

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**katedra elektromagnetického pole**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

2007

Milan Švanda

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ v PRAZE**

**Fakulta elektrotechnická**

**katedra elektromagnetického pole**

**Použití RFID systému pro identifikaci  
pohybujících se sportovců**

Diplomová práce

Vedoucí práce: Ing. Milan Polívka, Ph.D.

Diplomant: Milan Švanda

leden 2007

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci *Použití RFID systému pro identifikaci pohybujících se sportovců* řešil samostatně pouze za odborného vedení vedoucího práce *Ing. Milana Polívky, Ph.D.* a s využitím cenných rad *Ing. Přemysla Hudce, Csc.* V seznamu použité literatury jsem uvedl veškeré použité zdroje.

Nemám námitky proti půjčování, zveřejnění a dalšímu využití práce, pokud s tím bude souhlasit katedra elektromagnetického pole ČVUT FEL.

V Praze, dne 10. ledna 2007

.....  
podpis

## **Abstrakt**

Předložená práce se zabývá možností aplikace komerčně vyráběného RFID systému Trolley Ponder pro identifikaci sportovců v hromadných závodech. Na základě matematického modelu a měření výkonových úrovní pomocí testovacích antén je provedena optimalizace celého systému. Cílem je dosažení dostatečné rezervy ve výkonové bilanci. Optimalizace spočívá ve vhodném nastavení vysílacího výkonu, umístění a sklonu použitých antén, volbě polarizace. Nedílnou součástí je návrh antény TAGu s dostatečným ziskem. Funkce takto upraveného systému je ověřena pomocí testování v terénu. V závěru práce je nastíněn směr, kterým se lze ubírat při dalším zdokonalování systému a při jeho zavádění do praxe.

## **Klíčová slova**

RFID, bezkontaktní identifikace, transpondér, patchová anténa, půlvlnný dipól, zkrácený dipól, dvoupráskový model, hromadné závody

## **Abstract**

The thesis deals with possibility application of commercial RFID system Trolley Ponder for the identification of athlete in mass sports. On the basis of the mathematical model and measuring power level by the help of tests antennas was made a optimization of system. The purpose is achievement a sufficient power reserve. The optimization consists in the configuration of power level, position and inclination of antennas and choice polarization. The consequential is the design of TAGs antenna. The system function is verified in a outdoor test. In the conclusion is indicated the direction of the future system works at the implementing to the practise.

## **Key words**

RFID, contactless identification, transpoder, patch antenna, half-wave dipole, shorted dipol, two-rays model, mass sports

## **Poděkování**

Osobně bych chtěl na tomto místě poděkovat zejména vedoucímu práce *Ing. Milanu Polívkovi, Ph.D. a Ing. Přemyslu Hudcovi, Csc.* za obětavou pomoc při přípravě této práce. *Ing. Milanu Polívkovi, Ph.D.* patří můj nemalý dík též za ochotné a pečlivé průběžné čtení tohoto textu a za cenné připomínky, které jej pomohly výrazně zlepšit a doplnit. Děkuji také majitelům firmy SportSoft s.r.o. za spolupráci při testování a za zapůjčení systému.

V neposlední řadě děkuji svým rodičům za podporu v celém průběhu studia.

V Praze, dne 10. ledna 2007

Milan Švanda

## **Předmluva**

Dnes nachází rozličné RFID systémy uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti, kde pracují velmi spolehlivě. V poslední době se však objevil zájem používat komerčně vyráběný RFID systém, jehož původní účel byl identifikace zboží v prodejních řetězcích, pro identifikaci sportovců při hromadných závodech. Jedná se především o závody v běhu a v běhu na lyžích. Další možnou oblastí využití jsou cyklistické závody. Tento systém má sloužit pouze k zaznamenání průběhu sportovce kontrolou, nikoli k měření cílového času popř. mezičasů. K identifikaci může tedy docházet v libovolné poměrně velké vzdálenosti od kontrolní brány.

Takovýto způsob využití RFID systému s sebou přináší mnohé problémy, se kterými jsme se dříve nesečkali. Tato práce se zabývá systémovým rozborem se zaměřením na výkonovou bilanci. Jsou zde využity naměřené výkonové úrovně a matematický model pro nalezení optimální orientace a polohy antén, volbu vhodné polarizace a vysílacího výkonu. Velmi důležitou součástí tvoří návrh vhodného typu antény TAGu a její umístění na těle sportovce. Ve výsledku by práce měla přispět k úpravě jednotlivých částí tohoto systému do takové podoby, aby byl pro uvedený účel použitelný s přijatelnou spolehlivostí.

## Syntaxe a konvence práce

Práce je rozdělena do osmi základních kapitol, které jsou dále děleny na jednotlivé podkapitoly. První kapitolu tvoří úvod. Druhá kapitola popisuje návrh a realizaci testovacích antén včetně jejich výsledných parametrů. Ve třetí kapitole jsou rozepsány vztahy obsažené v matematických modelech a posouzena přesnost modelu. Cílem čtvrté kapitoly je nalézt optimální nastavení parametrů systému. V páté kapitole je uveden popis měření přijaté výkonové úrovně testovací anténou a na základě těchto měření je popsán vliv dalších úniků které se mohou vyskytnout při provozu systému. Šestá kapitola je věnována návrhu antény TAGu s požadovanými vlastnostmi. Sedmá kapitola se zabývá testováním výsledného systému v terénu. Osmou, a tedy poslední, kapitolu tvoří závěr práce. Je zde nastíněn další postup ve vývoji systému. Na konci svazku je umístěno 5 textových příloh, které doplňují práci o podrobnější informace. Šestou přílohu tvoří CD obsahující vlastní textovou část a výpočetní zdrojové texty v elektronické podobě.

Důležité pojmy, myšlenky apod. jsou vyznačeny **tučně**, popř. *kurzívou*. Názvy jsou pak zvýrazněny KAPITÁLKAMI. Obrázky, grafy, tabulky a rovnice jsou číslovány vůči základním kapitolám, v nichž se daný objekt nachází. Použitá literatura je číslována vůči celému textu. Elektronické zdroje dostupné na internetu jsou odlišeny označením [e-...].

## Obsah

<b>Prohlášení</b> .....	<b>2</b>
<b>Abstrakt</b> .....	<b>3</b>
<b>Poděkování</b> .....	<b>4</b>
<b>Předmluva</b> .....	<b>5</b>
<b>Syntaxe a konvence práce</b> .....	<b>6</b>
<b>Obsah</b> .....	<b>7</b>
<b>Seznamy</b> .....	<b>9</b>
Seznam použitých symbolů .....	9
Seznam použitých zkratk .....	12
Seznam příloh .....	13
<b>1 Úvod</b> .....	<b>14</b>
1.1 Cíle a přínosy práce .....	16
1.2 Parametry systému Trolley Ponder .....	17
<b>2 Testovací antény</b> .....	<b>18</b>
2.1 Meandrově zkrácený dipól.....	18
2.1.1 Parametry antény .....	19
2.2 Nízkoprofilový čtvrtvlnný patch.....	21
2.2.1 Parametry antény .....	22
<b>3 Matematický model</b> .....	<b>25</b>
3.1 Základní dvouapráskový model.....	25
3.2 Modifikovaný dvouapráskový model.....	27
3.2.1 Porovnání modelovaných a měřených dat .....	29
<b>4 Optimalizace parametrů</b> .....	<b>31</b>
4.1 Nastavení parametrů systému .....	31
4.2 Vliv změny parametrů prostředí .....	35
<b>5 Měření výkonových úrovní</b> .....	<b>37</b>
5.1 Schéma měřicího pracoviště .....	38
5.2 Seznam měřicích přístrojů .....	38
5.3 Další úniky .....	39
5.4 Výkonová bilance s testovací anténou .....	42
<b>6 Návrh antény TAGu</b> .....	<b>44</b>
6.1 Porovnání vlastností antén .....	44
6.2 Návrh RFID antény .....	45
6.3 Parametry antény .....	46
6.4 Celková výkonová bilance systému .....	49

<b>7</b>	<b>Testování systému .....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>54</b>
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>56</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>58</b>
	Příloha 1 – Testování systému .....	59
	Příloha 2 – Měření parametrů antén TAGu .....	64
	Příloha 3 – Parametry pevných antén .....	68
	Příloha 4 – Účinnost patchových antén .....	70
	Příloha 5 – Modifikovaný dvoupráskový model .....	72

## Seznamy

### Seznam použitých symbolů

$\alpha_p$	Odklon přímého paprsku od směru maxima směrové charakteristiky TAGu ve vertikální rovině
$\alpha_o$	Odklon odraženého paprsku od směru maxima směrové charakteristiky TAGu ve vertikální rovině
$\beta_p$	Odklon přímého paprsku od směru maxima směrové charakteristiky vysílací antény ve vertikální rovině
$\beta_o$	Odklon odraženého paprsku od směru maxima směrové charakteristiky vysílací antény ve vertikální rovině
$\gamma_p$	Odklon přímého paprsku od směru maxima směrové charakteristiky TAGu v horizontální rovině
$\gamma_o$	Odklon odraženého paprsku od směru maxima směrové charakteristiky TAGu v horizontální rovině
$\delta_p$	Odklon přímého paprsku od směru maxima směrové charakteristiky vysílací antény v horizontální rovině
$\delta_o$	Odklon odraženého paprsku od směru maxima směrové charakteristiky vysílací antény v horizontální rovině
$\varepsilon$	Komplexní permitivita
$\varepsilon_r'$	Relativní permitivita
$\eta$	Účinnost patchové antény
$\lambda$	Vlnová délka
$\sigma$	Elektrická vodivost
$\vartheta$	Úhel dopadu resp. odrazu paprsku
$\psi$	Sklon pevné antény
$\omega$	Úhlový kmitočet
$a$	Polarizační konstanta
$d$	Vzdálenost antény od těla, vzdálenost TAGu umístěného uprostřed trati od pevné antény

$d_2$	Vzdálenost TAGu od pevné antény
$E$	Intenzita elektrického pole
$E_{mez}$	Mezní intenzita elektrického pole
$f$	Kmitočet
$G$	Maximální výkonový zisk antény
$G_{max}$	Maximální výkonový zisk antény
$G_p$	Maximální výkonový zisk přijímací antény
$G_t$	Maximální výkonový zisk antény TAGu
$G_{tH}$	Směrová závislost výkonového zisku antény TAGu v horizontální rovině
$G_{tV}$	Směrová závislost výkonového zisku antény TAGu ve vertikální rovině
$G_v$	Maximální výkonový zisk vysílací antény
$G_{vH}$	Směrová závislost výkonového zisku vysílací antény v Horizontální rovině
$G_{vV}$	Směrová závislost výkonového zisku vysílací antény ve vertikální rovině
$h$	Tloušťka substrátu patchové antény
$h_1$	Výška vysílací antény
$h_2$	Výška antény TAGu
$j$	Komplexní jednotka
$k$	Vlnový vektor
$L_{k1}$	Útlum kabelu na vysílací straně
$L_{k2}$	Útlum kabelu na přijímací straně
$L_{konv}$	Konverzní ztráty TAGu
$L_0$	Útlum na trase
$p$	Vzdálenost TAGu od středu trati
$P$	Výkon

$P_p$	Výkon přijatý čtecím zařízením
$P_t$	Výkon přijatý TAGem
$P_v$	Vysílaný výkon
$r$	Minimální bezpečná vzdálenost od vysílací antény
$R$	Koeficient odrazu paprsku od země
$r_p$	Délka dráhy přímého paprsku
$r_o$	Délka dráhy odraženého paprsku
$S_{11}$	Koeficient odrazu
$\text{tg}\delta$	Ztrátový činitel
$Z_{in}$	Vstupní impedance

## Seznam použitých zkratk

EAS	Ochrana zboží proti krádeži (Electronic article surveillance)
EIRP	Efektivní izotropický vyzářený výkon (Effective Isotropic Radiated Power)
HP	Horizontální polarizace
ISM	Aplikace v průmyslu, vědě a lékařství (Industrial, Scientific and Medical)
RFID	Radiofrekvenční identifikace (Radio Frequency Identification)
SAR	Měrný absorbovaný výkon
SAW	Povrchová akustická vlna (Surface acoustic wave)
TAG	Označení pro nosič čipu (transpondér)
UHF	Pásmo ultra krátkých vln (Ultra High Frequency)
VA	Vysílací anténa
VP	Vertikální polarizace

## Seznam příloh

Příloha 1: Testování systému

Příloha 2: Měření parametrů antén TAGu

Příloha 3: Parametry pevných antén

Příloha 4: Účinnost patchových antén – zdrojový text MATHCAD 2000

Příloha 5: Modifikovaný dvoupráskový model – zdrojový text MATLAB 6.1

Příloha 6: CD Diplomová práce

- Textová část ve formátu pdf
- Výpočet účinnosti patchových antén v MATHCAD 2000
- Modifikovaný dvoupráskový model v MATLAB 6.1

# 1 ÚVOD

*„Když jsem chtěl něco objevit, nejprve jsem si prostudoval všechno, co bylo v tomto problému dosaženo minulostí.“*

*T. A. Edison, [5]*

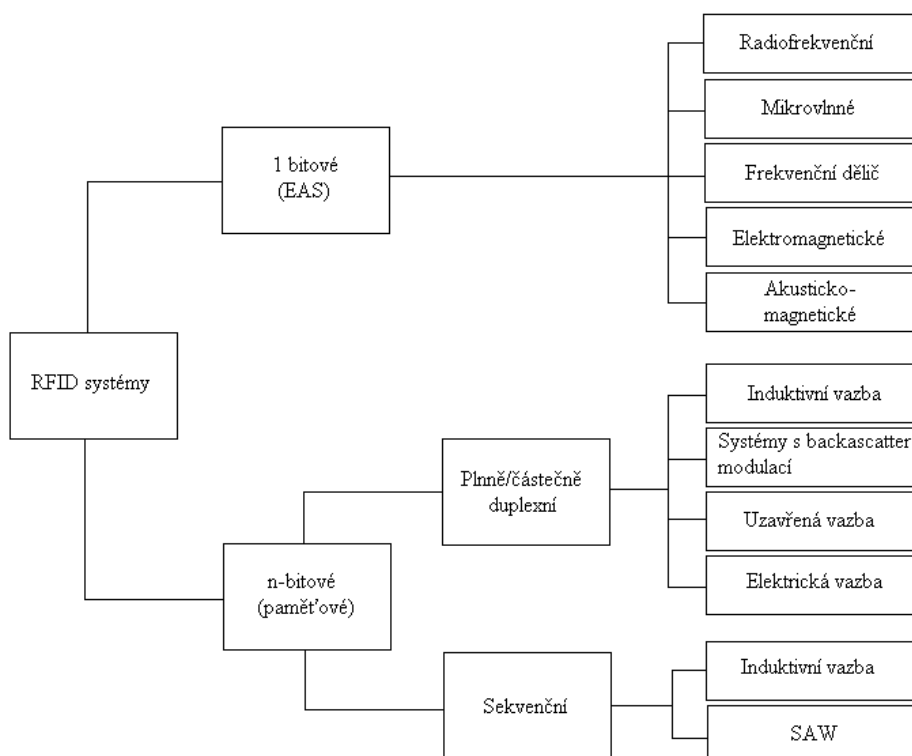
Předchůdcem systémů pro bezkontaktní identifikaci produktů (RFID) je čárový kód. Tento způsob byl patentovaný před více než padesáti lety – roku 1952 a k jeho všeobecnému rozšíření došlo v roce 1984.

Okolo roku 1969 se začal Američan *Mario Cardullo* zabývat myšlenkou vytvoření značky, jejíž identifikace by proběhla plně automaticky. To byl počátek RFID, radiofrekvenční identifikace. Myšlenka dostala konkrétní obrysy roku 1970, kdy zmíněný vynálezce podal patentovou přihlášku na RFID. Patentový úřad mu patent udělil roku 1973. V sedmdesátých letech proběhl vývoj RFID v laboratořích mnoha firem (IBM, ComServ, ...). Až do devadesátých let minulého století však zůstala oblast RFID systémů doménou výzkumníků. Vše se změnilo v posledním desetiletí, kdy rozvoj technologie umožnil použití RFID v řadě projektů. S příchodem tohoto století došlo ke standardizaci RFID systémů a byly tak vytvořeny podmínky pro jejich celosvětové využití [11].

V dnešní době je RFID technologie poměrně na vzestupu, neboť ceny těchto zařízení neustále klesají a zvyšuje se jejich účinnost. Díky tomu nacházejí

RFID systémy uplatnění v mnoha oborech lidské činnosti jako jsou průmysl, věda a lékařství (ISM), velmi rozšířené jsou pak v komerční oblasti.

Systémy pro bezkontaktní identifikaci mohou pracovat na mnoha principech v závislosti na účelu použití příslušného zařízení. Na obr. 1.1 je zobrazeno rozdělení RFID systémů podle fyzikálních principů. Podrobnější vysvětlení podstaty těchto principů lze nalézt v pramenu [2].



Obr. 1.1 – Rozdělení RFID systémů podle principu činnosti

Také oblast využívaných kmitočtových pásem je velice různorodá. Pohybuje se od jednotek Hz po desítky GHz.

Obecně se RFID systém skládá ze tří základních komponent. Jsou to: nosič informací (TAG, transpondér), čtecí zařízení (čtečka) a anténa (u nf principů pak cívka nebo jiný vazební prvek).

## 1.1 Cíle a přínosy práce

Jak již bylo řečeno objevil se v poslední době zájem využívat RFID systémy pro identifikaci pohybujících se sportovců v hromadných závodech. K identifikaci u dnes používaných systémů dochází při zanedbatelné rychlosti pohybu TAGu. Aby bylo možné použít RFID systém pro účely hromadných závodů, je nezbytné provádět identifikaci při mnohonásobně vyšší rychlosti. Dalším problémem je fakt, že k identifikaci musí docházet v celé šíři kontrolní brány a nikoli pouze při umístění TAGu v ose vysílací antény, jak to předpokládal původní účel systému Trolley Ponder.

V rámci semestrální práce „*Rozbor RFID systému pro identifikaci pohybujících se objektů*“ [10] byl proveden systémový rozbor komerčně vyráběného systému Trolley Ponder [e-1] pracujícího v pásmu 869 MHz se zaměřením na využití pro pohybující se sportovce. Tento rozbor byl motivován ne 100 % spolehlivostí tohoto systému při orientačním testování v terénu. Rozbor byl zaměřen na výkonovou bilanci a identifikaci systémových úniků. Jako systémové úniky byly identifikovány: vliv vícecestného šíření, pokles výkonu vlivem směrových charakteristik antén (pevných i TAGu), ztráty rozladěním antény TAGu, polarizační ztráty, zastínění antény TAGu.

Cílem této práce je návrh a realizace měření přijatých úrovní signálu pomocí testovacích antén umístěných na těle sportovce. Jako testovací anténa byl použit meandrově zkrácený planární půlvlnný dipól a nízkoprofilový čtvrtvlnný patch, který bylo nutné navrhnout. Dále je cílem porovnání takto získaných signálových úrovní s modelovanými hodnotami se zahrnutím jednotlivých typů úniků a optimalizace polohy a orientace vyzařovacích a detekčních antén, popř. návrh antény TAGu s vhodnými vlastnostmi. Dalším bodem je pak porovnání vhodnosti použití výše uvedených typů antén vzhledem k citlivosti čipu transpondéru a citlivosti přijímače RFID systému.

## 1.2 Parametry systému Trolley Ponder

Systém Trolley ponder byl původně vyvinut firmou Trolley Scan jako náhrada čárových kódů u zboží v prodejních řetězcích, ale je možné ho využít v mnoha jiných odvětvích. Jedná se o systém pracující v kmitočtovém pásmu 869,5 – 869,7 MHz. Jeho součástí je čtecí zařízení, na které lze připojit 2 antény (vysílací a při-jímací) a několik transpondérů (100 - 1000). Čtecí zařízení lze pomocí rozhraní RS 232 propojit s počítačem. Firma Trolley Scan nabízí výrobek v několika verzích. Další práce se zabývá verzí čtecího zařízení „*Small System*“ a trans-pondérů typu „*EcoChipTags*“ [e-1].

Systém je pasivní, což znamená, že nosič pro svou funkci nepotřebuje baterii, ale získává energii z nosné vlny vysílané čtečkou. Pro komunikaci je použita „backscatter modulace“ [2]. Parametry systému udávané výrobcem [e-1] jsou uvedeny v tab. 1.1.

Součást systému	Parametr	Hodnota
Celý systém	Pracovní kmitočet (Evropa)	869,5 – 869,7 MHz
	Dosah (dle prostředí a materiálu)	6 – 13 m
Čtečka	Vysílaný výkon	0,3 W – 4 W (doporučeno max. 3,5 W)
	Citlivost přijímače	-64 dBm (200 pW)
	Dynamický rozsah přijímače	54 dB
	Čtecí rychlost	70 s <sup>-1</sup>
	Počet TAGů zaznamenaných současně	až 500
Přijímací a vysílací anténa	Impedance	50 Ω
	Zisk	8 dBi
	Polarizace	lineární
Nosič (TAG)	Citlivost čipu	-6,9 dBm (200 μW)
	Zisk antény	2,1 dBi
	Polarizace	lineární
	Apertura antény	149 cm <sup>2</sup>
	Vstupní impedance antény	76+j340 Ω
	Konverzní ztráty TAGu	cca 20 dB

Tab. 1.1 – Parametry systému Trolley Ponder Small System

## 2 TESTOVACÍ ANTÉNY

Pro realizaci měření úrovní výkonu pomocí měřicího generátoru a spektrálního analyzátoru bylo nutné realizovat testovací antény se vstupní impedancí  $50 \Omega$ . Realizovány byly 2 typy antén, aby bylo možné porovnat jejich vhodnost pro daný účel. Protože anténa TAGu komerčně vyráběného systému Trolley Ponder je typu *zkrácený půlvlnný dipól*, byl zvolen tento typ antény jako jedna z testovacích antén. Jako druhá testovací anténa byl zvolen *čtvrtvlnný patch*, u kterého lze díky zemní rovině předpokládat zanedbatelný vliv podložky, na které je umístěn (např. lidská tkáň). Jako vhodný se jeví též poměrně široký vyzařovací diagram antény.

### 2.1 Meandrově zkrácený dipól

Tato anténa byla realizována na katedře elektromagnetického pole ČVUT FEL Ing. Milanem Polívkou, Ph.D. a byla k dispozici jako hotový výrobek. Není zde provedena symetrizace, neboť symetrizační vedení by mělo na kmitočtu 869 MHz příliš velké rozměry, což není pro dané použití vhodné.

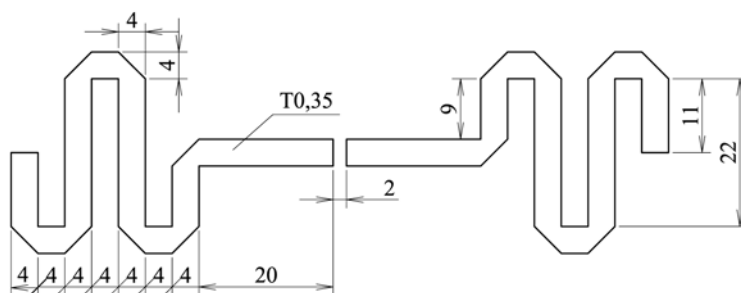


Obr. 2.1 – Meandrově zkrácený půlvlnný dipól  
(umístěný na polystyrenové podložce tloušťky 20 mm)

Naměřené parametry antény jsou uvedeny v následující podkapitole. Rozměry antény činí  $98 \times 30$  mm. Podrobné rozměry lze nalézt na obr. 2.2.

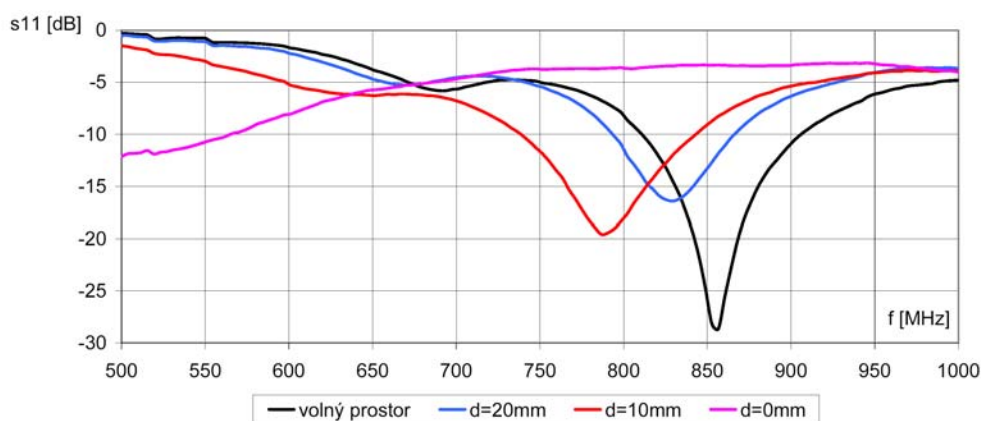
### 2.1.1 Parametry antény

Budoucí použití antény předpokládá umístění na těle sportovce, proto je nutné měřit přizpůsobení i směrové charakteristiky za těchto podmínek. Parametry byly měřeny při umístění antény na fantomu lidské tkáně. Jako fantom byl použit plastový kanistr o objemu 5 l naplněný solným roztokem o koncentraci 4 g/l. Podrobnosti o měření lze nalézt v příloze 2.



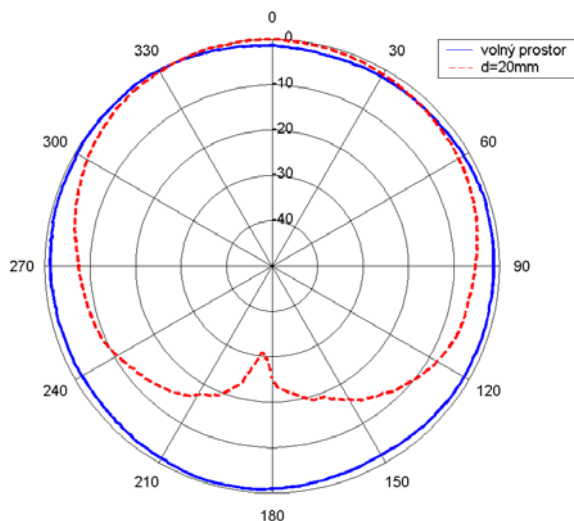
Obr. 2.2 – Rozměry meandrově zkráceného dipólu

**Přizpůsobení** antény bylo měřeno ve volném prostoru a dále ve třech různých vzdálenostech od fantomu lidského těla. Z následujícího grafu je patrný vliv lidské tkáně (fantomu) na rozladění antény. Při umístění ve vzdálenosti 20 mm od těla je přizpůsobení antény přijatelné, taková tloušťka podložky však není v praktickém použití možná.

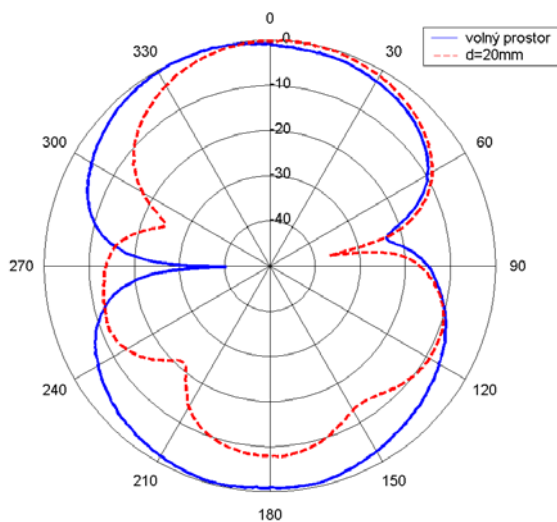


Graf 2.1 – Impedanční přizpůsobení meandrově zkráceného dipólu (umístění ve vzdálenosti d od fantomu lidského těla)

**Směrové charakteristiky** byly měřeny ve dvou základních rovinách (vertikální a horizontální) při umístění antény ve volném prostoru a dále ve vzdálenosti 20 mm od fantomu.



Graf 2.2 – Normovaná směrová charakteristika meandrově zkráceného dipólu umístěného ve volném prostoru a vzdálenosti 20 mm od fantomu lidského těla (horizontální rovina)



Graf 2.3 – Normovaná směrová charakteristika meandrově zkráceného dipólu umístěného ve volném prostoru a vzdálenosti 20 mm od fantomu lidského těla (vertikální rovina)

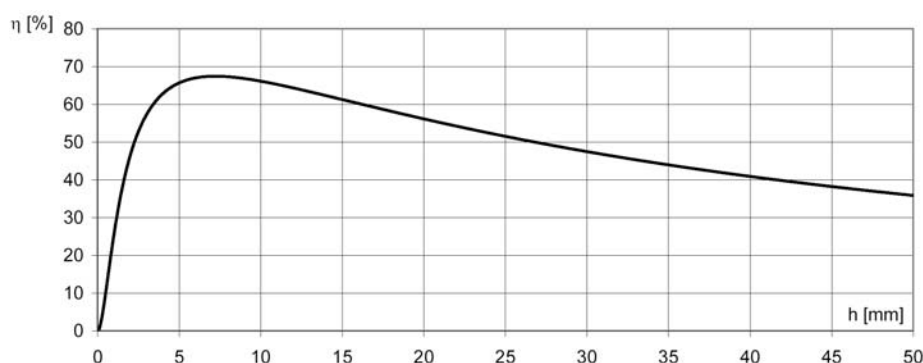
Hodnoty **maximálního zisku** antény jsou uvedeny v tabulce 2.1. Měření zisku bylo provedeno přímo na hrudi lidského těla. Podrobný postup měření je uveden v příloze 2. Přiložením antény do blízkosti lidského těla významně klesne maximální zisk. Tento jev je způsoben velkým poklesem účinnosti a rozladěním antény.

Vzdálenost antény od těla	Gmax [dBi]
volný prostor	3,8
20 mm	-5,72

Tab. 2.1 – Zisk meandrově zkráceného dipólu

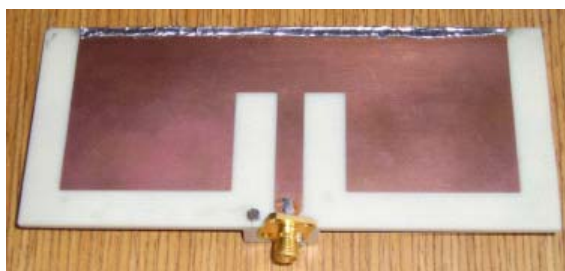
## 2.2 Nízkoprofilový čtvrtvlnný patch

Jak je patrné z grafu 2.4, který byl vytvořen na základě vztahů získaných v [4], má patchová anténa na kmitočtu 869 MHz při přijatelné výšce substrátu (cca do 3 mm) velmi malou účinnost. Účinnost antény lze zvýšit použitím substrátu o nízké relativní permitivitě nebo použitím velké tloušťky substrátu. Z tohoto důvodu také není možné anténu příliš miniaturizovat, neboť s miniaturizací výrazně klesá její zisk. Pro účely měření mohou být rozměry a hmotnost testovací antény poměrně velké. Jako řešení použitelné v praxi se jeví realizace antény z vodivé tkaniny a použití vzduchového dielektrika nebo dielektrika o velmi malé hmotnosti. Taková anténa by mohla mít díky nízké hmotnosti a částečné ohebnosti také větší rozměry.



Graf 2.4 – Účinnost patchové antény v závislosti na výšce substrátu (kmitočet 869 MHz, rozměry 120×100 mm,  $\epsilon_r=3,05$ ,  $\text{tg}\delta=0,003$ )

Anténa byla navržena pomocí empirických vztahů [3] a s využitím simulátoru elektromagnetického pole IE3D 10.2 byly její rozměry zpřesněny.



Obr. 2.3 – Nízkoprofilový čtvrtvlnný patch

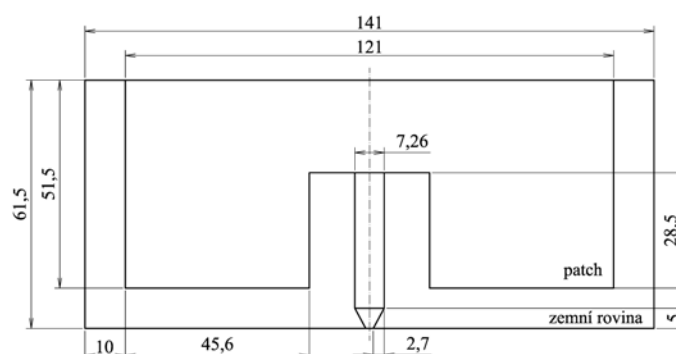
Parametry použitého substrátu jsou uvedeny v tab. 2.1. Největší tloušťka substrátu, která byla k dispozici je 1,5 mm. Pro zvýšení účinnosti byla anténa navržena na substrátu tloušťky 3 mm a realizována slepením dvou desek pomocí tenké vrstvy běžného rychle schnoucího lepidla. Zkrat na hraně antény byl realizován pomocí měděné samolepicí pásky tloušťky 35  $\mu\text{m}$ , jejíž hrana byla připájena k zemní rovině resp. motivu antény.

Název	Tloušťka substrátu	Relativní permitivita	Ztrátový činitel $\text{tg}\delta$
GIL 1000	1,5 mm	3,05	0,003

Tab. 2.2 – Parametry substrátu čtvrtvlnné patchové antény

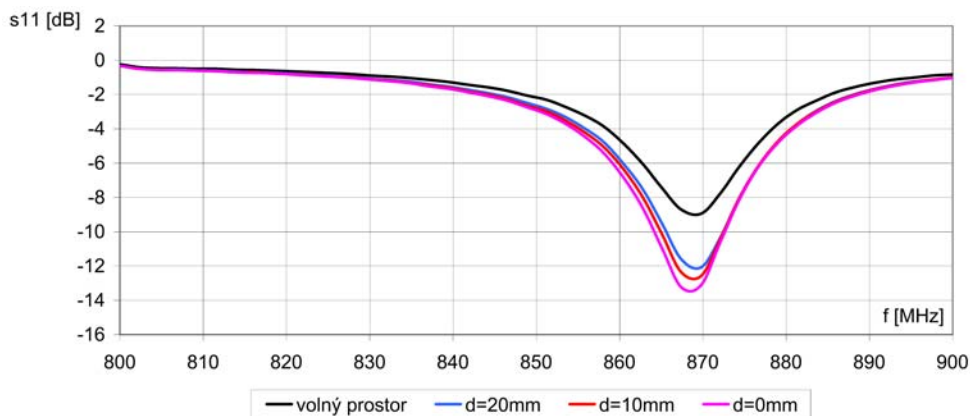
### 2.2.1 Parametry antény

Při měření antény byl použit opět fantom lidského těla jehož parametry jsou uvedeny v kapitole 2.1. Podrobnosti o měření lze nalézt též v příloze 2.



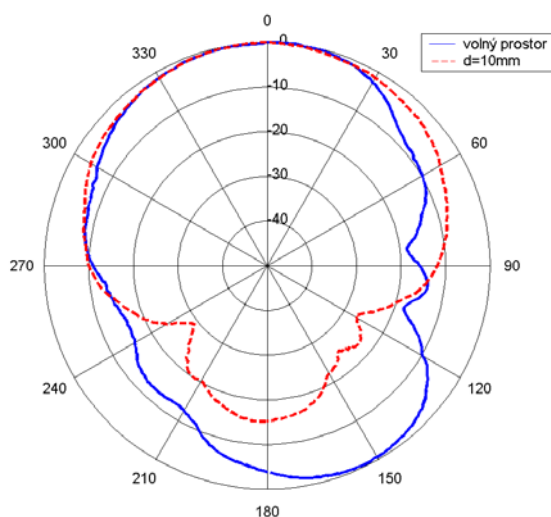
Obr. 2.4 – Rozměry nízkoprofilového čtvrtvlnného patche

**Impedanční přizpůsobení** bylo měřeno pro stejná umístění antény jako v případě meandru. Přiložením antény na fantom dochází k zanedbatelnému rozladění.

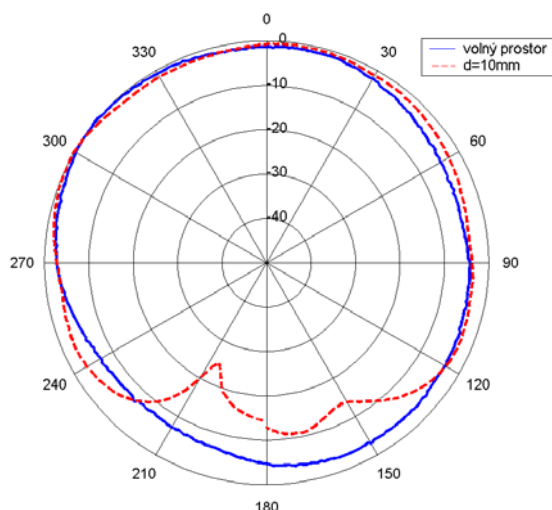


Graf 2.5 - Impedanční přizpůsobení nízkoprofilového čtvrtvlnného patche (umístění ve vzdálenosti  $d$  od fantomu lidského těla)

**Směrové charakteristiky** byly, stejně jako u předchozí antény, měřeny ve dvou základních rovinách (vertikální a horizontální). Zde při umístění antény ve volném prostoru a ve vzdálenosti 10 mm od fantomu.



Graf 2.6 – Normované směrové charakteristiky čtvrtvlnné patchové antény umístěné ve volném prostoru a vzdálenosti 10 mm od fantomu lidského těla (horizontální rovina)



Graf 2.7 – Normované směrové charakteristiky čtvrtlínové patchové antény umístěné ve volném prostoru a vzdálenosti 10 mm od fantomu lidského těla (vertikální rovina)

Hodnoty **maximálního zisku** antény jsou uvedeny v tabulce 2.3. Měření zisku bylo opět provedeno přímo na hrudi lidského těla. Podrobný postup měření je uveden v příloze 2. Jak je z naměřených hodnot patrné, přiložením antény k tělu dochází k nárůstu maximálního zisku antény. Je to způsobeno nárůstem směrovosti při zachování konstantní účinnosti antény.

Vzdálenost antény od těla	Gmax [dB]
volný prostor	-3,02
10 mm	-1,12
0 mm	-0,12

Tab. 2.3 – Zisk nízkoprofilové čtvrtlínové patchové antény

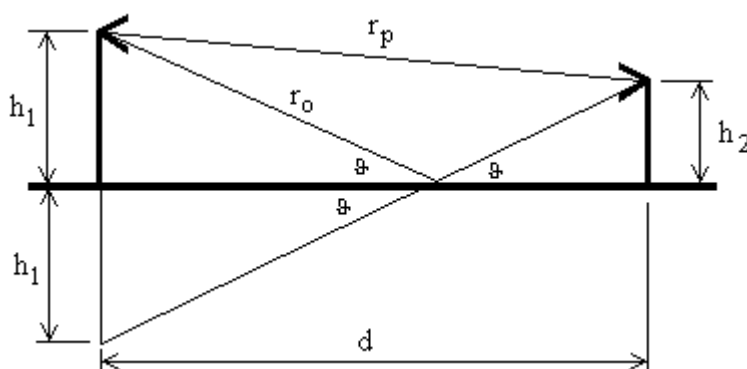
### 3 MATEMATICKÝ MODEL

Zhodnocení základních výkonových poměrů v systému bylo provedeno na základě *dvoupaprskového modelu*. Tento model bere v úvahu jeden paprsek přímý a jeden odražený od země [6]. Struktura dvoupaprskového modelu je popsána v následující kapitole. Pro lepší shodu se skutečností byl do modelu zahrnut vliv jednotlivých typů úniků. Jedná se pak o *modifikovaný dvoupaprskový model* popsany v kapitole 3.2.

Veškeré modely byly realizovány pomocí programu MATLAB 6.1.

#### 3.1 Základní dvoupaprskový model

Z následujícího obrázku je patrné uspořádání antén a význam značení použitého v rovnicích modelu. Vysílací anténa je umístěna ve výšce  $h_1$ , anténa TAGu pak ve výšce  $h_2$  nad zemí. Obě antény leží v jedné ose.



Obr. 3.1 – Základní dvoupaprskový model

Útlum na trase lze dle tohoto modelu vyjádřit vztahem

$$L_0 = -20 \cdot \log \left( \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right) \cdot \left| \frac{1}{r_p} \cdot e^{-j \cdot k \cdot r_p} + \mathbf{R}(\vartheta) \cdot \frac{1}{r_o} \cdot e^{-j \cdot k \cdot r_o} \right| \right) \quad (3.1)$$

kde dráhy přímého a odraženého paprsku jsou

$$r_p = \sqrt{(h_1 - h_2)^2 + d^2} \quad (3.2)$$

$$r_o = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d^2} \quad (3.3)$$

a koeficient odrazu od země je určen vztahem

$$\mathbf{R} = \frac{\sin(\vartheta) - a \cdot \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\vartheta)}}{\sin(\vartheta) + a \cdot \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\vartheta)}} \quad (3.4)$$

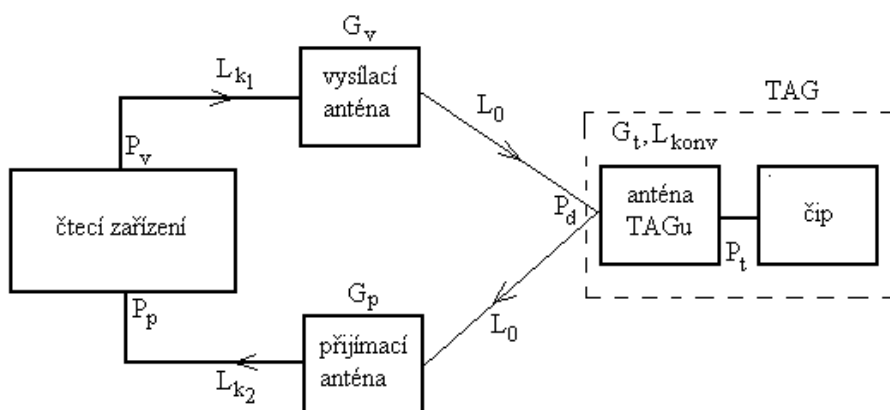
kde

$$\vartheta = \arcsin \left( \frac{h_1 + h_2}{d} \right) \quad (3.5)$$

$$a = \begin{cases} 1 & \text{vertikální polarizace} \\ \frac{1}{\varepsilon} & \text{horizontální polarizace} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon'_r - j \cdot \frac{\sigma}{\omega} \quad (3.7)$$

je komplexní permitivita terénu, jejíž hodnoty pro běžný terén jsou uvedeny v tabulce 4.1.



Obr. 3.2 – Blokové schéma modelovaného RFID systému

Na obr. 3.2 je znázorněno blokové schéma systému. Na jeho základě lze zapsat **základní přenosovou rovnici** pro výkon přijatý TAGem (v dBm) jako:

$$P_t = P_v - L_{k1} + G_v - L_0 + G_t \quad (3.8)$$

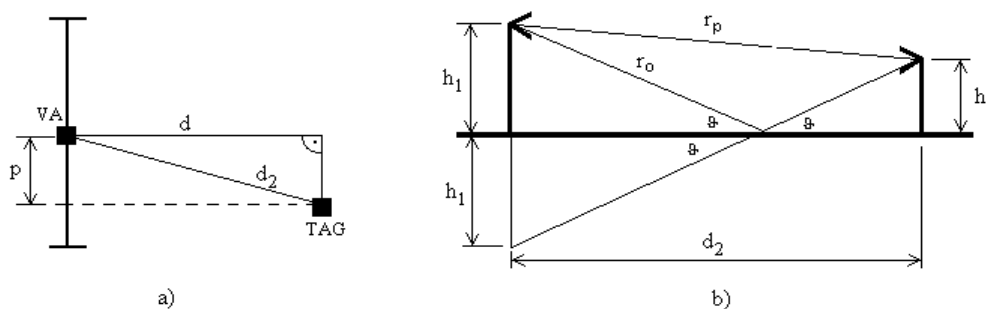
kde  $P_v$  je výkon generátoru čtečky,  $L_{k1}$  je útlum přívodního kabelu,  $G_v$  a  $G_t$  jsou zisky příslušných antén,  $L_0$  je útlum na trase. Výkon vyslaný TAGem zpět a přijatý čtečkou lze vyjádřit (v dBm) jako:

$$P_p = P_t + G_t - L_{konv} - L_0 + G_p - L_{k2} \quad (3.9)$$

kde  $L_{konv}$  jsou konverzní ztráty TAGu (viz. tab. 1.1),  $L_0$  je útlum na trase,  $G_p$  je zisk přijímací antény a  $L_{k2}$  je útlum přívodního kabelu.

### 3.2 Modifikovaný dvoupaprskový model

Do základního dvoupaprskového modelu byl zahrnut pokles výkonu vlivem směrových charakteristik antén. Modifikovaný dvoupaprskový model dále umožňuje simulovat konfiguraci, kdy vysílací anténa a anténa TAGu nejsou v jedné ose. Posun mezi anténami je označen  $p$  (viz. obr. 3.3 a)). Dále je možné měnit sklon antén. Do modelu lze zahrnout libovolné směrové charakteristiky. V dalších výpočtech a srovnáních byly použity naměřené charakteristiky pevných i testovacích antén (viz. příloha 2 resp. 3).



Obr. 3.3 – Modifikovaný dvoupaprskový model a) pohled shora, b) pohled ze strany

Vzdálenost mezi anténami lze určit pomocí následujícího vztahu.

$$d_2 = \sqrt{d^2 + p^2} \quad (3.10)$$

Útlum na trase lze dle tohoto modelu vyjádřit vztahem

$$L_0 = -20 \log \left( \left( \frac{\lambda}{4\pi} \right) \left[ \sqrt{G_{tV}(\alpha_p) G_{vV}(\beta_p) G_{tH}(\gamma_p) G_{vH}(\delta_p)} \cdot \frac{1}{r_p} e^{-j \cdot k \cdot r_p} + \sqrt{G_{tV}(\alpha_o) G_{vV}(\beta_o) G_{tH}(\gamma_o) G_{vH}(\delta_o)} \cdot \mathbf{R}(\vartheta) \cdot \frac{1}{r_o} \cdot e^{-j \cdot k \cdot r_o} \right] \right) \quad (3.11)$$

kde dráhy přímého a odraženého paprsku jsou

$$r_p = \sqrt{(h_1 - h_2)^2 + d_2^2} \quad (3.12)$$

$$r_o = \sqrt{(h_1 + h_2)^2 + d_2^2} \quad (3.13)$$

a koeficient odrazu od země je určen vztahem

$$\mathbf{R} = \frac{\sin(\vartheta) - a \cdot \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\vartheta)}}{\sin(\vartheta) + a \cdot \sqrt{\varepsilon - \cos^2(\vartheta)}} \quad (3.14)$$

kde

$$\vartheta = \arcsin \left( \frac{h_1 + h_2}{d_2} \right) \quad (3.15)$$

$$a = \begin{cases} 1 & \text{vertikální polarizace} \\ \frac{1}{\varepsilon} & \text{horizontální polarizace} \end{cases} \quad (3.16)$$

Směrová závislost zisku antény TAGu ve vertikální rovině je označena  $G_{tV}$ , v horizontální rovině  $G_{tH}$ . Charakteristika vysílací antény pak  $G_{vV}$  ve vertikální rovině a  $G_{vH}$  v rovině horizontální. Argumenty charakteristik  $\alpha_p, \beta_p, \gamma_p, \delta_p$  vyjadřují odklon paprsku od směru maxima charakteristiky. Tyto úhly zahrnují případný sklon antén a vztahy pro jejich výpočet lze nalézt v příloze 4.

**Přenosová rovnice** pro výkon přijatý TAGem (v dBm) je pak

$$P_t = P_v - L_{k1} - L_0 \quad (3.17)$$

kde  $P_v$  je výkon generátoru čtečky,  $L_{k1}$  je útlum přívodního kabelu,  $L_0$  je útlum na trase, který již zahrnuje směrové charakteristiky a zisky jednotlivých antén.

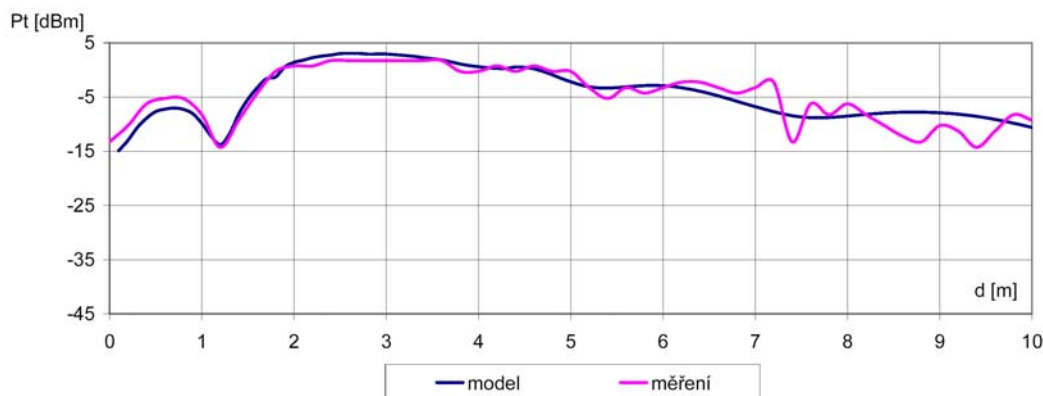
Výkon vyslaný TAGem zpět a přijatý čtečkou lze vyjádřit (v dBm) jako:

$$P_p = P_t - L_{konv} - L_0 - L_{k2} \quad (3.18)$$

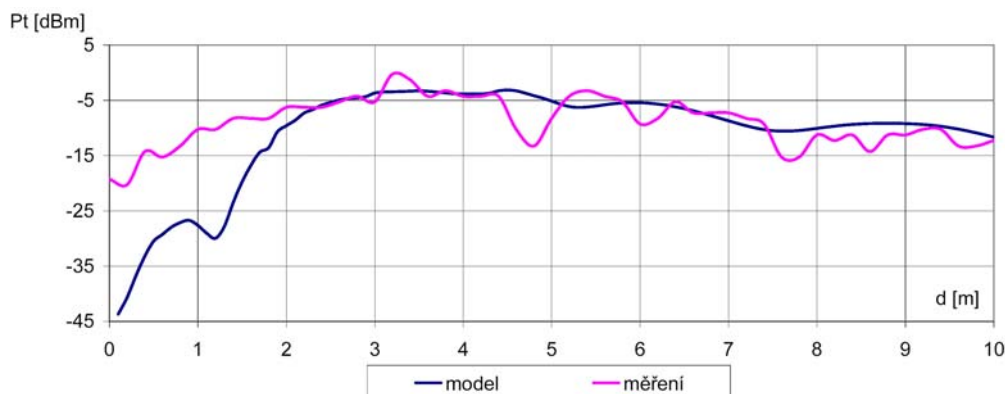
kde  $L_{konv}$  jsou konverzní ztráty TAGu (viz. tab. 1.1),  $L_0$  je útlum na trase a  $L_{k2}$  je útlum přírodního kabelu.

### 3.2.1 Porovnání modelovaných a měřených dat

Aby bylo možné používat takto vytvořený matematický model k porovnávání vlastností systému a následně k volbě jeho jednotlivých parametrů, je nezbytné ověřit schodu modelovaných dat se skutečností. K tomu lze využít naměřené výkonové úrovně v několika základních konfiguracích systému. Vlastní popis měřicí soustavy a postup měření je podrobně uveden v kapitole 5. Pro porovnání byla zvolena základní konfigurace s následujícími parametry. Vysílací anténa byla umístěna na středu brány ve výšce 3 m, její sklon činil 30°. Testovací anténa pak na hrudi testovací osoby ve výšce 1,3 m. Porovnána byla data získaná při poloze testovací antény v ose dráhy a dále 2,5 m od osy. Jako testovací anténa byl zvolen čtvrtvlnný nízkoprofilový patch umístěný přímo na těle (viz. podkapitola 2.2).



Graf 3.1 – Porovnání modelovaných a měřených dat (TAG na středu dráhy)



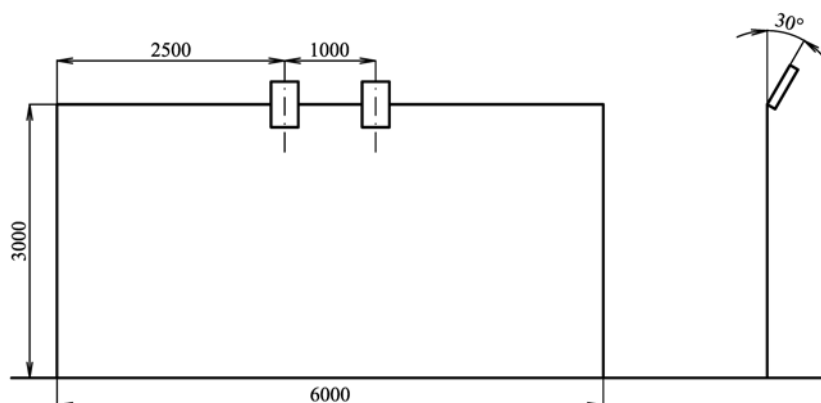
Graf 3.2 – Porovnání modelovaných a měřených dat (TAG 2,5 m od středu)

Jak je patrné z grafu 3.1, je při umístění TAGu v ose dráhy shoda modelovaných dat s měřením poměrně dobrá a to především ve střední vzdálenosti od brány (cca 2 – 7 m), kde nás průběh také nejvíce zajímá. Při umístění TAGu na okraji dráhy, tedy 2,5 m od středu, je modelovaná hodnota v blízkosti brány poněkud přísnější než hodnota naměřená, také zvlnění charakteristiky na dalším úseku je výraznější. Tato menší přesnost je způsobena vlivem horizontálních anténních charakteristik, které při vyosení TAGu vstupují do výrazu pro útlum na trase (3.11). Jak je patrné ze vztahu 3.11, aproximuje tento výraz směrovou charakteristiku antén v obecné rovině dané aktuální polohou TAGu pomocí řezu směrové charakteristiky ve vertikální a horizontální rovině.

Pro naše účely je i takováto shoda dostačující, neboť matematický model slouží pouze pro vzájemné porovnání jednotlivých konfigurací a nejvýznamnější je oblast střední vzdálenosti od brány, kde lze předpokládat největší výkonovou úroveň. U takto nalezené nejvhodnější konfigurace je pak třeba dosáhnout dostatečné výkonové rezervy.

## 4 OPTIMALIZACE PARAMETRŮ

První část této kapitoly se zabývá nastavením optimálních parametrů systému s ohledem na výskyt již dříve zmíněných typů úniků. V druhé části je pak porovnávána míra vlivu změny parametrů prostředí na funkci systému. U parametrů prostředí je možné se omezit na porovnání materiálů, které lze běžně očekávat na povrchu závodní trati.



Obr. 4.1 – Umístění pevných antén na kontrolní bráně

Jak je patrné z obr. 3.2, probíhá identifikace TAGu prostřednictvím dvou pevných antén umístěných na kontrolní bráně nad tratí. Trať je široká 6 m, výška brány činí 3 m. Vysílací a přijímací antény je možné sklonit k dráze pod libovolným úhlem  $\psi$ . Kontrolní brána je znázorněna na obr. 4.1.

### 4.1 Nastavení parametrů systému

V první fázi byly *pevné antény* se ziskem 8 dBi, dodávané výrobcem systému Trolley ponder, nahrazeny patchovými anténami se vzduchovým dielektrikem, které dosahují maximálního výkonového zisku 11,7 dBi. Tyto antény byly navrženy a realizovány na katedře elektromagnetického pole ČVUT FEL a

jejich parametry jsou uvedeny v příloze 5. Podrobnosti lze nalézt též v článku [13].

Základním bodem v procesu optimalizace je volba *vysílacího výkonu*. Čtecí zařízení umožňuje dodávat maximální výkon 4 W, pro trvalý provoz však výrobce doporučuje maximální výkon 3,5 W. Vysílací výkon byl nastaven na tuto hodnotu, neboť cílem optimalizace systému je získat dostatečnou výkonovou rezervu. Pokud bude tato rezerva dosažena je žádoucí provést přednostně miniaturizaci antény TAGu. Při tomto procesu samozřejmě významně klesá účinnost antény a tedy i rezerva ve výkonové bilanci.

Jak je patrné z následujícího výpočtu, je taková úroveň vysílacího výkonu při výkonovém zisku vysílací antény 11,7 dBi v souladu s hygienickými limity uváděných v „*Narizení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením*“ z roku 2000 [e-3]. Ve výše zmíněné normě je uvedena metodika výpočtu pomocí určení referenční hodnoty intenzity elektrického pole. Pokud nebude tato hodnota překročena, jsou dodrženy také mezní hodnoty proudové hustoty indukované v těle a SAR. Ze vztahů (4.1 – 4.4) lze vypočítat minimální přípustnou vzdálenost osoby od vysílací antény.

Výraz (4.1) udává hodnotu mezní intenzity elektrického pole pro kmitočet 869 MHz (viz. [e-3]).

$$E_{mez} = 0,0448 \cdot \sqrt{f} = 0,0448 \cdot \sqrt{869 \cdot 10^6} = 1320,65 Vm^{-1} \quad (4.1)$$

Intenzitu elektrického pole ve vzdálenosti  $r$  lze určit dle následujícího vztahu, kde  $P$  je vysílaný výkon a  $G$  zisk antény .

$$E(r) = \frac{1}{r} \cdot \sqrt{30 \cdot P \cdot G} \quad (4.2)$$

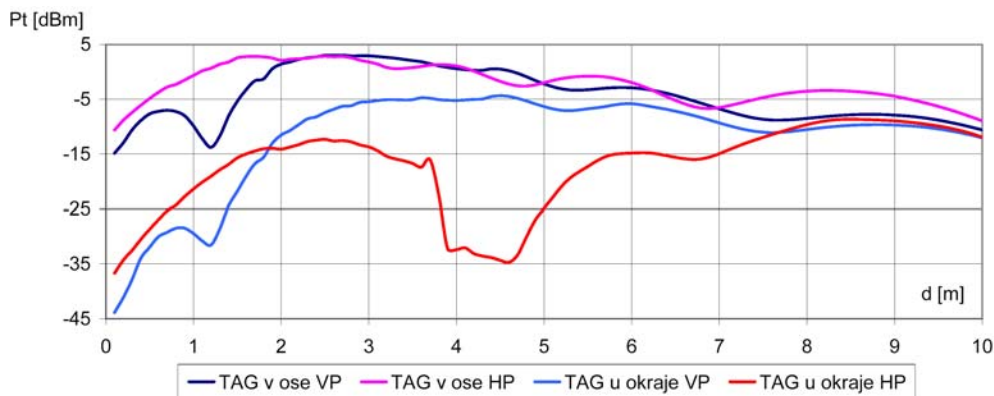
Vyjádřením vzdálenosti ze vztahu (4.2) a dosazením hodnoty mezní intenzity elektrického pole, lze získat hodnotu minimální vzdálenosti civilní osoby od vysílací antény.

$$r = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{E(r)} \quad (4.3)$$

$$r = \frac{\sqrt{30 \cdot P \cdot G}}{E_{mez}} = \frac{\sqrt{30 \cdot 3,5 \cdot 10^{10}}}{1320,65} = 0,0298m \quad (4.4)$$

Minimální vzdálenost od antény je 2,98 cm. Při umístění vysílací antény ve výšce 3 m se na takovou vzdálenost osoba nemůže přiblížit.

Dalším krokem je volba vhodné *polarizace*. Porovnání vertikální a horizontální polarizace bylo provedeno prostřednictvím matematického modelu na základě výkonové úrovně přijaté TAGem. Vysílací anténa byla umístěna v ose dráhy, její sklon činil 30°. Jako anténa TAGu byla zvolena patchová testovací anténa umístěná ve svislé poloze přímo na těle (viz. 2.2) ve výšce 1,3 m. Povrch dráhy tvořila suchá půda. Vysílací výkon byl 3,5 W.

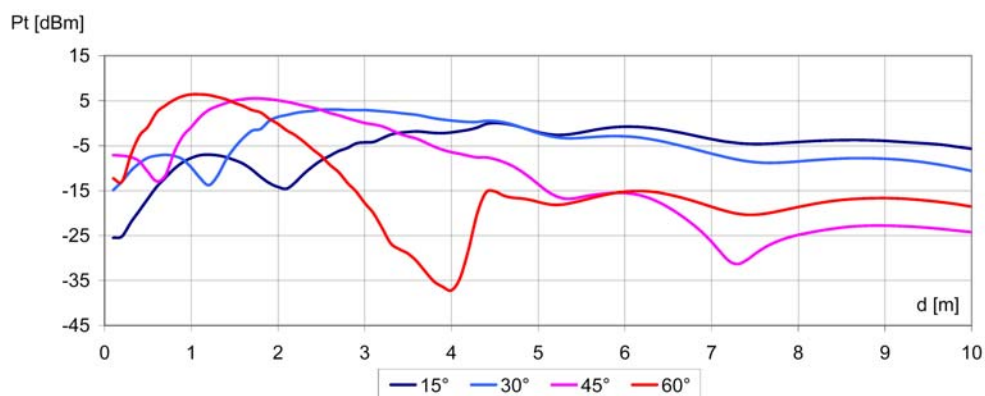


Graf 4.1 – Porovnání výkonové úrovně TAGu pro vertikální a horizontální polarizaci

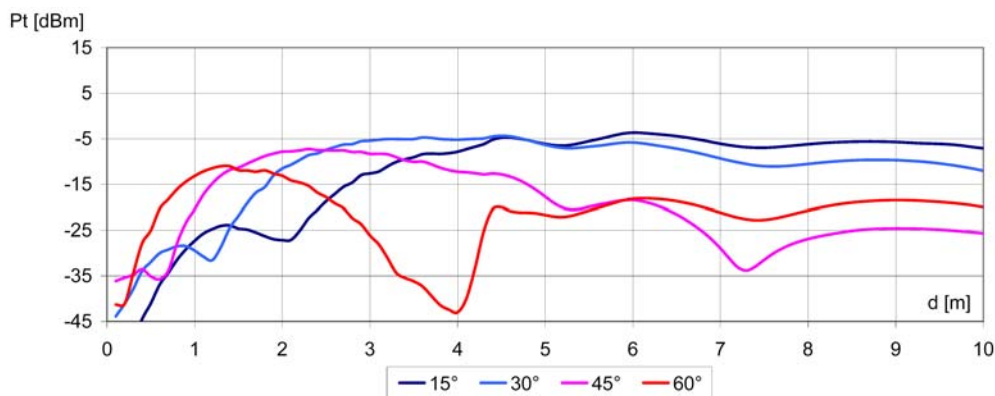
Jak je patrné z grafu 4.1, jsou při umístění TAGu v ose dráhy obě polarizace srovnatelné. Významný rozdíl nastává při umístění TAGu mimo osu vysílací antény. Křivka uvedená v grafu platí pro polohu TAGu u samého okraje dráhy, tedy 3 m od osy, ale podobný charakter mají křivky přijaté výkonové úrovně

již při menším vyosení. Dle předchozího srovnání se jeví jako výhodnější vertikální polarizace.

Jako vysílací a přijímací antény jsou k dispozici patchové antény o zisku 11,7 dBi. Jejich další parametry lze nalézt v příloze 3. Protože je požadováno pokrytí celé šíře trati, je nutno umístit vysílací a přijímací anténu co nejbližší středu. Vzdálenost mezi pevnými anténami byla zvolena 1 m. Zbývá tedy nastavit vhodný *úhel sklonu* obou antén (viz. obr. 4.1).



Graf 4.2 – Porovnání výkonu přijatého TAGem uprostřed trati v závislosti na sklonu pevné antény



Graf 4.3 – Porovnání výkonu přijatého TAGem na okraji trati v závislosti na sklonu pevné antény

V grafech 4.2 a 4.3 jsou porovnány výkonové úrovně přijaté TAGem pro několik možných sklonů pevných antén při umístění TAGu v ose resp. na okraji trati (3 m od středu). Na základě těchto grafů lze zvolit za nejvhodnější

sklon  $30^\circ$ . Při větším sklonu vykazuje průběh strmější pokles, při sklonu  $15^\circ$  lze pozorovat velmi malou úroveň výkonu v blízkosti kontrolní brány (cca do 4 m), kde lze předpokládat menší vliv zastínění TAGu sousední osobou.

*Anténa TAGu* musí splňovat několik základních vlastností. Jsou to malé rozměry, nízká hmotnost, dostatečný zisk, ale poměrně široký svazek v obou rovinách a stálost vlastností při umístění nad lidské tělo popř. jiné materiály (rozladění). Vlastní návrh a hlubší rozbor jednotlivých požadavků na anténu je uveden v kapitole 6.

*Umístění antény TAGu* se předpokládá na hrudi sportovce jako součást startovního čísla. Další možností je umístění TAGu na kotníku nebo rameni běžce popř. na přilbě cyklisty. Z důvodu poměrně velkých rozměrů antény (viz. kapitola 6) nepřipadají tyto konfigurace zatím v úvahu. Závodníci se při běhu většinou nepohybují vzpřímeně, ale v menším či větším předklonu. U cyklistů je tento jev ještě výraznější. Díky tomuto předklonu lze předpokládat poměrně značný vliv zastínění okolními sportovci při vytvoření větší skupiny. Jako vhodné řešení se jeví umístění TAGu na zádech sportovce. Při použití takového umístění bude k identifikaci docházet po průběhu kontrolní branou. Předklon sportovce zde bude mít spíše kladný účinek, neboť osa maxima směrové charakteristiky antény TAGu bude směřovat k vysílací resp. přijímací anténě umístěné na kontrolní bráně ve výšce 3 m.

## 4.2 Vliv změny parametrů prostředí

Základním parametrem prostředí je *materiál povrchu trati*. Jeho komplexní permitivita se vyskytuje ve výrazech pro odraz paprsku od země (viz. rovnice 3.4 resp. 3.13). Jako povrch trati lze předpokládat suchou popř. mokrou půdu, asfalt a v zimním období též sněhovou pokrývku, která může přecházet v led. Relativní permitivita a vodivost základních materiálů je uvedena v následující tabulce, která čerpá z pramene [8].

Typ terénu	$\epsilon'_r$ [-]	$\sigma$ [S·m <sup>-1</sup> ]
Suchá půda	3	10 <sup>-5</sup>
Mokrá půda	30	10 <sup>-1</sup>
Led	4,8	10 <sup>-4</sup>

Tab. 4.1 – Materiálové parametry terénu (f=869MHz)

Jak bylo modelováním ověřeno, je vliv komplexní permitivity výše uvedených materiálů na přijímanou výkonovou úroveň zanedbatelný.

## 5 MĚŘENÍ VÝKONOVÝCH ÚROVNÍ

Tato kapitola se zabývá měřením úrovně výkonu přijatého testovací anténou umístěnou na těle. Naměřená data bylo možné porovnat s výsledky získanými pomocí matematického modelu. Toto porovnání je pro přehlednost uvedeno v kapitole 3, která se zabývá vlastní konstrukcí matematického modelu. Dále bylo možné vysledovat vliv dalších úniků jako je zastínění testovací antény další osobou a vliv předklonu běžce v závislosti na vzdálenosti od vysílací antény.



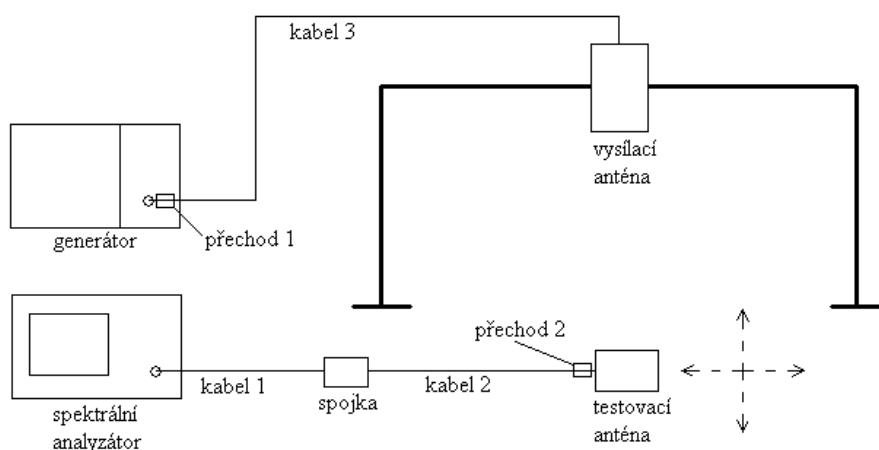
Obr. 5.1 – Uspořádání antén při měření úrovní přijatých testovací anténou umístěnou na těle

Měření bylo prováděno staticky v diskrétních vzdálenostech od brány, na které je umístěna vysílací anténa. Výška brány činí 3 m, šířka dráhy je 6 m. Testovací anténa byla umístěna na hrudi testovací osoby ve výšce 1,3 m. Měřicí krok byl zvolen 20 cm, aby bylo možné rozlišit s dostatečnou přesností výkonová minima vzniklá na naměřené charakteristice. Přijatá úroveň výkonu byla měřena pro 1 vysílací anténu umístěnou na středu brány. Aby bylo možné proměřit celou plochu trati byla provedena měření s testovací anténou na středu dráhy a dále mimo osu ve vzdálenostech 0,5 – 1 – 1,5 – 2 a 2,5 m od středu. Sklon vysílací antény byl volen  $30^\circ$  a  $45^\circ$  od svislé osy. Některé z těchto konfigurací byly proměřeny též při zastínění testovací antény další osobou stojící 1 m před

testovací anténou. Jako testovací antény byly použity antény navržené v kapitole 2. Ve vzdálenosti 0 – 10 m s krokem 1 m byl též měřen vliv předklonu běžce na velikost přijaté úrovně.

Použitý generátor signálu umožňuje nastavit maximální vysílací výkon 10 dBm. Měření byla tedy provedena s touto hodnotou vysílacího výkonu a naměřené hodnoty byly následně korigovány na hodnoty odpovídající vysílacímu výkonu 3,5 W. Protože bylo nutné použít pro měření kabely větší délky než tomu bude v reálném provozu systému (kabel od testovací antény ke spektrálnímu analyzátoru), byla též provedena korekce na útlum kabelů.

## 5.1 Schéma měřicího pracoviště



Obr. 5.2 – Schéma měřicího pracoviště pro měření výkonové úrovně přijaté testovací anténou

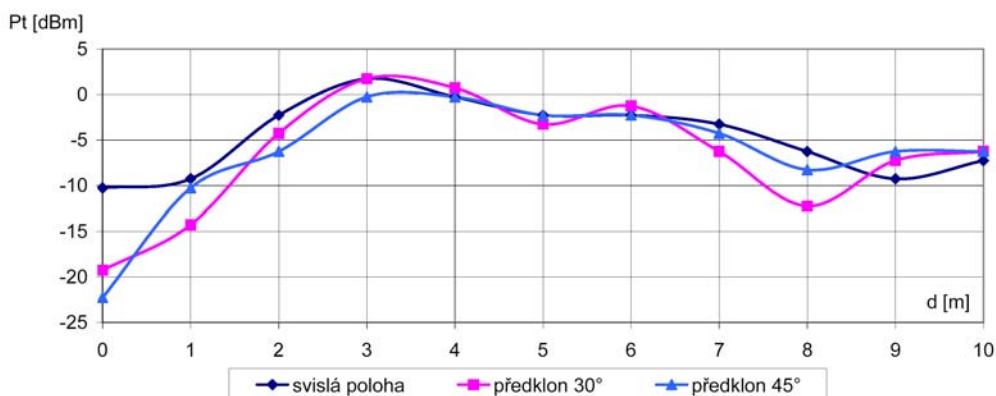
## 5.2 Seznam měřicích přístrojů

Spektrální analyzátor	spektrální analyzátor <i>Advantest R3131A</i> kmitočtový rozsah 9 kHz – 3 GHz
Generátor	signální generátor <i>Elsy SG 2000</i> kmitočtový rozsah 100 kHz – 2 GHz, použitý výstupní výkon 10 dBm

Vysílací anténa	patchová anténa zisk 11,7 dBi (podrobné parametry viz. příloha 3)
Testovací anténa	meandrově zkrácený dipól a nízkoprofilový čtvrtvlnný patch (parametry viz. 2)
Spojka	kabelová spojka $N_f / N_f$
Přechod 1	přechod $N_f / BNC_m$
Přechod 2	přechod $SMA_m / N_f$
Kabel 1	koaxiální kabel <i>H155</i> , konektory $N_m$ délka 6 m
Kabel 2	koaxiální kabel <i>H155</i> , konektory $N_m$ délka 10 m
Kabel 3	koaxiální kabel <i>H155</i> , konektory $N_m$ délka 10 m

### 5.3 Další úniky

Mezi další úniky, které mohou snížit výkonovou rezervu, patří *ztráty vzniklé předklonem běžce*, který má za následek pokles zisku antény TAGu vlivem její směrové charakteristiky.

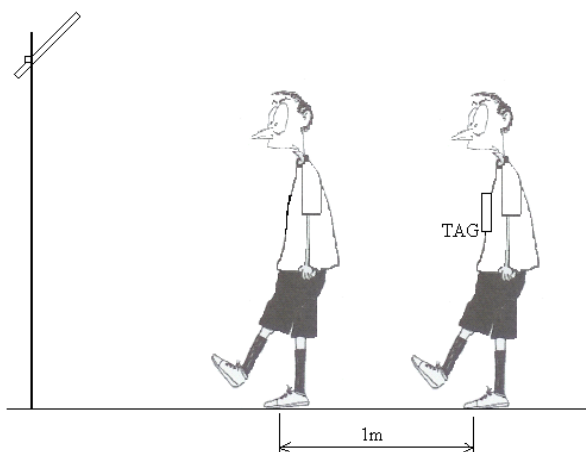


Graf 5.1 – Vliv předklonu běžce na přijatou výkonovou úroveň (měření)

Graf 5.1 zobrazuje naměřené úrovně výkonu přijatého testovací patchovou anténou pro 3 polohy předklonu závodníka. Výkonové úrovně jsou měřeny

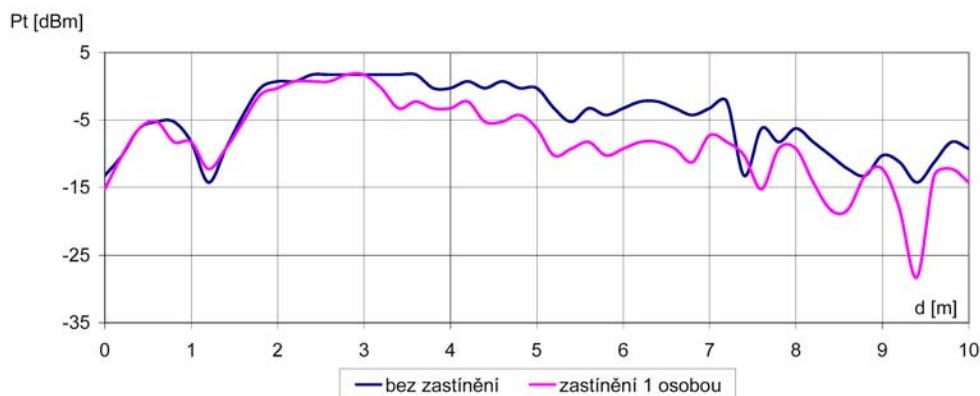
pouze v diskrétních bodech s krokem 1 m a průběh je pro přehlednost proložen křivkou. Jak je z naměřených hodnot patrné, způsobuje předklon největší ztráty v blízkosti vysílací antény a naopak ve velkých vzdálenostech. V obou těchto oblastech je však nedostatečná výkonová úroveň vlivem směrových charakteristik antén i při svislé poloze a nepředpokládá se, že zde bude docházet k identifikaci TAGu. Identifikaci lze naopak předpokládat v rozmezí vzdáleností přibližně 2 – 7 m, kde je vliv předklonu poměrně malý. Pohybuje se v rozsahu 1 – 2 dB.

Pokud dojde během závodu k nahromadění několika závodníků na malém prostoru, mohou osoby v předních řadách zastínit antény závodníků v zadních řadách. Díky tomu dojde k poklesu přijaté výkonové úrovně. Hovoříme pak o *ztrátách zastíněním*. Vliv těchto ztrát je poměrně obtížné namodelovat nebo měřit, neboť ve vlastním závodě může nastat velké množství variant seskupení závodníků. Velikost ztrát zastíněním pro každé seskupení je navíc závislá na míře předklonu jednotlivých závodníků popř. jejich rychlosti. Bylo tedy provedeno pouze orientační měření pro poměrně nepříznivý případ, jehož konfigurace je zobrazena na obr. 5.1. Funkce systému pro reálné konfigurace závodníků byla ověřena v části 7 – Testování systému.



Obr 5.1 – Konfigurace závodníků při měření zastínění

Výsledek orientačního měření zastínění je uveden v grafu 5.2. Jedná se o měření výkonové úrovně přijaté testovací patchovou anténou na těle sportovce stojícího 1 m za stínící osobou. Obě osoby stojí vzpřímeně a pohybují se středem trati. Sklon vysílací antény je  $30^\circ$ , výška brány 3 m. V grafu 5.2 je měření při zastínění jednou osobou porovnáno s měřením úrovně bez zastínění. Do vzdálenosti cca 3 m od vysílací antény k zastínění nedochází, to se projeví až při větších vzdálenostech. Pokles přijaté úrovně se pohybuje v rozmezí vzdáleností 3 – 5 m kolem 3 dB, ve větších vzdálenostech pak dosahuje 6 dB. U měřeného případu je zastínění poměrně významné. Při reálném závodě lze předpokládat, že takto významné zastínění nebude trvat po celou dobu průběhu závodníků identifikační zónou.



Graf 5.2 – Vliv výkonu přijatého TAGem na zastínění (měření)

Pro úplnost jsou na tomto místě uvedeny též *ztráty polarizačním nepřizpůsobením*. K tomuto typu ztrát dochází vlivem otočení antény TAGu vůči pevným anténám. U pevných antén lze předpokládat stabilní upevnění a k jejich pootočení tedy nedojde. Anténa TAGu upevněná na těle sportovce se samozřejmě pootočit může. Velikost ztrát polarizačním nepřizpůsobením je možné vyjádřit následujícím vztahem.

$$L_{pol} = -10 \cdot \log(\cos^2 \alpha) \quad (5.1)$$

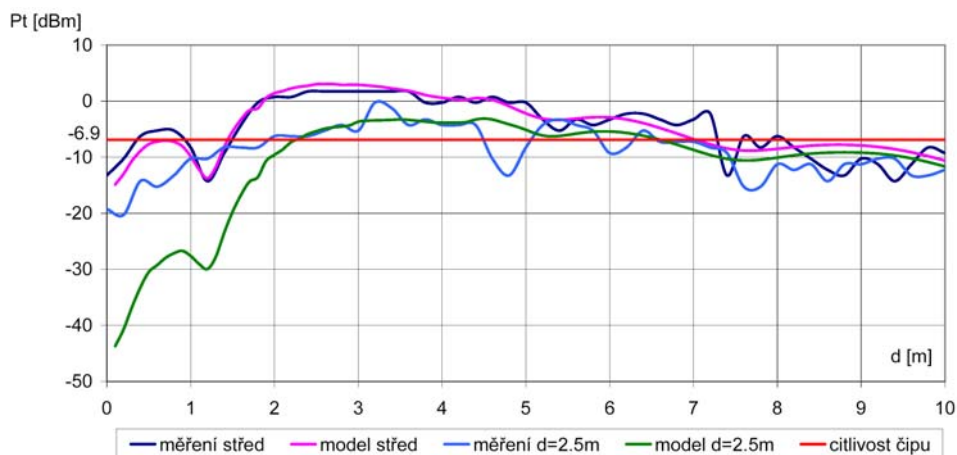
kde  $\alpha$  je úhel otočení TAGu.

Při běžném pohybu lze předpokládat pootočení o max. cca  $30^\circ$  což odpovídá ztrátě 1,25 dB. Tato hodnota se jeví v rámci získané výkonové rezervy jako přijatelná. Je však nutné zajistit, aby nemohlo dojít k pootočení většímu, při kterém by již mohlo dojít ke snížení spolehlivosti systému.

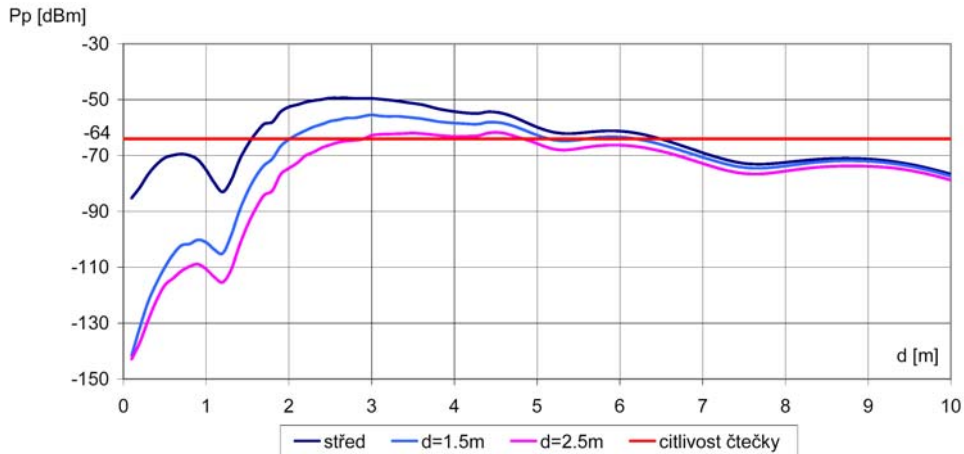
#### 5.4 Výkonová bilance s testovací anténou

V předchozích kapitolách jsou zmapovány a popsány veškeré významné typy úniků. Nyní lze vytvořit celkovou výkonovou bilanci systému nastaveného dle závěrů plynoucích z kapitoly 4 a na základě této bilance usoudit, zda je systém schopen spolehlivě pracovat. Předpokladem pro spolehlivou práci systému je získání dostatečné výkonové rezervy a to jak na trase vysílací anténa - anténa TAGu, tak na trase anténa TAGu - přijímací anténa. Limitujícím faktorem je na vysílací straně citlivost čipu, která činí  $-6,9$  dBm. Na straně přijímací je to pak citlivost čtecího zařízení, která dosahuje hodnoty  $-64$  dBm.

Výsledné nastavení systému je následující. Použity jsou pevné antény se ziskem 11,7 dBi umístěné ve výšce 3 m uprostřed brány (viz. obr. 4.2). Vysílací výkon je 3,5 W. Anténa TAGu je patchová s parametry dle kapitoly 2.2. Umístěna je přímo na těle sportovce ve výšce 1,3 m. Použitá polarizace je vertikální.



Graf 5.3 – Výkon přijatý TAGem (anténa TAGu patchová  $G_{\max}=-0,12$  dBi)



Graf 5.4 – Výkon přijatý čtecím zařízením (anténa TAGu patchová  $G_{max}=-0,12$  dBi)

Pokud se TAG umístěný na těle sportovce pohybuje ve středu trati je dosažena výkonová rezerva dostatečná. V přímé trase dosahuje 9 dB, ve zpětné trase pak 14 dB. S posunem TAGu k okraji dráhy se získaná výkonová rezerva vlivem směrových charakteristik antén snižuje a na okraji dráhy již činí v přímé trase 3,5 dB a ve zpětné přibližně 2,5 dB. S přihlédnutím na možný další pokles o cca 3 dB vlivem zastínění popř. o dalších 1,25 dB vlivem polarizačních ztrát již není takováto rezerva dostatečná.

Je potřeba si uvědomit, že výše diskutovaná výkonová bilance předpokládá anténu TAGu s maximálním ziskem  $-0,12$  dBi. Pokud se podaří navrhnu anténu TAGu se ziskem větším než 3 – 4 dB a se srovnatelnou šířkou svazku, bude již dosaženo dostatečné výkonové rezervy i pro TAG pohybující se u okraje dráhy. Pokud budou použity ohebné vodivé části antény a dielektrikum o nízké hmotnosti, jsou přijatelné větší rozměry antény a požadavek na zisk 3 – 4 dBi je reálný. Návrhem antény se zabývá následující kapitola.

## 6 NÁVRH ANTÉNY TAGU

Z předchozí kapitoly plyne potřeba vytvořit anténu TAGu se ziskem větším než 3 dB. Přitom trvá požadavek na poměrně malé rozměry, nízkou hmotnost a především na minimální vliv podložky na vlastnosti antény. Dalším požadavkem je dostatečná šířka svazku v obou rovinách. V první části této kapitoly jsou porovnány vlastnosti použitelných typů antén. Závěry tohoto srovnání lze využít při návrhu RFID antény, kterou bude možné opatřit čipem a použít v reálných závodech.

### 6.1 Porovnání vlastností antén

Jak již bylo řečeno v úvodu, dodává výrobce systému Trolley Ponder TAGy opatřené anténou typu zkrácený planární dipól. Výhodou takového typu antény je velmi malá výška, která je dána pouze výškou použitého substrátu (0,2 mm) a obalové fólie. Rozměry této antény jsou pro použití v hromadných závodech také přijatelné. Rozměry činí cca 80×40 mm. Výrobce udaný zisk antény je 2,1 dBi. Největším problémem, který použití takového typu antény téměř vylučuje, je významný vliv podložky, na které je anténa umístěna, na její parametry. Při umístění antény do blízkosti podložky, kterou tvoří např. lidské tělo, dochází především k výraznému rozladění antény (viz. graf 2.1). Dalším projevem je pak pokles účinnosti a tedy i zisku antény. Jak je z grafu 2.1 patrné, v praxi lze použít tento typ antény v minimální vzdálenosti 20 mm od těla. Tuto vzdálenost je možné zajistit např. použitím 20 mm silné polystyrenové podložky. Tím je však naprosto degradována výše uvedená výhoda nízkého profilu.

Jako možné řešení se jeví použití antény se zemní rovinou. Tato rovina významně zvyšuje předozadní poměr a omezuje tím vliv materiálu podložky na rozladění antény (viz. graf 2.5). Základním typem antény se zemní rovinou je patchová anténa. Protože systém pracuje v oblasti poměrně nízkých kmitočtů, nastávají dva nové problémy. Prvním jsou poměrně velké rozměry antény. Druhým problémem je nízká účinnost. Rozměry antény je možné snížit použitím čtvrtvlnného uspořádání, které je popsáno v podkapitole 2.2. Ani toto zmenšení není pro účel identifikace sportovců přijatelné. Řešením je použití ohebného dielektrika o nízké hmotnosti namísto klasického substrátu a vytvoření vodivých částí antény z vodivé tkaniny nebo z tenké měděné fólie. Účinnost antény lze zvýšit použitím substrátu o nízké relativní permitivitě nebo použitím velké tloušťky substrátu (viz. graf 2.4).

## 6.2 Návrh RFID antény

Na základě předchozího srovnání lze shrnout základní požadavky. Základem návrhu je patchová anténa. Z důvodu poklesu účinnosti nelze anténu příliš miniaturizovat a je třeba se vydat jiným směrem. Nutností je tedy nalézt dielektrikum o nízké hmotnosti a poměrně ohebný materiál tvořící vodivé části antény. Doposud navržené testovací antény mají standardní vstupní impedanci  $50 \Omega$ . V praxi je však nutné anténu opatřit čipem, jehož vstupní impedance činí  $76-j340 \Omega$ . Vstupní impedance antény musí být tedy komplexně sdružená k impedanci čipu, tedy  $76+j340 \Omega$ .



Obr. 6.1 – RFID patchová anténa opatřená čipem

Jako použitelný dielektrický materiál se jeví *oboustranně lepicí polyetylenová pěnová páska 9528*. Distributorem v ČR je firma G3. Jedná se o materiál o velmi nízké hmotnosti, který je schopen udržet definovanou vzdálenost vlastního patche od zemní roviny. Základní tloušťka je 0,8 mm. Výrobce je však schopen dodat tuto pásku v deskovém provedení v tloušťce o libovolném násobku tloušťky základní. Relativní permitivita a ztrátový činitel výrobce neudává. Realizací antény a porovnáním měřených hodnot se simulací v IE3D se však tyto parametry podařilo zjistit. Hodnota relativní permitivity je přibližně 1,29 a ztrátového činitele 0,015.

Vodivé části antény lze realizovat pomocí měděné pásky tloušťky 0,035 mm dodávané firmou ELCHEMCO pod označením *EMI/RFI stínící páska*. Firma je schopna dodat pásku v maximální šíři 50 mm. Pro vytvoření zemní roviny není tento rozměr dostatečný a je nutné zemní rovinu vytvořit ze dvou částí spojených pájením.

Z dříve uvedených důvodů je nutné použít maximální možnou výšku substrátu. Jako přijatelná se zdá výška 4,8 mm.

Název	Tloušťka substrátu [mm]	Relativní permitivita [-]	Ztrátový činitel tgδ [-]
pěnová páska 9528	4,8	1,29	0,015

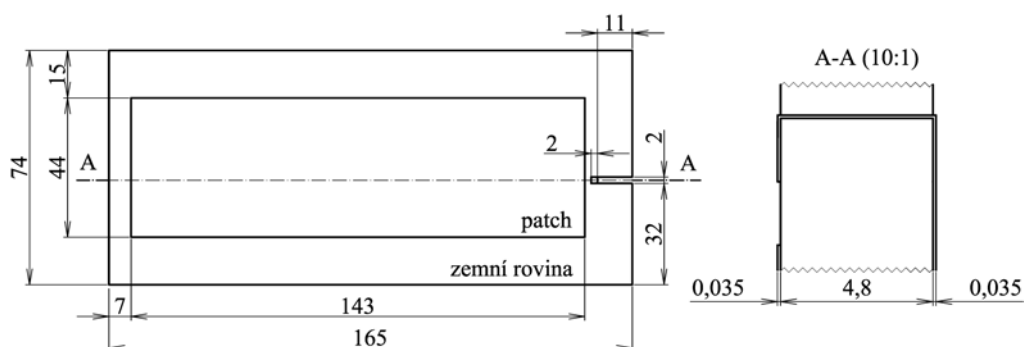
Tab. 6.1 – Parametry substrátu RFID antény

Vlastní rozměry antény byly navrženy experimentálně pomocí simulátoru pole IE3D 10.2. Dosažené parametry lze nalézt v následující podkapitole.

### 6.3 Parametry antény

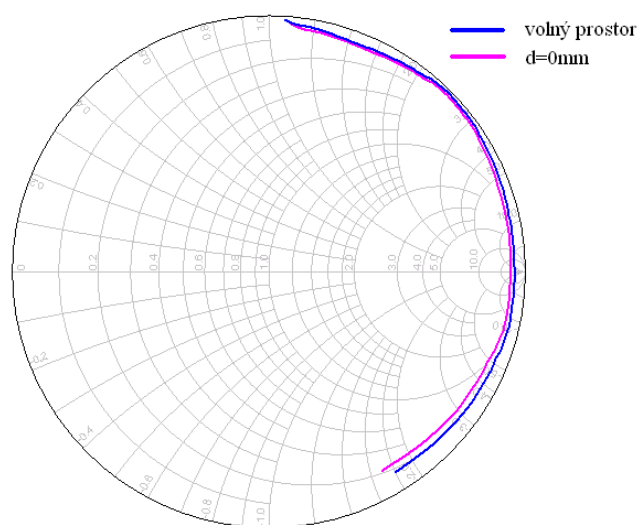
Aby bylo možné změřit vstupní impedanci, směrové charakteristiky a zisk antény, byl nejprve vytvořen model opatřený SMA konektorem s impedancí 50 Ω. Takováto anténa samozřejmě není na kmitočtu 869 MHz přizpůsobená a

hodnoty zisku bylo tedy nutné korigovat o odraz výkonu na vstupním konektoru (viz. příloha 2).



Obr. 6.2 – Rozměry RFID antény

U antény opatřené SMA konektorem byla změřena **vstupní impedance**. Její průběh ve frekvenčním pásmu 700 až 1000 MHz pro umístění antény ve volném prostoru a přímo na fantomu lidského těla je zobrazen v grafu 6.1.



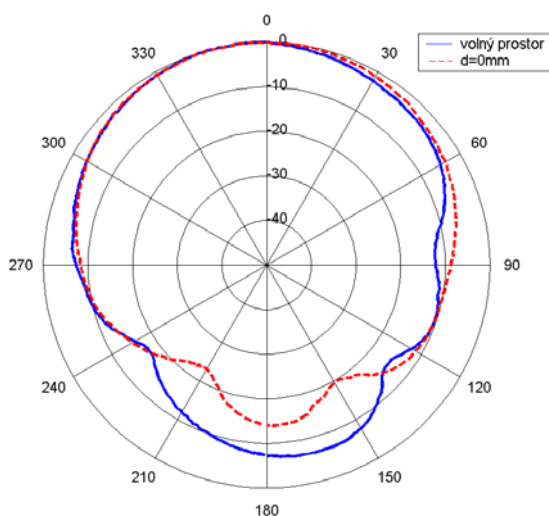
Graf. 6.1 – Vstupní impedance RFID antény ve volném prostoru a přímo na fantomu lidského těla (kmitočtový rozsah 700 – 1000 MHz)

Jak je z grafu 6.1 patrné, změna vstupní impedance antény vlivem umístění na fantomu lidského těla je minimální. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty vstupní impedance a přizpůsobení antény k impedanci čipu pro tyto dva případy.

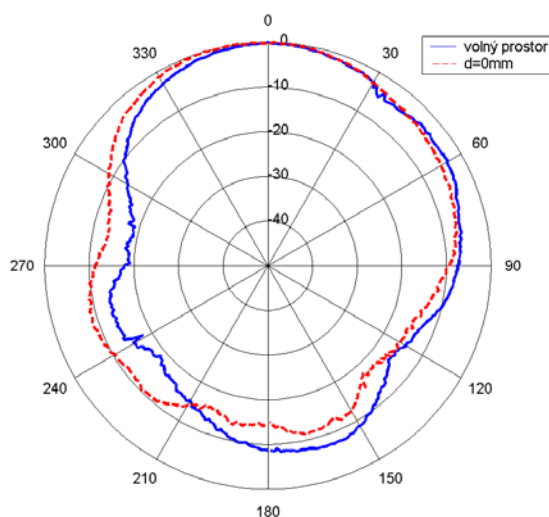
Vzdálenost antény od těla	$Z_{in} [\Omega]$	přizpůsobení k impedanci $76+j340 \Omega$ [dB]
volný prostor	$18+j241$	-14,2
0mm	$28,5+j248$	-15,3

Tab. 6.2 – Vstupní impedance a přizpůsobení RFID antény

**Směrové charakteristiky** byly měřeny ve dvou základních rovinách (vertikální a horizontální) při umístění antény ve volném prostoru a dále přímo na fantomu.



Graf 6.2 – Normované směrové charakteristiky RFID antény umístěné přímo na fantomu lidského těla (horizontální rovina)



Graf 6.3 – Normované směrové charakteristiky RFID antény umístěné přímo na fantomu lidského těla (vertikální rovina)

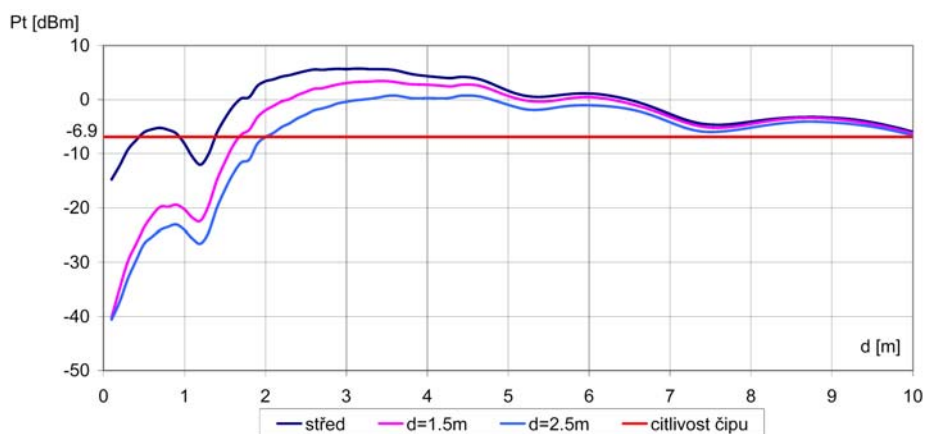
V tabulce 6.3 jsou uvedeny hodnoty **maximálního zisku**. Jeho měření bylo provedeno ve volném prostoru a přímo na hrudi lidského těla. Podrobný postup měření je uveden v příloze 2.

Vzdálenost antény od těla	Gmax [dB]
volný prostor	6,3
0 mm	5

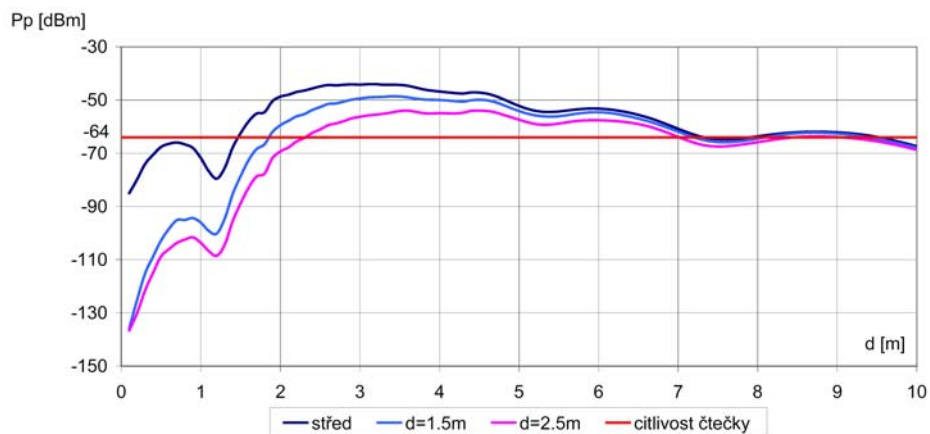
Tab. 6.3 – Zisk RFID antény

## 6.4 Celková výkonová bilance systému

V této kapitole je uveden návrh RFID antény, kterou lze po opatření čipem použít namísto TAGu. Anténa dosahuje při umístění přímo na těle sportovce (fantomu) maximálního zisku 5 dBi. V grafech 6.4 resp. 6.5 jsou uvedeny modelované průběhy přijaté výkonové úrovně TAGu resp. čtecího zařízení. V modelu jsou použity měřené směrové charakteristiky a zisk RFID antény umístěné přímo na fantomu lidského těla.



Graf 6.4 – Výkon přijatý TAGem (model, anténa TAGu RFID anténa Gmax=5 dBi)



Graf 6.5 – Výkon přijatý čtecím zařízením (model, anténa TAGu RFID anténa  $G_{max}=5$  dBi)

Jak je z grafů patrné, byla použitím navržené RFID antény dosažena výkonová rezerva při poloze TAGu na okraji dráhy v přímém směru 7 dB, ve zpětném směru 10 dB.

## 7 TESTOVÁNÍ SYSTÉMU

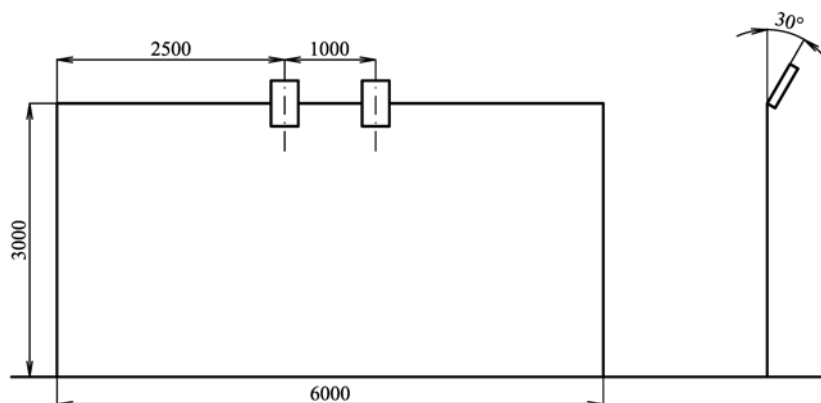
Z celkové výkonové bilance systému uvedené v podkapitole 6.4 lze soudit na spolehlivou funkci. Spolehlivost systému je však nutné ověřit v reálných podmínkách. K tomuto účelu bylo vytvořeno 7 RFID antén opatřených čipem, které byly upevněny na hrudi resp. zádech jednotlivých závodníků.

Závodníci se pohybovali po trati v několika formacích. První formací byla řada závodníků, druhou pak matice s parametry dle obrázku 7.2. Každá formace se pohybovala ve třech základních rychlostech. Byla to chůze, běh a rychlý běh. Z důvodu vyloučení náhodných vlivů byla každá z konfigurací 3× opakována. Pro porovnání byl test pro některé konfigurace proveden jak s nově navrženými patchovými RFID anténami, tak s původními TAGy typu zkrácený dipól, které dodává standardně firma Trolley Scan. Původní TAGy byly umístěny na polystyrenové podložce tloušťky 15 mm.



Obr. 7.2 – Základní formace závodníků pro testování RFID systému

Testování bylo provedeno na asfaltové dráze. Použitý vysílací výkon byl 3,5 W. Pevné antény byly umístěné uprostřed 3 m vysoké brány, jejich sklon byl 30°. Přívodní kabely typu H155 měly délku 6 m. Podrobné parametry testovací brány a umístění antén je patrné z obr. 7.3.



Obr. 7.3 – Základní konfigurace kontrolní brány pro testování RFID systému

Podrobné záznamy jsou uvedeny v příloze 1. Statistické vyhodnocení výsledků testování je uvedeno v následujících tabulkách. V tabulce 7.1 resp. 7.2 je uvedena procentuelní úspěšnost detekce TAGu pro jednotlivé formace a rychlosti pohybu závodníků. Pro každou z konfigurací byla provedena 3 měření. Tabulka 7.3 pak porovnává celkovou úspěšnost detekce pro veškeré použité konfigurace původního TAGu a TAGu s nově navrženou RFID anténou typu půvlunný patch.

konfigurace závodníků	rychlost pohybu	úspěšnost detekce
řada	chůze	100%
	běh	100%
	rychlý běh	100%
matice – okraj dráhy	chůze	100%
	běh	100%
	rychlý běh	100%
matice – střed dráhy	chůze	100%

Tab. 7.1 – Úspěšnost detekce TAGu s RFID patchovou anténou

konfigurace závodníků	rychlost pohybu	úspěšnost detekce
řada	chůze	66,7%
	běh	52,4%
matice – okraj dráhy	chůze	61,7%
	běh	52,4%
matice – střed dráhy	chůze	85,7%
	běh	71,4%

Tab. 7.2 – Úspěšnost detekce TAGu s původní anténou

Anténa TAGu	Úspěšnost detekce
původní anténa	65,4%
půlvlnný patch	100%

Tab. 7.3 – Celkové úspěšnost detekce

V tabulce 7.3 je uvedeno statistické vyhodnocení spolehlivosti pro všechny formace a rychlosti běhu závodníků. Při použití nově navržené antény TAGu dosahuje úspěšnost detekce **100%**. Oproti původním nosičům došlo tedy k významnému zvýšení spolehlivosti systému.

## 8 ZÁVĚR

Motivací k této práci byl požadavek využívat komerčně vyráběný RFID systém pracující v pásmu 869 MHz pro identifikaci sportovců v hromadných závodech. Systém je navržen pro identifikaci zboží v prodejních řetězcích. Při orientačním testování systému pro zmíněný účel byla zjištěna nedostatečná spolehlivost detekce, a to především mimo osu dráhy. Důvodem je řada úniků, které se při použití systému k původnímu účelu nevyskytovaly. V práci [10] byly identifikovány následující úniky. Vliv vícecestného šíření, pokles výkonu vlivem směrových charakteristik antén (pevných i TAGu), ztráty rozladěním antény TAGu, ztráty polarizačním nepřizpůsobením, zastínění antény TAGu. Aby bylo dosaženo dostatečné spolehlivosti systému bylo nutné provést několik úprav.

V první fázi byly nahrazeny pevné antény se ziskem 8 dBi dodávané výrobcem anténami se ziskem 11,7 dBi. Ani tato úprava nebyla dostatečná, a bylo nutné provést podrobnější rozbor problému. Na základě matematického modelu byly nastaveny jednotlivé parametry (viz. kapitola 4.1). V souladu s hygienickými limity byl použit maximální trvalý vysílací výkon 3,5 W. Polarizace byla zvolena vertikální, sklon pevných antén 30°. Významnou součástí úprav je návrh antény TAGu. Podrobnosti lze nalézt v kapitole 6. Jedná se o anténu typu půlvlnný patch. Její zisk měřený ve volném prostoru dosahuje hodnoty 6,3 dBi, při umístění antény na lidském těle pak 5 dBi. Rozměry a hmotnost antény je pro pořadatele závodů i samotné závodníky přijatelná. Jako nejvhodnější se jeví umístění antény na zádech sportovce.

Po dokončení zmíněných úprav bylo realizováno testování systému v terénu (viz. kapitola 7). Výsledky tohoto testování jsou uspokojivé, k identifikaci došlo ve 100 % případech. Jednalo se však zatím pouze o základní, spíše orientační testy. V budoucnu je nutné provést důkladnější testování s větším počtem závodníků a konfigurací. Součástí by měly být testy systému při vyšších rychlostech, které ověří použitelnost pro cyklistické a lyžařské závody. V závěru je vhodné ověřit spolehlivost při nasazení systému v reálných závodech, kde bude identifikace ověřena pomocí dnes používaného „ručního“ způsobu.

Při dobré funkci systému je možné zmenšit rozměry antény TAGu a opakovat testování. Jako vhodné se jeví především snížení profilu antény. Jak bylo zjištěno modelováním, dojde při snížení profilu na 2,4 mm (poloviční výška) k poklesu účinnosti o cca 20 %.

Před nasazením systému je též nutné zdokonalit upevnění antén na startovním čísle. Upevnění pomocí oboustranně lepicí pásky, která byla použita při testování, nepřichází v úvahu. Jako možné se jeví vložení TAGu do látkové kapsy vytvořené na rubu čísla. Anténu je také vhodné zatavit do fólie, která bude její povrch chránit před potem popř. jinými nepříznivými vlivy.

## Seznam použité literatury

### Tištěné dokumenty

- [1] BALANIS, C. A.: *Antenna Theory, Analysis and Design*, 2nd edition, New York: John Wiley & Sons, 1997
- [2] FINKENZELLER, K.: *RFID Handbook: Fundamentals and Applikations in Kontaktless Smart Cards and Identifikation*, 2nd edition, New York: John Wiley & Sons, 2005
- [3] JAMES J. R., HALL P. S.: *Handbook of Microstrip Antennas*, London: Peter Peregrinus Ltd., 1989
- [4] LEE K. F., CHEN W.: *Advances in Microstrip and Printed Antennas*, New York: John Wiley & Sons, 1997
- [5] MAYER D.: *Pohledy do minulosti elektrotechniky*, České Budějovice: Kopp, 2004
- [6] MAZÁNEK M., PECHAČ P., VOKURKA J.: *Antény a šíření vln*, Skriptum, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999
- [7] NOVOTNÝ K.: *Teorie elektromagnetického pole I*, Skriptum, Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000
- [8] POLÍVKA M., ŠVANDA M., HUDEC P.: *System Analysis and Testing of RFID System for Identification of Moving Objects*, EuMC 2006, European Microwave Conference, England, 2006
- [9] PROKOP, J., VOKURKA, J.: *Šíření elektromagnetických vln a antény*, Praha: SNTL/ALFA, 1980
- [10] ŠVANDA M., POLÍVKA M.: *Rozbor RFID systému pro identifikaci pohybujících se objektů*, Semestrální práce, Praha: ČVUT, 2006
- [11] Budeme pod dohledem „Velkého brata“?, *PC Revue*, ročník 2004, číslo 1
- [12] WONG K., *Compact and broadband microstrip antennas*, New York: John Wiley & Sons, 2002

[13] POLÍVKA M., HOLUB A., MAZÁNEK M.: *Collinear Microstrip Patch Antenna*, Rarioengineering, 2005, vol. 14, No. 4

[14] *Pravidla florbalu*, Česká florbalová unie, edice 2000

#### Internet

[e-1] Oficiální stránky firmy Trolley Scan, září 2005  
<http://www.trolleyscan.com>

[e-2] Oficiální stránky katedry elektromagnetického pole, říjen 2006  
<http://www.elmag.org>

[e-3] *Nariadení vlády o ochraně zdraví před neionizujícím zářením*, 2000  
materiál je k dispozici na stránkách ministerstva vnitra ČR  
<http://mvcr.cz/sbirka/2000>

[e-4] POLÁCH E., *Pravidla sazby diplomových prací*, Jihočeská universita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta, České Budějovice 1998  
<http://www.pf.jcu.cz/~edpo/pravidla/pravidla.pdf>

## **PŘÍLOHY**

## Příloha 1 – Testování systému

Podrobné výsledky testování jsou uvedeny v následujících tabulkách. Hodnotou **1** je označen správně detekovaný nosič, hodnota **0** značí nosič, u kterého nedošlo k identifikaci. Z konfigurace tabulky je patrné konkrétní rozmístění závodníků. Součástí každé z tabulek je statistické vyhodnocení výsledků pro danou konfiguraci.

### 1 RFID patchové antény

#### 1.1. Závodníci v řadě

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>100 %</b>

Tab. p1.1 – Testování RFID systému s patchovou anténou TAGu (závodníci v řadě, TAG na hrudi, chůze)

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>100 %</b>

Tab. p1.2 – Testování RFID systému s patchovou anténou TAGu (závodníci v řadě, TAG na hrudi, běh)

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>100 %</b>

Tab. p1.3 – Testování RFID systému s patchovou anténou TAGu (závodníci v řadě, TAG na hrudi, rychlý běh)

1.2. Matice závodníků

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
	1	2	3				
	4	5	6				
		7					
1	1	1	1				
	1	1	1				
		1					
2	1	1	1				
	1	1	1				
		1					
3	1	1	1				
	1	1	1				
		1					
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>100 %</b>

Tab. p1.4 – Testování RFID systému s patchovou anténou TAGu (závodníci v matici na okraji, TAG na hrudi, chůze)

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
	1	2	3				
	4	5	6				
		7					
1	1	1	1				
	1	1	1				
		1					
2	1	1	1				
	1	1	1				
		1					
3	1	1	1				
	1	1	1				
		1					
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>100 %</b>

Tab. p1.5 – Testování RFID systému s patchovou anténou TAGu (závodníci v matici na okraji, TAG na hrudi, běh)

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
	1	2	3				
	4	5	6				
		7					
1	1	1	1				
	1	1	1				
		1					
2	1	1	1				
	1	1	1				
		1					
3	1	1	1				
	1	1	1				
		1					
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>100 %</b>

Tab. p1.6 – Testování RFID systému s patchovou anténou TAGu (závodníci v matici na okraji, TAG na hrudi, rychlý běh)

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
			1	2	3		
			4	5	6		
				7			
1			1	1	1		
			1	1	1		
				1			
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>100 %</b>

Tab. p1.7 – Testování RFID systému s patchovou anténou TAGu (závodníci v matici na středu, TAG na hrudi, chůze)

## 2 Původní TAG

### 2.1. Závodníci v řadě

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	1	0	1	1	1
2	0	1	0	0	1	1	1
3	0	1	1	0	1	1	1
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>66,7 %</b>

Tab. p1.8 – Testování RFID systému s anténou TAGu typu zkrácený dipól (závodníci v řadě, TAG na hrudi, chůze)

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1	0	0	1	1	1
2	1	1	0	0	0	1	1
3	0	1	0	0	0	1	1
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>52,4 %</b>

Tab. p1.9 – Testování RFID systému s anténou TAGu typu zkrácený dipól (závodníci v řadě, TAG na hrudi, běh)

## 2.2. Matice závodníků

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
	1	2	3				
	4	5	6				
		7					
1	0	1	1				
	0	0	1				
		1					
2	0	1	0				
	0	1	1				
		1					
3	1	1	1				
	0	0	1				
		1					
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>61,9 %</b>

Tab. p1.10 – Testování RFID systému s anténou TAGu typu zkrácený dipól (závodníci v matici na okraji, TAG na hrudi, chůze)

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
	1	2	3				
	4	5	6				
		7					
1	1	1	0				
	0	0	1				
		1					
2	0	1	0				
	0	0	1				
		1					
3	1	1	0				
	0	0	1				
		1					
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>52,4 %</b>

Tab. p1.11 – Testování RFID systému s anténou TAGu typu zkrácený dipól (závodníci v matici na okraji, TAG na hrudi, běh)

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
			1	2	3		
			4	5	6		
				7			
1			1	1	1		
			0	1	1		
				1			
2			1	1	1		
			0	1	1		
				1			
3			1	1	1		
			0	1	1		
				1			
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>85,7 %</b>

Tab. p1.12 – Testování RFID systému s anténou TAGu typu zkrácený dipól (závodníci v matici na středu, TAG na hrudi, chůze)

číslo měření	umístění závodníků na trati dle čísel						
			1	2	3		
			4	5	6		
				7			
1			1	1	0		
			0	1	1		
				1			
2			1	1	0		
			0	1	1		
				1			
3			1	1	0		
			1	1	1		
				1			
<b>statistické vyhodnocení spolehlivosti dané konfigurace</b>							<b>71,4 %</b>

Tab. p1.13 – Testování RFID systému s anténou TAGu typu zkrácený dipól (závodníci v matici na středu, TAG na hrudi, běh)

## Příloha 2 – Měření parametrů antén TAGu

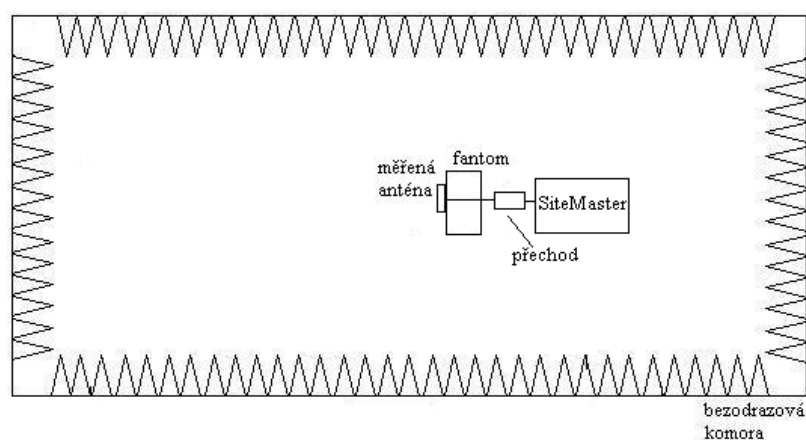
### 1 Úkol

Úkolem je provést pro testovací antény popsané v kapitole 2 (meandrově zkrácený půlvlnný dipól a nízkoprofilový čtvrtvlnný patch) a pro RFID anténu popsanou v kapitole 6 následující body.

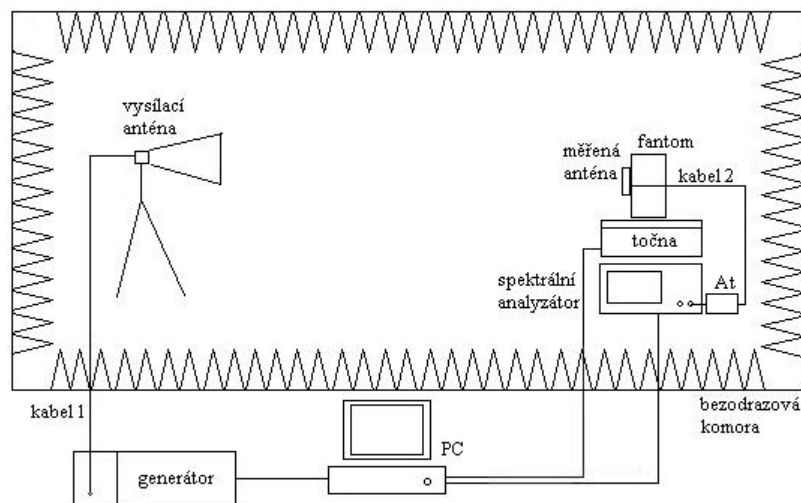
- 1) Měření přizpůsobení testovacích antén.
- 2) Měření vstupní impedance patchové RFID antény.
- 3) Měření směrových charakteristik ve vertikální a horizontální rovině.
- 4) Měření maximálního zisku.

Veškerá měření je třeba provést na kmitočtu 869 MHz ve volném prostoru a v několika definovaných vzdálenostech od fantomu lidského těla.

### 2 Schéma měřicího pracoviště



Obr. p2.1 – Uspořádání pro měření přizpůsobení a vstupní impedance antén



Obr. p2.2 – Uspořádání pro měření směrových charakteristik a maximálního zisku antén

### 3 Seznam použitých přístrojů

SiteMaster	měřič odrazu <i>SiteMaster S400A</i> , 100 kHz – 4 GHz
PC	řídící počítač
Generátor	Generátor <i>HP 8350B</i> , výstupní výkon 10 dBm
Spektrální analyzátor	Spektrální analyzátor <i>HP 8564E</i> , At 10 dB, span 1 MHz, RBW 30 kHz, sweep 50 ms
Vysílací anténa	Trychtýřová anténa <i>DRH 400</i> , G=10,5 dBi
At	Atenuátor 2,9 dB
Přechod	Přechod N – SMA
Kabel 1	Kabel H155, konektor SMA, délka 3 m
Kabel 2	Kabel H155, konektor SMA, délka 3 m
Fantom	plastový kanystr 5 l naplněný solným roztokem v koncentraci 4 g/l

## 4 Naměřené a vypočtené hodnoty

### 4.1. Měření přizpůsobení testovacích antén

Měření bylo provedeno pomocí měřiče odrazu SiteMaster v bezodrazové komoře. Anténa byla měřena ve volném prostoru a dále v několika vzdálenostech od fantomu lidského těla. Kmitočtový rozsah měření byl 500 MHz – 1 GHz pro zkrácený dipól resp. 700 MHz – 1 GHz pro čtvrtvlnný patch.

Vlastní naměřené hodnoty nejsou pro velký rozsah uvedeny. Výsledek je patrný z grafů uvedených v rámci kapitoly 2 resp. kapitoly 6.

### 4.2. Měření směrových charakteristik

Měření proběhlo na kmitočtu 869 MHz s krokem 1 °. Vlastní naměřené hodnoty nejsou opět pro velký rozsah uvedeny. Výsledkem jsou grafy viz. kapitola 2 resp. 6.

### 4.3. Měření maximálního zisku

Maximální zisk  $G_{\max}$  byl měřen při vertikální polarizaci antén. Vzdálenost vysílací a přijímací antény  $l=4,05$  m, výkon generátoru  $P_g=0$  dBm, zisk vysílací antény  $G_0=10,5$  dBi. Byla použita metoda referenční antény. Nejprve byl změřen přijatý výkon ( $P_{p0}$ ) při použití referenční přijímací antény totožné s anténou vysílací. Následně výkon přijatý jednotlivými měřenými anténami ( $P_p$ ).

Typ antény	$P_p$ [dBm]	$G_{\max}$ [dBi]
meandr volný prostor	-29,4	3,8
meandr $d=20$ mm	-38,92	-5,72
$\lambda/4$ patch volný prostor	-36,22	-3,02
$\lambda/4$ patch $d=10$ mm	-34,32	-1,12
$\lambda/4$ patch $d=0$ mm	-33,32	-0,12
RFID patch volný prostor	-39,6	6,3
RFID patch $d=0$ mm	-40,9	5

Tab. p2.1 – Maximální zisk antén

*příklad výpočtu:*

$$G_{\max} = Pp - Pp_0 + G_0 = -29,4 - (-22,7) + 10,5 = 3,8\text{dBi} \quad (\text{p1})$$

Vstupní impedance RFID patche na kmitočtu 869 MHz je  $76 + j340 \Omega$ . Při měření zisku přístroji se vstupní impedancí  $50 \Omega$  anténa tedy není přizpůsobená. Ztrátu takto vzniklým odrazem lze určit výpočtem a následně o tuto hodnotu provést korekci měření.

$$L_{s_{11}} = -10 \cdot \log(1 - (s_{11})^2) = -10 \cdot \log(1 - (-0,973)^2) = 12,7\text{dB} \quad (\text{p2})$$

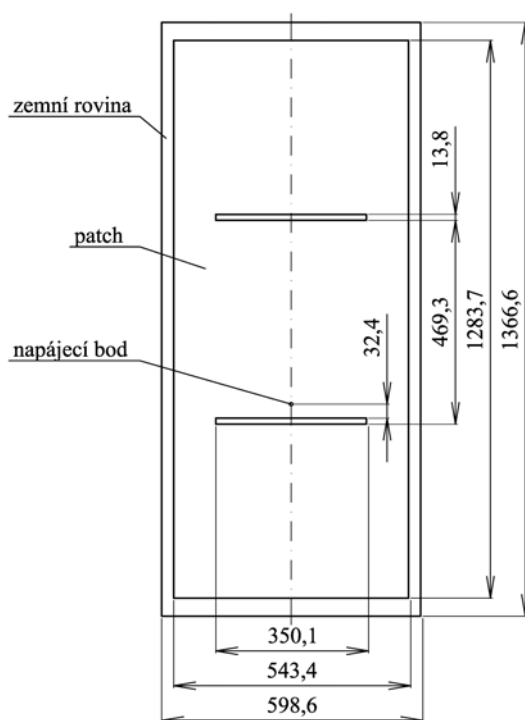
$$G_{\max} = Pp - Pp_0 + G_0 + L_{s_{11}} = -39,6 - (-22,7) + 10,5 + 12,7 = 6,3\text{dBi} \quad (\text{p3})$$

### Příloha 3 – Parametry pevných antén

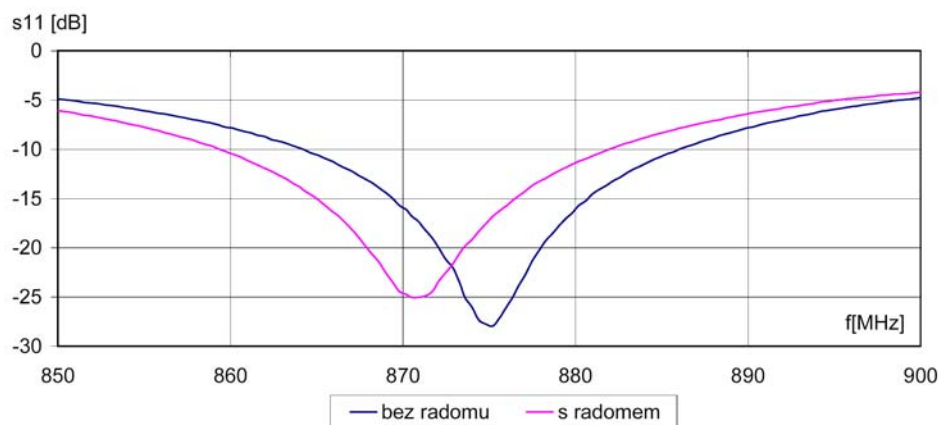


Obr. p3.1 – Pevná anténa bez radomu

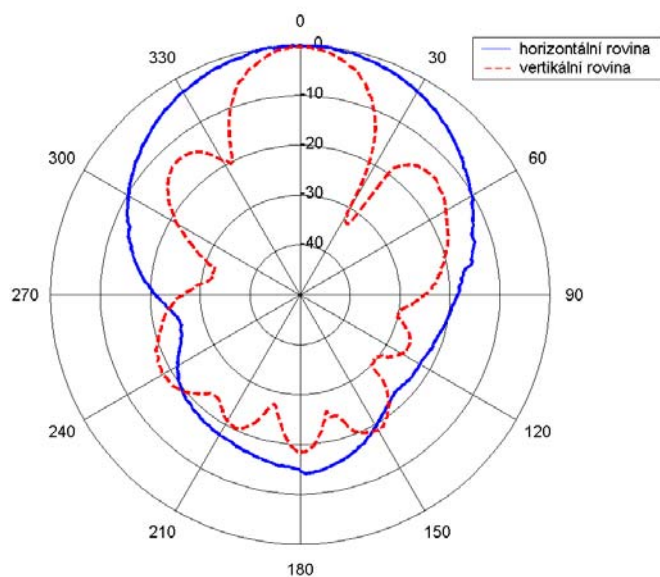
Jedná se o kolineární mikropáskové patchové antény na vzduchovém substrátu. Antény jsou opatřeny radomem. Jejich maximální zisk činí 11,7 dBi, ostatní charakteristiky jsou uvedeny v následujících grafech. Podrobnější popis antén lze nalézt v [13].



Obr. p3.2 – Rozměry pevné antény



Graf p3.1 – Impedanční přizpůsobení pevné antény (měřené hodnoty)



Graf p3.2 – Měřené normované směrové charakteristiky pevné antény (horizontální a vertikální rovina)

## Příloha 4 – Účinnost patchových antén

(LEE K. F., CHEN W.: Advances in Microstrip and Printed Antennas, New York: John Wiley & Sons, 1997)

-veškeré hodnoty je nutné zadávat v základních jednotkách

$$j := \sqrt{-1}$$

$$\varepsilon_0 := 8.85 \cdot 10^{-12}$$

$$c_0 := 3 \cdot 10^8$$

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

$$\sigma := 3 \cdot 10^7$$

$$f := 0.869 \cdot 10^9 \text{ Hz}$$

$$\varepsilon_r := 3.05$$

$$W := 0.120 \text{ m}$$

$$\mu_r := 1$$

$$L := 0.100 \text{ m}$$

$$l_d := 0.003 \dots \text{ztrátový činitel } \text{tg}\delta$$

$$h := 0, 0.00005, 0.1 \text{ m}$$

$$\eta_0 := 120 \cdot \pi \dots Z_0$$

$$\omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$\lambda_0 := \frac{c_0}{f}$$

$$\lambda_0 = 0.345$$

$$k_0 := 2 \cdot \frac{\pi}{\lambda_0}$$

$$R_s := \sqrt{\omega \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \sigma}}$$

$$a_2 := -0.16605$$

$$\text{delta}W(h) := \frac{\ln(4)}{\pi} \cdot h$$

$$a_4 := 0.00761$$

$$W_e(h) := W + 2 \cdot \text{delta}W(h)$$

$$c_2 := -0.0914153$$

$$\varepsilon_{\text{ef}}(\text{ksi}, h) := \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{(\varepsilon_r - 1) \cdot \left(1 + 10 \cdot \frac{h}{\text{ksi}}\right)^{\frac{-1}{2}}}{2}$$

$$\text{deltaL}(h) := \frac{0.412 h \cdot (\epsilon_{\text{ef}}(W, h) + 0.3) \cdot \left( \frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{ef}}(W, h) - 0.258) \cdot \left( \frac{W}{h} + 0.8 \right)}$$

$$\text{Le}(h) := L + 2 \cdot \text{deltaL}(h)$$

$$n1 := \sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}$$

$$c1 := \frac{1}{n1^2} + \frac{2}{n1^4}$$

$$\text{Pspshed}(h) := \frac{1}{\lambda_0^2} \cdot (k_0 \cdot h)^2 \cdot (80 \cdot \pi^2 \cdot \mu_r^2 \cdot c1)$$

$$\text{Pswshed}(h) := \frac{1}{\lambda_0^2} \cdot (k_0 \cdot h)^3 \cdot \left[ 60 \cdot \pi^3 \cdot \mu_r^3 \cdot \left( 1 - \frac{1}{n1^2} \right)^3 \right]$$

$$\text{erhed}(h) := \frac{\text{Pspshed}(h)}{\text{Pspshed}(h) + \text{Pswshed}(h)}$$

$$p1(h) := 1 + \frac{a2}{10} \cdot (k_0 \cdot \text{We}(h))^2 + (a2^2 + 2 \cdot a4) \cdot \left( \frac{3}{560} \right) \cdot (k_0 \cdot \text{We}(h))^4 + c2 \cdot \left( \frac{1}{5} \right) \cdot (k_0 \cdot \text{Le}(h))^2$$

$$p2(h) := c2 \cdot \left( \frac{1}{70} \right) \cdot (k_0 \cdot \text{We}(h))^2 \cdot (k_0 \cdot \text{Le}(h))^2$$

$$p(h) := p1(h) + p2(h)$$

$$\text{efic}(h) := \frac{\text{erhed}(h)}{1 + \text{erhed}(h) \cdot \left[ \text{ld} + \left( \frac{R_s}{\pi \cdot \eta_0 \cdot \mu_r} \right) \cdot \left( \frac{1}{\frac{h}{\lambda_0}} \right) \right] \cdot \left[ \left( \frac{3}{16} \right) \cdot \left( \frac{\epsilon_r}{p(h) \cdot c1} \right) \cdot \left( \frac{\text{Le}(h)}{\text{We}(h)} \right) \cdot \left( \frac{1}{\frac{h}{\lambda_0}} \right) \right]}$$

## Příloha 5 – Modifikovaný dvoupraskový model

```

%-----%
% ***   RFID MODEL 1   -   1   VYSILACI   ANTENA   *** %
%-----%

% smerove charakteristiky anten je nutno umistit do nasledujicich textovych souboru
% vzdy ve formatu dvou sloupcu (uhel   normovana smerova charakteristika) od -PI do +PI

% ZiskVstupla   ...   vysilaci antena   -   vertikalni charakteristika
% ZiskVstuplb   ...   antena   TAGu   -   vertikalni charakteristika
% ZiskVstuplc   ...   vysilaci antena   -   horizontalni charakteristika
% ZiskVstupld   ...   antena   TAGu   -   horizontalni charakteristika

%-----%

clear all;
close all;

%-----%

% ***   ZADANI   PARAMETRU   *** %

% rychlost svetla
c=3*10^8;

% kmitocet, vlnova delka a vlnovy vektor
f=869.5*10^6;
omega=2*pi*f;

lambda=c/f;
k=2*pi/lambda;

% komplexni permitivita
epsilonNula=8.85*10^-12;
epsilonR=3;
sigma=1e-5;
epsilon=(epsilonNula*epsilonR)-(j*(sigma/omega));

% polarizace
a=1;
% a=1   ...   vertikalni
% a=1/epsilon   ...   horizontalni

% vysky anten
h1=3;
h2=1.3;
% vyska pevne anteny
% vyska umisteni TAGu

% vysilaci vykon
Pv=3.5;
PvdBm=10*log10(Pv/10^-3);
% vysilany vykon celkovy (nikoli kazdou z anten)

% umisteni anten
p=0;
% vzdalenost TAGu od stredove osy

d=linspace(0.1,10,100);
d2=sqrt(d.^2+p.^2);
% vektor vzdalenosti od brany ve stredove ose
% vektor vzdalenosti mezi antenami

% sklony a otoceni anten
SklonPatchst=30;
SklonTagst=0;
OtoceniPatchst=0;
% sklon vysilaci anteny1 [st]
% sklon anteny TAGu [st]
% otoceni vysilaci anteny1 do stredu [st]

SklonPatch=3.1415*(SklonPatchst/180);
SklonTag=3.1415*(SklonTagst/180);
OtoceniPatch=3.1415*(OtoceniPatchst/180);
% sklon vysilaci anteny1 [rad]
% sklon anteny TAGu [rad]
% otoceni vysilaci anteny1 do stredu [rad]

% utlum privodnich kabelu
Lk1m=0.25;
% utlum 1m kabelu

DelkaKabelu1=6;
LkdB1=Lk1m*DelkaKabelu1;
Lk1=10^(LkdB1/10);
% delka kabelu k vysilaci antene v m

DelkaKabelu2=6;
LkdB2=Lk1m*DelkaKabelu2;
Lk2=10^(LkdB2/10);
% delka kabelu k prijimaci antene v m

% ZtratyNaTagu
ZtratyNaTagdB=20;

% maximalni zisky anten dB
GvmaxdB=11.7;
GpmaxdB=GvmaxdB;
GtmaxdB=5;
% vysilaci 1
% prijimaci 1
% TAG

%-----%

```

## POUŽITÍ RFID SYSTÉMU PRO IDENTIFIKACI POHYBUJÍCÍCH SE SPORTOVců

```

% ***** NACTENI A INTERPOLACE SMEROVYCH CHARAKTERISTIK ***** %

% VERTIKALNI ROVINA
load ZiskVstup1a.txt; %V smerova charakteristika vysilaci anteny [uhel normovany zisk]
load ZiskVstup1b.txt; %V smerova charakteristika anteny TAGu [uhel normovany zisk]

%vypocet vystupnich uhlu
Alfa1V=atan((h1-h2)./d)+SklonTag; %TAG primy paprsek
Beta1V=(-Alfa1V+SklonPatch); %PATCH primy paprsek
Alfa2V=-((pi/2)-(atan(d./(h1+h2))))-SklonTag; %TAG odrazeny paprsek
Beta2V=-Alfa2V+SklonPatch; %PATCH odrazeny paprsek
ZiskVstup2a=[Alfa1V',Beta1V',Alfa2V',Beta2V'];

%vyjmuti 1 sloupce (uhel resp. G)
UhelPatch1V=ZiskVstup1a(:,1);
GPatch1V=ZiskVstup1a(:,2);
UhelTag1V=ZiskVstup1b(:,1);
GTag1V=ZiskVstup1b(:,2);

%vlastni interpolace
UhelPatchPrimy2V=ZiskVstup2a(:,2);
UhelTagPrimy2V=ZiskVstup2a(:,1);
UhelTagOdrazeny2V=ZiskVstup2a(:,3);
UhelPatchOdrazeny2V=ZiskVstup2a(:,4);

%normovane smerove charakteristiky dB
GtprimyVNdB=spline(UhelTag1V,GTag1V,UhelTagPrimy2V);
GvprimyVNdB=spline(UhelPatch1V,GPatch1V,UhelPatchPrimy2V);
GtodrazenyVNdB=spline(UhelTag1V,GTag1V,UhelTagOdrazeny2V);
GvodrazenyVNdB=spline(UhelPatch1V,GPatch1V,UhelPatchOdrazeny2V);

%celkove zisky zavisle na smerove charakteristice dB
GtprimyVdB=GtmaxdB+GtprimyVNdB;
GvprimyVdB=GvmaxdB+GvprimyVNdB;
GtodrazenyVdB=GtmaxdB+GtodrazenyVNdB;
GvodrazenyVdB=GvmaxdB+GvodrazenyVNdB;

% - // - prepocetene na cislo
GtprimyV=10.^(GtprimyVdB/10);
GvprimyV=10.^(GvprimyVdB/10);
GtodrazenyV=10.^(GtodrazenyVdB/10);
GvodrazenyV=10.^(GvodrazenyVdB/10);

% HORIZONTALNI ROVINA
load ZiskVstup1c.txt; %H smerova charakteristika vysilaci anteny [uhel normovany zisk]
load ZiskVstup1d.txt; %H smerova charakteristika anteny TAGu [uhel normovany zisk]

%vypocet vystupnich uhlu
Alfa1H=atan(abs(p)./d); %TAG primy i odrazeny paprsek
Beta1H=atan(abs(p)./d); %PATCH primy i odrazeny paprsek
ZiskVstup2b=[Alfa1H',Beta1H'];

%vyjmuti 1 sloupce (uhel resp. G)
UhelPatch1H=ZiskVstup1c(:,1);
GPatch1H=ZiskVstup1c(:,2);
UhelTag1H=ZiskVstup1d(:,1);
GTag1H=ZiskVstup1d(:,2);

%vlastni interpolace
UhelPatchPrimy2H=ZiskVstup2b(:,2);
UhelTagPrimy2H=ZiskVstup2b(:,1);
UhelTagOdrazeny2H=ZiskVstup2b(:,1);
UhelPatchOdrazeny2H=ZiskVstup2b(:,2);

%normovane smerove charakteristiky dB
GtprimyHNdB=spline(UhelTag1H,GTag1H,UhelTagPrimy2H);
GvprimyHNdB=spline(UhelPatch1H,GPatch1H,UhelPatchPrimy2H);
GtodrazenyHNdB=spline(UhelTag1H,GTag1H,UhelTagOdrazeny2H);
GvodrazenyHNdB=spline(UhelPatch1H,GPatch1H,UhelPatchOdrazeny2H);

%celkove zisky zavisle na smerove charakteristice dB
GtprimyHdB=GtprimyHNdB;
GvprimyHdB=GvprimyHNdB;
GtodrazenyHdB=GtodrazenyHNdB;
GvodrazenyHdB=GvodrazenyHNdB;

% - // - prepocetene na cislo
GtprimyH=10.^(GtprimyHdB/10);
GvprimyH=10.^(GvprimyHdB/10);
GtodrazenyH=10.^(GtodrazenyHdB/10);
GvodrazenyH=10.^(GvodrazenyHdB/10);

%-----%

```

```

% *****                                DVOUPAPRSKOVY MODEL                                ***** %

%drahy paprsku
r1=sqrt((h1-h2)^2+d.^2);
r2=sqrt((h1+h2)^2+d.^2);

%koeficient odrazu
theta=asin((h1+h2)./d);
R=(sin(theta)-(a*sqrt(epsilon-((cos(theta)).^2))))/(sin(theta)+(a*sqrt(epsilon-((cos(theta)).^2))));

%UTLUM NA TRASE
%zahranuje vliv zisku a smerovych charakteristik anten
L0=1./(((lambda/(4*pi)).^2).*(abs(((sqrt(GtprimyV'.*GvprimyV'.*GtprimyH'.*GvprimyH')./r1).*(...
(exp(-j*k.*r1)))+(R.*sqrt(GtodrazenyV'.*GvodrazenyV'.*GtodrazenyH'.*GvodrazenyH')./r2).*(...
(exp(-j*k.*r2))))).^2));

L0dB=10*log10(L0);

%prenosova rovnice
PtdBm=PvdBm-LkdB1-L0dB;                                %vykon prijaty TAGem
PpdBm=PtdBm-ZtratyaNaTagudB-L0dB-LkdB2;                %vykon prijaty cteckou

%-----%
% *****                                VYSLEDKY                                ***** %

%grafy
figure(1)
plot(d,PtdBm);

figure(2)
plot(d,PpdBm);

%hodnoty
PtdBm'
PpdBm'

```