

COMUNICAȚII WI-FI PENTRU - CBTC

COMMUNICATIONS-BASED TRAIN CONTROL – CBTC

Alexandru BADEA¹, Gabriel POPA², Ion MATEI³
Victor Mihai POPA⁴, Claudiu-Nicolae BADEA⁵, George DUMITRU⁶

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

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

^{3,4}Cargo Trans Vagon SA, str. Vaselor no. 34, sector 2 București, România,
e-mail: Ion MATEI: matei@tts-group.ro, Victor Mihai POPA: pvmmihai@yahoo.com

^{5,6}Autoritatea Feroviară Română - Calea Griviței nr. 393, sectorul 1, București, România
e-mail: Claudiu-Nicolae BADEA: badeaclaudiun@gmail.com, George DUMITRU:
george.dumitru.cfr@gmail.com,

Rezumat: Controlul bazat pe comunicații al trenului (CBTC) este un sistem modern de semnalizare care utilizează comunicații radio pentru a permite schimbul de informații de înaltă rezoluție și control în timp real al trenului între tren și infrastructura de comunicații de pe linie. Marea majoritate a sistemelor CBTC din lume utilizează IEEE 802.11 Wifi ca tehnologie de comunicații radio, în principal datorită eficienței sale din punct de vedere al costurilor. Rețelele de cale ale acestor sisteme utilizează în principal infrastructura Wifi convențională. Aceasta înseamnă că un tren trebuie să se asocieze în mod constant (adică să facă legătura) cu punctele de acces Wifi (AP) de pe cale în timp ce rulează.

Cuvinte cheie: redundanța, frecvență, criptare, radio, tren, semnal, Wifi, interfață.

Abstract: Train Communications Control (CBTC) is a modern signaling system that uses radio communications to allow the exchange of high-resolution information and real-time train control between the train and the on-line communications infrastructure. The vast majority of CBTC systems in the world use IEEE 802.11 Wifi as a radio communication technology, mainly due to its cost-effectiveness. The track networks of these systems mainly use the conventional Wifi infrastructure. This means that a train must constantly associate (ie connect) with Wifi (AP) access points on the track while running.

Keywords: redundancy, frequency, encryption, radio, train, signal, Wifi, interface.

1. INTRODUCERE

Spre deosebire de linia ferată principală (adică trenurile suburbane pe distanțe lungi), numărul trenurilor în tranzit în masă este mai mare, de asemenea, ca urmare a unor progrese mai scurte. Prin urmare, tranzitul în masă necesită o tehnologie radio de capacitate mai mare în comparație cu GSM-R (sistemul global pentru comunicații mobile - pe calea ferată), adoptat de standardul european principal „ERTMS” [1] („European Rail Traffic Management System”- Sistemul european de gestionare a traficului feroviar).

Deși traficul CBTC în sine nu necesită rate de date ridicate, este totuși cheia pentru a

permite aplicații CBTC moderne, cum ar fi diagnosticarea și întreținerea de la distanță, actualizarea „software”-ului (sistemului de operare) de la distanță, „CCTV” [2] („Closed circuit television” - Televiziune cu circuit închis), redundanța transmisiei, precum și aplicații de informare pentru pasageri, cum ar fi Internetul de la bord. Rata de date pentru suportarea acestor aplicații poate ajunge cu ușurință la câțiva MB pe secundă pe tren. Transmisia de date fără cablu de bună calitate cu tehnologia „Wi-Fi” („Wireless Fidelity” [3] - fidelitate transmisie date, fără cablu), care acceptă rate de date de până la 300 MB/s, nu numai că îndeplinește această cerință, dar are și capacitatea de a face acest lucru în viitorul apropiat.

Natura subterană a căii ferate de transport în masă înseamnă că nu este fezabilă instalarea antenelor pe catarguri înalte, cum ar fi în locații în aer liber. Prin urmare, este inevitabil să se instaleze numeroase AP-uri de-a lungul căii pentru a acoperi o zonă mare [4]. Disponibilitatea costurilor reduse a echipamentelor Wi-Fi a jucat, așadar, un rol decisiv în succesul Wi-Fi pentru CBTC [5].

În timp ce tehnologiile celulare mai avansate, cum ar fi LTE [6], pot îndeplini cerințele privind rata de date, acestea sunt comparativ mai puțin rentabile, deoarece fie solicită furnizorului CBTC să își desfășoare propria infrastructură de rețea, fie să obțină conexiunea radio de la o companie de telecomunicații și să plătească în funcție de utilizare. Mai mult, asigurarea acoperirii radio în locațiile subterane este problematică [7], deoarece undele radio de înaltă frecvență pe care operează aceste tehnologii nu pot pătrunde bine prin obiectele solide.

Merită subliniat faptul că, deși este semnificativ mai mică comparativ cu o tehnologie convențională, cum ar fi bucla inductivă, echipamentele Wi-Fi sunt totuși vulnerabile la vandalism [5]. În special, AP-urile de cale, deși sunt închise în carcase metalice de protecție și montate pe catarg, sunt încă vizibile și la îndemână. Exemple obișnuite sunt deteriorarea carcasei AP și tăierea cablurilor la carcasă sau la antenele AP.

Câteva dintre dezavantajele alegerii tehnologiei Wi-Fi includ: susceptibilitatea la interferență; necesită măsuri de securitate stricte; lipsa suportului pentru mobilitate; interval scurt; congestia rețelei;

Sensibilitatea la interferențe de la alți utilizatori de Wi-Fi și non-Wi-Fi este o problemă cunoscută. Cu toate acestea, din nou, se dovedește a fi mai puțin o problemă din cauza naturii subterane a transportului de masă. În mediile subterane, probabilitatea de interferență a altor utilizatori este relativ mai mică și poate fi controlată mai eficient [8].

Deși preocupările de securitate prezentate aici se aplică oricărei tehnologii radio bazate pe difuzare, utilizarea benzii „ISM” [9] („audio bands are portions of the radio spectrum reserved internationally for industrial, scientific and medical” - benzile audio sunt porțiunile din spectrul radio rezervat la nivel internațional pentru industrie, știință și medicină) le face și mai relevante pentru Wi-Fi. Sunt necesare măsuri de securitate adecvate pentru a împiedica utilizatorii neautorizați să se conecteze la un AP CBTC cu dispozitivele lor Wi-Fi, să aducă traficul sau să fure resurse de lățime de bandă. O preocupare relevantă sunt atacurile de blocare care pot perturba întreaga rețea radio sau atacurile „om-în-mijloc” în care un intrus se poate prezenta ca un AP CBTC legitim, determinând conectarea trenurilor la aceasta [10]. Prin urmare, metodele de autentificare și criptare de date de la un „capăt la altul” sunt extrem de critice. Prin urmare, standardele relevante care specifică măsuri de securitate adecvate, cum ar fi EN 50159, sunt în mod normal implementate de sistemele CBTC [11].

Standardul IEEE 802.11 a fost dezvoltat în primul rând pentru a înlocui cablurile din rețelele locale, cum ar fi mediile de birou și, prin urmare, inerent nu acceptă mobilitatea și gamele mari [11]. Prin urmare, predarea nu a fost luată în considerare. Din acest motiv,

COMUNICAȚII WI-FI PENTRU - CBTC

sistemele de comunicații radio CBTC implementează, în general, proprii algoritmi de predare [12].

Viteza generală scăzută a trenurilor de transport în masă minimizează și mai mult această lipsă inerentă de suport pentru mobilitate în IEEE 802.11 [11].

În rețelele celulare precum „GSM” („Global System for Mobile Communication” - Sistem global pentru comunicații mobile) sau „LTE” (long-term evolution - is industry jargon used to describe the particular type of 4G that delivers the fastest mobile internet experience / evoluție pe termen lung - este jargonul din industrie folosit pentru a descrie tipul special de comunicații de nivel 4G, care oferă cea mai rapidă experiență pentru rețeaua de internet mobil), distanța dintre un nod mobil și o stație de bază este în mod normal mare. Comparativ, în transportul de masă, distanța dintre un tren și un AP de cale este scurtă, în mare parte datorită mediilor de tunel aglomerate. Acest lucru face ca gama scurtă de Wi-Fi să fie mai puțin o problemă [13]. Problema este în continuare minimizată prin faptul că există un număr mare de AP-uri desfășurate de-a lungul căii.

Calitatea slabă a serviciului (QoS) din cauza congestiei în rețelele de acces mediu bazate pe conflict, precum IEEE 802.11 (specify standards for Ethernet and wireless devices such as range, frequency, stuff like that - specificați standardele pentru dispozitive Ethernet și wireless cum ar fi intervalul, frecvența, altele asemenea), aceasta constituind o problemă bine cunoscută, mai ales atunci când numărul de utilizatori este mare. Cu toate acestea, nu este o problemă la fel de gravă în scenariul CBTC. Este puțin probabil să existe mai multe trenuri într-o celulă Wi-Fi la un moment dat, deoarece trenurile pe șine nu se pot apropia prea mult unele de altele din motive de siguranță. Acest lucru se datorează lungimii mai mari a trenului comparativ cu dimensiunea unei celule. Mai mult, într-o configurație tipică, doar două radiouri transmit, una la fiecare capăt al trenului. Probabilitatea ca ambele capete să fie în aceeași celulă sunt, prin urmare, scăzute în continuare [14].

2. BANDA DE FRECVENȚĂ

Aproape toată instalația CBTC funcționează astăzi într-una dintre cele trei benzi ISM fără licență: 900 Mz, 2,4 GHz și 5 GHz. Dintre acestea, 2,4 GHz este cel mai populară printre furnizorii CBTC, urmată de 5 GHz [15]. În tabelul 1 sunt ilustrate intervalele de frecvență ale benzii ISM împreună cu aplicațiile lor de utilizator.

Tabelul 1. Benzi de frecvență ISM și utilizatori

Gama de frecvență	Utilizatori
902 - 928 [MHz]	Cuptoare cu microunde, telefoane fără fir, încălzitoare industriale, radar militar, RFID („Radio Frequency Identification” - Identificarea frecvenței radio), IEEE 802.11ah.
2.4 - 2.4835 [GHz]	IEEE 802.11b/g, cuptoare cu microunde, telefoane fără fir, „Bluetooth”, deschizători de uși de garaj, monitoare pentru bebeluși, alarme auto, imprimante, tastaturi / mouse-uri.
5.725 - 5.825 [GHz]	IEEE 802.11a/h
61 - 61.5 [GHz]	IEEE 802.11a/h

Interferența dintre canalele utilizate, atât canalul normal, cât și canalul adiacent, este o problemă bine cunoscută în rețelele Wi-Fi.

Un motiv major pentru alegerea Wi-Fi este utilizarea bandei ISM. Aceasta înseamnă că operatorii feroviari nu trebuie să-și facă griji cu privire la obținerea unei licențe de la un organism de reglementare.

3. INTERFERENȚE

În SUA, această bandă a fost desemnată de Comisia Federală pentru Comunicații (FCC) ca fiind fără licență, ceea ce înseamnă că poate fi utilizată de oricine, fără a fi necesară obținerea unei licențe. Unele restricții privind puterea de transmisie se aplică totuși [16]. În Europa, reglementări similare sunt aplicate de Institutul European de Standarde în Telecomunicații (ETSI), Corpul Autorităților Europene de Reglementare în Comunicații Electronice (BEREC) și Comisia Europeană (CE).

Cu toate acestea, deoarece numărul de utilizatori care utilizează o bandă fără licență este semnificativ mai mare, există o probabilitate mai mare de interferență din partea altor utilizatori din bandă. De exemplu, într-un studiu [17] privind linia 1 de transport feroviar Chongqing din China, au fost observate până la 1300 „SSID”-uri („Service Set Identifier” - Identificarea setului de servicii) unice pe o perioadă de o secundă este o secvență de caractere care identifică în mod unic o rețea Wi - Fi (sau AP). Prin urmare, utilizarea crescândă a benzii de 2,4 [GHz] pentru sistemele CBTC de către operatorii feroviari a ridicat îngrijorări. De exemplu, eșecurile CBTC la metroul din Shenzhen au fost atribuite interferențelor cauzate de utilizatorii de Wi-Fi non-CBTC din locațiile înconjurătoare [18].

Având în vedere aceste motive, în mod normal se efectuează mai întâi un sondaj RF (frecvență radio) pentru a determina cantitatea de interferență înainte de planificarea plasării AP [19]. Cu toate acestea, proliferarea rapidă și pe scară largă a smartphone-urilor („telefoanelor inteligente”) și a altor dispozitive portabile înseamnă că nu este banal ca astfel de sondaje să prezică cu precizie interferența chiar și în viitorul apropiat [20].

Pentru a minimiza interferența canalelor adiacente, AP-urile adiacente din sistemele CBTC sunt desfășurate pe canale de frecvență alternative.

4. LICENȚIERE

Achiziționarea unei benzi licențiate este soluția optimă pentru a preveni riscul de interferență în sistemele CBTC. Cu toate acestea, este un proces administrativ îndelungat, cu șanse limitate de succes datorită deficitului de spectru. Spectrul disponibil există în benzi pentru care există puțin sau deloc echipamente radio disponibile. Alocarea în aceste benzi ar necesita, prin urmare, o investiție semnificativă în cercetare și dezvoltare de către furnizorii de radio înainte de implementarea unui sistem CBTC complet funcțional [16], [21].

Există, totuși, câteva excepții, în special sistemul Copenhagen S-train CBTC, pentru care banda 5.925-5.975 GHz a fost autorizată [22].

5. FACTORI PENTRU ALEGEREA UNEI BENZI DE FRECVENȚĂ

În CBTC, alegerea între benzile de frecvență de 2,4 GHz și 5 GHz este în general determinată de următorii factori:

- disponibilitatea echipamentelor radio rentabile: este mai probabil ca astfel de echipamente să fie disponibile la 2,4 GHz din cauza pieței mari a furnizorilor. Vanzătorii CBTC vor furniza mai degrabă un sistem de comunicații bazat pe echipamente „COTS”

COMUNICAȚII WI-FI PENTRU - CBTC

(„commercial-off-the-shelf” - vânzare cu amănuntul) [23] ușor disponibile decât să dezvolte propria lor soluție brevetată [19];

- densitatea și interferența utilizatorilor: datorită unui număr semnificativ mare de utilizatori Wi-Fi și non-Wi-Fi, banda de 2,4 GHz este mult mai predispusă la interferențe în comparație cu banda de 5 GHz, după cum se poate observa în tabelul 1;

- intervalul semnalului: în general, cu cât frecvența unei unde radio este mai mare, cu atât distanța pe care o poate parcurge este mai mică. Astfel, undele radio de 2,4 GHz acoperă o distanță substanțial mai mare decât undele de 5 GHz, cu aceeași putere de transmisie. Acest lucru se datorează caracteristicilor undelor radio de înaltă frecvență care nu numai că se atenuează mai repede, dar, de asemenea, nu penetrează obiecte solide aproape la fel de bine ca undele de joasă frecvență.

Cu toate acestea, un avantaj al semnalelor de înaltă frecvență este că, deoarece acestea nu străbat atât de departe, ele interferează și mai puțin cu semnalele învecinate;

- ușurința instalării: frecvența de operare conduce, de asemenea, la numărul de AP-uri instalate. Gama de semnal mai redusă de unde radio de 5 GHz înseamnă distanțe mai mici între AP-uri, rezultând un număr mai mare de instalații AP. Mai mult, frecvența conduce, de asemenea, locația și înălțimea instalației AP, datorită caracteristicilor de propagare;

- numărul de canale disponibile: la configurarea canalelor de frecvență pentru AP-urile adiacente, de regulă, sunt preferate canalele care nu se suprapun pentru a limita în continuare interferența. Cu toate acestea, doar 3 și 4 canale care nu se suprapun sunt disponibile în IEEE 802.11b (modulație „DSSS” - „Direct sequence spread spectrum” - Spectru răspândit de secvență directă) și IEEE 802.11g (modulație „OFDM” - „Orthogonal frequency-division multiplexing” - Multiplexare ortogonală de diviziune a frecvenței), respectiv [24]. Comparativ, IEEE 802.11a, care funcționează în banda de 5 GHz, permite 23 de canale care nu se suprapun [25].

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..

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 capacitate mai mare, mai puține echipamente pe cale, punctualitate mai mare, siguranță îmbunătățită și suport pentru operațiuni automate de tren.

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 urmare a echipamentului radio COTS ușor disponibil și a funcționării fără licență. Pe de altă parte, sensibilitatea la interferențe, lipsa suportului pentru mobilitate și gama scurtă de semnal sunt unele dintre dezavantajele sale. 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, inerent nu acceptă mobilitatea. Capitolul a prezentat 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.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **S.K. Abed**, „*European rail traffic management system-an overview*”, 2010 1st International Conference on Energy, Power and Control (EPC-IQ), pages 173-180.
- [2] **E. Kuun, W. Richard**, „*Open standards for CCTC and CCTV radio-based communication*”, Alcatel telecommunications review, 2004, 5 – Technical Forums II Communications-Based Train Control, pages 1-10.
- [3] **C. Song, B. Han, H. Yu, X. Zhang**, „*Study on coexistence and anti-interference solution for subway CBTC system and MiFi devices*”, 2013 5th IEEE International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology, Guilin, China, pages 174–180.
- [4] **T. Wen, C. Constantinou, L. Chen, Z. Tian, C. Roberts**, „*Access point deployment optimization in cbtc data communication system*”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 19 (6) (2017), pages 1985–1995.
- [5] **J. Farooq, J. Soler**, „*Radio Communication for Communications-Based Train Control (CBTC): A Tutorial and Survey*”, IEEE Communications Surveys Tutorials 19, 3 (2017), pages 1377–1402.
- [6] **P. Fraga-Lamas, J. Rodríguez-Piñeiro, J. A. García-Naya, L. Castedo**, „*Unleashing the potential of LTE for next generation railway communications*”, in Proc. 8th Int. Workshop Commun. Technol. Veh. (Nets4Cars/Nets4Trains/Nets4Aircraft), vol. 9066. Sousse, Tunisia, May 2015, pages 153–164.
- [7] **A. Aziminejad; A.W. Lee; G. Epelbaum**, „*Underground Communication: Radio Propagation Prediction for CBTC Data Communication Subsystem Design*”, IEEE Vehicular Technology Magazine, Volume: 10, Issue: 3, Sept. 2015, pages 71-79.
- [8] **R. Chaloo, A. Oladeinde, N. Yilmazer, S. Ozelik, L.Chaloo**, „*An overview and assessment of wireless technologies and co-existence of ZigBee, Bluetooth and Wi-Fi devices*”, Procedia Computer Science, volume 12, 2012, pages 386-391.
- [9] **J. Bai, C. Liu, A. Sabharwal**, „*Increasing cellular capacity using ISM band side-channels: a first study*”, AllThingsCellular '14: Proceedings of the 4th workshop on All things cellular: operations, applications, & challenges, August 2014, pages 9–14.
- [10] **Y. Li, L. Zhu, H. Wang, F.R. Yu, S. Liu**, „*A Cross-Layer Defense Scheme for Edge Intelligence-Enabled CBTC Systems Against MitM Attacks*”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, volume 22, Issue: 4, April 2021, pages 2286 – 2298.
- [11] **J. Farooq, J. Soler**, „*Radio Communication for Communications-Based Train Control (CBTC): A Tutorial and Survey*”, IEEE Communications Surveys & Tutorials, volume 19, Issue 3, thirdquarter 2017, pages: 1377 – 1402.
- [12] **J. Xu, L. Chen, W. Gao**, „*CBTC Simulation Platform Design and Study*”, Journal of Computer and Communications, vol. 7, pages 61-67, 2015.
- [13] **R. Alvarez, J. Roman**, „*ETCS L2 and CBTC over LTE — Convergence of the radio layer in advanced Train Control Systems*”, IRSE (Institution of Railway Signal Engineers), oct. 2013, pages 1–12.
- [14] **H. Jiang, H. Zhao, B. Zhao**. „*A novel handover scheme in wireless LAN in CBTC system*”, in IEEE International Conference on Service Operations, Logistics, and Informatics, pages 473–477, July 2011.
- [15] **J.W. Wu**, „*2.4/5-GHz dual-band triangular slot antenna with compact operation*”, Microwave and Optical Technology Letters, vol. 45, pages 81–84, 2005.
- [16] **M. Fitzmaurice**, „*Use of 2.4 GHz frequency band for Communications Based Train Control data communications systems*”. In: Proc. IEEE/ASME Joint Rail Conference, apr. 2006, pages. 263–267.

COMUNICAȚII WI-FI PENTRU - CBTC

- [17] **M. Voss**, „*Siemens Internal Report*”, Braunschweig, Germany: Siemens AG, Nov. 2015.
- [18] South China Morning Post, „*Public Wi-Fi signal may have caused Shenzhen subway train stoppage*”. Nov. 2012. URL: <http://www.scmp.com/news/china/article/1076596/public-wi-fi-signal-may-have-caused-shenzhen-subway-trainstoppage>.
- [19] **A. Neacsu, 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.
- [20] **A. Neacsu, N.N. Antonescu, D.B. Stoica**, „*Software Applications for Complex Technological Systems Reliability*”, Journal of the Balkan Tribological Association 15 (1), 45-51, 2009
- [21] **M. Fitzmaurice**, „*Wayside Communications: CBTC Data Communications Subsystems*”, in: IEEE Vehicular Technology Magazine 8.3, 2013, pages. 73–80.
- [22] **G. Naik, J.M. Park, J. Ashdown, W. Lehr**, „*Next generation Wi-Fi and 5G NR-U in the 6 GHz bands: Opportunities and challenges*”, IEEE Access, volume 8, 12 august 2020, pages 153027- 153056.
- [23] **T. Sullivan**, „*CBTC Radios – What to Do? Which Way to Go?*” Railway Age Magazine C&S Buyers Guide, 2005.
- [24] **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, pages 95–99.
- [25] *Here’s why you should use 5GHz WiFi instead of 2.4GHz*, URL: <http://pocketnow.com/2014/01/23/5ghz-wifi>.