



Universitatea
Transilvania
din Brașov

TEZĂ DE ABILITARE

De la Radio Cognitiv la Calitatea Experienței:
Reconfigurabilitate și Convergență în Telecomunicații

Domeniul: Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale

Autor: Conf. Dr. Ing. Vlad POPESCU

Universitatea Transilvania - Brașov

BRAȘOV, 2026

Mulțumiri

Pe parcursul celor aproape două decenii trecute de la finalizarea doctoratului, traiectoria profesională și cea personală nu a fost una dintre cele mai ușoare. Din fericire, chiar și într-un domeniu aparent anost precum cercetarea științifică, există bucurii și există și persoane care le fac posibile, fie direct, fie indirect.

Doresc să le mulțumesc colegilor și studenților din Universitatea Transilvania și în mod special domnilor profesori Florin Sandu și Titus Bălan pentru imboldul dat pentru finalizarea acestei teze de abilitare. De asemenea doresc să îi mulțumesc domnului profesor Maurizio Murroni de la Universitatea din Cagliari, alături de care am parcurs practic toate etapele dezvoltării mele academice.

Orice reușită cere timp îndelungat de lucru și un suport continuu din partea celor dragi, drept urmare doresc să mulțumesc familiei mele pentru suportul și înțelegerea oferită și mai ales pentru răbdarea de care a dat dovadă de-a lungul ultimilor ani.

Cuprins

A. SUMMARY	1
B. Realizări științifice și profesionale	5
1. De la Cognitive Radio la Software-Defined-Radio prin TV White Spaces și liberalizarea spectrului.....	7
1.1. Radio Cognitiv	8
1.2. Funcționalități principale CR:.....	9
1.2.1 Arhitectura CR	10
1.2.2 Aplicații CR	10
1.2.3 Cadrul legislativ și standardizare:.....	11
1.3. Spectrum Sensing.....	11
1.3.1 Principii și cerințe	11
1.3.2 Tehnici de spectrum sensing	12
1.3.3 Sensing Cooperativ și Distribuit	13
1.3.4 Parametri spectrum sensing și factori externi	14
1.3.5 Metrici de Performanță	14
1.4. Liberalizarea spectrului.....	14
1.4.1. Motive pentru liberalizarea spectrului	15
1.4.2. Mecanisme și principii.....	15
1.4.3. Rolul TV White Spaces (TVWS)	16
1.4.4. Geo-Location Databases în sistemele TV White Spaces.....	18
1.4.5. Cadre reglatoare și coordonare internațională	20
1.4.6 Standarde de comunicație	20
1.4.7 Impact și Dezvoltări Viitoare.....	20
1.5. Software Defined Radio.....	21
1.5.1. Concept și arhitectură	21
1.5.2. SDR în Cognitive Radio și Sistemele TVWS.....	22
1.5.3. Platforme Hardware SDR	23
1.5.6. Perspective și direcții viitoare de cercetare.....	24
1.6. Contribuții personale.....	26
1.6.1. Domeniile CR - SDR - TVWS	26
1.6.2. Domeniul interferențelor co-canal și măsurători în benzile UHF.....	28
1.7. Sumar Capitol 1	31
Bibliografie Capitolul 1	33

2. De la SDR la IoT și până la aplicații Smart Home și HbbTV	35
2.1 SDR pentru IoT și comunicații prin satelit	36
2.1.1 SDR pentru IoT	36
2.1.2 Reconfigurabilitate SDR pentru IoT	37
2.1.3 SDR pentru comunicații prin satelit.....	38
2.1.4 Componenta software și era spațială 2.0.....	39
2.1.5 Procesarea de tip edge și integrarea SDR	40
2.1.6 Considerente de securitate	41
2.1.7 Aplicații și studii de caz.....	41
2.2 IoT pentru aplicații Smart Home	42
2.2.1. Tehnologii și arhitecturi de comunicație SH	43
2.2.2. Gateway-uri și cadre de interoperabilitate	44
2.2.3. Interpretarea datelor în cadrul conceptului SH	44
2.2.4 Securitate, confidențialitate și managementul încrederii	45
2.2.5 Direcții viitoare și oportunități de cercetare.....	47
2.3 Televiziunea în bandă largă și aplicații HbbTV în SH	47
2.3.1 Evoluția difuzării către platforme hibride.....	48
2.3.2 Calitatea experienței (QoE) în broadcasting și media multisenzorială	49
2.3.3 Aplicații de broadcasting, broadband imersiv și multisenzorial.....	52
2.3.4 Perspective viitoare ale televiziunii broadband și HbbTV	53
2.4 Contribuții personale.....	53
2.4.1 Aplicații SDR IoT/satelit	54
2.4.2 Aplicații IoT – Smart Home - HbbTV	56
2.4.3 Aplicații IoT – media multisenzorială	59
1.8. Sumar Capitol 2	62
Bibliografie Capitolul 2	63
3. De la Smart Home la Smart Cities prin tehnologiile 5G/6G.....	65
3.1 De la IoT la SIoT către aplicații pentru Smart Cities.....	66
3.1.1 IoT ca fundație tehnologică a orașelor inteligente.....	66
3.1.2 Social Internet of Things - SIoT	67
3.1.3 Aplicații IoT și SIoT în scenarii de orașe inteligente	69
3.1.4. Provocări și direcții viitoare.....	70
3.2 Rolul 5G în ecosistemele Smart Cities actuale.....	72
3.3 Smart Cities și 6G	72
3.3.1 Parametri comparativi 5G vs. 6G pentru aplicații Smart Cities.....	73

3.3.2. Fundamentele conceptuale ale 6G pentru Smart Cities	73
3.3.3. Aplicații 6G în orașele inteligente	74
3.3.4. Digital Twins urbane — definiție, arhitectură și exemple	75
3.3.5. Rețele Non-Terestre (NTN) în arhitectura 6G pentru Smart Cities	76
3.3.6. Provocări și perspective viitoare	77
3.4 Securitatea cibernetică în contextul IoT, Smart Cities și 6G	78
3.4.1. Amenințări existente	78
3.4.2. Încredere, confidențialitate și riscuri etice	79
3.4.3. Soluții de securitate	80
3.4.4. Cadre legale europene pentru guvernanța datelor urbane	82
3.4.5. Direcții viitoare: securitate cibernetică în era 6G	83
3.5 Contribuții personale	83
3.5.1. IoT, SIoT și Smart Cities	83
3.5.2. 5G și tranziția spre 6G	85
3.6 Sumar Capitol 3	87
Bibliografie Capitolul 3	88
4. De la 5G/6G la Realitate Extinsă Hibridă.....	90
4.1 Media multisenzorială pentru XR și Hybrid XR	91
4.1.1. De la multimedia la mulsemmedia și la aplicații XR.....	91
4.1.2 XR și muzica live.....	92
4.1.3. Protocoale de comunicație și considerații de latență pentru sisteme XR.....	94
4.1.4. Arhitecturi și standarde	96
4.2 Evaluarea QoE pentru sisteme XR	99
4.2.1. QoE pentru aplicații de tip XR.....	101
4.2.2. Cybersickness: definiție, cauze și cuantificare	101
4.2.3 QoE în contextul concertelor hibride și mulsemmedia XR	102
4.3 Contribuții personale.....	103
4.3.1. Aplicații audio/video pentru concerte și spectacole XR.....	103
4.3.2. Sisteme bidirecțional de interacțiune live în medii XR	108
4.4 Sumar Capitol 4	111
Bibliografie Capitolul 4	112
5. Concluzii	115
C. Planul de Dezvoltare a Carierei.....	117

A. SUMMARY

This habilitation thesis summarizes the research activity of the author over the past 20 years, describing the main scientific achievements obtained in the field, throughout 4 chapters illustrating the evolution of the author's experience during the university activity after the PhD graduation. Each chapter ends with the results obtained by the author in the specific research field.

The four chapters of this thesis trace a coherent and progressive scientific journey: starting from the theoretical foundations of Cognitive Radio and the practical challenges of spectrum management, the work evolves systematically through Software-Defined Radio platforms, Internet of Things ecosystems, Smart Home and HbbTV applications, Smart Cities and 6G communications, culminating in the frontier domain of Extended XR Reality and multisensory immersive media. This progression reflects not merely a chronological sequence of research topics, but a deeply integrated scientific vision: wireless communications, pervasive connectivity, urban intelligence and user-centred immersive experience are all facets of the same profound technological transformation that has characterised recent years.

The common thread connecting all four chapters is the principle of reconfigurability — from hardware-level spectral agility in SDR, through protocol-level adaptability in IoT gateways, to network-level programmability in 5G/6G architectures, and finally to experience-level personalisation in multisensory XR systems.

Chapter 1 — From Cognitive Radio to SDR: Dynamic Spectrum Management

The first chapter of the thesis focuses on the fundamental problem of spectral efficiency in wireless communications, addressed through the Cognitive Radio (CR) paradigm and its practical implementations on Software-Defined Radio (SDR) platforms. The primary motivation is the chronic inefficiency in spectrum utilisation: initial studies showing that between 15% and 85% of allocated spectrum remains unused at any given moment, justifying the need for dynamic and opportunistic spectrum access.

The chapter analyses in depth the spectrum sensing techniques, including energy detection, cyclostationary feature detection and wavelet-based techniques for spectrum occupancy identification, and presents CR system architectures, with emphasis on the cognitive cycle (observe, orient, plan, decide, act) and primary user protection mechanisms. Particular attention is given to TV White Spaces (TVWS) as the first large-scale application of CR, including FCC/Ofcom regulations and the IEEE 802.22 standard for rural broadband networks.

Personal Contributions — Chapter 1

- Development of a wavelet-based spectrum sensing algorithm capable of identifying spectrum edges and detecting primary user signals (DVB-T2, LTE) with high sensitivity at low SNR, validated on a SDR platform.
- Design and implementation of systems for dynamic spectrum access management, integrating exponential backoff mechanisms and adaptive primary user protection.

- Field measurement campaigns for spectrum occupancy characterisation in indoor environments (university buildings, offices), providing empirical data for calibrating propagation models used in CR systems.
- Technical reports on the protection of DVB-T2 and IEEE 802.22 signals against interference generated by secondary users, with experimentally validated protection margin proposals.
- Analysis of interference generated by 802.11p (vehicular) systems in adjacent bands and evaluation of the impact on co-located CR systems, with mitigation technique proposals.

Chapter 2 — From SDR to IoT, Smart Home and HbbTV: Connected Platforms and Quality of Experience

The second chapter illustrates the transition from reconfigurable SDR platforms to Internet of Things ecosystems and intelligent multimedia applications. The chapter demonstrates how the reconfigurability principle from CR transfers to protocol and service level in IoT architectures, generating new connectivity paradigms for the residential environment and media content distribution.

IoRT (Internet of Remote Things) gateway architectures with satellite connectivity for areas without terrestrial coverage are analysed, along with multi-rate modulation techniques for LMS (Land Mobile Satellite) channels, D2D (Device-to-Device) feedback mechanisms for radio resource optimisation, and QoE assessment models for mulsemmedia systems in the Smart Home environment. An extended section is dedicated to the HbbTV (Hybrid Broadcast Broadband TV) platform and implicit QoE assessment methods through eye gaze and facial expression analysis.

Personal Contributions — Chapter 2

- Design of an IoRT gateway with satellite connectivity for IoT extension in rural and isolated areas, integrating MQTT and CoAP protocols with adaptation to satellite channel characteristics (latency, bit error).
- Implementation of a D2D feedback mechanism for reducing signalling overhead in dense cellular networks, with experimental evaluation of the spectral efficiency gain.
- Construction of a QoE model for mulsemmedia TV systems in the Smart Home environment, based on a PSO (Particle Swarm Optimization) algorithm for calibrating the contribution weights of each sensory modality to globally perceived quality.
- QoE assessment for HbbTV systems through eye gaze and facial expression analysis as implicit predictors of user engagement and satisfaction — an original contribution to the non-intrusive QoE assessment methodology.

Chapter 3 — From Smart Home to Smart Cities and 6G: Distributed Architectures and Next-Generation Connectivity

The third chapter extends the perspective from the residential to the urban level, analysing the convergence between the Social Internet of Things (SIoT) paradigm, Smart Cities infrastructures and next-generation communication technologies (5G/6G). The chapter demonstrates how the lessons learned in designing residential IoT systems scale to the urban

level, generating distributed architectures capable of orchestrating thousands of heterogeneous devices in complex public spaces.

The following topics are treated in detail: SIoT interaction models (object-to-object relationships based on ownership, co-location, co-mobility and social proximity), 5G SA network architectures with URLLC and mMTC profiles for Smart City applications, 5G vs. 6G comparisons in terms of latency, connection density and energy efficiency, Non-Terrestrial Network (NTN/LEO) technologies for ubiquitous connectivity, and urban data governance frameworks (GDPR, European data framework).

Personal Contributions — Chapter 3

- Design and implementation of an IoT system for smart tourism (2017), integrating environmental sensors, localisation and cultural information into a mobile platform for visitors.
- Publication of a reference article in IEEE Access (2020) on SIoT-based tourist services, proposing an object-to-object interaction model for adaptive cultural guidance, cited in the international literature.
- Preparation of a comprehensive survey (Sensors, 2023) on 6G architectures for Smart Cities, comparatively analysing candidate technologies (Terahertz, RIS, AI-native networking) and the specific requirements of urban applications (traffic, energy, public health).

Chapter 4 — From 5G/6G to Hybrid Extended Reality: Immersive, Multisensory and Distributed Media

The final chapter of the thesis marks the convergence of all previous research threads into a frontier domain: Hybrid Extended Reality (Hybrid XR). While the first three chapters progressively built the technological infrastructure — agile spectrum access, IoT connectivity, urban intelligence — the fourth chapter places the user at the centre of the system, exploring how these technologies converge to create immersive, multisensory and geographically distributed experiences.

The chapter analyses the evolution from multimedia to mulsemedia (MPEG-V standard, 2008), the role of 5G SA networks with URLLC profile in reducing end-to-end latency below the critical 30 ms threshold for Networked Music Performance (NMP) applications, the communication protocol ecosystem (MQTT, CoAP, WebRTC, RTP/SRTP, WebSocket, QUIC/MoQ) with comparative analysis of latency–reliability trade-offs, and compression standards for volumetric content (V3C, V-PCC, G-PCC, MIV, VVC, MPEG-DASH). An extensive taxonomy of QoE assessment methods for XR systems covers subjective, objective, hybrid and implicit methods, with dedicated discussion of cybersickness and co-presence.

The personal contributions are developed within the European Horizon EU HEAT — Hybrid Extended Reality project (2024–2027), coordinated together with partners from universities and research institutes in Cagliari, Dublin and Barcelona.

Personal Contributions — Chapter 4

- Publication of the HEAT project positioning paper: “Toward Interactive and Distributed Hybrid Extended Reality Experiences”, defining the conceptual framework of distributed and interactive XR architectures.
- Design of a real-time audio-video streaming architecture with bidirectional audience feedback, based on WebRTC, Unity 3D and spatial audio, with experimental evaluation of round-trip latencies and jitter for audio codecs.
- Development of a multisensory olfactory synchronisation system with audio content for remote spectators of a distributed live concert, using automatic speech recognition (Vosk ASR) and MQTT communication for real-time triggering of scent and wind effects.
- Design of the EmoLoop architecture — a bidirectional affective interaction system between audience and performers, fusing multimodal biosignals into a deep learning-based emotion recognition pipeline, translating audience affective states into live stagecraft control parameters in real time (awarded Best Poster at IEEE IS2 2025 conference).
- Contributions to QoE assessment for HbbTV systems through eye gaze and facial expression analysis, which underpin the implicit assessment methodology subsequently applied in XR scenarios.

General Conclusions

The thesis presents a coherent and progressive academic research activity conducted over nearly two decades. Starting from the problem of spectral efficiency in wireless communications — addressed through Cognitive Radio techniques and SDR platforms — the research evolved systematically towards IoT ecosystems and intelligent multimedia applications, escalated to the urban level through SIoT and Smart Cities paradigms, and ultimately converged towards the frontier domain of Hybrid Extended Reality and multisensory immersive media.

The author’s main original contributions cover: wavelet-based spectrum sensing algorithms; PSO-validated QoE models for mulsemmedia systems; SIoT architectures for smart tourism; reference surveys on 6G and Smart Cities; XR concert architectures with real-time audio-video streaming and bidirectional feedback; multisensory olfactory synchronisation systems via ASR; and the EmoLoop architecture for affective interaction in live performance environments. These contributions are materialised in over 30 publications in prestigious international journals and conferences, in Horizon EU European and national projects.

The natural directions for the evolution of the research activity target: (i) the integration of AI-native networking (6G) with real-time multisensory orchestration for XR platforms scalable to large audiences; (ii) the development of QoE-aware adaptive streaming systems, using physiological feedback (eye gaze, EDA, HRV) as real-time control signals for mulsemmedia personalisation; and (iii) the standardisation of open control interfaces for sensory IoT devices in XR environments, building on the W3C WoT and MPEG-V foundations towards a unified Hybrid XR platform architecture.

B. Realizări științifice și profesionale

Comunicațiile wireless și media imersivă reprezintă astăzi componente constitutive ale unui spectru larg de sisteme electronice și informatice moderne, cu aplicabilitate transversală în sectoare diverse — de la entertainment și artele spectacolului, la sănătate și telemedicină, educație la distanță, transport inteligent și patrimoniu cultural. Convergența dintre managementul dinamic al spectrului radio, conectivitatea pervasivă prin Internet of Things, inteligența urbană și experiența imersivă multisenzorială nu mai reprezintă o viziune de perspectivă, ci o realitate tehnologică în curs de consolidare, reflectată explicit în programele-cadru de cercetare și inovare ale Uniunii Europene, în politicile de implementare 5G/6G și în strategiile naționale și europene de digitalizare. La intersecția acestor domenii se află o provocare fundamentală, recurentă de-a lungul ultimelor două decenii de evoluție tehnologică: cum poate un sistem de comunicații sau de procesare media să se adapteze dinamic la context, la resurse disponibile și la nevoile utilizatorului, menținând în același timp cerințele de latență, fiabilitate și securitate impuse de aplicațiile moderne? Răspunsul la această întrebare — formulat prin paradigme succesive precum Cognitive Radio, Software-Defined Radio, IoT, Smart Cities și, în cele din urmă, Hybrid Extended Reality — constituie firul conducător al activității de cercetare prezentate în continuare.

În cadrul acestei teze de abilitare sunt prezentate rezultatele activităților de cercetare ale autorului desfășurate de-a lungul carierei profesionale, cu precădere cele obținute după finalizarea tezei de doctorat, structurate în patru capitole care ilustrează evoluția unui parcurs de cercetare coerent și progresiv, desfășurat pe parcursul a aproape două decenii de activitate universitară. Firul conducător al acestui parcurs este principiul reconfigurabilității — de la agilitatea spectrală la nivel hardware în platformele Software-Defined Radio, prin adaptabilitatea la nivel de protocol în arhitecturile IoT, la programabilitatea la nivel de rețea în infrastructurile 5G/6G, și în final la personalizarea la nivel de experiență în sistemele de Realitate Extinsă Hibridă multisenzorială.

Punctul de plecare al acestui parcurs îl constituie problema fundamentală a eficienței spectrale în comunicațiile wireless, abordată prin paradigma Radioului Cognitiv și motivată de ineficiența cronică în utilizarea spectrului de frecvențe conform studiilor de referință ale organismului FCC. Această realitate a justificat necesitatea unor mecanisme de acces dinamic și oportunist la spectru, concretizate în tehnici de spectrum sensing validate experimental pe platforme SDR și în campanii de măsurători de teren în medii indoor și outdoor, furnizând totodată date empirice relevante pentru calibrarea modelelor de propagare utilizate în sistemele cognitive. Protecția utilizatorilor primari față de interferențele generate de utilizatorii secundari și analiza interferențelor generate de sistemele vehiculare 802.11p în benzile adiacente completează tabloul contribuțiilor din această primă etapă.

Activitatea de cercetare a evoluat în mod organic spre ecosistemele Internet of Things și aplicațiile multimedia inteligente, demonstrând cum principiul reconfigurabilității se transferă de la nivelul fizic al radiocomunicațiilor la nivelul de protocol și serviciu al arhitecturilor distribuite. Această tranziție s-a materializat în proiectarea de gateway-uri pentru Internet of Remote Things cu conectivitate satelitară, destinate extensiei IoT în zone rurale și izolate prin integrarea protocolelor MQTT și CoAP cu adaptare la caracteristicile canalului satelitar, în

tehnici de modulație adaptive pentru canale LMS și în mecanisme de feedback D2D pentru optimizarea resurselor radio în rețelele celulare dense. Totodată, această perioadă a marcat intrarea activității de cercetare în domeniul evaluării calității experienței utilizatorului, prin construirea unui model QoE pentru sisteme mulsemmedia TV în mediul Smart Home, model validat printr-un studiu extensiv cu utilizatori și prin dezvoltarea unor metode implicite de evaluare QoE pentru platforme HbbTV.

Cercetările s-au extins ulterior în mod natural de la nivelul rezidențial la cel urban, prin analiza convergenței dintre paradigma Social Internet of Things, infrastructurile Smart Cities și tehnologiile de comunicație de generație viitoare 5G și 6G. Această etapă a generat arhitecturi distribuite capabile să orchestreze dispozitive heterogene în spații publice complexe, bazate pe modele de interacțiune SIoT, adică relații obiect-obiect fondate pe proprietate, co-localizare, co-mobilitate și proximitate socială. Această direcție a fost completată de o analiză comparativă aprofundată a arhitecturilor 5G SA cu profile URLLC și mMTC pentru aplicații Smart City, a tehnologiilor Non-Terrestrial Network și a cadrelor de guvernare a datelor urbane, sintetizată într-un survey comprehensiv publicat în 2023. Coordonarea proiectului Stargate-MIPS, finanțat de Agenția Spațială Română, a extins activitatea de cercetare și în domeniul satelitar, concretizată în realizarea unui gateway terestru pentru aplicații IoRT.

Cel de-al patrulea capitol al tezei plasează utilizatorul în centrul sistemului, explorând modul în care toate cunoștințele și tehnologiile acumulate în etapele anterioare, spectrul agil, conectivitatea IoT distribuită, inteligența urbană, converg pentru a crea experiențe imersive, multisenzoriale și distribuite geografic, în care latența, sincronizarea și calitatea experienței devin constrângeri de proiectare. Această convergență s-a materializat în contribuții concrete dezvoltate în cadrul proiectului european Horizon EU HEAT — Hybrid Extended Reality: o arhitectură de streaming audio-video în timp real cu feedback bidirecțional al publicului, bazată pe WebRTC, Unity 3D și audio spațial ambisonics de ordin superior; un sistem de sincronizare multisenzorială olfactivă cu conținut audio pentru spectatori remote ai unui concert live distribuit, utilizând recunoaștere automată a vorbirii și comunicație MQTT pentru declanșarea în timp real a efectelor senzoriale; și arhitectura EmoLoop — un sistem bidirecțional de interacțiune afectivă între public și performeri, care combină biosemnale multimodale într-un pipeline de recunoaștere emoțională bazat pe deep learning, traducând stările afective ale publicului în parametri de control ai scenotehnicii live în timp real, lucrare distinsă cu premiul Best Poster la conferința IEEE IS2 2025. Aceste contribuții sunt reflectate deopotrivă în activitatea didactică a autorului, prin coordonarea programului de licență Tehnologii și Sisteme de Telecomunicații, prin implicarea în programele de masterat Cybersecurity și Sisteme Electronice și de Comunicații Integrate, și prin colaborările active consolidate cu parteneri internaționali, colaborări care constituie totodată fundamentul viitoarelor direcții de cercetare doctorală propuse în cadrul acestei teze de abilitare.

1. De la Cognitive Radio la Software-Defined-Radio prin TV White Spaces și liberalizarea spectrului

Creșterea exponențială a utilizării tehnologiilor fără fir din ultimele două decenii a modificat fundamental modul în care spectrul este alocat, folosit și reglementat. Apariția smartphone-urilor, a conceptului și aplicațiilor Internet of Things (IoT) și a serviciilor mari consumatoare de date, precum transmisia video în înaltă definiție, conducerea autonomă și comunicațiile de tip mașină - mașină, toate au dus la o creștere a cererea de spectru radio cu mai multe ordine de mărime. În mod paradoxal, deși spectrul de frecvențe radio este considerat o resursă finită și extrem de valoroasă, studii extensive realizate pe întreg mapamondul au demonstrat în mod consecvent că porțiuni vaste ale spectrului rămân neutilizate sau doar parțial utilizate, în special din perspectiva temporală și geografică. Această discrepanță între utilizarea efectivă a spectrului și alocarea legală a expus limitări fundamentale în paradigma tradițională de gestiune a spectrului radio.

Din punct de vedere istoric, alocarea spectrului a fost guvernată de un model de licențiere rigid, partiționat vertical, în care benzile de frecvență specifice sunt atribuite static anumitor servicii sau operatori. Deși acest model asigură protecția împotriva interferențelor și simplifică gestionarea spectrului din punct de vedere administrativ, el introducea de asemenea un grad mare de ineficiență prin împiedicarea adaptării dinamice la fluctuațiile de trafic sau la distribuția spațială a utilizatorilor. De exemplu, benzile de frecvență alocate transmisiilor de televiziune rămân în mare parte nefolosite în multe regiuni rurale, în timp ce zonele urbane suferă frecvent de congestionarea spectrului în benzile nelicențiate de tip ISM.

Această ineficiență de lungă durată, pe fondul dezvoltării unui ecosistem wireless din ce în ce mai dinamic și eterogen, a catalizat apariția unui nou cadru conceptual: radioul cognitiv - cognitive radio (CR). Conceptualizat de Joseph Mitola III [1] la începutul anilor 2000, CR a reprezentat o viziune pentru sistemele wireless inteligente capabile să detecteze, să învețe și să se adapteze la mediul lor radio. În loc să ocupe static o bandă de spectru fixă, radiourile cognitive sunt proiectate să monitorizeze activitatea spectrală, să identifice frecvențele inactive (găuri de spectru sau white spaces) și să le acceseze în mod oportunist fără a cauza interferențe

dăunătoare utilizatorilor principali, posesori de licență. Noua paradigmă promitea să maximizeze eficiența spectrală prin strategii de comunicare inteligente și adaptate la context.

Viziunea CR s-a aliniat din punct de vedere temporal cu tendințe tehnologice mai largi, incluzând convergența platformelor de comunicație (radio și nu numai) de tip software - defined, inteligența artificială și hardware-ul reconfigurabil. În timp ce fundamentele teoretice ale CR sunt profund înrădăcinate în procesarea semnalelor, teoria informației și proiectarea protocoalelor wireless, realizarea lor practică a fost facilitată de apariția conceptului și a dispozitivelor de tip *Radio Definited Software - Software Defined Radio* (SDR). SDR oferă stratul esențial de abstractizare hardware care permite radiourilor să reconfigureze flexibil frecvența, modulația, lățimea de bandă și schemele de codificare în timp real, sub controlul software-ului.

Acest capitol începe cu o explorare aprofundată a conceptului CR ca și paradigmă fundamentală pentru accesul dinamic la spectru și urmărește tranziția de la teoria CR la inovația în domeniile regulatorii - în special, liberalizarea spectrului - și examinează în continuare rolul spațiilor albe din spectrul TV - TV White Spaces (TVWS) ca și caz de utilizare practic și orientat către politici de alocare spectrală. În final, prezintă conceptul SDR ca elementul tehnologic cheie care leagă principiile teoretice de sistemele operaționale. Toate aceste elemente formează o descriere coerentă a evoluției de la utilizarea statică a spectrului la comunicarea adaptivă, inteligentă și eficientă prezentă în toate sistemele wireless moderne.

1.1. Radio Cognitiv

Conceptul de radio cognitiv (Cognitive Radio - CR) reprezintă o viziune transformatoare în comunicațiile wireless, propunând o îndepărtare de la gestionarea rigidă, centralizată a spectrului către utilizarea inteligentă, descentralizată și adaptivă a resurselor radio. Introdus inițial de Joseph Mitola III și Gerald Q. Maguire la începutul anilor 2000 [1], radioul cognitiv are ca și principiu central capacitatea de a detecta mediul său operațional, de a analiza spectrul disponibil și de a-și reconfigura parametrii de transmisie în timp real pentru a optimiza comunicarea fără a cauza interferențe utilizatorilor licențiați (primary users - PU) [1],[2].

Motivațiile CR sunt înrădăcinate în ineficiențele alocării statice de spectru. Numeroase studii, incluzând cele conduse de Federal Communications Commission (FCC) [3], International Telecommunications Union (ITU) [9] și OFCOM [12], au relevat faptul că segmente mari ale spectrului radio licențiat rămân sub-utilizate atât în dimensiunea temporală, cât și în cea spațială. De exemplu, măsurătorile în zonele urbane, suburbane și rurale au arătat în mod consecvent că utilizarea spectrului în banda FIF este de doar 10-20% în multe scenarii. Această subutilizare este deosebit de evidentă în benzile de folosite pentru transmisia semnalului de televiziune, unde canalele sunt alocate dar rămân neocupate din cauza acoperirii doar locale sau regionale [3].

Radiourile cognitive au ca scop atenuarea acestei ineficiențe prin accesul dinamic la spectru (Dynamic Spectrum Access - DSA), unde utilizatorii secundari nelicențiați (secondary users – SU) exploatează în mod oportunist segmentele de spectru neutilizate (white spaces) asigurându-se în același timp că nu interferează cu utilizatorii primari. Acest comportament dinamic este guvernat de un set de funcționalități centrale care definesc ciclul cognitiv: observația, orientarea, planificarea, decizia și acțiunea, adesea îmbunătățite prin mecanisme de învățare (figura 1.1). Fiecare dintre aceste etape contribuie la capacitatea CR de a se adapta inteligent la mediu.

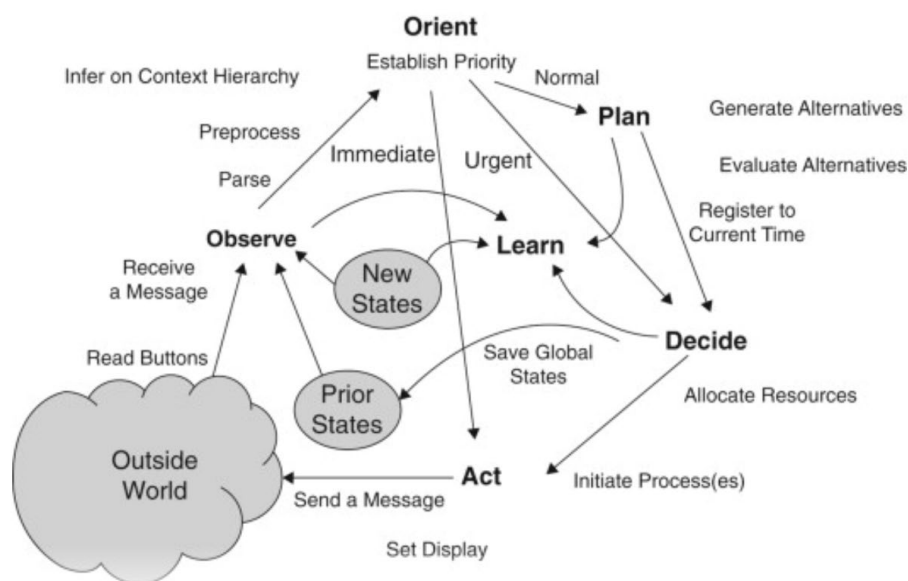


Fig. 1.1 Ciclul cognitiv – adaptarea CR la mediul radio înconjurător [1]

1.2. Funcționalități principale CR:

- **Detectția spectrului - Spectrum Sensing:** un radio cognitiv trebuie să monitorizeze continuu mediul radio pentru a detecta prezența sau absența utilizatorilor primari. Aceasta implică tehnici sofisticate de procesare a semnalului capabile să opereze în condiții de raport semnal-zgomot (SNR) scăzut și în prezența fading-ului și shadowing-ului [2]. Tehnici precum energy detection, matched filtering și cyclostationary feature detection [2] sunt utilizate în mod obișnuit.
- **Gestiunea spectrului:** După identificarea spațiilor spectrale neutilizate, CR evaluează cât de adecvate sunt ele pe baza unei game de criterii, incluzând calitatea canalului, durata disponibilității, nivelurile de interferență și cerințele utilizatorului. Aceasta duce la construirea unei politici de utilizare a spectrului adaptată condițiilor curente.
- **Mobilitatea Spectrului:** CR trebuie să fie capabile să evacueze porțiunea de spectru odată ce se detectează reparația unui utilizator primar și să treacă fără întreruperi la o altă bandă liberă fără întreruperea serviciului. Aceasta necesită mecanisme robuste de hand-off și modele predictive pentru comportamentul utilizatorului primar.
- **Spectrum Sharing:** În medii cu utilizatori secundari multipli, coordonarea este critică pentru a evita interferența reciprocă. Mecanismele de tip spectrum sharing variază de la protocoale bazate pe conținut la modele cooperative [2] și de teorie a jocurilor [2] care asigură alocarea echitabilă și eficientă.
- CR poate opera în arhitecturi atât centralizate, cât și distribuite. În modelele centralizate, un coordonator colectează datele spectrum sensing de la noduri multiple și ia decizii în ceea ce privește disponibilitatea de spectru [2]. În modelele distribuite, fiecare nod CR efectuează independent operațiunea de sensing și luarea deciziilor, folosind adesea protocoale cooperative pentru a atenua problema cunoscută sub numele de hidden node [2] și pentru a îmbunătăți acuratețea detectării.

1.2.1 Arhitectura CR

Un sistem CR constă de obicei din mai multe componente modulare, așa cum este specificat și în figura 1.2:

- **Front-End RF:** parte hardware capabilă să se acordeze pe o gamă largă de frecvențe, cu mecanisme de operare multi-bandă cu comutare rapidă.
- **Unitate de Procesare a Semnalului:** implementează algoritmi de spectrum sensing, clasificare a semnalului și funcțiile de modulare/demodulare.
- **Motorul Cognitiv:** Nucleul inteligenței responsabil pentru analiza mediului, învățare, luarea deciziilor și aplicarea politicilor.

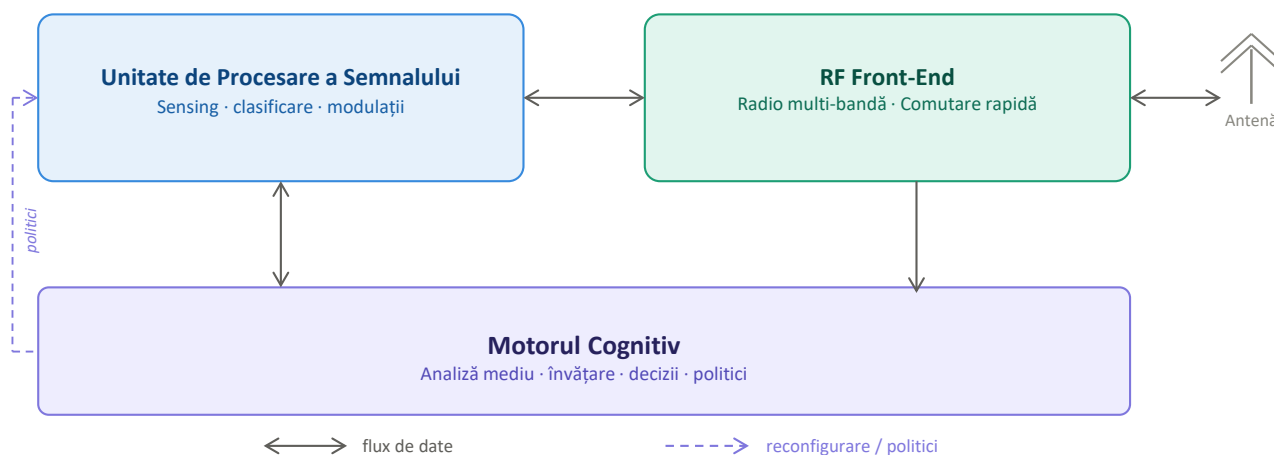


Fig. 1.2. Arhitectura generică a unui sistem CR [2]

1.2.2 Aplicații CR

Aplicabilitatea cognitive radio se extinde în domenii diverse:

- **Acces rural la banda largă:** prin utilizarea TV White Spaces (TVWS), dispozitivele CR permit implementarea eficientă din punct de vedere al costurilor a accesului la banda largă în zone neacoperite, valorificând caracteristicile favorabile de propagare ale frecvențelor FIF.
- **Rețele de siguranță publică:** CR facilitează interoperabilitatea și coordonarea dinamică a frecvențelor în rândul serviciilor de urgență, militare sau civile în timpul unor situații limită, atunci când disponibilitatea spectrului este incertă.
- **Comunicații vehiculare (VANETs):** CR oferă acces adaptiv la spectru pentru comunicarea de tip vehicle-to-vehicle (V2V) și vehicle-to-infrastructure (V2I), îmbunătățind fiabilitatea și eficiența canalului de comunicație.
- **Sisteme satelitare și aeronautice:** conceptele CR sunt explorate în aceste domenii pentru optimizarea utilizării spectrului în comunicațiile prin satelit, în special în constelațiile orbitale unde re folosirea spectrului radio este vitală.

1.2.3 Cadrul legislativ și standardizare:

Organele de reglementare au îmbrățișat din ce în ce mai mult paradigma CR, dezvoltând framework-uri care echilibrează inovația cu protecția utilizatorilor primari. FCC din SUA a adoptat reguli pentru utilizarea fără licență a TVWS bazate pe principiile CR, impunând însă ca dispozitivele să consulte baze de date de tip cu date despre ocupația spectrală (geo-location databases – GL-DBs) și să implementeze mecanisme spectrum sensing [3]. OFCOM din Marea Britanie și CEPT din Europa au urmat exemplul, cu eforturi coordonate pentru armonizarea politicilor spectrale [5].

Din punct de vedere al standardizării, standardul IEEE 802.22 reprezintă prima specificație bazată pe CR, vizând rețele de tip WRAN pentru zone rurale și îndepărtate. Standardul definește protocoalele pentru nivelele PHY și MAC din stiva ISO/OSI pentru dispozitivele CR care operează în TVWS, încorporând mecanisme pentru acces la GL-DBs, spectrum sensing, selecția dinamică a frecvențelor și reducerea interferențelor.

Alte inițiative de standardizare incipientă din domeniul CR sunt:

- **IEEE 1900.x (DySPAN):** O serie de standarde care abordează dynamic spectrum access și interoperabilitatea CR [4].
- **ETSI RRS (Reconfigurable Radio Systems):** Focalizat pe definirea framework-urilor pentru tehnologiile SDR și CR în contexte europene [5].
- **ITU-R Reports:** Susținând armonizarea globală și includerea conceptelor CR în strategiile de management al spectrului [9].

1.3. Spectrum Sensing

Spectrum sensing este o funcționalitate fundamentală în sistemele cognitive radio (CR), permițând accesul dinamic la spectru prin identificarea benzilor de spectru neutilizate – spațiile albe - fără a cauza interferențe dăunătoare utilizatorilor primari PUs. Capacitatea de a detecta cu acuratețe prezența sau absența PU într-o bandă de frecvență dată este fundamentală pentru asigurarea fiabilității, legalității și eficienței utilizării secundare a spectrului.

În paradigma CR, utilizatorii secundari (SUs) sunt obligați să evacueze canalul imediat la reparația unui PU. Prin urmare, procesul de spectrum sensing trebuie să fie atât precis, cât și rapid, ceea ce implică numeroase provocări tehnice în scenariile reale, în special în condiții de raport semnal-zgomot scăzut, multipath fading, shadowing și mobilitate.

1.3.1 Principii și cerințe

Obiectivul principal al spectrum sensing este să determine statutul de ocupare spectrală la un moment și locație date, mai specific, determinarea dacă o bandă de frecvență specifică este folosită de către un PU și, dacă nu, dacă banda poate fi exploatată în mod oportunistic de către un SU.

Cerințele cheie pentru spectrum sensing eficient includ:

- **sensibilitate ridicată:** pentru detectarea semnalelor PU slabe, în special în medii îndepărtate sau obstrucționate;
- **rată scăzută de detecții false:** Pentru a evita subutilizarea spectrului disponibil din cauza sensing-ului excesiv de conservator;
- **performanță în timp real:** Pentru a susține accesul dinamic la spectru cu întârziere minimă;
- **robustețe:** Pentru a face față situațiilor cu mult zgomot radio, shadowing și fading;
- **scalabilitate:** Pentru a opera pe benzi largi de frecvență, în special în scenarii de tip wideband sau multiband.

Aceste criterii de performanță sunt critice mai ales pentru operarea în benzile de tip TVWS, unde protecția serviciilor analogice și digitale de televiziune (precum DVB-T și DVB-T2 în Europa, ATSC în SUA) este impusă de către autoritățile competente.

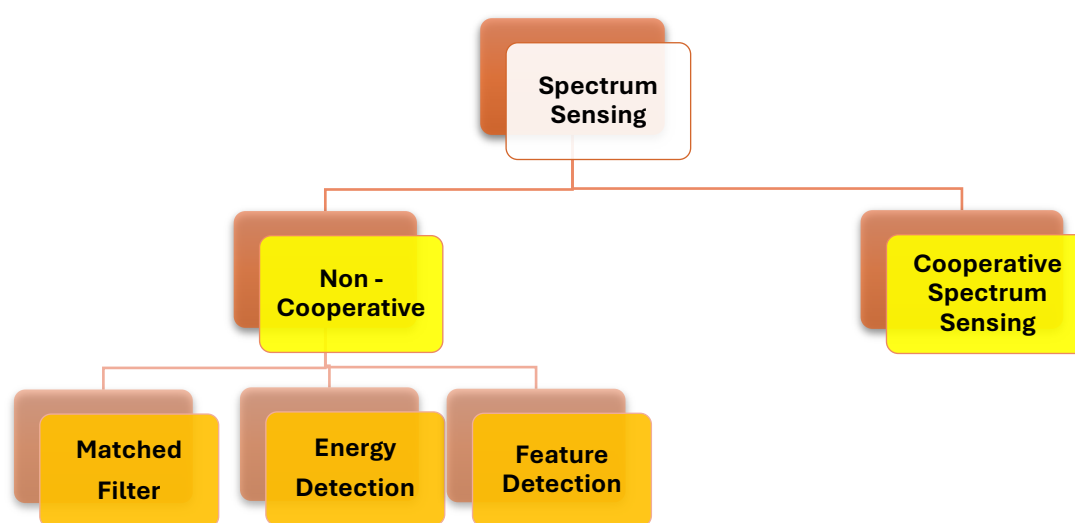


Fig. 1.3. Tehnici de spectrum sensing

1.3.2 Tehnici de spectrum sensing

O varietate largă de tehnici de spectrum sensing au fost dezvoltate, fiecare cu propriile compromisuri în complexitate, performanță și cunoștințele necesare despre semnalele PU.

- **Energy Detection (ED):** Aceasta este tehnica cea mai utilizată din cauza simplității sale și cerințelor minime pentru cunoștințe prealabile despre semnalul PU. Intensitatea semnalului radio recepționat este comparată cu un prag; dacă semnalul RF depășește pragul, banda este presupusă ocupată. Cu toate acestea, ED suferă în medii cu raport semnal-zgomot (SNR) scăzut și este foarte sensibilă la incertitudinea generată de prezența zgomotului RF [2].
- **Matched Filtering:** Această metodă optimală maximizează probabilitatea de detectare, presupunând însă cunoașterea perfectă a caracteristicilor semnalului PU (de ex., modulația, structura cadrului, etc.). Deși optimală, această metodă este adesea greu de implementat în practică din cauza indisponibilității unor informații atât de detaliate în majoritatea scenariilor [2].

- **Cyclostationary Feature Detection:** Această tehnică exploatează periodicitățile în semnalele modulate pentru a le diferenția de zgomot, care este de obicei staționar din punct de vedere statistic. Detectoarele de tip cyclostationary sunt mai robuste la zgomot și pot funcționa și în condiții de SNR scăzut, dar sunt complexe computațional și necesită perioade de observație mai lungi ale spectrului radio [2].
- **Wavelet-Based Detection:** Wavelet packet decomposition (WPD) și transformări similare au fost utilizate pentru a analiza semnalele non-stationary pe mai multe scale. Acestea sunt deosebit de utile în spectrum sensing de bandă largă unde este necesară discriminarea sub-benzilor. A fost demonstrată eficacitatea Discrete Wavelet Packet Transform (DWPT) în recunoașterea semnalului DVB-T pe sub-benzi, crescând acuratețea detectării în contextul TVWS [6].

Figura 1.3 prezintă o privire de ansamblu asupra tehnicilor de spectrum sensing. Tehnicile non-cooperative au fost tratate în cadrul acestui paragraf, în vreme ce tehnicile bazate cooperative și distribuite vor fi tratate în paragrafele următoare.

1.3.3 Sensing Cooperativ și Distribuit

Una dintre principalele limitări ale operațiunilor de spectrum sensing realizate la nivel local este problema *hidden node*, care implică faptul că este posibil ca un utilizator secundar să nu detecteze un transmițător primar din cauza fenomenelor de tip shadowing sau fading, rezultând în potențiale interferențe (figura 1.4). Pentru a atenua acest lucru, sunt aplicate metode de sensing cooperativ care permit mai multor SUs să partajeze informații de sensing, crescând astfel fiabilitatea detectării.

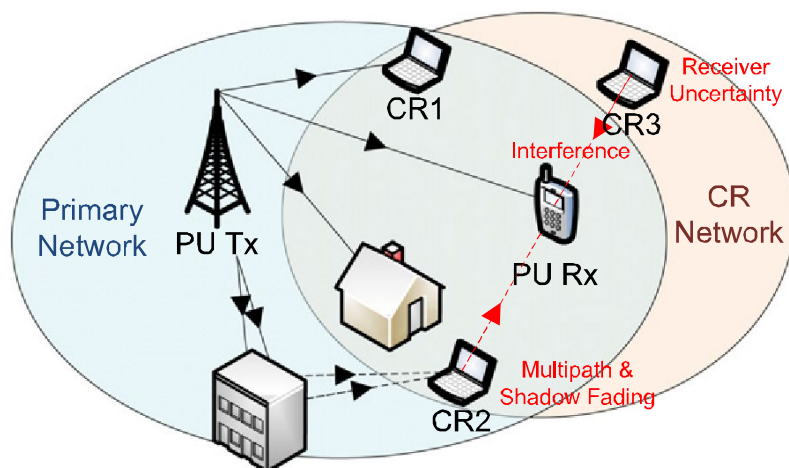


Fig. 1.4. Sensing cooperativ [13]

Metodele de spectrum sensing cooperativ poate fi împărțite în mai multe categorii:

- **Centralizat:** un centru de agregare adună datele de sensing și ia o decizie globală;
- **Distribuit:** utilizatorii SUs iau decizii local și partajează rezultatele pentru a rafina sensing-ul pentru iterațiile viitoare;
- **Relay-assisted:** anumite noduri acționează ca intermediari pentru a facilita procesul de sensing.

Studiile au arătat că metodele de cooperative sensing îmbunătățesc semnificativ performanța sensing-ului, în special în medii mobile și interioare. Cu toate acestea, cooperarea introduce și un overhead semnificativ de comunicare, latență și vulnerabilitate potențială la atacuri de modificare și chiar falsificare a datelor.

1.3.4 Parametri spectrum sensing și factori externi

O operațiune de spectrum sensing eficientă depinde de mai mulți parametri și factori externi:

- **timpul de sensing și rezoluția în frecvență:** rezoluția mai înaltă îmbunătățește acuratețea dar crește complexitatea și latența;
- **pragul de detecție:** Calibrarea adecvată este necesară pentru a echilibra între detecții false și ratate [2];
- **lărgimea de bandă analizată:** studiile au relevat că reducerea lărimii benzii (de ex., de la 8 MHz la 1 MHz sau 100 kHz) îmbunătățește granularitatea operațiunii de sensing cu implicații asupra complexității computaționale.
- **zgomotul RF de tip man-made:** mediile urbane prezintă zgomot de bază mai ridicat, care afectează determinarea pragului.
- **Hidden Node Margin (HNM):** Diferența dintre puterea primită estimată și actuală la un receptor trebuie modelată cu atenție pentru a evita interferența cu utilizatorii primari [10].

1.3.5 Metrici de Performanță

Eficiența unui algoritm de spectrum sensing este evaluată în general folosind următoarele metrici:

- **Probabilitatea de detecție (P_d):** Probabilitatea ca un PU să fie detectat corect;
- **Probabilitatea de alarmă falsă (P_{fa}):** Probabilitatea de a declara incorect prezența unui PU;
- **Probabilitatea de eșec în detecție (P_{ed}):** Probabilitatea de a eșua în detectarea unui PU prezent;
- **Timpul de sensing (T_s):** Timpul necesar pentru sensing-ul și analiza unei benzi de frecvență;

Organismele regulatorii impun adesea valori minime pentru P_d și maxime pentru P_{fa} pentru a garanta protecția utilizatorilor primari. De exemplu, FCC impune $P_d > 0,9$ pentru dispozitivele din benzile utilizate pentru transmisiile TV digitale.

1.4. Liberalizarea spectrului

Liberalizarea spectrului constituie o schimbare importantă în guvernarea resurselor de frecvență radio. Istoric vorbind, gestionarea spectrului a fost bazată pe modele statice de alocare prin care autoritățile de reglementare atribuie benzi de frecvență exclusive operatorilor licențiați (utilizatori primari) pentru perioade lungi și servicii specifice. Deși acest model oferă

protecție utilizatorilor primari împotriva interferențelor, el s-a dovedit din ce în ce mai inefficient în fața cererii crescute de resurse spectrale datorită expansiunii sistemelor wireless.

Liberalizarea spectrului introduce flexibilitate în accesul și alocarea spectrului, folosind concepte precum utilizarea secundară, operarea de tip license-exempt, dynamic spectrum access (DSA) și comercializarea drepturilor de spectru. Aceste inovații de politică au avut ca și scop maximizarea eficienței spectrale, stimularea inovației și reducerea barierelor de intrare pentru noii furnizori de servicii.

1.4.1. Motive pentru liberalizarea spectrului

Numeroase studii empirice au descoperit faptul că spectrul licențiat este sub-utilizat. De exemplu, rapoartele Federal Communications Commission (FCC) au arătat că unele benzi de frecvență, deși alocate, rămân inactive pentru perioade lungi de timp în funcție de locație și ora din zi. De exemplu în benzile FIF folosite pentru transmisiile de televiziune, a fost înregistrată o utilizare de doar 10-20%.

Această utilizare inefficientă a unei resurse finite și valoroase a indus o mișcare amplă la nivel global pentru liberalizarea spectrului. Prin permiterea accesului utilizatorilor secundari la spectrul care altfel ar sta nefolosit, guvernele și organismele reglatoare pot debloca resurse și implicit capital - în special în zonele rurale și nedeservite unde implementările tradiționale sunt în general apanajul operatorilor publici.

1.4.2. Mecanisme și principii

Liberalizarea spectrului se bazează pe mai multe mecanisme:

- **Acces secundar (underlay și overlay):** utilizatorii secundari, (SUs) pot accesa spectrul cu condiția să nu interfereze cu utilizatorii primari (PUs). Sistemele underlay operează sub pragul de zgomot al PUs, în timp ce sistemele overlay folosesc operațiuni de sensing avansat sau coordonare.
- **Fără Licență:** dispozitivele operează în benzi predefinite (de ex., benzile ISM) fără a necesita licențe individuale, sub rezerva conformității la constrângerile tehnice precum limitele de putere și măștile pentru canalele adiacente.
- **Spectrum Trading:** utilizatorii licențiați pot transfera sau închiria drepturile lor de spectru altor entități, permițând o distribuția a spectrului mai eficientă.
- **Dynamic Spectrum Access (DSA):** Spectrul este accesat dinamic pe baza disponibilității și condițiilor în timp real, permis de tehnologiile cognitive radio și spectrum sensing.

Aceste mecanisme, ilustrate în figura 1.5, formează fundamentul unui ecosistem spectral mai agil, eficient și competitiv.

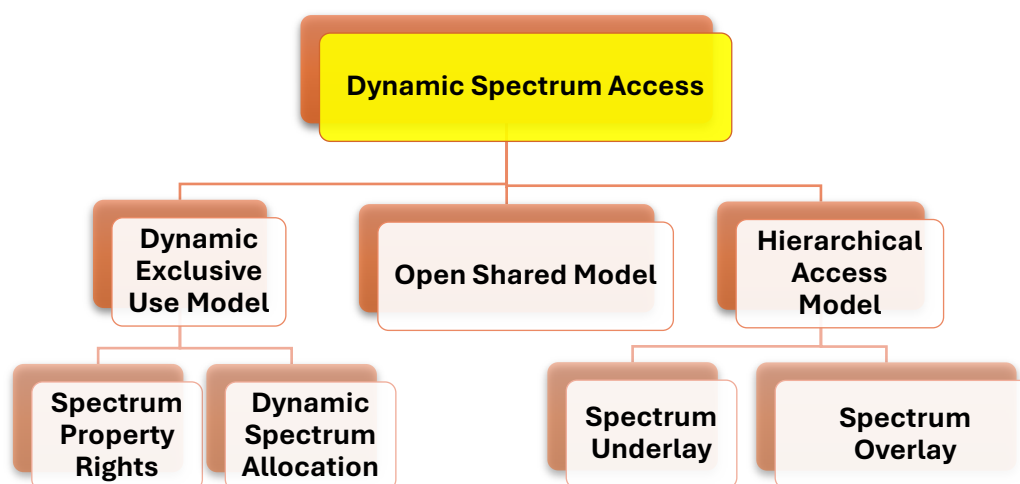


Fig. 1.5. – Accesul dinamic la spectru

1.4.3. Rolul TV White Spaces (TVWS)

Tranziția de la televiziunea terestră analogică la digitală (DTT) a creat oportunități substanțiale pentru liberalizarea spectrului radio. Sistemele digitale precum DVB-T și DVB-T2 sunt semnificativ mai eficiente spectral decât predecesorii lor analogici, utilizând tehnici avansate de compresie video (MPEG-4/H.264) și multiplexare OFDM, ceea ce a dus la eliberarea unui număr considerabil de canale neutilizate în benzile FIF (174–230 MHz) și UIF (470–790 MHz) – așa-numitele TV White Spaces (TVWS). TVWS sunt definite ca spații libere geografic și temporal în ocuparea spectrului în cadrul benzilor de difuziune, adică segmente de frecvență alocate serviciilor de televiziune dar care rămân nefolosite la o anumită locație și moment dat. Aceste spații apar din mai multe cauze structurale:

- **planificarea geografică a utilizărilor frecvențelor** – autoritățile de reglementare atribuie frecvențe diferite transmițătorilor vecini pentru a preveni interferența co-canal și pe canal adiacent, lăsând inevitabil porțiuni de spectru neutilizate în anumite zone geografice;
- **benzile de gardă rezervate între canalele adiacente** – separații spectrale impuse pentru a proteja canalele active de contaminarea reciprocă, în special relevante în planificarea DVB-T2 cu rețele cu frecvență unică (SFN);
- **implementarea neuniformă a transmițătoarelor raportat la densitatea de populație** – în zonele rurale și semi-urbane, numărul transmițătoarelor active este mult mai redus, lăsând o proporție semnificativ mai mare din spectrul alocat nefolosit;
- **tranziția în curs de la analogic la digital** – în țările aflate în proces de switch-off, o parte a benzii este temporar subutilizată pe durata perioadei de tranziție.

Studiile empirice realizate de FCC, Ofcom și CEPT au confirmat că, în funcție de locație, între 50% și 80% din spectrul UHF alocat televiziunii rămâne nefolosit la orice moment dat, ceea ce reprezintă o resursă spectrală considerabilă, în special în zonele cu densitate redusă de populație.

Politicile de liberalizare a spectrului în mai multe țări au permis utilizarea nelicențiată a TVWS sub regimuri stricte de protecție a interferențelor. În Statele Unite, FCC a adoptat reguli în 2008

care permit dispozitivelor nelicențiate să opereze în TVWS [3], impunând două mecanisme complementare de protecție: (i) accesul obligatoriu la baze de date de tip geo-location (GL-DB), care furnizează în timp real lista canalelor disponibile la o locație dată, și (ii) operațiuni de spectrum sensing pentru detectarea locală a utilizatorilor primari. Cadre legislative similare au fost dezvoltate de Ofcom (UK) [12], CEPT (Europa) [10] și organismele reglatoare din Canada (ISED), Singapore (IMDA) și Africa de Sud (ICASA), reflectând o tendință globală de armonizare a politicilor de acces secundar la spectru.

La nivel tehnic, exploatarea TVWS se realizează în principal prin două paradigme complementare. Prima, **sensing-based access**, presupune că dispozitivul CR detectează activ prezența sau absența utilizatorilor primari prin algoritmi de spectrum sensing (energy detection, cyclostationary feature detection, wavelet-based detection), luând decizia de acces în mod autonom. A doua, **database-driven access**, se bazează pe interogarea unor baze de date certificate (precum cele operate de Google, Microsoft sau Spectrum Bridge în SUA) care furnizează lista canalelor disponibile în funcție de coordonatele GPS ale dispozitivului, puterea de transmisie admisă și înălțimea antenei. Abordările hibride, care combină ambele mecanisme, oferă cel mai înalt nivel de fiabilitate și protecție.

Liberalizarea TVWS este deosebit de avantajoasă datorită caracteristicilor favorabile de propagare ale benzii UHF, care conferă sistemelor TVWS o serie de avantaje tehnice față de benzile nelicențiate convenționale (2,4 GHz, 5 GHz): rază de acoperire extinsă (până la 10–30 km în condiții optime), penetrare superioară în interiorul clădirilor și prin obstacole naturale (vegetație, relief), pierderi de propagare reduse și costuri de infrastructură semnificativ mai mici per unitate de suprafață acoperită. Aceste proprietăți fac din TVWS o soluție deosebit de potrivită pentru conectivitatea rurală, aplicațiile IoT de tip wide-area și sistemele de comunicații de tip public safety în scenarii de dezastru.

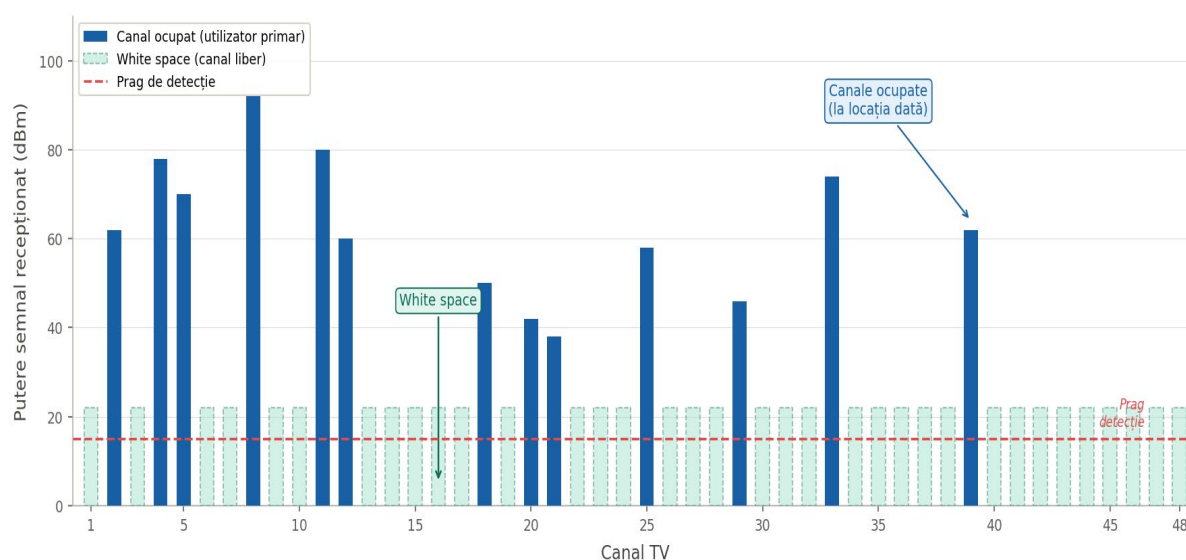


Fig. 1.6. TV White Spaces

1.4.4. Geo-Location Databases în sistemele TV White Spaces

Geo-location databases (GL-DB) reprezintă unul dintre cele mai importante mecanisme de management al accesului secundar la spectru în sistemele TV White Spaces, oferind o alternativă robustă și scalabilă față de spectrum sensing-ul exclusiv local. Conceptul GL-DB a fost introdus ca răspuns la limitările tehnice ale sensing-ului individual — în special problema *hidden node* și incertitudinea pragului de detecție — și se bazează pe principiul că un sistem centralizat, cu acces la date complete despre infrastructura de broadcasting, poate determina cu mai mare precizie canalele disponibile la o locație dată decât un dispozitiv individual. În esență, o GL-DB este un serviciu de interogare în timp real care, pe baza coordonatelor GPS ale unui dispozitiv TVWS, furnizează lista canalelor radio disponibile, puterea maximă de transmisie admisă și restricțiile tehnice aplicabile, în conformitate cu reglementările naționale în vigoare.

Arhitectura unui sistem GL-DB tipic implică mai multe componente funcționale interdependente. La nivelul de date, baza de date integrează informații despre amplasamentul, puterea de emisie, diagramele de radiație și parametrii tehnici ai tuturor transmițătoarelor TV licențiate din zona de acoperire, alături de date despre dispozitivele cu microfoane fără fir (wireless microphones) și alte categorii de utilizatori primari protejați. La nivelul de procesare, algoritmi de calcul al interferențelor determină, pentru fiecare locație geografică solicitată, care canale pot fi folosite fără a depăși pragurile de interferență admise la receptorii utilizatorilor primari. La nivelul de interfață, un API standardizat permite dispozitivelor TVWS — denumite *White Space Devices* (WSD) — să interogheze baza de date prin protocoale de tip HTTP/HTTPS, primind ca răspuns o listă de canale disponibile împreună cu parametrii tehnici asociați. Protocolul de comunicație dintre WSD și GL-DB a fost standardizat prin IEEE 1900.7 și prin specificațiile PAWS (*Protocol to Access White Space databases*), definite de IETF în RFC 7545. Un exemplu de sistem bazat pe GL-DB este ilustrat în figura 1.5.

Implementarea GL-DB variază semnificativ între jurisdicții, reflectând diferențele în arhitecturile regulatorii naționale. În Statele Unite, FCC a autorizat mai mulți operatori privați de GL-DB, printre care Google (prin serviciul *Spectrum Access System*), Microsoft (prin *White Space Database*), Spectrum Bridge și altele, care operează în conformitate cu regulile tehnice stabilite în *Part 15* a reglementărilor FCC. În Marea Britanie, Ofcom a adoptat un model similar, autorizând operatori precum Nominet și pe baza specificațiilor tehnice din *ETSI EN 301 598*. În Europa, CEPT a elaborat prin grupul de lucru SE43 un cadru armonizat pentru GL-DB, descris în rapoartele ECC 159 [10] și ECC 185, care definește cerințele minime pentru acuratețea bazelor de date, protocoalele de interogare și mecanismele de audit. Această diversitate de implementări a generat eforturi de interoperabilitate la nivel internațional, în special prin activitățile IEEE DySPAN și grupurile de lucru ITU-R [9].

Procesul de interogare a unei GL-DB urmează un flux bine definit, reglementat prin standarde tehnice. Un dispozitiv WSD care dorește să acceseze spectrul TVWS trebuie mai întâi să își determine coordonatele geografice cu precizie suficientă (tipic sub 50 m, folosind GPS sau alte metode de localizare), să se autentifice față de GL-DB folosind un identificator unic de dispozitiv (FCC ID în SUA, echivalent național în alte jurisdicții) și să transmită o cerere de tip *available spectrum query* conținând coordonatele, înălțimea antenei și tipul dispozitivului. GL-DB procesează cererea, calculează pentru fiecare canal din banda TVWS dacă operarea dispozitivului la locația specificată ar depăși pragurile de interferență la cel mai apropiat receptor protejat, și returnează lista canalelor disponibile împreună cu puterea maximă de transmisie admisă pe fiecare canal. Dispozitivul este obligat să reinterogheze GL-DB la intervale regulate (tipic la fiecare 24 de ore conform regulilor FCC, sau mai frecvent dacă se

deplasează) pentru a reflecta eventualele modificări în planificarea frecvențelor sau înregistrarea de noi utilizatori primari.

Limitele și provocările GL-DB sunt recunoscute atât în literatura academică, cât și de organismele de reglementare. O primă categorie de provocări este de natură tehnică: acuratețea calculului de interferență depinde critic de calitatea și actualizarea datelor despre infrastructura de broadcasting, iar erorile în modelele de propagare — în special în medii urbane cu reflexii multiple — pot duce la declararea incorectă a unor canale ca disponibile sau, dimpotrivă, la restricționarea nejustificată a accesului. O a doua categorie este de natură operațională: dispozitivele mobile care traversează rapid zone geografice diferite pot întâmpina latențe semnificative în procesul de reinterogare, afectând continuitatea serviciului. O a treia categorie privește securitatea și robustețea sistemului: dependența de un serviciu centralizat introduce un punct unic de eșec, iar atacurile de tip spoofing GPS sau compromiterea bazei de date pot duce la utilizarea neautorizată a spectrului cu interferențe asupra utilizatorilor primari. Aceste limitări au motivat cercetări active în direcția arhitecturilor distribuite de GL-DB, a integrării blockchain pentru auditabilitatea accesului la spectru și a utilizării tehnicilor de machine-learning pentru rafinarea modelelor de propagare folosite în calculul interferențelor.

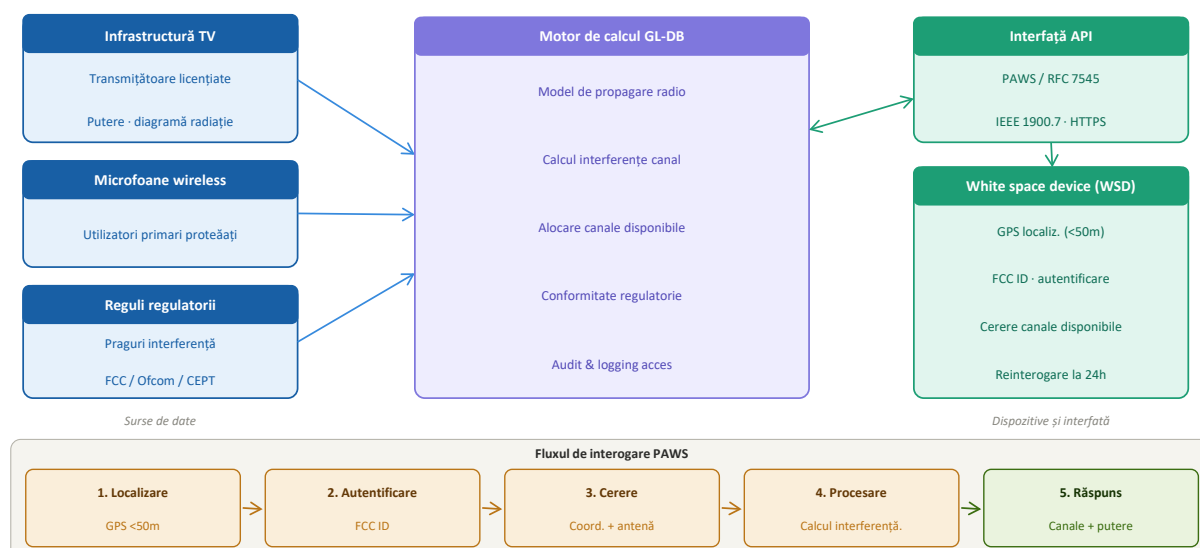


Fig. 1.7. Arhitectura unui sistem Geo-Location Database (GL-DB) pentru TV White Spaces

Perspectivile de evoluție ale GL-DB sunt strâns legate de tendințele mai largi din domeniul managementului dinamic al spectrului. Pe termen scurt, se anticipează extinderea modelului GL-DB dincolo de benzile TVWS, la alte categorii de spectru subutilizat — în particular, banda de 3,5 GHz în cadrul sistemului CBRS (*Citizens Broadband Radio Service*) din SUA utilizează deja o arhitectură similară, denumită *Spectrum Access System* (SAS), care gestionează accesul ierarhic al utilizatorilor. Pe termen mediu, convergența GL-DB cu platformele de management al rețelelor 5G și cu arhitecturile *Open RAN* deschide perspectiva unor sisteme integrate de orchestrare spectrală care să gestioneze simultan benzile licențiate, nelicențiate și cele cu acces secundar. Pe termen lung, integrarea inteligenței artificiale în motoarele de decizie ale GL-DB — prin modele predictive de ocupare spectrală, optimizare multi-obiectiv și învățare federată distribuită între nodurile de sensing — promite să transforme GL-DB dintr-un simplu registru de alocare într-un sistem dinamic de management spectral, capabil să maximizeze eficiența utilizării spectrului la nivel regional și național.

1.4.5. Cadre reglatoare și coordonare internațională

Organele regulatorii au îmbrățișat progresiv liberalizarea spectrului, ghidate atât de prioritățile naționale, cât și de cooperarea internațională. Repere cheie includ:

- **FCC (SUA):** A introdus regulile TVWS, a stabilit un proces de certificare pentru geolocation databases și a definit parametri tehnici precum limitele de putere, restricțiile de înălțime a antenei și cerințele de sensing [3].
- **Ofcom (UK):** A dezvoltat un regim de licențiere pentru dispozitivele TVWS bazat pe accesul condus de database și a publicat criterii detaliate de coexistență pentru protecția serviciilor DTT [12].
- **CEPT (Europa):** A emis rapoarte și recomandări ECC definind condițiile tehnice și operaționale armonizate pentru accesul TVWS, incluzând măștile de emisie, constrângerile de putere și pragurile de sensing [10].
- **ITU-R:** Deși se abține de la reglementarea directă a sistemelor CR, ITU-R a susținut dezvoltarea standardelor globale pentru accesul dinamic și a facilitat schimbul de informații între regulatorii naționali [9].

1.4.6 Standarde de comunicație

Liberalizarea a catalizat dezvoltarea standardelor care operaționalizează utilizarea dinamică și flexibilă a spectrului:

- **IEEE 802.22 WRAN:** primul standard bazat pe CR proiectat pentru accesul la banda largă în zonele rurale folosind TVWS. Standardul specifică protocoalele fizice și de nivel MAC, încorporează spectrum sensing și accesul la GLDB și susține mecanismele de protecție a utilizatorilor primari [4].
- **IEEE 1900.x (DySPAN):** suită de standarde care abordează accesul dinamic la spectru, incluzând terminologia, reprezentarea politicilor, spectrum sensing și interoperabilitatea între sistemele CR [4].
- **ETSI RRS (Reconfigurable Radio Systems):** dezvoltă framework-uri și arhitecturi pentru sistemele SDR și CR în Europa, susținând utilizarea flexibilă a resurselor radio pe mai multe benzi și servicii [5].

Aceste standarde integrează mecanismele tehnice cu constrângerile regulatorii, oferind un plan pentru operarea conformă și eficientă în medii spectrale liberalizate.

1.4.7 Impact și Dezvoltări Viitoare

Liberalizarea spectrului, în special în contextul TVWS, a dat deja rezultate tangibile:

- Implementarea serviciilor broadband rurale în Africa și Asia de Sud-Est folosind sisteme TVWS-enabled;
- Sisteme de comunicații de tip "Public Safety" bazate pe CR;
- Integrarea conectivității TVWS în platformele de tip Internet of Things (IoT) mai ales pentru aplicații de tip agricultura inteligentă.

Privind spre viitor, se așteaptă ca principiile liberalizării spectrului să se extindă dincolo de TVWS la benzi mai înalte, incluzând Citizens Broadband Radio Service (CBRS) de 3,5 GHz

în SUA și benzile milimetrice (mmWave). Mai mult, convergența între CR, SDR, tehnologiile machine learning și blockchain promit framework-uri de guvernare a spectrului descentralizate. Liberalizarea spectrului va continua să joace un rol foarte important în modelarea viitorului comunicațiilor wireless, permițând accesul dinamic, adaptiv și inclusiv la spectrul radio atât pentru aplicațiile existente, cât și pentru cele care stau să se afirme.

1.5. Software Defined Radio

Software Defined Radio (SDR) reprezintă un facilitator fundamental al sistemelor cognitive radio, liberalizării spectrului și paradigmelor DSA. Ca și platformă reconfigurabilă capabilă să emuleze protocoale radio multiple prin software, SDR oferă flexibilitate, interoperabilitate și adaptabilitate fără precedent în diverse medii wireless, acționând atât ca o coloană vertebrală tehnologică pentru cercetarea experimentală în comunicațiile radio, cât și ca o platformă de implementare practică pentru standardele emergente precum IEEE 802.22 WRAN, IEEE 802.11af și 5G NR-U.

1.5.1. Concept și arhitectură

SDR este definit ca un sistem de comunicare radio în care componentele implementate tradițional în hardware (de ex., mixere, filtre, modulatatoare/demodulatatoare, detectoare, amplificatoare) sunt în schimb implementate prin software executat pe procesoare de uz general (General-Purpose Processors - GPPs), procesoare digitale de semnal (Digital Signal processors - DSPs), field programmable gate arrays (FPGAs) sau platforme SoC.

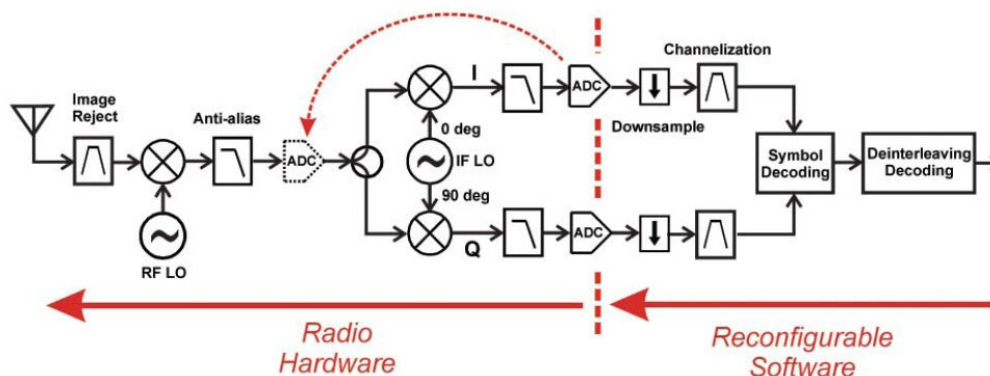


Fig. 1.8. Arhitectura tipică SDR [14]

Arhitectura unui sistem SDR, ilustrat în parte și în figura 1.7, cuprinde:

- **Modul RF:** Efectuează conversia A/D și D/A, amplificarea semnalului și translația de frecvență. Ar trebui să susțină game largi de acordare (de ex., 70 MHz la 6 GHz) și lărgime variabilă de bandă.
- **Lanțul de procesare digitală:** Implementează procesarea în banda bază precum modularea/demodularea, codificarea/decodificarea și modelarea spectrală. Aceasta este executată pe platforme hardware controlate software.
- **Planul de Control:** Gestionează configurarea, reconfigurarea și luarea deciziilor. Când este îmbogățit cu capacități cognitive, acest plan permite un comportament adaptiv bazat pe condițiile de mediu radio.

Arhitecturile SDR sunt adesea stratificate în **trei nivele de abstractizare**:

- **Hardware Abstraction Layer (HAL):** Oferă acces la nivel scăzut la resursele HW;
- **Middleware și APIs:** Oferă interfețe standardizate pentru librăriile de modulare, funcțiile de sensing și logica de control;
- **Application Layer:** Definește logica waveform, strategiile de acces la spectru și interacțiunile utilizatorului.

Această modularitate asigură scalabilitatea, extensibilitatea și compatibilitatea cu diverse standarde radio. Tranziția de la platforme hardware-defined la software-defined aduce o serie de beneficii cum ar fi:

- **Reconfigurabilitate:** Radiourile pot adapta schemele de modulare, benzile de frecvență și parametri de transmisie în timp real fără alterarea fizică.
- **Operare Multi-Standard:** Un singur dispozitiv poate opera sub mai multe standarde (de ex., LTE, Wi-Fi, DVB-T2), facilitând coexistența și interoperabilitatea.
- **Prototipare rapidă:** Cercetătorii pot testa forme de undă noi, protocoale MAC și tehnici de acces la spectru ad-hoc, accelerând ciclurile de inovare.
- **Cost scăzut:** Resursele hardware partajate reduc costurile de implementare și upgrade în timp, în special pentru echipamentele de infrastructură.

Aceste avantaje fac din SDR o platformă indispensabilă nu doar pentru experimentarea cognitive radio, ci și pentru aplicațiile comerciale și de tip mission-critical care necesită utilizare agilă a spectrului.

1.5.2. SDR în Cognitive Radio și Sistemele TVWS

În sistemele cognitive radio, SDR servește ca platforma physical layer pe care sunt executate mecanismele de spectrum sensing, luare a deciziilor și reconfigurare. Aceasta permite:

- **Spectrum sensing de bandă largă:** Platformele SDR pot eșantiona bandwidth-uri mari pentru a identifica oportunitățile spectrale;
- **Clasificarea semnalelor și extragerea de caracteristici:** Algoritmi de clasificare bazați pe machine learning pot fi implementați pentru a recunoaște semnăturile utilizatorilor primari;
- **Configurarea dinamică a transmisiei:** SDR-urile pot altera modularea, rata de codificare și frecvența purtătoare în timp real pe baza condițiilor de canal și constrângerilor regulatorii.

Conceptul SDR a fost larg utilizat în validarea experimentală a aplicațiilor TV White Space (TVWS). De exemplu, sistemele prototip care folosesc dispozitive USRP (Universal Software Radio Peripheral) au fost folosite pentru a demonstra fiabilitatea mai multor aplicații TVWS ca de exemplu Distribuția indoor a semnalului TV peste TVWS [6], coexistența între transmisiile nelicențiate IEEE 802.11p sau 802.22 și semnalele de televiziune digitală [4], sisteme de comunicare vehiculare (VANETs) adaptându-și dinamic utilizarea canalelor pe baza disponibilității detectate în banda UHF [7].

1.5.3. Platforme Hardware SDR

Numeroase platforme open-source și comerciale au apărut pentru a susține dezvoltarea SDR:

- **USRP (Ettus Research):** Cea mai adoptată pe scară largă platformă SDR în mediul academic și industrial. Oferă o gamă largă de plăci RF și susține GNU Radio.
- **HackRF One și RTL-SDR:** Dispozitive low-cost potrivite pentru monitorizarea de bază a spectrului și experimentarea de amatori.
- **NI LabVIEW cu platforme PXI/USRP:** oferă o interfață de programare grafică și procesare de mare viteză potrivită pentru aplicații în timp real.
- **BladeRF, LimeSDR și PlutoSDR:** platforme de nivel mediu cu un raport optim între performanța și preț.
- **Software:** GNU Radio, MATLAB/Simulink, LabVIEW și SDR Angel oferă medii de programare pentru a defini forme de undă și logica de procesare.

Aceste platforme susțin o varietate de cazuri de utilizare pentru dezvoltare, de la protocoale IoT cu bandă îngustă și până la analizatoare spectrale de bandă largă.

1.5.4. Provocări în proiectarea și implementarea SDR

În ciuda beneficiilor sale, SDR introduce mai multe provocări de design și operaționale:

- **Procesare:** procesarea semnalului de bandă largă, decodificarea în timp real și controlul adaptiv necesită resurse computaționale semnificative, în special pentru implementările mobile sau de tip embedded.
- **Latență și sincronizare:** sincronizarea precisă și procesarea cu latență scăzută sunt esențiale pentru aplicațiile de mare viteză, în timp real, precum LTE sau V2X.
- **Putere:** SDR-urile portabile trebuie să echilibreze flexibilitatea cu eficiența energetică, ceea ce nu este ușor pentru dispozitive radio alimentate cu baterii.
- **Calibrare:** Imperfecțiunile în componentele analogice (de ex., non-linearitățile, dezechilibrul IQ) trebuie compensate prin calibrare software.
- **Securitate:** Flexibilitatea SDR poate fi o sabie cu două tăișuri, tehnologia putând fi folosită pentru a emula protocoale oficiale de comunicații sau pentru a lansa atacuri asupra sistemelor wireless.

Abordarea acestor provocări necesită design atent al sistemului, optimizarea hardware-software și, în multe cazuri, programarea FPGA personalizată sau arhitecturile DSP embedded.

1.5.5. Aspecte regulatorii și de standardizare

Acceptarea regulatorie a dispozitivelor bazate pe SDR se bazează pe capacitatea lor de a aplica conformitatea cu regulile de acces la spectru. Autoritățile precum FCC și ETSI impun următoarele constrângeri:

- Aderarea la măștile de transmisie pentru a evita interferențele cu canalele adiacente;
- Limitarea puterii de transmisie;
- Constrângerile de tip geo-fencing și bazate pe locație;
- Mecanismele de aplicare software tamper-proof.

Pentru a îndeplini aceste condiții, multe sisteme SDR includ concepte și aplicații de tip secure bootloaders și medii runtime de tip sandboxed.

În standardizare, SDR este un element cheie pentru următoarele standarde:

- **IEEE 802.22 WRAN**, care mandatează capacități cognitive radio care pot fi implementate practic doar pe platforme reconfigurabile;
- **3GPP Release 16+ (NR-U și dynamic spectrum sharing)**, care include mecanisme de acces flexibil la spectru;
- **ETSI RRS**, care definește arhitecturi funcționale pentru sistemele radio reconfigurabile.

1.5.6. Perspective și direcții viitoare de cercetare

Viitorul SDR se află la intersecția reconfigurabilității, inteligenței artificiale și convergenței tehnologice. Pe măsură ce ecosistemele wireless evoluează spre paradigme de tip 6G, Open RAN și comunicații non-terestre, platformele SDR sunt poziționate să joace un rol central nu doar ca instrumente de cercetare și prototipare, ci ca infrastructură operațională de bază. Mai multe direcții de cercetare sunt urmărite activ la nivel academic și industrial, fiecare reprezentând o extensie naturală a capacităților actuale ale SDR.

Integrarea inteligenței artificiale și a învățării automate: Convergența SDR cu tehnicile de inteligență artificială (AI) și machine learning (ML) reprezintă probabil cea mai activă direcție de cercetare din domeniu. Modelele de tip deep learning sunt investigate pentru o gamă largă de aplicații în lanțul de procesare al SDR: clasificarea automată a modulațiilor (Automatic Modulation Classification — AMC), identificarea emițătorilor prin amprente RF (RF fingerprinting), atenuarea interferențelor adaptative și accesul predictiv la spectru bazat pe modele de ocupare spectrală istorice și în timp real. Arhitecturi precum rețelele neuronale convoluționale (CNN), rețelele recurente (LSTM) și, mai recent, transformerele au demonstrat performanțe superioare față de metodele clasice în condiții de SNR scăzut și medii radio cu variație rapidă. Un aspect deosebit de promițător este integrarea algoritmilor de reinforcement learning direct în motorul de decizie al SDR, permițând platformei să învețe politici optime de acces la spectru prin interacțiune continuă cu mediul radio, fără a necesita modele de canal prestabilite. Provocările rămân semnificative: complexitatea computațională a modelelor profunde, cerințele de date de antrenament reprezentative și latența inferenței în timp real sunt obstacole care motivează cercetări în direcția modelelor compacte (model pruning, quantization) și a acceleratoarelor hardware dedicate (NPU, FPGA cu suport AI).

Network Function Virtualization și Cloud-RAN: Virtualizarea funcțiilor de rețea (NFV) aplicată infrastructurii radio reprezintă o altă direcție transformatoare. În arhitecturile Cloud-RAN și Open RAN, funcțiile tradiționale ale stației de bază — procesarea benzii de bază, codificarea canalului, gestionarea resurselor radio — sunt dezagregate și migrate în platforme de calcul de uz general, executate ca funcții virtuale (VNF) sau containere (CNF) pe infrastructuri cloud-native. SDR servește în acest context ca stratul de abstractizare hardware care expune resursele radio fizice platformei de orchestrare software. Standardele O-RAN Alliance definesc interfețele deschise (O-RU, O-DU, O-CU) care permit separarea completă a hardware-ului radio de software-ul de procesare, deschizând calea spre rețele radio programabile și multi-vendor. Direcțiile active de cercetare includ orchestrarea în timp real a

resurselor radio prin xApps și rApps în cadrul RAN Intelligent Controller (RIC), optimizarea latențelor fronthaul în arhitecturile distribuite și securizarea funcțiilor radio virtualizate față de atacuri de tip side-channel sau injecție de trafic malițios.

Convergența Edge-SDR și aplicațiile în sisteme mobile: Încorporarea platformelor SDR în dispozitivele de tip edge — stații de bază mobile, vehicule autonome, drone (UAV), sateliți Low Earth Orbit (LEO) și echipamente IoT industriale — deschide noi posibilități pentru managementul distribuit al spectrului cu latență ultra-scăzută. Arhitecturile Edge-SDR permit executarea locală a algoritmilor de spectrum sensing, luare a deciziilor și reconfigurare radio, eliminând dependența de o infrastructură centralizată și îmbunătățind reziliența în scenarii de comunicații tactice, post-dezastru sau în zone fără acoperire celulară. Cercetările recente explorează federarea platformelor SDR distribuite prin tehnici de federated learning, unde modelele AI sunt antrenate colaborativ fără partajarea datelor brute de canal, adresând astfel atât eficiența computațională, cât și confidențialitatea datelor. Integrarea SDR în constelațiile de sateliți LEO (precum Starlink sau OneWeb) reprezintă un caz de utilizare emergent deosebit de relevant, unde reconfigurabilitatea software permite adaptarea dinamică a parametrilor de transmisie în funcție de condițiile de propagare și de trafic variabile pe orbită.

Interfațarea SDR cu comunicațiile cuantice: Deși aflată într-un stadiu incipient, cercetarea privind interfațarea SDR cu primitivele de comunicare cuantică reprezintă o direcție cu potențial pe termen lung. Sistemele de distribuție a cheilor cuantice (Quantum Key Distribution — QKD) necesită canale clasice de comunicare pentru reconcilierea informației și corectarea erorilor — canale care pot fi implementate eficient pe platforme SDR reconfigurabile. Mai mult, conceptul de *Quantum-Defined Radio* explorează posibilitatea utilizării fenomenelor cuantice (entanglementul, superpoziția) pentru îmbunătățirea securității și capacității legăturilor radio clasice. Deși integrarea practică rămâne limitată de fragilitatea stărilor cuantice în medii radio reale și de costul ridicat al echipamentelor criogenice, progresele în domeniul repetoarelor cuantice și al memoriilor cuantice la temperatură ambiantă sugerează că această convergență ar putea deveni relevantă pe orizontul de timp 2030–2040.

Standardizare și ecosisteme deschise: O direcție transversală, adesea subestimată, o reprezintă eforturile de standardizare și construirea ecosistemelor software deschise pentru SDR. Inițiative precum GNU Radio, OpenAirInterface (OAI) și SRSRAN oferă platforme open-source care accelerează cercetarea și transferul tehnologic, reducând semnificativ bariera de intrare pentru comunitatea academică. Standardele IEEE 1900.x (DySPAN) continuă să definească cadrul de interoperabilitate pentru sistemele SDR cognitive, în timp ce 3GPP Release 17 și 18 introduc mecanisme de acces flexibil la spectru (NR-U, dynamic spectrum sharing) care sunt implementate practic pe platforme SDR. Convergența acestor standarde cu arhitecturile Open RAN și cu platformele AI/ML promite un ecosistem SDR mai deschis, mai interoperabil și mai inteligent decât cel existent astăzi.

În concluzie, SDR va continua să fie o tehnologie de bază în ecosistemele wireless de generație următoare, nu doar ca platformă de cercetare și prototipare, ci ca infrastructură operațională pentru rețele 6G, sisteme non-terestre și comunicații critice. Caracterizat prin adaptabilitate, eficiență spectrală și coordonare inteligentă în rețele eterogene, SDR reprezintă liantul tehnologic care conectează reconfigurabilitatea hardware cu inteligența software într-un ecosistem wireless din ce în ce mai complex și mai dinamic.

1.6. Contribuții personale

1.6.1. Domeniile CR - SDR - TVWS

Activitatea de cercetare a autorului în domeniile CR - SDR – TVWS a început cu lucrarea "Survey On Spectrum Sensing Techniques For Cognitive Radio" [15] publicată în Buletinul Universității Transilvania în anul 2008 și a continuat cu lucrările de conferință [16] – [19] în domeniul aplicațiilor Wavelete pentru operațiile de spectrum sensing, studii teoretice despre folosirea TVWS pentru distribuția de semnale audio/video și utilizarea GL-DB pentru exploatarea dinamică a TVWS. Un alt survey (capitol de carte) a urmat în anul 2011 [23]

Cercetările teoretice din perioada 2008 – 2011 s-au materializat în trei lucrări [20] – [22] publicate în revistele IEEE Transaction on Broadcasting, IEEE Transaction on Consumer Electronics și Signal Processing: Image Communication, în care au fost prezentate diferite aplicații și implementări ale unui sistem bazat pe SDR pentru distribuția de semnale audio – video într-un mediu indoor.

Ideea principală a lucrărilor este de a utiliza oportunitățile spectrale pentru a redirecționa mai multe MUX-uri de canale TV digitale, provenind din transmisii terestre sau prin satelit, către un set de utilizatori autorizați într-un mediu indoor. Conținut digital suplimentar de pe dispozitive DVD/PC/mobile/camere video sau dispozitive IPTV pot fi partajate de asemenea pentru aplicații de tip home – entertainment sau pentru arhitecturi de infotainment (stațiuni, hoteluri, aeroporturi, centre comerciale etc.). Pe lângă utilizarea activă a GL-DB-urilor, sistemul propus implementa și spectrum sensing ca resursă suplimentară. Sensing-ul este utilizat pentru validarea informațiilor despre canalele locale neutilizate sau subutilizate citite din baza de date standard și, după caz, pentru rafinarea condițiilor de utilizare a acestora (de ex. controlul EIRP).

Un dispozitiv cognitiv central, acționând ca server, este responsabil pentru recepționarea conținutului TV și retransmiterea acestuia la putere redusă către dispozitivele finale care, în acest caz, sunt televizoare comerciale cu decodare DTT încorporate. Sistemul este conectat la o GL-DB care furnizează informații despre canalele neutilizate disponibile într-o anumită locație și, datorită abordării de spectrum sensing, este capabil să valideze rezultatul acestei interogări în mod exclusiv. Cele patru sarcini principale îndeplinite de dispozitivul central sunt ilustrate în figura 1.8. Prima sarcină constă în recepționarea conținutului de broadcasting digital și translatarea acestuia din frecvențe radio în banda de bază (module RF/BB). Fiecare dintre module poate gestiona programele TV conținute într-un MUX DTT sau Transponder Satelit. Module suplimentare sunt necesare pentru recepționarea simultană a mai multor MUX-uri sau transpondere, pentru a permite utilizatorilor să construiască o listă de canale TV dorite. Pe baza acestei liste, blocul central (DMUX/S-TRAN/MUX) gestionează conținuturile digitale recepționate și grupează canalele selectate într-unul sau mai multe MUX-uri/transpondere conforme cu standardul corespunzător. Numărul de MUX-uri/Transpondere generate depinde de numărul canalelor dorite și de caracteristicile acestora (SDTV, HDTV, radio etc.). Blocul central are, de asemenea, posibilitatea de a redirecționa conținuturi suplimentare de pe dispozitive externe DVD/PC/mobile/camere video sau dispozitive IPTV (fluxuri AUX) în oportunitățile spectrale detectate, ca unul sau mai multe canale în cadrul unui MUX. Înainte de distribuție, conținutul TV este codificat/criptat printr-un sistem proprietar conform Digital Rights Management (DRM) [20], [21], prevenind astfel transmisia în flux de către utilizatori

neautorizați. Doar televizoarele echipate cu un Modul de Acces Condiționat (CAM) dedicat, asociat dispozitivului central, vor fi autorizate să decodifice și să vizioneze conținuturile retransmise. Blocul de decizie ia în considerare posibilele inconsistențe dintre GL-DB-uri și rezultatul etapei de sensing: de exemplu, dacă etapa de spectrum sensing nu detectează servicii de broadcasting sau semnale PMSE, dar baza de date indică unul sau mai multe canale utilizate de servicii de broadcasting sau PMSE, aceste canale nu vor fi utilizate până când ambele surse de informații sunt congruente. În celălalt caz, dacă etapa de spectrum sensing detectează semnale ale serviciilor de broadcasting sau PMSE, dar baza de date nu indică niciun canal utilizat, canalele incriminate sunt de asemenea excluse. Etapa de validare furnizează frecvențele optime și valorile maxime ale puterii de transmisie care urmează să fie utilizate de modulele BB/RF, pe baza unui algoritm.

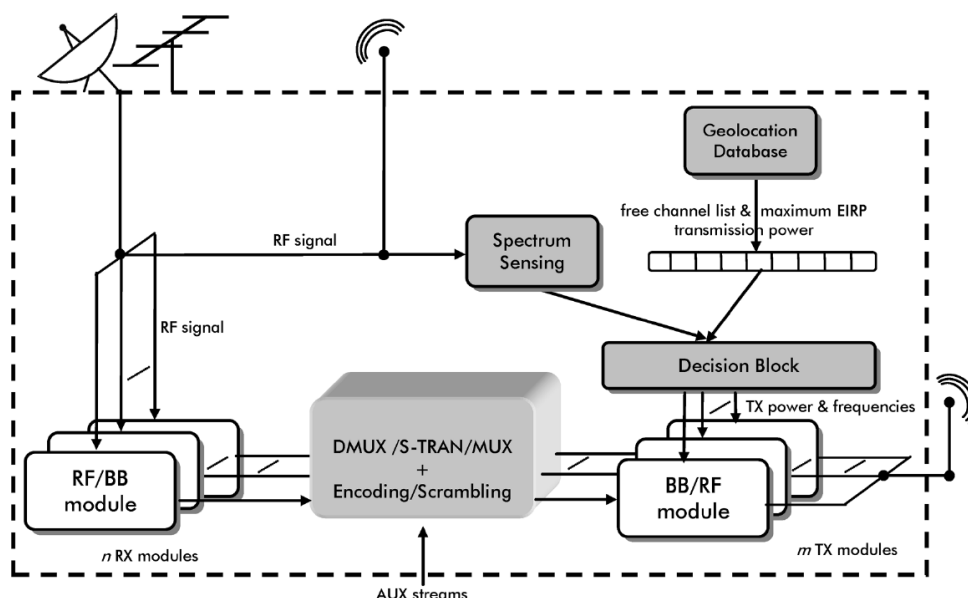


Fig. 1.9. Schema sistemului HDTV de distribuție indoor a semnalelor TV [20]

Pentru a obține o dovadă de concept validă pentru sistemul propus, am investigat mai întâi problemele legate de EIRP-ul maxim admisibil util pentru transmisia fără a genera interferențe dăunătoare (ACI) și le-am cuantificat nu doar pentru primul canal adiacent. Pornind de la investigații deja efectuate pe receptoare DTT comerciale, am validat aceste rezultate în condiții reale de funcționare, prin transmisie over-the-air într-o cameră anechoică. Aceste rezultate pentru transmisia DTT over-the-air au revelat un raport ușor mai ridicat față de studiile anterioare efectuate pe receptoare cu cablu.

Pentru selectarea dinamică a celui mai bun canal liber, în scopul evitării interferențelor cu canalele adiacente active, am proiectat un algoritm specific denumit ADA. Algoritmul utilizează ca date de intrare informațiile de ocupare obținute de la Agilent VSA (figura 1.9) și masca raportului de protecție a canalului adiacent, în vederea obținerii unei liste de frecvențe utilizabile și puteri de transmisie. Pe baza acestor valori ale puterii de transmisie calculate cu algoritmul ADA, am utilizat cea de-a doua parte a studiului pentru a determina experimental condițiile în care coexistența receptoarelor și transmițătoarelor DTT de scurtă distanță este fezabilă pentru mediile interioare.

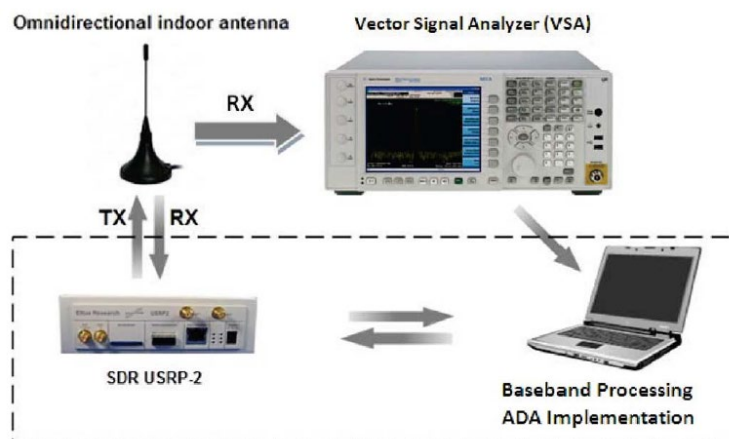


Fig. 1.10. Setup experimental pentru dispozitivul central [20]

Luând în considerare toate problemele legate de prezența fenomenelor tipice de atenuare pentru un mediu interior, am investigat distanța de acoperire dintre dispozitivul central și un receptor DTT, utilizând un nivel fix al puterii de transmisie. Testarea hardware-ului a fost făcută folosind televizoare comerciale cu tunere DTT integrate și antene disponibile comercial, în combinație cu dispozitivul SDR (Ettus USRP 2) pe care a fost implementat prototipul sistemului. Rezultatele campaniei de măsurători indoor au revelat o acoperire extinsă a sistemului wireless, adecvată pentru o casă normală cu două etaje. Ne-am asigurat că niciun alt receptor nu poate fi perturbat de o nouă transmisie prin respectarea raportului de protecție la transmisie, pentru a nu deranja în primul rând potențialii receptori din proximitatea dispozitivului central. Prin implementarea unui prototip funcțional al sistemului propus și efectuarea unei campanii extinse de măsurători interioare, am livrat dovada de concept a sistemului de distribuție interioară de scurtă distanță propus pentru retransmisia wireless în canalele TV libere a conținuturilor conforme DTT.

Extensii ale aceluiași sistem au fost prezentate în [21] folosind și o componentă de tip GL-DB, iar în [22] abordarea s-a concentrat pe probabilitatea de detecție a semnalelor utilizatorilor primari și calitatea imaginii transmise folosind M-JPEG-XR ca și standard de transmisie a semnalului video.

1.6.2. Domeniul interferențelor co-canal și măsurători în benzile UHF

În cadrul acestui domeniu de cercetare, eforturile autorului și ale colaboratorilor săi s-au concentrat în perioada 2012 – 2016 pe efectuarea de măsurători reale pentru a atesta fezabilitatea folosirii comunicațiilor nelicențiate în benzile de frecvență UHF, pentru comunicații indoor sau vehiculare .

Pentru standardul de televiziune DVB-T2 au fost efectuate teste [24] pentru evaluarea protecției serviciilor de broadcasting DVB-T2 perturbate de transmisiile IEEE 802.22 WRAN în regim de co-canal și pe canalele adiacente. Pentru cele mai reprezentative moduri de operare ale rețelelor reale de broadcasting DVB-T2, a fost măsurat nivelul maxim tolerabil al puterii de interferență al unui semnal IEEE 802.22 WRAN, asigurând în același timp integritatea serviciilor DVB-T2. Implementarea sistemului de măsurare a fost făcută folosind schema din figura 1.10.

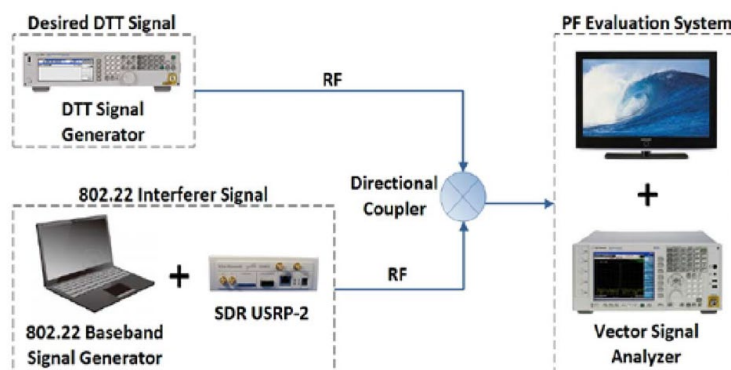


Fig. 1.11. Schema sistemului de măsurare a interferențelor DVB-T

Pentru a evalua performanța sistemelor DVB-T2 perturbate de transmisia IEEE 802.22 WRAN, pragul de degradare a imaginii a fost monitorizat pentru diferite moduri de operare ale standardului DVB-T2 (figura 1.11). Semnalul TV de 8 MHz pentru toate modurile de transmisie DVB-T2 considerate a fost generat utilizând software-ul Agilent Signal Studio for Digital Video conectat la un generator de semnal vectorial RF Agilent N5182A MXG. Schema straturii fizice PHY în bandă de bază IEEE 802.22 WRAN a fost modelată în Matlab/Simulink, după cum s-a descris în secțiunea anterioară. Semnalul în bandă de bază a fost modulat RF utilizând o platformă SDR USRP2 conectată la un calculator pe care rula modelul Simulink. Semnalele RF de interferență dorite și semnalele DVB-T2 au fost combinate utilizând un cuplor direcțional Merrimac CMR-20500. Semnalul TV a fost recepționat utilizând un receptor TV comercial. Diferite televizoare au fost testate în experimente și măsurători de teren anterioare, demonstrând performanțe foarte similare. Un analizor de semnal vectorial (VSA) Agilent EXA9010A a fost utilizat ca wattmetru atât pentru semnalele TV dorite, cât și pentru semnalul perturbator IEEE 802.22 WRAN. Pentru experimente a fost utilizat canalul 56 (754 MHz). Frecvența de transmisie a semnalului perturbator IEEE 802.22 WRAN a fost inițial setată la frecvența centrală TV dorită și ulterior modificată cu un ecart de frecvență de 500 kHz până la frecvența centrală a primului canal adiacent al semnalului TV dorit (adică canalul 57, 762 MHz). Nivelul de putere al semnalului IEEE 802.22 WRAN a fost variat direct de pe platforma SDR USRP2 și verificat utilizând analizorul Agilent VSA. Principala contribuție a lucrării a constat în propunerea unor rapoarte de protecție a sistemului care pot fi utilizate pentru evaluarea impactului potențial al operării TVWS asupra televiziunii digitale terestre bazate pe DVB-T2. Valorile furnizate sunt referințe pentru studiul EIRP-ului maxim, al densității maxime a dispozitivelor și al distribuției acestora în condiții de operare co-canal și pe canal adiacent ale dispozitivelor TVWS față de televiziunea digitală terestră, luând în considerare distanța dintre utilizatorii primari (adică receptoarele DTT) și utilizatorii secundari (adică dispozitivele din spațiile albe), pierderile de propagare, caracteristicile semnalului și caracteristicile antenelor.

Măsurători similare au fost realizate și pentru rețele vehiculare ad-hoc (VANETs) folosind semnale conforme cu standardul IEEE 802.11p standard [25]. Arhitectura sistemului de măsurare este prezentată în figura 1.12.

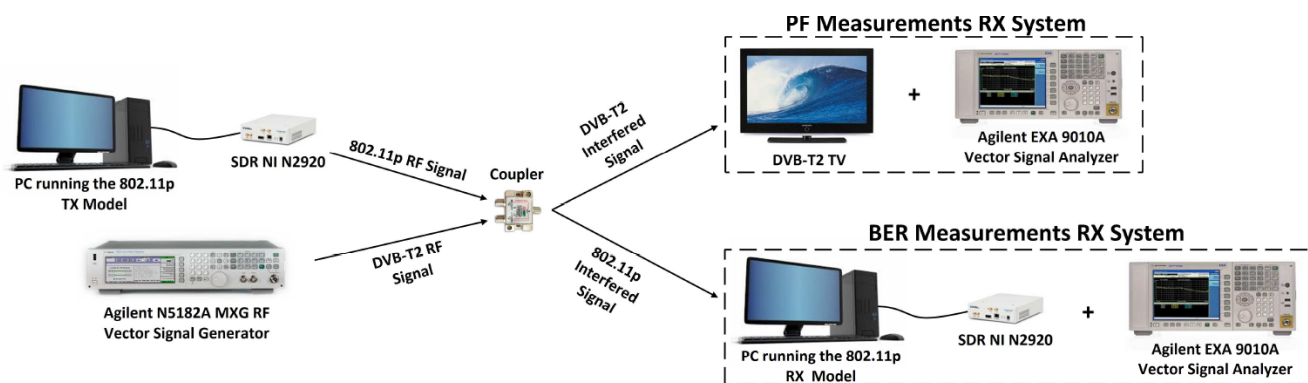


Fig. 1.12. Sistem de măsurare a interferențelor semnalelor 802.11p și DVB-T2.

Rezultatele obținute pentru modurile de transmisie DVB-T2 investigate sugerează că efectul interferenței în canalele adiacente ale unor semnale adiacente 802.11p variază în funcție de configurația acestuia. Pentru receptorul DVB-T2 testat a fost considerat cazul operativ cel mai defavorabil. Semnalul perturbator 802.11p a fost inițial setat la un nivel de putere de -20 dB sub sensibilitatea receptorului testat și apoi ajustat la ieșirea plăcii SDR pentru a obține degradarea necesară (punctul PF) a semnalului TV recepționat și decodificat. Lățimea de bandă și rata de biți au fost cei doi parametri monitorizați. Un semnal cu lățime de bandă de 5 MHz perturbă mai puțin pentru toate valorile ratei de biți comparativ cu un semnal cu lățime de bandă de 10 MHz, atât pentru configurația rețelei DVB-T2 de tip Multiple Frequency Network (MFN), cât și pentru cea de tip Single Frequency Network (SFN). În cazul unui semnal cu o lățime de bandă de 10 MHz, cazurile cu comportare critică corespund ratelor de biți scăzute. Aceasta poate fi explicat prin faptul că eficiența spectrală este ridicată atunci când se utilizează întreaga lățime de bandă, ducând la un spectru mai compact odată cu creșterea ratei de biți și la o scădere consecventă a perturbației cauzate semnalului de broadcasting. Comparând curbele obținute pentru cele două configurații considerate, se poate observa că valori mai scăzute ale raportului de protecție au fost obținute pentru tipul 64QAM. Cazul de 5 MHz prezintă un efect nedorit în dreptul celui de-al treilea canal adiacent, și mai pronunțat pentru valori scăzute ale ratei de biți, în funcție de calitatea receptorului. O a doua serie de măsurători a analizat performanța dispozitivelor 802.11p în prezența serviciilor de broadcasting DVB-T2. BER-ul unui dispozitiv 802.11p după un decodor Viterbi a fost evaluat în prezența interferenței adiacente DVB-T2. Rezultatele indică o tendință similară atât pentru configurațiile SFN, cât și MFN, conducând la concluzia că schemele de modulație superioare cu rate de date ridicate sunt mai robuste la interferențele DVB-T2. Mai mult, semnalele de 5 MHz prezintă niveluri BER mai ridicate comparativ cu semnalele de 10 MHz, datorită efectului de suprapunere observat în cazul de 10 MHz care afectează negativ calitatea semnalului recepționat.

Rezultatele din aceste două lucrări inițiale au fost extinse în [25] – [27] cu măsurători similare pentru alte tipuri de semnale perturbatoare și folosind metrici diferite pentru semnalele DVB-T2, cum ar fi Picture Failure Point (PFP).

1.7. Sumar Capitol 1

Capitolul 1 pornește de la ineficiența fundamentală a modelului de alocare statică a spectrului radio și continuă cu prezentarea unui ecosistem tehnologic capabil să depășească aceste limitări.

Radioul cognitiv, conceptualizat de Mitola și Maguire la începutul anilor 2000, a reprezentat o schimbare de paradigmă: trecerea de la spectrul privit ca resursă rigidă, atribuită static, la spectrul ca resursă dinamică, exploatabilă oportunist în funcție de prezența sau absența utilizatorilor primari. Ciclul cognitiv (observație, orientare, planificare, decizie, acțiune) a oferit un cadru teoretic care a inspirat o generație de cercetători și a stat la baza primelor standarde internaționale de acces dinamic la spectru, în special IEEE 802.22 WRAN, prima specificație bazată pe CR dedicată rețelelor regionale fără fir. Funcționalitățile fundamentale CR (spectrum sensing, gestiunea spectrului și mobilitatea spectrală) reprezintă astăzi componente standard ale oricărei arhitecturi de comunicații, regăsindu-se sub diverse forme în standardele 5G NR-U și în arhitecturile Open RAN de generație curentă.

Spectrum sensing, funcționalitate critică a CR, în condiții de SNR scăzut, shadowing, fading și mobilitate, ridică provocări tehnice substanțiale, care au motivat o bogată activitate de cercetare de-a lungul ultimelor două decenii. Tehnicile analizate continuă să fie relevante atât în sisteme operaționale cât și în cercetarea fundamentală. Detecția cooperativă și distribuită îmbunătățește mecanismele de sensing prin agregarea observațiilor individuale ale mai multor utilizatori secundari, probabilitatea de detecție crescând semnificativ, mai ales în cazuri specifice cum ar fi situațiile de tip hidden node.

TV White Spaces este cea mai concretă și reglementată aplicație a accesului secundar la spectru. Tranziția de la televiziunea terestră analogică la cea digitală a eliberat o resursă spectrală valoroasă în benzile VHF/UHF cu proprietăți de propagare excepționale: rază de acoperire extinsă, penetrare superioară a clădirilor și costuri de infrastructură reduse. Politicile de liberalizare adoptate de FCC (2008), Ofcom (2009) și CEPT (2010) au permis exploatarea acestei resurse de dispozitive nelicențiate, sub condiții stricte de protecție a serviciilor primare. Bazele de date de tip geo-location (GL-DB) au reprezentat o inovație regulatorie și tehnică de prim rang: în locul unui sensing pur local, cu toate limitările sale, GL-DB furnizează informații centralizate și permanent actualizate despre disponibilitatea spectrală la o locație dată, pe baza datelor complete despre infrastructura de broadcasting licențiată. Standardizarea protocolului de interogare prin PAWS (RFC 7545) și IEEE 1900.7 a asigurat interoperabilitatea globală a dispozitivelor TVWS, iar implementările comerciale ale GL-DB în SUA și Europa au validat fezabilitatea practică a acestui model. Limitele GL-DB precum dependența de date de propagare precise și latența de actualizare, au motivat arhitecturi hibride care combină consultarea GL-DB cu spectrum sensing local, oferind o redundanță de protecție suplimentară.

Software Defined Radio reprezintă stratul de abstractizare hardware care face posibil tot ansamblul descris anterior. Decuplarea funcționalităților radio de hardware-ul fizic — prin digitizarea semnalului cât mai aproape de antenă și implementarea în software a tuturor funcțiilor de procesare — conferă platformelor SDR flexibilitatea de a schimba frecvența de operare, modulația, lățimea de bandă, codecul și protocolul de acces la mediu prin simplă reconfigurare software. Platformele USRP ale Ettus Research, utilizate extensiv în cercetările prezentate, au oferit un instrument experimental de referință, combinând performanța FPGA cu accesibilitatea suitei software GNU Radio pentru prototiparea rapidă de sisteme radio complexe. Provocările tehnice ale SDR precum consumul energetic pentru platformele mobile

și embedded, latența de procesare în timp real și aspectele de securitate generate de flexibilitate, continuă să motiveze cercetări active, cu soluții din ce în ce mai mature disponibile în ecosistemul hardware-software din domeniu.

Contribuțiile personale ale autorului în perimetrul acestui capitol acoperă întreg spectrul de la cercetarea fundamentală la validarea experimentală, cu o orientare spre relevanța aplicativă și conformitatea cu cadrul de reglementare. Sistemul de distribuție indoor DTT în TVWS cu selecția dinamică a canalelor, campania de măsurători în camera anechoică pentru caracterizarea EIRP-ului admisibil și setul extins de rapoarte de protecție pentru coexistența DVB-T2/IEEE 802.22 și DVB-T2/IEEE 802.11p au constituit contribuții cu impact direct asupra standardizării și planificării frecvențelor pentru dispozitivele TVWS. Aceste rezultate, publicate în reviste IEEE de referință și extinse printr-o serie de lucrări de conferință, au furnizat unele dintre primele date empirice validate experimental privind coexistența sistemelor TVWS cu serviciile de broadcasting digital în benzile UHF europene.

Activitățile de cercetare din primul capitol al acestei teze s-au desfășurat într-o perioadă de efervescență conceptuală și regulatorie care a redefinit fundamental relația dintre utilizatorii de spectru și resursa radio în sine. Tranziția de la alocarea statică a frecvențelor la accesul dinamic a lăsat o moștenire metodologică și tehnologică de necontestat: tehnicile de sensing, algoritmi de decizie, mecanismele de coexistență și principiile GL-DB dezvoltate în contextul TVWS și CR se regăsesc astăzi, sub forme evaluate, în arhitecturile CBRS (Citizens Broadband Radio Service), în sistemele de Spectrum Access System (SAS) din banda de 3,5 GHz și în mecanismele de dynamic spectrum sharing ale standardelor 5G NR. SDR, la rândul său, a depășit statutul de platformă de cercetare pentru a deveni infrastructura de bază a stațiilor de bază virtualizate din arhitecturile Open RAN făcând din partea software cheia adaptabilității și eficienței wireless la scară globală.

Bibliografie Capitolul 1

- [1] J. Mitola III and G. Q. Maguire Jr., "Cognitive radio: Making software radios more personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, Aug. 1999. doi: 10.1109/98.788210
- [2] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005. doi: 10.1109/JSAC.2004.839380
- [3] FCC Spectrum Policy Task Force, "Report of the Spectrum Efficiency Working Group," Federal Communications Commission, Washington D.C., ET Docket No. 02-135, Nov. 2002.
- [4] IEEE Std 802.22-2011, "Standard for Wireless Regional Area Networks Part 22: Cognitive Wireless RAN MAC and PHY Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands," IEEE, Jul. 2011.
- [5] ETSI TR 102 907 V1.1.1, "Reconfigurable Radio Systems (RRS); Use Cases for Operation in White Space Frequency Bands," ETSI, Oct. 2011.
- [6] M. Murrioni and V. Popescu, "Spectrum Sensing for Dynamic Spectrum Access Networks in the 700-MHz UHF TV Band Using Wavelets," in *Proc. IEEE Broadband Multimedia Systems and Broadcasting Symp. (BMSB)*, Bilbao, Spain, May 2008.
- [7] M. Fadda, M. Murrioni, V. Popescu, J. Morgade, and P. Angueira, "Interference Issues for VANET Communications in the TVWS in Urban Environments," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 7, pp. 4952–4958, Jul. 2016. doi: 10.1109/TVT.2015.2453633
- [8] P. Bahl, R. Chandra, and T. Moscibroda, "White space networking with Wi-Fi like connectivity," *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, vol. 39, no. 4, pp. 27–38, Aug. 2009. doi: 10.1145/1594977.1592573
- [9] ITU-R, "Report ITU-R SM.2152: Definitions of Software Defined Radio (SDR) and Cognitive Radio System (CRS)," International Telecommunication Union, Geneva, 2009.
- [10] Electronic Communications Committee. (2011). *ECC Report 159: Cognitive Radio*. CEPT. <https://www.ero-docdb.dk/docs/doc98/official/pdf/ECCRep159.pdf>.
- [11] M. Murrioni, V. Popescu, M. Fadda, and C. Sacchi, "Multi-rate modulation for opportunistic satellite communications over LMS channels," *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 34, no. 6, pp. 743–759, 2016.
- [12] Ofcom, "Statement on Cognitive Access to Interleaved Spectrum," Office of Communications, London, UK, Jul. 2009. [Online]. Disponibil: https://www.ofcom.org.uk/data/assets/pdf_file/0014/25403/sfr.pdf
- [13] I. F. Akyildiz, B. F. Lo, and R. Balakrishnan, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey," *Phys. Commun.*, vol. 4, no. 1, pp. 40–62, Mar. 2011. doi: 10.1016/j.phycom.2010.12.003
- [14] Agilent Technologies, "Software Defined Radio Measurement Solutions," Application Note, Pub. No. 5989-3423EN, Agilent Technologies, Santa Clara, CA, Jul. 2007.
- [15] Stoianovici, V., Popescu, V., Murrioni, M. – Survey On Spectrum Sensing Techniques For Cognitive Radio. In "Bulletin Of The Transilvania University Of Brasov, VOL.1 (50)-2008, ISSN 1223-964X
- [16] Murrioni, M., Popescu, V. "Spectrum Sensing For Dynamic Spectrum Access Networks In The 700-MHz UHF TV Band Using Wavelets" *IEEE Broadband Multimedia Symposium*, 13 - 15 May, Bilbao, Spain, May 2008.
- [17] Murrioni, M.; Popescu, V., "Cognitive Radio HDTV multi-vision system in the 700 MHz UHF TV band," *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2010 IEEE International Symposium on , vol., no., pp.1,3, 24-26 March 2010

- [18] Mauro Fadda, Maurizio Murrone, Vlad Popescu, Vlad Cristian Stoianovici „TV White Spaces Exploitation for Signal Distribution” In: 7th International ICST Conference, MOBIMEDIA 2011, pp 65-72, Cagliari, Italy, 2011, ISBN 978-3-642-30418-7
- [19] Mauro Fadda, Maurizio Murrone, Vlad Popescu, Vlad Cristian Stoianovici „Cooperative Spectrum Sensing for Geo-Location Databases” In: 7th International ICST Conference, MOBIMEDIA 2011, pp 78-83, Cagliari, Italy, 2011, ISBN 978-3-642-30418-7
- [20] Fadda, M.; Murrone, M.; Popescu, V. "An Unlicensed Indoor HDTV Multi-Vision System in the DTT Bands" Broadcasting, IEEE Transactions on , vol.58, no.3, pp.338-346, Sept. 2012, doi: 10.1109/TBC.2012.2201559
- [21] Fadda, M.; Murrone, M.; Popescu, V. "A cognitive radio indoor HDTV multi-vision system in the TV white spaces," Consumer Electronics, IEEE Transactions on, vol.58, no.2, pp.302-310, May 2012, doi: 10.1109/TCE.2012.6227427, ISSN 0098-3063
- [22] Mauro Fadda, Maurizio Murrone, Cristian Perra, Vlad Popescu, “TV white spaces exploitation for multimedia signal distribution”, Signal Processing: Image Communication, Volume 27, Issue 8, September 2012, Pages 893-899, ISSN 0923-5965, 10.1016/j.image.2012.01.014.
- [23] Murrone Maurizio and Popescu Vlad: „Cognitive Radio Communications for Vehicular Technology – Wavelet Applications”, In Vehicular Technologies: Increasing Connectivity, Edited by Miguel Almeida, ISBN 978-953-307-223-4, 448 pages, Publisher: InTech, 2011, DOI: 10.5772/2285
- [24] V. Popescu, M. Fadda, M. Murrone, J. Morgade, and P. Angueira, “Co-Channel and Adjacent Channel Interference and Protection Issues for DVB-T2 and IEEE 802.22 WRAN Operation,” IEEE Trans. Broadcast., vol. 60, no. 4, pp. 693–700, Dec. 2014. doi: 10.1109/TBC.2014.2360024
- [25] Fadda, M.; Murrone, M.; Popescu, V.; Morgade, J.; Angueira, P.,” Field Measurements for Practical Unlicensed Communication in the UHF band”, Telecommunication Systems, Springer Science+Business Media New York 2015, pp.1-7, doi:10.1007/s11235-014-9963-7.
- [26] M. Fadda, V. Popescu, M. Murrone, P. Angueira, and J. Morgade, “On the Feasibility of Unlicensed Communications in the TV White Space: Field Measurements in the UHF Band,” International Journal of Digital Multimedia Broadcasting, vol. 2015, Article ID 319387, 8 pages, 2015. doi:10.1155/2015/319387, ISSN 1687-7578.
- [27] Popescu, Vlad; Fadda, Mauro; Murrone, Maurizio: 'Performance analysis of IEEE 802.22 wireless regional area network in the presence of digital video broadcasting – second generation terrestrial broadcasting services', IET Communications, 2016, 10, (8), p. 922-928, DOI: 10.1049/iet-com.2015.1117

2. De la SDR la IoT și până la aplicații Smart Home și HbbTV

Evoluția sistemelor de comunicații a fost profund modelată de convergența a trei paradigme: sisteme radio reconfigurabile, proliferarea senzorilor de toate tipurile și serviciile inteligente. SDR a permis migrarea de la aplicații centrate pe hardware costisitor către arhitecturi programabile, adaptive și rentabile. În paralel, proliferarea dispozitivelor IoT a extins conectivitatea la miliarde de obiecte eterogene, de la senzori industriali la aparatele de uz casnic. Această expansiune a favorizat dezvoltarea unor noi protocoale de comunicații, gateway-uri și strategii de administrare a rețelelor capabile să susțină ecosisteme dense, eterogene și dinamice de dispozitive.

Integrarea IoT în mediile domestice a accelerat emergența paradigmei casei inteligente (smart home – SH), unde dispozitivele cooperează pentru a livra servicii de eficiență energetică, securitate, divertisment și sănătate. Simultan, platformele de televiziune hibridă broadcast-broadband (de exemplu HbbTV) au transformat interacțiunea cu utilizatorul, permițând o combinație între serviciile tradiționale de difuzare și serviciile personalizate livrate prin internet. Împreună, aceste domenii ilustrează cum tehnologiile de comunicații reconfigurabile și omniprezența senzorilor formează fundația pentru următoarea generație de aplicații axate pe utilizator.

Acest capitol explorează traiectoria de la sistemele de comunicații bazate pe SDR către IoT și aplicațiile lor concrete în domeniul Smart Home și în cadrul serviciilor multimedia. Accentul este plasat pe arhitecturi, protocoale și tehnologii care susțin această evoluție, precum și pe provocările și direcțiile de cercetare asociate fiecărei etape.

2.1 SDR pentru IoT și comunicații prin satelit

2.1.1 SDR pentru IoT

Internet of Things (IoT) a constituit una dintre cele mai semnificative transformări ale societății digitale, permițând conectivitatea între miliarde de dispozitive eterogene, de la senzorii industriali la electronicele de consum. Expansiunea sa necesită infrastructuri de comunicații care să fie nu doar scalabile și eficiente energetic, ci și adaptabile la medii diverse și cerințe specifice aplicațiilor. Arhitecturile radio tradiționale, cu funcționalități fixe definite prin hardware, adesea nu au flexibilitatea necesară pentru a întâlni standardele IoT în evoluție și eterogenitatea tehnologiilor wireless.

SDR a apărut ca un candidat natural pentru a aborda aceste provocări. Prin decuplarea funcționalităților radio de hardware și implementarea lor prin software, SDR oferă capacitatea de a integra multiple standarde de comunicație IoT, de a reconfigura dinamic ca răspuns la medii în schimbare și de a susține evoluția pe termen lung a sistemelor IoT fără înlocuirea hardware [1].

Ecosistemul IoT este caracterizat de o gamă largă de standarde de comunicație care operează pe diferite straturi fizice și de control al accesului la mediu (MAC). Rețelele Low-Power Wide-Area (LPWANs) precum LoRaWAN, Sigfox și NB-IoT pun accent pe eficiența energetică și acoperirea pe distanțe lungi, în timp ce standardele de comunicații de rază scurtă precum ZigBee, Bluetooth Low Energy (BLE) și IEEE 802.15.4 pot acoperi conectivitatea în zona locală. În plus, variantele IoT celulare (LTE-M, 5G mMTC) oferă interoperabilitate pe scară largă pentru implementări mobile și de densitate ridicată [13].

La straturile de rețea și sesiune, IoT folosește protocoale ușoare de încapsulare și mesagerie optimizate pentru medii constrânse. De exemplu, 6LoWPAN permite IPv6 peste legături cu consum redus de energie, în timp ce protocoalele de rutare precum RPL și CoRPL optimizează conectivitatea în rețelele mesh. Standardele la nivel de sesiune precum MQTT și CoAP susțin modele eficiente de comunicare de tip *publish - subscribe* și *request - response*, permițând scalabilitate masivă cu overhead minimal [12].

Această eterogenitate de protocoale creează o provocare semnificativă de interoperabilitate. Gateway-urile trebuie să fie capabile să traducă între multiple standarde, în timp ce asigură simultan comunicația sigură, eficientă și fiabilă. Platformele bazate pe SDR sunt deosebit de potrivite pentru această sarcină: prin reconfigurarea transceiver-elor și stivelor de protocoale în software, ele pot susține nativ multiple standarde IoT pe un singur dispozitiv hardware, reducând astfel fragmentarea și costurile.

Pentru a ilustra diversitatea tehnologiilor IoT, Tabelul 2.1 rezumă principalele protocoale pe nivelele ISO, evidențiind fragmentarea peisajului IoT actual.

Tab. 2.1. Nivele ISO, protocoale și standarde IoT

Nivel ISO		Standard / Protocol
Sesiune		MQTT, SMQTT, CoRE, DDS, XMPP, CoAP
Rețea	Încapsulare	6LoWPAN, 6TiSCH, 6Lo, Thread
	Rutare	RPL, CoRPL, CARP
Legătură de date		Wi-Fi, BLE, Z-Wave, ZigBee, 3G/LTE, NFC, LoRaWan

2.1.2 Reconfigurabilitate SDR pentru IoT

Unul dintre avantajele principale ale folosirii SDR pentru IoT este capacitatea de a se adapta dinamic la cerințe noi. Această reconfigurabilitate se extinde dincolo de actualizări software și la comutarea de protocoale în timpul rulării și parametrizarea adaptivă. În [3] este prezentat un gateway IoRT bazat pe SDR capabil să-și actualizeze setările de protocol în timp real, acomodând astfel o gamă eterogenă de noduri IoT. Figura 2.1 ilustrează acest proces. Diagrama arată cum modulele software sau fișierele de configurare sunt încărcate, validate și fie instalate, fie eliminate pe baza verificărilor. Aceasta permite actualizări live fără a întrerupe operațiunea întregului sistem, susținând adaptarea fără întreruperi la noile standarde IoT și cerințele de securitate.

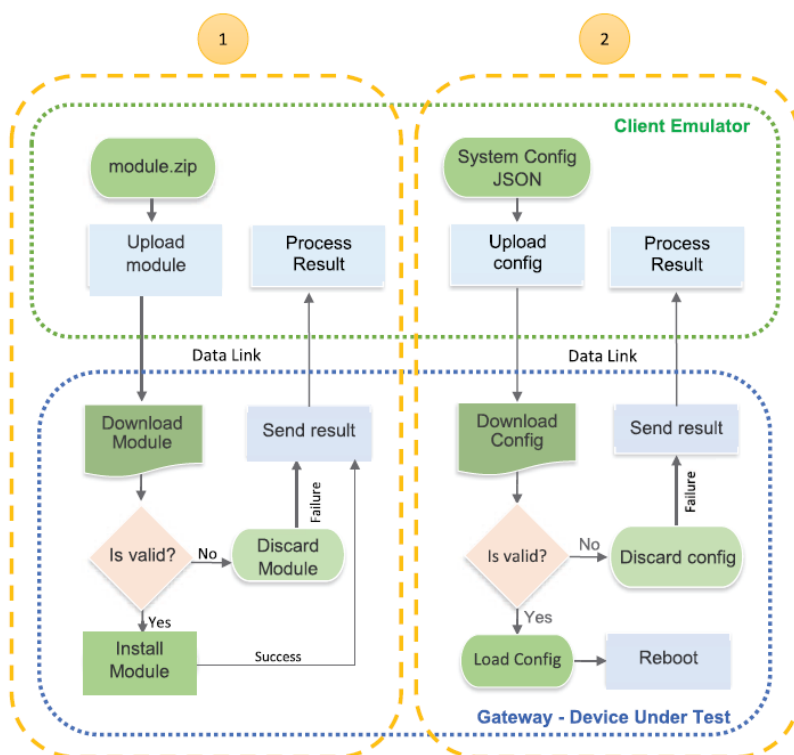


Fig. 2.1 – Mecanism de reconfigurare pentru un gateway IoT implementat cu SDR [3]

În plus față de adaptabilitatea la nivel de protocol, platformele SDR susțin și accesul dinamic la spectru (DSA), permițând dispozitivelor IoT să exploateze oportunist benzile de frecvență sub-utilizate. Prin integrarea detectării spectrului, gateway-urile IoT bazate pe SDR pot acționa ca noduri cognitive care alocă resursele eficient și minimizează interferența cu sistemele primare [4]. Aceasta este deosebit de benefică în implementările pentru zone cu o ocupație densă a spectrului RF, unde congestia canalelor poate degrada sever calitatea transmisiei.

Reconfigurabilitatea se manifestă în două moduri complementare. În primul rând, la nivelul protocolului, SDR permite comutarea între diferite scheme de modulație, strategii de codificare și protocoale de acces la mediu în timpul rulării. Aceasta asigură că gateway-urile IoT pot acomoda dispozitive diverse fără înlocuirea hardware. În al doilea rând, la nivelul sistemului, gateway-urile bazate pe SDR susțin implementarea de module software noi sau fișiere de configurare pentru a extinde funcționalitatea, optimiza performanța sau remedia vulnerabilitățile de securitate.

Validările experimentale confirmă că gateway-urile SDR reconfigurabile pot actualiza setările lor de protocol în timp real menținând continuitatea serviciului [4]. Această capacitate permite, de exemplu, implementarea unui nou driver LPWAN pentru a susține dispozitivele LoRaWAN, sau actualizarea unui modul criptografic ca răspuns la amenințări emergente, fără necesitatea intervenției hardware.

Reconfigurabilitatea este prin urmare o piatră de temelie a sistemelor IoT pregătite pentru viitor. Aceasta nu doar că extinde durata de viață a dispozitivelor și reduce costurile, ci asigură și că infrastructurile IoT rămân adaptabile în medii tehnologice și de reglementare în evoluție rapidă.

2.1.3 SDR pentru comunicații prin satelit

Comunicațiile prin satelit au servit în mod tradițional drept suport pentru servicii esențiale precum difuzarea de semnale audio-video, navigație și acoperirea globală cu bandă largă. Cu toate acestea, creșterea cererii de trafic multimedial, combinată cu proliferarea serviciilor de tip IoT și Machine-to-Machine (M2M), a creat presiuni suplimentare asupra infrastructurilor satelitare în ceea ce privește resursele spectrale, interoperabilitatea și adaptabilitatea serviciilor. SDR a fost tehnologia sinonimă cu flexibilitatea, oferind posibilitatea de a implementa și reconfigura sisteme avansate de comunicații prin satelit prin software mai degrabă decât prin reproiectarea hardware [5][6].

O contribuție importantă a SDR la comunicațiile prin satelit constă în dezvoltarea gateway-urilor prin satelit pentru IoT și IoRT (Internet of Remote Things). Gateway-urile clasice se bazează pe hardware specializat pentru a susține standarde specifice de modulație, ducând la costuri ridicate și scalabilitate slabă. În contrast, platformele SDR pot reconfigura dinamic interfețele lor radio, integrând protocoale cum ar fi LoRa, ZigBee sau LTE-M pentru IoT terestru cu standarde prin satelit precum DVB-S și E-SSA pentru uplink [3].

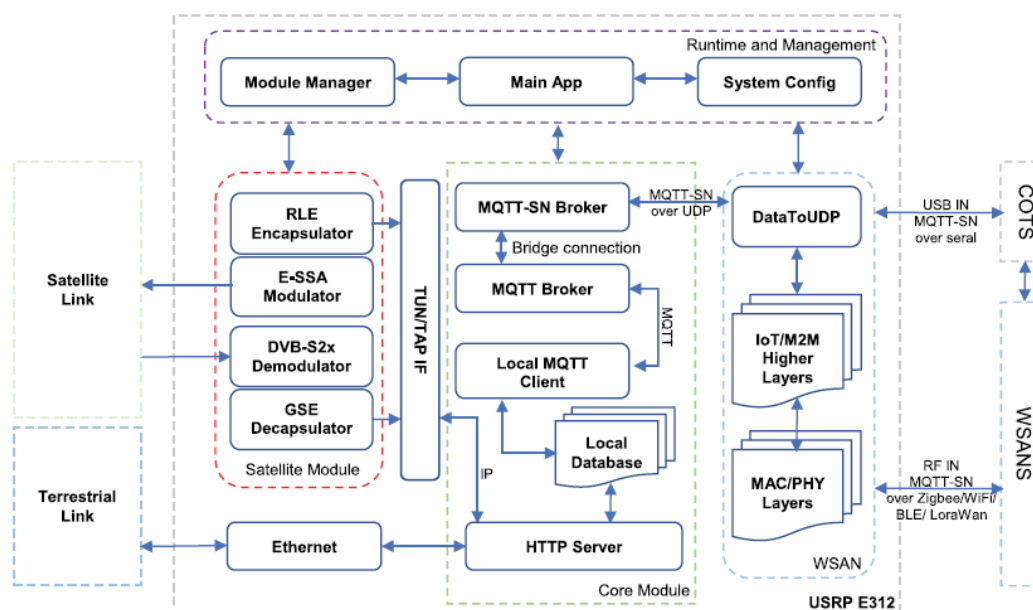


Fig. 2.2 – Gateway satelit - terestru reconfigurabil [3]

În [3], este descris un gateway IoRT bazat pe SDR care combină modulele IoT terestre Commercial Off-The-Shelf (COTS) cu interfețe prin satelit SDR reprogramabile. Implementările proof-of-concept au validat fezabilitatea reconfigurării în timp real a ambelor părți terestre și prin satelit, susținând dispozitive eterogene cu largă acoperire. Figura 2.2 ilustrează acest exemplu, o arhitectură de gateway IoT bazată pe SDR construită pe platforma SDR embedded USRP E310, la nivel de blocuri funcționale.

Gateway-ul integrează multiple front-end-uri radio - LoRaWAN, ZigBee, Wi-Fi și Bluetooth Low Energy (BLE) - și le conectează la diverse noduri senzor. Prin programabilitatea SDR, gateway-ul selectează dinamic interfața adecvată pentru fiecare dispozitiv, eliminând necesitatea mai multor gateway-uri dedicate.

2.1.4 Componenta software și era spațială 2.0

Sateți și industria aferentă trec printr-o schimbare paradigmatică adesea denumită Space 2.0, caracterizată de proliferarea constelațiilor de sateliți de top Low Earth Orbit (LEO), și CubeSats. În acest cadru, SDR joacă un rol central ca parte din "tehnologiile de legătură" care integrează sateliții, vehiculele aeriene fără pilot (unmanned aerial vehicles – UAV) și rețelele terestre în ecosisteme coerente de comunicații [5]. Prin combinarea SDR cu Software-Defined Networking (SDN) și virtualizare, sistemele spațiale pot ajunge la reconfigurarea dinamică, interoperabilitatea între rețele eterogene și experimentarea cu costuri reduse și cu hardware de standardizat [7][8].

În acest cadru, platformele SDR constituie interfețele RF reconfigurabile, SDN orchestrează fluxurile de rețea prin planuri de control programabile, iar NFV abstractizează funcțiile de comunicație (rutare, securitate, cache-ing) în module software care rulează pe hardware generic. Rezultatul este un ecosistem integrat unde sateliții, UAV-urile și infrastructurile terestre pot colabora fără întreruperi, adaptându-se dinamic la cererea utilizatorilor, disponibilitatea spectrului și cerințele de servicii.

Una dintre caracteristicile definitorii ale Space 2.0 este emergența sistemelor modulare, rentabile și scalabile, facilitată de componentele comerciale (Commercial Off-The-Shelf - COTS) combinate cu programabilitatea software. Această abordare reduce semnificativ costurile de implementare și permite abordări experimentale precum CubeSats și misiunile satelitare ale diferitelor centre de cercetare de pe lângă universități [8]. Prin încorporarea SDR în aceste sisteme, operatorii pot actualiza capacitățile de comunicare prin actualizări software mai degrabă decât prin înlocuiri costisitoare de hardware, extinzând durata de viață a sistemelor și asigurând compatibilitatea cu standardele în evoluție.

Deși acest exemplu este tipic pentru ecosistemul IoT terestru, aceleași principii arhitecturale se pot aplica și segmentului spațial. Payload-urile SDR reprogramabile la bordul sateliților pot susține multiple forme de undă, SDN poate reconfigura dinamic legăturile inter-satelit și satelit-sol, iar NFV explorează posibilitatea implementării de funcții virtuale direct în orbită sau la stațiile de sol edge. Colectiv, aceste capacități definesc o infrastructură spațială bazată pe software, unde alocarea resurselor, stivele de protocoale și serviciile nu mai sunt codate în hardware ci virtualizate și orchestrate dinamic.

În timp ce SDR îmbunătățește semnificativ reconfigurabilitatea și rentabilitatea, mai multe provocări rămân. Consumul de energie pe platformele încorporate este o barieră critică pentru

sistemele SDR operate pe baterii sau bazate pe CubeSat [9]. Detectarea spectrului în scenarii prin satelit este predispusă la inexactități din cauza problemelor nodurilor ascunse și a întârzierii extinse de round-trip inerente legăturilor geostaționare [10]. În plus, integrarea protocoalelor IoT terestre cu legăturile de întoarcere prin satelit introduce eterogenitate care complică asigurarea calității serviciului (quality of service - QoS).

Studiile recente au abordat aceste provocări explorând arhitecturi cooperative de detectare a spectrului implicând obiecte activate IoT, recunoașterea și clasificarea modulației condusă de AI [10], și parametrizarea predictivă a pipeline-urilor de procesare a semnalelor [1]. Integrarea inteligenței artificiale în platformele SDR permite adaptarea pro-activă la condițiile de canal variabile, îmbunătățind atât fiabilitatea cât și eficiența spectrală.

Cercetarea viitoare se așteaptă să consolideze rolul SDR în implementările de mega-constelații, backhaul IoT activat prin satelit și comunicații de urgență. Convergența SDR, SDN și AI va forma coloana vertebrală a infrastructurilor de comunicații prin satelit reziliente, scalabile și autonome.

2.1.5 Procesarea de tip edge și integrarea SDR

Implementarea calculului de tip edge în infrastructurile IoT îmbunătățește și mai mult rolul SDR. Prin încorporarea platformelor SDR la marginea rețelei, aproape de dispozitivele IoT, devine posibilă distribuirea sarcinilor ce presupun operațiuni computaționale complexe, de exemplu recunoașterea modulației, detectarea interferenței sau adaptarea protocolului de comunicație. Arhitecturile de tip edge reduc latența și îmbunătățesc scalabilitatea, permițând totodată implementarea inteligenței distribuite în rețeaua IoT [2].

Lucrări recente privind integrarea SDR cu Network Function Virtualization (NFV) ilustrează potențialul pentru gateway-urile IoT bazate pe SDR de a găzdui multiple funcții virtualizate cu o singură interfață RF [3]. De exemplu, inspecția pachetelor, detectarea anomaliilor sau modulele de securitate criptografice pot fi implementate ca funcții virtualizate alături de stivele de comunicație bazate pe SDR. Această co-localizare a resurselor de comunicație și procesare reduce overhead-ul și îmbunătățește fiabilitatea sistemului.

Figura 2.3 ilustrează o astfel de arhitectură - diagrama descrie platforma SDR operând la margine, conectată prin HTTPS la Microsoft Azure Cloud. Această interconectare susține două funcții complementare: (i) procesarea locală bazată pe SDR și modulația/demodulația semnalelor IoT, și (ii) calculul asistat de cloud, unde algoritmi AI și de învățare automată îmbunătățesc clasificarea semnalului, detectarea anomaliilor sau adaptarea protocolului.

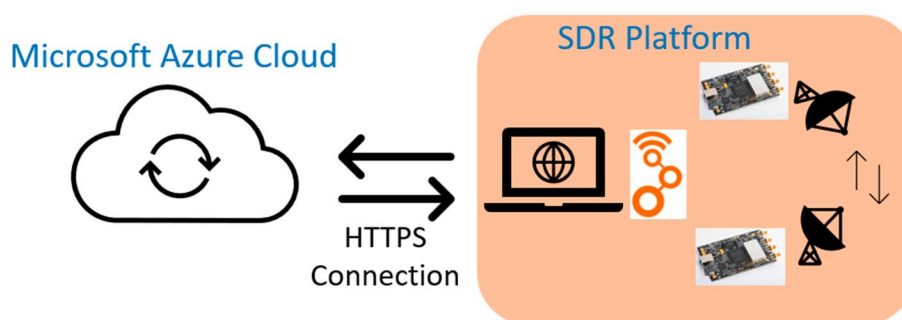


Fig. 2.3 – Integrare Edge-cloud folosind platforme SDR cu software GNU Radio [11]

Această arhitectură hibridă exemplifică continuum-ul edge-cloud în IoT: dispozitivele SDR acționează ca prima linie de procesare a datelor, în timp ce platformele cloud oferă resurse scalabile pentru sarcini intensiv computațional precum deep learning. În practică, această abordare se traduce în latență redusă, reziliența îmbunătățită împotriva întreruperilor de conectivitate și anonimizare sporită, deoarece datele sensibile pot fi procesate local în timp ce doar rezultatele agregate sau anonimizate sunt transmise către cloud.

Prin urmare, integrarea SDR cu edge computing și servicii cloud oferă o fundație flexibilă, scalabilă și sigură pentru aplicațiile IoT de următoarea generație, de la monitorizarea sănătății în timp real la orașele inteligente și automatizarea industrială.

2.1.6 Considerente de securitate

Proliferarea dispozitivelor IoT a ridicat preocupări substanțiale de securitate, deoarece multe dispozitive operează cu capacități computaționale limitate și protecție criptografică slabă. Platformele SDR oferă oportunități unice pentru a îmbunătăți securitatea IoT prin facilitarea:

- Actualizărilor dinamice ale protocoalelor criptografice - algoritmi de securitate pot fi actualizați prin software fără modificări hardware.
- RF fingerprinting și detectarea anomaliilor - SDR poate captura caracteristici fine ale semnalului pentru autentificarea dispozitivelor și detectarea intruziunilor [1].
- Rezistența la bruiaj - platformele SDR pot implementa tehnici adaptive de spectru răspândit sau strategii de salt în frecvență pentru a atenua interferența intenționată [4].

Cercetarea experimentală a arătat că testbed-urile bazate pe SDR pot replica și atenua eficient atacurile RF având ca și țintă dispozitivele IoT, inclusiv atacurile de replay, spoofing și jamming [5]. Aceasta poziționează platformele bazate pe SDR nu doar ca un facilitator de comunicație, ci și ca un executor de securitate în ecosistemele IoT.

2.1.7 Aplicații și studii de caz

Impactul practic al sistemelor IoT activate prin SDR poate fi înțeles cel mai bine prin implementarea lor în domenii din lumea reală. Prin combinarea flexibilității, rentabilității și interoperabilității, gateway-urile bazate pe SDR permit o gamă largă de aplicații care transcend limitările dispozitivelor convenționale cu funcții fixe.

Agricultura inteligentă reprezintă unul dintre cazurile de utilizare cele mai promițătoare. Fermele sunt din ce în ce mai echipate cu senzori distribuiți care monitorizează umiditatea solului, nivelurile de nutrienți și condițiile meteorologice. Aceste dispozitive se bazează adesea pe protocoale de comunicație diverse, de la LoRaWAN pentru senzorii de câmp pe distanțe lungi la ZigBee sau BLE pentru echipamentele localizate. Gateway-urile SDR permit integrarea fără întreruperi a acestor dispozitive eterogene, în timp ce backhaul-ul prin satelit asigură conectivitatea chiar și în zonele rurale îndepărtate. Prin reconfigurarea dinamică pentru a susține standardele LPWAN emergente, gateway-urile SDR extind durata de viață a sistemelor și reduc costul implementărilor agricole pe scară largă.

Asistența medicală și viața asistată ambient (ambien assisted living - AAL) este un alt domeniu critic. Dispozitivele de tip wearables și senzorii medicali oferă monitorizarea continuă a ritmului cardiac, saturației de oxigen din sânge și activității fizice. Un gateway de tip SH bazat

pe SDR poate agrega aceste semnale, aplica inteligența locală la margine pentru detectarea anomaliilor și înaintă alertele critice prin legături broadband sau prin satelit. Integrarea cu interfețele multimedia precum HbbTV (abordată în Secțiunea 2.3) permite livrarea notificărilor de sănătate direct la televizoare, asigurând accesibilitatea pentru utilizatorii în vârstă sau mai puțin înclinați tehnologic. Această combinație de flexibilitate SDR și servicii IoT de sănătate susține îngrijirea medicală proactivă, centrată pe casă.

IoT-ul industrial (IIoT) beneficiază și el de adaptabilitatea SDR. Fabricile operează adesea cu un amestec de sisteme wireless de tip legacy (de ex., legături proprietare sub - GHz) și standarde moderne (de ex., 5G mMTC). Gateway-urile SDR pot emula și conecta aceste sisteme, permițând migrarea treptată către tehnologii mai noi fără a renunța la infrastructura existentă. În plus, prin găzduirea funcțiilor de rețea virtualizate alături de stivele de comunicație SDR, gateway-urile pot implementa caracteristici avansate precum întreținerea predictivă, detectarea anomaliilor în timp real și monitorizarea securității cibernetice [12].

Managementul inteligent este un alt exemplu pentru aplicabilitatea SDR în IoT. Clădirile rezidențiale și comerciale sunt din ce în ce mai mult echipate cu contoare inteligente, panouri solare și sisteme de stocare a energiei. Aceste componente se bazează adesea pe protocoale precum NB-IoT, Wi-Fi sau ZigBee. Gateway-urile SDR pot asigura interoperabilitatea, permițând totodată strategii de răspuns la cerere prin programarea adaptivă. Prin procesarea datelor energetice local și coordonarea cu platformele cloud, aceste sisteme optimizează consumul casnic contribuind la stabilizarea rețelei inteligente mai largi.

În sfârșit, gestiunea situațiilor de urgență evidențiază contribuția unică a SDR la reziliența rețelelor de comunicații. În scenarii unde rețelele terestre de comunicații sunt deteriorate sau congestionate, gateway-urile bazate pe SDR pot comuta rapid la legături prin satelit sau moduri wireless ad-hoc pentru a menține comunicația. Această flexibilitate este critică pentru cei care coordonează operațiile de prim-ajutor, precum și pentru dispozitivele IoT care monitorizează parametri de mediu pentru a preveni incendiile, inundațiile sau cutremurele.

Aceste studii de caz demonstrează versatilitatea SDR în susținerea aplicațiilor IoT eterogene. De la ferme la fabrici și de la case la sisteme de reacție în caz de calamități sau situații de urgență, gateway-urile SDR oferă coloana vertebrală reconfigurabilă necesară pentru a integra dispozitive diverse, susține standarde în evoluție și livra servicii fiabile în condiții variabile.

2.2 IoT pentru aplicații Smart Home

Conceptul casei inteligente (Smart Home - SH) a evoluat de la sistemele timpurii de automatizare care controlau iluminatul sau încălzirea către ecosisteme extrem de interconectate care integrează diferiți senzori, acționarea, comunicația și luarea de decizii inteligentă. Casa inteligentă modernă implementează paradigma IoT într-un mediu domestic, creând servicii centrate pe utilizator care îmbunătățesc confortul, eficiența energetică, monitorizare sănătății și securitatea. Conform proiecțiilor recente, piața globală pentru dispozitive și aplicații SH se așteaptă să depășească 250 miliarde \$ până în 2030, determinată de cererea crescută a consumatorilor pentru automatizare și gestiunea consumului energetic, precum și de stimulentele guvernamentale pentru eficientizare energetică și dezvoltare sustenabilă [14].

Integrarea IoT / SH necesită tehnologii robuste de comunicație, cadre de interoperabilitate și arhitecturi scalabile. Platformele SDR și gateway-urile IoT, precum au fost introduse în secțiunile anterioare, oferă flexibilitatea de a acomoda dispozitive eterogene, multiple standarde de comunicație și cerințe dinamice ale utilizatorilor. Convergența IoT cu SDR întărește și mai mult această viziune prin permiterea conectivității multi-standard, flexibilității protocoalelor și infrastructurilor de comunicație sigure.

2.2.1. Tehnologii și arhitecturi de comunicație SH

Aplicațiile SH sunt structurate pe trei straturi fundamentale: stratul de percepție, unde senzorii adună date de mediu și fiziologice; stratul de rețea, care conectează dispozitivele prin standarde eterogene; și stratul aplicației, unde serviciile utilizatorilor sunt orchestrate. Protocoale precum ZigBee, BLE, Z-Wave, Wi-Fi, LoRaWAN și NB-IoT coexistă, fiecare optimizat pentru aplicații specifice ca și rază de acțiune, throughput și eficiență energetică.

Coexistența acestor tehnologii creează atât oportunități cât și provocări. Pe de o parte, permite optimizarea specifică aplicației: de exemplu, BLE este ideal pentru dispozitive wearable cu consum redus de energie, în timp ce Wi-Fi permite streaming video de înaltă rezoluție. Pe de altă parte, această eterogenitate complică integrarea, necesitând adesea gateway-uri multi-standard care să poată armoniza protocoalele și să ofere interfețe unificate pentru aplicații. Aici, SDR joacă un rol crucial prin posibilitatea gateway-ului să se adapteze dinamic la standarde în evoluție și medii RF complexe.

Figura 2.4 exemplifică o astfel de integrare. Aceasta arată cum dispozitivele de monitorizare a sănătății (de ex., senzori wearable) se conectează prin Bluetooth sau Wi-Fi la un gateway de casă inteligentă, care încorporează cadrul HbbTV 2.0.1 atât pentru semnalizarea de control (CS) cât și pentru serviciile multimedia (MS). Gateway-ul nu doar că înaintea datele de sănătate către un televizor sau set-top box prin IP, ci interacționează și cu actuatori inteligenți (de ex., sisteme de iluminat), oferind o interfață integrată care îmbină asistența medicală, automatizarea și divertismentul într-un singur ecosistem.

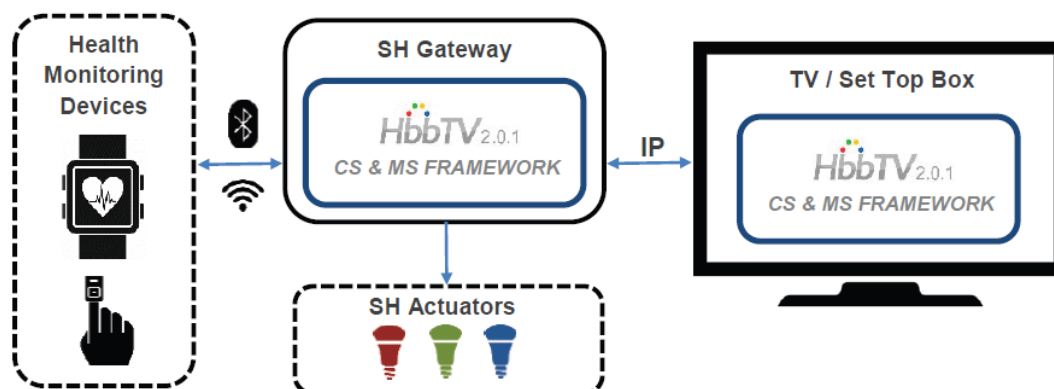


Fig. 2.4 – Arhitectura unui gateway Smart Home care integrează HbbTV pentru monitorizarea stării de sănătate și pentru servicii multimedia

Acest exemplu arată cum IoT în casele inteligente combină din ce în ce mai mult asistența medicală, managementul energiei și multimedia într-o singură infrastructură. Platformele SDR întăresc această arhitectură prin oferirea reconfigurării dinamice, permițând integrarea protocoalelor noi prin actualizări software, evitând astfel ieșirea prematură a dispozitivelor din uz [1][2].

2.2.2. Gateway-uri și cadre de interoperabilitate

Gateway-ul este elementul central al casei inteligente, permițând dispozitivelor eterogene să interacționeze cu serviciile cloud, accesul broadband sau chiar legături prin satelit în contexte îndepărtate. Implementările hardware combină de obicei procesoare încorporate (de ex., Raspberry Pi, sisteme bazate pe procesoare ARM) cu module SDR precum USRP B210 sau BladeRF Micro xA4.

Din perspectiva software, interoperabilitatea se realizează prin middleware (de ex., Home Assistant, OpenHAB) și protocoale ușoare precum MQTT și CoAP, care asigură comunicarea eficientă cu dispozitive constrânse. SDR îmbunătățește aceste gateway-uri prin permiterea emulației protocoalelor și traducerii—de exemplu, transformând mesajele ZigBee de la sistemele de iluminat în pachete MQTT înaintate prin Wi-Fi. Tabelul 2.2 prezintă un rezumat al caracteristicilor standardelor și protocoalelor de comunicații din domeniul SH.

Tabelul 2.2 – Protocoale de comunicație IoT în gateway-uri SH

Protocol	Rază de acțiune	Rata de transfer	Consum energetic	Aplicații tipice
ZigBee	10-100 m	250 kbps	Redus	Iluminat, senzori
BLE	1-50 m	125 kbps-2 Mbps	Foarte redus	Dispozitive portabile, trackere
Wi-Fi	10-50 m	10-600 Mbps	Ridicat	Multimedia, control
LoRaWAN	1-10 km	0,3-50 kbps	Foarte redus	Contoare inteligente, senzori exteriori
NB-IoT	1-10 km	20-200 kbps	Redus	Contorizare utilități, sănătate

Prin consolidarea acestor protocoale într-un singur gateway bazat pe SDR, casele inteligente evită fragmentarea, asigură compatibilitatea cu dispozitive mai vechi și susțin evoluția pe termen lung.

2.2.3. Interpretarea datelor în cadrul conceptului SH

În timp ce conectivitatea este fundamentală pentru casele inteligente, valoarea reală SH apare din capacitatea de a transforma datele brute în informații interpretabile. Această inteligență se realizează printr-o combinație stratificată de analitica de tip edge și calculul cloud.

În punctul de acces la rețea (edge), gateway-urile SH sau dispozitivele locale efectuează analiza în timp real a fluxurilor de date. De exemplu, citirile accelerometrului de la un dispozitiv wearable pot fi procesate local pentru a detecta pattern-uri anormale de mișcare precum căderi, declanșând alerte imediate fără a se baza pe conectivitatea cloud. Inteligența localizată de tip edge reduce latența, îmbunătățește fiabilitatea în cazul accesului intermitent la Internet și îmbunătățește reziliența datelor sensibile. Framework-uri de tip TinyML sau TensorFlow Lite

fac posibilă implementarea modelelor de rețele neuronale direct pe gateway-uri sau dispozitive încorporate, aducând capacitatea de analiză avansată mai aproape de sursa de date [11].

La nivelul cloud, sarcinile intensive în resurse precum modelarea predictivă, analiza comportamentală pe termen lung sau integrarea datelor multiple ale casei sunt efectuate. Platformele bazate pe cloud agregă volume mari de informații și aplică tehnici avansate, inclusiv învățarea profundă, pentru a permite servicii precum monitorizarea personalizată a sănătății, prognoza cererii energetice sau recomandările adaptive de divertisment. Acest model pe două nivele asigură că deciziile urgente sunt tratate local, în timp ce optimizările complexe beneficiază de scalabilitatea computațională a cloud-ului.

O dezvoltare promițătoare este adoptarea învățării federalizate, unde modelele locale sunt antrenate direct pe dispozitivele casei și doar actualizările anonimizate sunt partajate cu cloud-ul. Această abordare păstrează privacy-ul în timp ce permite îmbunătățirea modelului global, o caracteristică critică pentru aplicații sensibile precum monitorizarea medicală sau analiza comportamentului utilizatorilor. Gateway-urile bazate pe SDR joacă un rol important aici prin clasificarea traficului de date, prioritizarea fluxurilor critice și gestionarea eficientă a comunicării între dispozitivele locale și cloud.

Fluxul de date edge-cloud în SH este prezentat în figura 2.4 pentru a ilustra conceptele expuse în paragrafele precedente. Aceasta descrie cum dispozitivele IoT generează date brute, care sunt mai întâi procesate de un gateway de casă inteligentă activat SDR la margine (efectuând detectarea anomaliilor și prioritizarea), și apoi înaintate selectiv către serverele cloud pentru analiză ulterioară și stocare pe termen lung. Această figură oferă o vizualizare clară a împărțirii sarcinilor între analitica la margine și cloud, subliniind natura hibridă a inteligenței casei inteligente [11].

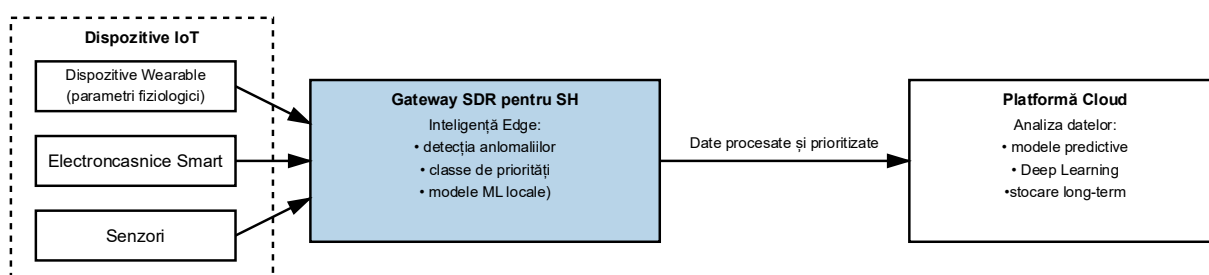


Fig. 2.5 – Diagrama de date pentru aplicații edge-cloud în domeniul SH

În rezumat, inteligența din SH se bazează pe sinergia dintre operațiuni analitice edge și cloud, îmbunătățite de flexibilitatea platformelor SDR. Inteligența edge asigură reactivitatea și constrângerile de privacy, în timp ce inteligența cloud oferă scalabilitate și capacități avansate de învățare. Împreună, ele transformă casa inteligentă de la o rețea pasivă de dispozitive într-un ecosistem activ, adaptiv care poate anticipa și răspunde la nevoile utilizatorilor.

2.2.4 Securitate, confidențialitate și managementul încrederii

Integrarea IoT în SH introduce nu doar oportunități pentru confort și eficiență sporite, ci și provocări semnificative privind securitatea, confidențialitatea și încrederea. Sistemele IoT casnice gestionează date extrem de sensibile — de la informațiile de sănătate colectate de

dispozitivele wearable, la comportamente zilnice înregistrate de către dispozitivele inteligente, la pattern-urile de consum energetic măsurate de contoarele inteligente. Compromiterea unor astfel de date poate duce la violări ale sferei private, supraveghere neautorizată sau controlul malefic al sistemelor critice precum încuierile sau dispozitivele de îngrijire medicală [16].

Amenințările de securitate în casele inteligente sunt diverse și adesea interdependente. Atacurile la nivelul comunicării includ ascultarea, spoofing-ul, replay-ul și jam-ul, în timp ce vulnerabilitățile la nivel de sistem sunt accesul neautorizat, injectarea de malware sau exploatarea actualizărilor de firmware nesigure. Botnet-urile pe scară largă, precum Mirai, au demonstrat potențialul devastator al dispozitivelor IoT compromise, care pot fi orchestrate pentru a lansa atacuri distribuite de negare a serviciului (distributed denial of service - DDoS) [15]. Aceste amenințări sunt deosebit de periculoase în contextul SH, unde utilizatorii sunt de obicei non-experti și dispozitivele au resurse constrânse, limitându-le capacitatea de a implementa protocoale de securitate puternice.

Platformele SDR oferă oportunități unice pentru a îmbunătăți securitatea casei inteligente. La straturile fizice, SDR permite operațiuni de RF fingerprinting, care exploatează variațiile induse de hardware în emisiile radio pentru a identifica în mod unic dispozitivele și a preveni atacurile de tip spoofing [19]. În plus, gateway-urile SDR pot implementa mecanisme adaptabile de criptare, ajustând dinamic puterea criptografică în funcție de capacitățile dispozitivelor și condițiile actuale ale rețelei. De exemplu, cifruri ușoare pot fi folosite pentru senzorii cu consum redus de energie, în timp ce algoritmi mai puternici sunt aplicați pentru legăturile de bandă largă sau fluxuri de date critice pentru sănătate.

O altă capacitate semnificativă a SDR este monitorizarea spectrului RF în timp real și detectarea anomaliilor. Prin analizarea continuă a mediului radio, gateway-urile SDR pot detecta pattern-uri anormale ce pot fi un semn pentru tentative de bruij, replay sau alte transmisii neautorizate. Odată identificate aceste transmisii, gateway-ul poate inițializa contramăsuri precum salturi în frecvență (frequency hopping – FH), comutarea canalelor sau fallback la protocoale alternative. Această adaptabilitate oferă un nivel de reziliență pe care sistemele de comunicație statice nu-l pot atinge.

În plus față de aceste apărări la nivelurile fizic și de legătură, framework-uri de gestionare a încrederii sunt necesare pentru a asigura interacțiuni sigure între dispozitive eterogene. Soluțiile actuale combină autentificarea activată prin SDR cu registrele distribuite bazate pe blockchain, creând urmări de audit imuabile ale evenimentelor de comunicație[20]. În astfel de cadre, gateway-ul SDR acționează ca un portofel blockchain, înregistrând transmisiile verificate de la dispozitivele IoT și garantându-le integritatea. Această abordare descentralizată reduce dependența de autorități centralizate și întărește încrederea utilizatorului în fiabilitatea sistemului.

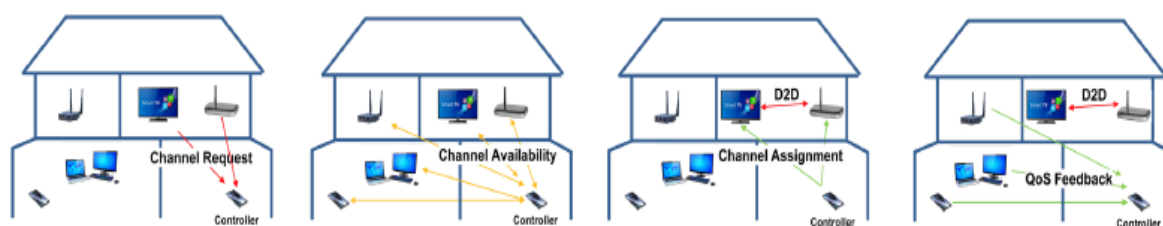


Fig. 2.6 – Spectrum sensing cooperativ în cadrul unei case inteligente

Figura 2.6 ilustrează cum dispozitivele IoT dintr-o casă inteligentă pot colabora pentru a îmbunătăți securitatea. Figura ilustrează o arhitectură de detectare cooperativă unde multiple noduri contribuie cu observații despre condițiile canalului. În contextul casei inteligente, acest principiu poate fi aplicat pentru a detecta intruziuni sau interferențe în mod colaborativ, permițând apărarea colectivă împotriva atacurilor. Astfel de framework-uri cooperative demonstrează că chiar și dispozitivele cu resurse constrânse pot contribui la securitatea colectivă a caselor inteligente.

Asigurarea securității, confidențialității și încrederii în casele inteligente necesită o abordare pe mai multe straturi care se întinde de la interfața radio fizică la managementul încrederii la nivel de sistem. Platformele SDR îmbunătățesc această abordare prin încorporarea mecanismelor reconfigurabile și adaptive, oferind nu doar interoperabilitatea și performanța, ci și reziliența împotriva amenințărilor emergente. Pe măsură ce casele inteligente cresc în complexitate și importanță, capacitatea gateway-urilor SDR de a acționa atât ca hub-uri de comunicație cât și aplicatori de securitate va fi decisivă pentru implementarea lor sigură și durabilă.

2.2.5 Direcții viitoare și oportunități de cercetare

Evoluția caselor inteligente va fi modelată de mai multe direcții cheie:

- Integrarea 5G/6G va asigura comunicații ultra-fiabile cu latență redusă (URLLC), permițând aplicații critice precum supravegherea medicală la distanță.
- Modelele de tip digital twin vor putea crea modele virtuale ale casei, simulând ocuparea și fluxurile energetice pentru optimizarea predictivă.
- Inteligența ambientală (AmI) va permite anticiparea nevoilor utilizatorilor, permițând adaptarea pro-activă a mediului (iluminat, încălzire, alertele de sănătate).
- Green IoT va pune accent pe durabilitate, folosind colectarea energiei, modulele SDR ultra-low-power și programarea inteligentă [11].
- Design-ul axat pe utilizator va asigura încrederea și utilizabilitatea, abordând temerile actuale privind siguranța datelor și făcând sistemele intuitive pentru utilizatorii non-tehnici [18].

Aceste direcții viitoare reafirmă rolul SDR ca tehnologie de bază în casele inteligente viitoare. Capacitatea sa de a integra standarde eterogene, de a încorpora inteligența adaptivă și de a aplica mecanisme de securitate asigură viitorul ecosistemelor IoT domestice, interoperabile și durabile.

2.3 Televiziunea în bandă largă și aplicații HbbTV în SH

Tranziția de la difuzarea analogică la cea digitală a transformat radical televiziunea de la un mediu unidirecțional într-o platformă interactivă care combină serviciile broadcast și broadband. Această convergență este implementată în standardul Hybrid Broadcast Broadband TV (HbbTV), care permite conținutului linear să fie îmbogățit cu servicii interactive livrate prin rețelele IP. Ecosistemul rezultat combină acoperirea largă și scalabilitatea tipică pentru serviciile broadcast cu personalizarea și interactivitatea broadband-ului.

Aplicațiile de televiziune broadband și HbbTV se extind acum mult dincolo de divertisment, incorporând domenii precum monitorizarea sănătății, e-learning și publicitatea inteligentă. Integrarea lor cu sistemele IoT și bazate pe SDR consolidează viziunea unui mediu multimedia convergent, unde conținutul și serviciile sunt adaptate fără întreruperi utilizatorilor în contexte domestice.

2.3.1 Evoluția difuzării către platforme hibride

Evoluția sistemelor de difuzare în ultimele două decenii reflectă o tranziție de la infrastructuri unidirecționale, rigide către platforme hibride și interactive. Inițial, introducerea televiziunii digitale terestre, prin cablu și prin satelit cu ajutorul standardelor DVB-T/T2, DVB-C/C2 și DVB-S/S2 a îmbunătățit semnificativ atât eficiența spectrală cât și calitatea conținutului livrat, permițând introducerea serviciilor de înaltă definiție (HD) și ultra-înaltă definiție (UHD). Trecerea la televiziunea digitală a eliberat și resurse valoroase de spectru în benzile UHF, creând oportunități pentru implementări broadband și IoT [12].

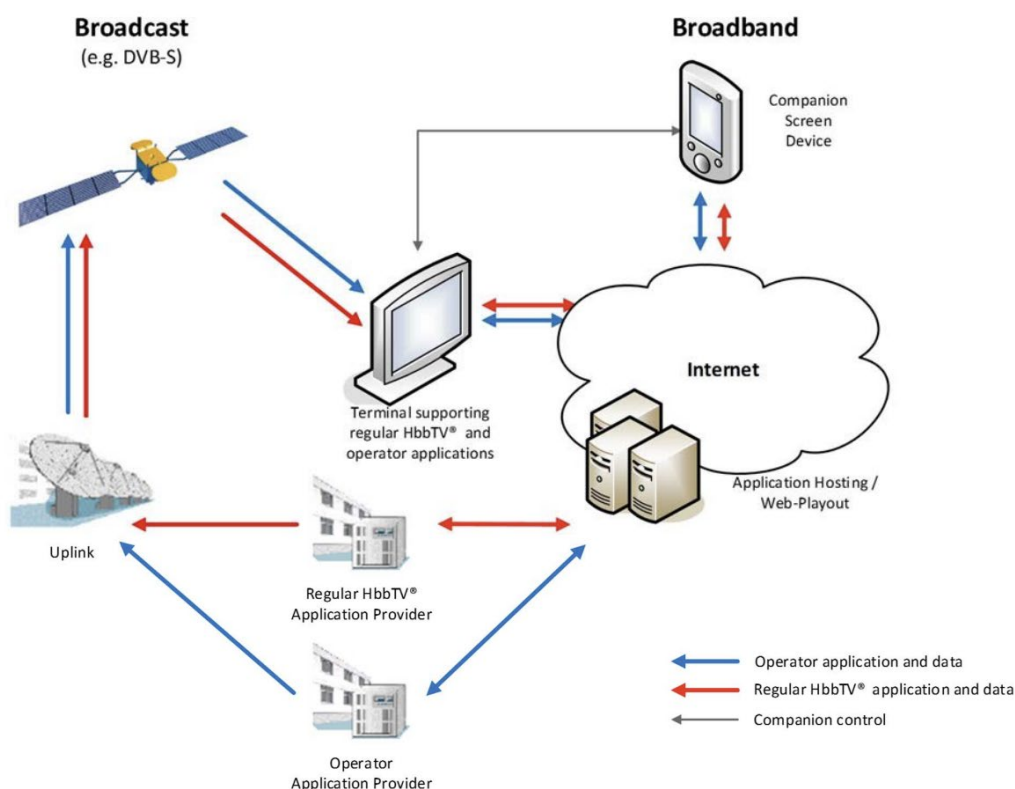


Fig. 2.7 Arhitectura hibridă broadcast – broadband conformă cu standardul HbbTV, bazată pe specificațiile ETSI TS 102 796 [14]

Cu toate acestea, pasul cel mai important a fost integrarea modelelor de transmisiune broadcast și broadband într-o arhitectură unificată. Această convergență permite operatorilor să exploateze scalabilitatea rețelelor broadcast pentru distribuția de conținut în masă, în timp ce exploatează simultan personalizarea și interactivitatea serviciilor bazate pe IP. Standardul Hybrid Broadcast Broadband TV (HbbTV) întruchiează exact acest principiu, combinând

livrarea de conținut liniar bazat pe standardele DVB cu aplicații și servicii broadband, accesibile prin televizoare și set-top box-uri conectate la rețea [13].

Acest model hibrid satisface atât necesitățile de scalabilitate cât și cele de personalizare ale serviciilor de tip broadcasting. Pe de o parte, distribuția broadcast pe scară largă rămâne cea mai eficientă metodă pentru livrarea către utilizatorul final a evenimentelor live sau a programelor consumate pe scară largă de către milioane de utilizatori simultan. Pe de altă parte, serviciile broadband permit video-on-demand, publicitate țintită, aplicații interactive și integrarea cu ecosistemele casei inteligente. Prin combinarea acestor abordări, HbbTV oferă difuzorilor un răspuns competitiv la platformele over-the-top (OTT) precum Netflix și YouTube, care se bazează exclusiv pe distribuția broadband.

Evoluția către sistemele hibride a fost modelată de mai mulți factori motori:

- progresul tehnologic, cu televizoare conectate la rețea (wireless sau cablat) și set-top box-uri capabile să susțină atât recepția DVB-T/C/S cât și conectivitatea IP.
- presiunea utilizatorilor finali în ceea ce privește flexibilitatea, interactivitatea și personalizarea conținutului.
- competiția cu operatorii broadband care i-a obligat pe operatorii broadcast să-și alinieze ofertele cu modelele de servicii OTT.
- politicile și reglementările naționale, inclusiv cerințele de eficiență spectrală și investițiile publice în inovația digitală.

Migrarea către platforme hibride broadcast - broadband reprezintă o redefinire fundamentală a televiziunii în era digitală. Standardul HbbTV asigură relevanță serviciilor broadcast prin combinarea eficienței rețelelor tradiționale cu personalizarea serviciilor broadband, poziționând televiziunea ca un hub central pentru ecosistemele convergente de comunicație și divertisment.

2.3.2 Calitatea experienței (QoE) în broadcasting și media multisenzorială

Conceptul de Calitate a Experienței (Quality of Experience — QoE) a apărut ca răspuns la limitările modelului tradițional de evaluare a serviciilor multimedia exclusiv prin metrici tehnice de tip QoS (Quality of Service). Dacă QoS descrie proprietăți obiective ale rețelei — lățime de bandă, latență, jitter, pierdere de pachete — QoE integrează percepția subiectivă a utilizatorului, așteptările sale, contextul de utilizare și starea emoțională ca variabile fundamentale ale calității serviciului. Definiția consacrată propusă de QUALINET descrie QoE ca „gradul de satisfacție sau insatisfacție al utilizatorului unei aplicații sau servicii, perceput subiectiv, în urma îndeplinirii așteptărilor sale cu privire la utilitatea și/sau plăcerea aplicației, în lumina personalității și stării sale curente” [15]. Această formulare subliniază că QoE nu poate fi redusă la nicio metrică tehnică singulară, ci reprezintă un construct multidimensional care operează la intersecția dintre tehnologie, psihologie și context.

În contextul platformelor hibride broadcast-broadband, QoE devine un criteriu central de design. Spre deosebire de sistemele tradiționale de difuzare — care asigurau în principal acoperirea și calitatea semnalului — mediile hibride trebuie să garanteze atât fiabilitatea tehnică a transmisiei, cât și satisfacția subiectivă a utilizatorului final, în condiții de conținut diversificat, dispozitive eterogene și niveluri variate de interactivitate.

Metodele subiective reprezintă standardul de referință în evaluarea QoE, deoarece capturează direct percepția utilizatorului. Pentru serviciile de broadcasting, standardul fundamental este scara MOS (Mean Opinion Score, ITU-T P.800), care colectează opiniile utilizatorilor pe o scară de la 1 (inacceptabil) la 5 (excelent) cu privire la calitatea percepută a unui stimul audio sau video. Testele ACR (Absolute Category Rating) prezintă stimulii individual și solicită o evaluare absolută per stimul, în timp ce testele DCR (Degradation Category Rating) prezintă stimulii în perechi — original și degradat — și solicită evaluarea degradării percepute. DSIS (Double Stimulus Impairment Scale) este o variantă similară, utilizată extensiv pentru evaluarea calității video broadcast.

Pentru evaluarea continuă a calității percepute pe durata unui clip, SSCQS (Single Stimulus Continuous Quality Scale) permite utilizatorului să ajusteze în permanență un cursor de calitate, generând o curbă temporală a QoE corelabilă cu evenimentele tehnice din fluxul media — buffering, artefacte de compresie, desincronizare audio-video. Această metodă este deosebit de valoroasă pentru broadcasting live, unde calitatea fluctuează în funcție de condițiile de rețea și de dinamica conținutului.

Dat fiind costul ridicat al studiilor subiective la scară largă, **metricile obiective** de calitate video sunt utilizate extensiv ca predictor ai QoE percepute. Metricile full-reference — care compară semnalul degradat cu un semnal de referință — includ PSNR (Peak Signal-to-Noise Ratio), cea mai simplă și mai utilizată, și SSIM (Structural Similarity Index Measure), care modelează percepția vizuală umană prin compararea structurii locale, luminanței și contrastului. VMAF (Video Multimethod Assessment Fusion), dezvoltat de Netflix, combină mai mulți descriptori vizuali percepțuali cu un model de machine learning antrenat pe date subiective, obținând corelații mai ridicate cu scorurile MOS decât PSNR sau SSIM individual. Pentru conținut fără referință disponibilă — scenariul tipic în broadcasting — metricile no-reference precum BRISQUE și NIQE estimează calitatea percepută din statisticile locale ale imaginii. Aceste metrici sunt integrate în sisteme de monitorizare continuă a calității în lanțul de distribuție broadcast.

QoE în serviciile de broadcasting este influențată de mai mulți factori interdependenți. Pe partea rețelei, parametri precum latența, jitter-ul, pierderea pachetelor și bitrate-ul afectează direct continuitatea și claritatea fluxurilor. Pe partea aplicației, designul interfeței, reactivitatea serviciilor interactive și fiabilitatea sistemelor de recomandare determină satisfacția utilizatorului. Factorii contextuali — tipul dispozitivului, mediul de vizualizare, preferințele individuale — modelează percepția calității serviciului. Tabelul 2.3 prezintă principalele metrici QoE utilizate în mediile hibride broadcast-broadband.

Tabelul 2.3 – Metrici QoE pentru medii hibride broadcast-broadband

Metrică	Tip	Impact asupra utilizatorului	Aplicație exemplu
Latență (RTT)	Obiectivă	Receptivitate interactivă	Vot, jocuri, EPG
Jitter	Obiectivă	Întreruperi video	Streaming live
Pierdere pachete	Obiectivă	Artefacte vizuale, freeze	Transfer date HbbTV
Rată de biți	Obiectivă	Rezoluție, claritate	Video UHD, 4K
MOS / ACR	Subiectivă	Satisfacție globală	Evaluare codec, QoE A/V
SSIM / VMAF	Obiectivă full-ref.	Fidelitate percepțională	Monitorizare calitate broadcast
Timp de pornire	Obiectivă	Frustrare utilizator	Servicii la cerere (VoD)
Frecvență rebuffering	Obiectivă	Continuitate vizionare	Streaming adaptiv MPEG-DASH

Odată cu extinderea serviciilor broadcast dincolo de modalitățile audiovizuale clasice — prin adăugarea de efecte haptice, olfactive, termice și de flux de aer în cadrul paradigmei mulsemmedia — metodologiile de evaluare QoE trebuie adaptate pentru a captura valoarea adăugată de aceste dimensiuni senzoriale suplimentare. Standardul MPEG-V (ISO/IEC 23005) a definit Sensory Effect Metadata (SEM) ca mecanism de sincronizare a efectelor senzoriale cu conținutul media, creând cadrul tehnic pentru broadcasting mulsemmedia. Evaluarea QoE în acest context nu mai poate fi redusă la calitatea video sau audio — ea trebuie să integreze coerența temporală a efectelor senzoriale cu conținutul, intensitatea acestora în raport cu profilul senzorial individual al utilizatorului și absența fenomenului de over-stimulation, documentat în literatura de specialitate ca degradant al QoE globale atunci când pragurile individuale de toleranță la stimuli sunt depășite.

Studiile de evaluare QoE pentru sisteme mulsemmedia utilizează metodologii combinate: testele subiective cu scale MOS adaptate evaluează satisfacția globală, în timp ce testele ACR per modalitate senzorială identifică contribuția individuală a fiecărui tip de efect la QoE globală. Cercetările proprii au demonstrat că augmentarea multisenzorială a conținutului TV îmbunătățește semnificativ ratingurile utilizatorilor față de condiția exclusiv audiovizuală, cu efecte deosebit de pronunțate pentru fluxul de aer și stimulii olfactivi, în timp ce vibrația haptică prezintă variabilitate mai mare între utilizatori. Modelele non-liniare parametriche, optimizate prin algoritmi de tip Particle Swarm Optimization (PSO), captează relația exponențial-descrescătoare dintre numărul de modalități senzoriale adăugate și valoarea marginală a fiecăreia pentru QoE globală — un fenomen de saturație perceptuală care trebuie luat în considerare în proiectarea sistemelor mulsemmedia adaptive.

Dincolo de metodele subiective clasice, care necesită întreruperea experienței pentru administrarea chestionarelor, metodele implicite și fiziologice furnizează indicatori ai stării interne a utilizatorului în timp real. Analiza direcției privirii (eye gaze) și a expresiei faciale au demonstrat potențial ca predictorii ai stării de angajament și ai QoE percepute în sisteme de tip SH, eliminând necesitatea evaluărilor post-sesiune. Conductanța galvanică a pielii (EDA) și variabilitatea ritmului cardiac (HRV) sunt corelate cu nivelul de excitație emoțională și cu gradul de imersiune în conținut, furnizând semnale complementare care nu pot fi capturate prin chestionare retrospective. Integrarea acestor metode implicite în sisteme de streaming adaptiv, unde QoE este estimată continuu și utilizată ca semnal de control pentru ajustarea calității transmisiei, reprezintă o direcție activă de cercetare, cu aplicabilitate directă în contextul platformelor HbbTV și al serviciilor mulsemmedia distribuite prin rețele broadcast-broadband hibride [3].

Integrarea personalizării utilizatorului adaugă o altă dimensiune la QoE. Sistemele hibride pot exploata conectivitatea broadband pentru a adapta serviciile în funcție de preferințele, comportamentele și profilurile utilizatorilor — recomandări de conținut personalizate, publicitate țintită, sau, în contextul smart home, recomandări de sănătate și eficiență energetică integrate cu dispozitivele IoT. Această personalizare trebuie echilibrată cu protecția datelor personale și conformitatea cu GDPR, creând o responsabilitate dublă pentru furnizorii de servicii: îmbunătățirea QoE prin personalizare cu menținerea încrederii utilizatorului prin transparență și securitate a datelor. Succesul platformelor hibride depinde de capacitatea lor de a garanta QoE ridicată pe dimensiunile tehnice, perceptuale și contextuale, QoE devenind astfel etalon al competitivității în era televiziunii hibride.

2.3.3 Aplicații de broadcasting, broadband imersiv și multisenzorial

Una dintre cele mai semnificative progrese permise de convergența tehnologiilor broadcast și broadband este posibilitatea difuzării de conținut imersiv și multisenzorial. Televiziunea tradițională a fost limitată la conținut audiovizual livrat într-un format fix, linear. În contrast, sistemele hibride broadcast - broadband (precum HbbTV) permit integrarea experiențelor interactive și personalizate, în timp ce dezvoltările recente în Realitatea Virtuală (virtual reality - VR) și realitatea augmentată (augmented reality - AR) extind experiența media în domenii tridimensionale, multisenzoriale [16].

Difuzarea imersivă exploatează interactivitatea broadband și capacitățile de redare locală pentru a oferi utilizatorilor experiențe video 360°, evenimente live multi-perspectivă și overlay-uri de conținut augmentat. De exemplu, o difuzare sportivă poate fi îmbunătățită cu multiple unghiuri de vizualizare accesibile prin căști VR, sau aplicațiile de patrimoniu cultural pot folosi AR pentru a îmbogăți documentarele cu conținut interactiv. Prin combinarea eficienței distribuției broadcast pentru fluxurile audiovizuale cu interactivitatea broadband pentru caracteristici personalizate sau îmbunătățite, HbbTV oferă coloana vertebrală pentru astfel de servicii.

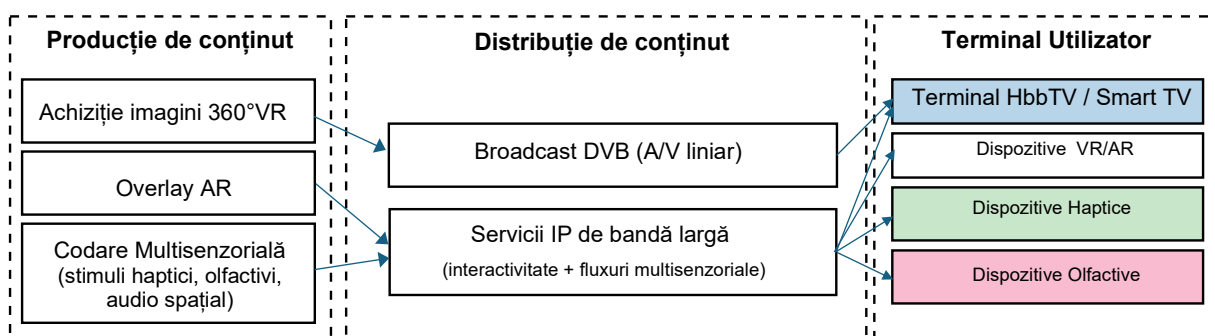


Fig.2.8 - Arhitectură hibridă broadcasting – broadband pentru aplicații VR/XR multisenzoriale

Figura 2.8 ilustrează o arhitectură tipică pentru livrarea experiențelor imersive. Se poate observa cum conținutul broadcast este sincronizat cu dispozitivele VR-AR de tip head-mounted-displays (HMD), în timp ce fluxurile suplimentare de date livrate broadband oferă extensii interactive și multisenzoriale. Această integrare permite transmisiilor de tip broadcast să migreze dincolo de ecranul tradițional și în medii imersive, unde utilizatorii pot să interacționeze într-o manieră activ cu conținutul.

În plus față de imersiunea vizuală, adăugarea de efect multisenzoriale poate îmbogăți experiența utilizatorului prin angrenarea și altor simțuri în afara vederii și a auzului. Noi lucrări științifice explorează integrarea dispozitivelor haptice, interfețelor olfactive și semnalului audio spațial pentru a completa conținutul AR/VR. De exemplu, un program de gătit ar putea oferi indicii olfactive sincronizate, sau un tur virtual al muzeului ar putea integra feedback haptic pentru a simula texturile artefactelor prezentate. Aceste extensii multisenzoriale, deși deocamdată experimentale, evidențiază potențialul sistemelor hibride broadcast - broadband de a evolua în a deveni platforme multimedia cu adevărat imersive.

Aplicațiile difuzării imersive și multisenzoriale se extind pe mai multe domenii:

- Divertismentul și sportul: oferind audiențelor acoperire live multi-unghi și participare virtuală la evenimente.
- Educația și patrimoniul cultural: permițând experiențe de învățare interactive și tururi virtuale imersive.
- Asistența medicală și reabilitarea: oferind programe terapeutice bazate pe VR sau instrumente de antrenament cu realitate augmentată.
- Interacțiunea socială: facilitând medii imersive partajate care îmbină conținutul broadcast cu caracteristici de comunicare socială.

Provocările tehnologice la ora actuală în acest domeniu sunt legate de cerințele stricte de bandă pentru streaming VR și AR de înaltă rezoluție, accesul necesitând latență redusă și lățime de bandă ridicată, care pot suprasolicita chiar și infrastructurile broadband existente. Gradul de acceptare din partea utilizatorului este și el critic, deoarece nu toți utilizatorii sunt dispuși să folosească dispozitivele HMD sau cele multisenzoriale. În plus, standardizarea este necesară pentru a asigura interoperabilitatea între sistemele de difuzare, în speță aplicațiile HbbTV și tehnologiile imersive emergente [17].

2.3.4 Perspective viitoare ale televiziunii broadband și HbbTV

Traectoria televiziunii broadband și HbbTV va fi influențată de mai multe tendințe convergente:

- Continuarea integrării IoT și SH: televizoarele vor deveni și mai mult un fel de panou de comandă centralizată pentru mediu IoT domestic, afișând date de la senzorii de sănătate, contoarele energetice și sistemele de iluminat și cele de securitate.
- Procesarea edge: Prin utilizarea procesării suplimentare la marginea rețelei (edge), aplicațiile HbbTV pot adapta livrarea conținutului dinamic la condițiile locale ale rețelei, îmbunătățind QoE.
- Personalizarea bazată pe AI: Sistemele de recomandare alimentate de AI vor adapta nu doar divertismentul, ci și eventual conținutul educațional și recomandările legate de starea de sănătate.
- Optimizarea traficului: Difuzarea hibridă poate reduce traficul redundant de streaming prin descărcarea distribuției de conținut în masă către broadcast, menținând broadband-ul pentru servicii personalizate.
- Integrarea 6G: Rețelele 6G cu latență redusă și throughput ridicat vor extinde rolul HbbTV în difuzarea VR/AR de înaltă definiție și colaborarea la distanță.

Aceste direcții consolidează HbbTV ca element central al ecosistemului multimedia convergent, îmbinând scalabilitatea transmisiilor broadcast cu personalizarea specifică accesului broadband. Integrarea SDR și IoT asigură dezvoltarea distribuției hibride broadcast – broadband ca o platformă centrată pe utilizator, adaptivă și sigură.

2.4 Contribuții personale

Contribuțiile personale ale autorului la tematicile prezentate în capitolul 2 se pot grupa în trei direcții diferite, toate însă pornind de la conceptele SDR.

2.4.1 Aplicații SDR IoT/satelit

Experiența acumulată de autor și de grupul său de cercetare cu aplicațiile CR și TVWS în general și cu platformele SDR în particular, au dus la cristalizarea unor noi idei de cercetarea aplicativă referitoare la dezvoltarea de gateway-uri bazate pe platforme SDR. Proiectul de cercetare STAGRATE-MIPS, depus în 2016 și finanțat de Agenția Spațială Română (ROSA) în 2017 pentru o durată de 2 ani a avut ca scop dezvoltarea unui gateway satelitar reconfigurabil care să permită interconectarea cu dispozitive terestre IoT și M2M, denumite generic Internet of Remote Things (IoRT). Pornind de la o arhitectură generică (figura 2.9), s-a trecut la o analiză atentă a protocoalelor de comunicație pentru uplink/downlink satelitar pentru cazul specific IoRT.

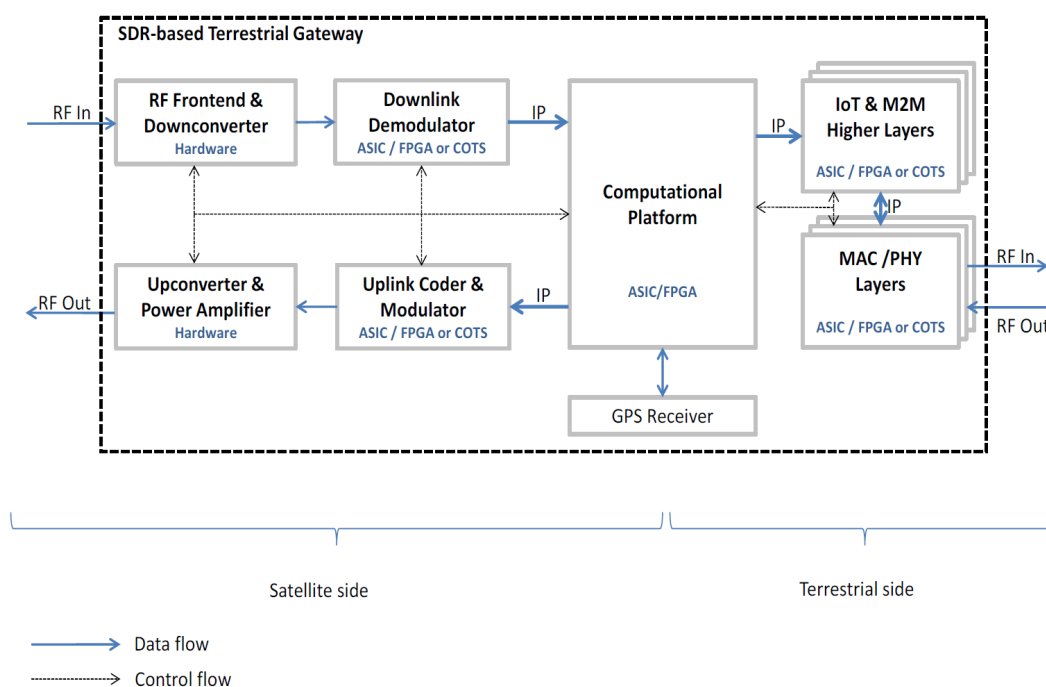


Fig. 2.9. Arhitectura generică a gateway-ului satelitar bazat pe tehnologii SDR

Cerințele principale pentru scheme de acces la gateway-ul proiectat sunt:

- debit agregat ridicat cu o probabilitate de transmisie a pachetelor foarte scăzută;
- suport eficient al pachetelor de dimensiuni mici cu un ciclu de transmisie foarte redus;
- overhead minim de semnalizare;
- cerințe de EIRP redus (Putere Izotropică Radiantă Efectivă);
- robustețe față de dezechilibrul energetic al pachetelor recepționate;

Cerințele generale ale legăturii uplink pentru aplicații IoRT implică rate de date scăzute și un număr ridicat de noduri care accesează resursele de transmisie în rafale scurte, ceea ce conduce la necesitatea utilizării unor protocoale de acces la mediu (MAC) simple, necoordonate și bazate pe acces aleatoriu. Pornind de la un studiu comparativ inițial, extins cu considerațiile proprii, s-a concluzionat în că interfața radio uplink cea mai potrivită pentru aplicații M2M și IoT ar fi S-MIM (S-Band Interactive Mobile Multimedia). Mecanismul de acces E-SSA oferă

cel mai ridicat debit MAC și robustețe față de dezechilibrul de putere, permițând în același timp transmisia asincronă de pachete în timp complet și cele mai scăzute cerințe de EIRP.

Pentru downlink, pe baza analizei inițiale a cerințelor, interfața radio cea mai potrivită ar fi DVB-S2 [34]. În urma studierii standardului specific, s-a ajuns la concluzia că DVB-S2X ar fi și mai adecvat cerințelor de transmitere a mesajelor M2M/IoT. DVB-S2X este o extensie a specificațiilor DVB-S2 care promovează tehnologii și funcționalități suplimentare. DVB-S2X utilizează schema de corecție a erorilor înainte (FEC) LDPC (Low Density Parity Check), dovedită și robustă în combinație cu FEC de tip Broadcast Control Channel (BCH) ca și cod extern, introducând totodată funcționalități suplimentare care îndeplinesc cerințele legăturii directe pentru M2M/IoT.

Deoarece interconectarea sateliților cu rețelele IoT/IoRT se realizează cel mai eficient prin acces indirect — fiecare senzor și actuator comunică cu satelitul prin intermediul unui nod gateway — și dat fiind că o interfață care permite aplicațiilor terțe să colecteze date de la senzori prin conexiuni WAN terestre reprezintă, de asemenea, o cerință importantă, componenta terestră a gateway-ului satelitar devine un element arhitectural cheie care permite transferul de date între protocoalele de comunicație wireless de scurtă distanță și rețelele terestre/satelitare tradiționale. În acest scop, gateway-ul trebuie să ofere suport pentru un set riguros de cerințe, cele mai importante fiind: managementul comunicațiilor, securitatea și autentificarea, agregarea datelor, traducerea protocoalelor și managementul consumului de energie. Deoarece unul dintre principalele obiective de atins este capacitatea de a comunica cu aplicații M2M/IoT utilizând cele mai comune protocoale wireless și standarde de transmisie, gateway-ul terestru bazat pe SDR oferă suport pentru următoarele standarde de comunicație: LoRaWAN, BLE, IEEE 802.11 și ZigBee IEEE 802.15.4. Conectivitatea cu dispozitivele IoT s-a realizat prin intermediul porturilor USB folosind module COTS.

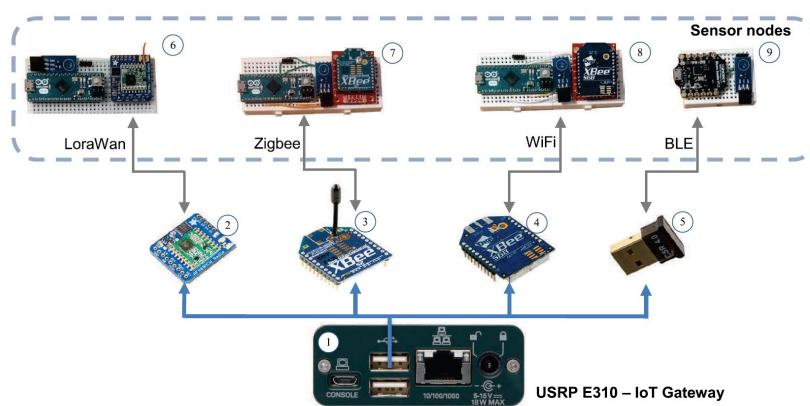


Fig. 2.10. Standardele de comunicații terestre specifice IoT

Din arhitectura generică prezentată în figura 2.9, trecând prin etapa de analiză a cerințelor și identificarea protocoalelor pentru interfațarea cu satelitul și cu dispozitivele terestre, s-a ajuns la arhitectura detaliată prezentată în figura 2.2. Mecanismul de reconfigurabilitate este prezentat în figura 2.3.

Produsul final a reprezentat o soluție de conectivitate prin satelit pentru aplicații IoRT, implementată pe un singur dispozitiv care acționează ca gateway între componentele terestră și satelitară, cu un cost semnificativ redus de implementare, asigurând în același timp un grad ridicat de reconfigurabilitate prin utilizarea unei platforme SDR standalone și a unor module

COTS pentru acoperirea principalelor standarde IoRT terestre. Pentru reducerea costului de implementare, legăturile uplink și downlink prin satelit au fost implementate în FPGA-ul platformei SDR, rezultând o ocupare totală a CPU de 82%. Aceasta a lăsat suficient spațiu pentru programarea interfeței de control, a bazelor de date locale, a serverului HTTP, a brokerilor MQTT și a tuturor celorlalte module software necesare. Testarea în laborator a întregului gateway a validat arhitectura aleasă și soluțiile utilizate pentru implementarea sa pe o platformă SDR standalone de cost redus. Testele unitare finale au validat implementarea și funcționarea modulelor SDR individuale.

2.4.2 Aplicații IoT – Smart Home - HbbTV

Pe baza arhitecturii prezentate în secțiunea anterioară, 2.4.1., în speță folosirea unui dispozitiv intermediar ca și gateway între diferite standarde și aplicații, a fost dezvoltat conceptul de unificare a experienței IoT de tip Smart Home (SH) prin dispozitive compatibile HbbTV. Conceptul de SH este în mod obișnuit asociat cu conceptul IoT. Cu toate acestea, conceptul de casă inteligentă a fost și este încă fragmentat, deoarece utilizatorul este frecvent constrâns să utilizeze diverse mecanisme sau platforme în cadrul mediului casnic pentru a accesa și interacționa cu toate dispozitivele. Această nișă poate prezenta noi oportunități atât pentru furnizorii de soluții TV, cât și pentru cei de care oferă soluții SH: posibilitatea ca televizorul să devină unul dintre principalele puncte de gestionare a tuturor dispozitivelor SH nu doar îmbunătățește calitatea experienței în ambele domenii, ci o și simplifică. Sinergia dintre aceste două domenii aparent necorelate aduce utilizatorului un set complet nou de servicii cu care poate interacționa.

Pe baza acestor considerații, am optat pentru o arhitectură (figura 2.11) ce are la bază cadrul HbbTV 2.0 Companion Screen (CS) și Multimedia Synchronization (MS). Acest cadru poate fi integrat cu ușurință atât în platformele TV existente, cât și în alte dispozitive precum gateway-urile locale Smart Home (IoT) sau smartphone-uri, furnizând mecanisme standardizate de discovery și comunicare pentru toate părțile implicate (figura 1). Gateway-ul SH IoT acționează ca manager pentru toate dispozitivele IoT inteligente disponibile în mediul casnic, precum: întrerupătoare inteligente de lumini, jaluzele, sistem de încălzire, sonerie cu cameră IP etc. Acesta oferă suport pentru cele mai importante protocoale specifice IoT (de ex., Zigbee, BLE sau LoRa), acoperind astfel o gamă largă de dispozitive IoT furnizate de diverși producători. De asemenea, acționează ca dispozitiv Companion Screen (CS), ceea ce îi permite să fie descoperit de televizorul compatibil HbbTV. Pentru smartphone-urile bazate pe Android, soluția furnizează o aplicație nativă care permite dispozitivului să funcționeze tot ca CS. Urmând arhitectura propusă, a fost implementat un prim prototip cuprinzând următoarele componente:

- Terminal HbbTV: un dispozitiv Nvidia Shield compatibil HbbTV 2.0,
- Gateway SH IoT - Raspberry Pi 3 — suport pentru principalele protocoale IoT asigurat prin module COTS;
- Client: Huawei P20 Lite cu Android 8.0
- Senzori/actuatori LoRaWAN, ZigBee, BLE și WiFi.

La lansare, aplicația HbbTV de pe terminal începe să caute dispozitive CS și încearcă să stabilească o conexiune cu acestea. Figura 6 prezintă procesul de descoperire și procesul de stabilire a conexiunii WebSocket. Această abordare se aplică atât pentru gateway-ul SH, cât și pentru smartphone. Cele mai importante componente implicate în procesele menționate anterior sunt HbbTV CS Manager, care rulează pe terminalul HbbTV, și CS Launcher, care rulează pe dispozitivul CS. În implementarea practică, la pornire, aplicația HbbTV obține o listă a launcher-elor active în acel moment de la HbbTV CS Manager și le selectează pe cele de interes. Ulterior, aplicația HbbTV trimite o comandă de lansare a aplicației către launcher(e), conținând URL-ul nativ de lansare. URL-ul nativ de lansare conține, de asemenea, endpoint-ul remote al serverului WebSocket (WS). Terminalul HbbTV rulează și el un server WS, iar pentru a stabili o conexiune WS, aplicația HbbTV solicită HbbTV CS Manager endpoint-ul local al serverului WS. Deoarece dispozitivul CS a obținut deja endpoint-ul remote al serverului WS prin intermediul URL-ului nativ de lansare, acesta stabilește o conexiune WS către acest endpoint. În final, serverul WS asociază conexiunile locale și remote, iar schimbul de mesaje poate începe. Schimbul de date dintre gateway-ul SH și aplicația HbbTV este atât de tip pull, cât și push. La încărcare, aplicația HbbTV, prin conexiunea WS stabilită, extrage (pull) de la gateway-ul SH toate informațiile de care are nevoie, precum: profilul selectat în prezent, toate dispozitivele SH disponibile și ultimele valori raportate, precum și maparea dintre dispozitivele SH și camere.

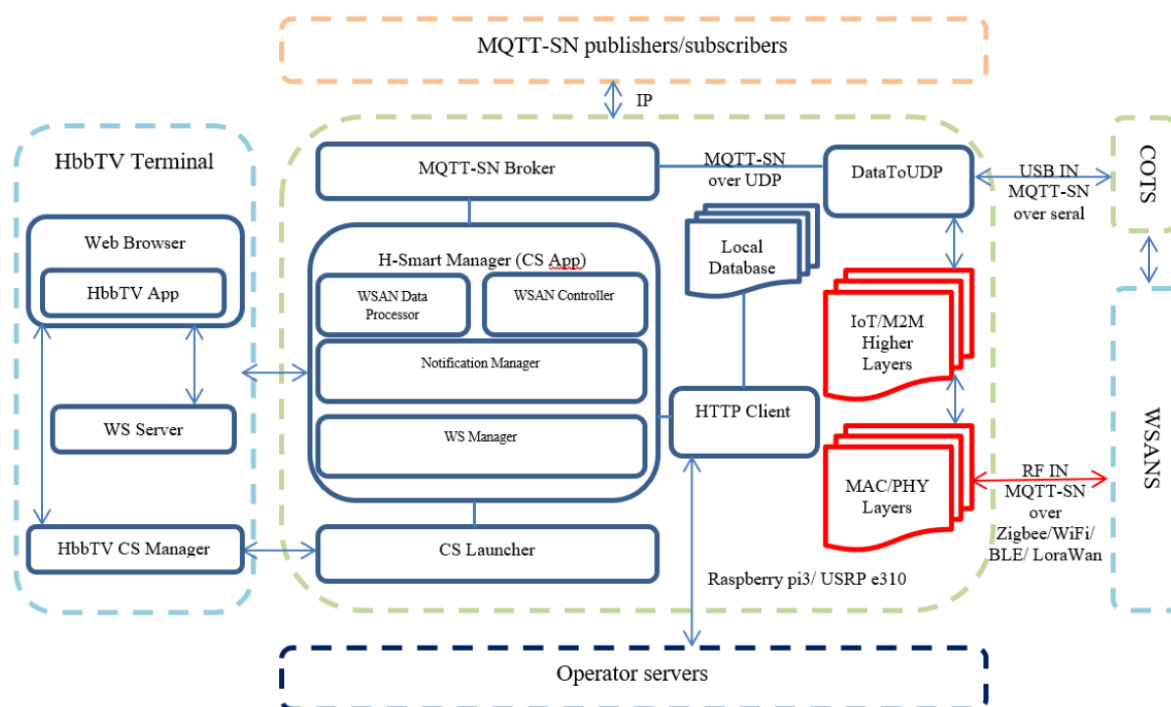


Fig. 2.11. Arhitectura Gateway SH - HbbTV

După finalizarea procesului de încărcare, gateway-ul SH transmite, prin intermediul bridge-ului MQTT-SN – WS, toate datele noi raportate de dispozitivele SH, stocând totodată aceste date atunci când este necesar. Aceasta reprezintă și o funcționalitate importantă, deoarece asigură că utilizatorul va putea vizualiza un istoric al datelor raportate de un dispozitiv SH. O altă funcționalitate importantă a aplicației HbbTV este gestionarea notificărilor. Așa cum s-a menționat anterior, aplicația este capabilă să afișeze și să execute suplimentar acțiuni legate de broadcasting (dacă este cazul), pe baza notificărilor primite atât de la gateway-ul SH, cât și de

la smartphone. Figura 7a prezintă aplicația HbbTV afișând o notificare de sonerie. Când cineva apasă butonul soneriei, gateway-ul SH detectează apăsarea butonului și trimite un mesaj către aplicația HbbTV, prin conexiunea WS, care conține tipul notificării (adică DoorBellRing) și URL-ul pentru accesarea transmisiunii live de la camera IP. Aplicația HbbTV procesează mesajul primit și afișează următoarele:

- serviciul de broadcasting mut/în pauză în fundal;
- notificarea și acțiunile disponibile pentru utilizator în colțul din dreapta jos (prim-plan);
- transmisia live de la camera IP într-un player PiP (picture in picture) (prim-plan).

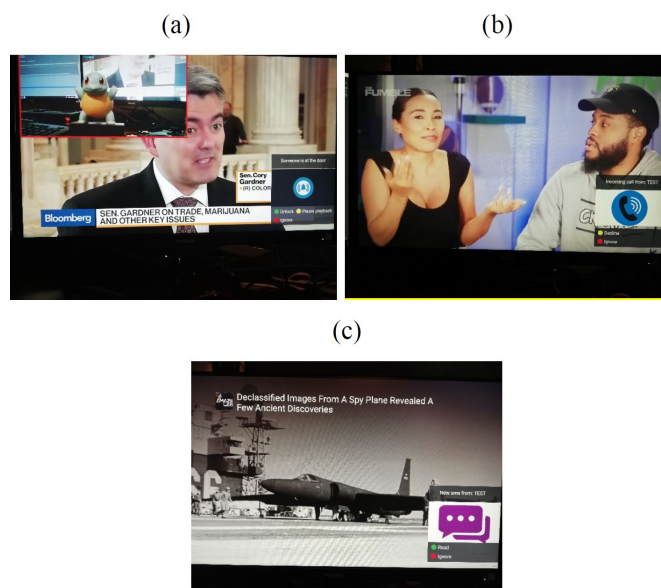


Fig. 2.12. Vizualizarea notificărilor

Figurile 2.12a și b prezintă o notificare de apel și, respectiv, o notificare SMS provenind de la smartphone.

Un set extins de teste subiective a fost realizat pentru a evalua beneficiile sistemului propus din perspectiva QoE percepute de utilizator pentru integrarea unui televizor compatibil HbbTV cu patru tipuri tipice de notificări SH: alarmă, mesaj text, apel telefonic și sonerie video. Rezultatele testelor au confirmat fezabilitatea abordării propuse și funcționalitatea arhitecturii, validând totodată implementarea hardware. Mai mult, analiza rezultatelor a permis selectarea unei configurații optime pentru notificările menționate, în ceea ce privește poziționarea, durata și caracteristicile multimedia.

Prototipul, propus pe parcursul mai multor lucrări la conferințe de specialitate IEEE [21][22] fost realizat și validat cu succes prin publicarea în revista IEEE Transaction on Broadcasting [23] în 2021, lăsând loc unei varietăți de implementări viitoare și integrări cu alte componente ale unui mediu SH.

Exemple în acest sens sunt lucrările [24] – [26] publicate la conferințe prestigioase printre care și IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), lucrări care folosesc dispozitive de monitorizare a parametrilor fiziologici (Health Monitoring Devices – HMD) în locul dispozitivelor IoT, o arhitectura fiind cea prezentată în figura 2.4. Ca și dispozitiv de randare/alertă este folosit tot un terminal HbbTV și standardul HbbTV 2.0 CS/MS.

2.4.3 Aplicații IoT – media multisenzorială

În ultimul deceniu, evoluția pieței TV a fost una foarte dinamică. Operatorii tradiționali TV s-au confruntat cu noi provocări pentru a face față cererii crescânde de servicii noi din partea utilizatorilor și de asemenea au avut de înfruntat și trecerea la televiziunea digitală, descrisă în amănunt în această lucrare în capitolul 1. Odată cu abundența consumului de știri în timp real prin rețele sociale pe un ecran secundar (telefon sau tabletă), peisajul broadcasting-ului a suferit o transformare majoră, telespectatorii începând să solicite experiențe personalizate care să răspundă nevoilor lor individuale.

În ciuda pieței în creștere a dispozitivelor portabile și a cererii de acces mobil la conținut video, numărul total de minute petrecute săptămânal în fața televizorului tradițional rămâne predominant. În acest context, sistemele de divertisment casnic au cunoscut o evoluție constantă în dimensiune și complexitate. Pentru a se adapta nevoilor utilizatorilor, sectorul electronicii de larg consum a dezvoltat produse dedicate — ecrane mai mari (dimensiuni și rezoluție), console pentru gaming, echipamente audio — gestionate printr-o singură telecomandă. Cum s-a subliniat și în paragraful anterior, conceptul de casă inteligentă SH a câștigat tot mai multă atenție din partea comunității ICT, existând un interes crescut pentru capacitatea dispozitivelor embedded, senzorilor și actuatorilor de a comunica și de a crea o lume cyber-fizică ubicuă prin incorporarea conceptelor IoT. Ultima contribuție a autorului la tematica capitolului 2, este o arhitectură IoT pentru servicii TV multisenzoriale într-un mediu SH folosind o platformă cloud IoT. În cadrul acestei arhitecturi, televizorul inteligent și dispozitivele de redare — comutatoare pentru aer condiționat, iluminat și vibrații — sunt reprezentate ca Obiecte Virtuale (VO), combinate și controlate prin Micro Engines (ME) astfel încât cerințele de sincronizare dintre mediile clasice și cele multisenzoriale reprezentate de dispozitivele SH să fie îndeplinite. Un setup bazat pe Raspberry Pi și dispozitive Arduino a fost implementat pentru testarea arhitecturii propuse, ilustrată schematic în figura 2.13.

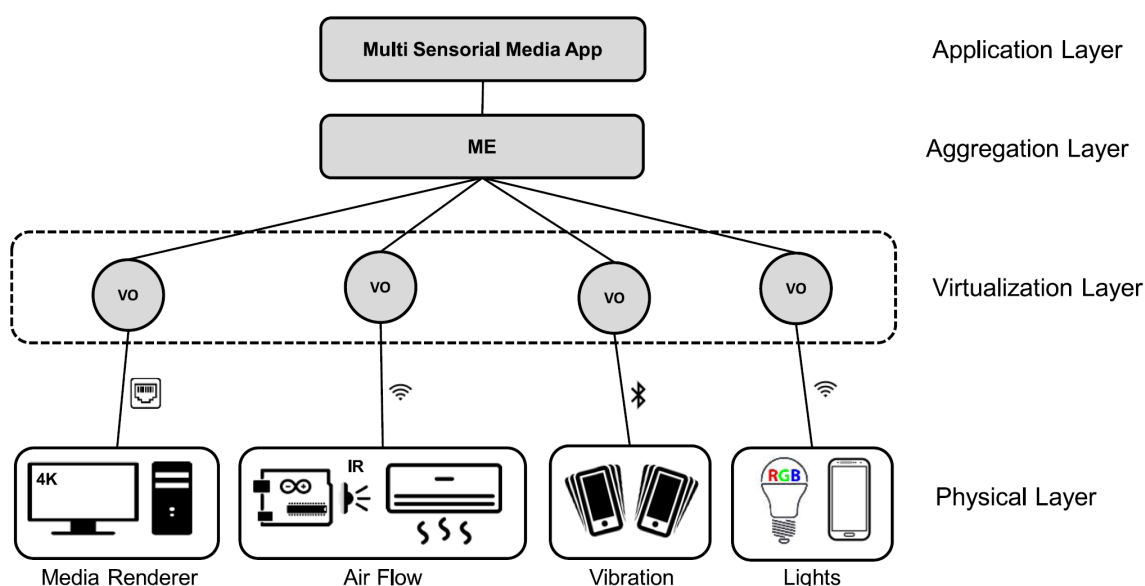


Fig. 2.13. Arhitectura IoT Cloud

Arhitectura stratificată cloud IoT este compusă din:

Stratul fizic: implementat în cloud, include obiecte capabile să acceseze internetul, denumite obiecte din lumea reală (RWO — Real World Objects), datorită conexiunii lor directe cu mediul fizic în care detectează și acționează. Pentru acest scenariu particular, RWO-urile sunt fie dispozitive electronice cu capacități de procesare și periferice integrate, precum smartphone-uri, fie platforme computaționale echipate cu capabilități de comutare, de exemplu platforme Raspberry Pi sau Arduino, capabile să pornească și să oprească dispozitivele de redare. Stratul fizic comunică cu straturile superioare utilizând metode standard de comunicație cu fir sau fără fir (de ex., Wi-Fi, Bluetooth, LTE, USB, Gigabit Ethernet etc.) și protocoale de date (adică HTTP și MQTT).

Stratul de virtualizare: pentru decuplarea componentei hardware de reprezentarea software bazată pe cloud, majoritatea soluțiilor IoT introduc conceptul de obiect virtual (VO — Virtual Object) ca echivalent digital al entităților din lumea reală, astfel încât fiecare obiect din stratul fizic este reprezentat printr-o virtualizare. VO este o componentă cheie a soluției globale și descrie RWO în termeni de descriere semantică și funcționalități. Este echipat cu două interfețe care permit o procedură de comunicare standardizată: pe de o parte, permite VO-ului să comunice cu stratul de agregare, iar pe de altă parte reprezintă punctul de acces la lumea reală, asigurând conexiunea cu RWO. În scopul nostru specific, stratul de virtualizare este implementat printr-un driver software instalat pe RWO, după cum este detaliat în secțiunea următoare.

Stratul de agregare: acest strat este responsabil pentru agregarea datelor provenite de la unul sau mai multe VO-uri, în vederea asigurării unui nivel ridicat de reutilizare. Micro Engine (ME) este o combinație (mash-up) a unuia sau mai multor VO-uri și chiar a altor ME-uri, responsabilă pentru preluarea și procesarea datelor din VO-uri în servicii de nivel înalt solicitate de straturile superioare (stratul de aplicație).

Stratul de aplicație: la acest nivel, aplicațiile utilizatorului sunt responsabile pentru procesarea și prezentarea finală. Implementarea și execuția aplicațiilor se bazează pe utilizarea unuia sau mai multor ME-uri.

Player-ul media este un PC desktop de înaltă performanță conectat la televizor printr-un cablu HDMI 4K și conectat la straturile superioare ale arhitecturii prin Gigabit Ethernet. Pentru implementarea efectelor multisenzoriale în arhitectura propusă sunt folosite dispozitive casnice obișnuite, mai exact: ventilatorul unui aparat de aer condiționat montat pe perete - pentru reproducerea efectelor de flux de aer, un sistem de iluminat LED RGB inteligent cu conexiune Wi-Fi integrată - pentru efectele luminoase, și funcția de vibrație a unui set de smartphone-uri - pentru efectele haptice. Virtualizarea smartphone-urilor se realizează printr-o aplicație software dezvoltată special și care rulează pe sistemul de operare Android. Ventilatorul AC este controlat prin intermediul unei telecomenzi infraroșu (IR) folosind o placă Arduino cu un shield IR, care reprezintă RWO-ul sistemului. Luminile LED RGB sunt conectate prin Wi-Fi la un smartphone care rulează o aplicație capabilă să extragă automat efecte de lumină din camera foto a telefonului, plasat în fața televizorului. În acest caz, RWO-ul este smartphone-ul care controlează luminile LED RGB inteligente. Utilizând un driver software pentru placa Arduino și o aplicație iOS pentru smartphone-uri, am reușit să virtualizăm RWO-urile și să le facem accesibile prin stratul de virtualizare (adică VO-uri) straturilor superioare ale arhitecturii propuse. Acest lucru ne-a permis să avem control deplin asupra sistemului și să respectăm

constrângerile de sincronizare specificate anterior. Comunicarea cu RWO a fost implementată utilizând protocolul de date MQTT peste diversele standarde de comunicație, asigurând o latență redusă, cu valori sub 1 secundă pentru această implementare specifică. Setup-ul de laborator este ilustrat în figura 2.14, cu luminile RGB (a), camera smartphone-ului (b) și telefoanele folosite pentru vibrații (c).

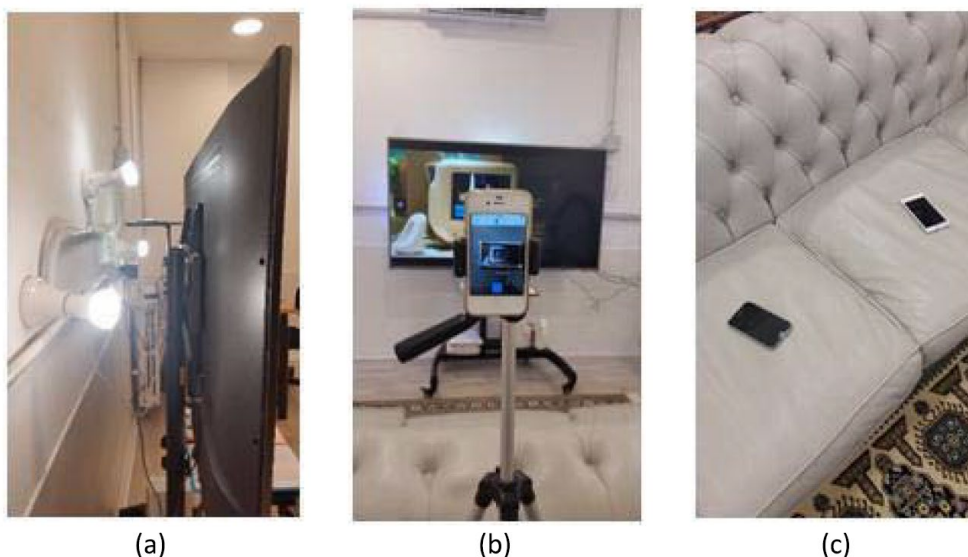


Fig. 2.14. Echipamentele folosite pentru implementarea arhitecturii

Folosind arhitectura din figura 2.13 și dispozitivele din figura 2.14, au fost efectuate teste pentru evaluarea QoE. 40 de participanți (31 bărbați și 9 femei) din medii diverse, cu vârste cuprinse între 22 și 50 de ani și o vârstă medie de 32 de ani, au fost invitați la această evaluare; doar un participant a mai luat parte la o evaluare similară. Metoda Single Stimulus Continuous Quality Scale (SSCQS), definită de recomandarea ITU-R BT.500-13, a fost utilizată în cadrul acestei evaluări. Secvențe video de 30–40 de secunde au fost prezentate aleatoriu, intercalate cu 5 secunde de ecran gri, utilizate de evaluatori pentru a nota secvențele video. SSCQS nu implică utilizarea unor secvențe de referință prezentate observatorilor. Scala de rating utilizată în evaluare s-a bazat pe MOS, conform Recomandării ITU-T P.911. Fiecărui participant din cadrul evaluării i s-a solicitat să acorde un rating de calitate pentru fiecare secvență video. Secvențele au fost selectate din categoriile acțiune, sport, documentar și publicitate. Rezultatele au fost următoarele:

- 85% dintre participanți au fost de acord că efectele senzoriale îmbunătățesc senzația de realitate, 10% au avut o opinie neutră, iar 5% au fost în dezacord;
- 67,5% dintre participanți nu au fost distrași de efectele senzoriale, 17,5% au avut o opinie neutră, iar 15% au fost distrași;
- 80% dintre participanți au apreciat pozitiv experiența multisenzorială, 12,5% au avut o opinie neutră, iar 7,5% nu au apreciat experiența media multisenzorială;
- 70% dintre participanți au considerat că momentul de activare al efectelor senzoriale a fost adecvat, 18% au avut o opinie neutră, iar 12% au fost în dezacord.

Arhitectura IoT, stimuli multisenzoriali și testele QoS au demonstrat fezabilitatea abordării propuse din perspectiva constrângerilor de sincronizare, a creșterii senzației de realitate și a satisfacției generale a utilizatorilor. Soluția IoT permite implementarea sistemului într-un scenariu real SH fără a fi necesară instalarea unui hardware specific dedicat. Mai mult, abordarea IoT permite scalabilitatea sistemului și posibilitatea de a adăuga funcționalități personalizate la ansamblul sistemului.

Rezultatele cercetării au fost publicate în IEEE Transaction on Broadcasting [27] și la 4 conferințe internaționale [28]-[31], punând de asemenea bazele pentru tematicile abordate în următoarele două capitole: trecerea de la IoT la Social IoT și trecerea de la media multisenzorială la realitatea virtuală hibridă.

1.8. Sumar Capitol 2

Capitolul 2 a prezentat evoluția de la reconfigurabilitatea hardware a platformelor SDR, tratată în detaliu în capitolul anterior, la ecosistemele de conectivitate IoT și, de acolo, la aplicațiile multimedia centrate pe utilizator din mediul SH.

Rolul SDR în contextul IoT depășește cu mult simpla conectivitate multi-protocol. Gateway-urile SDR reconfigurabile reprezintă un răspuns arhitectural la fragmentarea inerentă a peisajului IoT. Capacitatea de reconfigurare în timp real conferă acestor sisteme o durată de viață și o adaptabilitate imposibil de atins prin arhitecturi fixe. Integrarea SDR cu edge computing și servicii cloud completează tabloul: deciziile urgente sunt tratate local, cu latență minimă, în timp ce optimizările complexe beneficiază de scalabilitatea platformelor cloud. Aplicarea acestor principii în domeniul comunicațiilor prin satelit a condus la o contribuție concretă: gateway-ul IoRT (Internet of Remote Things) bazat pe platforma USRP E310, care integrează interfețe IoT terestre multiple cu uplink și downlink satelitar, implementate în FPGA, demonstrând că reconfigurabilitatea SDR poate reduce semnificativ costurile de implementare, fără a compromite flexibilitatea sau conformitatea cu standardele.

Paradigma casei inteligente a oferit contextul ideal pentru a demonstra valoarea practică a acestei infrastructuri inițial gândită pentru domeniul IoRT. Arhitectura propusă — bazată pe standardul HbbTV 2.0 — rezolvă o problemă reală de fragmentare: utilizatorul nu mai este obligat să gestioneze dispozitivele casnice prin aplicații separate, ci poate accesa un punct unic de control integrat în televizor, cu notificări contextuale, vizualizarea datelor IoT și interacțiune bidirecțională cu dispozitivele SH. Validarea experimentală a confirmat fezabilitatea abordării și a furnizat date concrete pentru optimizarea configurațiilor de notificare în termeni de poziționare, durată și caracteristici multimedia. Extinderea arhitecturii spre monitorizarea parametrilor fiziologici — cu terminal HbbTV ca interfață de alertă — a deschis o direcție aplicativă cu relevanță directă pentru îngrijirea medicală la domiciliu și asistența persoanelor vârstnice.

Contribuția privind media multisenzorială plasează capitolul la intersecția dintre IoT și experiența imersivă. Arhitectura cloud IoT cu Obiecte Virtuale și Micro Engines, validată cu dispozitive comerciale uzuale demonstrează că sistemele mulsemmedia nu necesită hardware dedicat costisitor.

Bibliografie Capitolul 2

- [1] M. Murrone, V. Popescu, M. Fadda, and C. Sacchi, “Multi-rate modulation for opportunistic satellite communications over LMS channels,” *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 34, no. 6, pp. 743–759, 2016.
- [2] S. Haykin, “Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [3] V. Popescu, M. Fadda, M. Nitti, and M. Murrone, “QoS feedback mechanism for a cooperative indoor D2D system,” in *Proc. URSI GASS*, 2018.
- [4] C. Gavrilă, V. Popescu, M. Alexandru, M. Murrone, and C. Sacchi, “An SDR-based satellite gateway for Internet of Remote Things (IoRT) applications,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 115423–115439, 2020.
- [5] M. Marchese and M. Mohebi, “Space 2.0: Satellite constellations, reconfigurable payloads, and the role of SDR,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 5, pp. 42–48, 2020.
- [6] J. Farserotu et al., “Integration of SDR and SDN for next generation satellite systems,” *International Journal of Satellite Communications and Networking*, vol. 37, no. 4, pp. 287–304, 2019.
- [7] A. Al-Hourani, S. Chandrasekharan, and R. J. Evans, “Low-cost CubeSat communications using SDR payloads: A survey,” *Acta Astronautica*, vol. 170, pp. 595–607, 2020.
- [8] R. Calvo-Palomino, A. Dhamodharan, and R. Ricart-Sanchez, “Energy consumption analysis of embedded SDR platforms for satellite applications,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 55, no. 6, pp. 2830–2841, 2019.
- [9] Y. Zeng, Y. Liang, and R. Zhang, “Spectrum sensing in cognitive radio: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 323–347, 2017.
- [10] F. Radu, P. A. Cotfas, M. Alexandru, T. Bălan, V. Popescu, and D. Cotfas, “Signals intelligence system with software-defined radio,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 8, p. 5199, 2023.
- [11] D. Ma, G. Lan, M. Hassan, W. Hu, and S. K. Das, “Sensing, Computing, and Communications for Energy Harvesting IoTs: A Survey,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 1222–1250, 2020. doi: 10.1109/COMST.2019.2962526
- [12] E. Lagunas, S. Maleki, L. Bhavnani, C. Tsinos, P. Sharma, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, “Spectrum Coexistence of TV and Satellite Broadcasting Services: Directions and Challenges,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 90–97, Apr. 2018. doi: 10.1109/MWC.2018.1700095
- [13] M. Piesing, “Hybrid Broadcast Broadband TV: The Way Forward for Connected TVs,” *IEEE Consum. Electron. Mag.*, vol. 2, no. 3, pp. 14–18, Jul. 2013. doi: 10.1109/MCE.2013.2256014
- [14] ETSI, “ETSI TS 102 796 V1.4.7: Hybrid Broadcast Broadband TV (HbbTV),” ETSI Standard, Sophia Antipolis, France, 2017. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102700_102799/102796/
- [15] S. Aroussi and A. Mellouk, “Survey on Machine Learning-Based QoE Improvement Techniques for Video Streaming Services,” *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 141, pp. 1–18, 2019. doi: 10.1016/j.jnca.2019.05.004
- [16] M. Montagud, P. Cesar, F. Boronat, and J. Jansen, “Enabling Social TV Experiences Over HbbTV: Challenges and Opportunities,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 3, pp. 110–117, Mar. 2018. doi: 10.1109/MCOM.2018.1600589
- [17] A. Alexiou, C. Bouras, V. Kokkinos, E. Rekkas, and A. Papazois, “Evaluation of Broadcasting Techniques for Supporting Immersive Media Services,” *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 66, no. 2, pp. 556–569, Jun. 2020. doi: 10.1109/TBC.2019.2957040

- [18] M. Mennicken, J. Vermeulen, and E. M. Huang, "From Today's Augmented Houses to Tomorrow's Smart Homes: New Directions for Home Automation Research," in *Proc. ACM UbiComp*, 2014, pp. 105–115. doi: 10.1145/2632048.2636076
- [19] K. Sankhe, M. Belgiovine, F. Zhou, S. Riyaz, S. Ioannidis, and K. Chowdhury, "ORACLE: Optimized Radio clAssification through Convolutional neural nEtworks," in *Proc. IEEE INFOCOM*, 2019, pp. 370–378. doi: 10.1109/INFOCOM.2019.8737463
- [20] K. Valtanen, J. Backman, and S. Yrjölä, "Blockchain-Powered Value Creation in the 5G and Smart Grid Use Cases," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 25690–25707, 2019. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2900551
- [21] C. Gavrilă, V. Popescu, M. Alexandru and M. Fadda „Unifying the Smart Home Experience Through HbbTV-enabled Devices”, 2019 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Jeju, Korea, 2019, pp. 1-5
- [22] S. Porcu, A. Floris, M. Anedda, V. Popescu, M. Fadda and L. Atzori, "Quality of Experience Eye Gaze Analysis On HbbTV Smart Home Notification System," *2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/BMSB49480.2020.9379794.
- [23] C. Gavrilă, V. Popescu, M. Fadda, M. Anedda and M. Murrone, "On the Suitability of HbbTV for Unified Smart Home Experience," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 67, no. 1, pp. 253-262, March 2021, doi: 10.1109/TBC.2020.2977539.
- [24] C. Gavrilă, V. Popescu, M. Murrone, M. Sole and D. Giusto, "TV-Centric Health Monitoring Leveraging the HbbTV Architecture in a Smart Home Environment," *2021 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/BMSB53066.2021.9547085.
- [25] Cristinel Gavrilă, Vlad Popescu, Roberto Girau, Mariella Sole, Mauro Fadda, Matteo Anedda and Daniele Giusto, "Health Monitoring in a Smart Home Environment", 2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE) <https://dx.doi.org/10.1109/ICCE53296.2022.9730396>
- [27] L. Jalal, M. Anedda, V. Popescu and M. Murrone, "QoE Assessment for IoT-Based Multi Sensorial Media Broadcasting," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 64, no. 2, pp. 552-560, June 2018. doi: 10.1109/TBC.2018.2823914
- [28] L. Jalal, V. Popescu and M. Murrone, "Quality-of-experience parameter estimation for multisensorial media using Particle Swarm Optimization," 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), Brasov, 2017, pp. 965-970. doi: 10.1109/OPTIM.2017.7975095
- [29] L. Jalal, V. Popescu and M. Murrone, "IoT architecture for multisensorial media," 2017 IEEE URUCON, Montevideo, 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/URUCON.2017.8171894
- [30] L. Jalal, M. Murrone and V. Popescu, "Experimental setup for IoT — based multi sensorial media," 2018 Baltic URSI Symposium (URSI), Poznan, Poland, 2018, pp. 80-84, doi: 10.23919/URSI.2018.8406735
- [31] L. Jalal, M. Anedda, V. Popescu and M. Murrone, "QoE Assessment for Broadcasting Multi Sensorial Media in Smart Home Scenario," 2018 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Valencia, Spain, 2018, pp. 1-5., doi: 10.1109/BMSB.2018.8436875

3. De la Smart Home la Smart Cities prin tehnologiile 5G/6G

Evoluția rapidă a tehnologiilor informației și comunicațiilor a transformat însăși structura societăților umane, permițând o progresie de la mediile localizate de tip smart home la paradigma extinsă a orașelor inteligente. Mediile SH au reprezentat stadiul inițial în care Internetul paradigma IoT a îmbunătățit viața de zi cu zi prin automatizare, servicii personalizate și management energetic. Cu toate acestea, pe măsură ce tehnologiile digitale au evoluat, aria de acoperire s-a extins pentru a cuprinde ecosisteme la scară urbană unde milioane de dispozitive, sisteme și servicii interconectate interacționează dinamic pentru a îmbunătăți eficiența, sustenabilitatea și calitatea vieții.

Tranziția de la IoT la *Internetul Social al Obiectelor* (*Social Internet of Things - SIoT*) este o etapă decisivă în această traiectorie. În timp ce arhitecturile IoT au impulsionează inițial eforturile tehnologice din zona conectivității și a interoperabilității dispozitivelor, SIoT introduce conceptul de relații sociale între obiecte și servicii, pe baza principiilor de încredere, cooperare și auto-organizare în moduri care reflectă interacțiunile umane. Această dimensiune socială îmbunătățește semnificativ scalabilitatea serviciilor în contexte urbane, unde eterogenitatea și dinamismul prezintă provocări semnificative.

Paralel cu aceste progrese, următoarea generație de tehnologii de comunicații wireless joacă un rol fundamental. Standardul 5G a introdus deja comunicații ultra-fiabile cu latență redusă, conectivitate masivă a dispozitivelor și bandă largă mobilă mult îmbunătățită. Cu toate acestea, complexitatea crescândă a ecosistemelor orașelor inteligente necesită saltul suplimentar promis de rețelele de a șasea generație (6G). 6G va integra inteligența artificială, calcul și inteligență de tip edge și comunicația în benzile de frecvență THz pentru aplicații de tip mobilitate autonomă, realitate extinsă, teleprezență holografică și monitorizarea în timp real a mediului.

În acest capitol se explorează transformarea tehnologică și socială de la IoT la SIoT, relația dintre 5G/6G și dezvoltarea orașelor inteligente, precum și provocările legate de securitate cibernetică care însoțesc această tranziție.

3.1 De la IoT la SIoT către aplicații pentru Smart Cities

IoT a fost mult timp considerat o piatră de temelie a paradigmei *orașelor inteligente* (*Smart Cities – SC*), permițând implementarea rețelelor de senzori, dispozitivelor inteligente și infrastructurilor inteligente care îmbunătățesc eficiența și calitatea vieții. Conform unui studiu privind tehnologiile folosite în contextul Smart Cities, IoT este indispensabil pentru aplicații în transport, energie și siguranță publică. Cu toate acestea, în ciuda utilității sale, paradigma tradițională IoT se confruntă cu probleme de scalabilitate, interoperabilitate și management al încrederii. Pentru a aborda aceste deficiențe, a fost propusă paradigma *Social Internet of Things* - *SIoT*, introducând interacțiuni structurate social între obiecte și servicii, imitând astfel structura relațională a societăților umane [2], [10].

3.1.1 IoT ca fundație tehnologică a orașelor inteligente

În centrul orașelor inteligente se află o arhitectură IoT stratificată (layered) care permite interconectarea dispozitivelor și serviciilor eterogene. Aceste arhitecturi includ de obicei un *layer de percepție* (senzori și actuatori), un *layer de rețea* (5G/LPWAN/Wi-Fi), un *layer de servicii* (cloud sau edge computing) și un *layer de aplicație* (servicii urbane).

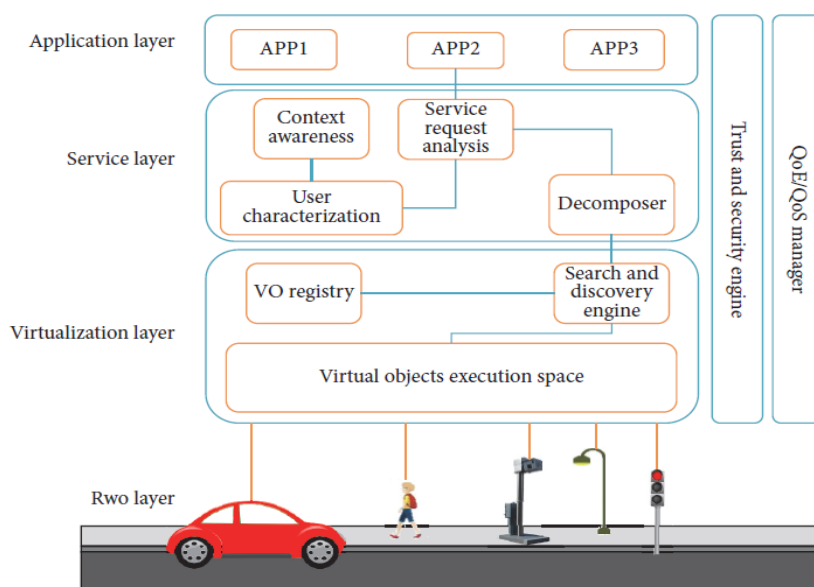


Figura 3.1.1 – Soluție arhitecturală IoT bazată pe cloud

Arhitectura stratificată prezentată în figura 3.1 [1] evidențiază câteva caracteristici specifice pentru conceptul SIoT:

- **Layer-ul de obiecte din lumea reală (real world objects - RWO):** Include entități fizice precum vehicule, pietoni și infrastructură urbană. Fiecare dintre aceste obiecte produce date brute recepționate de la senzori și actuatori.

- **Layer de virtualizare:** Fiecare obiect din lumea reală este asociat cu un *Obiect Virtual* (*Virtual Object - VO*), un twin digital care abstractizează funcțiile și datele sale. Layer-ul de virtualizare include un registru VO pentru indexarea entităților active și un *Spațiu de Execuție a Obiectelor Virtuale* (*Virtual Objects Execution Space - VOES*) care permite comunicarea și interacțiunea între dispozitivele eterogene.
- **Layer de servicii:** Orchestrează inteligența urbană prin module precum conștientizarea contextului, caracterizarea utilizatorului, analiza cererilor de servicii și un bloc care descompune cererile complexe în sarcini IoT simple. Motorul de căutare și descoperire asigură că VO-urile relevante pot fi identificate dinamic.
- **Layer de aplicație:** Cuprinde aplicații orientate către utilizator (APP 1 - 3) care exploatează serviciile de bază pentru a oferi date agregate referitor la mobilitate, informații turistice sau optimizare energetică.
- **Funcționalități trans-layer:** Motorul de Încredere și Securitate garantează schimburi securizate între straturi, în timp ce managerul QoE/QoS asigură că atât performanța sistemului, cât și calitatea percepută de utilizator sunt menținute.

Această arhitectură asigură interoperabilitate și scalabilitate, permițând dispozitivelor eterogene să "vorbească aceeași limbă" la nivelul virtual, indiferent de protocoalele lor de comunicare. De exemplu, semafoarele, camerele rutiere și sistemele de parcare activate RFID pot interacționa prin VO-urile lor, chiar dacă folosesc tehnologii diferite la nivel fizic [1].

Arhitectura clasică prezentată în figura de mai sus a fost experimentată în contextul Smart City cu orientare pe domeniul turismului: infrastructurile IoT (sniffer-e și camere wireless) au monitorizat mișcările pasagerilor debarcați de pe un vas de croazieră, permițând optimizarea fluxurilor de transport. Virtualizarea obiectelor fizice asigură interoperabilitatea, iar layer-ul de servicii permite generarea de recomandări personalizate pentru vizitatori cu nevoi diferite de mobilitate [1]. În mod similar, sistemele de mobilitate urbană care integrează dispozitive IoT și rețele neuronale pot clasifica pietoni, biciclete și vehicule cu o precizie de până la 98% [30]. Aceste rezultate subliniază importanța IoT pentru dezvoltarea Smart Cities.

Cu toate aceste implementările timpurii ale IoT în contextul Smart Cities, s-a ajuns rapid la limitările inerente conceptului IoT, respectiv că dispozitivele sunt adesea izolate în aplicații verticale, lipsind interoperabilitatea între domenii. În plus, registrele de servicii centralizate fac descoperirea dispozitivelor ineficientă în rețele cu pun potențial de miliarde de dispozitive până în 2030. Acest lucru a stimulat explorarea paradigmatelor mai dinamice, unde dispozitivele nu doar comunică, ci interacționează și social.

3.1.2 Social Internet of Things - SIoT

În timp ce arhitecturile IoT oferă interoperabilitate și schimb de date, acestea rămân limitate atunci când sunt aplicate în mediile extrem de dinamice și eterogene ale orașelor inteligente. În special, IoT nu dispune de mecanisme eficiente pentru descoperirea serviciilor, managementul încrederii și cooperarea autonomă. Paradigma SIoT abordează aceste limitări prin introducerea principiilor sociale în interacțiunile dintre dispozitive și servicii, permițând obiectelor să se comporte în mod similar cu oamenii în rețelele sociale digitale [2], [10].

Ideea centrală din spatele SIoT este că obiectele pot stabili relații sociale - prietenii, legături de co-localizare, legături parentale (de proprietate) sau conexiuni temporare bazate pe sarcini.

Aceste legături sociale îmbunătățesc navigabilitatea și încrederea, permițând dispozitivelor să se descopere reciproc în mod eficient și să coopereze fără a necesita structuri centralizate. De exemplu, o mașină electrică inteligentă care caută o stație de încărcare poate interoga obiectele sale "prietene" în graful SIoT, primind recomandări bazate pe încredere în loc să efectueze o căutare oarbă în toate nodurile disponibile.

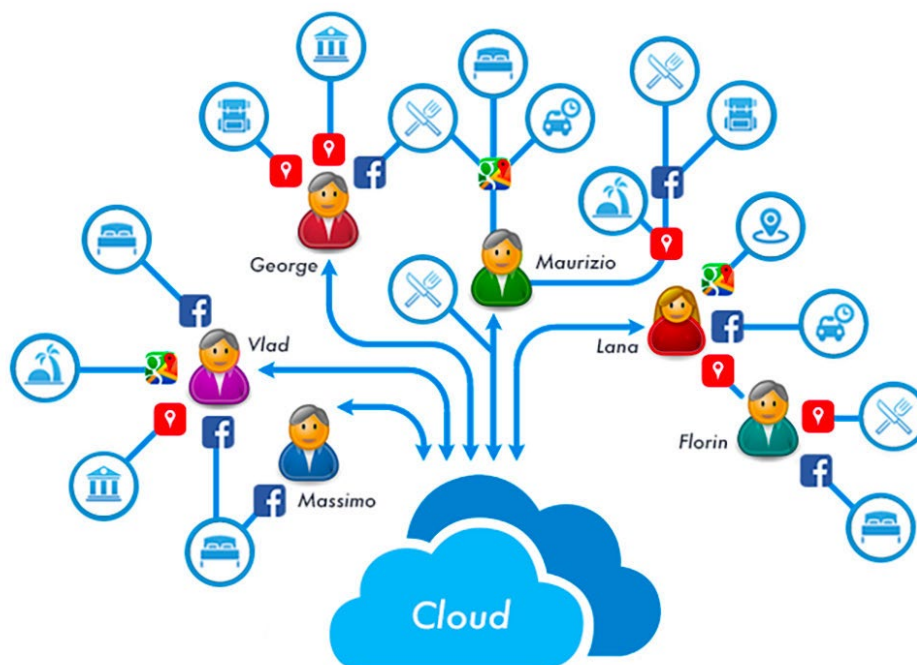


Fig. 3.2 – Exemplu de graf social SIoT care leagă utilizatori, servicii și platforme cloud

Figura 3.1 [2] ilustrează modul în care SIoT integrează utilizatori, servicii digitale (turism, transport, patrimoniu cultural, cazare) și platforme (Facebook, Google Maps) într-o rețea structurată social. Fiecare entitate interacționează prin intermediul cloud-ului, dar, în loc de schimb brut de date, legăturile sunt îmbogățite de semantică socială precum locația, preferințele și feedback-ul bazat pe reputație.

Această structură oferă trei avantaje majore:

- navigabilitate îmbunătățită: asemenea rețelelor sociale umane, rețelele SIoT prezintă proprietăți de tip "lume mică", ceea ce înseamnă că obiectele pot localiza serviciile dorite printr-un număr mic de salturi sociale [5], [11]. Acest lucru reduce drastic complexitatea descoperirii în comparație cu căutările tradiționale IoT.
- propagarea încrederii: în paradigma IoT, dispozitivele nu pot fi catalogate pe bază de "reputație". Paradigma SIoT folosește reputația obiectelor pe care o derivă din interacțiunile sociale. De exemplu, dacă "Vlad" a interacționat constant cu servicii turistice fiabile, recomandările sale vor avea mai multă greutate în rețea [2].
- Compoziție dinamică a serviciilor: SIoT permite compoziția autonomă a macro-serviciilor. De exemplu, într-un scenariu turistic, serviciile de cazare, recomandările de restaurante și furnizorii de transport pot interacționa social pentru a crea un pachet de călătorie personalizat [1].

Dincolo de obiecte, cercetarea SIoT a evoluat către Internetul Social al Serviciilor (Social Internet of Services - SIOS), unde serviciile însele acționează ca și entități sociale capabile să

recomande, să susțină sau chiar să "se împrietenească" între ele. Această tranziție deplasează punctul de greutate de la conectivitatea între dispozitive (specifică IoT) la sinergia între servicii, aliniindu-se direct cu nevoile Smart Cities, unde serviciile de mobilitate, sănătate, turism și guvernare sunt interconectate [2], [10].

În practică, primele demonstratoare SIoT în domeniul turismului arată cum serviciile modelate ca Obiecte Virtuale Social Conștiente (Virtually Socially Aware Objects - VSAO) pot coopera pentru a recomanda itinerarii turistice accesibile, îmbinând date de la operatori de transport, instituții culturale și recenzii din rețelele sociale. Acest lucru demonstrează potențialul SIoT de a face trecerea de la interoperabilitatea tehnică la luarea de decizii social conștiente [2], [3].

3.1.3 Aplicații IoT și SIoT în scenarii de orașe inteligente

Tranziția de la IoT la SIoT are implicații profunde pentru aplicațiile practice din domeniu Smart Cities. În timp ce IoT permite colectarea datelor și monitorizarea la distanță, SIoT extinde aceste capacități prin încorporarea încrederii, cooperării și conștiinței sociale direct în interacțiunile de servicii. Această secțiune prezintă domeniile cheie de aplicare unde SIoT poate debloca valoare nouă dincolo de implementările tradiționale IoT.

- **Turism și patrimoniu cultural:** turismul este una dintre industriile cu cea mai rapidă creștere în contextul orașelor inteligente și un mediu de testare foarte important pentru sistemele IoT și SIoT. Infrastructurile IoT includ deja funcții de bază precum numărarea vizitatorilor și informații de transport în timp real [1]. Cu SIoT, aceste capacități se extind în experiențe personalizate, guvernate de reguli sociale. De exemplu, serviciile din zona patrimoniului cultural pot "coopera" cu serviciile de transport și cazare pentru a compune dinamic itinerarii bazate pe nevoile de accesibilitate ale unui turist, recenzii ale colegilor sau feedback din rețelele sociale [2]. Includerea parametrilor de accesibilitate în demonstratoarele SIoT evidențiază modul în care această abordare promovează turismul incluziv, adresându-se călătorilor vârstnici și cu dizabilități [1].
- **Mobilitate și transport:** implementările IoT în mobilitate se concentrează în principal pe monitorizarea traficului, urmărirea vehiculelor și optimizarea transportului public. SIoT permite vehiculelor, infrastructurii și serviciilor de mobilitate să formeze grupuri bazate pe măsurarea încrederii, vehiculând date despre blocajele din trafic, pericole sau disponibilitatea parcarilor. De exemplu, un vehicul SIoT ar putea interoga "prieteni" săi (vehicule din apropiere sau senzori de parcare) pentru a găsi rute sigure și de încredere în timp real [3]. Această cooperare socială poate îmbunătăți nu doar eficiența, ci și siguranța, reducând dependența de sistemele centralizate de control al traficului.
- **Sustenabilitate și mediu:** monitorizarea mediului bazată pe IoT se bazează pe senzori care măsoară parametri precum temperatură, umiditate, calitatea aerului, zgomotul ambiental. SIoT îmbunătățește aceste rețele prin promovarea conștientizării colective: dispozitivele și serviciile pot forma grupuri sociale temporare pentru a agrega datele despre poluare, detecta anomalii și recomanda răspunsuri coordonate. De exemplu, serviciile de colectare a deșeurilor s-ar putea alinia social cu senzorii de trafic și calitate a aerului pentru a proiecta rute de colectare eco-eficiente [3].
- **Administrare participativă:** platformele IoT permit municipalităților să colecteze date despre utilizarea infrastructurii. SIoT extinde acest lucru permițând interacțiunea directă cetățean-serviciu prin twin-uri digitale *conștiente din puncte de vedere social*

(*socially aware*). Dispozitivele cetățenilor pot acționa ca "obiecte sociale" dotate cu un anumit grad de *încredere* (*trustworthiness*) care schimbă informații cu serviciile orașului în timp real, promovând administrarea participativă [2].

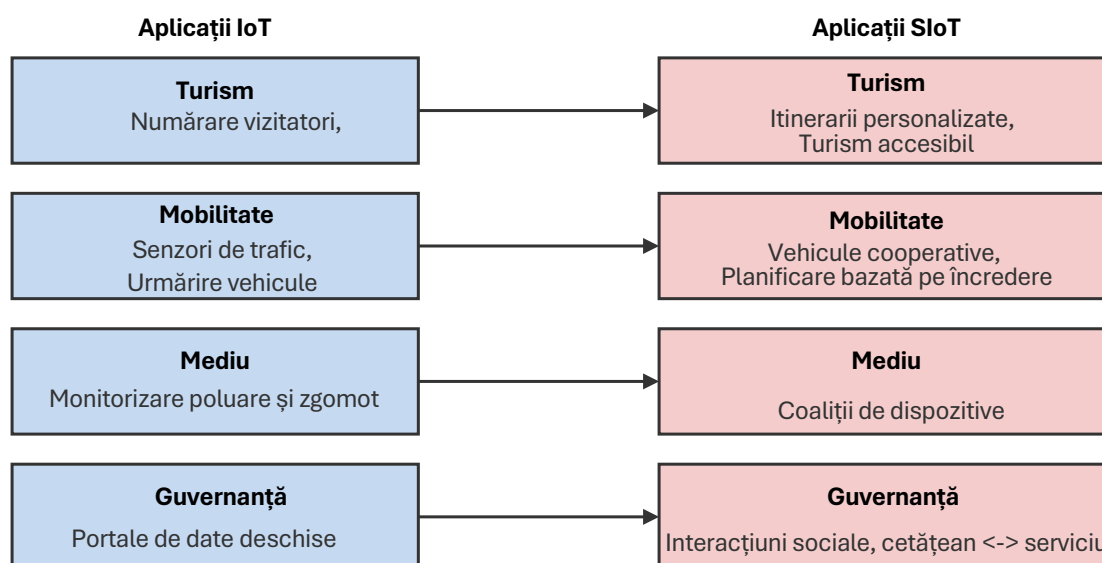


Figura 3.3 –Aplicații IoT vs. SIoT în contextul Smart Cities

Figura 3.3 compară din punct de vedere conceptual paradigmele IoT și SIoT în domeniile orașelor inteligente: În IoT, serviciile sunt verticale izolate (de exemplu, transport, mediu, turism). În SIoT, serviciile sunt interconectate social, permițând cooperarea și compoziția dinamică. De exemplu, IoT poate monitoriza poluarea, dar SIoT poate conecta social serviciile de transport și mediu pentru a recomanda opțiuni de mobilitate mai curate.

3.1.4. Provocări și direcții viitoare

Deși domeniul SIoT oferă avantaje evidente față de IoT în ceea ce privește navigabilitatea, managementul încrederii și compoziția dinamică a serviciilor, mai multe provocări rămân nerezolvate înainte ca acesta să poată fi integrat pe deplin în infrastructurile orașelor inteligente la scară largă. Aceste provocări sunt multidimensionale, cuprinzând deopotrivă considerente tehnice cât și sociale, etice și de guvernanță.

- Scalabilitate și complexitate:** creșterea exponențială a dispozitivelor conectate în mediile urbane - proiectate să depășească 25 de miliarde până în 2030 [18] - ridică întrebări despre modul în care SIoT poate gestiona eficient relațiile sociale [3]. Crearea și menținerea a milioane de legături sociale între obiecte necesită algoritmi de descoperire optimizați bazați pe grafuri și mecanisme de propagare a încrederii. Fără o proiectare atentă, costurile descoperirii obiectelor pot crește exponențial, reducând capacitatea de răspuns pentru aplicații în timp real, cum ar fi controlul traficului sau monitorizarea parametrilor de sănătate.
- Interoperabilitate și standarde:** Implementările IoT în orașele sunt încă fragmentate, bazându-se pe platforme specifice furnizorilor și protocoale de comunicare eterogene. Pentru ca SIoT să funcționeze fără probleme, standardizarea (potențial sub îndrumarea

IEEE, ITU sau 3GPP) este esențială pentru armonizarea modului în care dispozitivele formează, gestionează și dizolvă relațiile sociale [1].

- **Confidențialitate, securitate și considerente de etică:** SIoT îmbunătățește încrederea prin mecanisme specifice care însă amplifică și riscurile de confidențialitate. Metadatele sociale vehiculate de dispozitive pot releva date sensibile despre comportamentele, traiectoriile de mobilitate sau preferințele cetățenilor. Acest lucru creează riscuri de profilare și implicit de monetizare non-etică a datelor urbane [2]. Atenuarea acestor riscuri necesită tehnici de calcul care păstrează confidențialitatea (de exemplu, confidențialitate diferențială, criptare homomorfă, învățare federată) și modele de guvernare care să garanteze transparența și consimțământul cetățenilor. Majoritatea acestor considerente vor fi tratate în cadrul paragrafului 3.4.
- **Energie și sustenabilitate:** Mecanismele de discovery, comunicarea și evaluarea încrederii inerente în SIoT pot crește consumul de energie în ecosistemele IoT. Proiectele viitoare vor necesita abordarea strategiilor de tip *green networking*, optimizând energia per bit (biți/Joule) în timp ce echilibrează calitatea serviciului. Acest lucru se aliniază cu obiectivele globale de sustenabilitate și tranziția mai largă către orașe neutre din punct de vedere climateric [3].
- **Integrarea cu 6G:** integrarea SIoT cu infrastructurile de comunicații de a șasea generație (6G) este probabil cea mai importantă direcție viitoare. 6G promite latență ultra-redușă (<1 ms), rate de date de Tbps și orchestrare nativă AI - capacități care abordează direct blocajele de scalabilitate și descoperire ale SIoT [8]. De exemplu, comunicarea semantică în 6G ar putea permite dispozitivelor să schimbe înțeles în loc de date brute, reducând semnificativ încărcările rețelei și îmbunătățind eficiența SIoT [12]. În plus, inteligența de margine în 6G poate susține luarea deciziilor descentralizate, permițând SIoT să scaleze fără a se baza pe servere cloud centralizate. Trecerea de la 5G la 6G este discutată în detaliu în cadrul paragrafului 3.2
- **Guvernare și modele axate pe cetățean:** În cele din urmă, viitorul SIoT în orașele inteligente trebuie să fie axate pe cetățean. Inovația tehnică este insuficientă dacă modelele de guvernare nu reușesc să asigure incluziunea, transparența și responsabilitatea. Modelele viitoare ar trebui să împuternicească cetățenii să-și controleze identitățile digitale și modul în care dispozitivele lor interacționează social. Acest lucru necesită o colaborare multidisciplinară între ingineri, factorii de decizie politică și eticieni.

Evoluția de la IoT la SIoT marchează un pas decisiv către dezvoltarea ecosistemelor Smart Cities cu adevărat inteligente și adaptive. În timp ce IoT a furnizat coloana vertebrală structurală pentru detectare și conectivitate, SIoT introduce încrederea, cooperarea și conștientizarea socială ca proprietăți intrinseci ale infrastructurilor urbane. Provocările de scalabilitate, interoperabilitate, confidențialitate și sustenabilitate rămân substanțiale, dar integrarea tehnologiilor 6G promite să ofere inteligența computațională și capacitățile de comunicare necesare pentru a le depăși. Succesul SIoT în cadrul orașelor inteligente nu va fi măsurat doar prin performanța tehnologică, ci prin capacitatea sa de a promova servicii incluzive, sigure și centrate pe cetățean, asigurându-se că transformarea digitală se traduce în beneficii societale tangibile.

3.2 Rolul 5G în ecosistemele Smart Cities actuale

Înainte de a analiza potențialul transformator al 6G, este esențial să se înțeleagă contribuțiile concrete ale rețelelor de a cincea generație (5G) la ecosistemele urbane inteligente existente — contribuții care definesc totodată și limitele de la care 6G trebuie să pornească. Rețelele 5G, standardizate prin 3GPP Release 15 și extinse progresiv până la Release 17, au introdus trei clase de servicii fundamental diferite față de generațiile anterioare: enhanced Mobile Broadband (eMBB) pentru aplicații multimedia de înaltă rezoluție, Ultra-Reliable Low Latency Communications (URLLC) pentru sisteme de control în timp real, și massive Machine Type Communications (mMTC) pentru conectivitatea densă a dispozitivelor IoT la nivel urban [6], [8], [19].

Una dintre cele mai relevante capabilități 5G pentru Smart Cities este network slicing — posibilitatea de a crea rețele logice virtuale independente pe o infrastructură fizică partajată. Fiecare slice poate fi configurată cu parametri diferiți de latență, lățime de bandă, fiabilitate și prioritate, corespunzând unor cerințe specifice ale aplicațiilor urbane. De exemplu, un slice dedicat sistemelor de urgență poate garanta latență sub 1 ms și fiabilitate de 99,999%, în timp ce un slice separat gestionează fluxurile video de supraveghere urbană, fără ca cele două tipuri de trafic să interfereze [19]. Standardele 3GPP definesc tipurile de slice prin Slice Service Types (SST): eMBB (SST=1), URLLC (SST=2) și mMTC (SST=3), fiecare cu profiluri de performanță distincte.

Complementar network slicing-ului, Multi-access Edge Computing (MEC) — standardizat de ETSI — aduce capacitățile de calcul la marginea rețelei, în imediata proximitate a surselor de date. În contextul Smart Cities, MEC reduce semnificativ latența pentru aplicațiile sensibile la timp: procesarea în timp real a fluxurilor video pentru detectarea incidentelor de trafic, inferența AI locală pentru clasificarea persoanelor în spații publice, sau gestionarea dinamică a semaforizării bazată pe densitatea traficului detectată local [8], [19]. Combinația MEC cu network slicing reprezintă arhitectura de bază pe care sunt construite primele generații de servicii urbane inteligente cu 5G.

Cu toate acestea, 5G prezintă limitări structurale relevante pentru Smart Cities la orizontul 2030+. Spectrul utilizat (sub 6 GHz și mmWave) impune compromisuri între acoperire și capacitate. Latența tipică end-to-end în implementările 5G comerciale rămâne în intervalul 5–10 ms — insuficientă pentru aplicații precum conducerea autonomă cooperativă care necesită sub 1 ms. Densitatea de conexiuni mMTC, deși semnificativ îmbunătățită față de 4G (până la 10^6 dispozitive/km²), nu acoperă scenariile de hiper-densitate urbană proiectate pentru 2030 [6], [8]. Aceste limitări, alături de absența inteligenței native în structura rețelei, motivează tranziția spre 6G ca platformă fundamentală pentru Smart Cities de nouă generație.

3.3 Smart Cities și 6G

Urbanizarea rapidă a secolului XXI a impus cerințe fără precedent asupra infrastructurilor de comunicații. Platformele tradiționale IoT și rețelele 5G, deși puternice, sunt cvasi-insuficiente pentru a susține complexitatea existentă la ora actuală în arhitecturi de tip Smart Cities. Ca răspuns, rețelele de a șasea generație (6G) apar ca și componentă de bază pentru următoarea fază a inteligenței urbane. Spre deosebire de 5G, care s-a concentrat pe bandă largă îmbunătățită, comunicații ultra-fiabile cu latență redusă și comunicații masive de tip M2M, 6G

integrează inteligența artificială, inteligența de tip edge, frecvențele din gama terahertz și comunicațiile semantice într-o singură structură coerentă [6].

În orașele inteligente, 6G nu va oferi doar conectivitate mai rapidă și mai eficientă din punct de vedere energetic, ci va remodela, de asemenea, modul în care ecosistemele urbane sunt proiectate, gestionate și folosite de cetățeni. Următoarele subcapitole explorează fundamentele conceptuale, tehnologiile existente și aplicațiile transformatoare ale 6G în orașele inteligente.

3.3.1 Parametri comparativi 5G vs. 6G pentru aplicații Smart Cities

Tranziția de la 5G la 6G nu este o simplă evoluție cantitativă, ci o schimbare de paradigmă care redefineste ce este posibil în ecosistemele urbane inteligente. Tabelul 3.1 sintetizează parametrii tehnici cheie ai celor două generații, pe baza specificațiilor ITU-R IMT-2020 pentru 5G și a viziunii IMT-2030 pentru 6G [7], [8].

Tabelul 3.1 – Parametri comparativi 5G vs. 6G pentru Smart Cities

Parametru	5G (IMT-2020)	6G (IMT-2030)	Relevanță Smart Cities
Rată de date de vârf	20 Gbps	~1 Tbps	Teleprezență holografică, XR
Latență end-to-end	1–10 ms	< 0,1 ms	Conducere autonomă, chirurgie robotică
Densitate conexiuni	10 ⁶ disp./km ²	10 ⁷ disp./km ²	Hiper-densitate IoT urban
Fiabilitate	99,999%	99,99999%	Infrastructuri critice urbane
Eficiență energetică	1× (referință)	10–100×	Green networking, orașe neutre climatic
Spectru	< 6 GHz + mmWave	THz + mmWave + sub-6	Capacitate masivă în spații dense
Inteligență nativă	Externă (cloud AI)	Nativă (AI în rețea)	Orchestrare autonomă servicii urbane
Integrare satelitară	Parțială (Rel. 17)	Nativă (terestru + NTN)	Reziliență, acoperire globală

Diferențele sunt semnificative nu doar cantitativ, ci și calitativ. Latența 5G, deși revoluționară față de 4G, rămâne insuficientă pentru aplicații de conducere autonomă cooperativă (< 0,5 ms) sau control haptic la distanță (< 1 ms). Eficiența energetică de 10–100× a 6G față de 5G este critică în contextul în care rețelele mobile consumă deja circa 2% din energia globală, iar densificarea urbană va amplifica acest consum [7]. Inteligența nativă 6G — spre deosebire de AI-ul adăugat extern în 5G — permite rețelei să se auto-optimizeze, să gestioneze autonom interferențele și să aloce resurse în funcție de contextul semantic al cererilor. Această capacitate este definitorie pentru un management urban cu adevărat autonom și eficient energetic [8].

3.3.2. Fundamentele conceptuale ale 6G pentru Smart Cities

Tranziția de la sistemele de comunicații de a cincea generație (5G) la a șasea generație (6G) reprezintă o schimbare de paradigmă de la rețele de conectivitate la rețele inteligente [6]. În timp ce 5G a introdus bandă largă mobilă îmbunătățită, comunicații ultra-fiabile cu latență redusă și comunicații masive de tip mașină, aceasta rămâne încă centrată pe infrastructură. În schimb, 6G este vizualizat ca nativ-AI, încorporând inteligența direct în structura de comunicare a rețelelor [8].

Această evoluție este deosebit de relevantă pentru orașele inteligente, unde miliarde de dispozitive interconectate trebuie să se coordoneze în timp real. Spre deosebire de 5G, care se

baza în mare măsură pe procesare și inteligența cloud, 6G va exploata edge și fog computing, permițând luarea deciziilor aproape de sursa de date. Acest lucru va asigura latență ultra-redușă (<1 ms) și throughput extrem de ridicat (la nivel de Tbps), ambele esențiale pentru serviciile urbane critice, cum ar fi conducerea autonomă cooperativă, telemedicina și digitale twin [3], [17].

Un alt pilon conceptual al 6G este comunicarea semantică și orientată spre obiective. În timp ce sistemele IoT tradiționale transmit date brute (de exemplu, temperatură, calitatea aerului, fluxul de trafic), 6G va permite dispozitivelor să transmită informații contextualizate. De exemplu, în loc să trimită toate imaginile camerelor de trafic, un sistem activat 6G ar putea transmite concluzia: "accident detectat, congestioneare probabilă pentru 15 minute" [8]. Această schimbare reduce semnificativ overhead-ul de comunicare, crește eficiența și face rețelele mai aliniate cu nevoile cognitive ale managementului orașelor inteligente.

Sustenabilitatea este de asemenea încorporată în viziunea 6G. Spre deosebire de generațiile anterioare care au acordat prioritate adesea performanța în detrimentul utilizării energiei, 6G introduce comunicarea eficientă energetic per bit ca și principiu de proiectare. Acest lucru este critic pentru orașele inteligente, unde obiectivele de sustenabilitate sunt la fel de importante ca performanța tehnologică [7].

În cele din urmă, 6G aduce integrare multi-dimensională: nu doar combină rețelele terestre și satelit, dar încorporează și comunicarea cu lumină vizibilă (visible light communication - VLC), benzile THz și metodele de comunicare cuantică sigură.

3.3.3. Aplicații 6G în orașele inteligente

Integrarea tehnologiilor 6G în ecosistemele urbane este de așteptat să permită aplicații transformatoare care se extind mult dincolo de capacitățile infrastructurilor bazate pe 5G. Aceste aplicații vor remodela fundamental modul în care cetățenii interacționează cu orașele, modul în care sunt livrate serviciile și modul în care sunt guvernate sistemele urbane.

- **Mobilitate și transport:** vehiculele autonome sunt unul dintre cei mai clari beneficiari ai 6G. Spre deosebire de 5G, care susține mașini conectate, 6G introduce percepția cooperativă, unde vehiculele, infrastructura rutieră și pietonii schimbă date de senzori de înaltă fidelitate în timp real [3]. De exemplu, un vehicul activat 6G poate "vedea în jurul colțurilor" folosind feed-uri lidar și video transmise de la mașini din apropiere sau camere inteligente. Latența ultra-redușă (<1 ms) asigură că astfel de date sunt schimbate suficient de rapid pentru a preveni accidente, în timp ce comunicarea semantică permite vehiculelor să partajeze informații interpretate (de exemplu, "obstacol detectat, frânare aplicată") în loc de fluxuri video brute [8], [12].
- **Sănătate și telemedicină:** Throughput-ul de Tbps al 6G și orchestrarea nativă AI permit teleprezența holografică, unde medicii pot interacționa cu pacienți ranzați 3D la distanță în timp real [9]. Această capacitate permite telemedicina avansată în zonele urbane dense, asigurând accesul echitabil la asistență medicală, în special pentru populațiile vârstnice. În plus, dispozitivele IoT portabile alimentate de 6G pot monitoriza continuu semnele vitale ale pacienților și transmite în siguranță date către furnizori de servicii medicale, permițând intervenții proactive [6].

- **Guvernanță și implicarea cetățenilor:** 6G va îmbunătăți guvernarea participativă permițând cetățenilor să interacționeze cu twin-uri digitale în timp real ale orașelor lor [17]. Prin platforme de realitate extinsă (XR), rezidenții ar putea participa virtual la întâlniri de planificare, vizualiza impacturile politicilor sau contribui la co-crearea serviciilor. Aceasta este o schimbare de la orașele inteligente bazate pe date la democrații digitale bazate pe cetățeni, unde procesele decizionale sunt transparente, interactive și incluzive [3].
- **Turism și patrimoniu cultural:** Serviciile turistice vor fi transformate de aplicații XR immersive, alimentate de ratele de date extreme ale 6G. Vizitatorii vor experimenta patrimoniul cultural prin ghizi holografici, suprapuneri AR la situri istorice sau chiar XR multi-senzorial care combină vederea, sunetul și atingerea [1]. Dincolo de divertisment, aceste aplicații promovează incluziunea prin furnizarea de caracteristici de accesibilitate personalizate pentru turiștii vârstnici sau cu dizabilități.
- **Industrie și producție inteligentă:** În cadrul mai larg al Industriei 5.0, 6G susține robotica colaborativă și twin-uri digitale ale fabricilor, permițând sincronizarea în timp real între sistemele cibernetice și fizice. În contexte urbane, acest lucru asigură integrarea eficientă a hub-urilor de producție urbană, logistica inteligentă și lanțurile de aprovizionare reziliente. Aceste sisteme sunt esențiale pentru orașele auto-sustenabile care urmăresc să minimizeze dependența de resursele externe [8].

Prin implementarea unor astfel de servicii, 6G va juca un rol decisiv în transformarea orașelor în laboratoare vii unde realitățile digitale și fizice coexistă.

3.3.4. Digital Twins urbane — definiție, arhitectură și exemple

Conceptul de digital twin (DT) — geamăn digital — desemnează o reprezentare virtuală dinamică și sincronizată a unui sistem fizic, capabilă să simuleze starea, comportamentul și evoluția sa în timp real pe baza fluxurilor continue de date senzoriale [17]. Introdus inițial în contextul producției industriale, conceptul a evoluat rapid spre aplicații urbane la scară largă, unde urban digital twins (UDT) permit simularea, monitorizarea și optimizarea întregului ecosistem al unui oraș inteligent.

Arhitectura unui UDT tipic integrează patru componente funcționale interdependente. La nivel de percepție, rețelele de senzori IoT — camere, senzori de calitate a aerului, contoare inteligente, detectoare de trafic — furnizează fluxuri continue de date despre starea fizică a orașului. La nivel de comunicații, rețelele 5G/6G asigură transmisia cu latență redusă a acestor fluxuri de la dispozitive la platforma digitală. La nivel de procesare și modelare, algoritmi AI și modelele fizico-matematice construiesc și actualizează reprezentarea virtuală, integrând date în timp real cu modele predictive. La nivel de interfață și decizie, dashboarduri interactive, medii XR și sisteme de suport al deciziei permit operatorilor urbani și cetățenilor să interacționeze cu replica digitală a orașului [17], [3].

Exemple concrete de implementare validează maturitatea acestui concept. Virtual Singapore, una dintre cele mai avansate implementări globale, combină date GIS, BIM (Building Information Modeling) și analiză cloud pentru a simula scenarii urbane complexe — de la analiza impactului construcțiilor noi asupra umbririi și ventilației naturale, la optimizarea

plasării stațiilor de urgență. Helsinki a dezvoltat un UDT care integrează date în timp real pentru monitorizarea calității aerului, planificarea sustenabilă și optimizarea consumului energetic al clădirilor, cu aplicații extinse și în domeniul turismului virtual prin VR. Studiile comparative indică că orașele care utilizează digital twins — Singapore, Dubai, Helsinki, Rotterdam — au obținut îmbunătățiri de 20–30% în eficiența operațională a serviciilor urbane [17].

Integrarea UDT cu infrastructura 6G urmează să transforme aceste sisteme de la instrumente de planificare la infrastructuri de management urban în timp real. Latența sub-milisecundă a 6G va permite sincronizarea cvasi-instantanee a replicii digitale cu starea fizică a orașului, în timp ce capacitățile AI native ale rețelei vor susține optimizarea autonomă a resurselor urbane (energie, trafic, servicii de urgență) fără intervenție umană. Această convergență UDT–6G–AI reprezintă probabil cel mai profund salt calitativ în managementul urban al deceniului următor [8], [17].

3.3.5. Rețele Non-Terestre (NTN) în arhitectura 6G pentru Smart Cities

O componentă esențială a viziunii 6G adesea omisă în analizele orientate exclusiv spre rețelele terestre este integrarea nativă a rețelelor non-terestre (Non-Terrestrial Networks — NTN) în arhitectura de comunicații urbane. Spre deosebire de 5G, unde NTN a fost introdusă parțial prin 3GPP Release 17 ca funcționalitate opțională, 6G integrează sateliții, platformele de mare altitudine (HAPS — High Altitude Platform Stations) și vehiculele aeriene fără pilot (UAV) ca noduri de rețea de primă clasă, interoperabile nativ cu infrastructura terestră [7], [8], [23].

Arhitectura NTN 6G operează pe trei niveluri cu caracteristici complementare. Sateliții LEO (Low Earth Orbit, 500–2000 km altitudine) precum constelațiile de tip Starlink sau OneWeb, oferă acoperire globală cu latențe de 20–40 ms, semnificativ mai mici decât sateliții GEO tradiționali (~600 ms). Platformele HAPS (17–22 km altitudine, stratosferă) pot oferi acoperire echivalentă cu sute de stații de bază terestre dintr-un singur nod, cu latențe de 1–5 ms apropiate de performanțele stațiilor terestre. Dronele UAV utilizate ca stații de bază mobile (UAV-BS) completează acoperirea în zone urbane temporar supraîncărcate sau inaccesibile, adaptând dinamic topologia rețelei la cerere [23].

Pentru Smart Cities, integrarea NTN în 6G aduce avantaje concrete pe trei dimensiuni. Din perspectiva rezilienței, o arhitectură urbană care combină rețele terestre densificate cu backhaul satelitar LEO și acoperire HAPS elimină practic punctele vulnerabile ale arhitecturilor terestre, de exemplu orașele afectate de calamități naturale sau atacuri cibernetice care degradează infrastructura terestră, conectivitatea dispozitivelor IoT critice putându-se asigura prin redirectionare automată prin NTN [7], [23]. Din perspectiva acoperirii echitabile, NTN permite extinderea serviciilor Smart Cities la zonele periurbane și rurale din proximitatea marilor aglomerări, reducând decalajul digital urban-rural, unul dintre riscurile sociale majore identificate în secțiunile anterioare. Din perspectiva managementului evenimentelor, platformele HAPS și UAV-BS pot fi desfășurate rapid pentru a suplimenta capacitatea rețelei în zone de concentrare temporară a populației (concerte, evenimente sportive, situații de urgență) fără investiții în infrastructură permanentă [8], [23].

Standardizarea NTN în contextul 6G progresează activ la nivel internațional. 3GPP Release 17 a introdus primele specificații normative pentru NR-NTN și NB-IoT-NTN (sateliți LEO și

GEO), Release 18 a rafinat performanțele și handover-ul seamless, iar lucrările din Release 19 extind integrarea HAPS și UAV. ITU-R, prin grupul de lucru WP4B, lucrează la armonizarea spectrului și a interfețelor pentru NTN în cadrul viziunii IMT-2030, asigurând că integrarea NTN va fi o caracteristică nativă a standardelor 6G, nu o extensie opțională [7], [23]. Din perspectiva orașelor inteligente, aceasta înseamnă că arhitecturile de conectivitate urbană proiectate astăzi trebuie să includă ab initio dimensiunea non-terestră, atât pentru reziliența operațională, cât și pentru echitatea accesului la serviciile digitale urbane.

3.3.6. Provocări și perspective viitoare

Introducerea 6G în orașele inteligente aduce nu numai oportunități fără precedent, ci și o gamă largă de provocări care trebuie abordate pentru a asigura dezvoltarea sustenabilă și echitabilă. Din perspectivă tehnică, adoptarea comunicațiilor terahertz, rețelelor semantice și orchestrării native AI necesită o actualizare radicală a infrastructurilor existente. Orașele vor necesita implementări ultra-dense de stații de bază, servere de margine și gateway-uri inteligente. Integrarea rețelelor terestre, satelit și optice într-un întreg fără cusur va fi un proces complex, în timp ce sarcina financiară și logistică de actualizare a infrastructurilor 4G și 5G moștenite rămâne semnificativă [8]. În figura 3.4 sunt prezentate tehnologiile care vor duce la realizarea viitoare aplicații 6G în contextul Smart Cities.

Consumul de energie reprezintă o altă prioritate: deși 6G a fost conceput având în vedere sustenabilitatea, susținerea serviciilor intensive în date, cum ar fi teleprezența holografică, twin-urile digitale în timp real și XR imersiv, va crește inevitabil cerințele de energie. Dacă nu este gestionat cu atenție, acest lucru ar putea exacerba consumul de energie aferent din mediilor urbane ceea ce implicit va necesita încorporarea unor strategiilor de tip green-networking, inclusiv stații de bază alimentate cu energie regenerabilă, protocoale de rutare energy-aware și optimizarea bazată pe AI a resurselor de rețea [3].

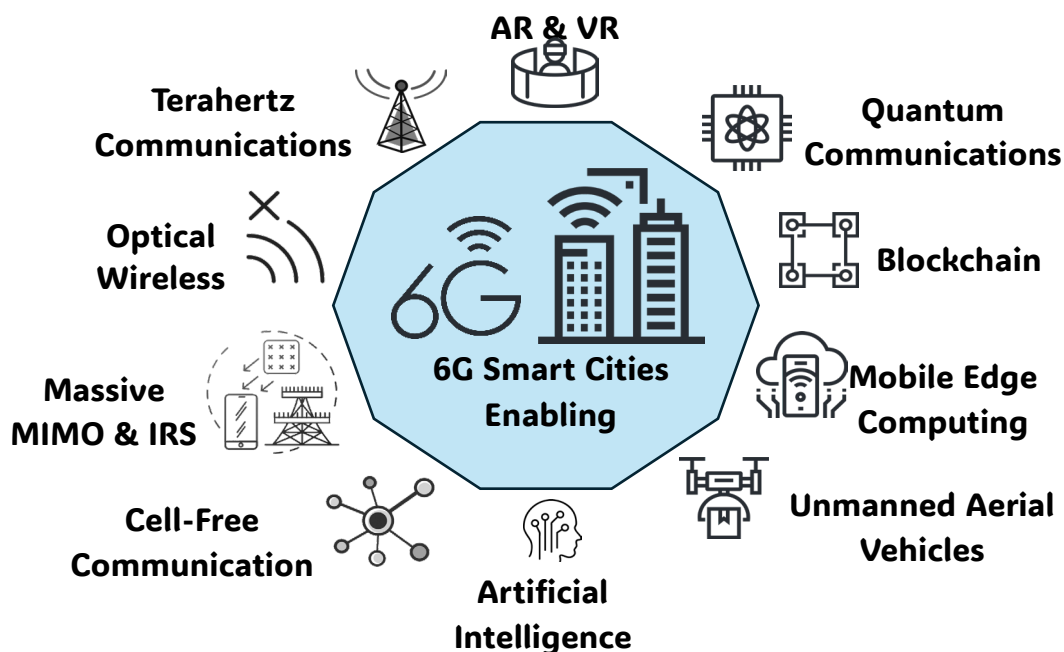


Figura 3.4 – Smart Cities și 6G – tehnologii și domenii de aplicabilitate [3]

Implicațiile sociale ale implementărilor 6G trebuie, de asemenea, să fie luate în considerare cu atenție. Costul desfășurării de noi infrastructuri riscă să creeze un peisaj urban "cu două viteze", unde orașele și regiunile bogate avansează rapid, în timp ce zonele mai puțin dotate cu resurse rămân în urmă [6]. Fără măsuri corective, acest lucru ar putea exacerba decalajul digital, lăsând comunitățile vulnerabile excluse de la serviciile de generație următoare. Abordarea acestui dezechilibru va necesita modele de finanțare incluzive, parteneriate public-privat și cadre de cooperare globală pentru a garanta accesul echitabil.

În cele din urmă, considerațiile de guvernanta vor determina succesul pe termen lung al orașelor inteligente activate cu tehnologie 6G. Tehnologia singură nu poate asigura incluziunea, transparența sau responsabilitatea. Modelele de guvernanta trebuie să împuternicească cetățenii să modeleze activ modul în care datele lor sunt colectate, procesate și utilizate. Colaborarea interdisciplinară între ingineri, factorii de decizie politică, eticieni și societatea civilă va fi crucială pentru a preveni tehnologia să depășească responsabilitatea socială [3].

Privind înainte, 6G deschide posibilități pentru orașe auto-reglate, auto-optimizate, în care rețelele echilibrează autonom cerințele de energie, redirecționează fluxurile de mobilitate și alocă resurse de urgență fără intervenție umană. În timp ce această viziune promite eficiență și reziliență, ridică și întrebări despre dependența excesivă de automatizare și riscurile prejudecății algoritmice. Viitorul 6G în orașele inteligente se află, prin urmare, în găsirea unui echilibru atent: valorificarea inovațiilor tehnice în timp ce le fundamentează în cadre centrate pe cetățean, etice și sustenabile.

3.4 Securitatea cibernetică în contextul IoT, Smart Cities și 6G

Pe măsură ce orașele fac tranziția de la infrastructuri bazate pe IoT la ecosisteme social conștiente activate 6G, securitatea cibernetică apare ca una dintre cele mai importante probleme. Proliferarea miliardelor de dispozitive interconectate extinde suprafața de atac, în timp ce integrarea serviciilor critice, cum ar fi sănătatea, transportul și energia, face incidentele cibernetice potențial catastrofale. Orașele inteligente reprezintă, astfel, nu doar o revoluție tehnologică, ci și un câmp de luptă complex unde amenințările cibernetice pot submina reziliența, confidențialitatea și încrederea.

Securitatea cibernetică în orașele inteligente nu se referă doar la protejarea datelor; este vorba despre protejarea interacțiunilor între dispozitive, servicii și cetățeni. Următoarele subcapitole analizează amenințările existente și potențiale, contramăsurile și direcțiile viitoare în contextul infrastructurilor IoT/SIoT și 6G.

3.4.1. Amenințări existente Pe măsură ce orașele inteligente evoluează în ecosisteme hiper-conectate, alimentate de infrastructuri IoT, SIoT bazate pe 5G/6G, suprafața lor de atac se extinde dramatic. Spre deosebire de sistemele informaționale tradiționale, orașele inteligente implică dispozitive eterogene, distribuite geografic și cu resurse limitate care interacționează peste infrastructuri critice. Acest lucru le face în mod unic vulnerabile la atacuri cibernetice care pot compromite nu doar integritatea datelor, ci și siguranța publică și reziliența urbană.

La nivelul dispozitivului IoT, cum ar fi senzorii de mediu, contoarele inteligente, camerele și dispozitivele wearable, sunt adesea implementate cu capacitate computațională limitată, făcându-le dificil de securizat cu criptare tradițională sau sisteme de detectare a intruziunilor.

Aceste dispozitive operează frecvent fără supraveghere, crescând riscul de manipulare fizică, falsificare a identității sau exploatare a defectelor de programare din firmware. De exemplu, senzorii de trafic compromiși ar putea injecta date falsificate în sistemele de mobilitate la nivelul orașelor, conducând la o gestiune eronată a traficului sau chiar accidente [1].

La nivelul rețelei, riscul atacurilor *Distributed Denial of Service (DDoS)* devine deosebit de sever. Incidentul botnet-ului Mirai din 2016 a demonstrat cum dispozitivele IoT slab securizate pot fi deturnate pentru a perturba serviciile online majore [4]. În contextul unui oraș inteligent, un astfel de atac ar putea paraliza rețelele de comunicare pentru răspunsul de urgență sau dezactiva serviciile digitale pe care se bazează milioane de rezidenți. Introducerea SIoT adaugă un nou nivel de complexitate: în timp ce relațiile sociale între dispozitive îmbunătățesc încrederea, actorii rău intenționați pot exploata aceste legături pentru a amplifica formarea botnet-urilor sau a lansa atacuri coordonate de dezinformare [2].

La nivelul aplicațiilor și serviciilor, amenințările vizează interacțiunile între utilizatorii finali și platformele orașelor inteligente. Serviciile turistice inteligente, aplicațiile de sănătate sau portalurile mobilitate-ca-serviciu toate gestionează date sensibile și trebuie să interacționeze în mai multe domenii. API-uri slabe, autentificare nesigură sau servicii cloud configurate greșit ar putea duce la încălcări ale datelor, furt de identitate sau manipulare frauduloasă a serviciilor [3]. Cu 6G, trecerea către comunicarea semantică adaugă o amenințare nouă: atacatorii pot încerca să manipuleze "înțelesul" informațiilor transmise (de exemplu, alterarea interpretării unui eveniment de senzor) mai degrabă decât datele brute în sine [9], [12].

Dispozitivele de tip edge sunt expuse manipulării și malware-ului, rețelele sunt susceptibile la botnets și denial-of-service, în timp ce aplicațiile și serviciile trebuie să se confrunte cu furtul de identitate, ingineria socială și atacuri de manipulare semantică. Împreună, aceste riscuri subliniază urgența proiectării unor reglementări de securitate transversale multi-strat, care integrează securitatea dispozitivelor, reziliența rețelei și fiabilitatea aplicațiilor de la bază.

3.4.2. Încredere, confidențialitate și riscuri etice

Dincolo de vulnerabilitățile tehnice ale dispozitivelor, rețelelor și aplicațiilor, cele mai sensibile provocări în ecosistemele orașelor inteligente se referă la încredere, confidențialitate și etică. Pe măsură ce miliarde de dispozitive și servicii schimbă date, întrebarea *cine poate fi de încredere și în ce condiții* devine foarte importantă pentru menținerea acceptării sociale a infrastructurilor digitale. Spre deosebire de sistemele ITC tradiționale unde încrederea poate fi gestionată central, ecosistemele IoT și SIoT necesită mecanisme de încredere distribuite, dinamice și contextualizate [2].

În SIoT, încrederea este adesea derivată din relațiile sociale între obiecte și servicii. Dispozitivele se pot evalua reciproc pe baza scorurilor de reputație, interacțiunilor istorice sau parametrilor social, cum ar fi evaluările, aprecierile și check-in-urile [2]. În timp ce acest model îmbunătățește navigabilitatea și descoperirea serviciilor, introduce riscul de manipulare a încrederii. Entitățile rău intenționate pot crea legături sociale false sau pot altera reputația pentru a câștiga credibilitate nejustificată. Astfel de atacuri subminează nu numai securitatea, ci și fundamentele etice ale interacțiunilor de servicii, în special în domenii precum sănătatea, transportul sau turismul, unde siguranța și fiabilitatea sunt primordiale [1].

Eforturile legate de confidențialitatea datelor sunt de asemenea întemeiate: platformele orașelor inteligente colectează cantități vaste de date personale și comportamentale - de la trasee de geolocalizare și modele de mobilitate până la interacțiuni pe rețelele sociale și informații de sănătate. Când sunt combinate cu metadatele SIoT (de exemplu, legături de "prietenie" între dispozitive sau servicii), aceste seturi de date pot permite profilarea detaliată a cetățenilor [3]. Acest lucru creează un risc dublu: pe de o parte, filajul potențial, unde guvernele sau corporațiile exploatează monitorizarea pentru control sau profit; pe de altă parte, comodificarea datelor, unde informațiile personale sunt tratate ca o resursă economică fără consimțământul informat al cetățenilor [9].

Introducerea 6G intensifică aceste provocări etice. Viziunea comunicării semantice - unde dispozitivele transmit înțeles mai degrabă decât date brute - ridică posibilitatea manipulării semantice, unde adversarii alterează interpretările mai degrabă decât biții. În plus, dezvoltarea twin-urilor digitale în timp real ale întregilor orașe necesită fluxuri de date sensibile actualizate continuu. Fără garanții adecvate, aceste replici digitale riscă să devină instrumente de supraveghere pervasivă mai degrabă decât instrumente pentru reziliența urbană [3], [17].

În cele din urmă, dimensiunile de încredere, confidențialitate și etice ale IoT, SIoT și 6G evidențiază un paradox: tocmai conectivitatea socială care face orașele inteligente adaptive și eficiente riscă, de asemenea, să submineze autonomia individuală și guvernarea democratică dacă rămâne nesupravegheată. Provocarea constă în proiectarea de ecosisteme unde încrederea este câștigată, confidențialitatea este păstrată și etica ghidează evoluția tehnologică, asigurându-se că beneficiile orașelor inteligente sunt atât social, cât și tehnologic sustenabile.

Tabelul 3.2 - Riscuri de confidențialitate și etice în mediile IoT, SIoT și 6G

Mediu	Riscuri Cheie	Riscuri Etice	Soluții
IoT	Autentificare slabă, scurgere de date	Supraveghere în masă, dispozitive nesecurizate	Criptare end-to-end, control al accesului
SIoT	Manipularea încrederii, reputație falsă	Exploatarea metadatelor sociale	Sisteme de reputație, încredere pe bază de blockchain
6G	Manipulare semantică, supraveghere cu digital twins	Profilare, prejudecată algoritmică	Confidențialitate diferențială, învățare federată, guvernanta etică

3.4.3. Soluții de securitate

Peisajul amenințărilor în rapidă expansiune în orașele inteligente activate IoT și SIoT necesită soluții de securitate care merg dincolo de firewall-urile și sistemele antivirus convenționale. Având în vedere scala, eterogenitatea și criticitatea infrastructurilor urbane, abordările emergente trebuie să încorporeze reziliența în fiecare strat al ecosistemului - de la dispozitivele de margine la rețele și aplicații.

La nivel de **layer dispozitiv**, criptarea de la capăt la capăt și protocoalele de tip lightweight de autentificare sunt fundamentale pentru a preveni manipularea și accesul neautorizat. Senzorii și actuatorii IoT sunt adesea cu resurse limitate, făcând impracticabilă implementarea mecanismelor criptografice tradiționale grele. În schimb, criptografia de tip lightweight și protocoalele cu curbe eliptice au apărut ca alternative eficiente. În plus, mediile de execuție de încredere (TEE) încorporate în microcontrolere pot proteja operațiunile sensibile chiar dacă sistemul de operare este compromis [1].

La **layer-ul de rețea**, soluțiile subliniază din ce în ce mai mult încrederea distribuită și reziliența. Managementul încrederii bazat pe blockchain a fost propus ca metodă de înregistrare imuabilă a interacțiunilor dispozitivelor, prevenind astfel nodurile rău intenționate să falsifice reputațiile în contextele SIoT [2]. Folosind contracte inteligente, blockchain poate impune politici transparente pentru acces, autentificare și partajare a reputației între dispozitive. Complementar acesteia, sistemele de detectare a intruziunilor (IDS) conduse de AI analizează tiparele de trafic în rețea în timp real, permițând identificarea anomaliilor, cum ar fi formarea botnet-urilor, încercările de falsificare sau traficul de tip denial-of-service [3]. Capacitatea modelelor AI de a se adapta la vectorii de atac în evoluție le face esențiale pentru reziliența la scară urbană.

În cadrul **layer-elor de aplicație și de servicii**, accentul este pus pe Arhitecturi Zero-Trust (ZTA) și calcul care păstrează confidențialitatea. Într-un model zero-trust, nicio entitate - dispozitiv, serviciu sau utilizator - nu implică este de încredere. Fiecare interacțiune trebuie verificată continuu prin autentificare multi-factor, analiză comportamentală și impunere de politici [9], [13]. Acest lucru este deosebit de relevant în orașele inteligente, unde serviciile precum sănătatea, mobilitatea și guvernarea interacționează în mai multe domenii. În plus, tehnicile de calcul care păstrează confidențialitatea, cum ar fi învățarea federată, permit modelelor AI să fie antrenate pe dispozitive distribuite fără centralizarea datelor sensibile ale cetățenilor [15]. Acest lucru nu numai că îmbunătățește confidențialitatea, ci reduce și riscul de încălcări la scară largă.

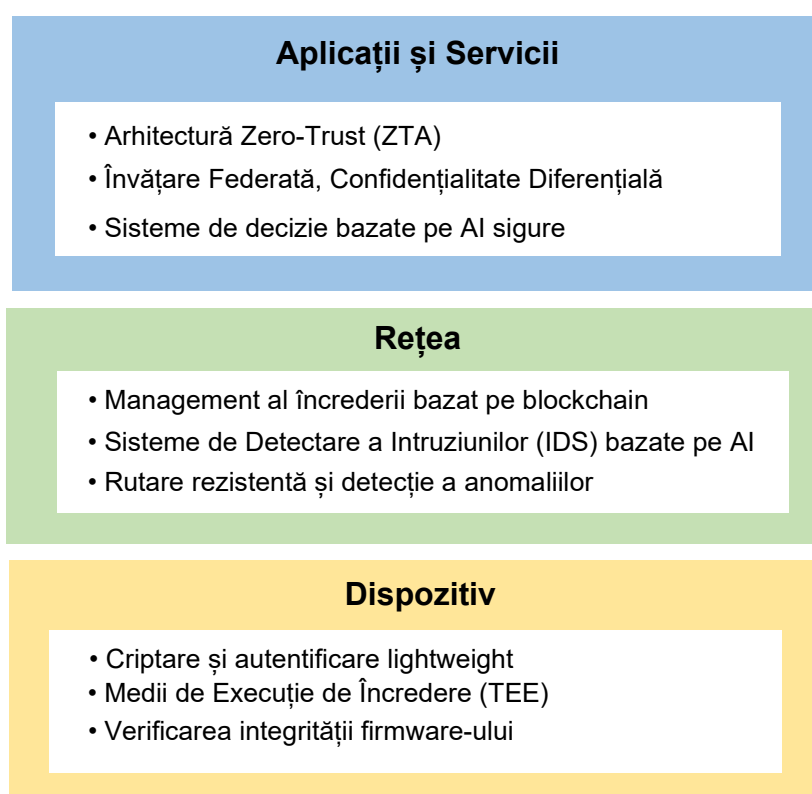


Fig 3.5 – Soluții de Securitate pentru Smart Cities

Împreună, aceste soluții reprezintă o schimbare către apărare pro-activă și adaptivă, unde securitatea este încorporată în structura însăși a orașului inteligent mai degrabă decât adăugată

ca un strat extern. Prin combinarea modelelor de încredere blockchain, detectare condusă de AI, politici zero-trust și calcul care păstrează confidențialitatea, infrastructurile urbane pot evolua în ecosisteme reziliente din punct de vedere al securității cibernetice capabile să reziste atât amenințărilor prezente, cât și viitoare.

3.4.4. Cadre legale europene pentru guvernanța datelor urbane

Transformarea digitală a orașelor inteligente se desfășoară într-un cadru juridic european în rapidă evoluție, care impune obligații concrete platformelor IoT, SIoT și 6G. Înțelegerea acestui cadru nu este opțională pentru arhitecții sistemelor urbane inteligente — neconformitatea poate genera sancțiuni de până la 4% din cifra de afaceri globală anuală în cazul GDPR, sau până la 35 milioane euro pentru sistemele AI de risc ridicat [20], [21].

Regulamentul General privind Protecția Datelor (GDPR — Regulamentul UE 2016/679) rămâne instrumentul de bază pentru protecția datelor personale în platformele Smart Cities. Principiile **privacy by design** și **privacy by default** impun ca arhitecturile IoT și SIoT să integreze protecția datelor de la stadiul de proiectare, nu ca adaos ulterior. Geolocalizarea cetățenilor, monitorizarea comportamentului de mobilitate și datele colectate de senzorii urbani sunt date personale în accepțiunea GDPR, necesitând baze juridice explicite, minimizare și transparență. Platformele SIoT care corelează relații sociale între dispozitive cu identitățile utilizatorilor sunt deosebit de expuse riscului de profilare [2], [20].

Directiva NIS2 (Directiva UE 2022/2555, în vigoare din octombrie 2024) [22] extinde semnificativ sfera obligațiilor de securitate cibernetică față de predecesoarea sa. Infrastructurile orașelor inteligente precum rețele energetice, sisteme de transport, servicii de sănătate digitală și administrație publică, se încadrează explicit în categoriile de entități esențiale și importante reglementate de NIS2. Obligațiile includ implementarea de măsuri de management al riscului cibernetic, notificarea incidentelor semnificative în 24 de ore și audituri periodice de securitate. Sancțiunile pot atinge 10 milioane euro sau 2% din cifra de afaceri globală pentru entitățile esențiale [9], [22].

Regulamentul UE privind Inteligența Artificială (AI Act, Regulamentul UE 2024/1689) clasifică sistemele AI utilizate în infrastructurile urbane critice drept sisteme de risc ridicat, impunând evaluări de conformitate, registre de transparență și supraveghere umană obligatorie. Sistemele AI pentru managementul traficului, triajul medical în urgențe sau distribuția resurselor urbane în situații de criză intră în această categorie. AI Act și GDPR se suprapun parțial: sistemele AI care procesează date personale trebuie să respecte simultan cerințele ambelor instrumente juridice [21].

Interacțiunea dintre cele trei instrumente (GDPR, NIS2 și AI Act) creează un cadru de conformitate stratificat. Abordarea integrată recomandată presupune maparea fluxurilor de date urbane față de toate cele trei instrumente simultan, implementarea arhitecturilor de tip **privacy-by-design** compatibile și constituirea unor structuri de guvernanță multi-actor care să includă responsabili de protecția datelor (DPO), ofițeri de securitate și eticieni AI. Ignorarea acestui cadru legal nu este doar un risc de sancțiuni financiare, este un obstacol fundamental în calea adoptării publice a platformelor Smart Cities de generație următoare [9], [14], [21].

3.4.5. Direcții viitoare: securitate cibernetică în era 6G

Pe măsură ce orașele inteligente se îndreaptă către integrarea 6G, securitatea cibernetică va evolua de la a fi o activitate de apărare perimetrală la a deveni o funcție încorporată, adaptivă și anticipativă a infrastructurilor urbane.

O direcție cheie este implementarea **criptografiei post-cuante**. Odată cu progresul rapid al calculului cuantic, schemele criptografice tradiționale, cum ar fi RSA și ECC, pot deveni vulnerabile. Orașele inteligente trebuie, prin urmare, să integreze algoritmi rezistenți la cuantic timpuriu în planificarea infrastructurii lor [16], asigurându-se că atât comunicările dispozitiv-la-dispozitiv, cât și cele la nivel de serviciu rămân sigure pe termen lung [7].

O altă tendință importantă este **utilizarea agenților de securitate autonomi** alimentați de inteligența artificială. Acești agenți, implementați la marginea rețelelor, vor monitoriza continuu traficul, vor detecta anomalii și vor neutraliza amenințări în timp real fără a necesita intervenție umană [3].

Conceptul de **conștientizare situațională** va câștiga, de asemenea, amploare. Prin integrarea datelor senzorilor din sistemele fizice (de exemplu, rețele electrice, rețele de apă, sisteme de transport) cu informații de securitate cibernetică, orașele vor putea detecta anomalii transdomeniu care pot semnaliza atacuri hibride complexe. De exemplu, o fluctuație neobișnuită în consumul de energie, combinată cu trafic suspect în rețea, ar putea indica un atac coordonat în desfășurare [9].

În concluzie, viitorul securității cibernetică în orașele inteligente activate 6G va fi modelat de trei piloni interdependenți: inovație tehnologică (criptografie rezistentă la cuantic, agenți conduși de AI, conștientizare situațională), guvernanta și etică (cadre care păstrează confidențialitatea, transparență, responsabilitate) [14], [15] și incluziune (standardizare, acces echitabil). Numai abordând într-o manieră integrată aceste dimensiuni, orașele viitorului pot asigura medii digitale reziliente, de încredere și axate pe bunăstarea cetățeanului.

3.5 Contribuții personale

3.5.1. IoT, SIoT și Smart Cities

Pornind de la experiența acumulată în activitățile de cercetare prezentate în capitolul 2, autorul a extins aria de acoperire a conceptului IoT din domeniul Smart Home în domeniul Smart City (SC), folosind aceeași arhitectură stratificată bazată pe obiecte virtuale, dar aplicată într-un context mult mai larg, tipic pentru SC. De la lucrarea [1], folosită și ca exemplu de arhitectură la începutul acestui capitol, s-a trecut la realizarea unui survey-ului "When Social Networks Meet D2D Communications: A Survey.", publicat la începutul anului 2019, lucrare bine primită de comunitatea academică, dovadă fiind un număr de peste 80 de citări până în prezent.

În paralel, direcția științifică dedicată aplicațiilor SC s-a concretizat și prin publicarea unui capitol de carte [24] care ilustrează utilizarea IoT pentru aplicații de turism accesibil în SC. Lucrarea analizează cerințele cheie pentru aplicațiile IoT într-un context de Smart City, și prezintă o arhitectură IoT pentru scenariul specific de Smart City dedicat gestionării durabile a

fluxului turistic în mediul urban al oraşului Cagliari din Italia. Pe baza arhitecturii IoT prezentate, este introdusă o aplicaţie de planificare turistică cu funcţionalităţi pentru turismul accesibil, împreună cu modelul matematic de optimizare utilizat pentru generarea unui tur specific care include un subset de Puncte de Interes (PoI). Aplicaţia propusă este adaptată pentru persoanele cu dizabilităţi fizice. Rezultatele obţinute au arătat că abordarea bazată pe IoT şi algoritmul propus poate fi personalizat pentru a returna un subset optimizat de PoI pentru turiştii cu dizabilităţi. A fost folosită o arhitectură cloud stratificată (figura 3.6) şi un algoritm de optimizare a parcursului care ţine cont de constrângerile arhitectonice şi de poziţia geografică a destinaţiilor (POI). Conceptul a fost ulterior reiterat în anul 2021 şi în cadrul lucrării ”Managing Accessible Tourist Services in a Social Manner” [21].

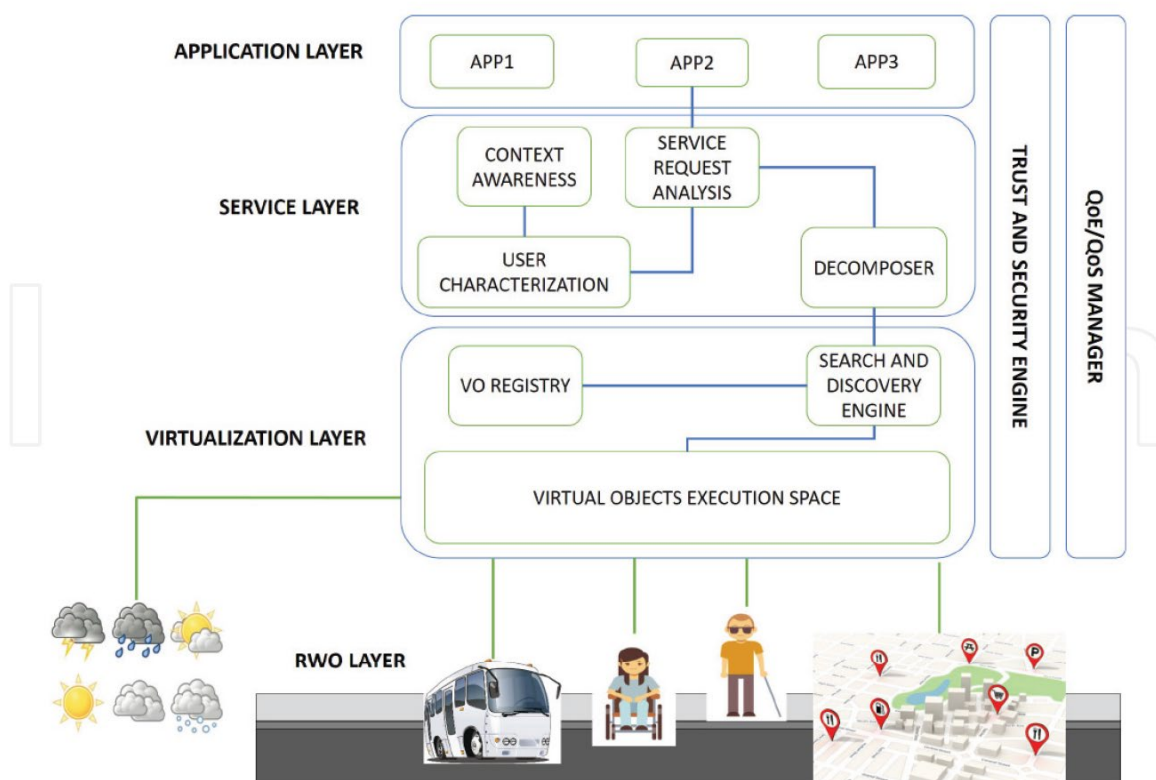


Fig. 3.6. Arhitectura cloud stratificată pentru aplicaţii IoT – SC

De la aplicaţiile turistice, conceptul IoT a fost extins şi la monitorizarea traficului într-un mediu SC în lucrarea [30] care analizează sistemul de monitorizare a traficului vehicular şi pietonal în scenarii de oraş inteligent pentru pietoni şi vehicule.

Primul pas a constat în achiziţia datelor, care sunt ulterior transmise unui nivel de intrare şi agregate în acelaşi format pentru a fi corelate corect între ele. A doua fază constă în procesarea datelor printr-o reţea neuronală (NN) în care diverşi algoritmi de machine learning sunt antrenaţi cu datele care caracterizează diferitele surse. În final, în cea de-a treia şi ultima fază, rezultatele monitorizării la ieşire furnizează prognoze privind diferitele tipuri de trafic, afişate pe o hartă sau în aplicaţii mobile, permiţând alerte în timp real pentru utilizatori sau agenţii publice de control. Soluţia propusă a fost de tip Reţea Neuronală Recurentă (RNN), incluzând neuroni conectaţi între ei în bucle şi utilizată în mod tipic pentru predicţii. Etapa de învăţare se

realizează în timp real utilizând tehnici de tip watchdog și backpropagation. Sistemul propus a fost antrenat printr-o primă fază de antrenament supervizat offline, prin evaluarea celei mai bune opțiuni. Modelul feed-forward multistrat a fost ales datorită performanțelor bune și costului redus.

Rezultatele au fost obținute experimental, utilizând surse multimedia și eterogene. Inițial, măsurătorile au fost efectuate cu suportul camerelor video. Într-o a doua etapă, sistemul de sniffing a fost adăugat, verificând diferențele și acuratețea față de scenariile anterioare. Modul în care sunt numărate persoanele în acest studiu nu este evident: datorită sniffer-ului, este posibil să fie luate în considerare chiar și atunci când se află în interiorul vehiculelor, plecând de la ipoteza că fiecare persoană deține un smartphone. Rețeaua înțelege cum să combine datele provenite din trei tehnologii diferite, îmbunătățind calitatea răspunsului sistemului. Pe lângă pietoni, în scenariul outdoor pot trece prin scenă vehicule de diverse tipuri, precum biciclete sau vehicule electrice. Astfel, a fost posibilă monitorizarea fluxului de persoane în scopul identificării obiceiurilor acestora și a punctelor de interes maxim, precum magazinele sau restaurantele frecventate în mod obișnuit.

Sistemul propus aduce avantaje tehnice, economice și sociale semnificative, crescând considerabil acuratețea clasificării până la 98,2%.

3.5.2. 5G și tranziția spre 6G

Plecând de la vasta experiență acumulată cu sistemele SDR, autorul și-a extins aria de cercetare și spre tehnologiile 5G în contextul transmisiilor video. Creșterea fără precedent a cererii în domeniul videoclipurilor mobile prin rețele celulare broadband reprezintă unul dintre principalele motive pentru adoptarea rapidă a standardului 5G. Acest scenariu alimentează necesitatea serviciilor orientate pe grupuri (adică multicast și broadcast) pentru gestionarea eficientă a resurselor radio, și implicit acordarea accesului simultan la resursele radio unor grupuri diferite de utilizatori, cu calitate diferențiată a serviciului.

Evolved Multimedia Broadcast Multicast Service (eMBMS), standardizat de 3GPP, este una dintre tehnologiile care vor fi extinse la sistemele 5G cu scopul specific de a îmbunătăți radical serviciile punct-la-punct și punct-la-multipunct. În lucrarea ”On the Feasibility of 5G Massive Concurrent Video Uplink” [31] se prezintă un studiu privind fezabilitatea utilizării tehnologiilor 5G în mod specific pentru uplink-ul concurent masiv de conținut video într-o zonă restrânsă, cum ar fi de exemplu un eveniment sportiv sau un concert muzical. A fost investigată capacitatea Next Generation NodeB (gNB) de a gestiona solicitările de uplink de la un număr mare de utilizatori în termeni de calitate video minimă față de numărul de utilizatori.

A fost luat în considerare un scenariu real în care utilizatorii sunt statici într-o zonă delimitată. Utilizatorilor li se permite să trimită în mod autonom videoclipuri live în timp ce urmăresc un eveniment sportiv live. Simulările au fost efectuate utilizând simulatorul de rețea Simu5G Omnet++ pentru a evalua fezabilitatea acestui sistem de upload video concurent masiv. Au fost analizate numărul de dispozitive care încarcă simultan videoclipuri, fiecare cu o rezoluție specifică, și rata de date medie corespunzătoare. Lucrarea a intenționat să ofere perspective utilizabile de radiodifuzori, companii de rețea și media în ceea ce privește participarea utilizatorului final. Un scenariu interesant ar fi achiziția de videoclipuri live ale utilizatorilor

din diverse puncte de vedere la un eveniment sportiv (meci de fotbal, cursă) care ar putea fi utilizate activ în cvasi-timp real sau în post-producție de către furnizor/radiodifuzor.

Tot în cadrul sistemelor 5G a fost analizată extinderea serviciilor de transfer în cazuri mai solicitante de trafic, ca de exemplu aplicațiile de realitate virtuală și extinsă (VR/XR), în cadrul lucrării "Beyond 5G Multicast for XR Communications aided by Pre-computed Multi-beams and NOMA" [32] prezentată în 2023 la prestigioasa conferință IEEE Globecom. S-a prezentat o strategie de multicast bazată pe multi-beam-uri MIMO pre-calculat fixe și subgrupare bazată pe accesul non-ortogonal multiplu (Non-orthogonal multiple access - NOMA) pentru abordarea livrării de aplicații XR specifice de tip multicast într-un mediu B5G restrictiv cu cerințe ridicate de debit de date. Abordarea propusă a permis exploatarea dinamică a diversității spațiale intrinsece a utilizatorilor și a diversității calității canalului, maximizând metrici specifice de QoS. Validarea abordării a fost făcută prin simulări la nivel de legătură de date, recreând un caz de utilizare pentru livrarea serviciului de multicast în B5G. Evaluarea include metricile critice ADR, MDI și PF. Rezultatele arată îmbunătățirea adusă de combinarea multi-beam-urilor pre-calculat cu o strategie dinamică de multicast, cu un câștig ADR de cel puțin 10% și respectiv 17% pentru livrarea de tip multicast AR și VR. Câștigul suplimentar adus de utilizarea oportunistă a subgrupării bazate pe NOMA este de aproximativ 3%. Scenariul multibeam de implementare este prezentat în figura 3.7.

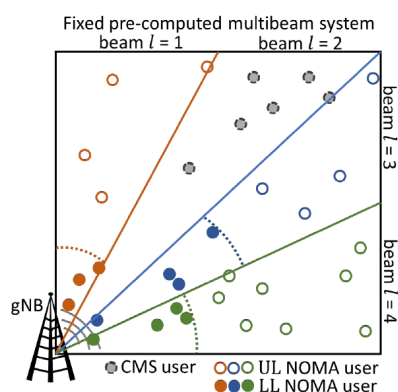


Fig. 3.7. Scenariul de implementare multi-beam NOMA

Tranziția de la 5G la 6G în termeni de cercetare științifică fost făcută prin intermediul unui survey extensiv despre 6G în contextul Smart City [3], "6G - Enabling the New Smart City: A Survey" publicat în anul 2023 și bine primit de comunitatea științifică, cu peste 110 citări până în prezent. Principalele concluzii ale acestei lucrări sunt menționate în subcapitolul 3.2.

3.6 Sumar Capitol 3

Capitolul 3 a urmărit evoluția tehnologică de la ecosistemele IoT pentru SH, analizate în detaliu în capitolul anterior, la paradigma urbană la scară largă Smart Cities, prin prisma a trei transformări tehnologice interdependente: evoluția de la IoT la SIoT, tranziția de la 5G la 6G și apariția cadrelor de securitate cibernetică și guvernanță a datelor.

Trecerea de la IoT la SIoT reprezintă mai mult decât o extensie funcțională a conectivității dispozitivelor, fiind o schimbare conceptuală care introduce încrederea, cooperarea și conștiința socială ca proprietăți ale infrastructurii urbane. SIoT adaugă navigabilitate conceptului IoT, propagare a reputației și compoziție dinamică a serviciilor, abordând limitările de scalabilitate și interoperabilitate inerente arhitecturilor IoT verticale. Demonstratoarele timpurii în domeniul turismului accesibil și al mobilității urbane, dintre care mai multe reprezintă contribuții directe ale autorului, au validat Obiectele Virtuale Social Conștiente (VSAO) ca putând coopera pentru a genera servicii personalizate și incluzive fără a necesita coordonare centralizată. Provocările rămase, mai ales cele legate de scalabilitate, standardizare și riscuri de manipulare a grafului de încredere motivează în mod natural tranziția spre 6G ca infrastructură nativă pentru SIoT la scară urbană.

Rețelele 5G au furnizat infrastructura de bază pentru primele generații de SC operaționale, prin network slicing, MEC și cele trei clase de servicii eMBB/URLLC/mMTC. Cu toate acestea, analiza comparativă 5G vs. 6G din Tabelul 3.1 evidențiază clar că limitările structurale ale 5G (latența tipică de 5–10 ms, densitatea de 10^6 dispozitive/km² și absența inteligenței native) sunt incompatibile cu cerințele ecosistemelor urbane ale orizontului 2030+. 6G, prin inteligența nativă, comunicarea semantică, benzile THz și integrarea non-terestră, promite o schimbare calitativă, nu doar cantitativă: de la rețele de conectivitate la rețele de orchestrare autonomă a ecosistemelor urbane. Convergența 6G cu Digital Twins urbane și cu NTN pentru reziliență și acoperire echitabilă definește arhitectura de comunicații a orașelor viitorului.

Securitatea cibernetică și guvernanța datelor nu pot fi tratate ca straturi adiționale — ele trebuie integrate de la proiectare în arhitecturile IoT, SIoT și 6G. Proliferarea dispozitivelor urbane interconectate extinde suprafața de atac la dimensiuni fără precedent, iar criticitatea serviciilor de energie, transport, și sănătate publică, fac consecințele unui incident cibernetic potențial catastrofale. Soluțiile prezentate (Arhitectura Zero-Trust, confidențialitate diferențială, învățare federată, criptografie post-cuantică și detectare AI a intruziunilor) formează un ecosistem de apărare proactivă și stratificată, adaptat eterogenității și distribuției geografice specifice Smart Cities. Cadrul juridic european tripartit GDPR–NIS2–AI Act adaugă dimensiunea obligatorie de conformitate, transformând securitatea din opțiune în imperativ legal pentru orice operator de infrastructură urbană digitală.

Capitolul 3 stabilește linia de demarcație între conectivitatea pervasivă a capitolului 2 și experiența imersivă a capitolului 4. Principiul reconfigurabilității — introdus ca proprietate hardware în capitolul 1 și extins la nivel de protocol în capitolul 2 — devine în capitolul 3 o proprietate a întregului ecosistem urban: rețele auto-configurabile prin network slicing și NTN, servicii auto-compuse prin SIoT, și cybersecurity auto-adaptiv prin AI. Scala de analiză crește de la dispozitiv la ecosistem urban, pregătind cadrul pentru saltul final al capitolului 4: de la ecosistemul urban inteligent la experiența umană imersivă și distribuită, posibilă tocmai datorită infrastructurii 6G și a serviciilor SIoT construite în capitolele precedente.

Bibliografie Capitolul 3

- [1] M. Nitti, V. Pilloni, D. Giusto, and V. Popescu, “IoT architecture for a sustainable tourism application in a smart city environment,” *Mobile Information Systems*, vol. 2017, Article ID 9201640, pp. 1–9, 2017.
- [2] G. A. Stelea, V. Popescu, F. Sandu, L. Jalal, M. Farina, and M. Murrone, “From things to services: A social IoT approach for tourist service management,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 153578–153592, 2020.
- [3] M. Murrone, M. Anedda, M. Fadda, P. Ruiu, V. Popescu, C. Zaharia, and D. Giusto, “6G—Enabling the New Smart City: A Survey,” *Sensors*, vol. 23, no. 17, p. 7528, Aug. 2023. doi: 10.3390/s23177528 *Sensors*
- [4] M. Antonakakis, et al., “Understanding the Mirai botnet,” in *Proceedings of the 26th USENIX Security Symposium*, Vancouver, Canada, pp. 1093–1110, 2017.
- [5] A. Kasnesis, D. Zarpalas, and P. Daras, “Enhancing SIoT navigability through cloud-based smart agents,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 92, pp. 424–436, 2019.
- [6] K. David and H. Berndt, “6G vision and requirements: Is there a need for beyond 5G?” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 13, no. 3, pp. 72–80, Sep. 2018. doi: 10.1109/MVT.2017.2789069
- [7] ITU-T, “IMT-2030 (6G) Vision Framework,” International Telecommunication Union, Geneva, Switzerland, Tech. Rep. ITU-T Y.3172, Jun. 2023.
- [8] Z. Zhang, Y. Xiao, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, and P. Fan, “6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 14, no. 3, pp. 28–41, Sep. 2019. doi: 10.1109/MVT.2019.2921208
- [9] J. Liu, B. Leung, and W. Chen, “Cybersecurity Challenges in 6G-Enabled Smart Cities,” *IEEE Commun. Stand. Mag.*, vol. 6, no. 4, pp. 32–40, Dec. 2022. doi: 10.1109/MCOMSTD.0001.2100120
- [10] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The Social Internet of Things (SIoT) — When Social Networks Meet the Internet of Things: Concept, Architecture and Network Characterization,” *Comput. Netw.*, vol. 56, no. 16, pp. 3594–3608, Nov. 2012. doi: 10.1016/j.comnet.2012.07.010
- [11] D. J. Watts and S. H. Strogatz, “Collective Dynamics of ‘Small-World’ Networks,” *Nature*, vol. 393, pp. 440–442, Jun. 1998. doi: 10.1038/30918
- [12] Z. Qin, X. Tao, J. Lu, W. Tong, and G. Y. Li, “Semantic Communications: Principles and Challenges,” arXiv:2212.00271, 2022. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2212.00271>
- [13] S. Rose, O. Borchert, S. Mitchell, and S. Connelly, “Zero Trust Architecture,” NIST Special Publication 800-207, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, Aug. 2020. doi: 10.6028/NIST.SP.800-207
- [14] C. Dwork and A. Roth, “The Algorithmic Foundations of Differential Privacy,” *Found. Trends Theor. Comput. Sci.*, vol. 9, no. 3–4, pp. 211–407, 2014. doi: 10.1561/04000000042
- [15] B. McMahan, E. Moore, D. Ramage, S. Hampson, and B. A. y Arcas, “Communication-Efficient Learning of Deep Networks from Decentralized Data,” in *Proc. 20th Int. Conf. Artif. Intell. Stat. (AISTATS)*, Fort Lauderdale, FL, 2017, pp. 1273–1282.
- [16] D. J. Bernstein and T. Lange, “Post-Quantum Cryptography,” *Nature*, vol. 549, pp. 188–194, Sep. 2017. doi: 10.1038/nature23461
- [17] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, and A. Y. C. Nee, “Digital Twin in Industry: State-of-the-Art,” *IEEE Trans. Ind. Informat.*, vol. 15, no. 4, pp. 2405–2415, Apr. 2019. doi: 10.1109/TII.2018.2873186
- [18] Ericsson, “IoT Connections Outlook,” Ericsson Mobility Report, Ericsson AB, Stockholm, Sweden, Jun. 2023. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report>

- [19] 3GPP, “Technical Specification 22.261: Service Requirements for the 5G System,” 3rd Generation Partnership Project, Release 17, Sophia Antipolis, France, 2022. [Online]. Available: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.261/
- [20] European Parliament and Council, “Regulation (EU) 2016/679 — General Data Protection Regulation (GDPR),” Official Journal of the European Union, L 119, pp. 1–88, May 2018.
- [21] European Parliament and Council, “Regulation (EU) 2024/1689 — Artificial Intelligence Act,” Official Journal of the European Union, L, Jul. 2024.
- [22] European Parliament and Council, “Directive (EU) 2022/2555 — NIS2 Directive on Measures for a High Common Level of Cybersecurity Across the Union,” Official Journal of the European Union, L 333, pp. 80–152, Dec. 2022.
- [23] M. Rinaldi, D. Tarchi, and A. Vanelli-Coralli, “Non-Terrestrial Networks for 6G: A Tutorial on Architecture, Key Technologies and Research Challenges,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 2024. doi: 10.1109/COMST.2023.3340072
- [24] Vlad Popescu, Michele Nitti, Daniele Giusto, Simone Zanda, Massimo Di Francesco, Carlino Casari, Maria Laura Clemente, Cristian Lai and Carlo Milesi „Using IoT for Accessible Tourism in Smart Cities”, In "Assistive Technologies In Smart Cities", book edited by Prof. Alejandro Rafael Garcia Ramirez, ISBN 978-953-51-6196-7, Publisher: InTech 2018.
- [26] Nitti, M.; Stelea, G.A.; Popescu, V.; Fadda, M. When Social Networks Meet D2D Communications: A Survey. *Sensors* 2019, 19, 396. doi: 10.3390/s19020396
- [29] R. Puddu, V. Popescu, M. Murrone and M. Fadda, "Managing Accessible Tourist Services in a Social Manner," *2021 IoT Vertical and Topical Summit for Tourism*, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF49204.2021.9604826.
- [30] M. Bertolusso, M. Spanu, V. Popescu, M. Fadda and D. Giusto, "Machine Learning-based Urban Mobility Monitoring System," *2022 IEEE 19th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, USA, 2022, pp. 747-748, doi: 10.1109/CCNC49033.2022.9700694.
- [31] M. Fadda, P. Scopelliti, V. Popescu, M. Sole and D. Giusto, "On the Feasibility of 5G Massive Concurrent Video Uplink," *2021 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/BMSB53066.2021.9547112.
- [32] E. F. Pupo, C. C. Gonzalez, V. Popescu, D. Giusto and M. Murrone, "Beyond 5G Multicast for XR Communications aided by Pre-computed Multi-beams and NOMA," *2023 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2023, pp. 738-743, doi: 10.1109/GCWkshps58843.2023.10465216.

4. De la 5G/6G la Realitate Extinsă Hibridă

Convergența progresivă a tehnologiilor media, infrastructurilor în rețea și cercetării în interacțiunea om-calculator a deschis calea pentru o nouă paradigmă: Realitatea Extinsă Hibridă (Hybrid XR). În timp ce Realitatea Virtuală (Virtual Reality - VR) și Realitatea Augmentată (Augmented Reality - AR) au revoluționat industrii de la gaming la medicină, ambele au rămas predominant centrate pe utilizatorul individual și pe imersiunea vizuală izolată. Hybrid XR depășește aceste limitări prin integrarea participanților distribuiți, a conținutului multisenzorial și a configurațiilor fizice din lumea reală cu medii virtuale partajate, creând astfel experiențe sincrone și ancorate spațial.

Spre deosebire de experiențele XR convenționale care se concentrează în principal pe imersiunea vizuală, Hybrid XR pune accent pe interacțiunea întruchipată, unde utilizatorii, dispozitivele și mediile sunt legate în spații atât fizice cât și digitale. Aceasta permite scenarii în care actorii dintr-un teatru fizic interacționează cu audiențe virtuale, unde concertele live sunt îmbogățite cu efecte olfactive generate de AI sau unde studenții participă simultan la un laborator virtual din locații fizice dispartate - fiecare experimentând aceeași consistență spațială, temporală și senzorială [1], [2].

Dezvoltarea Hybrid XR a fost accelerată de mai multe dezvoltări tehnologice convergente. În primul rând, maturizarea mediilor multisenzoriale (mulsemedia) a demonstrat că efectele senzoriale suplimentare - haptice, olfactive, termice - amplifică semnificativ prezența și imersiunea [3], [4]. Paradigma Internet of Things (SIoT) a permis infrastructurilor orchestrarea dinamică a dispozitivelor inteligente în spații fizice pentru a se adapta nevoilor acestor sisteme. În fine, progresele în tehnicile de streaming cu latență ultra-redușă, rețelele 5G/6G și sincronizare de precizie au redus barierele fizic/digitale pentru experiențe distribuite în timp real [5].

Hybrid XR reprezintă, prin urmare, mai mult decât o inovație tehnologică: este un ecosistem socio-tehnologic care redefineste modul în care oamenii muncesc, învață, performează și împărtășesc experiențe culturale, semnalând o schimbare de la narațiuni pre-înregistrate către

interacțiuni emergente, de la audiențe pasive către co-creatori activi, și de la spații discrete către topologii hibride.

Acest capitol explorează dimensiunile conceptuale, tehnologice și experimentale Hybrid XR, analizând modul în care integrarea multisenzorială, performanțele imersive și arhitecturile distribuite converg în medii augmentate.

4.1 Media multisenzorială pentru XR și Hybrid XR

Sistemele XR au fost tradițional ancorate în paradigma audiovizuală, unde imersiunea vizuală și sunetul spațial au format fundamentul prezenței virtuale. Totuși, ființele umane nu percep realitatea doar prin văz și auz. Atingerea, mirosul, gustul și temperatura joacă roluri integrale în modul în care înțelegem, navigăm și interacționăm cu mediile. În contextele din lumea reală, aceste modalități senzoriale funcționează în sinergie - prin ceea ce psihologii cognitivi numesc integrare multisenzorială - pentru a construi percepții coerente, bogate și contextual relevante.

4.1.1. De la multimedia la mulsemedia și la aplicații XR

Media multisenzorială (mulsemedia) reflectă o expansiune progresivă a fidelității reprezentationale în media digitală. Multimedia tradițională, caracterizată prin integrarea textului, imaginii, semnalelor audio și video, a transformat modul în care informația este comunicată și consumată. Cu toate acestea, aceasta a rămas în esență bidimensională și reprezentatională, producând conținut pentru percepția auditivă și vizuală, dar lăsând alte modalități senzoriale neexploatate.

Încercările inițiale de a extinde dincolo de imersiunea audiovizuală pot fi urmărite până la cinematograful experimental și atracțiile din parcurile tematice. Prototipuri precum "Smell-O-Vision" (1960) și "Sensurround" (1974) au fost încercări timpurii de a îmbogăți experiențele de vizionare cu mirosuri sincronizate sau vibrații de frecvență joasă. Deși au fost în mare parte comerciale eșecuri din cauza problemelor tehnice și a lipsei de standardizare, acestea au prefigurat recunoașterea faptului că imersiunea completă necesită mai mult decât stimuli audiovizuali [2].

O etapă majoră în formalizarea integrării multisenzoriale a fost publicarea standardului MPEG-V (Representation of Sensory Effects, RoSE) în 2008. MPEG-V a introdus un layer de metadata care permite creatorilor de conținut să adauge efectele senzoriale (cum ar fi vibrația, vântul, mirosul și iluminatul) și să le sincronizeze cu fluxurile audiovizuale [1]. Această standardizare a creat interoperabilitate între dispozitivele multisenzoriale, permițând redarea consistentă pe diverse platforme hardware.

În ultimii ani, mulsemedia a fost din ce în ce mai asociată cu mediile de tip XR, unde adăugarea efectelor senzoriale completează dispozitivele de tip Head Mounted Display (HMD) și aplicațiile de audio spațial pentru a îmbunătăți senzația de imersiune [8], [9]. Spre deosebire de VR sau AR, care se concentrează în principal pe coerența vizuală și spațială, XR multisenzorial integrează stimuli fizici din lumea reală - creând o consistență perceptuală între realitatea fizică și cea virtuală.

Tabelul 4.1 - Evoluția paradigmelor media: de la multimedia la mulsemmedia la Hybrid XR

Caracteristică	Multimedia (AV)	Mulsemmedia (MPEG-V)	XR Hibrid
Modalități suportate	Audio + Video	AV + haptic, flux de aer, olfactiv	Spectru complet (vedere, sunet, atingere, miros, termic)
Sincronizare	Sincronizare Audio-Video	AV + metadata efecte senzoriale	Sincronizare cross-modală în timp real (condusă de AI)
Mediu de livrare	PC, TV, Cinema	Smart Home, Gaming	Căști XR, IoT, Cloud-Edge
Interacțiune utilizator	Limitată	Recepție multisenzorială pasivă	Activă, bidirecțională, cu feedback activat
Adaptivitate	Niciuna	Efecte pre-scriptate	Personalizare adaptivă în timp real
Dimensiune socială	Locală	Locală (casă, laborator)	Distribuită, prezență hibridă

Acest cadru comparativ reflectă modul în care realitatea extinsă hibridă face un salt calitativ, trecând de la consumul de conținut către interacțiune în persoană, partajată, transmisă prin canale multisenzoriale.

4.1.2 XR și muzica live

Pandemia din 2020 a reprezentat un punct de inflexiune semnificativ în evoluția fluxurilor de producție audio la distanță și interactive, accelerând cu forță de necesitate dezvoltarea sistemelor de performanță distribuită în condiții reale [10], [11]. Ca răspuns la cerințele de distanțare fizică, artiștii și inginerii de sunet au apelat la soluții de rețea cu latență redusă pentru a păstra coerența ansamblurilor muzicale și implicarea publicului, stimulând interesul reînnoit al industriei și mediului academic pentru proiectarea unor arhitecturi de colaborare la distanță reziliente și cu performanță ridicată. Această perioadă a accelerat maturizarea unor platforme precum JackTrip [12] - un sistem open-source pentru streaming audio în timp real prin rețele IP care a trecut rapid de la statutul de instrument de cercetare la infrastructură de producție muzicală.

Creșterea activității în domeniul streaming-ului live audio a generat și un număr substanțial de articole de cercetare academică ce examinează provocările reprezentate de transmisia prin rețea a datelor audio - inclusiv stabilitatea transportului semnalului audio în condiții de fluctuație a rețelei, pragurile de latență end-to-end pentru sincronizarea perceptuală, strategiile de buffering pentru compensarea jitter-ului, și integrarea audio-ului spațial în medii 3D interactive [13]. Aceste studii adoptă adesea o perspectivă cross-layer, evaluând compromisurile de performanță dintre protocoalele de transport (RTP/UDP, QUIC, WebRTC), codecurile audio (OPUS [14], AAC-LD), și mecanismele de buffering adaptiv. Codecul OPUS standardizat prin RFC 7587 a devenit referința de facto pentru aplicații NMP datorită latenței algoritmice de 2,5–60 ms configurabilă, eficienței la rate de bit de 6–510 kbps, și rezilienței la pierderi de pachete de până la 10% fără degradare perceptuală semnificativă [14].

Simultan, experimentele de tipul Networked Music Performances (NMP) și streamingul de concerte interactive s-au extins atât ca frecvență cât și ca scară, facilitate de progresele în pipeline-urile media, capabile să atingă latențe round-trip sub 30 ms în condiții ideale [15]. Aceste experimente au fost posibile și prin accesul larg la infrastructuri broadband de înaltă performanță - conexiuni de fibră optică, rețele 5G SA cu capabilități URLLC (Ultra-Reliable

Low Latency Communication), și arhitecturi de edge computing care minimizează distanțele de traversare a pachetelor [16]. Rețelele 5G SA cu profile URLLC garantează latențe end-to-end sub 1 ms la nivel de transport celular, reducând contribuția rețelei la bugetul total de latență al sistemului NMP la sub 5%, marcând o schimbare de paradigmă față de rețelele LTE unde contribuția rețelei era frecvent de 20 - 50 ms.

Împreună, aceste evoluții semnaleză o tranziție tehnologică mai amplă spre colaborare muzicală persistentă. Convergența dintre networking, procesarea semnalelor și proiectarea media imersive creează noi paradigme de interacțiune muzicală în timp real, care nu mai sunt limitate de constrângerile spațiale și temporale ale sălilor de concert tradiționale sau ale fluxurilor de broadcasting convenționale. Astfel de sisteme deschid calea spre medii de performanță scalabile, cu latență redusă și distribuite geografic, care suportă interactivitate bidirecțională și fidelitate audio-vizuală imersivă pe endpoint-uri eterogene [16].

În paralel cu dezvoltarea domeniului NMP, tehnologiile XR au început să transforme modul în care performanțele muzicale sunt livrate și experimentate. Bazându-se pe aplicațiile NMP, artiști aflați în locații diferite pot acum participa la concerte sincrone care se extind dincolo de spațiile fizice. Această transformare a fost generată de cererea crescândă pentru formate imersive și interactive, accelerată de progresele în infrastructura de rețea, procesarea media și platformele de rendering în timp real. Spre deosebire de streaming-ul unidirecțional tradițional, arhitecturile XR pentru muzică live vizează realizarea co-prezenței (concept definit formal în secțiunea 4.1.5) creând un mediu virtual comun în care artiști și public se percep reciproc în timp real [10].

Deși conceptul de reprezentare la distanță nu este nou, atingerea unui nivel convingător de co-prezență rămâne provocarea centrală a domeniului. Latența, lipsa sincronizării audio-video și absența ancorelor spațiale pot afecta negativ iluzia unui spațiu partajat. Cercetările actuale se concentrează pe trei aspecte principale: menținerea unei întârzieri reduse pe întregul lanț media, livrarea unui sunet spațial precis și suportul pentru interacțiune care să permită publicului să răspundă în timp real. Studiile de psihoacustică arată că pragul critic pentru muzicieni este de aproximativ 30 ms end-to-end - dincolo de care rigiditatea muzicală (tightness) se degradează perceptibil, forțând muzicienii să adapteze interpretarea [17]. Acest prag este mult mai restrictiv pentru muzică decât cel pentru comunicarea vorbită (~150–200 ms) și impune cerințe de sistem semnificativ mai exigente.

Audio-ul spațial joacă un rol esențial în amplificarea senzației de imersiune. Tehnici precum funcțiile de HRTF și rendering-ul ambisonic [18] (standardizate prin MPEG-H 3D Audio (ISO/IEC 23008-3) [19]) simulează câmpuri sonore realiste care se adaptează în funcție de orientarea în spațiu a ascultătorului. Aceste metode sunt integrate în engine-urile care alimentează platformele XR și permit interacțiuni muzicale mai naturale pe scenele virtuale. Un concert hibrid modern poate utiliza formatele ambisonice de ordin superior (Higher-Order Ambisonics - HOA, ordin 3–7) pentru captarea câmpului sonor al scenei fizice și reproducerea sa cu fidelitate spațială ridicată prin headset-uri VR sau sisteme de difuzoare multisursă la locațiile în care este prezent publicului remote [19].

Latența rămâne constrângerea cea mai critică. Arhitecturile cu noduri de edge computing colocalizate cu stațiile de bază 5G descrise în secțiunea anterioară, reduc contribuția rețelei la sub 5 ms, lăsând bugetul de latență disponibil pentru procesarea audio (OPUS: ~7 ms), mixing spațial (~3 ms) și rendering senzorial (~5 ms) [16].

Sistemele recente încorporează și interacțiunea cu publicul, în care feedback-ul de tip aplauze sau reacții vocale este ancorat spațial și retransmis artiștilor cu întârziere minimă. Acest mecanism închide bucla dintre scenă și public, consolidând senzația de prezență partajată. Astfel de arhitecturi indică un viitor în care concertele nu sunt doar transmise, ci trăite împreună (sincron și interactiv) în format complet virtual sau hibrid [20][21].

4.1.3. Protocoale de comunicație și considerații de latență pentru sisteme XR

Comunicarea dintre dispozitivele IoT senzoriale, platformele XR și utilizatori impune cerințe tehnice severe: latență ultra-redușă pentru sincronizarea inter-modală, fiabilitate ridicată pentru experiența continuă, și scalabilitate pentru sesiuni multi-utilizator. Spre deosebire de sistemele multimedia tradiționale, unde o latență de 200–500 ms este perceptibil acceptabilă, mulsemmedia Hybrid XR operează cu constrângeri mult mai stricte: studiile de psihofizică indică că desincronizările audio-haptic peste 10–15 ms și audio-olfactive peste 300 ms sunt detectate de utilizatori și degradează semnificativ senzația de prezență [22], [23].

Ecosistemul de protocoale relevante pentru Hybrid XR acoperă mai multe straturi ale stivei de comunicații, de la protocoale IoT lightweight la soluții de streaming media în timp real și infrastructuri celulare de generație a cincea. Tabelul 4.3 prezintă o analiză comparativă extinsă față de tabelul original, incluzând și protocoale emergente cu relevanță directă pentru sistemele de comunicație pentru aplicații XR distribuite [23], [24].

Tabelul 4.3 – Protocoale de comunicație și caracteristici de latență pentru sisteme Hybrid XR

Protocol	Latență	Avantaje	Provocări	Aplicabilitate XR
MQTT	<100 ms tipic	Lightweight, pub-sub, larg adoptat în IoT, overhead minim	Garanții QoS limitate pentru XR la scară; nu suportă streaming media	Orchestrare dispozitive senzoriale (haptice, olfactive); semnalizare stare
CoAP	50–200 ms	REST-like, overhead redus, UDP-based, suport multicast	Suport slab pentru orchestrare eveniment complex; fără criptare nativă	Comandă dispozitive IoT cu resurse reduse în scenarii mulsemmedia
WebRTC	<50 ms cu STUN/TURN	Audio/video real-time, E2E encryption (DTLS/SRTP), suport browser nativ	Necesită adaptare pentru metadata senzoriale; scalabilitate limitată	Flux A/V principal în XR; bază pentru MoQ
5G MEC APIs	<20 ms (profil URLLC)	Latență ultra-redușă, procesare edge, QoS garantat prin network slicing	Necesită integrare infrastructură telco;	Streaming point cloud / MIV în timp real; sincronizare mulsemmedia <20ms
WebSocket	<10 ms (LAN) / 30–80 ms (WAN)	Full-duplex persistent, suport browser universal, ușor de implementat	Fără garanții de latență; nu suportă multiplexare multi-stream nativă	Metadata senzoriale și comenzi de control în timp real pentru mulsemmedia
RTP/SRTP	5–30 ms (LAN)	Standard ISO pentru transport media, jitter buffer, RTCP feedback	Necesită UDP; NAT dificil fără STUN/TURN	Transport media de bază în MIV și V-PCC pentru experiențe 3D imersive
QUIC/MoQ	<30 ms; –30% față de WebRTC	Multiplexare multi-stream, 0-RTT reconnect, pierdere pachete fără head-of-line blocking	Implementări imature; MoQ în stadiu de draft IETF (2024)	Streaming XR holografic de generație viitoare; candidat post-WebRTC

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport, standardizat OASIS v5.0) a fost proiectat pentru conectivitate IoT în condiții de bandă și putere limitate, utilizând un model publish-subscribe prin broker centralizat. Caracteristica sa de QoS pe trei niveluri (0 - fire and forget, 1 - at least once, 2 - exactly once) permite configurarea unui compromis între latență și fiabilitate în funcție de tipul efectului senzorial: comenzile haptice critice pot utiliza QoS 2, în timp ce actualizările de lumini ambientale acceptă QoS 0. Limitarea fundamentală a MQTT pentru XR constă în absența garanțiilor temporale și a suportului pentru streaming media - este un protocol de control, nu de transport media [2], [6].

CoAP (Constrained Application Protocol, RFC 7252) aduce simplitatea REST la dispozitivele cu resurse reduse, utilizând UDP ca transport și suportând nativ multicast - util pentru comenzi difuzate simultan către toate dispozitivele senzoriale dintr-o scenă. Cu latențe tipice de 50–200 ms, CoAP este adecvat pentru dispozitivele cu constrângeri severe (microprocesoare ARM Cortex-M, senzori alimentați din baterie) dar insuficient pentru efecte haptice sincronizate cu conținut video. CoAP-over-TCP (RFC 8323) și OSCORE (RFC 8613) adresează parțial limitările de securitate și traversare NAT ale versiunii UDP originale [12].

WebRTC (Web Real-Time Communication, RFC 8825) reprezintă soluția dominantă actuală pentru streaming audio-video în timp real în aplicații XR browser-based. Bazat pe RTP/SRTP pentru transport media și DTLS pentru criptare end-to-end, WebRTC atinge latențe sub 50 ms în condiții de rețea favorabile, cu suport STUN/TURN pentru traversarea NAT. Adoptarea sa universală în browsere (Chrome, Firefox, Safari, Edge) și integrarea nativă cu codec-uri video moderne (VP8, VP9, H.264, AV1) îl fac prima alegere pentru fluxurile audio-video principale ale experiențelor Hybrid XR. Limitarea sa principală constă în absența unui mecanism nativ pentru transportul metadatelor senzoriale MPEG-V - o extensie care necesită canale de date WebRTC (SCTP over DTLS) sau soluții hibride cu MQTT [2], [6], [23].

RTP/SRTP (Real-time Transport Protocol / Secure RTP, RFC 3550 / RFC 3711) reprezintă protocolul de transport media de bază sub WebRTC și sub soluțiile profesionale de streaming AV. SRTP adaugă criptare și autentificare fără overhead semnificativ față de RTP neprotejat, atingând latențe de 5–30 ms în rețele locale. RTCP (RTP Control Protocol) furnizează feedback de calitate - jitter, pierdere pachete, round-trip time - esențial pentru ajustarea dinamică a parametrilor de compresie în sistemele de streaming point cloud (V-PCC) și video imersiv (MIV). Combinația RTP+RTCP este standardul de facto pentru transportul fluxurilor MIV în implementările de referință MPEG [25], [26].

WebSocket (RFC 6455) oferă comunicație full-duplex persistentă over HTTP, cu latențe de 10 ms în rețele locale și 30–80 ms pe WAN, fără overhead de reconectare după stabilirea canalului. Spre deosebire de MQTT și CoAP, WebSocket operează la nivelul aplicație și este universal suportat în browsere, ceea ce îl face ideal pentru transportul metadatelor de efecte senzoriale MPEG-V SEM sincronizate cu conținut WebRTC. Arhitectura tipică pentru mulțimedia XR utilizează WebRTC pentru fluxurile A/V și WebSocket pentru metadatele senzoriale, cu sincronizare prin timestamp-uri NTP comune [6], [22].

Pe lângă protocoalele consacrate descrise mai sus, există și o serie de protocoale emergente cu potențial transformator pentru aplicațiile XR distribuite.

Cel mai semnificativ pas înainte în protocoalele de transport pentru aplicații XR este reprezentat de QUIC (Quick UDP Internet Connections, RFC 9000, 2021) și derivatele sale

pentru streaming media. QUIC, adoptat ca transport pentru HTTP/3 (RFC 9114), adresează limitările fundamentale ale TCP utilizat de WebSocket și HTTP: head-of-line blocking, overhead de handshake (TCP+TLS necesită 2–3 round-trip-uri vs. 0–1 RTT pentru QUIC), și absența multiplexării native a stream-urilor independente. Experimentele comparative arată că protocoalele QUIC-based obțin îmbunătățiri de aproximativ 30% în latență și 60% în timpul de conectare față de WebRTC în condiții de rețea 5G și Wi-Fi 6 [23].

Media over QUIC (MoQ, draft IETF 2024) extinde QUIC specific pentru streaming media în timp real, definind o arhitectură de publicare-abonare scalabilă pentru distribuția conținutului low-latency la audiențe mari - un caz de utilizare direct relevant pentru concerte hibride cu mii de participanți distribuiți. MoQ separă explicit controlul (stabilirea sesiunii, sincronizare) de transportul datelor media, permițând prioritizarea diferențiată a fluxurilor (video > haptic > olfactiv) în condiții de congestie. RTP over QUIC (RoQ, draft IETF 2024) păstrează semanticile RTP existente dar beneficiază de avantajele de transport ale QUIC, facilitând migrarea incrementală a infrastructurii WebRTC. Deși ambele standarde sunt în stadiu de draft, traiectoria lor de standardizare și adoptarea timpurie în CDN-uri majore sugerează că vor deveni protocoalele dominante pentru streaming XR în perioada 2026–2030 [23].

Complexitatea ecosistemului de protocoale și natura eterogenă a dispozitivelor Hybrid XR (de la headset-uri VR de înaltă performanță la senzori haptici cu resurse reduse) impun o abordare stratificată în care protocoalele sunt selectate în funcție de tipul fluxului de date, constrângerile dispozitivului și cerințele de latență. O arhitectură de referință pentru sisteme mulsemmedia XR distribuite poate utiliza simultan mai multe protocoale: 5G MEC APIs sau WebRTC/MoQ pentru fluxurile video și point cloud principale (latență <50 ms), RTP/SRTP pentru sincronizarea audio spațial (latență <30 ms), WebSocket pentru metadatele de efecte senzoriale MPEG-V (latență <80 ms, non-critic perceptual), și MQTT/CoAP pentru comenzile dispozitivelor IoT senzoriale cu resurse reduse (latență <200 ms, QoS configurabil) [1], [2], [6], [22]. Acest model stratificat, inspirat din arhitectura MPEG-V dar extins cu protocoale moderne, reprezintă fundația de comunicații a sistemelor Hybrid XR descrise în acest capitol.

4.1.4. Arhitecturi și standarde

Implementarea componentelor mulsemmedia în medii XR hibride necesită arhitecturi software și hardware capabile să orchestreze efecte senzoriale sincronizate pe dispozitive distribuite. Pe lângă protocoalele de transport analizate anterior, arhitectura de orchestrare trebuie să adreseze trei provocări specifice: sincronizarea inter-modală cu latențe eterogene per tip de efect, absența API-urilor unificate de control al dispozitivelor senzoriale, și integrarea semanticii MPEG-V în pipeline-urile XR distribuite [2], [6].

Cadrul conceptual pentru orchestrarea mulsemmedia este structurat pe trei straturi funcționale: producție (adnotarea fluxurilor media cu metadate MPEG-V SEM), transmisie (transportul sincron al fluxurilor AV și al metadatelor prin protocoalele descrise anterior) și redare (activarea dispozitivelor senzoriale precum difuzoare de mirosuri, dispozitive haptice, lumini inteligente, în sincron cu conținutul).

Cu toate acestea, MPEG-V singur nu rezolvă provocările orchestrării în timp real în medii XR distribuite. Pentru a aborda acest lucru, arhitecturile recente au adoptat paradigmele IoT pentru controlul dispozitivelor. O primă aplicație care a combinat conținutul multimedial cu

metadatele multisenzoriale a fost arhitectura PlaySEM, care a extins playerele media web pentru a susține mulsemmedia în 360° VR. PlaySEM a integrat un motor de sincronizare care a coordonat redarea video 360°, audio spațial și dispozitive senzoriale externe (mirosuri, haptice) folosind markere temporale încorporate în metadatele MPEG-V. Sistemul a demonstrat că orchestrarea mulsemmedia poate fi realizată direct în browser-e standard fără plugin-uri dedicate, facilitând astfel adoptarea mai largă [27].

Odată cu maturizarea ecosistemului XR, reprezentarea tridimensională fidelă a spațiilor și obiectelor a devenit o necesitate tehnologică fundamentală. Spre deosebire de conținutul video 2D convențional, datele volumetrice (point cloud-uri, video multi-unghi sau mesh-uri dinamice) sporesc necesitățile de compresie și transmisie cu un ordin de mărime. Comunitatea internațională de standardizare, condusă de ISO/IEC MPEG prin seria de standarde MPEG-I (Immersive), a elaborat un cadru coerent care acoperă întreg lanțul de la captură la redare pentru conținut XR volumetric [25], [26].

Standardul fundamental al seriei este ISO/IEC 23090-5 - Visual Volumetric Video-based Coding (V3C) definește arhitectura comună pentru codificarea media volumetrice prin proiecție video. V3C nu este un codec de sine stătător, ci un container și un cadru de procesare care permite reutilizarea infrastructurii video existente (HEVC, VVC, AVC) pentru comprimarea datelor tridimensionale. Pornind de la această bază, MPEG a definit două standarde specializate cu caracteristici complementare: Video-based Point Cloud Compression (V-PCC, ISO/IEC 23090-5 Annex H) și Geometry-based Point Cloud Compression (G-PCC, ISO/IEC 23090-9), finalizate respectiv în 2020 și 2021 [25].

V-PCC abordează compresia point cloud-urilor dinamice - de exemplu, reprezentări 3D pentru aplicații de teleprezență - prin proiecția nuvelor de puncte pe suprafețe 2D, urmată de compresia acestor proiecții cu codecuri video standard. Avantajul major al acestei abordări constă în reutilizarea directă a decodificatoarelor hardware existente (HEVC/VVC), eliminând necesitatea unor cipuri specializate noi. Performanțele tipice ale V-PCC variază între 0,1 și 2 Mbps pentru conținut dinamic de calitate acceptabilă, cu rapoarte de compresie de 20–100:1 față de reprezentarea brută. G-PCC, în schimb, operează nativ în spațiul 3D prin structuri de tip octree și transformate predictive, fiind mai potrivit pentru point cloud-uri statice sau de tip LiDAR - de exemplu, scanări arhitecturale sau hărți topografice [25].

Paralel cu compresia point cloud-urilor, MPEG a standardizat MPEG Immersive Video (MIV, ISO/IEC 23090-12, publicat 2023) - un standard destinat codificării video multi-unghi cu informație de adâncime (multiview plus depth - MVD), care permite redarea cu 6 grade de libertate (6DoF) a scenelor tridimensionale. MIV este agnostic față de codecul video de bază, putând utiliza AVC, HEVC, EVC sau VVC ca motor de compresie, și poate atinge bitrate-uri de aproximativ 25 Mbps pentru un conținut de calitate ridicată. Standardul definește trei profiluri: MIV Main (pentru MVD complet), MIV Geometry Absent (estimarea adâncimii pe server/cloud) și MIV Extended (imagini multi-plan). Relevanța MIV pentru VR și XR constă în capacitatea de a transmite scene cu perspectivă liberă - un utilizator poate naviga virtual în spațiu 3D, schimbând unghiul de vizualizare în timp real, pe baza unui set limitat de fluxuri video captate [26].

La nivelul codecului video de bază, VVC (Versatile Video Coding, ITU-T H.266 / ISO/IEC 23090-3, 2020) reprezintă cel mai recent standard internațional de compresie video, succesorul HEVC. VVC oferă o reducere de aproximativ 50% a ratei de bit față de HEVC la calitate

perceptuală echivalentă, suportând rezoluții de la SD la 16K, video 360°, HDR, wide color gamut și formate de tip YCbCr 4:4:4. Aceste capacități sunt esențiale pentru fluxurile video de înaltă fidelitate utilizate în aplicații XR: streaming 8K/360° pentru headset-uri VR, transmisia fluxurilor video multi-unghi pentru MIV, sau compresia atlaurilor V-PCC [26].

Din perspectiva transmisiei, standardul MPEG-DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP, ISO/IEC 23009-1) rămâne protocolul dominant pentru livrarea conținutului XR volumetric prin rețele IP. DASH permite segmentarea fluxurilor media în bucăți de câteva secunde, cu selecție adaptivă a calității în funcție de lățimea de bandă disponibilă, esențial pentru aplicații Hybrid XR care operează pe rețele 5G cu variabilitate ridicată a capacității. Extensii recente ale DASH pentru conținut imersiv, în special pentru point cloud-uri și video multi-unghi, sunt în curs de standardizare în cadrul ISO/IEC JTC1 SC29 WG11, vizând suportul nativ pentru formatul V3C și pentru metadatele de viewport adaptiv [28].

Tabelul 4.2 sintetizează principalele standarde relevante pentru compresia și transmisia conținutului volumetric în aplicații Hybrid XR.

Tabelul 4.2 – Standarde de compresie și transmisie pentru conținut volumetric în aplicații Hybrid XR

Standard	Referință ISO	Aplicație principală	Relevantă Hybrid XR
V3C	ISO/IEC 23090-5 (2021)	Container volumetric media	Cadru comun V-PCC și MIV
V-PCC	ISO/IEC 23090-5 Annex H (2020)	Point cloud dinamic (teleprezență)	Avatare 3D, holografie, spații virtuale
G-PCC	ISO/IEC 23090-9 (2021)	Point cloud static / LiDAR	Patrimoniu cultural, cartografiere SC
MIV	ISO/IEC 23090-12 (2023)	Video imersiv multi-unghi 6DoF	Free-viewpoint XR, concerte hibride
VVC / H.266	ITU-T H.266 / ISO/IEC 23090-3 (2020)	Codec video 8K/360°/HDR	Motor compresie VR/AR, reducere 50% față de HEVC
MPEG-DASH	ISO/IEC 23009-1 (Ed. 5, 2022)	Streaming adaptiv HTTP	Livrare adaptivă point cloud / MIV pe 5G

Implicațiile practice ale acestui ecosistem de standarde pentru aplicațiile XR sunt semnificative. În scenariile de manifestări artistice hibride (concerte muzicale, teatru), participanții de la distanță nu mai sunt limitați la vizualizarea unui flux video 2D fix, ci pot naviga liber în spațiul 3D al scenei, cu libertate de perspectivă garantată de MIV, sau pot interacționa cu reprezentări volumetrice de înaltă fidelitate ale artiștilor, comprimate prin V-PCC și transmise în timp real, prin rețele 5G cu MPEG-DASH adaptiv. Integrarea acestor standarde cu arhitecturile IoT/SIoT descrise anterior permite orchestrarea dinamică a fluxurilor volumetrice în funcție de capacitatea rețelei, poziția utilizatorului și preferințele senzoriale, creând astfel fundamentul tehnic pentru experiențele XR cu adevărat imersive și distribuite [25], [26], [28].

În ciuda acestor progrese, persistă mai multe provocări tehnice. Sincronizarea inter-modală rămâne dificilă datorită latențelor eterogene ale dispozitivelor - în timp ce afișajele vizuale și difuzoarele audio funcționează cu latențe de milisecunde, difuzoarele de mirosuri pot necesita secunde pentru a elibera și dispersa aromele. Abordarea acestor asincronii necesită algoritmi sofisticăți de compensare a latențelor și modele predictive care pre-activează dispozitivele cu latență mare înainte de punctele lor de sincronizare țintă [22].

În plus, lipsa API-urilor de control ale dispozitivelor rămâne o barieră. Deși MPEG-V standardizează metadatele, nu specifică protocoale de comunicare cu dispozitivele multisenzoriale. În consecință, implementările actuale se bazează adesea pe soluții ad-hoc sau proprietare, limitând interoperabilitatea. Eforturile viitoare către standarde deschise de comandă a dispozitivelor (eventual sub umbrele precum W3C Web of Things - WoT [29]) vor fi esențiale pentru o adoptare pe scară largă a dispozitivelor mulsemmedia în implementări XR hibride.

4.2 Evaluarea QoE pentru sisteme XR

Evaluarea QoE pentru sisteme XR utilizează o combinație de metode subiective, obiective, hibride și implicite, fiecare capturând dimensiuni complementare ale experienței utilizatorului. Spre deosebire de evaluarea QoE pentru video 2D unde MOS și PSNR/SSIM sunt suficiente, VR și XR necesită un portofoliu extins care să adreseze prezența, cybersickness, coerența senzorială inter-modală și interactivitatea în timp real [30], [31]. Tabelul 4.5 prezintă taxonomia completă pe trei categorii funcționale, cu aplicabilitate specifică pentru concertele hibride și mulsemmedia XR.

Tabelul 4.5 – Taxonomia metodelor de evaluare QoE pentru sisteme XR și mulsemmedia

Metodă/Metrică	Tip	Ce măsoară	Aplicabilitate specifică
MOS / ACR (ITU-T P.800)	Subiectivă	Opinie globală 1–5; ACR: categorie absolută per stimul	Studii mulsemmedia TV [2], [3] raportează îmbunătățiri semnificative față de condiția AV-only
SSCQS	Subiectivă continuă	Fluctuații temporale ale QoE pe durata sesiunii	Concerte live: corelație cu dinamica muzicii și cue-urile senzoriale
SSQ / VRSQ / CSQ-VR	Subiectivă	Simptome cybersickness (greață, dezorientare, oculomotor)	Orice aplicație XR cu HMD; CSQ-VR superior psihometric [32]
IPQ / SUS / MEC-SPQ	Subiectivă	Prezență, imersiune, co-prezență socială	VR social, NMP, concerte hibride
SSIM / PSNR / VMAF	Obiectivă full-ref.	Calitate video per-cadru față de referință	Streaming XR, evaluare VVC/HEVC; variant viewport-adaptive pt. 360°
BRISQUE / NIQE	Obiectivă no-ref.	Calitate perceptuală fără referință originală	Streaming adaptiv, conținut UGC 360°
Latență MTP	Obiectivă	Motion-to-photon delay (ms)	<20 ms: confortabil; 20–50 ms: perceptibil; >50 ms: cybersickness
Mapare QoS→QoE	Model parametric	Corelație parametri rețea (latență, pierdere) cu rating QoE	Predicție baseline; nu acoperă dimensiunile multisenzoriale [11]
PSQA	Model ML	Predicție QoE în timp real pe baza datelor subiective de antrenament	Streaming adaptiv mulsemmedia; antrenat pe date Jalal et al. [2]
Model non-liniar / PSO	Model parametric	Relație exponențială modalități senzoriale → QoE globală	Validat pentru haptice/olfactive/vizuale în SH mulsemmedia [3]
Eye gaze / pupilometrie	Implicită	Atenție, saliency, engagement vizual	HbbTV, concerte hibride; predictor QoE verificat [25], [26]
EDA / HRV	Fiziologică	Stres, arousal emoțional, nivel imersiune	Corelat cu prezența în VR; detecție stare cybersickness incipientă
Expresie facială	Implicită video	Emoții, satisfacție/insatisfacție momentană	Predictor QoE fără chestionar explicit [26]

Studiile inițiale din domeniul mulsemmedia au demonstrat deja că augmentarea multisenzorială îmbunătățește semnificativ ratingurile utilizatorilor față de conținutul exclusiv audiovizual [2]. Efecte similare sunt așteptate și în aplicațiile XR [8]:

Scalele de prezență IPQ, SUS, MEC-SPQ sunt instrumente complementare care capturează dimensiunile calitative ale experienței imersive: sentimentul de a fi în spațiul virtual, unitatea cu mediul și co-prezența cu alți participanți. Limitarea principală a tuturor metodelor subiective post-sesiune este bias-ul de retrospectivă, care motivează explorarea metodelor de evaluare continuă in-situ, integrate în mediul XR fără a rupe imersiunea.

Dat fiind costul ridicat al studiilor subiective la scară largă, modelele obiective și hibride sunt critice pentru deployment-ul în condiții reale. Mai multe abordări sunt întâlnite în literatura de specialitate:

- Mapările QoS→QoE, în care parametrii de rețea (latență, pierdere pachete, jitter) sunt corelați cu ratingurile utilizatorilor, furnizează predicții de bază dar ignoră dimensiunile multisenzoriale și starea internă a utilizatorului [31]. Aceste modele sunt utile ca punct de plecare, dar puterea lor predictivă este limitată pentru scenarii mulțimedia XR unde contribuția efectelor senzoriale la QoE globală poate depăși contribuția calității video.
- PSQA (Pseudo-Subjective Quality Assessment) valorifică modele de machine learning antrenate pe date subiective pentru a prezice QoE în timp real [33]. Aplicat sistemelor mulțimedia, PSQA poate incorpora simultan parametri tehnici și indicatori fiziologici pentru o predicție mai robustă, eliminând necesitatea evaluărilor subiective costisitoare în etapele de optimizare a sistemului.
- Modelele non-liniare parametrice [3], utilizează algoritmi de optimizare precum Particle Swarm Optimization (PSO) pentru a captura relația exponențială dintre modalitățile senzoriale adăugate și QoE globală. Aceste modele reflectă un fenomen important documentat empiric: valoarea marginală a fiecărei modalități senzoriale adiționale scade, iar over-stimulation - depășirea unui prag optimal de intensitate combinată - poate produce efecte negative asupra QoE.

Metricile obiective de calitate video (SSIM, PSNR, VMAF) pot fi aplicate fluxurilor componente ale sistemelor XR (V-PCC, MIV, video 360°), dar corelația lor cu QoE percepută este semnificativ mai slabă decât în video 2D. Metricile viewport-adaptive, care ponderează calitatea în funcție de orientarea privirii din datele de tracking al capului, sunt mai corelate cu QoE percepută și reprezintă direcția curentă a standardizării MPEG pentru conținut imersiv [14], [31].

Metodele implicite furnizează indicatori ai stării interne a utilizatorului în timp real, fără a perturba imersiunea, ceea ce constituie o proprietate esențială pentru aplicații de lungă durată. Cercetările proprii în evaluarea QoE pentru sisteme HbbTV [25], [26] au demonstrat că analiza direcției privirii și a expresiei faciale pot servi ca predictor ai stării de engagement și ai QoE percepute. Conductanța galvanică a pielii (EDA) și variabilitatea ritmului cardiac (HRV) sunt corelate cu arousal-ul emoțional și cu starea de imersiune profundă. Integrarea acestor semnale fiziologice în bucla de control a sistemelor de streaming adaptiv - transformând evaluarea din activitate post-hoc în mecanism de optimizare în timp real - reprezintă una dintre direcțiile cele mai active ale cercetării în domeniu și este direct aplicabilă arhitecturilor de concert hibrid documentate în această teză [30], [31].

4.2.1. QoE pentru aplicații de tip XR

Calitatea experienței QoE, definită și descrisă în amănunt în capitolul 2 mai ales pentru aplicații audio/video de tip broadcast ridică provocări semnificativ mai complexe pentru aplicații VR și XR decât pentru multimedia tradițională. Dacă pentru video 2D factorii determinanți ai QoE sunt relativ bine înțeleși și standardizați (rezoluție, bitrate, buffering, artefacte de compresie) pentru XR spațiul de factori de influență este multidimensional și interacționant. ITU-T Rec. P.1320 (2022), dedicată evaluării QoE pentru întâlnirile de tip XR, grupează factorii de influență în trei categorii: factori umani (Human Influence Factors - HIF), factori de sistem (System Influence Factors - SIF) și factori contextuali (Context Influence Factors - CIF) [31]. HIF includ susceptibilitatea la cybersickness, tendința spre imersiune, expertiza cu tehnologiile VR și starea emoțională momentană. SIF acoperă latența motion-to-photon (MTP), frame rate, rezoluția afișajului, câmpul vizual, bitrate-ul și jitter-ul. CIF descriu tipul aplicației, mediul fizic, configurația socială și durata sesiunii.

O dimensiune critică și distinctivă a QoE pentru XR este prezența (presence) - senzația de „a fi acolo”, în mediul virtual, și co-prezența (co-presence) - senzația de a împărtăși spațiul cu alți participanți. Prezența nu este o consecință directă a calității tehnice a sistemului, ci un construct psihologic multifactorial influențat de coerența senzorială, libertatea de mișcare și receptivitatea mediului la acțiunile utilizatorului [8]. Rupturile de imersiune (breaks in presence - BIPs) - generate de artefacte vizuale, lag perceptibil sau desincronizări senzoriale - sunt considerate în literatură evenimente discrete cu impact negativ semnificativ asupra experienței globale, distinct față de degradările tehnice continue specifice video-ului 2D [31]. Această particularitate impune metodologii de evaluare QoE adaptate pentru XR, care să capteze atât calitatea medie a sesiunii cât și evenimentele punctuale de degradare a prezenței.

Tabelul 4.4 prezintă o clasificare a principalilor factori de influență QoE specifici aplicațiilor XR hibride și mulsemmedia, cu exemple concrete pentru scenariile tratate în această teză.

Tabelul 4.4 – Factori de influență QoE pentru aplicații Hybrid XR și mulsemmedia

Categorie de factor	Factori specifici XR	Exemple și valori tipice
Factori umani (HIF)	Susceptibilitate cybersickness, tendință imersiune, expertiză VR, stare emoțională	SSQ <5 puncte: toleranță ridicată; >20: risc de abandon
Factori de sistem (SIF)	Latență motion-to-photon, frame rate, rezoluție, câmp vizual (FoV), bitrate, jitter	MTP <20 ms: confortabil; 20–50 ms: perceptibil; >50 ms: discomfort; FPS >72: fluid
Factori contextuali (CIF)	Tip aplicație (gaming, teleprezență, educație), mediu fizic, grup social, durată sesiune	Concert hibrid: CIF = audiență distribuită + scenă fizică + mediu virtual comun
Audio spațial	Eroare HRTF individualizare, latență head-tracking, calitate ambisonic (ordin HOA)	Latență tracking <20 ms; ordin HOA >3 pentru externalizare credibilă
Multisenzorial	Sincronizare inter-modală, intensitate efecte haptice/olfactive, personalizare senzorială	Desincronizare haptic <±15 ms; olfactiv <±300 ms față de trigger MPEG-V [7]

4.2.2. Cybersickness: definiție, cauze și cuantificare

Cybersickness - sau sickness indusă vizual (Visually Induced Motion Sickness - VIMS) - reprezintă una dintre cele mai semnificative bariere în adoptarea largă a tehnologiilor VR/XR și are o legătură directă, negativă, cu QoE. Simptomatologia sa include greață, dezorientare, disconfort ocular și, în cazuri severe, vărsături. Mecanismul causal dominant este conflictul

senzorial: sistemul vizual percepe mișcare în mediul virtual, în timp ce sistemul vestibular nu detectează accelerații corespunzătoare în lumea fizică. Latența MTP (motion-to-photon) este factorul tehnic cel mai direct corelat cu cybersickness. Pragul acceptat de industrie pentru confort este sub 20 ms, valorile de 20–50 ms sunt perceptibile și generează disconfort progresiv, iar peste 50 ms probabilitatea de cybersickness devine semnificativă [32].

Instrumentul clasic de măsurare a cybersickness este Simulator Sickness Questionnaire (SSQ), dezvoltat de Kennedy et al. (1993) [34], care evaluează 16 simptome grupate în trei subscale: greață, dezorientare și simptome oculomotorii. SSQ a fost ulterior adaptat pentru medii VR prin Cybersickness Questionnaire (CSQ-VR) și Virtual Reality Sickness Questionnaire (VRSQ), care adresează limitările psihometrice ale SSQ original - în particular, problemele de consistență internă și suprapunerea cu simptomele de anxietate [32]. Studiile de validare comparativă au demonstrat că CSQ-VR prezintă o consistență internă superioară față de SSQ și VRSQ, fiind mai sensibil la aspecte specifice ale aplicațiilor VR precum mișcările translaționale și rotaționale [32]. Scorul total SSQ variază de la 0 la valori de peste 200; praguri orientative de interpretare sunt: sub 5 - neglijabil, 5–20 - tolerabil, 20–45 - semnificativ, peste 45 - sever [34].

Factorii care contribuie la cybersickness în aplicații XR pot fi grupați în trei categorii. Factorii hardware includ: latența MTP (impactul cel mai direct), câmpul vizual (FoV), rezoluția și densitatea de pixeli per grad (PPD), interpupillary distance (IPD) setată incorect, și calitatea sistemului de tracking. Factorii software includ: frame rate (sub 72 fps crește semnificativ riscul de cybersickness [32]), algoritmi de locomotion (teleportare vs. mișcare continuă - aceasta din urmă generează mai mult conflict senzorial), și precizia rendering-ului spațial. Factorii individuali includ: vârsta, genul (femeile raportează în medie scoruri SSQ mai mari [34]), experiența anterioară cu VR, și susceptibilitatea înăscută la VIMS. Înțelegerea și mitigarea cybersickness nu este doar o problemă de confort - pentru aplicații de durată lungă, cum ar fi concertele hibride sau sesiunile de teleprezență profesională, cybersickness determină abandonarea prematură a sesiunii și evaluări globale QoE negative indiferent de calitatea conținutului [32].

4.2.3 QoE în contextul concertelor hibride și mulsemmedia XR

Evaluarea QoE în scenariile de concert hibrid și mulsemmedia XR introduce dimensiuni suplimentare față de modelele generale pentru XR, datorită naturii multi-modale și distribuite a experienței. Pe lângă factorii vizuali și de latență discutați anterior, QoE în aceste scenarii este determinată de: calitatea și spațializarea audio-ului (care acționează ca ancora perceptuală principală în absența video-ului de înaltă fidelitate), coerența efectelor senzoriale MPEG-V cu conținutul media, sentimentul de co-prezență cu artiștii și cu ceilalți participanți distribuiți geografic, și responsivitatea sistemului la acțiunile publicului (aplauze, reacții).

Studiile de QoE mulsemmedia confirmă că augmentarea multisenzorială îmbunătățește QoE percepută față de condiția exclusiv audiovizuală [2], [3]. Mecanismul explicativ este activarea simultană a canalelor perceptuale multiple, care reduce discrepanța somatică dintre lumea virtuală și indicatorii fizici ai utilizatorului, diminuând implicit conflictul senzorial responsabil de cybersickness. Cu toate acestea, calitatea mulsemmedia QoE este sensibilă la sincronizare, efectele senzoriale cu latență excesivă față de trigger-ul MPEG-V sau cu intensitate neadecvată

profilului individual al utilizatorului putând degrada QoE în loc să o îmbunătățească, efect documentat în literatura de specialitate sub termenul de over-stimulation [2], [3].

Direcțiile active de cercetare în QoE pentru XR mulsemmedia includ: modelele predictive de QoE bazate pe AI care integrează simultan metrici tehnice (latență MTP, bitrate, frame rate) și fiziologice (EDA, eye gaze) pentru predicția în timp real a stării de imersiune; evaluarea QoE în scenarii multi-utilizator distribuit, unde co-prezența adaugă o dimensiune socială care nu se regăsește în modelele single-user; standardizarea metodologiilor de evaluare pentru conținut volumetric (point cloud, MIV), unde metricile clasice de calitate video nu sunt direct aplicabile; și integrarea QoE în bucla de control a sistemelor de streaming adaptiv, transformând evaluarea din activitate post-hoc în mecanism de optimizare în timp real. Aceste direcții sunt în mod direct relevante pentru arhitecturile de concert hibrid documentate în această teză, plasând evaluarea QoE nu ca pas final de validare, ci ca componentă integrală a proiectării sistemului [30], [31].

4.3 Contribuții personale

Contribuțiile personale la acest ultim capitol al tezei sunt datorate quasi exclusiv participării ca și partener în cadrul proiectului european Horizon de cercetare ”HEAT – Hybrid Extended Reality”, scris de autor împreună cu colegi de la Universitățile din Cagliari, Dublin și Barcelona, proiect cu o durată de 36 de luni ce a început în luna iunie 2024. O primă lucrare, de poziționare a proiectului în literatură, a fost publicată deja în iunie 2024 sub titlul “Toward Interactive and Distributed Hybrid Extended Reality Experiences”, constituind o trecere în revistă a componentelor pilot ale proiectului. Contribuțiile științifice din ultimii doi ani s-au axat pe două direcții distincte în cadrul contextului XR: aplicații audio/video pentru concerte immersive XR și sisteme bidirecțional de interacțiune live în medii XR.

4.3.1. Aplicații audio/video pentru concerte și spectacole XR

Considerațiile din paragraful 4.1.2 sunt limitate la aplicații de tip NMP, concentrându-se în principal pe reducerea latenței. Studii și aplicații recente merg însă mai departe pentru a replica implicarea fizică și emoțională a manifestărilor artistice în prezență. Concertele XR precum cele descrise în [3] și alte exemple din paragrafele anterioare demonstrează cum datele audio spațial și vizuale în timp real pot amplifica senzația de prezență și implicare, creând o scenă virtuală partajată pentru performeri. Mai mult, sistemele care utilizează senzori de adâncime (de ex., Microsoft® Kinect™ și Intel® RealSense™ LiDAR) ajustează dinamic randarea semnalului audio spațial în funcție de mișcările și poziționarea în spațiu a muzicienilor, reducând și mai mult decalajul dintre performanțele fizice și cele în rețea.

Lucrare [35] și-a propus să introducă și să discute aspecte cheie din spatele proiectării și implementării aplicațiilor (AR/VR/XR) care permit streaming-ul în timp real al concertelor de muzică, unde utilizatorii echipați cu un hardware adecvat (adică Smart TV cu cameră și microfon integrate, PC, smartphone, headset XR) pot oferi feedback muzicienilor prin intermediul mediului virtual. Cercetare a avut două obiective principale de investigat:

1. mecanismele de feedback bidirecțional care maximizează experiența utilizatorului pe ambele părți ale aplicației (utilizatorii finali care ascultă și vizionează concertul și muzicienii care interpretează piesele);
2. abordările de generare a audio-ului spațial în timp real bazate pe date spațiale.

Arhitectura propusă și implementată (figura 1), este împărțită în trei blocuri principale: 1) Producător de conținut / NMP în timp real, 2) Server Cloud/Edge, 3) Utilizator(i) final(i).

În blocul Content Producer, interpretarea trupei este capturată video live cu ajutorul a cel puțin patru camere RGB-D, în cazul acesta specific Intel® RealSense™ LiDAR Camera L515. Datele RGB, împreună cu informațiile legate de adâncime (Depth - D), sunt transmise către blocul Position Capture, unde datele sunt preprocesate în timp real pentru a genera scena 3D completă, identificând poziția fiecărui muzician și permițând extrapolarea informațiilor spațiale care sunt transmise atât blocului de Video Encoding cât și blocului Spatial Audio Engine. Datele audio multicanal sunt capturate prin microfoane sau direct de la amplificatoarele instrumentelor printr-un Digital Audio Mixer (un mixer Behringer X32 Compact) și transmise canal cu canal blocului de Audio Capture. Fiecare canal reprezintă un instrument, vocea solistului fiind capturată de asemenea pe un canal separat. În cazul tobelor, unde sunt utilizate mai multe microfoane pentru captarea sunetului, ele sunt mixate intern pe un canal unic și transmise ca atare mai departe blocului Audio Capture.

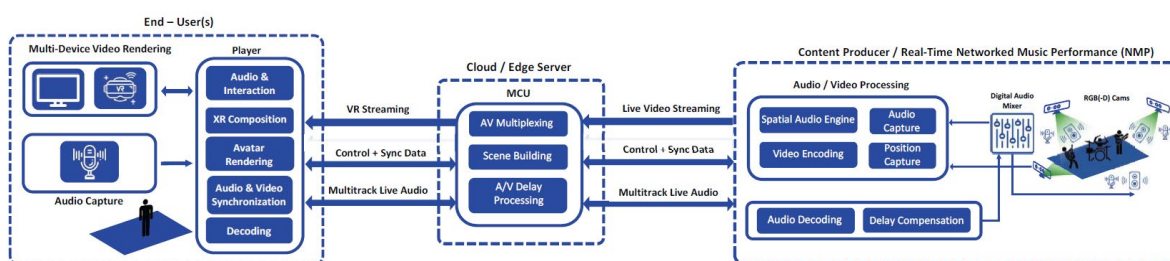


Fig.4.1. Arhitectură streaming audio live cu feedback din partea utilizatorului

Ieșirea blocului Content Producer este compusă deci din datele video live, datele de adâncime, datele audio live multicanal, datele de control și datele de sincronizare.

Blocul Cloud/Edge Server implementează mecanismele necesare pentru a sincroniza datele audio și video (blocul A/V Multiplexing) și pentru a construi întreaga scenă 3D (blocul de Scene Building). Toate mecanismele sunt implementate în cloud, utilizând o arhitectură bazată pe micro-servicii (de ex., Docker/Kubernetes) și un protocol de comunicare în timp real (de WebRTC). Avatarele muzicienilor sunt construite dinamic în termeni de textură și poziție.

Blocul End-User primește datele din cloud prin blocul de Decoding și construiește scena 3D pentru utilizatorul final, randând conținutul pentru multiple dispozitive, precum headset 3D sau ecran 2D, prin intermediul blocurilor de XR Composition și Avatar Rendering. Utilizatorul interacționează cu scena prin intermediul dispozitivului de randare, după cum urmează: pentru headset-ul 3D mișcarea utilizatorului este extrapolată direct utilizând datele furnizate de headset, în timp ce pentru ecranul 2D, direcția privirii telespectatorului este analizată de o cameră 2D (cameră dedicată sau telefon mobil), utilizând algoritmi specifici. Audio-ul utilizatorului final este capturat utilizând microfonul headset-ului 3D sau al camerei integrate, corelat cu mișcarea utilizatorului în blocul de Interacțiune Audio și sincronizat de blocul de

Sincronizare Audio-Video. Feedback-ul audio al utilizatorului, ca un canal audio separat, este ulterior transmis blocului Cloud/Edge Server unde întârzierea este compensată suplimentar de blocul A/V Delay Processing și apoi retransmis performanței live. Poziția utilizatorului este transmisă sub formă de metadate spațiale prin canalul de Control – Sync Data.

În stratul Content Producer, audio-ul este decodat, întârzierea este din nou compensată pentru a depăși întârzierile de rețea și apoi transmis mixerului audio digital ca un canal de feedback de intrare separat. Pe baza metadatelor spațiale, feedback-ul audio este panoramat de mixerul digital (controlat prin SDK-ul mixerului) și transmis liniei de monitorizare a fiecărui muzician (de ex., monitoare de scenă sau in-ear monitor) pentru a simula mișcarea utilizatorului, creând o reprezentare realistă a publicului și pe partea muzicienilor.

Pentru a evalua arhitectura în termeni de calitate a conexiunii pentru aplicații audio imersive cu constrângeri de latență ultra-redușă, am implementat un subset al întregii arhitecturi, concentrându-ne pe conexiunea audio dintre producătorul de conținut și utilizatorul final. Un server Unity a fost configurat în cloud și alimentat cu patru piste audio provenind din fișiere WAV lossless pre-înregistrate. Pe partea clientului, utilizatorul final navighează prin mediul 3D al serverului Unity, unde avatarele reprezintă cei trei membri ai trupei (bas, chitară și voce și tobe). Pe baza coordonatelor utilizatorului final, diferitele surse sonore au fost mapate 3D față de poziția sa în relație cu poziția muzicienilor. Deoarece transmisia în rețea s-a bazat pe protocolul WebRTC, au fost utilizate instrumentele WebRTC Internals Chrome. Două metrici principale au fost utilizate pentru a evalua comportamentul arhitecturii: timpul total de round-trip și jitter-ul, susținute de majoritatea referințelor studiate ca fiind cele mai semnificative pentru aplicațiile NMP. Pentru metricile menționate, au fost utilizate diverse codec-uri pentru a determina care dintre ele produce cele mai bune rezultate. Deoarece a fost utilizat mediul Unity 3D, alegerea s-a îndreptat spre codec-urile audio native implementate în Unity, respectiv RED, OPUS și G722. Acesta din urmă, deși un codec destinat aplicațiilor vocale de înaltă definiție, a fost luat în considerare pentru a testa influența unei frecvențe de eșantionare mai mici (8 kHz) și a unui bitrate mai redus (64 kbps) asupra metricilor analizate. Valorile obținute sunt în concordanță cu cele din literatură, dar nu iau în considerare și alte întârzieri de procesare care depind în mare măsură de hardware-ul și software-ul instalat la punctele terminale. Măsurători paralele au fost efectuate pe partea serverului utilizând Wireshark, obținând valori mult mai ridicate pentru timpul de round-trip; de exemplu, pentru codec-ul OPUS a fost obținută o valoare de 82 ms față de 3,68 ms a valorii din WebRTC Internals. Valorile Timpului Total de Round-Trip au fost obținute pentru pachete audio-video combinate, cu o calitate video setată la o rezoluție de 640 x 480 pixeli cu 15 cadre pe secundă.

Conceptul prezentat în lucrare a fost ulterior implementat complet într-o aplicație Unity, urmând să fie evaluat din puncte de vedere QoE în următoarele luni, în cadrul acțiunii pilot XR Blues din proiectul HEAT, acțiune pentru care autorul acestei lucrări este responsabil principal.

În cadrul aceleiași acțiuni pilot XR Blues a fost conceput și sistemul din lucrarea “Immersive live concert: A multi-sensory experience based on real-time lyrics detection from spatial audio data” [5] care se ocupă cu sincronizarea componentelor multisenzoriale olfactive cu cele vizuale pentru spectatori remote ai unui concert live distribuit în rețea. Versurile cântecelor declanșează efectele de miros de aer oceanic și de vânt atât pentru participanții prezenți fizic cât și pentru cei de la distanță. Concertul în prezență are loc într-un club de blues (figura 4.1.a), cu participanți care urmăresc prestația live și alții care o experimentează de la distanță prin

headset-uri XR, într-un mediu 3D bazat pe Unity (figura 4.1.b). Concertul este transformat într-un mediu 3D imersiv, permițând utilizatorilor de la distanță să navigheze în interiorul său, deplasându-se alături de muzicieni. Pe măsură ce explorează, sunetul se adaptează dinamic, oferind o experiență auditivă personalizată în funcție de poziția lor. În viitor, această abordare va fi extinsă pentru a incorpora holograme volumetrice ale muzicienilor, crescând semnificativ volumul de date transmise. Efectele de miros de aer oceanic și de vânt sunt declanșate de indicii audio specifice din versuri, creând o experiență mai imersivă atât pentru publicul prezent fizic cât și pentru cel de la distanță. Spectatorii de la distanță trăiesc concertul prin headset-uri XR, cu mirosuri și efecte sincronizate livrate pe baza indicilor audio.



(a) (b)
Fig. 4.2. Concert blues în prezență (a) și echivalentul virtual (b)

Prin combinarea detecției indicilor audio, a comunicației în rețea și a dispozitivelor de difuzare a mirosurilor, este posibilă livrarea de stimuli olfactivi sincronizați și efecte de vânt publicului de la distanță care urmărește concertul prin headset-uri. Soluția identifică indicii audio specifice în versurile concertului care declanșează efectele de miros de aer oceanic și de vânt. Aceste indicii sunt procesate în timp real pentru a asigura că mirosurile și efectele corespunzătoare sunt eliberate la momentele potrivite pentru utilizatorii de la distanță.

În această lucrare, propunem și testăm o soluție care introduce:

- Detecția indicilor audio pentru declanșarea în timp real a efectelor de miros și vânt.
- Comunicație bazată pe MQTT pentru interacțiune cu latență redusă între scena concertului și utilizatorii de la distanță.
- Evaluarea detecției indicilor audio utilizând două modele Vosk Python ASR.

Sistemul propus constă din următoarele componente: dispozitive de difuzare a mirosurilor, detecție audio și comunicație cu un broker MQTT, după cum este ilustrat în Fig. 4.3.

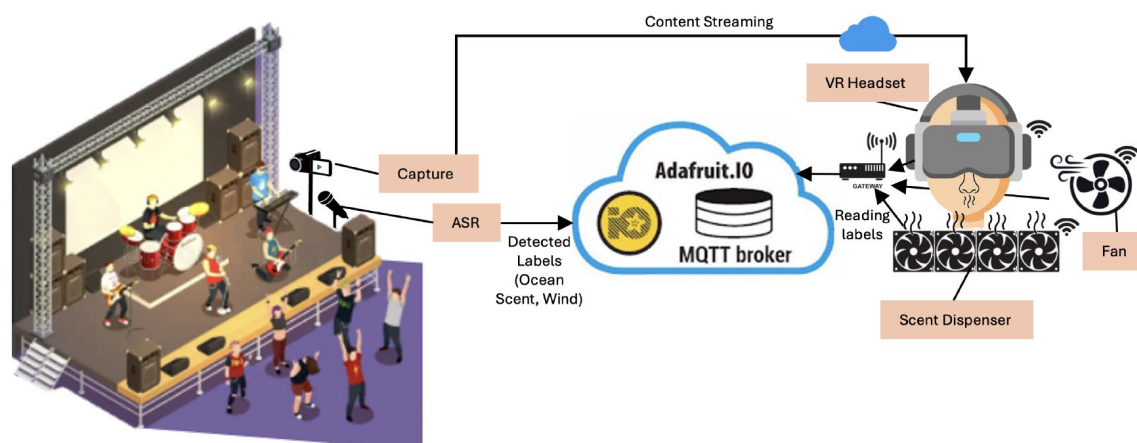


Fig. 4.3. Arhitectura sistemului pentru experiența de concert multisenzorial.

Difuzoarele de mirosuri sunt poziționate în proximitatea utilizatorilor virtual. Furnizate de Inhalio, aceste dispozitive dispun de sloturi pentru cartușe de miros personalizate conținând cu mirosul Aer Oceanic proiectate special pentru cerințele aplicației. În spatele fiecărui slot, ventilatoare suflă aer peste cartușe pentru a elibera mirosurile corespunzătoare. Dispozitivele sunt echipate cu conectivitate Wi-Fi, permițându-le să primească comenzi prin API-ul de olfacție. Acest API controlează ventilatoarele, permițând pornirea și oprirea lor, și ajustează intensitatea mirosului pe baza cererilor HTTP, asigurând un sistem dinamic și responsive de livrare a mirosurilor.

Un ventilator este utilizat pentru a crea efectul de vânt și este conectat la un smart plug Shelly. Ventilatorul este activat prin API-ul Shelly, care funcționează prin cereri HTTP, permițând controlul precis al efectului de vânt ca răspuns la comenzile brokerului MQTT.

Biblioteca Python Vosk, este utilizată pentru recunoașterea automată a vorbirii (ASR) în scenele cheie care implică efectele de aer oceanic și vânt. Audio capturat de la microfonul solistului prin mixerul audio este transmis unui PC, unde modelul Vosk procesează audio-ul capturat. Biblioteca Vosk calculează încrederea în ASR evaluând probabilitatea că o anumită transcriere să fie corectă, pe baza atât a modelului acustic cât și a modelului de limbaj. Modelul acustic evaluează caracteristicile audio pentru a identifica fonemele, în timp ce modelul de limbaj prezice cele mai probabile secvențe de cuvinte pe baza contextului. Vosk combină aceste modele pentru a genera o ipoteză a vorbirii recunoscute și calculează un scor de încredere, care reflectă cât de sigur este sistemul cu privire la acuratețea transcrierii. Acest scor este derivat din probabilitatea cuvintelor recunoscute și alinierea lor cu caracteristicile audio, probabilitățile mai mari indicând o certitudine mai mare. Scorul final de încredere oferă o estimare a probabilității că transcrierea este corectă.

Aplicația utilizează modelele de limbă engleză vosk-model-en-us-0.22 și vosk-model-small-en-us-0.15, modelul mai mare oferind o acuratețe mai ridicată în recunoașterea frazelor cheie din melodia „Californian Winds” folosită pentru implementarea arhitecturii, precum „take that road, take to northwest” și „I got nothing to lose alright.” Aceste fraze declanșează mirosul de aer oceanic corespunzător și efectul de vânt pentru utilizatorii de la distanță.

Odată ce cuvintele relevante sunt detectate, aplicația Python trimite un mesaj conținând eticheta de miros de aer oceanic sau efect de vânt brokerului MQTT Adafruit. Dispozitivele de la

distanță sunt activate de un alt script Python care citește din broker și trimite o cerere GET către dispozitive.

Biblioteca Python Vosk, utilizată pentru recunoașterea vorbirii, atribuie un scor de încredere fiecărui cuvânt recunoscut în timp real. Acest scor este apoi calculat ca medie pe propoziții pentru a determina fiabilitatea frazelor detectate. Prin testare empirică, s-a constatat că valorile de încredere ale propozițiilor de peste 70% au fost eficiente pentru declanșarea fiabilă a evenimentelor de miros corespunzătoare. De exemplu, când prima propoziție a melodiei „Californian Winds” de Fred Sunwalk („Take that road, take to northwest”) este detectată, aceasta declanșează mirosul de aer oceanic, în concordanță cu contextul melodiei de blues.

Efectul de vânt este declanșat de versul „I got nothing to lose alright”, imediat înainte de versul „got californian winds.”

Implementarea practică a demonstrat fezabilitatea integrării ASR cu efecte multisenzoriale pentru concerte live. Utilizând melodia „Californian Winds” (autor Fred Sunwalk, figura 4.2.a stânga) ca și studiu de caz, am demonstrat cum stimulii olfactivi și vizuali pot fi sincronizați pentru a îmbunătăți experiența imersivă a publicului de la distanță. Integrarea ASR pentru livrarea mirosurilor s-a dovedit eficientă în declanșarea mirosurilor de aer oceanic și a efectelor de vânt pe baza versurilor specifice ale melodiei. Soluția este în măsură să sincronizeze precis generarea mirosului și a vântului cu momentele cheie ale concertului.

4.3.2. Sisteme bidirecțional de interacțiune live în medii XR

Pornind de la arhitecturile pentru concerte VR/XR prezentate în paragraful anterior, lucrarea ”EmoLoop: A Bi-Directional System for Emotion-Driven Interaction Between Remote Audiences and Live Performers” [37], prezentată la conferința IEEE 6th International Symposium on the Internet of Sounds (IS2) (unde a obținut și premiul ”Best Poster Award”), extinde conceptele de bidirecționalitate din domeniul audio prin intermediul arhitecturii denumită EmoLoop.

Această arhitectură inovatoare permite interacțiunea bidirecțională în timp real între performeri și publicul remote distribuit, valorificând recunoașterea emoțiilor multimodale și controlul adaptiv al conținutului media. Sistemul propus integrează mai multe modalități de achiziție a datelor senzoriale, incluzând detecția expresiei faciale, achiziția datelor EEG și interacțiunile bazate pe smartphone, toate folosite pentru a interpreta starea afectivă a membrilor publicului și a modula prestația în consecință.

În medii imersive precum concertele live sau instalațiile teatrale, înțelegerea modului în care emoția se manifestă în tipare neurale, faciale și comportamentale este esențială pentru personalizarea experienței utilizatorului și amplificarea senzației de prezență. Platforme precum Meta Quest și Muse 2 oferă acces în timp real la aceste semnale prin SDK-uri și API-uri, furnizând o infrastructură viabilă pentru sisteme adaptive care să interpreteze emoții.

Arhitectura EmoLoop include: (i) un modul de detecție a emoțiilor utilizatorului care fuzionează semnale multimodale utilizând tehnologii de deep learning, (ii) un motor de mapare care traduce stările emoționale în parametri de scenotehnici în timp real și (iii) un canal de feedback în timp real către performeri prin indicii audio-vizuale. Acest pipeline modular permite noi forme de co-prezență public-performer, deosebit de relevante în contextele de

prestație hibridă sau la distanță, după cum este explorat în studii recente privind muzica în rețea și dramaturgia interactivă [1], [8]–[10].

Această lucrare contribuie la un obiectiv de cercetare mai amplu: investigarea modului în care datele emoțiilor poate fi integrată în ecosisteme de reprezentării artistice live, modelând expresivitatea și interacțiunea în spații fizice și virtuale. În această primă etapă, ne concentrăm pe proiectarea și implementarea fundației arhitecturale a unui astfel de sistem, definind modalitățile de senzoriizare, protocoalele de comunicație și strategiile de mapare pentru a susține viitoarele studii evaluative. EmoLoop vizează să contribuie atât ca cadru conceptual cât și ca prototip operațional pentru a aborda aceste întrebări în contextul temelor Internet of Sounds (IoS) și Internet of Musical Things (IoMusT).

Pe lângă calculul afectiv și cercetarea în domeniul prestațiilor în rețea, EmoLoop se aliniază și cu dezvoltările din domeniul Technology-Mediated Audience Participation — TMAP [12], un domeniu care examinează modul în care instrumentele digitale, gestuale sau bazate pe senzori permit publicului să influențeze activ prestațiile live. În cadrul acestui spectru, EmoLoop adoptă un model de participare bazat pe afect, în care stările emoționale ale publicului modulează reprezentarea artistică.

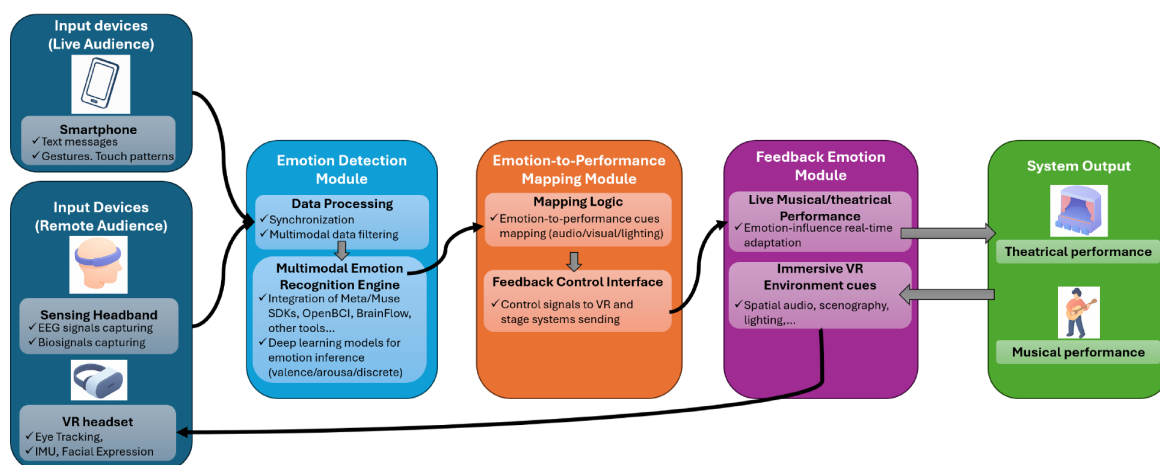


Fig. 4.4. Arhitectura Emoloop

EmoLoop avansează paradigma IoMusT prin integrarea dispozitivelor portabile ale publicului ca elemente muzicale active într-o rețea de performanță distribuită. Prin protocoale de comunicare în timp real precum OSC, MQTT și RTP-MIDI, biosemnalele multimodale captate de la utilizatorii de la distanță sunt traduse în parametri controlabili pentru sunet, iluminat și scenografie. Acest strat de mapare emoțională extinde modelele tipice de interacțiune IoMusT — în care controlul este exercitat de interpret sau instrument — prin poziționarea publicului ca sursă afectivă în cadrul aceluiași ecosistem interconectat.

Sistemul EmoLoop este conceput ca o arhitectură modulară, în timp real, care permite interacțiunea bidirecțională între publicul live și interpreți prin recunoașterea emoțiilor și modularea mediului imersiv, figura 4.4 ilustrând arhitectura generală.

Dispozitive de intrare:

Cască VR Meta Quest V3: Meta Quest V3 asigură randare imersivă de înaltă fidelitate și capturează biosemnale prin intermediul senzorilor integrați. Urmărirea ochilor, datele IMU și

expresiile faciale (prin intermediul matricelor de camere infraroșu și al Meta Quest SDK) permit achiziția în timp real a Activărilor Expresiilor Faciale (FEA), bazate pe Sistemul de Codificare a Acțiunilor Faciale (FACS).

Bentița Muse 2 - monitorizare cerebrală: Muse 2 capturează semnale EEG de la nivelul lobilor frontali și temporali, oferind informații neurofiziologice despre stările emoționale, precum excitație și valență [39]. Integrarea este susținută prin Muse SDK și cadre open source precum BrainFlow și OpenBCI, asigurând compatibilitatea cu pipeline-urile existente de procesare a semnalelor.

Modulul de detecție a emoțiilor utilizatorului

Acest modul fuzionează datele provenite de la căștile VR și bentița EEG și include:

- Preprocesare: Sincronizarea semnalelor, reducerea zgomotului și eliminarea artefactelor din datele EEG, IMU și FEA.
- Recunoaștere multimodală a emoțiilor: Bazată pe arhitecturi de învățare profundă, precum rețelele LSTM multi-scală cu mecanisme de atenție și blocuri squeeze-and-excitation (SE). Datele privind expresiile faciale sunt procesate prin metode similare rețelelor neuronale convoluționale bazate pe EfficientNet-B0.

Modulul de mapare emoție - spectacol

În această etapă, vectorii emoționali (de exemplu, valență/excitație, clase discrete de emoții) sunt traduși în parametri de control ai spectacolului live. Semnalele de control corespunzătoare sunt transmise pe scenă prin protocoale de comunicare în timp real precum ArtNet, MIDI, OSC și, opțional, WebSockets sau MQTT, alese în funcție de cerințele de latență și compatibilitatea cu endpoint-urile. Logica de mapare este sincronizată în timp real și în mediul VR (de exemplu, Unity), prin plugin-uri personalizate, și poate include:

- Modularea audio spațială (de exemplu, reverb, panning);
- Iluminat și scenografie dinamică (de exemplu, tonalitatea culorii în funcție de emoția colectivă);
- Tranziții de scenă declanșate de feedbackul dominant al publicului.

Modulul de feedback emoțional

Interpreții de pe scenă primesc indicii în timp real (vizuale sau auditive) care reflectă stările emoționale agregate ale publicului. Acestea pot fi prezentate, de exemplu, prin indicatori vizuali pe scenă, proiecții în realitate augmentată sau feedback audio prin monitoare in-ear. Legătura bidirecțională permite modularea co-creativă și afectivă a spectacolului, aliniindu-se conceptelor de dramaturgie participativă.

Ieșirea sistemului

Output-ul sistemului este transpus în două direcții: (i) o experiență VR imersivă livrată prin căștile VR, adaptată emoției utilizatorului, și (ii) muzică sau teatru dinamic, modelat de feedback-ul continuu al publicului. Această arhitectură închide bucla dintre percepția publicului, răspunsul emoțional și expresia prin spectacol — o inovație fundamentată pe cadre actuale de calcul afectiv și interacțiune cu medii imersive.

Arhitectura prezentată se află în acest moment în etapa de implementare practică a sistemului. Odată terminată implementarea, se va analiza și exploata componenta creativă a conceptului. Un regizor uman (sau pe viitor un agent AI) poate media dramaturgia prin selectarea perspectivei utilizatorului proiectate pe ecranul holografic. Alternativ, sistemul ar putea automatiza selecția punctului de vedere utilizând date emoționale agregate sau metrice bazate pe entropie. Membrii publicului pot acționa ca și co-creatori, întrucât răspunsurile lor afective modelează evoluția spectacolului. În acest sens conceptul EmoLoop abilitază relații expresive între muzicieni, public, scenografi și sisteme computaționale. Imersiunea publicului va fi evaluată prin chestionare de autoevaluare, indicatori biosemnalici și comportamentali (de exemplu pattern-uri EEG și direcția privirii) și prin receptivitatea la modularea performativă. Efectele dramaturgice vor fi evaluate prin tranzițiile de scenă înregistrate, feedback-ul interpreților și analiza modului în care declanșatorii emoționali influențează dezvoltarea muzicală sau narativă. Aceste măsuri vor contribui la determinarea gradului în care feedback-ul emoțional amplifică prezența și co-crearea în contexte virtuale și fizice.

Obiectivul pe termen lung al conceptului Emoloop este de a conecta afectul uman cu sistemele computaționale de performanță, permițând crearea de scenarii artistico-tehnice în care emoțiile nu doar inspiră, ci modelează activ spectacolele XR în timp real.

4.4 Sumar Capitol 4

Capitolul 4 se ocupă de convergența dintre tehnologiile 5G/6G și Realitatea Extinsă Hibridă (Hybrid XR), construind un cadru conceptual și tehnic pentru experiențele imersive distribuite și multisenzoriale. Prima parte analizează evoluția de la multimedia la mulsemmedia — de la standardul MPEG-V (2008) la sistemele XR multisenzoriale actuale — și documentează rolul infrastructurilor 5G SA cu profil URLLC și al edge computing în reducerea latenței end-to-end sub pragul critic de 30 ms pentru aplicații de tip Networked Music Performance (NMP). Sunt analizate comparativ protocoalele de comunicație relevante (MQTT, CoAP, WebRTC, RTP/SRTP, WebSocket, QUIC/MoQ), cu accent pe compromisurile latență-fiabilitate per tip de flux de date, și sunt prezentate standardele de compresie și transmisie pentru conținut volumetric (V3C, V-PCC, G-PCC, MIV, VVC, MPEG-DASH). Capitolul include o taxonomie extinsă a metodelor de evaluare QoE pentru sisteme XR cu discuții dedicate despre cybersickness și factorilor de influență specifici scenariilor hibride.

Contribuțiile personale, dezvoltate în cadrul proiectului Horizon EU HEAT (2024–2027), se articulează pe două direcții. Prima direcție vizează concertele XR imersive: o arhitectură de streaming audio-video în timp real cu feedback bidirecțional al publicului, bazată pe WebRTC, Unity 3D și audio spațial, evaluată prin metrice de round-trip time și jitter; și un sistem de sincronizare multisenzorială olfactivă cu conținut audio pentru spectatori remote, utilizând recunoaștere automată a vorbirii (Vosk ASR) și comunicație MQTT pentru declanșarea în timp real a efectelor de miros și vânt. A doua direcție introduce arhitectura EmoLoop — un sistem bidirecțional de interacțiune afectivă între public și performeri, distins cu premiul Best Poster la IEEE IS2 2025 — care fuzionează biosemnale multimodale (EEG prin Muse 2, expresii faciale și date IMU prin Meta Quest V3) într-un pipeline de recunoaștere emoțională bazat pe deep learning, traducând stările afective ale publicului în parametri de control ai scenotehnicii live în timp real.

Bibliografie Capitolul 4

- [1] M. Murroni, G. Muntean, M. Montagud, and V. Popescu, “Toward Interactive and Distributed Hybrid Extended Reality Experiences,” in *Proc. ACM Int. Conf. on Interactive Media Experiences Workshops (IMXw’24)*, Stockholm, Sweden, Jun. 2024, pp. 1–4. doi: 10.1145/3652213.3665435
- [2] L. Jalal, M. Anedda, V. Popescu, and M. Murroni, “QoE Assessment for IoT-Based Multi Sensorial Media Broadcasting,” *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 64, no. 2, pp. 552–566, Jun. 2018. doi: 10.1109/TBC.2018.2822786
- [3] L. Jalal, R. Puddu, M. Martini, V. Popescu, and M. Murroni, “A QoE Model for Mulsemedia TV in a Smart Home Environment,” *IEEE Trans. Broadcast.*, vol. 68, no. 4, pp. 791–803, Dec. 2022. doi: 10.1109/TBC.2022.3193254
- [4] N. Amarie, G. Fadda, V. Popescu, J.-M. Ghenta, M. Murroni, and A. Simiscuka, “Live Feedback for Immersive Music Performances: A Case Study,” in *Proc. ACM IMX Workshops*, Rio, Brazil, 2025, pp. 1–4.
- [5] A. A. Simiscuka, G. Fadda, V. Popescu, M. Murroni, and G.-M. Muntean, “Immersive Live Concert: A Multi-Sensory Experience Based on Real-Time Lyrics Detection from Spatial Audio Data,” in *Proc. ACM IMX Workshops*, Rio de Janeiro, Brazil, Jun. 2025, pp. 1–5.
- [6] C. Yan, S. Ban, Z. Li, C. Yu, and Z. Zheng, “Olfactory Interfaces for VR Immersion: A Review,” *Virtual Reality*, vol. 24, no. 4, pp. 553–570, Dec. 2020. doi: 10.1007/s10055-019-00420-3
- [7] T. Hirata and Y. Suzuki, “Synchronization of Sensory Stimuli in Extended Reality Systems,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 113244–113259, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3103967
- [8] S. S. Sundar, J. Kang, and A. Oeldorf-Hirsch, “Presence as a Function of Sensory Immersion in Virtual Reality: A User Study,” *Comput. Human Behav.*, vol. 132, art. 107241, Jul. 2022. doi: 10.1016/j.chb.2022.107241
- [9] E. B. Saleme and C. A. S. Santos, “PlaySEM: A Platform for Rendering MulSeMedia Compatible with MPEG-V,” in *Proc. 21st Brazilian Symposium on Multimedia and the Web (WebMedia ’15)*, Manaus, Brazil, Oct. 2015, pp. 145–148. doi: 10.1145/2820426.2820450
- [10] World Wide Web Consortium (W3C), “Web of Things (WoT) Architecture 1.1,” W3C Recommendation, Dec. 2023. [Online]. Available: <https://www.w3.org/TR/wot-architecture11/>
- [11] P. Hande, T. Schmid, D. Mukherjee, R. Jain, and B. Classon, “Extended Reality Over 5G - Standards Evolution,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 41, no. 6, pp. 1757–1771, Jun. 2023. doi: 10.1109/JSAC.2023.3276056
- [12] A. Covaci, R. Trestian, E. B. Saleme, I.-S. Comsa, G. Assres, C. A. S. Santos, and G. Ghinea, “360° Mulsemedia: A Way to Improve Subjective QoE in 360° Videos,” in *Proc. 27th ACM Int. Conf. Multimedia (MM ’19)*, Nice, France, Oct. 2019, pp. 1029–1037. doi: 10.1145/3343031.3350954
- [13] R. Jvet, S. Schwarz, D. Flynn, F. Pereira, P. Rondao-Alface, and T. Suzuki, “Overview of the Geometry-Based Point Cloud Compression Standard (G-PCC),” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 39, no. 4, pp. 32–43, Jul. 2022. doi: 10.1109/MSP.2022.3156895
- [14] B. Salahieh, J. Boyce, J. Chen, and R. Skupin, “MPEG Immersive Video Coding Standard,” *Proc. IEEE*, vol. 109, no. 9, pp. 1521–1536, Sep. 2021. doi: 10.1109/JPROC.2021.3085555
- [15] ISO/IEC, “Information Technology - Dynamic Adaptive Streaming over HTTP (DASH) - Part 1: Media Presentation Description and Segment Formats,” ISO/IEC 23009-1:2022, 5th ed., Geneva, Switzerland, 2022.
- [16] M. Casasnovas, D. Marchitelli, B. Bellalta, and M. Montagud, “Streaming Remote Rendering Services: Comparison of QUIC-Based and WebRTC Protocols,” *arXiv:2505.22132*, May 2025. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2505.22132>

- [17] M. Gapeyenko, V. Petrov, S. Paris, A. Marcano, and K. I. Pedersen, "Standardization of Extended Reality (XR) over 5G and 5G-Advanced: 3GPP New Radio," *IEEE Netw.*, vol. 37, no. 4, pp. 22–28, 2023. doi: 10.1109/MNET.009.2200349
- [18] R. Hamilton, "Real-Time Musical Performance Across and Within Extended Reality Environments," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 153, pp. A35–A35, Mar. 2023. doi: 10.1121/10.0018449
- [19] S. Giacomelli, C. Centofanti, J. Santos, M. Galbiati, T. Salvi, F. Graziosi, and C. Rinaldi, "Remote Immersive Audio Production: State of the Art Implementation, Challenges, and Improvements," in *Proc. AES Int. Conf. Immersive and Interactive Audio*, Sep. 2024, pp. 1–10.
- [20] L. Comanducci, "Intelligent Networked Music Performance Experiences," in *Intelligent Networked Music Performance*, Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 119–130. doi: 10.1007/978-3-031-15374-7_10
- [21] C. Rottondi, C. Chafe, C. Allocchio, and A. Sarti, "An Overview on Networked Music Performance Technologies," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 8823–8843, 2016. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2628440
- [22] L. Turchet, C. Rinaldi, C. Centofanti, L. Vignati, and C. Rottondi, "5G-Enabled Internet of Musical Things Architectures for Remote Immersive Musical Practices," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 5, pp. 4691–4709, 2024. doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3413048
- [23] Wikipedia contributors, "Ambisonics," *Wikipedia, The Free Encyclopedia*, Dec. 2024. [Online]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ambisonics>
- [24] A. Carôt and C. Werner, "Network Music Performance - Problems, Approaches and Perspectives," in *Proc. Music in the Global Village Conf.*, Budapest, Hungary, 2007, pp. 23–30.
- [25] S. Porcu, A. Floris, M. Anedda, V. Popescu, M. Fadda, and L. Atzori, "Quality of Experience Eye Gaze Analysis on HbbTV Smart Home Notification System," in *Proc. IEEE Int. Symp. Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/BMSB49480.2020.9379772
- [26] S. Porcu, A. Floris, and L. Atzori, "Towards the Prediction of the Quality of Experience from Facial Expression and Gaze Direction," in *Proc. 22nd Conf. Innovation in Clouds, Internet and Networks (ICIN)*, 2019, pp. 82–87. doi: 10.1109/ICIN.2019.8685894
- [27] J. Spittka, K. Vos, and J.-M. Valin, "RTP Payload Format for the Opus Speech and Audio Codec," *IETF RFC 7587*, Jun. 2015. [Online]. Available: <https://www.rfc-editor.org/info/rfc7587>
- [28] C. Chafe and J. P. Cáceres, "JackTrip: A System for Real-Time Network Audio Streaming," *Stanford CCRMA*, 2023. [Online]. Available: <https://ccrma.stanford.edu/groups/soundwire/software/jacktrip/>
- [29] J. Herre, J. Hilpert, A. Kuntz, and J. Plogsties, "MPEG-H 3D Audio - The New Standard for Coding of Immersive Spatial Audio," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 9, no. 5, pp. 770–779, Aug. 2015. doi: 10.1109/JSTSP.2015.2431214
- [30] P. Le Callet, S. Möller, and A. Perkis, Eds., "Qualinet White Paper on Definitions of Quality of Experience," *European Network on Quality of Experience in Multimedia Systems and Services (COST Action IC 1003)*, Version 1.2, Mar. 2013. [Online]. Available: http://www.qualinet.eu/images/stories/QoE_whitepaper_v1.2.pdf
- [31] ITU-T, "Recommendation P.1320: Quality of Experience Assessment of Extended Reality (XR) Meetings," *International Telecommunication Union*, Geneva, Switzerland, Jul. 2022. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/T-REC-P.1320>
- [32] K. Arda Sevinc, H. Yilmaz, and K. Cagiltay, "Psychometric Evaluation of Simulator Sickness Questionnaire and Its Variants as a Measure of Cybersickness in Consumer Virtual Environments," *Appl. Ergon.*, vol. 82, art. 102958, Jan. 2020. doi: 10.1016/j.apergo.2019.102958
- [33] G. Rubino and M. Varela, "Measuring the Quality of Multimedia Flows Using PSQA," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM)*, Dallas, TX, Nov. 2004, pp. 1179–1183. doi: 10.1109/GLOCOM.2004.1378138

- [34] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal, "Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness," *Int. J. Aviat. Psychol.*, vol. 3, no. 3, pp. 203–220, 1993. doi: 10.1207/s15327108ijap0303_3
- [35] N. Amarie et al., "Immersive Application for Real-Time Interactive Music Performances Using Spatial Audio," 2025 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Dublin, Ireland, 2025, pp. 1-4, doi: 10.1109/BMSB65076.2025.11165553.
- [36] Amarie, N., Fadda, G., Murroni, M., Alexandru, M., & Popescu, V. (2025). An Architecture for Real-Time Interactive Music Performances. 2025 23rd Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet), 1–3. <https://doi.org/10.1109/MedComNet65822.2025.11103534>
- [37] Amarie, N., Fadda, G., Simiscuka, A. A., Popescu, V., & Murroni, M. (2025). EmoLoop: A Bi-Directional System for Emotion-Driven Interaction Between Remote Audiences and Live Performers. 2025 IEEE 6th International Symposium on the Internet of Sounds (IS2), <https://doi.org/10.1109/IS264627.2025.11284604>
- [38] Simiscuka, A. A., Picoreau, M., Muntean, G.-M., Fadda, G., Murroni, M., Montagud, M., Mancini, M., Carli, M., Battisti, F., & Popescu, V. (2025). Enhancing XR Theatre with Remote Scent Delivery Using Audio Speech Recognition and Convolutional Neural Network-Based Scene Detection. 2025 IEEE 6th International Symposium on the Internet of Sounds (IS2), 1–7. <https://doi.org/10.1109/IS264627.2025.11284558>
- [39] P. Kalansooriya, G. A. D. Ganepola, and T. S. Thalagala, "Affective gaming in real-time emotion detection and Smart Computing music emotion recognition: Implementation approach with electroencephalogram," in 2020 Int. Research Conf. on Smart Computing and Systems Engineering (SCSE), Sep. 2020, pp. 111–116.

5. Concluzii

Prezenta teză de abilitare sintetizează un parcurs de cercetare desfășurat pe parcursul a aproape două decenii de activitate academică, ale cărui etape se dovedesc, privite în ansamblu, expresii succesive ale conceptului de reconfigurabilitate în telecomunicații. Acest concept a evoluat odată cu tehnologia, trecând prin paradigmele Radioului Cognitiv și ale platformelor Software-Defined Radio, prin ecosistemele Internet of Things și aplicațiile Smart Cities, și culminând cu arhitecturile de Realitate Extinsă Hibridă și sistemele de interacțiune multisenzorială.

Primul capitol a demonstrat că ineficiența spectrală nu este o limitare, ci o problemă rezolvabilă prin dotarea cu inteligența a sistemului de comunicații însuși. Tehnicile de detecție a spectrului, validate experimental pe platforme USRP și în campanii de teren, au arătat că un receptor radio poate deveni un observator activ al mediului electromagnetic înconjurător, capabil să identifice oportunități de acces și să protejeze utilizatorii primari cu sensibilitate ridicată chiar la rapoarte semnal-zgomot scăzute. Sistemele și algoritmi dezvoltati în această etapă au introdus conceptul de decizie adaptivă bazată pe starea mediului — un concept care va reveni, în forme tot mai elaborate, în toate etapele ulterioare ale cercetării.

Al doilea capitol a extins această logică adaptivă de la nivelul fizic al spectrului la nivelul de protocol și serviciu al arhitecturilor IoT și al aplicațiilor multimedia. Proiectarea gateway-urilor IoRT cu conectivitate satelitară a demonstrat că reconfigurabilitatea poate compensa limitările infrastructurii fizice, extinzând conectivitatea în zone fără acoperire terestră. Modelul QoE pentru sisteme mulsemmedia a marcat un moment important în evoluția cercetării: calitatea experienței utilizatorului a devenit o variabilă de optimizare explicită a sistemului, nu un rezultat pasiv al parametrilor tehnici. Această perspectivă centrată pe utilizator a deschis calea spre metodele implicite de evaluare QoE pentru platforme broadcasting, contribuție care anticipează metodologia de evaluare afectivă dezvoltată ulterior în arhitecturile din capitolul 4.

Al treilea capitol a extins perspectiva de la nivelul rezidențial la cel urban, demonstrând că paradigmele SIoT și Smart Cities nu reprezintă o simplă extindere cantitativă a IoT, ci o schimbare calitativă în modul în care sistemele de comunicații percep și modelează contextul social și urban. Modelul de interacțiune bazat pe obiecte virtuale și survey-ul comprehensiv privind arhitecturile 6G pentru Smart Cities au consolidat vizibilitatea internațională a activității de cercetare. Coordonarea proiectului Stargate-MIPS și extinderea activității spre domeniul satelitar au adăugat o dimensiune suplimentară acestei etape, demonstrând că reconfigurabilitatea poate fi aplicată cu succes și la nivel de infrastructură de rețea, nu doar la nivel de nod sau de protocol.

Al patrulea capitol a reprezentat convergența tuturor direcțiilor de cercetare anterioare într-un domeniu de frontieră unde comunicațiile wireless, procesarea în timp real, inteligența artificială și experiența senzorială a utilizatorului devin inseparabile. Arhitecturile XR cu streaming audio-video bidirecțional, sistemul de sincronizare multisenzorială olfactivă și arhitectura EmoLoop pentru interacțiunea afectivă în timp real dintre public și performeri — dezvoltate în cadrul proiectului european Horizon EU HEAT — demonstrează că principiul reconfigurabilității, aplicat la nivel de sistem, permite construirea unor medii în care planul fizic și cel virtual se influențează reciproc în timp real, mediat de stările emoționale și senzoriale ale utilizatorilor.

Contribuțiile prezentate în această teză acoperă un spațiu tematic extins: de la fizica propagării radio și teoria detecției, la protocoale de comunicație distribuite, la modele perceptuale ale calității experienței, și până la sisteme afective bazate pe biosemnale și deep learning. Această acoperire este rezultatul unei evoluții treptate și organice. Fiecare etapă a cercetării a furnizat concepte, instrumente și întrebări care au alimentat etapa următoare, construind progresiv un cadru în care comunicațiile wireless și calitatea experienței utilizatorului sunt tratate ca două componente ale aceleiași probleme de proiectare a sistemelor.

Direcțiile de cercetare viitoare identificate în cadrul acestei teze, integrarea rețelisticii AI-native 6G cu orchestrarea multisenzorială în timp real, dezvoltarea sistemelor de streaming adaptiv conștiente de QoE prin feedback fiziologic și standardizarea interfețelor deschise pentru dispozitivele IoT senzoriale în medii XR, reprezintă puncte de convergență între maturitatea tehnologică atinsă în domenii individuale și oportunitatea de a le integra în arhitecturi de sistem cu impact atât în cercetarea fundamentală, cât și în aplicații industriale și din domeniul artistic și cultural. Aceste direcții vor constitui baza temelor de doctorat propuse, într-un ecosistem de cercetare pe care autorul și-l propune să îl dezvolte în cadrul Departamentului de Electronică și Calculatoare al Universității Transilvania din Brașov, valorificând colaborările internaționale existente și atrăgând noi parteneri academici și industriali.

Teza de abilitare reprezintă nu un punct final, ci un punct de inflexiune: o sinteză a ceea ce a fost realizat și, totodată, o hartă a ceea ce urmează să fie construit.

C. Planul de Dezvoltare a Carierei

Premisele dezvoltării carierei universitare – realizări anterioare

Activitatea mea profesională s-a desfășurat în cadrul Departamentului de Electronică și Calculatoare al Universității Transilvania din Brașov, în cadrul Facultății de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, un mediu academic dinamic cu ale cărui valori mă identific în mare măsură. Pe parcursul acestei activități am fost implicat în proiecte diverse, acoperind atât latura didactică, cât și cea de cercetare științifică, precum și colaborări cu instituții și companii din domeniul tehnologiei informației și comunicațiilor. Din rolul de Prodecan cu Activitatea de Cercetare Științifică, Informatizarea și Relații Publice am avut ocazia să dezvolt în ultimii doi ani direcțiile de cercetare ale Facultății, să inițiez noi legături cu diferite entități de cercetare naționale și internaționale direct în facultate sau în cadrul centrelor de cercetare ale Institutul de Cercetare Dezvoltare (ICDT) al universității, în special Centrul de Sisteme electronice încorporate și Comunicații Avansate.

Voi continua să mă implic în activitățile didactice aferente programului de licență Tehnologii și Sisteme de Telecomunicații (TSTC), al cărui coordonator sunt. Un moment de referință în activitatea de coordonare l-a constituit pregătirea și întocmirea documentației de re-acreditare a programului de studii. Acest proces a implicat elaborarea dosarului complet conform cerințelor ARACIS, cu toate componentele sale: fișele disciplinelor actualizate, dovezile de competență ale corpului profesoral, situațiile privind baza materială și dotarea laboratoarelor, rapoartele de autoevaluare și documentele privind relația cu mediul socio-economic. Experiența acumulată în acest proces a condus la o mai bună structurare a fluxurilor documentare ale programului, astfel încât evaluările ulterioare să poată fi susținute cu un efort administrativ redus și cu o calitate a documentației îmbunătățită.

Obiectivul principal al prezentului plan de dezvoltare universitară îl reprezintă obținerea abilitării în vederea conducerii de doctorate, un demers care va contribui la consolidarea echipei de cercetare din care fac parte. Un obiectiv complementar îl constituie obținerea titlului didactic de profesor în cadrul Departamentului de Electronică și Calculatoare.

I. Elementele de succes în cariera mea profesională anterioară

I. 1. Studii

Studii doctorale:

2000 - 2006 – Universitatea Transilvania din Brașov - Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor – am obținut Diploma de doctor în domeniul Inginerie Electronică și Telecomunicații cu teza intitulată „Contribuții la prelucrarea și transmisia radio a datelor în mediul subteran” sub coordonarea D-lui Prof. Dr. Ing. Iuliu Szekely.

Studii aprofundate

2000 – 2001 – Universitatea Transilvania din Brașov – Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, ”Tehnici de Proiectare Automată în Electronică”

Studii de licență

1994 – 1999 – Universitatea Transilvania din Brașov, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, Electronică Aplicată – Diplomă de inginer.

I. 2. Sumar de activitate

Realizările profesionale anterioare au îmbinat cariera academică și colaborarea cu industria. Experiența dobândită în proiecte internaționale s-a reflectat în cadrul parcursului academic, atât la nivel didactic, cât și din punct de vedere al cercetării.

Din punct de vedere didactic printre cele mai importante realizări aș menționa activitatea de coordonator al programului de licență "Tehnologii și Sisteme de Telecomunicații" la Universitatea "Transilvania" din Brașov, Facultatea de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, începând cu anul 2021, unul dintre cele mai atractive programe de studii de la Universitatea Transilvania din Brașov. În ultimii 5 ani am contribuit activ la dezvoltarea bazei materiale pentru laboratoarele de telecomunicații și am efectuat schimbări în planurile de învățământ pentru a face mai atractiv programul de studii, mai ales în direcția SDR/SDN, IoT, inteligență artificială și Cybersecurity.

În direcția cybersecurity am contribuit activ la extinderea programului de master Cybersecurity pentru acordarea unei duble diplome la comun cu universitatea HES-SO din Elveția. La momentul actual putem spune ca Universitatea Transilvania are una dintre cele mai dezvoltate platforme de laborator de securitate cibernetică din țară, extinderea către internaționalizare a programului de master fiind un beneficiu evident pentru viitoarele generații de studenți, potențiali candidați de doctorat.

Rezultatele obținute pe parcursul activității de cercetare:

Publicații

- 1 carte în editură națională
- 3 capitole de cărți în edituri internaționale;
- 3 materiale didactice în edituri naționale;
- 102 de articole științifice publicate în reviste și conferințe internaționale indexate ISI sau BDI, dintre care:
 - 22 în reviste indexate ISI;
 - 36 în proceedings indexate ISI;
 - 15 articole indexate BDI;
- aproximativ 1300 de citări în articole dintre care peste 550 în articole indexate ISI (reviste și proceedings);

Responsabil partener / director într-un proiect național și un proiect internațional

- Director de proiect „DySPAN – Rețele de Acces Dinamic la Spectru”. Proiect de cercetare al Universității din Cagliari, în cadrul programului POR Sardegna FSE 2007–2013, L.R. 7/2007 „Promovarea cercetării științifice și a inovării tehnologice în Sardinia”, finanțat din fonduri europene 2010 - 2012
- Director de proiect de cercetare/dezvoltare ”STARGATE MIPS”, proiect finanțat de Agenția Spațială Româna prin intermediul programului ROSA/STAR C3, 2017 – 2018;
- Responsabil din partea Universității Transilvania și coordonator tehnic în proiectul EU Horizon HEAT- Hybrid Extended reAliTy , Grant agreement ID: 101135637

Membru în echipele de cercetare în 2 proiecte internaționale și 6 proiecte naționale

- membru supleant la nivel național în cadrul proiectului COST Action IC0902 “Cognitive Radio and Networking for Cooperative Coexistence of Heterogeneous Wireless Networks”, 2009 - 2013
- membru al echipei proiectului ”Sistem Bioinformatic Bazat Pe Inteligența Artificială Pentru Monitorizarea Sistemului Imunitar În Corelație Cu Procesele Metabolice Din Organismul Uman (Monimun)” (UEFISCDI -Contract:62-073/2008), 2008 – 2011
- membru al echipei proiectului ”Purificarea avansată a bioetanolului în vederea creșterii eficienței energetice a motoarelor cu ardere internă - BIOETASEP” (UEFISCDI), 2008-2011
- membru al echipei proiectului ”Tehnologie complexă curată pentru conversia deșeurilor vegetale regenerabile biodegradabile în bioetanol în condiții de eficiență - CLEANBIOENERG” (UEFISCDI - Contract:32-145/2008), 2008-2011
- membru al echipei proiectului ”Tehnologie și instalație inovativă pentru realizarea de membrane selective biocompatibile cu sângele uman destinate realizării unui dispozitiv oxigenator extracorporeal – MEMBIOX” (UEFISCDI Contract:72-193/2008), 2008-2011
- membru al echipei proiectului ”Cercetări privind promovarea unui sistem complex pentru evaluarea caracteristicilor fizico-mecanice ale solurilor în vederea creșterii siguranței și securității producției agricole – SCFM” (UEFISCDI Contract:52120/2008) 2008 - 2011
- membru al echipei proiectului ”Modernizarea tehnologiilor de prelucrare primară a cerealelor în scopul obținerii de produse agro-alimentare de calitate, corespunzătoare principiilor dezvoltării durabile și securității alimentare” (UEFISCDI Contract:51062/2007), 2007 – 2010

Alte proiecte depuse sau în evaluare

- ”Validated Ethical Responsibility in Intelligent Technology – VERITY” – propunere de proiect în cadrul apelului NATO SPS 2026/1

Membru în asociații științifice

- IEEE Broadcasting Society (BTS) – președinte al Chapter-ului BTS din România
- IEEE Aerospace and Electronic Systems Society (AESS) – membru fondator al panelului Glue Technologies for Space Systems
- IEEE Communication Society (ComSoc)

Recenzor reviste de specialitate

- International Journal of Digital Multimedia Broadcasting - Hindawi Publishing Corporation, Computer Networks, IEEE Vehicular Technology Magazine, International Journal of Communication Systems, Wireless Communications and Mobile Computing, International Journal of Communication Systems

Activitatea de cercetare și dezvoltare a debutat imediat după finalizarea studiilor aprofundate, prin înscrierea la doctorat și prin intermediul unei prime burse de cercetare (2001–2002) finanțate de DAAD (Deutsches Akademisches Austauschdienst), desfășurată la prestigioasa Universitate Tehnică RWTH Aachen, în cadrul Institutului de Minerit și Metalurgie. Activitatea a vizat proiectarea și implementarea unui „Sistem Informațional Mondial pentru Extracția Cuprului”, în cadrul unui proiect coordonat de Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG — Societatea Germană de Cercetare). O a doua bursă la aceeași universitate, în perioada 2004–2005, a avut ca obiect cercetarea și aplicarea unor soluții pentru implementarea rețelelor Wireless LAN în mine subterane, administrarea dispozitivelor Pocket PC și proiectarea unor senzori Bluetooth. Rezultatele acestei a doua burse au fost valorificate în mare parte și în teza de doctorat susținută în anul 2006.

Cercetările care fac obiectul primului capitol al tezei de abilitare au fost realizate în cadrul unor burse obținute la Universitatea din Cagliari: proiectul „ARDDIS — Acces Radio Dinamic și Distribuit” al consorțiului italian CNIT (Consortiul Național Interuniversitar pentru Telecomunicații), desfășurat în perioada 2008–2009, și o bursă regională a Regiunii Sardinia la aceeași universitate, în perioada 2010–2012, cu scopul dezvoltării și implementării unui sistem de acces dinamic și distribuit la resursa radio de tip cognitiv. Pe baza colaborărilor academice consolidate cu colegi de la Universitatea din Cagliari, activitatea științifică a continuat în domenii conexe: aplicații de tip TV White Spaces, broadcasting, DVB-T și DVB-T2, și ulterior IoT și SIoT. Implicarea în domeniul broadcasting a condus la cooptarea în cadrul societății IEEE Broadcast Technology Society și la alegerea ca președinte al filialei din România a acestei asociații profesionale. Ca urmare a rezultatelor științifice obținute în această perioadă postdoctorală, autorul a obținut gradul didactic de conferențiar universitar în 2013.

În anul 2017, în calitate de coordonator al proiectului de cercetare Stargate-MIPS, finanțat de Agenția Spațială Română ROSA, activitatea de cercetare s-a extins și în domeniul satelitar, prin realizarea unui gateway terestru pentru aplicații de tip Internet of Remote Things. Rezultatele proiectului au fost bine primite de comunitatea științifică și profesională, aprecierea concretizându-se prin cooptarea în societatea IEEE Aerospace and Electronic Systems Society (AESS) și ulterior prin includerea ca membru fondator al panelului Glue Technologies for Space Systems din cadrul aceleiași societăți.

Din anul 2019 activitatea științifică s-a diversificat către direcția dedicată aplicațiilor Smart Cities și, ulterior, către broadcasting cu extensie spre conceptul de media multisenzorială. O serie de publicații în reviste de specialitate cotate Q1 au validat și această direcție, care a fost ulterior extinsă spre domeniul realității virtuale și augmentate. În acest context, autorul a făcut parte din echipa care a propus trei proiecte de cercetare în cadrul programului Horizon, dintre care unul, HEAT, a fost acceptat pentru finanțare în anul 2024, autorul ocupând în prezent rolul de coordonator tehnic al acestuia. Marea majoritate a publicațiilor din ultimii doi ani (capitolul 4 al tezei), se înscriu în activitățile proiectului HEAT, care va continua până la sfârșitul anului 2027.

I.3. Dezvoltarea carierei viitoare

Traectoria profesională pe care mi-o propun este ancorată într-un set de valori fundamentale: feedback constructiv, transparență, deschidere spre inovație, comunicare eficientă, lucru în echipă și parteneriate active cu mediul socio-economic, concretizate prin atragerea continuă de contracte în beneficiul universității. Mă bazez pe susținerea acestor valori de către colectivul Departamentului de Electronică și Calculatoare și îmi propun să le promovez în rândul tuturor colaboratorilor.

În situația acceptării tezei de abilitare, voi urmări identificarea și atragerea atât a studenților, cât și a altor persoane motivate și capabile să își aprofundeze cunoștințele științifice prin studii doctorale.

Îmi doresc să îmi construiesc cariera academică într-un colectiv cu un înalt nivel profesional, care să contribuie la creșterea calitativă a programelor de studii ale facultății și la consolidarea rezultatelor de cercetare, cu impact direct asupra reputației, succesului și vizibilității Facultății de Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor din cadrul Universității Transilvania din Brașov. Instrumentele prin care voi pune în practică acest plan sunt menținerea și ridicarea standardelor de excelență academică, precum și colaborarea directă cu colegii și cu studenții. Funcția de Prodecan cu Activitatea de Cercetare îmi va permite să acționez în mod direct și sistematic asupra acestor obiective, oferindu-mi pârgurile instituționale necesare pentru a sprijini depunerea și câștigarea de proiecte de cercetare competitive, pentru a facilita colaborările interdisciplinare între departamente și pentru a consolida parteneriatele cu mediul academic și industrial național și internațional.

Îmi propun de asemenea consolidarea și creșterea valorică a programului de licență Tehnologii și Sisteme de Telecomunicații, pe care îl coordonez.. Dincolo de componenta strict didactică — actualizarea planurilor de învățământ, corelarea disciplinelor cu cerințele pieței muncii și supervizarea activităților de predare — coordonarea programului implică o activitate susținută de management al calității educaționale, documentare instituțională și construire de relații cu mediul profesional extern.

Un rezultat direct al obținerii abilitării va fi posibilitatea de a coordona doctoranzi, un pas necesar pentru a consolida colaborarea cu absolvenți de valoare sau cu specialiști din industrie, unii dintre ei deja implicați în activități ale universității, care și-au exprimat de mai mulți ani dorința de a se angaja într-un program doctoral. Până în prezent, din cauza lipsei abilitării, am colaborat pe teme interdisciplinare cu colegi abilitați, față de care îmi exprim gratitudinea pentru parteneriatul deschis și eficient pe care îl avem. În această calitate, fac parte în prezent din comisiile de îndrumare ale unor doctoranzi cu teme apropiate domeniilor tratate în teza de abilitare:

- Drd. Tuyishime Emmanuel, coordonator Prof. Dr. Petru Cotfas, tema: Addressing Cybersecurity Challenges in Remote Control Engineering Applications
- Drd. Florin Radu, coordonator Prof. Dr. Petru Cotfas, tema: Instrumentația virtuală și controlul la distanță – aplicații în educație, cercetare și industrie
- Drd. Nicușor Amarie, coordonator Prof. Dr. Titus Bălan, tema: Modelarea și evaluarea interacțiunii bidirecționale în aplicații VR și XR
- Drd. Daniel Calaver, coordonator Prof. Dr. Titus Bălan, tema: Metode hardware-software de achiziție și prelucrare semnale audio-video pentru aplicații CVI în timp real

Aceste colaborări prin teme de doctorat interdisciplinare ce îmbină telecomunicațiile cu alte domenii au început să aibă primele rezultate de cercetare, publicații la conferințe și jurnale indexate ISI, cu toți doctoranzii din listă existând deja publicații comune în ultimii trei ani.

Activitățile de cercetare viitoare se vor baza pe experiența acumulată până în prezent ce se regăsește în cele patru capitole ale prezentei teze: domeniul comunicațiilor, al sistemelor broadband și broadcasting, sisteme de realitate virtuală și augmentată. Experiențele acumulate vor fi în permanență actualizate și vor include noile tendințe impuse de tehnologie, piață și industrie.

Comunicațiile wireless și media imersivă reprezintă domenii orizontale, componente constitutive ale unui spectru larg de sisteme electronice și informatice moderne, de la infrastructurile de telecomunicații și platformele IoT, până la sistemele urbane inteligente și mediile de realitate extinsă. Fiind domenii cu aplicabilitate transversală, acestea se regăsesc cu succes în sectoare verticale diverse, dintre care pot enumera: entertainment și artele spectacolului, sănătate și telemedicină, educație și formare profesională la distanță, transport inteligent și mobilitate urbană, industrie și automatizare, precum și patrimoniu cultural și turism.

Convergența dintre managementul dinamic al spectrului, conectivitatea IoT, inteligența urbană și experiența imersivă multisenzorială a devenit parte integrantă din strategiile naționale și europene de digitalizare, regăsindu-se în mod explicit în programele-cadru de cercetare și inovare ale Uniunii Europene, în politicile de implementare 5G/6G și în viziunile strategice privind realitatea virtuală și inteligența artificială.

Astfel, direcțiile de cercetare, care vor reprezenta baza temelor de doctorat propuse, vor aborda domenii verticale ce corespund/ținesc viitoare apeluri de finanțare și valorificare a rezultatelor, precum și cerințele unor posibili parteneri industriali sau academici.

Exemple de posibile direcții de cercetare doctorală:

- Detecție adaptivă a spectrului și acces dinamic în rețele 6G heterogene — Extinderea tehnicilor CR/SDR spre arhitecturi 6G cu AI-native networking, integrând algoritmi de machine learning pentru detecția spectrului în timp real în scenarii multi-bandă (sub-6 GHz, mmWave, THz) și medii cu interferențe complexe (vehiculare, satelitare, medii IoT dense).
- Arhitecturi IoT reziliente pentru infrastructuri critice și orașe inteligente — Proiectarea de sisteme IoT/SlIoT cu securitate prin proiectare pentru aplicații Smart City (transport, energie, sănătate publică), cu accent pe protocoale lightweight, edge computing și mecanisme de autentificare distribuite conforme cu cadrul european de date și reglementările GDPR.
- Rețele Non-Terestre (NTN) și conectivitate LEO pentru extinderea serviciilor 5G/6G — Cercetarea arhitecturilor hibride terestre-satelitare pentru furnizarea de servicii broadband în zone izolate și scenarii de urgență, cu evaluarea compromisurilor latență-capacitate-cost în contextul constelațiilor LEO de generație nouă (Starlink, OneWeb, IRIS²).
- Sisteme de evaluare și optimizare a QoE pentru media imersivă distribuită — Dezvoltarea de modele predictive de QoE pentru experiențe XR multisenzoriale, integrând semnale fiziologice implicite (eye gaze, EDA, HRV) cu metrice tehnice de

- rețea, în vederea controlului adaptiv în timp real al fluxurilor mulsemmedia pe infrastructuri 5G/6G.
- Arhitecturi Hybrid XR pentru spectacol live și experiențe culturale distribuite — Proiectarea și validarea de sisteme închise de interacțiune fizic-virtuală pentru concerte, teatru și instalații artistice imersive, cu accent pe sincronizarea multisenzorială sub 30 ms, protocoale QUIC/MoQ pentru streaming volumetric și standarde MIV/V-PCC pentru reprezentare 3D în timp real.
 - Sisteme afective și neuro-adaptive pentru interacțiunea om-calculator în medii XR — Cercetarea pipeline-urilor de recunoaștere emoțională multimodală (EEG, expresie facială, IMU) integrate în arhitecturi de tip EmoLoop, cu aplicații în dramaturgie participativă, reabilitare neurologică prin XR și personalizarea adaptivă a conținutului imersiv în funcție de starea afectivă a utilizatorului.

Temele enumerate anterior reprezintă doar câteva exemple ilustrative; esențial este că orientarea acestora vizează în mod deliberat proiecte cu potențial de finanțare și parteneriat, mergând până la posibile valențe comerciale, pe modelul de incubare și spin-off promovat de numeroase universități de prestigiu.

Obiectivele de cercetare în domeniul telecomunicațiilor și al realității virtuale hibride vizează:

- sporirea valorii și a competențelor colectivului de cercetare al departamentului;
- atragerea de fonduri prin participarea la proiecte naționale, internaționale și cu terți, prin inițierea sau susținerea de propuneri comune cu colaboratori din țară și din străinătate;
- formarea viitoarelor cadre didactice cu expertiză ridicată pentru programul de studii TSTC; creșterea impactului și a vizibilității autorului, a echipei, a facultății și a universității prin valorificarea rezultatelor cercetărilor, publicarea de articole în reviste de specialitate recunoscute (reviste cu factor de impact ridicat, cotate Q1 și Q2, cel puțin un articol pe an), participarea la conferințe internaționale de prestigiu indexate ISI sau în baze de date relevante (cel puțin două articole pe an) și implicarea în organizarea de evenimente științifice locale;
- extinderea bazei materiale existente în laboratorul de cercetare prin achiziția de echipamente de ultimă generație sau prin dezvoltarea de componente de laborator virtualizat, care pot constitui fundamentul unor viitoare colaborări; consolidarea parteneriatelor existente și dezvoltarea altora noi la nivel național și internațional prin inițierea de parteneriate Erasmus+, participarea la propuneri comune de proiecte, organizarea de evenimente științifice și strângerea relațiilor cu mediul economic și cu producătorii de tehnologie. În acest sens, îmi propun întărirea colaborărilor deja construite cu instituții din domeniul telecomunicațiilor: Centrul Național Cyberint, Serviciul de Telecomunicații Speciale, ANCOM, Academia Tehnică Militară, Agenția de Cercetare pentru Tehnică și Tehnologii Militare și Departamentul Regional de Studii pentru Managementul Resurselor de Apărare.

Activitatea de cercetare este direct corelată cu cea didactică. Obiectivele activității didactice vizate pentru dezvoltarea carierei autorului sunt:

- creșterea calității cursurilor și laboratoarelor din cadrul programului de licență TSTC, coordonat de autor, ale Departamentului de Electronică și Calculatoare și ale Facultății IESC, unde autorul ocupă în prezent funcția de prodecan cu cercetarea, în vederea pregătirii vizitelor de acreditare, inclusiv prin constituirea unui fond consistent de publicații și materiale didactice în domeniu;
- utilizarea metodelor moderne de educație bazate pe interactivitate, problematizare și aplicare practică; implementarea de simulări software, laboratoare virtuale și în cloud, precum și demonstrații practice bazate pe sisteme electronice portabile sau pe accesarea laboratoarelor la distanță, în vederea creșterii atractivității cursurilor teoretice; dezvoltarea și actualizarea continuă a materialelor didactice pe baza rezultatelor cercetărilor proprii și a studiilor bibliografice din domeniu, prezentate în format digital; modernizarea permanentă a lucrărilor de laborator;
- încurajarea și coordonarea studenților în efectuarea de mobilități Erasmus+ și UNITA, în vederea dezvoltării lor personale prin schimb științific și cultural cu universitățile partenere; implicarea studenților în activități de cercetare și în manifestări științifice, precum și în competiții de tip hackathon, ale căror rezultate pot constitui punctul de plecare pentru programe de mentorat și inovare și pot evolua ulterior spre entități de tip startup. Un obiectiv important în acest sens îl reprezintă cultivarea unei gândiri antreprenoriale în rândul studenților, care în cazul Universității Transilvania ar putea fi implementată cu ajutorul Incubatorului Tehnologic și de Afaceri (ITA-UNITBV) ce funcționează la Institutul de Cercetare Dezvoltare (ICDT) al universității;
- identificarea și atragerea studenților de la ciclul de licență către programele de master și ulterior către studiile doctorale, în vederea formării lor ca specialiști de înalt nivel în domeniu;
- organizarea de echipe de lucru mixte, care să includă studenți din ani de studii diferiți, asigurând astfel continuitatea proiectelor, precum și implicarea unor elevi de liceu în aceste echipe, prin dezvoltarea colaborării cu mediul preuniversitar în scopul atragerii tinerilor către domeniile ingineresti;
- o mai bună mediatizare a rezultatelor și realizărilor studenților și ale cadrelor didactice.
- Adicional, cu sprijinul conducerii, sunt realizabile următoarele obiective:
- constituirea unui centru puternic de certificare pentru academii relevante în cadrul Facultății IESC, prin revitalizarea Academiei Cisco, a Academiei Palo Alto și Fortinet și a Academiei Microsoft, cu multiple beneficii pentru studenți în domenii precum programarea, inteligența artificială și soluțiile cloud;
- implicarea reprezentanților din industrie și a beneficiarilor în definirea unor teme de proiect și de practică relevante, pe care studenții să le soluționeze în echipă, metodă pe care am regăsit-o în multe din centrele de cercetare vizitate pe parcursul ultimilor 10 ani.