

Raport științific și tehnic privind implementarea proiectului

Sistem de access dinamic la spectru bazat pe baze de date de geolocație

(GeoSpectrum)

Contract PN-IV-P7-7.1-PED-2024-0741 nr. 103PED din 13/05/2025

Proiectarea și specificarea arhitecturii sistemului și construirea și optimizarea hărților de acoperire

Sinteză – etapă de execuție UNICĂ nr. 1 / 2025

Perioada mai – decembrie 2025

Obiectivele care au fost urmărite pentru etapa pe 2025 a proiectului sunt legate de proiectarea și specificarea arhitecturii sistemului GeoSpectrum, precum și de construirea și optimizarea hărților de acoperire pentru sistemele DVB-T2 și 2G/3G/4G/5G pentru zonele urbane, suburbane și rurale. Activitățile prevăzute în planul de realizare al proiectului corespunzător primei etape de execuție (anul 2025), au cuprins:

- specificarea cerințelor de sistem;
- proiectarea structurii bazei de date;
- definirea cazurilor de utilizare și a scenariilor;
- proiectarea arhitecturii sistemului GeoSpectrum;
- construirea și optimizarea hărților de acoperire DVB-T2 pentru zonele urbane, suburbane și rurale;
- construirea și optimizarea hărților de acoperire 2G/3G/4G/5G pentru zonele urbane, suburbane și rurale.

Introducere

Proiectul de cercetare GeoSpectrum are în vedere dezvoltarea unui sistem care să permită accesul dinamic la spectru prin îmbinarea bazelor de date de geolocație (Geolocation Databases - GLDB) cu detecția spectrală în timp real, prin utilizarea unor metode hibride de detecție spectrală. Sistemul permite obținerea unor informații precise legate de disponibilitatea diferitelor benzi de frecvență în timp și spațiu, pe baza modelării acoperirii radio pentru diferite sisteme primare (licențiate), care pot fi combinate cu măsurători realizate local de către dispozitive capabile de o astfel de procedură.

Soluții de acces dinamic la spectru asistat de baze de date de geolocație spectrală au fost deja propuse, sub diferite denumiri: Generalized Licensed Spectrum Database (GLSD), propus în Uniunea Europeană (EU), Spectrum Access System (SAS), utilizat în Statele Unite ale Americii (USA), folosit pentru a administra accesul în banda Citizens Broadband Radio Service (CBRS) (3550-3700 MHz), Licensed Shared Access (LSA) sau Automatic Frequency Controller (AFC), sistem utilizat în Marea Britanie și Canada pentru a gestiona dispozitivele Wi-Fi de putere standard în banda de 6 GHz prin coordonarea accesului printr-o bază de date centrală. Aceste soluții specifică regulile de protecție ale utilizatorilor primari (licențiați), corelând date de reglementare cu informație radio (GIS/DEM/clutter, modele de propagare), astfel încât cererile de acces să fie automatizate, compatibilitatea electromagnetică (EMC) verificată, iar deciziile emise aproape în timp real. Literatura recentă arată că, odată cu integrarea unor seturi de date mai bogate și a modelării avansate, densitatea de utilizare poate crește semnificativ fără a compromite protecția, cu câștiguri raportate de până la 60% în scenarii studiate [1][3][11].

Diferite proiecte pilot, derulate în mai multe zone ale globului, au confirmat fezabilitatea utilizării GLDB. Hărți de acoperire obținute prin intermediul a diferite modele de propagare, însoțite de liste de canale și puteri corespunzătoare admise, sunt integrate în aceste GLDB, care oferă interfețe pentru dispozitivele secundare (White Space Devices - WSD). Analize la scară zonală indică sub-utilizarea benzilor de frecvență libere (*white spaces*) (de ex. 52/58 canale libere sau disponibilități 87,9–98,23%), sugerând potențial ridicat pentru acces oportunist controlat de GLDB [4][5][6]. Mai mult, interfețe GLDB augmentate cu Machine Learning / Reinforcement Learning (ML/RL) pot anticipa disponibilitatea canalelor, atingând o acuratețe în gama 84–94% pe locații reale, ceea ce reprezintă un complement util la regulile deterministe și la propagarea clasică [2]. În scenarii mobile (inclusiv vehiculare), conectivitatea asistată de GLDB ajută la optimizarea plasării punctelor de interogare și la echilibrarea cost-latență-precizie, comparativ cu detecția spectrală realizată exclusiv local [7].

Limitările prezentate de detecția spectrală locală sunt legate de vulnerabilitatea la fading/shadowing, iar cele legate de GLDB izolate se referă la inerția cu care eventualele schimbări în configurația sistemelor primare sunt sesizate. De aceea, fuziunea între bazele de date de geolocație și detecția spectrală locală poate oferi hărți de oportunitate mai fidele spațio-temporal și poate reduce comutările inutile. Integrarea poate fi formulată ca un proces decizional Markov parțial observabil (POMDP), ajustând dinamic ponderea informației provenite din BD și din măsurători și completând lipsurile prin predicție spațială. Rezultatele astfel obținute indică un echilibru mai bun al sistemului și decizii mai robuste [8]. În rețele celulare, detecția asistată de Geo-DB (de exemplu prin Wireless Fingerprint Databases și clasificatori ML) crește probabilitatea de detecție și reduce consumul energetic, iar cooperarea între terminale aduce beneficii semnificative [9]. Complementar, alocarea proactivă bazată pe istoric reduce întreruperile cauzate de comutarea benzilor și restrânge zonele de protecție excesiv conservatoare [10].

În aceeași direcție, modele cu autorizare hibridă pe trei trepte (licențe primare (PL) / licențe secundare (SL) / licențe terțiare (TL)) combină garanții de calitate a serviciilor (QoS) pentru clasele prioritare cu acces oportunist ghidat de GLDB, captând micro-opportunități spațio-temporale pe care schemele rigide le pierd [12].

În concluzie, cercetările și proiectele pilot efectuate până în prezent și descrise în literatură dovedesc eficiența unor astfel de soluții de acces dinamic la spectru, având ca nucleu central o bază de date de geolocație spectrală, combinată cu elemente de detecție spectrală hibridă și componente predictive pentru stabilitate și eficiență.

1. Specificarea cerințelor de sistem

Sistemul **GeoSpectrum** are ca obiectiv furnizarea unui mecanism de acces dinamic la spectrul radio bazat pe **baze de date de geolocație spectrală (GLDB)**, integrând:

- **Hărți de acoperire** pentru sisteme DVB-T2 și 2G/3G/4G/5G în trei zone pilot: una urbană, una suburbană și una rurală (estimare și optimizare prin calibrare);
- O **bază de date de geolocație spectrală** cu disponibilitatea / ocuparea spectrului pentru diferite benzi de frecvență, pentru toate cele trei zone pilot menționate anterior;
- **Interfețe** pentru interogare după coordonate, specificându-se eventual capacitățile dispozitivului care interoghează baza de date, precum și benzile de frecvență de interes;
- Integrarea ulterioară cu **metode hibride de detecție spectrală** (detecție spectrală locală în timp real, combinată cu informațiile provenite din GLBD) și **mecanisme de partajare a spectrului**.

1.1. Cerințe funcționale

Sistemul GeoSpectrum trebuie să îndeplinească următoarele cerințe funcționale:

- Să determine benzile de frecvență disponibile pentru orice dispozitiv, bazat pe informațiile sale de geolocație (latitudine, longitudine);
- Să determine, corespunzător cu locația respectivului dispozitiv, puterea maximă cu care acel dispozitiv poate transmite;
- Să prevină autorizarea unui dispozitiv de a emite în zone restricționate (baze militare, zone protejate, zone de protecție transfrontaliere);
- Să permită, atunci când este necesar, actualizarea informațiilor legate de hărțile de acoperire corespunzătoare diferitelor sisteme licențiate (primare) (emițătoare DVB-T2, rețele de comunicații mobile 2G/4G/5G, etc);

Dispozitivele care doresc să utilizeze spectrul de frecvență în mod dinamic trebuie să se autentifice folosind ID-uri certificate de autoritățile de reglementare, număr serial, clasă operațională. Sistemul trebuie să păstreze într-un jurnal cererile de autentificare ale dispozitivelor care au interacționat cu acesta.

1.2. Cerințe de performanță

Pentru a putea răspunde solicitărilor primite într-un timp cât mai scurt, cerințele de latență sunt esențiale. Din acest punct de vedere, ținta de performanță pe care o avem în vedere pentru sistemul GeoSpectrum este ca percentila 95 din timpii de răspuns să fie sub 200 de milisecunde pentru interogări punctuale pe zone mai mici de un kilometru pătrat.

Pe lângă cerința percentilă 95 sub 200 de milisecunde menționată anterior, sistemul trebuie să susțină un debit de cel puțin 100 de cereri pe secundă în mediul de laborator, atât în condiții de cache inițializat (cold start), cât și optimizat (warm cache). Pentru percentila 95, ținta de latență poate fi relaxată la maximum 300 de milisecunde pentru interogări pe zone mai mari (de la 1 până la 5 kilometri pătrați).

1.3. Cerințe operaționale

În vederea unei funcționări optime, sistemul GeoSpectrum va suporta o monitorizare în timp real a încărcării sistemului și va genera în mod automat alerte legate de erorile legate de server, de degradarea latenței sistemului și de cazurile în care se sesizează o activitate suspectă a unui anumit dispozitiv.

De asemenea, sistemul trebuie să permită actualizări software fără a se întrerupe funcționalitatea și proceduri automate de backup și recuperare.

2. Proiectarea structurii bazei de date

Baza de date GeoSpectrum gestionează straturi de acoperire (raster), măsurători (vector), metadata și versiuni pentru a permite interogare geospațială rapidă, reproductibilitate și interoperabilitate. Stack-ul țintă este PostgreSQL 15 + PostGIS (vector & raster + indexare spațială), cu fișiere GeoTIFF/COG pentru rastere și GeoJSON/CSV pentru vectori. Stocarea geospațială se face în EPSG:4326 (calcul) și, când e nevoie de *tiles* pentru web, în EPSG:3857 (afișare). Rasterele sunt păstrate ca COG (Cloud Optimized GeoTIFF) cu o privire de ansamblu pentru citire eficientă, iar baza de date reține doar referințe (URI) și metadata complete.

2.1. Arhitectura Generală

Baza de date GeoSpectrum va fi bazată pe o versiune PostgreSQL 15 sau mai recentă, împreună cu extensia PostGIS activată pentru gestionarea datelor geospațiale. Această opțiune tehnologică oferă capacități sofisticate de procesare a datelor raster și vector în același mediu, precum și suport nativ pentru indexarea spațială eficientă prin mecanisme cum ar fi *Generalized Search Tree* (GiST) sau *Block Range Index* (BRIN). Straturile de acoperire în format raster vor fi stocate într-un depozit de tip obiect sau într-un sistem de fișiere ca fișiere GeoTIFF optimizate pentru cloud (COG). Cu toate acestea, baza de date va conține doar referințe către aceste fișiere, precum și metadatale complete și statisticile precalculate.

Toate datele geospațiale vor fi gestionate în sistemul de coordonate EPSG:4326 (WGS84 cu coordonate geografice) pentru calculele de bază, cu posibilitatea transformării în EPSG:3857 (Web Mercator) pentru generarea de *tiles* destinate vizualizării web. Această abordare dublă asigură atât precizia calculelor geodezice, cât și compatibilitatea cu platformele moderne de cartografiere online.

2.2. Entități Principale și Relații

Modelul conceptual al bazei de date va fi format din mai multe entități principale, care vor cuprinde fiecare componentă a sistemului GeoSpectrum. Tabelul *areas* va defini cele trei zone pilot, fiecare având un identificator distinct, un nume, și un tip de mediu (urban, suburban sau rural). Tabelul scenariilor permite conectarea fiecărei arii la mai multe scenarii de validare. Descrierea scenariului, notele metodologice și geometria specifică a zonei de interes restrânsă sunt stocate în acest tabel.

Tabelul *coverage_layers*, entitatea centrală a sistemului, este responsabil pentru gestionarea straturilor de acoperire radio. Un câmp JSONB cu metadata extinse, tehnologia (DVB-T2, 2G, 3G, 4G și 5G), banda de frecvență, sistemul de coordonate utilizat, rezoluția spațială în metri, numele modelului de propagare aplicat, referința la versiunea semantică, URI-ul fișierului raster fizic și identificatorul unic vor fi incluse în fiecare înregistrare. Valoarea NoData utilizată pentru pixelii invalizi, statisticile complete (minimă, maximă, medie și deviație standard) și histograma distribuției valorilor de putere sunt toate incluse în aceste metadata.

Tabelul de măsurători stochează fiecare punct de măsură cu geometria exactă (tip POINT), timpul de achiziție, tehnologia și banda măsurată, valoarea RSSI în dBm și metadata suplimentare despre echipament și condițiile de măsurare. Câmpul *campaign_id* leagă fiecare măsurătoare de o campanie specifică, ceea ce permite agregarea și analiza pe loturi întregi de date.

Tabelul *model_params*, care conține versiuni distincte ale parametrilor modelului de propagare, conectează fiecare configurație cu aria pilot corespunzătoare, numele modelului utilizat, setul complet de parametri serializați în format JSON și identificatorul commit-ului Git. Reproducerea exactă a

oricărei versiuni anterioare și urmărirea completă a evoluției procesului de calibrare sunt posibile datorită acestei structuri.

Tabelul de versiuni, care promovează ideea de versiuni imutabile, gestionează versionarea globală a tuturor artefactelor. Fiecare versiune are un număr semantic (major.minor.patch), autorul modificării, data de lansare și sursa datelor originale.

Tabelele utilizatorului și rolurile pentru implementarea controlului de acces bazat pe roluri (RBAC), precum și tabelul *query_log*, care înregistrează toate interogările la API cu informații despre utilizatorul solicitant, parametrii cererii, timpul de execuție și statusul răspunsului, susțin securitatea și sunt aspecte utile pentru audit. Această arhitectură permite atât controlul minuțios al accesului, cât și analiza și identificarea cauzelor care limitează performanța sistemului.

2.3. Integrarea Blockchain pentru Transparență și Trasabilitate

Chiar dacă implementarea completă a componentei blockchain este programată pentru etapa următoare a proiectului, arhitectura bazei de date trebuie să includă hook-uri și metode de pregătire pentru integrare în viitor. Pentru tranzacțiile importante legate de partajarea spectrului, blockchain-ul va oferi imutabilitate și transparență, oferind un jurnal distribuit și verificabil al tuturor operațiunilor sensibile.

Este avută în vedere utilizarea platformei Hyperledger Fabric ca soluție blockchain open-source pentru faza actuală. Această opțiune se datorează mai multor avantaje tehnice importante, cum ar fi o arhitectura care permite participanților să aibă control total, spre deosebire de blockchain-urile publice; și suportul pentru chaincode, sau smart contracts, în mai multe limbaje de programare, cum ar fi Go și Node.JS, un mecanism de consens modular care poate fi adaptat cerințelor de performanță și consistență specifice. De asemenea, are capacitatea de a gestiona canale diferite pentru niveluri diferite de confidențialitate a datelor. De asemenea, throughput ridicat – mii de tranzacții pe secundă – și latențe reduse în comparație cu blockchain-urile bazate pe proof-of-work sunt avantaje ale Hyperledger Fabric pentru sistemele operaționale de management al spectrului.

Odată ce un strat de acoperire sau o versiune de parametri este ancorată în ledger, arhitectura pregătită pentru blockchain include extinderea tabelului versions cu un câmp suplimentar de tip VARCHAR blockchain_tx_id. Acest câmp va stoca identificatorul tranzacției blockchain. În mod similar, câmpul blockchain_audit_hash va fi inclus în tabelul query_log. Acest lucru permite verificarea ulterioară a integrității jurnalului de audit prin compararea hash-urilor stocate în blockchain. Pentru a înregistra deciziile de alocare dinamică a spectrului, va fi creat un tabel spectrum_allocations, care va include câmpuri pentru identificatorul utilizatorului secundar, intervalul temporal de alocare, banda și puterea maximă autorizată, statusul alocării și referința către smart contractul blockchain care guvernează tranzacția.

În conformitate cu modelul conceptual al integrării blockchain, fiecare operațiune importantă, cum ar fi publicarea unui nou strat de acoperire calibrat, actualizarea parametrilor unui model de propagare, acordarea unei autorizații de utilizare a spectrului pentru un dispozitiv secundar sau revocarea acesteia, va genera o tranzacție în Hyperledger Fabric. Nodurile participante (ANCOM ca regulator, operatorii de rețele primare ca părți interesate) sunt responsabile de validarea acestora. Hash-ul criptografic al datelor tranzacției va fi stocat atât în blockchain, cât și în baza de date PostgreSQL, ceea ce permite verificarea continuă a integrității și detectarea oricăror modificări neautorizate.

Logica de business pentru partajarea spectrului va fi implementată de smart contract-urile (chaincode) dezvoltate în Hyperledger Fabric. Acestea includ verificarea că o cerere de alocare respectă regulile de protecție ale utilizatorilor primari bazate pe hărțile de acoperire, confirmarea că dispozitivul solicitant este autorizat și că nu există conflicte cu alte alocări active în aceeași zonă geografică și generarea automată a certificatelor digitale de utilizare cu termeni și condiții. Interfața API a bazelor de

date GeoSpectrum va fi utilizată de aceste smart contracts pentru a obține informațiile de acoperire necesare pentru luarea unei decizii. Cu toate acestea, înregistrarea deciziei finale va rămâne imutabilă în blockchain.

În ceea ce privește implementarea practică a etapei 2025, se vor efectua următoarele pregătiri: instalarea unui cluster de dezvoltare Hyperledger Fabric cu cel puțin trei noduri peer, unul pentru fiecare organizație participantă în scenariul pilot; configurarea unui canal blockchain dedicat tranzacțiilor GeoSpectrum; crearea primului smart contract demonstrativ pentru înregistrarea versiunilor de straturi de acoperire; și implementarea unui serviciu API intermediar caracteristic clusterului de dezvoltare Hyperledger Fabric. Un sistem complet de partajare a spectrului cu guvernanta descentralizată poate fi construit pe baza acestei infrastructuri minime, care va permite validarea noțiunii de transparență distribuită.

Integrarea blockchain va avea multe avantaje. De exemplu, va face ca procesul tuturor deciziilor de alocare a spectrului să fie unul transparent, ceea ce înseamnă că orice parte interesată poate verifica dacă regulile de protecție au fost respectate. De asemenea, jurnalul de tranzacții va rămâne imuabil, ceea ce înseamnă că înregistrările de audit nu vor fi modificate din nou și descentralizarea încrederii va elimina necesitatea unei autorități centrale unice. Construirea unui ecosistem de partajare dinamică a spectrului care să fie acceptat atât de operatorii de rețele, cât și de utilizatorii finali necesită aceste caracteristici.

2.4. Metode de optimizare a performanței

Pentru a atinge obiectivele de performanță, este necesară o strategie de indexare. Tabelul de măsurători va include indexuri GiST pe coloana de geometrie pentru interogări spațiale rapide, indexuri B-tree pe combinațiile de timp, bandă și tehnologie pentru filtrări tehnologice și temporale, și eventual un index Block Range (BRIN) pentru partiționarea eficientă pe intervale de timp extinse. Tabelul coverage_layers va beneficia de indexuri tehnologice, bandă și version_id, iar mecanismele de indexare a tile-ilor native PostGIS vor fi utilizate pentru a facilita accesul rapid la valorile raster.

Partiționarea tabelului de măsurători pe intervale lunare sau trimestriale va simplifica arhivarea datelor vechi și va îmbunătăți semnificativ performanța interogărilor pe perioade specifice. Această metodă permite menținerea unui volum de lucru redus în partiția activă. În același timp, datele istorice rămân accesibile, ceea ce înseamnă că nu afectează performanța operațiunilor curente.

O abordare crucială pentru reducerea latențelor este cache-ul multi-nivel. Pentru agregări frecvente, se vor crea perspective materializate la nivel de bază de date. Aceste perspective pot include statistici lunare bazate pe tehnologie și arie. La nivel de aplicație, un cache distribuit poate stoca rezultatele interogărilor pentru puncte frecvent solicitate folosind o politică de invalidare bazată pe evenimentele de actualizare a straturilor.

3. Definirea cazurilor de utilizare și a scenariilor

În vederea ilustrării modului de funcționare a sistemului GeoSpectrum într-o varietate cât mai largă de scenarii, în cadrul proiectului au fost definite trei zone pilot reprezentative pentru trei grade diferite de urbanizare:

- zona situată în București, Campusul Leu al Facultății de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației, UNSTPB (zona pilot considerată reprezentativă pentru un scenariu urban);
- zona situată în jurul localității Dărăști-Vlașca (aproximativ 20 km distanță de București, zona pilot considerată reprezentativă pentru un scenariu suburban);
- zona situată în jurul localității Slănic, județul Prahova (zona pilot considerată reprezentativă pentru un scenariu rural).

Pentru fiecare dintre tipurile de zone menționate anterior, sunt enumerate în secțiunile următoare diferitele posibile cazuri de utilizare și scenarii.

3.1. Cazuri de utilizare și scenarii corespunzătoare zonelor urbane

Zonele urbane prezintă în general o congestie ridicată a spectrului. În acest context, principalele cazuri de utilizare pentru bazele de date de geolocație spectrală se concentrează pe partajare, coordonare și atenuarea interferențelor.

Cazurile de utilizare și scenariile care sunt avute în vedere pentru o astfel de zonă sunt următoarele:

- **partajare dinamică a spectrului:** celulele mici 5G solicită dinamic spectrul prin intermediul unei baze de date SAS. Astfel sunt asigurate benzi libere de frecvență în medii dense cu multe puncte de acces. O astfel de abordare poate fi utilă în cazuri precum stadioane, centre comerciale, clădiri de birouri, fabrici;
- **infrastructura orașelor inteligente:** dispozitive care necesită legături fiabile, evitând producerea de interferențe: sisteme de detecție a traficului, senzori de monitorizare a calității aerului, senzori de siguranță publică, semnale stradale conectate, senzori de control al parcării. O alocare a spectrului bazată pe baze de date de geolocație spectrală le ajută să evite interferențele de la sistemele locale de transmisie, LTE și 5G;
- **rețele private pentru instituții publice:** spitalele, universitățile și campusurile corporative pot utiliza benzi nelicențiate. Interogarea bazelor de date de geolocație spectrală poate asigura coordonarea cu rețelele vecine;
- **transferul conexiunilor pe rețelele Wi-Fi publice urbane:** nodurile Wi-Fi municipale pot primi dinamic resurse de spectru, pentru a reduce congestia în benzile licențiate;
- **alocare de spectru bazată pe evenimente:** pentru evenimente temporare cu densitate mare, cum ar fi concerte, evenimente sportive, festivaluri, mitinguri politice. Bazele de date de geolocație spectrală pot alocă canale temporare pentru organizatori și pot gestiona microfoane wireless, camere, senzori de securitate IoT;
- **centre de transport:** aeroporturi, stații de metrou și centre de tren: utilizează spectru controlat prin bază de date pentru comunicații interne și servicii pentru pasageri. Astfel se asigură o utilizare eficientă a spectrului în apropierea sistemelor radar sau de comunicații sensibile.

3.2. Cazuri de utilizare și scenarii corespunzătoare zonelor suburbane

Mediile suburbane combină, în general, caracteristici ale mediilor urbane și rurale: densitate moderată, spectru disponibil și infrastructură mixtă.

Cazurile de utilizare și scenariile care sunt avute în vedere pentru o astfel de zonă sunt următoarele:

- **tronsoanele finale ale conexiunilor de bandă largă (*Last-Mile Broadband*):** pentru situațiile în care punctele de acces la internet extind serviciile la comunitățile suburbane în expansiune, bazele de date de geolocație spectrală previn interferențele dintre mai mulți furnizori;
- **case inteligente și rețele inteligente:** se referă la locuințele echipate cu contoare inteligente, sisteme de securitate, huburi de automatizare a locuinței. Pentru astfel de situații, companiile de utilități pot rezerva canale dinamic, folosind informații disponibile în bazele de date de geolocație spectrală, pentru telemetria rețelei electrice, pentru sistemele de răspuns la cerere și pentru infrastructura de încărcare a vehiculelor electrice;

- **parcuri industriale și de afaceri:** fabrici sau depozite care utilizează rețele private LTE/5G, mașini automatizate, senzori IoT. Bazele de date de geolocație spectrală pot facilita alegerea unor benzi de frecvențe neocupate, pentru a evita și interferențele cu vecinii;
- **rețelele de siguranță publică și comunitare suburbane:** pentru situațiile în care municipalitățile locale utilizează, rețele implementate temporar, au nevoie de spectru pentru sisteme de poliție, pompieri și urgențe, pentru rețele de supraveghere sau monitorizare cu drone;
- **școli și campusuri:** în cazul școlilor sau colegiilor din zone suburbane, în care sunt implementate rețele wireless private folosind spectru partajat. Bazele de date de geolocație spectrală ajută la evitarea interferențelor cu radiodifuzorii sau cu furnizorii de servicii de internet locali;
- **mobilitate și transport suburban:** pentru dispozitive cum ar fi semafoare conectate, sisteme de urmărire a autobuzelor școlare, senzori rutieri. Bazele de date de geolocație spectrală pot asigura coordonarea resurselor de spectru între cartiere.

3.3. Cazuri de utilizare și scenarii corespunzătoare zonelor rurale

Caracteristicile zonelor rurale sunt în general o densitate scăzută a populației, opțiuni limitate în ceea ce privește conexiunile de bandă largă disponibile, dar de asemenea și spectru neutilizat (în special benzile UHF rezervate pentru difuzarea sistemelor de televiziune digitală). Prin utilizarea bazelor de date de geolocație spectrală, aceste benzi de frecvențe neutilizate pot fi reutilizate într-o manieră sigură.

Cazurile de utilizare și scenariile care sunt avute în vedere pentru o astfel de zonă sunt următoarele:

- **furnizarea de servicii de internet de bandă largă:** furnizorii de servicii de internet wireless (ISP) implementează legături radio la distanțe mari și pot utiliza benzile de frecvență disponibile (white spaces). Prin accesarea bazelor de date de geolocație, asigură evitarea canalelor TV utilizate de radiodifuzorii locali. Prin astfel de legături, poate fi de exemplu asigurată conectivitatea pentru ferme și sate îndepărtate, în special în zone montane sau forestiere;
- **agricultura de precizie:** rețele Internet of Things (IoT) agricole care utilizează spectrul de joasă frecvență (de exemplu, TVWS) pentru acoperire pe distanțe lungi. Prin astfel de legături, pot fi de exemplu monitorizați senzori de sol, pot fi urmărite animale, pot fi automatizate irigațiile sau pot fi utilizate vehicule agricole autonome. Alegerea frecvențelor utilizate prin consultarea bazelor de date de geolocație spectrală asigură că dispozitivele funcționează pe canale fără interferențe;
- **monitorizarea infrastructurii la distanță:** monitorizarea conductelor, telemetria parcurilor eoliene, stații de alimentare cu energie electrică în zone îndepărtate, monitorizarea sistemului de colectare și distribuție a apei. Bazele de date de geolocație spectrală pot atribui benzi de frecvență neutilizate pentru telemetrie pe rază lungă de acțiune și consum redus de energie;
- **rețele de comunicații de urgență:** stații de bază temporare implementate după dezastre naturale, care pot utiliza spectrul alocat dinamic prin baza de date pentru echipele de salvare, pentru acoperire temporară, precum și pentru centre de comunicații bazate pe drone;
- **rețele de educație rurală și comunitară:** școli sau centre comunitare în care se stabilesc rețele wireless locale. Prin interogarea bazelor de date de geolocație spectrală, se evită interferențele cu stațiile de emisie, maximizând în același timp acoperirea cu semnal radio a respectivului obiectiv.

4. Proiectarea arhitecturii sistemului GeoSpectrum

Arhitectura care este prevăzută pentru sistemul GeoSpectrum este prezentată în Figura 1 și este descrisă pe parcursul acestei secțiuni.

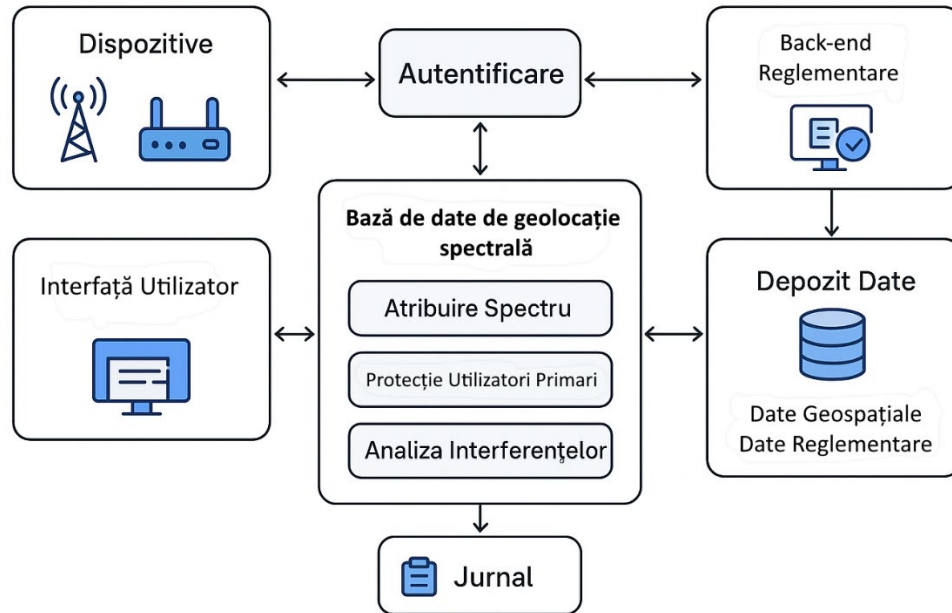


Figura 1. Arhitectura prevăzută pentru sistemul GeoSpectrum

Elementul central din cadrul sistemului GeoSpectrum este reprezentat de *baza de date de geolocație spectrală (GLDB)*, structurată conform detaliilor prezentate în Secțiunea 2 a actualului document. Această componentă procesează toate cererile provenite de la diferitele dispozitive care doresc să utilizeze spectrul într-un mod dinamic și furnizează informațiile despre disponibilitatea spectrului de frecvență. Funcțiile care sunt îndeplinite de GLDB sunt:

- gestionează înregistrările stațiilor licențiate, corespunzătoare diferitelor sisteme licențiate (primare) și diferitelor benzi de frecvență;
- primește interogări din partea dispozitivelor care doresc să utilizeze spectrul în mod dinamic;
- verifică regulile de acces la spectru impuse de autoritatea de reglementare;
- returnează informații legate de benzile libere și puterea de emisie maxim permisă;
- asigură evitarea interferențelor cu sistemele licențiate (primare);
- expune interfețe pentru a permite interogarea sa.

Modulul de autentificare are rolul de a valida identitatea dispozitivelor și a utilizatorilor. Prin intermediul acestui bloc, este asigurat controlul accesului, securitatea interfețelor utilizate, precum și gestionarea diferitelor certificate.

Back-end-ul de reglementare permite corelarea funcționării sistemului GeoSpectrum cu unele seturi de reguli de acces la resursele de spectru fixate de Autoritatea Națională pentru Administrare și Reglementare în Comunicații (ANCOM). Aceste reguli pot fi actualizate în funcție de necesități.

Dispozitivele care doresc să aibă posibilitatea de acces dinamic la spectru vor putea interoga, după ce au parcurs pasul de autentificare, baza de date de geolocație spectrală, pentru a obține informații

legate de benzile de frecvență disponibile. Aceste dispozitive trebuie să furnizeze ca date de intrare coordonatele geografice. În măsura în care respectivul dispozitiv posedă și capabilități de afișare a informațiilor, va fi avut în vedere o aplicație care să permită vizualizarea informațiilor furnizate de baza de date (de exemplu în cazul unui terminal mobil care rulează pe sistem de operare Android). Exemple de echipamente capabile de acces dinamic la spectru sunt:

- platforme radio definit prin software (familia Universal Software Radio Peripheral (USRP), Adalm-Pluto, Lime SDR, Blade RF, etc);
- dispozitive IoT și dispozitive Wi-Fi avansate;
- dispozitive între care se stabilesc legături de tip device-to-device (D2D);
- dispozitive LoRa / LoRaWAN (Gateway-uri cu configurări de lățime de bandă/factor de împrăștiere controlate, diferite variante de noduri).

Interfața de utilizator permite vizualizarea unor informații utile pentru situații cum ar fi monitorizarea resurselor, introducerea datelor și gestionarea politicilor sistemului.

Depozitul de date reprezintă elementul de stocare persistentă din cadrul sistemului GeoSpectrum și asigură informațiile necesare pentru baza de date de geolocație spectrală. Două categorii principale de date sunt incluse în acest bloc: Date geospațiale (hărți de acoperire, zone de excludere) și Date de reglementare (licențe, limite de putere, benzi protejate). Detalii legate de hărțile de acoperire pentru sistemele DVB-T2 și 2G/4G/5G care au fost construite în cadrul etapei curente a proiectului GeoSpectrum vor fi oferite în secțiunile 5 și 6 ale acestui document.

Modulul jurnal are rolul de a stoca toate acțiunile și evenimentele, cum ar fi interogări și solicitări de acces la spectru, atribuirii, modificări ale regulilor, autentificări.

5. Construirea și optimizarea hărților de acoperire DVB-T2 pentru zonele urbane, suburbane și rurale

În vederea estimării acoperirii radio a sistemului DVB-T2 pentru cele trei zone pilot alese au fost create rețelele de emițătoare, folosind informații oferite de Societatea Națională de Radiocomunicații (RADIOCOM). Pentru zonele București și Dărăști-Vlașca, cuprinse în aceeași zonă de alocare a frecvențelor, emițătoarele operează în canalul 30 UHF (frecvență purtătoare 546 MHz), iar pentru zona Slănic-Prahova, emițătoarele operează în canalul 22 UHF (frecvență purtătoare 482 MHz). În figura 2 sunt prezentate rețelele de emițătoare DVB-T2 corespunzătoare celor trei zone, construite în programul HTZ Communications [13], utilizat pentru estimarea acoperirii radio.

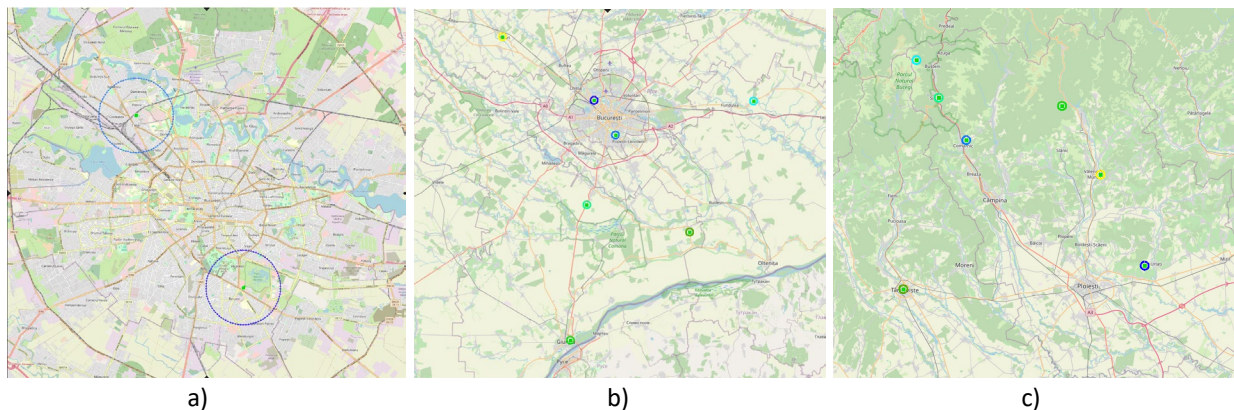


Figura 2. Rețelele de emițătoare DVB-T2 din zonele a) București; b) Dărăști-Vlașca; c) Slănic-Prahova

Pentru estimarea acoperirii radio în cele trei zone au fost utilizate diferite modele de propagare, pentru fiecare dintre ele fiind obținute hărți de acoperire cu semnal DVB-T2 în zonele respective. În vederea validării estimărilor obținute, au fost realizate trei campanii de măsurători ale semnalului DVB-T2 recepționat, pentru cele trei zone pilot. Configurația folosită pentru măsurători a cuprins un receptor GPS pentru identificarea exactă a locației, și o platformă software defined radio (SDR) USRP B210 [14], la care a fost conectată o antenă de bandă largă MP-Antenna 08-ANT-0860 [15], montată cu ajutorul unui suport magnetic pe acoperișul autoturismului cu care au fost realizate măsurătorile. Pentru calibrarea configurației de măsură folosite a fost utilizat un analizor de spectru. În figura 3 sunt prezentate traseele utilizate pentru colectarea măsurătorilor în cele trei zone pilot, precum și antena utilizată.

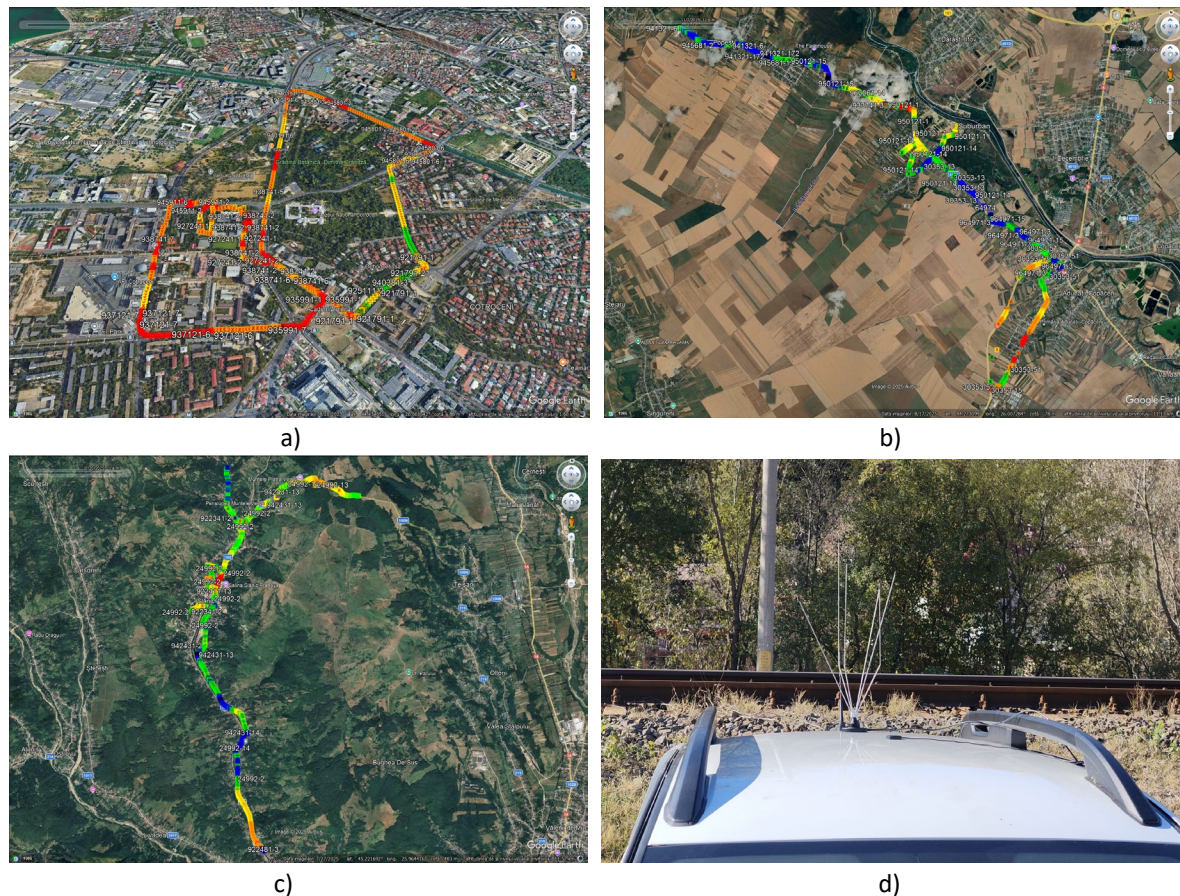


Figura 3. Traseele urmate pentru realizarea măsurătorilor în zonele a) București; b) Dărmăști-Vlașca; c) Slănic-Prahova. Antena utilizată este prezentată în subfigura d).

Rezultatele obținute prin comparația între estimările realizate folosind diferitele modele de propagare și măsurătorile realizate folosind configurația descrisă anterior sunt sintetizate în tabelele 1-3, pentru toate cele trei zone pilot. Patru metrici diferite de performanță au fost utilizate, ordonarea fiind făcută pe baza primei metrici: procent din traseul utilizat pentru măsurători pentru care diferența între estimare și măsurători este de sub 6 dB, deviație standard, eroare medie și factor de corelație.

Tabelul 1. Performanțele obținute pentru zona urbană (București, zona Campus Leu)

Model de propagare	%<6dB	Deviație standard [dB]	Eroare medie [dB]	Factor de corelație
Okumura-Hata	90 %	3.31	0.67	81 %
ITU-R 528-3	80 %	13.21	0.30	17 %
ITU-R 1812-6	76.67 %	5.39	2.73	59 %
ITU-R 525/526-15	76.67 %	5.58	2.40	59 %
ITU-R 452-17	76.67 %	5.42	2.50	60 %
ITU-R 2001-4	76.67 %	5.64	2.57	59 %
ITM NTIA Longley Rice	70 %	9.52	4.97	45 %
ITU-R 1225	66.67 %	4.34	3.97	41 %
ITU-R 1546-6	33.33 %	4.74	7.77	12 %
Okumura-Hata-Davidson	20 %	12.63	21.87	18 %

Tabelul 2. Performanțele obținute pentru zona suburbană (Dărăști-Vlașca)

Model de propagare	%<6dB	Deviație standard [dB]	Eroare medie [dB]	Factor de corelație
ITU-R 1546-6	86 %	4.86	0.60	73 %
Okumura-Hata	84 %	5.78	1.36	80 %
ITU-R 1812-7	84 %	5.40	2.38	81 %
ITU-R 1225	80 %	6.86	1.74	70 %
Durkin	62 %	6.57	5.88	71 %
Hata Seamcat	52 %	7.39	7.58	54 %
Hata COST 231 [17]	50 %	7.40	8.10	53 %
ITU-R 525/526-15	40 %	6.17	8.86	58 %
Okumura-Hata-Davidson	36 %	7.20	9.50	60 %
ITU-R 2001	32 %	5.96	9.14	59 %

Tabelul 3. Performanțele obținute pentru zona rurală (Slănic Prahova)

Model de propagare	%<6dB	Deviație standard [dB]	Eroare medie [dB]	Factor de corelație
ITM NTIA Longley Rice	100	0.95	0.10	98 %
ITU-R 525/526-15	100	1.89	0.17	93 %
ITU-R 1812-7	100	1.93	0.19	93 %
ITU-R 452-17	100	1.92	0.14	93 %
ITU-R 2001-4	100	1.88	0.19	94 %
ITU-R 525/526 11	100	1.22	0.31	97 %
Okumura-Hata	97.62	5.89	-1.38	68 %
ITU-R 1225	92.86	3.53	-1.12	77 %
ITU-R 1546-6	92.86	3.86	-1.86	78 %
Durkin	71.73	15.75	-10.33	39 %

În figura 4 sunt reprezentate hărțile de acoperire și graficele de corelație pentru modele de propagare cu performanțele cele mai bune, pentru fiecare dintre cele trei zone.

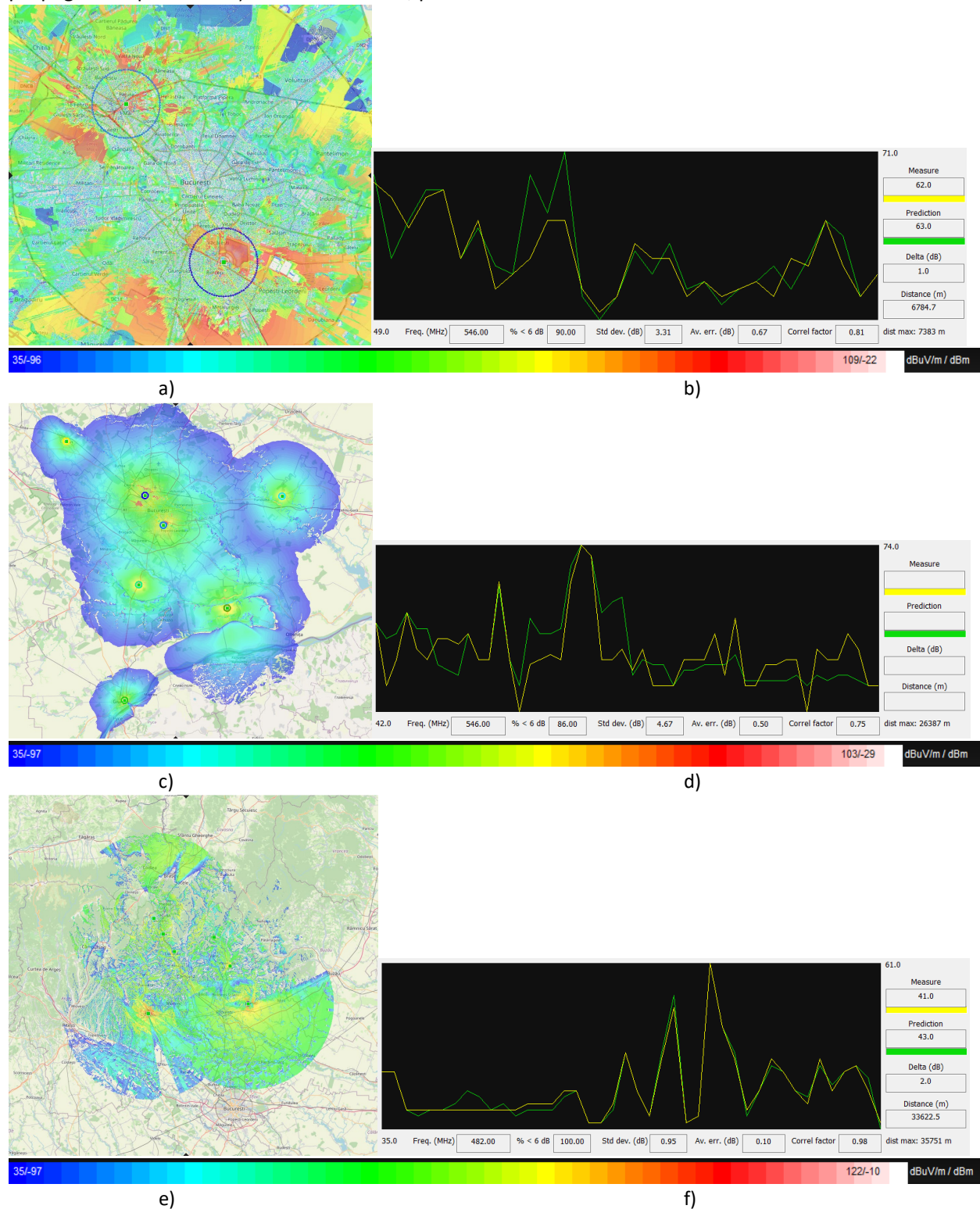


Figura 4. Hărțile de acoperire și corelațiile între estimări și măsurători pentru a) București, model Okumura-Hata; b) corelație București; c) Dărmăști-Vlașca, model ITU-R 1546-6; d) corelație Dărmăști-Vlașca; e) Slănic-Prahova, model ITM NTIA Longley Rice; f) corelație Slănic-Prahova.

Pentru zonele București și Dărmăști-Vlașca, unde pentru corelațiile obținute între estimări și măsurători s-au obținut valori mai mici decât în zona rurală, au fost realizate optimizări pentru modelele pentru care rezultatele obținute în prima etapă au fost cele mai bune (modelul Okumura-Hata pentru zona urbană și ITU-R 1546-6 pentru zona suburbană). În urma acestor optimizări, diferențele înregistrate pentru cele două situații au fost minimizate, obținându-se, pentru zona urbană și modelul Okumura-Hata, un %<6dB de 93.3%, o eroare medie de -0.07 dB și un factor de corelație de 85%, respectiv o eroare medie de numai 0.1 dB pentru modelul ITU-R 1546-6 în zona suburbană.

6. Construirea și optimizarea hărților de acoperire 2G/3G/4G/5G pentru zonele urbane, suburbane și rurale

În vederea estimării acoperirii radio a tehnologiilor 2G/4G/5G pentru cele trei zone pilot alese au fost create rețelele pentru 2 operatori din România pe fiecare banda de frecvență în parte (B8, B20, B1, B3, B7), folosind informații oferite de aceștia, dar și de site-ul public <https://www.cellmapper.net/map>. De asemenea, în urma unei solicitări, ANCOM (Autoritatea Națională pentru Administrare și Reglementare în Comunicații) ne-a oferit o serie de măsurători pentru toți cei 3 operatori în fiecare bandă și tehnologie, pentru a putea avea o posibilitate suplimentară de validare a hărților de acoperire construite. Pentru zonele Slănic Prahova și Dărmăști-Vlașca au fost făcute măsurători și construite rețelele operatorilor pentru benzile B8 (GSM 900), B20 (LTE 800), și B3 (LTE 1800), iar pentru zona București au fost adăugate, în plus față de benzile menționate anterior, măsurători și celule radio și în frecvența B7 (LTE 2600 FDD), respectiv B1 (LTE 2100 FDD). Rețelele 3G nu au mai fost avute în vedere, din cauza faptului că operatorii au încetat emisia pentru standardul respectiv.

Pentru o buna înțelegere a hărților și a structurii celulare a rețelelor a fost realizată o legendă (Figura 5 (a)), în timp ce hărțile cu rețelele radio ale celor doi operatori pot fi consultate în figura 6, operator 1, respectiv figura 7, operator 2. Pentru motive legate de confidențialitatea informațiilor, nu a fost folosit numele real al operatorului, ci s-a utilizat convenția operator 1/2. Măsurătorile au fost realizate cu ajutorul a trei dispozitive echipate cu suita TEMS Pocket, figura 5 (b). Prin aceste măsurători am dorit să punem în evidență atât relieful, cât și alte obstacole care pot influența semnalul recepționat, pentru a valida hărțile de acoperire.

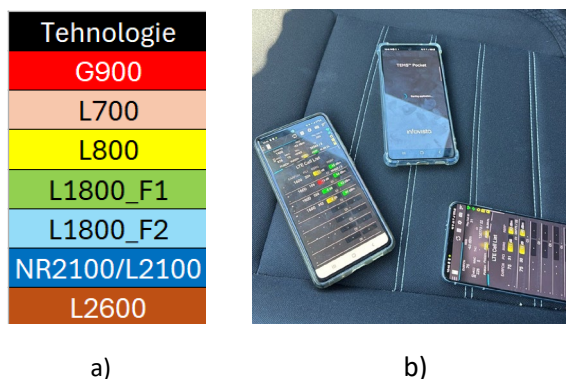


Figura 5. a) Legenda de culori pentru hărțile; b) setup-ul de măsurare pentru rețelele mobile - TEMS Pocket

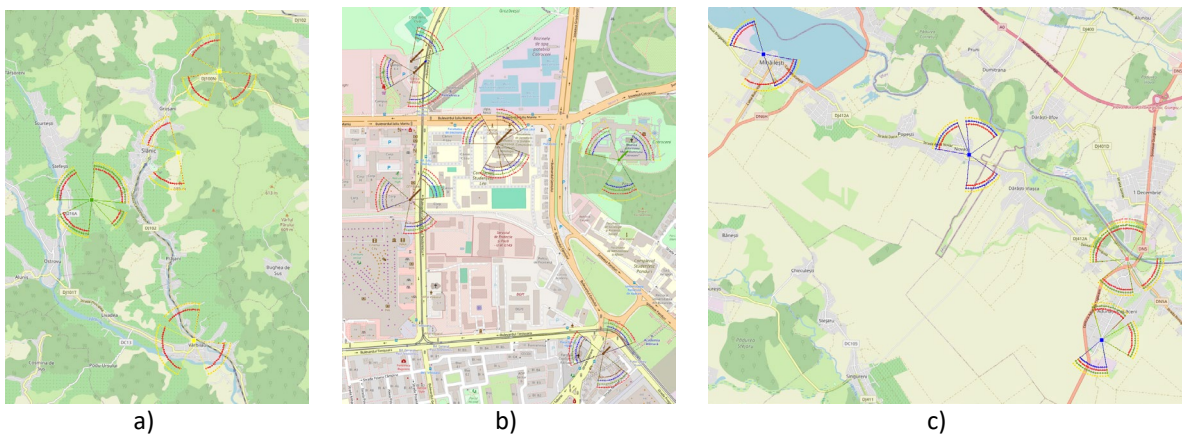


Figura 6. Rețele operator 1 în zonele a) Slănic Prahova; b) București – Campus ETTI; c) Dărmăști- Vlașca

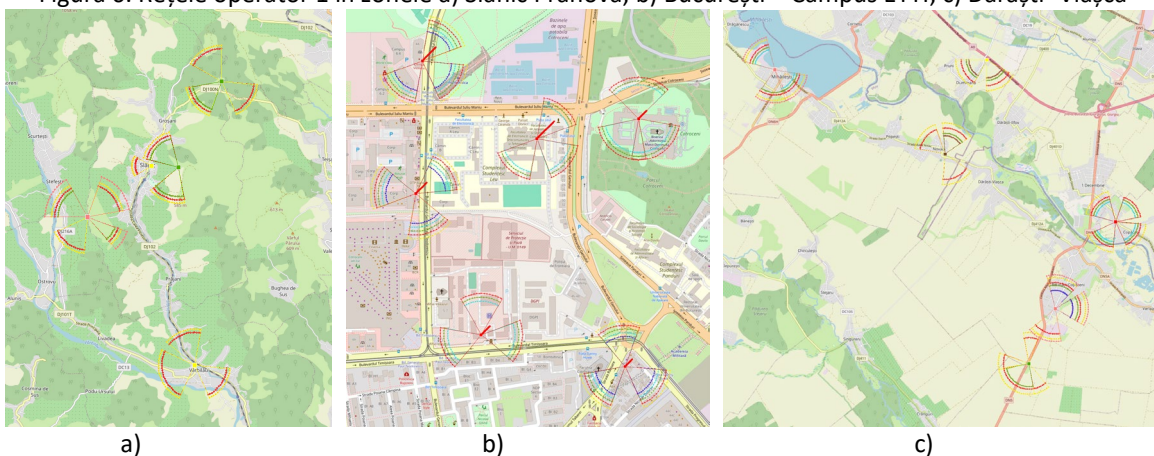


Figura 7. Rețele operator 2 în zonele a) Slănic Prahova; b) București – Campus ETTI; c) Dărmăști- Vlașca

Pentru estimarea acoperirii radio în cele trei zone au fost utilizate diferite modele de propagare, pentru fiecare dintre ele fiind obținute hărți de acoperire cu semnal GSM 900, LTE 800, LTE 1800, LTE 2100, respectiv LTE 2600 în zonele respective. În vederea validării estimărilor obținute, au fost realizate trei campanii de măsurători ale semnalului GSM/LTE recepționat pentru doi operatori, pentru cele trei zone pilot. În figura 8 sunt prezentate traseele utilizate pentru realizarea măsurătorilor în cele trei zone pilot.

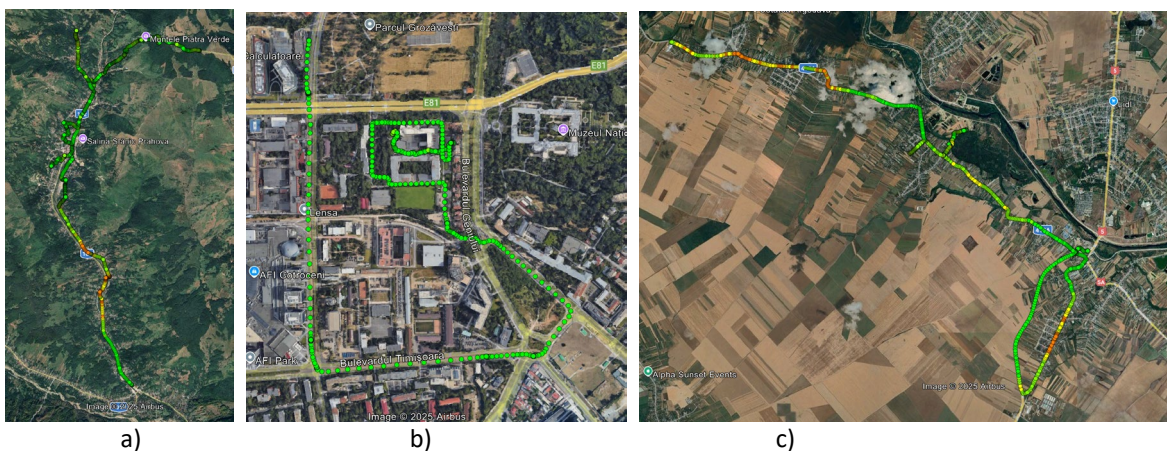


Figura 8. Traseele utilizate pentru realizarea măsurătorilor în zonele a) Slănic Prahova b) București – Campus ETTI c) Dărmăști-Vlașca

Rezultatele obținute prin comparația între estimările realizate folosind diferitele modele de propagare și măsurătorile realizate folosind configurația descrisă anterior sunt sintetizate în tabelele 4 (Slănic Prahova - operator 1), 5 (Dă răști-Vlașca / Adunații Copăceni - operator 1), 6 (București - Campus ETTI - operator 1), 7 (Slănic Prahova - operator 1), 8 (Dă răști-Vlașca / Adunații Copăceni - operator 1), 9 (București - Campus ETTI - operator 1).

Asemănător cu analiza realizată în cazul sistemelor DVB-T2, se vor folosi aceleași patru metri ci diferite de performanță. Pentru a reduce diferențele constatate între estimările realizate și măsurători, au fost realizate optimizări ale acestor modele prin aplicarea a diferiți factori de calibrare. Rezultatele acestor calibrări se pot observa de asemenea în figurile de mai jos. Liniile evidențiate folosind culoarea verde, respectiv galben, reprezintă modelele de propagare pentru care au fost obținute cele mai bune performanțe, după aplicarea optimizărilor, pentru fiecare bandă de frecvență analizată.

Tabelul 4. Performanțele obținute pentru zona rurală (Slănic Prahova) operator 1

Zonă	Tehnolo g	Model de propagare	Simulari					Dupa calibrare				
			K _c	% <6 d	Std. dev (d)	Av.err (d)	Correl Factor (%)	K _{new}	% <6 d	Std. dev (d)	Av.err (d)	Correl Factor (%)
Slanic	G900	Durkin [31]	137	88%	3.6	2.02	94%	145	97%	1.77	0.23	99%
Slanic	G900	Hata-COST231 [17]	137	62%	8.11	2.86	70%	146	68%	7.11	0.21	81%
Slanic	G900	ITU-R 526-11 [23]	137	84%	4.89	1.69	89%	149	95%	2.63	0.01	97%
Slanic	G900	ITU-R 1546 [22]	137	44%	9.69	-6.9	48%	127	60%	8.5	0.42	59%
Slanic	G900	ITU-R 2001-4 [21]	137	31%	13.66	10.45	29%	153	65%	10.28	0.38	39%
Slanic	G900	Walfisch-Ikegami [30]	137	53%	6.32	5.49	84%	146	85%	4.87	0.07	93%
Slanic	L800	4G 3GPP - Rural [33]	135	0%	7.92	23.99	28%	161	77%	6.22	0.35	72%
Slanic	L800	Durkin [31]	135	18%	8.44	17.11	38%	163	98%	1.46	0.31	98%
Slanic	L800	Hata-COST231 [17]	135	20%	9.45	14.04	6%	157	75%	6.3	-0.08	69%
Slanic	L800	ITU-R 526-11 [23]	135	34%	9.4	11.44	10%	170	99%	1.29	0.09	99%
Slanic	L800	ITU-R 1546 [22]	135	45%	6.85	8.38	56%	144	69%	6.32	0.44	64%
Slanic	L800	ITU-R 2001-4 [21]	135	6%	14.51	29.04	15%	172	72%	8.02	0	41%
Slanic	L800	Walfisch-Ikegami [30]	135	1%	8.2	25.63	56%	168	95%	2.85	0.05	96%
Slanic	L1800	4G 3GPP - Rural [33]	143	4%	10.44	27.53	54%	171	64%	10.29	-0.2	57%
Slanic	L1800	Durkin [31]	143	70%	4.96	4.86	91%	159	100%	0.98	0.1	100%
Slanic	L1800	Hata-COST231 [17]	143	16%	7.09	13.81	83%	162	92%	4.39	0.04	93%
Slanic	L1800	ITU-R 2001-4 [21]	143	19%	6.38	12.05	87%	163	99%	1.52	0.01	99%
Slanic	L1800	ITU-R 526-11 [23]	143	22%	6.71	12	85%	163	99%	1.64	0.05	99%
Slanic	L1800	ITU-R 1546 [22]	143	33%	7.2	8.8	82%	154	78%	6.1	-0.07	87%
Slanic	L1800	M2412 Uma [24]	143	28%	6.74	9.7	82%	154	70%	6.11	0.52	85%
Slanic	L1800	Walfisch-Ikegami [30]	143	17%	19.54	4.52	55%	146	24%	19.52	0.72	57%

Tabelul 5. Performanțele obținute pentru zona suburbană (Dă răști-Vlașca) operator 1

Zona	Tehnolo g	Model de propagare	Simulari					Dupa calibrare				
			K _c	% <6 d	Std. dev (d)	Av.err (d)	Correl Factor (%)	K _{new}	% <6 d	Std. dev (d)	Av.err (d)	Correl Factor (%)
Adunatii Copaceni	G900	Durkin [31]	137	70%	9.14	2.27	71%	141	62%	9	-0.32	73%
Adunatii Copaceni	G900	Hata-COST231 [17]	137	41%	9.58	7.99	68%	152	72%	7.15	-0.36	82%
Adunatii Copaceni	G900	ITU-R 526-11 [23]	137	63%	9.12	0.61	72%					
Adunatii Copaceni	G900	Walfisch-Ikegami [30]	137	42%	12.49	1.14	64%					
Adunatii Copaceni	G900	ITU-R 2001-4 [21]	137	63%	9.16	0.39	72%					
Adunatii Copaceni	G900	ITU-R 1812-7 [28]	137	65%	8.48	-1.39	78%	134	70%	8.37	0.15	78%
Adunatii Copaceni	G900	ITU-R 452-18 [32]	137	63%	9.12	0.62	72%	138	62%	9.11	-0.06	72%
Adunatii Copaceni	L800	4G 3GPP - Rural [33]	135	19%	19.4	0.09	41%	167	19%	19.4	0.09	41%
Adunatii Copaceni	L800	Durkin [31]	135	7%	13.09	25.35	48%	167	68%	9.2	0.05	71%
Adunatii Copaceni	L800	Hata-COST231 [17]	135	5%	12.76	31.1	44%	172	68%	8.3	-0.01	74%
Adunatii Copaceni	L800	ITU-R 526-11 [23]	135	9%	12.67	24.32	46%	166	70%	8.57	0.19	75%
Adunatii Copaceni	L800	ITU-R 2001-4 [21]	135	6%	20.17	30.93	37%	166	70%	8.65	0.18	74%
Adunatii Copaceni	L800	ITU-R 1812-7 [28]	135	20%	13.37	17.84	50%	164	73%	8.12	-0.07	80%
Adunatii Copaceni	L800	ITU-R 452-18 [32]	135	9%	12.73	24.44	45%	166	70%	8.56	0.24	75%
Adunatii Copaceni	L1800	4G 3GPP - Rural [33]	143	1%	10.92	29.48	88%	173	56%	10.34	0.51	91%
Adunatii Copaceni	L1800	Durkin [31]	143	4%	8.58	27.48	74%	178	97%	2.14	0.11	99%
Adunatii Copaceni	L1800	Hata-COST231 [17]	143	4%	8.65	30.03	76%	176	85%	5.23	0.29	93%
Adunatii Copaceni	L1800	ITU-R 526-11 [23]	143	5%	7.74	24.6	81%	173	97%	2.45	-0.03	98%
Adunatii Copaceni	L1800	ITU-R 2001-4 [21]	143	5%	7.77	24.35	82%	172	95%	2.55	0.27	98%
Adunatii Copaceni	L1800	ITU-R 1812-7 [28]	143	10%	6.88	17.71	87%	166	100%	1.43	0.06	99%
Adunatii Copaceni	L1800	ITU-R 452-18 [32]	143	5%	7.85	25.37	80%	173	96%	2.46	-0.03	98%

Tabelul 6. Performanțele obținute pentru zona urbană (București, Campus ETTI) operator 1

Zo	Tehnolo	Model de propagare	Simulari					Dupa calibrare				
			K _{old}	% <6	Std. dev (d)	Av.err (d)	Correl Factor (	K _{new}	% <6 dB	Std. dev (d)	Av.err (d)	Correl Factor (
ETTI	G900	Durkin [31]	137	55%	10.15	5.24	60%	145	68%	8.61	-0.22	65%
ETTI	G900	Hata-COST231 [17]	137	20%	10.89	15.97	40%	164	79%	5.18	-0.07	68%
ETTI	G900	ITU-R 526-11 [23]	137	58%	10.63	3.79	58%	145	62%	10.10	0.00	60%
ETTI	G900	Walfisch-Ikegami [30]	137	51%	9.40	6.56	38%	152	85%	6.57	0.14	50%
ETTI	G900	ITU-R 2001-4 [21]	137	55%	10.86	4.19	55%	146	60%	10.17	-0.30	59%
ETTI	G900	ITU-R 1812-7 [28]	137	47%	11.76	-7.79	59%	124	63%	10.14	0.13	66%
ETTI	L1800	4G 3GPP - Urban [33]	143	0%	7.86	36.40	-24%	182	86%	4.81	0.10	50%
ETTI	L1800	Durkin [31]	143	29%	15.39	20.40	19%	179	89%	5.06	0.12	72%
ETTI	L1800	Hata-COST231 [17]	143	0%	12.87	40.60	12%	196	75%	5.68	-0.29	1%
ETTI	L1800	ITU-R 526-11 [23]	143	44%	15.48	16.25	16%	174	85%	5.78	0.09	68%
ETTI	L1800	ITU-R 2001-4 [21]	143	44%	19.50	18.99	7%	181	81%	9.30	0.01	51%
ETTI	L1800	ITU-R 1812-7 [28]	143	89%	4.79	1.32	75%	149	92%	4.05	-0.17	78%
ETTI	L1800	M.2412 Umi-Uma [24]	143	13%	10.88	22.34	-11%	178	85%	5.53	0.14	70%
ETTI	L2600	4G 3GPP - Urban [33]	146	0%	6.12	39.79	27%	188	88%	4.55	-0.22	56%
ETTI	L2600	Durkin [31]	146	24%	17.24	25.66	45%	182	56%	9.84	0.32	50%
ETTI	L2600	Hata-COST231 [17]	146	0%	14.54	44.53	39%	200	77%	4.85	2.13	41%
ETTI	L2600	ITU-R 526-11 [23]	146	30%	17.30	22.17	42%	178	59%	19.79	0.20	47%
ETTI	L2600	ITU-R 2001-4 [21]	146	31%	29.74	28.71	16%	191	64%	23.64	-0.24	13%
ETTI	L2600	ITU-R 1812-7 [28]	146	70%	8.27	2.91	57%	151	68%	7.81	0.11	53%
ETTI	L2600	M.2412 Umi-Uma [24]	146	2%	10.63	28.58	26%	182	62%	8.08	-0.13	57%

Tabelul 7. Performanțele obținute pentru zona rurală (Slănic Prahova) operator 2

Zor	Tehnolo	Model de propagare	Simulari					Dupa calibrare				
			K _{old}	% <6 d	Std. dev (d)	Av.err (d)	Correl Factor (	K _{new}	% <6 d	Std. dev (d)	Av.err (d)	Correl Factor (
Slanic	G900	ITU-R 526-15 [33]	137	92%	4.01	0.9	91%	149	95%	2.76	-0.06	96%
Slanic	G900	Durkin [31]	137	92%	3.68	1.56	92%	150	99%	1.56	-0.02	99%
Slanic	G900	ITU-R 1546 [22]	137	59%	8.68	-6	57%	127	66%	7.29	0.35	64%
Slanic	G900	M.2412 Umi-Uma [24]	137	77%	5.16	-1.11	90%	132	82%	4.75	0	88%
Slanic	G900	Hata-COST231 [17]	137	76%	7.93	2.13	67%	157	72%	5.95	0.16	81%
Slanic	G900	Walfisch-Ikegami [30]	137	57%	6.87	4.23	80%	149	79%	6.25	0.31	88%
Slanic	L800	Durkin [31]	135	10%	8.89	18.98	50%	166	97%	2.14	-0.01	98%
Slanic	L800	ITU-R 526-15 [1]	135	28%	9.71	13.98	31%	166	95%	2.46	0.16	97%
Slanic	L800	ITU-R 1546 [22]	135	25%	10.18	14.93	48%	152	58%	8.44	0.23	62%
Slanic	L800	M.2412 Umi-Uma [24]	135	28%	7.65	10.54	61%	154	88%	4.36	0.04	89%
Slanic	L800	Hata-COST231 [17]	135	11%	9.7	18.19	37%	172	77%	5.9	0.22	82%
Slanic	L800	Walfisch-Ikegami [30]	135	2%	8.94	26.87	58%	168	84%	5.19	0.32	88%
Slanic	L800	4G 3GPP - Rural [33]	135	0%	8.82	39.59	57%	174	77%	6.93	0.47	74%
Slanic	L1800	4G 3GPP - Rural [33]	143	2%	8.99	26.32	47%	171	69%	8.04	0.13	60%
Slanic	L1800	ITU-R 526-15 [33]	143	64%	7.19	5.51	69%	159	95%	3.13	0.05	95%
Slanic	L1800	ITU-R 1546 [22]	143	72%	7.05	0.33	74%					
Slanic	L1800	Hata-COST231 [17]	143	64%	9.09	6.39	48%	160	57%	7.3	0.19	75%
Slanic	L1800	Durkin [31]	143	43%	8.13	9.51	60%	163	95%	2.65	0.3	96%
Slanic	L1800	Walfisch-Ikegami [30]	143	22%	11.41	14.27	45%	164	82%	8.6	0.17	77%
Slanic	L1800	M.2412 Umi-Uma [24]	143	69%	6.06	4.02	80%	150	79%	5.15	0.17	85%

Tabelul 8. Performanțele obținute pentru zona suburbană (Dărești-Vlașca) operator 2

Zona	Tehnolo	Model de propagare	Simulari					Dupa calibrare				
			K _{old}	% <6 d	Std. dev (d)	Av.err (d)	Correl Factor (	K _{new}	% <6 d	Std. dev (d)	Av.err (d)	Correl Factor (
Adunatii Copaceni	G900	ITU-R 526-15 [33]	137	67%	9.21	2.93	70%	142	69%	8.83	0.03	72%
Adunatii Copaceni	G900	Durkin [31]	137	65%	10.44	2.5	62%	140	64%	10.3	0.5	62%
Adunatii Copaceni	G900	ITU-R 1546 [22]	137	43%	12.51	-6.04	32%	130	47%	12.37	0.38	32%
Adunatii Copaceni	G900	M.2412 Umi-Uma [24]	137	15%	11.9	19.32	22%	159	55%	9.53	0.04	53%
Adunatii Copaceni	G900	Hata-COST231 [17]	137	57%	10.7	5.07	61%	149	63%	8.76	-0.46	70%
Adunatii Copaceni	G900	Walfisch-Ikegami [30]	137	51%	11.39	2.5	67%	157	58%	8.51	-0.12	71%
Adunatii Copaceni	L800	Durkin [31]	135	6%	13.82	30.43	44%	172	69%	10.06	-0.01	64%
Adunatii Copaceni	L800	ITU-R 526-15 [1]	135	6%	12.71	28.37	49%	171	69%	8.52	-0.28	74%
Adunatii Copaceni	L800	ITU-R 1546 [22]	135	18%	16.1	21.1	20%	158	51%	14.94	0.12	29%
Adunatii Copaceni	L800	M.2412 Umi-Uma [24]	135	1%	13.06	46.36	3%	183	50%	10.03	0.66	52%
Adunatii Copaceni	L800	Hata-COST231 [17]	135	2%	12.8	33.36	46%	173	61%	9.78	0.3	65%
Adunatii Copaceni	L800	Walfisch-Ikegami [30]	135	16%	16.23	24.41	35%	180	56%	9.8	0.05	66%
Adunatii Copaceni	L800	4G 3GPP - Rural [33]	135	10%	20.55	31.15	26%	167	24%	19.82	0.17	29%
Adunatii Copaceni	L1800	4G 3GPP - Rural [33]	143	4%	16.91	25.63	12%	169	45%	16.51	0.45	13%
Adunatii Copaceni	L1800	ITU-R 526-15 [33]	143	7%	10.04	23.79	42%	170	82%	8.63	-0.37	63%
Adunatii Copaceni	L1800	ITU-R 1546 [22]	143	5%	11.01	19.61	30%	163	75%	10.64	0.44	35%
Adunatii Copaceni	L1800	Hata-COST231 [17]	143	6%	12.5	26.41	16%	173	67%	9.26	0.48	60%
Adunatii Copaceni	L1800	Durkin [31]	143	6%	11.52	26.55	23%	173	80%	9.46	0.38	53%
Adunatii Copaceni	L1800	Walfisch-Ikegami [30]	143	6%	12.24	19.01	30%	167	70%	8.95	-0.22	73%

Tabelul 9. Performanțele obținute pentru zona urbană (București, Campus ETTI) operator 2

Zona	Tehnologie	Model de propagare	Simulari					Dupa calibrare				
			K _d	% <6 dB	Std. dev (dB)	Av. err (dB)	Correl Factor (dB)	K _n	% <6 dB	Std. dev (dB)	Av. err (dB)	Correl Factor (dB)
Leu	G900	ITU-R 526-15 [33]	137	69%	10.3	4.77	54%	151	74%	7.37	-0.07	67%
Leu	G900	Durkin [31]	137	68%	10.21	5.82	53%	149	68%	8.41	0.09	66%
Leu	G900	ITU-R 1546 [22]	137	40%	6.98	8.6	38%	147	71%	6.1	-0.01	50%
Leu	G900	M.2412 Umi-Uma [24]	137	74%	8.56	4.89	47%	146	64%	7.52	0.25	58%
Leu	G900	Hata-COST231 [17]	137	20%	11.8	17.55	41%	165	76%	6.54	0.34	59%
Leu	G900	Walfisch-Ikegami [30]	137	57%	11.53	5.83	22%	147	69%	10.77	-0.2	19%
Leu	L800	Durkin [31]	135	13%	16.35	28.3	78%	174	74%	6.51	0.01	91%
Leu	L800	ITU-R 526-15 [33]	135	8%	14.28	28.24	75%	172	65%	7.24	-0.22	89%
Leu	L800	ITU-R 1546 [22]	135	0%	8.67	52.62	55%	191	66%	7.33	-0.6	70%
Leu	L800	M.2412 Umi-Uma [24]	135	0%	9.21	35.92	67%	173	65%	6.86	0.39	81%
Leu	L800	Hata-COST231 [17]	135	0%	11.7	54.01	50%	195	43%	8.42	0.37	66%
Leu	L800	Walfisch-Ikegami [30]	135	17%	15.98	23.82	74%	169	37%	13.9	0.07	68%
Leu	L800	4G 3GPP - Urban [33]	135	0%	10.2	48.99	27%	185	59%	8.55	0.5	54%
Leu	L1800	4G 3GPP - Urban [33]	143	0%	4.73	34.92	63%	180	98%	2.83	0.01	89%
Leu	L1800	ITU-R 526-15 [33]	143	34%	15.14	15.74	36%	171	69%	7.12	0.4	66%
Leu	L1800	ITU-R 1546 [22]	143	0%	5.3	26.91	49%	171	94%	3.56	0.45	82%
Leu	L1800	M.2412 Umi-Uma [24]	143	1%	8.71	21.21	25%	168	85%	6.43	0.22	70%
Leu	L1800	Hata-COST231 [17]	143	0%	13.81	38.57	39%	193	79%	4.63	0.43	66%
Leu	L1800	Durkin [31]	143	31%	15.77	19.64	41%	175	69%	6.34	0.17	69%
Leu	L1800	Walfisch-Ikegami [30]	143	23%	13.55	19.92	44%	175	80%	7.64	0.1	54%
Leu	L2100	Durkin [31]	144	41%	17.38	18.14	85%	171	38%	10.43	0.39	89%
Leu	L2100	ITU-R 526-15 [33]	144	24%	15.16	17.68	80%	171	65%	9.31	0.41	87%
Leu	L2100	ITU-R 1546 [22]	144	0%	10.2	32.72	57%	178	56%	8.83	0.69	72%
Leu	L2100	M.2412 Umi-Uma [24]	144	3%	11.32	28.24	62%	178	56%	8.97	0.74	78%
Leu	L2100	Hata-COST231 [17]	144	0%	10.57	44.03	78%	191	54%	6.93	-0.29	89%
Leu	L2100	Walfisch-Ikegami [30]	144	34%	17.67	15.62	81%	164	23%	16.02	0.23	82%
Leu	L2100	4G 3GPP - Urban [33]	144	0%	9.97	40.36	60%	186	55%	8.56	0.47	73%

În continuare, vor fi prezentate cele mai bune rezultate din punct de vedere al modelelor de propagare folosite și al performanțelor pentru fiecare operator în parte, în funcție de zonă și tehnologie. Predicția cu cel mai bun procent (<6dB %) pentru fiecare bandă pentru operatorul 1 pentru zona suburbană (Dărăști-Vlașca) se regăsește în figura 9, cea pentru zona rurală (Slănic Prahova) în figura 10, respectiv pentru zona urbană (București, Campus ETTI) în figura 11.

Predicția cu cel mai bun procent (<6dB %) pentru fiecare bandă pentru operatorul 2 pentru zona suburbană (Dărăști-Vlașca) se regăsește în figura 12, cea pentru zona rurală (Slănic Prahova) în figura 13, respectiv pentru zona urbană (București, Campus ETTI) în figura 14.

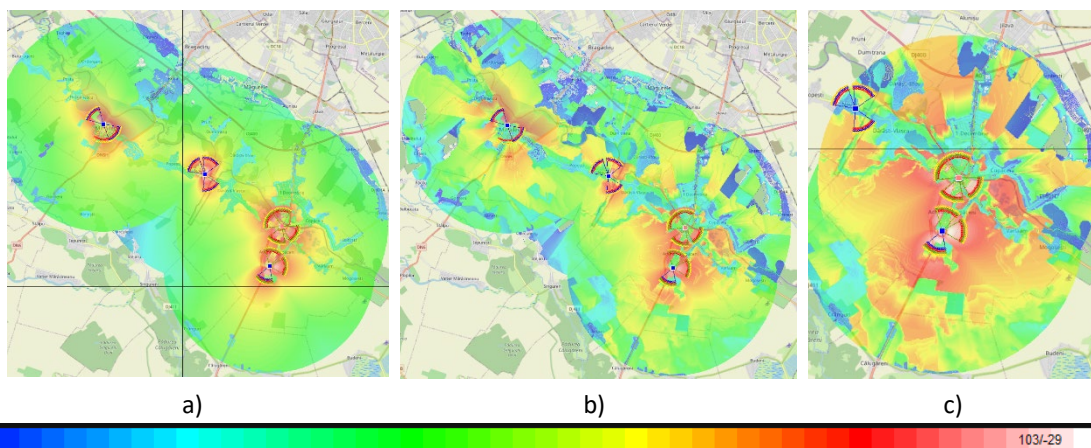


Figura 9. Hărțile de acoperire și corelațiile între estimări și măsurători pentru corelație Dărăști-Vlașca - operator 1, pentru tehnologia: a) G900 - model Hata Cost 231, b) LTE800 - model ITU-R 1812-7, c) LTE1800 - ITU-R 1812-7

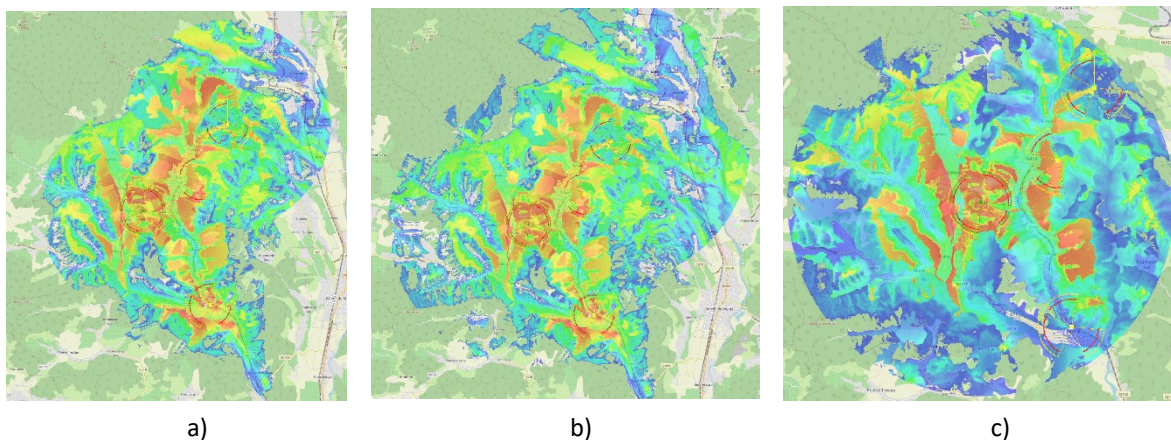


Figura 10. Hărțile de acoperire și corelațiile între estimări și măsurători pentru corelație Slanic - operator 1, pentru tehnologia: a) G900 - model Durkin, b) LTE800 - model Durkin, c) LTE1800 - model ITU-R 526

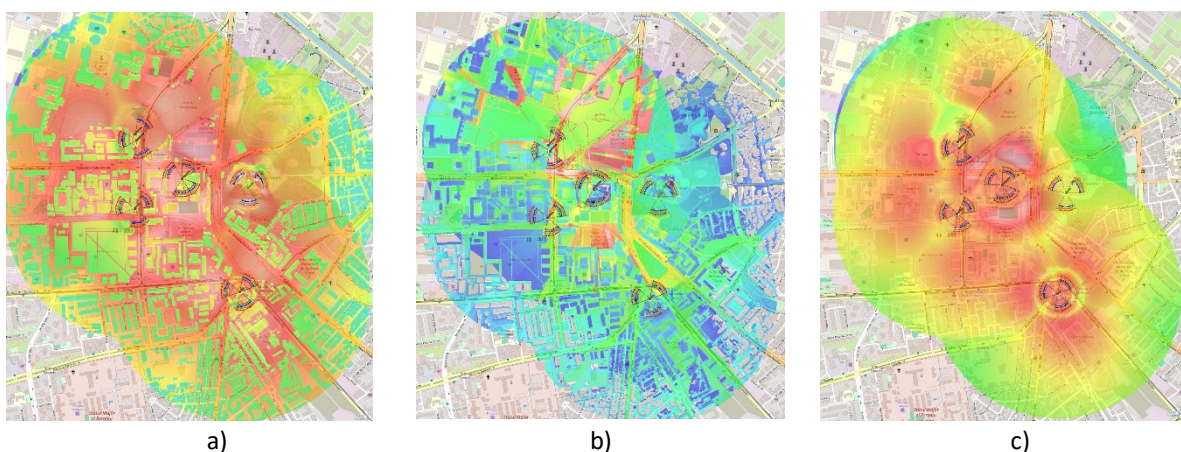


Figura 11. Hărțile de acoperire și corelațiile între estimări și măsurători pentru corelație București - operator 2, pentru tehnologia: a) G900 - model Hata Cost 231, b) LTE1800 - ITU-R 1812-7, c) LTE2600 - 4G 3GPP - Urban

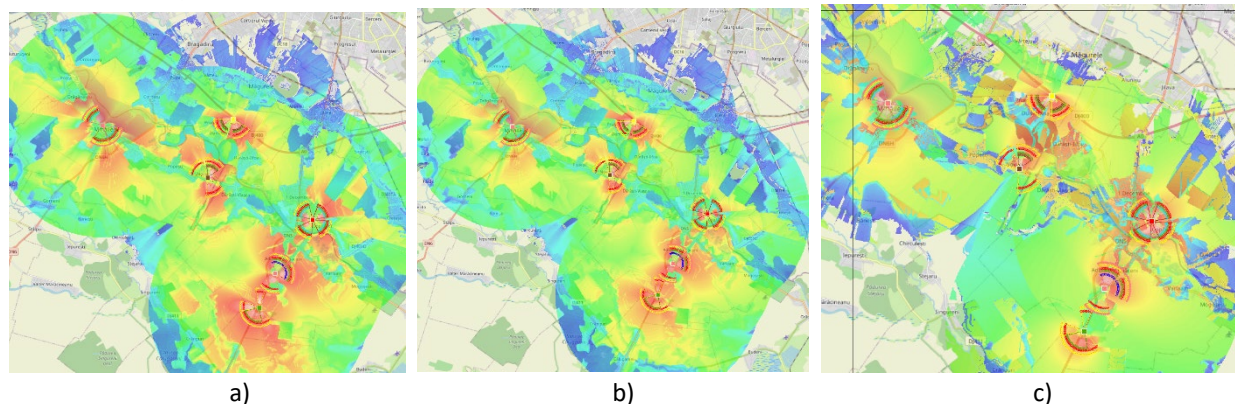


Figura 12. Hărțile de acoperire și corelațiile între estimări și măsurători pentru corelație Dărmăști-Vlașca - operator 1, pentru tehnologia: a) G900 - model ITU-R 526-15, b) LTE800 - model ITU-R 526-15, c) LTE1800 - Walfisch Ikegami

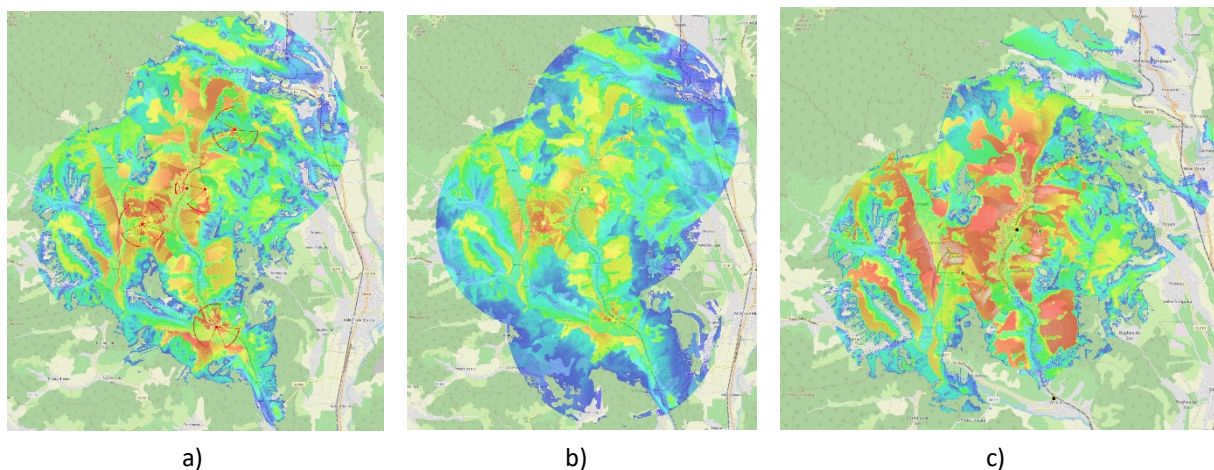


Figura 13. Hărțile de acoperire și corelațiile între estimări și măsurători pentru corelație Slanic - operator 2, pentru tehnologia: a) G900 - model Durkin, b) LTE800 - model Durkin, c) LTE1800 - model ITU R 526

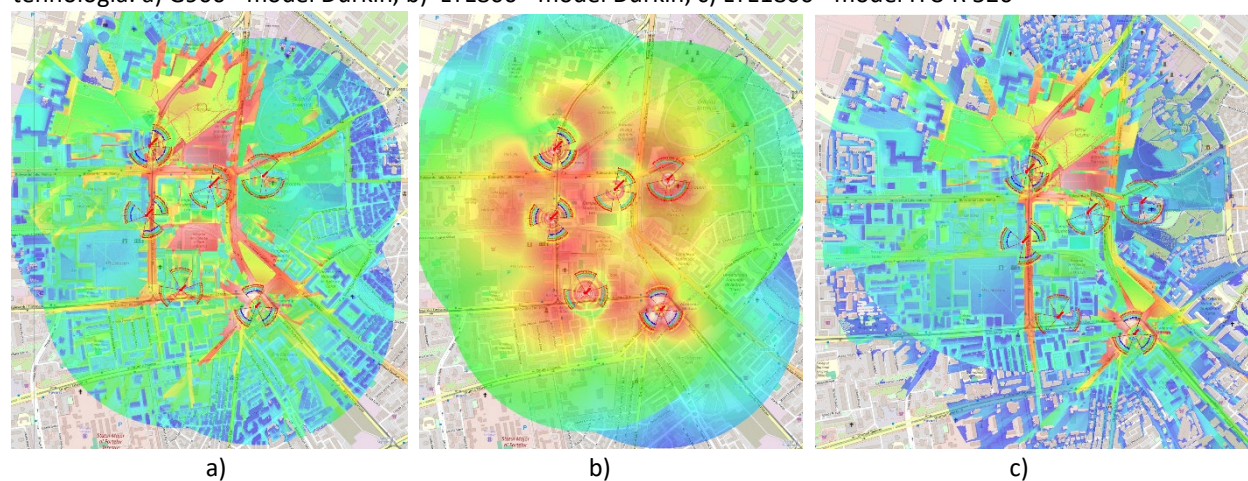


Figura 14. Hărțile de acoperire și corelațiile între estimări și măsurători pentru corelație București - operator 2, pentru tehnologia: a) G900 - model ITU R 526-15, b) LTE1800 - ITU R 526-15, c) LTE2100 - 4G 3GPP - Urban

Pe parcursul anului 2025, a fost dezvoltată pagina web care conține informații la zi legate de desfășurarea proiectului, care poate fi accesată la adresa: <https://geospectrum.radio.pub.ro>. Pagina a fost actualizată cu informații pe tot parcursul desfășurării etapei 2025 din cadrul proiectului. De asemenea, există o pagină web dedicată proiectului și pe site-ul partenerului din proiect, compania BEIA Consult International, accesibilă la adresa: <https://beiario.eu/geospectrum/>.

Publicații:

Activitatea de cercetare științifică derulată pe parcursul etapei 2025 din cadrul proiectului a fost concretizată prin publicarea următorului articol, în revista Technologies (zona Q1, factor de impact 3.6):

- V.S. Hociung, M.G. Gheorghe, C. Zamfirescu, M.C. Vochin, R.O. Preda, A. Martian, " Analysis of the Radio Coverage for a Mobile Private Network Implemented Using Software Defined Radio Platforms," in Technologies, Volume 13, Issue 11, Pages 489, 2025. (WOS:001623640900001)

De asemenea, un articol este momentan în curs de evaluare la revista IEEE Access (revistă Q2):

- T.C. Stoian, A. Martian, M. Sarbu-Dragan, R. Mihai, "Performance Assessment of 5G Time Division Duplexing Frame Structures".

Bibliografie:

- [1] C. Brown and A. Ghasemi, "Evolution Toward Data-Driven Spectrum Sharing: Opportunities and Challenges," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 99680-99692, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3315246
- [2] A. Pakzad, X. Asuncion, J. Ligayo, M. Raine, J. Uy and L. Materum (2022). A Menu-driven Interface for a Geolocation Database for Wireless Spectrum Sharing. *Journal of Communications*. 56-62. 10.12720/jcm.17.1.56-62.
- [3] A. Stirling (2020). White Spaces and Database-assisted Spectrum Sharing. In *Spectrum Sharing*, Wiley, <https://doi.org/10.1002/9781119551539.ch3>.
- [4] H. Hussien, K. Katzis, L. Mfupe, E. Bekele, (2021). Practical Implementation of Geo-location TVWS Database for Ethiopia. 10.1007/978-3-030-80618-7_34.
- [5] H. M. Hussien, K. Katzis, L. P. Mfupe and E. T, "Calculation of TVWS Spectrum Availability Using Geo-location White Space Spectrum Database," 2021 IEEE AFRICON, Arusha, Tanzania, United Republic of, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/AFRICON51333.2021.9570915.
- [6] Nwamaka.G., Engr & A.C.O, Dr & Nwobodo-Nzeribe, Nnenna. (2020). Design And Development Of A Web Based Geolocation Database For The Television White Spectrum (Tvws) In Nigeria. *International Journal Of Computer Application*. 2. 10.26808/rs.ca.i10v2.03.
- [7] R. Doost-Mohammady and K. R. Chowdhury, "Design of spectrum database assisted cognitive radio vehicular networks," 2012 7th International ICST Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM), Stockholm, Sweden, 2012, pp. 1-5, doi: 10.4108/icst.crowncom.2012.248536.
- [8] Y. Dai and J. Wu, "Integration of Spectrum Database and Sensing Results for Hybrid Spectrum Access Systems," 2015 IEEE 12th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems, Dallas, TX, USA, 2015, pp. 28-36, doi: 10.1109/MASS.2015.114.
- [9] Chen, S.; Shen, B.; Wang, X.; Yoo, S.-J. Geo-Location Information Aided Spectrum Sensing in Cellular Cognitive Radio Networks. *Sensors* 2020, 20, 213. <https://doi.org/10.3390/s20010213>.
- [10] M. Musashi and K. Adachi, "Spectrum Database Aided Prior Vacant Frequency Band Detection for Spectrum Sharing," 2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), Fukuoka, Japan, 2020, pp. 262-266, doi: 10.1109/ICAIIIC48513.2020.9065213.
- [11] M. Hoyhtya, A. Mammela, A. Chiumento, S. Pollin, M. Forsell and D. Cabric, "Database-Assisted Spectrum Prediction in 5G Networks and Beyond: A Review and Future Challenges," in *IEEE Circuits and Systems Magazine*, vol. 19, no. 3, pp. 34-45, thirdquarter 2019, doi: 10.1109/MCAS.2019.2925293.
- [12] Jiang, Huijuan & Wang, Tianyu & Wang, Shaowei. (2018). Three-Tier Hierarchical Model of Dynamic Spectrum Sharing Based on Hybrid Authorization Using Geolocation Database and Cognitive Radio. 1-6. 10.1109/ICC.2018.8422854.
- [13] ATDI HTZ Communications Software, disponibil online la adresa: <https://atdi.com/products-and-solutions/htz-communications>, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [14] Ettus Research USRP B210 SDR Platform, disponibil online la adresa: <https://www.ettus.com/allproducts/ub210-kit>, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [15] Antena MP-Antenna UHF VHF Antenna 08-ANT-0860, disponibil online la adresa: <https://www.mpantenna.com/product/uhf-vhf-antenna-08-ant-0860/>, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [16] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 317-325, Aug. 1980, doi: 10.1109/T-VT.1980.23859

- [17] F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi and M. Umehira, "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 32, no. 8, pp. 822-829, August 1984, doi: 10.1109/TAP.1984.1143419
- [18] Recommendation ITU-R M.1225., disponibil online la adresa: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.1225-0-199702-!!PDF-E.pdf, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [19] Propagation model for Recommendation ITU-R P.528-3, disponibil online la adresa: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/RREP-P.2345-1-2016-PDF-E.pdf, accesat în noiembrie 2025.
- [20] Modelul de propagare ITM NTIA Longley Rice , disponibil online la adresa: <https://its.ntia.gov/software/itm>, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [21] A General Purpose Wide-Range Terrestrial Propagation Model in the Frequency Range 30 MHz to 50 GHz. , disponibil online la adresa: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2001-4-202109-S!!PDF-E.pdf, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [22] Modelul de propagare ITU-R P.1546-6, disponibil online la adresa: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1546-6-201908-!!PDF-E.pdf, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [23] 525526 Recommendation ITU-R P.526-11: Propagation by Diffraction, disponibil online la adresa: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-11-200910-S!!PDF-E.pdf, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [24] Report ITU-R M.2412-0, disponibil online la adresa: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2412-2017-PDF-E.pdf, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [25] Recommendation ITU-R P.452-14, disponibil online la adresa: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.452-14-200910-S!!PDF-E.pdf, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [26] Modelul de propagare Hata Seamcat, disponibil online la adresa: <http://cept.org/eco/eco-tools-and-services/seamcat-spectrum-engineering-advanced-monte-carlo-analysis-tool>, accesat în noiembrie 2025.
- [27] Modelul de propagare Okumura-Hata-Davidson TSB-88-B, disponibil online la adresa: <https://fasma.org/wp-content/uploads/TSB-88-B-1-Wireless-Communications-System-%E2%80%93-Performance-In-Noise-And-Interference-%E2%80%93-Limited-Situations-Recommended-Methods-for-Technology-Independent-Modeling-Simulation-And-Verification.pdf>, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [28] Modelul de propagare ITU-R 1812-7, disponibil online la adresa: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.1812-7-202308-S/en>, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [29] Modelul de propagare ITU-R 525/526-15, disponibil online la adresa: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.526-15-201910-S/en>, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [30] J. Walfish, and H. L. Bertoni, "A theoretical model of UHF propagation in urban environments," IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. 36, no. 12, pp. 1788-1796, Dec. 1988 .
- [31] Vuckovik, Marija & Trajanov, Dimitar & Filiposka, Sonja. (2011). Durkin's Propagation Model Based on Triangular Irregular Network Terrain. 83. 333-341. 10.1007/978-3-642-19325-5_34.
- [32] Modelul de propagare ITU-R 452-18, disponibil online la adresa: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.452-18-202310-I/en>, accesat la 1 noiembrie 2025.
- [33] Modelul de propagare 3GPP TR 38.901 v18.0.0, "Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz (Release 18)," Tech. Rep., Apr. 2024.

03.12.2025

Director de proiect

Prof. dr. ing. Alexandru MARȚIAN