

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2009

Dušan Pavlovič

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Analýza vlivu vegetace na útlum šířícího se signálu
Dušan Pavlovič

Bakalářská práce

2009

Univerzita Pardubice
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektrotechniky
Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Dušan PAVLOVIČ**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**

Název tématu: **Analýza vlivu vegetace na útlum šířícího se signálu**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Přehled dosavadního řešení problematiky v české i zahraniční literatuře. Typy vegetačního útlumu a kvantitativní odhady. Posuzení útlumu ve vegetaci z hlediska šíření vln se zohledněním specifických pásem. Provedení a zhodnocení experimentu. Závěr pro použití v praxi.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Lédl: Kandidátská disertační práce, ČVUT, 2002 Dokumenty ITU-R

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Ondřej Fišer, CSc.
AV ČR, Ústav fyziky atmosféry

Datum zadání bakalářské práce: **15. ledna 2009**

Termín odevzdání bakalářské práce: **15. května 2009**



doc. Ing. Simeon Karamazov, Dr.

děkan



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2009

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 21. 7. 2009

Dušan Pavlovič

Poděkování:

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu této bakalářské práce doc. Ing. Ondřeji Fišerovi, Csc., za poskytnutí materiálů k bakalářské práci a vytvoření podmínek pro provedené měření. Dále panu Ing. Ph.D. Zdeňkovi Němcovi za zapůjčení přístroje pro měření a kamarádům Janu Jarošovi a Lubošovi Rejfkovi za pomoc při provedeném měření.

Anotace

V této bakalářské práci je hlavním předmětem zájmu útlum způsobený šířením signálu přes vegetativní překážku. V práci jsou představeny negativní vlivy vegetace na šířený signál a útlumové modely, kterými lze vypočítat útlum způsobený vegetací.

Dále práce obsahuje výsledky měření, které bylo provedeno pro porovnání útlumu při šíření signálu přes různé druhy vegetace běžně se vyskytující v našem klimatickém pásmu.

Klíčová slova

útlum vegetací; vegetační útlumový model; signálový únik

Abstract

In this bachelor work is the major subject of interest attenuation in vegetation. Negative effect of vegetation for signal propagation through vegetation and several attenuation models for calculation of excess attenuation from vegetation are presented in this work. Further work includes the results of measurements carried out to compare the attenuation when the signal is propagated through different types of trees commonly occurring in this vegetation zone.

Keywords

vegetation attenuation; attenuation model for loss due to vegetation; signal fading radiocommunication link

Obsah

1	Úvod.....	9
1.1	Důvody proč řešit útlum vegetací	10
2	Negativní vlivy vegetace na radiové šíření signál	11
2.1	Střední útlum.....	11
2.2	Dynamické účinky vegetace	12
2.3	Rozšíření svazku	14
2.4	Depolarizace dopadající vlny.....	14
3	Způsoby šíření skrz vegetaci z hlediska směřování průchodu signálu.....	15
4	Typy šíření signálů ve vegetaci.....	15
5	Řešení vlivu vegetace na útlum signálu	16
5.1	Difrakce.....	16
5.1.1	Výpočet nejvyšší zlomové složky	18
5.1.2	Výpočet boční zlomové složky	19
5.1.3	Výpočet složky odražené od země.....	20
5.2	Modely pro výpočet útlumu vegetací.....	21
5.2.1	Spoje s jedním terminálem v lesích	21
5.2.2	Modely pro překážku tvořenou jedním stromem	26
6	Vliv větru na útlum signálu šířeného přes vegetativní překážku.....	30
6.1	Podmínky pro vznik dynamického modelu útlumu vegetací.....	31
6.1.1	Krátkodobý útlum	31
6.1.2	Terénní měření	32
6.1.3	Laboratorní měření.....	33
6.2	Model útlumu vegetací v závislosti na rychlosti větru.....	34
7	Provedené měření.....	36
8	Závěr.....	41

Seznam obrázků

<i>Obrázek 1 - blokování přímé cesty signálu vegetací - (1)</i>	11
<i>Obrázek 2 - přijatý signál v čase - (1)</i>	13
<i>Obrázek 3 - ukázka geometrie řešení difrakce na ostrém břítku</i>	17
<i>Obrázek 4 - Geometrie nejvyšší zlomové složky - (5)</i>	19
<i>Obrázek 5 - geometrie bočních zlomových složek - (5)</i>	19
<i>Obrázek 6 - geometrie vlny odražené od země - (5)</i>	20
<i>Obrázek 7 - Porovnání naměřeného útlumu s výpočtem pomocí rozkladového modelu - (3)</i>	23
<i>Obrázek 8 - Frekvenční závislost specifického útlumu vegetací - (2)</i>	24
<i>Obrázek 9 - naměřená data a výpočet modelem maximálního útlumu (ITU-R) s různými parametry - (3)</i>	26
<i>Obrázek 10 - geometrie vegetační cesty - (2)</i>	29
<i>Obrázek 11- útlum v závislosti na vegetační hloubce pro různé kmitočty - (2)</i>	30
<i>Obrázek 12 - 3-D mříž (koule) - (1)</i>	35
<i>Obrázek 13 - sestavené měřicí pracoviště</i>	37
<i>Obrázek 14 - průměrný útlum v dB pro jednotlivé kmitočty</i>	38
<i>Obrázek 15 - útlum vegetací v závislosti na druhu vegetace a kmitočtu</i>	39
<i>Obrázek 16 - ukázka měřeného vzorku vegetace dubu červeného</i>	40
<i>Obrázek 17 - ukázka měřeného vzorku vegetace buku lesního</i>	40

Seznam tabulek

<i>Tabulka 1 - konstanty pro model maximálního útlumu - (3)</i>	25
<i>Tabulka 2 - konstantní hodnoty rovnice - (2)</i>	28
<i>Tabulka 3 - střední útlum v závislosti na rychlosti větru - (1)</i>	32
<i>Tabulka 4 - útlum vegetací v závislosti na druhu vegetace a kmitočtu</i>	39
<i>Tabulka 5 - útlum signálu šířeného přes javor horský pro různou hustotu překážky</i>	39

1 Úvod

Tato práce je zaměřena na negativní vliv vegetace na radiově šířený signál. Cílem práce je shrnout dosažené výsledky studií na toto téma a provedení experimentálního měření.

Znalost nežádoucích vlivů vznikajících při šíření signálů přes vegetativní překážku je velmi důležitá pro správné naplánování a navázání radiového spoje. V dnešní době je bezdrátové spojení neustále rozvíjeno a využívá se pro mnoho druhů spojů. Téma vegetativní překážky je velmi obsáhlé, protože obsahuje širokou škálu podmínek a typů zeleně. Z toho důvodu je obtížné vypracovat celkovou předpověď řešení radiového spojení.

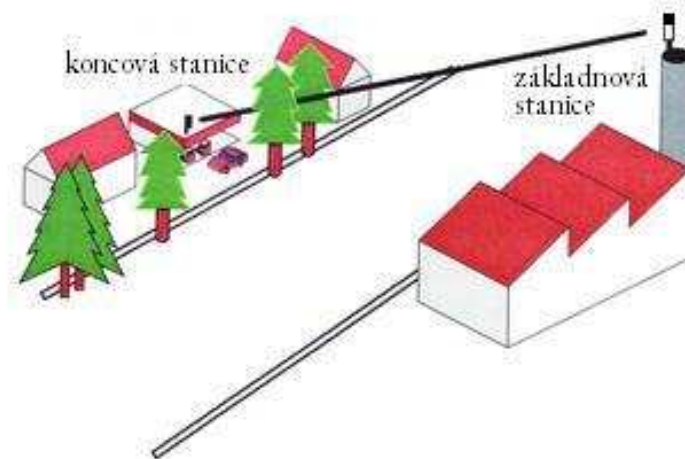
Na signál procházející skrz vegetativní překážku působí více negativních vlivů. Překážka tvořená vegetací způsobuje depolarizaci vlny. Mezi další nežádoucí vlivy vegetace na šířený signál patří úniky. Vegetativní překážka je nestatického charakteru, který se projevuje pohybem překážky ve větru. Pohyb způsobený větrem (rozměry listů srovnatelné s vlnovou délkou signálu) způsobuje značné úniky signálu. Za bezvětří převažuje v čase konstantní útlum.

V této práci bude představeno několik současných modelů pro výpočet útlumu vegetací. Modely jsou rozděleny podle toho, zda se jedná o jednotnou vegetativní překážku (les) nebo jediný strom. Dále jsou rozděleny podle kmitočtů, pro které jsou vhodné. Vliv větru na útlum signálu šířeného vegetativní překážkou je shrnut v samostatné kapitole. Je zde představen model pro výpočet útlumu vegetací zahrnující povětrnostní podmínky. V provedeném měření byl zkoumán útlum signálu průchodem přes vzorky deseti typů stromů běžně se objevujících v našem klimatickém pásmu.

1.1 Důvody proč řešit útlum vegetací

Bezdrátové spojení je revoluční pro osobní potřebu i telekomunikační služby s celkovým růstem v mobilních, pevných pozemních a satelitních komunikačních trzích. Zvýšení kapacity a širší širokopásmové systémy vyžadují po designérech, aby zvažili při vyšších kmitočtech a vyšších kmitočtových pásmech (např. při mikrovlnných a milimetrových frekvencích) vytváření vhodných technik a algoritmů pro posouzení a zmírnění následků degradace signálu šířením vln v kanálu. Větší počet uživatelů (zejména mobilní uživatelé) měl za následek síťové plánování pro zvýšení kapacity systému vyhledáním vysílací antény ve výšce nižší než okolní stromy a budovy [1].

Ztráty způsobené vegetační složkou obvykle nejsou zahrnuty v praxi, neboť je běžně vyžadována existence čisté dráhy spoje (v této práci bude jako spoj vždy uvažován radioreléový spoj s přímou dohledností). Nicméně není vzácný případ, že strom způsobí zablokování cesty k potenciálnímu zákazníkovi. Taková situace je znázorněna na obrázku 1. V [1] se uvádí, že běžná městská vegetace může způsobit ztlumení dráhy spoje a to dokonce pro 20 % potenciálních zákazníků. V oblasti zájmu je stále rostoucí problém, protože tendence moderního města je zvýšit počet stromů. Dále předpokládáme, že jediná stromová překážka bude blokovat významnou část těchto zákazníků. Toto pochází ze skutečnosti, že v dobře uspořádaných oblastech jsou vysázené stromy podél ulic a silnic. Je přirozené, že provozovatel bude rozhodovat také o zákaznících blokováných takovým typem překážky. Proto se zvyšuje požadavek na přesné a spolehlivé útlumové modely pro překážku tvořenou jedním stromem. Samozřejmě by měly být rovněž uvedeny jiné metody připojení těchto terminálů. Například zákazník může být připojen k jinému, překrývajícím pásmu s čistou dráhou spoje v tomto pásmu, ale pouze pokud takové pásmo existuje. Další možností by mohlo být použití opakovače a tím obejít blokování stromem. Toto řešení by mohlo být často obtížně realizovatelné, protože se často stromová překážka nachází velmi blízko anténě terminálové stanice, a to činí zastíněný prostor docela velký [1].



Obrázek 1 - blokování přímé cesty signálu vegetací – (1)

2 Negativní vlivy vegetace na radiově šíření signál

Obecně platí, že existuje několik vegetačních ztrátových účinků ovlivňujících obdržený signál a je třeba je vzít v úvahu. V této práci budou tyto vlivy shrnuty do čtyř bodů :

- střední útlum
- kolísání signálu vlivem vegetace (dynamické účinky)
- rozšíření svazku
- depolarizace dopadající vlny

2.1 Střední útlum

Střední útlum je průměrný útlum, pozorovaný přijímačem v časovém okně na daném rozmezí. Je snadné vzít v úvahu zavedení doplňkové složky vegetační ztráty do celkového výpočtu výkonu. Pro odhad středního útlumu vegetací je třeba zvážit několik závislostí, jako jsou frekvence, typ a hloubka vegetace. Dále je třeba vzít v úvahu cestu spoje (v této práci bude jako spoj vždy uvažován radioreléový spoj s přímou dohledností) ve vztahu k výšce stromu, zda je cesta blokována kmenovou nebo korunovou částí stromu. Dalším faktorem, který má vliv na střední útlum signá-

lu, je vegetační fáze stromu (pokud je strom s listy nebo bez listů). Tato problematika se řeší pomocí existujících útlumových modelů, kterými se budeme zabývat v dalších kapitolách.

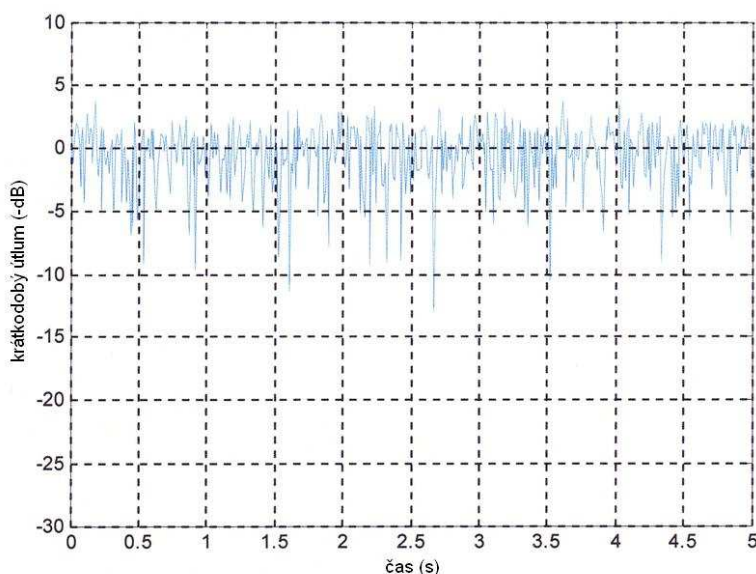
2.2 Dynamické účinky vegetace

Signálové odchylky způsobené vegetací vyjadřují okamžitý útlum způsobený stromem, který pozorujeme přijímačem. Strom není v reálném prostředí statický a vlivem starosti o životní prostředí se musíme smířit s tím, že se zeleň kymácí ve větru. To je pro radiově šířený signál nebezpečné, protože pohyb listů je srovnatelný s vlnovou délkou signálu a způsobuje značné úniky. Toto je základní charakteristika variace složek signálu, což je rychlá změna útlumu v čase. To je vidět na obrázku 2 pro typický příklad přijatého signálu v čase [1].

V dnešní době je často ve spojení s kvalitou použit termín Quality of Service (QoS). Z kvalitativního hlediska jsou nejnebezpečnější rychlé a hluboké úniky, protože způsobují výrazné zvýšení BER, což znamená, že i když se průměrný útlum vztahuje k výkonové rezervě, QoS není splněna.

Šíření elektromagnetické vlny je ovlivněno úniky a vícecestným šířením. Způsob, jak můžeme vytvořit obraz přijatého signálu, je následující: přijatý signál může být složen ze složky přímé cesty a velkého množství roztroušených složek odražených od listů. Kromě toho jsou fáze rozptýlených vln náhodné a nejlepší způsob jak zacházet s výsledným signálem je statistika. Pak je otázkou, jak vzít v úvahu kolísání signálu rádiové sítě při plánování např. PMP (point to multipoint) spojení. První možností by mohlo být zavedení několika dalších nadhodnocení výkonové rezervy, aby došlo ke splnění požadavků na QoS. Tento přístup by mohl být použit na PMP systémy pracující v nízkém kmitočtovém pásmu, kde je dostatečný prostor pro zvýšení výkonové rezervy. To znamená, že vysoce přesné hodnocení není nutné. Na druhou stranu pro systémy pracující ve vysokém kmitočtovém pásmu toto není možné, protože každá další, sice malá, výkonová rezerva způsobí výrazné zvýšení nákladů na vybavení. Je tedy žádoucí dostatečně přesné vyhodnocení nárůstu výkonové rezervy. Výsledná bezpečná rezerva ke kompenzaci kolísání signálu, která byla zavedena ve

výpočtu rozpočtu výkonu, by pak měla být rovna hodnotě zajištění, že přijatá úroveň signálu neklesne pod určitou mez za dané procento času (např. 99,9%).



Obrázek 2 - přijatý signál v čase – (1)

Více k tomuto tématu je možno najít v [1]. Pro problematiku kolísání signálu vlivem vegetace bylo zjištěno mnoho zajímavých výsledků z různých kampaní měření, v [1] se autoři odkazují na pár zajímavých jevů. Bylo prokázáno, že čím vyšší je pracovní frekvence, tím byly pozorovány hlubší signálové úniky. Je to proto, že pohyb listů je srovnatelný s vlnovou délkou signálu na vyšších frekvencích (v tomto případě 29 GHz).

- stromy se zelenými listy (v létě) produkují menší změny ve srovnání se stromy se žlutými dehydratovanými listy (na podzim).

- jehličnaté stromy při narušení větrem produkují pomalé úniky, zatímco opadavé stromy produkují rychlejší úniky.

- hloubka úniků kvůli stromům je menší než změny úrovně signálu v důsledku průjezdu vozidel.

2.3 Rozšíření svazku

Jak bude popsáno v další kapitole, mechanismus šíření je buď útlum nebo rozptyl v závislosti na hloubce vegetace. Když je velká hloubka vegetace, rozptylový způsob šíření převažuje nad útlumovým režimem. Experimentálně byla pozorována (provedením směru a výškového zobrazení přijímací antény na přijímač polohy) ztráta směrovosti. Ta se projeví útlumem spoje (rozšíření paprsku) s rostoucí hloubkou vegetace (k rozptylovému způsobu šíření elektromagnetických vln).

Samozřejmě se bude očekávat odlišné chování rozšíření svazku pro vegetační překážku s listy a bez listů. Byl pozorován následující směr: Pokud je stromová překážka s listy a signál je šířen skrz korunu, rozšíření paprsku jako funkce hloubky vegetace je vyšší, než je pro stromy bez listů. Materiál k této podkapitole byl čerpán z [1].

2.4 Depolarizace dopadající vlny

Depolarizace dopadající vlny způsobená šířením signálu skrz vegetaci je další jev, který je třeba vzít v úvahu při zakládání spojení v milimetrovém pásmu. Měření na 38 GHz popsané v [ITU-R] říká, že depolarizace prostřednictvím vegetace může být velká. Přijaté křížící se signály opačné polarity mohou být podobné signálům stejné polarity prošlými skrz vegetaci. Pro dostatečně velkou hloubku vegetace může být útlum tak velký, že obě složky signálu (se stejnou i opačnou polaritou) by mohly být pod dynamický rozsah přijímače. Poměr stejně polarizovaného obdrženého signálu k opačně polarizovanému obdrženému signálu by mohl být definován jako měřítko depolarizace. Při vyjádření v dB se poměr běžně nazývá jako rozlišení opačné polarizace XPO.

Dalším zdrojem depolarizace na milimetrových vlnových pásmech je déšť. Faktem je, že experimentální výsledky ukázaly, že diskriminace opačnou polarizací kvůli signálu šířenému skrz vegetaci je řádově větší než odpovídající hodnoty depolarizace deštěm. Experimentální výsledky pro jehličnaté a opadavé lesy udávají, že vážné poškození signálu depolarizací se projevila zejména u jehličnatých porostů. Podklady pro tuto kapitolu jsou čerpány z [1].

3 Způsoby šíření skrz vegetaci z hlediska směrování průchodu signálu

Pokud budeme uvažovat jako vegetativní překážku strom, můžeme rozdělit jeho stavbu na kmen, větve a listí (případně jehličí, pokud se jedná o jehličnatý strom). Dále je třeba vzít v úvahu roční období a s ním vegetační fázi stromu.

Útlum průchodem signálu stromy vzniká pohlcováním signálu listy, blokováním signálu kmeny a větvemi stromů. Absorpce listy je závislá na typu stromu, velikosti listů a obsahu vody v listech. Blokování kmeny je především závislé na jejich velikosti. Kromě útlumu přímého signálu stromy způsobují depolarizaci dopadající vlny. Útlum je také rozdílný v závislosti na typu polarizace vlny. Vlnová délka je na nižších kmitočtech srovnatelná s rozměrem překážky, tím pádem je vertikálně polarizovaná vlna více tlumená vzhledem k tvaru překážky, tedy vertikálně orientovaným kmenům stromů. Směrem k vyšším kmitočtům se vlnová délka snižuje a je mnohonásobně menší než šíře kmenů stromů. Z toho důvodu je útlum na vyšších kmitočtech srovnatelný nehledě na použitý typ polarizace. Tato problematika je dobře vidět v grafu na obrázku 8.

4 Typy šíření signálů ve vegetaci

Byl pozorován zajímavý směr vegetačních ztrát jako funkce hloubky v porostu [1]. Když se signál šíří skrz korunu stromu, míra útlumu je mnohem vyšší v případě malé vegetační hloubky (pouze s několika málo stromy na cestě), ve srovnání s útlumovou mírou pro velké vegetační hloubky (s mnoha stromy na cestě). To platí zejména pro stromy s listím. Tato tendence byla vysvětlena změnou typu šíření z velmi utlumené (pro pár stromů překázejících v přímé cestě signálu) na více-rozptýlený režim (pro velké vegetační hloubky, tam kde jsou na cestě všude stromy). Bylo předpokládáno, že bod změny šířícího režimu je přepnut z útlumové do rozptylové oblasti. U stromů s listy bod změny byl pozorován při třech stromech na cestě. Pro stromy bez listí ke změně dochází po asi osmi stromech. Důvodem je skutečnost, že stromy bez listí, drobné větvičky a větve absorbují a rozptylují elektromagnetické vlnění poměrně nízkou měrou, takže více rozptylový režim nastane až po několika stromech. Pokud jde o stromy s listím, je mnohem vyšší absorpce a rozptyl na jednotku objemu, tím pádem k přechodu na rozptylový režim dochází s méně stromy v

cestě, ale s mnohem vyššími ztrátami. V [1] se útlumová míra zvýšila až na 15-20 dB na strom pro první tři stromy s listím a po přechodu na rozptylový režim o 0.5-0,7 dB na strom pro fázi s listím.

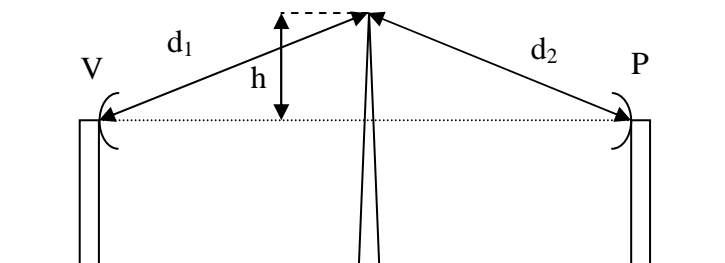
Pokud je přímá cesta signálu ovlivněna kmenovými částmi stromů, očekává se mnohem nižší útlum vegetací. Častěji však překážka prochází přes koruny stromů, ale není možné situaci blokování signálu kmeny stromů vynechat úplně, protože druhy terénu by mohly způsobit, že tato situace nastane. V [1] byla pozorována vyšší ztráta pro jeden strom než pro více stromů.

5 Řešení vlivu vegetace na útlum signálu

Pokud vegetace z hlediska vlnové délky zasahuje do 1. Fresnelovy zóny spoje, lze tento případ řešit pomocí teorie difrakce. Nabízí se řešení difrakce na ostré překážce. Pokud spoj překážkou přímo prochází, je nutno použít řešení pomocí modelů šíření dostupných v literatuře. Tyto modely vycházejí převážně z provedených experimentů.

5.1 Difrakce

Difrakce je označení pro ohyb vlny na překážce. Tento jev postihuje všechny vlny. Můžeme ho pozorovat ve vodě, na zvukových vlnách i rádiových vlnách. Řešení difrakce na překážce obecného tvaru a materiálových parametrů je velmi komplikovaná záležitost. V této práci bude představena pouze optická difrakce, někdy též nazývaná jako difrakce na ostrém břitu. Šíření vlny do oblasti optického stínu (za překážku) lze objasnit pomocí Huygensova principu. Na obrázku 3 je zobrazen princip difrakce na ostrém břitu. V je označení pro vysílač a P pro přijímač.



Obrázek 3 - ukázka geometrie řešení difrakce na ostrém břitu

Pokud je překážka níž než přímá spojnice mezi vysílačem a přijímačem, h (vzdálenost mezi vrcholem břitu a přímou spojnicí) je záporné. Úroveň zastínění přímé viditelnosti se vypočítá podle následujícího vztahu:

$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)} \quad (1.)$$

λ ...vlnová délka

d_1 ...vzdálenost mezi vysílačem a vrcholem překážky

d_2 ...vzdálenost mezi přijímačem a vrcholem překážky

Pro výpočet přídatných ztrát způsobených difrakcí na ostrém břitu jsou vhodné aproximativní vztahy, které nám udávají přídatné ztráty v dB v závislosti na parametru v udávajícím úroveň zastínění přímé spojnice mezi vysílačem a přijímačem.

Pro různé v lze vypočítat ztráty L_d [dB] podle následujících vztahů [4]:

$$\begin{aligned} v \geq 1 & & L_d &= 0 \\ 0 \leq v < 1 & & L_d &= 20 \log(0.5 + 0.62v) \\ -1 \leq v < 0 & & L_d &= 20 \log(0.5e^{0.95v}) \end{aligned} \quad (1.1.)$$

$$\begin{aligned}
 -2.4 \leq v < -1 & \quad L_d = 20 \log \left(0.4 - \sqrt{0.1184 - [0.1v + 0.38]^2} \right) \\
 v < -2.4 & \quad L_d = 20 \log \left(-\frac{0.225}{v} \right)
 \end{aligned}$$

Vztah doporučený ITU-R P.526, který platí pouze pro $v > -0,7$, je následující:

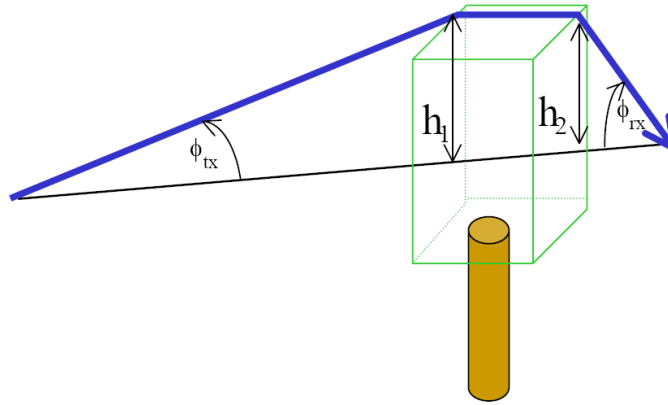
$$L_d = 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0.1)^2} + 1 + v - 0.1 \right) \quad (1.2.)$$

V [5] lze nalézt model pro útlum vegetací, který ve výpočtu celkových ztrát zahrnuje kromě ztrát způsobených šířením skrz vegetaci i různé ztráty způsobené difrakcí. V tomto modelu jsou řešeny 3 způsoby difrakce signálu způsobené stromem:

- nejvyšší zlomová složka
- boční difrakce
- difrakce odrazem od země

5.1.1 Výpočet nejvyšší zlomové složky

Zlomové (difrakční) ztráty, L_{top} , se kterými se setkaly zlomené signálové cesty skrz porost, lze popsat jako geometrický dvojitý izolovaný zlom na ostrém břitu. Geometrie zlomu je zobrazena na obrázku 4, kde Tx je vysílač a Rx je přijímač.



Obrázek 4 - Geometrie nejvyšší zlomové složky – (5)

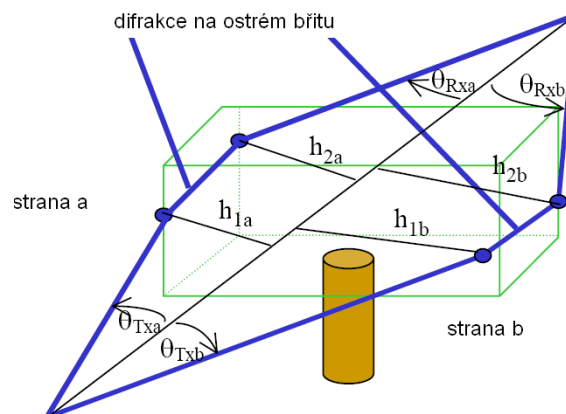
L_{top} [dB] se vypočítá [5]:

$$L_{top} = 6.9 + 20 \log\left(\sqrt{(v(h_1) - 0.1)^2 + 1} + v(h_1) - 0.1\right) + G_{TX}(\Phi_{TX}) + 6.9 + 20 \log\left(\sqrt{(v(h_2) - 0.1)^2 + 1} + v(h_2) - 0.1\right) + L_c + G_{RX}(\Phi_{RX}) \quad (2.1.)$$

V tomto vztahu $G_{TX}(\Phi_{TX})$ a $G_{RX}(\Phi_{RX})$ jsou ztráty způsobené úhly zlomených vln opouštějících vysílací anténu a pokračujících do přijímací antény. Ostatní části rovnice jsou zobrazeny na obrázku 4. Konstantu L_c autor neuvádí.

5.1.2 Výpočet boční zlomové složky

S difrakčními ztrátami L_a a L_b u signálu zlomeného kolem porostu může být zacházeno jako s geometrickým dvojitým izolovaným zlomem na ostrém břitu. Geometrie zlomu je zobrazena na obrázku 5, kde Tx je vysílač a Rx je přijímač.



Obrázek 5 - geometrie bočních zlomových složek – (5)

L_{top} [dB] se vypočítá [5]:

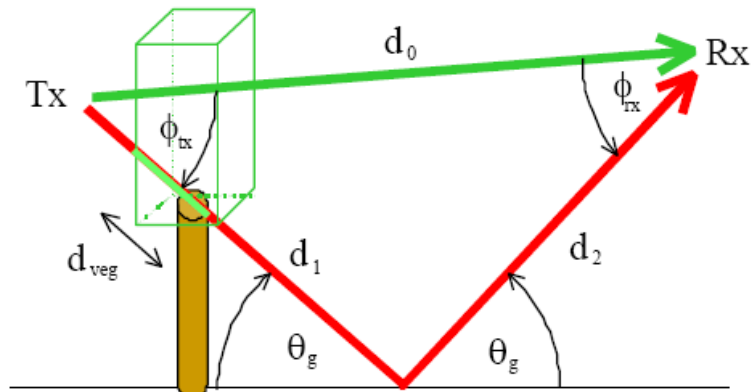
$$\begin{aligned}
 L_{top} = & 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v(h_{1a}) - 0.1)^2 + 1} + v(h_{1a}) - 0.1 \right) \\
 & + G_{TX}(\Phi_{TXa}) + 6.9 \\
 & + 20 \log \left(\sqrt{(v(h_{2a}) - 0.1)^2 + 1} + v(h_{2a}) - 0.1 \right) \\
 & + L_c + G_{RX}(\Phi_{RXa})
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

$$\begin{aligned}
 L_{top} = & 6.9 + 20 \log \left(\sqrt{(v(h_{1b}) - 0.1)^2 + 1} + v(h_{1b}) - 0.1 \right) \\
 & + G_{TX}(\Phi_{TXb}) + 6.9 \\
 & + 20 \log \left(\sqrt{(v(h_{2b}) - 0.1)^2 + 1} + v(h_{2b}) - 0.1 \right) \\
 & + L_c + G_{RX}(\Phi_{RXb})
 \end{aligned}$$

V tomto vztahu G_{TX} (Φ_{TXa} , Φ_{TXb}) a G_{RX} (Φ_{TXa} , Φ_{TXb}) jsou ztráty (pro strany a, b) vzhledem k úhlu se kterým zlomená vlna opouští vysílací anténu a vstupuje do přijímací antény. Ostatní části rovnice jsou zobrazeny na obrázku 5. Konstantu L_c autor neuvádí.

5.1.3 Výpočet složky odražené od země

Předpokládá se, že cesta je natolik krátká, že odražené vlny mohou být modelovány v geometrii podle obr. 6, kde Tx je vysílač a Rx je přijímač.



Obrázek 6 - geometrie vlny odražené od země – (5)

Ztráty zaznamenané v praxi odrazem vlny o zem na přijímači ovlivňuje reflektivní koeficient R_0 . Hodnoty pro permitivitu a vodivost jsou získávány z ITU-R Rec. 527-3.

Ztráty, zaznamenané v praxi odrazem od země, L_G [dB] jsou pak dány vztahem:

$$L_G = 20 \log_{10} \left(\frac{d_1 + d_2}{d_0} \right) - 20 \log_{10}(R_0) + G_{TX}(\phi_{TX}) + G_{RX}(\phi_{RX}) \quad (2.3.)$$

V tomto vztahu $G_{RX}(\alpha)$ a $G_{TX}(\beta)$ jsou ztráty způsobené úhly odražených vln opouštějících vysílací anténu a pokračujících do přijímací antény.

5.2 Modely pro výpočet útlumu vegetací

V literatuře existuje více modelů pro výpočet útlumu vegetací. V široké škále podmínek a typů zeleně je obtížné vypracovat celkovou předpověď řešení. K dispozici je také nedostatek vhodně utříděných experimentálních dat. Modely popsané v následujících odstavcích se vztahují jen na určitá frekvenční pásma a pro různě konfigurované typy cesty. Z výčtu několika typů existujících útlumových modelů mohou být rozděleny do tří základních kategorií:

- Empirické modely (založeny na zkušenostech)
- Semi-empirické modely
- Fyzikální modely

V této práci bude několik dostupných modelů uvedeno. Budou rozděleny podle kmitočtů, pro které jsou vhodné, a podle toho, zda se jedná o model pro útlum způsobený jednotnou vegetativní překážkou (například les) nebo jedním stromem.

5.2.1 Spoje s jedním terminálem v lesích

Exponenciální rozkladový model výkonu

Tato část byla zpracována z textu [3]. Exponenciální rozkladový model výkonu byl dříve používán podle doporučení ITU-R. Byl vyvinut z měření provedených

hlavně v pásmu UHF. Tento model představuje nadbytečný útlum A skrz vegetaci v decibelech:

$$A = 0.2f^{0.3}d^{0.6} \quad [\text{dB}] \quad (3.1.)$$

A ...útlum v dB

d ...hloubka vegetace (délka dráhy signálu ve vegetaci)

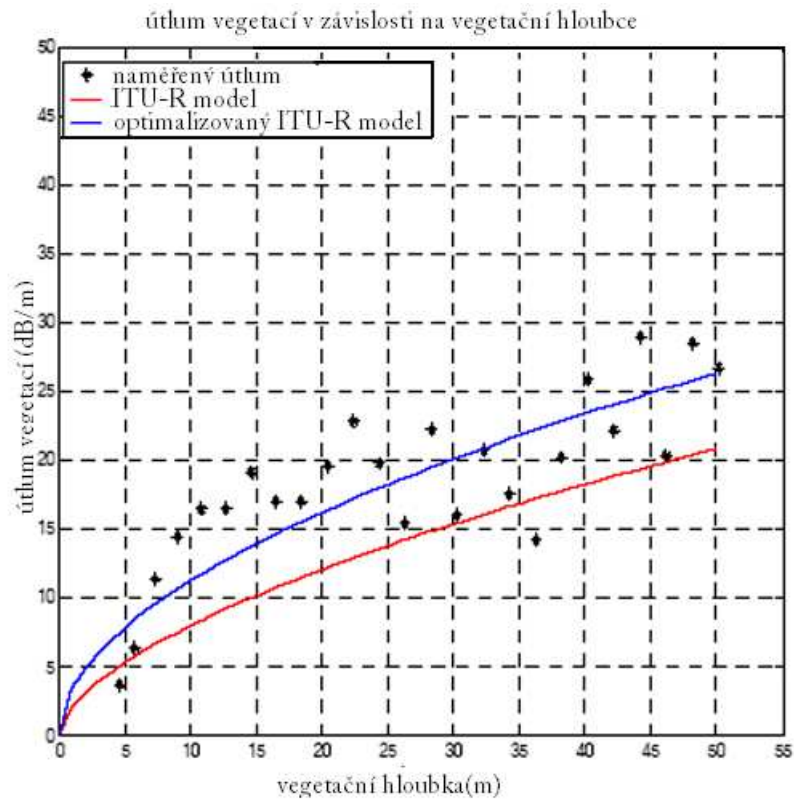
f ...frekvence v [MHz]

Funkce tohoto modelu byla ověřena v [3]. Měření proběhlo ve Spojených arabských emirátech průchodem signálu s kmitočtem 2,1 GHz přes jeden z nejčastějších místních typů stromů a to datlové palmy. Měření bylo provedeno v parku porostlém vegetací, který se nachází v oblasti Shahama, severně v městě Abu Dhabi (Spojené arabské emiráty). Tyto parky se skládají z bloků vegetace, každý blok je jako malá plocha jednoho druhu stromů. Pro provádění měření byla vybrána přímka datlových palm s velmi podobnými rozměry. Stromy byly stejně rozloženy ve vzdálenosti 8 m od sebe. Typická výška stromů je asi 7 m, se středem zeleně (koruny) ve výšce 2,5 až 3 m a s průměrnou korunou v horizontálním průměru cca 6 m. Průměrná šířka kmene se pohybuje kolem 60 až 70 cm v průměru, počet listů a vějířových listů a jejich dimenze na strom jsou podobné s průměry pro rozměry datlové palmy. Měření na 2112,4 MHz byla provedena v typických polopouštních podmínkách - lehké větry a polosuché počasí, průměrná venkovní teplota byla 35 až 38 °C [3]. Byla použita vertikálně polarizovaná, nemodulovaná spojitá vlna.

Splnění výše uvedeného modelu bylo vyšetřeno proti naměřeným datům získaných na místě (šířením signálu přes datlové palmy). Výpočet podává RMS chybu rovnu 5,97 dB mezi modelovým předpokladem a naměřenými údaji. Použitím nejmenších středních kvadratických metod se technika konstant výše uvedeného modelu, které jsou optimalizovány použitím 1,656 namísto 0,2 a 0,5332 místo 0,6, modifikovanému modelu dává RMS chybu rovnu 3,66 dB proti změřeným údajům.

Obrázek 7 ukazuje graf naměřených dat, rozkladový model a optimalizovaný rozkladový model. V [3] měly grafy na obrázku 7 a obrázku 9 na vertikální ose uvedenu

jednotku útlumu vegetací (dBm). S největší pravděpodobností došlo k chybě a jednotka měla být (dB/m) jak je uvedeno v této práci.



Obrázek 7 - Porovnání naměřeného útlumu s výpočtem pomocí rozkladového modelu - (3)

ITU-R model maximálního útlumu

Aktuálnější doporučený model od ITU-R uvádí, že útlum prostřednictvím vegetace A_{av} , v decibelech je uveden ve vztahu:

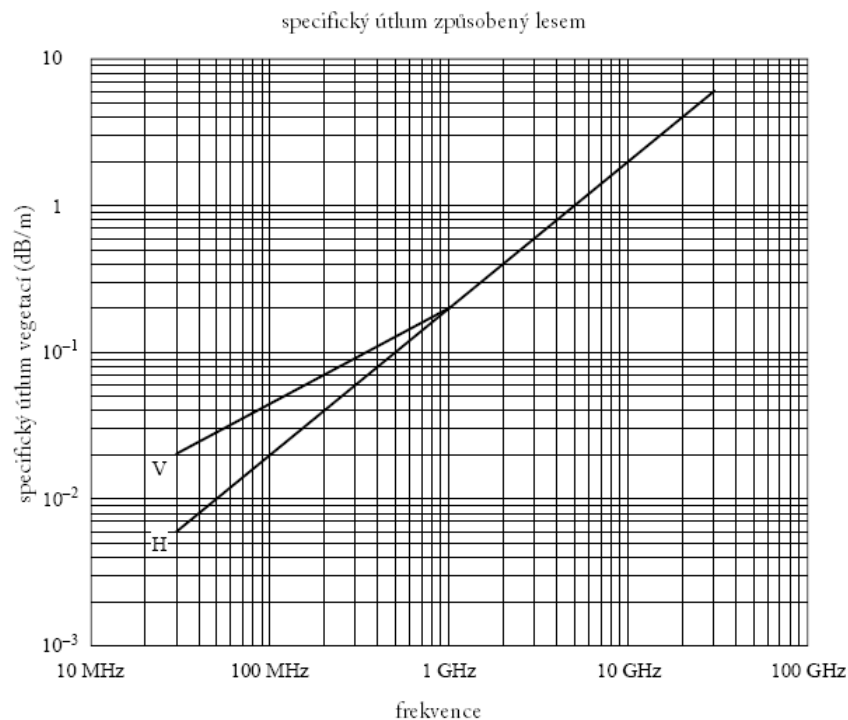
$$A_{av} = A_m [1 - e^{-(d\gamma/A_m)}] \text{ [dB]} \quad (3.2.1.)$$

A_m ...je maximální útlum pro jeden terminál uvnitř a konkrétní typ a hloubku vegetace [dB]

γ ... je útlum pro specifické velmi krátké cesty porostem [dB/m]

d ... je délka cesty do vegetace v metrech

A_m je závislý na druhu vegetace, hustotě vegetace a také typu antény ve vegetaci a svislou vzdáleností mezi anténou a horní částí vegetace. Hodnota specifického útlumu vegetací γ dB/m, záleží na druhu a hustotě vegetace. Přibližné hodnoty jsou uvedeny na obrázku 4 v závislosti na frekvenci. V označuje vertikální a H horizontální polarizaci. Obrázek 8 ukazuje typické hodnoty specifického útlumu odvozené z různých měření v kmitočtovém pásmu 30 MHz až 30 GHz v zalesněné oblasti [2]. Na nižším kmitočtu než je 1 GHz existuje tendence k vertikálnímu polarizování signálů. Ze zkušeností je známo, že je vyšší útlum než horizontální, což je způsobeno rozptylem od kmenů stromů.



Obrázek 8 - Frekvenční závislost specifického útlumu vegetací – (2)

Frekvenční závislost A_m (dB) má podobu:

$$A_m = A_1 f^\alpha \text{ [dB]} \quad (3.2.2.)$$

f ...frekvence

A_1 ...konstanta

α ...konstanta

Je třeba zdůraznit, že útlum se v důsledku porostu značně liší s ohledem na nezvyklou povahu tohoto média a širokou řadu druhů, hustotu a obsah vody získané

v praxi. Hodnoty zobrazené na obrázku 8 by měly být chápány pouze jako typické. Na kmitočtech v řádu 1 GHz se zdá být specifický útlum (dB/m) o 20 % vyšší přes stromy s listím než u bezlistých stromů. Jsou zde také pozorovány možné varianty útlumu v důsledku pohybu zeleně například kvůli větru [2].

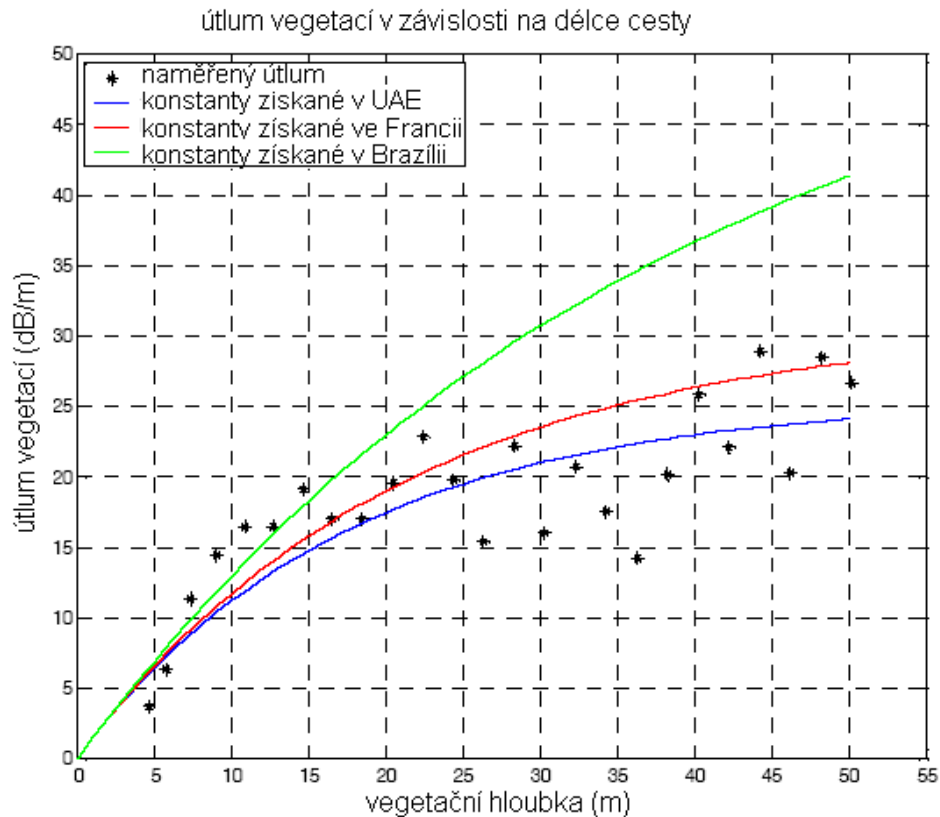
Měření v kmitočtovém pásmu 900-1800 MHz bylo provedeno v parku tropických stromů v Rio de Janerio (Brazílie), přinesly hodnoty konstant $A_1 = 0,18$ a $\alpha = 0,752$. Další měření s frekvenčním rozsahem 900-2200 MHz, prováděné v lese nedaleko Mulhouse (Francie), přinesly $A_1 = 1,15$ a $\alpha = 0,43$ [13].

V [3] byla opět ověřena funkce modelu v místních podmínkách průchodem signálu přes datlové palmy. Splnění modelu maximálního útlumu bylo vyšetřeno proti naměřeným datům získaným na místě. Bylo dokázáno, jak veliký vliv na útlumový model má vhodné zvolení konstant A_1 a α . Model v místních podmínkách vykazoval RMS chybu rovnu 10,6 dB proti naměřeným datům, když byly použity konstanty získané v Brazílii, a dával RMS chybu rovnu 4,37 dB proti naměřeným datům při použití konstant do modelu získaných ve Francii. V dalších analýzách založených na měření přes datlové palmy pro získání nejlepších údajů do vztahu pro maximální útlumový model byly použity konstantní hodnoty $A_1 = 1,08$ a $\alpha = 0,423$. Tabulka 1 ukazuje vyhodnocení maximálního útlumového modelu pomocí různých konstantních hodnot a odpovídající RMS chybu vůči naměřeným datům ve Spojených Arabských Emirátech.

Tabulka 1 - konstanty pro model maximálního útlumu - (3)

Místo měření	A_1	α	RMS chyba
Brazílie	0,18	0,752	10,60
Francie	1,15	0,43	4,37
Spojené arabské emiráty	1,08	0,423	3,59

Obrázek 9 ukazuje porovnání mezi naměřenými daty získanými ve Spojených arabských emirátech (UAE) proti datům získaným z modelu maximálního útlumu použitím konstant získaných v Brazílii, Francii a UAE.



Obrázek 9 - naměřená data a výpočet modelem maximálního útlumu (ITU-R) s různými parametry – (3)

5.2.2 Modely pro překážku tvořenou jedním stromem

Přibližný model pro kmitočty do 3GHz

Podklady k tomuto modelu jsou čerpány z [2]. Předchozí rovnice se nevztahují na rádiovou cestu překrytou jedinou vegetativní překážkou, kdy oba terminály jsou mimo vegetativní médium, jako je například cesta procházející korunou jediného stromu. V VHF a UHF pásmech, kde specifický útlum má relativně nízké hodnoty, a to zejména v případě, že vegetativní část rádiové cesty je poměrně krátká, tato situace může být modelována na základě přibližného vztahu, pokud jde o specifický útlum a maximální limit přesahující celkovou dosažitelnou ztrátu. Tato rovnice je vhodná pro kmitočty pod nebo rovné 3 GHz.

$$A_{et} = d \cdot \gamma \text{ [dB]} \quad (4.1.)$$

d... délka cesty v koruně stromu v metrech

γ ... specifický útlum pro velmi krátké vegetativní cesty (dB / m).

Je třeba zdůraznit, že rovnice a s ní spojený maximální limit pro Aet, jsou pouze přibližné. Obecně lze říci, že bude tendence přeceňovat nadměrné ztráty na vegetaci. Je to tedy velmi užitečné pro přibližné hodnocení dalších ztrát, když plánujete mít službu. Pokud se používá pro výpočet nežádoucího signálu, může značně podhodnotit výslednou interferenci.

Model pro kmitočty nad 3GHz

Útlum prostřednictvím vegetace je důležitý pro širokopásmové bezdrátové přístupové systémy. Tyto systémy jsou obvykle založeny na hvězdicové síti s dobře umístěným HUB-em (nebo základnovou stanicí) slouží mnoha uživatelům s anténou na střeše.

V mnoha případech budou signály zkresleny vegetací poblíž antény uživatele. Pro jednoduchost - HUB anténa (základnové stanice) bude uvedena jako vysílač a uživatel jako anténa přijímače.

Model pouze odhaduje šíření skrz vegetaci. Ověřený útlum bude minimálně na úrovni určené z následujícího modelu a ohyb signálu kolem vegetace může být odhadnut pomocí Doporučení ITU-R P.526, § 4.2.

Empirický model šíření skrz vegetaci byl vyvinut pro kmitočty nad 3 GHz. Model udává útlum skrz vegetaci v závislosti na její hloubce. Model byl odvozen z databáze naměřených dat v rozsahu kmitočtů 9.6-57.6 GHz, ale také přihlíží k místní geometrii z hlediska rozsahu osvětlení vegetace, definovanou šířkou osvětlení W (viz. obrázek 10).

$$A = \frac{R_{\infty}}{f^a W^b} d + \frac{k}{W^c} \left(1 - e^{\left(-\frac{(R_0 - R_{\infty}) W^c}{k} d \right)} \right) [\text{dB}] \quad (4.2.1.)$$

f...frekvence v [GHz]

W...šířka osvětlení vegetace

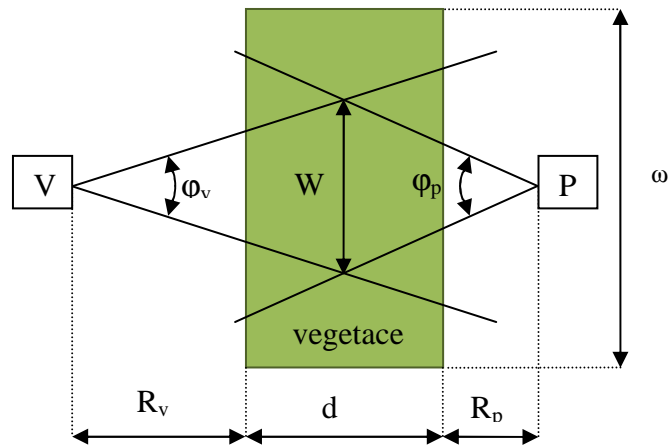
a...konstanta z tabulky 2

- b...konstanta z tabulky 2
- c...konstanta z tabulky 2
- k...konstanta z tabulky 2
- R_0 ...konstanta z tabulky 2
- R_∞ ...konstanta z tabulky 2

Tabulka 2 - konstantní hodnoty rovnice – (2)

<i>Konstantní hodnoty</i>	<i>s listím</i>	<i>bez listů</i>
a	0,7	0,64
b	0,81	0,43
c	0,37	0,97
k	68,8	114,7
R_0	16,7	6,59
R_∞	8,77	3,89

Po stránce geometrie je třeba zvážit, do jaké míry je osvětlena vegetace. To může být charakterizováno šířkou osvětlení, W (jak je ukázáno na obrázku 10). W je maximální horizontální rozsah šířky paprsku uvnitř vegetace společný pro vysílač a přijímač. Protože tento model je vhodný pro empiricky naměřená data, rovnice by měla být použita pouze v rámci těchto mezí pro W od jednoho do padesáti metrů. Předpokládá se, že vegetace vyplňuje vertikální rozměr mimo anténu přijímače, a proto vertikální rozměr není v současné době modelován.



Obrázek 10 - geometrie vegetační cesty – (2)

φ_p ...3 dB široký paprsek z antény přijímače do vysílače

w ...fyzická šířka porostu

d ... hloubka vegetace

R_v ...vzdálenost do vegetace od vysílače

R_p ...vzdálenost do vegetace od přijímače

ω ... fyzická šířka porostu

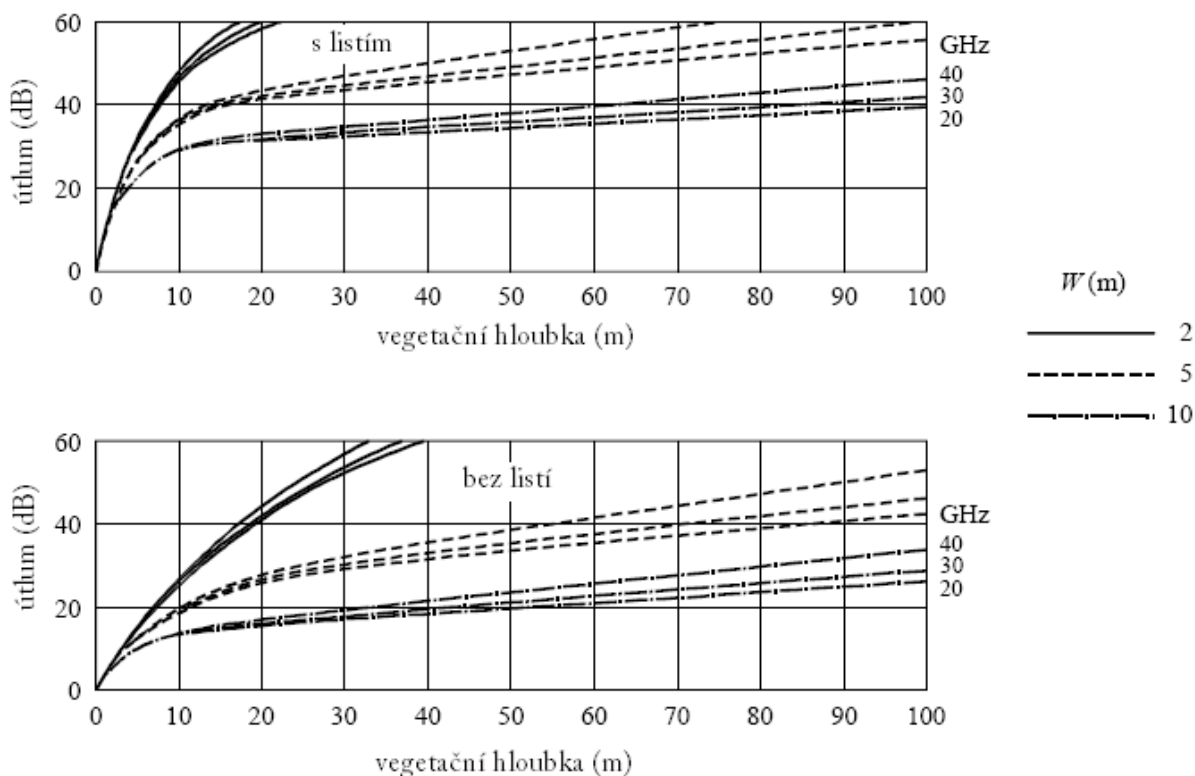
Předpokládá se, že přijímač je nejbližší k vegetaci. W je maximální efektivní šířka spoje mezi vysílačem a přijímačem antény, které leží ve vegetačním médiu (to je dáno největší změřenou hloubkou vegetace), definuje se [2]:

$$W = \min \left[\begin{array}{l} \frac{(R_v + d + R_p) * \tan(\varphi_v) * \tan(\varphi_p)}{\tan(\varphi_v) + \tan(\varphi_p)} \\ (R_v + d) * \tan(\varphi_v) \\ (R_p + d) * \tan(\varphi_p) \\ \omega \end{array} \right] \quad (4.2.2.)$$

V praxi $R_v \gg R_p$ a šířka paprsku z přijímače, φ_p očekává se, že je jen několik málo stupňů. Za těchto podmínek části rovnice obsahující R_p nebudou nutné.

Obrázek 4 ukazuje příklad modelu pro tři případy šířky vegetace W (lze vidět na obrázku 10) a tři frekvence 20, 30 a 40 GHz pro vegetaci s listím a bez listí. Tento model pro útlum skrz vegetaci jako funkce hloubky vegetace může být začleněn do deterministických modelů. Tento text byl vypracován z [2].

modelovaný útlum vegetací pro 20, 30 a 40 GHz pro parametry z tabulky 2.



Obrázek 11- útlum v závislosti na vegetační hloubce pro různé kmitočty – (2)

6 Vliv větru na útlum signálu šířeného přes vegetativní překážku

O vlivu větru na útlum signálu šířeného přes vegetaci již bylo řečeno v předchozí kapitole o negativním vlivu vegetace na radiově šířený signál. Tato problematika byla prošetřena v [1]. Vegetace je nestacionární překážkou a tím pádem při působení větru se pozice listí a větví v koruně stromu mění s časem. Vítr působící na strom způsobuje pomalé a rychlé úniky signálu. Ty jsou zapříčiněny pohybem listů, který je srovnatelný s vlnovou délkou signálu.

6.1 Podmínky pro vznik dynamického modelu útlumu vegetací

V [1] byl vytvořen nový dynamický model útlumu vegetací. Byl zde představen termín krátkodobý útlum vegetací. Dopady útlumu vegetací na provádění PMP systémů v milimetrovém vlnovém pásmu by mohly být rozděleny na dva způsoby: odhad středního útlumu nebo odhad krátkodobého útlumu. Obě cesty jsou nedílnou součástí procesu plánování. Je důležité si uvědomit, že krátkodobé součásti získávají velký význam pro budoucí PMP systémy v milimetrovém vlnovém pásmu, které poskytují vysokou kvalitu služeb pro koncového zákazníka v reálném čase. Tyto služby zejména vyžadují vysokou kvalitu signálu v místě příjmu a všechny, dokonce i krátkodobé snížení hodnot signálu jsou naprosto nežádoucí, protože mohou snadno knokautovat služby.

6.1.1 Krátkodobý útlum

Obdržený signál šířený přes strom ve vanoucím větru může vykazovat velmi vysoké změny. Rychlé změny obdrženého signálu v oblasti mobilních komunikací se nazývají krátkodobý únik, nebo rychlý únik. Jsou způsobeny především vícecestnými odrazy vysílané vlny, která trpí rozptyly od domů a dalších lidských konstrukcí, nebo přírodních překážek, jako jsou okolní lesy. V [1] byl vybrán jiný termín, ve srovnání s mobilní světovou komunikací, protože příčiny tohoto jevu nejsou přesně to samé. Musí být zvaženo, jak vícecestné šíření signálu, tak různé vlastnosti stromu v čase. Vzhledem k tomu, že strom je nestacionární a listí mění svůj postoj a prostorovou orientaci v čase, signálové charakteristiky (např. fázové změny, útlum) ovlivňující elektromagnetického pole se také mění.

V [1] byly vyšetřeny změny vlastností signálu způsobené elektromagnetickými vlnami šířenými přes strom, vystavený prostředí o různých rychlostech větru. Byly prošetřeny 3 druhy stromů, aby bylo pochopeno chování přijatého signálu s ohledem na nestacionární překážku blokující přijímací anténu. Vždy bylo předpokládáno, že se signál šíří pouze korunou stromu. Důvodem je, že obvykle koruna stromu stíní anténu terminálu a dodatečné dynamické efekty v přijatém signálu jsou vytvářeny nestacionární korunou stromu. Vlastnosti signálových úniků s ohledem na různé podmínky rychlosti větru byly vyšetřeny při vytváření různých rychlostí větru pro

každý z typů vegetace. Měření autor provedl přes tři druhy stromů, keř šípkové růže, borovici a jabloň. Bylo provedeno terénní měření a měření v laboratorních podmínkách.

6.1.2 Terénní měření

Při venkovním měření byly uvažovány dvě podmínky rychlosti větru a to silný vítr (simulovaný třepáním stromem s fixním lanem chyceným za kmen stromu) a bezvětří (nebyla použita žádná umělá simulace větru na překážce). Terénní měření byla pořízena ve městě Praha, Česká republika. Bylo použito Point-to-point spojení na 38 GHz. Všechny překážky byly měřeny s listím, jelikož v době provedení měření [1] nebyl v této oblasti žádný strom bez listí k dispozici. V tabulce 3 je zobrazen střední útlum pro jednotlivé typy stromu a podmínky větru změřený ve venkovním prostředí.

Tabulka 3 - střední útlum v závislosti na rychlosti větru – (1)

Typ stromu	Střední útlum (dB) bezvětří	Střední útlum (dB) silný vítr
Keř šípkové růže	8,57	11,67
Jabloň	17,36	17,76
Borovice	7,74	12,07

Střední útlum pro každý typ vegetace byl vypočítán stejně. Závěr z [1] je, že v případě bezvětří je střední útlum keře šípkové růže a borovice podobný, zatímco střední útlum jabloně je mnohem vyšší. To dobře odráží objemový rozměr překážky. Jabloň měla z překážek nejvyšší objem, zatímco keř šípkové růže a borovice byly mnohem menší. Tento hlavní princip je platný i pro případ silného větru, ale byl pozorován i další aspekt, střední útlum vykazuje značný nárůst u menších překážek při zvýšení rychlosti větru. Toto bylo zdůvodněno tím, že pokud vítr působí stejnou silou na menší překážku, tato vykazuje větší pohybové změny. Dále výsledky experimentu potvrdily vysokou korelaci mezi rychlostí větru a krátkodobým útlumem. Čím vyšší je rychlost větru, tím je vyšší standardní odchylka, stejně jako pravděpodobnost šíře výskytu zejména krátkodobého útlumu. Více informací o provedeném měření lze nalézt v [1], včetně podrobného popisu podmínek měření a výsledných grafů a diagramů.

6.1.3 Laboratorní měření

Při terénním měření [1] se autor setkával s problémem měnících se podmínek životního prostředí v průběhu experimentu terénní zkoušky. Bylo to významné zvláště při měření určitého typu vegetace při bezvětří. V tomto případě bylo velmi těžké podmínky dosáhnout, protože skutečné bezvětří lze získat například jen uvnitř budov. Pro tyto pokusy jsou laboratorní podmínky optimální cestou k dosažení takového prostředí. Cílem laboratorního experimentu bylo potvrdit vztah mezi rychlostí větru narážející na strom a vlastnostmi úniků přijatých signálů. Vzhledem k tomu, že se měření provádí uvnitř budovy, není ovlivněno náhodnými změnami turbulence vzduchu. Také byly měřeny různé druhy stromů za účelem sledování průběhu úniků signálu s ohledem na typ vegetace. Na přijímací anténu bylo upevněno 2-D skenovací zařízení, s možností měnit pozici přijímací antény ve vertikálním i horizontálním směru v rovině kolmé k šíření elektromagnetického pole. K simulaci větrného prostředí byl použit chladicí ventilátor s možností měnit otáčky ve čtyřech stupních. Poté byl rozptyl ze stromu za různých podmínek rychlost větru měřen.

Měření [1] bylo opět provedeno přes více typů vegetativních překážek. Byly měřeny jehličnaté stromy, listnaté stromy (letního období) a stromy bez listů. Pro každou překážku a rychlost stavu větru byla prováděna měření v několika pozicích nacházejících se na rastru, který měl rozměr $0,2 \text{ m}^2$ s krokem $0,05$ metru. To vedlo na celkem 25 měřících míst. Výsledky laboratorního experimentu také potvrdily existenci krátkodobého útlumového jevu a jeho vztah k rychlosti větru narážejícího do vegetace. Bylo také prokázáno, že nejvyšší změna středního útlumu, standardní odchylka krátkodobého útlumu, a pravděpodobnost krátkodobého útlumu byla u jehličnatých stromů [1]. Je třeba také zdůraznit, že to byla ve skutečnosti nejhustší překážka ze všech měřených stromů. Obecně lze říci, že by mohlo být uvedeno, že čím vyšší je hustota blokovacího porostu, tím vyšší je změna středního útlumu a standardní odchylky krátkodobého útlumu, stejně jako pravděpodobnost krátkodobého útlumu.

Mnohem více informací o laboratorním měření včetně grafů a naměřených hodnot je uvedeno v [1]. Autor obě měření provedl, aby mohl být vytvořen model útlumu vegetací beroucí v úvahu vliv větru na útlum a úniky signálu.

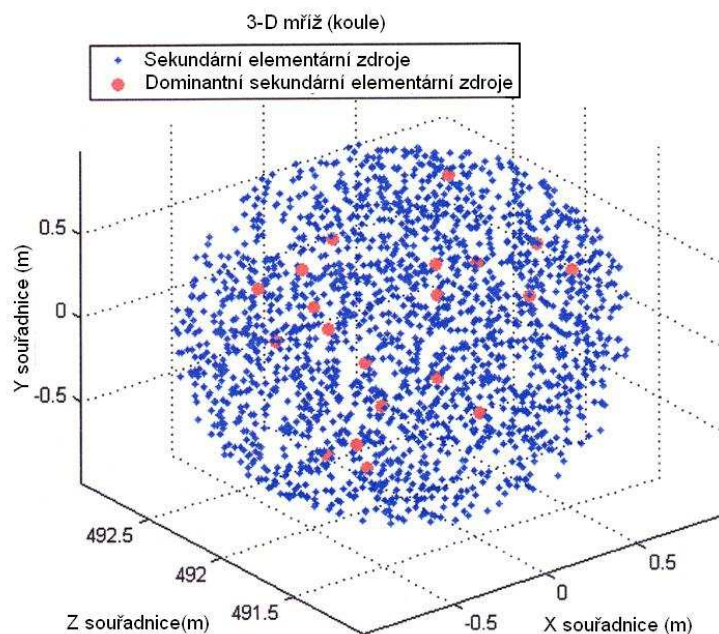
6.2 Model útlumu vegetací v závislosti na rychlosti větru

Byl vytvořen model, do kterého byly zahrnuty různé podmínky rychlosti větru [1]. Základní model vycházel z fotografie koruny stromu, který blokoval přímou cestu mezi základnovou stanicí a koncovou stanicí. Bod, ze kterého se odebíral obraz byl ve skutečnosti umístěním koncové antény. Aby mohlo být ilustrováno chování stromu osvětleného elektromagnetickým polem předpokládáme, že pracovní frekvence jsou přenášeny z milimetrových vlnových pásem pro oblast vlnových délek viditelného světla. Můžeme potom vidět, že strom má mnoho děr nechávajících světlo šířit skrz, a to bez jakéhokoliv útlumu. Máme také oblasti s nízkou hustotou listů, které umožňují šíření světla přes strom s menším útlumem a máme oblasti s vysokou hustotou listů, které umožňují šíření světla s vysokým útlumem nebo neumožňují šíření vůbec.

Obecně, a to bez ohledu na to, zda bychom předpokládali milimetrové nebo viditelné vlnové pásmo, užitím Huyghensova principu můžeme říci, že strom se skládá z mnoha zdrojů elektromagnetického pole. Amplitudy u těchto zdrojů se mohou lišit, což představuje buď díra ve stromu, nebo oblast listů. Pomocí softwarových úprav fotografie autor [1] zvýraznil hrany tučnou uzavřenou křivkou, které ve skutečnosti představují díry ve stromu. Tyto otvory jsou přepočteny na základní zdroje dále nazývané druhotné zdroje. Velikost kruhu představuje amplitudu pouze konkrétního zdroje (tj. kolik daný zdroj přispívá k celkovému přijatému signálu), a ne fyzickou velikost. Autor [1] pracoval s otvory stromu jen tak dalece, že soubor vytažených zdrojů by se ve skutečnosti skládal ze sekundárních zdrojů, což představují díry v koruně stromu.

Pro konstrukci modelu můžeme zdroje vyplnit na 2-D mřížku, tedy ovlivnění dopadajícího elektromagnetického pole by bylo reprezentováno 2-D mřížkou druhotných elementárních zdrojů, které neposkytují útlum a změny fáze s ohledem na dopadající vlnu. Vzhledem k tomu, že tyto zdroje nejsou dotčeny dopadající vlnou každým dalším útlumem, byly tyto zdroje nazvány "dominantní sekundární elementární zdroje". Aby byl model stromu kompletní, musíme také zvážit zdroje představující listy stromu. Jedná se ve skutečnosti o další sekundární elementární zdroje přispívající k celkovému přijatému signálu stejně. Samozřejmě tyto zdroje poskytnou další útlum a fázové změny vedlejší elektromagnetické pole. Proto budou dále nazvány

"sekundární elementární zdroje". Vzhledem k tomu, že listy mají určitou prostorovou pozici v koruně stromu, výsledkem bude 3-D mřížka. 3-D mřížka kruhového tvaru je zobrazena na obrázku 1. Dominantní sekundární elementární zdroje byly snadno vytvořeny náhodným výběrem existujících sekundární elementárních zdrojů a jejich přesunutím do roviny kolmé k šíření a přicházejících přes střed 3-D mřížky.



Obrázek 12 - 3-D mříž (koule) - (1)

Stromy, keře, nebo libovolný rostlinný objekt může být modelován jako 3-D mříž pomocí tohoto přístupu. V simulaci [1] byly zářící modely vždy všesměrové. Celkový přijatý signál v přijímaném bodě a v daném časovém okamžiku se vypočítává takto:

$$E_{celkový} = E_{přímý} + E_{rozptýlený} = \frac{E_v}{r} e^{-jkr} + \sum_i \frac{E_i \alpha_i}{d_i} e^{-j(kd_i + \varphi_{0i} + \varphi_{ri})} \quad (5.)$$

kde E_v představuje amplitudu vysílaného pole, r je vzdálenost mezi primárním zdrojem a přijímačem, E_i je amplituda pole vysílaného od i -tého sekundární elementárního zdroje, α_i je náhodný útlumový faktor i -tého sekundárního elementárního zdroje, d_i je vzdálenost mezi i -tým sekundárním elementárním zdrojem a přijímačem, φ_{0i} je

počáteční fáze i -tého sekundárního elementárního zdroje, φ_{ri} je náhodný prvek fáze i -tého sekundární elementárního zdroje, a k je vlnové číslo. Pro i -tý dominantní sekundární elementární zdroj, α_i se vždy rovná jedné a φ_{ri} je vždy rovna nule.

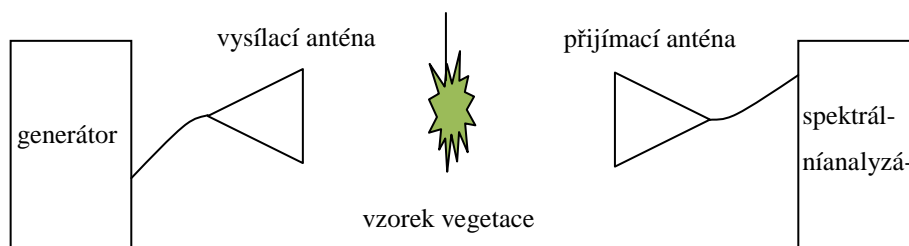
Náhodné fázové složky se používají pro modelování podmínky různé rychlosti větru podle určení fázového intervalu, ze kterého mohou náhodné fáze být vzaty v daném časovém intervalu. Jako příklad můžeme uvést, že pro konkrétní podmínky nízké rychlosti větru bychom umožnili náhodné fázové složky, které mají být odebrány z intervalu $\langle -\pi/8, \pi/8 \rangle$, a pro vysoké rychlosti stavu větru budou trvat náhodné fázové složky na intervalu $\langle -\pi/2, \pi/2 \rangle$. Dominantní zdroje jsou zavedeny jen pro podmínky bezvětří a nízké rychlosti větru. Pro vysoké rychlosti větru se dominantní zdroje nezobrazí z důvodu, že začínají ztrácet svoji prostorovou stabilitu. Mnohem více informací o modelu je uvedeno v [1]. Jsou zde provedena porovnání modelu s výsledky terénního měření. Tato práce také obsahuje výsledky různých měření závislosti tělesné velikosti 3-D mřížky, hustoty druhotných zdrojů v 3-D mřížce a tvaru 3-D mřížky.

7 Provedené měření

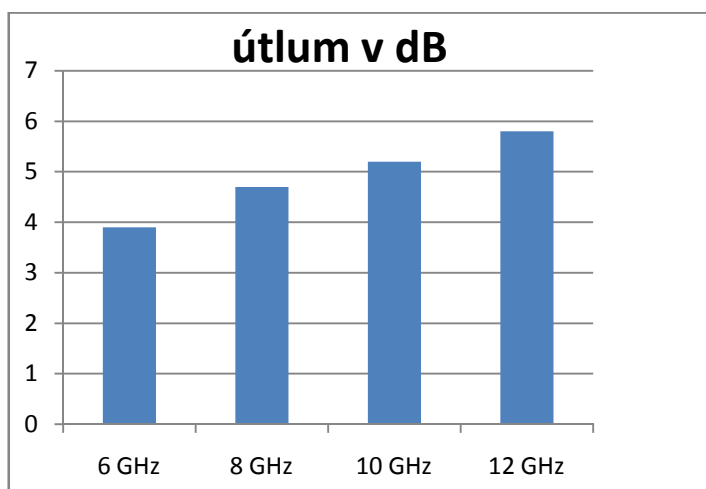
Při měření v rámci bakalářské práce byl měřen vliv zastínění přímé cesty vegetací na útlum signálu. Měření bylo provedeno v areálu VŠ Pardubice. Měli jsme k dispozici 10 vzorků vegetace, na kterých bylo měření provedeno - viz tabulka 4. V měření je obsaženo 8 listnatých stromů a 2 jehličnaté. Vzhledem k ročnímu období nebylo měření provedeno přes listnatý strom bez listů. Jako vysílač byl použit generátor HP, schopný pracovat s kmitočty 4-12 GHz a na přijímací straně byl použitý spektrální analyzátor HP, který byl schopný toto frekvenční pásmo změřit výkonově i frekvenčně. Vysílací i přijímací antény byly zvoleny trychtýřové. Ukázka zapojeného pracoviště je na obrázku 13. Kmitočty, při kterých bylo měření provedeno, jsou 6, 8, 10, 12GHz. Tyto kmitočty byly zvoleny dle dostupného generátoru a frekvenčního pásma, na kterém byly schopné pracovat trychtýřové antény použité při měření. Počasí bylo polojasné o teplotě cca 20 °C a bezvětří.

Útlum signálu přes vegetativní překážku je těžko popsateľný, jak již bylo dříve řečeno. Záleží na druhu vegetativní překážky, zda se jedná o jehličnatý, listnatý nebo

listnatý strom ve vegetativní fázi bez listů. Záleží též na velikosti listů nebo jehličí a množství vody v nich obsažené. Také bylo během našeho měření dokázáno, že velký vliv na útlum signálu má též hustota vegetace. Při měření průchodu signálu skrz vzorek Javoru horského o malé hustotě listů (běžný vzorek vegetace vzhledem k ostatním typům stromů obsažených v měření) bylo zvláště na kmitočtu 6 GHz znatelné zvýšení útlumu s hustotou vegetativní překážky. Toto měření bylo provedeno pouze na kmitočtech 6 GHz a 10 GHz. Při 6 GHz byl útlum pro malou hustotu překážky 5 dB a pro velkou 12 dB. Na kmitočtu 10 GHz nebyl už tento jev tak výrazný. Pro malou hustotu překážky byl útlum signálu 10 dB a velkou hustotu překážky 13,5 dB. Tyto výsledky měření provedené s proměnnou hustotou překážky jsou zobrazeny v tabulce 5. Dalším faktorem ovlivňujícím útlum signálu přes vegetativní překážku je rozměr listů. Celkově můžeme z dosaženého měření poznamenat, že se útlum zvyšoval s kmitočtem. To je patrné z grafu na obrázku 14, kde je zobrazen průměrný útlum přes vegetativní překážku pro každý kmitočet.



Obrázek 13 - sestavené měřicí pracoviště

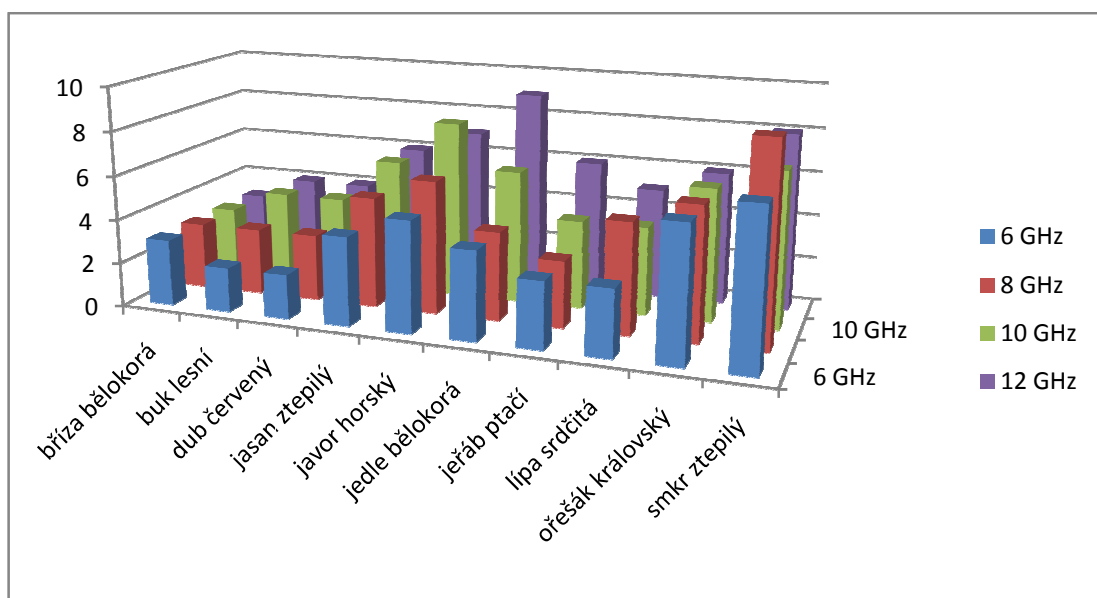


Obrázek 14 - průměrný útlum v dB pro jednotlivé kmitočty

Změřený útlum průchodem signálu o kmitočtu 6 GHz pro různé druhy stromů je zobrazen v tabulce 4. Nejvyšší útlum byl naměřen u smrku ztepilého. Pravděpodobně je to způsobeno tím, že vzorek smrku byl hustší než ostatní vzorky vegetací. Závislost hustoty vegetace na útlumu signálu je značná a byla ověřena měřením (viz tabulka 5). Při kmitočtu 8 GHz si můžeme všimnout, že se útlum u většiny druhů vegetace zvýšil. Nejvyšší útlum má opět překážka tvořená vzorkem smrku ztepilého. Na kmitočtu 10 GHz se překážkou způsobující nejvyšší útlum stal javor horský. V tabulce 4 je také vidět, že překážka tvořená břizou bělokorou a ořešákem královským v tomto rozmezí kmitočtů svůj útlum nemění. V grafu 1 jsou vyobrazeny všechny vegetativní překážky při všech kmitočtech. Na kmitočtu 12 GHz způsobuje nejvyšší útlum vzorek jedle bělokoré. Pro představu jsou na obrázcích 16 a 17 ukázány vzorky vegetačních překážek.

Tabulka 4 - útlum vegetací v závislosti na druhu vegetace a kmitočtu

útlum[dB]	f[GHz]	6GHz	8GHz	10GHz	12GHz
	bříza bělokorá		3	3	3
buk lesní		2	3	4	4
dub červený		2	3	4	4
jasan ztepilý		4	5	6	6
javor horský		5	6	8	7
jedle bělokorá		4	4	6	9
jeřáb ptačí		3	3	4	6
lípa srdčitá		3	5	4	5
ořešák královský		6	6	6	6
smrk ztepilý		7	9	7	8
průměrný útlum[dB]		3,9	4,7	5,2	5,8



Obrázek 15 - útlum vegetací v závislosti na druhu vegetace a kmitočtu

Tabulka 5 - útlum signálu šířeného přes javor horský pro různou hustotu překážky

javor horský	6 GHz	10 GHz	útlum[dB]
středně hustá překážka	5	8	
hustší překážka	12	13,5	



Obrázek 16 - ukázka měřeného vzorku vegetace dubu červeného



Obrázek 17 - ukázka měřeného vzorku vegetace buku lesního

8 Závěr

V této bakalářské práci byly celkově shrnuty účinky vegetace na šířený signál. Těchto negativních účinků je více a jsou popsány v kapitole 2. Důvody, proč řešit útlum vegetací, jsou zmíněny již v úvodu. Jedním z hlavních důvodů je potřeba přesného plánování pro posouzení a zmírnění následků kanálu.

Pokud je vegetační překážka umístěna tak, že zasahuje do první Fresnelovy zóny spoje, lze použít řešení difrakce na ostré překážce. Tento typ řešení je uveden v kapitole 5.

Další případ je, když šířený signál překážkou přímo prochází. Pro takový případ se pro určení útlumu vegetací používají modely. V této práci jsou modely rozděleny podle toho, zda je překážka tvořena souvislou vegetací (les) nebo jedním stromem. Modelů je v literatuře mnoho, ale mají četná omezení. Většina jich vychází z naměřených údajů útlumu, a proto se hodí např. pouze pro omezené rozmezí kmitočtů nebo omezené druhy vegetací a jejich vegetační fáze. Toto je řešeno pomocí konstantních hodnot, které jsou do vzorců dosazovány. Na obrázku 5 je vidět chyba výpočtu proti naměřeným údajům pro konstanty získané z různých míst měření. Pro přesné plánování útlumu vegetací je proto důležité experimentálním měřením upravit modely pomocí konstant, aby byly vhodné pro místní podmínky.

V této práci je též shrnut vliv větru na signál šíření přes vegetační překážku. Z pohledu šíření elektromagnetických vln jsou všechny překážky o velikosti srovnatelné s vlnovou délkou důležité - zejména v případě, že strom má listí nebo jehličí, které má velikost s vlnovou délkou srovnatelnou. Nestacionární charakter stromu způsobuje, že se vyskytují v přijatém signálu úniky. Čím silnější vítr naráží na strom, tím více robustními větvemi stromu pohybuje. V kapitole 6.2 je představen model pro útlum vegetací v závislosti na rychlosti větru.

Součástí bakalářské práce je měření. Byl měřen útlum průchodem vzorky vegetačních překážek běžně se vyskytujících v našich klimatických podmínkách. Celkem bylo v měření zahrnuto 10 stromů, 8 listnatých a dva jehličnaté. Měření proběhlo na čtyřech kmitočtech: 6, 8, 10, 12 GHz. Útlumy způsobené vzorky vegetačních překá-

žek se pohybují řádově v jednotkách dB. Vegetační překážky představovaly jednotlivé větve o podobných rozměrech (obrázek 16). Z dosaženého měření můžeme poznamenat, že se útlum zvyšoval s kmitočtem, jak je patrné z obrázku 14. Na kmitočtech 6 a 8 GHz způsobil nejvyšší útlum smrk ztepilý a to 7 a 9 dB. Na kmitočtu 10 GHz způsobil nevyšší útlum javor horský a pro kmitočet 12 GHz měla nejvyšší útlum překážka tvořená jedlí bělokorou. Na obrázku 15 je v grafu vyobrazen útlum pro všechny měřené druhy vegetací a všechny měřené kmitočty. Během měření byl ověřen velmi velký vliv hustoty překážky na útlum vegetací. Byl změřen průchod signálu vzorkem javoru horského střední hustoty a velké hustoty listů. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 5.

Seznam použité literatury

- [1] Lédl, P. (supervisor Pechač, P.): *Planning Issues for Point-to-Multipoint Systems Operating in Millimeter Waveband*. [PhD Thesis]. Prague: CTU, Faculty of Electrical Engineering, Department of Electromagnetic Field, 2004. 92 p.
- [2] ITU-R. *ATTENUATION IN VEGETATION : RECOMMENDATION ITU-R P.833-2*. [s.l.] : [s.n.], 1992-1994-1999. 6 s. Dostupný z WWW: <<http://www.antennerna.se/archive/ITU-R.833-2.pdf>>.
- [3] AL-BASHEIR, Mohammed S., SHUBAIR, Raed M., SAMI M., Sharif. *Measurements and Analysis for Signal Attenuation through Date Palm Trees at 2.1 GHz Frequency*. [s.l.] : [s.n.], 2004. s. 17-22.
- [4] PECHAČ, Pavel, ZVÁNOVEC, Stanislav. *Základy šíření vln pro plánování pozemních radiových spojů*. 1. vyd. Praha : BEN, 2007. 200 s. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [5] Radiocommunications Agency. *A Generic Model of 1-60 GHz Radio Propagation through Vegetation - Final Report*. [s.l.] : [s.n.], 2002. 134 s. Dostupný z WWW: <http://www.ofcom.org.uk/static/archive/ra/topics/research/topics/propagation/vegetation/vegetation-finalreportv1_0.pdf>.

Seznam zkratek

HUB	rozbočovač propojující uzly ve hvězdicové síťové topologii
PMP	(Point to Multipoint) – jde o jednosměrné spojení spojující jeden zdrojový uzel s více cílovými koncovými uzly
QoS	(Quality of Service) – kvalita služeb – koncové zařízení může požadovat specifickou kvalitu přenosu
RMS	(Root Mean Square) – statistická veličina vyjadřující míru odchylky dvou veličin, například vypočtené a naměřené hodnoty
UHF	(Ultra High Frequency) – ultra krátké vlny, jde o frekvence 0,3 - 3 GHz
VHF	(Very High Frequency) – velmi krátké vlny, jde o frekvence 30 - 300 MHz