

Univerza v Ljubljani

Fakulteta za elektrotehniko

Davor Barukčič

Kapaciteta sistema GSM-R Slovenskih železnic

Diplomsko delo visokošolskega strokovnega študija

Mentor: viš. pred. dr. Urban Burnik, univ. dipl. inž. el.

Ljubljana, 2015

Zahvala

Zahvaljujem se mentorju viš. pred. dr. Urbanu Burniku za vso strokovno pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge. Zahvaljujem se tudi mentorjema Petru Pušniku in Matjažu Matku iz Slovenskih železnic, za pomoč pri praktičnem delu diplome.

Posebna zahvala gre tudi moji družini za vso podporo.

Vsebina

1 Uvod	5
2 Železniška infrastruktura	7
2.1 Telekomunikacijski sistem Slovenskih železnic	7
2.1.1 Kabelski sistemi	8
2.1.2 Prenosni sistemi	8
2.1.3 PTS – digitalni dispečerski sistem	8
2.1.4 Telefonske centrale	8
2.1.5 Sistem ozvočenja na postajah	8
2.1.6 Telekomunikacijska govorna mesta	9
2.1.7 Pomožni telefoni	9
2.1.8 Registrofoni	9
2.1.9 Urne naprave	9
2.1.10 Podatkovno omrežje (Gigabit Ethernet)	9
2.1.11 Sistem za avtomatsko najavo vlakov (AIS)	9
2.1.12 Sistem za klic v sili	10
2.1.13 Radijski sistemi	10
2.2 Signalnovarnostne naprave	10
2.3 Zasnova hrbteničnega omrežja	11
3 Sistem ERTMS	13
3.1 Sistemski pregled sistema ETCS	15
3.1.1 Stopnje sistema ETCS	16
3.2 Sistemski pregled GSM-R	18
3.2.1 Funkcije GSM-R, opredeljene v specifikaciji EIRENE	19

3.3 Uporabljeni prenosni mediji za povezavo med sistemoma ETCS in GSM-R	21
3.4 Uvajanje sistema ERTMS v slovenskem omrežju	22
4 Komunikacijski sistem GSM-R	23
4.0.1 GSM-R za podatkovne komunikacije	26
4.1 Celični koncept	26
4.2 Primer načrtovanja pokrivanja	27
4.3 Selitev med celicami	29
4.4 Radijska pokritost	30
4.5 Arhitektura GSM-R	31
4.5.1 Tipične strukture GSM-R	32
4.6 Kakovost storitev za GSM-R	34
4.7 Določanje kapacitete sistema v odvisnosti od podatkovnih sporočil	35
4.8 Določanje kapacitete v odvisnosti od podatkovnih in govornih kanalov	35
4.9 Omejena razpoložljivost govornih in podatkovnih kanalov v celici	36
4.10 Vpliv drugih mobilnih sistemov na GSM-R	37
5 Analiza kapacitete sistema GSM-R	39
5.1 Podatki za analizo	39
5.1.1 Območje pokrivanja	40
5.1.2 Število vlakov	40
5.1.3 Uporabniki sistema GSM-R na Slovenskih železnicah	41
5.2 Ocena na podlagi števila aktivnih vlakov	43
5.3 Ocena na podlagi števila klicev	44
5.4 Primerjava	46
5.4.1 Celična pokritost na območjih z visoko gostoto vlakov	47
5.5 Omejitev prenosnega sistema	48
5.6 Povečanje zmogljivosti GSM-R sistema	48
6 Zaključek	51
Literatura	53

Kazalo slik

Slika 1: Karta opremljenosti prog Slovenskih železnic s signalno varnostnimi napravami	11
Slika 2: Topologije obročev SŽ in TK naprav na železniškem omrežju	12
Slika 3: Evro baliza	14
Slika 4: ETCS stopnja 1	16
Slika 5: ETCS stopnja 2	17
Slika 6: ETCS stopnja 3	17
Slika 7: Povezava med GSM-R in ETCS sistemom	21
Slika 8: Frekvenčni spekter GSM-R	24
Slika 9: Osnovna arhitektura GSM-R omrežja	25
Slika 10: Klasični celični koncept v obliki šesterokotnikov	26
Slika 11: Ponavljajoč 7 celični vzorec, prikazan s krogi.....	27
Slika 12 Ponavljajoč 4 celični vzorec	28
Slika 13: Prehodno območje med celico C in D	29
Slika 14: GSM-R arhitektura za ETCS sistem z visoko in nizko redundanco	33
Slika 15: Visoko redundantna GSM-R arhitektura s podvojenimi celicami	33
Slika 16: Pokritost proge z dvema različnima frekvencama	36
Slika 17: Pokritost proge z dvema različnima skupinama celic (zgornja). V primeru nedelovanja ene celice je pokritost še vedno zagotovljena (spodnja).	36

Kazalo tabel

Tabela 1: Možna razporeditev frekvenčnih kanalov za ponavljajoč 7 celični vzorec 28	
Tabela 2: Čas vzpostavitve klica, določenega s strani EIRENE specifikacij	31
Tabela 3: GSM-R Qos parametri	34
Tabela 4: Število potrebnih kanalov na podlagi števila aktivnih vlakov	43
Tabela 5: Število in dolžina klicev v najbolj prometni uri.....	44
Tabela 6: Število potrebnih kanalov v najbolj prometni uri	45

Seznam kratic

TK – telekomunikacijski

SV – signalno varnostno naprave

ILTIS – integriran nadzorni in informacijski sistem

ROTS – železniški operacijski telekomunikacijski sistem

ŽAT – železniška avtomatska tehnologija

ILTIS – integriran nadzorni informacijski sistem

SIMISW – sistem za računalniško vodenje prometa

LB – lokalna baterija

CB – centralna baterija

E&M – linijska nadzorna signalizacija med telefonskima stikaloma

AIS – Sistem za samodejno prepoznavanje

S2m – ISDN vmesnik za visoke hitrosti prenosa

ADM – multiplekser z oddajanjem in odvzemanjem

STM-1 – sinhroni prenosni modul

ATP – sistem za avtomatsko zaščito vlaka

PAMR – javno dostopni mobilni radijski sistem

PMR – privatni mobilni radijski sistem

EVC – kabinska vlakovna oprema

UMTS – Univerzalni mobilni telekomunikacijski sistem

WiMax – brezžična širokopasovna telekomunikacijska tehnologija

LTE – standard za visoko hitrostne brezžične mobilne komunikacije

GPH – ročne mobilne naprave za splošno rabo

OPH – ročne mobilne naprave za operativno rabo

GPRS – storitev za paketni prenos podatkov

Povzetek

Diplomska naloga proučuje način uporabe frekvenc sistema GSM-R in njihovo uporabo za podporo sistemu ETCS z zagotavljanjem prenosa podatkov in govora.

V prvem delu je opisana trenutna infrastruktura Slovenskih železnic in osnovni deli železniškega telekomunikacijskega sistema. V nadaljevanju sta opisana sistema ETCS in GSM-R kot sestavna dela sistema ERTMS. Predstavljene so stopnje sistema ETCS, za katere delovanje je potreben sistem GSM-R, in funkcionalnosti sistema GSM-R, namenjene izključno za uporabo na železnicah.

V tretjem delu je obdelan sistem GSM-R s področja komunikacije in uporabe frekvenc. Predstavljena je uporaba frekvenc, razporeditev frekvenc v omrežju, struktura omrežja in določanje kapacitete omrežja.

V praktičnem delu diplomske naloge je opravljena analiza kapacitete sistema. Za območje Železniške postaje Ljubljana je opravljena primerjava potrebnih kanalov za zagotovitev nemotenega prometa. Izračuni potrebnih frekvenčnih kanalov so določeni glede na količino prometa v najbolj prometni uri in s predpostavljeno največjo količino prometa.

Ključne besede: komunikacijski sistem, frekvenčni kanali, kapaciteta, sistem GSM-R.

Abstract

This thesis examines the use of GSM-R frequencies and their use to ensure the transmission of data and speech for ETCS.

The first part describes the current infrastructure of Slovenian Railways and the basic parts of the railway telecommunication system. The following describes the ETCS and GSM-R as integral parts of ERTMS system. Also presented are ETCS levels, which operations require GSM-R, and functionalities of GSM-R system, designed exclusively for railway use.

The third part focuses on the GSM-R system in the field of communication and the use of frequencies. Described is the use of frequencies, allocation of frequencies in the network, network structures and determining of the network capacity.

In the practical part of the thesis, analysis of the system capacity is made. For the main railway station in Ljubljana, calculation is made of the necessary channels to ensure smooth traffic. The calculation is determined by the amount of traffic in the busiest hour and the assumed highest traffic volume.

Key words: communication system, frequency channels, capacity, GSM-R

1 Uvod

V Evropski uniji se od začetka 90. let razvija transevropsko transportno omrežje (TEN-T: Trans-European Networks) z namenom zagotavljanja bolj prostega pretoka prometa in boljših mednarodnih povezav. Za vzpostavitev takšnega prometa je oviro predstavljala neenotnost med posameznimi železniškimi operaterji. Železnice po vseh državah, vključno s Slovenijo, so uporabljale lastne analogne sisteme za prenos informacij, ki pa med seboj niso bili kompatibilni. V ta namen je bil razvit evropski sistem za upravljanje železniškega prometa (ERTMS), ki predstavlja skupni signalizacijski sistem. ERTMS obsega sistem za vodenje in nadzor vlakov (ETCS) ter sistem digitalnih radijskih komunikacij za železnice (GSM-R).

Slovenske železnice (SŽ) so na glavnih progah opremljene z digitalnim dispečerskim sistemom (PTS), obstoječi analogni radijski sistem za vlake pa se uporablja za operativno komunikacijo med strojevodji in dispečerji v centrih vodenja. Ti obstoječi sistemi so zastareli in brez možnosti nadgradnje. Z uvedbo sistema GSM-R bo slovensko železniško omrežje doživelo zamenjavo celotnega sistema PTS in celotnega analognega dela na progah. GSM-R poleg običajnih funkcij GSM zagotavlja še določene funkcije, razvite posebej za železnice, deluje v frekvenčnem pasu, dodeljenem posebej za Evropo ter zagotavlja nosilno storitev za sistem ETCS. Z uvedbo novega sistema bodo vlaki postali interoperabilni, kar predstavlja možnosti za boljše in varnejše povezave, poenotenje obstoječega komunikacijskega sistema, manjše motnje in zamude vlakov.

V diplomskem delu so proučene osnovne funkcionalnosti sistema GSM-R ter dodeljevanje frekvenčnega prostora. Cilj naloge je ugotoviti, ali bo število frekvenčnih kanalov v dodeljenem frekvenčnem pasu zadostovalo za nemoteno delovanje vseh storitev in komunikacij. Za aplikacije s paketno orientiranim prenosom podatkov bo za železnice uvedeno omrežje GPRS. Diplomaska naloga se za

prenos podatkov in govora osredotoča samo na sistem GSM-R, GPRS pri analizi ni upoštevan.

2 Železniška infrastruktura

K železniški infrastrukturi spadajo vse naprave in objekti, ki so potrebni za nemoteno delovanje železniškega prometa.

Železniško omrežje v Sloveniji je sestavljeno iz 1228,1 kilometra prog, od tega je 897,7 kilometra enotirnih in 330,9 kilometra dvotirnih prog. Elektrificiranih je 503,5 kilometra. Proge so praktično v celoti elektrificirane z enosmernim sistemom 3 kV. Izjema so le obmejna območja, kjer je elektrifikacija izvedena s sistemom, ki ga uporabljata sosednji državi [1]:

- Avstrija: 15 kV, 16,67 Hz,
- Hrvaška: 25 kV, 50 Hz.

Proge delimo na glavne in regionalne, delimo pa jih tudi po številu tirov:

- enotirne: vlaki po istem tiru vozijo v obe smeri,
- dvotirne: vsak tir ima določeno smer prometa vlakov.

2.1 Telekomunikacijski sistem Slovenskih železnic

Za delovanje in vodenje železniškega prometa imajo SŽ svoj lasten telekomunikacijski (TK) sistem, ki se je zaradi zastarelosti in dotrajanosti leta 1996 začel posodabljati v digitalno telekomunikacijsko omrežje. Danes je sistem povezan s 567 kilometri optičnega kabla, ki služi kot prenosni medij. [2]

Hrbtenico sistema predstavlja prenosni sistem sinhrona digitalne hierarhije (SDH). To služi kot prenosno omrežje napravam višjih OSI (osnovni referenčni

model za odprte systemske povezave) nivojev ter nižjemu prenosnemu sistemu plesiohronne digitalne hierarhije (PDH). SŽ imajo poleg omrežja SDH še integrirane storitve preko digitalnega omrežja (ISDN) in železniške operacijske telekomunikacijske sisteme (ROTS). Sodobne centrale ISDN so nadomestile celotno železniško analogno omrežje (ŽAT). Te poleg telefonije omogočajo tudi prenos podatkov, slike in zvoka.

2.1.1 Kabelski sistemi

Kabelski sistemi so sestavljeni iz bakrenih in optičnih kablov. Bakreni kabli potekajo vzdolž proge. Preko njih poteka komunikacija iz govornih mest ob progi, povezava signalnovarnostnih naprav (SVn) in elementov. Zagotavljajo tudi zveze na posamezni postaji. Optični kabli so osnova hrbteničnem omrežju. Služijo kot prenosni medij za digitalne prenose in podatkovne sisteme višjih hitrosti. [3]

2.1.2 Prenosni sistemi

Prenosni sistemi uporabljajo tehnologijo SDH/PDH za prenašanje podatkov med posameznimi postajami. SDH je hrbtenični sistem, PDH pa pristopni sistem na lokalnem nivoju. Prenos poteka preko optičnih kablov. Na prenosni sistem so povezani naslednji sistemi: PTS, ILTIS (integriran nadzorni in informacijski sistem), SIMISW (sistem za vodenje prometa s pomočjo računalnikov), podatkovno omrežje, sistem ozvočenja in sistem za avtomatsko najavo vlakov. [3]

2.1.3 PTS – digitalni dispečerski sistem

PTS je digitalni komunikacijski sistem, ki je zasnovan na tehnologiji ISDN. Na sistem PTS so priključeni lokalna baterija (LB), centralna baterija (CB), analogni in digitalni telefonski naročniki, sistem ozvočenja in interfoni. Prometnik preko komunikacijskega pulta upravlja s postajnimi komunikacijskimi zvezami. Pult sestavljajo tipkovnica, prikazovalnik, mikrotelefonske kombinacije, mikrofoni in zvočnik za prostoročno komuniciranje. [3]

2.1.4 Telefonske centrale

Na centralah je omogočeno priključevanje analognih in telefonskih naročnikov ISDN ter priključevanje analognih vodov s signalizacijo E&M. Preko central ISDN se na S2M nivoju izvaja tudi povezava v javno telefonsko omrežje. [3]

2.1.5 Sistem ozvočenja na postajah

Ozvočenje na železniških postajah je namenjeno železniškemu osebju in potnikom na postaji. Preko ojačevalnikov in zvočnikov se oddajajo sporočila, ki jih prometnik govori v živo preko mikrofona sistema PTS, in sporočila sistema za avtomatsko najavo vlakov. Ta sistem je priključen direktno na PTS ali preko prenosnega sistema. [3]

2.1.6 Telekomunikacijska govorna mesta

Telekomunikacijska govorna mesta so namenjena osebju SŽ, ki izvaja dela ob progi. Vsebujejo LB ali CB telefonske aparate, ki so namenjeni komunikaciji s prometnim in z vzdrževalnim osebjem na postajah. Govorna mesta so postavljena v obliki omaric in stebričkov ob nivojskih prehodih, uvoznih in izvoznih signalih na postaji, na postajnem območju, ob opremi za avtomatski progovni blok in drugje. Stebrički so vgrajeni na prosti progi z medsebojno razdaljo enega kilometra. [3]

2.1.7 Pomožni telefoni

Pomožni telefoni so nameščeni na postajah v prometnih uradih. Priključeni so vzporedno na progovne vode in so namenjeni uporabi, če odpovejo drugi sistemi. [3]

2.1.8 Registrofoni

Registrofoni so namenjeni registraciji pogovorov, ki se vršijo na progovnih vodih, radijskih zvezah in TK-pultih dispečerjev ter vlakovnih odpravnikov. [3]

2.1.9 Urne naprave

Urne naprave prikazujejo točen čas. Namenjene so potnikom, uporabnikom železniških storitev in zaposlenim. [3]

2.1.10 Podatkovno omrežje (Gigabit Ethernet)

Podatkovno omrežje je sestavljeno iz ožičenja, ki predstavlja pasivni del, in iz Ethernet stikal in usmerjevalnikov, ki predstavljajo aktivni del. Stikala so na eni strani povezana na prenosni sistem, na drugi strani pa na postajnih sistemih omogočajo lokalno Ethernet omrežje. [3]

2.1.11 Sistem za avtomatsko najavo vlakov (AIS)

Sistem sproža avtomatska, že vnaprej posneta, govorna sporočila. Sistem na osnovi prejete informacije iz sistema ILTIS o poziciji določenega vlaka, vnesenega

voznega reda in vnaprej posnetih sporočilnih predvaja ustrezen posnetek na ustrezni postaji. S sporočili obveščajo potnike o prihodih in zamudah vlakov. Sporočila so poleg slovenskega jezika posneta tudi v nekaterih drugih jezikih. [3]

2.1.12 Sistem za klic v sili

Sistem za klic v sili predstavljajo stebrički SOS, postavljeni na postaji in na območju, kjer se zadržujejo potniki. Zagotavlja direktno povezavo do delovnega mesta v centru vodenja prometa. Sistem je namenjen obveščanju o interventnih dogodkih. Stebrički za klic v sili se direktno ali pa preko prenosnega sistema priključujejo na sistem PTS. [3]

2.1.13 Radijski sistemi

SŽ uporabljajo dve vrsti radijskih zvez:

- RDZ (radio dispečerska zveza): namenjene komunikaciji med dispečerjem in osebjem na vlaku. Omogočajo govorne povezave in pošiljanje telegramov.
- UKV (ultra kratki valovi): namenjene lokalnim radijskim povezavam za premik vagonov, popisa in vzdrževanja. [3]

2.2 Signalnovarnostne naprave

S pomočjo SVn se na varen in zanesljiv način ureja železniški promet. Z njihovimi operacijami se poskušajo zmanjšati napake in zavarovati kritična mesta v železniškem prometu. S SVn je voznik železniškega vozila pravočasno obveščen, kako mora prilagoditi vožnjo, v primeru neupoštevanja signalnih znakov pa lahko vozilo tudi ustavijo. Z njihovo uporabo se zmanjšuje vpliv človeškega dejavnika, ki je pogosto vzrok izrednih dogodkov.

S signalnimi znaki se izvršilni delavci in osebje med seboj obveščajo o pogojih vožnje na določeni relaciji proge, o stanju proge, hitrosti, premiku in nevarnostih na progi. Signalne znake ločimo na vidne in slišne signale.

Glede na vrsto konstrukcije se SVn ločijo na:

- mehanske,
- elektromehanske,

- elektrorelejne,
- elektronske,
- kombinirane.



Slika 1: Karta opremljenosti prog Slovenskih železnic s signalno varnostnimi napravami

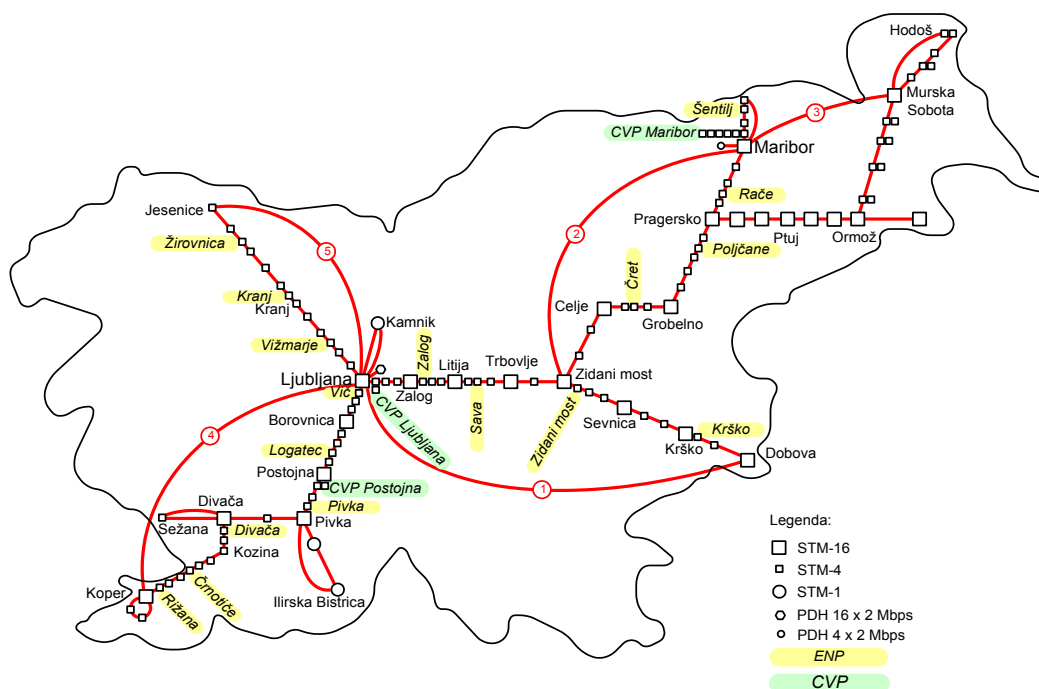
2.3 Zasnova hrbteničnega omrežja

Trenutno hrbtenično omrežje SDH v glavnem služi za prenos signalov znotraj sistema SŽ, v manjšem obsegu pa tudi za prenos signalov zunanjih uporabnikov. Zelo pomembno je neprekinjeno delovanje sistema prenosa, saj v primeru zaustavitve sistema lahko delno zastaneta potniški in tovorni promet.

Sestavni del hrbteničnega omrežja so multipleksorji z oddajanjem in odvzemanjem (ADM), ki se nahajajo na vseh večjih postajah. Ti omogočajo multipleksiranje po principu odcepljanja s ponovnim zasedanjem. Sestavljeni so iz enojnega ali dvojnega vstavka, linijskih, pretočnih, preklopnih in kontrolnih enot. Vozlišča so medsebojno topološko povezana v več obročev. Ti se zaradi zaščite prometa sekajo v dveh točkah – dveh vozliščih. Trenutno obstaja pet takih obročev [4]:

- 1. obroč: Ljubljana, Zalog, Litija, Trbovlje, Zidani most, Krško, Sevnica, Dobova in nazaj v Ljubljano;

- 2. obroč: Trbovlje, Celje, Pragersko, Maribor, Grobelno, Zidani most in nazaj v Trbovlje;
- 3. obroč: Maribor, Ptuj, Murska Sobota, Hodoš, Ormož, Pragersko in nazaj v Maribor;
- 4. obroč: Ljubljana, Postojna, Divača, Hrpelje, Kozina, Koper, Sežana, Pivka, Borovnica, Zalog in nazaj v Ljubljano;
- 5. obroč: Ljubljana, Jesenice, Kranj, Zalog in nazaj v Ljubljano.



Slika 2: Topologije obročev SŽ in TK naprav na železniškem omrežju

Obroči imajo zmogljivost sinhronega transportnega modula STM-1, ki imajo prenosno hitrost 155 Mbit/s. Posamezni ADM-ji so med seboj povezani preko parov optičnih vlaken, posledično so tako za posamezen obroč potrebna štiri optična vlakna. Topologija obroča je geografsko izvedena kot linija, saj potekajo optična vlakna v snopu ob železniški progi. Poškodbe optičnega vlakna lahko povzročijo izpad sistema. [4]

3 Sistem ERTMS

Skozi leta je bilo po Evropi razvitih več kot 20 različnih železniških nadzornih sistemov. Sistemi so bili razviti s strani nacionalnih zahtev različnih evropskih železnic glede na tehnične standarde in operacijske predpise. Raznolikost v sistemih se je izkazala za neučinkovito in na dolgi rok nezanesljivo za uporabo sistemov. Sistemi za avtomatsko zaščito vlaka (ATP) so zaradi raznolikosti nezdržljivi.

Pri potovanju preko meja drugih držav mora biti vlak opremljen z različnimi sistemi ATP. Raznolikost v sistemih včasih celo zahteva zamenjavo lokomotive ali strojevodje, saj v vsaki državi velja drugačen sistem signalizacije. Vsi dodatni sistemi ATP zavzamejo veliko prostora, povečani so stroški vzdrževanja in posledično je tudi daljši čas potovanja. Poenotenje več signalnih sistemov zmanjša tehnične težave čezmejnih prehodov vlakov, zmanjša stroške, zagotavlja boljšo interoperabilnost železniških storitev ter pripomore k splošni kakovosti in konkurenčnosti železniškega prometa. V ta namen je bil razvit sistem ERTMS. [5]

ERTMS je evropski sistem za upravljanje železniškega prometa. Sistem je sestavljen iz dveh delov:

- ETCS: evropski sistem za vodenje vlakov. Njegova naloga je, da zagotovi varno pot za določen vlak;
- GSM-R: sistem digitalnih radijskih komunikacij za železnice. Zajema govorne in podatkovne komunikacije.

Ta dva podsistema skupaj tvorita sistem ERTMS, signalizacijski in prometni upravljalni sistem, ki omogoča interoperabilnost na območju evropskega železniškega omrežja. Sistem obravnava več področij, ki so pomembna pri nadzoru in vodenju železniškega prometa: železniški elektro napajalni sistemi, signalno

varnostni sistemi, telekomunikacijsko in informacijsko področje. Sistem ETCS je definiran v več različnih stopnjah, ki omogočajo nadgradnjo iz ene stopnje v drugo. Pri prehodih stopenj je zelo pomembno, da lahko vlak iz stopnje 3 vozi po stopnji 2, vlak iz stopnje 2 pa po stopnji 1. Prehod iz ene stopnje vodenja prometa v drugo mora biti postopen. Za uvedbo sistema je potrebna tudi nadgradnja opreme v železniških vozilih in ob progi. [5]

Oprema ob progi:

- Eurobaliza: progovna naprava za posredovanje podatkov s proge v sistem na vlaku. Posreduje stanje na določenem mestu ali odseku proge, lahko pa sprejema tudi informacije z vlaka. Omogoča zanesljiv prenos podatkov tudi pri hitrostih do 500 km/h;
- Eurozanka: verižna zanka, ki je položena na železniški tir. Nadzornemu centru pošilja podatke o položaju vlaka;
- Elektronska enota: sprejema podatke od eurobalize in eurozanke;
- Radijski nadzorni center (RBC): s pretokom informacij preko sistema GSM-R izmenjuje podatke z nadzornim centrom.



Slika 3: Evro baliza

3.1 Sistemski pregled sistema ETCS

ETCS je sistem za samodejni nadzor vlakov za evropske železnice. Sistem nadomešča vso vozno signalizacijo in nadzorne sisteme z bolj učinkovitim sistemom. Določen je z nizom specifikacij, ki zagotavljajo interoperabilnost kabinske in progovne opreme s strani različnih dobaviteljev in proizvajalcev.

Sistem ETCS omogoča posredovanje podatkov o dovoljeni hitrosti in informacije o gibanju vlaka do strojevodje. Omogoča tudi konstanten nadzor, ali strojevodja upravlja vlak skladno s temi navodili. Računalnik, ki se nahaja v kabini vlaka, primerja hitrost vlaka z dovoljeno hitrostjo in samodejno zavira, če je to potrebno. [6]

Sistem za svoje delovanje zahteva podporo prenosnih omrežij. Za to podporo skrbi omrežje GSM-R, ki zagotavlja podatkovno komunikacijo med progovno in vlakovno opremo sistema ETCS. Fiksni del prenosnega omrežja pa je potreben za podatkovne komunikacije med progovno opremo sistema ETCS na različnih lokacijah ter povezavami z zunanjimi sistemi nadzornih centrov in opremami vzdrževalnih skupin. Progovno opremo predstavljajo radijsko nadzorni centri (RBC), vlakovno opremo pa kabinska vlakovna oprema (EVC). RBC se nahaja v signalnem kontrolnem centru in predstavlja centralno nadzorno napravo za vso progovno opremo sistema ETCS. Skrbi za nadzor sistema, zavarovanje vožnje vlakov in izdajanje dovoljenj za vožnjo. Vsebuje podatke o poti vlaka, omejitvah hitrosti in lokacijah vlaka.

Obstajata dva osnovna načina zagotavljanja podatkovnih komunikacijskih storitev med RBC-ji in EVC:

- Tokokrogovna povezava (Circuit Switched Mode): vsaka individualna komunikacija je določena svoji aktivni vlakovni kabini. En vlak zaseda en komunikacijski kanal.
- Paketna podatkovna povezava preko GPRS: informacije so posredovane v obliki paketov preko komunikacijskega kanala, ki si ga lahko deli več vlakov skupaj.

Trenutno je v uvedbi prenos preko tokokrogovne povezave, upoštevana pa mora biti možnost poznejše nadgradnje na GPRS.

3.1.1 Stopnje sistema ETCS

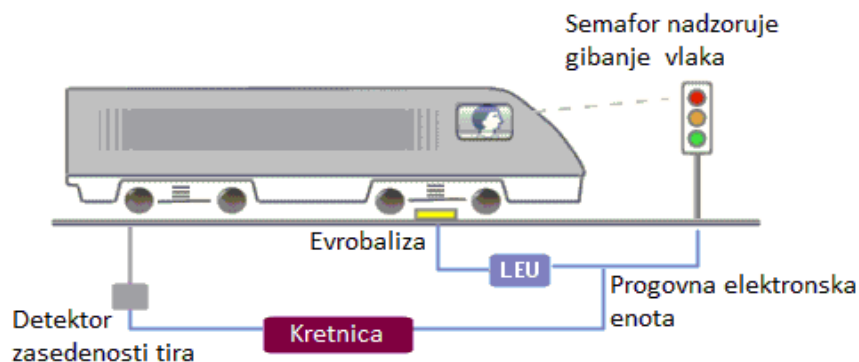
Za ravnanje z različnimi konfiguracijami v opremljenih za signalizacijo v državah članicah Evrope je bil sistem ETCS zasnovan z več aplikacijskimi stopnjami. Te stopnje so način izražanja možne povezave med progo in vlakom. Določanje stopnje je odvisno od tega, kako je proga opremljena in na kakšen način se informacije posredujejo vlaku. Vsaka stopnja ima določene funkcionalnosti in zahteve, ki morajo biti izpolnjene, da je lahko zagotovljena varnost na določeni stopnji. [6]

ETCS stopnja 0

Stopnja 0 je namenjena vlakom, opremljenim s kabinsko opremo ETCS, ki vozijo po neopremljenih progah. Vlakovni podatki ETCS morajo biti preneseni in vneseni iz dveh razlogov: za podporo funkcij ETCS, ki delujejo na stopnji 0, kot sta hitrost vlaka in nadzor maksimalne hitrosti, ter za nemoteno vožnjo pri vstopu v območje z višjo stopnjo ETCS. [6]

ETCS stopnja 1

V stopnji 1 se poleg nove opreme na progi in vlakih še vedno uporablja kontrolne in signalizacijske naprave ob progi. Vlak s strani proge sprejema informacije, ki omogočajo izračun najvišje dovoljene hitrosti. Te informacije so vlaku posredovane preko eurobaliz, ki se nahajajo vzdolž tirov in so povezane z obstoječim signalizacijskim sistemom. Strojevodja na zaslonu sprejema podatke o zavorni hitrosti in hitrosti vlaka. [6]



Slika 4: ETCS stopnja 1

ETCS stopnja 2

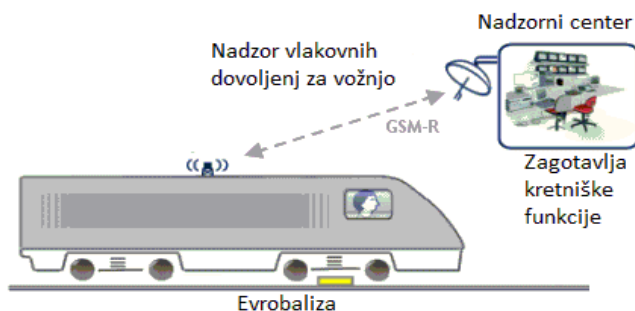
V stopnji 2 se za izmenjavo informacij med progo in vlakom uporablja konstantno radijsko komunikacijo, ki jo zagotavlja sistem GSM-R. Na tej stopnji signali ob progi niso nujno pomembni. Kretnica prenese stanje naprav za nadzor poti vlakov do RBC-ja. Ta s pomočjo prejetih podatkov generira dovoljenja in omejitve o nadaljnji vožnji vlaka in s temi podatki preko omrežja GSM-R obvešča strojevodjo. Evrobalize se v tej stopnji v glavnem uporabljajo za meritve poti in hitrosti. [6]



Slika 5: ETCS stopnja 2

ETCS stopnja 3

V stopnji 3 ETCS nadomesti vse progovne krmilne in signalizacijske naprave. Lokacija vlaka je opredeljena na podlagi meritev poti in hitrosti. Ti podatki se preko sistema GSM-R poročajo na RBC. V tej stopnji se ne uporablja zapornice za nadzor poti vlakov. Vožnja vlakov je izvedena po sistemu premičnega progovnega odseka. V primerjavi s stopnjo 2 takšna konfiguracija zelo poenostavlja zmanjševanje stroškov in opreme na progi, saj signalizacija ob progi ni več potrebna. [6]



Slika 6: ETCS stopnja 3

ERTMS – regionalni

To je regionalna različica stopnje 3, ki je namenjena prometno manj obremenjenim linijam. Uporabljena je minimalna progovna oprema, za prenos pa sta uporabljena sistem GSM-R in GPRS, kar predstavlja nizke stroške uvedbe in vzdrževanja tega nivoja. Sistem operira s 50 odstotkov nižjimi stroški od običajnega nadzornega sistema. Bistvena razlika od stopnje 3 je ta, da je tukaj signalizacija po odsekih proge fiksna in avtomatska preverba integritete ni potrebna. To postane odgovornost voznika, kar pa tudi predstavlja omejitve pri vožnji vlaka. [6]

3.2 Sistemski pregled GSM-R

GSM-R je radijski komunikacijski sistem, ki podpira ETCS. Uporablja se za komunikacijo med vlakom in nadzornimi prometnimi centri, posredovanje podatkov o največji dovoljeni hitrosti in dodatne komunikacije, ki so potrebne za nemoteno delovanje železniškega prometa. Zasnovan je na mobilni tehnologiji GSM. Glavni nalogi sistema sta, da služi kot podatkovni prenosni medij za informacijske signale in govorne funkcije ETCS. V sistemu GSM-R, ki je tokokrogovno komutirano omrežje, ima vsaka vlakovna enota namensko dvosmerno tokokrogovno povezavo, vzpostavljeno v omrežju za oddajanje signalizacije ali govorne komunikacije ETCS.

Sistem je bil sprva uveden kot nadomestilo starejših, predvsem analognih, mobilnih komunikacijskih sistemov. Poleg standardnih govornih funkcij GSM in možnosti prenosa podatkov je bil nadgrajen s specifičnimi funkcijami za železnice. Govorne komunikacije in funkcije so namenjene komunikaciji med osebjem na vlakcu, komunikaciji s prometniki, nadzornimi centri, vzdrževalci proge in tudi kot telefonska storitev osebju in potnikom na postajah ali progi. [8]

Pri sistemu GSM-R zelo pomembno vlogo igra izkoristek frekvenčnega spektra. Ekonomična uporaba frekvenc je za upravljavce železnih komunikacij ključnega pomena, saj je frekvenčni pas omejen na 4 MHz. V ta namen železnice v okviru sistema GSM-R uvajajo mobilno podatkovno storitev GPRS. GPRS uporablja paketni prenos podatkov, kar pomeni, da lahko uporabniki (do osem) hkrati dostopajo do enega podatkovnega prenosnega kanala.

Železnice se za sistem odločajo predvsem zaradi njegova potenciala za:

- podporo številnim aplikacijam,

- doseganje interoperabilnosti med železniškimi omrežji,
- učinkovite rabe virov (radijske frekvence, kabelske povezave ...),
- zmanjšanje stroškov javnih naročil (uporablja se enoten sistem),
- zmanjšanje stroškov vzdrževanja,
- nadaljnji tehnični razvoj.

Da lahko posamezne železnice uporabijo popolnoma operativne in preverjene produkte GSM-R, morajo biti ti določeni z nizom specifikacij. Te specifikacije so določene s strani:

- Mednarodne zveze železnic (UIC): ta opredeljuje specifikacije, imenovane Evropsko integrirano radijsko podprto železniško omrežje (EIRENE). Železniški operaterji v EIRENE določajo sistemske zahteve sistema GSM-R in funkcionalne zahteve, ki zagotavljajo interoperabilnost med železniškimi omrežji.
- Združenja mobilnih radijskih omrežij za železnice v Evropi (MORANE): to je združenje železniških operaterjev, GSM-operaterjev in raziskovalnih organizacij. Namen projekta MORANE je razviti, testirati in ovrednotiti prototipe omrežja GSM-R, da so lahko izpolnjene zahteve železnic. [7, stran 16–20].

3.2.1 Funkcije GSM-R, opredeljene v specifikaciji EIRENE

GSM-R kot sistem, ki je razvit posebej za železniške potrebe, poleg običajnih funkcij GSM zagotavlja še dodatne funkcije, razvite za železnice. Te funkcije zagotavlja na celotnem pokritem območju železniške mreže.

Skupinski klic

Funkcija omogoča klicanje več uporabnikov hkrati, ki so znotraj določenega področja. Pogovor lahko teče med samo enim uporabnikom in klicateljem, ostali uporabniki lahko medtem pogovor samo poslušajo.

Razpršeni klic

Funkcija se od skupinskega klica razlikuje le v tem, da nihče od klicanih uporabnikov nima možnosti govora, ampak lahko samo poslušajo.

Prioritetni klici

Funkcija omogoča razvrščanje klicev v prioritetne skupine z istim izvorom. Na primer klici, ki jih generirajo strojevodje, se razvrstijo v prioritetno skupino. Na enak način se razvrstijo tudi klici drugih železniških skupin. Če se istočasno pojavi več klicev, ki so različnih prioritet, se ti razvrstijo v čakalno vrsto glede na njihovo prioriteto. Klic v sili, ki ima najvišjo prioriteto, pa obstoječo zvezo takoj poruši in se vzpostavi nemudoma.

Pristopne matrice

Pristopne matrice z omogočanjem ali blokiranjem komunikacijske poti določajo, kdo in s kom lahko komunicira znotraj omrežja GSM-R. S to funkcijo je ostalim naročnikom prepovedano klicati funkcionalne številke vlakov, dovoljenje imajo le pooblaščen operatorji.

Funkcionalno naslavljanje

Opisuje proces klicanja naročnika, ki se nanaša na funkcijo, ki jo opravlja v določenem času.

Lokacijsko naslavljanje

S to funkcijo lahko klicatelj glede na svojo lokacijo vedno vzpostavi zvezo s službenim mestom, odgovornim za to lokacijo – recimo, ko uporabnik vzpostavi zvezo s kontrolorjem na tem specifičnem vlaku. Pri tej funkciji klicatelj vedno kliče enotno številko službenega mesta ali pa uporabi hitro klicanje s pritiskom na programirano tipko.

Kratka SMS-sporočila

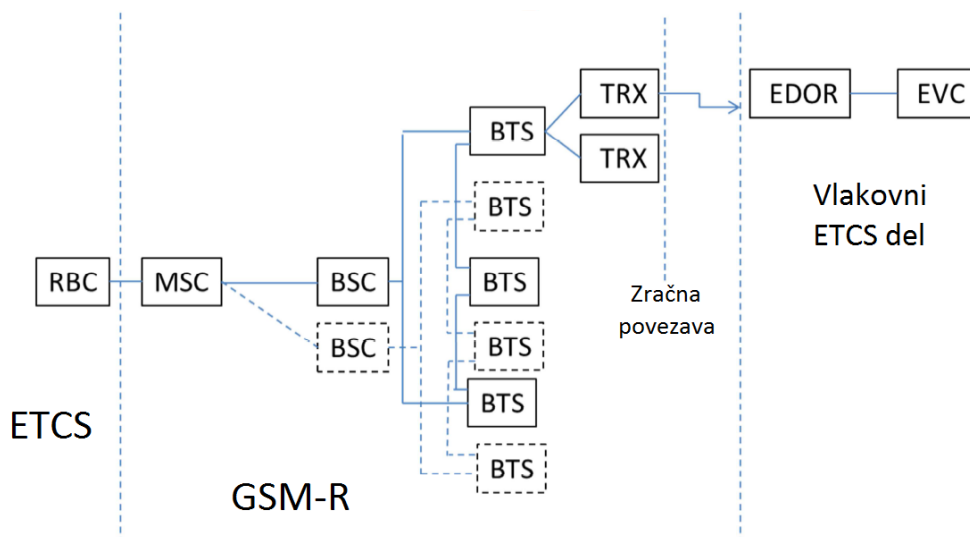
Omrežje GSM-R omogoča pošiljanje SMS-sporočil med vsemi uporabniki. Podobno kot je pošiljanje telegramov v analognem omrežju, je znotraj sistema GSM-R omogočeno pošiljanje vnaprej spisanih in definiranih sporočil. Dispečer lahko po potrebi obvešča tudi večje skupine uporabnikov hkrati.

Klic v sili

Funkcija klica v sili se uporablja v primeru nevarnosti na progi ali izrednega dogodka. Klic lahko sproži strojevodja, vlakovno osebje ali dispečerji. Klic ima najvišjo prioriteto med tovrstnimi klici. Informacijo, da je bil klic sprožen in takojšnjo zvezo s klicateljem dobijo vsi uporabniki v tem celičnem področju. Govori lahko samo en uporabnik naenkrat, medtem ko ostali lahko le poslušajo pogovor.

3.3 Uporabljeni prenosni mediji za povezavo med sistemoma ETCS in GSM-R

Pri opisu uporabljenih prenosnih medijev je osredotočena povezava preko sistema GSM-R ter ne preko evrobaliz in evrozank.



Slika 7: Povezava med GSM-R in ETCS sistemom

Vmesnik med fiksnim delom sistema ETCS je radijski blokovni center (RBC), za sistem GSM-R pa vmesnik predstavlja mobilna centrala (MSC). Ta vmesnik uporablja protokol ISDN 30B + D, ki je sestavljen iz tridesetih 64 kb/s B priključkov z dodatnim 16 kb/s D kanalom za signalizacije. Skupaj to predstavlja 2 Mb/s povezavo. Med mobilno centralo in krmilnikom baznih postaj (BSC) je zaradi redundance uporabljen sistem 2 Mb/s. Enako velja za povezavo med krmilnikom baznih postaj in baznimi postajami (BTS), vendar so zaradi varnostnih razlogov bazne postaje povezane v zanko, kar vedno omogoča dve možni povezavi. Prenosni medij je lahko optično vlakno, bakreni kabel, koaksialni kabel ali radijska povezava, slednja se pogosto uporablja na podeželskih območjih. [8]

Na mobilno centralo sta priključena dva krmilnika postaj, povezava z drugim je na sliki prikazana s črtkano črto. Bazna postaja tega sekundarnega krmilnika je ugnezdjena z eno od prvih baznih postaj. Na ta način lahko postaja in povezan oddajnik (TRX) pokrijeta območje nedelujoče bazne postaje in nedelujočega oddajnika. Bazna postaja je običajno postavljena v bližini oddajnika in povezava med njima je narejena z ustreznimi mediji. [8]

Govor in podatki sistema ETCS se po zraku prenašajo preko sedemfrekvenčnih kanalov z 9,6 kb/s bitne hitrosti. Antena, ki je povezana z EDOR-jem (podatkovni radio), sprejme signal in ga nato vnese v kabinski računalnik EVC. EDOR in EVC sta del vlakovne kabinske opreme ETCS. [8]

3.4 Uvajanje sistema ERTMS v slovenskem omrežju

Leta 1999 je Evropska unija omogočila izdelavo študije izvedljivosti za uvedbo sistema ERTMS za koridor V. Leta 2005 je sledila prijava koridorja D, ki poteka po koridorju V, v katerega je vključena tudi Slovenija, za uvedbo sistema. Koridor D poteka na trasi med Valencio, Lyonom, Torinom, Ljubljano in Budimpešto. Republika Slovenija je prijavila 420 kilometrov prog in 72 lokomotiv Slovenskih železnic. Oprema prog in lokomotiv se financira s strani Evropske unije. [14]

Za začetni pilotni projekt je planirana implementacija na 64 kilometrih proge na relaciji Ljubljana–Jesenice in na 50 kilometrih proge na relaciji Zidani Most–Dobova. Predvideno je, da en RBC pokriva okoli 50 kilometrov proge, kar pomeni uporabo štirih RBC-jev za pilotni projekt. Za pokrivanje preostalih prog je predvidena postavitev 21 dodatnih RBC-jev. RBC-ji so z jedrnim omrežjem povezani preko povezave E1.

4 Komunikacijski sistem GSM-R

Radijski komunikacijski sistem za železnice sestavljajo naslednji glavni elementi:

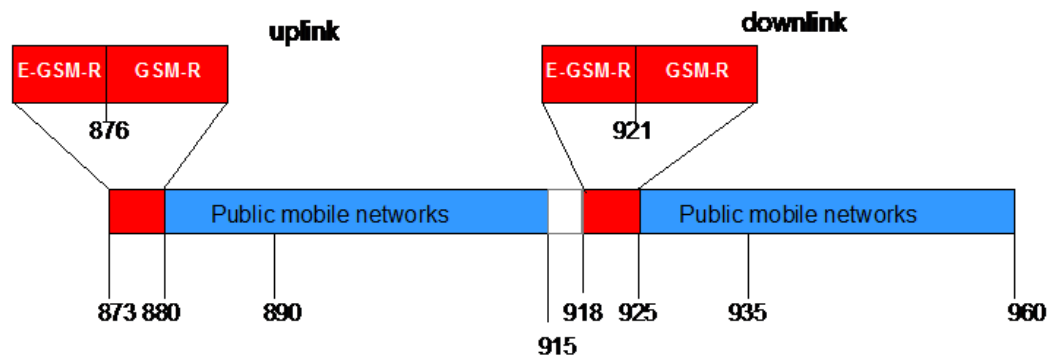
- mobilno omrežje,
- fiksno omrežje,
- mobilna in fiksna terminalska oprema,
- oprema za nadzor in upravljanje sistema,
- vmesniki med progovno opremo in ostalo komunikacijsko opremo.

Nacionalno omrežje GSM-R lahko temelji na enem ali več mobilnih omrežjih GSM. Omrežja so med seboj lahko povezana neposredno ali posredno preko fiksnih omrežij. Ta fizična omrežja morajo biti med seboj povezana tako, da tvorijo eno samo logično omrežje. Tudi nacionalna omrežja GSM-R so lahko med seboj povezana in s tem zagotovijo boljše storitve preko številnih držav. [7, stran 16–20]

Mednarodna zveza železnic je že v zgodnji fazi razvoja sistema določila skupni frekvenčni pas, v katerem bo sistem deloval. Tako sta s strani Evropske uprave za pošto in telekomunikacije (CEPT) znotraj 900 Mhz frekvenčnega pasu rezervirana dva pasova za GSM-R:

- uplink: 876–880 Mhz, ki se uporablja za prenos podatkov,
- downlink: 921–925 Mhz, ki se uporablja za sprejem podatkov.

Ker so bile te frekvence dogovorjene na evropski ravni, omogočajo prehajanje čez mejo in mednarodni promet. Uporabljen frekvenčni pas je lahko za države izven Evrope drugačen.



Slika 8: Frekvenčni spekter GSM-R

Iz dodeljenega spektra imamo na voljo do 19 parov uporabnih frekvenčnih kanalov. Nosilna frekvenca je določena s številko absolutnega radijskega frekvenčnega kanala (ARFCN). Za nosilce GSM-R se uporablja naslednji dogovor, da $F_l(n)$ predstavlja frekvenčno vrednost nosilca ARFCN v spodnjem pasu, $F_u(n)$ pa predstavlja ustrezno frekvenčno vrednost v zgornjem pasu:

- $F_l(n) = 890 + 0.2 \cdot (n - 1024) \text{ Mhz}$ $955 \leq n \leq 973$
- $F_u(n) = F_l(n) + 45 \text{ Mhz}$

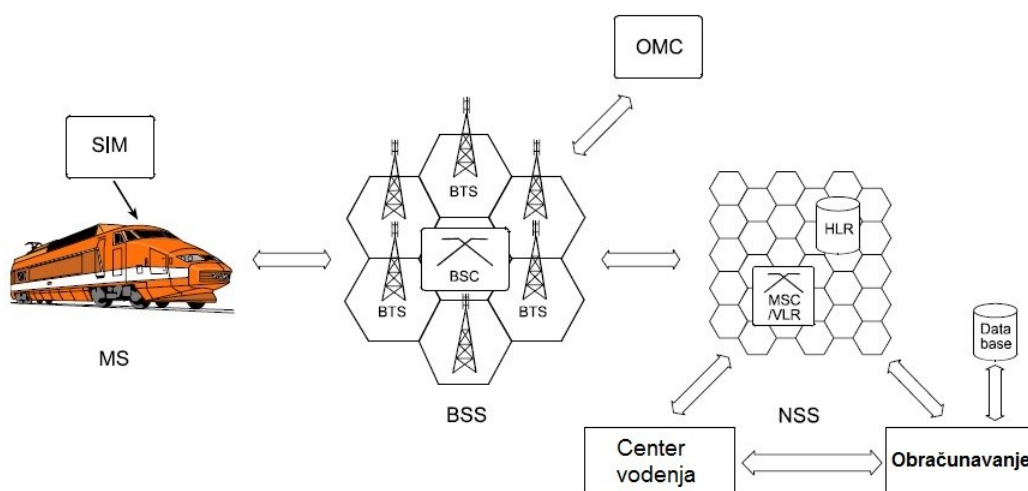
Poleg 19 dodeljenih kanalov je vključen še en 200-kiloherčni kanal, ki služi kot zaščitni pas. Ta ščiti pred interferencami med pasom GSM-R in sosednjim E-GSM pasom v zgornjem koncu dela spektra. Poleg tega je priporočena uporaba 400–600 kHz zaščitnega pasu za preprečitev motenj PMR/PAMR storitev v spodnjem delu dodeljenega spektra.

Vsak 200-kiloherčni frekvenčni kanal je razdeljen na osem časovnih enot. Najmanj ena enota na bazno postajo je potrebna, da deluje kot kontrolni kanal. Ostalih sedem enot pa se porabi za govorno in podatkovno komunikacijo. To pomeni, da se za množico prenosnih kanalov uporablja skupni signalizacijski kanal. Ta koncept se imenuje signalizacija po skupnem kanalu. [7, stran 101]

Zagotavljanje dodatnih frekvenc je odvisno od posamične države. Uporabljene bi bile lahko frekvence v razširjenem pasu E-GSM, ki je zelo primeren, saj bi bila vsa oprema GSM-R sposobna delovati na teh frekvencah.

Omrežje GSM-R je kot radijski nosilec zasnovano na sistemu GSM in vsebuje naslednje elemente:

- **krmilnik baznih postaj (BSC);**
- **podsystem baznih postaj (BSS);**
- **bazno oddajno-sprejemno postajo (BTS);**
- **podsystem preklopnega omrežja (NSS):** povezuje se z BSS preko GSM"A" vmesnika. NSS vsebuje **osnovno mobilno centralo (MSC)**, katere glavna odgovornost je nadzor klicev. MSC je podprta z **registrom lokacije naročnikov (HLR)** in **registrom lokacije gostujočih naročnikov (VLR)**. HLR vsebuje trajne podatke naročnikov, medtem ko VLR vsebuje začasne podatke o naročnikih, ki delujejo na območju MSC;
- **mobilne naprave:** izvajajo komunikacijo z BSS;
- **naročniški identifikacijski modul (SIM):** vsebuje informacije, specifične za posamezne naročnike. SIM in mobilna naprava tvorita **mobilno postajo (MS)**;
- **operativni vzdrževalni center (OMC):** je odgovoren za spremljanje napak in vzdrževanje mobilnega omrežja;
- **upravni center:** odgovoren za spremljanje delovanja omrežja, omrežno konfiguracijo in upravljanje z naročniki omrežja;
- **fiksne povezave:** skupaj povezujejo sestavne dele mobilnega omrežja.



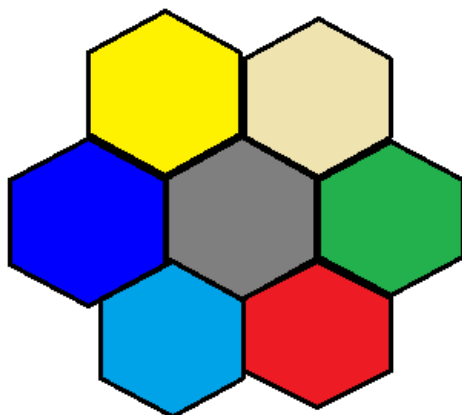
Slika 9: Osnovna arhitektura GSM-R omrežja

4.0.1 GSM-R za podatkovne komunikacije

GSM-R se poleg storitev za avtomatski nadzor vlakov lahko uporabi še za številne druge komunikacije. Možnosti uporabe podatkovne komunikacije so odvisne od potreb železnice in obremenitve sistema. Železniško osebje tako lahko dostopa do podatkov o voznih redih, zamudah, urnikih in drugih časovnih razporedih. Na vse več železnicah pa se sistem uporablja za krmiljenje sistemov za obveščanje potnikov. V uporabi so sistemi za potnike tako na vlakih kakor tudi na postajališčih, kjer potniki lahko dobijo vse potrebne informacije o potovanju z vlakom na izbrani relaciji.

4.1 Celični koncept

Celični koncept je pristop, kjer neko večje območje pokrivanja razdelimo v serijo manjših pokritih območij, ki jim rečemo celice. Tak pristop omogoča vnovično rabo enakih radijskih kanalov na istem storitvenem področju. S tem zagotovimo učinkovitejše storitve za naročnike in bolj učinkovito rabo razpoložljivega radijskega spektra. Klasična konfiguracija mobilne celice je v obliki šesterokotnika:

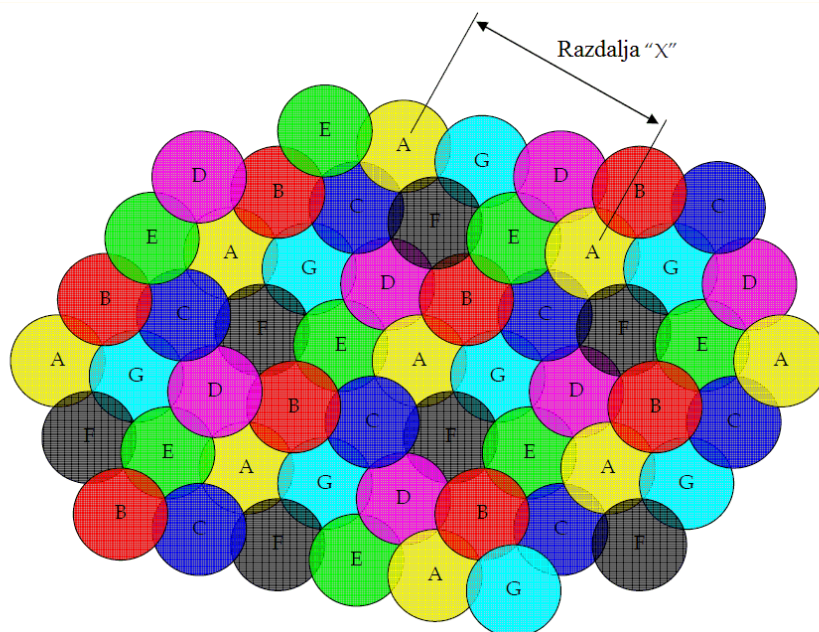


Slika 10: Klasični celični koncept v obliki šesterokotnikov

Vsaki celici je dodeljena ena ali več frekvenc, medtem ko so sosednjim celicam dodeljene različne frekvence. Na ta način je možno spremljati, v kateri celici se uporabnik nahaja. [7, stran 102]

4.2 Primer načrtovanja pokrivanja

Pri pokrivanju širšega območja, na primer za podporo komunikacij v mestu z več železniškimi progami in postajami, se uporablja ponavljajoči se večcelični vzorec. Spodaj je podan primer vzorca s sedmimi ponavljajočimi se celicami:



Slika 11: Ponavljajoč 7 celični vzorec, prikazan s krogi

Vsak krog predstavlja drugo celico, medtem ko barve in črke od A do G določajo sedem sklopov celic, v katerih se ponovno uporabljajo iste frekvence.

Pri načrtovanju celic in frekvenčnem načrtu ima zelo pomembno vlogo povečanje razdalje med oddajniki in sprejemniki baznih postaj na istih frekvencah, da se izognemo medkanalnim motnjam. Zmanjšane morajo biti tudi motnje zaradi sosednjih dodeljenih kanalov, ki se pojavijo med sosednjima celicama. Premajhna razdalja ima lahko negativen učinek na delovanje kanalov in interferenco med njimi. Za zagotovitev radijske zmogljivosti, pri čemer se zmanjšajo medkanalne interference, je predlagana naslednja razporeditev 19 frekvenc med različne celice:

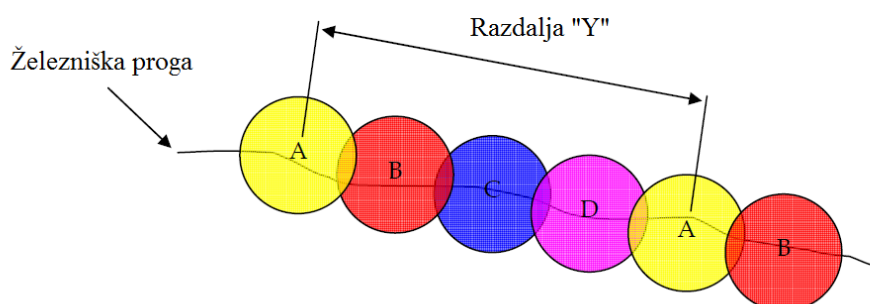
Celica	Frekvenčni kanali	Št. prometnih kanalov (št. kontrolnih kanalov)
A (rumena)	n= 955, 962 in 969	22 (2) ali 23 (1)
B (rdeča)	n= 956, 963 in 969	22 (2) ali 23 (1)

C (modra)	n= 957, 964 in 971	22 (2) ali 23 (1)
D (vijolična)	n= 958, 965 in 972	22 (2) ali 23 (1)
E (zelena)	n= 959, 966 in 973	22 (2) ali 23 (1)
F (siva)	n= 960 in 967	15 (1)
G (zeleno-modra)	n= 961 in 968	15 (1)

Tabela 1: Možna razporeditev frekvenčnih kanalov za ponavljajoč 7 celični vzorec

V resnični situaciji je zelo verjetno, da bodo nekatera območja potrebovala večjo kapaciteto, na primer velike postaje z veliko količino prometa in uporabnikov. Ta primer in drugi dejavniki, kot so geografske lastnosti območja, optimizacija območnih skupinskih klicev in lokacijsko naslavljanje bodo imeli vpliv na optimalno načrtovanje celic in frekvenc. [7, stran 104–106]

Zgoraj naveden primer, ki zagotavlja pokritost preko širšega območja, lahko primerjamo s pokrivanjem vzdolž preprostega odseka železniške proge:



Slika 12 Ponavljajoč 4 celični vzorec

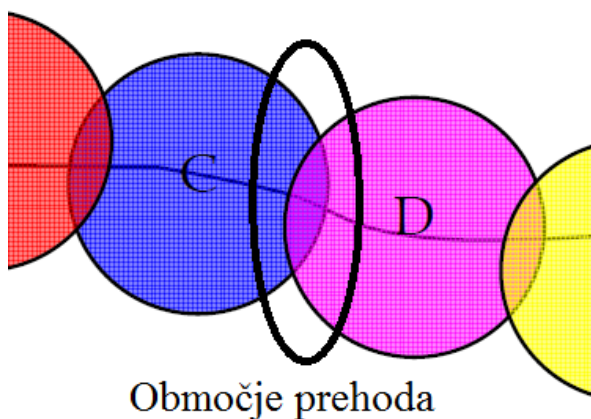
Kot je razvidno iz zgornje slike, za linearno območje zadostuje pokritje s ponavljajočim se štiriceličnim vzorcem. Če iz obeh primerov primerjamo razdaljo "X" in razdaljo "Y", vidimo, da je s štiriceličnim vzorcem dosežena večja razdalja med celicama istega tipa kot pa s sedemceličnim vzorcem. Zaradi manjšega števila celic v vzorcu je lahko na vsako celico dodeljeno večje število kanalov, s tem pa je dosežena boljša radijska zmogljivost. [7, stran 104–106]

Naslednji seznam podaja primere območij in funkcij, ki jim je treba nameniti posebno pozornost pri načrtovanju pokritosti omrežja GSM-R:

- območja, prekrita z mostovi in nadvozi,
- železniške postaje,
- ranžirna območja,
- območja za klice v sili,
- višinsko omejena območja,
- železniški odseki in ovirani deli prog.

4.3 Selitev med celicami

Sistem GSM-R beleži, v kateri celici se nahaja posamezna mobilna enota, ta položaj pa se shranjuje v register lokacije naročnikov (HLR). Pri selitvi mobilne enote iz ene celice v drugo sistem izvede predajo in HLR se samodejno posodobi. Za zagotovitev stalne in neprekinjene povezave se selitev izvaja v prehodnem območju, kjer se dve celici med seboj prekrivata. Dolžina prehodnega območja je odvisna od časa, potrebnega za ustrezno predajo in hitrosti premikajoče se enote, v našem primeru vlaka. [8, stran 22–23]



Slika 13: Prehodno območje med celico C in D

Pri prehodu mobilne enote v celico, ki pripada drugemu operaterju GSM-R, se izvede postopek gostovanja (angl. *roaming*). V takem primeru morata operaterja obeh celic med seboj imeti sporazum o gostovanju. Ko enota zapusti celico, ki pripada železniškemu omrežju, in vstopi v celico javnega omrežja, se zgodi

naslednje: HLR železniškega omrežja sprejme informacijo, da je mobilna enota zapustila omrežje, register lokacije gostujočih naročnikov (VLR) javnega omrežja se posodobi z informacijami o gostujoči enoti in njenem položaju. Na ta način se lahko mobilna enota normalno uporablja tudi izven domačega omrežja, posledično so lahko drugačni stroški obračunavanja storitev. [8, stran 22–23]

4.4 Radijska pokritost

Radijsko načrtovanje omrežja je odvisno predvsem od geografskih podatkov. Tako je lahko osnovno pokrivanje izračunano z zbranimi podatki že obstoječih digitalnih zemljevidov posameznih področij. Ti modeli morajo biti prilagojeni železniškemu okolju. Posebna pozornost mora biti namenjena nepokritim točkam, medkanalnim in sosednjekanalnim motnjam. Nepokrita območja se lahko zmanjšajo z optimizacijo lokacij za BTS ali s postavitvijo anten na teh območjih. Če to ne reši problema, se lahko uporabijo dodatni repetitorji. [9, stran 27]

Na splošno so za načrtovanje radijskega omrežja podane naslednje minimalne zahteve:

- minimalni nivo sprejemanja: -90 dBm,
- izhodna moč mobilne postaje: 2W (33 dBm) ali 8W (39 dBm),
- občutljivost sprejemnikov mobilnih postaj: -102 dBm,
- razmerje med nosilcem in motnjami za medkanalne motnje (C/I_C):
20 dBm,
- razmerje med nosilcem in motnjami za sosednje kanalne motnje (C/I_A):
5 dBm,
- moč antene: tipično od 12 do 17 dB,
- izgube v napajalnem kablu in drugih komponentah,
- dovoljena odstopanja.

4.5 Arhitektura GSM-R

Tipična struktura železniškega omrežja GSM-R se v bistvu dosti ne razlikuje od običajnega javnega mobilnega omrežja z vidika omrežnih elementov in povezljivosti. Optimiziran vzorec dodeljevanja frekvenc za povečanje zmogljivosti omrežja, manjše celice na gostih območjih (kot so železniške postaje) in rešitve za prehode med celicami pri visokih hitrostih so v uvajanju za javni GSM (mobilno telekomunikacijsko omrežje) in so lahko nekoliko prilagojene za specifično uporabo na železnicah. Razlike, ki se pojavijo, so v postavitvi omrežja ter načrtovanju, ki ga določajo potrebe železniških omrežij.

Posebne zahteve omrežja izhajajo iz naslednjih zahtev aplikacij, ki uporabljajo GSM-R [9, stran 20]:

- nemotena komunikacija pri hitrostih do 500 km/h,
- učinkovita izraba razpoložljivih frekvenc (20),
- razmerje med nosilcem in motnjami: 12 dBm, specifikacije EIRENE zahtevajo 15 dBm,
- 95-odstotna pokritost za 95 odstotkov časa v določenem območju pokritosti z nivojem nad -90 dBm,
- odstotek uspešnih prehodov med celicami in omrežji GSM-R je nad 99,5 odstotka,
- pokritost v tunelih.

Čas vzpostavitve klica mora v 95 odstotkih dosegati spodnje zahteve, za ostalih 5 odstotkov pa 1,5-krat spodnje vrednosti:

Prioriteta klica	Vrsta klica	Čas vzpostavitve klica za 95 % vseh klicev
Prioriteta 1	železniški klic v sili	≤ 1 s
Prioriteta 2	nujni skupinski klic	≤ 2 s
Prioriteta 3	operativni klici za zgornja primera	< 5 s
Prioriteta 4	vsi nizko-prioritetni klici	< 10 s

Tabela 2: Čas vzpostavitve klica, določenega s strani EIRENE specifikacij

Omrežje GSM-R je tipično zgrajeno iz več eliptičnih celic ob tirih s smernimi antenami v smeri tirov. Na območju železniških postaj so celice bolj sektorsko razporejene zaradi večje količine prometa. Za manj naseljena območja, kjer so zahtevane manjše progovne hitrosti, zadostujejo že navadne govorne povezave. Celice na teh območjih lahko delujejo kot vsesmerne celice, na primer na podeželskih območjih brez sistema ETCS. Zato mora biti frekvenčno načrtovanje skrbno prilagojeno glede na dane pogoje. [9, stran 20]

4.5.1 Tipične strukture GSM-R

Arhitektura omrežja GSM-R uporablja redundance, ki so na voljo iz obstoječih tehnologij GSM. Redundance sistema morajo biti določene zaradi zahtevane varnosti, razpoložljivosti in zanesljivosti. Z vzpostavitvijo ustrezne redundantne strukture omrežja GSM-R je zagotovljen nemoten potek prometa.

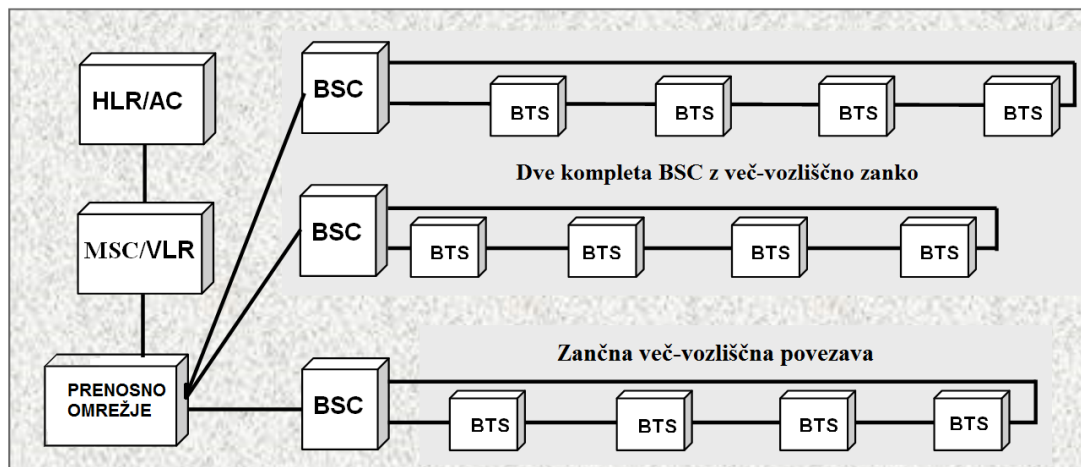
Železniške aplikacije z visokimi zahtevami zanesljivosti tipično uporabljajo večvozliščno zančno arhitekturo. Pri tem prepletanje BTS dveh različnih zank zmanjša posledice izpada ene same BTS ali BSC-ja. [9, stran 22]

Zančna večvozliščna povezava

BTS so povezane v večvozliščno zanko. Na ta način je lahko v eni zanki fizično povezano do sedem BTS. Iz varnostnih razlogov so povezane samo štiri. Če se v tem primeru prvotna povezava ne vzpostavi, potem BTS nemoteno preklopi na povratno povezavo. To pomeni, da tekoči klici ne bodo izpuščeni zaradi ene izgubljene prenosne poti. Tak primer povezave je lahko izveden z dvema namenskima kabloma, ki sta ločena s kabelskim kanalom. To bi predstavljalo varno rešitev. Druga bolj ekonomična rešitev pa je s pomočjo logičnih povezav na optičnem obroču PDH/SDH. [9, stran 22]

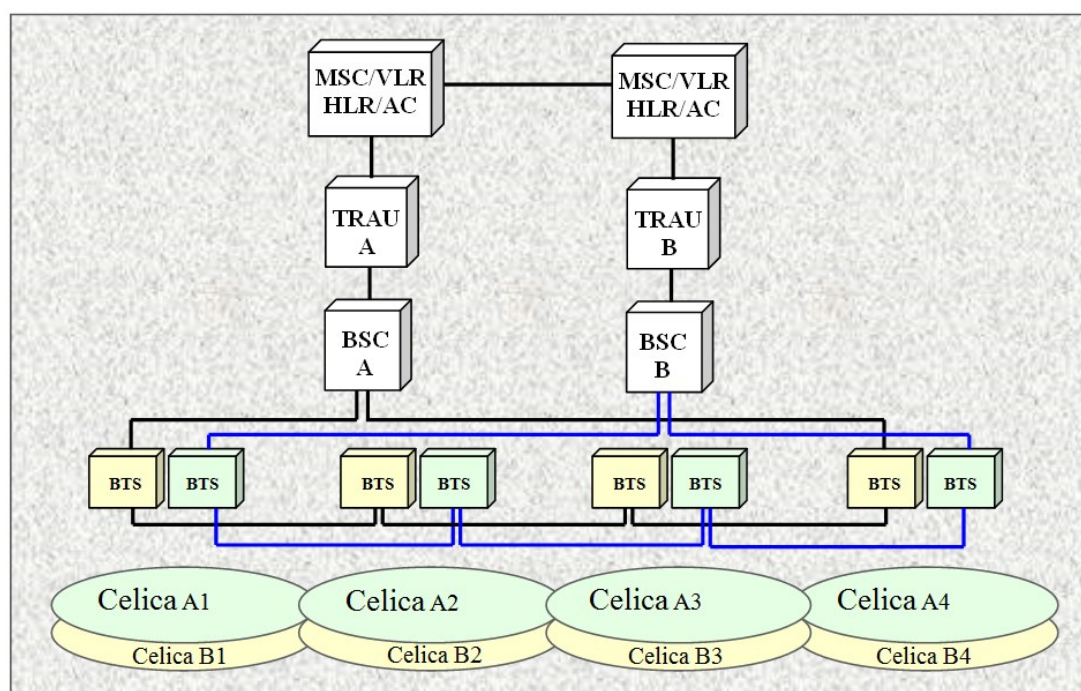
Dve kompleta BSC z večvozliščno zanko

BTS so povezane z dvema različnima BSC-jema v večvozliščni zanki, ki se med seboj prepletata v enojni shemi. V tem primeru je manjše tveganje nedelovanja storitev zaradi izpada BTS in BSC-ja ali napake na kablu. [9, stran 22]



Slika 14: GSM-R arhitektura za ETCS sistem z visoko in nizko redundanco

Zgoraj navedeni primeri nespremenjene vrste povezav so možni z GSM fazo 2. Za še večjo zanesljivost brez ene same točke odpovedi pa je predlagana naslednja arhitektura, ki deluje s podvojeno mrežno strukturo z dvema načinoma porazdelitve celic:



Slika 15: Visoko redundantna GSM-R arhitektura s podvojenimi celicami

Kot je razvidno iz slike, sta za takšno redundantno strukturo predvideni dve MSC. Prva MSC je aktivna, druga pa je v stanju pripravljenosti. V primeru izpada aktivne MSC bo celotno obratovanje prevzela MSC, ki je v pripravljenosti. Enak sistem delovanja velja tudi za BSC. Prvi BSC je aktiven, drugi pa redundanten.

Redundantni BSC je postavljen na lokaciji, ki je geografsko ločena od aktivnega. V realni postavitvi je uporabljenih več BSC-jev.

4.6 Kakovost storitev za GSM-R

Kakovostne zahteve sistema GSM-R temeljijo na parametrih QoS (Quality of Service), ki so določeni s strani UIC. Določanje kakovosti storitev je stalen proces EIRENE in MORANE organov, kakor tudi med železnicami in dobavitelji. Za različne železniške aplikacije veljajo drugačne zahteve. Za sprejemljivo delovanje na ETCS nivoju 1 in višje morajo biti izpolnjene QoS zahteve za vzpostavljane povezave. Povzetek zahtev je prikazan v spodnji tabeli:

QoS Parametri	Zahtevane vrednosti	Verjetnost
Zamuda pri vzpostavitvi povezave klica mobilnega izvora	< 8.5 s	95 %
	≤ 10 s	100 %
Verjetnost motnje pri vzpostavitvi	1%	100 %
Maksimalna zamuda pri prenosu podatkov	≤ 0.5 s	99 %
Stopnja izgube povezave	≤ 1% / h	100 %
Trajanje motnje prenosa	< 0.8 s	95 %
	< 1 s	99 %
Obdobje brez motenj	> 20 s	95 %
	> 7 s	99 %
Zamuda registracije v omrežje	≤ 30 s	95 %
	≤ 35 s	99 %
	≤ 40 s	100 %

Tabela 3: GSM-R Qos parametri

Zgoraj navedene zahteve so predpisane za hitrosti do 500 km/h na ravnih linijah prog in tudi v tunelih, na odsekih, mostovih in postajah. Parametri veljajo za pot od začetne do končne točke enega vlaka in niso odvisne od obremenitve omrežja.

4.7 Določanje kapacitete sistema v odvisnosti od podatkovnih sporočil

V primeru železnice, v celoti opremljene s sistemom ERTMS/GSM-R, je premikajoči se vlak na celotni poti od začetne do končne postaje povezan s sistemom. Povezan je nenehno in ne samo takrat, ko poteka prenos sporočil. Količina poslanih podatkov v tej neprekinjeni povezavi je zelo nizka. Sporočilo za posodobitev stanja lokacije je sestavljeno iz 14 bajtov, sporočilo o dovoljenju za vožnjo pa med 40 in 500 bajtov, v povprečju 250 bajtov.

V primeru, da je vsako minuto poslano eno sporočilo o stanju lokacije in eno sporočilo o dovoljenju za vožnjo in če upoštevamo, da je 1 bajt enako 8 bitov:

- $14 \times 8 + 250 \times 8 = 2.112$ bitov

V tem trenutku se prenese 2.112 bitov. Hitrost prenosa je 9.600 bitov na sekundo, kar pomeni, da je možno poslati 576.000 bitov v tej minuti. To predstavlja uporabo 0,4 odstotka razpoložljive kapacitete. [8, stran 26]

4.8 Določanje kapacitete v odvisnosti od podatkovnih in govornih kanalov

Za prenos govora in podatkov je razpoložljivih sedem časovnih enot za eno frekvenco GSM-R. Na ta način je kapaciteta porazdeljena med podatkovne in govorne klice. Več frekvenc se želeni celici dodeli po potrebi.

Telekomunikacijski promet je merjen v Erlangih (osnovna enota intenzivnosti prometa v telekomunikacijah). En Erlang predstavlja 60 minut prometa. Če v eni uri sprejmemo 300 klicev, ki trajajo po dve minuti, pomeni, da smo sprejeli za 600 minut klicev, kar je enako 10 Erlangov prometa v tej uri. [8, stran 26]

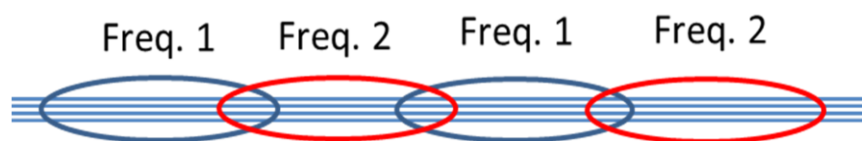
Promet je opisan v prometnih modelih, ki se uporabijo za izračun potrebnega števila telekomunikacijskih linij ali v našem primeru radijskih kanalov, čakalne vrste ali zavrženih klicev. Za izračun teh vrednosti obstajajo različne formule, ena od najpogostejše uporabljenih je Erlang formula. Formula je prikazana v različnih oblikah, odvisno od tega, kako so obravnavani zavrženi klici. V Erlang B-formuli je predpostavljeno, da je zavrženi klic izgubljen. V Erlang C-formuli je zavržen klic postavljen v čakalno vrsto za toliko časa, dokler ni obdelan. V železniškem primeru

je količina govornih klicev spreminjajoča. V primeru motenj in na ranžirnih postajah je lahko količina klicev večja, kar pomeni, da zasede od tri do štiri kanale. Po drugi strani pa so ti klici kratki in se v glavnem uporabljajo za formalna navodila in informacije.

4.9 Omejena razpoložljivost govornih in podatkovnih kanalov v celici

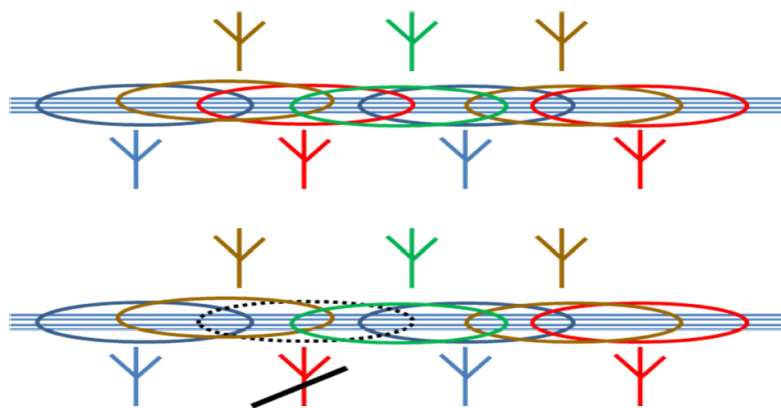
Kot že omenjeno, vlak na svoji poti od samega začetka do cilja stalno zaseda podatkovni kanal. Omejeno število 19 frekvenc in posledično zaradi tega omejeno število podatkovnih in govornih kanalov, sedem na frekvenco, predstavlja omejitev sistema, ko je zahtevano, da je en kanal vedno na voljo za vsak premikajoči se vlak.

Sistem GSM-R uporablja celični koncept za pokritost in najboljšo izrabo frekvenc. V Poglavju 3.5 (Primer načrtovanja pokrivanja) je omenjeno, da je železniško progo mogoče pokriti z uporabo le dveh frekvenc.



Slika 16: Pokritost proge z dvema različnima frekvencama

Takšna pokritost se smatra kot minimalna konfiguracija, ki nam zagotovi sedem govornih in podatkovnih kanalov. Konfiguracija pa je nezanesljiva v primeru, da ena od celic ne deluje korektno, kar povzroči zaustavitev vlaka in prometa.



Slika 17: Pokritost proge z dvema različnima skupinama celic (zgornja). V primeru nedelovanja ene celice je pokritost še vedno zagotovljena (spodnja).

Za povečano zanesljivost lahko štiri celice pokrivajo isto področje kot na sliki 15. Modro-rdeči sklop je tukaj prekrit z zeleno-rjavim sklopom celic. V primeru, da ena od celic odpove, ostaja del linije proge še vedno pokrit. Za zagotovitev redundance je vsak sklop povezan na svoj BSC. Tako je lahko tudi v primeru izpada BSC-ja zagotovljena polna pokritost.

4.10 Vpliv drugih mobilnih sistemov na GSM-R

Kot že omenjeno, sistem GSM-R deluje na rezerviranem spektru znotraj 900-megaherčnega pasu. V njegovi bližini s sistemi GSM operirajo še drugi ponudniki mobilnih storitev, kakor tudi mobilni sistemi tretje in četrte generacije, kot so UMTS (univerzalni mobilni telekomunikacijski sistem), WiMax in LTE (standard za visokohitrostne brezžične mobilne komunikacije). Problem predstavljajo tudi uvedbe širokopasovnih tehnologij 3G in 4G. Celična pokritost javnih mobilnih operaterjev je tako lahko zelo blizu celic GSM-R, lahko jih prekriva ali pa ima večjo poljsko jakost. Vsakršni vpliv drugega omrežja lahko povzroči motnje v prometu GSM-R.

Motnje zmanjšajo ali onemogočijo mobilno povezavo in povzročijo neuspeh prenos podatkov o gibanju vlaka in vožnji. Posledice so lahko zaustavitev vlaka, blokada prometa, zamude in slaba učinkovitost omrežja. Velika nevarnost je tudi za nedelovanje klica v sili, ki predstavlja še večje tveganje za žrtve.

Železnice beležijo vedno večje število motenj na sistemih GSM-R. Po statističnih podatkih nemških železnic se je število lokacij z interferencami z 58 lokacij v letu 2006 povečalo na 252 lokacij do januarja 2011. Z UIC so poročali o še nadaljnjih 180 lokacijah v drugih državah Evropske unije. Pričakovano je, da se bo število primerov znatno povečalo, saj v nekaterih državah implementacija sistema GSM-R še ni dokončana in številne nove mobilne tehnologije so šele v vzponu v 900-megaherčnih pasovih. [10]

Analize različnih merilnih kampanj so pokazale, da na trenutne GSM-R mobilne postaje vplivajo intermodulacijski učinki takrat, ko radijske motnje presežejo nivo signala okoli -40 dBm. To je v skladu z nivoji blokiranja in intermodulacij za prvi kanal GSM, opredeljenih v sistemski dokumentaciji Evropskega inštituta za telekomunikacijske standarde (ETSI). Primeri interferenc so bili zabeleženi za nizke in visoke sprejemne moči signala GSM-R.

Razlogi, zakaj prihaja do težav, na podlagi raziskav Švedske transportne administracije Trafikverket [8, stran 31]:

- Predlagane dovoljene vrednosti signalov UMTS/LTE v neposredni bližini železniške proge so 500- do 1000-krat višje od tistih, ki jim je oprema GSM-R namenjena;
- Vpliv motenj je pogosto odvisen od opreme. Čeprav določena enota izpolnjuje zahteve, obstajajo precejšnje razlike med različnimi modeli in dobavitelji;
- Učinkovitost opreme GSM-R, ko je izpostavljena visokim nivojem sosednje frekvenčnih kanalov, ima močan nelinearen vzorec. To pomeni, da je vpliv učinkovit na več ravneh;
- Glavni problem predstavljajo intermodulacijski učinki neenakomernih nivojev, ki nastanejo v signalni poti sprejemnika GSM-R.

Za preprečitev problemov je potrebno nivojsko načrtovanje signala glede prostora, frekvence in amplitude. S strani administracije Evropske uprave za pošto in telekomunikacije (CEPT) so predlagane potencialne tehnike za zmanjševanje vplivov, ki so razdeljene v tri kategorije: ukrepi v povezavi z uvajanjem tehnologije, ukrepi v povezavi s strojno opremo in tehnologijo ter ukrepi v povezavi s spektrom.

Pri ukrepih v povezavi s spektrom je predlagano usklajeno načrtovanje frekvenc omrežja GSM-R in javnih mobilnih omrežij. Koordinacija frekvenčnega načrtovanja bi operaterjem omogočila, da se izognejo konfliktom nastavljanja radijskih vmesnikov med sosednjimi baznimi postajami. Na območjih v bližini železnice bi bile frekvence oddajnega kontrolnega kanala (Broadcast Control Channel) javnega mobilnega omrežja izbrane med kanali, ki niso blizu pasu GSM-R. Druga predlagana rešitev pa je uporaba dodatnega frekvenčnega pasu E-GSM-R. Pri tej rešitvi je zaželeno, da se pas E-GSM-R uporabi za prometne kanale, GSM-R pa za kontrolne in prometne kanale. [11, stran 18]

5 Analiza kapacitete sistema GSM-R

Za podlago raziskave, ali bo število razpoložljivih kanalov sistema GSM-R zadovoljevalo potrebam slovenskega železniškega omrežja, sem izbral glavno železniško postajo v Ljubljani, ki predstavlja najpomembnejše železniško križišče v državi. Promet, ki poteka skozi, prihaja iz drugih večjih mest, kot so Maribor, Dobova, Koper, Sežana, Jesenice ter po neelektrificiranih progah iz smeri Kamnika in Novega mesta. Zaradi velike frekvence prihodov in odhodov vlakov v Ljubljani bo potreba po kanalih za signalizacijo in komunikacijo večja kot na dvotirnih ali enotirnih progah.

Podani sta dve oceni potrebnih kanalov. Ena ocena je na podlagi števila aktivnih vlakov, ki jih lahko pričakujemo na območju postaje. Druga ocena potrebnih kanalov je podana na podlagi tabele profilov klicev bodočih uporabnikov GSM-R v glavni prometni uri. Upoštevan je promet ETCS nivo 2, število govornih klicev in njihovo trajanje v glavni prometni uri. Podatki temeljijo na trenutni uporabi analognega in digitalnega omrežja SŽ. Ocene so podane za območje ene celice na območju glavne železniške postaje v Ljubljani. Pri oceni je upoštevano operativno in administrativno osebje, vlakovni radio (EVC) in funkcionalnost ETCS nivo 2.

5.1 Podatki za analizo

Zahtevana kapaciteta, ki jo mora zagotoviti omrežje GSM-R, bo v glavnem odvisna od naslednjih parametrov:

- velikost območja pokrivanja,
- število aktivnih vlakovnih kabin znotraj celice,
- uporabniki mobilnega omrežja.

5.1.1 Območje pokrivanja

Železniška postaja v Ljubljani pokriva 1500 metrov široko področje. Postajno območje je pokrito s petimi peroni, osmimi železniškimi tiri in 13 dodatnimi tiri. V analizi bo predpostavljeno, da je območje Železniške postaje Ljubljana pokrito z eno bazno postajo in eno samo celico premera pet kilometrov.

Celica je določena kot območje, ki ga pokrivajo namenske frekvence. Sektor je definiran kot smer antene, kar pomeni, da je celica lahko porazdeljena na več sektorjev. Zaradi moči signala (92 dBm) je priporočeno, da je planirana velikost celic v povprečju pet kilometrov. Iz frekvenčnega vidika je najbolj idealna rešitev, da območje pokrivanja konfiguriramo z le eno celico, če je to mogoče.

Znotraj celice bodo na razpolago maksimalno tri frekvence. Razporeditev frekvenc je prikazana tudi v Tabeli 1 v Poglavju 3.2 (Primer načrtovanja pokrivanja). Zaradi preprečevanja motenj se frekvence ne smejo ponoviti v sosednji celici, vse frekvence pa tudi ne morejo biti uporabljene v eni sami celici. Omejeno število frekvenc pa pomeni tudi omejeno število prometnih in signalizacijskih kanalov. Tri frekvence nam dajejo na razpolago 24 kanalov, od teh je najmanj en rezerviran za signalizacijo GSM-R. To pomeni, da ima takšna celica največ 23 prometnih kanalov.

5.1.2 Število vlakov

Število aktivnih kabin znotraj celice je določeno kot pričakovana številka aktivnih vlakovnih kabin za vsak tir v najbolj prometni uri. Aktivna vlakovna kabina je tista, v kateri je operacija ETCS aktivna med začetkom in koncem vožnje. Pri izračunu bodo upoštevani vlaki, ki prihajajo ali odhajajo s postaje in ki najbolj zasedajo frekvenčne kanale. To so potniški in tovorni vlaki, ki jim Železniška postaja Ljubljana predstavlja cilj poti ali začetek potovanja. Železniška postaja Ljubljana ima osem glavnih in 13 dodatnih tirov. Ves glavni promet, ki poteka skozi postajo, pa prihaja in odhaja po sedmih tirih, kar nam daje skupno število sedem vlakov:

- dvotirna proga iz smeri Maribora in Dobove,
- dvotirna proga iz Sežane,
- enotirna proga iz Jesenic,
- enotirna neelektrificirana proga iz Novega mesta,
- enotirna neelektrificirana proga iz Kamnika.

Predpostavili smo, da je območje postaje pokrito s celico premera pet kilometrov. Če Železniška postaja Ljubljana predstavlja središče celice, potem celica proti vzhodu sega vse do Železniške postaje Ljubljana Moste. Med njima poteka proga s tremi tiri, kar pomeni, da imamo lahko na tej progi tri aktivne vlakovne kabine. Z upoštevanjem treh tirov iz smeri vzhoda dobimo končno število osem vlakov, ki bodo upoštevani pri določanju števila kanalov. Vlaki na preostalih tirih medtem čakajo na dovoljenje za vožnjo in dodelitev prostega tira ali pa izvajajo ranžiranja. Ranžiranja vlakov, ki so nadzirana preko sistema ETCS, v operacijskem načinu delovanja ne predstavljajo kritične omejitve pri gostoti prometa, zato ne bodo upoštevana pri izračunu potrebnih kanalov.

Tipični scenarij je videti tako, da vlakovna enota, namenjena od lokacije A do določene lokacije B, nadzornemu centru preko radijske zveze pošlje zahtevek za dodelitev poti. Nadzorni center se odzove z dodelitvijo poti. Kabinski računalnik tako prejme digitalno mapo poti z vsemi potrebnimi podatki, kot so: pozicije nivojskih prehodov, zahtevane pozicijske točke in hitrostni profil. Na svoji poti vlak prevozi vse pozicijske točke v določenem času ter oddaja pozicijske oznake nadzornemu centru. Povezava GSM-R med vozilom in ustreznim komunikacijskim partnerjem je vzpostavljena med vsakim dejanjem in prekinjena po končani komunikaciji.

5.1.3 Uporabniki sistema GSM-R na Slovenskih železnica

V novem radijskem sistemu GSM-R bo struktura uporabnikov sistema dodeljena na osnovi obstoječega stanja ter dodatnih možnosti, ki jih sistem ponuja s prenosom podatkov in govora.

Seznam uporabnikov novega sistema:

- dispečerji v centrih vodenja prometa in vlakovni odpravniki,
- uporabniki analognih UKV-zvez: premikalne skupine, vozovni pregledniki, popisovalci vozov in vzdrževalci infrastrukture,
- vozila: lokomotive, garniture, delovna vozila in stroji,
- operativni del, ki uporablja javne zveze GSM: vodenje prometa, vzdrževanje infrastrukture,
- ETCS nivo 2: sistem vodenja prometa vlakov, kjer je GSM-R nosilna storitev za komunikacijske potrebe,

- Dodatne aplikacije, ki za prenos podatkov uporabljajo sistem GSM-R.

Na SŽ so vzpostavljeni trije centri vodenja prometa, ki se delijo glede na regije: Ljubljana, Maribor in Postojna. Ti centri v tem trenutku še niso v popolni funkcionalnosti. Zaradi rekonstrukcije starih signalnovarnostnih naprav na progah se promet še ne vodi povsod daljinsko iz enega centra. Posledično je to tudi razlog, da je treba ohraniti še veliko število vlakovnih odpravnikov in jim obstoječe dispečerske pulte zamenjati z novimi s funkcionalnostjo GSM-R. [15]

Premikalna področja so tako kot dispečerska razdeljena po regijah:

- CVP Ljubljana: centralno področje,
- CVP Postojna: zahodno področje,
- CVP Maribor: vzhodno območje.

V centrih vodenja, na postajah in pomembnejših železniških vozliščih bodo stabilne radijske postaje v sistemu GSM-R nadomeščene z ISDN- ali IP-telefoni. Delovne skupine na terenu bodo posodobljene s prenosnimi radijskimi napravami OPH. Ostali administrativni uporabniki pa bodo opremljeni z radijskimi postajami GPH. Med administrativne uporabnike spadajo tisti, ki so kakorkoli povezani z izvajanjem vodenja prometa, vzdrževanja infrastrukture in drugih storitev.

Železniška vozila, ki se uporabljajo v SŽ, delimo v dve kategoriji: transportna in vzdrževalna. Transportna vozila delimo še na:

- električne garniture (EMV) in električne lokomotive (Elok),
- diesel garniture (DMV) in diesel lokomotive (Dlok).

Transportna vozila bodo v sistemu GSM-R opremljena s kabinsko napravo (EVC). [15]

5.2 Ocena na podlagi števila aktivnih vlakov

Pri prvi predpostavki so ocene podane za osem aktivnih vlakovnih kabin. Vlaki se nahajajo znotraj celice, ki pokriva železniško postajo.

Prometnega kanala ni mogoče deliti z drugimi povezavami, tudi če je kanal premalo izkoriščen. Da bi zagotovili zadostno kapaciteto za signalizacijo ETCS, mora omrežje GSM-R zagotoviti en uporabniški/prometni kanal za vsako vlakovno enoto [12, stran 2]. Pri oceni bo za govorne komunikacije predviden en kanal, za ETCS nivo 2 signalizacijo pa dva kanala.

Uporabniki / vrsta prometa	Število kanalov za govorni promet	Število kanalov za podatkovni promet
čuvaj delovnih skupin	1	
vzdrževanje proge	1	
druge vzdrževalne skupine	1	
administrativni uporabniki	1	
vozilo (govorna komunikacija)	8	
ETCS nivo 2 (podatkovna komunikacija)		16
Skupne zahteve na celico	12	16

Tabela 4: Število potrebnih kanalov na podlagi števila aktivnih vlakov

Za čuvaje, vzdrževalce in administrativne uporabnike je predviden po en kanal za govorno komunikacijo. Za vozila je prav tako predviden en kanal na vlak, kar skupaj znaša osem kanalov. Za podatkovno komunikacijo, z upoštevanjem dveh kanalov za eno vozilo, pa potrebujemo 16 kanalov za osem predvidenih vlakov. Za zagotovitev kapacitete v tem primeru potrebujemo 12 kanalov za govorni promet in 16 kanalov za ETCS podatkovni promet in signalizacijo, kar je skupno 28 kanalov, potrebnih za zagotovitev nemotene komunikacije.

5.3 Ocena na podlagi števila klicev

Ocena potrebnih kanalov je podana na podlagi tabele profilov klicev bodočih uporabnikov GSM-R v glavni prometni uri. Upoštevan je promet ETCS nivo 2, število govornih klicev in njihovo trajanje v glavni prometni uri, podan je tudi promet v Erlangih. Podatki temeljijo na trenutni uporabi analognega in digitalnega omrežja SŽ. [15]

Uporabniki / vrsta prometa	Št. klicev v glavni prometni uri	Dolžina klica (s)	Promet (Erlang)
čuvaj delovnih skupin	20	10 s	0,0056 Erl
vzdrževanje proge	10	50 s	0,139 Erl
druge vzdrževalne skupine	10	30 s	0,0833 Erl
administrativni delavci	2	90 s	0,05 Erl
vozilo (samo govorna komunikacija)	3	30 s	0,025 Erl
ETCS nivo 2 (podatkovna komunikacija)	3	1200 s	1 Erl

Tabela 5: Število in dolžina klicev v najbolj prometni uri

Pri računanju števila kanalov je upoštevan pogoj, da za zagotovitev kakovosti število neuspešnih vzpostavitev povezav in telefonskih linij ne sme presegati en odstotek. To lahko privede do pomanjkanja virov signalnih kanalov (SDCCH), posledično bi to kljub razpoložljivemu radijskemu omrežju pomenilo zavrnitve vzpostavitev klicev zaradi odsotnosti signalizacije. Število potrebnih kanalov je izračunano z Erlang B-kalkulatorjem¹ po naslednjem postopku:

¹ Vir: <http://www.site2241.net/erlang.htm>

V Erlang kalkulator pod opcijo **Offered Load** vpišemo promet v Erlangih, ki smo ga izračunali v prvi tabeli. Pod drugo opcijo **Number of Channels** pa vnašamo število kanalov, predvidenih za to skupino. Vzemimo za primer administrativne uporabnike. Izračunali smo, da v najbolj prometni uri opravijo 0,05 Erlanga prometa. Glede na Erlang formulo so verjetnosti blokade prometa 0,0476, če je uporabljen en kanal, 0,0012, če sta uporabljena dva kanala in 0,00001, če so uporabljeni trije kanali. Pri primerjavi izračunanih vrednosti z vrednostmi, podanimi za kakovostno storitev prenosa podatkov, ki navajajo, da mora biti verjetnost motnje pri vzpostavitvi povezave manjša od 0,01 oziroma en odstotek, vidimo, da je ta zahteva izpolnjena že pri uporabi dveh kanalov.

Uporabniki / vrsta prometa	Število kanalov za govorni / podatkovni promet	Promet (Erlang)
čuvaj delovnih skupin	1	0,0056 Erl
vzdrževanje proge	2	0,139 Erl
druge vzdrževalne skupine	2	0,0833 Erl
administrativni uporabniki	2	0,05 Erl
vlak (govorna komunikacija)	2	0,025 Erl
ETCS nivo 2 (podatkovna komunikacija)	5	1 Erl
Skupne zahteve na celico	14	

Tabela 6: Število potrebnih kanalov v najbolj prometni uri

5.4 Primerjava

Izračunano je, da bi v prvem primeru potrebovali 28, v drugem pa 14 kanalov za zagotovitev kapacitete. V prvem primeru potrebujemo za polovico več kanalov, kar pomeni veliko razliko pri konfiguraciji celic za pokrivanje železniške postaje.

Za zagotovitev 28 prometnih kanalov mora biti celica konfigurirana s štirimi frekvencami, ki nam dajejo na razpolago 32 kanalov, od teh potrebujemo dva za signalizacijo, preostalih 30 kanalov pa lahko uporabimo kot prometne kanale za uporabnike. Celica s tremi frekvencami ne zagotavlja zadostne kapacitete in v tem primeru je delitev kapacitete na več manjših celic obvezna. V vsakem primeru, ko potrebujemo več kot tri frekvence, je potreben tudi nov frekvenčni načrt. Pri delitvi območja na več manjših celic je zelo pomembno, kje se nahajajo prehodi med celicami. Predaja komunikacije med baznima postajama je lažje izvedljiva, če je moč signala oddajne in sosednje celice za daljši čas več ali manj enaka.

V drugem primeru predstavlja 14 prometnih kanalov bolj realno število za potrebno kapaciteto. Za 14 prometnih kanalov sta potrebni le dve frekvenci, ki dajeta na razpolago 16 kanalov – pri tem je odvisno, koliko kanalov je rezerviranih za signalizacijo. Pri enem skupnem signalizacijskem kanalu imamo na voljo 15 prometnih kanalov, dva signalizacijska kanala pa omogočata 14 prometnih kanalov. V tem primeru tri frekvence s 23 prometnimi kanali zagotavljajo zadostno kapaciteto in za pokritost železniške postaje zadostuje ena celica. Delitev kapacitete na manjše celice ni potrebna.

Kljub temu, da bi v našem primeru dve frekvenci zadostovali za delovanje sistema, morajo biti na razpolago rezervne frekvence. V primeru izrednih in preobremenjenih situacij, kot so slabe vremenske razmere ali nesreče, se lahko promet ustavi in znotraj celice, kjer smo navadno imeli en ali dva vlaka, se lahko pojavi večje število vlakov. Takšen scenarij privede do povečane uporabe govornih kanalov.

Podana ocena na podlagi tabele profila klicev predstavlja dejansko obremenjenost prometa v najbolj prometni uri. Takšna količina prometa ne predstavlja omejitve pri kapaciteti omrežja. Osnova za določitev kapacitete ne daje absolutnega števila vlakov, ki se lahko nahajajo znotraj celice. Teh je znotraj celice lahko več kot osem, vendar je z večjim številom njihova aktivnost omejena. Vsak

takšen scenarij, kjer količina vlakov, računanih na tak način, preseže izračune, se mora obravnavati kot izjemen primer. Vse to se mora upoštevati pri frekvenčnem načrtovanju, kakor tudi povečanje prometa v prihodnosti.

5.4.1 Celična pokritost na območjih z visoko gostoto vlakov

Na območju železniške postaje se pogosto nahaja več vlakov in vlakovnih enot, ki na gostem območju mirujejo ali pa se premikajo bolj počasi. Tu je lahko tudi železniško osebje, ki izvaja vzdrževalna dela, ki zahtevajo več govornega prometa.

Na manjših postajah z enim ali dvema glavnima tiroma in nekaj stranskimi tiri za ranžiranja število kanalov ne predstavlja posebne omejitve. Pri manjših postajah je pomembno upoštevanje dejavnika, če mimo postaje potujejo vlaki z visokimi hitrostmi – celica mora za takšne vlake upoštevati predajna območja.

Na večjih postajah obstaja veliko gibanja pri nizkih hitrostih na dokaj gostem območju. V Sloveniji se to nanaša na postaje, kot so Ljubljana, Ljubljana Zalog, Koper, Maribor ... Takšna območja bodo najverjetneje konfigurirana z več manjšimi celicami, da bodo lahko obvladovala veliko število klicev na omejenem območju.

Na območju Železniške postaje Ljubljana Zalog se nahaja velika ranžirna postaja. Postaja je namenjena izključno tovarnemu prometu in je osrednja ljubljanska postaja za natovarjanje in raztovarjanje tovarnih vlakov. Dolžina postaje je 6512 metrov in je razdeljena na uvozno in izvozno postajo, sestavljena je iz 12 uvoznih in 16 izvoznih tirov. V neposredni bližini postaje pa se promet odvija pri visokih hitrostih. To pomeni, da imamo visoko gostoto prometa, ki zahteva več kanalov na manjšem območju, in hitro premikajoče se vlake, ki potrebujejo čim manj predajnih območij, kot je mogoče. V takšnem primeru bo celično načrtovanje in določanje frekvenc igralo zelo pomembno vlogo.

Na železniških postajah in premikalnih območjih, kjer je večja gostota prometa, bi z uporabo samo sistema GSM-R kot nosilne storitve število kanalov lahko povzročalo težave. V Poglavju 4.3 je ugotovljeno, da bi sistem GSM-R zadoščal za zagotovitev komunikacije na železniški postaji v Ljubljani v najbolj prometni uri. Z upoštevanjem samo osnovnih uporabnikov govorne in podatkovne komunikacije potrebujemo v tem primeru 14 frekvenčnih kanalov. Podatki za število klicev v najbolj prometni uri so lahko dober približek dejanskega prometa, vendar so

še vedno samo statistika. V primeru izrednega dogodka ali pa samo povečanega prometa je lahko število potrebnih kanalov veliko večje.

5.5 Omejitev prenosnega sistema

Šibko točko sistema predstavlja zračna povezava. Medtem ko hitrost prenosa 9,6 kb/s zadovoljuje potrebe, je število kanalov omejeno. Brezžični sistemi, tako kot vsi takšni sistemi, potrebujejo neko interno signalizacijo. V tem primeru je to signalizacija po skupnem kanalu. Od osem uporabniških kanalov na frekvenco je vsaj en uporabljen za ta namen, lahko pa je konfiguriran tudi en signalizacijski kanal za dve frekvenci. Uporaben kompromis med zanesljivostjo in zmogljivostjo sta dva signalna kanala za tri frekvence, kar nam omogoča 22 kanalov za podatkovni in govorni promet.

5.6 Povečanje zmogljivosti GSM-R sistema

Osnovna konfiguracija omrežja nam daje na razpolago 22 kanalov. Kot je ugotovljeno v analizi, v primeru, da imamo osem aktivnih vlakovnih kabin, aktivno vzdrževalno osebje in druge uporabnike, potrebujemo 28 frekvenčnih kanalov. Osnovna konfiguracija v tem primeru ne zagotavlja zadostne kapacitete in potrebna je ustrezna rešitev.

Radijski spekter je omejen vir in zato je malo verjetno, da bo v prihodnosti na razpolago več frekvenc, kot jih premoreta rezervirana pasova GSM-R in E-GSM-R. E-GSM-R je razširitev, ki se lahko uporablja samo na podlagi nacionalnih predpisov. Omejitev uporabe je uvedena, ker je ta pas v nekaterih drugih državah uporabljen za druge namene. Države, v katerih je ta pas neizkoriščen, ga lahko uporabijo, vendar samo za promet in enote, ki delujejo znotraj te države. V primeru, da frekvenčni pas E-GSM-R postane rezerviran le za železniško uporabo, bi dobili dodatnih 15 frekvenc na razpolago.

Poleg tehničnih rešitev je omejeno kapaciteto mogoče rešiti tudi z neke vrste formalnimi dogovori. Primer, ko imamo celico, ki ima vse uporabniške kanale zasedene: za takšne primere se lahko ustanovi alarmni prag, ki nadzornike opozori o možnosti presega signalne kapacitete sistema GSM-R. Nadzorniki bi nadzirali število dodatnih vlakov, ki vstopajo v že obremenjeno območje, dokler se območje ne razbremeni. Vlaki, ki nekaj časa ne bi nadaljevali vožnje oziroma bi stali na enem

mestu, bi se izklopili iz nadzora ETCS. Z odjavo iz nadzora bi kabinski sistem na vlaku ETCS prešel v »stanje pripravljenosti« in s tem bi se sprostili kanali GSM-R te enote.

Preprost način povečanja zmogljivosti je prehod iz tokokrogovnih na paketne povezave. GPRS standard za paketno orientirane podatke je v sistemu GSM-R drugje po Evropi že v uporabi za storitve, ki niso del sistema ETCS. Implementiran bo tudi za omrežje GSM-R v Sloveniji. GPRS z enim kanalom omogoča komunikacijo za do osem uporabnikov, medtem ko GSM-R omogoča samo enega.

6 Zaključek

Za nemoten potek železniškega prometa je potrebna zanesljiva komunikacija vlaka z nadzornim centrom, prometnikom in osebjem na progi. Zanesljiva komunikacija bo glavna naloga sistema GSM-R kjer se podatki in govor prenašajo preko omejenega števila frekvenčnih kanalov. Vprašanje, ki je postavljeno v tej nalogi je, ali bo omejeno število podatkovnih kanalov lahko zagotavljalo nemoteno komunikacijo, za promet na Slovenskih železnica. Analiza kapacitete sistema je opravljena s primerjavo ocen potrebnih kanalov.

Primerjani sta ocena potrebnih kanalov za predpostavljeno število aktivnih vlakov in ocena potrebnih kanalov na podlagi klicev v najbolj prometni uri. Osnovna konfiguracija omrežja GSM-R nam daje na razpolago 22 frekvenčnih kanalov za območje, katero pokriva celica. V primeru ocene na podlagi 8 aktivnih vlakov znotraj celice, bi potrebovali 28 frekvenčnih kanalov, kar presega zmoglosti sistema. Na podlagi števila klicev v najbolj prometni uri je izračunano, da bi potrebovali 14 frekvenčnih kanalov. Ocena na podlagi števila klicev predstavlja dejansko obremenjenost prometa, katero lahko pričakujemo in kapaciteta je zagotovljena z osnovno konfiguracijo omrežja GSM-R. Absolutnega števila vlakov znotraj območja celice ni mogoče določiti. V primeru izrednega dogodka je lahko število vlakov veliko večje, posledično bi bila večja tudi potreba po frekvenčnih kanalih.

Študija je pokazala, da bo število dodeljenih kanalov in s tem zmogljivost sistema GSM-R zadostovala tako za signalizacijo na progi kakor tudi za visoke hitrosti prometa. Za trenutno količino prometa na SŽ in z uvedbo GPRS število kanalov ne predstavlja omejitve. Z razširitvijo sistema GSM-R na dodatne operative možnosti in storitve za operativno osebje in potnike bi se v prihodnosti lahko pojavila potreba po več kanalih. Bolj kot kapaciteta bodo pri uvajanju sistema v središču pozornosti vplivi in motnje drugih mobilnih sistemov.

Literatura

- [1] Slovenske železnice [svetovni splet]. Dostopno na <http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/onas> [13. 3. 2014]
- [2] Slovenske železnice – Infrastruktura [svetovni splet]. <http://www.slo-zeleznice.si/sl/podjetje/infrastruktura> [13. 3. 2014]
- [4] B. Hernavs. *Hrbtenično telekomunikacijsko omrežje slovenskih železnic*. Slovenske železnice, d. o. o. [13. 3. 2014]
- [3] Zapiski iz dnevnika napisanega v času praktičnega dela, marec 2012.
- [5] Anthea Ngai. *What is ERTMS*. Institution of railway signal engineers [svetovni splet]. Dosegljivo na <http://www.irse.org.hk/eNewsletter/issue06/Technical-Articles/ETCS/ETCS.htm> [17. 3. 2014]
- [6] S. Jabri, E. Miloudi El Koursi, T. Bourdeaud'huy, E. Lemaire. *European railway traffic managment system validation using UML/Petri nets modelling strategy*. European Transport Research Review, 2010. [17. 3. 2014]
- [7] A. Neele, S. Wotton. *GSM-R procurement guide V. 5.0*. UIC Pariz: februar, 2007. [2. 6. 2014]
- [8] G. Lindstorm. *Is GSM-R the limiting factor for ERTMS system capacity?*. KTH Railway Group: junij, 2012. [3. 6. 2014]
- [9] W. Hillenbrand. *GSM-R The Railways Integrated Mobile Communication System*. Siemens: maj, 2009. [4. 9. 2014]

- [10] Mednarodna zveza za železnice - UIC, *Interference into GSM-R due to public mobile radio networks*. European Rail Infrastructure Managers, marec 2011 [svetovni splet]. Dosegljivo na: <http://www.hlspectrumreview.com/uploads/file/RSCCom%20mtg%2035%20GSM-R%20Interference%2023%20March%202011.pdf> [4. 9. 2014]
- [11] Electronic Communications Committee. *ECC Report 162 – Practical mechanism to improve the compatibility between GSM-R and public mobile networks and guidance on practical coordination*. ECC: maj, 2011. [11. 9. 2014]
- [12] Aleksander Sniady, Jose Soler. *Capacity gain with an alternative LTE railway communication network*. DTU Fotonik, Technical University of Denmark. [6. 11. 2014]
- [13] D. G. Fisher. *Boundaries between ETCS and the GSM-R network*, Banedanmark [svetovni splet]. Dosegljivo na <http://www.bane.dk/db/filarkiv/5589/Boundaries%20between%20ETCS%20and%20the%20GSM-R%20network.pdf> , 16. 4. 2008. [2. 7. 2015]
- [14] Anton Popler. *Posodobitev naprav za zavarovanje prometa na železniški progi Zidani Most–Dobova*. Diplomsko delo. Univerza v Mariboru: november, 2012. [6. 11. 2014]
- [15] Boris Gombač, Bojan Vučko. *Določitev uporabnikov GSM-R sistema*, Slovenske železnice, 6. 4. 2010. [20. 11. 2014]

Dodatek

A Tabela potrebnih kanalov za različne scenarije prog

Tabela prikazuje oceno potrebnih kanalov za enotirne proge, dvotirne proge, enotirne proge med postajami z možnostjo križanj in dvotirno progo med postajami z možnostjo križanj. Ocene so podane za območje ene celice na odprti progi. Upoštevani so vsi mobilni terminali operativnega osebja, EVC in ETCS nivo 2 funkcionalnost. Zahteve so podane s kanali na eno bazno postajo (BTS).

Med uporabniki so upoštevani čuvaji delovnih skupin, vzdrževalci proge, vzdrževalci drugih telekomunikacijskih naprav in administrativni uporabniki. Za govorne komunikacije je predviden en kanal na uporabnika oziroma enoto, za ETCS nivo 2 signalizacijo pa dva kanala.

Scenarij proge	Govorni promet – uporabniki	Govorni promet – vlaki	Podatkovni promet – ETCS nivo 2	Skupno
Enotirna proga	4	1	2	7
Dvotirna proga	4	2	4	10
Enotirna proga – s postajo, omogoča križanja	4	2	4	10
Dvotirna proga – s postajo, omogoča križanja	4	3	6	13