

6.3. PROPAGAREA UNDELOR ELECTROMAGNETICE ÎN SISTEMELE DE COMUNICAȚII PRIN SATELIȚI

6.3.1. Pierderile de putere în sistemele de comunicații cu sateliți

6.3.1.1. Aspecte generale

În §6.1.1.2 s-au dedus expresiile bilanțului energetic al unei legături de comunicație cu satelitul pe un tronson sub forma generală (6.8') reprodusă mai jos:

$$P_R = \frac{\eta P_E G_E G_R}{a \cdot a_a}; \quad P_{R(\text{dB})} = P_{E(\text{dB})} + G_{E(\text{dB})} + \eta_{(\text{dB})} + G_{R(\text{dB})} - a_{(\text{dB})} - a_{a(\text{dB})} \quad (6.68.a)$$

$$P_E = \frac{a P_R \cdot a_a}{\eta G_E G_R}; \quad P_{E(\text{dB})} = P_{R(\text{dB})} - G_{E(\text{dB})} - \eta_{(\text{dB})} - G_{R(\text{dB})} + a_{(\text{dB})} + a_{a(\text{dB})} \quad (6.68.b)$$

Prima relație arată puterea recepționată pentru o putere de emisie dată iar a doua indică puterea de emisie necesară pentru realizarea unei puteri la receptor date.

Termenii G_E , η , G_R , a sunt "structurali": G_E , η , G_R sunt independenți de timp, a este independent de timp (sateliți geostaționari) sau cu variație în timp cunoscută (sateliți sub-sincroni).

Atenuarea în atmosferă a_a , variază aleator în timp pentru un receptor dat, de la zero în atmosferă ideală (limpede) până la zeci de **dB**. Ca urmare, nivelul semnalului recepționat suferă modificări, fluctuații: rapide, numite *scintilații* (scintillatios) și lente - atenuări (fades).

La acestea se adaugă fenomenul numit *depolarizare* cauzat de rotirea planului de polarizare al oscilațiilor UEM la trecerea prin medii ionizate (efect Faraday) și prin zone cu ploaie și cristale de gheață.

Atenuarea și depolarizarea sunt cauzate de interacțiunea UEM cu particulele componente ale atmosferei: electroni și ioni liberi, atomi și molecule, vapori de apă, picături de apă (ploaie, ceață), particule de gheață, particule în suspensie (fum, freon, ...) etc. Aceste interacțiuni depind mult de frecvența UEM, devenind deosebit de intense peste **10GHz**, cu excepția efectului Faraday. De fapt, **10GHz** este adesea considerată o limită difuză (imprecisă, largă) în legătură cu propagarea UEM în atmosferă: se tratează separat propagarea UEM cu frecvențe sub și peste **10GHz**.

Cele mai multe probleme apar pe tronsonul descendent (down-link) deoarece puterea de emisie a satelitelui este drastic limitată.

Pentru sistematizare, cauzele fluctuațiilor de nivel la recepție se vor împărți în două categorii: efecte de propagare care nu se datorează precipitațiilor și efecte produse de precipitații; depolarizarea se va discuta separat. De asemenea, se vor discuta și consecințele efectului Doppler.

6.3.1.2. Atenuări în atmosferă datorate absorbției și reflexiilor

Atenuări datorate absorbției moleculare

O parte din energia UEM este absorbită de moleculele diverselor gaze și de apă (vapori) din atmosferă. La anumite frecvențe apar fenomene de rezonanță și absorbția crește foarte mult. Cercetările au arătat că:

- absorbții de rezonanță cu moleculele de apă (vapori) apar la circa **22.235GHz**;
- absorbții de rezonanță cu moleculele de oxigen apar între **56.5GHz** și **65.2GHz**;
- alte absorbții de rezonanță apar la peste **100GHz**.

În afara frecvențelor de rezonanță absorbțiile pot fi neglijate, cauzând atenuări sub **1dB**.

Evident, frecvențele de rezonanță sunt cu mare grijă evitate.

Scintilații ionosferice

La unghiuri de elevație mici (ε , fig. 6.6), UEM parcurg trasee foarte lungi în ionosferă, zonă cu mari concentrații de electroni liberi și în general turbulentă. În ionosferă se produc variații rapide ale indicelui de refracție și ca urmare direcțiile de propagare se modifică. Ca urmare, antenele fiind directive, se modifică câștigul pe direcția unde, deci nivelul semnalului recepționat. Altă consecință a modificării direcției de propagare constă în apariția interferențelor între oscilații defazate (care au parcurs drumuri diferite) cu consecințe în variații ale amplitudinii și fazei oscilației la receptor. Turbulența ionosferică determină și variații rapide ale absorbției de energie. Consecința acestor fenomene este că puterea semnalului demodulat prezintă variații rapide, *scintilații ionosferice* de **x0.1dB**. Aceste scintilații sunt cu atât mai mari cu cât antenele sunt mai directive și unghiurile de elevație mai mici.

Ca urmare, se evită recepția sub elevații mici sau se realizează proiecte speciale.

Atenuări datorate interferențelor cu unde reflectate și reflectate multiplu

La elevații mari, apar interferențe cu unde reflectate pe neregularitățile terenului. În cazul stațiilor fixe, efectele sunt evitate prin plasare potrivită și utilizarea unor antene de recepție foarte directive. Altfel se pune problema în cazul sistemelor cu sateliți lucrând în banda de **4GHz** pentru comunicații cu nave maritime și receptoare mobile; acestea utilizează antene mici, cu directivitate redusă.

Problemele legate de reflexii au fost tratate pe larg în cap. 2 și în §6.6. pentru cazul sistemelor de radiorelee și concluziile se pot aplica, cel puțin calitativ – iar pentru semnale utile analogice și cantitativ, în cazul sistemelor cu sateliți (când se transmit date aprecierile cantitative diferă).

În general, în cazul elevațiilor mari, efectele absorbțiilor moleculare și reflexiilor nu sunt deosebit de importante. Mult mai importante sunt efectele precipitațiilor și depolarizării.

6.3.1.3. Efectul Faraday. Depolarizare

Aspecte principale privind polarizarea UEM.

Se știe că UEM sunt emise întotdeauna polarizat, liniar (plan) sau eliptic (în particular circular). Polarizarea este specifică undelor transversale (în orice punct oscilația se face în plan perpendicular pe direcția de propagare). Polarizarea este legată de modul în care direcția de oscilație se modifică în timp.

În cazul *polarizării liniare* a UEM vectorul câmp electric \vec{E} oscilează în fiecare

punct de pe direcția de propagare pe o direcție constantă în timp. Dacă UEM se propagă în vid sau în mediu omogen și izotrop fără sarcini libere, oscilația se face pe aceeași direcție în orice punct de pe direcția de propagare – fig. 6.37. Aceasta se întâmplă practic în atmosfera de joasă altitudine.

Polarizare eliptică înseamnă că într-un punct vectorul câmp electric \vec{E} oscilează pe direcții care se modifică în timp, vârful său descriind o elipsă. Pentru înțelegere, se consideră o antenă în O , punct în care oscilația se face cu amplitudinea E , după o direcție cu unghiul α față de Oz . Evident, se poate considera propagarea celor 2 oscilații perpendiculare între ele, care în origine sunt:

$$e_{z0}(t) = E_{z0} \cos \omega t = E \cos \alpha \cdot \cos \omega t, \quad e_{y0}(t) = E_{y0} \cos \omega t = E \sin \alpha \cdot \cos \omega t$$

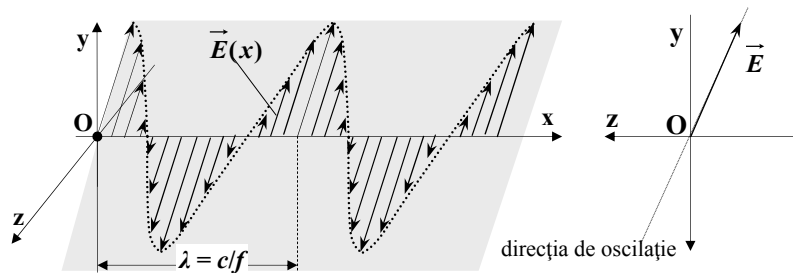


Fig. 6.37. Undă cu polarizare liniară nemodificată (Ox - direcția de propagare) (Sistemul de axe poate fi ales cu o axă pe direcția de oscilație, de polarizare)

În anumite medii, anizotrope, condițiile de propagare sunt diferite, în funcție de direcția de oscilație. De exemplu, vitezele de propagare diferă: v_1 pentru oscilația pe Oz și v_2 pentru oscilația pe Oy. Urmarea este că într-un punct M , la distanța x de sursă, oscilațiile au faze diferite, sunt defazate cu $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \omega(x/v_2 - x/v_1)$ (oscilația pe Oz – origine de fază) și deci:

$$e_{z_M}(t) = E_{z_M} \cos \omega t, \quad e_{y_M}(t) = E_{y_M} \cos(\omega t - \varphi)$$

Rezultanta este ușor de aflat în cazul particular cu $E_{z_M} = E_{y_M} = E$ și $\varphi = \pi/2$ sau $3\pi/2$. Pentru $\varphi = \pi/2$ (fig. 6.38.a) se poate scrie: $e_{z_M}(t) = E \cos \omega t$ și $e_{y_M}(t) = E \cos(\omega t - \pi/2) = -E \sin \omega t$. Oscilația rezultantă este constantă în orice moment dar direcția de oscilație se rotește cu viteza ω ; vectorul descrie un cerc. Pentru $\varphi = 3\pi/2$ vectorul se rotește în sens opus (fig. 6.38.b).

Calitativ, se înțelege că dacă amplitudinile pe Oy și Oz nu sunt egale, vectorul rezultat descrie o elipsă (calculul matematic, fără să fie dificil, ocupă mult spațiu). Elipsa este încadrată într-un dreptunghi cu laturile semiaxele elipsei pentru $\varphi = \pi/2$ iar axa mare este înclinată față de Oz cu un unghi dependent de φ . Viteza de rotație nu este constantă. Se va observa că pentru $\varphi = k\pi$ ($k = 0, 1, \dots$) elipsa (cercul) degenează într-o dreaptă.

Ionosfera, pătura situată între circa 100km și 400km altitudine, este un mediu neomogen și anizotrop, cu mare densitate de purtători liberi (plasmă) și în care acționează câmpul magnetic terestru, slab dar nenegligabil. Acest câmp imprimă electronilor o componentă eliptică a mișcării, suprapusă peste agitația dezordonată, conferind mediului caracterul anizotrop.

O UEM care intră într-un asemenea mediu, se descompune în două unde polarizate eliptic în sensuri opuse, care se propagă cu viteze diferite; acesta este fenomenul de *birefrință*. Cauza fenomenului constă în faptul că plasma în câmp magnetic terestru prezintă indici de refracție ($n = \sqrt{\epsilon_r}$) diferiți pentru câmp electric cu direcții de oscilație diferite.

Ca urmare, când cele două unde polarizate eliptic în sensuri opuse ies din ionosferă sunt defazate și oscilația rezultantă într-un punct este polarizată liniar dar pe o direcție diferită de aceea pe care o avea la intrarea în mediu. Rezultatul este că direcția (planul) de polarizare al undei se rotește cu un unghi dependent de distanța parcursă în ionosferă – acesta este *fenomenul Faraday*. (Rezultanta a două oscilații cu aceeași frecvență polarizate eliptic în sensuri opuse este o oscilație polarizată liniar.)

Necorespondența dintre planul de polarizare al undei și al antenei receptoare determină pierderi de putere de semnal recepționat (teoretic, dacă unghiul celor două polarizări este $\pi/2$, semnalul recepționat este nul). Rotația Faraday depinde de frecvență: este mai mare la 2-4GHz și mai mică la 10-12GHz. La 4 – 6GHz, rotația medie este de 1-2°, ceea ce este mult; maximele ajung la 6 – 8° determinând pierderi de putere de cca 20dB.

În principiu, rotația Faraday ar putea fi compensată prin rotirea polarizării antenei. Din cauză că proprietățile ionosferei se modifică mult și frecvent, procedeul nu prea dă rezultate.

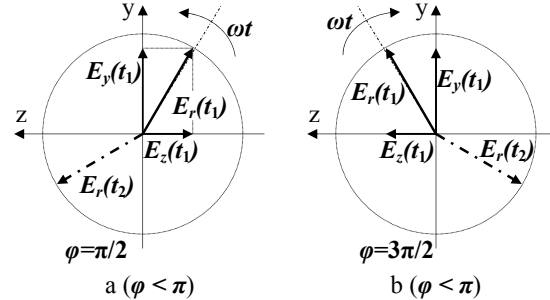


Fig. 6.38. Polarizarea circulară

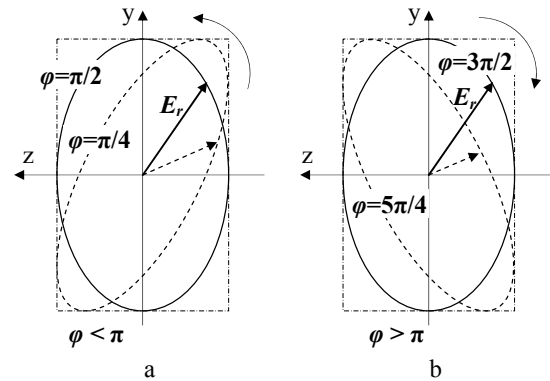


Fig. 6.39. Polarizarea eliptică

Un efect și mai neplăcut al rotației Faraday constă în *depolarizare*.

Unde EM polarizate liniar pe direcții ortogonale se pot transmite cu același reflector excitat de iluminatori potriviți: unul (V) pentru polarizare pe Oy (verticală) și altul (H) pentru polarizare pe Oz (orizontală) – fig. 6.40. La receptor, iluminatorul V recepționează, ideal, numai undele polarizate pe Oy (vertical) iar cel pe H numai undele polarizate pe Oz (orizontal). În situații reale, o parte a puterii transmise cu polarizare V este recepționată de iluminatorul H și invers – transmisiile nu sunt perfect “izolate” chiar în condiții de propagare foarte bune.



Fig. 6.40. Transmisie cu unde polarizate ortogonale.
Depolarizarea undelor la receptor

În situațiile reale apar rotații ale direcțiilor de polarizare, cauzate de fenomenul Faraday și de efectele precipitațiilor. Ca urmare, la receptor cele două oscilații nu mai sunt ortogonal polarizate – se spune că sunt *depolarizate* (fig. 6.40).

O soluție a problemei depolarizării constă în utilizarea a două unde polarizate circular în sensuri opuse. În acest caz însă, se complică sistemele de excitație a antenelor, deoarece undele polarizate circular trebuie obținute în circuite înaintea iluminării.

6.3.1.4. Efectele precipitațiilor

Precipitațiile – ploaia, într-o măsură cristalele de gheață de la altitudini mari și zăpada, influențează propagarea UEM. Această influență este destul de redusă dar neneglijabilă la frecvențe sub 10GHz și devine esențială la peste 10GHz.

Local, pe arii restrânse, ploaia se caracterizează:

- pe termen scurt, prin *intensitate R* (rainfall rate), adică înălțimea stratului de apă colectat în unitatea de timp. *R* se exprimă în **mm/oră** (la o ploaie slabă $R = 0.25\text{mm/oră}$, la una intensă $R = 20\text{mm/oră}$; valorile peste **100mm/oră** apar rar, pe durate scurte);
- pe termen lung, prin procentul de timp dintr-un an în care se realizează *R* mai mare decât o valoare dată – aceasta se numește *probabilitatea de distribuție cumulativă* sau *curba excedentului*;
- prin cantitatea totală de apă colectată într-un an (media pe mulți ani).

Global, pe arii largi (țări, continente), ploaia se caracterizează prin curbe de egală intensitate și egală probabilitate. Mai exact, pe hartă se trasează curbe care unesc punctele în care o intensitate dată (10mm/h, 20mm/h, ...) depășește un procent de timp pe an (de exemplu 0.01%). Aceste curbe sunt rezultatul medierii rezultatelor observațiilor pe mulți ani.

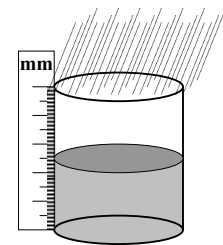


Fig. 6.41. Vas colector pentru măsurarea intensității ploii

Un prim efect al ploii constă în introducerea unei atenuări suplimentare a_{ap} când UEM traversează pe o distanță L o zonă cu ploaie de intensitate R . Numeroase cercetări teoretice și experimentale arată că această atenuare poate fi bine apreciată cu relația:

$$a_{ap} = aR^b L \quad (\text{dB}) \quad (6.69)$$

aR^b este *atenuarea specifică* în dB/km iar R în mm/oră este intensitatea ploii. Coeficienții a și b sunt de obicei dați în tabele (CCIR, Report 564-2, 1982) și diferă puțin în funcție de polarizare (orizontală sau verticală); pentru calcule puțin precise se poate admite:

$$a = \begin{cases} 4.21 \cdot 10^{-5} f^{2.42} & 2.9 \leq f \leq 54 \text{ GHz} \\ 4.09 \cdot 10^{-2} f^{0.699} & 54 \leq f \leq 180 \text{ GHz} \end{cases} \quad b = \begin{cases} 1.41 f^{-0.0779} & 8.5 \leq f < 25 \text{ GHz} \\ 2.63 f^{-0.272} & 25 \leq f < 164 \text{ GHz} \end{cases} \quad (f \text{ în GHz})$$