

Ĝeneralaj trajtoj de elektromagnetaj ondoj kaj radiopropagado

Lenio Marobin, PY3DF

Enkonduko

Radiopropagado estas esprimo uzata por klarigi la sintenon de radio-ondoj dum elsendado de unu loko al alia, ordinaro mezurita ekde la tera supraĵo. Same kiel lumondoj, radio-ondoj suferas la influon de la fenomenoj *reflekto, refrakto, difrakto, absorbo* kaj *disperso*.

Radiopropagado en la tera atmosfero suferas la tagajn ŝanĝojn de la jonigado de la plej supraj tavoloj de la atmosfero fare de la suno. Kompreni la fenomenon de variaj kondiĉoj de radiopropagado havas tre praktikan aplikadon, interalie pri la elekto de kurtondaj frekvencoj por internacia brodkasto, projekti fidindan reton por poŝtelefonoj, aŭ por operatoroj de radaroj. Aliaj faktoroj ankaŭ povas influi propagadon de ondoj de unu loko al alia: de videbla distanco ĝis la horizontlinio aŭ ĝis la jonosfero. Inluas jonosferan radio-signalon intermita E-tavolo¹, disvastiga F-tavolo, jonosferaj tavolo-kliniĝoj kaj suna protoneventoj. Ĉar estas malfacile prognozi radiopropagadon plejofte helpservoj, aviadiloj kaj kelkaj TV-brodkastoj nun uzas satelitajn sendilojn, kiuj povas liveri pli stabilajn komunik-kondiĉojn.

Radio-ondoj je malsamaj frekvencoj propagadas je malsamaj manieroj. La interago de radio-ondoj kun la jonigitaj regionoj de la atmosfero igas la prognozon de radio-ondoj tre malfacila kompare al propagado en la libera spaco. Jonosfera radiopropagado tre intime rilatiĝas al veterkondiĉoj de la atmosfero. Unu klara ekzemplo estas tio, ke subita atmosfera perturbo, aŭ kurtonda fado, povas esti observata dum la x-radioj rezultintaj de suna flagro jonigas la D-Tavolon de la jonosfero. Altiĝo de la jonigado de tiu tavolo pliintensigas la absorbon de radiosignaloj trapasantaj ĝin. Dum tre intensa suna x-radia flagrado tuta aŭ preskaŭ tuta aro da radiosignaloj trapasantaj la jonosferon ĉe la sunigitaj regionoj de la hemisfero povas esti absorbita. Tiuj sunflagroj povas interrompi HF-radiopropagadon kaj fuŝi GPS²-akuratecon.

MODOJ

TERAJ MODOJ – Malaltaj frekvencoj (inter 30 kaj 3000 kHz) kutime sekvas la kurbecon de la tero laŭ la terkrusto. Laŭ ĉi tiu modo, radio-ondoj propagadas per la interago kun la duonkonduktanco de la tera krusto. La ondoj sekvas la surfacon de la terkrusto, kaj sekve iras laŭ la kurbeco de la tero mem. Ĉar la terkrusto ne estas perfekta elektra kondukilo, terondoj rapide malfortiĝas dum ili sekvas la terkruston. La malfortiĝo estas proporcia al la frekvenco uzata, kaj ĉi tiu modo estas utila precipe por LF kaj VLF-frekvencoj.

Nuntempe LF kaj VLF-frekvencoj estas precipe uzataj por horsignaloj kaj por arma komunikado inter ŝipoj kaj submaraj ŝipoj. En la komencaj jaroj komercaj kaj profesiaj radioservoj fidis nur je longaj ondoj, malaltaj frekvencoj kaj surtera propagado. Por eviti intermikson, radio-ondoj kaj sendiloj estis limigitaj al altaj frekvencoj (HF), kiu pruvis esti senutilaj pro la limo de kontakteleco. Post la malkovro de la avantaĝoj de HF por komerca kaj arma uzoj, radioamatoraj eksperimentoj estis limigitaj nur al rajtigataj segmentoj de HF.

REKTA MODO (videbla distanco) – Rekta modo okazas ĉiam, kiam la distanco inter du antenoj estas videbla. Tiu estas la plej ordinara modo de radiopropagado, kaj okazas ĉe VHF kaj pli altaj frekvencoj. Ĉar radiosignaloj povas vojaĝi tra pluraj metalaj objektoj kaj aliaj materialoj radio-ondoj povas trapasi murojn. Ekzemploj estas propagado inter satelitoj kaj teranteno, aŭ ricevado de TV-signaloj el loka TV-sendilo rekte al anteno de TV-aparato de uzanto.

JONOSFERA MODO – Ankaŭ nomata skipo³ ĉi tiu modo dependas de la reflektado de ondoj sur la jonosfero, konsistanta el unu aŭ pliaj jonigitaj tavoloj de la supra atmosfero. F2-tavolo estas la plej grava tavolo por HF-propagado, kvankam F1, E, kaj D-tavoloj ankaŭ havas relativan rolon. Tiuj tavoloj suferas la influon de la suno en tuttaga ciklo aŭ de la sezonoj, dume ankaŭ la 11-jara sunmakula ciklo determinas la utilecon de tiuj modoj. Dum la plej alta sunaktiveco la tuta HF-sekcio ĝis 30 MHz povas esti uzata, kaj F2-propagado ĝis 50 MHz povas esti observata ĉiutage depende de la suna fluo. Dum malalta sunaktiveco propagado en altaj frekvencoj ĝenerale malpliboniĝas. Prognozo de la jonosferaj modoj estas el konsiderinda intereso por radioamatoroj kaj komercaj, maraj aŭ aviadilaj komunikadoj, kaj ankaŭ por kurtondaj brodkastoj.

Meteora reflektado (duŝo) – Meteora reflektado dependas de la altaj jonigitaj aerkolumnoj generataj de meteoroj. Kvankam ĉi tiu modo daŭras mallonge – ofte inter sekundoj kaj kelkaj sekundoj – tamen cifereca (*diĝita*) komunikado per meteora reflektado permesas telekomanditan komunikadon inter stacioj situantaj kelkajn centojn da kilometroj ĝis pli ol 1600 km sen la bezono de satelita konekto. Ĉi tiu modo estas ĝenerale tre utili-la por VHF-frekvencoj inter 30 kaj 250 MHz.

Aŭrora reflektado – Temas pri intensaj kolumnoj de aŭrora jonigo je 100 km alte ene de la aŭroraj reflekto-ondoj, pli notindaj ĉe HF kaj VHF. La reflektado dependas de la angulo. Subita movo de elektronoj kreas diserigan reflektadon. Aŭrora radio-reflekto estas precipe trovata en altaj latitudoj kaj tre malofte estas observata ĝis mezaj latitudoj. La apero de radio-aŭroroj dependas de la suna aktiveco, kaj jaraj eventoj estas pli oftaj dum maksimuma sunciklo. Radio-aŭroroj inkluzivas la tiel nomatajn “posttagmezajn aŭrorojn”, kiuj rezultigas pli fortajn sed pli distorditajn signalojn, kaj “malfruvesperajn ondojn”, kun pli varieblaj signaloj. Propagkondiĉoj por tiu ĉi modo etendiĝas ĝis 2000 km en la direkton oriente-okcidenten, sed fortaj signaloj estas plej ofte observataj norde-suden.

Intermita E- propagado – Intermita E-propagado povas esti observata ĉe HF kaj VHF-frekvencoj. Ne konfuziĝi kun la ordinara HF E-tavola propagado. Intermita E-propagado okazas en mezaj latitudoj kaj precipe dum somero, ekde majo ĝis aŭgusto en la norda hemisfero kaj ekde novembro ĝis februaro en la suda hemisfero. Ne estas simpla kaŭzo por ĉi tiu mistera propagado. La reflektado okazas en tre fajna jonigita tavolo ĉ. 90 km alte. La periodeco de ĉi tiu propagado estas nekonstanta. Ĝi povas esti observata dum unu ĝis tri sinsekvaj tagoj, kaj tuj tute malaperos dum kelkaj tagoj por poste senatende reaperi. Ĉi tiuj eventoj kutime komenciĝas matene, atingas la kulminon posttagmeze kaj duan pinton vespere. Ĝi ofte malaperas ĉe noktomezo. Plejofte observata en 30 MHz. La tipa skipo estas 1000 ĝis 2000 km, sed per plurskipo kelkfoje la distanco duobliĝas. La signaloj estas tre fortaj sed akompanataj de malrapidaj fadoj.

TROPOSFERA MODO

Troposfera dispersado – Ĉe VHF kaj altaj frekvencoj malgranda variado ĉe la atmosfera denseco je alteco de 10 km povas dispersi iom da radioenergio reflekte al la terkrusto, permesante kontaktojn super la horizonto inter stacioj je distancoj de 800 km.

Troposfera refrakto pere de inversa tavolo – Subitaj ŝanĝoj en la atmosfera temperaturo kaj humideco povas en kelkaj okazoj fari, ke UHF kaj VHF signaloj povas propagiĝi je distancoj de centoj da kilometroj ĝis 2000 km. Tiu inversa tavolo estas observata precipe en areoj de alta aerpremo. La okazo de tiu evento povas daŭri de kelkaj horoj ĝis kelkaj tagoj. Radiosignaloj estas pli intensaj en la altaj frekvencoj. Ĝi estas tipa evento dum la fino de la somero, precipe matenfrue.

Pluvodispersado – Pluvodispersado estas esence mikroonda propagado, kaj pli kutime observata ĉe 10 Ghz. Dispersado pere de neĝo aŭ glacio ankaŭ povas okazi, sed malpli efika. Pluvo povas ankaŭ malplifortigi signalojn de satelitoj aŭ mikroondaj radaroj. Malpliintensigo de signaloj ĝis 30 dB povas okazi sur 30Ghz dum tropika pluvo.

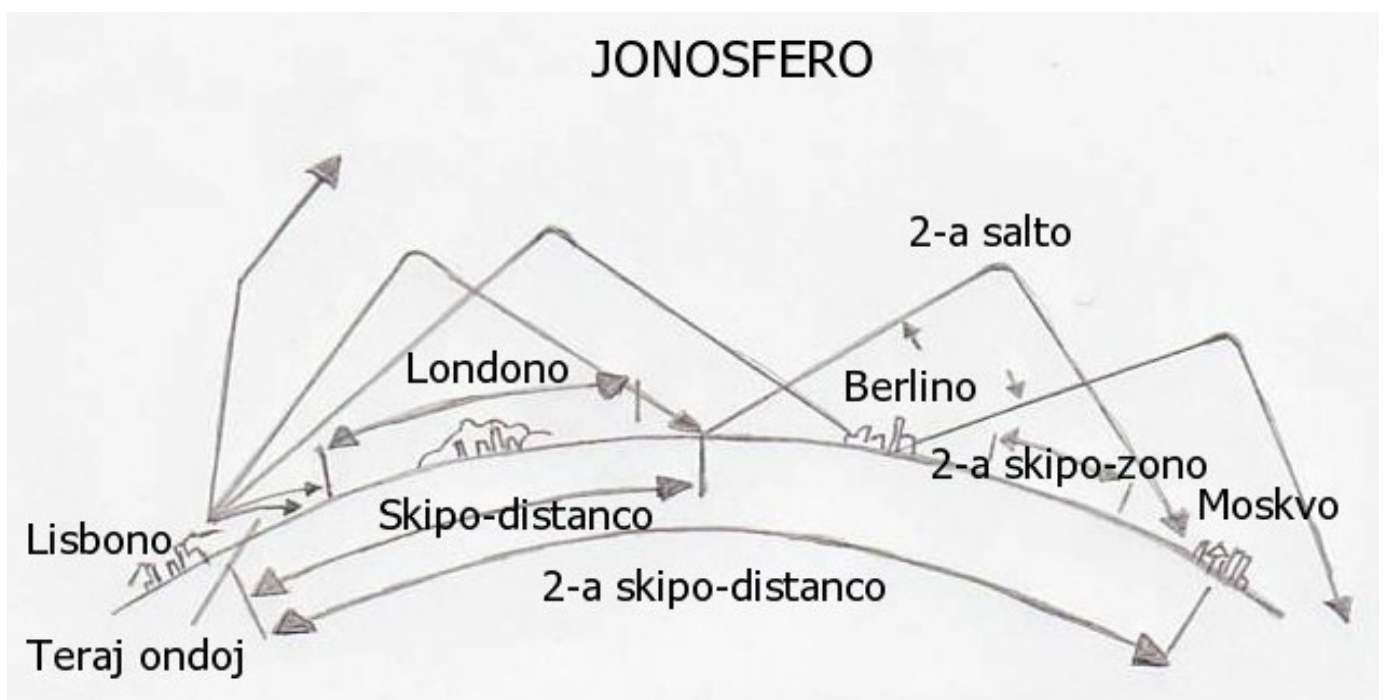
Aviadilo-dispersado – Aviadilo dispersado (ofte reflektado) estas observata ĉe VHF pere de mikroondoj, kaj ebligas momentan propagadon ĝis la distanco de 500 km. La plej kutima aplikado estas por kontroli la trafikon de aviadiloj pere de radaro.

Fulmo-dispersado – Kutime observata je la distanco de 500 km aŭ plie. La varmaj kanaloj de fulmoj dispersas radio-ondojn dum frakcio de sekundo. Kvankam fulmo-dispersado estas rapide observata pere de mikroonda radaro, tamen pro la fulmobruo ĉi tiu modo ne havas praktikan uzon por telekomunikado.

ALIAJ KAŬZOJ

Difrakto – Propagado iras laŭ la konturo de objektoj. Uzata por sendi radiosignalojn trans montaron, kiam rekta metodo (videbla distanco) ne eblas. Tamen, la angulo de propagado ne povas esti akuta, kontraŭe la signalo ne difraktiĝos. Forta signalo kaj antenoj bezonataj. Malaltaj frekvencoj pli bone funkcios. Kontraŭe, VHF (aŭ pli altaj frekvencoj) ne bone funkcios por sendi signalon trans montaron. Poŝtelefonoj uzas difrakton por sendi siajn signalojn, kaj kutime uzas antenojn sur la tegmento de konstruaĵoj, kiuj difraktas la signalojn sur la stratoj. Difrakto dependas de la ondolongeco kaj la grandeco de la obstaklo. Malaltaj frekvencoj pli facile iras laŭ la konturo de glataj surfacoj kiel montoj.

Angle	Bendo	Frekvenco	Ond-longo	Propagado
VLF	Tre malaltaj frekvencoj	3-30 kHz	100-10 km	Inter tero kaj jonosfero
LF	Malaltaj frekvencoj	30-300 kHz	10-1 km	Inter tero kaj la D-tavolo de la jonosfero Teraj ondoj
MF	Mezaltaj frekvencoj	300-3000 kHz	1000-100m	Surteraj ondoj. E, F-tavoloj, jonosfera refrakto vespere, kiam D-tavolo absorbo malvigliĝas
HF	Altaj frekvencoj	3-30 MHz	100-10 m	F1, F2-tavoloj, jonosfera refrakto
VHF	Tre altaj frekvencoj	30-300 MHz	10-1 m	Malofta E-jonosfera refrakto. Tre rara F1, F2-tavola jonosfera refrakto dum alta sunmakula aktivado ĝis 80 Mhz. Ĝenerale rekta ondo-propagado. Kelkfoje troposfera
UHF	Ultraaltaj frekvencoj	300-3000 MHz	100-10 cm	Rektaj ondoj. Kelkfoje troposfera
SHF	Hiperaltaj frekvencoj	3-30 GHz	10-1 cm	Rektaj ondoj
EHF	Ekstremaltaj frekvencoj	30-300 GHz	10-1 mm	Rektaj ondoj limigita per absorbo



Absorbo – Malaltaj frekvencoj vojaĝas facile tra brikoj kaj ŝtonoj, kaj VLF eĉ enpenetras akvon. Se frekvenco plialtiĝas, absorbo fariĝas pli grava. Ĉe mikroondoj aŭ pli altaj frekvencoj, absorbo per molekula resonanco en la atmosfero (precipe akvo) estas grava sinteno por radiopropagado. La uzo de 58-60 GHz por longdistanca komunikado estas senutila pro la granda absorbo. Ĉi tiu fenomeno estis unue observata dum la esplorado pri uzo de radaroj dum la dua mondmilito. Por frekvencoj super 400 GHz la tera atmosfero blokas kelkajn segmentojn de tiu spektro, sed permesas aliajn, kiel UV-lumon blokatan de la ozona tavolo (sorbas la kurtondajn ultraviolajn radiojn damaĝajn al la vivuloj ~ ozona truo).

¹ Jonosferaj tavoloj (regionoj) – D-tavolo, inter 90 kaj 150 km; F-tavolo, super 150 km; ĉiuj super la terkrusto de la tero. Internaj tavoloj estas nomataj E, intermita-E, E₂, F, F₁, F_{1.5}, F₂.

² GPS: Angle *Global Positioning System* (satelita navigilo).

³ **Skipo**: Ne PIV-a, sed vaste uzata en la teknika lingvo. Laŭ PIV: Saltodistanco – Salto inter la ricevlimo de tera radio kaj la punkto ĉe kiu nereakta radio reflektita de la supra atmosfera tavolo atingas la teron; inter tiuj punktoj la ricevado ne estas ebla.