

# VLIV PŘÍRODY NA SATELITNÍ KOMUNIKACI

Prof. Ing. Miroslav Kasal, CSc.  
ÚREL FEKT VUT v Brně, [kasal@feec.vutbr.cz](mailto:kasal@feec.vutbr.cz)

## ÚVOD

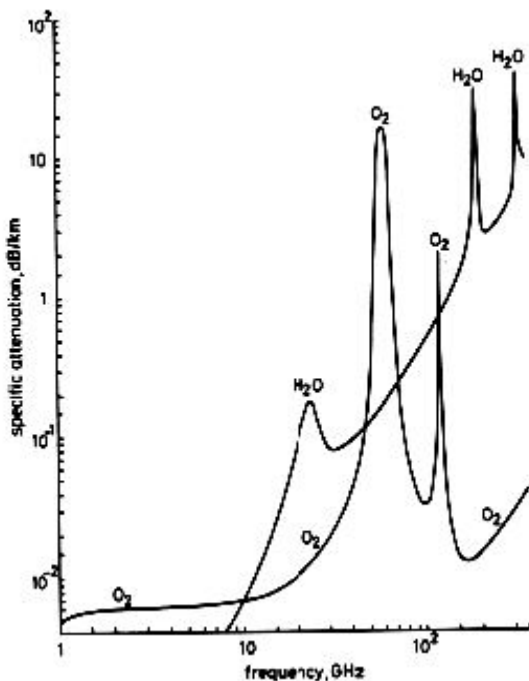
Při rádiové komunikaci s umělými družicemi Země se uplatňuje celá řada přírodních jevů. Je to dáno především průchodem elektromagnetických mikrovln troposférou, ionosférou a magnetosférou Země, tedy prostředím zdaleka ne elektromagneticky neutrálním. V některých případech hraje roli pohyb družice. Většina jevů se uplatňuje v obou komunikačních směrech podobně, některé však nikoli. V tomto příspěvku si všimneme efektů způsobujících přídavný útlum elektromagnetické vlny, její depolarizaci a další ovlivnění, které je třeba uvažovat při výpočtech spojení s družicemi, případně kosmickými sondami v meziplanetárním prostoru. Pro následující úvahy budeme předpokládat komunikaci s družicemi, popř. kosmickými sondami v rozsahu frekvencí 1 až 40 GHz.

Energetický návrh družicových spojů se provádí velmi přesně. Je tomu tak především proto, že to lze, neboť i při velmi vysokých útlumech daných vzdáleností, je možné poměrně přesně definovat všechny potřebné parametry, zvláště při větší elevaci pozemské antény. Chyba se navíc vždy značně prodraží. Je-li spoj předdimenzován, je zbytečně „velká“ družice, v opačném případě jsou větší náklady na pozemský segment.

## BLÍZKÉ OKOLÍ ZEMĚ

### Troposféra

Jevy související s šířením elektromagnetických vln uvažovaných frekvencí v troposféře jsou velmi pečlivě prostudovány a v detailech se i nadále zkoumají. Na základě těchto poznatků jsou vytvářeny sofistikované počítačové modely. Po doplnění statistikou výskytu v různých klimatických oblastech pak umožňují velmi přesné předpovědi podmínek šíření pro danou aplikaci.



Obr. 1. Typická závislost útlumu v atmosféře, způsobená molekulami kyslíku a vodní páry při tlaku 1013 mb, teplotě 15° C a vodní páry 7,5 g.m<sup>-3</sup>

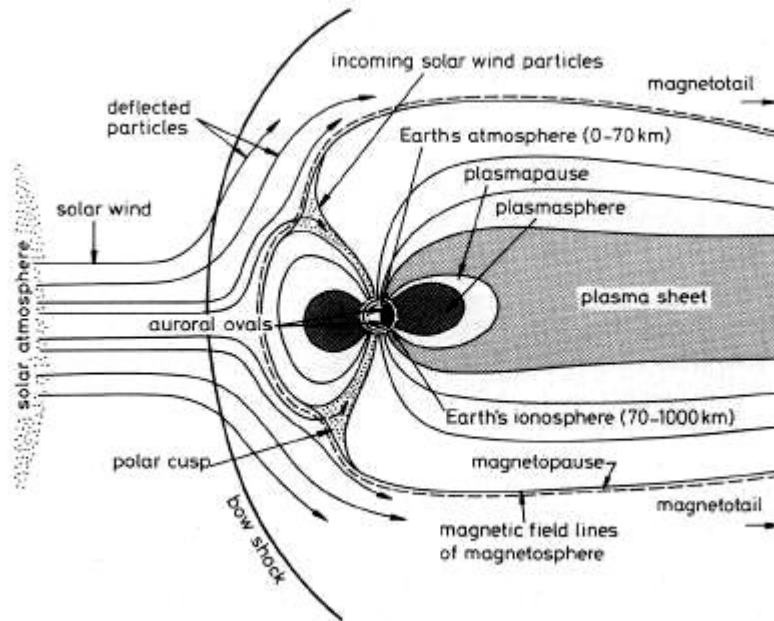
ovlivňují blesky a ionosférické výboje. Ionosféra některé frekvence elektromagnetického spektra odráží, lépe řečeno ohýbá zpět k zemskému povrchu. I na vyšší frekvence, kde je již refrakce méně významná má ionizované prostředí vliv.

Především molekuly kyslíku a vodní páry zvyšují na určitých frekvencích útlum natolik, že se nedají využít ani pro terestrickou komunikaci. I satelitní spoje proto pracují ve frekvenčních oknech vyplývajících z obr. 1.[2]. Přídavný útlum atmosféry se projevuje stejně pro uplink i downlink družicového spoje, samozřejmě s přihlédnutím k frekvenci. Atmosféra se však může projevit u downlinku ještě zvýšením ekvivalentní šumové teploty přijímacího pozemského systému, míří-li přijímací anténa do dešťového mraku s vysokou koncentrací hydrometeorů a to i na frekvencích pásma S, C, X a Ku. Tohoto fenoménu si všimneme podrobněji.

### Ionosféra

Je oblast horních vrstev atmosféry, která je částečně ionizována (plazma). Ultrafialové a korpuskulární záření Slunce ionizuje v ionosféře atomy a molekuly. Stupeň ionizace kolísá s denní dobou, ročním obdobím, geografickou polohou a fází slunečního cyklu. Ionosféra se dělí na několik vrstev D (60-90 km), E(90-150 km) a F (150-800 km). Je nabitá kladně a má náboj cca 10<sup>6</sup> C, naproti tomu Zemský povrch má přibližně stejný náboj opačné polarity. Napětí mezi povrchem a ionosférou se pohybuje okolo 360 kV a teče jí za jasného dne proud cca 1 800 A [5] (celkový odpor atmosféry je tedy asi 200 Ω a odpovídající Joulevův výkon 648 MW). Náboj ionosféry

## Magnetosféra



Obr. 2. Magnetosféra Země vzniká interakcí slunečního větru a dipólového pole

Dipólové magnetické pole je vytvářeno v jádru Země elektrickými proudy o hodnotě řádu  $10^9$  A. Dlouho se mělo za to, že magnetosféra má přibližně rotačně symetrický tvar (s osou symetrie danou spojnicí magnetických pólů). Až podrobný výzkum blízkého okolí naší planety pomocí družic, odhalil rázovou vlnu a kapkovité prodloužení zemské magnetosféry. Dipólové pole je totiž deformováno interakcí se slunečním větrem do charakteristického tvaru[2][5]. Elektromagnetické vlny družicového spoje jsou ovlivňovány složkou magnetického pole rovnoběžnou se směrem jejich šíření.

## VLIV DEŠŤOVÉHO MRAKU NA KOMUNIKACI S DRUŽICEMI

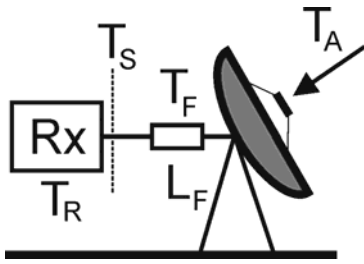
Zatímco útlum dešťového mraku se projeví přídavným útlumem v obou komunikačních směrech známým způsobem, vliv na downlink je větší, neboť dešťový mrak způsobí kromě útlumu také zvýšení ekvivalentní šumové teploty a tedy snížení jakostního činitele  $G/T$  pozemského přijímacího systému[1][2][3][6]. Komunikační rovnice pro družicový downlink má obecně známý tvar

$$\left( \frac{C}{N_0} \right)_D = (EIRP)_{SL} - L_D + \left( \frac{G_{Rmax}}{T_S} \right)_{ES} + 228,6 \quad , \quad [\text{dB (Hz)}] \quad (1)$$

kde  $\left( \frac{C}{N_0} \right)_D$  je poměr detektovaného výkonu nosné vlny ku výkonové spektrální hustotě AWGN,  $(EIRP)_{SL}$  je ekvivalentní vyzářený výkon vysílače družice [dB (W)],  $L_D$  jsou ztráty šířením včetně útlumu v atmosféře [dB],  $\left( \frac{G_{Rmax}}{T_S} \right)_{ES}$  je jakostní činitel pozemské přijímací soustavy [dB ( $K^{-1}$ )] a 228,6 je Boltzmanova konstanta vyjádřena v [dB ( $W \cdot Hz^{-1} \cdot K^{-1}$ )].

Pro ekvivalentní šumovou teplotu systému v referenční rovině vstupního konektoru přijímače, můžeme podle obr. 3. psát

$$T_S = \frac{T_A}{L_F} + T_F \left( 1 - \frac{1}{L_F} \right) + T_R \quad , \quad [K] \quad (2)$$



**Obr. 3. Konfigurace přijímacího systému pro stanovení ekvivalentní šumové teploty**

kde  $L_F$  jsou ztráty v napaječi a  $T_F$  jeho termodynamická teplota,  $T_A$  a  $T_R$  jsou ekvivalentní šumové teploty antény a vlastního přijímače.

Při jasné obloze je šumová teplota směrové antény dána součtem jasové teploty místa na obloze kam anténa míří  $T_{SKY}$  a příspěvkem od Země, který závisí na vyzářovací charakteristice antény a na její elevaci  $T_G$ , obr. 4a. Tedy

$$T_A = T_{SKY} + T_G \quad . \quad [K] \quad (3)$$

Objeví-li se před anténou dešťový mrak s termodynamickou teplotou  $T_m$  a ztrátami na frekvenci downlinku  $A_{RAIN}$ , bude záření oblohy tímto mrakem zeslabeno (stejně jako signál) a naopak mrak zvýší úroveň šumu, neboť se chová jako atenuátor na vstupu přijímací soustavy, obr. 4.b. Šumová teplota antény tedy v tomto případě bude

$$T_{A-R} = \frac{T_{SKY}}{A_{RAIN}} + T_m \left( 1 - \frac{1}{A_{RAIN}} \right) + T_G \quad . \quad [K] \quad (4)$$

Jako příklad uvažme downlink uživatelského terminálu systému VSAT v pásmu 12 GHz. Pro elevaci přijímací antény  $20^\circ$  jsou reálné hodnoty  $T_{SKY} = 12 \text{ K}$  a  $T_G = 40 \text{ K}$ . Při jasné obloze lze tedy očekávat šumovou teplotu antény  $T_A = 52 \text{ K}$ . Dále uvažme vliv dešťového mraku s útlumem na frekvenci 12 GHz  $A_{RAIN} = 7 \text{ dB}$  (což je hodnota, která by neměla být překročena v našich klimatických podmínkách po více než 0,01% času průměrného roku (53 minut)) a teplotou  $T_m = 275 \text{ K}$ . Výsledná šumová teplota antény za deště podle vztahu (4) potom bude  $T_{A-R} = 263 \text{ K}$ . Bude-li použit napaječ s velmi malými ztrátami  $L_F \rightarrow 1$ , a ekvivalentní šumová teplota přijímače bude  $T_R = 170 \text{ K}$  ( $F = 2 \text{ dB}$ ), bude poměr šumových teplot systému  $T_{S-R}/T_S = 1,95$ . To znamená, že se při uvažovaném vydatném dešti zhorší šumová teplota systému o 2,9 dB. Stejným poměrem se zhorší i odstup podle rovnice (1). Připočteme-li k tomu vlastní útlum průchodu signálu mrakem, bude výsledný  $C/N_0$  při dešti o 9,9 dB nižší.

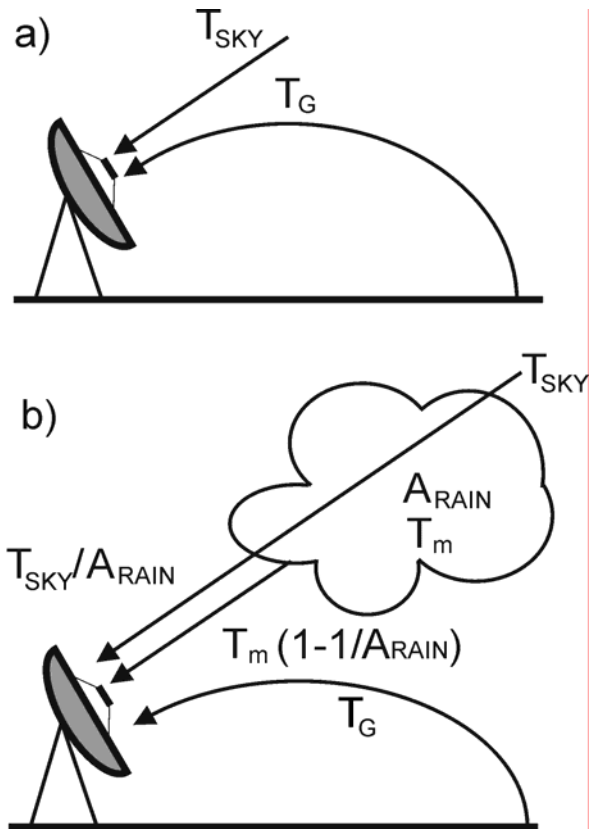
Vliv hydrometeorů se projevuje ale i depolarizačním efektem. Tzn., že vstupuje-li do mraku vlna např. RHCP (pravotočivě kruhově polarizovaná), vystupuje z mraku také složka LHCP (levotočivě kruhově polarizovaná) a křížová polarizační diskriminace (XPD) může být značně snížena. Totéž platí i pro lineární polarizace. Efekt je způsoben anisotropií média v němž se vlny šíří a je tím větší, čím méně symetrické jsou vodní kapky.

## IONOSFÉRICKÉ EFEKTY

Šíření rádiových vln ionosférou je komplexní směs interakcí mezi ionizovaným prostředím, magnetickým polem a parametry vlastního signálu. Refrakce a absorpce signálu v ionosféře s rostoucím kmitočtem klesá a kolem 1 GHz jsou již zanedbatelné.

Jestliže se však lineárně polarizovaná vlna šíří ionosférou, stáčí se vektor elektrické složky o úhel

$$\Phi = \frac{2,36 \cdot 10^4}{f^2} \int NB \cos \theta_B dl \quad , \quad [rad] \quad (5)$$



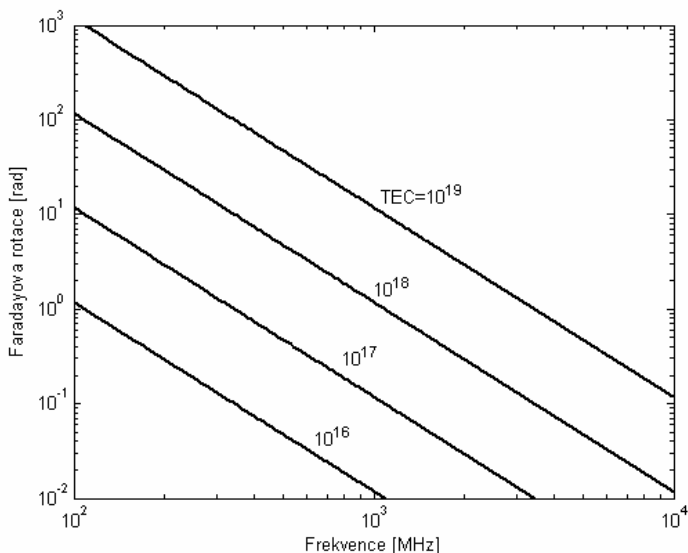
**Obr. 4. K výpočtu ekvivalentní šumové teploty antény při jasné obloze a za deště**

kde  $f$  je frekvence signálu [Hz],  $N$  je počet elektronů v  $m^3$ ,  $B$  je magnetické pole Země  $Wb/m^2$ ,  $\theta_B$  je úhel mezi magnetickým polem a směrem šíření vlny a  $dl$  je délkový element ionizované vrstvy.

Součin  $B \cos \theta_B$  představuje složku magnetické indukce ve směru šíření vlny a v jednotlivých případech jej můžeme považovat za konstantu. Integrál

$$TEC = \int Ndl, \quad [\text{počet elektronů} \cdot m^2] \quad (6)$$

je celkový obsah elektronů v jednotce plochy (Total Electron Content). Ve vertikálním řezu (v zenitu) se TEC mění mezi  $10^{16}$  až  $10^{18}$  elektronů na  $m^2$  s maximem v slunečním dni [2].



**Obr. 5. Závislost Faradayovy rotace na frekvenci pro různé koncentrace elektronů v ionosféře**

Faradayova rotace tedy závisí nepřímo úměrně na čtverci frekvence. Na kmitočtech pod 1 GHz se tak dokáže stočit rovina lineárně polarizované vlny i o několik násobků  $2\pi$ , obr. 5. a výsledná polarizace je naprosto nepředvídatelná. Tyto frekvence se přitom používají pro komunikaci s družicemi na nízkých drahách, neboť je při nich relativně malý Dopplerův posuv. Je tedy nutné používat kruhovou polarizaci. Na druhé straně v pásmu Ku je stáčení roviny polarizace lineárně polarizované vlny vlivem Faradayovy rotace již tak malé, že ji lze, při dostatečné polohové stabilizaci družice, použít pro komunikaci.

Průchod signálu ionizovaným prostředím má ještě řadu více nebo méně významných důsledků. Např., frekvenčně závislá délka průchodu ionosférou může signál zkreslit proměnným skupinovým zpožděním. Zvláště závažně se tento jev může projevit u družicových navigačních systémů a při družicovém „rangingu“. V závislosti na koncentraci nabitých částic se rozdíl drah může odhadnout vztahem [2]

$$\Delta R = \frac{40,3}{f^2} TEC \quad [m] \quad (7)$$

Pro průměrnou hodnotu  $TEC = 10^{17}$  a frekvenci 1,27 GHz vychází  $\Delta R = 2,5$  m. Odpovídající hodnoty pro koncentrace  $10^{16}$  a  $10^{18}$  jsou potom 0,25 m a 25 m, tedy hodnoty, které mohou měřené navigační parametry zcela jistě ovlivnit.

## ZÁVĚR

V souvislosti s uvedeným tématem bychom mohli uvést celou řadu dalších efektů a jejich důsledků uplatňujících se při družicové komunikaci. U všech jsou patrné závislosti na frekvenci a přirozeně také na fyzikálních parametrech prostředí. Jeho anisotropie, nehomogenita a časová proměnnost činí odpovídající modely velmi komplexními a proto se často musíme smířit pouze s odhady a empirickými relacemi. Nicméně výzkum v tomto oboru pokračuje a řada projektů uskutečněných v minulosti i současnosti poskytuje nová experimentální data, která se dříve nebo později promítnou do přesnějších výpočtů a odhadů.

## LITERATURA

- [1] MARAL, G.- BOUSQUET, M.: Satellite Communication Systems. Second Edition, John Wiley & Sons, New York 1993
- [2] ALLNUTT, J. E.: Satellite-to-ground radiowave propagation. Peter Peregrinus Ltd, IEE, London 1989
- [3] PRATT, T.-BOSTIAN, C. W.-ALLNUTT, J. E.: Satellite Communication. Second Edition, John Wiley & Sons, New York 2003
- [4] LUTZ, E.-WERNER, M.-JAHN, A.: Satellite Systems for Personal and Broadband Communications. Springer-Verlag Berlin 2000
- [5] KAIZER, V.: Cluster, Polar, Wind, Magion – výzkum ionosféry. Aldebaran Bulletin 24/2004. [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004\\_24\\_son.html](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_24_son.html)
- [6] KASAL, M.: Směrové a družicové spoje. Skriptum ÚREL FEKT VUT v Brně, 2003