

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická

**Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical
Engineering**

Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Vliv deště na stratosférické spoje

Influence of Rain on Stratospheric Links

Summary

Stratospheric communication systems could offer a possibility of a very fast and sufficient additional signal coverage, e.g. in the case of disasters, when existing networks collapse. High Altitude Platforms (HAP) are typical representatives of such wireless systems. Influence of rain on propagated electromagnetic waves belongs to the main factors considered in power margin planning of these systems. In the first part of the presentation, particular techniques of rain fade mitigation ranging from a route diversity of two links up to whole system performance will be presented. Next part is afterwards focused on the influence of atmospheric gases on stratospheric links. The applications of a Fabry–Perot resonator for specific measurements of atmospheric gases, i.e. absorption measurement and the methodology of emission measurement in the time domain, are discussed.

Souhrn

Za účelem dostatečného pokrytí určité oblasti signálem, zejména v případech řešení nouzových situací, se nabízí možnost využít vysílače umístěné v zemské stratosféře. Jeden z druhů těchto bezdrátových připojení mohou představovat platformy ve velkých výškách (HAP, *High Altitude Platform*). Velmi významným faktorem, který je nutno zahrnout do výkonové rezervy těchto spojů, je vliv deště. Z tohoto důvodu jsou představeny jednotlivé metody používané ke kompenzaci útlumu spojů v důsledku dešťových srážek, a to jak pro trasové diverzitní spoje v jednoduché konfiguraci dvou spojů, tak i pro celé systémy pokrývající rozsáhlá území. Dále je pojednáno o působení atmosférických plynů na přenosové trasy stratosférických systémů a jsou popsány možné způsoby specializovaných měření těchto atmosférických plynů prostřednictvím Fabry-Perotova rezonátoru, tj. absorpční měření a metodika měření emisivity plynů v časové oblasti.

Klíčová slova: Vliv deště, stratosférické spoje, HAP, trasová diverzita, milimetrové vlny, útlum plynem, spektroskopie

Keywords: Rain influence, stratospheric links, HAP, route diversity, millimeter waves, gas attenuation, spectroscopy

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Analýza vlivu deště na HAP systémy	6
2.1. Trasová diverzita v jednoduché konfiguraci	7
2.2. Analýza HAP systému jako celku	9
3. Útlum elmg. vln plynem u stratosférických systémů	12
3.1. Absorpční měření pomocí Fabry-Perotova rezonátoru .	13
3.2. Emisní měření pomocí Fabry-Perotova rezonátoru	14
3.3. Útlumové charakteristiky pro HAP systémy.....	16
4. Závěr	17
5. Použitá literatura	18
Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.....	20

1. Úvod

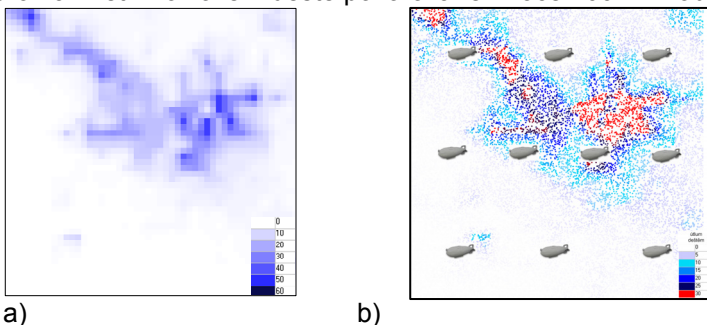
Stratosférické systémy, např. systémy z platform ve velkých výškách (HAP - *High Altitude Platform*), mohou představovat nový způsob bezdrátového připojení v oblastech málo dostupných pro vybudování klasických pevných sítí. Tyto systémy mohou být při využití např. heliem plněných vzducholodí či speciálních letadel umístěných ve stratosféře ve výškách 17 až 22 km nad zemským povrchem [1] rovněž využity jako alternativní řešení při nouzových situacích (tsunami, tajfun apod.). Mezinárodní telekomunikační unie (ITU) alokovala pro provoz HAP systémů pásma 31/28 GHz a 47/48 GHz [2]; testování možných vlivů na HAP systémy bylo realizováno v projektu CAPANINA [3]. Výzkumem problematiky šíření elmg. vln ve zmiňovaných pásmech se pak zabývají Centrum základního výzkumu (Centrum pro kvazioptické systémy a terahertzovou spektroskopii KVAŠTES) či COST 297 [4], na jejichž řešení se autor předkládané práce podílel a dosud podílí.

Práce je založena na vědeckých aktivitách autora, přičemž je přihlédnuto i k pedagogickým aspektům jejího dalšího využití. V první části je analyzován vliv dešťových srážek (v mikro i makro pojetí) na stratosférické spoje, a to jak pro jednoduché konfigurace diverzitních spojů, tak i pro celé systémy z platform ve velkých výškách. Druhá část pojednává o působení atmosférických plynů na přenosové trasy stratosférických systémů, přičemž je pojednáno o možných způsobech specializovaných měření těchto atmosférických plynů prostřednictvím Fabry-Perotova rezonátoru.

2. Analýza vlivu deště na HAP systémy

Útlum elektromagnetické vlny způsobený dešťovými srážkami je významným faktorem při určování dostupnosti (*availability*) rádiových spojů v milimetrových pásmech. Lze jej stanovit buď z četnosti a rozložení dešťových kapek jednotlivých velikostí v objemu a popisu interakce elmg. vlny s kapkou [5], nebo pomocí makroskopického přístupu vycházejícího z dlouhodobých statistik měření závislostí intenzit dešťových srážek a s tím souvisejících útlumů rádiových spojů [6]. Fyzická vrstva spojů s větší elevací (spojů se satelitem či HAP) je z hlediska vlivu dešťových srážek značně odlišná oproti pozemní komunikaci - ke vzniku srážek dochází v menších výškách (pro Evropu stanovena střední výška 3,36 km [7]) než jsou umístěny vysílače, takže je hydrometeory ovlivněna pouze část těchto spojů. Pro výpočet útlumu satelitního spoje jsou k dispozici statisticky

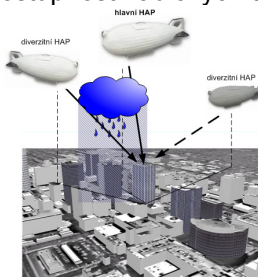
popsané modely používající pro celé území jednu hodnotu intenzity deště [8], takže není možná jejich aplikace u systémů rozprostřených na velkém území. Pro HAP systémy je nezbytné definovat nové, případně modifikovat stávající časově proměnné a prostorově vyjádřené intenzity deště a přiřadit ke statistikám deště novou klasifikaci prostorových vlastností. Ukázka simulace HAP systému [9] pro konkrétní rozložení deště pozorované v roce 2002 viz. obr. 1.



Obr. 1 Plošné rozložení a) intenzity deště v mm/h; b) útlumu deštěm v dB pro spoje mezi HAP stanicemi a pozemními uživateli na frekvenci 48 GHz [9]

2.1. Trasová diverzita v jednoduché konfiguraci

U systému skládajícího se z více HAP stanic lze při trasové diverzitě (*site/route diversity* viz. obr. 2) vycházet z nerovnoměrného rozložení intenzity deště a tudíž při využití rozdílných časových průběhů úniků signálu zvýšit úroveň dostupnosti rádiových spojů.



Obr. 2 Princip trasové diverzity u HAP spojů

Problematikou diverzity (trasové diverzity) pro pozemní spoje se zabývá doporučení ITU-R P.1410 [10], které definuje tzv. diverzitní zisk jako změnu v rezervě na únik vlivem deště pro dané procento času při použití druhého spoje. V [11] byl odvozen empirický model pro diverzitu u pozemních spojů ovlivněných deštěm. Pro satelitní

spoje je pak používán postup dle ITU-R P. 618 [8]. Diverzitní zisk G_{div} v [dB] je zde definován součinem parametrů závislých na prostorové a úhlové separaci (G_d , G_ψ), frekvenci (G_f) a elevaci G_θ .

Pro určení diverzitního zisku u HAP systémů byly podrobně analyzovány výše zmiňované metody. Z výsledků provedených simulací (pro dešťové události z let 2002-2005) vyplývá, že výhoda využití diverzitního zisku je zřejmá zejména u spojů s požadovanou velmi vysokou spolehlivostí, tj. 99,99% a více. Vzhledem k tomu, že parametry dle [8] jsou určeny na základě měření realizovaných v jiné geografické oblasti, bylo nezbytné optimalizovat tento model též pro Českou republiku. Parametry byly odvozovány pro případ HAP systému pracujícího na frekvenci 48 GHz, tj. pro $G_f = 0,3$. V případě HAP spojů se ukázala podstatně odlišná závislost parametru G_d , a to jak na vzdálenosti mezi jednotlivými uživateli, tak i na velikosti útlumu hlavního spoje vlivem deště - pro velké útlumy vzrůstal rozptyl diverzitních zisků. Toto bylo zohledněno při následném procesu optimalizace, kdy byl výsledný model váhován menšími hodnotami diverzitního zisku. Prostřednictvím genetického algoritmu s korekcí upravující statistiku výskytu dané hodnoty diverzitního zisku, kdy v 99,99% času není daná hodnota překročena, byla odvozena závislost parametru diverzitního zisku na vzdálenosti d a útlumu hlavního spoje A ve tvaru [12]

$$G_d = 1,65A \cdot (1 - e^{-2,61d}). \quad (2.1)$$

Dále byl nastavován stejný poměr vzdáleností hlavního i diverzitního spoje v rozsahu od 2 do 20 km s krokem 2 km a na základě simulací byla odvozena závislost diverzitního zisku na úhlové separaci, přičemž bylo nutné diverzitní zisk normovat G_d . Optimalizovaný vztah závislosti G_ψ na úhlové separaci ψ (ve stupních) je dán [12]

$$G_\psi = 1 + 0,0164\psi. \quad (2.2)$$

V následné fázi byl odvozen parametr G_θ závislý na elevaci θ (ve stupních) hlavního spoje k HAP stanici [12]

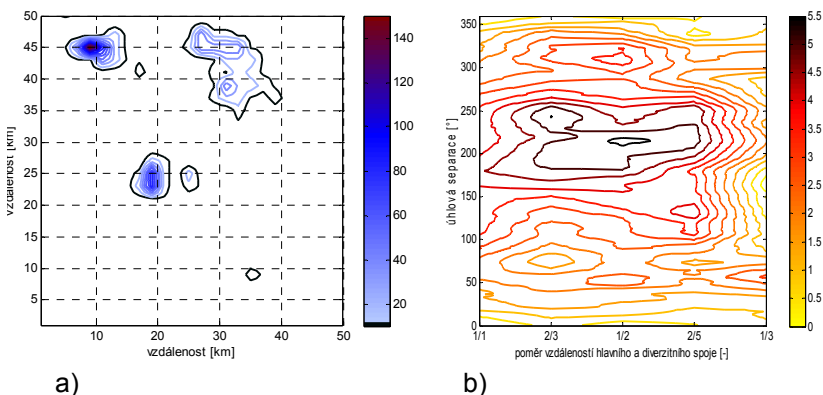
$$G_\theta = 1 + 0,0032\theta. \quad (2.3)$$

Rozdíly nově odvozeného modelu [12] oproti [8] jsou markantní zejména u závislostí diverzitního zisku na vzdálenostech mezi uživateli a na útlumu u hlavního spoje vlivem deště. V současné době neexistuje doporučení ITU zaměřené na vliv deště u HAP

systemů, a proto odvozený model (pozn. model sice vychází z konkrétních dat, avšak daná metodika je univerzální pro jakékoliv území) poskytuje cenné zázemí pro plánování diverzitních HAP spojů a stratosférických spojů v rámci České republiky.

2.2. Analýza HAP systému jako celku

Odišné přenosové charakteristiky oproti dvojici spojů (obr. 2) lze pozorovat při analýze HAP systému jako celku pokrývajícího konkrétní území, a to s ohledem na časový i prostorový vliv dešťových událostí. Za tímto účelem byly provedeny studie mechanismu výběru diverzitních spojů v daném systému (parametry HAP dle [3]). Vyhodnocovány byly jak samostatné spoje k základnové stanici, tak též dvojice hlavního spoje s diverzitním spojem vybraným na základě nejkratší trasy nebo největší úhlové separace. Zatímco u pozemních spojů byly ve většině případů pozorovány vyšší diverzitní zisky u diverzitních spojů vybraných na základě nejmenší vzdálenosti [13], u HAP spojů již tomu tak nebylo. Z výsledků provedených analýz [14] oproti pozemním spojům vyplývá, že až v 44,6 % času přinese využití diverzitního spoje s největší možnou úhlovou separací větší diverzitní zisk než využití diverzitního spoje s nejkratší trasou (pozn. v 37,6 % jsou tyto mechanismy téměř stejně úspěšné a pouze v 17,8 % převažují případy s výběrem nejkratšího diverzitního spoje).

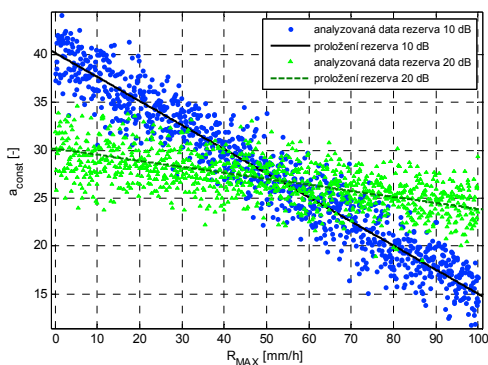


Obr. 3 a) prostorové rozložení intenzity deště v [mm/h]; b) porovnání pravděpodobnosti snížení výpadků HAP systému s pozemním systémem v % [14]

Na základě zmiňovaných výsledků byla provedena analýza vlivu deště na celý HAP systém za použití pravděpodobnosti snížení

výpadků signálu v systému [13] definované jako poměr úspěšně nastavených diverzitních spojů a celkového počtu spojení mezi uživatelem a nejbližší základnovou stanicí vypadlých vlivem deště. Porovnání pravděpodobnosti snížení výpadků pro HAP systém a pro pozemní systém je ilustrováno na obr. 3 (pro 48 GHz a horizontální polarizaci). V HAP systému byla sledována výrazně vyšší pravděpodobnost snížení výpadků spojů než u pozemního systému (rozdíl až o 5,5 %). Z analýzy časových změn vyplývá, že uplatnění trasové diverzity je u HAP systému velmi přínosné zejména pro úhlové separace mezi 30° a 330° - pro menší separace již dosahuje diverzitní zisk velmi nízkých hodnot.

V [13] byla pro pozemní systémy odvozena metodika klasifikace dešťových srážek. Dešťová srážka byla charakterizována maximální intenzitou deště na daném území a tzv. prostorovým parametrem deště. Jedním ze stěžejních úkolů bylo analyzovat možnost aplikace prostorového parametru deště i pro HAP systémy. Z uvedeného důvodu byl u HAP systémů proveden výpočet pravděpodobnosti snížení výpadků signálu vlivem trasové diverzity pro každou z dešťových událostí z období let 2002–2005 [15]. Analýza byla prováděna na kmitočtu 48 GHz s kruhovou polarizací elmg. vlny [3] pro rezervy na únik signálu deštěm nastavené shodně v celém systému, přičemž byla testována i závislost na velikosti této rezervy (v rozsahu od 5 do 30 dB). Ze simulací HAP systémů byly odvozeny prostřednictvím genetického algoritmu velikosti parametrů a_{const} , b_{const} a c_{const} [15]. Bylo zjištěno, že závislost parametru a_{const} na maximální intenzitě deště R_{MAX} na daném území a rezervě na únik signálu deštěm P_{MARG} (viz obr. 4) již nelze formulovat jako v [13].



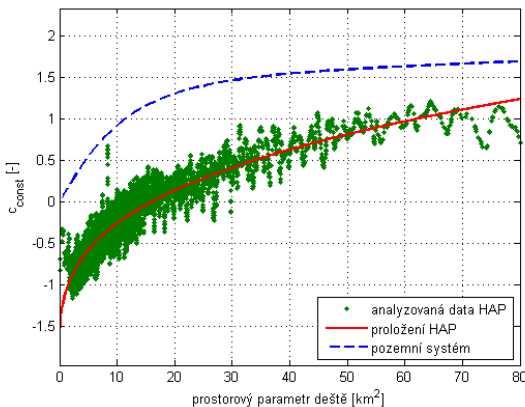
Obr. 4 Závislost parametru a_{const} na maximální intenzitě deště na daném území pro rezervy na únik signálu deštěm 10 dB a 20 dB [15]

Oproti pozemním systémům byla u HAP systémů zaznamenána nižší závislost pravděpodobnosti snížení výpadků signálu na maximální intenzitě deště na daném území [15] (zejména pak pro uživatele s obdobnými délkami hlavního a diverzifikačního spoje), tj. zhruba třetinové hodnoty konstanty a_{const} oproti hodnotám odvozeným pro pozemní systémy v [13]. Sklon závislosti parametru a_{const} pro různé rezervy na únik signálu vlivem deště (viz. obr. 4) musel být popsán novou funkcí, kdy velikost rezervy parametrizuje směrnici závislosti koeficientu a_{const} na maximální intenzitě deště dle vztahu [15]

$$a_{const} = a_1 + \frac{1}{a_1} \cdot P_{MARG} R_{MAX} + a_2 R_{MAX} - P_{MARG} \quad (2.4)$$

Z výsledků simulací byly pomocí optimalizace získány parametry $a_1 = 50,16$ a $a_2 = -0,454$.

Porovnání závislostí c_{const} na prostorovém parametru deště pro HAP systémy a pro pozemní systémy je znázorněno na obr. 5.



Obr. 5 Porovnání závislostí c_{const} na prostorovém parametru deště odvozených pro HAP systémy a pro pozemní systémy [15]

Oproti závislosti platné pro pozemní systémy [13] byla v případě HAP systémů odvozena výsledná závislost parametru c_{const} na prostorovém parametru deště S v km^2 ve tvaru [15]

$$c_{const} = (c_2 \cdot S)^{c_1} - c_2^{-1}, \quad (2.5)$$

kde $c_1 = 0,309$ a $c_2 = 0,520$. Hodnota parametru c_{const} v případě HAP systémů nabývá jak záporných, tak i kladných hodnot; v případě

pozemních systémů je však c_{const} vždy kladná. U obou systémů představuje parametr c_{const} mocninu poměru vzdáleností hlavního a diverzitního spoje ($d_{hlavní}/d_{div}$). Se zvyšujícím se prostorovým parametrem deště se pro konstantní poměr vzdáleností zvyšuje i c_{const} a současně se snižuje pravděpodobnost snížení výpadků v systému.

Rozdíl mezi použitím trasové diverzity u obou systémů je markantní při změně poměru $d_{hlavní}/d_{div}$. U pozemních systémů při konstantní délce hlavního spoje a zvyšující se délce diverzitního spoje klesá pravděpodobnost snížení výpadků v systému. Vedle toho u HAP systémů a dešťových rozložení popsaných $S < 15,8 \text{ km}^2$ je tomu naopak ($c_{const} < 0$). Tento rozdíl lze vysvětlit konfigurací tras, kdy u pozemních systémů je převážná část spoje ovlivňována dešťovou událostí a další prodlužování diverzitní trasy již má na diverzitní zisk velmi malý efekt, zatímco u HAP systémů jsou ovlivňovány pouze části spoje pod úrovní deště.

Další parametr je dle [13] závislý na parametru c_{const} . Pro HAP systémy je možné zmiňovanou závislost vyjádřit lineární funkcí [15]

$$b_{const} = b_1 \cdot c_{const} + b_2, \quad (2.6)$$

kde $b_1 = 0,283$ a $b_2 = \pi/16$ byly stanoveny na základě optimalizací provedených prostřednictvím genetického algoritmu.

Výsledný vztah pro pravděpodobnost snížení výpadků v HAP systému pomocí trasové diverzity lze popsat výrazem [15]

$$P = a_{const} \cdot \left(1 - \left(\frac{\vartheta - \pi}{\pi - \left(\frac{\pi + 4,5 \cdot c_{const}}{16} \right) \sqrt{1 - \frac{d_{hlavní}}{d_{div}}}} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{d_{hlavní}}{d_{div}} \right)^{c_{const}} \quad (2.7)$$

kde ϑ [rad] je úhlová separace. Metodika hodnocení prostorových závislostí dešťových srážek používaná u pozemních systémů je tedy uplatnitelná i u HAP systémů. Vzhledem k rozdílnému charakteru obou služeb jsou však závislosti na parametrech deště a nastavené rezervě na únik signálu vlivem deště značně odlišné.

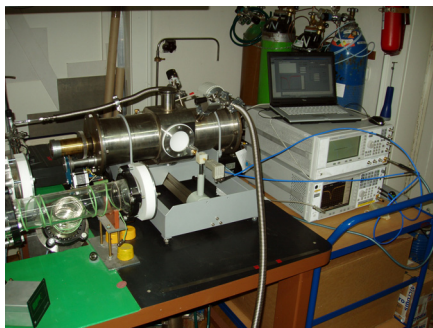
3. Útlum elmg. vln plynem u stratosférických systémů

Bezdrátové komunikační systémy jsou v milimetrových pásmech výrazně ovlivňovány též interakcí s atmosférou Země, zejména pak

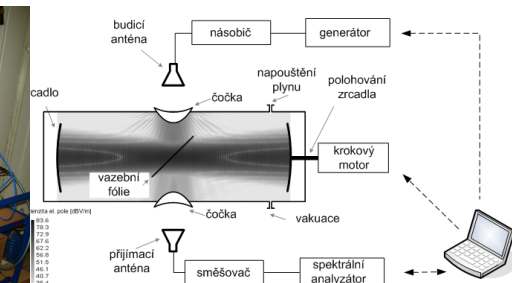
rezonanční absorpcí molekul plynů způsobenou vlivem elektrických či magnetických dipólových momentů molekul. Tato absorpce je vyjádřena absorpčním spektrem, které na daných frekvencích představují jednotlivé spektrální čáry frekvenčně vymezující přechody mezi konkrétními stabilními energetickými stavy molekuly [16]. Nejvýraznější útlum způsobují molekuly plynného kyslíku a vodní páry [19]. Kyslík vlivem magnetického dipólového momentu molekuly vykazuje řadu spektrálních čar v pásmu 50 až 70 GHz a spektrální čáru na 118,7 GHz. Rezonance vodní páry (elektrický dipólový moment) leží na 22,2 GHz, 183,3 GHz, 325,1 GHz a 380,1 GHz. Pro výpočet útlumu elm. vln atmosférickými plyny jsou používány např. modely [17] či ITU-R P.676 [18].

3.1. Absorpční měření pomocí Fabry-Perotova rezonátoru

V rámci Centra KVAŠTES byla na Katedře elektromagnetického pole FEL ČVUT v Praze vyvinuta metodika měření absorpce elm. vln atmosférickými plyny [20] (měřicí sestava a uspořádání absorpčního měření s ukázkou rozložení intenzity elektrického pole; viz. obr. 6). Stěžejní částí měřicího systému je Fabry-Perotův (FP) rezonátor složený z válcové ocelové dutiny s dvěma téměř konfokálně umístěnými sférickými pozlacenými zrcadly (za účelem splnění podmínky stability rezonátoru). Jedno ze zrcadel lze polohovat po 0,10 μm a 0,05 μm (krok, mikrokrok motoru), čímž je dosaženo vysoké přesnosti ladění rezonátoru. Aby nedocházelo k fokusaci energie způsobující saturaci měřeného plynu, byly ve stěnách rezonátoru upevněny dielektrické čočky, u kterých byl optimalizován tvar [20] pro dosažení nejúčinnějšího rozložení dopadající energie na vazební fólii a optimálního rozložení elm. pole uvnitř rezonátoru.



a)



b)

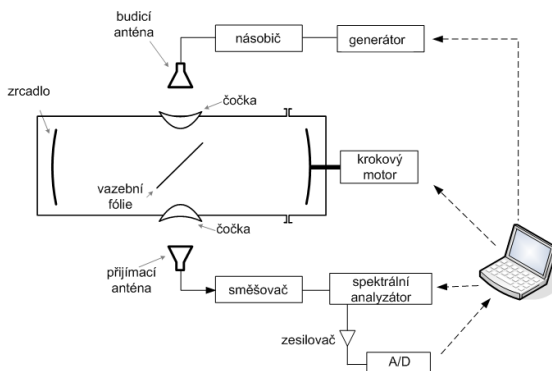
Obr. 6 a) Sestava pro měření útlumu elm. vln atmosférickými plyny; b) schéma zapojení pro měření absorpce [20]

Na základě měření a modelování transverzálních módů TEM_{pq} byla provedena kalibrace rezonátoru, jejímž výsledkem bylo výrazné zlepšení kvality celé měřicí metodiky. Dále byl odvozen vliv natočení vazební fólie na lichý transverzální mód TEM_{11q-2} [21]. Měření absorpce plynu ve FP rezonátoru je založeno na vyhodnocování činitelů jakosti prázdného (vakuovaného) rezonátoru a rezonátoru s měřeným vzorkem plynu [22]. Protože činitel jakosti je závislý na ztrátách v rezonátoru, byly minimalizovány nežádoucí ztráty na zrcadlech (difrakcí a odrazem) a vazební ztráty na dielektrické fólii. Měřený činitel jakosti vakuovaného FP rezonátoru dosahuje hodnoty okolo 10^5 . Přednost této měřicí metody indikuje (v případě velmi jemných spektrálních čar) efektivní délka měřicí trasy 83 m. Byla provedena řada absorpčních měření jak tzv. standardního laboratorního plynu (při „otevřeném“ rezonátoru [20]) tak i kyslíku, acetonitrilu [23] aj.

3.2. Emisní měření pomocí Fabry-Perotova rezonátoru

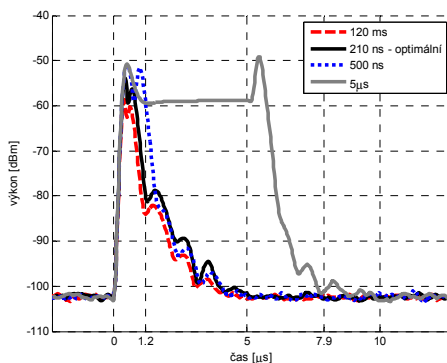
Měření absorpce plynu selhává v případech velmi nízkých tlaků, a to z důvodu saturace přechodů (nasyčení) měřeného vzorku, kterou lze považovat za následek snížení relaxačních procesů způsobujícího vyrovnávání úrovní populací saturovaných přechodů [16]. Toto představuje hlavní omezení absorpční spektroskopie na frekvencích nižších než cca 80 GHz. Emisní měření jsou na rozdíl od absorpce zjednodušená postupným vyzařováním dovolujícím snadnou Fourierovu analýzu. Příkladem emisního spektrometru je mikrovlnný Fourierův spektrometr (FTMW - *Fourier Transform MicroWave*). Vzhledem k obtížnosti realizace měřicího systému byla dosud tato měření realizována jen na několika málo světových pracovištích (většinou vycházejí z poznatků prof. Grabowa [24]). Princip FTMW spektrometru [24] lze rozdělit do dvou částí - v první je uskutečněna excitace měřeného plynu do vyššího energetického stavu a v druhé začíná při vypnutí buzení měřený plyn spontánně emitovat mikrovlnný signál. Pro změření požadované emise vzorku plynu je nezbytné docílit časů odezvy v řádech desítek ns. Měřený časový průběh signálu je pak transformován do frekvenční oblasti.

V rámci spolupráce FEL ČVUT a VŠCHT byl realizován a následně testován zcela původní zjednodušený systém FTMW spektrometru [23] (obr. 7). Navržené uspořádání se liší od [24] radiálním buzením a dále tím, že je využito zapojení rezonátoru na průchod elmg. vlny na rozdíl od zapojení s odraženou vlnou v [24].



Obr. 7 Uspořádání FTMW spektroskopického měření [23]

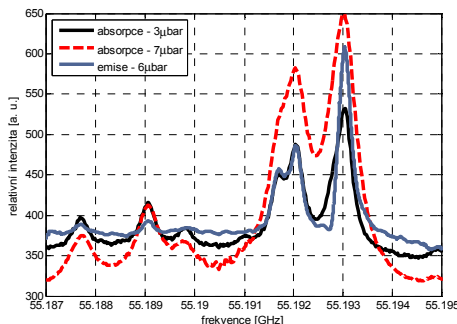
Citlivost FTMW spektrometru je pro měření molekul plynu s malým přechodovým momentem závislá na možnostech polarizace molekul. Správné nastavení naladění rezonanční dutiny a vazby lze spolehlivě určit i v časové oblasti (obr. 8).



Obr. 8 Časová odezva měřená pro různé délky budících pulzů [23]

Pro experimentální odvození optimální délky budícího pulzu bylo provedeno v pásmu 55 GHz měření acetonitrilu (CH_3CN), který má symetrickou molekulu s velkým dipólovým momentem, čemuž odpovídají intenzivní rotační čáry. Délka impulzního buzení byla postupně měněna pro dosažení co nejvyšší emise po skončení doby trvání pulzu (obr. 8), která se projevila nadbytečnými vrcholy na sestupné hraně zaznamenávaného průběhu impulzu. Pro acetonitril o tlaku $6 \mu\text{bar}$ byla nalezena optimální délka impulzu 210 ns. Dále byl optimalizován postup stanovení měřených spekter ve frekvenční oblasti. Byla vyhodnocována jak bodová spektra, kdy

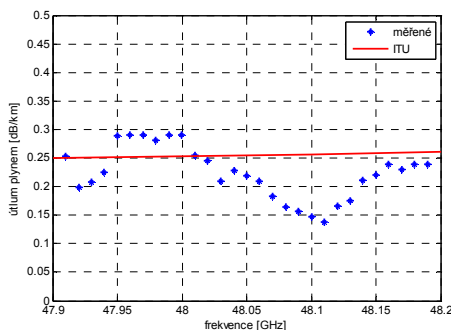
byla každé měřené frekvenci přiřazena jedna diskrétní hodnota (intenzita) spektra, tak i spektra vytvořená z delších úseků Fourierových obrazů. Následně byla optimalizována šířka těchto frekvenčních pásem. Porovnání výsledků - vyprůměrovaného spektra vzájemně se překrývajících Fourierových obrazů širokých 2150 kHz [23] – s absorpčním měřením [25] je znázorněno na obr. 9.



Obr. 9 Zprůměrované překrývající se úseky vypočtených spekter široké 2150 kHz [23]

3.3. Útlumové charakteristiky pro HAP systémy

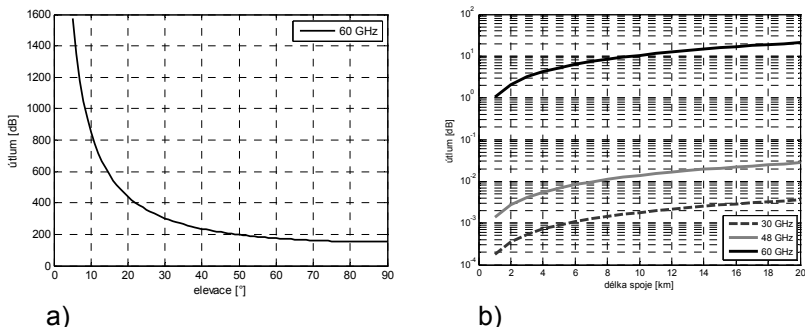
Srovnání měřených útlumových charakteristik [14] s ITU-R P.676 [18] v pásmu provozu HAP systémů je zaneseno na obr. 10.



Obr. 10 Porovnání absorpčního měření standardního plynu s [18]

Dále byla provedena analýza využití frekvenční oblasti vyššího atmosférického útlumu pro spoje mezi HAP základnovými stanicemi (s přihlédnutím k refrakci elmg. vlny). Na obr. 11a je znázorněna závislost útlumu spoje atmosférou na elevacích u spojů k HAP stanici ve výšce 20 km pro pásmo 60 GHz a parametry atmosféry dle [26]. Vzhledem k tomu, že ve výpočtu není zahrnut útlum volným

prostorem (u spoje dlouhého 20 km roven 154 dB), je z grafu zřejmé, že pro celý rozsah elevací je útlum atmosférou dostatečný k tomu, aby tento spoj nebyl odposloucháván. Dále byla provedena analýza spoje mezi HAP stanicemi - útlumové charakteristiky pro frekvence 30 GHz, 48 GHz a 60 GHz jsou zobrazeny na obr. 11b.



Obr. 11 Útlum atmosférou a) v závislosti na elevaci u spoje od pozemního uživatele k HAP základnové stanici; b) v závislosti na délce spoje mezi HAP stanicemi (HAP vždy ve výšce 20 km) [12]

4. Závěr

Podrobná analýza atmosférických vlivů na přenos signálu u platform ve velkých výškách je vzhledem k vysokým nákladům na jejich realizaci naprosto nezbytná. Za tímto účelem byly odvozeny nové postupy pro výpočet trasové diverzity u dvojic spojů z platform ve velkých výškách ovlivněných deštěm. Stávající používané metody stanovení trasových diverzit, vycházející ze znalostí získaných u satelitních či pozemních systémů, nejsou pro HAP systémy zcela ideální. Co se týká provozu celých HAP systémů pokrývajících rozsáhlá území, z výsledků provedených analýz pak vyplývá, že metodika hodnocení prostorových závislostí dešťových srážek je sice uplatnitelná, nicméně je nezbytné stávající přístup platný pro pozemní systémy výrazně modifikovat. Pravděpodobnosti snížení výpadků signálu při použití trasové diverzity jsou však v obou typech zmiňovaných systémů velmi odlišné, stejně tak jako i jejich závislost na prostorovém parametru deště, na což je nutné brát při plánování HAP systémů zřetel.

V závěrečné části byly představeny nové poznatky týkající se měření emisivity plynů a absorpce elektromagnetických vln atmosférickými plyny pomocí Fabry-Perotova rezonátoru. Navržená a testovaná metodika měření emisivity plynů za využití principu FTMW

spektrometru je výrazným přínosem k této interdisciplinární problematice, a to i z hlediska milimetrových bezdrátových systémů.

5. Použitá literatura

- [1] T. C. Tozer and D. Grace, "High-altitude platforms for wireless communications", *Electronics & Communications Engineering Journal* (ECEJ), vol. 13, no. 3, pp. 127-137, June 2001.
- [2] International Telecommunication Union, World Radiocomm. Conference (WRC-03), [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-R/conferences/wrc/wrc-03/index.asp>
- [3] C. Spillard et al., "Mobile Link Propagation Aspects, Channel Model and Impairment Mitigation Techniques", FP6 IST-2003-506745 CAPANINA, Deliverable D14, 2004, [Online]. Available: <http://www.capanina.org/deliverables.php>
- [4] COST297 – HAPCOS High Altitude Platforms for Communications and Other Services, [Online]. Available: <http://www.hapcos.org/>
- [5] J. Marshall, W. Palmer, "The distribution of raindrops with size", *Journal of Meteorology*, no.5, pp. 165-166, 1948.
- [6] *Propagation Data and Prediction Methods Required for the Design of Terrestrial Line-of-sight Systems*, International Telecommunications Union, ITU-R P.530-11, 2005.
- [7] *Rain height model for prediction methods*, International Telecommunications Union, ITU-R P.839-3, 2001.
- [8] *Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems*, International Telecommunications Union, ITU-R P.618-8, 2003.
- [9] S. Zvánovec, P. Pechač, M. Mazánek, "Route Diversity Simulations in Multi-HAP Networks during Heavy Rainstorms", in *EuCAP 2009*, Berlin: VDE Verlag, pp. 305-307, 2009.
- [10] *Propagation data and prediction methods required for design of terrestrial broadband millimetric radio access systems operating in a frequency range about 20–50 GHz*, International Telecommunications Union, ITU-R P.1410, 2000.
- [11] I. S. Usman, M. J. Willis, and R. J. Watson, "Route diversity analysis and modelling for millimetre wave point to multi-point systems", in *1st Int. Workshop of COST Action 280*, Jul. 2002.
- [12] S. Zvánovec, P. Pechač, M. Mazánek, "Validation of Route Diversity Schemes of Two Joint HAP Links", in *Proceedings of ISAP 2009*, Bangkok, pp. 520-523, 2009.
- [13] S. Zvánovec, P. Pechač, "Rain Spatial Classification for Availability Studies of Point-to-Multipoint Systems", *IEEE*

- Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 54, no. 12, pp. 3789- 3796, 2006.
- [14] S. Zvánovec, P. Piksa, M. Mazánek, P. Pechač, "A Study of Gas and Rain Propagation Effects at 48GHz for HAP Scenarios", *EURASIP Journal on Wireless Comm. and Networking*, 2008, vol. 5, no. 1, pp. 1-7 [online]: <http://www.hindawi.com/GetArticle.aspx?doi=10.1155/2008/734216>.
- [15] S. Zvánovec, P. Pechač, "Validation of Rain Spatial Classification for High Altitude Platform Systems", zasláno do časopisu *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, v recenzním řízení. ISSN 0018-926X.
- [16] C. H. Townes, A. L. Schawlow, *Microwave Spectroscopy*, McGraw-Hill, London, 1955.
- [17] L. J. Ippolito, *Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance*, Wiley, Chichester, 2008.
- [18] *Attenuation by Atmospheric Gates*, International Telecommunications Union, ITU-R P.676-6, 2005.
- [19] J. H. Van Vleck, "The Absorption of Microwaves by Oxygen and Uncondensed Water Vapour", *Phys. Rev.*, vol. 71(1), pp. 413-433, 1947.
- [20] S. Zvánovec, P. Piksa, P. Černý, M. Mazánek, P. Pechač, "Gas Attenuation Measurement by Utilization of Fabry-Perot Resonator", in *Proceeding of EUCAP 2007*, (IET), 2007.
- [21] P. Piksa, S. Zvánovec, P. Pechač, M. Mazánek, "Higher Modes of Sub-millimetric Fabry-Perot Resonator", in *URSI - XXIX General Assembly - Proceedings*, Chicago URSI, 2008.
- [22] E. P. Valkenburg, V. E. Derr, "A high-Q Fabry-Perot interferometer for water vapor absorption measurements in the 100 Gc/s to 300 Gc/s frequency range", *Proceedings of the IEEE*, vol. 54, pp. 493-498, 1966.
- [23] S. Zvánovec, P. Černý, P. Piksa, T. Kořínek, P. Pechač, M. Mazánek, J. Varga, J. Koubek, Š. Urban, "The Use of the Fabry-Perot Interferometer for High Resolution Microwave Spectroscopy", *Journal of Molecular Spectroscopy*, vol. 256, no. 1, pp. 141-145, 2009.
- [24] J.U. Grabow, W. Caminati, in: J. Laane (Ed.), *Frontiers of Molecular Spectroscopy*, Elsevier, p. 383, 2009.
- [25] P. Kania, L. Střifteská, M. Šimečková, Š. Urban, "Pressure Shift of Acetonitrile GroundState Constants", *J.Mol. Struct.* 795, pp. 209-218, 2006.
- [26] *Reference standard atmospheres*, International Telecommunications Union, ITU-R P.835, 2005.

Ing. Stanislav Zvánovec, Ph.D.

Narozen: 29.1.1977 v Jindřichově Hradci

Stav: ženatý

Adresa: Högerova 811, 15200 Praha 5

E-mail: xzvanove@fel.cvut.cz

Vzdělání:

1991-1995 SPŠ v Písku, studijní obor Výpočetní technika

1995-2002 FEL ČVUT v Praze, obor Radioelektronika

2002-2006 Doktorské studium, Katedra elektromagnetického pole, FEL ČVUT v Praze, obor Radioelektronika

Zaměstnání:

Od 2005 Katedra elektromagnetického pole, FEL ČVUT v Praze – odborný asistent, vědecký pracovník.

Výuka v předmětech:

Šíření vln a kmitočtové plánování, Milimetrová a submilimetrová technika, Měření v optických komunikacích, Fotonika, Základy přenosu optickými vlákny, Šíření vln v moderních radiokomunikacích, Antény a šíření v moderních telekomunikacích, Trendy a perspektivy mikrovlnné techniky.

Obory profesního zájmu:

Šíření elektromagnetických vln v milimetrovém a submilimetrovém pásmu, kvazioptika, vláknová optika, bezdrátové optické systémy, UWB komunikace, mikrovlnná spektroskopie.

Vědeckovýzkumná činnost:

Řešitel, spoluřešitel či člen řešitelských kolektivů v rámci Centra základního výzkumu Kvastes, zahraničních grantů ESA PECS, COST 297, GAČR 102/08/P346 a P206/10/2182, FRVŠ, rozvojového projektu MŠMT 2009 a řady projektů NBÚ. Recenzent odborných časopisů Spectroscopy Letters, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, Progress in Electromagnetics Research-PIER, Radioengineering.

Členství:

Člen výboru MTT/AP/ED/EMC Československé sekce IEEE

Předseda komise F národního komitétu URSI

Člen výboru Společnosti pro radioelektronické inženýrství

Člen programového/edičního výboru konferencí COMITE 2010, MIC-CCA 2009, MIC-CPE 2010.