

1. Šírenie troposférických elektromagnetických vln

Šírenie elektromagnetických vln v troposfére do značnej miery závisí od meteorologických podmienok.

1.1. Vlastnosti troposféry

Troposférou nazývame dolnú vrstvu atmosféry, ktorá leží priamo nad zemským povrchom a siaha do výšky 8 až 10 km v oblastiach pólů Zeme, 10 až 12 km v stredných zemepisných šírkach a 16 až 18 km v oblasti rovníka. Zloženie troposféry (percentuálne zastúpenie jednotlivých plynov) nezávisí od výšky. Výnimkou je obsah vodnej pary, ktorý závisí od meteorologických podmienok a znižuje sa so zväčšovaním výšky.

Charakteristickým javom vznikajúcim v troposfére je pokles teploty so vzrastajúcou výškou. Vertikálny teplotný gradient má hodnotu 6 K/km . Príčinou tohto poklesu je priehľadnosť troposféry pre slnečné žiarenie. Prakticky všetka slnečná energia prechádzajúca troposférou je pohlcovaná zemským povrchom. Zohriaty povrch Zeme spôsobuje ohrev troposféry, pričom rozhodujúcu úlohu hrá konvekcia tepla. Vrstvy troposféry, ktoré sú v styku so zemským povrchom sa ohrievajú a vystupujú hore, ich miesto zaujímajú chladnejšie vrstvy, atď. V dôsledku nerovnomerného rozloženia teploty na povrchu Zeme pritom vznikajú prúdenia vzostupné a zostupné, pričom vznikajú v troposfére víry.

V určitých prípadoch môžu v troposfére vznikáť oblasti, v ktorých teplota vzduchu rastie so zväčšovaním výšky. Tento jav sa nazýva teplotná inverzia. Inverzia môže vznikáť rôznym spôsobom, napr. premiestnením teplého vzduchu teplejších oblastí nad zasnežený zemský povrch alebo sponad pevniny nad chladnejšie more.

V izotermickej troposfére klesá tlak s výškou podľa vzťahu

$$p = p_0 e^{-\frac{MgH}{RT}}, \quad (3.1)$$

kde p_0 je tlak na hladine mora, $M = 29,7$ je mólová hmotnosť vzduchu v $[\text{kgmol}^{-1}]$, g je tiažové zrýchlenie v $[\text{ms}^{-2}]$, $R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Jkmol}^{-1}\text{K}^{-1}$ je univerzálna plynová konštanta, H je nadmorská výška, e je absolútna vlhkosť vzduchu a T je teplota v $[\text{K}]$.

Šírenie elektromagnetických vln v troposfére do značnej miery závisí od meteorologických podmienok. Ich vplyv sa prejaví ako lom, rozptyl a tlmenie elektromagnetických vln. Pre popis vplyvu meteorologických podmienok na šírenie elektromagnetických vln musíme predovšetkým určiť vzťahy medzi elektrickými a meteorologickými parametrami troposféry.

1.2. Index lomu troposféry

Vznik lomu (refrakcie) je spojený s priestorovými zmenami elektrickej permitivity prostredia, v ktorom sa šíria elektromagnetické vlny. Relatívny index lomu vzduchu sa len málo líši od jednotky (stredná hodnota pri povrchu Zeme je $n = \sqrt{\varepsilon_r} \approx 1,000325$). Ukazuje sa však, že aj veľmi malé zmeny indexu lomu

troposféry, spojené so zmenou výšky, majú praktický význam. V praxi sa častejšie používa tzv. súčiniteľ lomu N definovaný vzťahom

$$N = 10^6(n-1) . \quad (3.2)$$

Súčiniteľ lomu závisí od teploty, tlaku a vlhkosti vzduchu

$$N = 10^6(n-1) = \frac{77,6}{T} \left(p + \frac{4810e}{T} \right) , \quad (3.3)$$

kde e je absolútna vlhkosť vzduchu. Derivovaním vzťahu (3.3) môžeme vyjadriť výškovú zmenu súčiniteľa lomu vzťahom

$$\frac{dN}{dH} = 77,6 \left[\frac{1}{T} \frac{dp}{dH} - \left(\frac{p}{T^2} + 9620 \frac{e}{T^3} \right) \frac{dT}{dH} + \frac{4810}{T^2} \frac{de}{dH} \right] . \quad (3.4)$$

So zväčšovaním výšky tlak klesá a gradient tlaku len málo závisí od meteorologických podmienok. Gradient teploty a gradient vlhkosti sú však citlivé na zmeny meteorologických podmienok a môžu meniť i svoje znamienko (smer) – napr. pri inverzii.

Vzhľadom na značné a časté zmeny meteorologických podmienok matematický popis vplyvu troposféry na šírenie elektromagnetických vln je možný iba za určitých definovaných podmienok. Takáto idealizovaná troposféra sa nazýva štandardná troposféra. Podľa CCIR súčiniteľ lomu štandardnej troposféry je daný vzťahom

$$N(H) = 289e^{-0,136H} , \quad (3.5)$$

kde H je nadmorská výška, $H[km]$.

Pretože súčiniteľ lomu závisí od výšky H , trajektórie lúčov elektromagnetických vln v priblížení geometrickej optiky nie sú priamky. Ich tvar možno vo všeobecnosti určiť pomocou rovnice eikonalu v tvare

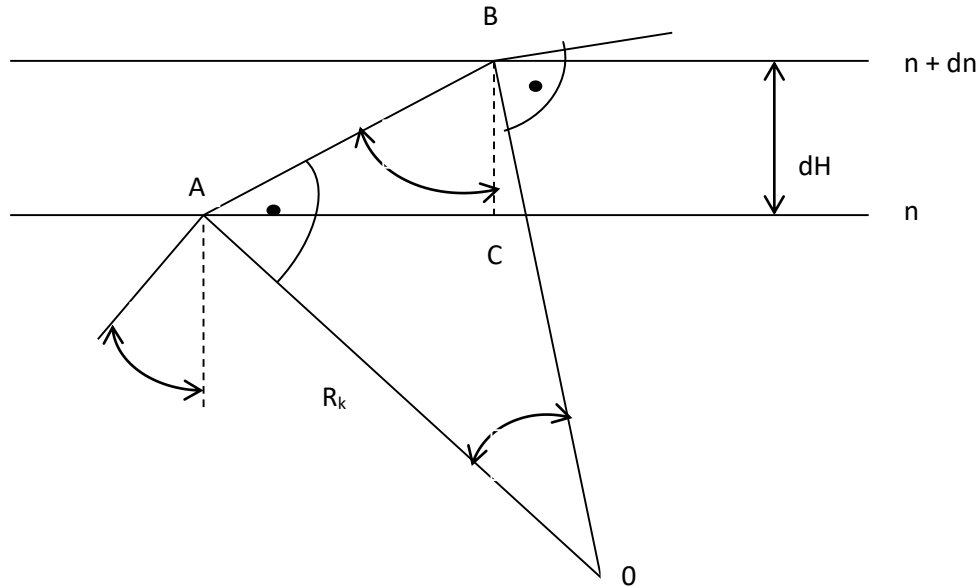
$$\left| \nabla \vec{A} \right| = n . \quad (3.6)$$

Polomer zakrivenia trajektórie však môžeme určiť aj jednoduchšie, ak predpokladáme, že troposféra sa skladá z rovinných vrstiev s konštantnými N . Uvažujme dve také vrstvy vzdialené o dH (Obr. 3.1). Index lomu dolnej vrstvy je n , hornej $n + dn$. Lúč dopadajúci na dolnú vrstvu pod uhlom φ zmení na dráhe dH svoj smer, takže na hornú dopadne pod uhlom $\varphi + d\varphi$. Hľadaný polomer krivosti môžeme potom vyjadriť v tvare

$$R_K = \frac{\overline{AB}}{d\varphi} . \quad (3.7)$$

Z trojuholníka ABC dostaneme

$$\overline{AB} = \frac{dH}{\cos(\varphi + d\varphi)} \approx \frac{dH}{\cos \varphi} . \quad (3.8)$$



Obr. 1.1: Určenie polomeru krivosti lúča

Potom polomer krivosti má tvar

$$R_K = \frac{dH}{\cos(\varphi \cdot d\varphi)} . \quad (3.9)$$

Podľa Snellovho zákona lomu pre každé rozhranie platí

$$n \sin \varphi = (n + dn) \sin(\varphi + d\varphi) . \quad (3.10)$$

Vzťah (3.10) môžeme upraviť na tvar

$$n \sin \varphi \approx n \sin \varphi + n \cos \varphi d\varphi + \sin \varphi dn , \quad (3.11)$$

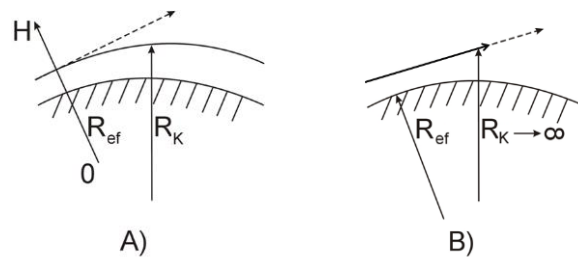
kde sme zanedbali členy s druhou mocninou diferenciálov. Zo vzťahu (3.11) vyjadríme súčin $\cos \varphi d\varphi$ a dosadíme do vzťahu (3.9). Potom pre polomer krivosti platí

$$R_K = - \frac{n}{\frac{dn}{dH} \sin \varphi} . \quad (3.12)$$

Vo vzťahu (3.12) bez podstatného vplyvu na presnosť výpočtu môžeme predpokladať $n \approx 1$. Okrem toho pre malé elevačné uhly $\gamma = (\pi/2 - \varphi) \rightarrow 0$ platí $\sin \varphi \approx 1$. Potom pre polomer krivosti platí

$$R_K \approx -\frac{1}{\frac{dn}{dH}} = -\frac{10^6}{\frac{dN}{dH}} . \quad (3.13)$$

Zo vzťahu (3.13) vidíme, že polomer krivosti lúča nezávisí od absolútnej hodnoty indexu lomu, ale závisí od jeho prírastku so zmenou výšky. R_K môže byť kladné len vtedy, keď index lomu s narastajúcou výškou klesá, t.j. $dn/dH < 0$. Takéto zakrivenie lúča sa nazýva kladná refrakcia a je znázornené na obrázku (Obr. 3.2). Čiarkovane je znázornená priamková trajektória, ktorá zodpovedá priblíženiu homogénneho prostredia ($n = \text{konšt.}$). Kladná refrakcia efektívne zväčšuje oblasť priamej viditeľnosti antén.



Obr. 1.2: Kladná refrakcia nad skutočným zemským povrchom (A) a nad zemským povrchom s efektívnym polomerom krivosti (B)

Vplyv troposférického lomu na šírenie elektromagnetických vln možno zahrnúť do interferenčných vzťahov a v niektorých prípadoch aj do difrakčných vzťahov odvodených v 2. kapitole zavedením tzv. efektívneho polomeru Zeme R_{ef} (Obr. 3.2B). Efektívny polomer krivosti Zeme možno použiť vtedy, keď gradient indexu lomu nazávidí od výšky, t.j.

$$\frac{dn}{dH} = \text{konst.} \quad (3.14)$$

relatívne zakrivenie lúča a zemského povrchu je definované ako $(1/R) - (1/R_K)$, preto pre efektívny polomer R_{ef} musí platiť

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_K} = \frac{1}{R_{ef}} - \frac{1}{\infty} \quad (3.15)$$

a potom dostávame

$$R_{ef} = \frac{R}{1 - \frac{R}{R_K}} . \quad (3.16)$$

Ak dosadíme do vzťahu (3.16) vzťah (3.13), dostaneme pre efektívny polomer R_{ef} vzťah

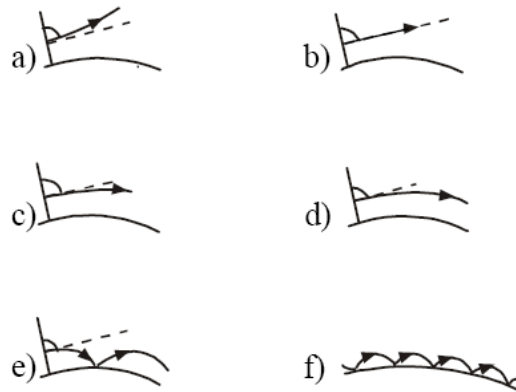
$$R_{ef} = \frac{R}{1 - R \frac{dN}{dH} 10^6} . \quad (3.17)$$

Pre štandardnú troposféru platí

$$R_K \approx \frac{10^6}{4 \cdot 10^{-2}} = 25000 km \quad (3.18)$$

$$R_{ef} \approx 8500 km \quad (3.19)$$

$$k = \frac{R_{ef}}{R} \approx \frac{4}{3} . \quad (3.20)$$



Obr. 1.3: Základné druhy troposférického lomu: záporný lom (a), nulový lom (b), kladný lom (c), kritický lom (d), superrefrakcia (e, f)

Podľa gradientu (dn/dH) rozlišujeme niekoľko (5) základných druhov troposférického lomu:

1. *Záporný lom* (označenie A) nastáva pre (dN/dH) > 0 (Obr. 3.3a). Lúč sa odchyľuje od povrchu Zeme, dochádza k zmenšeniu priamej viditeľnosti antén; $R_{ef} < R$; $R < 0$.

2. *Nulový lom* (označenie B) nastáva pre (dN/dH) = 0 (Obr. 3.3b). Lúč sa šíri po priamke, priama viditeľnosť antén sa nemení; $R_{ef} = R$; $R_k = \infty$.

3. *Kladný lom* (označenie C) nastáva pre (dN/dH) < 0 (Obr. 3.3c). Lúč sa "prichyľuje" k povrchu Zeme, priama viditeľnosť antén sa zväčšuje; $R_{ef} > R$; $R > 0$.

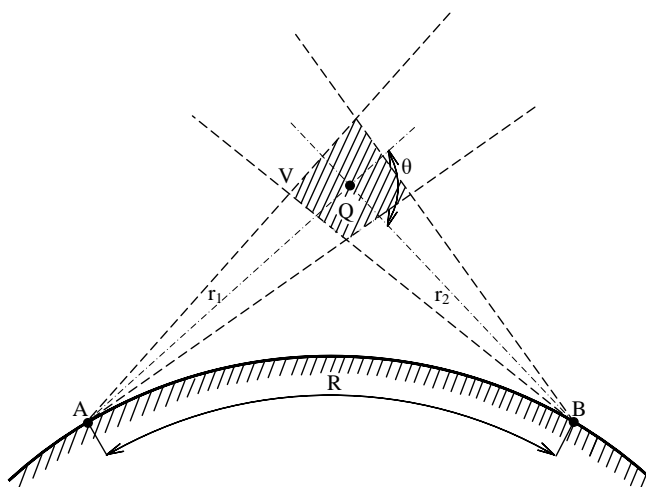
4. *Kritický lom* (označenie C₄) nastáva pre (dN/dH) = -0,157. Lúč kopíruje zakrivenie zemského povrchu; $R_{ef} = \infty$; $R = 6,37 \cdot 10^6 m$.

5. *Superrefrakcia* (označenie C_s) nastáva pre $(dN/dH) < -0,157$. Príčinou jej vzniku je najčastejšie teplotná inverzia. Lúč sa vracia späť k zemskému povrchu a mnohonásobne sa od neho odráža (Obr. 3.3d,e), t. j. elektromagnetická vlna sa šíri tzv. vlnovodovým kanálom; $R_{ef} \ll 0; R \ll 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$. Superrefrakcia umožňuje šírenie elektromagnetických vln na veľké vzdialenosti (ďaleko za oblasť priamej viditeľnosti). Praktické využitie tohto spôsobu šírenia je však obmedzené pre jeho zriedkavý výskyt. Môže však byť príčinou rôznych rušení diaľkovým príjmom.

1.3. Rozptyl elektromagnetických vln v troposfére

Praktické skúsenosti ukazujú, že v troposfére existujú chaotické turbulentné prúdenia vzduchu. Tieto prúdenia majú vplyv na lokálny súčiniteľ lomu, takže závislosť súčiniteľa tlmenia od výšky (tzv. profil súčiniteľa tlmenia) vykazuje fluktuácie. Tieto fluktuácie sú príčinou rozptylu elektromagnetických vln šíriacich sa v troposfére, ktorý umožňuje diaľkové spojenie pomocou veľmi krátkych vln.

Predpokladajme, že vysielač a prijímač sú umiestnené v bodoch A a B v blízkosti zemského povrchu (Obr. 3.4).



Obr. 1.4: Šírenie elektromagnetických vln troposférickým rozptylom

Označme V tú časť troposféry, ktorá je viditeľná súčasne z bodov A, B a ktorá sa zúčastňuje na procese vzniku rozptýlenej vlny. Každý element objemu vnútri oblasti V ožiarený vysielačou anténou sa stáva sekundárnym zdrojom žiarenia. Energia dopadajúca na prijímačiu anténu je výsledkom pôsobenia všetkých sekundárnych zdrojov v objeme V . hustota toku energie v bode Q vo vnútri objemu V je popísaná vzťahom

$$S_Q = \frac{P_m}{4\pi r_1^2}, \quad (3.21)$$

kde P_m je ekvivalentný výkon vyžiarený v smere bodu Q , r_1 je vzdialenosť vysielačej antény od bodu Q ($r_1 = AQ$). Označme $\sigma(\theta)$ plochu rozptyľujúcu energiu v smere prijímačej antény elementu troposféry dV so stredom v bode Q . Potom hustota toku energie vytvorená týmto elementom v bode B je

$$dS_B = \frac{P_m \sigma(\theta)}{(4\pi r_1 r_2)^2} dV, \quad (3.22)$$

kde $r_2 = QB$ je vzdialenosť bodu Q od prijímacej antény. Výkon dodávaný prijímacej anténe elementom objemu v bode Q vypočítame ako súčin hustoty toku energie dS_B a efektívnej plochy prijímacej antény A_2

$$dP_2 = \frac{P_m A_2 \sigma(\theta)}{(4\pi r_1 r_2)^2} dV. \quad (3.23)$$

Pre výpočet výkonu dodávaného prijímacej anténe celým objemom V je potrebné vzťah (3.23) integrovať. Ak je smerovosť antény veľká (a v praxi sa stretávame najčastejšie s takýmto prípadom), potom môžeme pre všetky body Q predpokladať

$$r_1 = r_2 = \frac{R}{2}, \quad (3.24)$$

t.j. predpokladať, že plocha $\sigma(\theta)$ sa nemení. Okrem toho ekvivalentný výkon vyžarovaný vysielačou anténou je približne rovnaký pre celý objem V a rovná sa súčinu výkonu vysielača P_V a energetického zisku G_1 . Podobne môžeme predpokladať, že sa nemení ani efektívna plocha prijímacej antény. Ak vyjadríme plochu A_2 pomocou energetického zisku prijímacej antény G_2 , dostaneme pre výkon dodávaný do prispôbeného prijímača

$$P_2 = \frac{P_N G_1 G_2 \lambda^2 V \sigma(\theta)}{4\pi^3 R^4} P_2 = \frac{P_N G_1 G_2 \lambda^2 V \sigma(\theta)}{4\pi^3 R^4} dV. \quad (3.25)$$

Ak by sa elektromagnetické vlny šírili vo voľnom priestore, potom vo vzdialenosti R (Obr. 3.4) by výkon dodávaný do prijímača bol

$$P_{02} = \frac{P_N G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi)^2 R^2}. \quad (3.26)$$

Môžeme preto použiť pojem činiteľa tlmenia W a vyjadriť výkon dodávaný do prijímača v podmienkach troposférického rozptylu

$$P_2 = P_{02} W^2. \quad (3.27)$$

Porovnaním vzťahov (3.27) a (3.25) s využitím vzťahu (3.26) môžeme vzťah pre činiteľ tlmenia pri rozptyle elektromagnetických vln v troposfére napísať v tvare

$$W = \frac{2}{R} \sqrt{\frac{V \sigma(\theta)}{\pi}}. \quad (3.28)$$

Efektívnu rozptyľujúcu plochu $\sigma(\theta)$ možno vyjadriť v tvare

$$\sigma(\theta) \approx \frac{4\pi^2 \lambda}{\theta^5} \left(\frac{dN\Sigma}{dH} - \frac{dN\Sigma}{dH} \right)^2. \quad (3.29)$$

Objem V môžeme za predpokladu, že antény sú rovnaké, vyjadriť pomocou jednoduchých geometrických vzťahov

$$V \approx \frac{1}{8} a R^2 \alpha_V^2 \alpha_H^2, \quad (3.30)$$

kde α_V, α_H sú uhly polovičného výkonu smerovej charakteristiky v rovine vertikálnej, resp. horizontálnej.

Rozptyl veľmi krátkych vln v troposfére je spojený s kolísaním (fluktuáciami) prenášaných signálov. Pozorujeme fluktuácie rýchle (trvajúce minúty, sekundy a zlomky sekúnd) i fluktuácie pomalé (hodinové až mesačné). Príčinou pomalých fluktuácií intenzity elektrického poľa sú regulárne (napr. sezónne) a náhodné zmeny meteorologických podmienok, špeciálne zmeny stredného gradientu indexu lomu a turbulentných procesov v troposfére. Pri popise podmienok pre príjem signálov šíriacich sa troposférickým rozptylom je preto nutné používať štatistické metódy. Je experimentálne overené, že pomalé zmeny intenzity elektrického poľa možno najlepšie popísať pomocou logaritmicke – normálneho rozdelenia, na druhej strane rýchle zmeny sa riadia Raileighovým rozdelením.

Štatistický vzťah medzi fluktuáciami intenzity elektrického poľa v dvoch rôznych bodoch priestoru sa vyjadruje pomocou priestorovej korelačnej funkcie $\rho(R)$. Fluktuácie pozorované v dostatočne vzdialených bodoch sú štatisticky nezávislé, pretože rozptýlené vlny prichádzajúce do týchto bodov pochádzajú z rôznych oblastí troposféry, v ktorých náhodné zmeny indexu lomu nie sú štatisticky korelované. Priestorová korelačná funkcia je preto klesajúcou funkciou vzdialenosti. Fluktuácie považujeme za štatisticky nezávislé, keď priestorová korelačná funkcia klesne pod hodnotu

$$\rho(R) \leq \frac{1}{e} \approx 0,37. \quad (3.31)$$

Vzdialenosť R_m , pri ktorej vo vzťahu (3.31) nastáva rovnosť, nazývame polomerom priestorovej korelácie fluktuácií. Vo všeobecnosti R_m nepresahuje obvykle niekoľko desiatok vlnových dĺžok.

Táto skutočnosť sa využíva pre zlepšenie podmienok príjmu rádiových signálov. Ak pre príjem použijeme dve antény vzdialené od seba o viac ako R_m , potom fluktuácie signálov v týchto anténach budú štatisticky nezávislé. Označme $p(E)$ pravdepodobnosť, že intenzita elektrického poľa v mieste antény je menšia ako E . Pravdepodobnosť súčasného poklesu intenzity elektrického poľa v obidvoch prijímacích anténach je potom $p^2(E)$, čo je omnoho menšie ako pre jednu anténu (zvlášť keď $p(E) \ll 1$).

Ak sa zaujímate o fluktuácie dvoch signálov s rôznymi frekvenciami, možno tvrdiť, že pri veľkom rozdieli frekvencií Δf sú tieto fluktuácie štatisticky nezávislé. Pre popis štatistických vzťahov medzi fluktuáciami dvoch signálov s rozdielnymi frekvenciami definujeme frekvenčnú korelačnú funkciu fluktuácií $\rho(\Delta f)$. Frekvenčný odstup Δf_m , pri ktorom

$$\rho(\Delta f) = \frac{1}{e} \quad (3.32)$$

nazývame odstupom frekvenčnej korelácie fluktuácií (3.32).

Odstránenie frekvenčnej korelácie signálov, ktoré sa líšia o frekvencie

$$\Delta f \gg \Delta f_m \quad (3.33)$$

má dvojaký význam pre prácu rádiokomunikačných systémov. Na jednej strane sa využíva pre zlepšenie podmienok príjmu (podobne ako odstránenie priestorovej korelácie), na druhej strane odstup korelácie Δf_m určuje šírku frekvenčného pásma, ktoré možno preniesť bez skreslenia. Ak šírka frekvenčného pásma prenášaného signálu je menšia ako Δf_m , potom fluktuácie jednotlivých zložiek signálu sú silne korelované a nedochádza k jeho skresleniu. Ak však šírka pásma omnoho prevyšuje Δf_m , potom fluktuácie jednotlivých spektrálnych zložiek signálu nie sú korelované a signál je silne skreslený. Prostredie, v ktorom sa šíri signál, má teda určité "frekvenčné pásmo priepustnosti" ohraničujúce prípustnú šírku pásma signálu.

1.4. Tlmenie elektromagnetických vln v troposfére

Doteraz sme skúmali vplyv troposféry na šírenie elektromagnetických vln s uvážením jej nehomogénosti. Tento vplyv sa prejavoval zakrivením trajektórie (lúča) a rozptylom. Pritom sme predpokladali, že troposféra je priehľadná pre elektromagnetické vlny, t.j. má nulové tlmenie. Bohatý experimentálny materiál získaný pri využití rádiových spojov v širokom frekvenčnom rozsahu ukazuje, že tento predpoklad je oprávnený pre všetky meteorologické podmienky len pre elektromagnetické vlny s vlnovou dĺžkou $\lambda > 10\text{cm}$. Kratšie elektromagnetické vlny sa v troposfére šíria s tlmením, ktoré pri niektorých meteorologických podmienkach môže byť také veľké, že bráni nadviazaniu rádiového spojenia.

Rozlišujeme štyri druhy tlmenia elektromagnetických vln v troposfére: 1. tlmenie spôsobené atmosférickými zrážkami (dážď, hmla, sneh), 2. molekulárna absorpcia, 3. rozptyl na časticiach, 4. tlmenie v pevných čistočkách (prach, dym a pod.). Posledné dva druhy tlmenia majú význam len pre najkratšie vlny patriace do pásma viditeľného svetla.

Tlmenie vplyvom atmosférických zrážok. Možno rozlíšiť dve príčiny tlmenia elektromagnetických vln kvapôčkami vody: a) Kvapku vody môžeme považovať za polovodivé prostredie, v ktorom elektromagnetická vlna indukuje prúdy, ktorých hustota pri veľmi vysokých frekvenciách môže byť veľká. Straty energie spôsobené týmito prúdmi prispievajú k tlmeniu. b) Prúdy indukované v kvapkách vody sú zdrojmi sekundárneho žiarenia, spôsobujúcimi rozptyl elektromagnetických vln, pričom intenzita poľa klesá podobne ako pri absorpcii.

Molekulárna absorpcia. Elektromagnetické vlny s vlnovou dĺžkou $\lambda < 1,5\text{cm}$ pôsobia priamo na jednotlivé častice (molekuly) plynov, z ktorých je zložená troposféra. Energia elektromagnetickej vlny sa spotrebúva na vybudenie atómov a molekúl plynu do stavov s vyššou energiou. Pretože dovolené hladiny energie sú diskrétné, uvedené javy majú rezonančný (selektívny) charakter. Najväčší význam majú molekuly kyslíka (O_2) a vodné pary. Pre kyslík existujú lokálne maximá tlmenia pri vlnových dĺžkach 0,5 cm a 0,25 cm, pre vodné pary – 1,35 cm, 1,5 mm a 0,75 mm. Tlmenie spôsobené absorpciou molekulami (O_2) je približne

konštantné (pre danú frekvenciu), tlmenie spôsobené vodnými parami veľmi závisí od vlhkosti vzduchu, preto sa často mení.