

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

RADIO COMMUNICATION SYSTEMS FOR COMMUNICATIONS-BASED TRAIN CONTROL - CBTC

Alexandru BADEA¹, Gabriel POPA², Ioan Adrian MUNTEAN³,
Monica VĂLU⁴, Claudiu-Nicolae BADEA⁵, George DUMITRU⁶

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

²Universitatea Politehnica București, Splaiul Independenței nr. 313, București, România
e-mail autor: Gabriel POPA: gabi21popa@yahoo.com

^{3,4,5,6}Autoritatea Feroviară Română - Calea Griviței nr. 393, sectorul 1, București, România
e-mail autor: Ioan Adrian MUNTEAN: adrianmuntean67@yahoo.com; Monica VĂLU,
mmonicavalu@yahoo.com; Claudiu-Nicolae BADEA, badeaclaudiun@gmail.com,
George DUMITRU, george.dumitru.cfr@gmail.com,

Rezumat: *Lucrarea reprezintă un studiu asupra sistemului de control al trenului bazat pe comunicații (CBTC) este un sistem automatizat de control al trenurilor care utilizează comunicații bidirecționale tren-sol pentru a asigura funcționarea în siguranță a vehiculelor feroviare. Sistemele CBTC au cerințe stricte pentru disponibilitatea și latența comunicațiilor. Majoritatea sistemelor de comunicații tren-sol CBTC existente funcționează în modul infrastructură fără comunicații tren - tren. Din cauza absenței unui nivel ridicat de siguranță în transferul comunicațiilor fără fir care sunt nesigure și a riscurilor frecvente privind afectarea calității și a conținutului datelor transmise, sistemele CBTC existente pot afecta grav performanța controlului trenului, eficiența funcționării trenului și utilitatea căii ferate. Sistemele CBTC prezintă un nivel ridicat de cerințe stricte pentru comunicațiile dintre tren și infrastructura feroviară, deoarece sistemul de control al trenului depinde de datele exacte, în timp util și fiabile prin legăturile de comunicații. Cu toate acestea, întrucât „WLAN”-urile nu sunt inițial concepute pentru medii cu mobilitate ridicată, întârzierea și pierderile aleatorii ale pachetelor sunt inevitabile în sistemele CBTC bazate pe „WLAN - Wireless Local Area Network (Rețea locală fără fir)”, ceea ce ar putea duce la tracțiune inutilă, frânare sau chiar frânare de urgență a trenurilor, pierderi de capacitate a liniei și insatisfacția pasagerilor.*
Cuvinte cheie: *bloc, comunicații, radio, secțiune, semnal, tren.*

Abstract : *The paper is a study of the communication-based train control system (CBTC) is an automated train control system that uses two-way train-ground communications to ensure the safe operation of railway vehicles. CBTC systems have strict requirements for the availability and latency of communications. Most existing CBTC ground-to-ground communications*

systems operate in infrastructure without train-to-train communications. Due to the lack of a high level of security in the transfer of unsafe wireless communications and the frequent risks of affecting the quality and content of transmitted data, existing CBTC systems can seriously affect train control performance, train efficiency and railway utility. CBTC systems have a high level of strict requirements for train-to-rail communications, as the train control system depends on accurate, timely and reliable data through communications links. However, as "WLANs" are not originally designed for high mobility environments, delay and random packet loss are unavoidable in "WLAN" -based CBTC systems, which could lead to unnecessary traction, braking or even braking. train emergencies, line capacity losses and passenger dissatisfaction.

Keywords: block, communications, radio, section, signal, train.

1. INTRODUCERE

Radioul a fost folosit pentru comunicarea vocală de către căile ferate de zeci de ani. Recent, comunicațiile fără fir au fost considerate de industria feroviară ca fiind capabile să îndeplinească mai multe funcții. În această lucrare se analizează unele dintre aplicațiile disponibile astăzi, cum ar fi transmiterea datelor pentru monitorizare și controlul traficului, informații vitale, semnalizarea, funcționarea automată a trenului și controlul frânelor și comunicațiile video. Disponibilitatea transmisiei radio digitale este recunoscută drept principalul motiv al acestei revoluții a comunicațiilor.

Adoptarea sistemelor CBTC care utilizează comunicații radio pentru controlul trenurilor a fost încurajată de sistemele feroviare din întreaga lume în ultimii ani, permițând o funcționare mai eficientă decât sistemele de semnalizare convenționale, precum și economii semnificative de întreținere și reduceri ale cantității de echipamente necesare.

Obiectivul principal al sistemului CBTC este de a crește capacitatea liniei prin reducerea intervalului de timp între trenuri. Având ca obiectiv principal creșterea performanțelor (cazul de față procesul de circulație a trenurilor), optimizarea proceselor se face folosind algoritmi specializați universal valabili în toate domeniile tehnice [1].

Sistemele tradiționale de semnalizare detectează trenurile în secțiuni discrete ale căii denumite „blocuri”, fiecare fiind protejat de semnale care împiedică intrarea unui tren într-un bloc ocupat. Deoarece fiecare bloc este o secțiune fixă de cale, aceste sisteme sunt denumite sisteme de blocuri fixe (automate).

Într-un astfel de sistem, în care componentele sunt modelate prin blocuri în mișcare (CBTC), pentru fiecare tren reprezentarea fiind de tip „bloc” care se deplasează, este trasată secțiunea protejată/monitorizată din spatele acestuia, asigurându-se astfel schematizarea comunicării continue a poziției exacte a trenului prin radio, buclă inductivă etc. la un sistem centralizat de supraveghere în timp real, on-line [2], [3].

2. SISTEMUL DE UTILIZARE ÎN CBTC

În CBTC, comunicația radio continuă, de mare capacitate, este utilizată pentru schimbul de informații de control al trenului între tren și marginea căii de rulare, permițând funcțiile de control automat al trenului (ATC), și anume protecția automată a trenului (ATP) și funcționarea automată a trenului (ATO).

Trenul trimite în mod continuu viteza, direcția și locația curentă către marginea căii de rulare prin conexiunea radio. Pe baza acestor informații primite de la toate trenurile aflate în în acel moment pe cale, precum și a capacităților de frânare a unui tren, centrul de control al

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

traficului de la marginea căii de rulare calculează viteza maximă și distanța care trenului îi este permis să o parcurgă, și transmite aceste informații la tren. Pe baza acestor informații, echipamentul ATC de la bord reglează continuu viteza trenului și menține distanța de siguranță față de trenul din față. Datorită acestui schimb de informații în timp real, echipamentele de cale utilizate în sistemele convenționale, cum ar fi semnalele luminoase colorate și circuitele de cale, nu sunt necesare și pot fi îndepărtate.

Viteza și locația unui tren sunt determinate folosind o combinație de dispozitive precum vitezometre, tahometre, transpondere („balize”), radar doppler, contoare și sisteme de geolocalizare precum sistemul de poziționare globală (GPS) [4]. Precizia locației, în special, este extrem de critică. Balizele sunt puncte de referință fixe montate între șine. Pe măsură ce un tren trece deasupra unei balize, informațiile de localizare sunt transmise de la balize la tren folosind o antenă montată sub tren. Între balize, locația este continuă estimată utilizând măsurători de odometrie la bord. Orice inexactitate acumulată la distanță este corectată atunci când trenul trece de următoarea baliză [4]. Standardul IEEE CBTC recomandă o precizie a locației de la 5 la 10 metri [5]. Există o serie de probleme asociate cu utilizarea unui sistem de geolocalizare, cum ar fi GPS, ca mijloc principal de localizare. Precizia de localizare a sistemelor de geolocalizare ar putea să nu fie suficient de mare, de exemplu pentru a diferenția trenurile care circulă strâns între ele. Semnalele din satelit nu pot fi recepționate în mod fiabil în interiorul tunelurilor. Mai mult, furnizorii CBTC sunt, în general, reticenți să depindă de un sistem care este controlat de o autoritate externă. Prin urmare, utilizarea unui sistem de geolocalizare în CBTC este în mod normal suplimentar.

În semnalizarea feroviară convențională, liniile sunt împărțite în blocuri de linie automată (sau „secțiuni de cale”), iar circuitele de cale sunt instalate pentru a determina dacă un tren se află în interiorul unui bloc. Fiecare bloc este protejat de un semnal. Diverși factori dictează lungimea blocului, inclusiv cât de ocupată este linia, viteza maximă permisă pe acea linie, viteza maximă și capacitățile de frânare ale diferitelor trenuri, observarea, etc. Când un tren se află într-un bloc, deoarece nu există metoda în timp real pentru a determina locația sa exactă în interiorul blocului, întregul bloc este declarat ca fiind ocupat, iar alte trenuri nu au voie să intre în el. Deoarece limitele acestor blocuri sunt fixe, indiferent de viteza și capacitatea de frânare a unui anumit tren și sunt consolidate în continuare de circuite de cale, acest tip de operație se numește „operație de bloc fix” [4], [6].

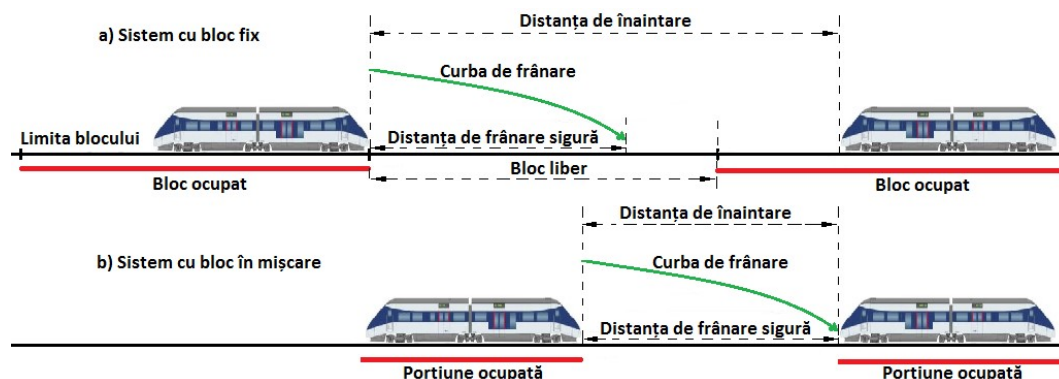


Fig. 1. Distanța de frânare sigură între trenurile din blocurile fixe și sistemul cu bloc în mișcare

În schimb, în „operațiunea de blocare în mișcare” utilizată în CBTC, grație comunicării în timp real între tren și marginea căii, locația trenului este actualizată continuu [3], [6], [7]. Ca urmare, zona de ocupare sau blocul se „deplasează” odată cu trenul și reflectă locația sa reală. Nu există limite fixe ale blocurilor. Așa cum se arată în figura 1, acest lucru permite trenurilor să circule mai aproape unul de celălalt.

Comunicarea radio este în general nesigură. Proiectarea unui sistem fiabil de control al trenului prin intermediul unei legături radio nesigure este o sarcină provocatoare. În sistemele de semnalizare convenționale, distanța dintre trenuri care se succed este mare, așa cum se poate observa în figura 1. Astfel, un anumit număr de erori de comunicare poate fi tolerat. Cu toate acestea, în CBTC, avansurile sunt foarte scurte, ceea ce înseamnă că, în cazul unei defecțiuni de comunicare, un tren ar putea să nu primească la timp locația trenului din fața acestuia. În această situație, o abordare tipică în sistemele CBTC este de a aplica frânarea de urgență și apoi de a le acționa în modul manual. În cel mai rău caz, aceasta ar putea declanșa o reacție în lanț cu următoarele trenuri, urmând ca toate să se oprească [8], [9].

Intervalul de expirare înainte de aplicarea frânării de urgență variază de la proiect la proiect, în funcție de mai mulți factori, inclusiv de frecvența mesajelor de control CBTC. O valoare estimată este între 5 și 10 secunde.

În comparație cu sistemele convenționale de control al trenurilor, în CBTC, responsabilitatea de a determina locația unui tren a fost mutată de pe circuitul de cale ferată în responsabilitatea trenului însuși [6].

Această determinare a locației centrată pe tren are ca rezultat o certitudine mai mică. Anterior, locația trenului era determinată de marginea căii de rulare (cu ajutorul unui circuit de cale), independent de tren. În plus, proiectarea defectuoasă a circuitelor de cale a însemnat că o defecțiune a fost interpretată ca o prezență a trenului. Cu toate acestea, în CBTC, marginea căii de rulare depinde de tren pentru a obține informații despre locație, care la rândul lor depinde de comunicația radio [10]. Prin urmare, eșecul legăturii de comunicații radio este extrem de critic pentru un sistem funcțional CBTC.

Din aceste motive, sistemele CBTC alocă în mod normal o „marjă de protecție” fixă la calcularea distanței de frânare în condiții de siguranță [5]. În plus, sistemele CBTC folosesc în mod normal o metodă convențională de detectare a trenurilor ca alternativă, pentru determinarea locației în cazul unei defecțiuni a comunicațiilor radio, precum și pentru trenurile non-CBTC care funcționează concomitent cu trenurile CBTC [6]. Aceasta este, de asemenea, o cerință a standardului IEEE CBTC.

Eșecurile comunicării radio duc la erori de transmisie și o mare latență de predarea informației, rezultând întârzieri și pierderi de pachete [9].

Dimensiunea tipică a unui mesaj de control CBTC este de 400 - 500 biți. În mod normal, este acceptat un timp de transmitere a mesajelor mai mic de 100 de milisecunde. Având în vedere că frecvența tipică a acestor mesaje este de aproximativ 100-600 de milisecunde, cerințele de date pentru un sistem CBTC sunt de obicei cuprinse între 20-40 kbps și nu mai mult de 100 kbps [8].

Componentele majore ale unui sistem tipic CBTC, precum și rețeaua de comunicații bidirecțională care conectează trenul și marginea căii de rulare cuprinde următoarele trei rețele integrate: [9].

- antrenarea rețelei de la bord;
- antrenarea rețelei radio la cale;
- urmărirea cadrului rețelei.

Rețeaua de la bordul trenului și rețeaua de cale utilizează internetul, în timp ce rețeaua

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

radio de la tren la cale utilizează în general Wi-Fi.

Echipamentul de la bord (figura 2) include computerul la bordul vehiculului (VOBC). Acest sistem este responsabil pentru trimiterea periodică a informațiilor privind controlul trenului. Aceasta fie include, fie lucrează împreună cu subsistemele ATP și ATO de la bord [5].

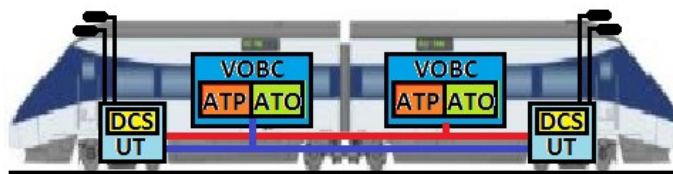


Fig. 2. Componentele CBTC de la bord

(VOBC - Calculator de bord pentru vehicule; ATP - Protecție automată a trenului; ATO - Operare automată a trenului; DCS - Sistem de comunicare a datelor; UT - Unitatea de tren)

Subsistemele ATP și ATO fac parte din funcționalitatea ATC de la bord. ATP controlează funcțiile legate de siguranță și ATO controlează funcțiile reale de conducere a trenului. Fiecare dintre acestea are atât componente la bord, cât și componente.

Probabil cel mai critic subsistem, subsistemul ATP ajută la prevenirea coliziunilor ca urmare a nerespectării de către mecanic a unui semnal sau a restricției de viteză. Acesta monitorizează și controlează viteza trenului și acționează frânele, dacă este necesar. Subsistemul ATO este responsabil pentru automatizarea funcționării trenului, inclusiv a operațiunilor de bază efectuate în mod normal de către un conducător, cum ar fi pornirea și oprirea trenului, frânarea și accelerarea eficiente din punct de vedere energetic și precizia opririi.

O altă componentă critică la bord este sistemul de comunicații de date (DCS), denumit și sistemul de comunicații radio (RCS). DCS este de obicei o combinație de software și hardware, inclusiv radio și antene, și este responsabil pentru comunicația radio între tren și marginea căii. DCS poate fi fie un sistem complet independent, fie integrat în VOBC. Dacă este independent, sistemul de calcul care rulează DCS este denumit frecvent și ca unitate de tren (UT).

În figura 3 sunt ilustrate componentele obișnuite ale unui sistem CBTC. Termenii „marginea căii” și „pe cale” sunt adesea folosiți interschimbabil. Cu toate acestea, „pe cale” conține în general componentele situate fie pe sau aproape de cale și este considerat o parte a căii. Un controler de zonă (ZC), sau controler de cale, este responsabil pentru controlul unei anumite zone din rețeaua feroviară. Împărțirea rețelei de cale în mai multe zone independente, astfel încât fiecare zonă să cuprindă propria infrastructură de cale, îmbunătățește disponibilitatea chiar dacă una sau mai multe zone se confruntă cu eșecuri. Funcția fundamentală a unui ZC este de a menține separarea sigură a trenului în zona sa. Un ZC include, de obicei, subsistemele ATP și ATO [8], [11].

Subsistemul ATP al unui ZC gestionează toate comunicațiile cu trenurile din zona sa. De asemenea, acest subsistem calculează autoritatea de circulație pentru fiecare tren din zona sa. Un sistem de interblocare computerizat (CI) este fie inclus ca sistem independent, fie ca parte a subsistemului ATP. CI controlează echipamentele de cale, cum ar fi mașinile de semnalizare/comutare și este responsabil pentru stabilirea rutelor pentru trenuri. Subsistemul ATO asigură toate trenurile din zona sa cu destinația lor, precum și timpii de ședere [11].

Independent de ZC este sistemul de supraveghere automată a trenului (ATS), care este

responsabil de monitorizarea și programarea traficului.

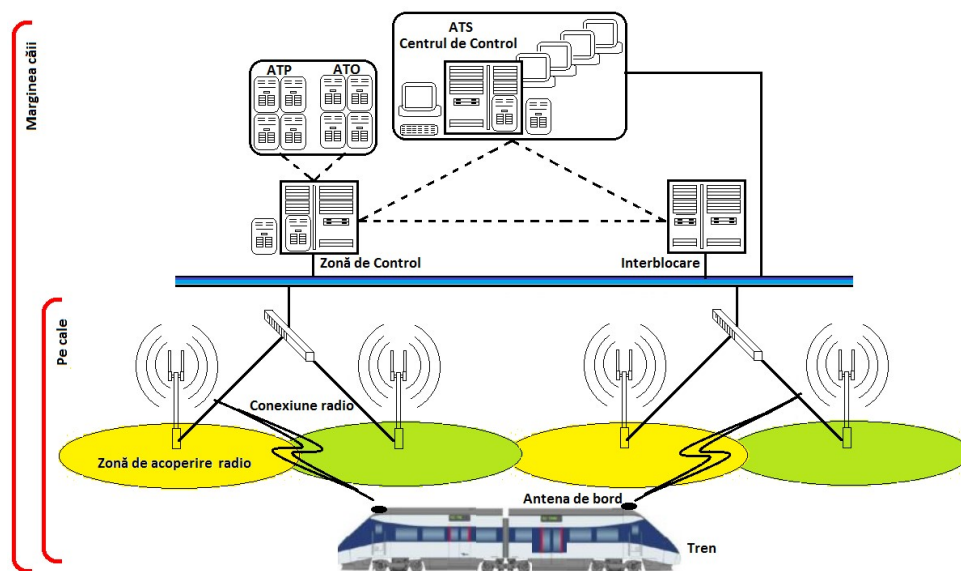


Fig. 3. Componente CBTC la marginea căii (ATS - Supravegherea automată a trenurilor; ATO - Operare automată a trenului; ATP - Protecție automată a trenului).

Ansamblul căii este împărțit în mai multe celule Wi-Fi, fiecare fiind deservit de un punct de acces (AP). În figura 3 sunt folosite culorile galben și verde pentru a diferenția zonele de acoperire radio ale AP-urilor. Aceste secțiuni sunt folosite pentru a reprezenta și două frecvențe radio diferite [12]. AP-urile sunt fie desfășurate pe o parte a căii, fie pe ambele, în mod alternativ. Trenurile comunică către AP-uri printr-o conexiune radio [13]. Aceasta constituie o rețea radio tip CBTC tren-cale și este considerată partea de cale a sistemului DCS. AP-urile sunt la rândul lor conectate la componentele de pe cale prin intermediul cadrului rețelei.

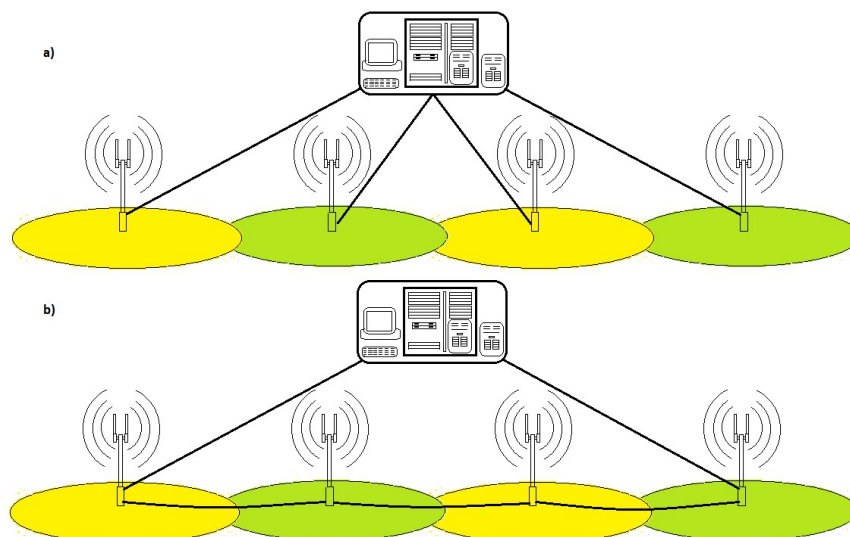


Fig. 4. Rețea de cale: a) configurare stea; b) configurare inelară

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

O configurație tipică a cadrului rețelei de cale este arătată în figura 4(a), în care fiecare AP este conectat direct la infrastructura de cale utilizând cabluri de fibră optică [14]. O alternativă avansată este topologia inelară, prezentată în figura 4(b) [15]. Această configurație minimizează cablarea, deoarece distanța dintre un AP și rețeaua principală este de obicei mult mai mare decât distanța dintre două AP-uri adiacente. O limitare inerentă a unei rețele bazate pe apel este că un singur nod eșuat poate perturba întreaga rețea.

Cu toate acestea, există o serie de protocoale de redundanță înel Ethernet, cum ar fi Media Redundancy Protocol (MRP), pentru a atenua această problemă [16]. În plus, pot fi folosite mai multe inele pentru a permite redundanța excesivă sau pentru a menține numărul de noduri dintr-o rețea de inele sub limită.

3. EVOLUȚIA COMUNICAȚIILOR ÎN SEMNALIZAREA FERROVIARĂ

Într-o formă ușor evoluată a semnalizării convenționale, cunoscută sub numele de „control al trenului pe calea ferată”, șinele sunt utilizate pentru comunicația dintre infrastructura trenului și a căii. Aceste sisteme utilizează circuite de cale de curent alternativ codificate (AC), numite și circuite de urmărire a frecvenței audio (AF) datorită intervalului de frecvențe utilizate, pentru a modula datele [17]. Datele de control ale trenului trimise prin șine sunt apoi utilizate pentru semnalizarea cabinei - caracteristica de a afișa informații despre aspectul semnalului către mecanic în interiorul trenului - și pentru a impune viteza permisă [6]. Deoarece în aceste sisteme, circuitele de cale sunt utilizate pentru a determina locația trenului, acest tip de semnalizare este denumit și „semnalizarea circuitului de cale”. Această tehnologie poate fi considerată o formă timpurie de control al trenului bazat pe comunicații.

Cu toate acestea, rezoluția redusă a locației trenului determinată de circuitele de cale ferată și capacitatea redusă de comunicație feroviare duc la informații mai puțin exacte de localizare a trenului. Acest lucru are ca rezultat progrese mai mari pentru a asigura siguranța și, astfel, capacitatea redusă a liniei. Progresul tipic în sistemele convenționale de control al trenurilor este de câteva minute [9].

Sistemele CBTC timpurii din anii 1980 foloseau bucla inductivă ca tehnologie de comunicare [18]. Acest tip de semnalizare a fost numit și „control al trenului bazat pe transmisie” (TBTC) [11]. Primul sistem CBTC s-a bazat pe această tehnologie și a fost instalat în Toronto, Canada, în 1985, pe Toronto Transit Commission Scarborough RT Line [18].

În aceste sisteme, cablurile buclei inductive au fost montate pe șine și au fost codificate cu anumite frecvențe la intervale regulate. Trenul și-a verificat locația citind aceste semnale printr-un detector montat sub el [4]. După cum s-a putut observa, această metodă poate fi considerată o alternativă avansată la semnalizarea circuitului de cale discutată anterior. Din acest motiv, semnalizarea circuitului de cale se argumentează ocazional ca fiind o formă de control al trenului bazat pe comunicații.

Spre deosebire de sistemele CBTC actuale care funcționează în gama de frecvențe GHz cu Wi-Fi, sistemele cu buclă inductivă funcționează în domeniul kHz [19]. Cu toate acestea, în ciuda demersurilor sale, bucla inductivă este o tehnologie dovedită care a fost utilizată pentru căile ferate de trei decenii. Este rentabil, deoarece folosește sârmă standard neecranată, ușor de reparat.

Sistemele moderne CBTC utilizează comunicații radio continue și de mare capacitate între tren și infrastructura de la marginea căii pentru a transmite informațiile de control ale trenului. Rezoluția înaltă și locația extrem de precisă a trenului permite funcționarea „blocării

în mișcare”. Rezultatul este avansuri scurte și capacitate crescută a liniei. Un progres tipic în sistemele CBTC este de 90 de secunde sau mai puțin [5], [9], [10], [18]. În plus, permite funcții avansate, cum ar fi operațiunile de tren fără mecanic și nesupravegheate [6].

Sistemele CBTC bazate pe radio pot fi aproximativ împărțite în două categorii: cele bazate pe comunicarea radio modernă, de mare capacitate - care poate fi împărțită în continuare în tehnologii personalizate și comerciale de tip raft (COTS) - și cele bazate pe cele mai vechi tehnologii de scurgere a undelor.

Majoritatea sistemelor radio CBTC anterioare erau soluții personalizate, construite special pentru a se potrivi cerințelor unui proiect și au folosit o tehnologie radio proprie. Un exemplu este soluția radio Model 2400 a Andrew Corporation, bazată pe tehnologia de scurgere a undelor, utilizată de Bombardier în instalațiile sale inițiale CBTC.

Pentru a menține sistemul radio independent de un anumit furnizor, New York City Transit (NYCT) a optat pentru o soluție COTS pentru proiectele sale Culver și Canarsie Line. Soluția aleasă s-a numit RailPath și a fost dezvoltată de Springboard Wireless Networks Inc. S-a bazat pe tehnologia cu spectru larg și a funcționat în banda de 2,4 GHz [20], [21].

Sistemul radio utilizat în sistemul CBTC de la Copenhaga S-train, numit Airlink [22], se bazează pe Wi-Fi. Cu toate acestea, generațiile anterioare de Airlink folosesc în continuare tehnologie radio proprie construită la comandă, bazată pe spectru larg și care funcționează în benzile de 2,4 și 5,9 GHz. Ultimul proiect care folosește acest sistem bazat pe spectru răspândit este noua linie contractată Queens Boulevard din NYCT [23].

Un ghid de undă cu scurgeri este un cablu coaxial cu deschideri periodice în ecranarea sa pentru a permite scurgerea sau intrarea semnalelor radio, acționând astfel ca o antenă continuă. Ghidul de undă cu scurgeri este, de asemenea, cunoscut sub numele de alimentator cu scurgere, cablu cu scurgere sau cablu radiant. De zeci de ani, a fost folosit cu succes pentru a furniza servicii de radio voce în metrou [24], [25].

Ghidul de unde scurgeri oferă anumite avantaje. Comunicarea radio în locații în aer liber este imprevizibilă în general, deoarece pierderea de propagare pe care o are un semnal depinde în mare măsură de obstacolele pe care le întâmpină în calea sa [19]. Ghidul de undă cu scurgeri implică o comunicare în aer liber foarte limitată, care are loc pe o distanță foarte scurtă - în mod normal în intervalul 0,3 - 0,6 metri - între cablul cu scurgeri și antena receptorului din tren. Astfel, ghidul de undă cu scurgeri garantează o pierdere de propagare mai previzibilă și este mai puțin susceptibil la interferențe [26], [27], [28], [29].

Având în vedere aceste avantaje, anumiți operatori feroviari au folosit o combinație de comunicații radio și ghid de undă. În timp ce comunicația radio este utilizată în tuneluri, ghidul de undă care se scurge este utilizat în locații în aer liber în care interferența este semnificativ mai mare sau în locațiile critice în care comunicația radio este extrem de problematică [26], [27], [28]. Un exemplu este stațiile din tuneluri, unde mai multe trenuri staționare ar putea obstrucționa calea liniei de vedere către cel mai apropiat AP. Cu toate acestea, o provocare în aceste soluții este comutarea fără probleme între cele două tehnologii în zonele de tranzit. Pentru fiecare tehnologie trebuie utilizat un set separat de antene [30].

Dezavantajul cu ghidurile de undă cu scurgeri este că nu sunt costisitoare, iar instalarea și întreținerea necesită mult efort, în special în mediile de tunel aglomerate [8], [27]. În plus, atunci când sunt instalate în locații în aer liber, acestea sunt predispuse la degradarea semnalului din cauza efectelor mediului, cum ar fi ploaia și zăpada. Din aceste motive, ghidul de undă cu scurgeri nu s-a dovedit a fi foarte popular pentru sistemele CBTC [25].

4. ROAMING ÎN SISTEMELE CBTC

Spre deosebire de comunicarea celulară, roaming-ul în mediile feroviare nu este o simplă posibilitate, ci este o realitate inevitabilă. Spre deosebire de rețelele celulare, Wi-Fi sunt rețele cu rază scurtă de acțiune, unde rețelele mai mari sunt construite prin implementarea mai multor AP-uri strâns legate împreună. Aceasta înseamnă că AP-urile sunt plasate la intervale regulate pe rețeaua de cale, astfel încât zonele lor de acoperire se suprapun, iar un tren trebuie să găsească continuu un nou AP adecvat și să se reconecteze pe măsură ce se deplasează.

Un aspect critic al roaming-ului în CBTC este deci modul în care un sistem de comunicații radio trece ușor de la un AP la altul (adică transfer), fără a provoca întreruperi și întârzieri în comunicare. O latență mare de predare ar putea duce la o recepție întârziată a informațiilor autorității de circulație, iar trenul ar putea fi nevoit să acționeze frâne de urgență [5], [9].

Mai mult, deoarece în CBTC este foarte obișnuit să se desfășoare AP-uri adiacente pe frecvențe diferite, sistemul de comunicații radio trebuie să comute între ele atunci când se trece de la un AP la altul. Acest lucru, combinat cu viteza ridicată a trenurilor moderne, are ca rezultat schimbarea rapidă a canalelor și face algoritmii de predare utilizați cu succes în mediile staționare Wi-Fi, ineficiente pentru CBTC [50], [32].

Frecvența predării este determinată de distanța dintre cele două AP (sau zonele de acoperire AP) și viteza trenului. Transmiterea din IEEE 802.11 este așa-numită „hard handover”, în care nodul principal rupe conexiunea curentă înainte de a stabili următoarea conexiune, rezultând întârzieri și pierderi de pachete [9], [33]. Viteza mare și distanța inter-AP scurtă duc la transferuri mai frecvente, agravând și mai mult situația [34], [35].

Studiile arată că numărul de pachete pierdute din cauza predării este mult mai mare decât cel datorat propagării radio [31]. La o viteză a trenului de 200 km/h, timpul maxim de predare de 180 de milisecunde și suprafața de suprapunere de 20 de metri, rata de pierdere a pachetelor calculată este aproximativă de 10%.

Timpul de predare în CBTC este de obicei cuprins între 70-120 milisecunde, cu o secundă față limită superioară [9]. Atâta timp cât acest timp este mai scurt decât intervalul de mesaje de control CBTC discutat, nu impune o amenințare serioasă, deoarece înseamnă doar un mesaj pierdut în cel mai rău caz.

În mod normal, o tranziție lină se realizează prin dotarea unui tren cu cel puțin două aparate de radio, unul la fiecare capăt, astfel încât cel puțin unul dintre aceste aparate de radio să fie întotdeauna conectat la un AP.

Pe măsură ce trenul se mișcă, radioul din față continuă să caute un nou AP. Când găsește un AP nou, întrerupe conexiunea curentă și stabilește una nouă cu noul AP (conexiunea 1 din figura 5), în timp ce radioul din spate rămâne conectat.

Apoi, radioul din spate comută conexiunea la noul AP (conexiunea 2), în timp ce radioul din față rămâne conectat. Algoritmi sofisticăți de roaming ar putea dezvolta un fel de algoritm distribuit pentru a preveni roaming-ul ambelor radiouri în același timp. Primul pas se repetă și radioul frontal se conectează la un nou AP (conexiunea 3).

Cu toate acestea, înainte de executarea unei predări, aceasta trebuie detectată, adică când se execută predarea. Modul în care se realizează acest lucru nu este specificat de standardul IEEE 802.11 și, prin urmare, sistemele CBTC își dezvoltă de obicei propriul algoritm de roaming. Abordările tipice sunt monitorizarea calității linkului, de exemplu prin monitorizarea numărului de pachete nerecunoscute (adică pierderea pachetelor) sau prin

monitorizare când calitatea semnalului scade sub un anumit prag [36]. Câteva abordări pentru acesta din urmă sunt de a măsura calitatea semnalului (de exemplu, prin intermediul indicatorului puterii semnalului recepționat (RSSI)) din cadrele de semnalizare primite de la un AP și de a măsura cât de consistentă este calitatea semnalului, prin monitorizarea ratei de recepție a cadrelor. [37], [38]. Dacă se găsesc mai multe AP potențiale pentru noua conexiune, aceleași criterii sunt utilizate pentru a selecta cel mai bun AP dintre ele. Mediile extrem de dinamice ale transportului feroviar fac detectarea predării în continuare provocatoare.

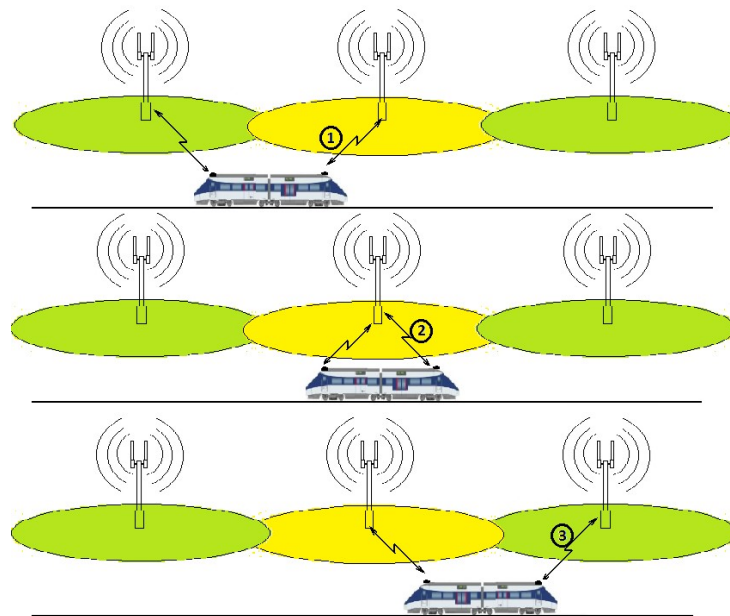


Fig. 5. Roaming/predare în CBTC

O abordare tipică în sistemele CBTC este de a efectua transferul de îndată ce trenul primește un semnal de la un nou AP, cu puterea peste un anumit prag, chiar dacă puterea semnalului curentului AP este mai mare și crește în continuare. Acest lucru este ilustrat în figura 6, unde, un transfer de la AP-1 la AP-2 se efectuează într-un moment în care puterea semnalului curent al AP-1 (verde) este mai mare decât cea a AP-2 (roșu) [2], [3], [7].

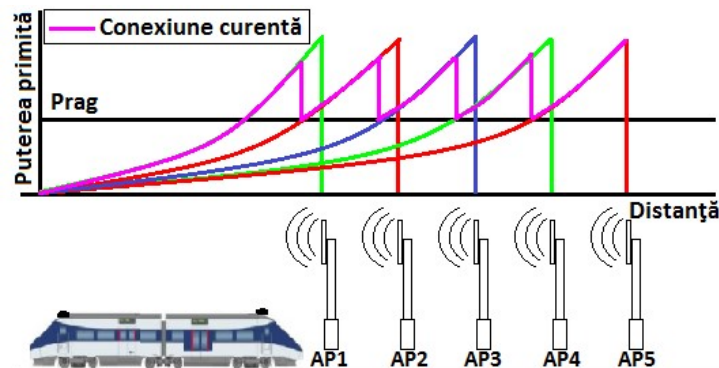


Fig. 6. Un algoritm tipic de roaming

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

Obiectivul este în principal de a evita scăderea acută a puterii semnalului pe măsură ce trenul trece peste AP-ul actual. Acest lucru se datorează parțial concepției greșite că antenele unidirecționale nu au acoperire la partea din spate, așa cum este sugerat și în figura 6. Cu toate acestea, acest lucru este departe de realitate. Parametrul antenei „raportul față-spate” specifică raportul radiațiilor transmise în direcția înainte față de cel transmis în direcția înapoi [39]. De exemplu, antena HUBER + SUHNER Sencity SPOT-S folosită în Copenhaga Strain CBTC are un raport față-spate de 20 dB [40]. Aceasta înseamnă că acoperirea sa în direcția inversă este -20 dB mai slabă decât cea în direcția înainte, dar există încă o acoperire, cu excepția cazurilor rare când este blocată în totalitate de catargul pe care este instalată antena.

Această concepție greșită duce la implementări incorecte ale algoritmilor de roaming, care se conectează prematur la un nou AP, anticipând o cădere acută a semnalului pe măsură ce trenul trece pe lângă un AP.

O altă abordare este aceea de a utiliza două praguri diferite: un „prag de ieșire” și un „prag de îmbinare”. Roaming-ul se efectuează dacă puterea semnalului curentului AP coboară sub pragul de ieșire și/sau puterea semnalului noului AP este peste pragul de îmbinare.

Cu toate acestea, aceste praguri trebuie stabilite cu atenție. Un prag de ieșire prea scăzut poate duce la o conexiune prelungită la AP curent. Rezultatul este un roaming întârziat, care poate duce la pierderea totală a semnalului de tren în timp ce trece pe lângă AP. Un prag prea mic de îmbinare poate duce la conectarea trenului la un AP cu o calitate slabă a semnalului [41].

Transmiterea în IEEE 802.11 are 3 faze: (1) scanare, (2) autentificare și (3) re-asociere.

Dintre cele trei faze de predare, scanarea durează cel mai mult timp. Conform studiilor, latența fazei de scanare reprezintă aproximativ 90% din latența totală de predare [9], [42].

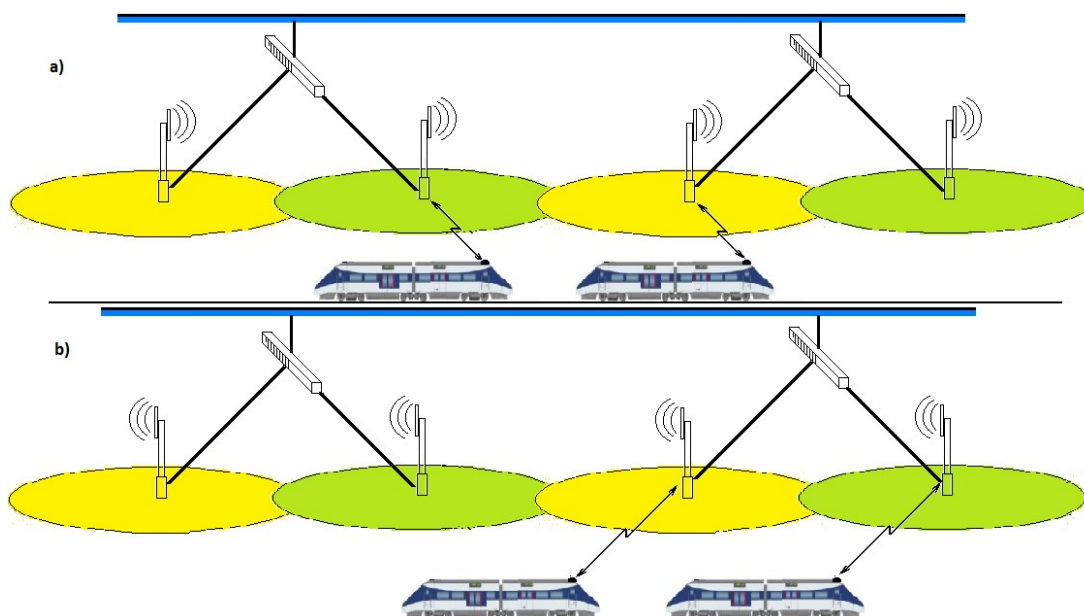


Fig. 7. Direcția de roaming față de direcția antenei

În scanarea pasivă, un nod wireless așteaptă ca mesajele trimise de AP-uri să anunțe

prezența lor. Scanarea pasivă este lentă, deoarece majoritatea furnizorilor de hardware stabilesc intervalul de balize la 100 de milisecunde, în mod implicit. În scanarea activă, nodul trimite mesaje de solicitare, la care AP-urile din apropiere răspund cu mesaje de răspuns.

În general, în sistemele CBTC, scanarea activă este adoptată pentru a minimiza latența [9], [31]. Cu toate acestea, întrucât în mod normal nodul trebuie să încerce toate canalele de frecvență, este nevoie de timp semnificativ [31].

Alegerea canalelor de frecvență pe care să le utilizați atunci când se desfășoară o rețea radio pe cale este adesea independentă de dezvoltarea sistemului de comunicații radio CBTC. În consecință, chiar dacă sunt utilizate doar două canale, nu este neobișnuit ca un sistem de comunicații radio CBTC să fie dezvoltat într-un mod de a scana în continuare toate canalele în mod implicit, pentru a fi în siguranță. Unul dintre motive este că adesea aceste sisteme CBTC fie nu sunt personalizate pentru nevoile unui anumit client, fie nu sunt conștiente de canalele reale utilizate. Numai aceste canale sunt utilizate ulterior, doar pentru a reveni la toate canalele în caz de eșec la găsirea unui AP.

Adesea se folosește un fel de scanare pasivă în fundal în care nodul află despre următoarele AP-uri disponibile în timp ce este încă conectat la AP-ul curent [43].

Datorită naturii liniare a unei rețele radio de cale, următorul AP la care se poate conecta poate fi predeterminat, cu condiția ca trenul să mențină o bază de date actualizată cu informații despre AP și toate AP-urile sunt într-o stare sănătoasă.

În faza de autentificare, un nod își stabilește identitatea cu AP-ul găsit în faza de scanare, prin schimbul de mesaje speciale de autentificare. Cu toate acestea, în funcție de implementarea furnizorului, această fază ar putea dura mult, de exemplu până la o secundă dacă se utilizează o arhitectură de securitate centralizată bazată pe IEEE 802.1X [44] care implică comunicarea cu un server de autentificare, cum ar fi RADIUS [45].

Câteva produse Wi-Fi acceptă extensia IEEE 802.11f [46], cunoscută și sub numele de Protocol de puncte de acces (IAPP). IAPP oferă o metodă de pre-autentificare în care un AP, după autentificarea cu succes cu un nod, partajează informațiile de autentificare ale nodului cu AP-urile din apropiere [31]. Procesul de autentificare poate fi astfel omis atunci când se conectează ulterior la acele AP-uri.

În scenariile CBTC, în care transferul fără probleme este esențial, o abordare este de a omite complet faza de autentificare. Cu toate acestea, dezavantajul este că autentificarea trebuie apoi efectuată la nivel de pachet utilizând un protocol de securitate de nivel superior, cum ar fi IP Security (IPSec).

În faza de asociere, nodul se înregistrează la AP prin schimbul de mesaje speciale, astfel încât AP să poată transmite date la și de la acesta. Nu există loc de îmbunătățire în latența acestei faze, deoarece aceasta este dictată doar de întârzierea transferului de mesaje [31].

5. CONFIGURAREA REȚELEI RADIO

Redundanța este esențială pentru furnizarea de comunicații radio fiabile în CBTC și este un factor decisiv atunci când planificați numărul și amplasarea AP-urilor de cale, precum și a radiourilor de la bord. Deoarece mișcarea trenului este fixă, configurația rețelei radio tren-cale este liniară, ceea ce este util în reducerea eforturilor de instalare. AP-urile sunt așezate cât mai aproape de cale pentru a obține cea mai bună calitate a semnalului pe tren și pentru a evita orice obstacole în calea vederii liniei. Pentru a asigura conectivitate continuă, distanța inter-AP, care este distanța dintre două AP-uri adiacente, este aleasă într-un mod în care

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

zonele de acoperire ale AP-urilor se suprapun. Calculele bugetului legăturii FR (frecvență radio) sunt de obicei făcute pentru a determina distanța inter-AP, iar gama de semnal AP joacă un rol cheie în aceste calcule [47]. În mod normal se efectuează ulterior un sondaj de situri RF pentru a determina numărul și plasarea AP-urilor.

O abordare comună este utilizarea unei distanțe scurte între AP, precum și a unei puteri de transmisie ridicate, pentru a depăși interferențele de la alte dispozitive/utilizatori.

Pentru a facilita o predare lină, distanța inter-AP este proiectată astfel încât trenul să fie întotdeauna în interiorul acoperirii a cel puțin două AP-uri. Un alt avantaj al unei distanțe scurte între AP este că radioul din față poate auzi nu doar AP-ul din față, ci și următorul.

Crește disponibilitatea, deoarece radioul frontal are de două ori mai multe AP-uri decât are nevoie [25]. AP-urile adiacente trebuie să fie desfășurate pe frecvențe diferite pentru a evita interferențele în acest caz.

În tabelul 1 sunt enumerate intervalele pentru mediile interioare și exterioare pentru IEEE 802.11b, care oferă cele mai mari intervale comparativ cu celelalte standarde IEEE 802.11. Cel mai frecvent utilizate sunt 802.11a și 802.11g [48].

Cu toate acestea, gama de semnal radio IEEE 802.11 depinde de diverși factori și poate fi îmbunătățită. Parametrii precum înălțimea antenei, puterea de transmisie, câștigul și sensibilitatea receptorului pot fi reglați pentru a spori gama de semnal. În plus, gama de semnal depinde de frecvența de funcționare și de pierderea de propagare.

Pe măsură ce un semnal se deplasează de la un transmițător la un receptor, acesta suferă pierderea puterii semnalului datorită diferitelor fenomene de propagare, cum ar fi reflexia, refracția, difracția, absorbția și efectul de cale, datorită mediului și obstacolelor din cale. Pe lângă înălțimea și locația antenelor, pierderea de propagare este în continuare dependentă de distanța dintre emițător și receptor [49].

Când se planifică o rețea radio CBTC, toți acești parametri sunt utilizați în calculele pachetului de legătură pentru a determina acoperirea AP. Scopul acestor calcule este să ofere un număr minim garantat.

Pentru a fi în siguranță, deseori cea mai proastă pierdere de propagare, precum și diverse „margini”, de exemplu „marjă de legătură” și „marjă de estompere” sunt utilizate în aceste calcule. Ca urmare, o simplă diferență de +6 dBm în puterea recepționată reală dublează distanța realizabilă.

Tabelul 1. Intervalele de semnal IEEE 802.11b

Nr. crt.	Mod	Modulare	Distanța interioară [m]	Distanța exterioară [m]
1.	1 Mbps	DSSS	550	50
2.	2 Mbps	DSSS	388	40
3.	5,5 Mbps	CCK	235	30
4.	11 Mbps	CCK	166	24
5.	5,5 Mbps	PBCC	351	38
6.	11 Mbps	PBCC	248	31
7.	6 Mbps	OFDM	300	35
8.	12 Mbps	OFDM	211	28
9.	18 Mbps	OFDM	155	23
10.	24 Mbps	OFDM	103	18
11.	36 Mbps	OFDM	72	15
12.	48 Mbps	OFDM	45	11
13.	54 Mbps	OFDM	36	10

Cu toate acestea, în cea mai mare parte echipamentele radio COTS sunt utilizate în sistemele CBTC, care oferă o flexibilitate limitată pentru ajustarea valorilor parametrilor menționați anterior. Astfel, pentru a lua în considerare faptul că semnalele radio se atenuează foarte mult datorită diferitelor fenomene de propagare, în CBTC se presupune o rază efectivă de numai 200-300 de metri. Studiile din [9] și [50] arată că în condiții de propagare slabe, probabilitatea ca puterea primită să scadă sub sensibilitatea receptorului, crește atunci când se utilizează o distanță inter-AP mai mare de 200 de metri. Mai mult, probabilitatea de a primi un semnal cu un nivel de putere acceptabil este mai mare de 95% atunci când se utilizează o distanță inter-AP mai mică de 200 de metri.

Alegerea unei distanțe mai mici de 200 de metri, pe de altă parte, înseamnă costuri mai mari, precum și predări mai frecvente.

Din aceste motive, distanțele tipice inter-AP variază de la 100 la 600 de metri, în funcție de cale și topologia terenului, de exemplu curbe, elevații, pante, obstacole etc. și puterea de transmisie utilizată [51]. Un studiu al instalațiilor CBTC a arătat că o distanță inter-AP de 200-300 de metri este mai frecventă, totuși s-au văzut și distanțe mai mari de peste 350 de metri [9], [14], [31], [37], [30].

În plus, distanțe semnificativ mai mari de până la 100 de kilometri în legăturile punct-la-punct pot fi realizate prin ajustarea parametrilor stratului IEEE 802.11 MAC (Control acces mediu), cum ar fi timpul de expirare ACK (pachet de confirmare), timpul slotului și fereastra de conținție (CW).

Sensibilitatea receptorului este puterea minimă a semnalului necesară la antena receptorului pentru a demodula semnalul. Cu cât schema de modulație utilizată este mai avansată, cu atât este mai mare puterea semnalului (sau raportul semnal-zgomot) necesară pentru demodularea corectă a semnalului [39].

În tabelul 2 se observă cerințele de sensibilitate ale receptorului specificate de standardul IEEE 802.11a, care se bazează pe OFDM și funcționează la 5 GHz [52]. La efectuarea calculelor bugetului de legătură, se recomandă respectarea valorilor sensibilității receptorului specificate de producătorul hardware-ului.

Sensibilitatea receptorului este direct legată de un anumit Bit Error Rate (BER), Packet Error Rate (PER) sau Frame Error Rate (FER) [39]. De exemplu, standardul IEEE 802.11a afirmă că performanța minimă necesară a receptorului la viteza de date de 54 Mbps este -65 dBm cu un PER de 10% sau mai puțin, după cum se vede în tabelul 2.

Tabelul 2. Intervalele de semnal IEEE 802.11b

Nr. crt.	Mod	Modulare	Rata de codare	Sensibilitate minimă [dBm]
1.	6 Mbps	BPSK	1/2	-82
2.	9 Mbps	BPSK	3/4	-81
3.	12 Mbps	QPSK	1/2	-79
4.	18 Mbps	QPSK	3/4	-77
5.	24 Mbps	16-QAM	1/2	-74
6.	36 Mbps	16-QAM	3/4	-70
7.	48 Mbps	16-QAM	2/3	-66
8.	54 Mbps	16-QAM	3/4	-65

O antenă omni-direcțională asigură o acoperire egală în toate direcțiile, rezultând o zonă de acoperire mai largă, deși distanța parcursă este scurtă. În schimb, o antenă unidirecțională oferă acoperire într-o direcție specifică, rezultând o distanță mai mare, dar o

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

zonă de acoperire îngustă. Tipul de antenă utilizat variază în funcție de soluțiile CBTC.

În general, antenele unidirecționale oferă o acoperire mai bună în mediile de linie de orizont, iar antenele omnidirecționale au performanțe mai bune în mediile non-linii de orizont, de exemplu în tuneluri cu curbe [53]. De asemenea, în aceste cazuri se pot utiliza și date istorice din baze, cu problematică similară, construite pe experiențele anterioare, folosind cu precădere software specializate de gestionare, optimizare, precum și de interpretare a fiabilității și compatibilității dintre metodele folosite și situațiile reale, așa cum se arată și în literatura de specialitate [2], [3], [7], [54].

Datorită distanței lor reduse, trenul ar trebui să „vadă” un singur punct de pornire în fața acestuia, dacă AP-urile sunt spațiate corespunzător. Aceasta înseamnă roaming mai rapid și mai puțin complex, deoarece poate fi evitată partea de „selecție AP” a algoritmului [41]. Dezavantajele evidente sunt un număr mare de AP necesare pentru a acoperi o anumită zonă și o susceptibilitate mai mare la interferențe din partea utilizatorilor din apropiere, de exemplu hotspoturi Wi-Fi în gări.

Adesea se folosesc în schimb două antene unidirecționale, orientate în direcții opuse. Se poate reduce numărul de AP-uri și astfel se creează un model liniar mai previzibil, care se potrivește bine unei rețele de cale. Cu toate acestea, se oferă unele provocări. Lățimea zonei de acoperire a unei antene unidirecționale depinde de mărimea lățimii fasciculului antenei. O antenă AP cu o lățime de fascicul foarte îngustă înseamnă că trenul nu poate vedea AP înainte ca acesta să fie „aliniat” corespunzător la zona de acoperire a AP [41].

Dacă avem antene unidirecționale și omnidirecționale, trenul vede o creștere treptată a puterii semnalului pe măsură ce se apropie de AP, urmată de o ușoară cădere în timp ce este adiacent AP. Cu toate acestea, unde diferă este atunci când trenul se îndepărtează ulterior de AP. În cazul unei antene omnidirecționale, trenul vede o scădere treptată a puterii semnalului. În schimb, în cazul unei antene unidirecționale, se observă o scădere rapidă a puterii semnalului imediat după ce a trecut de AP [41].

În funcție de topologia căii și terenului, AP-urile sunt montate pe catarguri pentru a oferi o acoperire optimă, precum și ușurința întreținerii [51]. Înălțimea acestor catarguri variază de la 50 de centimetri la cei mai tipici 4 metri pentru instalațiile subterane și 4-6 metri pentru instalațiile în aer liber [8], [9], [27], [55], [56]. Adesea, înălțimea antenei este aleasă pentru a fi în mod rezonabil peste nivelul acoperișului trenului, de exemplu între 0,5 și 1 metru, pentru a se asigura că undele radio nu sunt protejate de tren. Pentru a determina înălțimea dorită, pot fi folosite modele de trasare a razelor.

Antenele sunt, în general, instalate la o înălțime suficientă pe acoperișul trenului, astfel încât linia de vizibilitate către AP să nu fie obstructată de alte trenuri. În general, antenele unidirecționale sunt preferate la bord, din motivul discutat anterior. Cu toate acestea, utilizarea antenelor unidirecționale atât pe AP cât și pe tren ar putea face roaming-ul mai greu, deoarece înseamnă că zonele lor de acoperire trebuie să fie aliniate perfect pentru a putea fi observate. Din acest motiv, unele sisteme CBTC folosesc o combinație de antene unidirecționale și omnidirecționale, de exemplu antene unidirecționale pe trenuri și antene omnidirecționale pe AP-uri, sau invers [57].

În CBTC, redundanța este cheia disponibilității ridicate. Regula generală este că, în orice locație dată pe cale, trebuie să fie disponibile cel puțin două puncte de acces la care să se conecteze. Un tren este de obicei echipat cu două unități de tren UT (UT), unul la fiecare capăt, pentru a asigura o redundanță suficientă. Fiecare UT este de obicei echipat cu un radio, deși sunt văzute și soluții cu două radio. Fiecare radio este apoi echipat cu una sau două antene.

Redundanța este asigurată suplimentar de diversitate. Având două antene pe radio, separate de o anumită distanță, oferă diversitate spațială, deoarece pot fi recepționate două semnale independente la un moment dat, din care poate fi utilizat semnalul mai puternic. Diversitatea antenei ajută la depășirea problemelor create de cale [41], [49]. Diversitatea spațială suplimentară este asigurată automat prin faptul că există două UT pe tren, separate de lungimea trenului [29]. Folosirea a două sau mai multe frecvențe, este ea însăși o formă de diversitate - numită diversitate de frecvență - deoarece scade probabilitatea ca toate semnalele dintr-o anumită zonă să fie corupte în același mod.

O altă formă de redundanță este redundanța puterii. Atunci când se utilizează topologia multi-inel, pentru a face inelele AP (sau rețelele principale) complet independente una de cealaltă, acestea sunt implementate cu surse de alimentare independente.

În figurile 8 și figura 9, culorile galben și verde ale zonelor de acoperire AP reprezintă două frecvențe diferite. Mai mult, antenele de la bord nu reprezintă un tip de antenă specific, adică unidirecțional sau omnidirecțional, cu excepția cazului în care este specificat în mod specific.

Figura 8(a) prezintă o configurație fără redundanță la bord. În această configurație, există un singur UT pe tren, cu o singură antenă (unidirecțională sau omnidirecțională).

AP-ul de pe cale are, de asemenea, un radio cu o singură antenă unidirecțională. Frecvențele radio au fost utilizate alternativ. De exemplu, o distanță inter-AP de 300 de metri implică faptul că distanța dintre cele două AP-uri consecutive care operează pe aceeași frecvență este de 600 de metri, ceea ce ajută la minimizarea interferenței.

Pe AP-uri, utilizarea antenelor unidirecționale numai într-o singură direcție, ca în figura 8(a), ar putea duce la „problema nodului ascuns”, unde două noduri se află în intervalul unui nod comun, dar nu unul în celălalt. Acest lucru face ca protocolul de „detectare a operatorului” CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) utilizat pentru a evita coliziunile în MAC IEEE 802.11 este inefficient, deoarece cele două noduri nu se pot observa reciproc. Nu este neobișnuit ca intervalul real de semnal AP să fie mult mai mare decât intervalul „garantat”. Să presupunem că în figura 8(a), semnalul AP 3 poate fi observat de un tren aflat în prezent în zona de acoperire a AP 1. AP 1 și AP 3 nu se pot observa, deoarece antena AP 1 este îndreptată în direcția opusă sau are un raport față-spate foarte scăzut. Acest lucru poate duce la o situație în care AP 1 începe să transmită, în timp ce AP 3 transmite deja, rezultând o coliziune.

Această problemă este rezolvată în figura de configurare 8(c) în care AP 1 are o antenă suplimentară în direcția opusă, permițându-i să observe transmisia AP 3 și, astfel, să suspende transmisia. Figura 8(b-e) prezintă configurații cu redundanță la bord. Redundanța la bord este asigurată de faptul că există două UT independente pe tren, astfel încât aceste UT sunt conectate la două rețele diferite de la bord, așa cum se vede mai sus în figura 8. Configurația specifică variază în funcție de soluții. În majoritatea configurațiilor, ambele UT-uri sunt conectate tot timpul la AP-uri, unde al doilea UT este fie utilizat pentru a transmite simultan, ca o rezervă, fie pentru a se conecta la următorul AP în avans. În anumite soluții, UT-urile sunt configurate în mod intenționat cu diferite SSID-uri, astfel încât să nu se conecteze la același AP.

O configurație tipică, prezentată în figura 8(b), este de a echipa fiecare AP cu un radio și o antenă omni-direcțională. În contrast, configurația prezentată în figura 8(c) utilizează două antene unidirecționale îndreptate în fiecare direcție, care extinde acoperirea radio.

Comparativ cu figura 8(b), există jumătate de AP în această configurație pentru a oferi aceeași zonă de acoperire. Figura 8(d) prezintă o configurație în care fiecare AP este echipat

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

cu două radiouri, permițându-i să funcționeze simultan pe două frecvențe/SSID-uri. Dacă UT-urile sunt configurate cu SSID-uri diferite, această configurație este mai potrivită în comparație cu cea din figura 8(c), în care aria de acoperire a unui singur AP ar putea fi suficient de mare pentru a acoperi întregul tren, făcând astfel mai puțin probabilă două UT-uri pentru a vă conecta la AP-uri diferite.

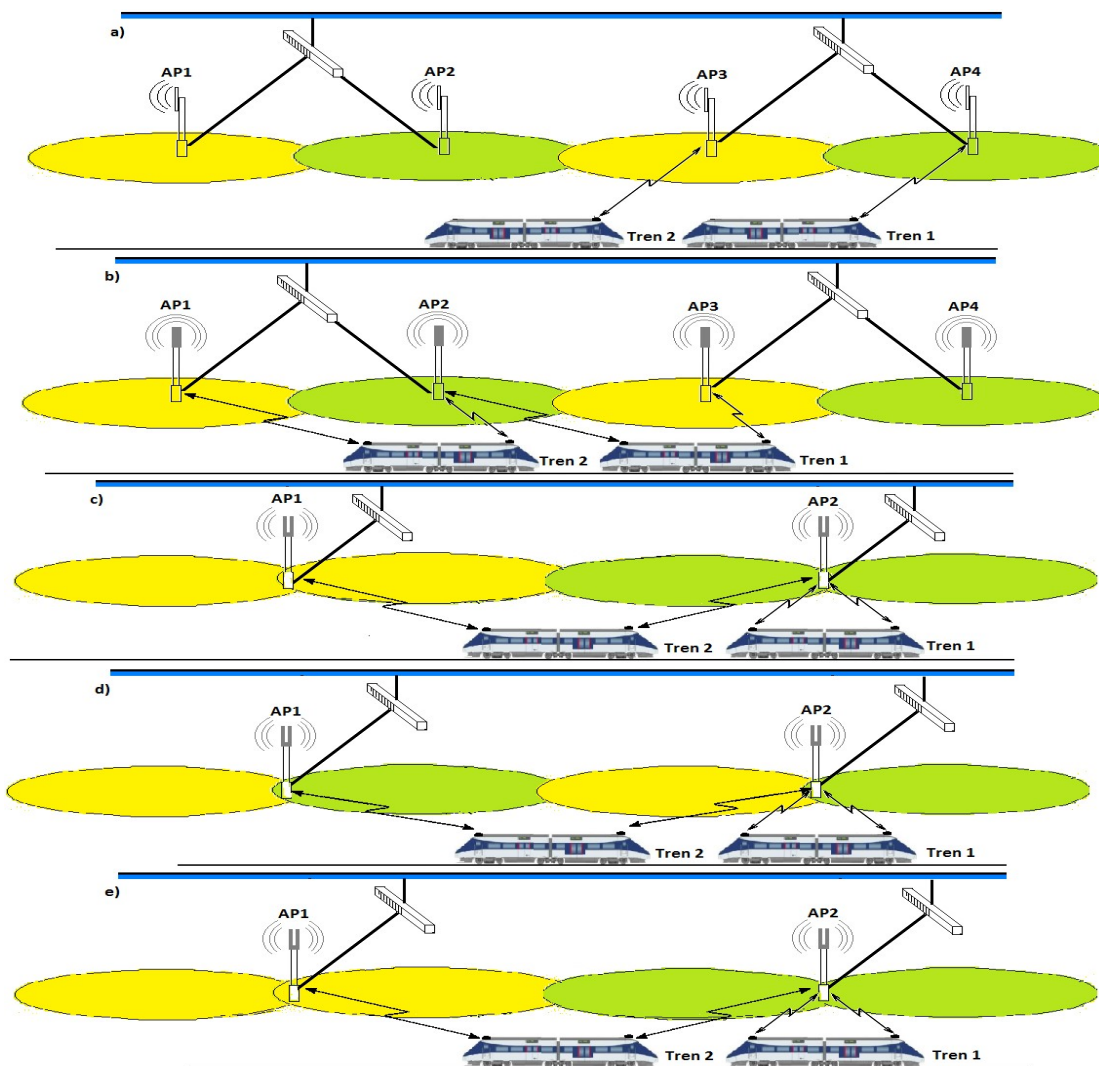


Fig. 8. Configurații fără redundanță sau doar cu redundanță la bord

Problema nodului ascuns apare din nou aici. Deoarece radiourile/antenele unui AP sunt pe două frecvențe diferite, AP 1 încă nu poate auzi ce transmite AP 2 pe frecvența „verde”. Figura 8(e) prezintă o configurație alternativă care rezolvă această problemă prin utilizarea frecvențelor în modul „ABBA”, mai degrabă decât în modul normal „ABAB”. Amplasarea aceleiași antene de frecvență pentru a îmbunătăți eficacitatea protocolului CSMA/CA. În plus, distanța crescută între noile noduri potențiale ascunse, de ex. AP 1 și AP 3 (nu sunt vizibile în figură), minimizează probabilitatea ca semnalele AP 3 să ajungă la AP 1.

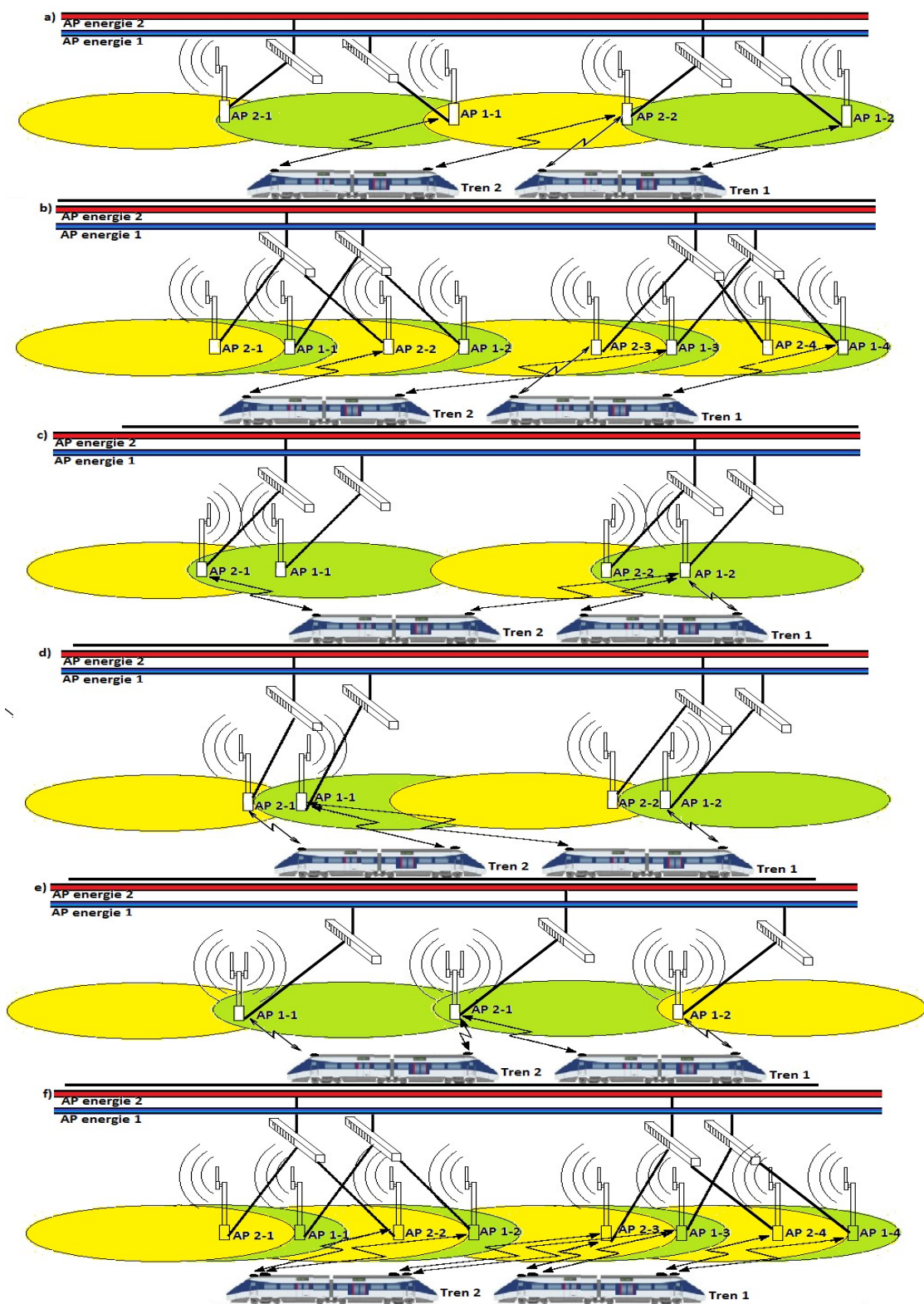


Fig. 9. Configurații cu redundanță atât la bord, cât și la marginea căii.

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

În figura 9(a) în afară de redundanța de bază, sub formă de zone de acoperire suprapuse, redundanța suplimentară este asigurată prin desfășurarea a două rețele backbone separate AP și plasarea AP-urilor în cele două rețele în mod alternativ [34], [58]. Eșecul unei rețele nu îl afectează pe celălalt. Acest lucru seamănă foarte mult cu topologia cu mai multe inele.

Configurația din figura 9(b) adaugă două niveluri suplimentare de redundanță: redundanță de acoperire îmbunătățită, deoarece există o suprapunere mai mare între zonele de acoperire ale AP-urilor învecinate și redundanță AP, deoarece există două AP-uri la fiecare locație. Nici un eșec complet al uneia dintre rețelele principale nu va afecta acoperirea.

Cu toate acestea, acest nivel suplimentar de redundanță vine în detrimentul unui număr crescut - de două ori mai mare - de AP-uri.

Dacă cele două UT-uri sunt configurate pentru a se conecta la AP-uri în rețele backbone diferite, așa cum se arată în figura 9(b), rezultatul este transferuri mai puțin frecvente, deoarece transferul este necesar numai atunci când ambele UT-uri pierd conexiuni numai atunci când două AP-uri sunt plasate unul lângă celălalt. În acest mod, antenele lor pot indica aceeași direcție, ca în figura 9(b), sau în direcții opuse, spre exterior sau spre interior, ca în figura 9(c) și figura 9(d) [34], [58] .

În mod normal, antenele unidirecționale sunt considerate a fi foarte direcționale, fără acoperire pe partea din spate. Obiectivul din spatele instalării antenelor orientate spre interior văzut în unele configurații [100], ca în figura 9(c), este de a evita acest punct mort. Cu toate acestea, antenele unidirecționale nu sunt atât de direcționale în viața reală. În schimb, acoperirea din spatele antenei arată ca în figura 9(d).

În figura 9(e) este prezentată o configurație cu o redundanță de acoperire completă. O examinare atentă a cifrei arată că există o suprapunere de aproape 100% a zonelor de acoperire ale AP-urilor învecinate - jumătate din zonele de acoperire ale AP 1-1 și AP 1-2 (galben) sunt complet ascunse de zona de acoperire a AP 2-1 (verde). Aceasta este în esență aceeași configurație prezentată anterior în figura 8(c), cu excepția faptului că distanța inter-AP a fost redusă foarte mult pentru a permite această suprapunere aproape completă. În cele din urmă, figura 9(f) prezintă aceeași configurație ca în figura 9(b), cu excepția faptului că permite redundanță suplimentară la bord prin utilizarea a două radio/antene per UT în loc de una, permițând patru conexiuni simultane la un moment dat.

CONCLUZII

Comunicarea radio joacă un rol cheie în sistemele moderne de semnalizare bazate pe comunicații, deoarece conectează trenul la marginea căii pentru a transfera informații de control de înaltă rezoluție și în timp real ale trenului. Cu ajutorul acestor informații, CBTC oferă o serie de avantaje majore față de un sistem de semnalizare convențional, și anume, avansuri mai scurte care duc la o capacitate mai mare, mai puține echipamente pe cale, punctualitate mai mare, siguranță îmbunătățită și suport pentru operațiuni automate de tren. În lucrare s-a prezentat un tutorial cuprinzător al CBTC și stadiul tehnicii de utilizare a comunicațiilor radio. O imagine de ansamblu asupra evoluției tehnologiilor de comunicații pentru semnalizarea feroviară a comparat comunicarea bazată pe radio cu comunicarea bazată pe buclă inductivă timpurie și pe ghid de undă. În timp ce aceste tehnologii timpurii suportă costuri mari de instalare și întreținere, cea mai mare provocare a comunicațiilor radio este interferența. O examinare amănunțită a beneficiilor și dezavantajelor utilizării unei tehnologii de comunicații radio, în special IEEE 802.11 Wi-Fi, pentru CBTC, a arătat că succesul Wi-Fi poate fi atribuit în principal ratelor sale ridicate de date, ușurinței de instalare și întreținere, și rentabilitatea acestuia ca rezultat al echipamentului radio COTS ușor disponibil și al funcționării fără licență. Pe de altă parte, sensibilitatea la interferențe, lipsa suportului pentru mobilitate și gama scurtă de semnal sunt unele dintre dezavantajele sale. Lucrarea include o prezentare generală a componentelor fundamentale ale unui sistem CBTC, atât la bord, cât și la marginea căii, precum și a celor trei tipuri de rețele implicate. O comparație între echipamentele radio bazate pe Wi-Fi și primele COTS și echipamentele personalizate s-au dovedit a fi mai ieftine. O imagine de ansamblu aprofundată a configurației rețelei radio CBTC a arătat că, deși o distanță tipică inter-AP în CBTC este de numai 200-300 de metri datorită razei reduse de semnale Wi-Fi, se poate atinge o rază de acțiune semnificativ mai mare de până la kilometri prin ajustarea diferiților parametri. O evaluare a proiectelor și topologiilor alternative pentru rețeaua radio tren-la-cale a arătat că redundanța este cheia asigurării unei disponibilități ridicate în CBTC, iar disponibilitatea poate fi crescută dramatic asigurând redundanța la mai multe niveluri. Roaming-ul într-un mediu CBTC este o realitate inevitabilă datorită gamei reduse de rețele Wi-Fi și a vitezei mari a trenurilor. Astfel, o predare fără probleme de la un punct Wi-Fi AP la altul este o cerință critică. Standardul IEEE 802.11 a fost dezvoltat în primul rând pentru utilizatorii staționari într-o zonă limitată și, prin urmare, inherent nu acceptă mobilitatea. În lucrare s-a făcut o prezentare generală a proiectelor de algoritmi de roaming pentru CBTC, care a arătat că un algoritm de roaming complex și inteligent este astfel o componentă critică a unui sistem de comunicații radio CBTC. A fost inclus un rezumat al diferitelor eforturi de standardizare pentru CBTC. Cu intenția de a atrage mai multă atenție asupra standardului IEEE CBTC, a fost prezentat un scurt rezumat al standardului, inclusiv valorile parametrilor orientative pentru performanțe optime.

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

BIBLIOGRAFIE

- [1] **AG. Siemens, L. Bro, M. Voss, C. Bode**, „*Ad-hoc kommunikationsnetzwerk*, English translation: *Ad-hoc communication network*”. Patent application 10 2017, 203 040.2 (German Trademark and Patent Office), feb. 2017.
- [2] **A. Neacsă, 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.
- [3] **A. Neacsă, N.N. Antonescu, D.B. Stoica**, „*Software Applications for Complex Technological Systems Reliability*”, Journal of the Balkan Tribological Association 15 (1), 45-51, 2009.
- [4] **G. Theeg, S. Vlasenko**. „*Railway Signalling and Interlocking*. Eurailpress”, 2009, ISBN: 978-3-7771-0394-5.
- [5] „*Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements*”, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA: IEEE.
- [6] **R. Pascoe, T. Eichorn**. „*What is communication-based train control?*”, in: IEEE Vehicular Technology Magazine 4.4 (Dec. 2009), pp. 16–21.
- [7] **A. Neacsă, N.N. Antonescu, D.B. Stoica**, „*Modern Solutions for Selecting the Corresponding Machinery Dedicated to Technological Applications*”, Journal of the Balkan Tribological Association 15 (4), 474-479, 2009.
- [8] **C. Cortes Alcala, S. Lin, R. He, C. Briso-Rodriguez**, „*Design and Test of a High QoS Radio Network for CBTC Systems in Subway Tunnels*”, In: Proc. IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC 2011-Spring). May 2011, pp. 1–5.
- [9] **B. Bu, F. Yu, T. Tang**, „*Performance Improved Methods for Communication-Based Train Control Systems With Random Packet Drops*”, in: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 15.3 (June 2014), pp. 1179–1192.
- [10] **T. Tazaki**, „*Development of CBTC for Global Markets*”, in: Hitachi Review 61.7 (2012), pp. 347–351
- [11] **Wikipedia**. „*Communications-based train control - Wikipedia, The Free Encyclopedia*”, URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Communicationsbased-train_control&oldid=740770099.
- [12] **A. Badea, S. Halunga, M. Găină, C. Capotă, E. Stancu**, „*Influence of Manchester encoding over spreading codes used in multiple access techniques for IoT purposes*”, IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), 2019, INSPEC Accession Number: 19359199, DOI: 10.1109/SIITME47687.2019.8990780, Publisher: IEEE
- [13] **UNIFE**, „*The Unife World Rail Market Study - Forecast 2014 to 2019*”, Tech. rep. UNIFE, 2014.
- [14] **Y. Zhang, L. Zhu, L. Chen, T. Tang, S. Liu**, „*A Method for Simulation and Analysis of Trackside Data Communication System in CBTC*”. In: Proc. WRI International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC '09), Vol. 3. Jan. 2009, pp. 529–533.
- [15] **I. Silajev**, „*Thales CBTC - Communication Based Train Control Rail Signalling Solutions*”, URL: [http://www.rpknis.rs/ictforum2010/PPTprezentacije/English/CBTC-Communication%20Based%](http://www.rpknis.rs/ictforum2010/PPTprezentacije/English/CBTC-Communication%20Based%20)

- 20Train%20Control%20-%20Igor%20Silajev.pdf
- [16] **Siemens**, „*Redundant networks for industry*”, URL: http://w3app.siemens.com/mcms/infocenter/dokumentencenter/sc/ic/Documentsu20Brochures/BR_Redundante_Netzwerke_112012_en.pdf.
 - [17] **A. Badea, S. Halunga, G. Luca**, „*Energy optimization for the low data rate IoT devices by using Manchester's coded pseudo-random sequences*”, (ECBS 2019), Proceedings of the 6th Conference on the Engineering of Computer Based Systems September 2019 Article No.: 19 Pages 1-4 ,Bucharest, Romania, ISBN: 978-1-4503-7636-5, <https://doi.org/10.1145/3352700.3352719>.
 - [18] **S. Morar**. „*Evolution of Communication Based Train Control worldwide*”, in: Proc. IET Professional Development Course on Railway Signalling and Control Systems (RSCS '10). June 2010, pp. 281–289.
 - [19] **E. Stancu, C. Capotă, A. Badea, S. Halunga, N. Vizireanu**, „*Measurements of the emission parameters of a WiMax BTS under interference conditions*”, CONFERENCE ATOM-N 2020, Friday, August 21, Oral Presentation, O Session, OMN100-92, - ibn.idsi.md.
 - [20] „*Transportation Systems Design, Inc - Communications Based Train Control*”, URL: <http://www.tsd.org/cbtc/>.
 - [21] **T. Sullivan**, „*NYCT gets resigaled*”, in: Mass Transit 25.1 (1998), pp. 34–40.
 - [22] Siemens, „*Trainguard MT: Optimal performance with the world's leading automatic train control system for mass transit*”, 2014. URL: <http://www.siemens.com/press/pool/de/feature/2013/infrastructure-cities/mobility-logistics/2013-02-trainguardmt/broschuere-trainguard-mt-e.pdf>.
 - [23] **RailwayAge**, „*Siemens, Thales land NYCT QBL West Phase 1 CBTC contracts*”, aug. 2015, URL: <http://www.railwayage.com/index.php/communications/siemens-lands-nyct-qbl-phase-1-cbtc-contract.html>.
 - [24] **B. T. Sullivan**, „*CBTC Radios - What to Do? Which Way to Go?*” in: Railway Age (2005), URL: <http://www.tsd.org/papers/CBTCRadios.pdf>.
 - [25] **M. Fitzmaurice**. „*Wayside Communications: CBTC Data Communications Subsystems*”, in: IEEE Vehicular Technology Magazine 8.3 (Sept. 2013), pp. 73–80.
 - [26] **M. Heddebaut**, „*Leaky Waveguide for Train-to-Wayside Communication-Based Train Control*”, in: IEEE Transactions on Vehicular Technology 58.3 (Mar. 2009), pp. 1068–1076. ISSN: 0018-9545.
 - [27] **B. Bing, W. Hongwei, Z. Hongli, J. Hailin**, „*A research on the hybrid train-to-ground communication method in CBTC*”, in: Proc. IEEE International Conference on Service Operations, Logistics, and Informatics (SOLI), July 2011, pp. 512–516.
 - [28] **S. Shirlaw**, „*Radio and communications-based train control: Migration, interoperation and system engineering issues*”, in: Proc. International Conference on Railway Engineering - Challenges for Railway Transportation in Information Age (ICRE '08). Mar. 2008, pp. 1–5.
 - [29] **R. Lardennois**, Siemens. „*Wireless Communication for Signaling in Mass Transit*”, sept. 2003, URL: <http://www.tsd.org/papers/SiemensWirelessCommsInMassTransit.pdf>.
 - [30] **B. Bing, W. Hongwei, Z. Hongli, J. Hailin**, „*A research on the hybrid train-to-ground communication method in CBTC*”, in: Proc. IEEE International Conference on Service Operations, Logistics, and Informatics (SOLI), July 2011, pp. 512–516.
 - [31] **H. Jiang, H. Zhao, B. Zhao**, „*A novel handover scheme in wireless LAN in CBTC system*”, in:

SISTEME DE COMUNICAȚII RADIO PENTRU CONTROLUL TRENURILOR BAZAT PE COMUNICAȚII - CBTC

- Proc. IEEE International Conference on Service Operations, Logistics, and Informatics (SOLI). July 2011, pp. 473–477.
- [32] **Y. Wei, H. Lu, Z. He**, „*Research of the Digital Communication System for CBTC Based on 802.11*”, in: Proc. Third International Conference on Multimedia Information Networking and Security (MINES), nov. 2011, pp. 95–99.
 - [33] **L. Zhu, F. Yu, B. Ning**, „Availability Improvement for WLAN-Based Train-Ground Communication Systems in Communication-Based Train Control (CBTC)”, in: Proc. IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), sept. 2010, pp. 1–5.
 - [34] **X. TianHua, T. Tao, G. ChunHai, C. BaiGen**, „*Dependability analysis of the data communication system in train control system*”, in: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 52.9 (2009), pp. 2605–2618.
 - [35] **Y.B. Lin, S.N. Yang, C.T. Wu**, „*Improving Handover and Drop-off Performance on High-Speed Trains With Multi-RAT*”, in: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 15.6 (dec. 2014), pp. 2720–2725. ISSN: 1524- 9050.
 - [36] **A. Böhm, M. Jonsson**, „*11p-based Delay-Sensitive Vehicle-to-Infrastructure Communication, Handover*”, in IEEE 802, Tech. rep. School of Information Science, Computer and Electrical Engineering (IDE), Halmstad University, Sweden, 2007.
 - [37] **M. Kassab, M. Wahl, M. Casanova, M. Berbineau, M. Aguado**, „*IEEE 802.11a performance for infrastructure-to-train communications in an underground tunnel*”, in: Proc. 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications (ITST), Oct. 2009, pp. 447–452
 - [38] **A. Badea, M.G. Berceanu, C. Florea, S. Halunga**, „*The performance of Manchester source coding in an uplink LDPC channel coding OFDM-based Massive MIMO system*”, CONFERENCE ATOM-N 2020, Friday, August 21, Oral Presentation, O Session, OMN100-108, - ibn.idsi.md.
 - [39] **P. Roshan, J. Leary**, „*Wireless LAN Fundamentals*”, Cisco Press, IEEE 802.11 2003. ISBN: 978-1-58705-077-0.
 - [40] **HUBER+SUHNER**, „CBTC Connectivity Solutions”, 2011. URL: <http://literature.hubersuhner.com/Marketsegments/Transportation/RailCBTCEN>.
 - [41] **E. Kuun**, „*Open standards for CBTC and CCTV radio-based communication*”, in: Proc. APTA Rail Transit Conference. 2004.
 - [42] **P. Roshan, J. Leary**, „*Wireless LAN Fundamentals*”, IEEE 802.11, Cisco Press, 2003. ISBN: 978-1-58705-077-0 .
 - [43] **J. Montavont, N. Montavont, T. Noel**. „*Enhanced schemes for L2 handover in IEEE 802.11 networks and their evaluations*”, in: Proc. IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '05), vol. 3, sept. 2005, pp. 1429–1434.
 - [44] „*Local and Metropolitan Area Networks–Port-Based Network Access Control*”, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA: IEEE, 2010.
 - [45] „*WLAN Roaming - the basics*”, Mar. 2010. URL: <http://www.techworld.com/mobile/wlan-roaming--the-basics-435>.
 - [46] „*Trial-Use Recommended Practice for Multi-Vendor Access Point Interoperability Via an Inter-Access Point Protocol Across Distribution Systems Supporting IEEE 802.11 Operation*”, 3 Park

- Avenue, New York, NY 10016-5997, USA: IEEE, 2003.
- [47] **M. Fitzmaurice**, „*Use of Wireless Local Area Networks in Rail and Urban Tranzit Environments*”, in: Transportation Research Record 1916 (2005), pp. 42–46.
 - [48] **H. Wang, F. R. Yu, L. Zhu, T. Tang, B. Ning**, „*A Cognitive Control Approach to Communication-Based Train Control Systems*”, In: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 16.4 (aug. 2015), pp. 1676–1689.
 - [49] **A. F. Molisch**, „*Wireless Communications*”, 2nd ed. Wiley, 2011. ISBN: 978-0-470- 74186-3.
 - [50] **L. Zhu, Y. Zhang, B. Ning, H. Jiang**, „*Train-Ground Communication in CBTC Based on 802.11b: Design and Performance Research*”, in: Proc. WRI International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC '09), vol. 2, jan. 2009, pp. 368–372.
 - [51] **K. K. Yoo, R. Y. Kim**, „*HiNet: Radio Frequency Communication Based Train Control (RF-CBTC) System Jointly Using Hierarchical Modulation and Network Coding*”, in: vol. 7425. Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2012. Chap. Convergence and Hybrid Information Technology: 6th International Conference, ICHIT 2012, Proceedings, pp. 130–137.
 - [52] „*Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*”, 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997, USA: IEEE, 2012.
 - [53] **Thales**, „SelTrac CBTC worldwide references”, aug. 2014. URL: [https : / / www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/seltrac_cbtc_references.pdf](https://www.thalesgroup.com/sites/default/files/asset/document/seltrac_cbtc_references.pdf).
 - [54] **S. Neacsu, C.N. Eparu, A. Neacşa**, „*The Optimization of Internal Processes from a Screw Compressor with Oil Injection to Increase Performances*”, International Journal of Heat and Technology 37 (1), 148-152, 2019.
 - [55] **L. Zhu, F. R. Yu, B. Ning, T. Tang**, „*Design and Performance Enhancements in Communication-Based Train Control Systems With Coordinated Multipoint Transmission and Reception*”, in: IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 15.3 (june 2014), pp. 1258–1272.
 - [56] **T. Changqing, Z. Guoxin, W. Hui, K. Kai, R. Yanrong**, „*Propagation in tunnel in case of WLAN applied to Communications-Based Train Control system*”, in: Proc. IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing (CCWMC '09). Dec. 2009, pp. 393–396.
 - [57] **H. Rhee**, „*ATO Data of train control system based on Wi-Fi mesh telecommunication*”, in: Proc. The 21st International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 2013
 - [58] **L. Zhu, F. Yu, B. Ning**, „*Availability Improvement for WLAN-Based Train-Ground Communication Systems in Communication-Based Train Control (CBTC)*”, in: Proc. IEEE 72nd Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), sept. 2010, pp. 1–5.