



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

# VLIV ZPŮSOBU INSTALACE ANTÉNY NA STŘEŠE DRÁŽNÍHO VOZIDLA NA DOSAŽENÉ PARAMETRY A VYZAŘOVÁNÍ ANTÉNY

INFLUENCE OF THE ANTENNA INSTALLATION METHOD ON THE ROOF OF THE RAILWAY VEHICLE ON  
ACHIEVED ANTENNA PARAMETERS AND RADIATION PATTERN

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Drtina

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radek Theumer

BRNO 2024

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Elektronika a komunikační technologie**

Ústav radioelektroniky

**Student:** Vojtěch Drtina

**ID:** 240605

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2023/24

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Vliv způsobu instalace antény na střeše drážního vozidla na dosažené parametry a vyzařování antény**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Seznamte se s funkčními a systémovými specifikacemi systému GSM-R [1] a s typy antén vhodných pro použití na drážním vozidle. Vyhodnoťte, jakým konkrétním způsobem jsou instalovány antény na současná drážní vozidla. Vytvořte model reálné antény [2] a pomocí simulací ověřte její parametry dané technickými specifikacemi. Simulace podložte měřeními na reálné anténě.

Simulujte, jak dispozice a provedení střechy konkrétního typu drážního vozidla (zejména v případě jednotek ŠKODA 15Ev, 18Ev a 19Ev s prvky elektrické výzbroje umístěnými na střeše) ovlivňuje parametry antén a její vyzařovací diagram. Pokuste se navrhnout metodiku měření v reálném prostředí s přihlédnutím k realizovatelnosti, omezením díky vlivům reálného prostředí apod.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] System Requirements Specification Version 16.0.0. [online]. International Union of Railway (UIC), Paris, 2012 [cit. 2023-05-24]. ISBN 2-7461-1832-4. Dostupné z: <https://uic.org/>

[2] Arya, A., Hassan, R. S. Shark-Fin Antenna for Railway Communications in LTE-R, LTE, and Lower 5G Frequency Bands. [online]. Progress in Electromagnetics Research, vol. 167, pp. 83-94, 2020. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <http://www.researchgate.net/>

[3] Ribeiro, A. G. Analysis of Antennas' Locations on Trains for Mobile Communications. [online]. Universidade de Lisboa. Diploma thesis, 2018. [cit. 2023-05-24]. Dostupné z: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997258499/resumo.pdf>

**Termín zadání:** 16.2.2024

**Termín odevzdání:** 27.5.2024

**Vedoucí práce:** Ing. Radek Theumer

**doc. Ing. Lucie Hudcová, Ph.D.**  
předseda rady studijního programu

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.



## **ABSTRAKT**

Tato práce zkoumá optimální umístění antén pro systém ETCS (European Train Control System) na drážních vozidlech a analyzuje vliv okolní zástavby na vyzařovací charakteristiku těchto antén. Cílem je analyzovat a navrhnout umístění antén tak, aby bylo dosaženo maximální spolehlivosti komunikace mezi vozidlovou anténou a infrastrukturou ETCS. V práci jsou představeny simulace různých umístění antén na jednotkách 18Ev a 15Ev a také metodika reálného měření těchto jednotek. Práce se dotýká problematiky měření a simulacím vyzařování antén na velkých objektech, jenž se nedají umístit do bezodrazové komory.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

ETCS, GSM-R, vyzařovací charakteristika, drážní vozidlo, činitel odrazu, monopól

## **ABSTRACT**

This thesis investigates the optimal placement of antennas for the system ETCS (European Train Control System) on railway vehicle and analyzes the impact of surrounding structures on the radiation characteristics of these antennas. The goal is to analyze and propose antenna placement to achieve maximum reliability in communication between vehicular antennas and the ETCS infrastructure. The thesis presents simulations of various antenna placements on 18Ev and 15Ev units as well as the methodology for real measurement of these vehicles. The thesis addresses the measurement and simulation of antenna radiation on large objects that cannot be placed in an anechoic chamber.

## **KEYWORDS**

ETCS, GSM-R, radiation pattern, railway vehicle, reflection coefficient, monopole

DRTINA, Vojtěch. *Vliv způsobu instalace antény na střeše drážního vozidla na dosažené parametry a vyzářování antény*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2024. Vedoucí práce: Ing. Radek Theumer

## Prohlášení autora o původnosti díla

<b>Jméno a příjmení autora:</b>	Vojtěch Drtina
<b>VUT ID autora:</b>	240605
<b>Typ práce:</b>	Bakalářská práce
<b>Akademický rok:</b>	2023/24
<b>Téma závěrečné práce:</b>	Vliv způsobu instalace antény na střeše drážního vozidla na dosažené parametry a vyzařování antény

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora\*

---

\*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Radku Theumerovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Jiřímu Šustrovi a panu Ing. Vladimíru Říhovi ze Správy železnic, státní organizace za odborné rady a poskytnutí materiálů, panu Vítězslavovi Staňkovi z ČD - Telematika a.s. za zapůjčení antény a odbornou pomoc při měření na hnacím vozidle, panu Miloslavovi Kuželovi z ALPS Electronic Czech, s.r.o. za uskutečnění rentgenu vnitřní struktury antény.

# Obsah

Úvod	11
<b>1 Teorie</b>	<b>12</b>
1.1 Vlakové zabezpečovače napříč Evropou	12
1.2 ERTMS	14
1.2.1 Aplikační úrovně ETCS	14
1.2.2 Protokol EURORADIO	17
1.2.3 Legislativní rámec ERTMS	18
1.3 Rádiové sítě	19
1.3.1 Analogové rádiové sítě	19
1.3.2 Digitální rádiové sítě	20
1.4 GSM-R	21
1.4.1 Rádiové rozhraní GSM-R	21
1.4.2 GSM-R BTS	23
1.5 Antény na železnici	25
1.5.1 Průjezdny profil	26
1.5.2 Typy antén na železnici	26
1.6 Aspekty zástaveb drážních vozidel	29
1.6.1 Umístování antén na drážní vozidla	29
1.6.2 Vliv troleje	30
1.6.3 Vozy s téměř ideální zástavbou střechy	31
<b>2 Praktická část</b>	<b>33</b>
2.1 Měření reálné antény	33
2.1.1 Měření v ideálních podmínkách	33
2.1.2 Měření na lokomotivě	38
2.2 Simulace antény pro GSM-R pásmo	40
2.2.1 Simulátor Ansys HFSS	40
2.2.2 Simulace antény	41
2.3 Simulace zástavby vlaku	46
2.3.1 Jednotka 18Ev	46
2.3.2 Jednotka 15Ev	54
2.3.3 Porovnání jednotek 18Ev a 15Ev	60
2.4 Možnosti měření v praxi	61
2.4.1 Měření srovnávací metodou	61
2.4.2 Další metody měření velkých vozidel	66

<b>Závěr</b>	<b>68</b>
<b>Literatura</b>	<b>70</b>

# Seznam obrázků

1.1	Vlakové zabezpečovače v Evropě, stav k 2003 [3]	13
1.2	Použití ETCS ve světě v roce 2018 [6]	13
1.3	Nákres L1	14
1.4	Nákres L2	15
1.5	Mapa tratí vybavených ETCS v ČR, stav k 2024 [11]	16
1.6	Základní traťové rádiové spojení [22]	19
1.7	Příklad kvality kanálu pro fyzický kanál závislý na poloze [27]	22
1.8	GSM-R spektrum	23
1.9	GSM-R BTS	23
1.10	Pokrytí v okolí Olomouce	24
1.11	Minimální vzdálenost mezi anténami	25
1.12	Referenční čáry statických hraničních čar GA, GB a GC [32]	27
1.13	Anténa QDBLUD1 a její vnitřní struktura	27
1.14	Vnitřní struktura invertované F antény [42]	28
1.15	Průjezdny profil GA a zástavba u jednotky Škoda 18Ev RegioPanter	29
1.16	Zástavba na jednotce Škoda 10Ev, řada 651	30
1.17	Zástavba na hnacím vozidle 362.172	30
1.18	Rušení vlivem pantografu	31
1.19	ÚDZRT ERTMS samostatný motorový vůz [51]	32
1.20	Eurailscout Motorpost Plan mP BRT-91 [52]	32
1.21	Tažný vůz pro měření rádiových sítí	32
2.1	Zástavba antén na voze 362 019 - 2	33
2.2	Diagram měření antény	34
2.3	Určení vzdáleného pole [57]	34
2.4	Měření v bezodrazové komoře	35
2.5	E rovina	35
2.6	H rovina	36
2.7	Fotografie pracoviště pro měření S11	36
2.8	S11	37
2.9	Detail S11	37
2.10	Fotografie přístrojů použitých při měření	38
2.11	Parametr S11 měřený na zástavbě	39
2.12	Příjem z různých BTS v okolí Brna FSH8	39
2.13	Příklad rozdělení oblasti na konečně mnoho menších oblastí	40
2.14	Náčrt čtvrtvlnného monopólu se čtvercovým reflektorem	41
2.15	Simulovaná anténa	42
2.16	Parametrická analýza rozměru L	43

2.17	Parametrická analýza rozměru monopole_radius . . . . .	43
2.18	Parametrická analýza rozměru reflektoru . . . . .	44
2.19	Parametrická analýza rozměrů s přidáním zemní plochy . . . . .	44
2.20	Diagram vyzařování antény v rovině E . . . . .	45
2.21	Jednotka 18Ev z boku . . . . .	46
2.22	Jednotka 18Ev pohled shora (rozměry v mm) . . . . .	47
2.23	Vzájemná orientace modelu pro různé úhly $\phi$ a jejich vyzařovací charakteristiky při simulacích . . . . .	47
2.24	Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při $\theta = 30^\circ$ . . . . .	49
2.25	Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při $\theta = 60^\circ$ . . . . .	49
2.26	Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při $\theta = 90^\circ$ . . . . .	50
2.27	Vyzařovací diagram pro výšky 50 mm a 30 mm podstavce při $\theta = 90^\circ$ . . . . .	50
2.28	Vyzařovací diagram pro různé pozice při $\theta = 30^\circ$ . . . . .	51
2.29	Vyzařovací diagram pro různé pozice při $\theta = 60^\circ$ . . . . .	51
2.30	Vyzařovací diagram pro různé pozice při $\theta = 90^\circ$ . . . . .	52
2.31	Vyzařovací diagram pro pozice 1 a 3 při $\theta = 90^\circ$ . . . . .	52
2.32	Pozice 1 různé výšky podstavce . . . . .	53
2.33	Elektrická intenzita na vzdálenosti . . . . .	53
2.34	Výbava na střeše jednotky Škoda 15Ev . . . . .	54
2.35	Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při $\theta = 30^\circ$ . . . . .	55
2.36	Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při $\theta = 60^\circ$ . . . . .	55
2.37	Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při $\theta = 90^\circ$ . . . . .	56
2.38	Vyzařovací diagram pro výšky podstavce 30 cm a 50 cm při $\theta = 90^\circ$ . . . . .	56
2.39	Elektrická intenzita na vzdálenosti . . . . .	57
2.40	Umístění antény pro datarail na jednotce 15Ev . . . . .	58
2.41	Vyzařovací charakteristiky pro různá $\theta$ . . . . .	58
2.42	Vyzařovací charakteristiky pro různá $\theta$ . . . . .	59
2.43	Porovnání parametru S11 . . . . .	59
2.44	Porovnání vyzařovací charakteristiky . . . . .	60
2.45	Porovnání vyzařovací charakteristiky . . . . .	60
2.46	Úroveň signálu z BTS Uničov . . . . .	62
2.47	Úroveň signálu z BTS Bohuňovice . . . . .	62
2.48	Úroveň signálu z BTS Bohuňovice . . . . .	63
2.49	Úroveň signálu z BTS Bohuňovice . . . . .	65
2.50	Sférická nearfield sestava pro měření antén na modelech lokomotiv [65] . . . . .	66



# Úvod

Moderní železniční infrastruktura a provoz na ní vyžaduje adekvátní úroveň zabezpečení a co největší eliminaci chyb lidského faktoru konkrétně výpravčího/dispečera a strojvedoucího.

Se snahou zvyšovat maximální traťovou rychlost na konvenčních koridorech nad současnou mez 160 km/h v České republice a zároveň budování vysokorychlostních tratí (VRT) se zamýšlenými rychlostmi nad 200 km/h je nezbytné dosadit zabezpečovací systém, který je schopen hlídat jízdu vlaku v reálném čase.

V rámci evropského projektu ERTMS (European Rail Traffic Management System) se na evropské železniční síti buduje nový jednotný zabezpečovací systém ETCS (European Train Control System), který má nahradit národní zabezpečovací systémy jednotlivých států, které jsou značně odlišné. Hlavním cílem projektu ERTMS je interoperabilita. Po zprovoznění první tratě v České republice s výhradním provozem pod systémem ETCS z Olomouce do Uničova dne 1. ledna 2022 dochází k častým rozpadům spojení mezi palubní částí zabezpečovacího zařízení a radioblokovou centrálou (RBC), které mají mnoho příčin. Příčinami jsou problémy v přenosové soustavě, výpadky na straně traťové části (neboli na straně RBC) a v neposlední řadě výpadek rádiového spojení z důvodu špatného příjmu způsobeného nevhodnou instalací datových GSM-R antén na střechách hnacích vozidel. Každý rozpad spojení je z hlediska principu funkce tohoto zabezpečovacího zařízení vyhodnocen jako riziko a vlak je automaticky nouzově zastaven. Časté rozpady spojení vedou k častému nouzovému brzdění, což má za následek zpoždění vlaků (dopad na dopravní společnost) a také vznik škod na dvojkolích drážních vozidel (vznik plochých dvojkolí zejména při zhoršených adhezních podmínkách).

Tato práce se věnuje právě rozpadům způsobeným ze strany mobilní části ETCS, tedy části na hnacím vozidle, které mohou být způsobeny nevhodným umístěním antén na střeše vozidla. Jako první se změří antény v ideálním prostředí, dále se práce věnuje simulacím v prostředí HFSS a poté i měřením na reálném drážním vozidle. Samotný vlakový zabezpečovač ETCS není předmětem této práce, nicméně pro pochopení důležitosti stabilního spojení a časoprostorové dostupnosti rádiové sítě GSM-R je popisu základních principů tohoto systému věnováno několik stránek. Je zde kladen důraz na pochopení problematiky umístování antén na střechách drážních vozidel. Při nevhodném umístění totiž není kvalita rádiového signálu dostatečná a vlakový zabezpečovač ETCS není schopen korektní funkce.

# 1 Teorie

## 1.1 Vlakové zabezpečovače napříč Evropou

Evropské železnice jsou velice různorodé, co se týče zabezpečovacích a řídicích systémů od různých evropských dodavatelů. Tato situace představuje hlavní překážku pro zajištění interoperability<sup>1</sup> železniční sítě v Evropě.

Čím dál víc vzrůstá poptávka po mezinárodním provozu v souvislosti s výstavbou nových vysokorychlostních tratí (VRT) v Evropě a výstavbou několika nákladních koridorů nebo konvenčních koridorů<sup>2</sup>, které se stávají součástí sítě TEN-T (Transevropská dopravní síť) [1]. Momentálně se v Evropě nachází více než 20 různých zabezpečovacích systémů. To znamená, že drážní vozidlo uvažované pro mezinárodní provoz musí být vybaveno minimálně každým typem národního vlakového zabezpečovače země, v níž je provozováno. Dopravní předpisy jednotlivých státních železničních správ umožňují jízdu vlaku nevybaveného příslušným vlakovým zabezpečovačem pouze omezenou rychlostí, nebo ji neumožňují vůbec. Častěji jsou však opatřeny i několikatery různými zabezpečovači. Například “The Thalys”, který spojuje Paříž-Brusel-Kolín nad Rýnem, musí být vybaven sedmi různými typy národních zabezpečovačů [2]. Kromě toho některé země předpovídají významný nárůst hustoty dopravy a přehodnocují svou strategii infrastruktury, aby se přizpůsobily intenzivnější dopravě. Obrázek 1.1 ukazuje rozmanitost zabezpečovacích zařízení používaných v Evropě v roce 2003 [3]. Za povšimnutí stojí existence vícero typů vlakových zabezpečovacích systémů v některých zemích, zejména v západní Evropě.

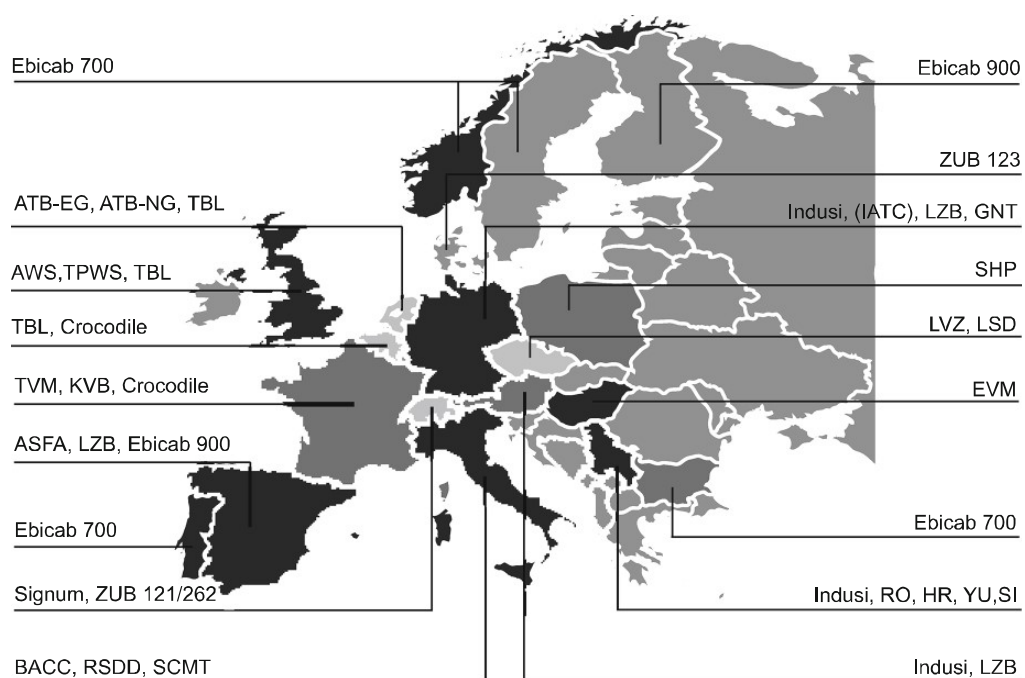
V této souvislosti přijala Evropská komise iniciativu na objednání vývoje nového standardního vlakového zabezpečovacího systému. Konkrétně směrnice (EU) 2016/798 [4] zajišťuje bezpečný, nepřerušovaný a konkurenceschopný provoz mezinárodních vlaků.

Mimo jiné systém ERTMS byl přijat v několika projektech mimo Evropu, například v Jižní Koreji, Tchaj-wanu, Turecku, Alžírsku, Argentině a Novém Zélandu. Navíc existuje ekvivalentní čínský zabezpečovací systém nazvaný CTCS (Chinese Train Control System), který je silně inspirován principem systému ERTMS [5].

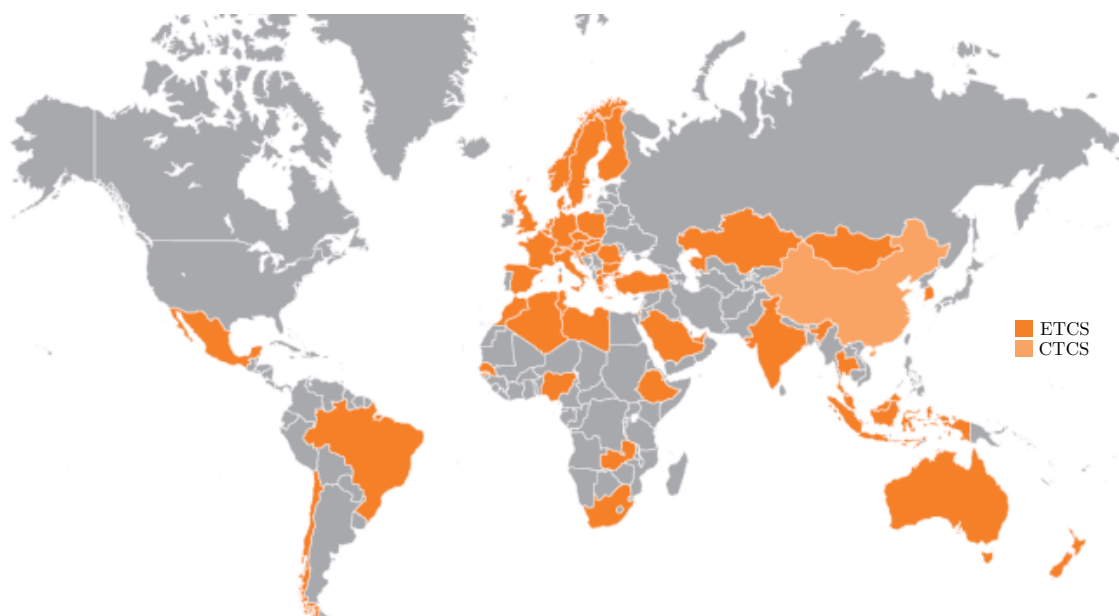
---

<sup>1</sup>*Interoperabilita železničního systému* zajišťuje mimo jiné kompatibilitu železniční infrastruktury jednotlivých členských států EU; zajištění železniční interoperability spočívá v nastavení podmínek pro integraci evropského železničního průmyslu a vznik jednotného trhu (jednotný zabezpečovací systém, jednotné telekomunikační rozhraní).

<sup>2</sup>*konvenční koridor* je trať obvykle do 160 km/h, na které současná legislativa (přítomnost úroňových přejezdů, apod.) a technické provedení kolejového spodku a svršku neumožňuje zvýšit traťovou rychlost



Obr. 1.1: Vlakové zabezpečovače v Evropě, stav k 2003 [3]



Obr. 1.2: Použití ETCS ve světě v roce 2018 [6]

## 1.2 ERTMS

ERTMS (The European Rail Traffic Management System) je jednotný systém pro evropské státy definovaný technickými specifikacemi, který zajišťuje zabezpečení jízdy vlaku zahrnující hlídání rychlosti. Hlavním důvodem zavádění takového systému je interoperabilita. Mezi další cíle patří: snížení ceny údržby, zvýšení rychlosti vlaků, zvýšení kapacity infrastruktury a navýšení bezpečnosti ve vlakové dopravě.

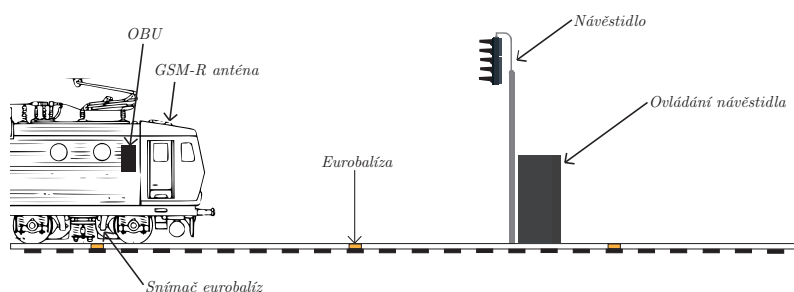
ERTMS má dvě základní části:

- **ETCS** (The European Train Control System) je automatický interoperabilní vlakový zabezpečovač;
- **GSM-R** (Global System for Mobile Communications for Railway) je rádiový systém, který zajišťuje hlasovou a zejména datovou komunikaci mezi drážním vozidlem a radioblokovou centrálou (RBC), přičemž systém GSM-R je založen na klasickém GSM využívající vyhrazené frekvence určené výhradně pro železniční správy.

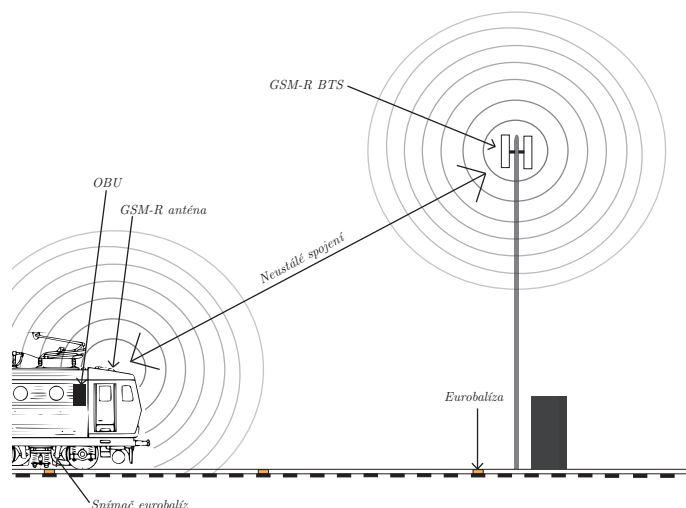
Systém ETCS se implementuje ve třech aplikačních úrovních (L1, L2 a L3), které se v rámci definované vzájemné kompatibility liší úrovní a rozsahem prolínání traťové a palubní části zařízení ETCS, které vzájemně kooperují při zabezpečení jízdy drážních vozidel vybavených OBU (On-board unit). S ohledem na další varianty provozu OBU ETCS se doplňují i další provozní módy (L0 a LSTM) [7].

### 1.2.1 Aplikační úrovně ETCS

Úroveň L1 spočívá v přenosu informací z traťové části do palubní části bodově prostřednictvím eurobalíz (zkráceně balíz). Tyto balízy jsou umístěny v kolejovém systému na pražcích a slouží k předávání jak konstantních informací o rychlosti na trati, stoupání a klesání terénu, tak i proměnných informací v závislosti na aktuální poloze



Obr. 1.3: Nákres L1



Obr. 1.4: Nákres L2

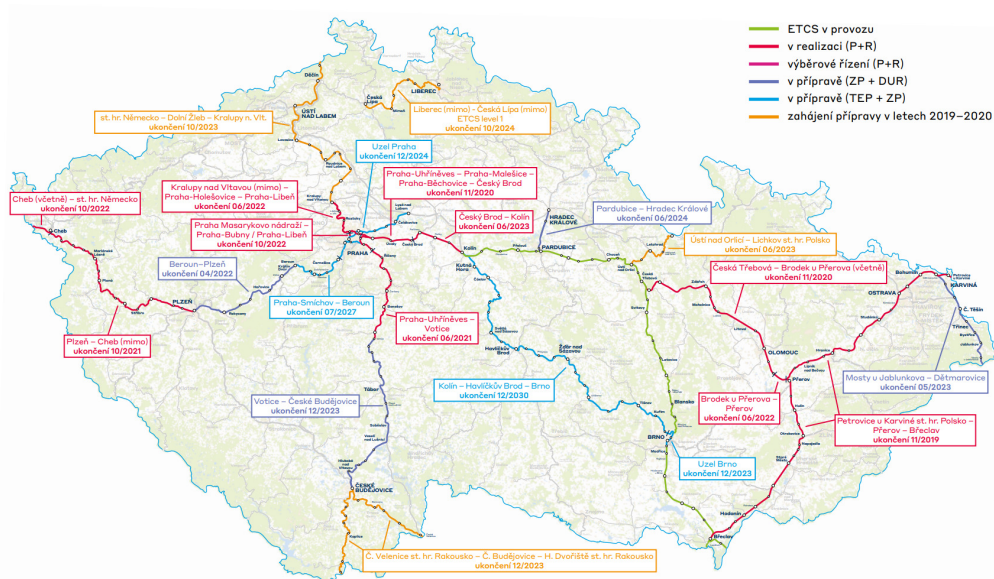
kolejové cesty (například dovolená rychlost a vzdálenost k dalšímu návěstidlu). Dále přenášejí proměnné a konstantní údaje nezbytné pro provoz systému ETCS, jako je maximální povolená rychlost při posunu. Jednotlivé balízy jsou přímo propojeny se zabezpečovacím zařízením na trati.

Úroveň L2 využívá rádiový přenos informací z traťové části prostřednictvím datového rádia GSM-R. V kolejích jsou umístěny nepřepínatelné balízy, které identifikují polohu vozidla a přenášejí některé nezbytné neměnné informace. Tyto balízy již nejsou připojeny ke staničnímu/traťovému zabezpečovacímu zařízení a jsou zcela pasivními prvky. Kromě balíz tvoří traťovou část i tzv. radiobloková centrála. RBC zajišťuje přenos informací o traťové rychlosti, stoupání a klesání, omezení rychlosti na základě postavené vlakové cesty, místo zastavení před stanoveným místem a všechny tyto údaje přímo získává od staničního/traťového zabezpečovacího zařízení.

Úroveň L3 je velice podobná úrovni L2 s tím rozdílem, že je vyžadováno zajištění celistvosti vlaku, tedy zda nedošlo k roztržení soupravy. V České republice se v současnosti nepočítá se zavedením úrovně L3, ale například ve Švédsku trať v úrovni L3 funguje od roku 2012 [8].

Úroveň LSTM je mód, v němž drážní vozidlo vybavené OBU ETCS jede po trati nevybavené traťovou částí systému ETCS, ale je opatřena národním vlakovým zabezpečovačem. To platí za předpokladu, že palubní část je vybavena odpovídající přijímací anténou a specifickým modulem, který plní funkci příslušného národního vlakového zabezpečovače.

Úroveň L0 se nastaví v palubní části v situaci, kdy trať není vybavena traťovou částí systému ETCS a není ani vybavena národním vlakovým zabezpečovačem. Alternativně je L0 aktivována v případě, kdy sice trať disponuje traťovou částí národního vlakového zabezpečovače, ale vozidlo není vybaveno odpovídajícím specifickým



Obr. 1.5: Mapa tratí vybavených ETCS v ČR, stav k 2024 [11]

stykovým modulem.

Nevýhodou úrovně L1 je bodový způsob předávání informace a to tak, že vlak přejede nad balízkou. To znamená, že např. informace o změně návěsti s příkazem „stůj“ se vlak dozví až po přejetí a načtení balíky. Tím pádem OBU pracuje s informacemi, které už nemusí být aktuální.

Oproti tomu v úrovních L2 a L3 se informace přenáší prostřednictvím rádiové sítě (v Evropě je standardizovaná prozatím síť GSM-R), takže RBC neprodleně po změně o ní informuje palubní část, tedy drážní vozidlo. Další předností L2 a L3 je možnost zadat přes palubní část povel pro nouzové zastavení jednoho nebo všech vlaků komunikujících s RBC (tzv. generální stop).

Úroveň L1 má jistou výhodu v nákladech na zavedení, jelikož není potřeba budovat síť GSM-R podél trati. Tento fakt je však diskutabilní z hlediska nutnosti digitální telekomunikační sítě pro účely hlasové komunikace. Nevýhodou je, že balíky musí být připojené k zabezpečovacímu zařízení, což znamená kabelizaci v okolí kolejiště [9].

Z výše uvedených důvodů bylo u nás doporučeno pro hlavní tratě budovat úroveň L2. Stejně postupují i železniční správy, které již vybavily některé své tratě úrovní L1. Na obrázku 1.5 je uvedena mapa plánovaného pokrytí železniční sítě v České republice do roku 2024 [10]. Z popisu úrovně L2 (respektive L3) vyplývá, že pro správnou funkci systému ETCS je časoprostorová dostupnost a kvalita rádiového spojení z hlediska definované kvality služeb (QoS) GSM-R klíčová.

## 1.2.2 Protokol EURORADIO

Jak vyplývá z výše napsaného, základem funkce ETCS v L2 je datová komunikace mezi RBC (traťová část) a OBU (palubní část). Pro realizaci komunikace slouží protokol EURORADIO, jenž je definovaný normou ČSN EN 50159 ed. 2 [12]<sup>3</sup>. Protokol je navržený pro zajištění interoperability i s ostatními železničními subsystémy. Datová komunikace je v rámci tohoto protokolu strukturována do zpráv, které obsahují jeden či více paketů. Zprávy a pakety jsou standardizovány a popsány v Subsetu-026 [13] vydávaným Evropskou železniční agenturou<sup>4</sup>.

### Oprávnění k jízdě „Movement Authority“

K zajištění bezpečné jízdy vlaku je nutné vhodným způsobem přenášet informace o stavu infrastruktury a řadu dalších důležitých informací pro jízdu. Jednou ze stěžejních zpráv zasílaných z RBC na OBU je zpráva MA (Movement Authority) neboli oprávnění k jízdě. Tato zpráva (dle Subsetu-026 označená jako *Msg 3*) se skládá obvykle z 5 paketů a je aktualizována a posílána OBU každých 15 sekund. Pravidelné přijetí této zprávy OBU (vozidlem) umožňuje jízdu drážního vozidla pod plným dohledem vlakového zabezpečovače ETCS. OBU na základě této zprávy dohlíží na dodržování rychlosti, v reálném čase dopočítává dynamickou brzdnou křivku, čímž zajišťuje bezpečnou jízdu vlaku a jeho případné bezpečné zastavení před koncem oprávnění k jízdě (typicky návěst „stůj“). Vydání oprávnění k jízdě je totiž závislé na postavení vlakové cesty<sup>5</sup>. Na přijetí MA reaguje OBU potvrzovací zprávou *Msg146* [13] čímž dá RBC najevo, že drážní vozidlo MA přijalo a přenos byl bezchybný.

### Časovač T\_SECTIONTIMER

Slouží k zajištění bezpečnosti v případě ztráty spojení RBC s jedoucím drážním vozidlem. Tento časovač je implementovaný v adresném softwaru (ASW) traťové části ETCS i v softwaru palubní části (OBU). V rámci České republiky je nastaven na 18 sekund ve vazbě na staniční zabezpečovací zařízení. Časovač určuje platnost vydání (a poslání) MA. Každé přijetí nového platného MA způsobí novou inicializaci časovače, který v ideálním případě nepřeteče. V případě **navázaného spojení** zašle RBC na OBU stejné nebo nové MA každých 15 sekund. V případě ztráty spojení

<sup>3</sup>ČSN EN 50159 (342670) Drážní zařízení - Sdělovací a zabezpečovací systémy a systémy zpracování dat - Komunikace v přenosových zabezpečovacích systémech

<sup>4</sup>ERA, European Union Agency for Railway

<sup>5</sup>*Vlaková cesta* je určena pro jízdu drážních vozidel, zajišťuje správné postavení výhybek, správnou indikaci návěstí na návěstidlech a umožňuje zabezpečený pohyb drážních vozidel po železniční infrastruktuře (správné a koncové polohy prvků, volnost kolejových úseků); je ohraničena hlavními návěstidly.

neobdrží OBU žádné nové MA a RBC žádnou odpověď od OBU a dojde k vypršení časovače. V takovém případě bude vlaku následující sekce povolení k jízdě odepřena a vlak bude nouzově zastaven.

### 1.2.3 Legislativní rámec ERTMS

Dle nařízení Komise (EU) 2016/919 (TSI CCS) (technické specifikace pro interoperabilitu pro řízení a zabezpečení na straně palubní i traťové) [14] ze dne 27. května 2016 musí být všechna nová vozidla s povolením k prvnímu uvedení do provozu, pokud se mají použít na úsek tratě, jenž je vybaven nebo má být vybaven ETCS do pěti let po schválení uvedení do provozu. V návaznosti podle právních předpisů ČR (Vyhláška Ministerstva dopravy č. 173/1995 Sb.) [15] musí být od 1.1.2017 veškerá hnací drážní vozidla a řídicí vozy nově schvalované do provozu na území ČR (čili jakákoliv nová výroba, ale i modernizace) vybavena palubní částí zabezpečovacího zařízení ETCS. Od 1.1.2020 se tato povinnost týká i speciálních hnacích vozidel nebo řídicích vozidel soupravy speciálních vozidel (MVTV, MTW, speciální vozidla pro údržbu trakčního vedení) a netýká se pouze speciálních vozidel, které smí být samostatně provozovány v dopravných nebo v traťových úsecích jen na vyloučených kolejích (například různá pracovní mechanizace typu dvoucestný bagřík, apod.).

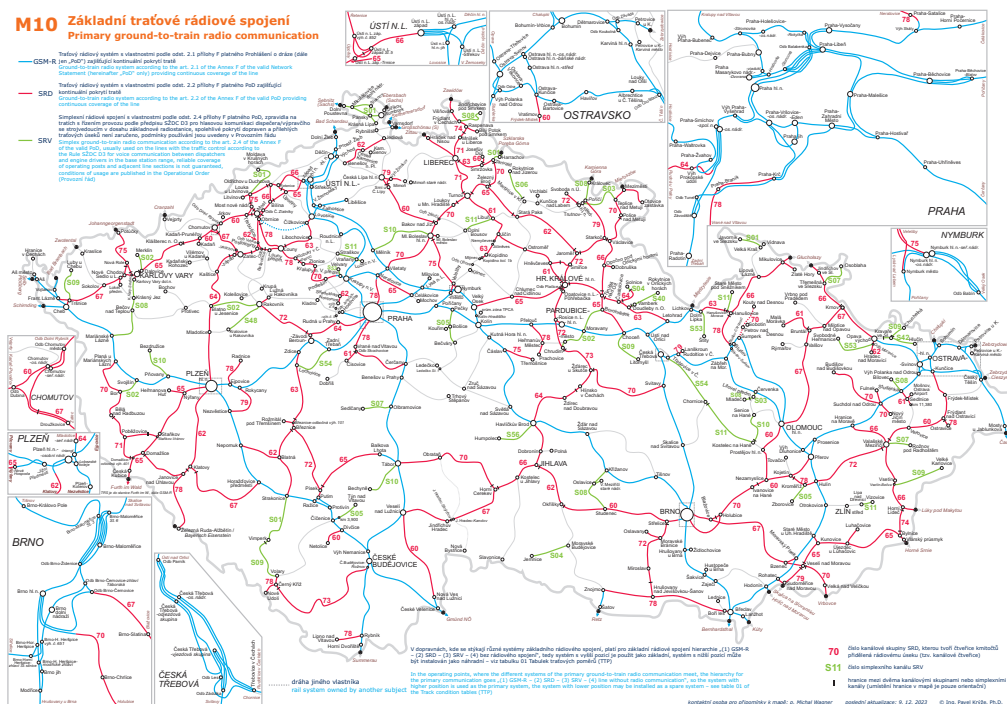
Národní impelmenatční plán [10] dále řeší migrační období, tedy období duálního provozu interoperabilního nově budovaného zabezpečovače ETCS a stávajícího národního vlakového zabezpečovače LS. TSI CCS [10] stanovuje strategii přechodu z národního systému třídy B typu LS k ETCS. Vybavení tratí vytváří podmínky jak k provozu pod ETCS, tak i pod stávajícím systémem typu LS. Migrační doba je období od zavedení zkušebního provozu ETCS na dané trati do okamžiku, kdy je na trati spuštěn rutinní provoz a tudíž na ní nesmí být vypraven vlak jedoucí mimo dohled ETCS. Nutno podotknout, že rutinní provoz ještě neznamená výhradní provoz.

Národní implementační plán počítá s určitými faktory, které ovlivní postup implementace ETCS (na straně palubní i traťové), zejména časový harmonogram. [10] Mezi těmito faktory však nefiguruje fakt, že zástavba na vozidlech (zejména umístění antén) neodpovídá platným normám a požadavkům a vozidlo tak neprojde ESC (případně RSC) testy (tzv. testy kompatibility). Legislativní pozadí ESC je definováno TSI CCS (NK 2016/919 [14] ve znění PNK 2019/776 [16], 2020/387[17] a 2020/420 [18] [kapitola 6.3.3.1 a s tím související 4.2.17 - CCO/CCT]); ERA ESC/RSC technical document - TD/011REC1028 (ESC-CZ-01 a ESC-CZ-02) [19]; SŽ PPD-2/2018 ve znění změny č. 1 (41 funkčních provozních testů) [20] a Metodickým postupem DUCR-2834/19 [21].



## 1.3 Rádiové sítě

V České republice se momentálně používají čtyři různé typy základního traťového rádiového spojení. Digitální GSM-R a tři analogové systémy MRS, SRD a SRV. Současným trendem je postupné nahrazování analogových systémů systémem digitálním kvůli požadavkům ETCS.



Obr. 1.6: Základní traťové rádiové spojení [22]

### 1.3.1 Analogové rádiové sítě

MRS (místní rádiová síť) je analogový komunikační systém, který umožňuje spojení v dopravních a přilehlých částech mezistaničních úseků. Slouží pro obsluhu a zajištění provozu dráhy. Systém pracuje v simplexním režimu, to znamená, že v jednu chvíli může mluvit pouze jeden. Pracuje v rozsahu kmitočtů od 148,2 MHz do 153,65 MHz.

TRS SRV (traťové rádiové sítě síť radiodispečerská vlaková) je analogový simplexní traťový komunikační systém. Pracuje v rozsahu kmitočtů od 148,2 MHz do 153,65 MHz.

TRS SRD (traťové rádiové sítě síť radiodispečerská) je analogový duplexní systém. Systém SRD má vazbu na národní vlakový zabezpečovač LS (funkce generální stop). Pracuje v rozsahu kmitočtů od 457,400 MHz do 468,450 MHz [23].

### 1.3.2 Digitální rádiové sítě

V posledních letech se sítě vyvíjejí a systémy druhé generace (GSM) začínají být omezené svou technologií i kapacitou. Je tedy relevantní, aby se nahradila stávající rádiová síť GSM-R novým železničním komunikačním systémem příští generace. Systémy čtvrté generace (LTE) zvládají vyšší rychlosti a mají větší kapacitu [29]. LTE-R má větší kapacitu kanálů. Je to plně paketově orientovaná síť, takže je vhodnější pro datovou komunikaci. Také má sníženou prodlevu packetů, což je klíčový požadavek ETCS, díky tomu je přijatelným systémem [24].

Dále je ve hře TETRA, ke které se přiklonilo Finsko. Hlavně z důvodu, že operuje na nižších frekvencích. Díky tomu, že ztráty jsou přímo úměrné jejich frekvenci, GSM-R potřebuje daleko více stanic než TETRA k dosažení stejného pokrytí (zhruba 2x). To znamená podstatné zlevnění provozu železnice [3].

Pro srovnání parametrů jednotlivých sítí používaných v Evropě je uvedena Tabulka 1.3.2, která je z důvodu některých standardizovaných pojmů v oblasti rádiových sítí uváděna v angličtině.

Parametr	GSM-R	TETRA	LTE-R
<b>Frekvence</b>	DL <sup>6</sup> : 921–925 MHz, UL <sup>7</sup> : 876–880 MHz	400 MHz	450 MHz, 800 MHz, 1.4 GHz, a 1.8 GHz
<b>Šířka kanálu</b>	200 kHz	25 kHz	1.4–100 MHz
<b>Peak data rate</b>	172 Kbps	5–10 Kbps	DL: 50 Mbps, UL: 10 Mbps
<b>All-IP</b>	Not standalone	Ne	Ano
<b>Handover</b>	hard	hard	Standard, soft (bez ztráty dat)
<b>Modulace</b>	GMSK TDMA	DPSK TDMA	QPSK, 16-QAM, a 64-QAM
<b>Mobilita</b>	500 km/h	332 km/h	500 km/h
<b>Úspěšnost handoveru</b>	≥ 99,5%	≥ 94,2%	≥ 99,9%

Tab. 1.1: Porovnání sítí

<sup>6</sup>downlink, směr komunikace z antény BTS k vozidlové anténě

<sup>7</sup>uplink, směr komunikace z vozidlové antény k anténě BTS

## 1.4 GSM-R

GSM-R (Global System for Mobile Communications – Railway) představuje mezinárodní standard pro bezdrátovou komunikaci v železniční dopravě. Cílem je efektivní a bezpečná výměna informací mezi vlaky a dispečerskými centry, které řídí železniční provoz. Tento standard vychází z technických specifikací normy GSM a EIRENE – MORANE, což zajišťuje spolehlivou komunikaci i při vysokých rychlostech vlaků bez přerušování signálu.

GSM-R využívá infrastrukturu veřejné sítě GSM, avšak jeho design a funkce jsou optimalizovány pro specifické potřeby železničního prostředí. GSM-R poskytuje bezpečnou platformu pro hlasovou i datovou komunikaci mezi zaměstnanci železnic (strojvůdci, dispečerů, výpravčích, posunovačů, vozmistrů). Mezi jeho klíčové funkce patří obousměrné skupinové volání (VGCS), jednosměrné skupinové volání (VBS), možnost volby volaného na základě polohy volajícího a prioritizace pro tísňová volání.

### 1.4.1 Rádiové rozhraní GSM-R

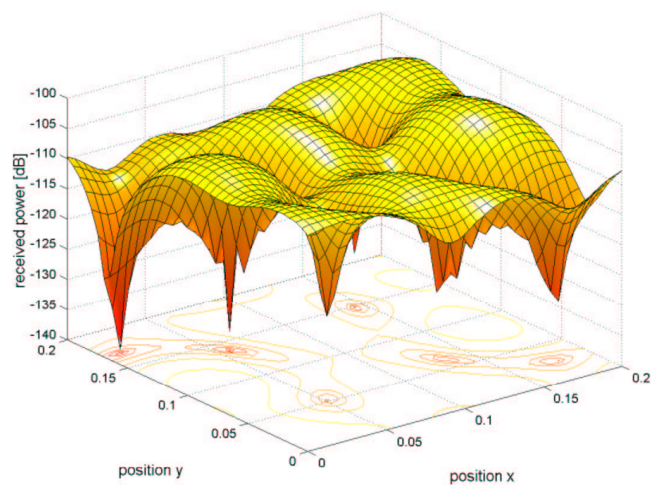
Rádiové rozhraní systému GSM-R se zabývá spojením mezi MS (Mobile Station) a BTS (Base Transceiver Station). GSM-R používá šířku pásma 4 MHz rozdělenou mezi 876-880 MHz pro Up-link a 921-925 MHz pro Down-link a šířku pásma jednotlivých kanálů 200 kHz, díky čemuž tento systém disponuje 16 kanály. Některé země využívají ještě dodatečné pásmo pro železnice E-GSM-R s dodatečným ochranným pásmem 200 kHz pro ochranu před rušením pásma E-GSM. Systém využívá modulaci GMSK (Gaussian Minimum Shift Keying). Přenos dat je prováděn v periodických rámcích TDMA s periodou 4,615 ms pro každý nosný kmitočet, kde každý rámec je rozdělen do osmi timeslotů. Timesloty vytvářejí fyzické kanály o délce 577  $\mu$ s. V nich se nacházejí tzv. bursty, což jsou skupiny 148 bitů.

Systém GSM-R funguje ve dvou režimech a to v režimu nečinnosti (idle mode) a režim přiděleného spojení (dedicated mode), přičemž druhý zmíněný nastává, když je mobilní zařízení zapojeno do spojení s přepojováním okruhů (circuit switching). V režimu nečinnosti mobilní zařízení monitoruje síť v reálném čase a skenuje dostupné BTS, aby zjistilo, zda není voláno. [25]

Z pohledu přenosu dat existují sítě s přepojováním okruhů a sítě s přepojováním datových jednotek (paketů). Přičemž sítě s přepojováním okruhů vytváří dedikovanou pevnou cestu mezi partnery dříve, než se přenáší data. Výhodou této cesty je, že jediné zdržení při přenosu informací je doba šíření signálu. Ovšem systém je kvůli trvalé alokaci bez ohledu na provoz neefektivní.

Přepojování paketů naopak nezřizuje trvalou cestu, ale využívá principu mezi-skladů, kde jsou data rozdělena na pakety, které mohou být přenášeny různými cestami a mohou dorazit v jiném pořadí, než byly odeslány. [26]

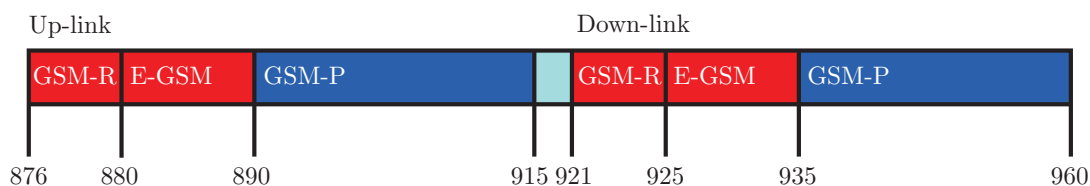
Aby byly splněny potřeby ETCS, je nutné na síť GSM-R aplikovat přísnější QoS (Quality of service) popsaných v EIRENE. Požadavky na kvalitu služeb jsou popsány v Subsetu-093 [28]. Jeho shrnutí je uvedeno v Tabulce 1.2. Jelikož přijímaný výkon je proměnný v čase i v prostoru vlivem vícecestného šíření a Dopplerova jevu. Příklad tohoto vlivu je vidět na Obrázku 1.4.1. Je zřejmé, že v tomto případě se přijímaný výkon místy mění o 30 až 40 dB oproti průměrné hodnotě. Z tohoto důvodu se musí QoS vyhodnocovat statisticky, jak je vidět v Tabulce 1.2.



Obr. 1.7: Příklad kvality kanálu pro fyzický kanál závislý na poloze [27]

Tab. 1.2: Shrnutí požadavků QoS pro GSM-R dle EIRENE [29]

Požadavek	Hodnota
Zpoždění navázání spojení	$< 8,5$ s (95%), $\leq 10$ s (100%)
Chybovost při navázání spojení	$< 10^{-2}$ (100%)
Míra ztráty spojení	$< 10^{-2}/h$ (100%)
Zpoždění přenosu uživatelských dat	$\leq 0,5$ s (99%)
Doba rušení přenosu	$< 0,8$ s (95%), $< 1$ s (99%)
Období bezchybného přenosu	$> 20$ s (95%), $> 7$ s (99%)
Zpoždění registrace do sítě	$\leq 30$ s (95%), $\leq 35$ s (99%), $\leq 40$ s (100%)
Doba sestavení hovoru	$\leq 10$ s (100%)
Doba sestavení tísňového hovoru	$\leq 2$ s (100%)
Délka trvání přenosových chyb	$< 1$ s (99%)



Obr. 1.8: GSM-R spektrum

### 1.4.2 GSM-R BTS

GSM-R běžně využívá vyhrazené stožáry základnových stanic umístěné poblíž železniční infrastruktury. Tyto stožáry jsou typicky vysoké od 20 m do 30 m. Vzdálenost mezi těmito základnovými stanicemi je obvykle v rozmezí 4 až 15 kilometrů, ovšem to na konvenčních tratích a koridorech ne vždy zaručí určitou míru redundance. Nicméně na tratích VRT (vysokorychlostních tratích) bude muset být v budoucnu redundance zaručena. Díky tomu je GSM-R klíčovým prvkem pro modernizaci železničního provozu, zvyšování bezpečnosti a optimalizaci komunikace mezi všemi účastníky železniční dopravy.

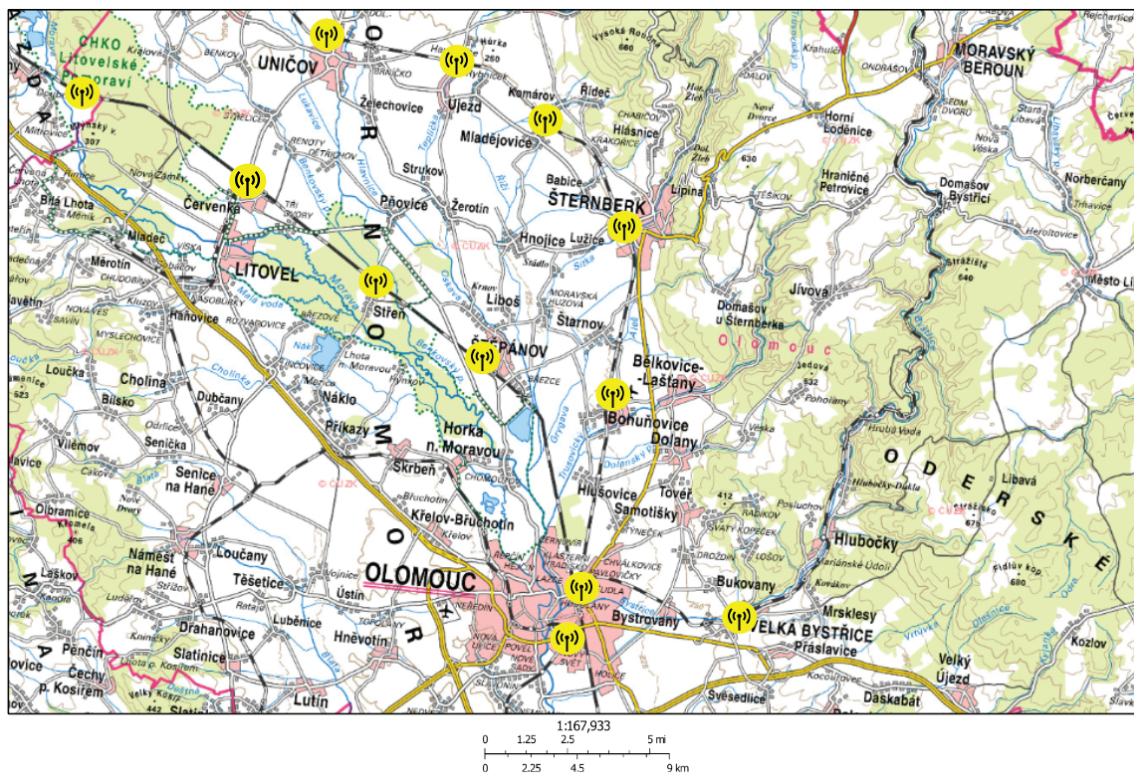


Obr. 1.9: GSM-R BTS

Zástavba BTS (Base Transceiver Station) kolem železnic je situována výhradně v okolí tratí a snahou je budování zástavby na pozemcích Správy železnic. To ztěžuje rádiové plánování a pokrytí tratí rádiovým signálem, které právě komplikuje reliéf



trati samotné i okolní krajinný ráz. V okolí první zprovozněné trati v České republice s výhradním provozem pod systémem ETCS z Olomouce do Uničova, je prostředí velmi rovinnaté a bez překážek (mimo městskou zástavbu v Olomouci). Traťové úseky jsou v okolí Olomouce rovinnaté a geograficky řešené tak, že jsou blízko sebe a jsou téměř paralelní, jak je vidět v Obrázku 1.10. To má za následek, že se vlivem směrovosti antén na BTS dostane na vozidlovou anténu silný signál ze sousední tratě směrem na Štěpánov a Českou Třebovou. Tím pádem se může stát, že se anténa připojí k jinému úseku RBC (Radiobloková centrála), přičemž každá cesta má předem dané, jaké jsou její sousední stanice RBC, se kterými má definovaný handover. Tudíž se anténa snaží připojit na sousední RBC ve směru na Štěpánov, i přestože se od této cesty vzdaluje a kvůli tomu nedokáže navázat spojení. Tato situace se vyhodnotí jako chyba spojení. Jedna z možností, jak tento problém vyřešit, je takzvaný „záchranný handover“<sup>8</sup>, jenž toto řešení by přineslo více problémů než výhod. Jelikož by mohl vzniknout takzvaný „ping-pong“ mezi dvěma RBC okruhy.

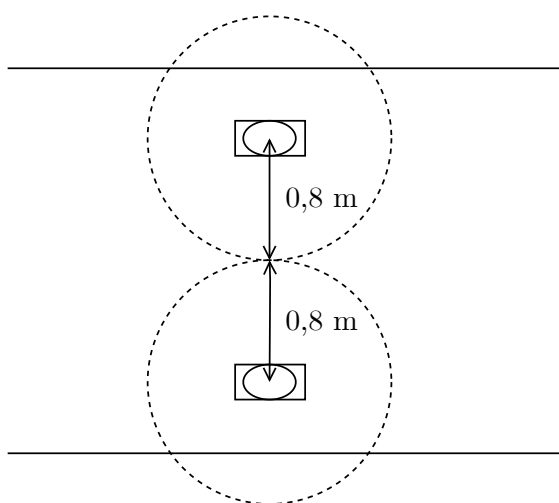


Obr. 1.10: Pokrytí v okolí Olomouce

<sup>8</sup>Schopnost systému připojit se na jiné RBC než na definované sousední na trase.

## 1.5 Antény na železnici

Antény se instalují na střechy vozidel zpravidla dle uvážení dodavatele. Jedna z věcí, kterou se výrobci řídí, je znázorněna na Obrázku 1.11, kde je naznačeno, že v přímém okolí antény (0,8 metru kolem) by neměla být žádná jiná anténa či kovová překážka. Jelikož v České republice není přijatá žádná norma na RSC (Radio System Compatibility) testy (stav k 2024, plánuje se definice nových RSC testů), dodavatelé dodržují primárně požadavky výrobce antény z datasheetu, kde výrobce uvádí, že anténa by měla být co nejblíže OBU. Technik při oživování zařízení provede pouze test impedančního přizpůsobení měřením PSV (poměr stojatých vln). Měření požadavků EIRENE na izotropní zářič se při funkčních testech neprovádí.



Obr. 1.11: Minimální vzdálenost mezi anténami

Ze specifikací EIRENE je úroveň pokrytí definována jako intenzita pole na anténě na střeše vozu a předpokládá se izotropická anténa.

### " 3.2 Pokrytí

3.2.1 Při plánování sítě je úroveň pokrytí definována jako pole síly signálu u antény na střeše vlaku (nominálně ve výšce 4 m nad kolejí). Předpokládá se izotropní anténa se ziskem 0 dBi. Toto kritérium bude splněno s určitou pravděpodobností v oblasti pokrytí. (Cílová úroveň výkonu pokrytí závisí na statistických fluktuacích způsobených skutečnými podmínkami šíření) [30]."

V České republice se zavádí úroveň L2, která vyžaduje nepřetržité spojení OBU s RBC. V definici QoS (Quality of Service) systémových specifikací GSM-R [31] je

definovaná doba, jak dlouho může trvat handover. Proto je nutné hnací vozidlo vybavit dvěma anténami. Handover mezi dvěma BTS, kdy každá náleží jiné radioblokové centrále ETCS (RBC ETCS), pak probíhá následovně:

- 1) hnací vozidlo jedoucí pod dohledem RBC "A" komunikuje přes jednu datovou anténu;
- 2) na hranici dvou RBC hnací vozidlo přejíždí balízu příkazující navázání spojení s BTS přidružené k následné RBC "B"
- 3) po navázání spojení komunikuje jedna datová anténa s RBC "A" (stále dohlížející na jízdu vlaku), zatímco druhá datová anténa již komunikuje s RBC "B" (přešla z IDLE módu do DEDIKOVANÉHO)
- 4) přejetí další balízové skupiny přikáže OBU provést soft-handover, který je díky již navázanému spojení s RBC "B" pomocí druhé antény rychlý i při větších rychlostech
- 5) dohled jízdy hnacího vozidla je předán RBC "B" a spojení s RBC "A" pomocí první z antén je rozvázáno.

### 1.5.1 Průjezdny profil

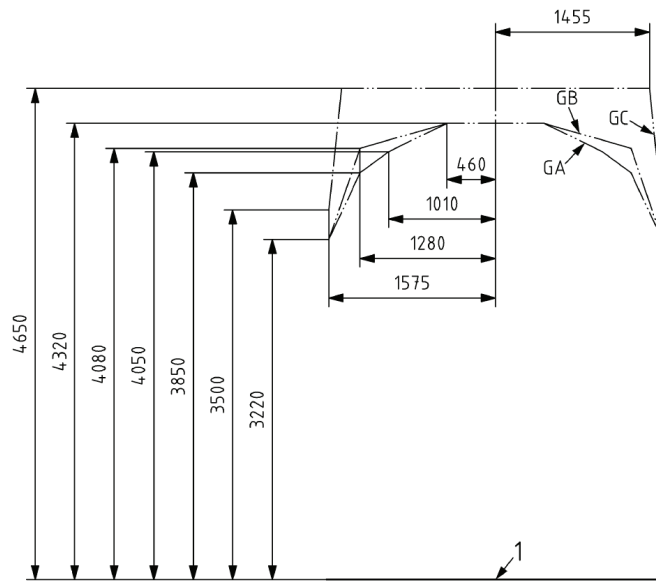
Z nevhodného umístění antén na některých vozidlech mohou nastat problémy se zářením do směru následující BTS. Jelikož se stanice BTS pro síť GSM-R umísťují podél tratí, mohou na některých úsecích vznikat problémy s handoverem. Když je další BTS rovněž ve směru trati, tak je možnost, že se OBU připojí na sousední BTS na jiné trati, která ovšem nemá definovaný handover s následující BTS ve směru jízdy, protože cloněná anténa na střeše svým ziskem zvýhodňuje příjem z bočních stran, viz. obrázek 1.10. Je důležité, aby anténa měla všesměrový vyzařovací diagram a nezvýhodňovala některé směry. Pokud anténa nesplňuje požadavek na všesměrovost a nedokáže navázat spojení do definovaného časovače, jak je zmíněno v 1.2.2, OBU tento stav vyhodnotí jako chybu spojení a začne nouzově brzdit.

Řešením by bylo dát anténu výše, než je výbava na střeše. Ovšem to u většiny hnacích vozidel nejde kvůli tomu, že fyzické rozměry vozidla jsou na hranici maximálního povoleného průjezdného profilu definovaného normou ČSN EN 15273-1+A1 [32] viz. Obrázek 1.12. Mimo tento průjezdný profil nesmí nic kromě sběrače proudu vyčnívat a případná úprava naráží na legislativní limity.

### 1.5.2 Typy antén na železnici

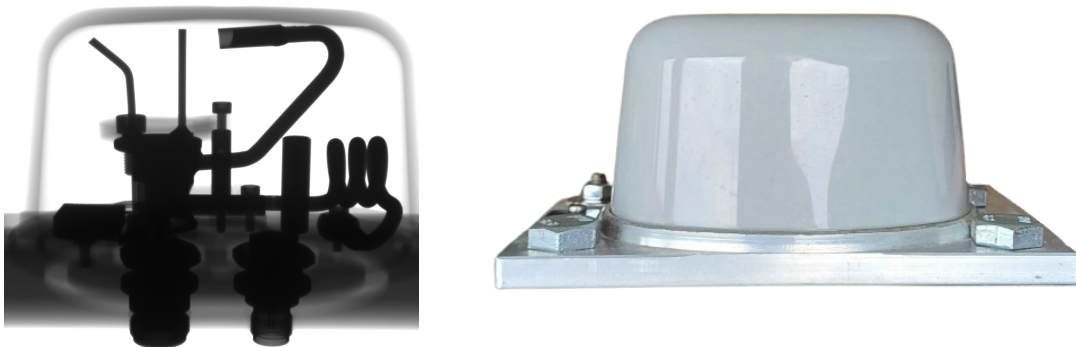
Pro ETCS se používají v Česku antény hlavně dvou výrobců (Hubner & Suhner, Polo Marconi). Jelikož například mobilní terminál RIU-ETCS 5E vysílá až 8 W [33], musí být vnitřní struktura odlišná od běžných sharkfin antén





Obr. 1.12: Referenční čáry statických hraničních čar GA, GB a GC [32]

použitých například v automobilovém průmyslu. Pro představu, jak vypadá vnitřní struktura, byl proveden rentgen antény od výrobce Polo Marconi QDBLUD1 [45].



Obr. 1.13: Anténa QDBLUD1 a její vnitřní struktura

Z rentgenu je vidět, že anténa obsahuje několik modifikovaných a tvarovaných dipólů, jenž jsou přizpůsobeny pro různá pásma, ve kterých anténa funguje. K anténě je přidána spirála jako obvod zkratu, který anténu chrání před poškozením vysokým napětím při pádu troleje na střechu hnacího vozidla. Dále je vidět, že polykarbonátový obal je pouze skořepina pro ochranu struktury.

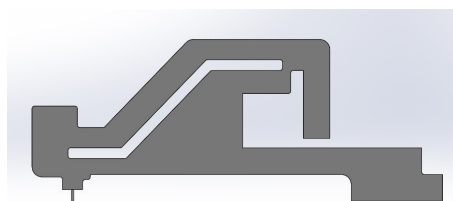
Další možností, jak mohou být realizovány antény pro drážní vozidla, je pomocí modifikované invertované F antény. Modifikace spočívá v přidání dalších ramen pro

docílení vícepásmovosti, dále slotem pro širší pásmo přizpůsobení a pomocí pahýlu nastavení impedančního přizpůsobení [35]. Příklad struktury této antény je vidět v Obrázku 1.14.

Dále bylo provedeno srovnání antén z různých vědeckých článků a antén, které se instalují přímo na drážní vozidla v Tabulce 1.5.2. Je vidět, že veškeré antény jsou všesměrové (omnidirectional) a mají podobný zisk kolem 5 dBi.

Tab. 1.3: Rešerše porovnání různých struktur vozidlových antén

zdroj	struktura	zisk	charakteristika	pásma
[36]	PIFA	2,86 dB	všesměrová	USPCS, UMTS, ISM, WLAN
[37]	PIFA	2,6 dB	všesměrová	GSM 900 MHz, 1800 MHz, UMTS, WLAN
[38]	PIFA	-	všesměrová	LTE, GPS, WLAN
[39]	PIFA	2,28 dBi	všesměrová	LTE, 5G
[40]	dipól	4,27–9,82 dBi	všesměrová	GSM, LTE, Wi-Fi
[41]	flíčková	4,89 dB	všesměrová	sub 6 GHz
[42]	PIFA	-	všesměrová	LTE
[43]	-	2 dBi	všesměrová	UHF-GSM/R
[44]	-	0-2 dBi	všesměrová	UHF-GSM-R
[45]	-	5,167 dBi	všesměrová	GSM, DCS, UMTS
[46]	-	6 dBi	všesměrová	GSM 900 MHz, 1800 MHz, UMTS, WLAN
[47]	-	6 dBi	všesměrová	GSM-R
[48]	-	5 dBi	všesměrová	GSM 900 MHz, 1800 MHz, UMTS, WLAN



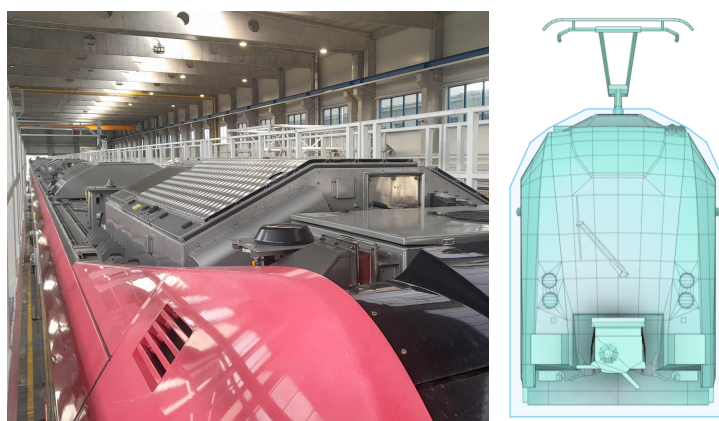
Obr. 1.14: Vnitřní struktura invertované F antény [42]

## 1.6 Aspekty zástaveb drážních vozidel

### 1.6.1 Umisťování antén na drážní vozidla

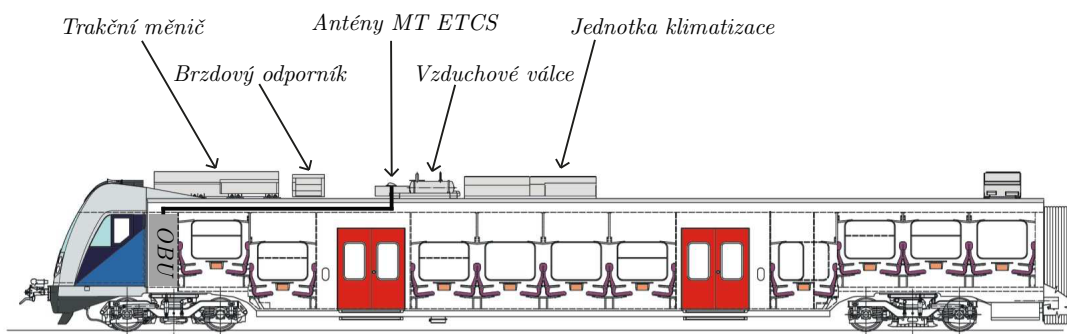
Například na vozech Škoda 18Ev jsou antény umístěné vedle sebe a v blízkosti kovového krytu klimatizace, trakčního měniče a výbavy EDB (elektrodynamická brzda), nad které antény nepřesahují, jak je vidět na Obrázku 1.16. U těchto nízkopodlažních jednotek je problém s umisťováním díky tomu, že veškerá výbava vlaku musí být kvůli bezbariérovosti a pohodlí cestujících na střeše. Z toho důvodu jsou tyto jednotky svými rozměry na hraně maximálního průjezdného profilu, jak je vidět na Obrázku 1.15. Z důvodů, jež jsou popsány o kapitole výše, tedy vyplývá, že projektanti jsou velmi limitováni možnostmi umístění antén na střechu. Dalším faktorem je snaha o unifikaci výroby. Jelikož jsou tyto jednotky vyráběny ve více variantách, které se liší svou délkou a výbavou na střeše, musela by se pro každou verzi zvlášť upravovat projektová dokumentace pro ideální umístění antén.

Na střechách vlaku totiž nejsou pouze antény sloužící pro datové přenosy GSM-R, ale je jich tu mnoho a z toho důvodu jsou projektanti nuceni dělat určité kompromisy. Větší problém představují drážní vozidla, kde je střecha daleko více zastavěná, jak je vidět na Obrázku 1.17. Na tyto starší lokomotivy (retrofity<sup>9</sup>), u jejichž výroby nebylo uvažováno s umisťováním antén pro datovou komunikaci, jsou projektanti nuceni instalovat stále nové antény pro obsluhu různých systémů. V tomto případě je to několik antén pro analogovou komunikaci MRS a TRS, dále anténa pro GSM datarail, která slouží pro sběr provozních a diagnostických dat z vozidel, jako jsou poloha, rychlost, ujeté kilometry, spotřebovaná energie a podobně. Dále jsou tu 2 antény pro datovou komunikaci systému ETCS, jak bylo popsáno v minulé kapitole a v neposlední řadě antény pro hlasovou komunikaci ETCS.

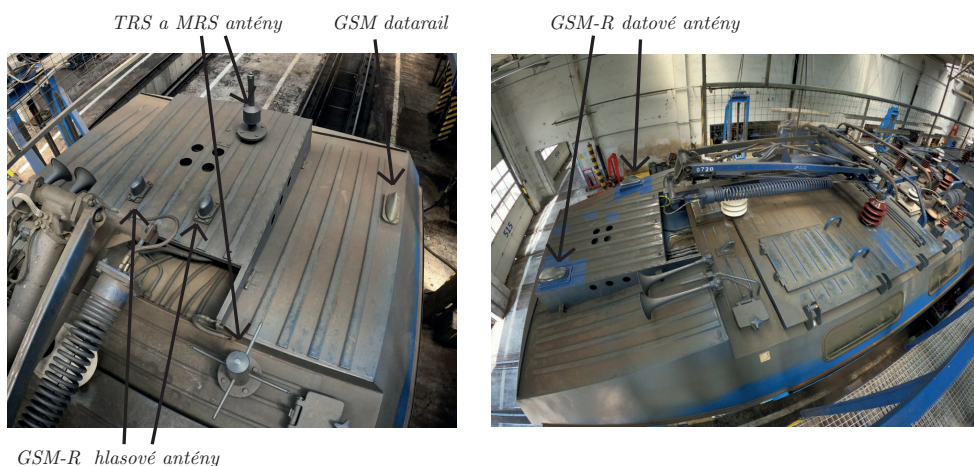


Obr. 1.15: Průjezdný profil GA a zástavba u jednotky Škoda 18Ev RegioPanter

<sup>9</sup>starší lokomotivy na které je zpětně instalováno ETCS



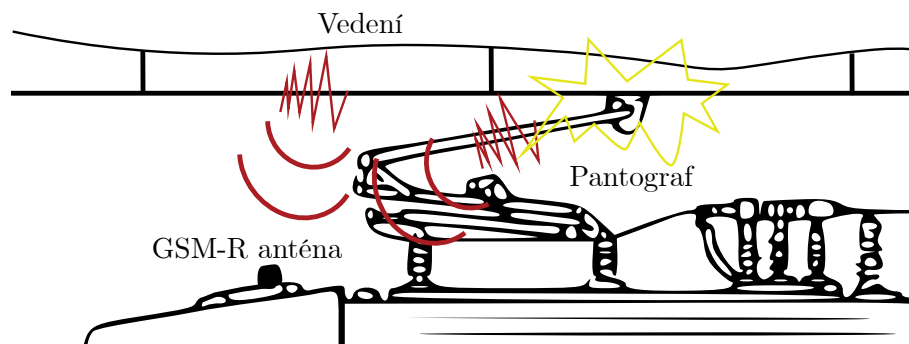
Obr. 1.16: Zástavba na jednotce Škoda 10Ev, řada 651



Obr. 1.17: Zástavba na hnacím vozidle 362.172

## 1.6.2 Vliv troleje

Při pohybu vlaku mají na anténu vliv různé přechodné i trvalé elektromagnetické rušivé jevy. Díky tomu, že jsou většinou GSM-R antény vícepásmové a nejsou striktně selektivní, takže přijímají i jiné pásma než čistě GSM-R. V praxi se tomuto jevu zamezuje pomocí filtrů mezi vozidlovou anténou a mobilním terminálem v OBU, o kterém nejsou veřejně data k dispozici. V článku [49] je uvedeno, že systém GSM-R je především ovlivněn rušením elektromagnetického pole mezi drátem trakčního vedení a sběračem. Pokud dojde ke špatnému kontaktu mezi drátem trakčního vedení a sběračem, může se objevit elektrický oblouk a tyto prvky se mohou chovat jako antény vysílající EMI (Elektromagnetická Interference), které může GSM-R anténa přijímat viz. obrázek 1.18. Zranitelné je zejména down-link pásmo, jelikož se pohybuje v daleko menších úrovních signálů. Kromě toho systém GSM-R používá frek-



Obr. 1.18: Rušení vlivem pantografu

venční pásma blízká veřejným pásmům GSM-P. Když veřejné BTS stanice používají sousední frekvenční pásma GSM-R, zvyšuje se riziko rušení pro komunikaci GSM-R. Toto se nejvíce projeví v blízkosti měst.

### 1.6.3 Vozy s téměř ideální zástavbou střechy

V České republice ve vlastnictví Správy železnic existují 2 takovéto drážní vozidla, které se používají pro diagnostiku rádiových sítí. Jedním z nich je motorový vůz, jak je vidět na Obrázku 1.19, který vznikl v roce 2014 přestavbou vozu řady 851. Používá hlavně diagnostiku digitálních i analogových rádiových systémů – plnění vyhlášky č. 177/1995 Sb., testů indikátorů horkoběžnosti, diagnostiku národního LVZ, diagnostiku systému ETCS a snímkování návěstidel.

Celkem je na střeše měřicího vozu rozmístěno 17 antén:

- 3 antény pro vozidlovou radiostanici MTR10 (150 MHz, 450 MHz, GSM-R + GPS, GSM-P);
- 2 antény pro datovou komunikaci ETCS;
- 9 antén pro měřicí účely (GSM-R, TRS, 150MHz);
- 3 antény pro ostatní účely (CDMA, UMTS, komunikace EZS). [50]

Druhým takovým příkladem je tažený vůz, který vznikl už v roce 1995 přestavbou poštovního vozu řady POST-W 2.47. Zajišťuje předprojekční měření, měření během výstavby i po jejím dokončení (pro účely konečného ověření a převzetí díla) a pravidelnou periodickou diagnostiku všech analogových (pásmo 150 MHz, 450 MHz) a digitálních (GSM-R, GSM) rádiových systémů – plnění vyhlášky č. 177/1995 Sb.. Tento vůz ovšem nedisponuje rovnou střechou, ale oválnou, to má dle [54] vliv na vyzařovací charakteristiku antén i na jejich zisk.

V Holandsku například operuje jednotka vyfocená na Obrázku 1.20. Tento vůz



byl také roku 1992 přestavěn z poštovního motorového vozu. V létě 2014 byla jednotka BRT-91 vybavena kryty na střeše, které měly zabránit nepřesnostem měření vlivem vyzařování antén. Za povšimnutí stojí, že podobnou cestou se při realizaci měřicího vozu vydala i Správa železnic, která výbavu taky zakryla plechem a srovnala celou výbavu střechy do roviny. V této práci budou tedy tyto vozy brány jako ideální případ pro srovnání.



Obr. 1.19: ÚDZRT ERTMS samostatný motorový vůz [51]



Obr. 1.20: Eurailscout Motorpost Plan mP BRT-91 [52]



Obr. 1.21: Tažný vůz pro měření rádiových sítí

## 2 Praktická část

### 2.1 Měření reálné antény

Měřila se anténa QDBLUD1 od výrobce Polo Marconi [45], jenž se instaluje na hnací vozidla řady 362/363, jak je vidět na Obrázku 2.1.



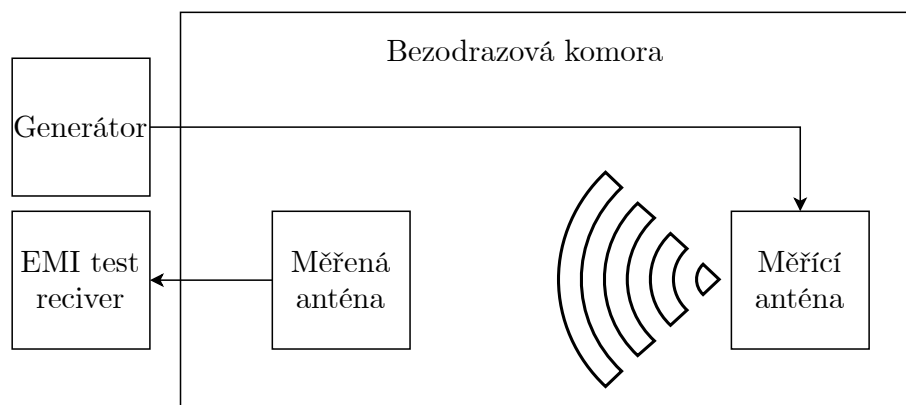
Obr. 2.1: Zástavba antén na voze 362 019 - 2

Měření proběhlo ve dvou variantách, jednou přímo v bezodrazové komoře, kde se měřilo vyzařování v E a H rovině, S11 parametr a poté i přímo při provozu na lokomotivě 362 113 - 3, kde se měřilo spektrum.

#### 2.1.1 Měření v ideálních podmínkách

##### Měření v bezodrazové komoře

Měřil se příjem na měřené anténě a jako vysílací anténa se použila měřicí anténa HL 562Z1 s vysílacím generátorem Rohde & Schwarz SML03 Signal Generator 9 kHz To 3,3 GHz. Signál z měřené antény se měřil pomocí Rohde & Schwarz ESU26 EMI Test Receiver 20 Hz to 26.5 GHz. Výsledky byly zpracovány ve vývojovém prostředí MATLAB.



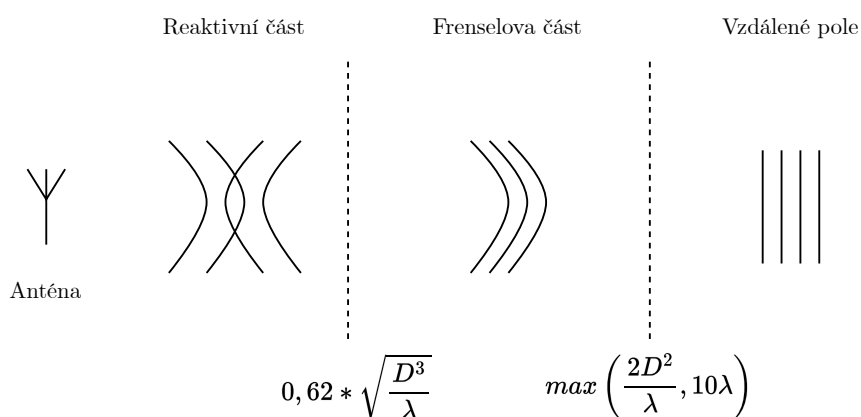
Obr. 2.2: Diagram měření antény

Anténa se měřila v rovině E a H. Anténa byla připevněna na stativu a byla otáčena v ose x o 360°, odečítal se přijímaný signál měřené antény. Anténu se takto dalo měřit díky metodě měření zvané metoda dvou antén, která je založena na principu Friisového přenosového vzorce, který k použití potřebuje 2 známé antény, které jsou skoro totožné ve smyslu impedance a polarizace, přičemž jedna je vysílací a druhá přijímací. Poté se může použít následující vztah (2.1) [56]

$$\frac{P_r}{P_t} = \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \cdot G_t \cdot G_r, \text{ kde } G_t = G_r = G, \quad (2.1)$$

nebo v dB,

$$G_{dB} = \frac{1}{2} \cdot \left[ 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right) + 10 \log_{10} \left( \frac{P_r}{P_t} \right) \right]. \quad (2.2)$$



Obr. 2.3: Určení vzdáleného pole [57]

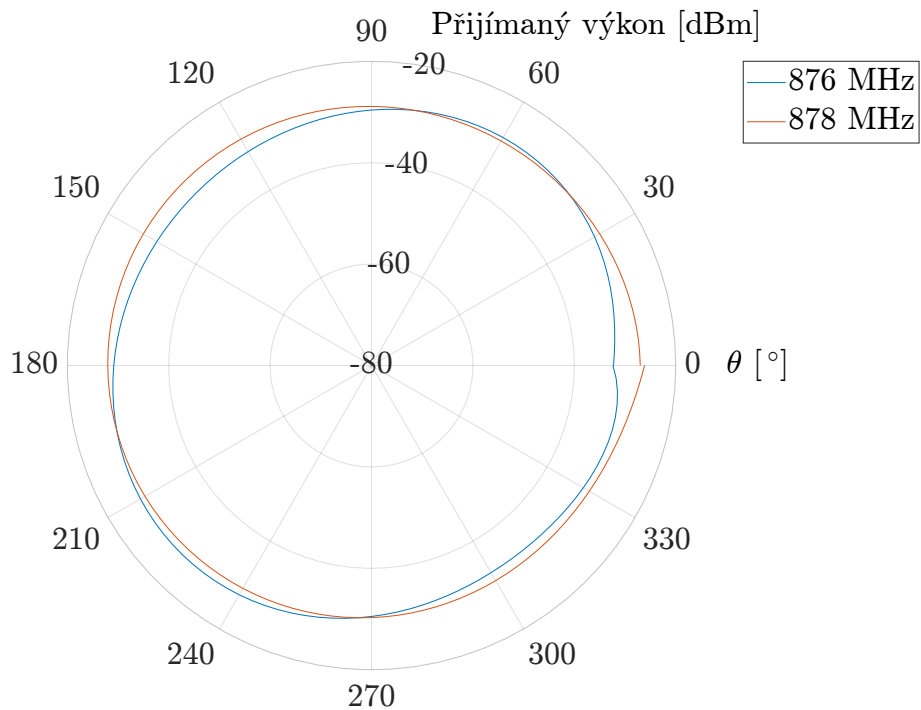


Jediný problém této metody je, že musí být známá vzdálenost mezi anténami  $r$  (což v tomto případě bylo 420 cm), vysílaný výkon  $P_t$ , přijímaný výkon  $P_r$  a frekvence, která se dá vypočítat přes  $f = c/\lambda$ .

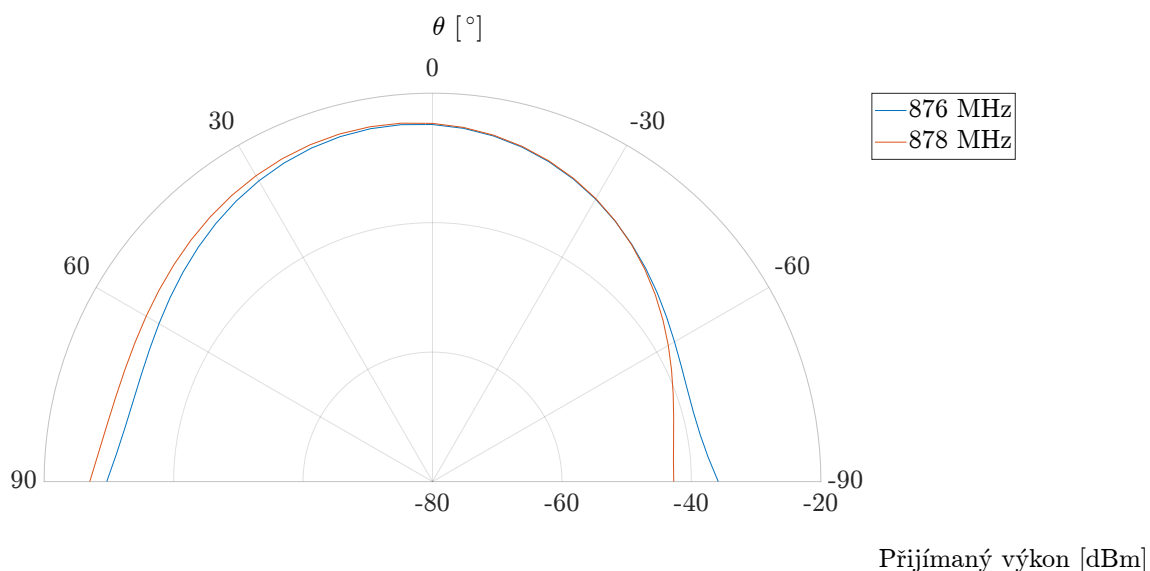
Při měření bylo uvažováno měření ve vzdáleném poli díky vzdálenosti  $r$  mezi měřicí a měřenou anténou. Kde byl zvolen vzorec ze článku [57], v němž se uvádí, že pokud nejsou známy rozměry antény, dá se vycházet z násobku vlnové délky díky použití Rayleighova kritéria.



Obr. 2.4: Měření v bezodrazové komoře



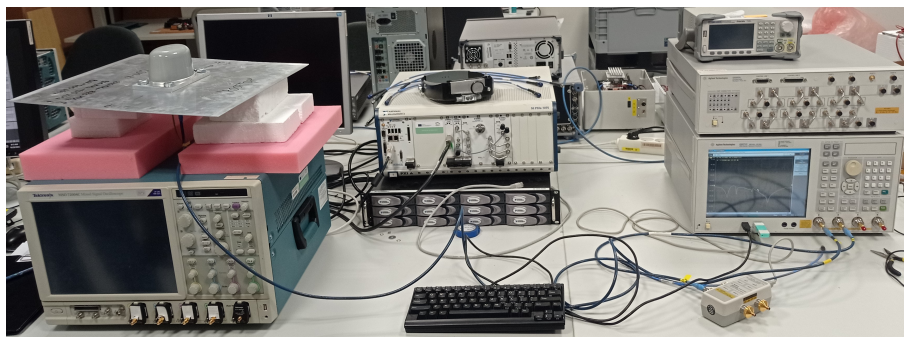
Obr. 2.5: E rovina



Obr. 2.6: H rovina

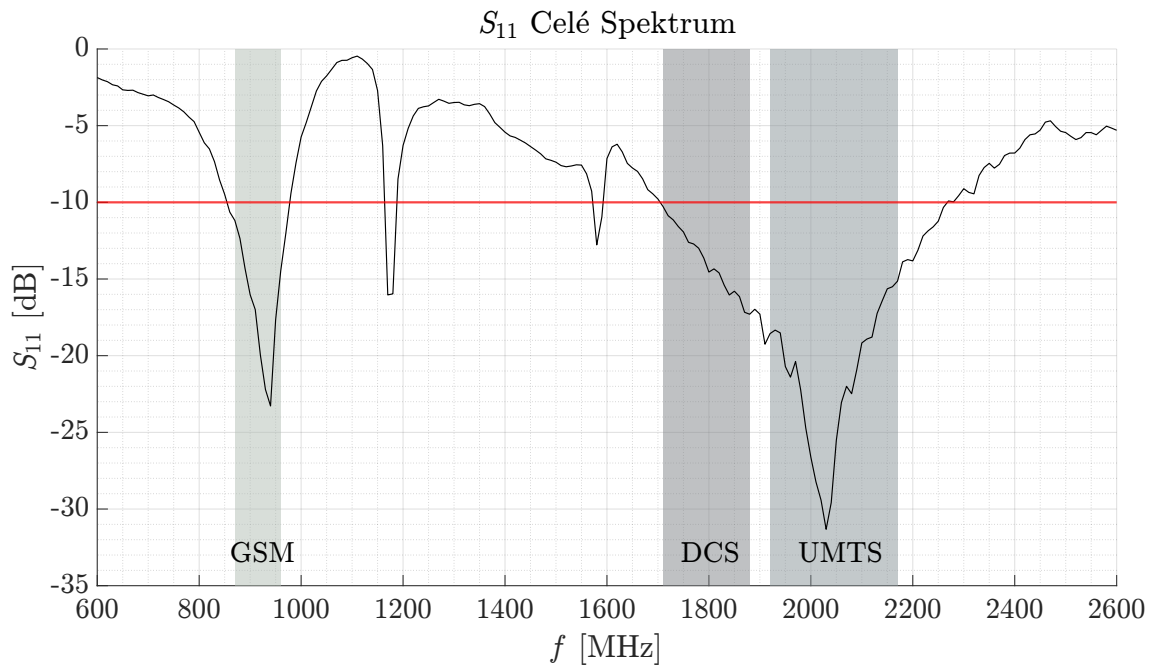
### Měření S11

Měření parametru S11 bylo uskutečněno na přístroji E5071C Agilent Network Analyzer, který byl zkalibrován pomocí N4433A Electronic Calibration Module.

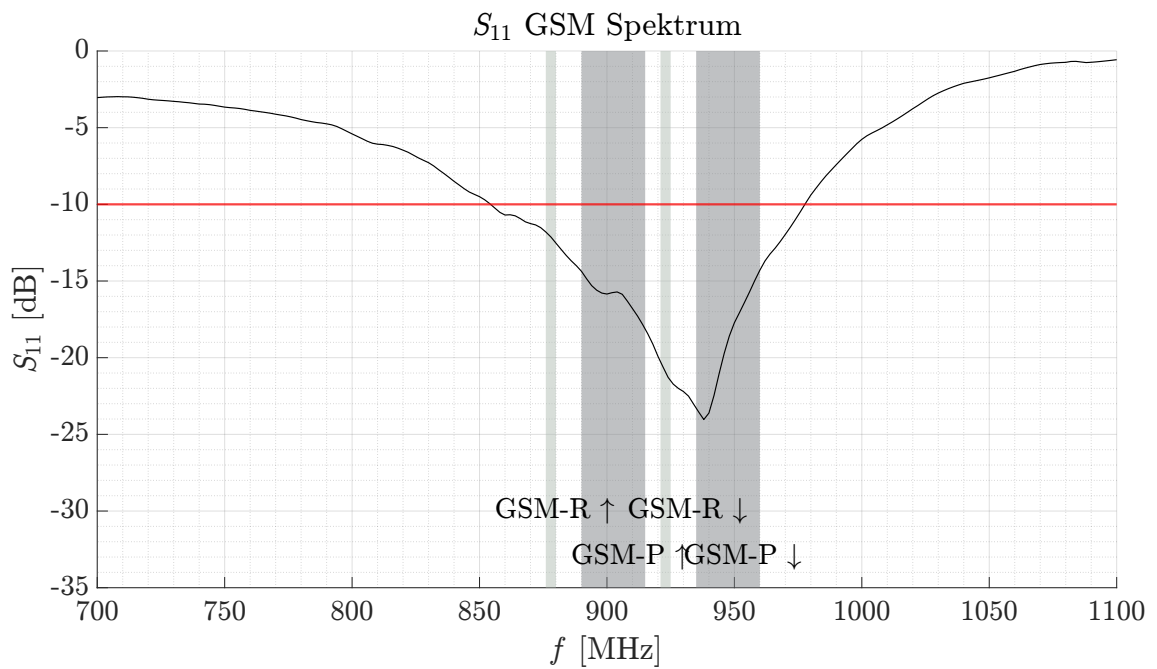


Obr. 2.7: Fotografie pracoviště pro měření S11

Výsledky jsou rozdělené do dvou grafů, kde jeden ukazuje přizpůsobení na celé spektrum dle datasheetu [45] a druhý se zaměřuje na přizpůsobení síti GSM. Z výsledků je vidět, že anténa je přizpůsobená pro pásma GSM, DCS a UMTS.



Obr. 2.8:  $S_{11}$



Obr. 2.9: Detail  $S_{11}$

## 2.1.2 Měření na lokomotivě

Měření proběhlo v depu kolejových vozidel Brno Maloměřice. Měření na lokomotivě 362 113-3 probíhalo zároveň s oživováním a funkčním testem OBU systému ETCS.

Na měření byly použity dva spektrální analyzátoři: Anritsu SiteMaster S332E a Rohde & Schwarz FSH8.



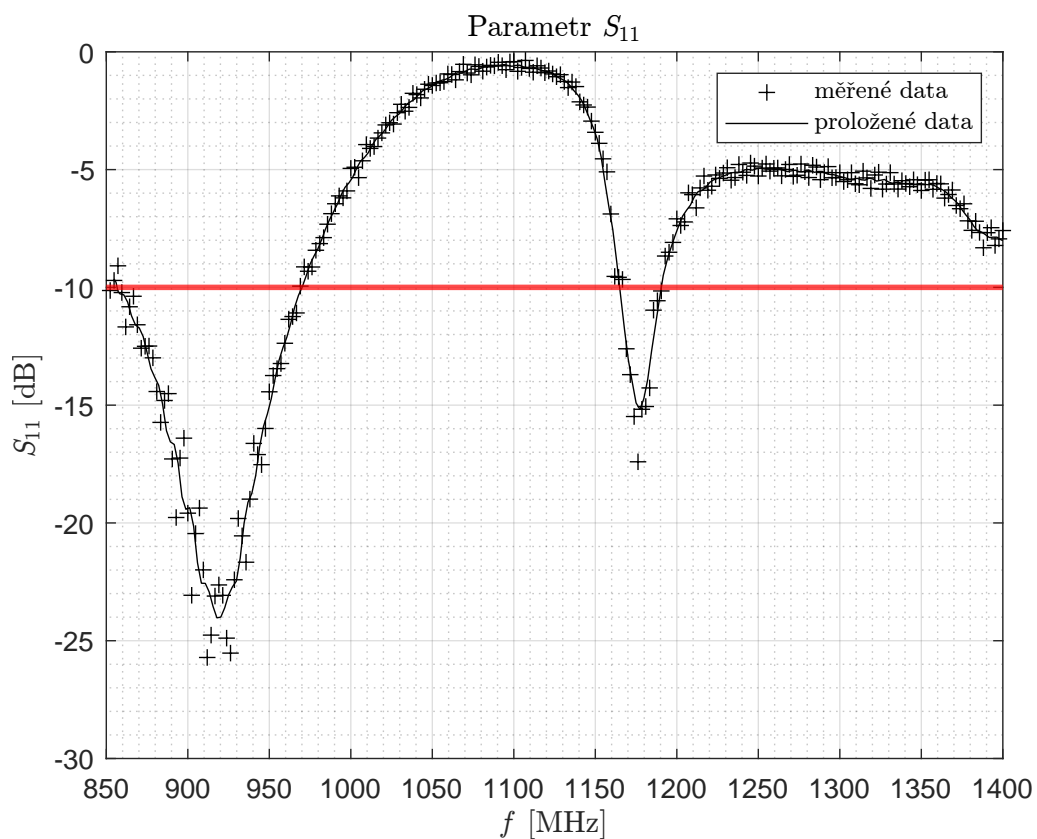
Obr. 2.10: Fotografie přístrojů použitých při měření

Na lokomotivě se připojilo k anténnímu výstupu mobilního terminálu MT2 [58] používaného pro hlasový modul lokomotivní radiostanice. Tento terminál, stejně jako mobilní terminály MT5/MT5e [59] a celá výbava OBU ETCS se nachází ve strojovně lokomotivy, která je při jízdě pod napětím 25 kV/50 Hz. Vstup do strojovny je chráněn koncovým spínačem obsluhovaným dveřmi mezi stanovištěm strojvedoucího a strojovnou [60].

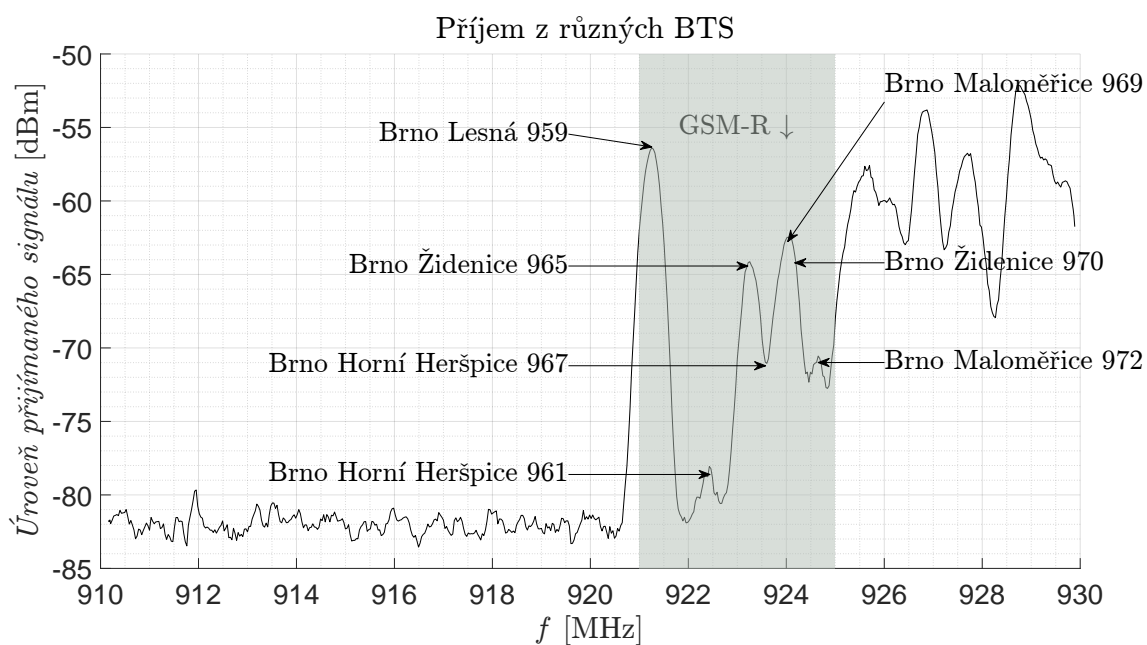
Ze změřených dat pro S11 je vidět podobnost s měřením v ideálních podmínkách viz. Obrázek 2.7.

Na Obrázku 2.12 je vidět síla signálu jednotlivých BTS v Brně, přičemž BTS Brno Židenice a BTS Brno Maloměřice byly umístěny ve směru jízdy lokomotivy a BTS Brno Lesná byla umístěna v bočním pohledu, zhruba kolmo od lokomotivy. Z Obrázku 2.12 je vidět, že nejsilnější signál je přijímán z BTS Brno Lesná, která je právě přímo z boku kolmo na lokomotivu. To může být způsobeno buď nevhodným rádiovým plánováním a nebo to může poukazovat na fakt, že vozidlová anténa zvyhodňuje příjem z určitých směrů. Také je zřejmý odstup signálu od šumu (SNR), který se pohybuje v rozmezí od 5 dB do 26 dB.

Cílem toho měření bylo ověření přizpůsobení antény na konkrétní zástavbě, úrovně přijímaného signálu z okolních BTS a hladiny šumu.



Obr. 2.11: Parametr  $S_{11}$  měřený na zástavbě



Obr. 2.12: Příjem z různých BTS v okolí Brna FSH8

## 2.2 Simulace antény pro GSM-R pásmo

### 2.2.1 Simulátor Ansys HFSS

HFSS (High-Frequency Structure Simulator) od Ansys je nástroj pro simulaci elektromagnetických polí, který se používá k analýze vysokofrekvenčních a vysokorychlostních elektronických zařízení. Existují různé typy solverů v HFSS, včetně solverů s metodou konečných prvků a hybridních solverů.

Metoda konečných prvků je numerická metoda obecně používaná k řešení diferenciálních rovnic s okrajovými podmínkami. Koncept metody konečných prvků spočívá v rozdělení oblasti na konečně mnoho menších oblastí nazývaných prvky a přiblížení řešení diferenciální rovnice na těchto prvcích pomocí vhodné sady bázevých funkcí. Simulace ve frekvenční oblasti je často výpočetně náročná zejména pro široké frekvenční spektrum, protože je třeba provést samostatné simulace pro každou frekvenci.

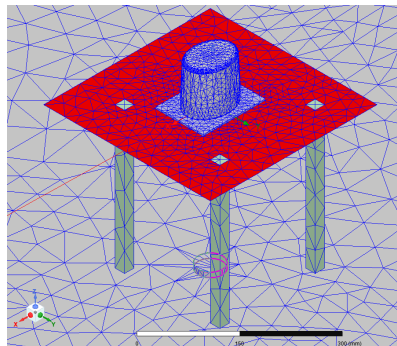
Hybridní řešič kombinuje různé simulační techniky, často zahrnuje metody jak ve frekvenční tak v časové oblasti. Může zahrnovat kombinaci metod, jako jsou Finite Element Method (FEM), Method of Moments (MoM), Finite Difference Time Domain (FDTD) a další. Tento přístup může být výpočetně efektivnější pro komplexní problémy, protože umožňuje použití nejvhodnější metody pro různé části simulovaného systému. Například FEM může být použit pro detailní modelování malých částí, zatímco MoM může být použit pro větší oblasti [53].

Nejobecnější tvar jednorozměrné vlnové rovnice:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \xi \frac{\partial u}{\partial t} + ku = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + F(x, t), \quad (2.3)$$

kde  $c$  je rychlost vlny a  $\xi$  je tlumicí koeficient,  $k$  je externí obnovovací faktor a  $F(x, t)$  je libovolná vnější síla.

Díky dostatečně výkonnému hardwaru byla tedy zvolena přesnější metoda konečných prvků.



Obr. 2.13: Příklad rozdělení oblasti na konečně mnoho menších oblastí



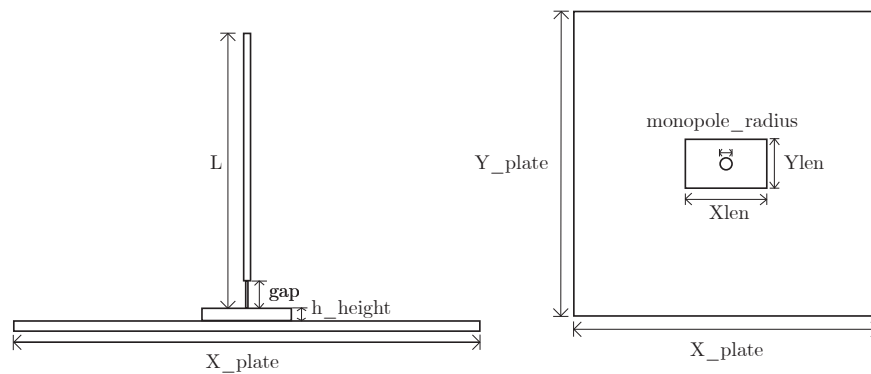
## 2.2.2 Simulace antény

Pro simulace v programu Ansys Electronics Desktop byla zvolena  $\lambda/4$  monopólová anténa kvůli tvaru střechy drážních vozidel a protože monopól, který pracuje nad nekonečnou zemní rovinou, je ekvivalentní konvenční  $\lambda/2$  dipólové anténě. Toto rozhodnutí lze považovat za vhodný přístup k realitě, protože monopóly jsou obvykle instalovány uvnitř aerodynamické struktury. Ve většině případů jsou antény pouze monopólem zabaleným v krytu, aby měly lepší aerodynamické vlastnosti. Nákres je možné vidět na obrázku 2.14. Délka  $L$  byla vypočtena pomocí vlnové délky

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad (2.4)$$

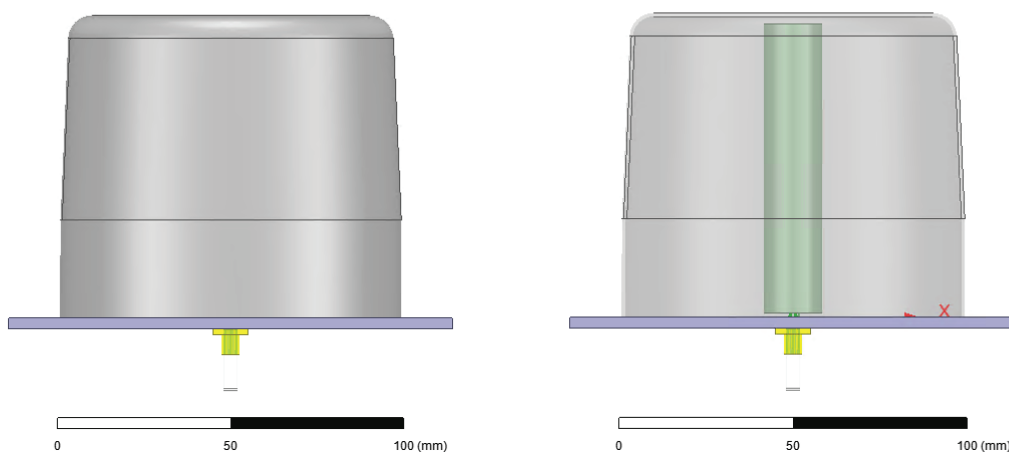
$$L = \frac{\lambda}{4} \quad [\text{m}], \quad (2.5)$$

kde  $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  je rychlost elektromagnetické vlny ve vakuu (potažmo vzduchu), jenž vyšla 0,3261 m. Pro čtvrtvlnný monopól se délka ramene určí dle vzorce (2.5) na 8,15 cm. [54]



Obr. 2.14: Nákres čtvrtvlnného monopólu se čtvercovým reflektorem

Předlohou pro model krytu byla rovněž anténa QDBLUD1, která se instaluje na drážní vozidlo, z jejíž technického listu vyplývá tvar a materiál krytu. Materiál byl zvolen podle informací poskytnutých výrobcem v technickém listu a to jako polyethylen, jehož relativní permitivita je  $\epsilon_r = 2,25$  a konduktivita  $\sigma = 0 \text{ S m}^{-1}$ . Kryt byl vymodelován dle technického listu výrobce, kde uvádí rozměry a technický nákres celé antény. Dále byl použit SMA RF Jack, který je součástí knihoven HFSS. Na konektor byl vyveden 10 mm dlouhý koaxiální kabel, který je zakončen krátkým válcem, z něhož se vytvořil pomocí exciations wave port. Zemní kovová plocha pro připevnění antény byla vymodelována opět dle technické dokumentace.



Obr. 2.15: Simulovaná anténa

Všechny simulace byly provedeny na počítači, který se skládal z AMD Ryzen 9 5900X 12-Core Processor s rychlostí 3,70 GHz a s 64 GB paměti RAM. Anténa s vypočtenými rozměry byla podrobena parametrické analýze. Na základě této analýzy, byly rozměry optimalizovány pro přizpůsobení rezonanční frekvence 918 MHz (střed společného GSM-R a GSM pásma) s parametrem  $S_{11}$  pod -10 dB, což znamená, že i v nejhorším případě je pouze 10 % vyslaného signálu odraženo.

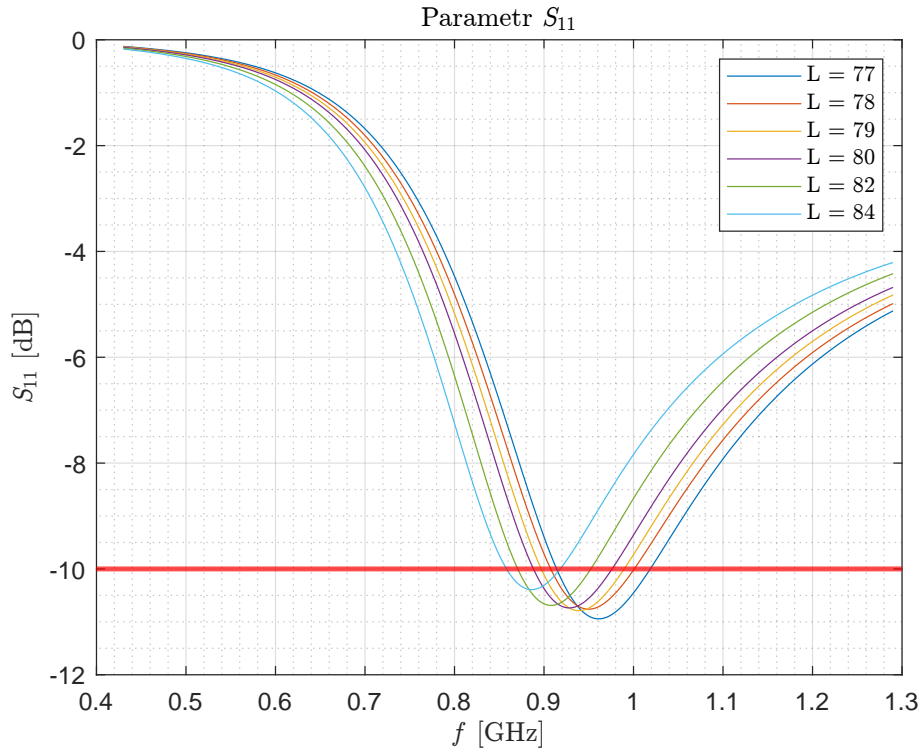
Prvním parametrem analýzy byla délka monopólu  $L$ . Dle očekávání délka monopólu byla zvětšena pro snížení rezonanční frekvence, viz. Obrázek 2.16.

Dále byla provedena parametrická analýza průměru monopólu, kde se ověřilo, že s rostoucím průměrem monopólového zářiče klesá parametr  $S_{11}$  (zlepšuje se přizpůsobení) a tím pádem dochází k rozšíření pásma, viz. Obrázek 2.17.

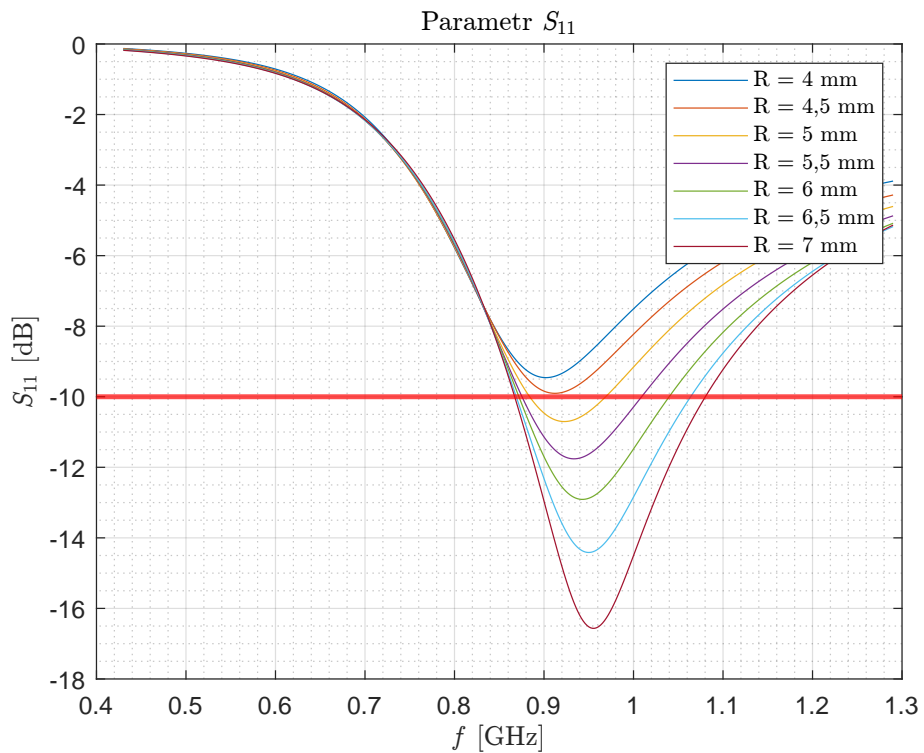
Důležitý rozměr je i velikost reflektoru, který je v praxi na drážních vozidlech 350 mm, což je velikost, kterou výrobce vyžaduje v rámci technické dokumentace. Byla provedena i simulace s rozměrem 500 mm, která však na přizpůsobení neměla markantní vliv, viz. Obrázek 2.20. Menší rozměry již více ovlivňovaly parametr  $S_{11}$ .

V poslední parametrické analýze už byla přítomná zemní plocha o velikosti 350 mm a pevná délka monopólu byla 79 mm. Proměnný byl tedy pouze průměr monopólu, který pro naše potřeby byl nakonec zvolen 7,5 mm, viz. Obrázek 2.19.

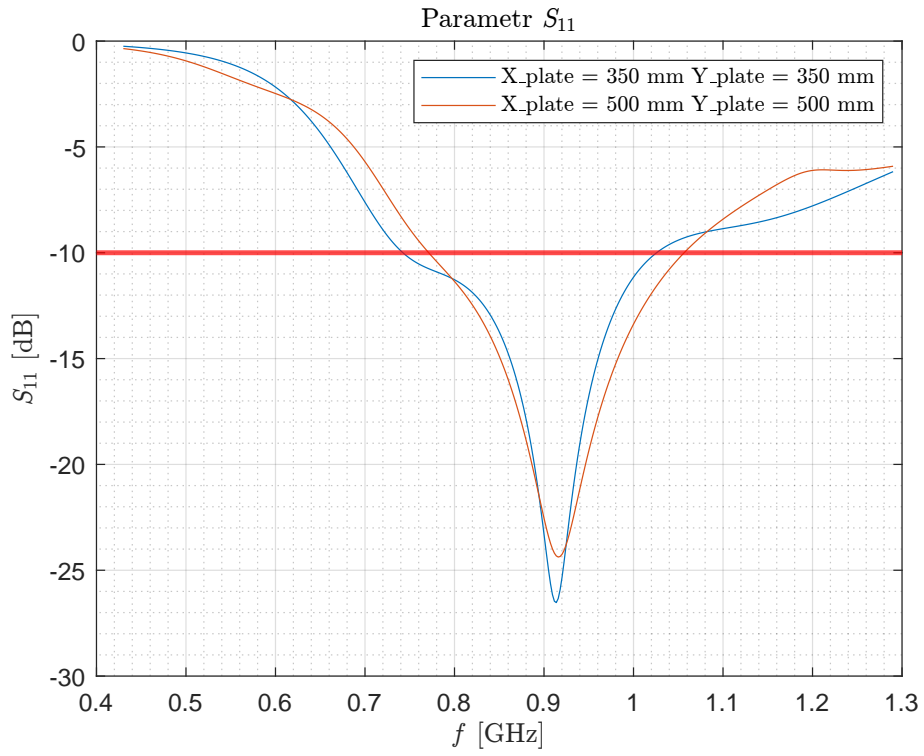




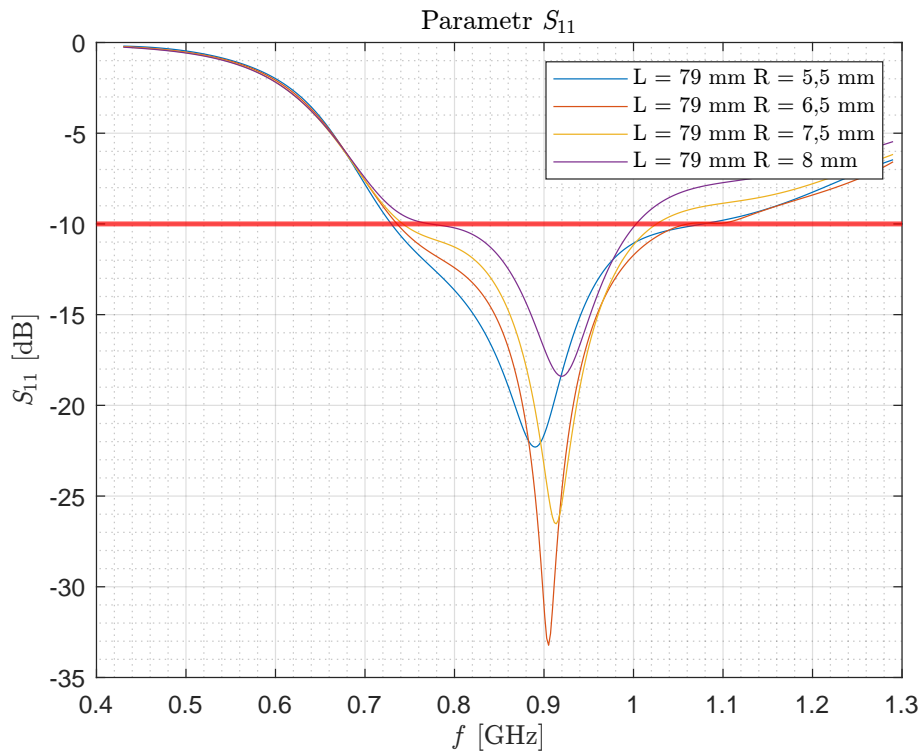
Obr. 2.16: Parametrická analýza rozměru L



Obr. 2.17: Parametrická analýza rozměru monopole\_radius



Obr. 2.18: Parametrická analýza rozměru reflektoru

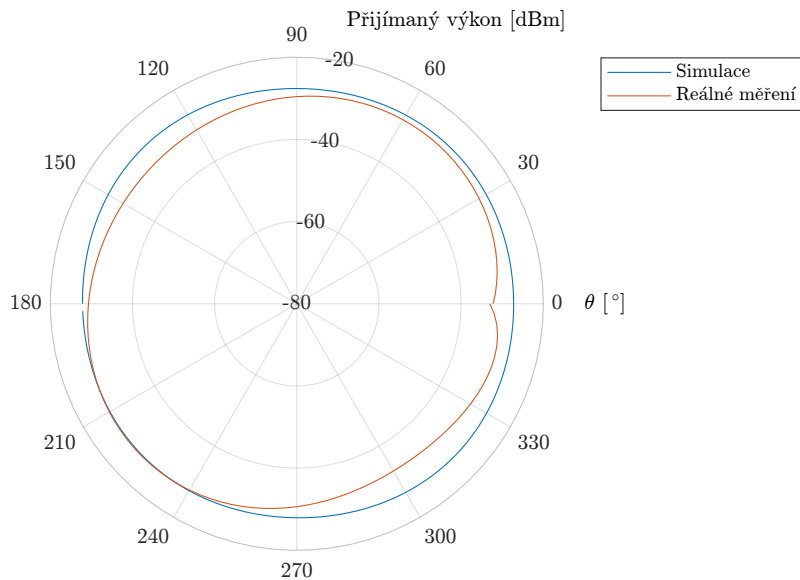


Obr. 2.19: Parametrická analýza rozměrů s přidáním zemní plochy

Tab. 2.1: Finální parametry antény pro simulaci

Název proměnné	Hodnota proměnné
gap	1,2 mm
monopole_radius	7,5 mm
L	79 mm
Xlen	130 mm
Ylen	100 mm
h_height	3,2 mm
X_plate	350 mm
Y_plate	350 mm

Ve vyzařovací charakteristice byly do jednoho polárního grafu vloženy 2 křivky. Jedna, která vyšla ze simulace monopólu a druhá, která byla měřena v kapitole 2.1.1. V E rovině vyzařovací charakteristika vyšla skoro totožná, to je docíleno tím, že vyzařovací charakteristika monopólu je toroid. V H rovině už je rozdíl znatelný, tento graf je v elektronické příloze. U simulované antény jsou pouze dva laloky z důvodu použití pouze základního monopólu, který nezáří do své osy při analýze ve vzdálené oblasti. To by šlo vyřešit nahrazením základního monopólu PIFA (Planar Inverted F Antenna) anténou, která by byla schopná docílit lepších výsledků. Ovšem dle zkušeností z provozu je ideální, aby anténa nejvíce zářila pod úhlem  $30^\circ$  od reflektoru, takže pro simulace byl monopól vyhodnocen jako vyhovující [55].



Obr. 2.20: Diagram vyzařování antény v rovině E

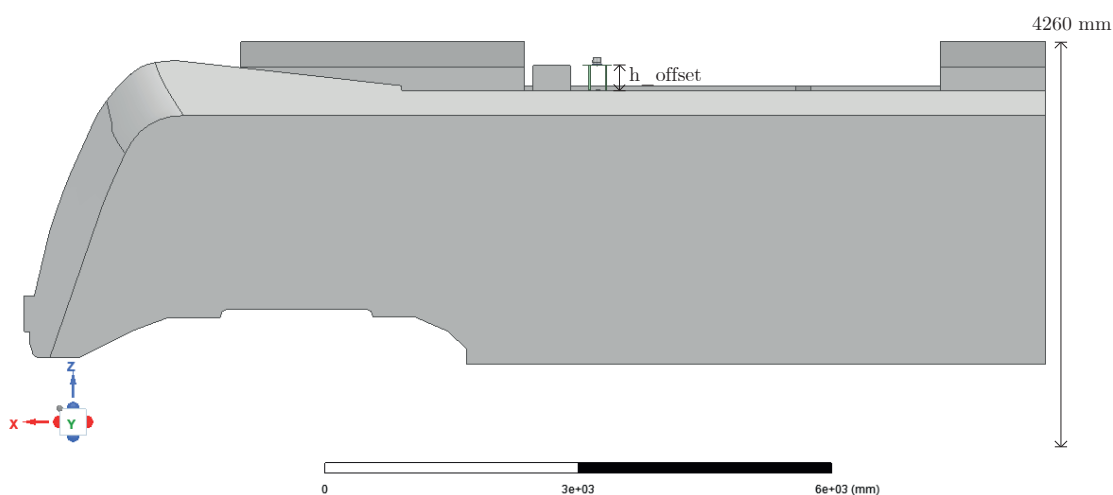
## 2.3 Simulace zástavby vlaku

Jednotky RegioPanter se vyrábí v mnoha sériích, které se liší počtem vozů a množstvím výbavy elektrovýzbroje na střeše. Obecně problematické jsou dvouvozové varianty, které mají střechu více zastavěnou. Pro simulace a ověření současného stavu byly vybrány následující varianty: dvouvozová 15Ev, čtyřvozová 18Ev (Moravia). Tyto jednotky byly zvoleny kvůli jejich hlavní odlišnosti a to je počet vozů. Protože i při odlišném počtu vozů zůstává počet elektrovýzbroje podobný, v případě 15EV jsou dokonce nějaké moduly navíc díky tomu, že je jednotka dvousystémová. Z toho vyplývá, že v případě 15EV je střešní prostor jednotky daleko více zaplněn a pro vhodné umístění antén nezůstává moc prostoru.

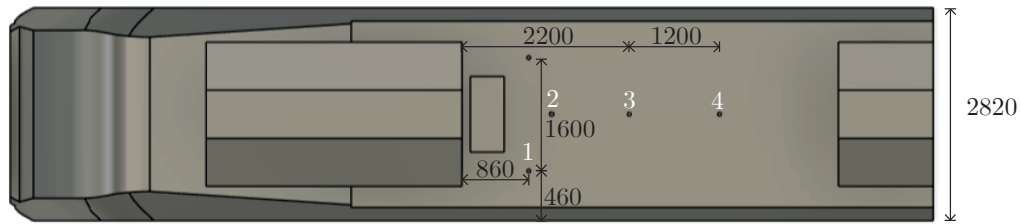
Veškeré polární grafy jsou uváděny v realizovaném zisku v decibelech.

### 2.3.1 Jednotka 18Ev

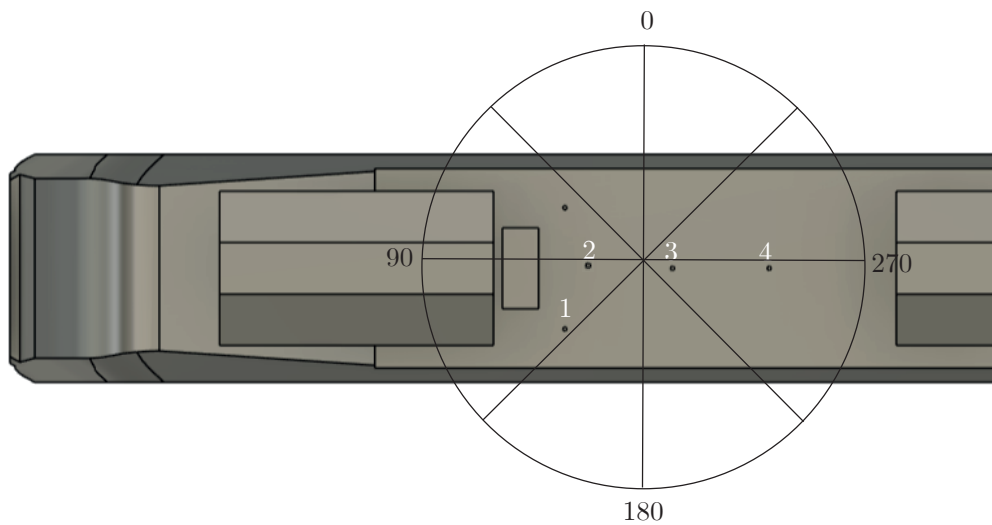
V této části byla provedena důkladná analýza vlivu překážek a pozice antén na vyzařovací charakteristiku. Jak už bylo dříve uvedeno, největší překážkou pro anténu je na jednotkách 18Ev trakční měnič, brzdový odporník a jednotka klimatizace, respektive jejich kryty. V simulacích byla měněna výška podstavy antény  $h_{offset}$  a její pozice na střeše drážního vozidla. Tyto pozice jsou mezi sebou a trakčním měničem vzdáleny 1200 mm viz. Obrázek 2.22. Z obrázku je vidět, že třetí pozice je z hlediska vzdálenosti od překážek největším kompromisem. Jelikož pozice 4 už se opět blíží clonícímu krytu klimatizace.



Obr. 2.21: Jednotka 18Ev z boku



Obr. 2.22: Jednotka 18Ev pohled shora (rozměry v mm)



Obr. 2.23: Vzájemná orientace modelu pro různé úhly  $\phi$  a jejich vyzařovací charakteristiky při simulacích

Pro simulaci byly zvoleny různé výšky antén (konkrétně 150 mm, 300 mm, 500 mm a 600 mm). Výška 300 mm zhruba odpovídá reálnému umístění antény, nicméně technické výkresy jednotky k dispozici nejsou. Zatímco výška 500 mm se nachází na hranici průřezného profilu GA. Výška 600 mm tento průřezný profil přesahuje, což má své specifické komplikace pro použití v reálném provozu. Simulace tedy zahrnují jak standardní tak i hraniční a nadlimitní podmínky, čímž poskytují komplexní pohled na chování antén v různých situacích.

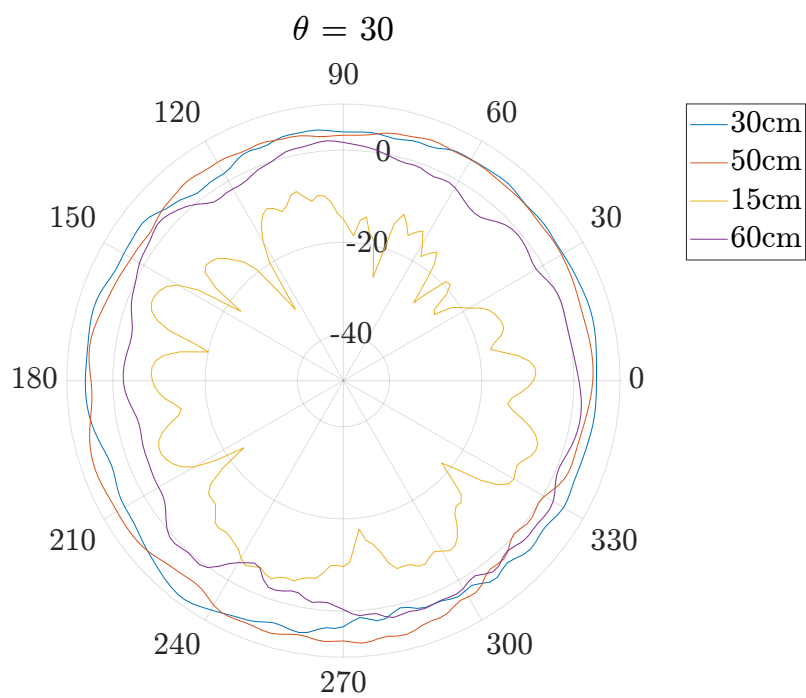
Dále byly vybrány čtyři různé pozice pro umístění antén. První pozice odpovídá současnému umístění antén na jednotkách 18Ev. Druhá, třetí a čtvrtá pozice představují nové možné způsoby instalace, které jsou momentálně v testovací fázi.

Ze zpracovaných výsledků jsou patrné rozdíly vyzařovací charakteristiky pro různé výšky antén, ale i pro jejich umístění. V prvních třech polárních grafech je vidět, že výška podstavce 150 mm je naprosto nevyhovující, jelikož je vyzařovací

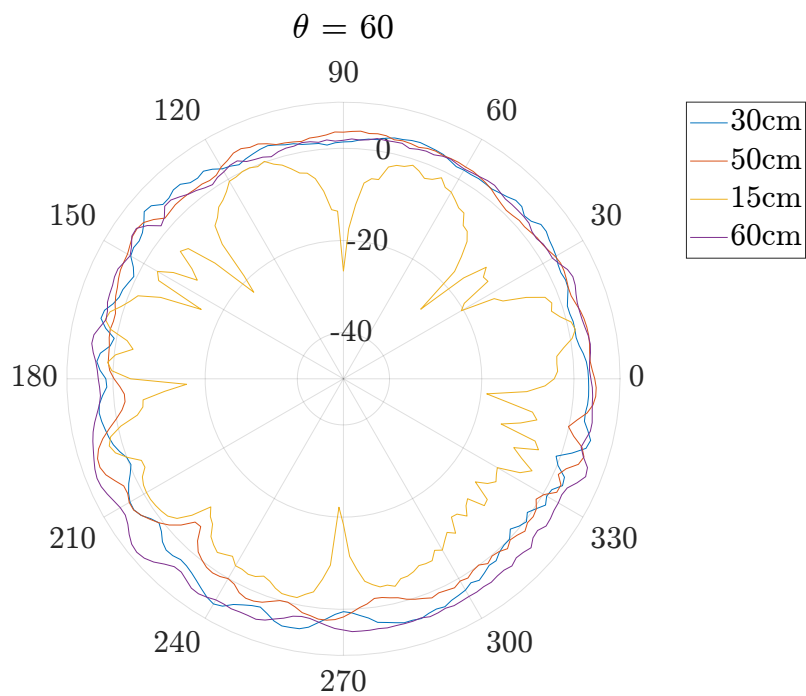
charakteristika velice nekonzistentní oproti ostatním výškám podstavce. U grafu v Obrázku 2.24 jsou vidět i nekonzistentnosti pro ostatní křivky, tento rozdíl mezi maximální hodnotou a minimální, zvaný margin, by z praxe neměl u ideální všesměrové antény přesáhnout 3 dB, tato hranice není nikde v literatuře zmíněná. Požadavky EIRENE pouze vyžadují všesměrový zářič, při praktickém návrhu se ovšem berou 3 dB jako ve většině případů vyhovující. Na Obrázku 2.25 je vidět, že pro výšku 150 mm antény nad střechou vozidla se může místy charakteristika podobat „pásmové zádrži“ pro určité úhly. U Obrázku 2.26 je vidět, že když je vyzařovací charakteristika pro  $\theta = 90^\circ$ , neboli rovnoběžná se střechou, tak se nejméně podobá kružnici, kterou by ideální všesměrová anténa měla opisovat a tím pádem zvyhodňuje určité směry. Detail marginu u tohoto grafu je poté vykreslen na Obrázku 2.27, kde je zřejmé, že margin pro anténu s podstavcem vysokým 300 mm je 16,2 dB oproti podstavci s výškou 500 mm (kdy je anténa na hranici průjezdného profilu) 12,6 dB, což je rozdíl 3,6308 dB mezi marginem jednotlivých antén. Ovšem ani jedna z variant stále nedosahuje požadovaného marginu, tudíž se ani vzdáleně nepřibližuje definovanému požadavku systémovými specifikacemi viz. Kapitola 1.5.

Dále bylo provedeno srovnání různých pozic, na které se dají antény instalovat. U grafů byla použita stejná výška a to v praxi používaných 300 mm. Z toho důvodu mají následující grafy odlišné měřítko než předchozí. Z Obrázku 2.28 je očividné, že dosud používaná *Pozice 1*, má největší margin. U Obrázku 2.30 je vidět, jak při pohledu pod velmi malým úhlem vzhledem k reflektoru (který může nastat pokud je anténa BTS velice vzdálena), anténa ve své vyzařovací charakteristice zvyhodňuje příjem z bočních stran ( $\phi = 0^\circ$  a  $180^\circ$ ) oproti příjmu ve směru čela vlaku, kde bude ovšem pravděpodobněji umístěna nejbližší BTS. V Obrázku 2.31 je srovnání marginu pro *pozici 1* a *pozici 3*. Zde je zcela patrné, že *pozice 3* má daleko nižší margin a je tedy daleko více vhodná pro instalaci antén. Ovšem stále se tato pozice nedokáže přiblížit požadovaným 3 dB.

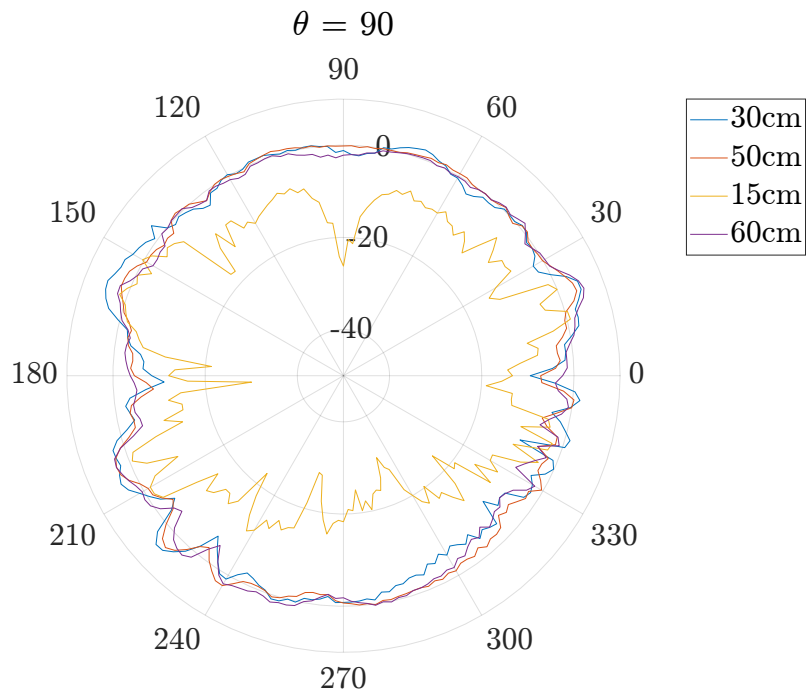
Na posledních Obrázcích 2.32 a 2.33 je zobrazená elektrická intenzita v závislosti na vzdálenosti od antény. Byla zvolena spojnice mezi vozidlovou anténou a domnělou BTS, jenž je 1 km daleko, vysoká 25 m a postavena 5 m od kolejiště. Z tohoto důvodu je úhel polyline definované v HFSS, podle které se vykresluje intenzita elektrického pole, vypočten na  $\theta = 1,348^\circ$ . U Obrázku 2.33 je vidět, jak elektrická intenzita prudce klesá, když polyline reprezentující přímou viditelnost mezi vozidlovou anténou a anténou BTS prochází skrz překážku (trakční měnič). Rozdíly ve vzdálenosti jednotlivých křivek jsou dány odstupem simulovaných pozic mezi sebou. Dá se vysledovat, že signál se šíří i mnohacestným šířením, což není ovšem pro GSM-R úplně žádoucí z důvodu časového zpoždění. Také je zde vidět, jak je průběh zvlněný, což je způsobeno vlnoplochami a interferencemi způsobenými značnými odrazy od překážek na střeše (kryty měničů, klimatizace, ...).



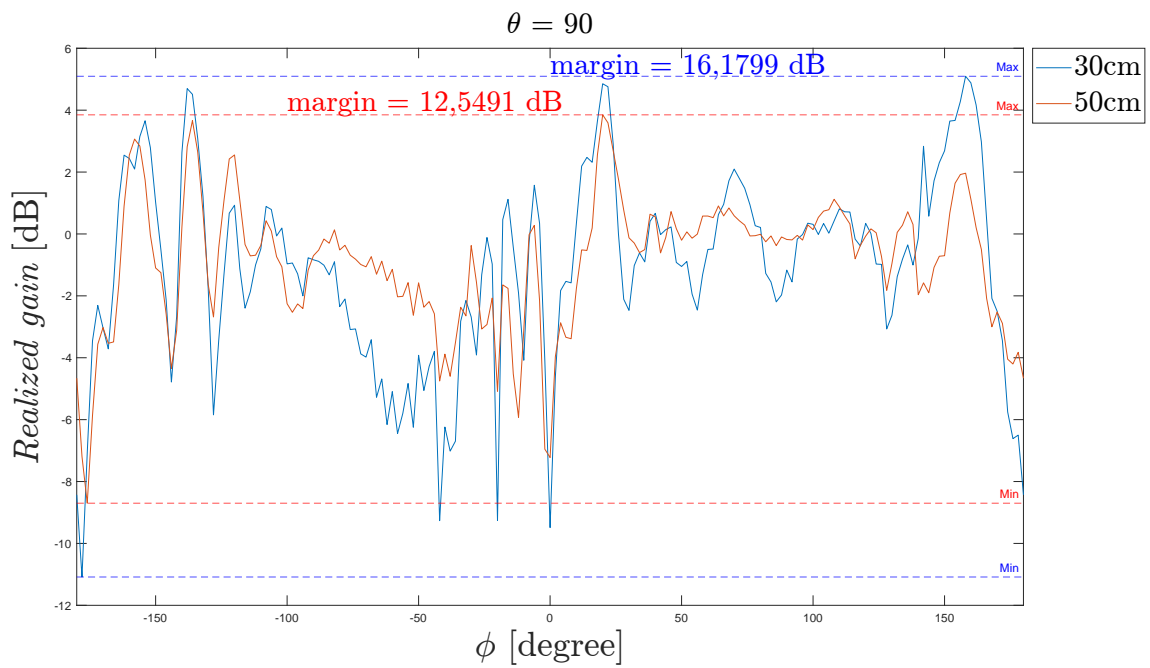
Obr. 2.24: Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při  $\theta = 30^\circ$



Obr. 2.25: Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při  $\theta = 60^\circ$

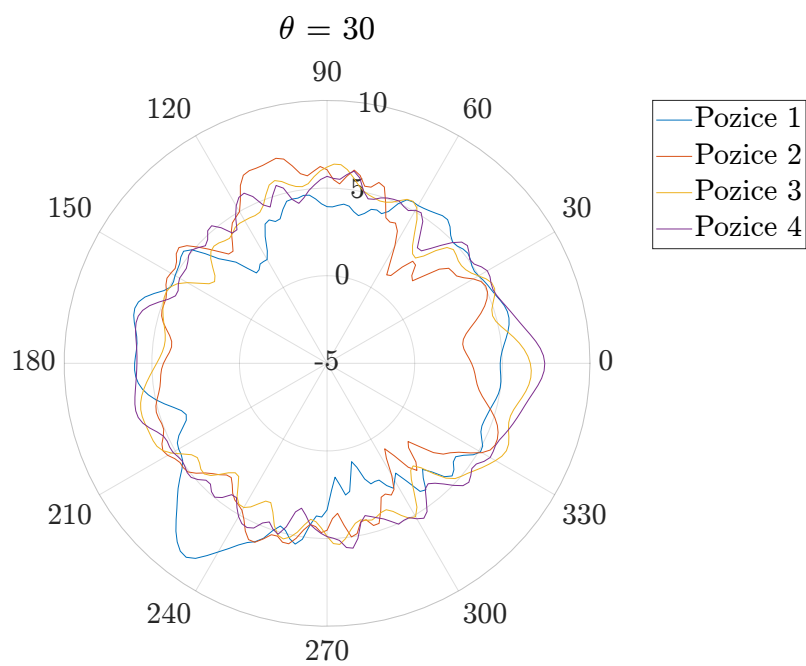


Obr. 2.26: Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při  $\theta = 90^\circ$

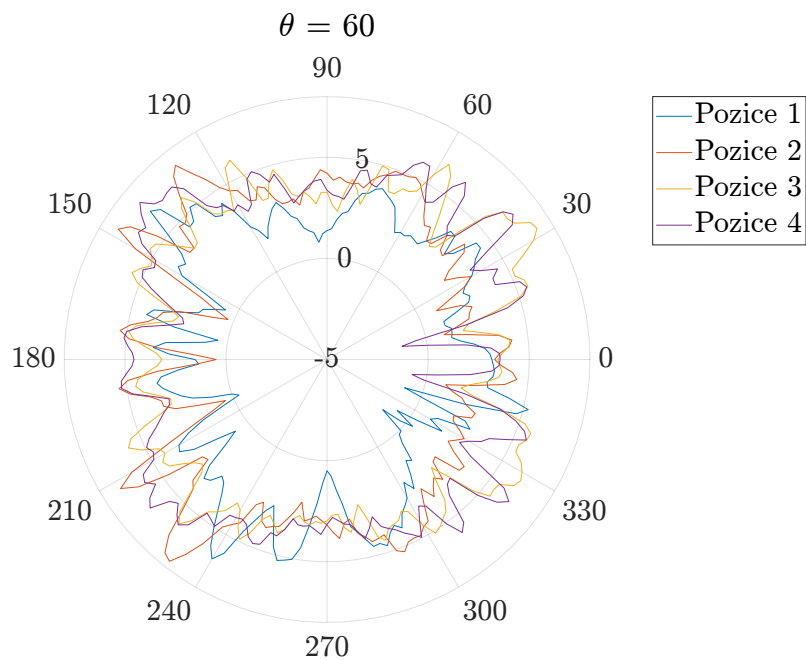


Obr. 2.27: Vyzařovací diagram pro výšky 50 mm a 30 mm podstavce při  $\theta = 90^\circ$

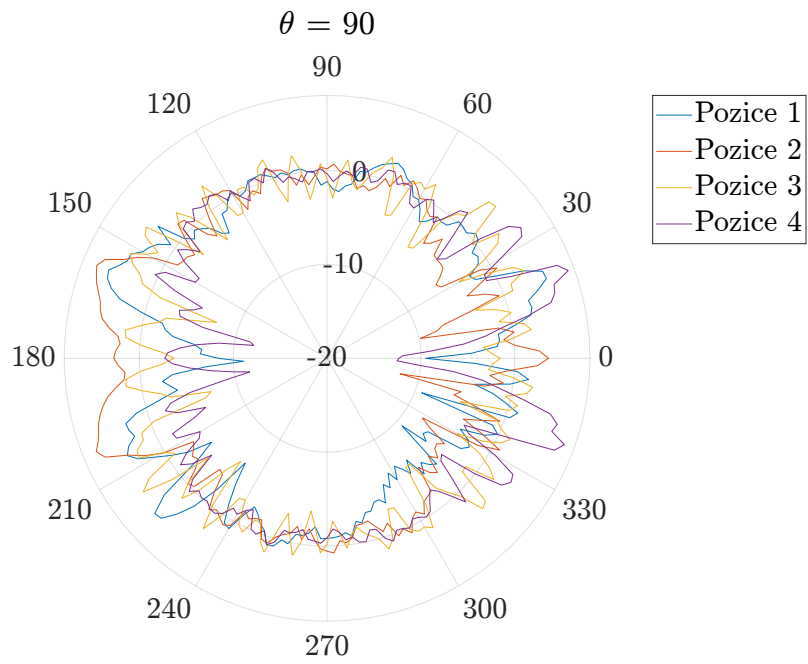




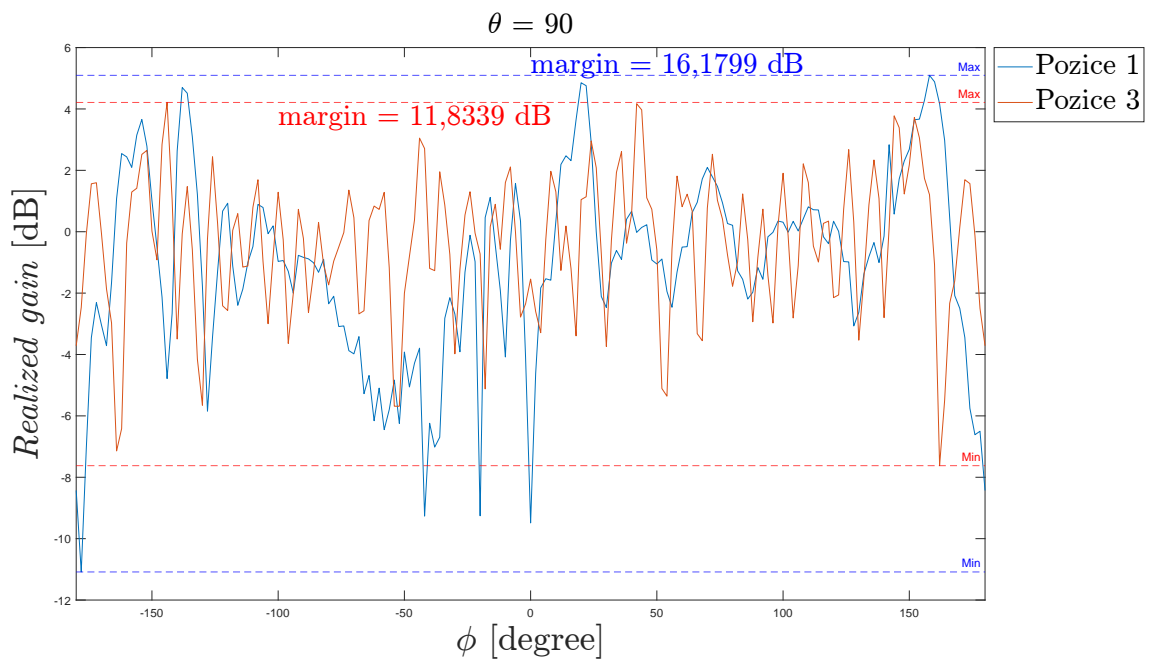
Obr. 2.28: Vyzařovací diagram pro různé pozice při  $\theta = 30^\circ$



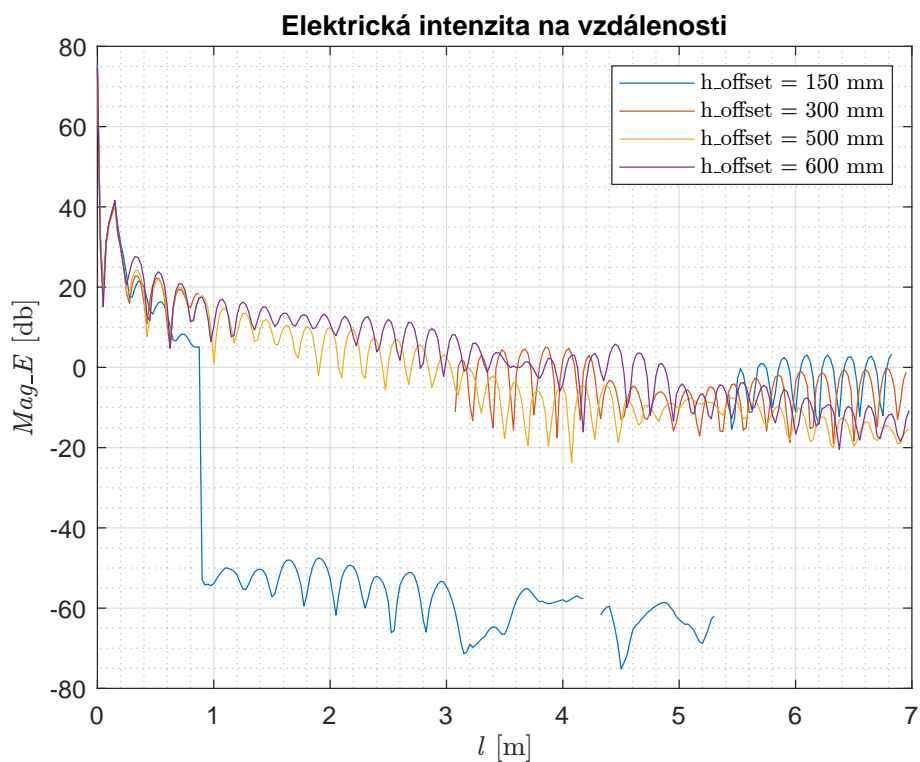
Obr. 2.29: Vyzařovací diagram pro různé pozice při  $\theta = 60^\circ$



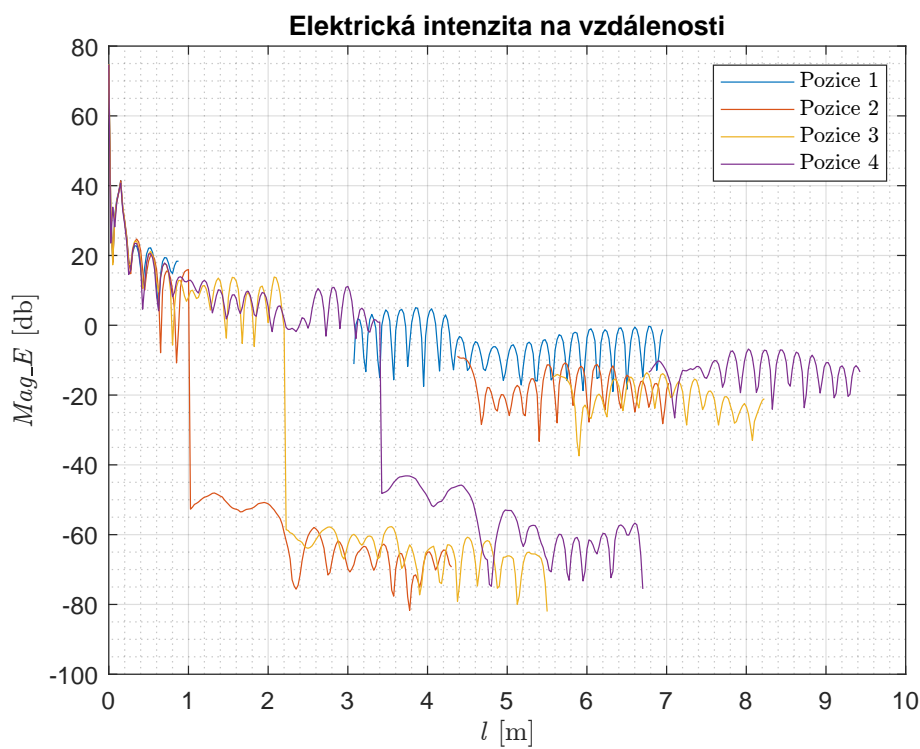
Obr. 2.30: Vyzařovací diagram pro různé pozice při  $\theta = 90^\circ$



Obr. 2.31: Vyzařovací diagram pro pozice 1 a 3 při  $\theta = 90^\circ$



Obr. 2.32: Pozice 1 různé výšky podstavce



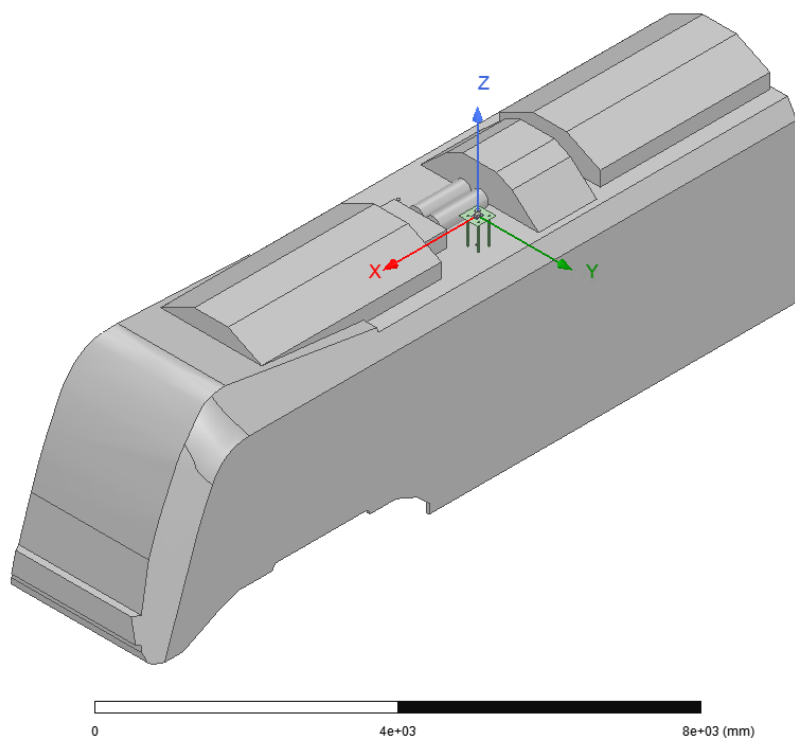
Obr. 2.33: Elektrická intenzita na vzdálenosti

### 2.3.2 Jednotka 15Ev

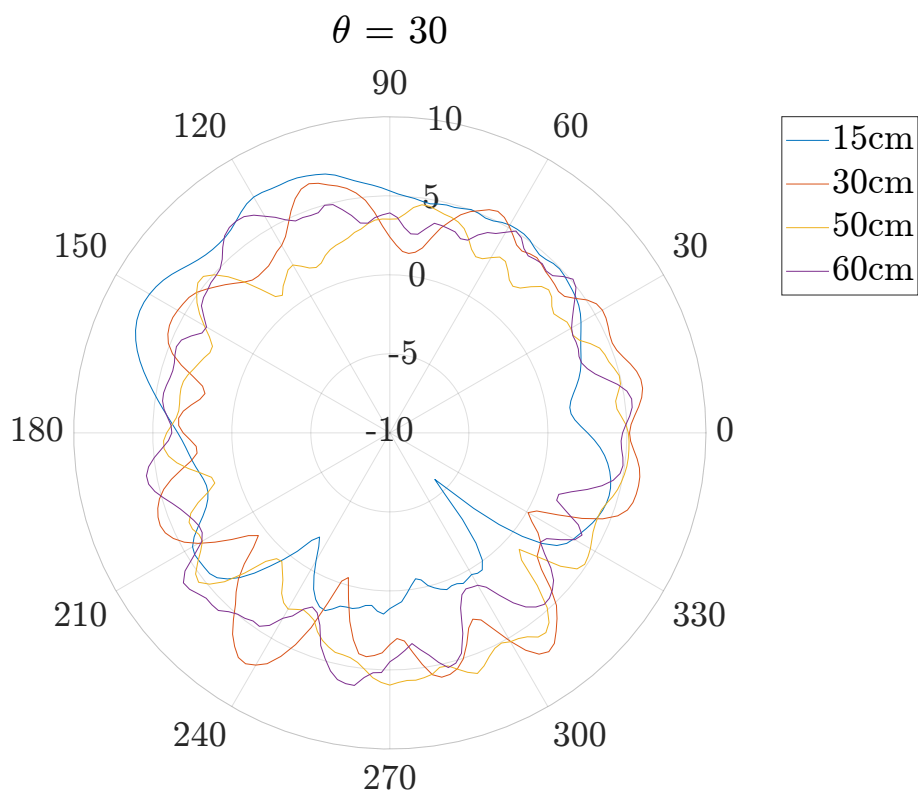
V této části byla podrobena analýze jednotka 15Ev. Už z modelu je vidět, že prostoru pro umístění antény z důvodu nahuštěné elektrovýzbroje moc nezůstává. Proto byla na tomto modelu uvažována pouze jedna pozice a jediná proměnná byla výška antény, v simulacích byl zkoumán její vliv na vyzařovací charakteristiku.

Model byl použit stejný jak v předchozí části s tím rozdílem, že byly na střeche přidány vzuchojemy a kryty elektrovýzbroje viz. Obrázek 2.34. Orientace a hlavní rozměry modelu jsou tedy totožné.

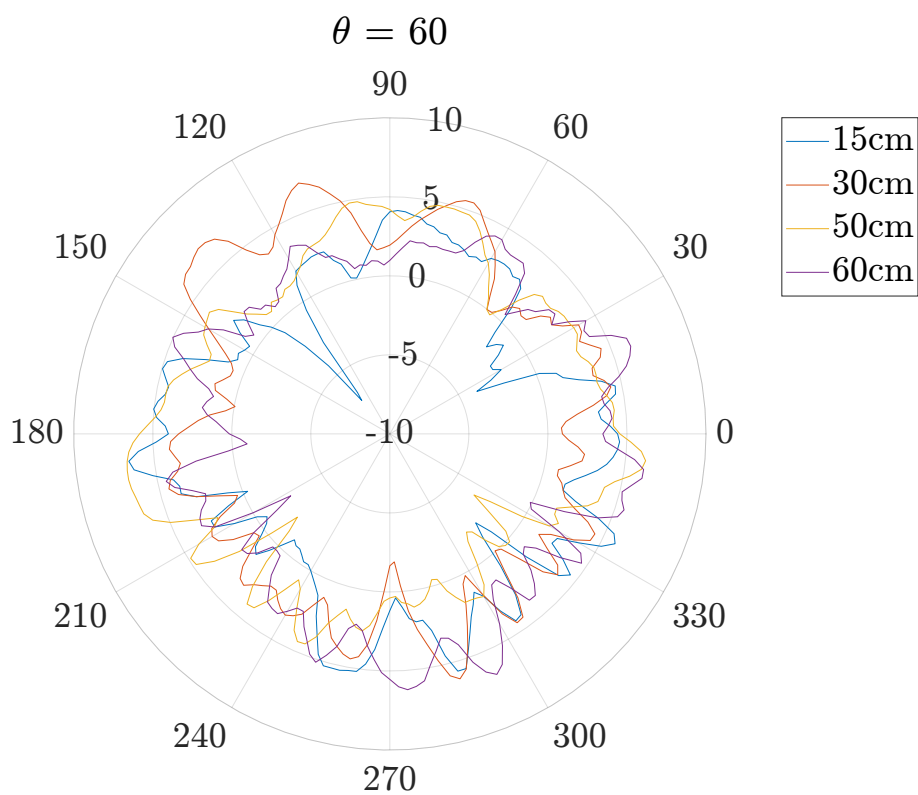
Už na první pohled je z výsledků vidět, že vyzařovací diagram nesplňuje požadavky na všesměrovost popsané o podkapitulu výše. Toto tvrzení se potvrzuje na Obrázku 2.37 kde margin pro výšku 30 cm vyšel 20,2 dB a pro výšku 50 cm 26,6 dB. Což je velmi vzdálené požadovaným 3 dB. V Obrázcích 2.35 a 2.36 je krásně vidět, jak vlivem zástavby je vyzařovací charakteristika deformována a dost výrazně znevýhodňuje určité směry.



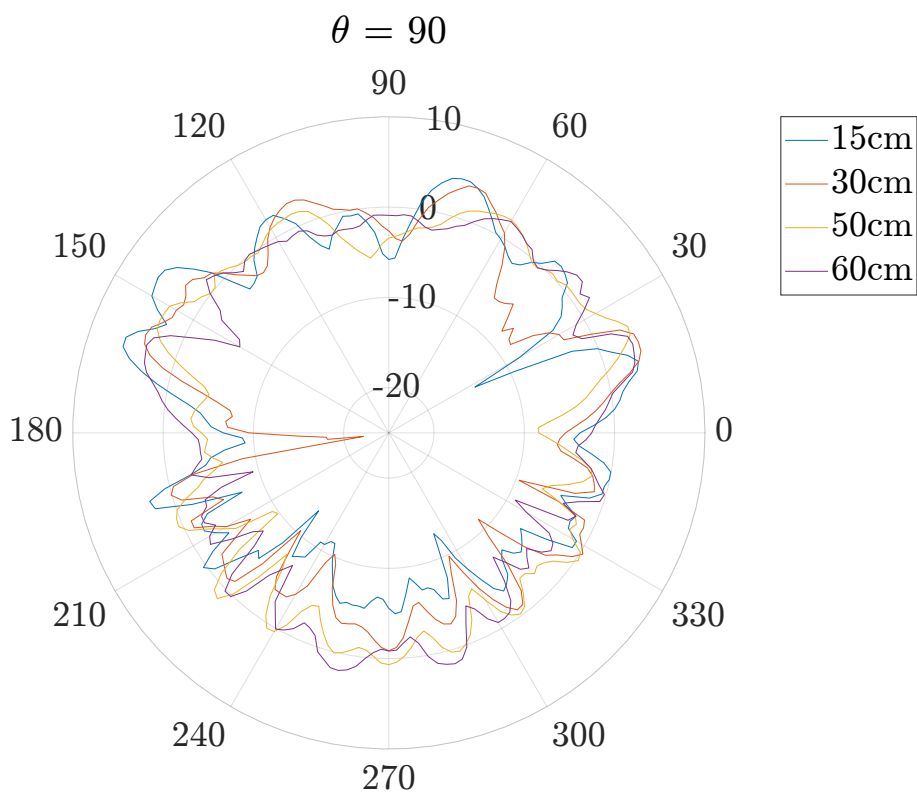
Obr. 2.34: Výbava na střeše jednotky Škoda 15Ev



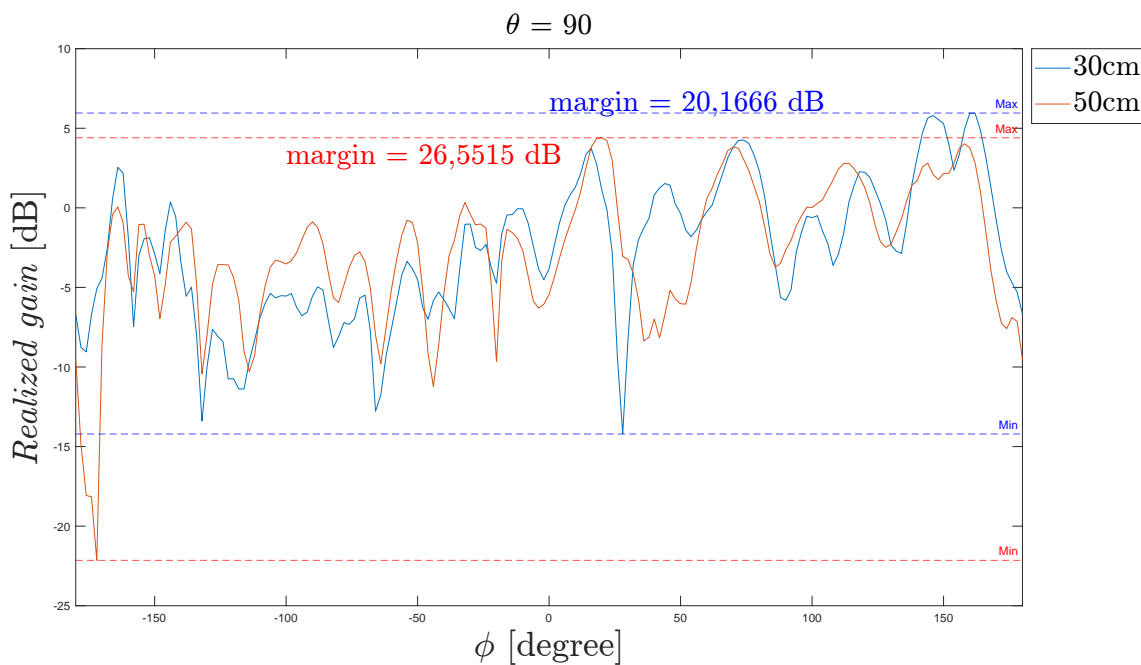
Obr. 2.35: Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při  $\theta = 30^\circ$



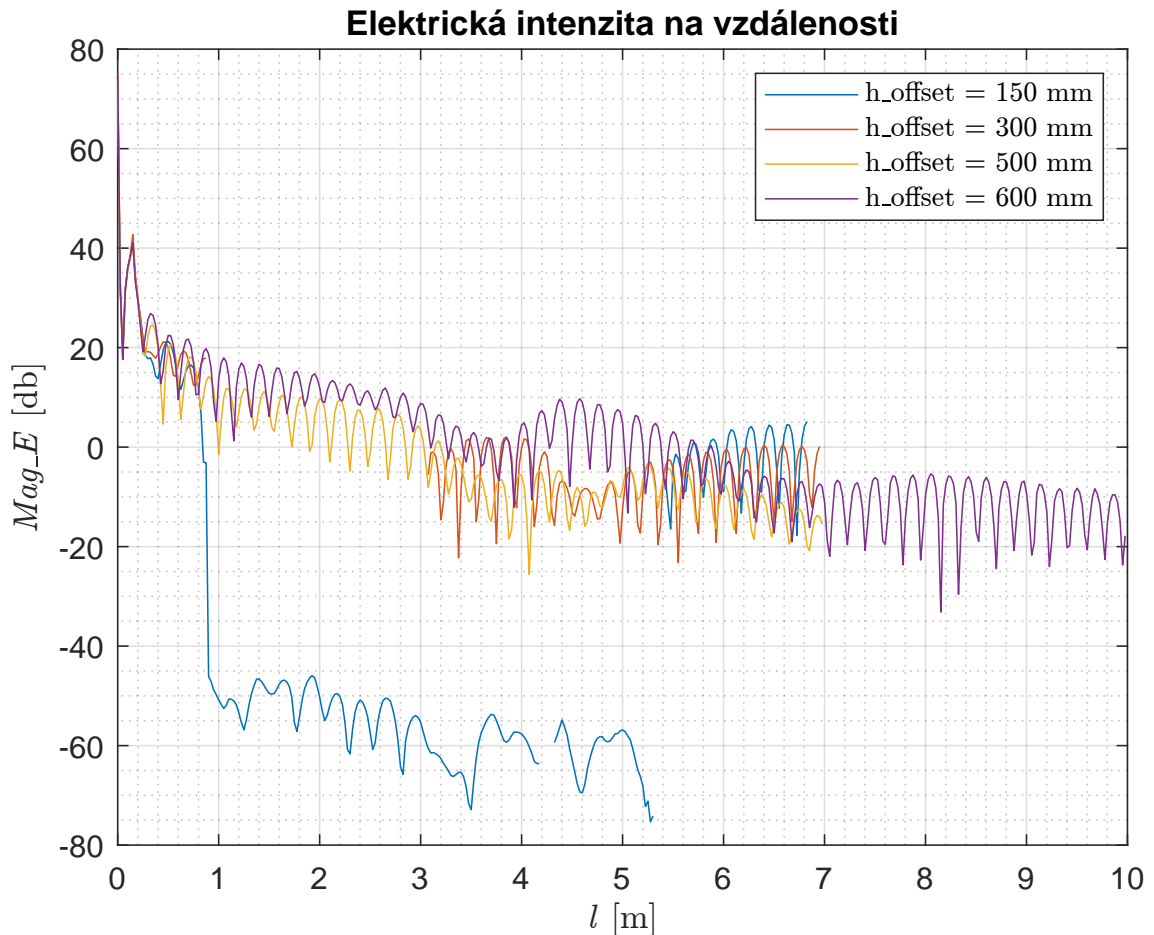
Obr. 2.36: Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při  $\theta = 60^\circ$



Obr. 2.37: Vyzařovací diagram pro různé výšky podstavce při  $\theta = 90^\circ$



Obr. 2.38: Vyzařovací diagram pro výšky podstavce 30 cm a 50 cm při  $\theta = 90^\circ$

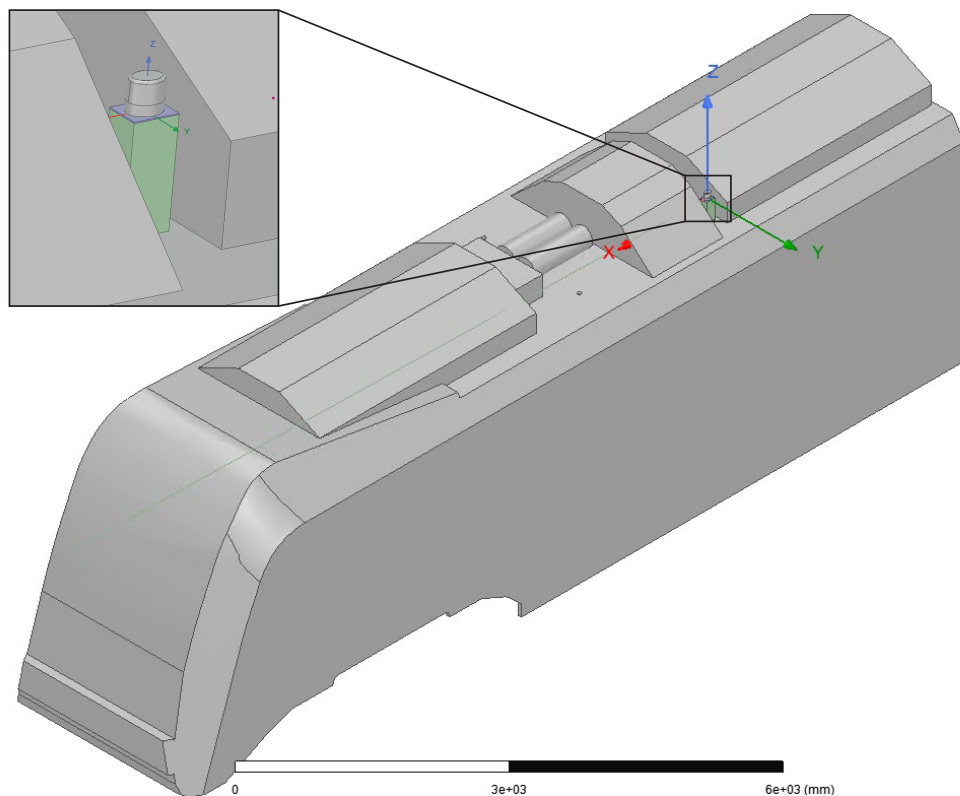


Obr. 2.39: Elektrická intenzita na vzdálenosti

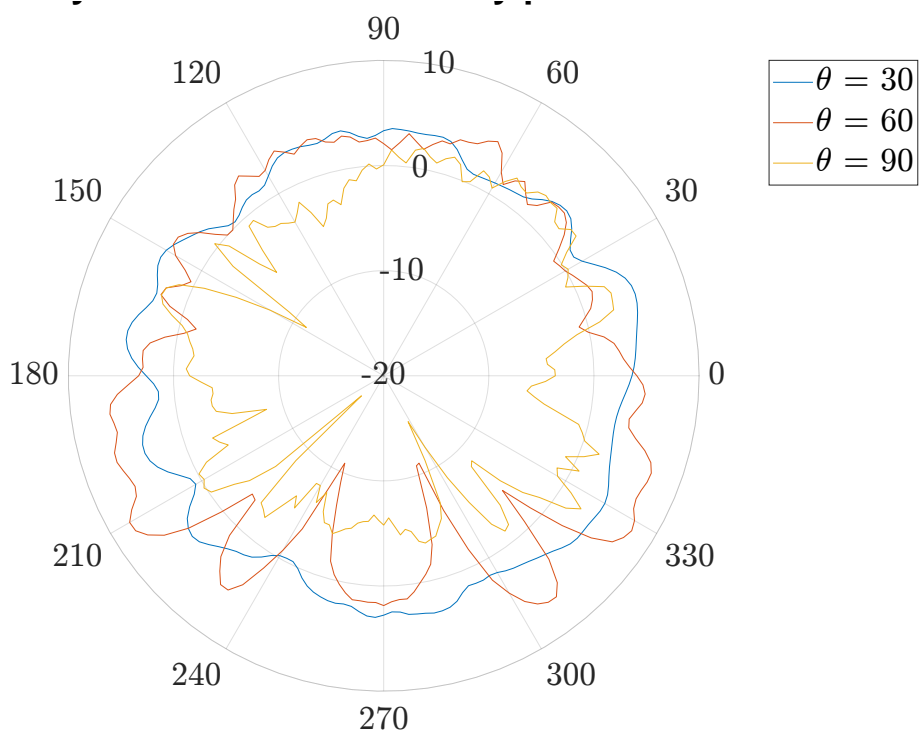
### Umístění antény pro Datarail na jednotce 15Ev

Tato anténa slouží pouze pro sběr dat výrobcí drážních vozidel, jak je popsáno v Kapitole 1.6.1. Tato anténa tedy nevyžaduje neustálé spojení, ale posílá data pouze v určitých intervalech. Toto spojení nemusí splňovat žádné normy QoS. Z toho důvodu není na instalaci kladen takový důraz a na jednotky se instaluje bez reflektoru a je umístěná mezi kryty elektrovýzbroje na kovovém stojanu.

Simulace proběhly pro stejnou výšku a pozici. V Obrázku 2.41 jsou tedy zobrazeny průběhy pro různé  $\theta$ , ze kterého je vidět, jak moc deformovaný vyzařovací diagram této antény je. Pro  $\theta = 30^\circ$  je ovšem margin překvapivě dobrý. Ovšem ostatní průběhy jsou velice nevyhovující a jejich margin se pohybuje kolem 20 dB, jak je vidět na Obrázku 2.42. Největší změna je ovšem u parametru S11, jak je vidět na Obrázku 2.43, kde je zřejmé, že přizpůsobení antény bez reflektoru kleslo na -17 dB a zároveň přizpůsobilo i pásmo 590 MHz.

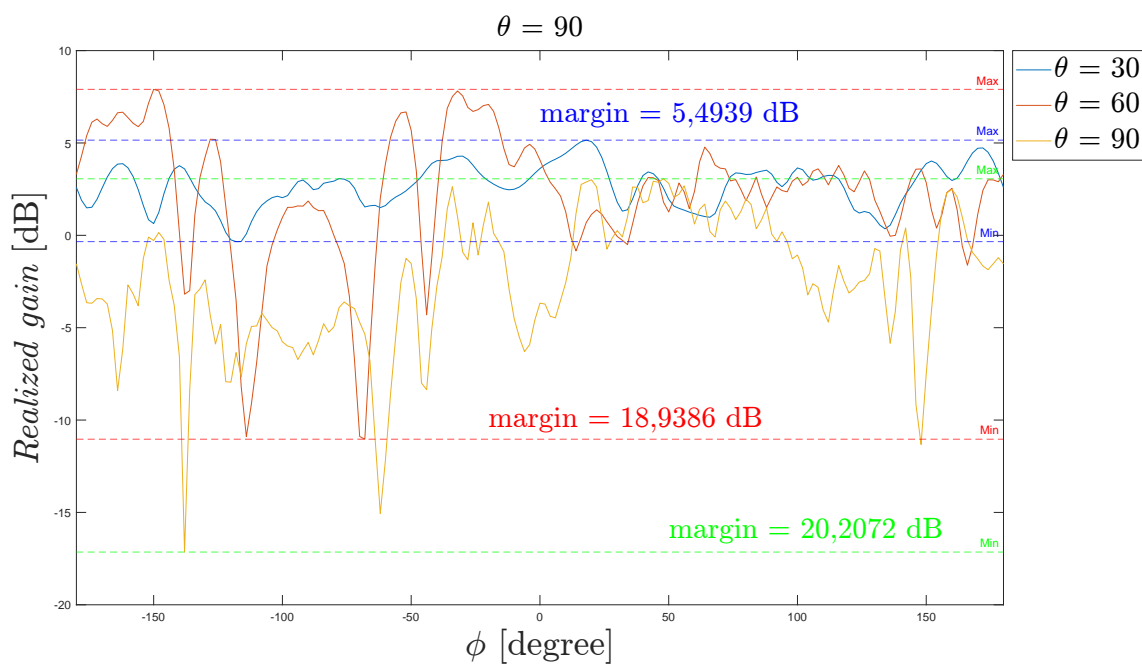


Obr. 2.40: Umístění antény pro datarail na jednotce 15Ev

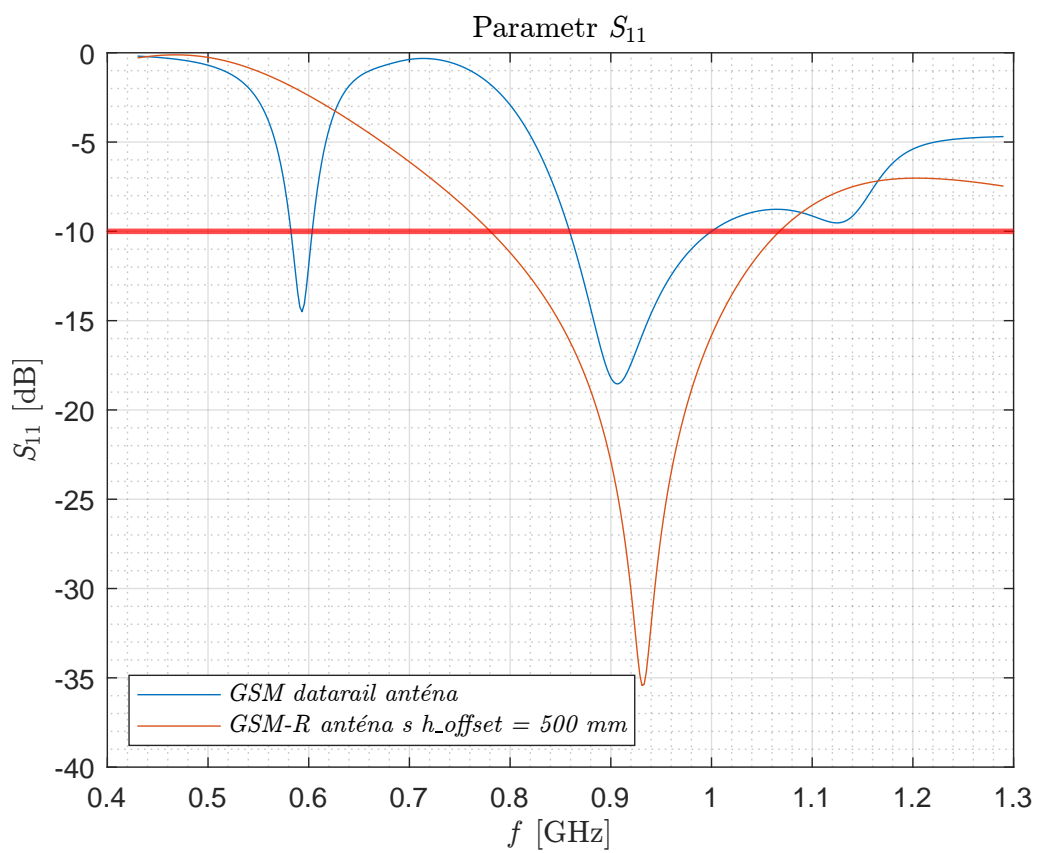


Obr. 2.41: Vyzařovací charakteristiky pro různá  $\theta$





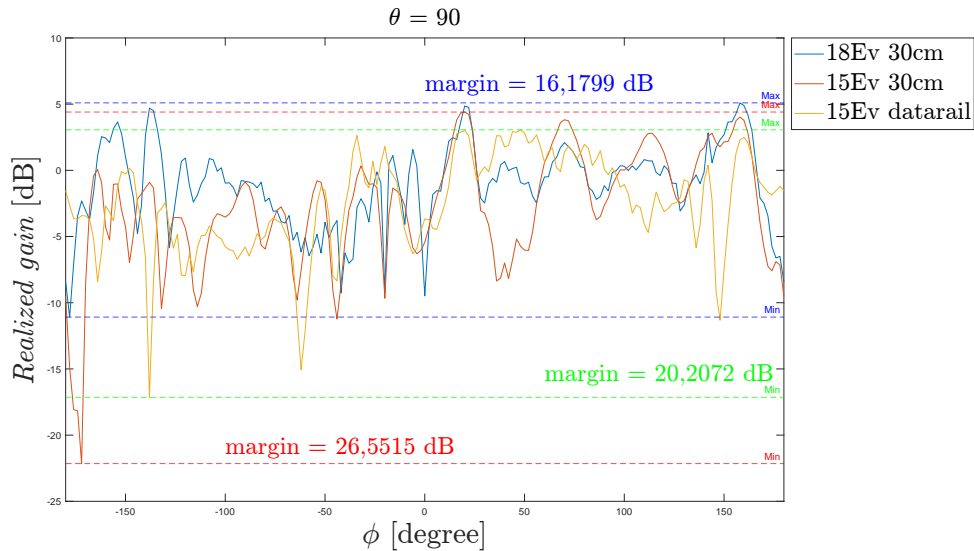
Obr. 2.42: Vyzařovací charakteristiky pro různá  $\theta$



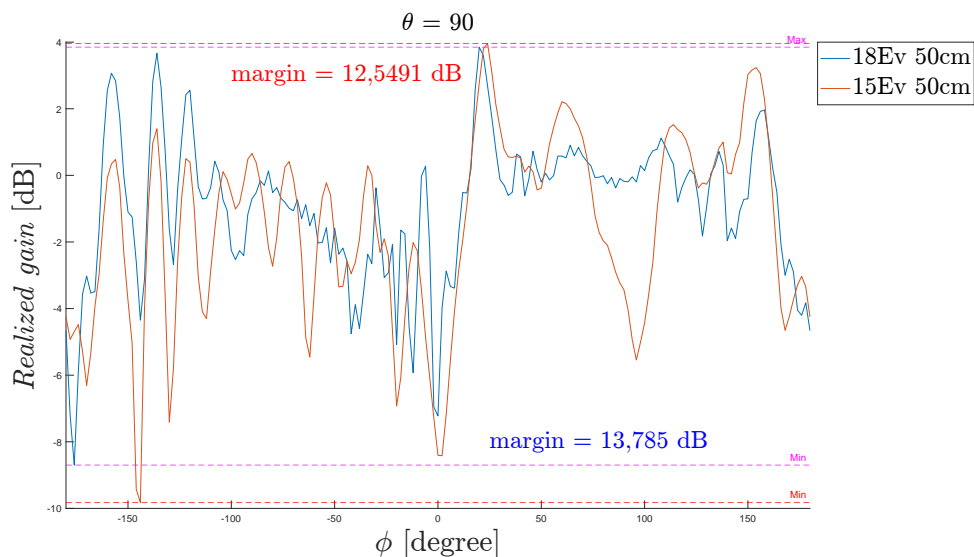
Obr. 2.43: Porovnání parametru  $S_{11}$

### 2.3.3 Porovnání jednotek 18Ev a 15Ev

Do jednoho grafu byly vloženy vyzařovací charakteristiky pro stejnou pozici a výšku, z jednotek 15Ev a 18Ev. Z Obrázku 2.45 je vidět, jak má hustější střešní zástavba elektrovýzbroje negativní vliv na margin antény. Kde pro jednotku 15Ev je vyzařovací charakteristika daleko více nekonzistentní a margin dosahuje 26,6 dB. Dále byla vložena vyzařovací charakteristika pro anténu pro Datarail, kde byl margin 20,2 dB. Ze srovnání na Obrázku 2.45 je tedy vidět, že ani jedna z těchto instalací není vhodná pro zachování všesměrovosti vozidlových antén.



Obr. 2.44: Porovnání vyzařovací charakteristiky



Obr. 2.45: Porovnání vyzařovací charakteristiky

## 2.4 Možnosti měření v praxi

Metody pro měření vyzařovacích parametrů antén již instalovaných na velkých vozidlech jsou často problematické, avšak existují způsoby, jak tyto výzvy překonat. Mezi tyto metody patří využití dronů, objížďení měřeného objektu anténou nebo srovnávací metoda. Měření vyzařovacích parametrů již nainstalovaných antén, které se standardně provádí v bezodrazové komoře, je v oblasti dopravních prostředků dostupné pouze pro osobní a menší nákladní automobily.

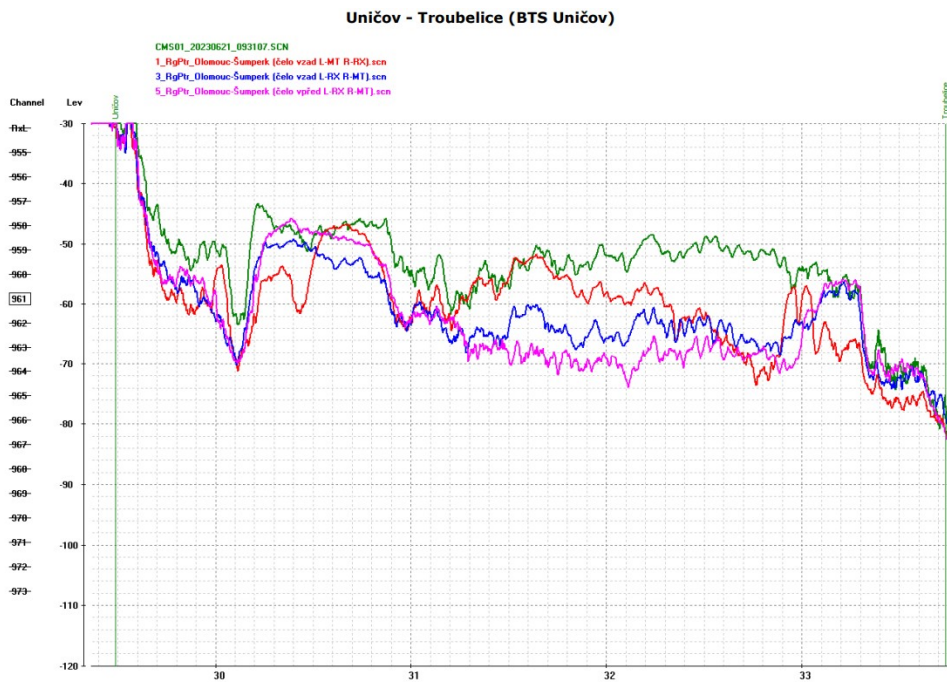
### 2.4.1 Měření srovnávací metodou

Pro drážní vozidla, jako je motorová jednotka, je takové měření v ČR nedostupné. Proto byla pro posouzení všesměrovosti vyzařování antén instalovaných na jednotce RegioPanter použita srovnávací metoda. Tato metoda využívá srovnávacího měření úrovně signálu posuzovaných antén vůči referenční úrovni signálu zdokumentovaného za srovnatelných podmínek pomocí měřicího vozu SŽ (viz. Kapitola 1.6.3), který je určen pro diagnostiku rádiového rozhraní systému GSM-R, kde je kladen důraz na přesnost měření a maximální všesměrovost vyzařovacích charakteristik měřících antén.

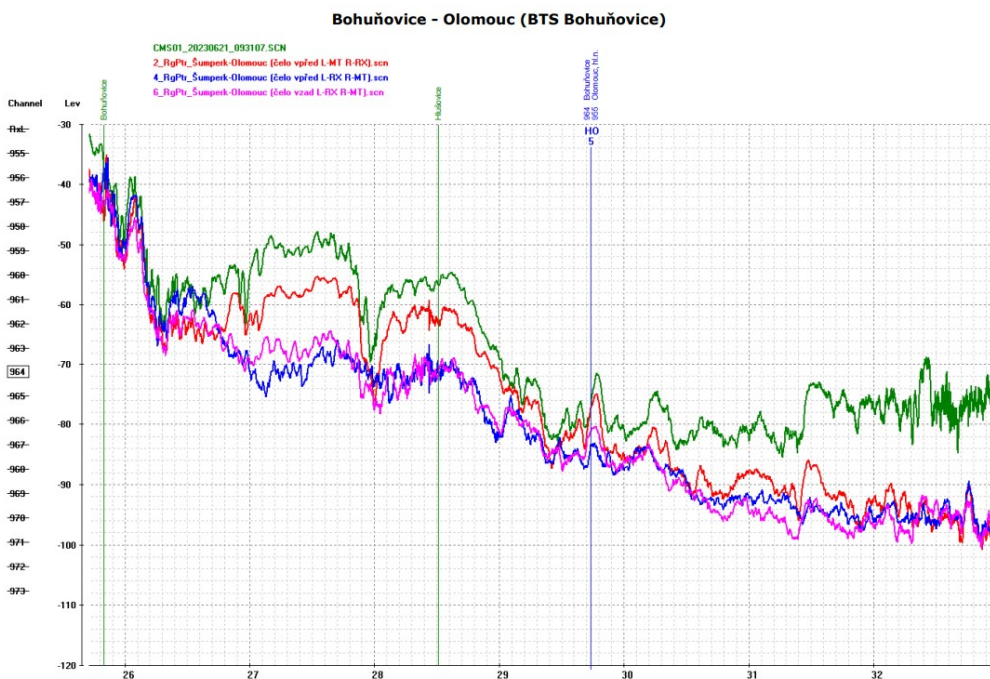
#### První měření

Měření probíhalo ve spolupráci s oddělením rádiových sítí Centra techniky a diagnostiky Správy železnic. Během měření byla tažena souprava, která byla složená ze tří jednotek. První jednotka byla tažná a pracovala pod dohledem ETCS, protože na měřeném úseku je výhradní provoz. Druhá jednotka sloužila jako měřená, zatímco třetí jednotka v soupravě byla vybavena zařízením pro měření rádiových sítí. Výsledky měření byly následně zpracovány a porovnány mezi sebou, což umožnilo detailní analýzu a vyhodnocení vlastností antén v reálných provozních podmínkách.

Výsledky měření jsou zpracovány jako absolutní porovnání antén při starém a novém umístění na střeše. Nad každým grafem je uvedeno, v jakém úseku byl měřen a jméno BTS pokrývající daný úsek. V grafech jsou zobrazeny stopy prezentující úroveň signálu dané BTS s jednotlivými anténami. Přičemž zelená stopa prezentuje referenční úroveň signálu pořízenou měřicím vozem. Červená, modrá a fialová stopa pak úrovně změřené při jednotlivých jízdách v daném směru na jednotlivých GSM-R anténách jednotky RegioPanter. U každého grafu je uveden seznam vyhodnocovaných souborů (jízdy) s rozlišením barvy stopy. Pro antény RegioPanteru je také uvedeno číslo jízdy (1-6), směr jízdy čela jednotky (kde byly umístěny posuzované antény) a informace, která anténa byla použita pro měření, tedy levá (L-RX), nebo pravá (R-RX).



Obr. 2.46: Úroveň signálu z BTS Uničov



Obr. 2.47: Úroveň signálu z BTS Bohuňovice

Po zpracování výsledků je patrné, že signál je podstatně slabší než referenční signál a dochází k zásadním změnám úrovně vzhledem k referenčnímu signálu i mezi posuzovanými anténami navzájem, a to i v závislosti na orientaci vozidla. Lze

tedy vyvodit, že posuzované GSM-R antény jednotky RegioPanter určené pro ETCS vykazují výrazný záporný zisk (ztrátu) a jejich vyzařovací charakteristiky se zásadně odlišují od požadované všesměrové charakteristiky.

Z grafu je patrné, že rozdíl v úrovni přijímaného signálu mezi jednotlivými ETCS anténami RegioPanteru může být až 16 dB, což znamená, že na jedné anténě je signál až 40x slabší než na druhé. Při srovnání s referenční úrovní změřenou pomocí MV ERTMS je signál na ETCS anténách často slabší o 20 dB (tj. 100x), ale také až o 24 dB, což znamená, že přijímaný signál může být u RegioPanteru více než 250x slabší, než by měl být.

## Druhé měření

Druhé měření navazovalo na první s tou změnou, že antény byly nainstalovány na nové pozici, jak je vidět na Obrázku 2.48.



Obr. 2.48: Úroveň signálu z BTS Bohuňovice

Na základě předchozího měření byla použita stejná metodika měření, která je popsána v předchozí podkapitole. Tedy srovnávací měření úrovně signálu posuzovaných antén vzhledem k referenční úrovni signálu.

Podobně jsou také zpracovány výsledky, jak je popsáno o podkapitolu výše, s tím rozdílem od předchozí podkapitoly, kde byla zobrazována a graficky porovnávána absolutní úroveň změřených signálů na jednotlivých anténách ve stejném místě na trati. To znamená, že úroveň se měří v rámci celého dynamického rozsahu měřícího přijímače. Z důvodu možnosti přesnější vizualizace s rozlišením i malých úrovněových

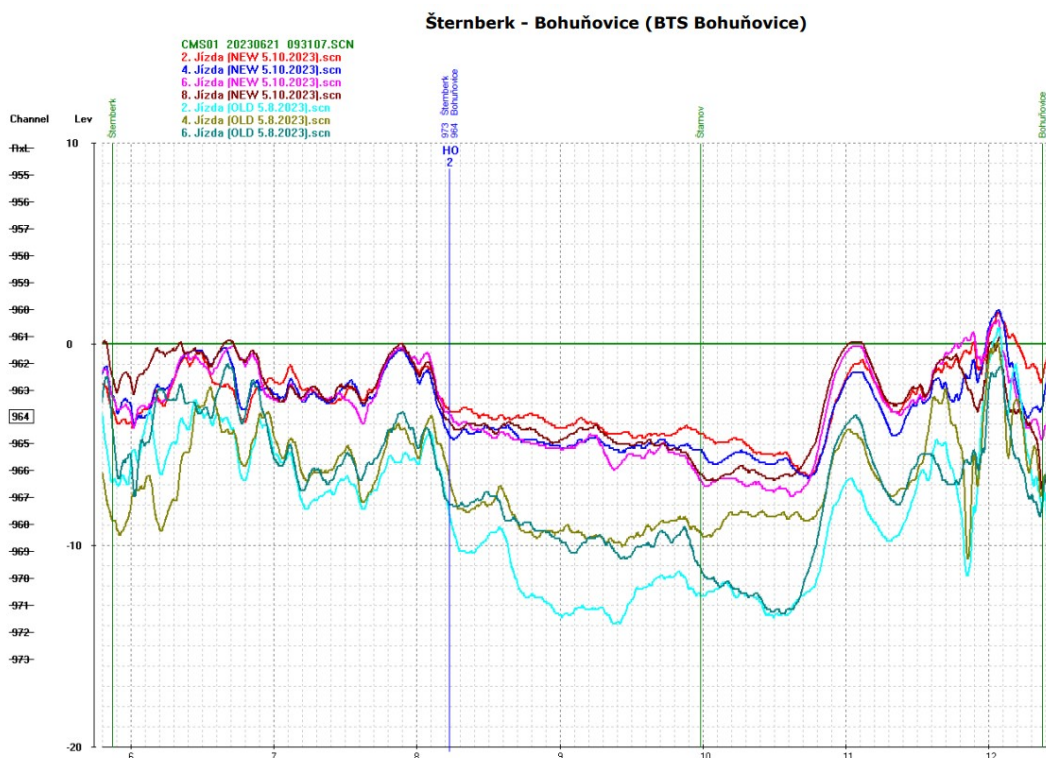
rozdílů při současně větším počtu porovnávaných signálů bylo použito diferenční zobrazení relativních úrovní vztažených k referenční úrovni. Úroveň byla daná úrovní signálu na měřicí anténě měřícího vozu CTD. Tento způsob umožnil zobrazení a porovnání vlastností původního i nového způsobu řešení instalace antén navzájem, tak i porovnání každého z řešení vzhledem k referenční úrovni měřícího vozu CTD.

Referenční úroveň 0 dB je představená zelenou stopou, jenž prezentuje úroveň signálu pořízenou měřícím vozem CTD. Ostatní barevné stopy představují úrovně změřené postupně při jednotlivých jízdách na jednotlivých GSM-R anténách jednotky RegioPanter. V Obrázku 2.49 jsou zobrazeny průběhy, jak původního způsobu instalace (v názvu stopy nad grafem uvedeno OLD), tak i nového způsobu řešení instalace antén (v názvu NEW) a to v obou směrech jízdy a směrech čela jednotky (vpřed/vzad, kde byly umístěny posuzované antény).

Poloha průběhů nad nulovou úrovní (nad zelenou čarou vyjadřující referenční úroveň 0 dB) představuje silnější signál, než jaký byl pořízen na měřícím voze (měřítko na kladné y ose po 1 dB do max +10 dB, což odpovídá 10x silnějšímu signálu v lineární míře). Naopak poloha stopy pod nulovou úrovní znamená slabší úroveň signálu, než jaký byl měřen na měřícím voze (měřítko na záporné y osy po 1 dB do max -20 dB, což odpovídá 100x slabšímu signálu, než který byl změřen v případě měřícího vozu CTD). Z hlediska vyzařovacích parametrů posuzovaných antén by pro všesměrový zářič (tedy požadovaný stav) mělo při jednotlivých jízdách docházet jen k minimálnímu rozdílu a odchýlkám od referenční úrovně dané všesměrovou měřicí anténou měřícího vozu CTD. V ideálním případě by se všechny stopy měly nacházet v blízkosti nulové zelené referenční úrovně a jakákoliv větší odchylka, ať už do kladných, nebo záporných hodnot, je nežádoucí. Pro porovnání jednotlivých řešení obecně platí, že lepší řešení představuje to, u kterého je stopa blíže nulové referenční linii a lepší je zejména to řešení, které má konzistentnější průběh (co nejmenší zvlnění).

Tento způsob zobrazení vyžaduje pro správnou synchronizaci a korelaci dle GPS dat větší míru průměrování naměřených signálů, proto je i výsledný signál více vyhlazen a dochází k potlačení rychlých změn, což má za následek snížení propadu zobrazovaného signálu o cca 3 dB, než ve skutečnosti byl. Měření probíhalo v průběhu dne za běžného provozu, z toho důvodu byl složitý postproces dat, jelikož měřicí terminály měřily i v případě stání ve stanici či při čekání na návštěv. Navíc není možné celou trať projet stejnou rychlostí. Všechny tyto aspekty museli být brány v potaz při postprocesu dat, se kterým pomohl zaměstnanec ze střediska rádiových sítí Správy železnic a nejsou tedy náplní bakalářské práce [61].





Obr. 2.49: Úroveň signálu z BTS Bohuňovice

Nově navržený způsob instalace vozidlových antén je ve většině provozních situací podstatně lepší než původní řešení, jak je patrné z výše uvedených výsledků. Z toho vyplývá, že i relativně malá změna v umístění antén může zajistit podstatně silnější a konzistentnější signál.

Z uvedených výsledků také vyplývá poměrně vysoká citlivost vozidlových antén na způsob instalace a výsledné dosahované parametry. Z toho vychází, že způsob umístění a instalace antén je zásadní a je potřeba celému procesu věnovat zvýšenou pozornost a péči, jak ve fázi návrhu a realizace, tak ve fázi ověřování a schvalování.

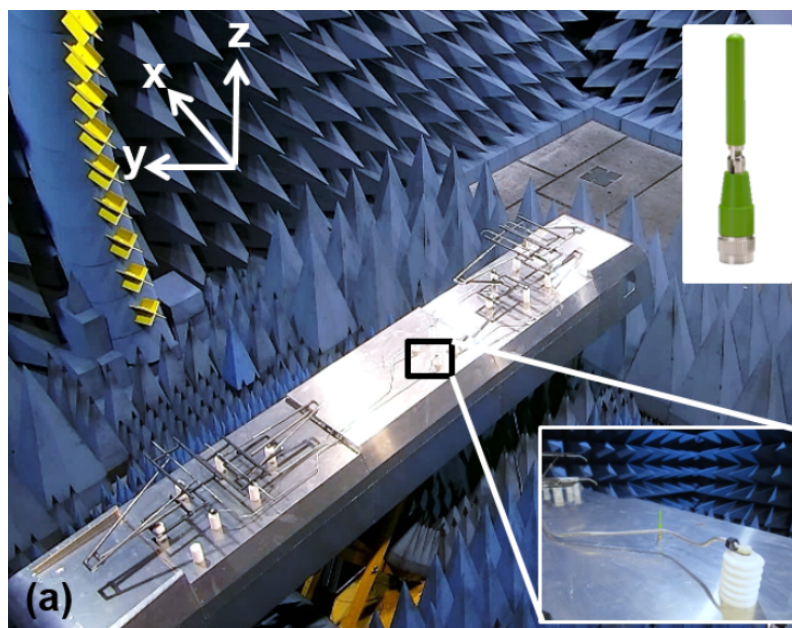
Je patrné, že se s přibližováním vozidla k BTS, vozidlové antény svým ziskem více blíží k požadovanému všesměrovému diagramu a při vzdalování dochází většinou k propadu zisku, neboli dochází k zeslabení požadovaného signálu vzhledem k úrovni, jaké by měl signál u všesměrové antény dosahovat.

Pokles zisku v předozadním směru vyzařování vozidlové antény z Obrázku 2.49 nastává při větším vzdálení vozidla od BTS, tedy zhruba v oblasti předání hovoru mezi jednotlivými BTS na trati, kde však z bočních směrů k žádnému výše uvedenému zacinění nedochází a kde mají antény do stran nerušený „výhled“. Pokud by se pro popis uvedeného chování a vlivu pro jednoduchost a názornost zvolil například střed grafu na Obrázku 2.49, lze předpokládat, že antény v nově navrženém řešení

budou zvýhodňovat nežádoucí příjem z bočních směrů vzhledem k požadovanému předozadnímu směru o cca 4-5 dB, kdežto původní řešení bude zvýhodňovat příjem z nežádoucího bočního směru dokonce o 9-14 dB.

## 2.4.2 Další metody měření velkých vozidel

Další metody, které se v praxi povětšinou používají, zahrnují drony a UAV (bezpilotní letouny). Metody jsou vcelku nové, ovšem mají v sobě velký potenciál. ANTF (Airborne Near-field Test Facility) uzavírá technologickou mezeru v testování venkovních mobilních antén a otevírá nejmodernější technologii měření antén aplikačním oblastem, kde dosud byl možný pouze omezený přístup k přesným informacím o vyzařovacích charakteristikách anténních systémů. Tato metoda by usnadnila získávání informací o vyzařování téměř jakéhokoli venkovního anténního systému kdykoli během jeho životnosti a také by umožnila pravidelné kontroly vlastností antén, které mohou degradovat kvůli environmentálním a provozním vlivům. Jak je zmíněno v článku [62], tato metoda a její přesnost závisí velmi na počasí, kdy při větrných dnech RC letadlo s automatizovaným letem neopisuje kružnici nýbrž elipsu. Naproti tomu článek [63] využívá RC helikoptéru. V článku [64] využívá dron s Bayesovskou optimalizací hyperparametrů pomocí Gaussovských procesů pro výpočet maximálního laloku antény. Existují i metody, které se vydali jiným směrem a to zmenšením testovaného objektu v poměru. Tato metoda je časově a finančně náročnější než dříve zmíněné, ovšem výsledky jsou dle autora velmi přesné a cílí na dodržování přísných norem [65].



Obr. 2.50: Sférická nearfield sestava pro měření antén na modelech lokomotiv [65]



Tab. 2.2: Rešerše problematiky měření vyzařovacích ch. elektricky velkých objektů

Zdroj	Sumarizace
[63]	Článek pojednává o měření vyzařovací charakteristiky leteckých vozidel pomocí zařízení ANTF pro měření v blízkém poli. ANTF je mobilní systém pro sondování elektromagnetických polí pomocí dálkově ovládaného vrtulníku, cílený na generování přesných Far-field vyzařovacích charakteristik. Porovnává ANTF s tradičními zařízeními a zkoumá jeho potenciální aplikace v letectví, radarových systémech a komunikačních sítích. Jsou zde popsány technické požadavky, systém a plán rozvoje ANTF. Článek konstatuje, že ANTF vyplňuje technologickou mezeru v testování venkovních antén.
[65]	Článek se zabývá simulací a měřením instalovaných antén lokomotiv pomocí zmenšených modelů. Studie představuje výsledky měření antén zmenšených modelů lokomotiv, které ověřují přístup pomocí numerických simulací. Je zkoumán vliv geometrie střechy a nadstaveb na radiální vzory antén pro různé provozní frekvence. Výsledky ukazují dobrou korelaci mezi simulacemi a měřeními, s rostoucím parazitickým vlivem prostředí při vyšších frekvencích.
[64]	Článek představuje automatizovanou metodu pro charakterizaci vyzařovacího diagramu antén pomocí dronu s radiofrekvenčním zařízením na gimbalu. Spektrální analyzátor zaznamenává data o síle signálu pro reálnou charakterizaci antény. Metoda urychluje lokalizaci důležitých prvků, jako je hlavní paprsek, a snižuje potřebu následného zpracování. Bayesovská optimalizace napomáhá plánování cesty dronu, což šetří baterie a snižuje potřebu vzorkování. Studie cílí na efektivní automatizaci procesu charakterizace antén.
[62]	Tento článek diskutuje o využití bezpilotních leteckých prostředků (UAV) k měření vyzařování antén, zejména pro antény s nízkými frekvencemi na složitých platformách, jako jsou válečné lodě. Článek navrhuje použití modelového letadla R/C vybaveného autopilotním systémem pro tento účel a demonstroval proveditelnost použití UAV k měření vyzařování. Studie ukazuje slibné výsledky s dobrou shodou mezi naměřenými a simulovanými vzory. Zdůrazňuje potenciál UAV v tom, že měření antén je přístupnější a cenově efektivnější.

## Závěr

V této práci bylo ověřeno jak simulacemi tak reálným měřením, že antény pro systém GSM-R používané na zastavkách hnacích vozidel jsou všesměrové a tím pádem vyhovující. Dále bylo ověřeno přizpůsobení činitele odrazu pro jednotlivé frekvence GSM-R pásma, které též vyhovují. Z toho vyplývá, že chyba a důvody rozpadů spojení na fyzické vrstvě musejí být opravdu způsobeny (mimo jiné) nevhodným umístěním antén na střechách hnacích vozidel. Jak je vidět ze srovnání obou měření, v E rovině jsou skoro totožná. Simulovaná anténa tedy byla zvolena vhodně a dala se použít na následné simulace.

U simulací pro jednotku 18Ev je patrné, že různé výšky antén a jejich umístění výrazně ovlivňují vyzařovací charakteristiky. Výška podstavce 150 mm je naprosto nevyhovující kvůli nekonzistentnímu vyzařování. Ideální všesměrová anténa by měla mít rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou (margin) do 3 dB, což žádná z testovaných antén nesplňuje. Podstavec s výškou 300 mm má margin 16,2 dB, zatímco podstavec s výškou 500 mm má margin 12,6 dB. Ani jedna z těchto variant tedy nedosahuje požadovaného marginu. Při výšce antény 150 mm nad střechou vozidla se vyzařovací charakteristika může podobat „pásmové zádrži“ pro určité směry. Když je anténa rovnoběžná s reflektorem ( $\theta = 90^\circ$ ), charakteristika nejméně připomíná kružnici, kterou by měla ideální všesměrová anténa opisovat, což znamená, že anténa zvýhodňuje určité směry. Celkově výsledky ukazují, že ani jedna z testovaných výšek podstavců nedosahuje požadovaného výkonu dle systémových specifikací.

U simulací hustější zastavby na střeše jednotky 15Ev vyplývá, že dosud používaná Pozice 1 má největší margin. Nicméně, když je anténa umístěna v Pozici 3, má tato pozice nižší margin a je tedy vhodnější pro instalaci antén, ale ani zde nedosahuje požadovaných 3 dB. Při pohledu pod velmi malým úhlem vzhledem k reflektoru, například když je anténa BTS vzdálena, zvýhodňuje anténa příjem z bočních stran ( $\phi = 0^\circ$  a  $180^\circ$ ) oproti příjmu ve směru čela vlaku, kde je s největší pravděpodobností umístěna nejbližší BTS. Simulace ukázaly, že elektrická intenzita prudce klesá, když přímá viditelnost mezi vozidlovou anténou a BTS prochází skrz překážky jako trakční měniče, což způsobuje nežádoucí časové zpoždění a interference signálu.

U simulací pro jednotku 15Ev a umístění její antény pro datarail vyplývá, že vyzařovací diagram antény je značně deformovaný. Pro úhel  $\theta = 30^\circ$  je margin překvapivě dobrý, ale ostatní průběhy jsou nevyhovující s marginem kolem 20 dB. Největší změna byla u parametru S11, kde přizpůsobení antény bez reflektoru kleslo na -17 dB a zároveň se přizpůsobilo pásmo 590 MHz.

Z porovnání vyzařovacích charakteristik různých pozic a výšek antén vyplývá, že hustší střešní zastavba elektrovýzbroje negativně ovlivňuje margin antény. Pro jednotku 15Ev dosahuje margin 26,6 dB, zatímco pro jednotku 18Ev je margin

20,2 dB. Ani jedna z těchto instalací není vhodná pro zachování všesměrovosti vozidlových antén. Hustší střešní zástavba negativně ovlivňuje margin antén, což ukazuje na nutnost hledání lepších řešení pro instalaci antén na vozidlech.

Z měření na reálném vozidle pak lze vyvodit následující. Pokud by ve stejném místě na trati bylo vozidlo s anténou nainstalovanou podle původního umístění na pozici 1, tak užitečný signál bude mít úroveň -79 až -84 dBm, zatímco rušivý signál bude mít úroveň -85 dBm, tedy odstup od šumu v tomto případě bude 6 až 1 dB, což nevyhnutelně povede k zásadnímu zhoršení kvality signálu hraničící s rozpadem volání a pokud bude možnost, síť GSM-R zajistí předání hovoru na jinou buňku ve snaze hovor udržet.

V případě nového umístění na pozicích 3 a 4 vozidlové antény bude mít užitečný signál úroveň -74 až -75 dBm a rušivý signál bude mít úroveň -85 dBm, tedy odstup šumu v tomto případě vychází 11 až 10 dB, což se projeví jen mírným zhoršením kvality signálu.

Obecně v radiotechnice platí, že nejlepší zesilovač je anténa, neboť slabší signál (např. díky horší anténě) se může sice při dalším zpracování libovolně zesílit, ale zesílením vždy dojde ke zkreslení signálu, přidání šumu atd., tedy k zhoršení odstupů šumu, který má přímý vliv na chybovost.

## Literatura

- [1] S.R.O., Titio. *Transevropské dopravní síť (TEN-T)*. Online. Transevropské dopravní síť (TEN-T). Dostupné z: [https://www.mdcrcz.cz/Dokumenty/Strategie/TEN-T-a-dalsi-doprava/Transevropske-dopravni-site-\(TEN-T\)](https://www.mdcrcz.cz/Dokumenty/Strategie/TEN-T-a-dalsi-doprava/Transevropske-dopravni-site-(TEN-T)). [cit. 2023-12-26].
- [2] *Why does Europe need ERTMS?* Online. ERTMS. Dostupné z: <https://www.ertms.net/about-ertms/ertms-in-brief/>. [cit. 2023-12-15].
- [3] BERBINEAU, Marion; JONSSON, Magnus; BONNIN, Jean-Marie; CHERKAOUI, Soumaya; AGUADO, Marina et al. *Communication technologies for vehicles: 5th International Workshop, Nets4Cars/Nets4Trains 2013, Villeneuve d'Ascq, France, May 14-15, 2013 : proceedings*. LNCS sublibrary. New York: Springer, [2013]. ISBN 978-3-642-37974-1. [cit. 2024-05-26].
- [4] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *DIRECTIVE (EU) 2016/798, DIRECTIVE (EU) 2016/798 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL*. 2020 [cit. 2024-05-26].
- [5] NING, B.; TANG, T.; QIU, K.; GAO, C. a WANG, Q. *CTCS—Chinese Train Control System*. Online. In: NING, B. (ed.). *Advanced Train Control Systems*. WIT Transactions on State of the Art in Science and Engineering. WIT Press, 2010, s. 1-7. ISBN 978-1-84564-494-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.2495/978-1-84564-494-9/01>. [cit. 2023-12-25].
- [6] AUTOR. *ETCS*. Online. Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/digitalizace/etcs>. [cit. 2023-12-27].
- [7] VIŠNOVSKÝ, Karel a ZÁVOD TECHNIKA, AŽD Praha s.r.o., *ETCS A JEHO VAZBY NA INFRASTRUKTURU*. 20. KONFERENCE ŽELEZNIČNÍ DOPRAVNÍ CESTA 2018, 2018. Dostupné také z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/50157286/15-visnovsky-azd-sb.pdf>. [cit. 2023-12-15].
- [8] JURAJ KOVÁČ | 1.5.2012 (12:09). *Švédsko spustilo ETCS Level 3, pomůže hlavně regionálním tratím*. Online. ŽelPage.cz. Dostupné z: <https://www.zelpage.cz/zpravy/8586>. [cit. 2023-12-27].
- [9] KLEGA, Marcel. *ZAVÁDĚNÍ SYSTÉMU ETCS NA TRATÍCH V ČR*. 2012. Dostupné také z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/50157246/a06-klega-szdc-sb.pdf>. [cit. 2024-05-26].

- [10] MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. *Plán moderního zabezpečení české železnice: Implementace evropského vlakového zabezpečovacího zařízení ETCS*. 2021. Dostupné z: <https://zdopravy.cz/wp-content/uploads/2021/08/etcsplan.pdf>. [cit. 2023-12.-25].
- [11] SŽDC. *Proč ETCS*. Online. Správa železnic. 2023. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/digitalizace/etcs/proc-etcs>. [cit. 2023-12-25].
- [12] ESTUDIO.CZ. *ČSN EN 50159 (342670) Drážní zařízení - Sdělovací a zabezpečovací systémy a systémy zpracování dat - Komunikace v přenosových zabezpečovacích systémech*. Online. Technické normy ČSN. 08/2011n. 1. Dostupné z: <https://www.technicke-normy-csn.cz/csn-en-50159-342670-182824.html#>. [cit. 2024-05-26].
- [13] *SUBSET-026-2*. Online. Nenalezený vydavatel. 2016. Dostupné z: <https://webpages.iust.ac.ir/sandidzadeh/Courses/Signalling%20/spec3%20ETCS%20baseline%20%20and%20GSM-R%20baseline%201/Index04%20SUBSET-026%20v360/SUBSET-026-8%20v360.pdf>. [cit. 2024-05-26].
- [14] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *COMMISSION REGULATION (EU) 2016/919 of 27 May 2016 on the technical specification for interoperability relating to the -control-command and signalling- subsystems of the rail system in the European Union*. 2016. [cit. 2024-05-26].
- [15] MINISTERSTVO DOPRAVY ČR. *173 VYHLÁŠKA Ministerstva dopravy ze dne 22. června 1995, kterou se vydává dopravní řád drah*. 22. června 1995 [cit. 2024-05-26].
- [16] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *PROVÁDĚCÍ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2019/776 ze dne 16. května 2019*. 2019. [cit. 2024-05-26].
- [17] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *PROVÁDĚCÍ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2020/387 ze dne 9. března 2020*. 2020. [cit. 2024-05-26].
- [18] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *PROVÁDĚCÍ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2020/420 ze dne 16. března 2020*. 2020. [cit. 2024-05-26].
- [19] COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. *PROVÁDĚCÍ NAŘÍZENÍ KOMISE (EU) 2023/1695 ze dne 10. srpna 2023*. 2023. [cit. 2024-05-26].
- [20] SŽDC. *Pokyn provozovatele dráhy k zajištění plynulé a bezpečné drážní dopravy — Testy kompatibility palubních a traťových částí systému ERTMS/ETCS úrovně 2*. 2018. Dostupné z: <https://www.spravazeleznic.cz/>

- documents/50004227/139626480/SZ\_PPD-2L2018\_sezm1\_20210428.pdf/8b8d4c6a-5e82-4fbb-9249-99ce524ad7a5?version=2.0. [cit. 2023-12.-25].
- [21] BRABEC, Karel; MELICHAR, František; RŮŽIČKA, Karel a BITTNER, Jaromír. *Metodický postup pro provádění zkoušek kompatibility, schvalování a uvádění do provozu vozidel vybavených zabezpečovacím systémem ETCS ve znění platném od 1.3.2021*. 2021. Dostupné z: [https://ducrcz.cz/wp-content/uploads/2023/05/Metodicky\\_postup\\_pro\\_provedeni\\_zkousek\\_kompatibility-1.pdf](https://ducrcz.cz/wp-content/uploads/2023/05/Metodicky_postup_pro_provedeni_zkousek_kompatibility-1.pdf). [cit. 2023-12.-25].
- [22] *Základní traťové rádiové spojení*. Online. In: SŽDC. Správa železnic. Dostupné z: <https://provoz.spravazeleznic.cz/Portal/ViewArticle.aspx?oid=2104272>. [cit. 2023-12-25].
- [23] *Pásmo železničních rádiových sítí*. Online. DVOŘÁK, Pavel. Railian.cz. Dostupné z: <https://www.railian.cz/pasma-zeleznicnich-radiovych-siti.html>. [cit. 2023-12-25].
- [24] HE, Ruisi; AI, Bo; WANG, Gongpu; GUAN, Ke; ZHONG, Zhangdui et al. High-Speed Railway Communications: From GSM-R to LTE-R. Online. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2016, roč. 11, č. 3, s. 49-58. ISSN 1556-6072. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/MVT.2016.2564446>. [cit. 2023-12-27].
- [25] SAUTER, Martin. *From GSM to LTE-advanced pro and 5G: an introduction to mobile networks and mobile broadband*. Third edition. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017. ISBN 9781119346869. [cit. 2024-05-26].
- [26] KOLKA, Zdeněk. *Počítačové a komunikační sítě*. 2007. [cit. 2024-05-26].
- [27] Fitzek, Frank. (1997). *Quality of Service Support in Wireless Multi-Code CDMA Systems*. [cit. 2024-05-26].
- [28] *SUBSET-093*. Online. Nenalezený vydavatel. 04-March-2022n. 1. Dostupné z: [https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/index37\\_reserved\\_document\\_informative\\_specifications\\_0.pdf](https://www.era.europa.eu/system/files/2022-11/index37_reserved_document_informative_specifications_0.pdf). [cit. 2024-05-26].
- [29] FRAGA-LAMAS, Paula; FERNÁNDEZ-CARAMÉS, Tiago a CASTEDO, Luis. Towards the Internet of Smart Trains: A Review on Industrial IoT-Connected Railways. Online. *Sensors*. 2017, roč. 17, č. 6. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/s17061457>. [cit. 2023-12-25].
- [30] EIRENE. *System Requirements Specification Version 16.0.0*. 0.0.2. 21 December 2015n. 1. Dostupné z: [https://uic.org/IMG/pdf/srs-16.0.0\\_uic\\_951-0.0\\_2\\_final.pdf](https://uic.org/IMG/pdf/srs-16.0.0_uic_951-0.0_2_final.pdf). [cit. 2023-12.-28].

- [31] TRÖGEL, Martin. *SŽ TSI CCS/MP1: Zásady pro projektování traťové části ERTMS pro tratě s výhradním provozem evropského vlakového zabezpečovače*. 2022. Dostupné z: <https://www.spravazeleznice.cz/documents/50004227/142705238/S%C5%BD+TSI+CCS+MP1.pdf/1cf94a98-657c-4579-a466-4adc85136804?version=1.0>. [cit. 2023-12.-28].
- [32] ČSN EN 15273-1+A1 (280340), *Železniční aplikace - Průjezdové průřezy tratí a obrysy vozidel*. 05/2017n. 1. [cit. 2024-05-26].
- [33] FUNKWERK. *Data Radio Device for ETCS Purpose RIU-ETCS 5E. V3.2*. Dostupné z: [https://funkwerk.com/en/wp-content/uploads/2020/03/Funkwerk-Datasheet-RIU\\_ETCS-5E\\_EN.pdf](https://funkwerk.com/en/wp-content/uploads/2020/03/Funkwerk-Datasheet-RIU_ETCS-5E_EN.pdf). [cit. 2023-12.-28].
- [34] POLOMARCONI.IT. *FOUR BAND GSM - DCS - L1 GPS - UMTS ANTENNA: QDBLUD1*. Data Sheet Rev. 08. 2023. Dostupné z: <https://products.polomarconi.it/wp-content/uploads/datasheet/QDBLUD1.pdf>. [cit. 2023-12.-28].
- [35] NAMITA a KHOSLA, Dishant. *Journal of Mobile Computing, Communications & Mobile Networks: Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for Mobile Communication: A Review*. Volume 6, Issue 2. 1/2019n. 1. ISSN 2349-901X. [cit. 2023-12.-28].
- [36] Saini, Dr.Hardeep & Thakur, Abhishek & Ku, Rajesh. (2017). *Ameliorating the Performance of a Planar Inverted F Antenna by Minimization of Losses*. Progress In Electromagnetics Research M. Vol. 56. 121–131. 10.2528/PIERM16112903. [cit. 2024-05-26].
- [37] Saidatu, N.A. & Soh, Ping Jack & Sun, Y. & Lauder, D. & Abdullah Al-Hadi, Azremi. (2010). *Multiband Fractal PIFA (Planar Inverted F Antenna) for mobile phones*. 671 - 675. 10.1109/ISWCS.2010.5624482. [cit. 2024-05-26].
- [38] Kwon, Oh-Yun & Kim, Byung-Sung & Song, Reem. (2018). *A Fully Integrated Shark-Fin Antenna for MIMO-LTE, GPS, WLAN, and WAVE Applications*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. PP. 1-1. 10.1109/LAWP.2018.2805681. [cit. 2024-05-26].
- [39] Arya, Ashwini & Hassan, Rehab S.. (2020). *Shark-Fin Antenna for Railway Communications in LTE-R, LTE, and Lower 5G Frequency Bands*. Progress in Electromagnetics Research. Vol. 167. pp. 83-94. [cit. 2024-05-26].

- [40] Cui, Jiaqian & Zhang, Anxue & Chen, Xiaoming. (2019). *An Omnidirectional Multiband Antenna for Railway Application*. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. PP. 10.1109/LAWP.2019.2952648. [cit. 2024-05-26].
- [41] Tütüncü, Bilal & Kösem, Mahmut. (2022). *Substrate Analysis on the Design of Wide-Band Antenna for Sub-6 GHz 5G Communication*. Wireless Personal Communications. 125. 10.1007/s11277-022-09619-9. [cit. 2024-05-26].
- [42] Khosla, Dishant. (2019). *Planar Inverted-F Antenna (PIFA) for Mobile Communication: A Review*. 10-14. [cit. 2024-05-26].
- [43] Polomarconi. *BRGD-R*. Online. Polomarconi.it. 2022. Dostupné z: <https://products.polomarconi.it/wp-content/uploads/datasheet/BRGD-R.pdf>. [cit. 2024-05-26].
- [44] Polomarconi. *BRGI-R*. Online. Polomarconi.it. 2018. Dostupné z: <https://products.polomarconi.it/wp-content/uploads/datasheet/BRGI-R.pdf>. [cit. 2024-05-26].
- [45] POLOMARCONI. *QDBLUD1*. Online. Polomarconi.it. 2023. Dostupné z: <https://products.polomarconi.it/wp-content/uploads/datasheet/QDBLUD1.pdf>. [cit. 2024-05-26].
- [46] HUBER+SUHNER. *1399.17.0039*. Online. mouser.com. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/HUBER%2BSUHNER/1399.17.0039?qs=Cv1v43E0JppbS6i5sv%252BhwQ%3D%3D>. [cit. 2024-05-26].
- [47] HUBER+SUHNER. *1309.17.0093*. Online. mouser.com. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/HUBER%2BSUHNER/1309.17.0093?qs=Cv1v43E0Jpq2fuMP3p81cg%3D%3D>. [cit. 2024-05-26].
- [48] HUBER+SUHNER. *1399.17.0122*. Online. mouser.com. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/ProductDetail/HUBER+SUHNER/1399.17.0122?qs=Cv1v43E0JppC2f%252Bc84W0Cw%3D%3D>. [cit. 2024-05-26].
- [49] DUDOYER, Stephen; DENIAU, Virginie; BEN, Nedim a ADRIANO, Ricardo. Susceptibility of the GSM-R Transmissions to the Railway Electromagnetic Environment. Online. In: PERPINYA, Xavier (ed.). *Infrastructure Design, Signaling and Security in Railway*. InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0448-3. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/36149>. [cit. 2023-12-28].
- [50] SPRÁVA ŽELEZNIC. *Měřící vůz ERTMS*. Online. CTD. Dostupné z: <https://www.tudc.cz/index.php/diagnosticke-prostredky/ertms/>. [cit. 2024-05-26].



- [51] NAVRÁTIL, Martin. *851.014 — měřicí vůz pro ERTMS v Hranicích na Moravě*. Online. Railpage.net. Dostupné z: <https://www.railpage.net/fotografie/851-014-merici-vuz-pro-ertms-v-hranicich-na-morave/>. [cit. 2024-05-26].
- [52] BUSDORDRECHT2003. *Eurailscout Motorpost Plan mP BRT-91*. Online. Ne-nalezený vydavatel. Thu 12 oct '23. Dostupné z: <https://treinpositities.nl/foto/196772>. [cit. 2024-05-26].
- [53] Musa, James Aliyu, Bhar. *Solving Wave Equation using Finite Element Method*. (2021). 10.13140/RG.2.2.24199.32169. [cit. 2024-05-26].
- [54] RIBEIRO, André Gonçalves. *Analysis of Antennas- Locations on Trains for Mobile Communications*. October 2018. Dostupné také z: [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997258501/Dissertacao%20Andre%20Ribeiro\(pos%20defesa\).pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997258501/Dissertacao%20Andre%20Ribeiro(pos%20defesa).pdf). [cit. 2024-05-26].
- [55] ŠUSTR, Jiří. *ETCS Rádiové plánování a handover mezi BTS - zkušenosti z provozu. Interní dokument*. 2023. [cit. 2023-12.-28].
- [56] GEORGIEVA, Natalia. *LECTURE 8: Basic Methods in Antenna Measurements*. 2020. Dostupné z: [https://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna\\_dload/current\\_lectures/L08\\_Measure.pdf](https://www.ece.mcmaster.ca/faculty/nikolova/antenna_dload/current_lectures/L08_Measure.pdf). [cit. 2023-12.-28].
- [57] SPENCER, Matthew. *Lecture 17: Near and Far, Radiation Patterns, Links*. Online. 2023. Dostupné z: <https://pages.hmc.edu/mspencer/e157/fa23/slides/17.pdf>. [cit. 2024-05-26].
- [58] FUNKWERK. *MT2. V4.0*. Dostupné z: [https://www.funkwerk.com/wp-content/uploads/2015/07/MT2\\_EN.pdf](https://www.funkwerk.com/wp-content/uploads/2015/07/MT2_EN.pdf). [cit. 2023-12.-28].
- [59] FUNKWERK. *GSM-R Radio Module: MT5E-AD / MT5E-SD. V2.0*. Dostupné z: [https://funkwerk.com/en/wp-content/uploads/2020/03/Funkwerk-Datasheet-MT5E-AD-MT5E-SD\\_EN.pdf](https://funkwerk.com/en/wp-content/uploads/2020/03/Funkwerk-Datasheet-MT5E-AD-MT5E-SD_EN.pdf). [cit. 2023-12.-28].
- [60] ČSN ETS 300 582 ED.4 (872605), *Digitální buňkový telekomunikační systém (Fáze 2) - Všeobecně k funkcím pro přizpůsobení terminálů (TAF) pro pohyblivé stanice (MS) (GSM 07.01)*. 08/1997n. 1. [cit. 2023-12.-28]. [cit. 2024-05-26].
- [61] ŠUSTR, Jiří. *Měření GSM-R antén pro ETCS na jednotce RegioPanter 640.201-0 Interní dokument*. 2023. [cit. 2024-5.-26].

- [62] Ustuner, Fatih & Aydemir, Emre & Gulec, Erhan & Ilarslan, Mustafa & Celebi, Mansur & Demirel, Ekrem. (2014). *Antenna radiation pattern measurement using an unmanned aerial vehicle (UAV)*. 1-4. 10.1109/URSI-GASS.2014.6929024. [cit. 2024-05-26].
- [63] Fritzel, Torsten & Steiner, Hans-Jürgen & Habersack, J & Schippers, H. & Ferrante, J.-G. (2005). *Antenna Pattern Measurements of Full-Size Air Vehicles with an Airborne Near-field Test Facility (ANTF)\**. [cit. 2024-05-26].
- [64] OWAIS, Muhammad; MIDTIBY, Henrik; TRIFON, Diana a HASAN, Agus. Autonomous Drone-Based Antenna Radiation Pattern Characterization. Online. In: *2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. IEEE, 2022, s. 207-213. ISBN 978-1-6654-0593-5. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICUAS54217.2022.9836092>. [cit. 2024-05-26].
- [65] ASGHAR, Muhammad Ehtisham; BORNKESSEL, Christian; HEIN, Matthias A.; KOHLER, Thomas; KOCHER, Jens et al. Simulation and Measurement of Locomotive Antennas in the Installed State Based on a Scaled Mockup. Online. In: *2021 Antenna Measurement Techniques Association Symposium (AMTA)*. IEEE, 2021, s. 1-6. ISBN 978-1-7362351-1-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.23919/AMTA52830.2021.9620626>. [cit. 2024-05-26].