

SISTEME CBTC DE SUPRAVEGHERE A TRAFICULUI FERROVIAR

CBTC SYSTEMS FOR RAILWAY TRAFFIC SUPERVISORY

Alexandru BADEA¹, Gabriel POPA², Monica VĂLU³
Constantin BIBIRE⁴, Claudiu-Nicolae BADEA⁵, George DUMITRU⁶

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

^{2,4}Universitatea Politehnică București, Splaiul Independenței nr. 313, București, România
e-mail: Gabriel POPA: gabi21popa@yahoo.com; Constantin BIBIRE:
constantin.bibire@yahoo.com

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

Rezumat: Această lucrare oferă o imagine detaliată a proiectului pentru o rețeaua CBTC - „Communications-based train control” (sistem de siguranță și control a circulației trenului bazat pe comunicații / transmiterea datelor - semnalelor) pentru circulația feroviară. În lucrare au fost evidențiate utilizările în modul „ad-hoc” a sistemelor Wi-fi. Un tren poate pur și simplu să transmită pachete de date. Când un AP - „Access Point (punct de acces) primește un pachet, îl poate redirecționa către următorul AP și așa mai departe, putând crea astfel un lanț de AP-uri. La capătul lanțului, după ce pachetele au ajuns la destinație, pentru minimizarea interferențelor; transmisia datelor se face pe frecvențe multiple. În plus, redundanța este asigurată de un AP care nu numai că trimite semnalul către cel mai apropiat vecin, ci și către suma tuturor celorlalți vecini apropiați. Cercetările dezvoltate în acest domeniu analizează performanța acestui nou proiect de transmitere a datelor utilizând simularea pe calculator. Un număr mare de scenarii au fost analizate cu scopul de a examina rezistența, redundanța și scalabilitatea sistemului.

Cuvinte cheie: redundanță, frecvență, radio, tren, Wi-fi, nod, semnalizare.

Abstract: This paper provides a detailed picture of the project for a CBTC network - "Communications-based train control" (safety and control system for train traffic based on communications / data transmission - signals) for rail traffic. The paper highlighted the "ad-hoc" use of Wi-Fi systems. A train can simply transmit data packets. When an AP - "Access Point" receives a packet, it can redirect it to the next AP and so on, creating a chain of APs. At the end of the chain, after the packets have reached their destination, to minimize interference, the data is transmitted on multiple frequencies. In addition, redundancy is ensured by a PA that not only sends the signal to the nearest neighbor, but also to the sum of all other close neighbors. The research developed in this field analyzes the performance of this new data transmission project using computer simulation. A large number of scenarios were analyzed in order to examine the strength, redundancy and scalability of the system.

Keywords: redundancy, frequency, radio, train, Wi-fi, node, signaling.

1. INTRODUCERE

Traficul feroviar este caracterizat de capacități de frânare slabe din cauza coeficientului de frecare redus dintre roțile materialului rulant și șinele de cale. Prin urmare,

obiectivul principal al unui sistem de semnalizare feroviar precum și ale sistemelor de control și siguranță a circulației trenurilor) sunt de a preveni coliziunea și deraierea trenurilor [1]. Semnalizarea convențională a căilor ferate se bazează pe echipamente de cale, inclusiv semnale luminoase colorate și circuite de cale pentru contorizarea secțiunilor de cale al căror scop principal constă în identificarea menținerea constantă a locației trenului. Cu toate acestea, tehnologiile utilizate în prezent sunt învechite și depășite de standardele actuale de performanță impuse de cadrul de reglementare legislativ. Astfel, tehnologiile utilizate în prezent se apropie de expirarea duratelor de viață pentru majoritatea instalațiilor din întreaga lume, aceste tehnologii devenind perimate și fiind pe cale de consecință responsabile pentru majoritatea întârzierilor de trenuri înregistrate în fiecare zi. Acesta este unul dintre motivele pentru care sistemele convenționale de semnalizare necesită înlocuirea rapidă cu sisteme moderne de semnalizare [2] – [5].

În figura 1(a) este ilustrat „design”-ul convențional pentru o rețea de cale de tip „CBTC” și în figura 1(b) este prezentată o vedere simplificată a proiectului propus pentru a ilustra ideea fundamentală din spatele proiectului.

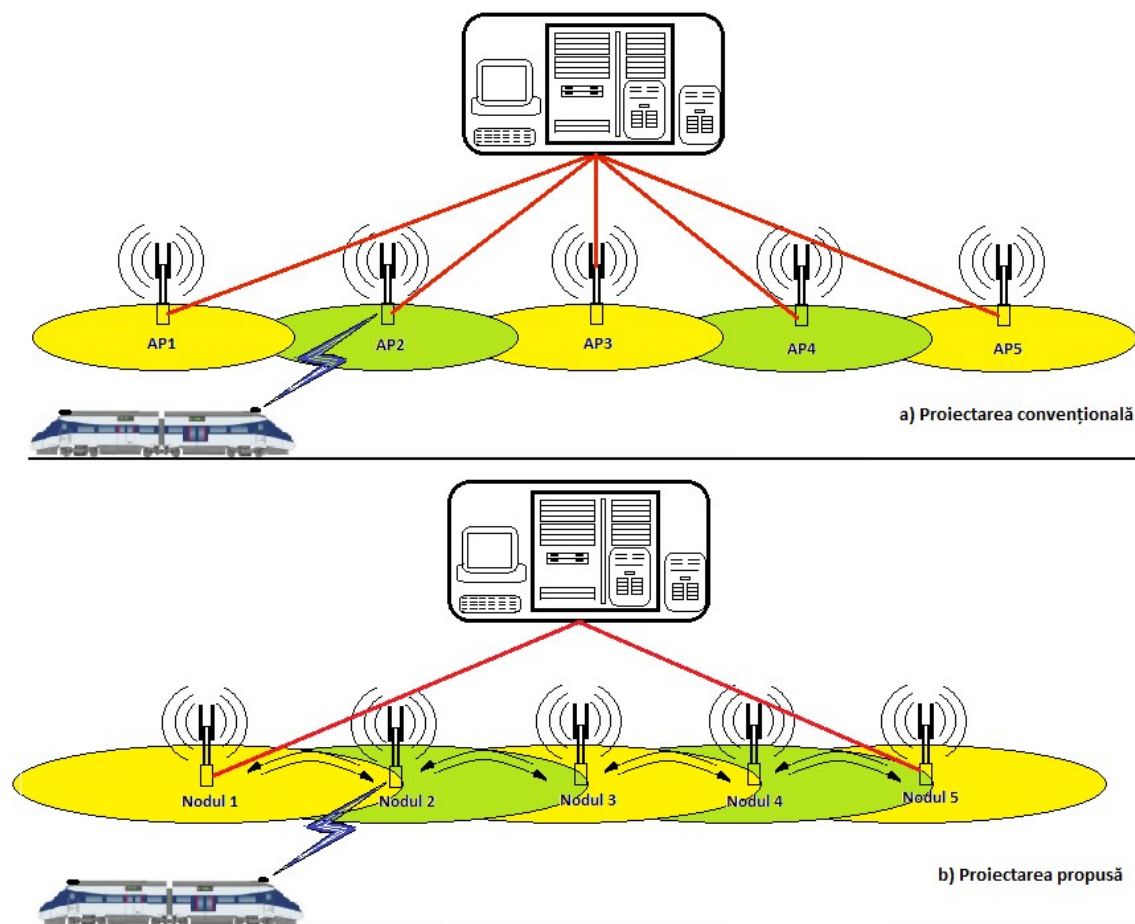


Fig. 1. Rețea de cale „CBTC”: Proiectare convențională și proiectarea propusă

În semnalizarea feroviară modernă, bazată pe comunicații, sunt folosite diferite mijloace de telecomunicații pentru a transfera informațiile de control ale trenului între tren și infrastructura de pe cale. Cu toate acestea, în prezent terminologia utilizată face referire aproape exclusiv la semnalizarea bazată pe comunicații radio. „CBTC” este un sistem de

semnalizare modern, bazat pe comunicații radio, care permite schimbul de informații de înaltă rezoluție și de control al trenului în timp real, utilizând comunicațiile radio [6]. Acest lucru mărește capacitatea traficului pe linii / secții de circulație feroviară, prin reducerea în siguranță a distanței (avansurilor) între trenurile care circulă pe aceeași linie (porțiuni de cale) și minimizează numărul de echipamente de cale subsecvente necesare [7] - [9]. „CBTC” este prima opțiune a operatorilor feroviari (întreprinderilor feroviare) pentru operațiuni de tranzit / trafic în masă, cu peste 100 de sisteme de tip „CBTC” care sunt instalate în prezent în întreaga lume [7]. Ideea fundamentală care stă la baza proiectului supus atenției constă în maximizarea potențialului de transmitere a datelor relevante exploatarea natura difuziei comunicațiilor radio pentru utilizarea unei alternative mai performante comparativ cu cea convențională [10], care implică conexiuni cablate excesive pentru conecta fiecărui „AP” (punct de acces) subsecvent infrastructurii căii ferate [11]. Incipient, un tren transmite pachete de date care sunt ulterior preluate de un nod direcțional din lanțul de emisie și redirecționate către nodul său vecin și așa mai departe, operațiune schematizată în figura 1(b). Prin urmare, nu este necesară scanarea și asocierea „AP”-urilor. Acest lucru face ca trenul să înregistreze o economie de aproximativ 70-120 milisecunde care semnifică o latență tipică de transmisiune în sistemul „CBTC” de fiecare dată când se emit semnale / date unui nou nod din lanț [12].

În esență, în figura 1(b) este ilustrată rețeaua convențională „multi-hop” într-o cheie „ad-hoc” în care toate nodurile funcționează pe aceeași frecvență. În acest context există două provocări majore cu această abordare, respectiv situația în care toate nodurile transmit pe aceeași frecvență, care conduce la o creștere a probabilității de interferență a semnalelor coroborat cu impedimentul produs de apariția nodului ascuns. Al doilea inconvenient îl reprezintă apariția unui singur nod eşuat, context care are ca rezultat direct, apariția unui lanț rupt (în sensul unui singur punct de eșec). Aceste inconveniente constând în apariția nodurilor ascunse, când două noduri se află în raza de transmisie a unui nod comun, dar nu în raza celuilalt. În cazul imposibilității recepționării reciproce a semnalelor și a datelor transmise, mecanismul „CSMA” - Carrier Sense Multiple Access” (Acces divers transmisiune multiplă) / „CA” - Collision Avoidance (Evitarea coliziunii) [13], utilizat în „IEEE 802.11 MAC” (care reprezintă „Standardul creat și menținut de Comitetul Institutului de Ingineri electroniști și electrotehniști” - IEEE / „The standards are created and maintained by the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Committee”, pentru „MAC” - „Multiple Channel Access” / Accesul pe mai multe canale) pentru a evita coliziunile ineficiente [14]. De exemplu, în figura 1(b), nodul 1 și nodul 3 se află în raza de transmisie a nodului 2, dar nu în raza reciprocă. Consecința este că nodul 1 și nodul 3 ar putea începe să transmită către nodul 2 simultan, fără a putea recepționa transmisiunile celuilalt nod, rezultând astfel coliziuni în nodul 2 [15]. În rețelele „Wi-Fi” - „wireless fidelity” (transmisiuni fără fir de înaltă fidelitate) pentru infrastructuri convenționale, această problemă este rezolvată prin utilizarea mecanismului „RTS/CTS” - „Request To Send / Clear To Send” (Cerere de transmisiune / Ștergere transmisiune) [16]. În contextul soluției propuse spre adoptare, există două motive pentru care mecanismul „RTS/CTS” nu este aplicabil. În primul rând, pentru ca acest mecanism să funcționeze optim, toate nodurile care ar putea interfera ar trebui să se afle în intervalul de transmisie al nodului care trimite mesajul „CTS”, cum ar fi un „AP”. Însă, acest lucru nu este posibil în cazul unui scenariu „ad-hoc” și „multi-hop” în care nodurile nu sunt obligatoriu în intervalul celuilalt, precum situația expusă schematic în figura 1(b). În al doilea rând, ideea care definește proiectul propus este de a utiliza difuzarea transmisiunilor, caz în care mecanismul „RTS/CTS” este irelevant.

2. PROIECTAREA REȚELEI PROPUSE

Această secțiune oferă o prezentare detaliată a proiectului propus. În contextul acestui studiu, proiectarea propusă a fost denumită rețea de comunicații radio ad-hoc multi-radio, „multi-hop” pentru sistemul „CBTC” (Controlul Trenurilor Bazate pe Comunicații) [17].

2.1. Separarea frecvenței și redundanța

Pentru a rezolva problema interferențelor, proiectarea propusă utilizează trei frecvențe pentru a asigura o anumită separare între noduri care transmit pe aceeași frecvență la fel ca reutilizarea frecvenței în rețelele celulare. Fiecare nod este echipat cu trei aparate de radio, toate funcționând pe frecvențe diferite. Cele două radiouri laterale utilizează antene unidirecționale una în fiecare direcție. Aceste aparate de radio sunt utilizate atât pentru transmisie, cât și pentru recepție. Cel de-al treilea radio de top este echipat cu o antenă omnidirecțională și este utilizat numai pentru recepție. În figura 2 este ilustrată această configurație în care culorile roșu, galben și albastru reprezintă trei frecvențe.

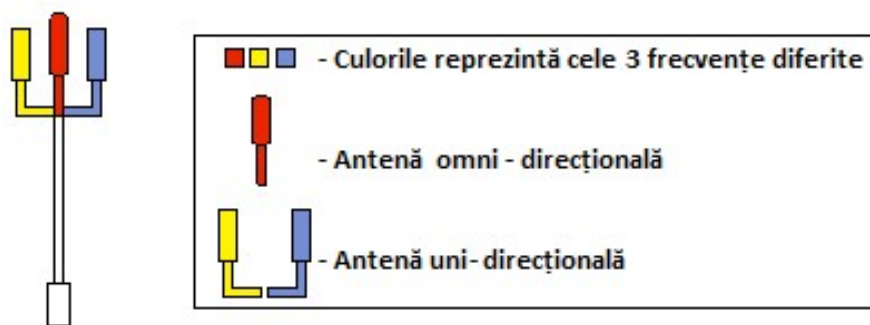


Fig. 2. Nod cu trei aparate radio fiecare funcționând pe o frecvență diferită

În esență, o antenă omnidirecțională [18] este utilizată pe radio de sus - în loc de o antenă unidirecțională [19] - pentru a putea primi de la nodurile de pe ambele părți. Transmișiile se fac nu numai către nodul imediat vecin, ci și către următorul nod. Cele trei frecvențe sunt apoi utilizate alternativ pe nodurile ulterioare. În figura 3 este ilustrat mecanismul. Săgețile de pe linii indică direcția transmisiei. De reținut este faptul că cele două linii de transmisie care ies din radioul drept al nodului 1 (albastru), sunt afișate numai pentru a sublinia că transmisiile sunt recepționate atât pe nodul 2, cât și pe nodul 3. Cu toate acestea, în realitate, va fi o singură transmisie primită la ambele noduri.

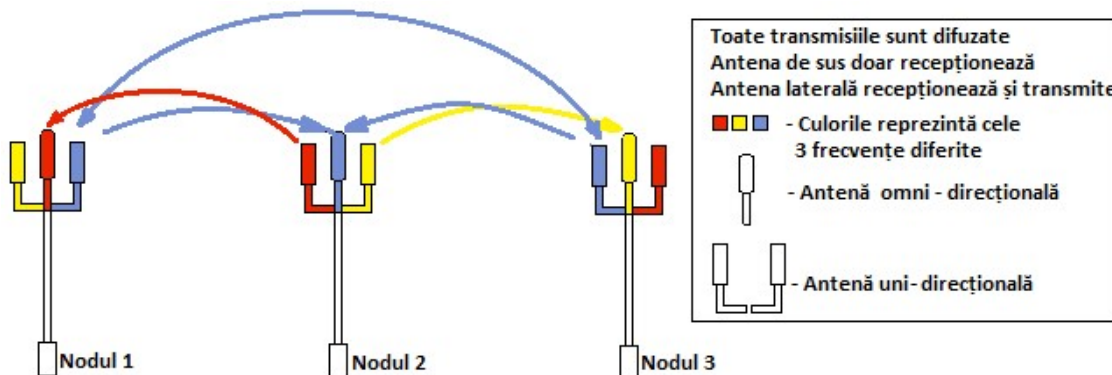


Fig. 3. Schița unei rețele cu trei noduri

După cum se observă în figura 3, funcția radioului de sus este de a primi transmisii de la vecinul imediat, iar cea a radioului lateral este de a primi de la cel de-al doilea vecin. O adresă predefinită inclusă în fiecare pachet indică direcția fluxului de trafic. Cele trei aparate de radio dintr-un nod funcționează în cooperare. Pe măsură ce un radio primește un pachet, în funcție de direcția traficului, acesta livrează pachetul către radioul lateral corect (adică la stânga sau la dreapta) care îl transmite mai departe. Aceasta formează o intercalare „asemănătoare coardei”. Așa cum se observă în figura 3, radiourile care transmit pe aceeași frecvență pe două noduri adiacente opuse se confruntă - de exemplu radiourile galben de pe nodurile 1 și 2 - asigurând astfel separarea frecvenței cu ajutorul antenelor unidirecționale. Gama de transmisie cu 2 noduri rezolvă problema punctului unic de eșec și introduce redundanță în proiect, deoarece același pachet este primit de două noduri, deci mai eficient decât unul singur. În continuare, se rezolvă problema nodului ascuns asigurându-se că două noduri care transmit către un al treilea nod comun sunt întotdeauna în raza celuiilalt. Mai exact, dacă dispozitivul radio din dreapta nodului 1 și cel din stânga nodului 3 intenționează să transmită către dispozitivul radio superior al nodului 2, atunci mecanismul „CSMA/CS” - „Carrier sense multiple access with collision detection (Acces multiplu în sensul purtătorului cu detectarea coliziunilor) îl va împiedica să transmită simultan [20], deoarece se află în raza reciprocă și, prin urmare, se poate suprapune recepția semnalelor concomitent (se pot auzi reciproc). Mai mult decât atât, din cauza separării de frecvență acum, în orice locație dată, există cel mult două dispozitive radio care să concureze pe același mediu, precum dispozitivele radio din nodul 1 dreapta, din nodul 3 stânga, din nodul 2 dreapta și din nodul 4 stânga, etc., așa cum s-a schematizat în figura 4.

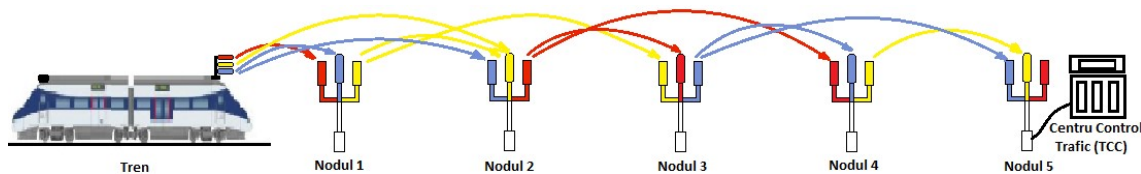


Fig. 4. Un nod de tren transferă pachete către un nod TCC peste un lanț de cinci noduri (un flux de trafic unidirecțional)

2.2. Tipuri de noduri: nodul lanțului și nodul terminal

Tipul de nod la care s-a făcut raportarea anterior este denumit nod de lanț, deoarece aceste noduri sunt cele care compun lanțul [21]. Un al doilea tip de nod este nodul terminal, care este fie un tren, fie un „TCC” - „Traffic Control Center” (Dispecerat de control al traficului feroviar) [22]. Practic, este nodul care folosește rețeaua lanțului pentru a-și transfera pachetele de date / semnale către un alt nod terminal la celălalt capăt al lanțului. Un tren intenționează să trimită pachete de date și / sau semnale către „TCC”, iar acesta intenționează să trimită pachete către unul sau mai multe trenuri. Un tren rulează de-a lungul lanțului și transmite la rândul său pachete, care sunt apoi preluate de un nod din lanț și, urmând lanțul, ajung la „TCC”. La fel, pachetele trimise de „TCC” urmează lanțul în direcția opusă și sunt recepționate de un tren care trece. De remarcat este faptul că un „TCC” este o mașină de tip server, staționară care este conectată la un nod în capătul lanțului, utilizând o conexiune cu fir, de obicei prin intermediul rețelei principale și prin urmare, nu utilizează comunicații radio. În timp ce un nod din lanț transmite numai pe două frecvențe (fiecare într-o direcție), un tren transmite pe toate cele trei frecvențe, așa cum este ilustrat în figura 4, în care este prezentat schematic un scenariu în care un tren transferă pachete de date și / sau semnale impuls către un nod „TCC” peste un lanț de cinci noduri. Se observă cum „design”-ul cu trei frecvențe

asigură o distanță de separare a frecvenței de trei noduri, de exemplu frecvența albastră este utilizată de nodurile 1 și 4. Motivul pentru care un tren transmite pe trei frecvențe, spre deosebire de orice alt nod al lanțului, este acela că trenul trebuie să poată comunica cu lanțul, indiferent de direcția în care circulă sau de poziția trenului în raport cu lanțul. De exemplu, presupunând că trenul transmite o singură frecvență [23]. S-ar putea ajunge la o situație în care trenul întâlnește un nod a cărui antenă respectivă este o antenă laterală care se confruntă opus și, deoarece este o antenă unidirecțională, nu poate recepționa transmisia trenului. Acest lucru este prezentat în figura 5, unde nodul 1 nu este capabil să primească transmisiunii (informații) de la tren. Pentru pachetele de date, impulsuri și / sau care curg din tren spre lanț, nu este o problemă, deoarece nodul 2 este încă capabil să primească informațiile de la tren.

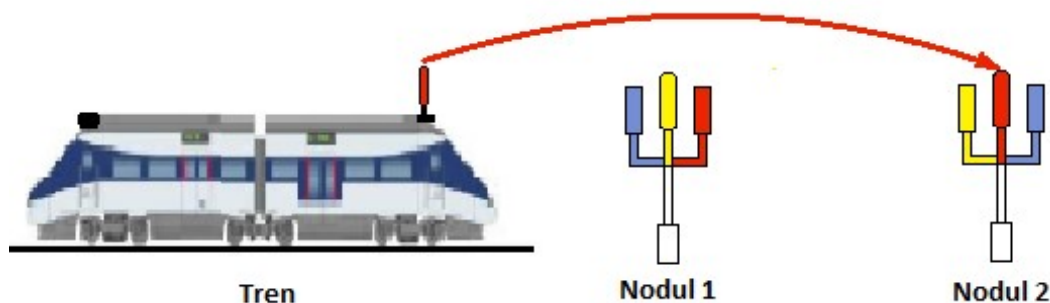


Fig. 5. Nodul 1 nu poate recepționa transmisiunile trenului într-un scenariu posibil dacă informația trenului este transmisă pe un singur radio.

Cu toate acestea, se observă că dispozitivul radio din figura nr. 5 nu este utilizat pentru transmisiune, ci doar pentru recepție. Astfel, pentru traficul feroviar care circulă în direcția opusă, trenul nu va putea primi informații de la nici unul dintre cele două noduri, deoarece acestea vor transmite pe frecvențele roșii și verzi, deoarece dispozitivul radio din tren funcționează pe frecvența roșie. Astfel, proiectarea impune ca trenul să transmită pe minimum două frecvențe, deoarece în acest mod, un nod din lanț va putea primi din tren pe o singură frecvență cu oricare dintre cele trei combinații de frecvențe posibile. Cu toate acestea, pentru a maximiza disponibilitatea în continuare, „design”-ul dictează ca trenul să transmită pe toate cele trei frecvențe. Pe cale de consecință, toate cele trei antene ale unui tren sunt omnidirecționale (așa cum s-a schematizat în figura nr. 4). De remarcat este faptul că același efect poate fi atins și prin utilizarea antenelor unidirecționale, astfel încât, în loc să se utilizeze o antenă omnidirecțională pe o anumită frecvență, vor fi utilizate două antene unidirecționale pentru a acoperi fiecare direcție (adică și din stânga și din dreapta). Cu toate acestea, consecința va consta în faptul că trenul trebuie ulterior să fie dotat cu șase antene în loc de trei. Așa cum s-a prezentat în figura nr. 4, pentru simplitate, s-a presupus că trenul este situat la capătul lanțului. Cu toate acestea, în realitate, trenul se va deplasa de-a lungul lanțului.

2.3. Adresare și redirectionare

Nodurilor terminale li se atribuie adrese predefinite diferite de cele atribuite nodurilor lanțului. În acest fel, la primirea unui pachet de date / semnale / impulsuri, un nod este capabil să distingă dacă pachetul a fost transmis de un nod terminal sau de un nod intermediar din lanț [24]. Există două tipuri de adrese de destinație implicate în proiectare respectiv adresa de destinație reală, care va fi întotdeauna a unui nod terminal și o adresă care indică direcția fluxului de pachete [25]. Această așa numită adresă de direcție este adăugată la fiecare pachet, constând din una din stânga, una din dreapta și din ambele. Când un tren transmite informații, le folosește pe ambele ca adrese de direcție. La primirea unui pachet de la un tren, un nod de

lanț creează o copie a pachetului, înlocuiește direcția pachetelor din stânga cu cele din dreapta și transmite pachetele câte unul în fiecare direcție. Astfel, unul dintre aceste pachete este transmis în direcția înapoi, acest mecanism fiind denumit redirectionare în acest studiu de caz. Pentru a ușura eforturile de instalare și întreținere, un nod de lanț trebuie să fie desfășurat într-un mod care să nu știe de locația sa în lanț. Astfel, redirectionarea pachetului în ambele direcții asigură că acesta ia cea mai scurtă cale către TCC. Următorul nod de lanț (în fiecare direcție) la primirea acestui pachet continuă să îl redirectioneze într-o singură direcție.

2.4. Pachete duplicat

Un rezultat inerent al redundanței în proiectare îl reprezintă pachetele duplicat [26], care sunt atât o cerință, cât și o problemă. Mai exact, dacă fiecare nod transmite pachetele duplicate, acestea cresc rapid exponențial de-a lungul lanțului și congestionează rețeaua. De exemplu în figura 4, nodul 1 va primi două copii ale aceluiași pachet de la tren. În continuare, nodul 2 va primi patru copii ale aceluiași pachet, două trimise de nodul 1 și două primite direct de la tren. La fel, nodul 3 va primi șase copii ale aceluiași pachet și așa mai departe. Mai exact, există trei tipuri de pachete duplicat. Primul tip se referă la un nod care primește mai multe copii ale aceluiași pachet de la două noduri diferite. Al doilea tip se referă la un nod care primește mai multe copii ale aceluiași pachet de la același nod iar ultimul tip face referire la situația în care pachetele trimise de un nod în direcția înainte, sunt primite de un nod anterior în direcție inversă, din cauza problemelor antenei. În figura nr. 4, un exemplu de tip duplicat 1 este atunci când nodul 3 primește o copie a unui pachet de la nodul 1 (galben) și o altă copie de la nodul 2 (roșu). Cu toate acestea, pentru al doilea tip, nodul care trimite este întotdeauna un tren, deoarece doar un tren poate fi recepționat de același nod din lanț pe mai multe frecvențe. Nodul 2 din figura nr. 4 primește duplicate de ambele tipuri respectiv două copii direct de la tren și o copie de la nodul 1. Al treilea tip de duplicat constă dintr-un caz special care este definit ca atunci când pe două noduri învecinate, antenele laterale opuse care se confruntă pot recepționa suprapus pachetele de date / semnale / impulsuri (una pe alta). Un exemplu este atunci când un pachet trimis de nodul 2 dreapta (roșu) este primit de nodul 1 stânga (roșu). Cu toate acestea, deoarece antenele unidireționale sunt utilizate pe dispozitivele radio laterale, probabilitatea duplicării tipului 3 este neglijabilă, deoarece se va întâmpla numai dacă antena este defectă (de exemplu apariția problemelor de direcționare din cauza unui surplus cantitativ sau flux sporit (foarte mic) ori din cauza unei erori apărute în timpul instalării unui nod într-un mod în care antenele indică în direcția greșită (opusă).

Pentru evitarea unor sincope precum cele exemplificate anterior, în proiectarea propusă, pachetele duplicate sunt eliminate la fiecare nod cu ajutorul unui număr de secvență unic inclus în fiecare pachet. Deși figura 4 prezintă „TCC” plasat direct lângă lanț, un „TCC” va fi conectat la lanț de obicei, prin rețea de-a lungul lanțului, care va semăna mai mult cu ilustrația din figura 3. De asemenea, în figura 1(b), „TCC” este ilustrat ca fiind conectat la ambele capete ale lanțului, din motive de simplitate. În realitate, „TCC” ar putea fi la fel de bine conectat la un singur capăt al lanțului, mai ales dacă dimensiunea lanțului este dimensionat în limite rezonabile. Cu toate acestea, în cazul în care cele două capete ale lanțului sunt conectate la același „TCC”, trebuie implementată o componentă intermediară suplimentară care va efectua o manipulare duplicat dacă se primesc două copii ale aceluiași pachet de date, urmând cele două căi înainte de a livra pachetul către „TCC”.

2.5. Fiabilitate și securitate

Deoarece proiectul supus atenției omite asocierea înainte începerea transmisiunii, acest lucru nu reduce neapărat fiabilitatea comunicării [27]. Natura difuză a designului și

redundanța inerentă (adică fiecare pachet este primit de două noduri) compensează această lipsă de fiabilitate. În proiectare nu se fac retransmisiile conform standardului „IEEE 802.11 MAC”. Proiectarea se bazează pe difuzare transmisiuni și fiecare pachet este primit de două noduri. Astfel, întrucât nodul expeditorului va primi două pachete „ACK” - „Acknowledge” (Confirmare / recunoaștere) [28] în loc de unul, ca răspuns la un pachet de date, conform standardului „IEEE 802.11 MAC” și se va comporta în mod neașteptat, deoarece nu există nici o modalitate de a ști care nod a efectuat transmisiunea pachetului „ACK” și care pachet cu exactitate a fost recunoscut. Cu toate acestea, această lacună de retransmisii este compensată de redundanța inerentă în proiectare, care se asigură deja ca un pachet de date să fie primit de două noduri. Mai mult decât atât, retransmisiile vor avea oricum un impact negativ asupra lățimii de bandă. Din cauza acestei caracteristici de difuzare și a lipsei de retransmisii, proiectarea propusă nu este cu adevărat o rețea „wireless” (fără fir) „ad-hoc” în sens convențional, deoarece rețelele convenționale „ad-hoc” implică transmisiile „unicast” (care înseamnă comunicare între un singur emițător și singur receptor în afara rețelei de transmisiune) [29], precum și retransmisiile. În plus, deoarece faza de asociere este omisă, proiectarea propusă folosește protocolul de nivel superior „IPSec” - „Internet Protocol Security” (Protocol de siguranță acces / utilizare internet) pentru autentificare [30] și criptare „end-to-end” („encryption”, care reprezintă un sistem de comunicare în care doar utilizatorii rețelei / sistemului de comunicare pot citi mesajele transmise)) pentru a securiza comunicația datelor [31].

CONCLUZII

Această lucrare a prezentat o imagine de ansamblu a proiectului propus pentru o rețea „CBTC” pentru calea ferată. Un nod în această proiectare funcționează în modul „ad-hoc”, primind pachete de difuzare și redirecționând către vecinii săi, formând astfel un lanț de noduri. Ca urmare, trenul nu trebuie să se asocieze cu nodurile pe măsură ce se deplasează și nu mai sunt necesare cablurile costisitoare din fibră optică care conectează nodurile. Pentru a minimiza interferențele și pentru a rezolva bine cunoscuta problemă a nodului ascuns, proiectarea permite separarea frecvenței utilizând trei frecvențe.

Fiecare nod este echipat cu trei aparate de radio (și antene), câte una pe fiecare frecvență, și se utilizează o singură frecvență pentru transmisiile într-o singură direcție. Cele trei frecvențe sunt apoi utilizate alternativ pe nodurile ulterioare. Pentru a oferi redundanță și pentru a evita un singur punct de eșec, transmisiile se fac nu numai către nodul vecin imediat, ci și către următorul nod. Astfel, fiecare transmisie este recepționată de două noduri în fiecare direcție. Pachetele duplicate - care sunt rezultatul redundanței inerente în proiectare - sunt eliminate folosind un număr de secvență unic inclus în fiecare pachet. Un tip special de nod este un nod terminal, care este fie un nod de tren, fie un nod „TCC”. Spre deosebire de un nod cu lanț obișnuit, un nod terminal transmite pe toate cele trei frecvențe în toate direcțiile, pentru a maximiza probabilitatea transmisiilor de succes a trenului către cale.

BIBLIOGRAFIE

- [1] **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, pages 281–289.
- [2] **European Commission**, „*Sector Overview and Competitiveness Survey of the Railway Supply Industry*”, Tech. rep. European Commission, 2012.

- [3] **Frost & Sullivan**, „*Strategic Analysis of Communication Based Train Control Systems in the Western European Urban Rail Market*”, July 2013.
- [4] **UNIFE**, „*The Global Rail Market Now to 2016: UNIFE Study Key Findings & Future Outlook*”, 2008.
- [5] **UNIFE**, „*Worldwide Rail Market Study - status quo and outlook 2016*”, Tech. rep. UNIFE, 2008.
- [6] **A. Badea, G. Popa, I.A. Muntean, M. Vălu, C.N. Badea, G. Dumitru**, „*Sisteme de comunicații radio pentru controlul trenurilor bazat pe comunicații - CBTC*”, în *Sinteze de Mecanică Teoretică și Aplicată*, Volumul 11 (2020), Numărul 4, pages 249-272.
- [7] **R. Alvarez, J. Roman**, „*ETCS L2 and CBTC over LTE - Convergence of the radio layer in advanced Train Control Systems*”, In: IRSE (Institution of Railway Signal Engineers) technical meeting (2013).
- [8] **B.M. Martínez**, „*Invensys. ERTMS & CBTC Technology convergence*”, presented at MetroRail 2013.
- [9] **Parsons**, „*Benefits and Barriers to CBTC and ETCS convergence*”, presented at MetroRail 2012.
- [10] **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.
- [11] **L. Li, J.Y. Halpern, P. Bahl, Y.M. Wang, R. Wattenhofer**, „*A Cone-Based Distributed Topology-Control Algorithm for Wireless Multi-Hop Networks*”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Volume: 13, Issue: 1, Feb. 2005, Page(s): 147-159.
- [12] **J. Farooq, L. Bro, R.T. Karstensen, J. Soler**, „*Performance Evaluation of a Multi-radio, Multi-hop Ad-hoc Radio Communication Network for Communications-Based Train Control (CBTC)*”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume: 67, Issue: 1, Jan. 2018, Page(s): 56 - 71.
- [13] **J. Peng, L. Cheng**, „*Revisiting Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)*”, 40th Annual Conference on Information Sciences and Systems, 2006.
- [14] **T.S. Ho, K.C. Chen**, „*Performance Analysis of IEEE 802.11 C SM A/C A M edium Access Control Protocol*”, *Proceedings of PIMRC 1996 - 7th International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Communications*.
- [15] **J. Lin, X. Wang, J. Dang**, „*Reliability and safety verification of the new collision avoidance strategy for Chinese train control system*”, *Computer Modelling and New Technologies*, 2014, 18(9), pages 415-422 .
- [16] **W.Ye, J. Heidemann, D. Estrin**, „*An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks*”, *Proceedings. wenty-First Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies: 23-27 June 2002*.
- [17] **J. Farooq, L. Bro, R.T. Karstensen, R. Thystrup, S. José**, „*A multi-radio, multi-hop ad-hoc radio communication network for CommunicationsBased Train Control (CBTC) with optimized frequency separation*”, *Proceedings of the 2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference*, pages 1-8.
- [18] **X. Li, Q. Song, H. Tao; X. Liu, S. Zhang, X. Wang, Q. Luo, X. Peng**, „*Evaluation on anti-interference to WLAN equipments for spatial deployment of CBTC systems in tunnels*”. In 2014 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Shanghai, China .
- [19] **E. Kuun, W. Richard**, „*Open standards for CCTC and CCTV radio-based communication*”, *Alcatel telecommunications review*, 2004 pages 1-10.
- [20] **C. Kai, S.C. Liew**, „*Towards a More Accurate Carrier Sensing Model for CSMA Wireless Networks*”. 2010 IEEE International Conference on Communications, Cape Town, South Africa, pages 1-6.
- [21] **M. Burkhart, P. Von Rickenbach, R. Wattenhofer, A. Zollinger**, „*Does topology control reduce interference?*”, *Proceedings of the 5th ACM international symposium on Mobile ad hoc networking and computing*, May 2004, Pages 9–19.
- [22] **G. Hanis, B. Stadlmann**, „*OBUs' Development and Maintenance of a Train Control System for Low Density Traffic Lines*”, *Ada-Europe International Conference on Reliable Software*

- Technologies Ada-Europe 2014: Reliable Software Technologies – Ada-Europe 2014, pages 166-176.
- [23] **S.H. Yoo, T.G. Lee, S.H. Lee, G.S. Park, M.S. Ryou**, „*Design of CBTC On-board System Architecture*”, Proceedings of the KSR Conference, pages 2705-2710, 2011.
 - [24] **X. Qin, B. Zhang, C Li**, „*Localized topology control and on-demand power-efficient routing for wireless ad hoc and sensor networks*”, Peer-to-Peer Networking and Applications volume 12, pages 189–208, 2019.
 - [25] **R. Alvarez**, „*Defining the CBTC over lte interface: riding the wave*”, Rail Systems Australia, 2015.
 - [26] **P. Dersin**, „*Availability of data communication networks in automated urban train systems*”, Published in: 2014 Reliability and Maintainability Symposium Conference: 27-30 Jan. 2014.
 - [27] **A. Neacsu, N.N. Antonescu, D.B. Stoica**, „*Software Applications for Complex Technological Systems Reliability*”, Journal of the Balkan Tribological Association 15 (1), pages 45-51, 2009.
 - [28] **S. Bhupendra, M. Rajesh**, „*Performance Analysis of DCF- Two Way Handshake vs RTS/CTS During Train-Trackside Communication in CBTC based on WLAN802.11b*”, Recent Advances in Computer Science and Communications (Formerly: Recent Patents on Computer Science), Volume 13, Number 3, 2020, pp. 345-352 (8).
 - [29] **W.Z. Song, X.Y. Li, O. Frieder, W.Z.Wang**, „*Localized topology control for unicast and broadcast in wireless ad hoc networks*”, Published in: IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Volume: 17, Issue: 4, April 2006, Page(s): 321-334.
 - [30] **B. Liu, X. Liu, W. Xue**, „*Research on safe communication technology of CBTC based on IPSec*”, Railway Computer Application, 2009.
 - [31] **J. Farooq, J. Soler**, „*Radio communication for communications-based train control (CBTC): A tutorial and survey*”, Published in: IEEE Communications Surveys & Tutorials, Volume: 19, Issue: 3, thirdquarter 2017, Page(s): 1377-1402.