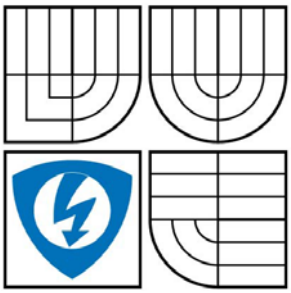


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VYUŽITÍ REPEATERŮ PRO ZLEPŠENÍ SIGNÁLŮ V MOBILNÍCH SÍTÍCH

UTILIZATION OF REPEATERS FOR SINGLE ENHANCEMENT IN MOBILE NETWORKS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — ONDŘEJ KUBÁSEK
AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. MARTIN KOUTNÝ
SUPERVISOR

BRNO 2008

LICENČNÍ SMLOUVA
POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Ondřej Kubásek

Bytem: Dukelská 470, 562 01, Ústí nad Orlicí - Hylváty

Narozen/a (datum a místo): 14.12.1985, Litomyšl

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 244/53, 602 00, Brno

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

prof. Ing. Kamil Vrba, Csc.

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1
Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
   - □ disertační práce
   - □ diplomová práce
   - □ bakalářská práce
   - □ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako .....

   (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP:	Využití repeateru pro zlepšení signálu v mobilních sítích
Vedoucí/ školitel VŠKP:	Ing. Martin Koutný
Ústav:	Ústav telekomunikací
Datum obhajoby VŠKP:	

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- □ tištěné formě – počet exemplářů ……..
- □ elektronické formě – počet exemplářů ……..

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2
Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizovaní výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
   - □ ihned po uzavření této smlouvy
   - □ 1 rok po uzavření této smlouvy
   - □ 3 roky po uzavření této smlouvy
   - □ 5 let po uzavření této smlouvy
   - □ 10 let po uzavření této smlouvy

   (z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3
Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísni a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: …….

…….. ……

Nabyvatel Autor

Anotace

V rámci této práce je prozkoumána vhodnost využití RF repeaterů pro zlepšení pokrytí signálem v mobilních sítích. Je vytvořen přehled jednotlivých typů repeaterů s jejich výhodami a nevýhodami, rozebrána problematika izolace antén a z toho rezultující nastavení zisku repeaterů. Dále se tato práce zabývá návrhem repeaterového systému pro zlepšení mobilního signálu ve vozech Českých drah. Součástí tohoto návrhu je rozbor problematiky penetrace a šíření signálu ve vlacích, možnosti zástavby repeaterů do jednotlivých vozů, diagnostika systému a finanční ocenění. Celý tento návrh je podložen výsledky testovacího měření, které proběhlo za spolupráce firem T-Mobile Czech Republic a.s., Vodafone Czech Republic a.s., Telefónica O2 Czech Republic a.s., České dráhy a.s. (Czech Railways Company) a ČD-Telematika a.s. na trati Praha – Ostrava.

Klíčová slova

repeater, pokrytí, signál, mobilní telefon, GSM, vlak

Abstract

This thesis examines possibile applications of RF repeaters to improve the mobile networks signal coverage. An overview of various types of repeaters is given, while advantages and disadvantages of particular types are discussed. The questions of antenna isolation and resulting repeater gain settings are solved here as well. The thesis also considers a proposal of repeater system to improve the signal coverage in the trains of the České dráhy, a.s. company. This proposal analyses the questions of signal penetration and propagation in trains, possibilities of implementing repeaters into carriages, system diagnostics and the financial issues. The proposal is supported by the results of a trial measurement taken out in the cooperation among T-Mobile Czech Republic a.s., Vodafone Czech Republic a.s., Telefónica O2 Czech Republic a.s., České dráhy a.s. (Czech Railways Company) a ČD-Telematika a.s. on the Prague – Ostrava line.

Keywords

repeater, coverage, signal, cell phone, GSM, train

KUBÁSEK, O. *Využití repeaterů pro zlepšení signálů v mobilních sítích.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 48 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Koutný.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Využití repeaterů pro zlepšení signálů v mobilních sítích jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30.5.2008 .....

podpis autora

Seznam použitých zkratek

ALC	Automatic Level Control, automatická kontrola úrovně
BCCH	Broadcast Control Channel, vysílací řídící kanál
BTS	Base Transceiver Station, základnová stanice
CEPT	Conference Europeenne des Administrations des Postes et des Telecommunications, Evropská konference poštovních a telekomunikačních správ
ČD	České dráhy
ČTÚ	Český telekomunikační úřad
DCS	Digital Cordless Standard, digitální bezdrátový standard
DL	Downlink
DOS	Disk Operating System, diskový operační systém
DÚ	Drážní úřad
E-GSM	Extended GSM
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory, elektricky mazatelná semipermanentní paměť
EIRENE	European Integrated Railway radio Enhanced Network, evropská integrovaná železniční rádiová síť
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power, ekvivalentní izotropně vyzářený výkon
ETCS	European Train Control Systém, evropský vlakový zabezpečovač
ETSI	European Telecommunications Standards Institute, evropský institut pro technické standardy
GPRS	General Packet Radio Service, obecný paketový rádiový systém
GSM	Global System for Mobile Communications, globální systém pro mobilní komunikace
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway, mobilní komunikační systém pro železnici
HSCSD	High Speed Circuit Switched Data, vysokorychlostní datové přepínané okruhy
HW	Hardware, technické vybavení

LED	Light Emitting Diode, světlo emitující dioda
MT	Mobilní telefon
NMT	Nordic Mobile Telephone, systém analogového telefonního přenosu s frekvenční modulací v pásmu 450 MHz
OMC	Operation and maintenance center, provozní dohledové centrum
P-GSM	Primary GSM
PC	Personal Computer, osobní počítač
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association, Mezinárodní sdružení pro paměťové karty personálních počítačů
PCS	Personal Communication Services, osobní komunikační služby
PSTN	Public Switched Telephone Network, veřejná komutovaná telefonní síť
RF	Radio Frequency, rádiový kmitočet
RSSI	Receive Signal Strengh Indication, Indikátor úrovně přijatého signálu
SW	Software, programové vybavení
TETRA	Trans European/Terrestrial Trunked Radio, standard pro policejní systémy
TCH	Traffic Channel, přenosové kanály
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System, systém 3. generace standardu mobilních telefonů
UPS	Uninterruptable Power Supply, nepřerušitelný zdroj napájení
VSWR	Voltage Standing Wave Ratio, napěťový činitel stojatého vlnění

Seznam obrázků

Obr. 1. Buňková struktura 14
Obr. 2. Průběh difrakce při průchodu kolem překážky 18
Obr. 3. Závislost ztráty na parametru difrakce 19
Obr. 4. Blokové schéma funkce repeateru 20
Obr. 5. Blokové schéma pásmově selektivního repeaterového systému 21
Obr. 6. Blokové schéma 2-kanálového repeaterového systému 22
Obr. 7. Nastínění využití repeateru 30
Obr. 8. Omezení DL cesty 32
Obr. 9. Omezení UL cesty 33
Obr. 10. Rozdělení pásem GSM a DCS mezi jednotlivé operátory 34
Obr. 11. Kmitočtová pásma GSM-R 35
Obr. 12. Blokové schéma statického měření 36
Obr. 13. Schéma vozu typu AEE s označením umístění repeateru 36
Obr. 14. Úroveň signálu v uličce vozu 37
Obr. 15. Úroveň signálu v kupé vozu 37
Obr. 16. Mapa trati s vyznačenými problematickými místy bez použití repeateru 38
Obr. 17. Mapa trati s vyznačenými problematickými místy s použitím repeateru 38
Obr. 18. Jednotka MIR-T9/18 39
Obr. 19. Blokové schéma repeaterového systému pro retranslaci pásem GSM-R, GSM a DCS 40
Obr. 20. Blokové schéma repeaterového systému pro retranslaci pásem GSM a DCS 41
Obr. 21. Vůz typu AEE s označením nejvhodnějšího zástavbového prostoru 42
Obr. 22. Zástavba repeateru do vozu typu AEE 42

Seznam tabulek

Tab. 1. Porovnání útlumu při šíření ve volném prostoru a šíření s odrazy 18
Tab. 2. Průměrné hodnoty pokrytí ve vozech typu AEE 37
Tab. 3. Měření úrovně signálu bez repeaterové technologie 38
Tab. 4. Měření úrovně signálu s repeaterovou technologií 38
Tab. 5. Finanční ohodnocení vlastní repeaterové technologie 45
Tab. 6. Finanční ohodnocení mechanického řešení a montáže zařízení 45
Tab. 7. Finanční ohodnocení dokumentace a schválení na DÚ 46

Obsah

1 ÚVOD 13
2 SYSTÉM GSM 14
2.1 Historie GSM 14
2.2 Struktura GSM 14
2.3 Buňky v GSM 15
2.3.1 Makrobuňky 15
2.3.2 Mikrobuňky 15
2.3.3 Pikobuňky 16
3 PROBLEMATIKA ŠÍŘENÍ RÁDIOVÉHO SIGNÁLU 16
3.1 Druhy šíření mobilního signálu 16
3.1.1 Šíření ve volném prostoru 16
3.1.2 Šíření odrazem 18
3.1.3 Difrakce 18
3.2 Řešení problematiky 20
4 REPEATER 20
4.1 Rozdělení repeaterů 21
4.1.1 Repeatery definované zesilovaným frekvenčním pásmem 21
4.1.2 Repeatery definované selektivitou (kanálové nebo pásmové) 21
4.1.3 Repeatery definované výstupním výkonem 22
4.2 Hlavní komponenty a funkce repeateru 22
4.2.1 Duplexer 22
4.2.2 Jednotka konverze 23
4.2.3 Základní deska 23
4.2.4 Aktivní slučovač 23
4.2.5 Koncový zesilovač 23
4.2.6 Napájecí zdroj 23
4.2.7 Řídící jednotka 24
4.2.8 I^2C sběrnice 24
4.2.9 Modem 24
4.2.10 Záložní zdroj 24
4.2.11 Externí alarmy 25
4.2.12 Jednotka VSWR 25

4.2.13 Funkce sledování provozu 25
4.2.14 Funkce RSSI (Receive Signal Strengh Indication) 25
4.3 Využití repeaterů 25
4.4 Nastavení repeateru 26
5 PROBLEMATIKA REPEATEROVÉ TECHNOLOGIE 27
5.1 Izolace antén 27
5.2 Nastavení zisku 28
6 NÁVRH REPEATEROVÉHO SYSTÉMU PRO VOZY ČD 29
6.1 Rozbor problematiky 29
6.1.1 Termická skla 30
6.1.2 Minimální použitelná úroveň pokrytí 31
6.1.2.1 Citlivost daná vlastním šumem repeateru 31
6.1.2.2 Omezení DL cesty 31
6.1.2.3 Omezení UL cesty 32
6.1.2.4 Určení minimální použitelné úrovně pokrytí 33
6.1.3 Vzájemná interakce rádiových sítí 33
6.1.4 Možnosti kmitočtového řešení 34
6.2 Výsledky testovacího provozu 35
6.2.1 Statická měření ve voze typu AEE 36
6.2.2 Dynamická měření ve voze typu AEE 37
6.3 Návrh konfigurace repeaterového systému 39
6.3.1 Vlastní technologie repeateru 39
6.3.2 Mechanické řešení a možnosti zástavby 41
6.4 Problematika systému dohledu a údržby 43
6.4.1 Funkční diagnostika a zajištění oprav 43
6.4.2 Problematika překročení hranic a napájení z vozové baterie 44
6.5 OCENĚNÍ FINANČNÍ NÁROČNOSTI 45
6.5.1 Vlastní technologie repeatru 45
6.5.2 Mechanické řešení a montáž zařízení 45
6.5.3 Dokumentace a schválení na DÚ 46
7 ZÁVĚR 47

1 Úvod

Žijeme v době, kdy si většina lidí nedovede život bez mobilního telefonu představit. Nejpopulárnějším standardem pro mobilní komunikaci ve světě je GSM, který používá více než miliarda lidí z více jak 200 zemí a i v České Republice je jasně nejrozšířenější. Proto se ve svém projektu budu věnovat především tomuto standardu.

Ve většině zemí působí více operátorů, kteří v tvrdé konkurenci bojují o přízeň zákazníků. Jednou z důležitých zbraní v tomto boji může být kvalita pokrytí signálem, a proto operátoři rádi uvádějí, že mají pokryto téměř 100% území. Jistě ale všichni víme, že realita je trochu jiná a že se najde spousta míst, kde si s mobilním telefonem nezavoláme. Nejde jenom o to, že existují stále skutečně „bílá“ místa na mapě pokrytí, ale zkuste si zavolat z vlaku, z tunelu nebo ze stanice metra, ve většině případů je to nemožné. Ale existují už světlé výjimky, jako jsou například všechny stanice metra v Praze, kde si můžete bez problémů zavolat. Je to možné díky repeaterové technologii, která zajišťuje dostatečně silný signál.

2 Systém GSM

2.1 Historie GSM

Celulární radiotelefonní systém GSM je systém 2. generace, která je plně digitální. Jeho vývoj začal v 80. letech na podnět organizace CEPT. V roce 1991 vydala ETSI, která se také podílela na vývoji, první část doporučení GSM – Phase 1. Tento systém byl zpočátku využíván výhradně pro přenos hovorových signálů. Díky jeho flexibilitě bylo možné do něj implementovat nové technologie (GPRS, EDGE, HSCSD), a proto se v současnosti hojně používá k přenosu datových signálů. V současné době již většina GSM sítí podporuje GSM – Phase 2 a přichází systémy třetí generace. Rozdíl mezi jednotlivými vývojovými kategoriemi je především v úrovni služeb, které poskytuje.

2.2 Struktura GSM

Síť GSM využívá celulární (buňkovou) strukturu. Je založena na myšlence, že obsluhovanou oblast rozdělíme na 14 šestiúhelníkových buněk, které tvoří dvojici svazků (clusters). Navazováním jednotlivých svazků na sebe lze pokrýt neomezeně velké území. Uvnitř každé buňky musí být jedna základnová stanice (BTS), která komunikuje s mobilními účastníky v dané buňce. Každá BTS má přidělenou svoji skupinu kanálů.



Obr. 1. Buňková struktura

2.3 Buňky v GSM

Protože požadavky na dostupnou kapacitu se místo od místa liší, vystává v některých oblastech nutnost mít síť hustší než jinde. Z tohoto důvodu by měly základnové stanice pokrývat různě definované území a to znamená, že budou mít částečně jiné parametry, nejčastěji týkající se výkonu a typu antén. Buňky podle typu můžeme rozdělit na makrobuňky, mikrobuňky a pikobuňky.

2.3.1 Makrobuňky

Jsou nejobecněji charakterizovány umístěním vysílacích antén nad úrovní střech. Na šíření má u těchto buněk velký vliv ohyb a rozptyl na vrcholcích budov. Dále můžeme makrobuňky dělit podle velikosti na:

- *umbrella*: ty tvoří nejvyšší vrstvu GSM sítě tzv. deštníkové buňky. Pokrývají velké území (až 30 km) a umísťují se na vyšší kóty. Využití především ve vesnických a horských oblastech, kde je signál nižších vrstev slabý nebo nedostupný a není zde možno z ekonomických i technických důvodů postavit další vysílače.
- *velké*: Typické městské makrobuňky (až 5 km), zajišťují provoz nad větší částí města nebo menším venkovským prostorem (několik vesnic).
- *malé*: Městské makrobuňky (do 1 km), které řeší kapacitní nároky center měst, průmyslových zón, zábavních parků. Bývají umístěny na nižších objektech a vyladěné tak, aby vyčerpávaly kmitočtové spektrum opravdu jen v nejbližším okolí.

2.3.2 Mikrobuňky

Jejich antény se na rozdíl od makrobuněk umísťují pod úroveň střech, nejčastěji na úroveň prvního nebo druhého patra. Pokrývají pouze své blízké okolí, ulice, křižovatky. Elektromagnetické vlny se zde šíří spíše odrazem než ohybem a rozptylem. U mikrobuněk díky jejich umístění nehrozí, že bude docházet k přezařování do vzdálenějších lokalit a proto nejsou problémy s výběrem vhodných kmitočtů. Další výhodou je jejich snadnější instalace. Nevýhody tkví především ve složitějším handoveru a riziku, že když mobilní účastník při hovoru bude rychle měnit polohu, handover se nestihne provést a spojení spadne.

2.3.3 Pikobuňky

Instalují se přímo do budov, ve kterých je signál z venkovních základnových stanic utlumený zdmi a je v nich vysoký mobilně telefonní provoz, případně tak velký provoz, že by venku způsoboval kapacitní problémy.

3 Problematika šíření rádiového signálu

Šíření signálu je hlavní parametr pro všechna radiová spojení. Rádiový signál je během přenosu ovlivňován mnoha vlivy. Úroveň signálu je snižována různými přírodními mechanismy, tím dochází k útlumu, což je nejdůležitější faktor při šíření signálu. Intenzita a kvalita signálu často výrazně kolísá v závislosti na čase, poloze přijímače a vzdálenosti přijímače od vysílače a liší se na různých frekvencích. Pokud chceme navrhnout efektivní bezdrátovou síť, musíme rozumět základním fyzikálním procesům šíření signálu, měřením získat data o šíření signálu v pokrývaném prostoru, analyzovat všechna známá data a vytvořit reálný model.

3.1 Druhy šíření mobilního signálu

Při šíření mobilního signálu dochází k těmto třem základním jevům:

- Šíření ve volném prostoru
- Šíření odrazem
- Difrakce

3.1.1 Šíření ve volném prostoru

I když je mezi anténou vysílače a přijímače přímá spojnice bez jakýkoliv překážek, nemusí být spojení kvalitní. Abychom si mohli být jistí, že přenos bude bezproblémový, musí být v okolí spojnice dostatek místa, přičemž okolím je v daném případě tzv. první Fresnelova zóna. Pokud jsou v této oblasti nějaké překážky, vždy dochází k rušivým odrazům signálu. Fresnelova zóna je dána oblastí o tvaru rotačního elipsoidu. Nejmenší možná vzdálenost mezi překážkou a přímou spojnicí mezi komunikujícími zařízeními je definována tímto vztahem

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{D}}\,. \tag{3.1}$$

r_1 …poloměr první Fresnelovy zóny v dané vzdálenosti

λ …vlnová délka

D…vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem

d_1, d_2 …vzdálenost překážky od přijímače popř. vysílače

Další podmínkou je, že v blízkém okolí antény, a to ve všech směrech by neměl být žádný objekt. Velikost tohoto okolí můžeme určit podle vztahu

$$h = \frac{2L^2}{D}\,. \tag{3.2}$$

h…minimální vzdálenost překážky od antény

L…největší rozměr antény

D…vzdálenost mezi vysílačem a přijímačem

Kdyby se ve vzdálenosti h od antény nacházel nějaký předmět (zvláště elektricky vodivý) docházelo by k deformování vyzařovací charakteristiky antény a vzniku tzv. stínů. Pokud je tato podmínka splněna a 80 % první Fresnelovy zóny je volných, je šíření signálu srovnatelné se šířením ve volném prostoru [5].

Ale i ve volném prostoru se signál šíří se ztrátami. Tyto ztráty jsou dány prostředím a pro šíření v suchém vzduchu platí následující vztahy

Ztráty ve volném prostoru mezi dvěmi izotropními anténami [dB]

$$= 32{,}4 + 20 \times \log_{10} F[MHz] + 20 \times \log_{10} R[km]\,, \tag{3.3}$$

Ztráty ve volném prostoru mezi dvěmi dipólovými anténami [dB]

$$= 28{,}8 + 20 \times \log_{10} F[MHz] + 20 \times \log_{10} R[km]\,. \tag{3.4}$$

F…frekvence signálu

R…vzdálenost mezi přijímací a vysílací anténou

Z rovnic (3.3) a (3.4) vyplývá, že se zvyšující frekvencí nám vysílač při stejném výkonu pokryje menší území.

3.1.2 Šíření odrazem

Pokud se signál dostane na rozhraní dvou prostředí, může dojít k jeho odražení zpět do prostředí. Tento jev se ve fyzice označuje odraz vlnění a řídí se zákonem odrazu. Ten říká, že úhel odrazu je roven úhlu dopadu, přičemž odražené paprsky zůstávají v rovině dopadu.

V prostřední mobilní komunikace často dochází k dopadu a odrazu pod malými úhly, k odrazům bez ztrát (koeficient odrazu = 1) a posunutí fáze.

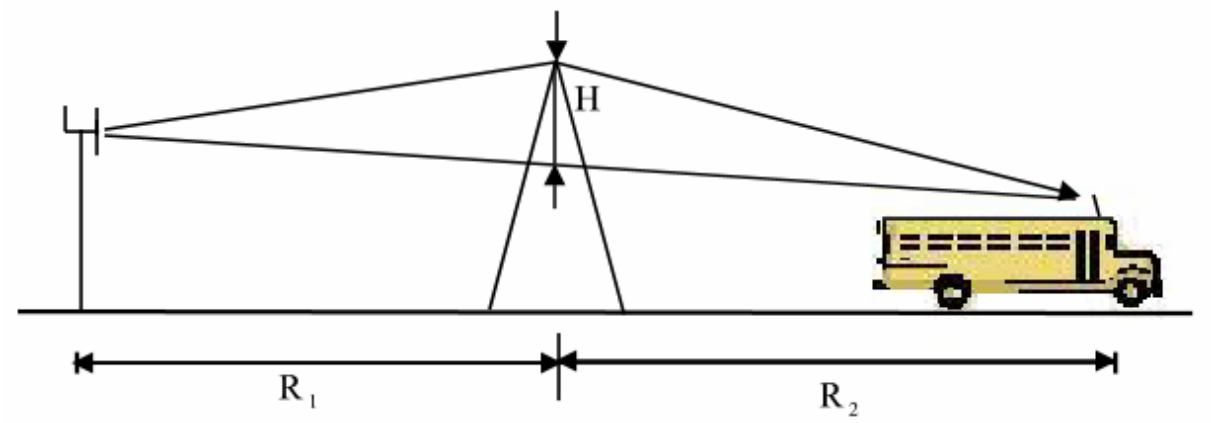
Tab.1. Porovnání útlumu při šíření ve volném prostoru a šíření s odrazy

Vzdálenost	km	1	2	4	6	8	10	15	20
Přijatý signál ve volném prostoru	dBm	-32,6	-36,3	-40	-42,2	-43,7	-45	-47,2	-48,7
Přijatý signál v prostoru s odrazy	dBm	-42,9	-49,2	-55,6	-59,3	-62	-64	-67,7	-70,3

3.1.3 Difrakce

Difrakce (ohyb) je charakteristickou vlastností vlnění. Vzniká při průchodu vlnění otvorem nebo kolem překážky způsobující narušení vlnění.

Pokud cestu blokuje jedna přesně definovaná překážka jako je naznačeni na (obr. 2), můžeme tuto ztrátu celkem snadno vypočítat.



Obr. 2. Průběh difrakce při průchodu kolem překážky

V tomto případě můžeme pro parametr difrakce ν sestavené cesty psát

$$\nu = -H\sqrt{\frac{2}{\lambda}\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)}. \tag{3.5}$$

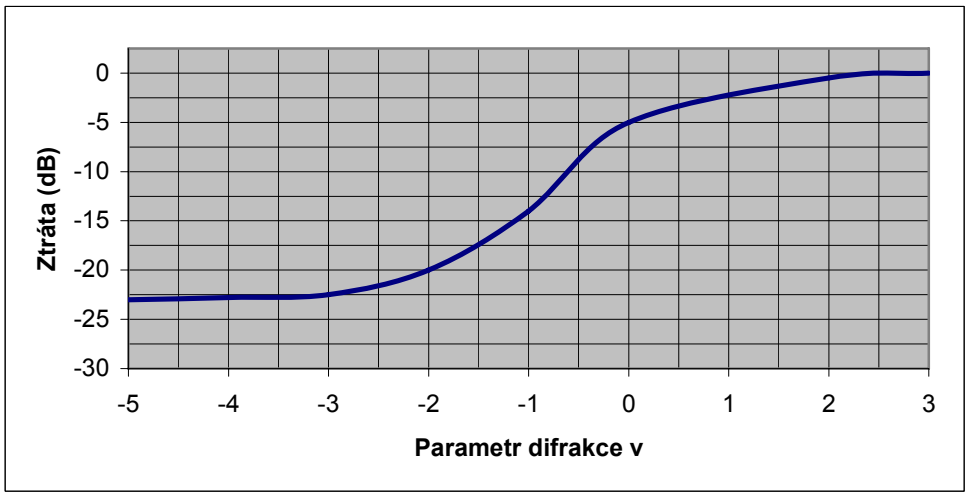
ν…parametr difrakce

H…vzdálenost mezi průsečíkem mezi vysílačem a přijímačem a místem difrakce

λ…vlnová délka

R_1…vzdálenost překážky od vysílače

R_2…vzdálenost překážky od přijímače



Obr. 3. Závislost ztráty na parametru difrakce

Dále pomocí grafu (obr. 3) získáme ztrátu na překážce v dB.

Přidáním této ztráty k jinak určeným ztrátám cesty získáme celkový útlum cesty. Ostatní ztráty jako ve volném prostoru nebo ztráty odrazem počítáme samostatně pro cestu jako kdyby překážka neexistovala.

Toto byly některé fyzikální jevy, které ovlivňují kvalitu signálu. My se ale můžeme setkat v životě dalšími faktory, které ovlivňují konečnou kvalitu signálu. Např. při cestě vlakem (viz. kapitola 6.1).

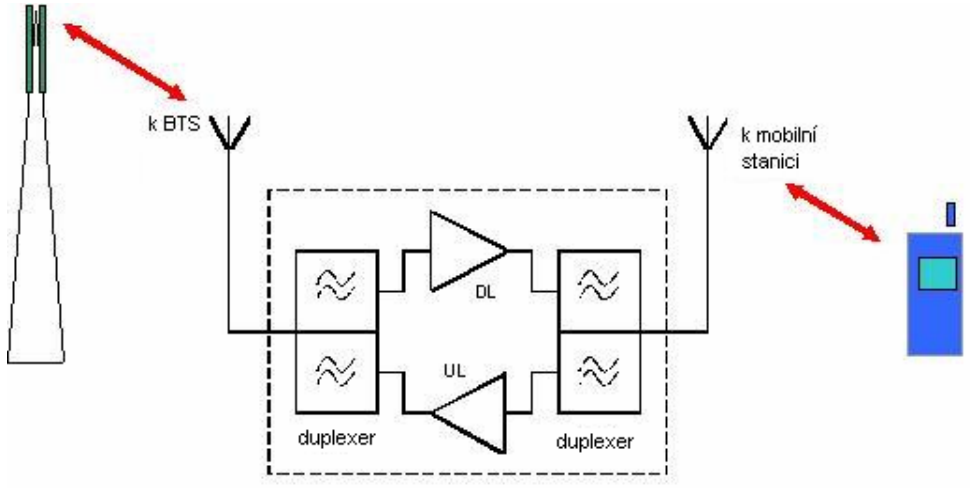
3.2 Řešení problematiky

Výše uvedené ztráty mohou mít za následek, že v některých místech dojde k tak velkým ztrátám, že komunikace nepůjde navázat. Tomu se však operátoři snaží všemožně bránit. Je skoro nereálné zabraňovat vzniku negativních jevů (např. odstraněním překážky), a proto se musí vyrovnat s jejich důsledkem. Takové problémy lze řešit instalací nové základnové stanice, která dostatečně pokryje požadované území. V některých případech, kdy není potřeba pokrýt tak velkou plochu je použití plnohodnotné základnové stanice zbytečné a velmi nákladné. V těchto případech lze vše vyřešit jednoduše pomocí repeateru. Použití repeateru je ale mj. nutné zvážit také z hlediska hlasového provozu. I když repeater zvětšuje oblast pokrytí, nepřidává žádnou kapacitu opakované základnové stanici.

4 Repeater

Jedná se jednoduché a relativně levné zařízení umožňující pokrýt dostatečným signálem GSM nepokrytá místa bez nutnosti stavět základnovou stanici.

Repeater je síťový prvek pro celulární sítě. Funguje jako obousměrný zesilovač, který v DL zachytává signál od vhodné základnové stanice a s požadovaným ziskem ho zase vysílá do pokrývaného prostoru k přijímači, to samé se děje i v UL (směr od MT k BTS).



Obr. 4. Blokové schéma funkce repeateru

4.1 Rozdělení repeaterů

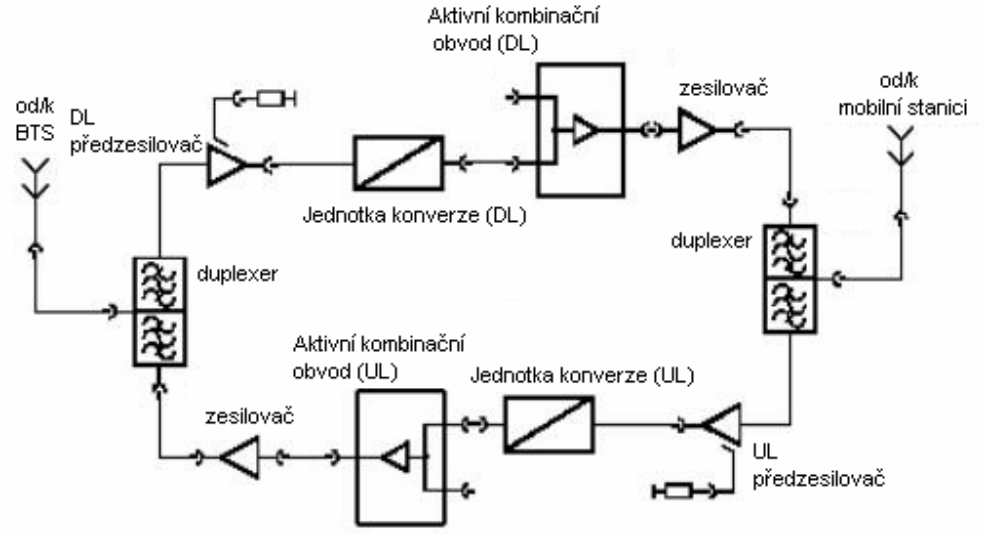
4.1.1 Repeatery definované zesilovaným frekvenčním pásmem

Nejběžnější frekvenční pásma využívaná ve světě jsou:

- TETRA 400 MHz (policejní systémy, systémy pro varování obyvatelstva),
- NMT450 (analogové systémy, zastaralé),
- GSM 900,
- GSM 1800,
- US Cellular (americký standard),
- PCS 1900 (americký standard),
- UMTS (systém třetí generace, frekvence 2100 MHz, rozvíjí se verze na frekvenci 900MHz).

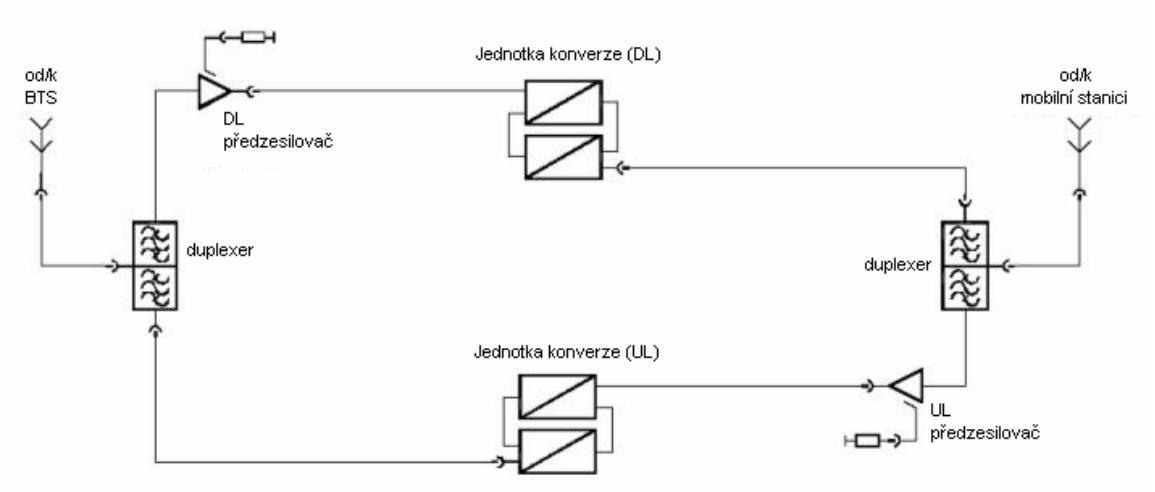
4.1.2 Repeatery definované selektivitou (kanálové nebo pásmové)

- *širokopásmové* – zesilují celé frekvenční pásmo
- *pásmově selektivní* – zesilují určitou část frekvenčního pásma. Šířka zesilovaného pásma může být pevně daná nebo ji lze často měnit. Výhodou pásmově selektivních repeaterů je možnost zesílení více kanálů, umožňují frekvenční hopping. Nevýhodou je zpravidla nižší výkon z důvodu použití jednoho výkonového zesilovače pro dané pásmo.



Obr. 5. Blokové schéma pásmově selektivního repeaterového systému

- *kanálově selektivní* – zesilují pouze určitý počet kanálů (u GSM systému je šířka kanálu 200 kHz). Filtrace přes jeden kanál snižuje náchylnost repeateru k rušení signály blízkých frekvencí. Další výhodou je vyšší výkon, protože každý kanál má svůj vlastní výkonový zesilovač. Nevýhodou je nutnost použití více kanálových modulů v případě požadované vyšší kapacity, čímž se repeater stává větší a dražší.



Obr. 6. Blokové schéma 2-kanálového repeaterového systému

4.1.3 Repeatery definované výstupním výkonem

- HP repeater – výkon řádově 30 dBm (1 W) a vyšší
- Minirepeater – výkon řádově 23dBm (0,2 W)
- Pikorepeater – výkon řádově 10dBm (10 mW)

4.2 Hlavní komponenty a funkce repeateru

Repeater je složen ze dvou zesilovacích řetězců, které jsou zapojeny protisměrně, paralelně. Přijímací cesta jednoho směru je připojena k vysílací cestě druhého směru pomocí jednotky oddělující frekvence, tuto jednotku budeme dále nazývat jako duplexer.

4.2.1 Duplexer

Úkolem duplexeru je izolovat uplink a downlink, tj. oddělit vysílací a přijímací cesty a kombinovat tyto signály k anténě. Šířka frekvenčního pásma duplexeru by měla být celá šíře vysílaného i přijímaného signálu daného frekvenčního pásma.

V duplexeru jsou zabudované RF sondy, které zajišťují detekci a aplikaci měřících signálů. Tyto sondy jsou s různým činitelem vazby, 30 dB pro měření a 20 dB pro připojení modemu. Toto usnadňuje měření za provozu repeateru.

4.2.2 Jednotka konverze

Úkolem jednotky konverze je zesílit přijaté signály a konvertovat je na určitou mezifrekvenci. Signály projdou stupňovým filtrem, který obsahuje vysoce selektivní filtry. Dále prochází přes digitálně řízený útlumový článek. Pomocí stejného syntezátoru frekvencí, jako byl použit pro konverzi na mezifrekvenci, přeměníme mezifrekvenci zpět na originální frekvenci. Syntezátor je řízený přes I^2C sběrnici. U kanálově selektivních repeaterů obsahuje tato jednotka i výkonový zesilovač, který je u pásmově selektivních umístěn zvlášť.

4.2.3 Základní deska

Účelem základní desky je umožnit komunikaci mezi jednotkou konverze a řídícím modulem přes I^2C sběrnici a podporovat všechny spojení. Všechny signály jsou potvrzovány logikou základní desky. Základní deska je umístěna pod jednotkou konverze.

4.2.4 Aktivní slučovač

Aktivní slučovač je obsažen pouze u pásmově selektivních repeaterů. Na vysílací i přijímací straně jsou signály za jednotkou konverze spojeny pomocí aktivních kombinačních obvodů. Aktivní slučovač zajišťuje detekci výkonu, která ovládá zisk a výstupní výkon. Tato detekce výkonu a její regulace se označuje ALC (Automatic level control).

4.2.5 Koncový zesilovač

V koncovém zesilovači se dociluje konečného požadovaného výkonu.

4.2.6 Napájecí zdroj

Napájecí zdroj transformuje napájecí napětí ze sítě na definované stejnosměrné napětí, které napájí všechny aktivní součásti repeateru. Na napájecím zdroji je umístěn vypínač, který umožňuje odpojit repeater od sítě. Tím zajistíme, že všechny obvody budou bez napětí a můžeme například bezpečně provést opravné práce.

Napájecí napětí je přesně továrně definováno a nesmí být změněno. Napájecí zdroj může obsahovat chránící pojistku.

4.2.7 Řídící jednotka

Řídící jednotka je mikropočítač s DOS (diskovým operačním systémem) nebo s jiným operačním systémem, zajišťuje celou komunikaci mezi obsluhou a repeaterem. Na řídící jednotce je umístěno rozhraní RS232, k němuž se připojuje buď PC pro lokální připojení nebo modem pro komunikaci na dálku. Tímto způsobem je možné lokálně nebo vzdáleně nastavovat parametry repeateru, jako např. frekvenci, zisk, výkon repeateru, anebo naopak je možné přijímat od repeateru stavová hlášení a v případě poruchy alarmy. Data mezi řídící jednotkou a základní deskou jsou vedena přes I^2C sběrnici. Pro případ výpadku dodávky elektrického proudu je na řídící jednotce umístěna paměť EEPROM, kde jsou uloženy veškeré konfigurační parametry.

4.2.8 I^2C sběrnice

Tato sběrnice realizuje sériová spojení mezi jednotlivými integrovanými obvody uvnitř zařízení. Informace se mezi zařízeními připojenými ke sběrnici přenáší formou sériových dat se sériovými hodinami po dvouvodičovém vedení. Každé zařízení má unikátní adresu a může fungovat jako vysílač nebo přijímač.

4.2.9 Modem

Modem je volitelná součást repeateru, která umožňuje vzdálený dohled nad repeaterem. Pro tento dohled mají operátoři ve svém dohledovém centru instalován speciální SW (OMC), který umožňuje automatizovaný dohled na všemi repeatery v síti. Komunikace s modemem se provádí pomocí AT příkazů.

4.2.10 Záložní zdroj

Repeater může být vybaven záložním zdrojem se sadou baterií, které napájejí ty části repeateru (základní deska, modem), jež jsou nutné pro vyslání alarmu v případě výpadku síťového napětí. Dále jednotka záložního zdroje podporuje vícenásobné vytáčení přes modem v případě, že je systém zaneprázdněn nebo došlo k jiným problémům v komunikaci. Baterie je chráněna proti hlubokému vybití pomocí odpojení jednotky. Pomocí vypínače umístěného na

záložním zdroji lze baterii odpojit, aby bylo možné při údržbě zajistit, že jsou všechny obvody bez elektrického napětí. Záložní zdroj je přímo připojen na řídící modul. Během nabíjení baterie svítí na jednotce zelená LED dioda, která po úplném nabití zhasne.

4.2.11 Externí alarmy

Repeater je vybaven svorkami pro připojení externích alarmů. To znamená, že je možné monitorovat stav některých externích zařízeních (dveřní kontakt, teplotní čidlo apod.). V principu se jedná o reléové kontakty, u nichž je možné softwarově měnit logiku.

4.2.12 Jednotka VSWR

Funkce VSWR umožňuje obsluze zjistit status anténního systému (anténa a kabel). Jednotka VSWR měří poměr stojatých vln na výstupním portu vysílací antény. Pokud bude vadný kabel nebo například anténa bude pokryta ledem, ihned se to projeví zhoršením VSWR. Pokud VSWR klesne pod přibližně 13dB, je vyslán alarm.

4.2.13 Funkce sledování provozu

Funkce sledování provozu umožňuje obsluze zhodnotit operační výkon repeateru (počet hovorů uskutečněných přes repeater).

4.2.14 Funkce RSSI (Receive Signal Strengh Indication)

Pomocí funkce RSSI je možné monitorovat úroveň signálu přijatou repeaterem od BTS. Měří vstupní úroveň kanálu BCCH (Broadcast Control Channel). Tato hodnota je výchozí veličinou pro nastavení zisku repeateru.

4.3 Využití repeaterů

Aplikace:

- Venkovní aplikace
  - údolí,
  - vesnice,
  - silnice,
  - železnice.

- V uzavřených prostorech
    - železniční / metro stanice,
    - letiště,
    - nákupní a zábavná centra,
    - podnikové haly,
    - privátní domy,
    - soupravy vlaků / metra (mobilní repeatery).
- Tunely
    - železniční,
    - silniční,
    - nouzové východy,
    - metro.

4.4 Nastavení repeateru

Pro optimální výkon musí být repeater správně nastaven. Nastavení je provedeno na základě podmínek a hodnot získaných při měření v místě stanoviště.

K nastavení je potřeba:

- informace od obsluhující BTS,
    - číslo a frekvenci BCCH,
    - číslo TCH (Trafic Channel),
    - směr z repeateru k základnové stanici, pro nastavené donor antény,
- laptop s konektorem RS232 a kabel k připojení na repeater,
- spektrální analyzátor a měřící vysílač,
- adekvátní kabely a adaptéry pro propojení testovacího zařízení k anténám a k portům repeateru,
- manuál k repeateru se softwarovými příkazy.

Pokud je toto všechno zajištěno, je možno připojit repeater k elektrické síti. Nejdříve je nastaven útlum všech kanálů repeateru na 30dB. Poté jsou nastavena čísla kanálů pro BCCH a všechny TCH na příslušnou hodnotu. Nakonec je nastaven zisk a tím výkon celého repeateru. Vyšlo se přitom ze základního vzorce

$$RSSI(dBm) + G(dB) = P(dBm). \quad (4.1)$$

RSSI…vstupní úroveň signálu

G…zisk repeateru

P…výkon repeateru

5 Problematika repeaterové technologie

5.1 Izolace antén

Izolace antén je jednou z hlavních parametrů, který ovlivňuje nastavení repeateru. Přijímací anténa, repeater a vysílací anténa tvoří systém, který se za určitých podmínek může chovat jako zpětnovazební smyčka. To znamená, že část výkonu vyzářeného vysílací anténou je působením vlivů popsaných v kapitole 3 se zpožděním přijata přijímací anténou. A právě poměr mezi vyzářeným výkonem z vysílací antény a přijatým výkonem na přijímací anténě je nazýván izolací antén. Aby se předešlo oscilaci systému, musí být izolace antén minimálně o 15 dB vyšší než zisk repeateru.

Některé faktory, které mají vliv na izolaci antén:

- *Vyzařovací diagram antény* (horizontální a vertikální): Optimální směrování přijímací a vysílací antény je tehdy, když k sobě antény směřují minimy vyzařovacího diagramu. Obě antény jsou obvykle instalovány v opačném směru. To je dobré vzít na vědomí při výběru antén a použít antény s vysokým předozadním poměrem.
- *Výškový rozestup*: Vysílací a přijímací antény jsou v typické konfiguraci pro makrobuňku umístěny na jedné věži. Vertikální vzdálenost mezi anténami velmi ovlivňuje izolaci antén. Obecně lze říci, že čím jsou antény dále od sebe, tím je stupeň izolace antén vyšší. Důležitým parametrem, ale v tomto ohledu je vertikální anténní diagram.
- *Okolí obou antén*: Odrazy a útlumy o všechny objekty v blízkosti antén mohou výrazně ovlivňovat izolaci antén. Tyto odrazy vznikají na všech předmětech v okolí antén. Nejvíce citelné jsou odrazy od plechových střech, hal apod.

5.2 Nastavení zisku

U repeateru lze nastavovat zisk zvlášť v UL i DL, ale doporučuje se, aby vždy byl použit stejný zisk jak pro DL, tak pro UL směr, aby byla zachována rovnováha systému. Tím zůstane repeater pro BTS naprosto transparentní.

Nastavení repeateru je nejlépe ukázáno na následujících třech scénářích. Při předpokladu, že repeater má maximální výstupní výkon 33 dBm a maximální zisk 80 dB.

a) limitace z důvodů nízkého vstupního signálu:

   úroveň vstupního signálu = -70 dBm;

   změřená izolace antén = 100 dB;

   maximální výkon repeateru = 33 dBm;

   maximální zisk repeateru = 80 dB.

   Díky vysoké izolaci je možné sice nastavit zisk repeateru na maximum, ale z důvodu nízkého vstupního signálu bude repeater pracovat s výstupním výkonem pouze 10 dBm (-70 dBm + 80 dB = 10 dBm)

b) limitace z důvodů nízké izolace antén:

   úroveň vstupního signálu = -55 dBm;

   změřená izolace antén = 85 dB;

   maximální výkon repeateru = 33 dBm;

   maximální zisk repeateru = 80 dB.

   V tomto případě je možno nastavit zisk repeateru pouze na 70 dB (85 dB – 15 dB = 70 dB) – viz pravidlo v kapitole 5.1. I když je vstupní signál vyšší než v případě a), bude výstupní výkon repeateru -55 dBm + 80 dB = 25 dBm.

c) limitace z důvodů maximálního výkonu repeateru:

   úroveň vstupního signálu = -40 dBm;

   změřená izolace antén = 95 dB;

   maximální výkon repeateru = 33 dBm;

   maximální zisk repeateru = 80 dB.

   V tomto případě byl sice velice dobrý vstupní signál a vysokou izolaci antén, ale je nutné zredukovat zisk repateru na 73 dB, aby nedošlo k překročení jeho maximálního výkonu. -40 dBm + 73 dB = 33 dBm.

Zisk repeateru je možno redukovat pomocí útlumu, který lze nastavit softwarově. Při vysokém útlumu (>10dB) je vhodné použít pevný útlumový článek na port přijímací antény.

Útlum musí být nastaven podle nejnižší hodnoty přípustného zisku ze všech scénářů.

6 Návrh repeaterového systému pro vozy ČD

Na mnoha místech železničního koridoru je mobilní signál slabý nebo dokonce úplně chybí. Proto roste nespokojenost cestujících, kteří nemohou během jízdy telefonovat a připojovat se na internet. Přitom především vlaky vyšších tříd se těší velké oblibě mezi podnikateli a manažery, pro které je kvalitní spojení se světem během jízdy nezbytností.

Z těchto důvodů České dráhy a dceřiná společnost ČD Telematika ve spolupráci s mobilními operátory zahájili zkušební provoz zařízení GSM repeater.

6.1 Rozbor problematiky

Výsledky vyhodnocení prokázaly problematické podmínky pro možnost spojení uvnitř vozu i v případě vyhovujících podmínek pokrytí vně vozu způsobené atenuací rádiového signálu při jeho pronikání dovnitř vozu. Tento vliv je zásadní zejména u klimatizovaných vozů, které jsou vybaveny termickými skly.

Z výše uvedeného je pro zlepšení podmínek rádiové komunikace z vnitřních prostor vozu důležitější usnadnit pronikání rádiového signálu dovnitř a ven z vozu. To znamená provést opatření spíše na straně vozového parku, než v oblasti infrastruktury. Jestliže vně vozu bude vyhovující úroveň pokrytí, potom je možno pomocí aktivního repeateru dosáhnout retranslace signálu dovnitř vozu.

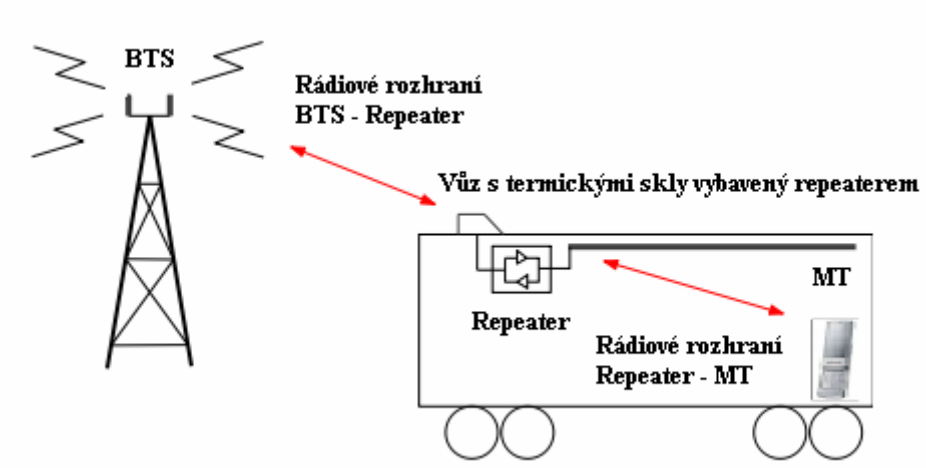
V případě aktivního repeateru musí být ziskem repeateru a případným ziskem použitého anténního systému pokryt útlum vnitřní instalace repeateru a útlum nově vzniklého rádiového rozhraní mezi vlastním repeaterem a MT uživatele uvnitř vozu. Vzhledem k tomu, že ze systémového hlediska není možno použít konverzi kmitočtů je vlastní repeater v podstatě obousměrným zesilovačem s poměrně kritickými parametry. Návrh systému vlastního repeateru musí uvažovat a optimalizovat výkonový rozpočet jak pro rádiovou cestu DL, tak ve směru opačném, tedy v UL. Vzhledem k omezené izolaci vnitřního a vnějšího anténního systému vlastního repeateru a poměrně vysokému potřebnému zisku je nezbytné správnou konfigurací zajistit jeho potřebnou stabilitu. Zejména v případě širokopásmového řešení jsou kladeny extrémní požadavky na dynamický rozsah vstupní části repeateru. Pro

maximální citlivost (využitelnost repeateru v případě slabého signálu) je požadován nízký vlastní šum (omezující spodní hranici dynamického rozsahu) a vysoká intermodulační odolnost, tedy linearita repeateru při zpracování silných signálů (omezující horní hranici dynamického rozsahu). Pro návrh a konkrétní aplikaci repeateru z uvedeného vyplývá nezbytnost úrovňového plánování a odpovídajícího řešení v oblasti kmitočtového spektra a potřebné filtrace.

Těmito všemi problematikami se zabývají následující kapitoly technického rozboru.

6.1.1 Termická skla

U klimatizovaných vozů je z důvodu efektivní bilance tepla nanesena tenká metalická vrstva na povrchu okenního skla. Tato vrstva zabraňuje pronikání tepelného slunečního záření (fyzikálně: elektromagnetické vlnění obdobně jako v případě rádiového signálu využitého pro bezdrátový přenos informací) což následně způsobuje také vysokou rádiovou odrazivost a tím nízkou účinnost pronikání rádiového signálu dovnitř či vně vozu. Výsledky provedených měření ukazují, že rádiový signál s kmitočtem v pásmu 900 MHz (GSM/GSM-R) je při svém průchodu do vnitřku (či ven z) vozu vybaveného termickými skly potlačen zhruba o 20 dB. Tak zásadní zvýšení útlumu na trase od základnové radiostanice (BTS) k přenosnému mobilnímu terminálu (MT) uživatele nacházejícího se uvnitř vozu není možno kompenzovat na straně infrastruktury systému bez vynaložení extrémně vysokých investičních nákladů (instalační vzdálenost mezi BTS by musela být přibližně poloviční). Proto v případě požadavku na zajištění bezproblémové mobilní komunikace z vozu vybaveného termickými skly je účelné kompenzovat průchozí útlum na straně vozového parku využitím repeateru.



Obr. 7. Nastínění využití repeateru

6.1.2 Minimální použitelná úroveň pokrytí

Repeater je schopen zajistit bezproblémovou mobilní komunikaci z vozu vybaveného termickými skly pouze v případě splnění minimální použitelné úrovně pokrytí, tedy bude-li na vstupu repeateru dostatečný signál příslušné sítě GSM. Dostatečný signál je poměrně nic neříkající ukazatel, proto bude odvozena teoretická hodnota dostatečného signálu analýzou základních omezujících činitelů.

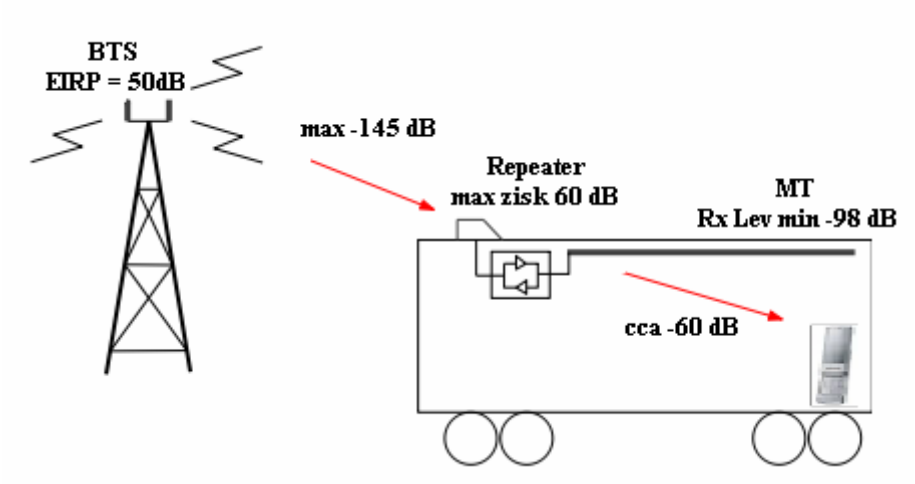
6.1.2.1 Citlivost daná vlastním šumem repeateru

Základním omezujícím faktorem citlivosti (schopnosti zpracovat slabé signály) je spodní hranice dynamického rozsahu použitého zařízení. Jak již bylo uvedeno, spodní hranice dynamického rozsahu je z fyzikálního hlediska limitována šumem vlastního zařízení. Pod tuto teoretickou - fyzikálně limitovanou hranici se nelze v žádném případě dostat. V optimálním případě je možno se k této hranici přiblížit. U moderních zařízení pro opakování signálu v pásmu 900 MHz lze uvažovat s vlastním šumem repeateru v úrovni F = 9 dB. Při uvažování šumové šířky pásma 200 kHz pro systém GSM a GSM-R lze odvodit výkonový šumový práh v úrovni NF = -121 dBm. Bude-li jako minimální odstup signálu od šumu uvažován C/I = 9 dB bude minimální teoretická citlivost daná šumem v úrovni –103 dBm. Vypočtená úroveň teoretické citlivosti repeateru dané šumem ve výši –103 dBm je v zásadě uspokojující a v dobré korelaci s hodnotami citlivostí dosahovaných přenosnými MT určenými pro systémy GSM a GSM-R.

6.1.2.2 Omezení DL cesty

Minimální použitelnou úroveň pokrytí je možno odvodit rozborem výkonového rozpočtu pro jednotlivé směry rádiového spojení. V této kapitole je na základě výkonového rozpočtu odvozen maximální akceptovatelný útlum DL cesty rádiového rozhraní BTS – Repeater. Kompletní DL cesta je rozdělena na rádiové rozhraní BTS – Repeater a rozhraní Repeater – MT uživatele uvnitř vozu. Rozhraní Repeater – MT musí na straně MT uživatele vytvořit podmínky pro bezproblémovou mobilní komunikaci z hlediska minimální úrovně signálu požadovaného MT. Jako rozumnou hranici pro spolehlivou činnost lze ve shodě s požadavky Eirene „Evropská integrovaná železniční rádiová síť“ v případě hlasové komunikace považovat minimální úroveň –98 dBm. Při uvažování průměrného útlumu na vzdušném rozhraní Repeater – MT ve výši cca 60 dB je potřebný minimální výkon –38 dBm, který je na vnitřní straně repeateru bez problému zajistitelný. Bude-li dále zisk vlastního

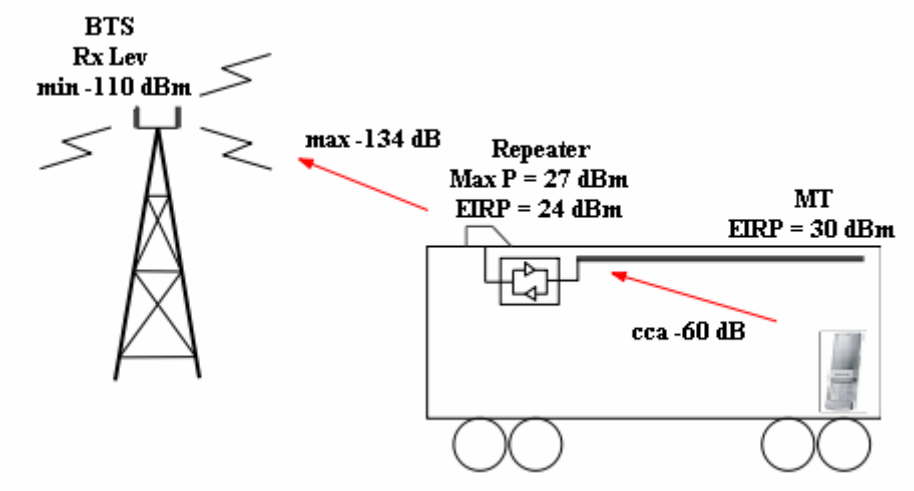
repeateru (zisk bez zásahu obvodů pro automatické řízení zisku repeateru) ve výši 60 dB a při uvažování: neziskového anténního systému, útlumu vnitřní instalace repeateru cca 3 dB a EIRP vyzářeného výkonu BTS cca 50 dBm bude maximální akceptovatelný útlum DL cesty rádiového rozhraní BTS – Repeater ve výši 145 dB.



Obr. 8. Omezení DL cesty

6.1.2.3 Omezení UL cesty

Obdobně jako v předchozí kapitole je zde na základě výkonového rozpočtu odvozen maximální akceptovatelný útlum UL cesty rádiového rozhraní BTS – Repeater. Bude-li uvažován vyzářený EIRP výkon MT uživatele v úrovni 30 dBm, průměrný útlum na vzdušném rozhraní Repeater – MT ve výši cca 60 dB a zisk vlastního repeateru 60 dB. Výstupní výkon repeateru na rozhraní BTS – Repeater by měl být v úrovni 30 dBm. Vzhledem k maximální možné výstupní úrovni 27 dBm a vzhledem k uvažovanému neziskovému anténnímu systému a útlumu vnitřní instalace repeateru cca 3 dB je vyzářený EIRP výkon repeateru 24 dBm. Pak při uvažování minimální úrovni použitelného signálu BTS ve výši –110 dBm je maximální akceptovatelný útlum UL cesty rádiového rozhraní BTS – Repeater ve výši 134 dB.



Obr. 9. Omezení UL cesty

6.1.2.4 Určení minimální použitelné úrovně pokrytí

V předchozích kapitolách byly určeny maximální akceptovatelné útlumy DL a UL cest rádiového rozhraní BTS – Repeater. Z vypočtených hodnot je nejvíce omezující maximální akceptovatelný útlum UL cesty ve výši 134 dB. Při uvažování dříve použitého EIRP vyzářeného výkonu BTS 50 dBm s přihlédnutím k úrovni dané šumem odvozené v předchozí kapitole je požadovanou minimální teoreticky použitelnou úrovní pokrytí –84 dBm. U takto odvozené teoretické hodnoty lze vzhledem ke způsobu odvození (na základě typických systémových parametrů) v praxi očekávat její reálnou použitelnost s mírou nepřesnosti v řádu jednotek dB. Jak je vidět, jedná se o poměrně vysokou hodnotu výkonové úrovně potřebné pro zajištění spolehlivé funkce repeateru a zajištění bezproblémového rádiového přenosu v případě mobilní komunikace z vozu vybaveného repeaterem. To klade značné nároky na kvalitu rádiového signálu zajišťujícího pokrytí na předmětné trati. Pro srovnání lze uvést, že specifikací EIRENE je od systému GSM-R pro zajištění datových přenosů ETCS L2 vyžadována úroveň pokrytí ve výši –95 dBm.

6.1.3 Vzájemná interakce rádiových sítí

Předchozí kapitoly uvažovaly na vstupu repeateru signál jediné obecné sítě v pásmu 900 MHz (GSM / GSM-R) a jeho retranslaci pro zajištění odpovídajícího pokrytí touto sítí uvnitř vozu. Zajištění vnitřního pokrytí signálem všech sítí veřejných operátorů GSM a signálu drážního systému GSM-R je problematické z důvodů uvedených v kapitole 6.1.4. Mimo to by pro jednotlivé sítě a kmitočtová pásma byl potřeba samostatný repeater, čímž by došlo k nárůstu finanční náročnosti a prostorové velikosti repeaterového systému. Ve

výsledném řešení je proto nutno zohlednit vliv možných výkonových úrovní pokrytí jednotlivých sítí na dané trati v rámci společného repeateru, na výsledné úrovně rádiových rozhraní jednotlivých sítí v místě MT uživatele uvnitř vozu. Vzhledem k vysoké dynamice změn výkonových úrovní na kterémkoliv rádiovém rozhraní musí být repeater z konstrukčních důvodů vybaven obvody pro automatické řízení zisku, což v případě užití společného repeateru více sítěmi může přinášet poměrně zásadní problém. Pro zajištění pokrytí svým signálem každá ze sítí (GSM / GSM-R) užívá příslušných BTS rozmístěných dle strategického záměru, požadavků rádiového plánování, akvizičních možností, atp. což v konečném důsledku vede k rozdílné úrovni pokrytí jednotlivých veřejných sítí GSM podél železniční trati. V případě velkého rozdílu ve výkonových úrovních bude signál sítě s nejlepším pokrytím prostřednictvím obvodů automatického řízení zisku repeateru potlačovat signály sítí s horším pokrytím. U repeaterů moderní konstrukce je tento vliv do značné míry potlačen a je dosahováno akceptovatelného rozdílu výkonových úrovní 50 až 55 dB bez zásadního potlačení signálu sítě s horším pokrytím.

6.1.4 Možnosti kmitočtového řešení

Jednotlivým operátorům veřejné GSM byly pro potřeby jejich sítí přiděleny správcem kmitočtového spektra ČTÚ kmitočtové úseky jak v pásmu GSM (900 MHz), tak i v pásmu DCS (1800MHz). Zástupci veřejných operátorů bylo požadováno zajištění vnitřního pokrytí v obou kmitočtových pásmech. Vzhledem k alokaci a proložení přidělených kmitočtových úseků mezi jednotlivé operátory v rámci kmitočtových pásem GSM a DCS (viz. následující obrázek), je stupeň volnosti kmitočtového řešení výsledné konfigurace do značné míry omezen a je nezbytné užít společného repeateru pro více sítí s možným negativním dopadem popsaným v předchozí kapitole.

Pásmo GSM:

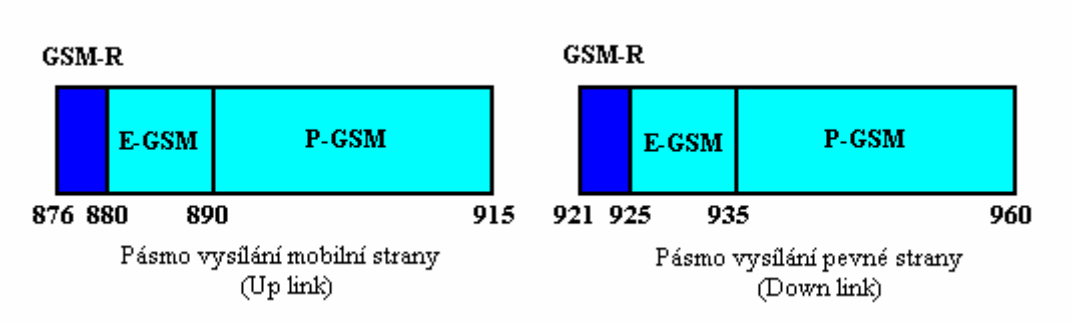
Kanály	Operátor
1 – 21	Vodafone
22 – 35	T-Mobile
36 – 49	Telefónica O2
50 – 60	T-Mobile
61 – 70	Telefónica O2
71 – 80	T-Mobile
81 – 96	Telefónica O2
97 - 108	T-Mobile
109 - 114	Telefónica O2
115 - 124	Vodafone

Pásmo DCS:

Kanály	Operátor
518 - 570	Telefónica O2
571 - 579	T-Mobile
581 - 597	Telefónica O2
608 - 643	T-Mobile
725 - 774	T-Mobile
776 - 865	Vodafone

Obr. 10. Rozdělení kanálů v pásmech GSM a DCS mezi jednotlivé operátory

Bude-li shledáno potřebným vybavit technologii repeateru také kmitočtovým pásmem GSM-R (posouzení podmínek pokrytí signálem drážní sítě uvnitř vozů bez použití repeateru s přihlédnutím k efektivitě poměru vynaložených finančních prostředků vzhledem k dosaženému zlepšení signálu GSM-R při použití repeateru), bude muset být při návrhu možné konfigurace, brán zřetel na vzájemný vliv a problematiku koexistence kmitočtových pásem GSM ve vztahu ke kmitočtovému pásmu GSM-R. Pro další úvahy je možno vycházet z následujícího obrázku popisujícího kmitočtového uspořádání těchto pásem:



Obr. 11. Kmitočtová pásma GSM-R

Jak je patrno z obrázku, kmitočtové pásmo GSM-R přímo sousedí s rozšířeným kmitočtovým pásmem GSM. V případě užití pouze pásma P-GSM je možno dosáhnout odstupu kmitočtových pásem GSM-R a GSM 10 MHz. Problematická situace nastává z hlediska blízkého sousedství UL pásma GSM a DL pásma GSM-R s odstupem pouhých 6 MHz vzhledem k značnému rozdílu výkonových úrovní. Pro zabránění vzájemného rušivého ovlivňování je nezbytné maximálním způsobem separovat jednotlivé kmitočtové trakty repeateru užitím triplexerů (zařízení umožňujících při využití vysokojakostních laděných obvodů slučování či rozdělování kmitočtově blízkých a výkonově odlišných signálů s vysokou mírou vzájemné separace) a dalších řešení jako např. samostatných anténních systémů umístěných v dostatečné vzdálenosti od sebe.

Tyto postupy jsou dále aplikovány v kapitole 6.3 zabývající se návrhem konfigurace repeateru.

6.2 Výsledky testovacího provozu

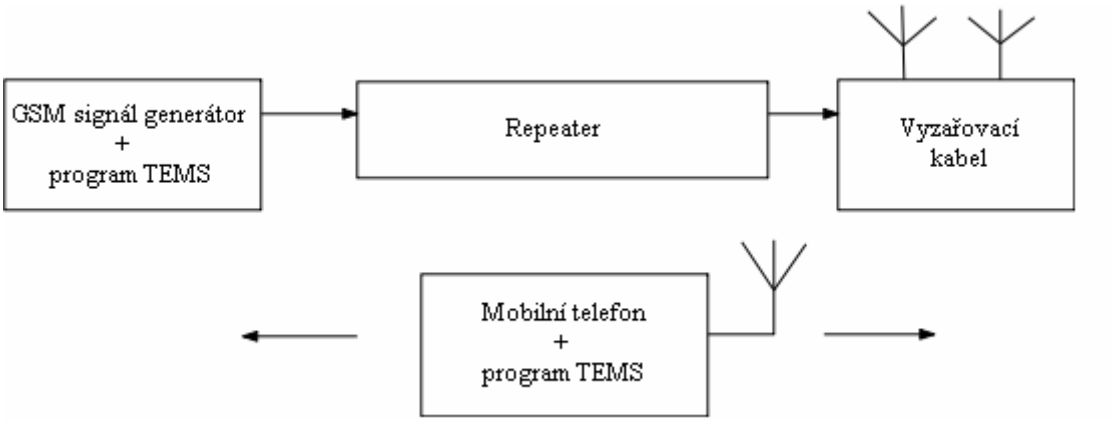
Jelikož se jako nejvhodnější řešení pro zlepšení mobilního signálu ve vlacích jeví využití repeateru, proběhlo za spolupráce firem T-Mobile Czech Republic a.s., Vodafone Czech Republic a.s., Telefónica O2 Czech Republic a.s., České dráhy a.s. (Czech Railways

Company) a ČD-Telematika a.s. testovací měření. Měření proběhlo ve vozech typu AEE s repeaterovými jednotkami od firmy Andrew, typ MIR-T9 a MIR-T18.

6.2.1 Statická měření ve voze typu AEE

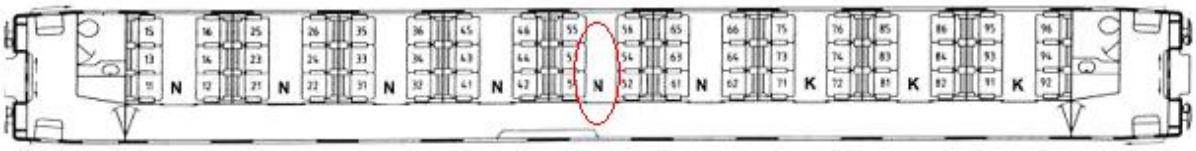
Na repeater nainstalovaný ve voze byl dodáván signál od BTS v konstantní výši -50 dBm. Zisk repeateru byl nastaven na maximální možnou nominální hodnotu 70 dB, protože izolace mezi oběmi anténami repeateru byla lepší než 85 dB.

Mobilní telefon vybavený programem TEMS^{TM} Pocket GSM se pohyboval vozem a zaznamenávala se úroveň signálu.

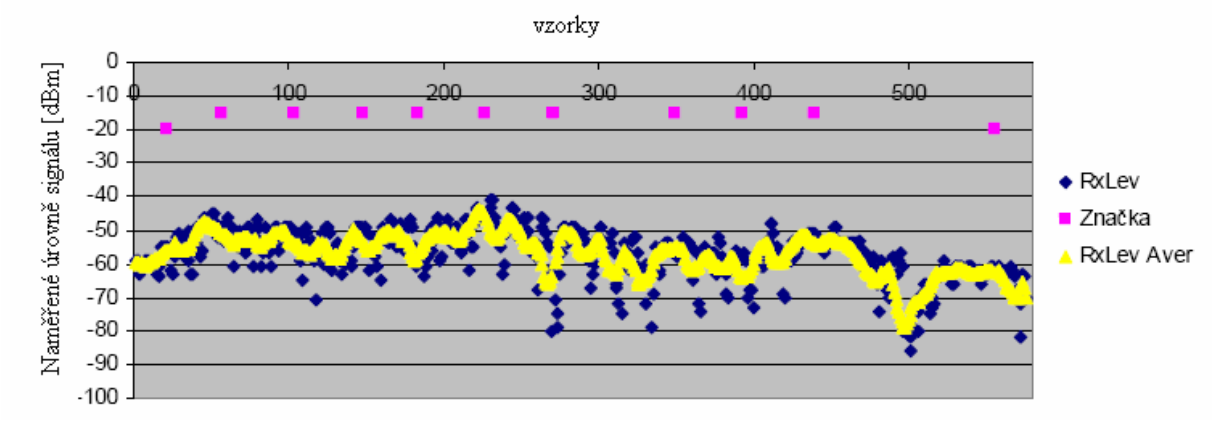


Obr. 12. Blokové schéma statického měření

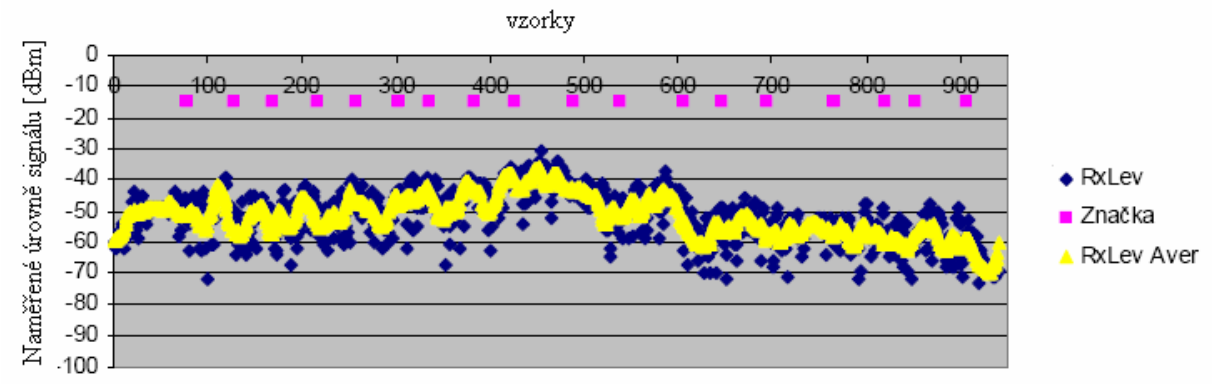
V prvním měření byli proměřeny úrovně pouze v uličce vagónu (obr. 14), fialové značky označují začátek a konec uličky a pozice před každými dveřmi do kupé. V druhém měření bylo měřeno i v kupé (obr. 15). Fialové značky označují pozice u dveřích a u okna v jednotlivých kupé. Modré značky v grafech označují naměřené hodnoty a žluté značky průměrnou úroveň.



Obr. 13. Schéma vozu typu AEE s označením umístění repeateru



Obr. 14. Úroveň signálu v uličce vozu



Obr. 15. Úroveň signálu v kupé vozu

Tab. 2. Průměrné hodnoty pokrytí ve vozech typu AEE

Repeater	Andrew
Vstupní výkon na repeateru [dBm]	-50
Pokrytí v uličce vozu [dBm]	-56,9
Pokrytí v uličce vozu + kupé [dBm]	-51,7
Ztráty v uličce [dB]	6,9
Ztráty v uličce + kupé [dB]	1,7

6.2.2 Dynamická měření ve voze typu AEE

Úkolem tohoto měření bylo prozkoumat kvalitu pokrytí na trase Praha – Ostrava (384 km) a vyzkoušet zda je použití repeateru vhodnou volbou pro zlepšení signálu na této trase. Měřící zařízení se skládalo ze dvou identických systémů, každý měřil BCCH kanál jednoho pásma GSM 900 MHz a GSM 1800MHz. Toto zařízení bylo umístěno uvnitř kupé a snímalo úroveň signálu, nejdříve s vypnutou (tab. 3) a poté se zapnutou repeaterovou technologií (tab. 4).

Tab. 3. Měření úrovně signálu bez repeaterové technologie

Bez repeateru	
nepokryto [%]	25,1
nepokryto [km]	96,4
průměrná úroveň signálu [dBm]	-79,6

Tab. 4. Měření úrovně signálu s repeaterovou technologií

S repeaterem	
nepokryto [%]	0,2
nepokryto [km]	0,7
průměrná úroveň signálu [dBm]	-55,7



Obr. 16. Mapa trati s vyznačenými problematickými místy bez použití repeateru



Obr. 17. Mapa trati s vyznačenými problematickými místy s použitím repeateru

Hranice pro dostatečné pokrytí byla stanovena na -86 dBm, pokud byla úroveň signálu nad touto hodnotou, byl výsledek hodnocen jako pokryto (vyznačeno zelenou barvou). Pokud úroveň signálu nedosahovalo této úrovně, bylo toto místo hodnoceno jako nepokryto (vyznačeno červenou barvou)(obr. 16) a (obr. 17).

6.3 Návrh konfigurace repeaterového systému

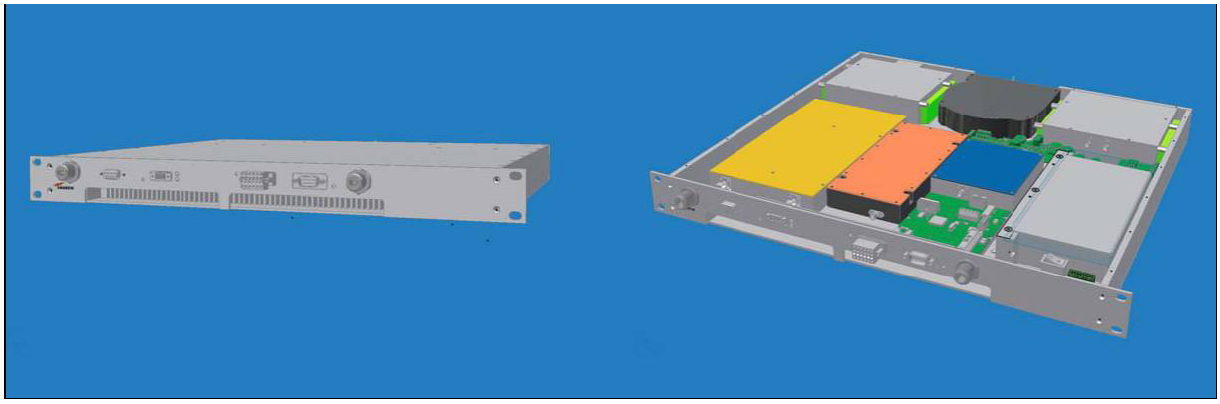
Na základě analýzy problematiky uvedené v předchozích kapitolách a výsledků testovacího měření byla podle nabídek dodavatelských společností a po seznámení s využitím v zahraničí postupně definována optimální konfigurace vlastní technologie repeateru.

6.3.1 Vlastní technologie repeateru

Navržená konfigurace vlastního repeateru byla posuzována a následně zvolena zejména z hlediska dosažitelných technických parametrů a vlastností v následujících oblastech:

- maximální využitelnost úrovně vnějšího pokrytí,
- omezení v kmitočtovém spektru a jeho alokaci,
- prostorová náročnost z hlediska zástavby,
- finanční náročnost daného řešení,
- možnost zástavby do více typů vozů.

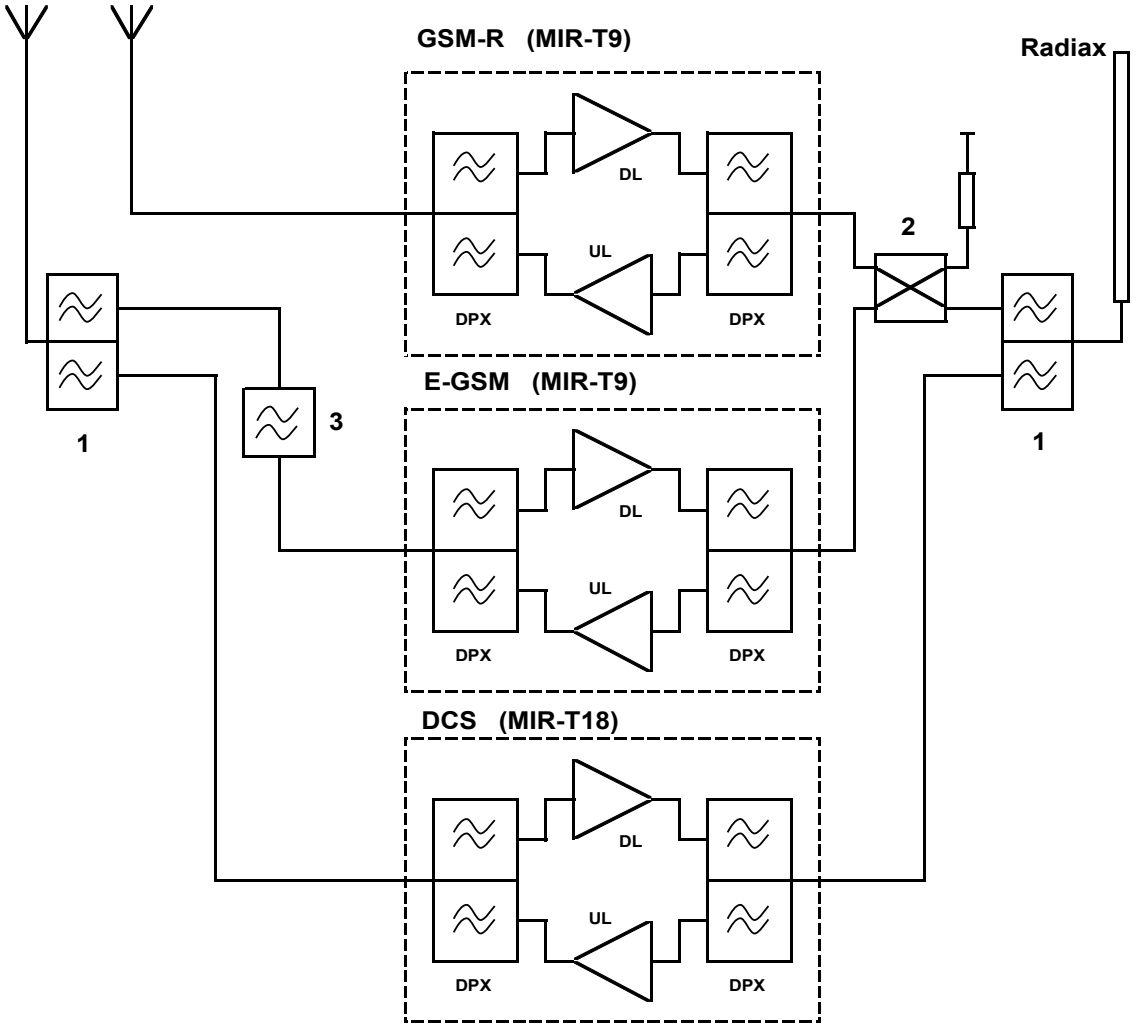
Z hlediska výše uvedeného byl vybrán jako nejvhodnější koncepci aktivního repeateru technologie Andrew se třemi samostatnými trakty pro jednotlivá kmitočtová pásma jenž jsou realizovány pomocí tří zástavbových 19´´ jednotek typu MIR–T9/18 v pásmové a širokopásmové konfiguraci.



Obr. 18. Jednotka MIR-T9/18

Retranslace pásma 900 MHz a 1800 MHz je zajišťována pomocí dvou širokopásmových (broadband) modulů, které jsou společné pro všechny sítě GSM společností Telefónica O2, T-Mobile a Vodafone. Konstrukčně je každý modul řešen zvlášť v jedné jednotce se zástavbovou výškou 1 HU.

Retranslace pásma GSM-R je zajišťována pomocí jednoho pásmového (band selective) modulu vyhrazeného pro drážní síť GSM-R. Konstrukčně je tento modul jako v předešlých případech řešen v rámci jedné jednotky se zástavbovou výškou 1 HU.



Obr. 19. Blokové schéma repeaterového systému pro retranslaci pásem GSM-R, GSM a DCS

UL/DL Up Link/Down Link zesilovače cest v rámci jednotlivých jednotek MIR-T9/18

DPX Duplexery pro sloučení UL a DL cest v rámci jednotlivých jednotek MIR-T9/18

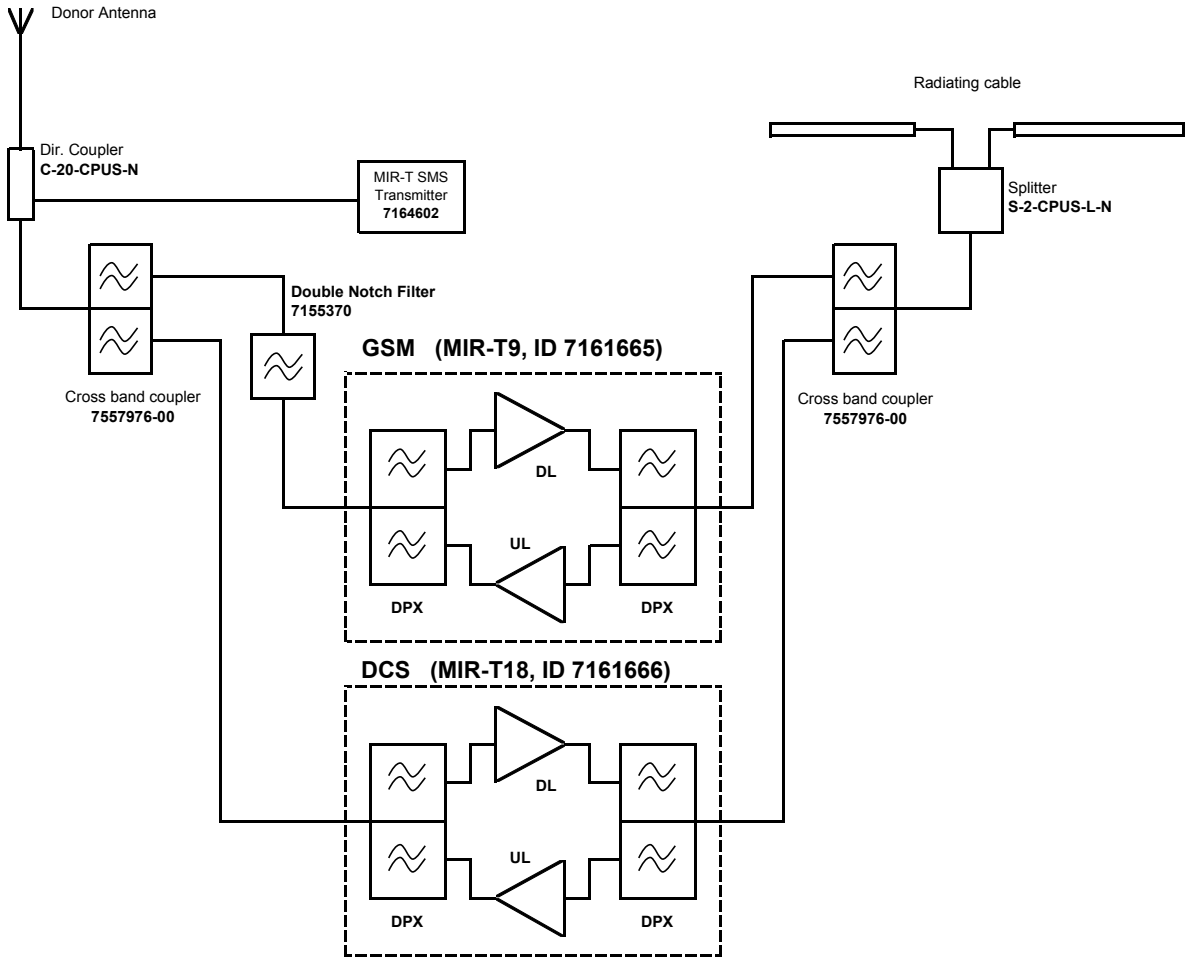
1 Duplexery pro pásma GSM/DCS/GSM-R

2 Hybridní slučovač/rozbočovač

3 Dvojitý pásmový odlaďovač (Notch Filter) pro potlačení IM produktů

Jelikož mezi mobilními operátory a ČD nedocházelo ke shodě, jsou posledními požadavky od operátorů vybavit vozy ČD repeaterovou technologií pouze pro pásma GSM a DCS, a proto se dále už nebudu zabývat pásmem GSM-R.

V tomto případě by se využili pouze dva samostatné trakty, tzn. dvě jednotky typu MIR–T9/18.

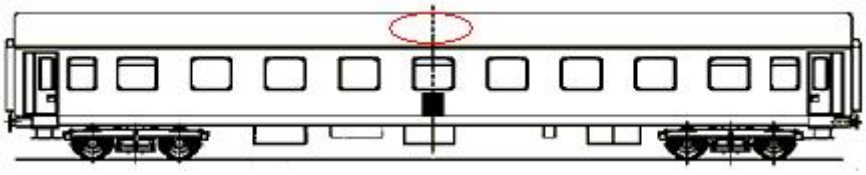


Obr. 20. Blokové schéma repeaterového systému pro retranslaci pásem GSM a DCS

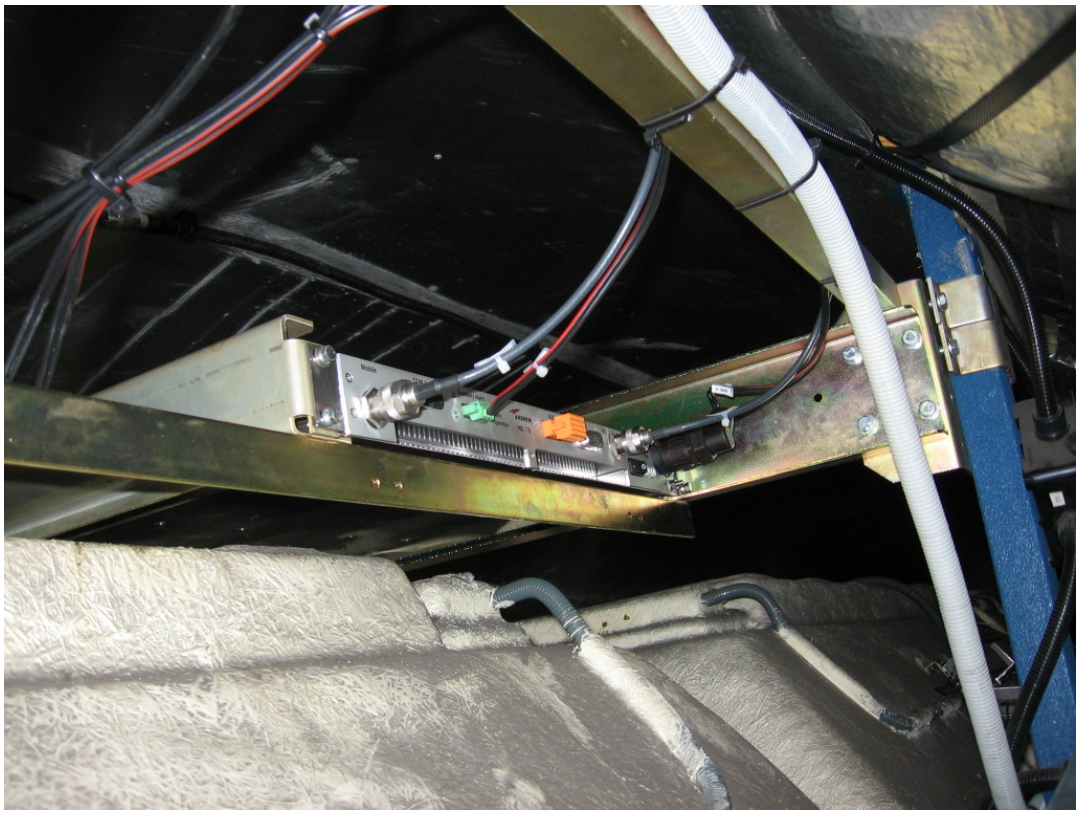
6.3.2 Mechanické řešení a možnosti zástavby

Hlavním cílem této kapitoly je vytipování vhodných prostorů pro možnou zástavbu repeateru v daném typu vozu a zejména vhodnost a realizovatelnost takové zástavby vzhledem k dostupnému prostoru, klimatickým podmínkám v daném prostoru, možnosti zajistit potřebné chlazení technologie repeateru atp.

Jako místo doporučené instalace repeateru do vozů řady AEE byl z hlediska náročnosti repeateru na potřebný zástavbový prostor, možnosti instalace vnějšího a vnitřního anténního systému a vysokofrekvenčních kabelových rozvodů a v neposlední řadě možnosti údržby a oprav nakonec zvolen stropní technologický prostor vozu uprostřed vagónu.



Obr. 21. Vůz typu AEE s označením nejvhodnějšího zástavbového prostoru



Obr. 22. Zástavba repeateru do vozu typu AEE

Vzhledem k poměrně vysokým teplotám v letních měsících v tomto prostoru je nezbytné na základě podkladů výrobce repeateru zajistit potřebné chlazení zařízení. Přístup do prostor s repeaterem by bylo potřebné projekčně řešit vhodným uzamykatelným systémem. Konkrétní mechanické řešení by mělo být součástí konstrukčních a projekčních prací v rámci zpracování projektové dokumentace a dokumentace pro schválení na DÚ.

U souprav SC Pendolino je stropní prostor naprosto nedostačující, ale v těchto soupravách technologický prostor tvoří přímo rack připravený pro zástavbu jednotek.

6.4 Problematika systému dohledu a údržby

V předešlých kapitolách byla na základě rozboru dané problematiky vybrána nejvhodnější konfigurace vlastního repeateru schopného zajistit retranslaci všech potřebných a požadovaných kmitočtových pásem GSM a DCS dovnitř vozu. Vzhledem k tomu, že pro osazení repeateru do vozu ČD bude nutno zpracovat dokumentaci potřebnou pro proces schválení na DÚ, musí cílem projektu (a příslušného schválení) být návrh kompletního finálního technického řešení, které by v případě kladného rozhodnutí managementu bylo ve větším měřítku v praxi aplikovatelné na vozidla daného typu. Jelikož repeater, jako každé jiné zařízení není bezporuchový, je potřeba nejlépe nyní, ve fázi přípravy podkladů a analýzy technických, ekonomických a provozních parametrů neopomenout systém dohledu, údržby a řešení možných provozních stavů včetně pomocných HW prostředků (např. pro dálkovou diagnostiku).

Mimo vlastní technologii repeateru je tedy potřeba řešit následující problematiku:

- dohled funkčnosti jednotlivých částí repeateru,
- způsob zajištění případných oprav zařízení ve stanoveném čase,
- problematiku přechodu státních hranic vozem vybaveným repeaterem,
- splnění požadavků kladených na zařízení napájené z vozové baterie.

6.4.1 Funkční diagnostika a zajištění oprav

Dohled funkčnosti jednotlivých částí repeateru může být v podstatě řešen pomocí lokální nebo dálkové diagnostiky. Vlastní zajištění oprav pak např. pracovníky ČD, nebo pomocí třetí smluvní strany (ČD-T, externí firma, …).

Lokální diagnostika představuje nejjednodušší řešení z hlediska potřebného HW vybavení a potřebných investičních prostředků. Jedná se v podstatě o zajištění místní indikace vhodným zobrazovacím prvkem na vhodném a pohledu snadno přístupném místě vozu. Takové řešení je podporováno vlastní technologií repeateru pomocí kontaktů diagnostiky přístupných návazným indikačním obvodům. V tomto případě by dohled a servis mohl být řešen pomocí pracovníků ČD prostřednictvím jednoduché indikace závady např. LED diodami. Určitou nevýhodou takového řešení je, že spolehlivost a čas nahlášení poruchy (tím i čas pro její odstranění) je závislý na lidském činiteli. Tímto způsobem lze také řešit problematiku přechodu státních hranic, montáží tlačítka na vypnutí a zapnutí celého repeaterového systému.

Zajištění dálkové diagnostiky již vyžaduje určité technické HW vybavení a ve srovnání s předešlým způsobem diagnostiky i větší investiční náročnost. Výhodou takového řešení je okamžité nahlášení závady při jejím výskytu na předem určené dohledové místo s přenosem všech potřebných informací, tedy druhu závady, označení a případné polohy vozidla vybaveného repeaterem. U dálkové dohledu je možné i zpětné ovládání repeateru, které za určitých předpokladů představuje možnou podporu při řešení související problematiky např. vypnutí repeateru v případě překročení státních hranic.

6.4.2 Problematika překročení hranic a napájení z vozové baterie

Bez souhlasu zahraničního operátora veřejné sítě GSM nelze jakýmkoliv způsobem využívat kmitočty jemu přidělené (místním správcem a přídělcem kmitočtového spektra), tedy je zesilovat a následně vyzařovat jako v případě uvažovaného repeateru. V dané situaci jsou v podstatě možné dvě varianty:

- uzavřít mezinárodní dohody se všemi do úvahy připadajícími zahraničními operátory GSM,
- při překročení státní hranice ČR ve směru ven zajistit vypnutí repeateru a v případě přechodu hranice ve směru dovnitř zajistit opětovné zapnutí repeateru.

Vzhledem k problematice a nevyjasněnosti budoucích smluvních vztahů s přihlédnutím k časové náročnosti první varianty se zdá být lepší druhá varianta, tedy nalezení řešení pro vypínání a opětovné zapínání repeateru při překročení státní hranice (bude-li přes-hraniční provoz požadován). Takové řešení, jak již bylo uvedeno v předchozí kapitole je možné lokálním vypnutím a zapnutím repeateru nebo dálkovým vypnutím a zapnutím repeateru na základě znalosti polohy vozu a detekce překročení státní hranice.

Dálkový dohled by dále mohl řešit problematiku splnění požadavků kladených na zařízení napájené z vozové baterie, tedy zejména:

- omezení doby chodu repeateru při napájení pouze z baterie vozu,
- při poklesu napětí vozové baterie pod stanovenou mez se musí repeater automaticky vypnout a po obnovení standardních podmínek opět zapnout.

6.5 OCENĚNÍ FINANČNÍ NÁROČNOSTI

V této kapitole je vyjádřena finanční náročnost kompletního projektu osazení repeaterů GSM do vozů ČD na základě cenových podkladů firmy Andrew a dalších oslovených firem.

6.5.1 Vlastní technologie repeatru

Dále uvedené finanční ocenění vlastního repeateru (v konfiguraci doporučené pro zástavbu do vozu ČD) je převzato z podkladů o cenových relací jednotlivých základních položek sestavy repeateru technologie Andrew.

Tab. 5. Finanční ohodnocení vlastní repeaterové technologie

Položka	Název položky	Množství	Cena za položku
1.	Repeater MIR-T9, broadband	1	145 000 Kč
2.	Repeater MIR-T18, 2 band	1	156 250 Kč
3.	Rack 19“, 7HU	1	16 250 Kč
4.	Double notch filter	1	15 250 Kč
5.	Duplexer GSM/DCS	2	2500 Kč
6.	Donor antenna	1	12 500 Kč
7.	Vyzařovací kabel	20 m	12 500 Kč
Celkem			362 750 Kč

6.5.2 Mechanické řešení a montáž zařízení

Z předložených nabídek společností MOVO a RCD Radiokomunikace jsou v této kapitole relevantní následující položky:

Tab. 6. Finanční ohodnocení mechanického řešení a montáže zařízení

Položka	Název položky	Subjekt	Cena za položku
1.	Vývoj a výroba sestavy repeateru	RCD	93 000 Kč
2.	Realizace montážních prací v MOVO Plzeň	MOVO	100 000 Kč
3.	Vysokofrekvenční montáž zařízení	RCD	17 000 Kč
4.	Oživení a změření sestavy	RCD	16 500 Kč
Celkem			226 500 Kč

6.5.3 Dokumentace a schválení na DÚ

Jako v předchozím případě jsou z předložených nabídek společností MOVO a RCD Radiokomunikace relevantní následující položky:

Tab. 7. Finanční ohodnocení dokumentace a schválení na DÚ

Položka	Název položky	Subjekt	Cena za položku
1.	Měření VF izolace daného typu vozu	RCD	14 000 Kč
2.	Aee/Bee - zpracování projektové dokumentace a dokumentace pro schválení na DÚ	MOVO	270 000 Kč
Celkem			284 000 Kč

Náklady za měření VF izolace daného typu vozu, zpracování projektové dokumentace a dokumentace pro schválení na DÚ a vývoj sestavy repeateru jsou jednorázové a činí zhruba 320 000 Kč. Vybavení jednoho vozu typu AEE repeaterovým systémem bez jednorázových investic vychází zhruba na 550 000 Kč.

7 Závěr

Mobilní operátoři mohou pomocí repeateru významně zlepšovat pokrytí účastníků signálem. Je potřeba si však uvědomit, že repeater je „pouze“ RF zesilovač a nepřináší do sítě novou datovou čili hovorovou kapacitu, což je asi největším omezením v jeho použití. Jako každý zesilovač zesiluje mimo užitečného signálu také šum a interference, takže jeho použití v mobilních sítích je třeba pečlivě naplánovat. Na druhé straně ale poskytuje mnoho výhod. Repeater je možné rychle instalovat a integrovat do mobilní sítě. Díky nízké hmotnosti i objemu nejsou potřeba velké nosné konstrukce, stačí přivést napájecí napětí. Repeatery se osvědčily a stále osvědčují při počátečním rozvoji jakékoliv buněčné sítě (GSM, UMTS, TETRA), kdy není požadovaná velká kapacita sítě, ale je potřeba rychle pokrýt velké území. Investice na výstavbu repeaterového stanoviště je řádově nižší, než výstavba nové BTS. Operátoři tak mohou rozložit své investiční náklady do delšího časového horizontu. V některých speciálních případech má repeater naprosto nezastupitelnou roli, např. při zlepšení signálu ve vlacích. Kvalitu signálu ve vlacích ovlivňuje především vysoká atenuace při jeho průchodu dovnitř vozu. Proto není možné řešit daný problém na straně infrastruktury systému bez vynaložení extrémně vysokých investičních nákladů a speciální repeatery se zde zdají jediným řešením, které poskytne cestujícím kvalitní hovorové i datové služby. To potvrdilo i testovací měření. Jeho výsledky naznačují možnosti využití repeaterů pro zlepšení signálu ve vlacích ČD, přestože finanční náklady na kompletní řešení repeaterové technologie nejsou nijak malé, avšak při porovnání s náklady na vybudování nových základnových stanic jsou přijatelné. V této práci byl vytvořen přehled jednotlivých typů repeaterů a detailně rozebrány jeho funkce. Byl navrhnut funkční repeaterový systém pro pokrytí vlakových souprav českých drah. Návrh řeší všechny důležité problematiky, které by se mohly vyskytnout při zabudování repeaterového systému do vozů Českých drah včetně ocenění finanční náročnosti. Celý tento projekt je postaven na výsledcích testovacího provozu, který proběhl na trati Praha – Ostrava za spolupráce firem T-Mobile Czech Republic a.s., Vodafone Czech Republic a.s., Telefónica O2 Czech Republic a.s., České dráhy a.s. (Czech Railways Company) a ČD-Telematika a.s.

Seznam literatury a použitých zdrojů

[1] *GSMweb* [online]. c1997-2007 [cit. 2007-11-30]. Dostupný z WWW: <http://www.gsmweb.cz/>.

[2] *Andrew Corporation* [online]. c2007 [cit. 2007-11-16]. Dostupný z WWW: <http://www.andrew.com/>.

[3] HANUS, S. *Rádiová a mobilní komunikace.* Skripta FEKT VUT v Brně. Brno, 2002, 107 stran.

[4] JAN, Lodl. Vagony Českých drah brzy zaplaví mobilní signál. Prozradíme jak. *Mobil.cz* [online]. 2007 [cit. 2007-11-22].

[5] Stanovení první Fresnelovy zóny. *Pvfree.net* [online]. 2006 [cit. 2007-11-23].

[6] EBERSPAECHER , Joerg, VOEGEL, Hans-Joerg, BETTSTETTER, Christian. *GSM Switching, Services, and Protocols*. [s.l.] : [s.n.], 2001. 332 s. ISBN 978-0471499039.

[7] PECHAČ, Pavel. *Šíření vln v zástavbě*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 108 s. ISBN 8073001861.

[8] PECHAČ, Pavel, ZVÁNOVEC, Stanislav. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. [s.l.] : [s.n.], 2007. 200 s. ISBN 9788073002237.

[9] *TEMS™ Pocket* [online]. c2008 [cit. 2008-05-21]. Dostupný z WWW: <http://www.ericsson.com/solutions/tems/realtime_diagnostics/downloads/TEMS_Pocket_6.0.pdf>.

[10] GUNNAR, Heine. *GSM Networks: Protocols, Terminology and Implementation*. [s.l.] : [s.n.], 1998. 432 s. ISBN 978-0890064719.