

# Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

*redakce nakladatelství BEN – technická literatura*  
[redakce@ben.cz](mailto:redakce@ben.cz)



## 3.1 Útlum atmosférickými plyny

Rezonance molekul nekondenzovaných plynů obsažených v atmosféře způsobuje útlum šířících se elektromagnetických vln. Absorpci plyny popisuje tzv. absorpční spektrum, které je na daných frekvencích dáno spektrálními čarami, jež odpovídají přechodům mezi jednotlivými stabilními energetickými stavy příslušné molekuly. Spektrální čáry však ve skutečnosti nejsou ideálně úzké. Jejich rozšíření způsobuje např. Dopplerův jev, kdy chaotický, teplotně závislý pohyb molekul nenulovou rychlostí vede k Dopplerovskému rozšíření spektrálních čar. Další příčinou útlumu elektromagnetických vln jsou vzájemné kolize mezi molekulami. Tento jev je vyjma teploty závislý též i na hustotě plynu, tj. tlaku. Absorpční spektra lze velmi přesně získat pomocí spektroskopie. Více o spektroskopii a příslušné kvantové teorii lze nalézt např. v [1].

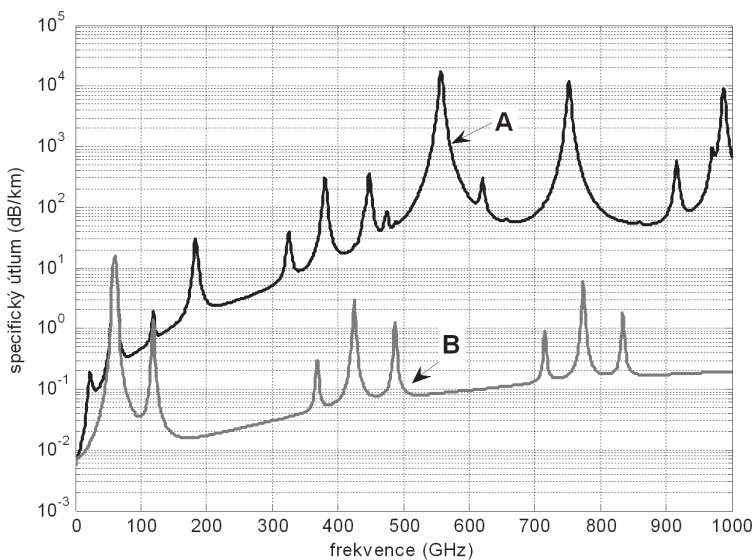
Na frekvencích do cca 350 GHz, kam spadá pásmo rádiových vln, se v atmosféře nachází pouze několik absorpčních čar způsobených zejména vlivem molekul kyslíku a vodní páry. Uvažujeme-li složení i stav atmosféry (teplota, tlak, vlhkost) konstantní podél uvažované trasy, lze útlum atmosférických plynů vyjádřit jako specifický útlum v dB/km. To lze předpokládat u pozemních spojů s malou elevací (sklonem). Celkový specifický útlum pak lze vyjádřit jako součet specifických útlumů jednotlivých plynů, tj.:

$$\gamma = \gamma_o + \gamma_w, \quad (3.1)$$

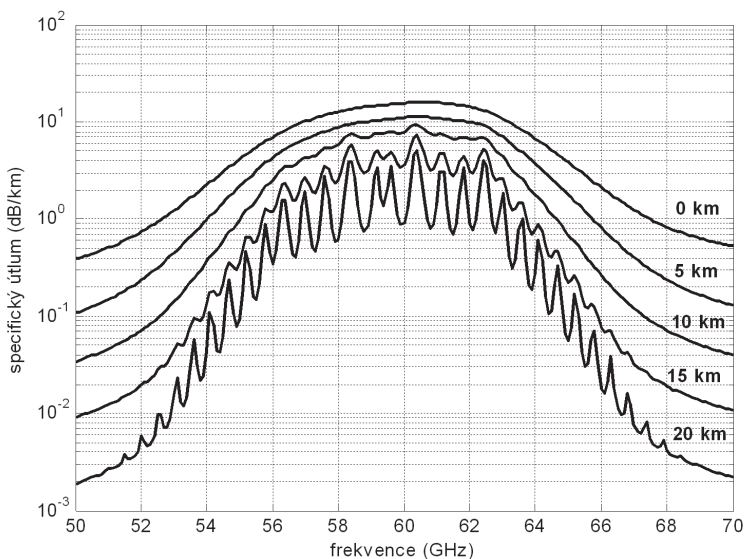
kde  $\gamma_o$  je specifický útlum plynného kyslíku, resp. útlum suchého vzduchu (*dry air*), a  $\gamma_w$  specifický útlum vodních par (*water vapour*), vše v dB/km. Zdůrazněme, že se jedná o nekondenzovanou vodní páru obsaženou v troposféře – ztráty způsobené kondenzovanými částicemi (hydrometeory) jsou založeny na zcela jiném fyzikálním principu a tudíž je o nich samostatně pojednáno v kap. 3.4.

Molekulární kyslík vykazuje skupinu spektrální čar v pásmu 50 až 70 GHz, které mohou splývat, a izolovanou spektrální čáru na frekvenci 118,74 GHz. S ohledem na permanentní magnetický moment molekuly kyslíku je určitý útlum elektromagnetických vln vykazován i na nižších frekvencích (*obr. 3.1*). Z hodnot specifického útlumu v okolí rezonancí je patrné, že v případě realizace rádiového spoje v tomto pásmu dojde vlivem atmosféry k velmi vysokým ztrátám signálu. Najdou se však aplikace (např. vojenské) u nichž je vysoký stálý útlum atmosféry žádoucí a to zejména z důvodu utajení provozu vysílání v daném pásmu. Pro běžné telekomunikační služby jsou však hodnoty ztrát neúnosné, a proto jsou využívané frekvenční oblasti se zanedbatelným útlumem atmosférických plynů mezi rezonancemi často označovány jako tzv. rádiová okna.

Na *obr. 3.2* je zobrazen specifický útlum atmosférického kyslíku pro několik nadmořských výšek, tj. pro různý tlak. Vyšší tlak (menší nadmořská výška) znamená zvýšení útlumu díky vyšší hustotě molekul a splývání jednotlivých spektrálních čar. To je způsobeno jejich výše zmíněným rozšiřováním díky kolizím mezi molekulami. S nižší hustotou kolizí ubývá, a proto jsou na *obr. 3.2* pro nižší tlak zřejmé jednotlivé spektrální čáry. Specifický útlum je i teplotně závislý, zvláště v blízkosti jednotlivých spektrálních čar.



Obr. 3.1 *Specifický útlum rádiových vln způsobený absorpcí atmosférickými plyny pro  $T = 286\text{ K}$  a tlak  $1013\text{ hPa}$ ; A – referenční atmosféra ( $7,5\text{ g/m}^3$ ), B – suchá atmosféra*



Obr. 3.2 *Specifický útlum způsobený molekulami kyslíku v závislosti na nadmořské výšce*

Molekuly vodní páry vykazují elektrický moment a v pásmu do 350 GHz tři spektrální čáry: 22,2 GHz, 183,3 GHz a 325,4 GHz (*obr. 3.1*). Na útlumu se podílí i „okraje“ většího množství spektrálních čar v submilimetrové a infračervené oblasti spektra.

Pro výpočet útlumu atmosférickými plyny při šíření rádiové vlny jsou v literatuře k dispozici modely jak pro pozemní, tak i družicové spoje [2], [3]. Jakýsi standard představuje metodika z doporučení ITU-R P.676 [4], která popisuje dva dále specifikované přístupy. První z nich, exaktní a výpočetně poměrně náročný, je platný pro frekvence až do 1 THz. Sumace příspěvků jednotlivých spektrálních čar zde vychází přímo ze spektrometrických dat. Druhá, výpočetně jednodušší metoda je platná ve frekvenčním rozsahu 1 až 350 GHz a v nadmořských výškách do 10 km n. m. a je založena na aproximaci křivek specifického útlumu získaných exaktním výpočtem. Absolutní chyba modelu je většinou pod 0,1 dB/km a roste až k 0,7 dB/km v okolí 60 GHz. Uvedme zde pouze některé vztahy druhé metody platné do 54 GHz.

Specifický útlum pro suchý vzduch je dán následujícími vztahy:

$$\gamma_o = \left( \frac{7,2r_i^{2,8}}{f^2 + 0,34r_p^2r_i^{1,6}} + \frac{0,62\xi_3}{(54-f)^{1,16\xi_1} + 0,83\xi_2} \right) f^2 r_p^2 \cdot 10^{-3} \quad (3.2)$$

$$\xi_1 = r_p^{0,0717} r_i^{-1,8132} e^{0,0156(1-r_p)-1,6515(1-r_i)} \quad (3.3)$$

$$\xi_2 = r_p^{0,5146} r_i^{-4,6368} e^{-0,1921(1-r_p)-5,7416(1-r_i)} \quad (3.4)$$

$$\xi_3 = r_p^{0,3414} r_i^{-6,5851} e^{0,2130(1-r_p)-8,5854(1-r_i)} \quad (3.5)$$

$$r_p = \frac{p}{1013} \quad (3.6)$$

$$r_i = \frac{288}{273+t} \quad (3.7)$$

kde  $f$  je frekvence v GHz (1–54 GHz),  $p$  je tlak v hPa a  $t$  teplota ve °C.

Specifický útlum pro vodní páru je pak dán:

$$\gamma_w = \left[ \frac{3,98\eta_1 \exp(2,23(1-r_i))}{(f-22,235)^2 + 9,42\eta_1^2} g(f, 22) + \frac{11,96\eta_1 \exp(0,7(1-r_i))}{(f-183,31)^2 + 11,14\eta_1^2} \right. \\ \left. + \frac{0,081\eta_1 \exp(6,44(1-r_i))}{(f-321,226)^2 + 6,29\eta_1^2} + \frac{3,66\eta_1 \exp(1,6(1-r_i))}{(f-325,153)^2 + 9,22\eta_1^2} \right]$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{25,37\eta_1 \exp(1,09(1-r_i))}{(f-380)^2} + \frac{17,4\eta_1 \exp(1,46(1-r_i))}{(f-448)^2} \\
& + \frac{844,6\eta_1 \exp(0,17(1-r_i))}{(f-557)^2} g(f, 557) + \frac{290\eta_1 \exp(0,41(1-r_i))}{(f-752)^2} g(f, 752) \\
& + \left. \frac{8,33 \cdot 10^4 \eta_2 \exp(0,99(1-r_i))}{(f-1780)^2} g(f, 1780) \right\} f^2 r_i^{2,5} \rho \cdot 10^{-4} \quad (3.8)
\end{aligned}$$

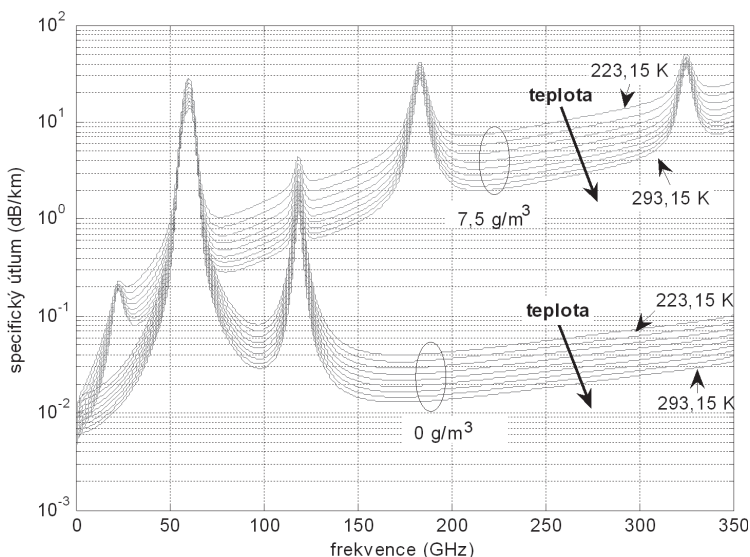
$$\eta_1 = 0.955 r_p r_i^{0,68} + 0.006 \rho \quad (3.9)$$

$$\eta_2 = 0.735 r_p r_i^{0,5} + 0.0353 r_i^4 \rho \quad (3.10)$$

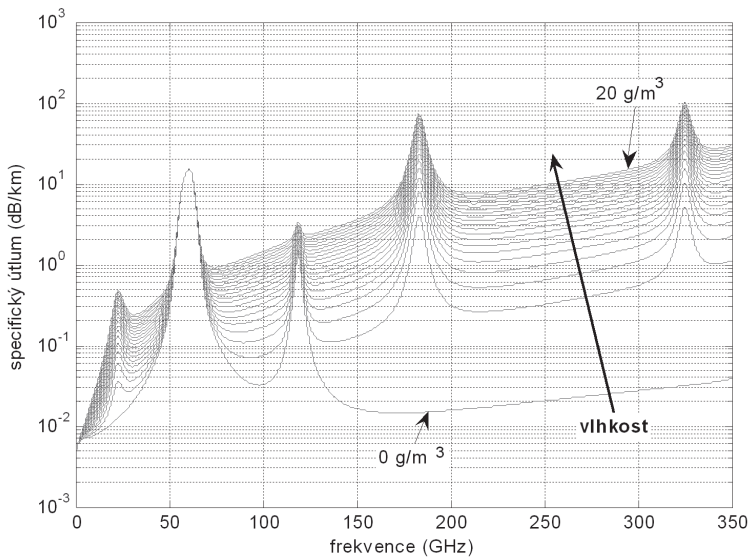
$$g(f, f_i) = 1 + \left( \frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2, \quad (3.11)$$

kde  $f$  je frekvence v GHz (1 až 350 GHz) a  $\rho$  hustota vodních par v  $\text{g/m}^3$ .

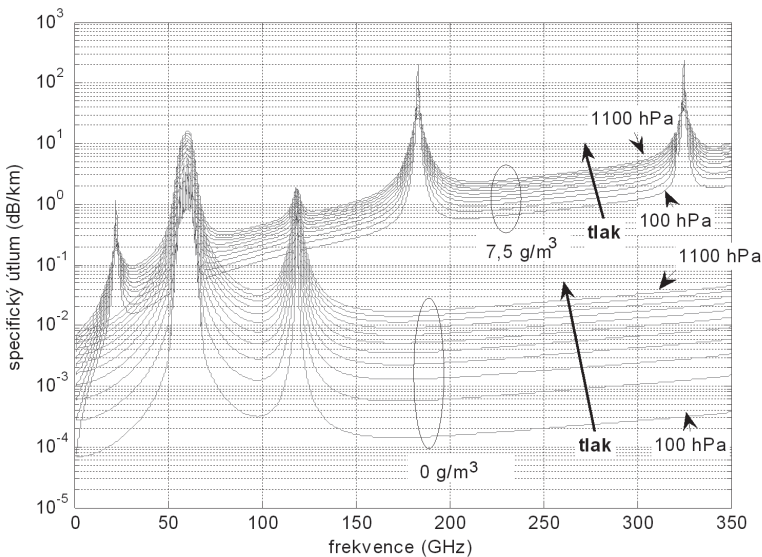
Hodnotu specifického útlumu je také možné odečíst z grafů na obr. 3.3, obr. 3.4 a obr. 3.5.



Obr. 3.3 Specifické útlumy pro referenční a suchou atmosféru v závislosti na teplotě (křivky vyneseny po 10 Kelvinech); tlak 1013 hPa



Obr. 3.4 Specifické útlumy v závislosti na vlhkosti (křivky vyneseny po  $1 \text{ g/m}^3$ ); tlak 1013 hPa, teplota 293,15 K



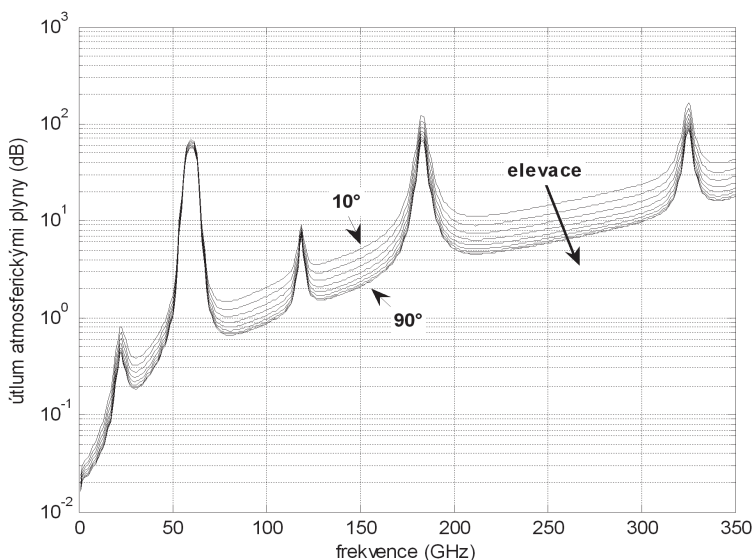
Obr. 3.5 Specifické útlumy pro referenční a suchou atmosféru v závislosti na tlaku (křivky vyneseny po 100 hPa); teplota 293,15 K

Celkové ztráty rádiového spoje způsobené absorpcí atmosférickými plyny získáme jako:

$$L_g = d\gamma = d(\gamma_o + \gamma_w), \quad (3.12)$$

kde  $d$  je délka spoje v km.

Výše uvedený vztah však platí pouze v případě spoje s nulovou inklinací, kdy lze předpokládat stejné parametry atmosféry podél celé trasy. V opačném případě, např. v případě družicového spoje nebo pozemního spoje s nenulovou elevací, je nutné brát v potaz změnu vlastností atmosféry s nadmořskou výškou. Exaktní výpočet je pak značně složitější a vyžaduje znalost výškových profilů tlaku, teploty a vlhkosti, přičemž celkový útlum je poté dán integrací přes celou trasu. Kromě exaktního přístupu nabízí [4] i přibližný výpočet založený na tzv. ekvivalentní výšce, počítané zvlášť pro suchou atmosféru a zvlášť pro vodní páry, který koriguje specifický útlum získaný podle výše uvedených vztahů a grafů. Vliv inklinace spoje ilustruje obr. 3.6.



Obr. 3.6 Vliv elevace pozemního spoje (výška vysílače 100 m, délka spoje 5 km,  $\rho = 7,5 \text{ g/m}^3$ ,  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ; křivky vyneseny po  $10^\circ$ ) na útlum atmosférickými plyny

Pro modely šíření vln může být někdy vhodné řešit atmosférickou refrakci i absorpci najednou. Je to možné zavedením komplexního indexu lomu  $n$  podle (2.40), kde imaginární část vyjadřuje útlum šířící se vlny vlivem absorpce atmosférických plynů. Vztah mezi imaginární částí indexu lomu, která je pochopitelně frekvenčně závislá, a specifickým útlumem v dB/km je:

$$\gamma = 0,186 \cdot 10^6 f \text{ Im}[n] \quad (3.13)$$

kde frekvence  $f$  je v GHz.