

PROVOCĂRI ALE COMUNICAȚIILOR MOBILE DE NOUĂ GENERAȚIE ÎN CĂILE FERATE

CHALLENGES OF MOBILE COMMUNICATIONS NEXT GENERATION IN RAILWAYS

Alexandru BADEA¹, Gabriel POPA², Elena Geanina BIBIRE³,
Adrian Ioan MUNTEAN⁴, Constantin BIBIRE⁵, Claudiu-Nicolae BADEA⁶

¹Universitatea Politehnică București, Splaiul Independenței nr. 313, București, România
e-mail: Alexandru BADEA: alexsinaia@yahoo.com

^{2,3,4,5}Universitatea Politehnică București, Splaiul Independenței nr. 313, București, România
e-mail: Gabriel POPA: gabi21popa@yahoo.com; Elena Geanina BIBIRE:
elena.bibiree@yahoo.com; Adrian Ioan MUNTEAN: adrianmuntean67@yahoo.com;
Constantin BIBIRE: constantin.bibire@yahoo.com;

⁶UNICOMTRANZIT SA, Bld. Pipera nr. 1-IA, corp A, et. 2,3,4,5, oraș Voluntari, jud. Ilfov,
România, e-mail: Claudiu-Nicolae BADEA: claudiu.badea@unicom-group.ro

Rezumat: Noua generație de comunicații mobile în domeniul feroviar va fi orientată către toate sectoarele specifice, toate serviciile, toate legăturile și către asigurarea unei securități puternice. Se așteaptă ca acestea să înlocuiască complet sistemul existent, și să ofere suport video de conducere automată și de siguranță a circulației trenurilor. Serviciile de monitorizare și alte servicii oferă servicii de transmitere a informațiilor de mare viteză, care sunt platforma de transport a informațiilor a Internetului feroviar și baza pentru asigurarea siguranței operațiunilor feroviare de mare viteză. Aceasta se poate transpune ca o Integrare de percepție-comunicare, prin fuziunea cu inteligența digitală de ultimă generație. Teoria matricei de tip și proprietățile fizice și electromagnetice ale noilor materiale oferă suport teoretic de bază pentru aplicații de ultimă oră pentru dezvoltarea de comunicații mobile de nouă generație în căile ferate prin utilizarea tehnologiei wireless de înaltă precizie. Planificarea și optimizarea rețelei, tehnologia de integrare a modelării informațiilor despre clădire (BIM), realitatea augmentată (AR) și digitalizarea vor oferi suport tehnic pentru dezvoltarea comunicațiilor mobile de nouă generație în căile ferate, atât în prezent cât și în viitor. În implementarea sa, noua generație de sisteme de comunicații mobile feroviare trebuie să stabilească șase concepte de proiectare „gestionabile, controlabile, credibile, vizibile, fiabile și măsurabile” și trebuie să rezolve problema resurselor limitate de frecvență și a noilor nevoi.

Cuvinte cheie: comunicație; latență; digitalizare, tehnologie, unde milimetrice, internet.

Abstract: The new generation of mobile rail communications will be geared towards all rail sectors, all services, all links and strong security. It is expected to completely replace the existing system, and provide video support for automated driving and train traffic safety. Monitoring and other services provide high-speed information transmission services, which are the information transport platform of the railway Internet and the basis for ensuring the safety of high-speed railway operations. This can be transposed as Perception-Communication Integration, through the fusion of new digital intelligence. Type matrix theory and physical and electromagnetic properties of new materials provide basic theoretical support for cutting-edge application for the development of next-generation mobile communications in railways by using high-precision wireless technology. Network planning and optimization, building information modeling (BIM) integration technology, augmented reality (AR) and digitization will provide technical support for the development of next-generation mobile communications in railways, both now and in the future. In its implementation, the new generation of railway mobile communication systems must establish six design concepts of "manageable, controllable, credible, visible, reliable and measurable" and must solve the problem of limited frequency resources and new needs.

Keywords: communication; latency; digitization, technology, millimeter waves, Internet.

1. INTRODUCERE

În prezent se propune să se formeze o rețea feroviară modernă de mare viteză până în 2035, prin construirea de căi ferate inteligente de mare viteză [1] și să se accelereze realizarea unei rețele inteligente de mare viteză a căilor ferate. În același timp, țările din întreaga lume au propus și planuri strategice pentru digitalizarea căilor ferate și dezvoltarea inteligentă. Prin utilizarea unei noi generații de tehnologie a informației și comunicațiilor pentru a îmbunătăți semnificativ eficiența și eficacitatea operatorilor de transport feroviar, pentru a optimiza calitatea serviciilor de transport de călători și marfă și pentru a îmbunătăți nivelul de siguranță al transportului feroviar, au devenit o direcție importantă pentru dezvoltarea viitoare a căilor ferate în lume. Comanda de expediere a trenurilor și sistemul de control al operațiunii trenurilor Nivelul 3 (CTCS-3) [2], informațiile de control al funcționării trenului, comenzile de expediere a trenului, informațiile de verificare a numărului de trenului și dinamica echipamentului de semnalizare, serviciile de aplicație, cum ar fi informațiile de monitorizare, sunt efectuate de sistemul de comunicații mobile de bandă îngustă feroviară (GSM-R) [3]. Cu toate acestea, GSM-R are o capacitate de transport insuficientă, are interferențe grave în banda de frecvență. Măsurarea efectivă a sistemului de comunicații mobile de bandă largă (LTE-R) pe o calea ferată de mare viteză arată că rata de transmisie la marginea celulei este de numai 10 Mbit/h atunci când funcționează în banda de frecvență de 450 MHz. Lățimea de bandă de 5 MHz la viteză de 350 km/h, nu poate satisface nevoile de cunoaștere a situației de interconectare omniprezentă și de luare a deciziilor inteligente și rapide cerute de calea ferată inteligentă de mare viteză. Comunicații de expediere multimedia feroviară, supraveghere video de înaltă definiție de la bord și de pe cale, detectarea și diagnosticarea de la distanță cu realitate augmentată (AR) [4] raportată la realitatea virtuală (VR), sunt aplicații cu senzori la scară largă. Controlul operațiunilor și serviciile legate de siguranța feroviară, serviciile de lățime de bandă mare și serviciile feroviare de Internet au propus cerințe mai mari pentru fiabilitatea, utilizarea spectrului, eficiența energetică, lățimea de bandă pentru noua generație de sisteme de comunicații mobile feroviare [5].

Noua generație de tehnologie de comunicații mobile feroviare a primit o atenție deosebită din partea industriei feroviare. Uniunea Internațională a Căilor Ferate (UIC) pledează pentru transformarea digitală a căilor ferate [6], propune crearea viitorului sistem de comunicații mobile feroviare (FRMCS) [7] și clarifică nevoile de comunicare a șase mari categorii de aplicații pentru utilizatorii feroviar, inclusiv obiecte de comunicație, lățime de bandă, fiabilitate și viteză. Laboratoarele feroviare relevante din alte țări mențin o atitudine deschisă față de noua generație de comunicații mobile feroviare. Deși nu au dezvoltat planuri de construcție și dezvoltare, au început cercetările teoretice, demonstrațiile tehnice și testele de inginerie.

În septembrie 2019, în laboratorul de mobilitate a trenurilor 5G al Deutsche Bahn (DB) s-a testat pentru prima dată trenuri bazate pe tehnologia 5G. S-au folosit echipamente bazate pe tehnologia 5G pentru a efectua teste de control de la distanță pe trenurile fără mecanic. În noiembrie același an, s-a început să se studieze evoluția de la GSM-R la FRMCS și s-au efectuat teste de funcționare a rețelei feroviare 5G pe calea ferată suburbană din Hamburg prin controlul trenurilor, transmiterea informațiilor și teste de conducere autonomă. În noiembrie 2019, Căile Ferate Naționale Franceze (SNCF) au semnat un acord de parteneriat cu Nokia pentru a crea în comun un laborator feroviar 5G pentru a efectua teste complete ale performanței FRMCS în mediul de laborator și feroviar pentru a se pregăti pentru tranziția sistemelor de comunicații feroviare la standarde de comunicații fără fir mai noi, de performanță mai ridicată. În martie 2020, Căile Ferate Federale Elvețiene (SBB) au stabilit un pilot de bandă de frecvență FRMCS în cadrul proiectului Smart Railway 4.0 care își propune să definească standarde tehnice pentru FRMCS și

intenționează să înlocuiască actualul GSM-R cu FRMCS în 2025 pentru a îmbunătăți semnificativ siguranța, disponibilitatea și productivitatea infrastructurii feroviare. În 2019, la laboratorul 5G din Barcelona, Spania (5G Barcelona), Catalonia Railways (FGC), guvernul catalan, Barcelona World Mobile Communications Foundation (MWCapital) și Vodafone Spania, au înființat un laborator feroviar 5G pentru a efectua cercetări privind tehnologiile și aplicațiile feroviare cheie 5G. În noiembrie 2020 a fost lansat oficial și a fost finanțat „Programul European Horizon 2020”, care a avut ca scop verificarea primei specificații FRMCS prin dezvoltarea și testarea prototipurilor FRMCS pentru infrastructura de cale și echipamentele de bord. În ianuarie, Japan Mobile Communications Corporation (NTT Docomo) și JR East Japan Railway Co. Ltd. a folosit mașina de testare Shinkansen ALFA-X [8] pentru a implementa cu succes teste de comunicare 5G pentru trenurile de mare viteză de 360 km/h, iar în ianuarie 2020, Institutul de Cercetare a Căilor Ferate din Coreea (KRRRI) a semnat un acord de cooperare tehnică cu SK Telecom pentru a dezvolta primul sistem inteligent de control al trenului din lume care utilizează comunicații 5G și la sfârșitul anului 2020 a anunțat că testul bazat pe tehnologia de control automat al trenului 5G a avut succes [9].

Din analiza motivelor prezentate anterior, se poate preciza cu certitudine faptul că, dezvoltarea de aplicații ingineresti pentru diferite zone industriale, aduce un plus în rezolvarea problemelor tehnice prin suportul oferit de soluțiile moderne de hardware, software și comunicații [10-13]. Crearea de baze de date consistente în timp real și realizarea de analize pe baza informațiilor ce rezultă din transformarea, tratarea și interpretarea acestor date conduc la creșterea fiabilității sistemelor tehnice [14], în general, și a rețelelor de comunicații, în special [15-18].

2. TEHNOLOGIA DE COMUNICARE MOBILĂ DE NOUĂ GENERAȚIE PENTRU CĂILE FERATE

Într-un raport tehnic lansat în iunie 2017, Sectorul de radiocomunicații al Uniunii Internaționale de Telecomunicații (ITU-R) a rezumat activitatea de cercetare globală actuală privind sistemele de comunicații mobile de nouă generație pentru căile ferate. În viitor, dacă dorim să rezolvăm problemele de bază ale operațiunilor de siguranță feroviară, cum ar fi supravegherea video feroviară de înaltă definiție, identificarea pericolelor pentru siguranța infrastructurii și inteligența sistemelor de control al operațiunilor, noua generație de sisteme de comunicații mobile feroviare trebuie să îndeplinească nevoile tradiționale de bandă largă mobilă îmbunătățită (eMBB) [19], dar și nevoile de comunicare masivă de tip mașină (mMTC) [20] și comunicație ultra-fiabilă cu latență scăzută (URLLC) [21].

Conform tendinței actuale de dezvoltare, tehnologiile emergente de comunicații fără fir reprezentate de tehnologia 5G vor oferi, fără îndoială, un nou impuls pentru dezvoltarea sistemelor de comunicații mobile de nouă generație pentru căile ferate. Bazându-se pe tehnologia 5G, sistemul de comunicații mobile de nouă generație al căii ferate poate fi îmbunătățit în continuare în ceea ce privește calitatea comunicațiilor mobile, numărul de dispozitive de acces și transmisia fiabilă a ratelor ridicate de date. În plus, apariția și aplicarea tehnologiei 5G poate ajuta sistemul de comunicații mobile de nouă generație al căii ferate să se îmbunătățească în continuare în ceea ce privește obținerea de date auxiliare prin satelit și monitorizarea în timp real a stării de funcționare a trenurilor.

Construcția unei noi generații de sisteme de comunicații mobile feroviare poate realiza o transmisie eficientă și fiabilă a informațiilor în scenariile mobile de mare viteză, poate crea o nouă rețea inteligentă de calcul colaborativ și sistem de distribuție a informațiilor. Poate construi o rețea de comunicații a informațiilor feroviare cu legătură completă care integrează Internetul feroviar și sprijină transmisia de date de mare capacitate și accesul la echipamente feroviare masive pentru a îmbunătăți în mod cuprinzător performanța sistemelor de comunicație a

informațiilor feroviare. Oportunitățile și provocările cu care se confruntă noua generație de sisteme de comunicații mobile feroviare [22] se pot structura pe trei niveluri: nivelul teoriei de bază a aplicațiilor, nivelul aplicațiilor tehnologice și nivelul ingineriei.

2.1. Nivelul teoriei de bază a aplicațiilor

În procesul de transmitere a informațiilor, integrarea percepție-comunicare-calcule rupe cadrul serviciului de informații în stil coș de fum al colectării informațiilor terminale, transmiterii informațiilor în rețea și calculului marginii cloudului și poate construi simultan colectarea de informații. Cadrul tehnologic de procesare a informațiilor end-to-end cu calcularea informațiilor este de așteptat să sprijine serviciile feroviare inteligente care sunt puternic cuplate cu percepția, comunicarea și calcularea. Viitoare trenuri inteligente de mare viteză sunt de așteptat să fie echipate cu senzori (radar cu unde milimetrice, camere de luat vederi), comunicare (5G, Wi-Fi 6, unde milimetrice, internet, lumină vizibilă), calcul (creierul trenului, calcularea la margine cu acces multiplu) este o platformă integrată care realizează percepția cuprinzătoare, interconectarea omniprezentă, procesarea integrată, învățarea activă și luarea deciziilor științifice a informațiilor între echipamentele mobile feroviare de mare viteză, infrastructura fixă și mediile interne și externe și realizează un sistem inteligent de management integrat al întregului ciclu de viață [23].

Fuziunea inteligenței digitale se bazează pe fuziunea datelor mari și a inteligenței artificiale, care poate realiza percepția, înțelegerea, raționamentul, predicția și alte capacități ale datelor. Luând ca exemplu sistemul de comunicații mobile de nouă generație al căii ferate, integrarea inteligenței digitale poate colecta date de la diferite echipamente ale elementelor de rețea în timp real și poate efectua procesare în timp real, analiză de modelare și predicție asupra datelor pentru a realiza configurarea optimă a echipamentelor elementului de rețea și formați un set complet de procese de operare în buclă închisă și, în cele din urmă, obțineți o gestionare, control și optimizare inteligente a rețelei. În plus, integrarea inteligenței digitale poate realiza, de asemenea, fuziunea multi-profesională a datelor de operare și întreținere inteligentă și analiză unificată și poate construi o arhitectură de sistem inteligentă de operare și întreținere completă pentru căi ferate inteligente de mare viteză și căi ferate inteligente. Se oferă astfel un sprijin important industriei feroviare pentru a realiza transformarea digitală și inteligentă.

Noua teorie a matricei îmbunătățește și mai mult performanța sistemului de comunicații mobile de nouă generație a căii ferate prin introducerea mai multor grade de libertate. De exemplu, trenurile de mare viteză vor determina utilizatorii să schimbe frecvent celulele într-o perioadă scurtă de timp, ceea ce duce la o scădere a calității recepției semnalului. După introducerea tehnologiei Massive Multiple Input Multiple Output (Massive MIMO) [24], rata maximă de transfer și rata medie de transfer a celulelor de-a lungul căii ferate vor fi considerabil îmbunătățite. Pe această bază, sistemul distribuit Massive MIMO introduce o colaborare inteligentă între mai multe noduri distribuite de-a lungul căii ferate pentru a realiza planificarea comună a resurselor și transmiterea comună a datelor, elimină eficient interferențele, îmbunătățește calitatea semnalelor primite și oferă utilizatorilor din tren servicii stabile și de încredere. Ca o extensie a sistemelor Massive MIMO, metasuprafețele inteligente (RIS, cunoscute și sub numele de suprafețe inteligente mari (LIS)) pot controla undele electromagnetice prin rețele de metasuprafețe pasive la scară largă. Dacă teoria sistemului și tehnologiile cheie care utilizează RIS sau LIS pentru a controla diferite mecanisme de propagare a undelor radio pot fi dezvoltate pe baza caracteristicilor scenariilor feroviare, eficiența spectrului și acoperirea noii generații de sisteme de comunicații mobile feroviare vor fi îmbunătățite, iar puterea sistemului și consumul va fi redus semnificativ.

În prezent, unitățile trenurilor sunt fabricate în principal din aliaje, care au un efect

puternic de ecranare asupra undelor electromagnetice [25], ceea ce face ca acoperirea fără fir în vagoane să se confrunte cu provocări severe. În septembrie 2018, la Expoziția Internațională de Tehnologie de Tranzit Feroviar de la Berlin (InnoTrans 2018) desfășurată în Germania, CRRC Corporation Limited a lansat oficial noua generație de vehicule de metrou din fibră de carbon CETROVO [26]. În comparație cu trenurile realizate din materiale tradiționale, cum ar fi oțelul și aliajul de aluminiu, greutatea CETROVO este redusă cu 13%. Se poate observa că proporția noilor materiale compozite construite din fibră de carbon, fibră de sticlă etc. pe trenuri va continua să crească în viitor.

Dacă mecanismul de interacțiune și regulile dintre proprietățile fizice și proprietățile electromagnetice ale materialului (cum ar fi constanta dielectrică relativă, conductivitatea, coeficientul de împrăștiere, indicele de împrăștiere, pierderile de transmisie etc.) sunt pe deplin luate în considerare în timpul procesului de proiectare a noilor materiale de construcție a trenurilor, acesta e baza siguranței, confortului, economisirii energiei și protecției mediului, să îmbunătățească aspectul trenurilor, interacțiunea, comunicarea, percepția și alte capacități și să consolideze rolul noilor materiale de construcție a trenurilor în dezvoltarea transportului feroviar inteligent.

2.2. Nivelul aplicațiilor tehnologice

În această secțiune se va introduce grupul tehnologic „Great Intelligence Moves Cloud Things” [27], constând din date mari, inteligență artificială (AI), comunicații mobile 5G, cloud computing și Internet of Things și modul în care tehnologia blockchain împuternicește sistemul de comunicații mobile de nouă generație al căilor ferate, oferă servicii de înaltă calitate și garanții pentru siguranța exploatarea trenurilor, și întreținere, construcție și siguranța în construcție etc.

Tehnologia Big Data se referă în principal la tehnologia de colectare, analiză, procesare și aplicare a datelor masive. Cu sprijinul tehnologiei de date mari, inteligența artificială (AI) poate fi utilizată pentru a analiza în mod inteligent datele de detectare cum ar fi șinele și terasamentul, pentru a monitoriza, controla și prezice dinamic indicatorii cheie, promovând astfel dezvoltarea inteligenței a căii ferate de mare viteză.

Introducerea AI în toate aspectele sistemului de comunicații fără fir poate ajuta la rezolvarea problemelor existente în sistemul de comunicații fără fir și poate îmbunătăți considerabil performanța sistemului de comunicații fără fir [28]. De exemplu, detectarea inteligentă bazată pe viziune necesită suport de transmisie video de înaltă definiție multicanal. Cu toate acestea, lățimea de bandă actuală a căii ferate este redusă, iar transmisiile de sistem tradiționale sunt în mare parte videoclipuri de joasă definiție, care nu pot satisface nevoile de detectare inteligentă. Introducerea tehnologiei AI poate îmbunătăți imaginile cu rezoluție scăzută, ocupând în același timp aceleași resurse de lățime de bandă. Sistemul de comunicare inteligentă de linie primește rezoluție de imagine, realizează transmisia video de înaltă definiție cu lățime de bandă redusă, îmbunătățește considerabil acuratețea detectării și realizează detectarea de înaltă precizie a intruziunilor feroviare ale sistemului.

Tehnologia de comunicații mobile 5G poate atinge lățime de bandă mare, latență scăzută și IoT masiv și poate îmbunătăți sistemul. Există probleme precum rețea instabilă, viteza redusă a rețelei și semnal slab în comunicațiile feroviare de mare viteză, astfel încât să putem oferi călătorilor servicii mai bune. Tehnologia undelor milimetrice [29] introdusă de 5G are mai multe resurse de lățime de bandă, ceea ce poate rezolva problema actuală a congestiei în benzile de frecvență sub 6 GHz, poate crește rata de transmisie și poate reduce latența.

Super-puterea de calcul a cloud computing-ului poate rezolva problemele de calcul și stocare într-o manieră centralizată și poate îmbunătăți eficiența comunicării [30]. Integrarea

tehnologiei cloud computing și a sistemelor de comunicații mobile pentru calea ferată de mare viteză poate procesa datele mai rapid, poate înțelege starea de funcționare a trenurilor, poate detecta defecțiunile la timp și le poate gestiona rapid, jucând un rol important de sprijin în calea ferată inteligentă de mare viteză.

În scenariile feroviare de mare viteză, există multe facilități și sarcini grele care trebuie întreținute. Introducerea tehnologiei Internet of Things este foarte benefică deoarece prin intermediul acesteia se pot colecta informații despre starea diferitelor tipuri de echipamente și se pot transmite informațiile înapoi către platforma de operare pentru procesare, astfel încât să se atingă scopul de a supraveghea inteligent diverse tipuri de echipamente în tranzitul feroviar. Astfel se răspunde nevoilor de monitorizare și control în timp real și reparații și întreținere de la distanță a operațiunilor feroviare inteligente de mare viteză [31].

Caracteristicile de descentralizare și de nemodificare ale blockchain-ului pot oferi garanții pentru securitatea datelor în sistemul de comunicații mobile de nouă generație al căii ferate. De exemplu, tehnologia Internet of Things în comunicațiile feroviare inteligente de mare viteză transmite și procesează datele la nivelul rețelei. Stocarea datelor pe nodurile blockchain poate asigura integritatea, confidențialitatea și autenticitatea acestor informații de date.

2.3. Nivelul ingineriei

Indicatorii cheie de performanță (KPI) și conceptele de bază ale designului ingineresc sunt similare cu 5G. KPI-urile noilor generații de proiectare a sistemului de comunicații mobile feroviare includ: rata medie a terminalului care este de 10 ~ 100 Mbit/s (luând în considerare lățimea de bandă a rețelei de 10 MHz.), iar rata de vârf a terminalului ajunge la 200 Mbit/s (luând în considerare lățimea de bandă a rețelei de 10 MHz), densitatea conexiunii fără fir ajunge la 1×10^4 conexiuni fără fir pe kilometru, întârzierea de la capăt la altul este de ordinul milisecundelor, iar eficiența energetică a rețelei este de 10 ori îmbunătățită în comparație cu 4G, acceptând viteza feroviară de mare viteză de 500 km/h. Proiectarea noii generații de sisteme de comunicații mobile feroviare va lua ca nucleu comanda de dispecerizare inteligentă și controlul trenului și va stabili „gestionabil, controlabil, credibil, vizibil, fiabil și măsurabil” din sursa de proiectare inginerescă.

Șase concepte majore acceptă aplicații feroviare inteligente de mare viteză/căi ferate inteligente, cum ar fi construcții inteligente, echipamente inteligente, operațiuni inteligente, călătorii inteligente și logistică inteligentă, ținând cont de colaborarea inteligentă cu alte rețele de comunicații pentru a obține un serviciu complet, un scenariu complet, legătură completă și integrare puternică de securitate.

Planificarea și optimizarea rețelei fără fir precise și eficiente sunt garanții importante pentru construcția și dezvoltarea de înaltă calitate a sistemelor de comunicații mobile. Planificarea rețelei fără fir existente se bazează pe evaluarea manuală și pe modele empirice de pierdere de propagare, iar optimizarea rețelei se bazează pe teste repetate de unitate și depanare manuală izolate unele de altele. Sistemul este fragmentat și incapabil să se coordoneze și să se repete, ceea ce a devenit o problemă cheie comună în construcția, operarea și întreținerea comunicațiilor mobile feroviare. În plus, odată cu determinarea standardelor 5G și apariția construcției de rețele fără fir de frecvență mai mare, noua generație de sisteme de comunicații mobile feroviare se va confrunta cu noi cerințe și provocări în planificarea și optimizarea rețelelor fără fir din noul spectru, noi interfețe aeriene, noi scenarii, etc. Prin urmare, tehnologiile cheie de bază, cum ar fi drepturile de proprietate intelectuală independente, tehnologia de urmărire a razelor de înaltă performanță, complet controlabilă prin cod [32], tehnologia de integrare a planificării și optimizării și tehnologia de planificare inteligentă a rețelei, trebuie depășite urgent pentru a oferi rețele wireless de înaltă calitate pentru noua

generație de sisteme de comunicații mobile feroviare. Acestea oferă un suport important pentru planificare și optimizare.

Tehnologia de fuziune de modelare a informațiilor (BIM) [33] este o tehnologie de expresie digitală pentru modele și informații arhitecturale tridimensionale, iar cea mai proeminentă caracteristică a AR (realitate augmentată) este fuziunea virtuală și reală și funcțiile de interacțiune om-calculator. Tehnologia de integrare a BIM și AR permite inginerilor să aibă o experiență de înaltă calitate și eficiență atunci când se confruntă cu noua generație de sisteme de comunicații mobile feroviare, de la proiectare, construcție și până la managementul operațiunilor și întreținerii, ceea ce ajută la scurtarea timpului proiectului și la asigurarea fiabilității pe toată durata ciclului vieții. În viitor, tehnologia de integrare BIM și AR va crește cu siguranță odată cu îmbunătățirea performanței terminalelor mobile și cu noua generație de comunicații mobile feroviare. Pe măsură ce rețelele de comunicații mobile devin mai populare și mature, ele vor avea un impact profund asupra construcției inteligente a căilor ferate. Probleme precum procesarea ușoară a modelelor BIM, precizia de poziționare în interior și exterior a AR și managementul colaborativ cu mai multe persoane vor fi, de asemenea, provocări considerabile.

Tehnologia Digital Twin [34] este o metodă tehnică care creează digital entități virtuale ale entităților fizice și este utilizată pentru a simula, analiza, verifica, prezice și controla întregul ciclu de viață al entităților fizice.

În timpul perioadei generale de planificare, proiectare și construcție a unei noi căi ferate sau în timpul modernizărilor majore, modelul digital geamăn al proiectului de inginerie poate optimiza proiectarea în funcție de nevoile operaționale și poate reduce riscul de întârzieri sau neconformități ale managementului în perioada de construcție prin simulare.

În plus, modelul digital geamăn al proiectelor de inginerie poate optimiza, de asemenea, logistica de transport și comunicarea în managementul lanțului de aprovizionare, menținând astfel progresul construcției și controlând bugetele de cost.

În plus, un sistem inteligent al creierului unei stații de cale ferată de mare viteză poate fi construit pe baza tehnologiei gemene digitale. La nivelul de colectare a datelor, supravegherea video de înaltă definiție sau tehnologia Internet of Things poate fi utilizată pentru a realiza percepția informațiilor și la procesarea prin fuziune. Stratul, scenariile de funcționare a stației pot fi construite prin model de date de bază, optimizare, luare a deciziilor etc. și, în cele din urmă, realizează funcții de bază, cum ar fi dispecerarea inteligentă și managementul inteligent, îmbunătățesc percepția, analiza și capacitățile de management ale stației și accelerează dezvoltarea căilor ferate inteligente.

3. APLICAREA TEHNOLOGIEI DE COMUNICAȚII MOBILE DE NOUĂ GENERAȚIE ÎN CĂILE FERATE

Această secțiune va introduce aplicațiile actuale și viitoare ale tehnologiei de comunicații mobile de nouă generație în căile ferate, dificultățile și problemele deschise cu care se confruntă în acest proces, precum și cercetarea în acest domeniu.

3.1. Dificultățile tehnologiei de comunicații mobile

Există o contradicție între resursele limitate de frecvență și noile cerințe emergente, pe de o parte pe măsură ce tot mai mulți călători aleg călătoria pe calea ferată, un număr mare de servicii video de înaltă definiție, VR/AR/realitate mixtă (MR) sunt intens concurente. Scenariile feroviare tipice de înaltă densitate, de mare capacitate, pe de altă parte, cu echipamente feroviare inteligente, cum ar fi conducerea autonomă, conexiune virtuală pe orice vreme (vânt,

îngheț, zăpadă, ploaie, ceață, nisip, întuneric, lumină) mediu de detectare. Odată cu dezvoltarea continuă a tehnologiilor cheie, numărul de senzori montați pe vehicule (radar cu unde milimetrice, senzori vizuali etc.) crește rapid, iar datele senzoriale masive trebuie, de asemenea, să fie transmise eficient și fiabil. Se poate observa că dezvoltarea căilor ferate inteligente de mare viteză și a căilor ferate inteligente va genera un număr mare de aplicații cu lățime de bandă intensivă, necesitând mai multe resurse de frecvență pentru a susține transmiterea în timp real a datelor masive. Acest lucru formează o contradicție puternică cu resursele foarte limitate de frecvență ale rețelei de comunicațiilor mobile feroviare.

Prin urmare, trebuie să sortăm și să anticipăm nevoile viitoare ale afacerilor feroviare și nevoile sistemului, să planificăm științific frecvența rețelei private și în același timp, să creștem resursele de frecvență, trebuie să ne concentrăm pe clarificarea caracteristicilor nevoilor afacerii feroviare care nu implică afaceri feroviare de bază. Utilizarea resurselor rețelei publice ar trebui luată în considerare pentru a îmbunătăți capacitățile mobile de interconectare omniprezente ale echipamentelor, infrastructurii și personalului feroviar.

Problema legată de mobilitatea de mare viteză și fiabilitate este că mobilitatea de mare viteză este cea mai distinctivă caracteristică și provocare a comunicațiilor feroviare de mare viteză [35]. Datorită vitezei mari a trenurilor feroviare de mare viteză, efectul Doppler produs va aduce decalaj de frecvență a sistemului de comunicații feroviare de mare viteză, făcând ca semnalul recepționat să fie instabil și performanței rețelei fără fir să se deterioreze. Viteza trenului este mare, iar utilizatorii efectuează frecvent comutarea celulelor și resetarea lor într-o perioadă scurtă de timp. Dacă este selectată, rata de retragere a apelurilor va crește din ce în ce mai mult, ceea ce va crește și sarcina rețelei și va duce la scăderea calității semnalului. Structura complet închisă a șinei de mare viteză va provoca, de asemenea, pierderi serioase de penetrare [36]. Aceste efecte datorate mobilității de mare viteză și ecranării caroseriei va reprezenta o amenințare pentru transmiterea sigură și fiabilă a semnalelor de control al trenului, între tren și sol. Prin urmare, modul de a asigura eficacitatea și fiabilitatea comunicațiilor mobile în condiții de mișcare de mare viteză este un punct dureros pe care sistemul de comunicații feroviare de nouă generație trebuie să îl rezolve urgent. În acest sens, trebuie să studiem metode de estimare a offset-ului de frecvență Doppler precise, eficiente și de complexitate redusă și să folosim tehnologii de corecție și compensare pentru a reduce impactul offset-ului de frecvență, trebuie să proiectăm cu latență scăzută și cu succes ridicat. Tehnologia de comutare a celulelor de înaltă eficiență și strategia de comutare pentru a oferi acces la semnal fără fir continuu, stabil și foarte fiabil pentru utilizatorii de comunicații mobile de mare viteză, trebuie proiectate noi materiale compozite cu constantă dielectrică scăzută pentru a reduce impactul caroseriei metalice asupra semnalelor mobile de comunicare (ecranare numerică).

Provocările aduse de unicitatea clusterelor și scenariilor nodurilor de tranzit feroviar integrat sunt dezvoltarea sistemelor inteligente de tranzit feroviar și promovarea „integrarea a patru rețele” de: căi ferate trunchi, căi ferate interurbane, căi ferate urbane (suburbane) și tranzit feroviar urban. Clusterul cuprinzător al nodului de transport feroviar este punctul cheie în dezvoltarea integrării în patru rețele, care va maximiza transferul eficient, conexiunea fără întreruperi și circulația convenabilă a oamenilor, logistica, fluxul de capital și fluxul de informații în transportul tridimensional complet în rețea. Aceasta înseamnă că clusterul cuprinzător al nodului de tranzit feroviar va fi un loc dens de adunare pentru mai multe moduri de transport, mai multe sisteme de comunicații și mai multe rețele fără fir și va deveni o zonă super hotspot pentru concurența masivă a afacerilor. Cea mai mare dificultate în dezvoltarea inteligentă a clusterelor de hub-uri de tranzit feroviar integrat va fi modul de a face față interferențelor severe dintre mai multe sisteme de comunicații fără fir și între diferiți utilizatori din cadrul sistemului de comunicații fără fir, cauzate de resursele de frecvență insuficiente, precum și de degradarea corespunzătoare a performanței rețelei. și transmiterea datelor, cum ar

fi fiabilitatea redusă. În plus, scena feroviară este complexă și distinctă, incluzând structuri speciale și neregulate, cum ar fi gări, tuneluri, cadre de tracțiune electrică, încrucișări, poduri și găuri deschise. În plus, fluxul dens de oameni, logistică și vehicule cluster hub de tranzit feroviar integrat, determinând propagarea undelor radio să prezinte caracteristici unice de pierdere și are un grad ridicat de eterogenitate spațială și dependență de frecvență. Acest lucru face dificil ca modelele empirice sau analitice de propagare a undelor radio utilizate îndelung să reprezinte cu acuratețe scenariu feroviar, în special propagarea undelor radio și caracteristicile canalului în clusterelor de hub de tranzit feroviar integrat. Prin urmare, noua generație de sisteme de comunicații mobile feroviare trebuie să depășească tehnologiile de bază, cum ar fi tehnologia de înaltă performanță de urmărire a razei [8], tehnologia de integrare de planificare și optimizare și tehnologia inteligentă de eliminare a interferențelor și să integreze planificarea și optimizarea rețelei fără fir de înaltă calitate, în cluster cuprinzătoare de noduri de tranzit feroviar, în procesul de proiectare, construcție, operare și întreținere, pentru a face față provocărilor aduse de unicitatea clusterelor și scenariilor integrate de noduri de tranzit feroviar.

3.2. Coexistența rețelelor publice și rețelelor private

Datorită resurselor limitate de frecvență ale rețelelor feroviare private pe rețele de coexistență public-privat, pe viitor, serviciile feroviare care au cerințe relativ scăzute de securitate, fiabilitate etc. pot lua în considerare utilizarea rețelei publice 5G a operatorului pentru a le utiliza. În ceea ce privește coexistența rețelelor publice și rețelelor private, există aproximativ trei rețele. Prima cale este coexistența tehnologiilor eterogene, adică utilizarea diferitelor arhitecturi și tehnologii diferite pentru a se dezvolta în aceeași direcție de afaceri. A doua cale este coexistența tehnologiilor omogene, adică sistemele tehnologice de bază utilizate de rețelele publice și rețelele private sunt aceleași. Sistemele tehnologice GSM-R și LTE-R dezvoltate de calea ferată sunt integrarea izomorfă a tehnologiilor feroviare [37] și Global System for Mobile Communications (GSM) și Long Term Evolution (LTE). În timpul acestui proces, calea ferată a fost transformată și optimizată de multe ori pentru a crea un sistem potrivit pentru propriile nevoi speciale de dezvoltare. Al treilea tip de rețea este coexistența nivelului operațional și a nivelului de afaceri. De exemplu, căile ferate vor folosi direct tehnologia rețelei publice pentru a furniza servicii în unele zone. Vor exista aceste trei forme, printre care coexistența omogenă poate fi mai favorizată de industrie și poate asigura mai bine securitatea informațională a rețelelor de comunicații.

Sistemul de comunicații mobile de prima generație trebuie să aibă capacitatea de a coopera cu alte rețele. Wi-Fi 6 poate fi un supliment eficient pentru rețeaua de comunicații mobile de nouă generație a căii ferate în scenarii de viteză redusă și poate fi aplicat scenariilor de afaceri cum ar fi VR/AR, transportului feroviar, operațiunile din stație, educație și formare și asistență AI [38]. Bazat pe tehnologia de poziționare Beidou [39], combinată cu funcțiile de poziționare interioare și exterioare ale rețelei de comunicații mobile de nouă generație a căii ferate, este posibil să se obțină o poziționare feroviară pe toată suprafața care să răspundă nevoilor de poziționare ale diferitelor scenarii, cum ar fi zone deschise și tuneluri. Rețeaua de comunicații prin satelit poate fi utilizată ca o rețea de rezervă pentru rețeaua de comunicații mobile de nouă generație a căii ferate, ajutând la crearea unei rețele de comunicații feroviare care să integreze aerul, spațiul și solul pentru a obține o acoperire completă a comunicațiilor feroviare regulate, comunicațiilor de urgență, comunicării temporare de construcție și altele scenarii. Crearea o rețea de transmisie feroviară dedicată de la tren la sol bazată pe spectrul de unde milimetrice de 60 GHz, care poate realiza încărcare și descărcare de date la bord de viteză ultra-înaltă, realizarea descărcării de mare viteză a căii ferate 6A, 6C și altele, datele la bord și

datele video de la bordul Serviciului de informare a călătorilor, livrare de mare viteză. Comunicația de rețea fixă de generația a 5-a (F5G) este un supliment al rețelei de comunicații mobile de nouă generație a căii ferate. Combinarea avantajelor masive de conectare ale F5G și a rețelei de comunicații mobile de nouă generație a căii ferate va ajuta la construirea în comun a fundației pentru conectarea diferitelor profesii feroviare și la construirea unei lumi inteligente în care totul este conectat în calea ferată. Tehnologiile mobile IoT, cum ar fi Narrowband IoT (NB-IoT) completează noua generație de comunicații mobile feroviare IoT și pot realiza interconectarea și percepția infrastructurii feroviare, a echipamentelor mobile, a componentelor cheie, a mărfurilor și a personalului etc.

CONCLUZII

Calea ferată este o infrastructură majoră strategică națională, și critică și un motor major al economiei naționale. Joacă un rol crucial în dezvoltarea economică și socială, precum și în proiecte majore de trai și coloana vertebrală a sistemului de transport.

Dezvoltarea căii ferate inteligente de mare viteză/căi ferate inteligente este un proiect de sistem complex care necesită desfășurarea lanțurilor de inovație în jurul lanțului industrial compus din strat de detectare inteligent, strat de transmisie inteligent, strat de resurse de date, strat de decizie inteligentă, strat de aplicație inteligentă. etc. și cercetarea științifică țintită, cercetarea științifică și tehnologică și formarea de noi talente.

Promovarea lanțului de inovare pentru a servi în mod eficient lanțul industrial, în același timp, trebuie stabilit, de asemenea, lanțul industrial în jurul lanțului de inovare pentru a obține transferul rapid și transformarea noii generații de rezultate de inovare în tehnologia informației și comunicațiilor și promovarea; transformarea și modernizarea structurii industriei feroviare. Lanțul de inovare și lanțul industrial se susțin reciproc și formează un nou impuls pentru a promova dezvoltarea de înaltă calitate a căilor ferate. Dezvoltarea durabilă a lanțului industrial necesită un ecosistem armonios. O nouă generație de mobilitate pentru căile ferate.

În ceea ce privește dezvoltarea comunicațiilor, un ecosistem armonios ar trebui să se refere la respectarea principiilor deschiderii, ordinii, cooperării și dezvoltării, crearea unui mediu ecologic mai bun pentru dezvoltarea digitală și inteligentă a industriei feroviare, permițând tuturor membrilor să coexiste. și să prospere și, în cele din urmă, să realizeze o dezvoltare armonioasă a întregului lanț și a întregului sistem. Pentru a crea un lanț de inovare, un lanț industrial și un lanț valoric profund integrat și pentru a promova integrarea profundă a tehnologiei informației și comunicațiilor de nouă generație cu căile ferate, cercetarea și dezvoltarea tehnologiei de comunicații mobile de nouă generație pentru căile ferate are un drum foarte lung de parcurs.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **T. Wang**, „*The intelligent Beijing–Zhangjiakou high-speed railway*”, Engineering, vol. 7(12), 2021, pp. 1665-1672.
- [2] **W.A.N.G. Yang**, „*Study on safety evaluation of CTCS-3 level train control system based on IEC62425*”, China Safety Science Journal 29.S1 (2019): 81.
- [3] **R. He, B. Ai, G. Wang, K. Guan, Z. Zhong, A.F. Molisch, ... & Oestges**, „*High-speed railway communications: From GSM-R to LTE-R*”, Ieee vehicular technology magazine, 2016, vol. 11(3), pp. 49-58.
- [4] **S. Scheffer, A. Martinetti, R. Damgrave, S. Thiede, & L. van Dongen**, „*How to make augmented reality a tool for railway maintenance operations: operator 4.0 perspective*”, Applied Sciences, 2021, vol. 11(6), 2656.

- [5] **B. Ai, A.F. Molisch, M. Rupp, et al.**, „5G key technologies for smart railways”, Proceedings of the IEEE, 2020, 108(6): 856-893. DOI: 10.1109/JPROC.2020.2988595
- [6] **S.C.S.G. Martins, Susana**, „Technology Assessment and High-Speed Trains: Facing the Challenge of Emergent Digital Society”, Diss. Universidade NOVA de Lisboa (Portugal), 2017.
- [7] **J. Hu, G. Liu, Y.Li., Z. Ma, W. Wang, C. Liang, ..., & P. Fan**, „Challenges and opportunities”, IEEE Communications Magazine, 2022, vol. 60(10), pp. 64-70.
- [8] **H. Feng, S. Li, X. Ma, & M. Xu**, „Development of 5G-R System in Chinese Railway”, In 2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC) (pp. 950-954). IEEE.
- [9] **P. Sun**, „5G Development Around the Globe”, In A Guidebook for 5GtoB and 6G Vision for Deep Convergence 2023, (pp. 9-52). Singapore: Springer Nature Singapore.
- [10] **A. Neacșa, D.B. Stoica**, „Aspects concerning the software applications in order to determine the technological systems reliability”, MOCM The 13th International Conference of Fracture Mechanics, 4 (13), 2007.
- [11] **A. Neacșa, N.N. Antonescu, D.B. Stoica**, „Software Applications for Complex Technological Systems Reliability”, Journal of the Balkan Tribological Association, 15 (1), 2009.
- [12] **A. Neacșa, N.N. Antonescu, D.B. Stoica**, „Modern Solutions for Selecting the Corresponding Machinery Dedicated to Technological Applications”, Journal of the Balkan Tribological
- [13] **A. Neacșa, D.B. Stoica, N.N. Antonescu**, „Studies on the Use of Implemented Databases on Web Platforms in Order to Verify Machines Compatibility with Working Conditions”, Journal of the Balkan Tribological Association, 18 (4), 2014.
- [14] **A. Badea, G. Popa, I.A. Muntean, M. Vălu, C.N. Badea, G. Dumitru**, „Sisteme de comunicații radio pentru controlul trenurilor bazat pe comunicații-CBTC”, Synthesis of Theoretical & Applied Mechanics/Sinteze de Mecanica Teoretica si Aplicata, 2020, 11. Jg., Nr. 4.
- [15] **C.N. Eparu, A. Neacșa, A.P. Prundurel, R. Rădulescu, C. Slujitoru, N. Toma, M. Nițulescu**, „Analysis of a high-pressure screw compressor performances”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 595 (1), 2010.
- [16] **C.N. Eparu, S. Neacșu, A. Neacșa, A.P. Prundurel**, „The comparative thermodynamic analysis of compressor's energetic performance”, Mathematical Modelling of Engineering Problems, 6 (1), 2019.
- [17] **C.N. Eparu, S. Neacșu, A. Neacșa**, „Correlation of Gas Quality with Hydrodynamic Parameters in Transmission Networks”, MATEC Web of Conferences, 290 (1), 2019.
- [18] **C.N. Eparu, S. Neacșu, A.P. Prundurel, R. Rădulescu, A. Neacșa**, „Behaviour of transmission and distribution networks with big consumption, the stress test”, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 595 (1), 2019.
- [19] **R. Chen, W.X. Long, G. Mao, & C. Li**, „Development trends of mobile communication systems for railways”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, 20(4), 3131-3141.
- [20] **Y. Ma, G. Ma, N. Wang, Z. Zhong, J. Yuan, & B. Ai**, „Enabling OTFS-TSMA for smart railways mMTC over LEO satellite: A differential Doppler shift perspective”, IEEE Internet of Things Journal, 2022, 10(6), 4799-4814.
- [21] **A. Slalmi, H. Chaibi, A. Chehri, R. Saadane, G. Jeon, & N. Hakem**, „On the ultra-reliable and low-latency communications for tactile internet in 5G era”, Procedia Computer Science, 2020, 176, 3853-3862.
- [22] **B. Ai, X. Cheng, T. Kürner, Z.D. Zhong, K. Guan, R.S. He, ... & C. Briso-Rodriguez**, „Challenges toward wireless communications for high-speed railway”, IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2014, vol. 15(5), pp. 2143-2158.
- [23] **P. Singh, M.A. Dulebenets, J. Pasha, E.D.S. Gonzalez, Y.Y. Lau, & R. Kampmann**, „Deployment of autonomous trains in rail transportation: Current trends and existing challenges”, 2021, IEEE access, 9, pp. 91427-91461.
- [24] **B. Ai, J. Zhang, R. He, et al.**, „5G basic theory and key technologies for intelligent high-speed rail services and applications”, Science Foundation of China, 2020, 34(2): pp.133-141
- [25] **R. Pandey, S. Tekumalla, & M. Gupta**, „EMI shielding of metals, alloys, and composites. In Materials for potential EMI shielding applications”, 2020, pp. 341-355, Elsevier.

- [26] **J.M. Im, & K.B. Shin**, „*Technology of Light Weight Railway Vehicle using Composite Materials*”, International Journal of Railway, 2019, 12(2), 23-27.
- [27] **Q.Y. Li, Z.D. Zhong, M. Liu, & W.W. Fang**, „*Smart railway based on the Internet of Things*”, In Big data analytics for sensor-network collected intelligence, 2017, pp. 280-297, Academic Press.
- [28] **J.K. Zhu, G. Chen, S.H. Zhang, et al.**, „*Foundation study on wireless big data: concept, mining, learning and practices*”, China communications, 2018, 15(12): pp. 1-15.
- [29] **W. Hong, Z.H. Jiang, C. Yu et al.**, „*The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications*”, IEEE journal of microwaves, 2021, 1(1): 101-122. DOI: 10.1109/JMW.2020.3035541.
- [30] **Academia Chinei de Tehnologie Informației și Comunicațiilor**, „*Cartea Albă pentru Dezvoltarea Cloud Computing [R]* ”, 2020.
- [31] **B. Ai, G. Ma, Z. Zhong**, „*5G technology and applications in intelligent high-speed rail [J]. ZTE Communications Technology*”, 2019, 25(6): 42-47+54. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906007 [32]
- [33] **W. Xia, Y. Zheng, L. Huang, & Z. Liu**, „*Integration of building information modeling (BIM) and big data in China: recent application and future perspective. Buildings*”, 2023, vol. 13(10), 2435.
- [34] **Y. Gao, S. Qian, Z. Li, P. Wang, F. Wang, & Q. He**, „*Digital twin and its application in transportation infrastructure*”, 2021, IEEE 1st International Conference on Digital Twins and Parallel Intelligence (DTPI) (pp. 298-301). IEEE.
- [35] **H. Wei**, „*Analysis of key technologies for intelligent optimization of high-speed rail lines*”, (2020-03-25)[2021-06-20].
- [36] **K. Wang Kai**, „*5G high-speed rail coverage, creating broadband information channels for high-speed rail transit*”, (2020-05-14)[2021-06-20].
- [37] **B. Sun, Y. Guo, Y. Yu, J. Liu, B. Ai, Z. Zhong, & W. Wang**, „*Reliability Analysis of CTCS-3 Train-Ground Communication System Based on 5G-R*”, 2023, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72(10), pp. 12927-12940.
- [38] **A. Badea, G. Popa, A.I. Muntean, V.M. Popa, C. Bibire, G. Dumitru**, „*Evaluarea siguranței sistemelor de supraveghere și control a trenurilor bazate pe comunicații (CBTC)*”, Sinteze de Mecanică Teoretică și Aplicată, Volumul 12 (2021), Numărul 2, Editura Matrix Rom, pp. 103-116.
- [39] **J. Liu, B. Cai, & J. Wang**, „*An analysis of BeiDou Navigation Satellite System (BDS) based positioning for train collision early warning*”, 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), pp. 1065-1070, IEEE.