Bakalářská práce



České vysoké učení technické v Praze

**F**3

Fakulta elektrotechnická Katedra elektromagnetického pole

# Modelování bezdrátového spojení mezi družicí a říční lodí

**David Prudek** 

### / Prohlášení

Prohlašuji, ze jsem práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

# Abstrakt / Abstract

Testovani testing

# / Obsah

<b>1</b> Üvod
<b>2</b> Odraz elektromagnetické vlny $\dots 2$
<b>3 Difrakce</b>
4 Vícecestné šíření
4.1 Šíření na přímou viditelnost5
4.2 Dvoupaprskový model6
4.3 Odraz od stěn koryta8
4.4 Odraz od stěny koryta a ná-
sledně od vodní hladiny9
4.5 Difrakce na hranách mostu 10
4.5.1 Difrakce na spodní a
vrchní hraně mostu 13
4.5.2 Difrakce na hranách
mostu a odraz od vodní
hladiny 14
4.6Změna výšky přijímací antény . $15$
4.7 Použité Hodnoty
5 Analýza experimentu
5.1 Experiment ve vlakovém ko-
ridoru
5.2 Výsledky experimentu 19
5.3 Srovnání výsledků experi-
mentu se simulací
5.4 Parametry experimentu 21
<b>6 Závěrvěr</b>
Literatura 23
<b>A Zadání</b>
<b>B Zkratky</b>

# Tabulky / Obrázky

Data použitá pro simulaci 16 Parametry vyhodnocovaného		Difrakce vlně Difrakce na d
experimentu	4.1.	Nasimulovany
		lu při šíření j
		paprsku bez z
	4.2.	Nasimulovany
		lu při šíření j
		paprsku se za
	4.3.	Nasimulovany
		při šíření pří
		ného paprsku
		$mostem\ \dots.$

3.1.	Difrakce vlnění na štěrbině3
3.2.	Difrakce na dvojštěrbině4
4.1.	Nasimulovaný průběh signá-
	lu při šíření pouze přímého
	paprsku bez zastínění mostem6
4.2.	Nasimulovaný průběh signá-
	lu při šíření pouze přímého
	paprsku se zastíněním mostem6
4.3.	<i>v</i> 1
	při šíření přímého a odraže-
	ného paprsku bez zastineni
	mostem
4.4.	Nasimulovaný průběh signálu
	při šíření přímého a odraže-
	ného paprsku se zastinenim
4 5	mostem
	Vizualizace koryta řeky8
	Vizualizace koryta9 Simulace přijatého výkonu
4.7.	při odrazu od obou stěn koryta9
<b>Λ</b> Ω	Simulace přijatého výkonu
7.0.	při započtení také odrazu od
	stěny koryta a následně od
	vodní hladiny
4.9.	Geometrie difrakce na ostré
	překážce11
4.10.	Závislost poměru intenzit na
	koeficientu zastínění
4.11.	Závislost útlumu difrakcí na
	koeficientu zastínění
4.12.	Závislost útlumu difrakcí na
	koeficientu zastínění a apro-
	ximace pro $v > 2 \dots 13$
4.13.	Vizualizace difrakce na vrch-
	ní a spodní hraně mostu 13
4.14.	1 0
	na vzdálenosti pro přidaný
	případ difrakce na hranách
4 1 5	mostu
4.15.	Vizualizace difrakce na vrch-
	ní a spodní hraně mostu s
	následnám odrazem od vodí
110	hladiny
4.10.	Závislost přijatého výkonu
	na vzdálenosti pro difrakci

	a následný odraz od vodní	
	hladiny	15
4.17.	Závislost přijatého výkonu	
	na výškové poloze přijímací	
	antény	15
<b>5</b> .1.	Úsek analyzovaný experi-	
	mentem s výsledky měření	17
5.2.	Vysílací anténa	
5.3.	Přijímací anténa anténa	18
5.4.	Experimentálně změřený při-	
	jatý výkon	19
5.5.	Experimentálně změřený	
	útlum šířením	19
5.6.	Experiment srovnaný se si-	
	mulaci pro volný prostor	20
5.7.	Nasimulované hodnoty srov-	
	nané s experimentem	20

# Kapitola 1 Úvod

S narůstajícím počtem mobilních zařízení, ať se již jedná o mobilní telefony, GPS navigace nebo jiné mobilní radiostanice a zvyšujícími se nároky na kvalitu přenosu signálu, vzniká potřeba teoreticky modelovat šíření signálu pro konkrétní prostředí. Pro mobilní zařízení je nejdůležitější se zabývat modelováním šíření podél frekventovaných dopravních cest, jako jsou dálnice, hlavní železniční tratě nebo frekventované říční trasy. Především z důvodu, že pro dálniční nebo železniční sítě je již v této době hotovo poměrně velké množství modelů, zabývá se tato práce vícecestným šířením v říčním korytu.

Model v prostředí MATLAB zahrnuje několik základních situací šíření signálu od vysílače (pro nás satelit) k přijímači (pro nás loď plující středem koryta). Základní situace pro koryto řeky: Přímý paprsek (přímá viditelnost mezi anténami), paprsek odražený od vodní hladiny a paprsky odražené od stěn koryta. Posledním typem je dvojitý doraz (od stěny koryta a následně od vodní hladiny). Simulace pak obsahuje také model mostu zjednodušený na dvě dokonale ostré hrany, na nichž dochází k difrakci. Základní situace pro most jsou: Difrakce na horní a spodní hraně mostu (po difrakci se signál šíří dále přímo k přijímači), odraz vlny od vodní hladiny po difrakci na hranách mostu.

V jednotlivých částech práce jsou prezentovány situace, které v simulaci uvažujeme a jsou v nich zmíněny základní vztahy použité pro výpočet. Pro každou část jsou uvedeny grafy přijatého výkonu přijímačem.

# Kapitola 2

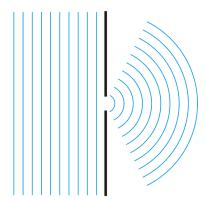
#### Odraz elektromagnetické vlny

K odrazu nějakého vlnění dochází obecně vždy na rozhraní dvou prostředí s různými vlastnostmi. Pro elektromagnetickou vlnu jsou tyto vlastnosti permitivita ( $\varepsilon$ ) a permeabilita ( $\mu$ ). Na těchto parametrech závisí, jak velká část elektromagnetické vlny projde rozhraním do prostředí s jinými parametry a jaká část se od rozhraní odrazí. Podle obr. 1 dopadá na rozhraní dvou prostředí elektromagnetická vlna pod úhlem  $\theta$  i Z Maxwellových rovnic vyplývá, že po dopadu na rozhraní vzniknou z dopadající vlny dvě vlny nové (odražená a procházející) a to se stejnou frekvencí jako vlna dopadající. Vzhledem k tomu, že vlna procházející do druhého prostředí je zatlumena ještě dalšími interakcemi s překážkami, ji do simulací nezahrnujeme (měla by jen zanedbatelný vliv).

# Kapitola 3 Difrakce

Difrakce je obecně jev, při kterém dochází k šíření nějakého vlnění i za překážku, která jí stojí v cestě (tedy i do oblasti která je geometricky zastíněna). Tento jev je možné sledovat u všech typů vlnění (mechanické, elektromagnetické,...). Vlna je difrakcí nejvíce ovlinňována předměty, které jsou rozměrově podobné její vlnové délce.

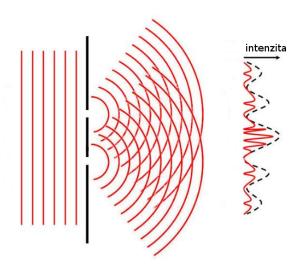
Jev difrakce vzniká díky platnosti Huygensova principu, který říká, že každý bod do kterého vlna dospěje se stává sám zdrojem vlnění. Zřejmě nejjednosušší případ difrakce se dá sledovat na štěrbiě v překážce, která stojí v cestě šíření. Ve chvíli, kdy vlna dospěje k překážce, se stává štěrbina bodovým zdrojem vlnění za překážkou.



**Obrázek 3.1.** Difrakce vlnění na štěrbině, štěrbina sama se stává zdrojem vlnění (převzato z internetu)

Dalším příkladem difrakce, který je analyticky ještě relativně snadno řešitelný, je difrakce na dvojštěrbině. U tohoto případu se na výsledném šíření vln za překážkou velmi výrazně projevuje interference vlnění od obou štěrbin (bodových zdrojů).

3. Difrakce



**Obrázek 3.2.** Difrakce na dvojštěrbině s naznačeným průběhem intenzity pole za překáž-kou ovlivněné interferencí (převzato z internetu)

# Kapitola 4 Vícecestné šíření

Přítomnost zemské atmosféry a terénních překážek (např.: povrch země, zástavba, vodní plochy) v blízkosti přenosové cesty má za následek interakci elektromagnetické vlny s překážkami a vznik tzv. vícecestného šíření. V takovýchto situacích dochází k přijetí také druhotných vln odražených od překážek. Ve velmi komplikovaném terénu (typicky městská zástavba) dochází k přijetí nekonečně mnoha odražených vln. V takovém případě volíme pro simulace jen takové odražené vlny, které zásadně ovlivní výsledek (čím vícekrát se vlna odrazí a po čím delší dráze se šíří, tím se vlna více utlumí).

Situace vícecestného šíření se dá zjednodušit pomocí tzv. paprskové optiky. V té se využíva zjednodušení vlny na diskrétní paprsek (zanedbání šířky Fresnelovy zóny). Toto používáme ale pouze v případě, že je vlnová délka podstatně menší než velikosti objektů účastnících se interakce. [1]

Na straně přijímací antény se vlny přijaté z jednotlivých cest šíření vektorové sčítají (1).

$$\overline{E} = \sum_{i} \overline{E_l} \tag{1}$$

Kde  $\overline{E_l}$  je příspěvek od jednotlivých paprsků a  $\overline{E}$  je výsledný vektor intenzity v místě přijímací antény [1].

Problematika vícecestého šíření take znamená, že má každá cesta šíření jinou délku. Tudíž se každou cestou šíří signál po jiný časový úsek a nesená informace je přijata pokaždé v jiném čase. Toto není ale pro tuto prácí podstatné, týká se to spíše následného zpracování signálu.

V modelu neuvažujeme šířku Fresnelovy zóny, pouze spojnice bodů. Toto zjednodušení pomocí paprskové optiky funguje ale pouze pokud považujeme všechny objekty se kterými vlna interaguje za mnohem větší než je vlnová délka signálu. Zastínění mostem je realizováno poklesem intenzity elektrického pole přímého paprsku při průchodu pod mostem na nulu.

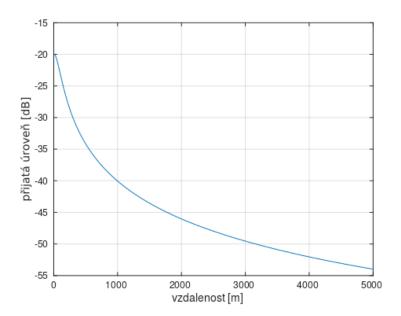
#### 4.1 Šíření na přímou viditelnost

Šíření na přímou viditelnost je nejjednodušší případ, který může v našem případě nastat. Při této situaci se šíří signál pouze po spojnici vysílače s přijímačem. Průběh závislosti přijatého signálu na vzájemné vzdálenosti vysílače a přijímače lze jednoduše vypočítat jen z útlumu způsobeného volným prostorem.

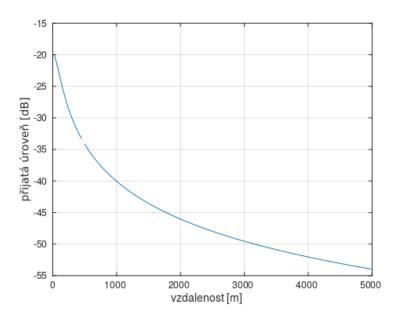
$$E = \frac{E_0}{d_{pr}} e^{-jkd_{pr}} \tag{2}$$

Kde  $E_0$  je počáteční amplituda v místě vysílací antény, k konstanta šíření a  $d_{pr}$  přímá vzdálenost vysílací a přijímací antény [2], [1].

4. Vícecestné šíření



Obrázek 4.1. Nasimulovaný průběh signálu při šíření pouze přímého paprsku bez zastínění mostem. Simulace na základě vztahu (2)



Obrázek 4.2. Nasimulovaný průběh signálu při šíření pouze přímého paprsku se zastíněním mostem. Simulace na základě vztahu (2)

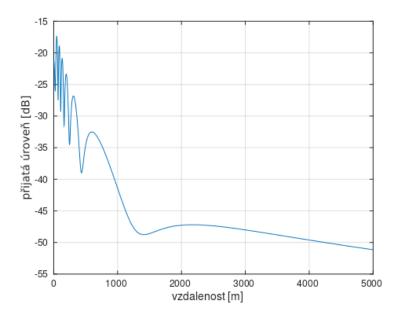
#### 4.2

#### Dvoupaprskový model

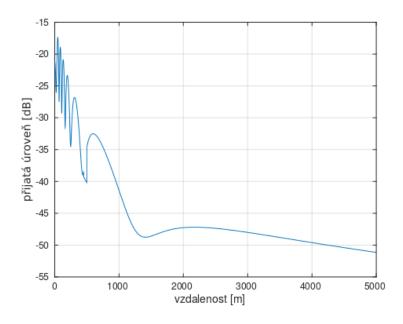
Přidáním jednou odraženého paprsku dostáváme tzv. dvoupaprskový model. Průběh přijatého signálu v závislosti na vzdálenosti je zde složitější. Přímý paprsek je doplněn o odražený, který se šíří po delší trajektorii a při odrazu od překážky se mění jeho fáze na opačnou. Komplexní signály se v místě jejich přijetí anténou sčítají, čímž vzniká typické kolísání hladiny signálu při změně vzdálenosti od vysílače. Při úplném odražení vlny od překážky by se v místech s přesně opačnou fází signálů blížila hodnota přijatého výkonu k nule. Situaci popisuje vztah (3)

$$E = \frac{E_0}{d_{pr}} e^{-jkd_{pr}} + \frac{E_0}{d_{od}} e^{-jkd_{od}} R e^{-j\psi}$$
(3)

Kde  $d_{od}$  je délka trajektorie odraženého paprsku,  $Re^{-j\psi}$  je komplexní činitel odrazu, R je činitel odrazu [1].

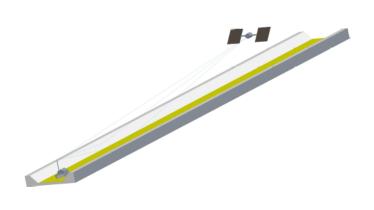


**Obrázek 4.3.** Nasimulovaný průběh signálu při šíření přímého a odraženého paprsku bez zastínění mostem



**Obrázek 4.4.** Nasimulovaný průběh signálu při šíření přímého a odraženého paprsku se zastíněním mostem

#### 4.3 Odraz od stěn koryta



Obrázek 4.5. Vizualizace koryta řeky

Přidáním dvou paprsků odražených od stěn koryta vzniká již komplikovaná funkce, kterou nelze snadno analyticky určit. Pro simulaci v prostředí MATLAB to znamená přidat do součtu komplexních intenzit dvě intenzity odražených paprsků od stěn. Hlavním parametrem pro jejich výpočet je sklon stěny koryta vůči vodorovné hladině. V simulaci zatím uvažuji nekonečně rozlehlé roviny stěn koryta. Problémovou částí je zde také situace, kdy se úhel odklonu stěny koryta velmi blíží nule. (Pro úhel roven nule splyne odraz od stěny s odrazem od vody diskutovaným ve dvoupaprskovém modelu. Pro tuto situaci je do simulace přidána podmínka nerovnosti úhlu nule.) Pro úhly blížící se nule nastane situace, kdy by k odrazu ve skutečnosti nedošlo (bod odrazu se nachází pod hladinou vody). V těchto případech se tedy simulace dopouští nepřesnosti. Pro výslednou přijatou intenzitu (uvažujeme stejné úhly sklonu rovin) dostaneme vztah (4). Vztahy (5), (6), (7) a (8) je pak možné využít pro výpočet geometrie koryta.

$$E = \frac{E_0}{d_{pr}} e^{-jkd_{pr}} + \frac{E_0}{d_{od}} e^{-jkd_{od}} R_v e^{-j\psi} + 2 \frac{E_0}{d_{odk}} e^{-jkd_{odk}} R_k e^{-j\psi}$$
(4)

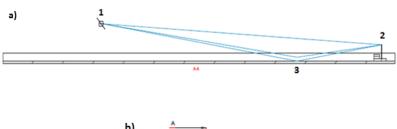
$$d_{od2} = \sqrt{d_2^2 + (h_{S2} + h_{L2})^2} \tag{5}$$

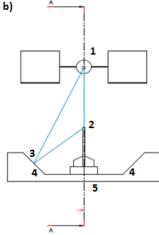
$$d_2 = \sqrt{d_{pr}^2 - (h_{S2} - h_{L2})^2} \tag{6}$$

$$h_{S2} = (a * tan\alpha + h_{S1})cos\alpha \tag{7}$$

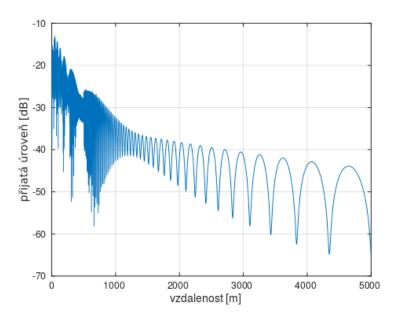
$$h_{L2} = (b * tan\alpha + h_{L1})cos\alpha \tag{8}$$

Kde veličina a je vzdálenost kolmého průmětu satelitu na vodní hladinu od břehu řeky (pro nás je to polovina šířky řeky, a=b), b je vzdálenost lodě od břehu ,  $h_{S2}$  je výška satelutu vůči stěně koryta ,  $h_{L2}$  je výška lodě vůči stěně koryta ,  $d_{pr}$  je délka přímého spoje satelitu a lodě ,  $d_2$  je vzdálenost kolmých průmětů lodě a satelitu na rovinu stěny koryta ,  $d_{odk}$  je délka paprsku odraženého od stěny koryta.





**Obrázek 4.6.** Vizualizace odrazu od stěny koryta a přímého paprsku a) boční pohled na koryto řeky, b) pohled zepředu



**Obrázek 4.7.** Simulace přijatého výkonu při odrazu od obou stěn koryta, pro simulaci byl použit vztah (4)

# 4.4 Odraz od stěny koryta a následně od vodní hladiny

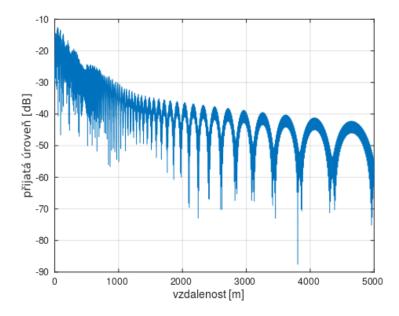
Tato situace je nejsložitější, kterou pro odražené paprsky uvažujeme. Útlum odrazů od překážek je již tak velký, že se na součtu přijatého výkonu odražený signál projeví

4. Vícecestné šíření

jen minimálně. Do vztahu pro výpočet je v tomto případě nutné přidat další faktor ovlivňující změnu fáze signálu a jeho útlum. Vztah bude v tomto případě vypadat následovně (9).

$$E = \frac{E_0}{d_{pr}} e^{-jkd_{pr}} + \frac{E_0}{d_{od}} e^{-jkd_{od}} R_v e^{-j\psi} + 2\frac{E_0}{d_{odk}} e^{-jkd_{odk}} R_k e^{-j\psi} + \frac{E_0}{d_{2od}} e^{-jkd_{2od}} R_k e^{-j\psi} R_v e^{-j\psi}$$
(9)

Kde  $d_{2od}$  je délka dráhy dvakrát odraženého paprsku.

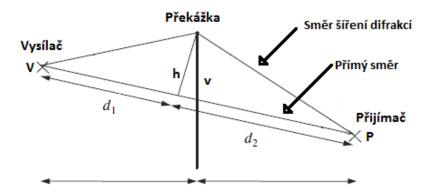


**Obrázek 4.8.** Simulace přijatého výkonu při započtení také odrazu od stěny koryta a následně od vodní hladiny

#### 4.5 Difrakce na hranách mostu

Difrakce na hranách mostu vychází z tzv. Huygensova principu, který popisuje jev šíření elektromagnetické vlny i za překážku v cestě. Difrakce je silně ovlivňována tvarem překážky která vlnu zastiňuje [1].

Řešení difrakce na překážce obecného tvaru je tak složitě, že se omezujeme na řešení pouze ve zjednodušených případech. Ve všech našich výpočtech uvažujeme pouze dokonale ostrou a dokonale absorbující překážku. Tento případ je nejjednodušší a nazývá se difrakcí na ostrém břitu (knife edge diffraction) [2].



**Obrázek 4.9.** Geometrie difrakce na ostré překážce. Převzato z literatury [2].

Míra zastínění přímého spoje je definována pomocí parametru v (10) [1].

$$v = h\sqrt{\frac{2}{\lambda}(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2})}$$
 (10)

Kde je  $\lambda$  vlnová délka a ostatní parametry jsou znázorněné na Obr. 4.9.

Řešení je poměrem intenzity elektrického pole E v bodě přijetí signálu P při zastínění překážkou a intenzity  $E_p$  v bodě P pro situaci bez překážky. Tento poměr vyjadřuje vztah (11) [1] .

$$\frac{E}{E_p} = \frac{1+j}{2} \int_v^\infty e^{-j\frac{\pi}{2}s^2} ds$$
 (11)

Tento integrál řešíme dále numericky pomocí Sinového a Kosinového Fresnelova integrálu. Dostáváme následující zjednodušený vztah (12) [3],[4].

$$\frac{E}{E_n} = \frac{1+j}{2} \left[ \left( \frac{1}{2} - C(v) \right) - j\left( \frac{1}{2} \right) - S(v) \right] \tag{12}$$

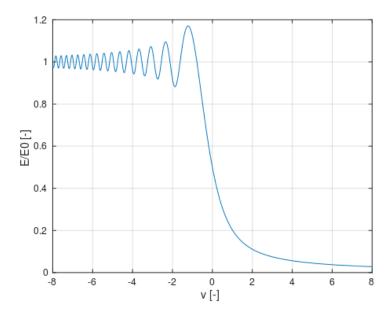
Kde C(v) je Kosínový (13) a S(v) Sinový (14) Fresnelův integrál [3],[4].

$$C(v) = \int_0^v \cos(\frac{\pi s^2}{2}) \tag{13}$$

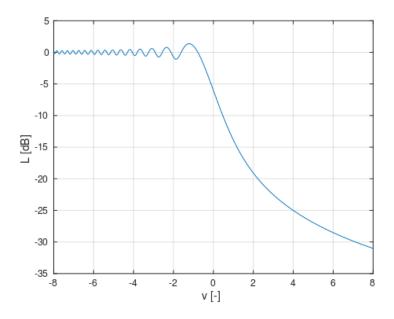
$$S(v) = \int_0^v \sin(\frac{\pi s^2}{2}) \tag{14}$$

Po numerickém vyřešení dostáváme následující grafy závislostí v na poměru intenzit  $\frac{E}{E_p}$  (Obr. 4.10) a útlumu difrakcí L (Obr. 4.11).

4. Vícecestné šíření



**Obrázek 4.10.** Závislost poměru intenzit na koeficientu zastínění, vychází ze vztahů (12), (13), (14)

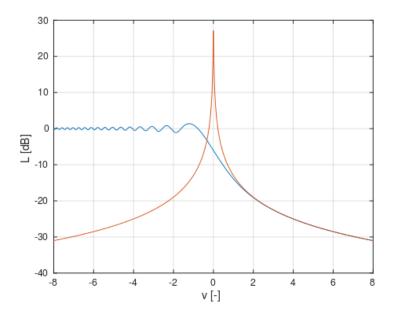


**Obrázek 4.11.** Závislost útlumu difrakcí na koeficientu zastínění, vychází ze vztahů (12), (13), (14)

Z grafů závislostí poměru intenzit a útlumu na koeficientu zastínění vyplývá, že pro koeficienty v hodnot blížících se k $-\infty$  se situace velmi podobá volnému prostoru [2]. Pro nás ale taková situace nenastane. Uvažujeme totiž difrakci na hranách mostu pouze jako příspěvek k celkové intenzitě elektrického pole v bodě přijímací antény, do přímého paprsku tedy difrakci nezahrnujeme a při výpočtu přírůstku intenzity díky difrakci uvažujeme zastínění přímého spoje.

Pro hodnoty v vyšších hodnot (obvykle větší než 2) se dá použít také následující zjednodušený vztah pro poměr intenzit [1].

$$\mid \frac{E}{E_p} \mid = \frac{1}{2\pi v} \tag{15}$$

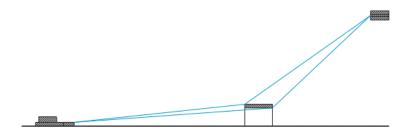


**Obrázek 4.12.** Závislost útlumu difrakcí na koeficientu zastínění a aproximace pro v>2, vychází ze vztahů (12), (13), (14), (15)

V grafu vidíme, že pro hodnoty v > 2 obě charakteristiky v podstatě splývají.

#### 4.5.1 Difrakce na spodní a vrchní hraně mostu

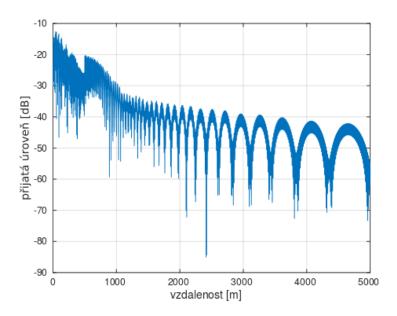
V simulaci uvažujeme difrakci na dvou hranách mostu, které jsou dokonale ostré. Pomocí výše uvedených vztahů (12), (13), (14) jsme provedli výpočet přírůstku intenzity elektrického pole od obou případů difrakce a sečetli ho s intenzitou získanou v předchozích částech simulace.



Obrázek 4.13. Vizualizace difrakce na vrchní a spodní hraně mostu

Uvažujeme, že k difrakci dochází jen v případech, kdy se přijímač nachází na opačné straně vůči mostu než vysílač.

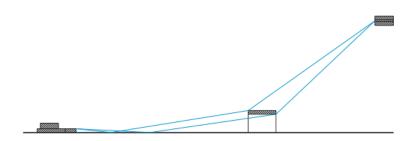
4. Vícecestné šíření



**Obrázek 4.14.** Závislost přijatého výkonu na vzdálenosti pro přidaný případ difrakce na hranách mostu, vychází ze vztahů (12), (13), (14)

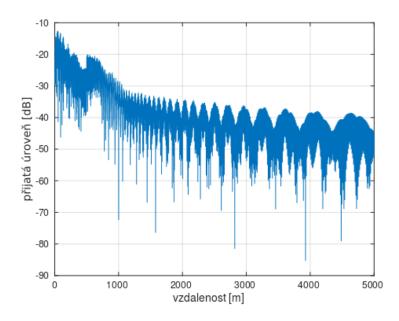
#### 4.5.2 Difrakce na hranách mostu a odraz od vodní hladiny

Pro tuto situaci uvažujeme, že dojde k difrakci na hraně mostu a následně k odrazu elektromagnetické vlny od vodní hladiny k přijímací anténě.



**Obrázek 4.15.** Vizualizace difrakce na vrchní a spodní hraně mostu s následnám odrazem od vodí hladiny

Hodnoty intenzity počítáme jako difrakci pro bod odrazu od vodní hladiny a dále pomocí činitele odrazu, útlumu volným prostorem (diskutováno v sekcích 4.1, 4.2) dopočítáme intenzitu v místě přijetí.

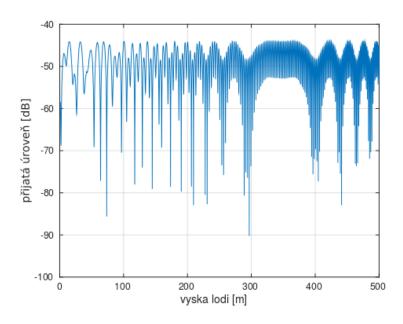


**Obrázek 4.16.** Závislost přijatého výkonu na vzdálenosti pro difrakci a následný odraz od vodní hladiny, vychází ze vztahů (12), (13), (14)

#### 4.6 Změna výšky přijímací antény

Simulace přijaté úrovně signálu v závislosti na měnící se výšce přijímací antény nad vodní hladinou.

Simulace zobrazená grafem na obr. 4.17 uvažuje hypoteticky výšku několikanásobně větší, než je výška mostu (loď by tudíž nebyla schopna podjezu). Toto měřítko bylo použito pouze pro zobrazení většího rozsahu změn přijaté úrovně signálu.



Obrázek 4.17. Závislost přijatého výkonu na výškové poloze přijímací antény

4. Vícecestné šíření



### 4.7 Použité Hodnoty

Tabulka hodnot použitých pro simulaci veškerých průněhů v kapitole 4.

Parametr	Hodnota	Poznámka
Vzdálenost	0-5000m	proměnná vzdálenost lodi a satelitu
Krok výpočtu	$0.8 \mathrm{m}$	krok změny vzdálenost při simulaci
Výška lodi	$1 \mathrm{m}$	výška antény nad hladinou řeky
Výška satelitu	$100 \mathrm{m}$	výška satelitu nad hladinou řeky
Výška horní hrany mostu	$50 \mathrm{m}$	výška horní hrany nad hladinou řeky
Výška dolní hrany mostu	$40\mathrm{m}$	výška spodní hrany nad hladinou řeky
Vzdálenost horní hrany mostu	$450 \mathrm{m}$	vzdálenost horní hrany mostu od vysílače
Vzdálenost dolní hrany mostu	$500 \mathrm{m}$	vzdálenost spodní hrany mostu od vysílače
Šířka mostu	$50 \mathrm{m}$	ze vzdáleností horní a spodní hrany mostu
Činitel odrazu vody	-0,5	značeno $R_v$
Činitel odrazu koryta	-0,8	značeno $R_k$
Frekvence	$1000~\mathrm{MHz}$	
Úhel odchylky stěny koryta	$15^{\circ}$	
Vzdálenost lodi od behu	$10 \mathrm{m}$	
Počáteční intenzita elektrického pole	$10\mathrm{V/m}$	

Tabulka 4.1. Data použitá pro simulaci

# Kapitola 5

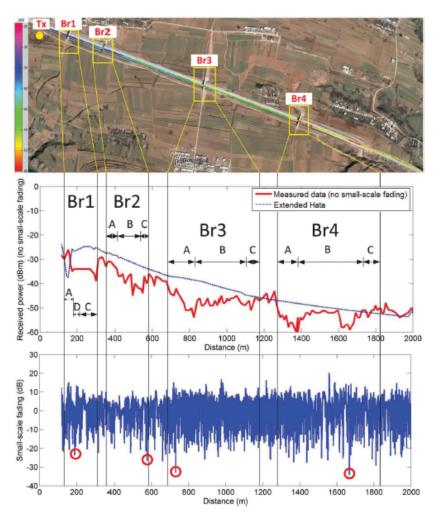
### Analýza experimentu

#### 5.1 Experiment ve vlakovém koridoru

Tato kapitola je věnována analýze dat naměřených ve vlakovém koridoru. Experiment je použit k ověření funkčnosti vytvořeného modelu.

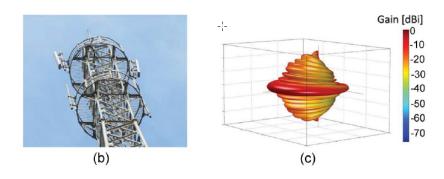
Experiment měřený v korytě vlakového koridoru s několika mosty je terénním profilem srovnatelný s uvažovanou situací lodě plovoucí pod mostem.

Analyzovaný experiment nicméně zahrnuje relativně dlouhý úsek koridoru, který jako celek nesplňuje požadavek na přímou trasu s jedním mostem. Pro ověření funkčnosti simulace musíme tedy zvolit pouze část měřeného úseku. Celý analyzovaný úsek, včetně výsledků měření je zobrazen na obr. 5.1.

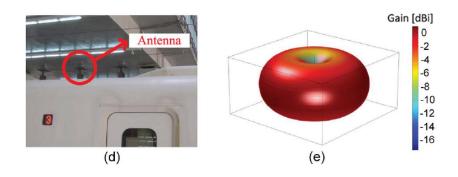


Obrázek 5.1. Celý úsek analyzovaný experimentem s výsledky měření

Podle terénního profilu zobrazeného na obr. 5.1 vypadá nejpřijatelněji úsek kolem třetího mostu (na obrázku označený jako Br3). Tento úsek tedy volíme pro další zpracování.



Obrázek 5.2. Směrová charakteristika a ilustrační fotografie vysílací antény



Obrázek 5.3. Směrová charakteristika a ilustrační fotografie přijímací antény

Na obr. 5.2, 5.3 jsou zobrazeny charakteristiky vysílací a přijímací antény použité při měření experimentu. Z charakteristik je viditelné, že přijímací anténa (obr. 5.3) umístěná na střeše pohybujícího se vlaku má velmi simetrickou charakteristiku, tudíž u ní nebude příliš docházet k neočekávanému kolísání signálu. Vysílací anténa ale tak simetrickou charakteristiku nemá, může zanést tedy do srovnání experimentu se simulací větší chybu.

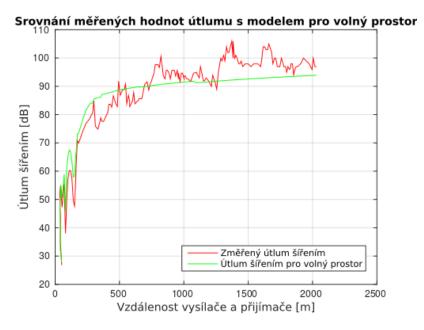
#### 5.2 Výsledky experimentu



Obrázek 5.4. Experimentálně změřený přijatý výkon, pro celý měřený úsek

Graf na obr. 5.4 zobrazuje změřený přijatý výkon anténou umístěnou na střeše vlaku v závislosti na vzdálenosti od vysílače.

Z poklesů úrovně přijatého výkonu můžeme ve vlakovém koridoru zhruba odhadnout polohu jednotlivých mostů.

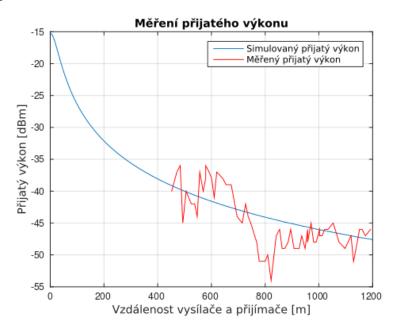


**Obrázek 5.5.** Experimentálně změřený útlum šířením, se srovnáním teoretického útlumu volným prostorem

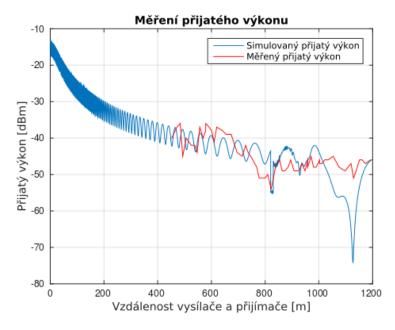
Graf na obr. 5.5 zobrazuje závislost útlumu signálu na vzdálenosti od vysílače. V grafu je také pro srovnání vynesena závislost útlumu volným prostorem na vzdálenosti.

#### 5.3 Srovnání výsledků experimentu se simulací

Pro srovnávání experimentálně naměřených dat se simulací využíváme pouze rovný úsek koridoru s jedním mostem. Jako optimální byl zvolen úsek ve vzdálenosti 450 až 1200 metrů od vysílače. S mostem ve zdálenosti VZDALENOSTI



Obrázek 5.6. Experiment srovnaný se simulaci pro volný prostor



Obrázek 5.7. Nasimulované hodnoty srovnané s experimentem

Grafy na obr. 5.6, 5.7 zobrazují srovnání experimentálně změřených dat (červené křivky) ve vlakovém koridoru s daty teoreticky nasimulovanými v prostředí MATLAB (modré křivky). Ze závislostí se zá, že simulace relativně vystihuje trend křivky experimentálně změřených hodnot. Pro závislost na obr. 5.6 platí, že naměřené hodnoty oscilují kolem simulace pro volný prostor. Toto odpovídá předpokladu vícecestného šíření, kdy se signály přijaté z různých směrů komplexně sčítají, čímž vznikají na trase

místa s nejen nižšími hodnotami (odečtení signálů v protifázi), ale také situace většího přijatého výkonu než pro volný prostor (signály se málo fázově liší a tedy se přijatá úroveň vzyšuje). Takováto situace mohla nastat například pro případ vlaku vzdalujícího se od vysílače a přibližujícího se k mostu, kde mohl mít vliv odraz od čelní strany mostu.

Pro měření byla v experimentu použita anténa s reálnými parametry, u které musíme uvažovat různé vlastnosti pro směry ze kterých signál přichází. Směrová charakteristika je znázorněna na obr. OBRAZEK ANTENA. Pro simulaci, která uvažuje příjem isotropickou anténou (nulová směrovost, zisk 0dBi) mohly tyto reálné paramtery způsobit neočekávané výchylky v naměřených datech. Stejná situace zde nastává také pro vysílací anténu umístěnou pevně na telekomunikačním stožáru, její charakteristika je zobrazen na obr. OBRAZEKCHAR

Téměř periodické kolísání přijatého signálu vycházejícího ze simulace znázorněné na obr. 5.7 způsobené odrazem signálu od povrchu koryta (pro říční koryto voda, pro vlakový koridor pevné dno) mohlo být do značné míry ovlivněno umístěním přijímací antény nízko (30 cm) nad střechou vlaku, což způsobilo částečné odstínění odraženého paprsku.

#### 5.4 Parametry experimentu

Tabulka hodnot použitých pro srovnání s experimentem. Hodnoty byly získány z dokumentace experimentu a z vyhodnocovacích skriptů v prostředí MATLAB.

Parametr	Hodnota	Poznámka
Vzdálenost	0-1200m	proměnná vzdálenost lodi a satelitu
Krok výpočtu	0.1m	krok změny vzdálenost při simulaci
Výška vlaku	4.1m	výška antény nad dnem koryta korydoru
Výška vysílače	$33\mathrm{m}$	výška vysíslače nad dnem korydoru
Výška horní hrany mostu	$12,\!36\mathrm{m}$	výška horní hrany mostu
Výška dolní hrany mostu	$10{,}41\mathrm{m}$	výška spodní hrany mostu
Vzdálenost horní hrany mostu	$450 \mathrm{m}$	vzdálenost horní hrany mostu od vysílače
Vzdálenost dolní hrany mostu	$500 \mathrm{m}$	vzdálenost spodní hrany mostu od vysílače
Šířka mostu	9,6m	ze vzdáleností horní a spodní hrany mostu
Činitel odrazu vody	-0,2	značeno $R_v$
Frekvence	930  MHz	
Počáteční intenzita elektrického pole	$5\mathrm{V/m}$	

Tabulka 5.1. Parametry vyhodnocovaného experimentu

[4]

# Kapitola **6** Závěrvěr

Cílem tohoto projektu je realizování simulace průběhu přijatého výkonu pohybujícího se přijímače nad vodní hladinou v korytu řeky s mostem. Simulace zahrnuje několik základních situací, které mohou pro uvažovaný objekt nastat. Použitým prostředím pro simulace je program MATLAB. Pro zjednodušení považujeme most za kvádr a uvažujeme u něj dvě dokonale ostré hrany na nichž dochází k difrakci signálu. Pro případ podjezdu lodi pod mostem uvažujeme v modelu pouze zastínění přímé viditelnosti.

Výsledky simulací odpovídají předpokladu zvětšujícího se kolísání signálu s každou přidanou cestou šíření. Vzhledem k tomu, že v reálném prostředí by byl satelit ve velké vzdálenosti nad zemským povrchem a ve výsledné přijaté úrovni signálu by mělo šíření difrakcí větší podíl (kvůli komplikovanější geometrii terénu) bylo by vhodnější použít spíše nižší frekvence v řádech jednotek GHz. Také z grafů vyplývá, že pro vícenásobné odrazy (nebo například difrakce a odraz) se již charakter křivky příliš nemění a cesty využívající pro šíření ještě další odrazy již pravděpodobně budou mít na křivku zanedbatelný vliv.

V navazující práci by bylo vhodné rozšířit množství uvažovaných cest šíření a ověřit, že pro mnohonásobné odrazy (více než trojnásobné) se již přijatý výkon bude měnit jen zanedbatelně. Dalším rozšířením je samozřejmě přidání dalších situací šíření signálu pro koryto a most. Také by bylo vhodné realizovat experiment a tím ověřit nasimulovaná data

## Literatura

- [1] S. Zvánovec P. Pechač. Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů.
- [2] A. Aragon-Zavala S.R. Saunders. Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems. 2007.
- [3] Mike Willis. Propagation tutorial: Diffraction. 2007. http://www.mike-willis.com/Tutorial/PF7.htm.
- [4] Perfecto Mari∎o Espi∎eira Fernando Pérez Fontán. Modelling the Wireless Propagation Channel. 2008.

# Příloha **A** Zadání



SoC • System on a chip