RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

Transporta un mašīnzinību fakultāte

Dzelzceļa transporta institūts

Jeļena ČAIKO

Transporta datorvadības, informācijas

un elektroniskās sistēmas programmas doktorande

(doktor.apl.nr. 001RED005)

MOBILO SAKARU SISTĒMU RADIOVIĻŅU IZPLATĪŠANĀS MEŽOS MATEMĀTISKIE MODEĻI

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. sc. phys., profesors
V. POPOVS

RTU Izdevniecība

Rīga-2004

PROMOCIJAS DARBS
IZVIRZĪTS RĪGAS TEHNISKĀS UNIVERSITĀTĒ
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2004. gada 13. oktobrī Rīgas Tehniskās Universitātes Elektronikas un telekomunikācijas fakultātē, Āzenes ielā 12, 210 telpā.

OFICIĀLIE OPONENTI

Asoc. Profesors, Dr.habil.sc.ing. Guntars. Balodis,
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, Dr.habil.sc.ing. Algimantas Kajackas,
Viļņas Tehniskā universitāte, Lietuva

Professor.Dr.habil.sc.ing.Imants Matīss,
Latvijas Zinātņu Akadēmija

APSTIPRINĀJUMS

Es apstiprinu, ka esmu izstrādāja doto promocijas darbu, kurš iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskā universitāte inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Jelena Čaiko.

Datums: 2004. gada 11. jūnijs

Promocijas darbs ir uzrakstīts krievu valodā, satur ievadu,5 nodaļas, slēdzienu, 51 attēlus un ilustrācijas, kopā 178 lappuses. Promocijas darbā ir 5 literatūras saraksti (atbilstoši katrai nodaļai), kuros ir 25, 18, 20,10 un 10 nosaukumi.

IEVADS

Pēdējiem gadu desmitiem raksturīga ātra mobilo sakaru sistēmu ieviešana, kas paredzētas telefona ziņojumu un ciparu datu pārraidei mobilajiem abonentiem. Tādās sakaru sistēmās apkalpojamā teritorija tiek sadalīta ļoti daudzās darba zonās (šūnās); zonas iekšienē sakari starp mobilajām un bāzes stacijām notiek pa radiokanālu.

Izveidojot mobilo sakaru tīklu, lai noteiktu optimālu bāzes staciju uzstādīšanas vietu un skaitu, ka arī citu uzdevumu risināšanai, nepieciešams noteikt radiosignāla raksturlielumus jebkurā telpas punktā visā apkalpošanas zonā. Meža vide rada īpašus apstākļus radioviļņu izplatībai, kas izmaina apkalpošanas zonas radiopārklašanas vienmērīgumu.

Nepieciešams priekšnosacījums efektīvo sakaru sistēmu izstrādei, darbam meža vidē, ir dziļas pamatīgas zināšanas par radiosignālu izplatīšanās kanālu raksturlielumiem.

Tēmas aktualitāte

Laikā, kad ar radioviļņu izplatīšanās problēmām mobilo sakaru sistēmās pilsētas apstākļos nodarbojas daudz autoru, meža masīvu ietekme uz radioviļņu izplatīšanās apstākļiem ir samērā maz izpētīta, bez tam no matemātiskās modelēšanas^viedokļa nav sistemātiskas pieejas, bet no otras puses praktiski nav reprezentatīvu eksperimentālo datu, kas ņem vērā meža masīvu struktūru, blīvumu, mitrumu un citu raksturlielumu ietekmi uz uztveramā signāla līmenī.

Tādēļ ir ļoti aktuālas matemātiskās modelēšanas un eksperimentālo pētījumu problēmas par radioviļņu izplatīšanos mežos.

Bez tam, atskaitot mobilo sakaru sistēmas, šiem pētījumiem var būt dažādas pielietošanas sfēras:

tiešo uzdevumu risināšanai virszemes un kosmiskajām RRL; apgriezto uzdevumu risināšanai par radiosignālu atstarošanu un izkliedēšanu meža masīvos, kas ļauj noteikt galvenos meža masīvu parametrus.

Darba mērķis

Darba mērķis ir: kompleksu pētījumu veikšana par decimetru diapazona radioviļņu izplatīšanos meža masīvos, lai izstrādātu pamatus mobilo sakaru sistēmu projektēšanai Latvijā; matemātisku modeļu veidošana, kas ļauj noteikt meža vides parametrus; decimetru diapazona radioviļņu izplatīšanās pamatmehānismu aprakstīšana meža apstākļos, atkarībā no attāluma starp uztveršanas punktu un bāzes staciju, ievērojot reālus meža masīvu parametrus: koku dielektriskā caurlaidība, izmēri, blīvums, mitrums, vēja slodzes u.c.

Zinātniskā novitāte un galvenie rezultāti

Veicot šo darbu, tika tālāk attīstīts zinātniskais virziens mūsdienu radiofizikā - decimetru diapazona radioviļņu izplatīšanās teorija meža masīvos, kā statistiski sarežģītās neviendabīgās vidēs.

Promocijas darba tika veikti teorētiskie (matemātisku modeļu veidošana radioviļņu izplatībai neviendabīgās vidēs) un eksperimentālie pētījumi par radioviļņu izplatīšanos meža masīvos. Šie rezultāti ir oriģinālu pētījumu, kas Latvijā veikti pirmo reizi, rezultāti.

Šajā virzienā iegūtos jaunos zinātniskos rezultātus, īsi var noformulēt šādi:

tika novērtēti galvenie meža masīvu parametri;

izveidots meža masīvu kā kvazihomogēnas neviendabīgas vides efektīvās dielektriskās caurlaidības determinēts modelis; izstrādāti radioviļņu izplatīšanās meža masīvā determinēti matemātiskie modeļi un tika veikts salīdzinošs novērtējums ar jau zināmajiem eksperimentālajiem datiem;

Tverska un Ritova aptuveno matemātisku modeļu izmantošana ļāva izveidot statistiskus matemātiskos modējus, kas ļauj noteikt elektromagnētiskā lauka koherentās un hekoherentās sastāvdaļas uztveršanas punktā meža masīvu apstākļos;

veikti radioviļņu izplatīšanās eksperimentālie pētījumi šūnas robežās izvēlētai mobilo sakaru LMT operatora bāzes stacijai, ņemot vērā meža masīva ietekmi.

Aizstāvēšanai izvirzīts sekojošais

Meža masīvu galveno parametru noteikšana;

Vispārināts elektrodinamiskais modelis, kas ļauj noteikt meža masīva kā kvazihomogēnas neviendabīgas dielektriskās vides ar zudumiem, kuras dispersās fāzes telpiskā koncentrācija atrodas robežās $f_i \leq (0{,}02\text{-}0{,}2)$, efektīvo komplekso dielektrisko caurlaidību

GarumrimŠanas efektīvā koeficienta noteikšana (un attiecīgi, arī radiosignāla pavājināšanās līmeņa noteikšana atbilstošajā viļņa garumā) dažādiem meža vides modeļiem.

Determinētie matemātiskie radioviļņu izplatīšanās modeļi meža masīvos.

Statistiskie radioviļņu izplatīšanās modeļi meža masīvos.

Eksperimentālo pētījumu rezultāti par radioviļņu izplatīšanos meža masīvos.

Radioviļņu līmeņa noteikšanas uztveršanas punktā, ņemot vērā meža masīvu ietekmi, teorētisko un eksperimentālo rezultātu salīdzinošā analīze.

Praktiskā nozīme un pielietošana

Var norādīt sekojošas iegūto rezultātu praktiskās pielietošanas galvenās sfēras:

mobilo sakaru sistēmas;

radioreleju virszemes un kosmiskās sistēmas;
radiolokācijas un radionavigācijas sistēmas;
kosmiskās meža masīvu parametru pētīSanas sistēmas un ar tām saistīto zemes mežu ekoloģijas problēmu pētīšana.
Promocijas darbā iegūtās signāla enerģētisko raksturlielumu sakarības ļauj prognozēt radiolīdzekļu darba apstākļus mežainā apvidū, ņemot vērā meža masīvu parametrus.
Šajās sakarībās atrastā signāla pavājināšanās saistība ar meža augu segas parametriem var tikt izmantota meža masīvu stāvokļa un to pamatraksturojumu novērtēšanai.

Rezultātu aprobācija

Par promocijas darba tēmā veikto pētījumu rezultātiem tika referēts sekojošās starptautiskajās konferencēs:
- 42. RTU Starptautiskā zinātniskā konference, 2001. gada 11.-13. oktobris, Rīga, Latvija;
- 43. RTU Starptautiskā zinātniskā konference, 2002. gada 11.-13. oktobris, Rīga, Latvija;
- 44. RTU Starptautiskā zinātniskā konference, 2003. gada 9.-11. oktobris, Rīga, Latvija;
- The lst International conference information technologies and management 2003. April 15-16. 2003, Information Svstem Institute, Riga, Latvia.
- The 2nd International conference information technologies and management 2003. April 15-16. 2003, Information Svstem Institute, Riga, Latvia.

Darba struktūra un apjoms

Promocijas darbs sastāv no ievada, piecām nodaļām un nobeiguma. Darbs uzrakstīts krievu valodā un satur 178 lappuses, 59 zīmējumus un 19 tabulas, 22 grafikus, katra nodaļa ietver savu literatūras sarakstu.

DARBA SATURS

Pirmā nodaļa

Pirmajā nodaļā veikts analītisks meža masīvu parametru apskats, tiek apskatīti meža masīvu *mehāniskie* pamatparametri, kas ietekmē to *elektrodinamiskos* raksturojumus.

Šajā darbā mežs uzskatīts kā sarežģīta vertikāla struktūra, kas sastāv no dažādiem slāņiem (zeme, koku stumbri, lapotne, gaiss), katram no šiem slāņiem ir savas specifiskās īpatnības un tie atšķirīgi ietekmē radioviļņu izplatīšanos.

Jāatzīmē, ka meža augu segas elementu izvietojums ir nejaušs, to parametri, izmēri un dielektriskā caurlaidība meža masīva robežās kokiem būtiski izmainās.

Bez tam, meža augu segas parametrus ietekmē laika apstākļi, tādi kā nokrišņi, gadalaiki.

Darbā ir noskaidrots, ka pie zemu izvietotiem BTS un MS, galvenie meža augu segas elementi, kas veido koherento lauku, ir koku stumbri un ka pie izkliedēšanas raksturlielumu modelēšanas jāievēro koku augstums, diametrs, audzes blīvums un dielektriskā caurlaidība UAF diapazonā.

Saskaņā ar [1.1], [1.2] datiem, Latvijā koku augstums h meža masīvā sasniedz vērtību 10-30 metrus, rādiuss pie koka pamatnes a nepārsniedz 50 cm, dielektriskās caurlaidības ε un vadāmības σ vērtības UAF diapazonā ir attiecīgi (7÷20) un (0,01÷0,1) Sim/m.

Vidējais koku stumbru skaits uz m^2(10^{-3} <N <10^{-1}) stumbri/m^2 Meža masīvu blīvums atkarīgs no gadalaika. Meža aizpildījuma blīvums CD mainās robežās: 0,3<CD<l.

Vēja ātrums virs meža var mainīties robežās 0 < U_w < 20 m/s, (neskaitot viesuļvētras) pie tam vēja ātrums meža iekšienē parasti ir: U_{inf}≈(0,02÷0,03)U_W, t.i. (0 < U_{inf} < (0,4÷0,6)) m/s.

Meža augu mitrums ir atkarīgs no gadalaika, laika apstākļiem un tas tiek noteikts kā: W≈χF_B, kur $\chi=\rho_B/\rho_{q,\eta}$. Koku stumbriem un zariem: W≈2,22 f_B Augu segas zaļās masas svars uz laukuma vienību tiek noteikts kā: $M=f(h)d_B$,

kur f — tilpuma vienības aizpildīšanas blīvums ar augu segu, <h> - augu segas vidējais augstums; d_B- ūdens īpatnējais svars.

Ūdens daudzums, kas atrodas augu segas elementos ar augstumu <h> laukumā S, tiek noteikts kā:

$P_B = fW\,hSd_B$, kur W - augu elementu relatīvais tilpuma mitrums.

Visas šīs mežu parametru īpatnības ietekmē to elektrodinamiskos raksturlielumus, kuru apskatam veltīta otrā nodaļa.

Otrā nodaļa

Otrā nodaļa ir veltīta vispārināta elektrodinamiskā modeļa veidošanai, kas]auj noteikt meža masīva kā kvazihomogenas neviendabīgas dielektriskās vides ar zudumiem, kuras dispersās fāzes tilpuma koncentrācija atrodas robežās $f_i \leq (0{,}02\text{-}0{,}2)$ komplekso dielektrisko caurlaidību

Noteikts garumrimšanas efektīvā koeficienta lielums (un attiecīgi, arī radiosignāla pavājināšanās līmenis atbilstošajā viļņa garumā) dažādiem meža vides modeļiem.

Elektriskā lauka vienādojumu, kas reducēts uz vidējiem tilpumiem, kas ir lielāki par neviendabīgumu mērogiem, var uzrakstīt kā:

$$\langle \mathbf{D} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \mathbf{D} dV \,,\ \langle \mathbf{E} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \mathbf{E} dV \qquad (1)$$

kur <D> un <E> elektriskā lauka indukcijas un intensitātes vektoru vidējas vērtības, bet elektriskā lauka sastāvdaļas i-tā meža elementa iekšienē ir

$$\langle \mathbf{D}_i \rangle = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} \mathbf{D} dV \,,\ \langle \mathbf{E}_i \rangle = \frac{1}{V_i} \int_{V_i} \mathbf{E} dV \qquad (2)$$

kur D un E - elektromagnētiskā lauka sastāvdaļas jebkurā neviendabīgas vides punktā, Vi - i-tās komponentes tilpums, V - visas vides tilpums.

Attiecībā uz vektoriem <D> un <E> neviendabīgu vidi (pie $f_F < 0.25$) var apskatīt kā kvaziviendabīgu un lineāru vidi, un raksturot ar dielektriskās caurlaidības tenzora efektīvo vērtību $|\varepsilon_m|$:

$$\langle \mathbf{D} \rangle = |\varepsilon_m| \langle \mathbf{E} \rangle \qquad (3)$$

Lauka vidējā vērtība i-tajā komponente līdzinās vidējai vektora vērtībai, kuru noteic lauku ģeometriskā summa, kuru savukārt nosaka ar tilpuma koncentrāciju f_i un vidējo lauka vērtību visā vidē:

$$\langle \mathbf{D_i} \rangle = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{V} \langle \mathbf{D} \rangle = \sum_{i=1}^{n} f_i \langle \mathbf{D} \rangle, \qquad (4)$$

Elektriskā lauka intensitāte tilpuma Vi iekšienē ir:

$$\langle \mathbf{E_i} \rangle = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{V} \langle \mathbf{E} \rangle = \sum_{i=1}^{n} f_i \langle \mathbf{E} \rangle, \qquad (5)$$

kur $f_i = nV_i/V$ - i-tās komponentes tilpuma koncentrācija.

Tādējādi, vienādojums (5) sasaista vidējo lauka vērtību i-tajā komponentē <Ei> ar vidējo lauka vērtību visā vidē <E>.

Ieviešam jēdzienu par lauka koeficientu tādai videi $|\alpha_i|$, kas sasaista i-tās komponentes lauka intensitāti ar lauka intensitāti visā vidē.

$$<\mathbf{E_i}> = |\alpha_i| < \mathbf{E} >, \qquad (6)$$

Lauka koeficients $|\alpha_i|$ (vispārīgā gadījumā tas ir tenzors) ir atkarīgs no i-tās komponentes dispersās fāzes daļiņu formas, relatīvajām dielektriskajām caurlaidībām ($\chi = \varepsilon_i/\varepsilon_j$), daļiņu formām-faktoriem ($\delta_i = d_{max} / d_{min}$), daļiņu lielo asu orientācijas attiecībā pret elektromagnētiskā lauka virzienu (t.i. no polarizācijas veida E un virziena δ_i):

$$|\alpha_i| = |\psi(\chi, \delta_i)| \qquad (7)$$

Lauka koeficienta $|\alpha_i|$ ieviešana ļauj vektora vienādojumus (4) un (5) uz $|\varepsilon_m| = \sum_{i=1}^{n} f_i \varepsilon_i |\alpha_i|$, izteikt kā:

$$\langle \mathbf{D} \rangle = |\varepsilon_m| \langle \mathbf{E} \rangle = \left[\sum_{i=1}^{n} f_i \varepsilon_i |\alpha_i| \right] \langle \mathbf{E} \rangle, \qquad (8)$$

Pie tam izteiksme (8) ļauj, ņemot vērā (6), atrast efektīvās dielektriskās caurlaidības ε_m tenzoru lineārai neviendabīgai videi:

$$|\varepsilon_m| = \sum_{i=1}^{n} f_i \varepsilon_i |\alpha_i|, \qquad (9)$$

pie nosacījumu izpildīšanas:

$$1 = \sum_{i=1}^{n} f_i \varepsilon_i, \; 1 = \sum_{i=1}^{n} f_i \qquad (10)$$

Tādējādi, izteiksme lineārās kvaziviendabīgās dielektriskās vides ar zudumiem efektīvai dielektriskajai caurlaidībai ε_m izteikta kā (9), kas ir pareiza pie nosacījumu (10) izpildīšanas.

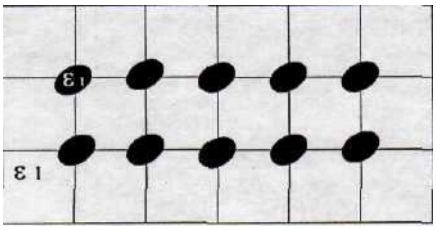
Apskatīti atsevišķi gadījumi, kas ļauj novērtēt komplekso dielektrisko caurlaidību neviendabīgām vidēm ar dažādām dispersām daļiņām un to izvietojumu šajā vidē.

V.Popova darbā ir iegūtas komplekso dielektrisko caurlaidību izteiksmes sekojošām vidēm:

Ja vide ir šūnu vide, t.i. nesoša fāze-gaiss, dispersā faze-augi, tad:

1) Ja n-komponenšu neviendabīgā vidē dispersās daļiņas ir izvietotas regulāri (kristāliskā režģa mezglos - 1 .zīm.), tad formula (9) tiek pārveidota:

$$|\varepsilon_m| = \varepsilon_1 + \sum_{i=2}^{n} (\varepsilon_i - \varepsilon_1) f_i |\alpha_i| \qquad (11)$$



l.zīm. Neviendabīga vide ar regulāri izvietotam dispersām daļiņām

No izteiksmes (11) izriet sekojoši atsevišķi gadījumi:

1.1. ja dispersās daļiņas ir elipsveida, tad, noteikuši lauka koeficientu, ņemot vērā depolarizācijas koeficientu, iegūsim izteiksmi (12):

$$\dot{\varepsilon}_m = \varepsilon_1 + \sum_{i=2}^{n} (\varepsilon_i - \varepsilon_1) f_i \sum_{\nu=1}^{3} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon^*} - 1 \right) n_i^{\nu} \right]^{-1} \qquad (12)$$

kur $\varepsilon_1 < \varepsilon^* < \varepsilon_m$

$$n_i^{\nu} = \frac{1}{2} abc \int_0^{\infty} \left[\left(\lambda + \gamma^2\right) \sqrt{\left(\lambda + a^2\right)\left(\lambda + b^2\right)\left(\lambda + c^2\right)} \right]^{-1} d\lambda \text{ -}$$

elipsveida daļiņu depolarizacijas koeficients; γ=a vai b vai c, atkarība no elipses lielās ass stāvokļa attiecībā pret vektoru E.

α_i- lauka koeficients:

$$\alpha_i = \frac{1}{3} \sum_{\nu=1}^{3} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_m} - 1 \right) n_i^{\nu} \right]^{-1} \tag{13}$$

1.2.) ja dispersās daļiņas ir sfērisks, tad lauka koeficients tiek izteikts kā (14), bet kompleksā dielektriskā caurlaidība tiek izteikta kā (15):

$$\alpha_i = \frac{3}{\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon^*} + 2 \right)} \tag{14}$$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 + \sum_{i=2}^{n} \frac{3 f_i \left(\varepsilon_i - \varepsilon_m\right)}{\left(\varepsilon_i + 2\varepsilon_m\right)}$$

(15)

pie tam lielumu ε^* pie tilpuma koncentrācijas $0{,}25 < f_i < 0{,}45$ var pielīdzināt neviendabīgas vides efektīvai dielektriskai caurlaidībai, kuru mēs meklējam $\varepsilon^* = \varepsilon_m$un tad izteiksme (15) tiks uzrakstīta netiešā veidā:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 + \sum_{i=2}^{n} \frac{3 f_i \left(\varepsilon_i - \varepsilon_m\right)}{\left(\varepsilon_i + 2\varepsilon_m\right)} \tag{16}$$

Mazas tilpuma koncentrācijas gadījumā $f_i < 0{,}25$ šo lielumu var uzskaitīt par nesošās vides dielektrisko caurlaidību $\varepsilon^* = \varepsilon_1$=l un tad vienādojums (15) būs tiešs.

Apskatīsim vienkāršāku, divkomponentu vidi, kurai izteiksme (9) tiek izteikta vienkāršākā veidā:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 f_1 \alpha_1 + \varepsilon_2 f_2 \alpha_2 \tag{17}$$

pie tam, nepārtrauktai nesošai videi $\alpha_1 \rightarrow 1$

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1(1-f_2) + \varepsilon_2 f_2 \alpha_2 = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - 1) f_2 \alpha_2 \tag{18}$$

a) Elipsveida daļiņām efektīvas dielektriskās caurlaidības izteiksme tiks izteikta kā:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 + \frac{1}{3}(\varepsilon_2 + \varepsilon_1) f_2 \sum_{\nu=1}^{3} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon^*} - 1 \right) n_i^{\nu} \right]^{-1}, \tag{19}$$

kur

$$\alpha_2 = \frac{1}{2} \sum_{\nu=1}^{3} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon^*} - 1 \right) n_2^{\nu} \right]^{-1} \tag{20}$$

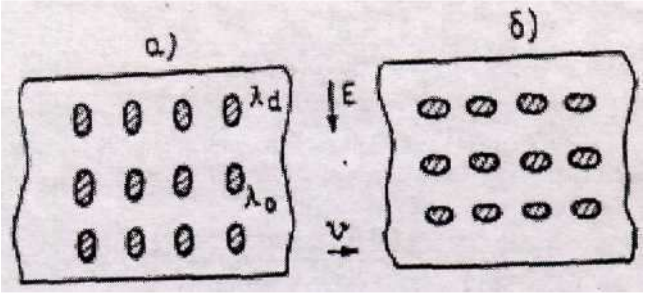
b) sfēriskajam daļiņām efektīvās dielektriskās caurlaidības izteiksme tiks izteikta kā:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_1 + f_2 \frac{3(\varepsilon_2 - \varepsilon^*)}{(\varepsilon_2 + 2\varepsilon^*)}. \tag{21}$$

Apskatīsim divfāzu vidi un noteiksim efektīvas dielektriskas caurlaidības izmaiņu divos gadījumos:

uz divfāzu vidi, kurai dispersās daļiņas tiek uzskatītas kā elipses, krīt plakani polarizēts elektromagnētiskais vilnis tādā veidā, ka tā vektors sakrīt ar elipses lielām asīm;

uz divfāzu vidi, kurai dispersās daļiņas tiek uzskatītas kā elipses, krīt plakani polarizēts elektromagnētiskais vilnis tādā veidā, ka elipses daļiņu lielā ass ir ortogonāla lauka intensitātei.



2.zīm. Divfāzu vides shēma.

Efektīvās dielektriskās caurlaidības izmaiņas tiek noteikta pēc formulas:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1 \eta \cdot \eta_1 f_2 \frac{1-3n^x}{2+\eta_1+\eta_1(1+\eta_1)n^x-(\eta_1 n^x)^2}, \qquad (22)$$

kur, $\eta = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}-1$; $\eta_1 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon^*}-1$; $\eta^x = \frac{1-e^2}{2e^3}\left(\ln\frac{1+e}{1-e}-2e\right)$;

$e=\sqrt{1-(b/a)^2}$; b/a –elipses mazās ass attiecība pret lielo (b=c).

Dotajā gadījumā formula (22) ir pietiekami nozīmīga meža masīva novērtējumam, jo zari, kas tiek uzskatīti kā elipses, maina savu stāvokli attiecībā pret plakani polarizētu vilni.

Sakritot elipses lielajai asij ar lauka intensitātes vektoru, efektīvā dielektriskā caurlaidība dotajā gadījumā ir maksimāla, bet pie ortogonalitātes tā ir minimāla, t.i. var uzreiz novērtēt elektriskā lauka intensitātes izmaiņas - vertikāli polarizētiem viļņiem mežos rimšana ir lielāka, nekā horizontāli polarizētiem viļņiem, tāpēc, ka efektīvā dielektriskā caurlaidība pirmajā gadījumā ir lielāka.

2) Ja mežs tiek uzskatīts kā statistiskais maisījums, t.i. augu un gaisa statistiskais maisījums, kur augi izvietojušies nejauši, efektīvā kompleksā dielektriskā caurlaidība tiks aprēķināta pēc izteiksmes

$$\sum_{i=1}^{n}(\varepsilon_m-\varepsilon_i)f_i\alpha_i = 0 \qquad (23)$$

2.1.) divkomponentu videi šī izteiksme vienkāršosies un tiks izteikta kā:

$$\left(|\dot{\varepsilon}_m| - \dot{\varepsilon}_1\right) f_1 |\alpha_1| + \left(|\dot{\varepsilon}_m| - \dot{\varepsilon}_2\right) f_2 |\alpha_2| = 0 \tag{24}$$

pie tam, ja elipsveida dispersās daļiņas ir izvietotas telpā nejauši, tad izteiksme (23) tiks uzrakstīta kā:

$$\sum_{i=1}^{n} (\varepsilon_m - \varepsilon_i) f_i \sum_{\nu=1}^{3} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon^*} - 1 \right) n_i^{\nu} \right]^{-1} = 0 \tag{25}$$

ja sfēriskas daļiņas ir izvietotas telpā nejauši, tad efektīvā dielektriskā caurlaidība tiks aprēķināta pēc izteiksmes (25):

$$\sum_{i=1}^{n} \left(|\varepsilon_m - \varepsilon_i| \right) f_i - \frac{3}{\left(\frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_m} + 2 \right)} = 0 \tag{26}$$

Dotās izteiksmes divkomponentu videi vienkāršosies un tiks uzrakstītas ka izteiksmes (27-28):

elipsveida daļiņas:

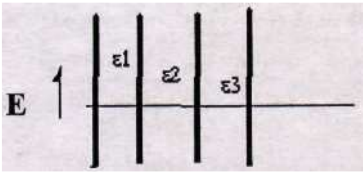
$$(\varepsilon_m - \varepsilon_1) f_1 \alpha_1 + (\varepsilon_m - \varepsilon_2) f_2 \alpha_2 = 0 \tag{27}$$

- sfēriskas daļiņas:

$$(\varepsilon m - \varepsilon_1) f_1 \frac{1}{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_m} + \frac{(\varepsilon m - \varepsilon_2) f_2}{(\varepsilon_2 + 2\varepsilon_m)} = 0 \tag{28}$$

3) Interesanti arī apskatīt, kāda veidā tiek noteikta slāņveida struktūras efektīvā dielektriskā caurlaidība pie plakani polarizēta elektromagnētiskā viļņa krišanas. No izteiksmes (9) izriet izteiksme (29), ja lauka intensitāte ir paralēla slāņu plaknei (3.zīm.):

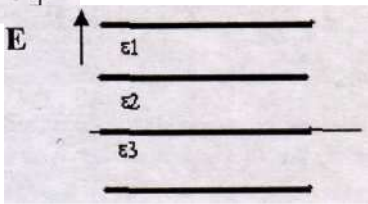
$$\varepsilon_m = \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i f_i \qquad (29)$$



3.zim. E vektors ir paralēls slāņiem

Ja lauks ir ortogonāls slāņiem, tad saskaņā ar formulu (9) un 4.zlm. iegūsim dielektrisko caurlaidību:

$$\varepsilon_m = \left[\sum_{i=1}^{n} \frac{f_i}{\varepsilon_i} \right]^{-1} \qquad (30)$$



4.zīm. E vektors ir perpendikulārs slāņiem

Divkomponentu videi šīs izteiksmes vienkāršosies un tiks uzrakstītas kā (31-32)

- ja vektors E virzīts gar slāņiem, tad

$$\varepsilon_m = \dot{\varepsilon}_1 f_1 + \dot{\varepsilon}_2 f_2, \left(\varepsilon_m = \sum_{i=1}^{n} \dot{\varepsilon}_i f_i \right) \qquad (31)$$

- ja vektors E virzīts ortogonāli slāņiem, tad

$$\varepsilon_m = \frac{1}{f_1 / \dot{\varepsilon}_1 + f_2 / \dot{\varepsilon}_2} \quad (32)$$

Tādējādi, augstāk apskatītie vispārinātie modeļi dod iespēju noteikt efektīvo komplekso dielektrisko caurlaidību ε_m kā divām, tā arī daudzfāzu vidēm, pie atbilstošajiem tuvinājumiem no neviendabīgas vides struktūras viedokļa.

Trešā nodaļa

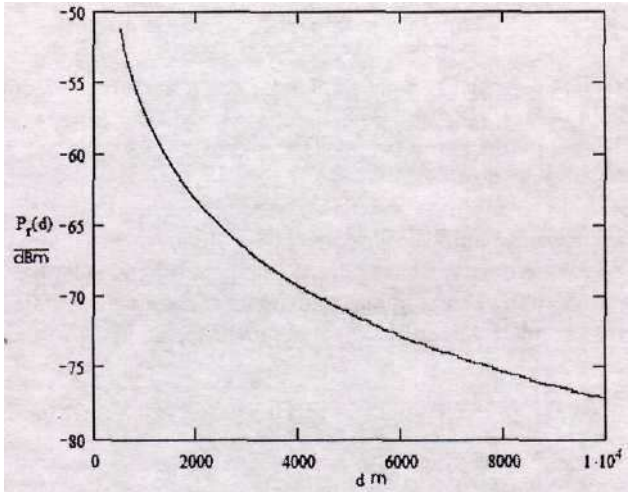
Trešajā nodaļa apskatīti jau pazīstamie un izveidoti determinētie radioviļņu izplatīšanās (RVI) modeļi» kas ļauj noteikt drošas uztveršanas zonu, kurā iekļaujas signāla līmeņa vērtības dažādos izplatīšanās apstākļos. Trešajā nodaļa apskatītie RVI modeļi ļauj noteikt zonu, kurā atradīsies signāla līmeņa vērtības uztveršanas punktā.

1) Vienstara modeļa gadījumā - mobilā un bāzes stacijas atrodas tiešas redzamības apstākļos un lauks uztveršanas punktā tiek noteikts ar tipveida formulām - (33) un (34).

Uztveramā signāla jauda uztveršanas punktā Pr brīvā telpā:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}, (\text{dBW}) \rightarrow P_r(dBm) = 10\log(P_r(d) \cdot 1000)) \quad (33)$$

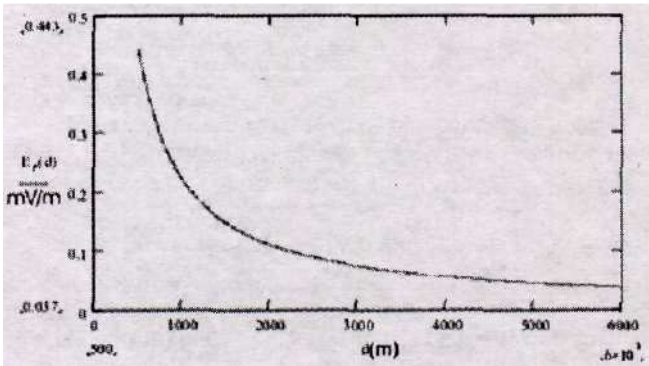
kur Pt- raidītāja jauda, Pr(d)-jauda uztvērēja ieejā, kas ir attāluma starp uztvērēju un raidītāju funkcija, Gt un Gr — raidantenas un uztvērējantenas pastiprināšanas koeficienti.



Grafiks (1). Radiosignāla jaudas zudumi uztveršanas punktā P(d) (dBm) kā funkcija no attāluma d(m).

Lauka intensitāti, ko rada neorientēta antena brīvā telpā, nosaka ar izteiksmi

$$E_r(d) = \frac{245\sqrt{P_t G_t}}{d}, \text{(mV/m)} \qquad (34)$$



Grafiks (2). Lauka intensitātes atkarība uztveršanas punkta E_r (mV/m) no attāluma starp stacijām d(m).

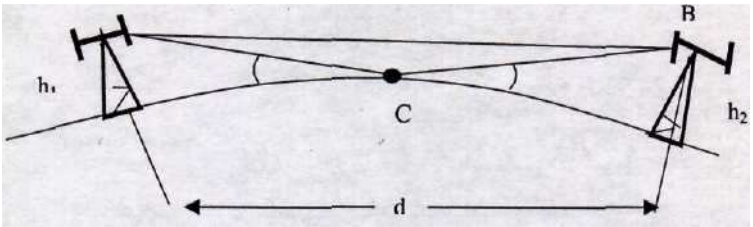
2) Gadījumā, ja tiek ņemts vērā no Zemes atstarotais radiostars un nav nekādu šķēršļu starp MS un BTS, lauka aprēķināšanai uztveršanas punktā jāizmanto divstaru modelis, pie tam eksistē apgabals BTS apkārtnē, kuram signāla līmenis un tā fāze svārstās (7.zīm.).

Atkarībā no attāluma r un tiešas redzamības r_o=3.57 ($[h_1]^{1/2}$ + $[h_2]^{1/2}$) attāluma savstarpējas attiecības, pateicoties divu staru interferencei, lauka intensitātes noteikšanai uztveršanas punktā iespējamas lietot sekojošas formulas:

a) vispārīgā gadījumā elektriskā lauka intensitātes amplitūdas . rezultējošā vērtība tiek noteikta ar formulu:

$$E_m = \frac{245\sqrt{P_{1KBT}G}}{r_{KM}}\sqrt{1+R^2+2R\cos(\phi+\frac{2\pi}{\lambda}\Delta d)}\ ,(\text{mV/m}) \qquad (35)$$

kur R - uzdota diapazona elektromagnētisko viļņu atstarošanas no zemes koeficienta modulis; Φ — fāzes zaudēšanas leņķis pie atstarošanās; Ar - staru gaitas starpība: tieša stara 1 un atstarotā stara 2 (5.zīm.) (Δd=[(AC+CB)-AB]), (P_1 - kW, r - km, $\lambda\Delta$ un Δ&- m).



5.zīm.

Tādējādi, salīdzinot ar vienstara modeli, elektriskā lauka intensitātes amplitfldas vērtība ir atkarīga no vājinājuma reizinātāja:

$$F(R,\ \phi,\ \Delta d)=\sqrt{1+R^2+2R\cos(\phi+\frac{2\pi}{\lambda}\Delta d)}\ , \qquad (36)$$

kas, savukārt, ir atkarīgs no atstarošanās koeficienta R moduļa, fāzes Φ zaudēšanas leņķa pie atstarošanās un staru gaitas starpības Δd. Lai noteiktu R un Φ , jāzin

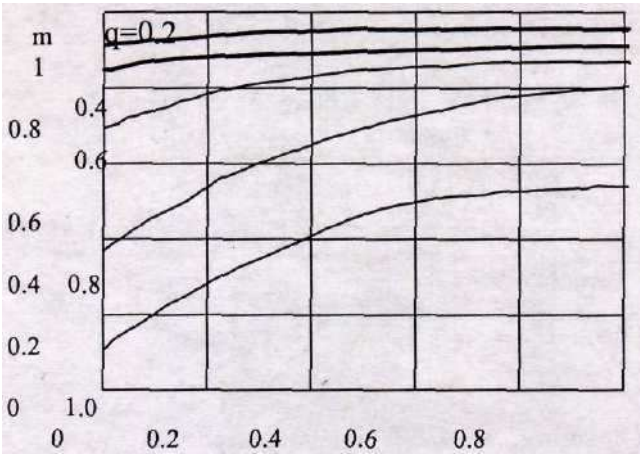
slīdēšanas leņķis γ elektromagnētiskā viļņa polarizācijas veids un atstarotās virsmas elektriskās konstantes (dielektriskā caurlaidība un elektriskā vadītspēja). Tuvinātā izteiksme Δr tiek noteikta ar formulu:

$$\Delta d=2mh_1h_2/d- \qquad (37)$$

kur m - koeficients, kas ir atkarīgs no uztvērēj antenas augstuma (vai uztveršanas punkta) virs zemes h_2 un raidantenas pacelšanas augstuma h_1 (pie $h_1 > h_2$) attiecības, kā ari parametra

$$q=d/(2R.h_1)^{1/2}, \qquad (38)$$

pie tam koeficients $m(h_2/h_1, q)$ tiek noteikts no grafikiem 6.zīm.



Zim. 6.

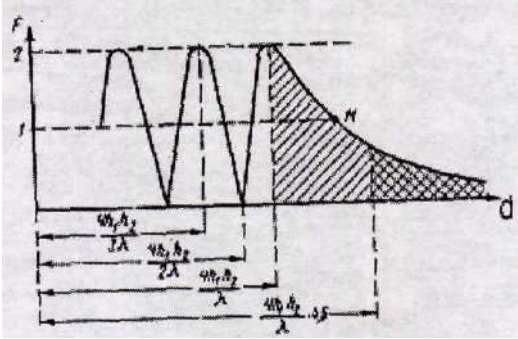
Apskatīsim sīkāk formulu (36), kas izteikta kā:

$$F(R, \phi, \Delta d)= \sqrt{1+R^2+2R\cos(\phi+\frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d})}\,, \qquad (39)$$

Tā kā mainoties attālumam d izmainās slīdēšanas leņķis *Φ*, kas ir atkarīgs no attāluma d, pie kam vājinājuma reizinātāja F(R, Φ, *Δ*d) vērtība iziet secīgi caur

maksimumu virkni: kad $\cos(\phi + \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d}) = +1$ un minimumu virkni: kad $\cos(\phi + \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d}) = -1$, pie tam F vērtības maksimuma punktos ir vienādas: F =

F(r) izmaiņa atkarībā no kosinusa argumenta $\phi + \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d} = \Psi$, pie tam ja $\Psi_{max} = 2\pi$, pirmais maksimums ir pie $d_{1\,max} = \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda} \frac{1}{(2\pi - \phi)}$.



7.zīm.

Palielinot d, kosinusa arguments mainīsies robežās no 2π līdz π, bet pats reizinātājs F monotoni samazināsies, robežgadījuma tiecoties uz nulli. Tādējādi, pie d< d_{1max} , tiek novērotas lieluma F svārstības robežās F_{max}=l+R līdz F_{min}=l-R. Noteiksim reizinātāja F maksimumu un minimumu punktus:

a. maksimumu nosacījumi: $\phi + \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d_{n\,max}} = 2n\pi$,n=1,2,3…r_k=var,

b. minimumu nosacījumi: $\phi + \frac{4\pi h_1 h_2}{\lambda d_{k\,min}} = (2k-1)\pi$,k=1,2,3…r_k=var.

Tādējādi, saskaņā ar izteiksmi (39), elektriskā lauka intensitātes amplitūdas rezultējoŠā vērtība divstaru modelim attālumos $d < d|_{max}$ tiek pakļauta izmaiņām, ko sauc par interferences maksimumiem un minimumiem, U. dažos telpas punktos uztveršanas nosacījumi atbildīs F=l+R, bet citos — F = 1 - R.

Lauka intensitāti uztveršanas punktā nosaka pēc formulas (40):

$$E_r(d) = \frac{173\sqrt{P_t}}{d} \cdot F \text{, (V/m)} \tag{40}$$

pie tam lauka matemātiskā izteiksmē parādās interferences reizinātājs F, kur F — vājinājuma reizinātājs pie maziem slīdēšanas leņķiem

$$F = 2\left|\sin\left(\frac{2\pi h_t h_r}{d_{(m)}\lambda_{(m)}}\right)\right| = 2\left|\sin\left(\frac{0.360 h_t h_r}{d\lambda}\right)\right| \tag{41}$$

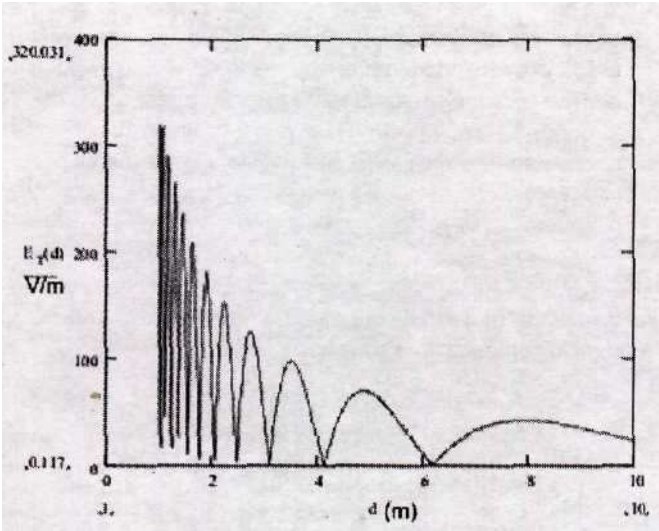
kur h_t - raidītāja augstums (m) un h_r - uztvērēja augstums (m), d - attālums no raidītāja līdz uztvērējam, λ - viļņa garums (m).

Ievietojot izteiksmi (41) izteiksmē (40), iegūsim (42):

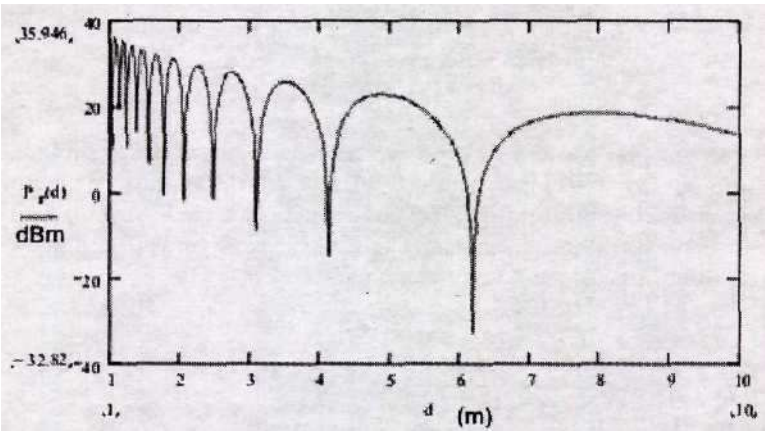
$$E_r(d) := \frac{346\sqrt{P_t}}{d} \cdot \left|\sin\left(\frac{0.360 h_t \cdot h_r}{d \cdot \lambda}\right)\right| \text{, (V/m)} \tag{42}$$

Formula (42) raksturo elektromagnētiskā lauka interferences struktūru. Pie mazām slīdēšanas leņķa θ vērtībām lielākai daļai Zemes virsmas atstarošanās koeficients R ir tuvs vieniniekam, bet fāzes zaudējuma leņķis ir 180°. Mainoties attālumam, izmainās slīdēšanas leņķa θ vērtība. Uztvertā signāla jauda uztveršanas punktā Pr ir:

$$P_r(d) := 10 \cdot \log\left(\frac{E_r(d)^2}{120 \cdot \pi} \cdot \frac{G_r \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} \cdot 1000\right) \text{, (dBm)} \tag{43}$$



Grafiks (3). Lauka intensitātes atkarība no attāluma starp stacijām d(m) vertikāli polarizētam vilnim uztveršanas punktā Er(V/m)

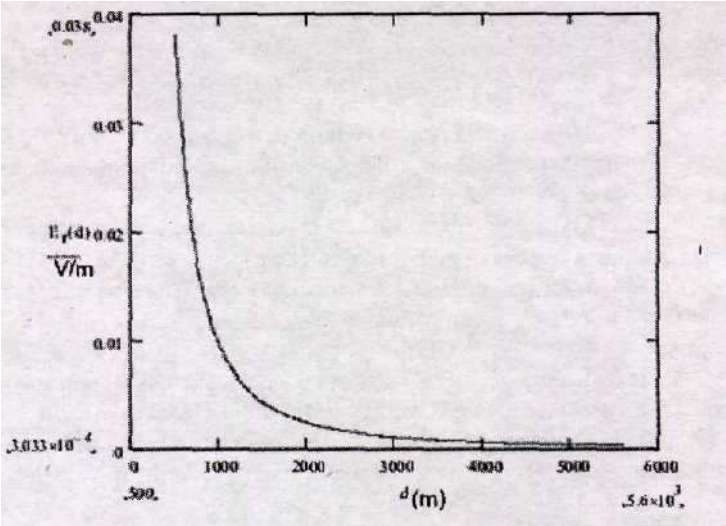


Grafiks (4). Vertikāli polarizēta viļņa signāla jaudas zudumi uztveršanas punkta P(d) (dBm) kā funkcija no attāluma d(m) mazi attālumi.

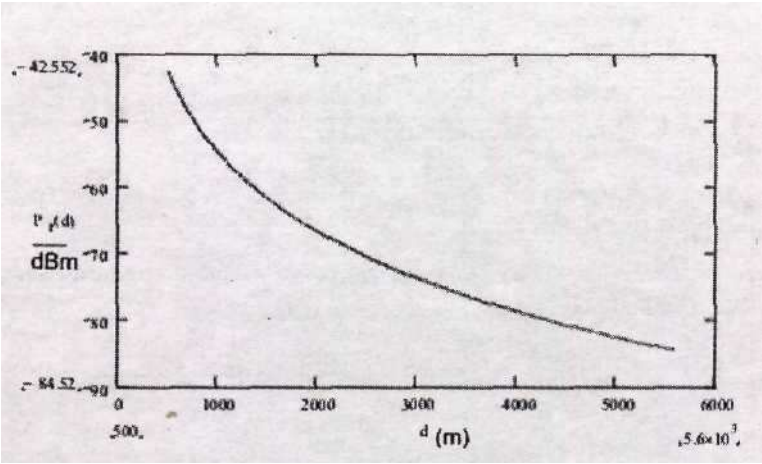
Pie lieliem attālumiem starp uztvērēju un raidītāju, slīdēšanas leņķis kļūst minimāls, un vājinājuma reizinātājs monotoni samazināsies, bet elektromagnētiskā lauka intensitātes formula uztvērējantenas novietošanas vietā būs:

$$E_r(d) := \frac{2\,E_0 \cdot d_0 \cdot 2\,\pi \cdot h_t \cdot h_r}{\lambda \cdot d^2}, \text{ (V/m)} \tag{44}$$

kur $E_0 := \frac{\sqrt{30 \cdot P_t \cdot G_t}}{d_0}$ lauka intensitāte tiešas redzamības zonā tiešas redzamības attālumā no raidītāja d_0.



Grafiks (5). Elektromagnētiskā lauka intensitāte uztveršanas punktā $E_r(d)$ (V/m) kā funkcija no attāluma d(m), neievērojot vājinājuma reizinātāju.



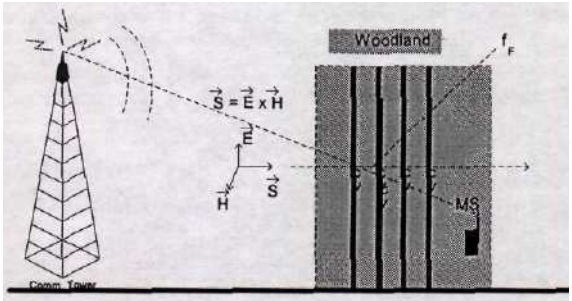
Grafiks (6). Signāla jaudas zudumi uztveršanas punktā P(d) (dBm) kā funkcija no attāluma d(m), neievērojot vājinājuma reizinātāju.

Kā izriet no izteiksmēm (42-44), elektromagnētiskā lauka intensitāte vispārīgā gadījumā ir daudzu parametru funkcija: $E_r=E_r(\lambda,\theta,d,h_r,h_t,P,G)$.

3) Gadījumos, kad mobilā stacija nokļūst meža masīvā vai virzās pa ceļu starp meža masīviem, jāveido matemātiskie modeļi, kas izmanto sekojošus tuvinājumus:

3.1) Ja MS atrodas meža masīva iekšienē, tad UAF-diapazonā mežu var uzskatīt kā divas neviendabīgas vides - slāņaina diviāzu vide(8.zīm.) un divfāzu vide (9.zīm), kura dispersās daļiņas - koki - tiek uzskatīti kā kvazisfēras, kas izvietotas regulāri (pie nosacījuma, ka meža masīva blīvums ir mazs).

Modelis I



Efektīva kompleksā dielektriska caurlaidība dotajam modelim tiek noteikta:

$$\dot{\varepsilon}_m = \varepsilon_1(1 - f_F) + \dot{\varepsilon}_F \cdot f_F, \tag{45}$$

$$\text{vai} \quad \frac{\dot{\varepsilon}_m}{\varepsilon_1} = 1 + (\dot{\varepsilon}_F - 1) f_F, \tag{46}$$

bet rimšanas koefcienta lielums ar (47):

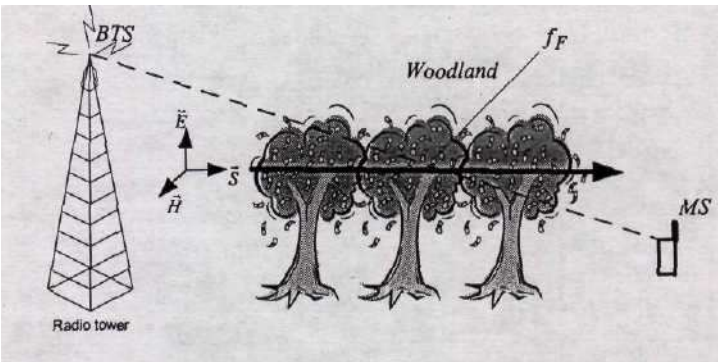
$$\alpha_{m1} = \omega\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cdot \sqrt{\varepsilon_1} \cdot \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \cdot \sin[\frac{1}{2} arctg(B_1 / A_1)], \tag{47}$$

kur

$$A_1 = 1 + (\varepsilon'_F - 1) f_F, \tag{48}$$

$$B_1 = \varepsilon''_F \cdot f_F,$$

Modelis II



9.zīm. Modelis II

Meža masīva efektīvā dielektriskā caurlaidība dotajam modelim:

$$\dot{\varepsilon}_m = \varepsilon_1[1 + \frac{\dot{\varepsilon}_F - \varepsilon_1}{\dot{\varepsilon}_F + 2\varepsilon_1} \cdot 3 f_F], \tag{49}$$

Bet lielums α_m tiek atrasts ar izteiksmi:

$$\alpha_{m2} = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}\sqrt{\frac{A^2+B^2}{C^2+D^2}}\cdot\sin\{\frac{1}{2}[arctg(B/A)-arctg(D/C)]\}, \quad (50)$$

kur,

$$A = \varepsilon'_F(1+3f_F)+(2-3f_F),$$
$$B = \varepsilon''_F(1+3f_F),$$
$$C = \varepsilon'_F+2, D = \varepsilon''_F. \quad (51)$$

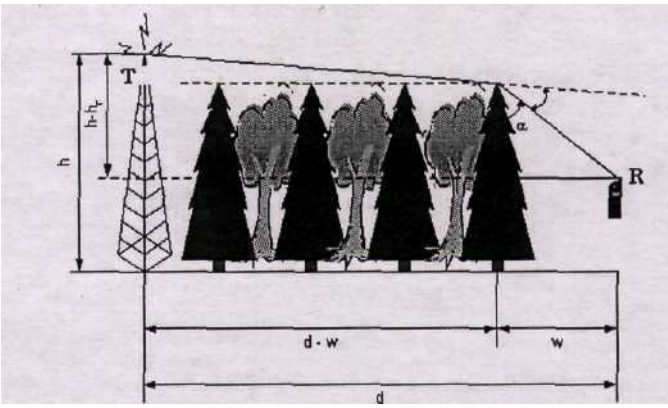
Šajā gadījumā, ka izriet no 1.tabulas, pamatojoties uz šiem modējiem (Popova modeļi) var noteikt garumrimšanas koeficientu skaitlisko vērtību izmaiņu zonu radioviļņiem, kas izplatās caur meža masīvu, tātad arī lauka līmeni uztveršanas punktā.

1 .tabula

f, MHz	Teorija ($-\alpha_m$), dB/m		Eksperiments		Standarts	
	Modelis I F.(3.3)	***Modelis II*** F.(3.5)	$-\alpha_m$, dB/m	[ ]	$-\alpha_m$, dB/m	[ ]
10	0.0018	0.00378				
82	0.01435	0.03	0.0525	[10]		
100	0.018	0.0378	α_v=0.06 α_k=0.03	[9]	0.093	[5]
200	0.036	0.0756				
210	0.0378	0.079	0.0785	[2]		
300	0.0545	0.1145	0.1	[10]		
450	0.081	0.17				
500	0.09	0.189				
540	0.0972	0.204	α_v=0.2 α_k=0.	[9]	0.25	[5]

			18			
900	0.162	0.34				
1000	0.18	0.378				
1200	0.216	0.4536	$\alpha_v=\alpha_k$ =0.35	[9]		
1800	0.324	0.68				
1900	0.342	0.718				
2000	0.36	0.756				
3000	0.54	1.134				
3200	0.576	1.21	$\alpha_v=\alpha_k$ =0.5	[8]		
5000	0.9	1.89				
9600	1.728	3.63				
10000	1.8	3.78				
15000	2.7	5.67				
30000	5.4	11.34				

3.2) Ja MS atrodas aiz meža masīva vai jauktas trases rajona, tad UAF-diapazonam var izmantot elektromagnētisko viļņu difrakcijas modeli ķīlī (10. un ll.zīm.), kā art attiecīgi noteikt lauka līmeni uztveršanas punktā pēc 3. nodaļā piedāvātajām analītiskajām izteiksmēm (52, 53.) un p. 3.6.

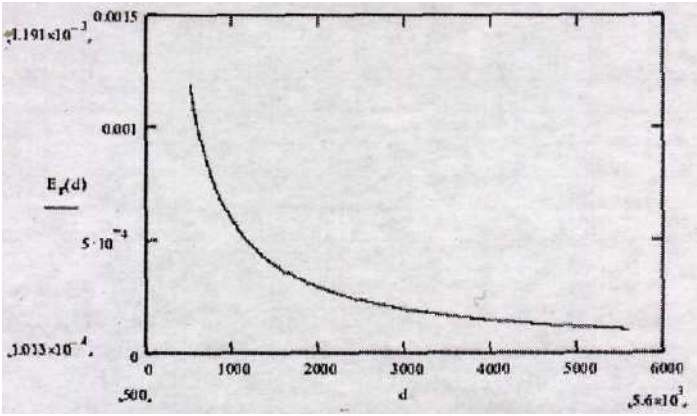


10.zim. Difrakcijas ķīlī ģeometrija.

Lauka Er(d) intensitāte uztveršanas punktā difrakcijas gadījumam:

$$E_r(d) := .225\frac{\sqrt{30\cdot P_t\cdot G_t}}{d}\cdot\frac{1}{v(d)}\quad ,(V/m) \tag{52}$$

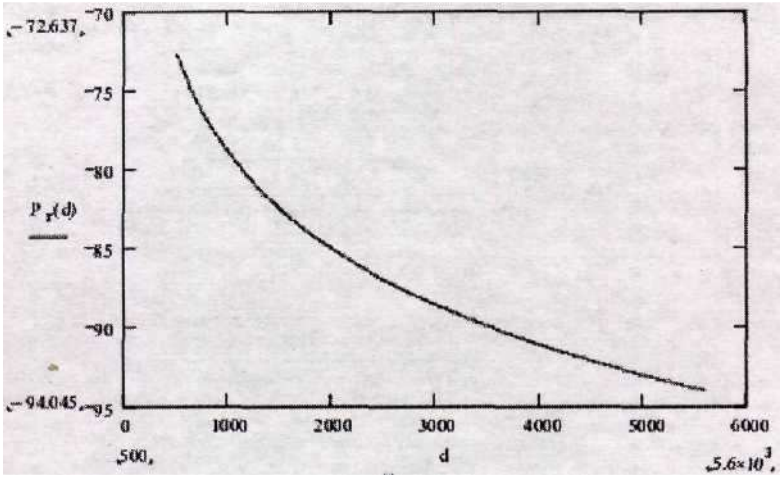
kur, $v(d) := \left(\frac{\pi}{2} - \alpha(d)\right)\cdot\sqrt{\frac{2\cdot[w\cdot(d-w)]}{\lambda\cdot(w+d-w)}}$ - Frenela



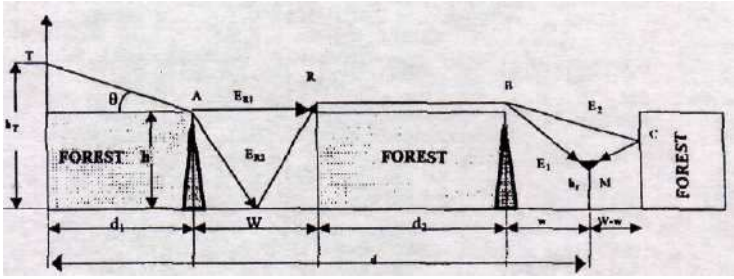
Grafiks (7). Elektromagnētiskā lauka Er(d) (V/m) intensitātes atkarība no attāluma d(m).

Jauda $P_r(d)$ uztveršanas iekārtas ieejā difrakcijas gadījumam:

$$P_r(d) := 10\log\left(\frac{E_r(d)^2}{120\cdot\pi}\cdot\frac{G_r\cdot\lambda^2}{4\cdot\pi}\cdot 1000\right)\quad ,(dBm) \tag{53}$$



Grafiks (8). Signāla jaudas zudumi uztveršanas punktā P(d) (dBm) kā funkcija no attāluma d(m).



11 .zīm. Meža sānskats. Lauka intensitāte

$E_{mobile}(d)$ uztveršanas punkta difrakcijas gadījumam:

$$E_{mobile} = 0.225 \cdot \frac{\sqrt{30 \cdot P_T \cdot G_T}}{d} \cdot \frac{(d_2 + w)}{(d_1 + W)} \cdot \sqrt{5 + \left(\frac{R_{ROAD}}{v_R}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{v_{BM}}\right)^2 + \left(\frac{R_{FOREST}}{v_{BCM}}\right)^2}{\left(\frac{1}{v'_{BM}}\right)^2 + \left(\frac{R_{FOREST}}{v'_{BCM}}\right)^2}}, \text{(V/m)} \quad (54)$$

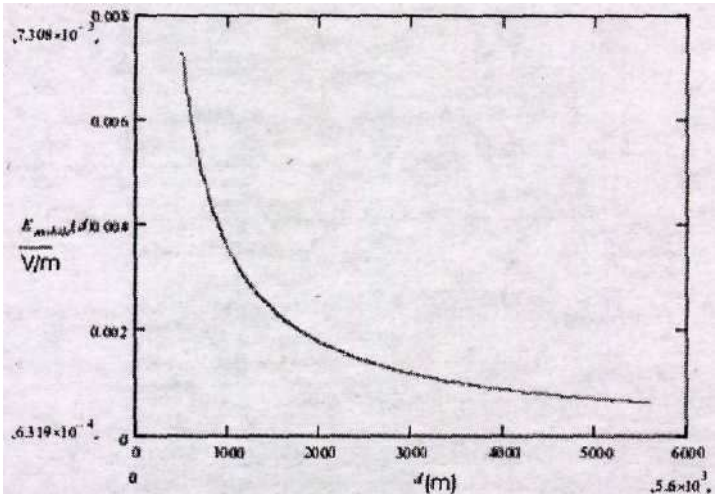
Kur $P_T G_T$ - efektīvā bāzes stacijas izstarošanas jauda, R_{FOREST} - Frenela koeficients pie atstarošanās no meža un

$$v_{BM} = \sqrt{2}(h - h_r) \cdot \sqrt{\frac{d \cdot \cos^2 \alpha}{\lambda(d \cos\alpha - w)w}} \tag{55}$$

$$v_{BCM} = \sqrt{2}(h - h_r) \cdot \sqrt{\frac{d \cdot \cos^2 \alpha}{\lambda(d \cos\alpha - 2W + w)(2W - w)}} \tag{56}$$

$$v'_{BM} = \sqrt{2}(h - h_r) \cdot \sqrt{\frac{(d_2 + w) \cdot \cos^2 \alpha}{\lambda[(d_2 + w)\cos\alpha - w]w}} \tag{57}$$

$$v'_{BCM} = \sqrt{2}(h - h_r) \cdot \sqrt{\frac{(d_2 + w) \cdot \cos^2 \alpha}{\lambda[(d_2 + w)\cos\alpha - 2W + w](2W - w)}} \tag{58}$$

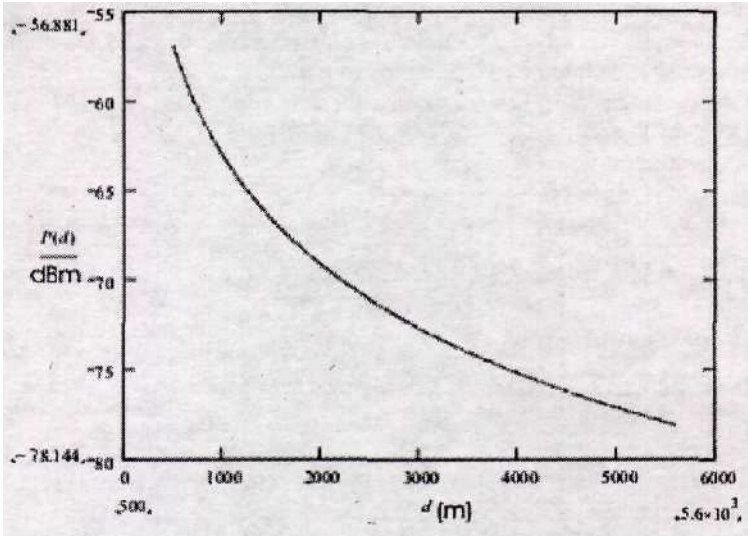


Grafiks (9). Elektromagnētiskā lauka intensitātes izmaiņas uztveršanas punktā E_{mobile}(V/m) atkarībā no attāluma d(m).

Lai aprēķinātu signāla jaudas zudumus uztveršanas punkta atkarībā no attāluma, izmantojam formulu:

$$P_R(d) := \frac{E_{mobile}(d)^2}{120\pi} \cdot \frac{G_r \cdot \lambda^2}{4 \cdot \pi} \tag{59}$$

$$P(d) := 10 \cdot log\left(P_R(d) \cdot 1000\right) \quad , (\mathrm{dBm}) \tag{60}$$



Grafiks (10). Signāla jaudas zudumi uztveršanas punkta P(d) (dBm) kā funkcija no attāluma d(m).

Ceturtā nodaļa

Zināmie daudzstaru radioviļņu izplatīšanās modeļi, kas tiek izmantoti pie ierobežota izkliedēto viļņu skaita, nevar tikt izmantoti veidojot matemātiskos modeļus radioviļņu izplatībai mežā.

Tāpēc ceturtajā nodaļā balstoties uz aptuveniem Tverska un Ritova modeļiem, tika izveidoti radioviļņu matemātiskie modeļi radioviļņu izplatībai

mežu masīvos, kas ļāva noteikt koherentās un nekoherentās sastāvdaļas uztveršanas punktā.

Mežs šajos modeļos tika attēlots sekojoši:

- Tverska tuvinājumā mežs tiek aprakstīts kā neviendabīga vide ar nejauši izvietotiem kokiem, uz kuriem daudzkārtēji tiek izkliedēts elektromagnētiskais vilnis un lauks uztveršanas punktā tiek noteikts kā visu izkliedēto lauku superpozīcija.

Tverska tuvinājums - daudzkārtējas izkliedēšanas teorija ļauj ievērot elektromagnētiskā viļņa rimšanu tā izkliedēšanas un absorbēšanas de] vilnim izplatoties vidē, kas sastāv no liela skaita diskrētu izkliedētāju. Tādējādi, elektromagnētiskā viļņa izplatīšanās mehānisma meža masīva iekšienē apraksts, balstoties uz daudzkārtējas viļņu izkliedēšanas statistisko teoriju, ir ļoti interesants no teorētiskā un praktiskā viedokļa.

Izmantojot Tverska teoriju, var novērtēt vidējā lauka, koherentās intensitātes, garumpavājināšanas, meža vides efektīvās dielektriskās caurlaidības vērtības, ņemot vērā meža parametrus: koku blīvumu, kompleksās dielektriskās koka caurlaidības lielumu un vērtību sadalījumu.

Lauka intensitāti, kas eksistē uztveršanas punktā $r_a(x_a, 0,0)$, saskaņā ar daudzkārtējas viļņu izkliedēšanās uz kokiem teoriju, pielietojot Tverska tuvinājumu, var izteikt kā summu:

$$E(\mathbf{r}_a) = \varphi^a + \sum_{s=1}^{N} \varphi^s \psi_s^a + \sum_{s=1}^{N} \sum_{m=1, m\neq s}^{N} \varphi^m \psi_s^m \psi_s^a + \\ + \sum_{s=1}^{N} \sum_{m=1, m\neq s}^{N} \sum_{t=1, t\neq m,s}^{N} \varphi^t \psi_t^m \psi_m^s \psi_s^a + \ldots \qquad (61)$$

Pie tam, pirmais saskaitāmais ir tiešais vilnis, bet pārējie saskaitāmie ir noteiktās kārtnības izkliedētā lauka komponenti - vienreizēja, divreizēja izkliedēšanās utt. Šī saskaitāmo rinda attiecas uz gadījumu, kad meža masīvā atrodas N koki un tiek ievēroti visi iespējamie izkliedēšanas procesi, izņemot viļņus, kas iet caur vienu izkliedētāju vairāk par vienu reizi. Summēšanas indeksi norāda uz konkrētu izkliedētāju, piemēram, s - izkliedētājs, kas atrodas punktā r_s.(p - krītošais vilnis, augšējais indekss norāda novērošanas punktu, piemēram, $<\varphi^s$ - krītošais vilnis punktā r_s; ψ- lauks, kas izkliedēts ar mežaugu segas elementu, piemēram, ψ^a_s - lauks, kas rodas punktā r_a no izkliedētāja r_s.

Tā kā koki meža masīvā ar laukumu S izvietojušies nejauši, varbūtību tam, ka apgabalu dS aizņem koks, noteiksim sekojoši:

$$P(dS) = \frac{dS}{S}.$$

Uzskatīsim koku atrašanos viļņa izplatīšanās trasē par retu notikumu plūsmu ar pastāvīgu vidējo blīvumu v. Tas nozīmē, ka divu koku atrašanās varbūtība apgabalā dS, salīdzinot ar viena koka atrašanās varbūtību, ir maza, kā arī koka atrašanās varbūtība jebkurā apgabalā dS nav atkarīga no tā, kāds koku skaits ir citos apgabalos, kas nepārklāj doto apgabalu.

Fakta varbūtība, ka pavisam meža masīvā ir N koki, tiek noteikta ar Puasona likumu.

$$P(N) = \frac{(\nu S)^N}{N!} \exp(-\upsilon S). \tag{62}$$

Izteiksme (63) apraksta vidējo lauka intensitāti meža masīva $E(r_a)$

$$< E(\mathbf{r}_a) >= e^{ikx_a} \sum_{N=0}^{\infty} \left\{ \frac{\nu S^N}{N!} \exp(-\nu S) \left(1 + \sqrt{\frac{2\pi i}{k}} \frac{< f > x_a}{S} \right)^N \right\} \tag{63}$$

kur, <f> - vidējā izkliedēšanas amplitūdas vērtība virzienā ,,uz priekšu", kas nav atkarīga no izkliedētāju koordinātēm x; k - augsts pozitīvais parametrs (diapazonam 900-1800 MHz $k \geq \pi$).

Tverska modelis ļauj novērtēt elektromagnētisko viļņu izkliedēšanas apstākļus neviendabīgas vides elementos, kas izvietoti nejaušā kārtībā.

Tverska risinājums ļauj noteikt elektromagnētiskā lauka koherentās un nekoherentās sastāvdaļas uztveršanas punktā, pie tam plakanpolarizētajam elektromagnētiskajam vilnim no izejot no signāla reālās uztveršanas viedokļa, jāzin koherentā sastāvdaļa. Taču Tverska modeli praksē sarežģītības dēļ ir grūti izmantot koherenta lauka līmeņa matemātiskam aprakstam uztveršanas punktā.

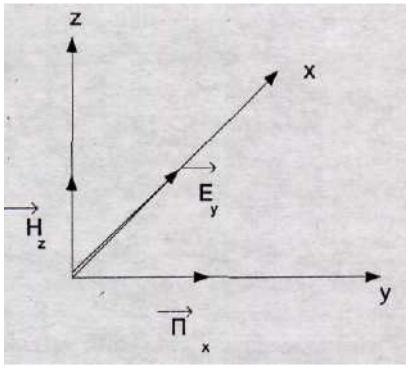
Pie nelielām meža elementu koncentrācijām telpā, ir iespējams izmantot Ritova tuvinājumu, kurā neviendabīgas vides efektīvā dielektriskā caurlaidība ε_m ir funkcija no telpiskajām koordinātēm, pie nemainīguma nosacījuma laikā $\varepsilon(r) \mid t = const$, pie tam mežs tiek uzskatīts kā lineāra statistiski neviendabīga vide, kuras efektīvai kompleksai dielektriskai caurlaidībai ir mediānas vērtība un pirmās kārtas ierosme dumpošana nejaušā koku izvietojuma dēļ.

Izteiksim efektīvo meža vides dielektrisko caurlaidību kā $\varepsilon_m = \langle\varepsilon_m\rangle + \varepsilon(r,t)$, kur $\langle\varepsilon_m\rangle$ - tās vidējā vērtība, $\varepsilon(r,t)$ - tās fluktuējoša daļa (pie pieņēmuma, ka neviendabīga vide ir diamagnētiska μ_r=l), tas ir, dielektriskā caurlaidība ir gadījuma funkcija no koordinātēm un laika. Tad vides laušanas koeficients tiks izteikts kā $n = \langle n\rangle + n_1(r,t)$, kur $\langle n\rangle = \langle\varepsilon_m\rangle$ $n_1(r,t)$ ir atkarīgs no $\varepsilon(r,t)$.

Tādējādi, gadījuma rakstura vidē efektīvā relatīvā kompleksā dielektriskā caurlaidība ε_m un laušanas koeficients n mainās no punkta uz punktu un šīs izmaiņas praktiski nav iespējams paredzēt. Vēl vairāk, pat ja tās būtu zināmas, praktiski nav iespējams aprakstīt to vērtības visos telpas punktos brīvi izvēlētā laika momentā.

Tāpēc vides parametri jāapraksta statistiski un jāmeklē elektromagnētiskā viļņa sastāvdaļu izmaiņu statistiskās likumsakarības šādā vidē.

Pieņemsim, ka elektromagnētiskais vilnis ir plakans un izplatās pa koordināti x.



12.zīm. Elektromagnētiskā viļņa virziens.

Ritova tuvinājums.

Elektriskā lauka sadalījumu telpā $E_z(r)$ var izteikt kā $E_z(r)=e^{\Psi(r)}$ un meklēt atrisinājumu funkcijai $\Psi(r)$ no vienādojuma (64) rindas veidā.

$$\left[\nabla^2 E_z(r) + k^2{}_m(1+2\delta n)\right]E_z(\mathbf{r}) = 0 \qquad (64)$$

Vāju fluktuāciju gadījumā parasti meklē tuvinātu vienādojuma (64) risinājumu maziem n.

Tuvināto vienādojuma atrisinājumu pie mazām n vērtībām var izteikt kā:

$$\left[\nabla^2\psi + (\nabla\psi)^2 + k_m{}^2(1+2\delta n)\right] = 0 \qquad (65)$$

Šis vienādojums ir pirmās kārtas nelineārs diferenciāls vienādojums attiecībā uz Δ_ψ (Rikati vienādojums).

Ja nav fluktuāciju ($\delta n = 0$) šo vienādojumu var izteikt kā:

$$\left[\nabla^2\psi_0 + (\nabla\psi_0)^2 + k_m{}^2\right] = 0 \qquad (66)$$

Izteiksim vienādojuma (66) atrisinājumu:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \left(\frac{d\psi}{dx}\right)^2 + k_m{}^2(1+2\delta n) = 0,$$

$k_m{}^2(1+2\delta n) = a^2$ (a=const)

$$\psi'' + (\psi')^2 + a^2 = 0$$

Izsakot locekli $\psi' = \xi(y)$, iegūstam

$$\xi' + \xi^2 + a^2 = 0 \qquad (67)$$

Šis vienādojums ir vienādojums ar atdalāmiem mainīgajiem.

$$\frac{d\xi}{dy} = -(\xi^2 + a^2)$$

$$\frac{d\xi}{\xi^2 + a^2} = -dy$$

Integrējot $\int\frac{d\xi}{\xi^2 + a^2} = -\int dy$, iegūsim $\frac{1}{a}arctg\frac{\xi}{a} = -y + c_1$, ($c_1$=const)

$$arctg\frac{\xi}{a} = a(c_1 - y)$$

$$\frac{\xi}{a} = tga(c_1 - y)$$

$$\xi = atga(c_1 - y)$$

Atgriežoties pie mainīgā Ψ, iegūsim:

$$\psi' = atga(c_1 - y) \tag{68}$$

Šis vienādojums arī ir vienādojums ar atdalāmiem mainīgajiem

integrējot $\int d\psi = \int atga(c_1 - y)dy$

$$\psi(y) = a\int \frac{\sin a(c_1 - y)}{\cos a(c_1 - y)}dy = \int \frac{d\cos a(c_1 - y)}{\cos a(c_1 - y)} = \ln|\cos a(c_1 - y)| + c_2 ,$$

(c_2=const), tādā veidā funkcijas $e^{\psi(r)}$ pakāpi noteiksim kā:

$$\psi = \ln|\cos a(c_1 - y)| + c_2$$

iegūsim:

$$\psi = \ln\left|\cos\left(k_m\sqrt{1 + 2\delta n}(c_1 - y)\right)\right| + c_2 \tag{69}$$

vai

Analoģiskā veidā tiek risināts vienādojums (67), pie tam tā atrisinājums ir:

$$\psi_0 = \ln|\cos(k_m(c_1 - y))| + c_2 \tag{70}$$

tas ir, $E_o(r)=e^{\Psi}o^{(r)}$ - lauks bez fluktuācijam un $E(r)=e^{\Psi(r)}$ - lauks, kas ievēro vides laušanas efektīvā koeficienta fluktuācijas. Ritova tuvinājums ļauj novērtēt radiosignāla koherento sastāvdaļu, kas izplatās meža masīvos pie maziem blīvumiem, kad laušanas rādītāja efektīvās vērtības fluktuācijas ir pirmās kārtas mazi lielumi, bet pats meža masīvs ir neviendabīga vāji dispersa vide ar statistiski izvietotiem neviendabīgumiem (kokiem).

Piektā nodaļa

Piektajā nodaļā ir aprakstīti eksperimentālie pētījumi, eksperimentu rezultāti un veikta salīdzinošā analīze ar citu autoru eksperimentu rezultātiem.

Radioviļņu izplatīšanās meža masīvos eksperimentālie pētījumi ir ļoti sarežģīti un dārgi sekojošo iemeslu dēļ:

mežs no elektrodinamikas viedokļa vispārīga gadījumā ir nejauši - neviendabīga daudzfāzu vide, kuras elektrodinamiskie parametri nejauši mainās atkarībā no meža struktūras un veida, sezonāliem, klimatiskiem un laika apstākļiem u.c;

radiosignāla līmenis uztveršanas punktā ir atkarīgs ne tikai no darba frekvences, polarizācijas veida un MS un BTS antenu pacelšanas augstuma, bet arī

nejaušā veidā ir atkarīgs no koku ietekmes, to izvietojuma, meža pamatnes seguma u.c;

lai izmērītu radiosignāla līmeni, ir nepieciešama tāda dārga aparatūra kā spektrometri ar augstu jutību, kas izvēlētajā darba frekvencē ļauj noteikt, ne tikai uztvertā signāla līmeni (attiecībā uz MS uztvērēja jutību), bet arī tā polarizāciju, enerģētisko spektru un attiecību S/T (signāls/traucējums);

RVI eksperimentu veikšanas sarežģītība mežā slēpjas tai apstāklī, ka signāla līmenis mērījumu laikā pastāvīgi mainās, fluktuējot attiecībā pret mediānas vērtību, kas arī pakļauts lēnām pamiršanām, pie tam BTS stāvoklis, antenu pacelšanas augstums, vidējā darba frekvence un ESM polarizācijas veids parasti ir fiksēti un mainās tikai MS stāvoklis telpā attiecībā pret BTS.

Trešajā nodaļā jau tika apskatīti RVI atsevišķu eksperimentālo pētījumu mežos rezultāti, kas pamatā aprobežojas ar efektīvo garumrimšanas koeficientu noteikšanu atbilstošajās darba frekvencēs, pie atbilstošiem polarizācijas veidiem un atbilstošiem mežu tipiem pie tieša - caurspiedoša RVI. Taču mobilo sakaru sistēmām vidējā 900 MHz frekvencē pie tiešas meža zondēšanas šādi eksperimenti literatūrā nav aprakstīti.

Pamatā šie eksperimenti aprobežojās ar RVI pilsētās ar dažādu apbūves blīvumu, kurās bija izveidoti mobilo sakaru mikrošūnu tīkli.

Tāpēc zemāk tiks apskatīti RVI eksperimentu rezultāti mežos GSM standartam.

7. ***RVI eksperimentālie pētījumi izvelētajā trasē Mālpils-Garkalne***

Pašlaik praktiski nav eksperimentālo pētījumu reprezentatīvu rezultātu par decimetru diapazona radioviļņu tiešu izplatīšanos meža masīvos. Tajā pat laikā pie mobilo sakaru šūnu sistēmu projektēšanas, ir precīzi jāzina radioviļņu rimšanās mežā efektīvie koeficienti diapazonā no 900 līdz 2000 MHz, kas galu galā ir nepieciešams vajadzīgā makrošūnas rādiusa izvēlei pie prasības par izvēlētās teritorijas vienmērīgu radiopārklāšanu.

Tāpēc tika veikti eksperimentālie pētījumi par elektriskā lauka intensitātes un jaudas plūsmas blīvuma atkarību uztveršanas punktā no attāluma līdz izvēlētai BTS pie RVI radioviļņu tiešas izplatīšanās mežā.

Šajā nodaļā ir attēloti elektriskā lauka intensitātes un jaudas plūsmas blīvuma mērījumu rezultāti 900 MHz frekvencē, kas tika veikti meža masīvā vasarā un rudenī, kad kokiem bija lapas.

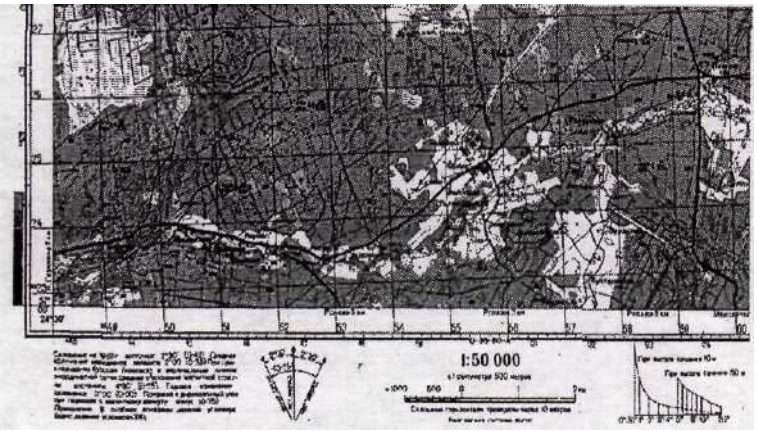
1. eksperiments.

RVImērījumi ar spektra analizatoru FSP30(3kHz-30GHz)

Elektromagnētiskā lauka intensitātes reģistrācija uztveršanas punktā tika veikta pie signālu uztveršanas ar rupora antenu ar pastiprināšanas koeficientu IGHz frekvencē - G = 7 dB. Uztverošās antenas augstums attiecībā pret zemi bija apmēram h_2 ~1,5 metri. Raidītāja antena atradās uz BTS torņa ar augstumu h,=100 m, kas atrodas apdzīvotajā vietā Podkajās un *izstaroja vertikāli polarizētu*

elektromagnētisko vilni. Raidītāja jauda bija P - 50 W. Mērījumi tika veikti stingri fiksētos attālumos no BTS:

R = 1km; 2km; 3 km; 5km; 10km - garMālpils-Garkalnes šoseju (13.zīm.).



13.zim. Apvidus karte.

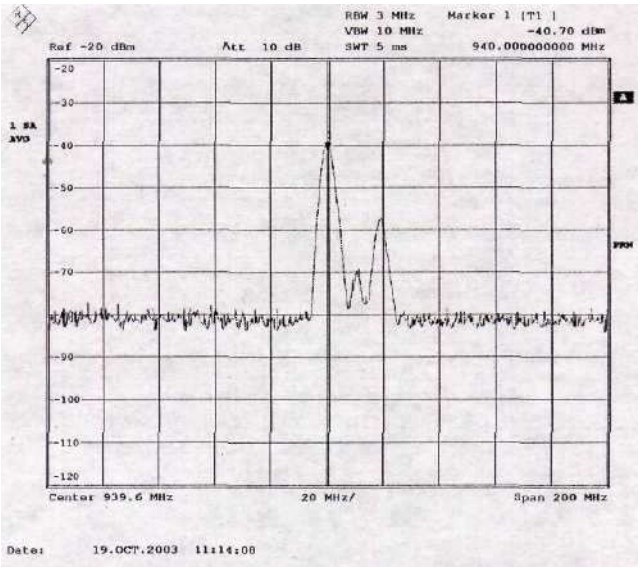
Spektra analīzei kontrolējamā frekvenču diapazonā un drošas signālu uztveršanas zonā tika izmantots augstfrekvenču FSP30 tipa spektra analizators (kura darba frekvenču diapazons ir - 3kHz-30GHz), kas ļauj automātiski mērīt signāla līmeni diapazonā no 10 līdz 6000 MHz. Mērījumu shēma attēlota 14.zīmējumā.

14.zīm. Mērīšanas iekārta.

Spektra analizatora monitorā tiek attēlots uztvertā signāla spektrs frekvenču joslā 200 MHz.

Eksperimentu rezultāti

Kā piemērs 15.zīm. attēlota uztvertā signāla jaudas līmeņa spektrogramma darba frekvencē 939,6 MHz.



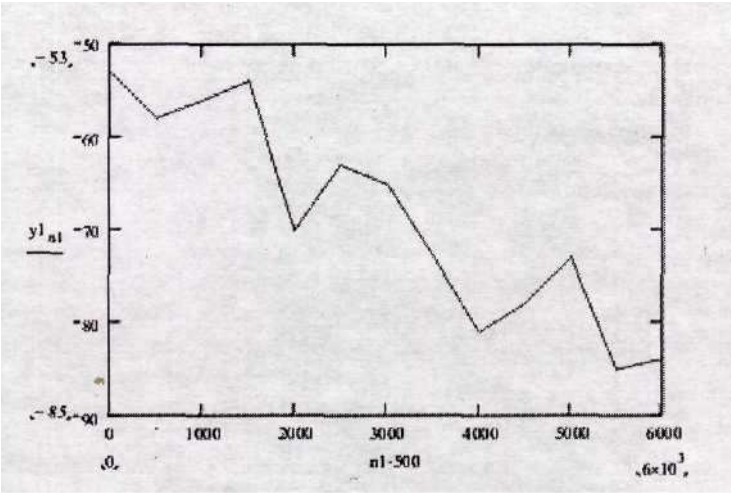
15.zīm. Signāla spektrogramma uztveršanas punktā

Marķieris nodrošina pārvietošanos pa spektrālo raksturlīkni ar vienlaicīgu signāla frekvences un jaudas parametru vērtību uzrādīšanu.

Spektrogramma tiek attēloti uztvertā radiosignāla jaudas līmeņa mērījumu rezultāti dBm-os kā funkcija no frekvences MHz. Kā izriet no 15.zīm. frekvencēs f_1=939.6, f_2=949.6, f_3=959,6 tiek novēroti trīs maksimumi -40.7dBm, -70dBm, -57dBm, kas atbilst trijiem vienas BTS šūnas sektoriem.

Mērījumu princips ir standartizēts un tā jēga ir spektra analizatora secīga pārskaņošana uz uzdoto frekvenci un signāla līmeņa mērīšana uzdotajā frekvencē.

Lai gan marķiera mērījumu precizitāte ir ±3 dBm, tajā pašā laikā tā ir pietiekama ekspluatācijas mērījumiem, kas arī bija pamatojums plašai spektra analizatoru izmantošanai radiofrekvenču pārraides sistēmu ekspluatācijā. Spektrogrammu ieraksti no spektra analizatora tika pārnesti uz papīra nesēju, kas ļāva uzzīmēt grafiku 16.zīm.



16.zīm.

Lai pārrēķinātu uztvertā signāla līmeni, kas tika izmērīts ar spektra analizatoru (dBV), signāla jaudā uztveršanas punktā (dBm) (pie nosacījuma, kas uztvērējantenas izeja ir saskaņota ar uztvērēja ieeju), tika izmantota attiecība 71.

$$P_r(d) = \frac{V^2}{4R_{ant}} \tag{71}$$

$$P_r(d)dBm = 10\log\left[\frac{V^2}{4R_{ant}}\right] \tag{72}$$

P_r- signāla jauda uztveršanas punktā

R_{ant}=50Ω - uztvērējantenas pretestība

V — sprieguma efektīvā vērtība uztvērēja ieejā (signāla līmenis).

Eksperimentu rezultātu analīze:

Balstoties uz paveikto analīzi var uzskatīt, ka pie decimetru diapazona viļņu izplatīšanās mežā Šķēršļotā apvidū, darbojas dažādi radioviļņu izplatīšanās mehānismi.

Pie maziem attālumiem no BTS (līdz 2 km) lauku novērošanas punktā rada vilnis, kas izplatās brīvajā telpā. Attālumā 2 km lauks uztveršanas punktā strauji krītas par -12 dBm attiecībā uz lauka līmeni brīvajā telpā (-75dBm), jo izplatīšanās ceļā ir meža masīvs, kas pavājina tiešo vilni un lauks uztveršanas punktā nokļūst

vērtību apgabalā, kas ierobežotas ar līknēm jauktai trasei (-69,159 dBm) un difrakcijai ķīlī (-85,029 dBm).

Attālumā no 3-5 km darbojas daudzkārtējs viļņu izkliedēšanas mehānisms uz kokiem un vājināšanās mehānisms ir līdzīgs telpiskā viļņa vājināšanai.

Attālumā 5 km lauka līmenis bija vienāds (-64 dBm), tas izskaidrojams ar to, ka uztvērējs atradās tiešas redzamības zonā un lauks uztveršanas punktā tika veidots no tiešā viļņa un no meža malas atstarotā viļņa.

2.eksperiments

Mērījumi, izmantojot pārvietojamo mobilo staciju.

2.eksperiments tika veikts gar to pašu šosejas posmu, izmantojot specializētu sistēmu drošas uztveršanas zonas analīzei mobilo sakaru tīklu bāzes staciju signāliem.

Mērīšanas aparatūru veidoja četri moduļi (17.zīm.):

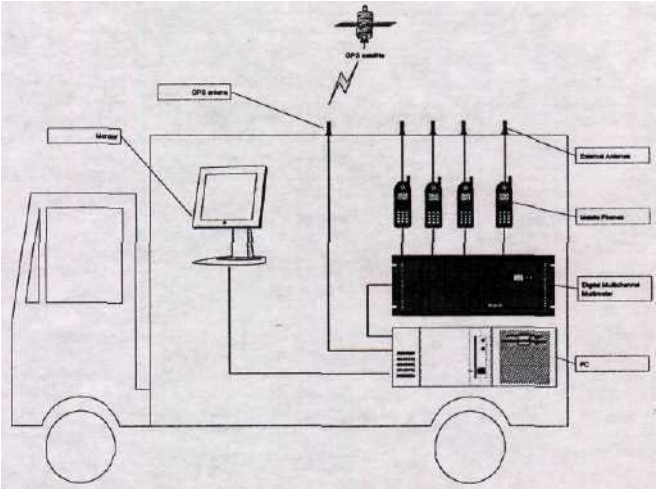
1) Mobilie telefoni *Nokia* 5110 ar programmu Service Termīnal, kas graduēta jaudas plūsmas blīvuma vienībās *(PDμW/cm^2).*

2)PC

3) Ārējā antena - vibrators

4) Ciparu multimetrs,

bez tam, tika izmantots GPS uztvērējs, kas lika pieslēgts PC.



17.zīm.

Mērījumu metodika

1) Pārklāšanas zona, kas iekļāva pirmā eksperimenta teritoriju, grafiski tika attēlota apvidus kartē (18.zīm.).

2) Radiosignāls no BTS tika mērīts BCCH *(Broadcast Control Channel)* kanāla frekvencē.

3) Uztvertā signāla līmeņa vērtības un mērījumu punktu koordinātes tika ierakstītas speciāla faila veidā (19.zīm.).

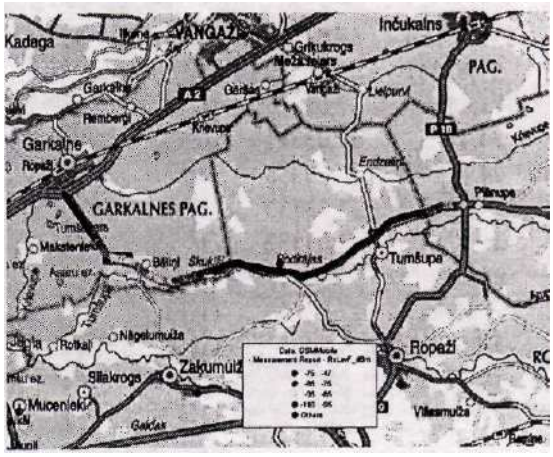
4) Katrā trases punktā tika mērīts uztvertā signāla līmenis, ar piesaisti pie grafiskajām koordinātēm.

5) Skenējošie uztvērēji (mobilie telefoni) mērīšanas modeļa sastāvā ļāva katrā trases punktā izmērīt uztverto signālu līmeņu vērtības.

6) Pēc faila datiem, kurā tika ierakstītas uztverto signālu līmeņu vērtības un vietas koordinātes, tika izveidots uztvertā signāla jaudas atkarības grafiks no koordinātes mērījumu trasē, kas attēlots 20.zīm. (jāatzīmē, ka mērījumi tika veikti gar trasi, kas ir identiska pirmā eksperimenta trasei).

18.(a).zīm. Signāla līmenis no bāzes stacijas Podkājas.

18.(b).zīm. Signāla līmenis no bāzes stacijas

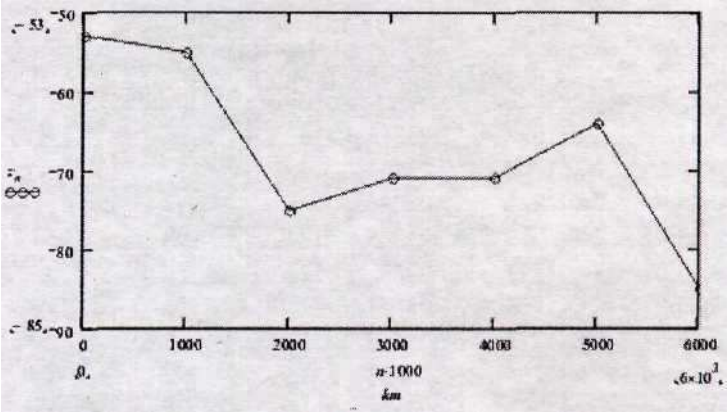


18.(c).zīm. Apkopojošs izmērītā līmeņa grafiks no trijām bāzes stacijām.

Device Time	GPS longitude	latitude	altitude	Mob. 1 scan mode RxLev BCCH 25
10:34:58	24,41692	57,03746	14	-96
10:34:59	24,41706	57,03731	13,6	-96
10:35:00	24,41721	57,03715	13,1	-93
10:35:01	24,41729	57,03706	12,9	-98
10:35:02	24,41743	57,03692	12,75	-89
10:35:03	24,41763	57,03671	12,47	-96
10:35:04	24,41772	57,03662	12,1	-90
10:35:06	24,41805	57,03631	11,7	-92
10:35:07	24,41826	57,03611	11,47	-96
10:35:08	24,41836	57,03602	11,2	-88
10:35:10	24,41876	57,03566	11,1	-92
10:35:11	24,41894	57,0355	11	-96
10:35:12	24,41905	57,0354	11	-101
10:35:13	24,41929	57,03519	11,07	-92
10:35:14	24,41938	57,03511	10,9	-103
10:35:15	24,4196	57,03494	10,85	-95
10:35:16	24,41983	57,03474	10,7	-94

10:35:17	24,41998	57,03463	10,7	-99
10:35:18	24,42027	57,03439	10,72	-91
10:35:19	24,42059	57,03414	10,7	-91
10:35:20	24,42061	57,03412	10,7	-94
10:35:21	24,4208	57,03397	10,75	-96
10:35:22	24,421	57,03381	10,75	-98
10:35:23	24,42133	57,03355	10,8	-95
10:35:24	24,42161	57,03333	10,9	-90
10:35:25	24,42163	57,03332	11	-94
10:35:26	24,42189	57,0331	11,07	-90
10:35:27	24,42203	57,03299	11,1	-93
10:35:28	24,42225	57,03283	11,15	-93
10:35:29	24,42249	57,03263	11,25	-94
10:35:30	24,42276	57,03243	11,3	-91

19.zim. Faila paraugs ar mērījumu punktu koordinātēm un signāla līmeņiem.

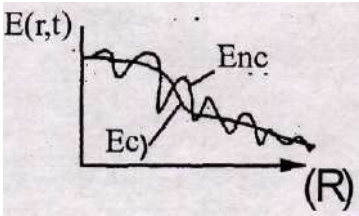


20.zīm. Signāla jaudas P(r) (dBm) atkarības līkne no attāluma r.

Eksperimentu analīze.

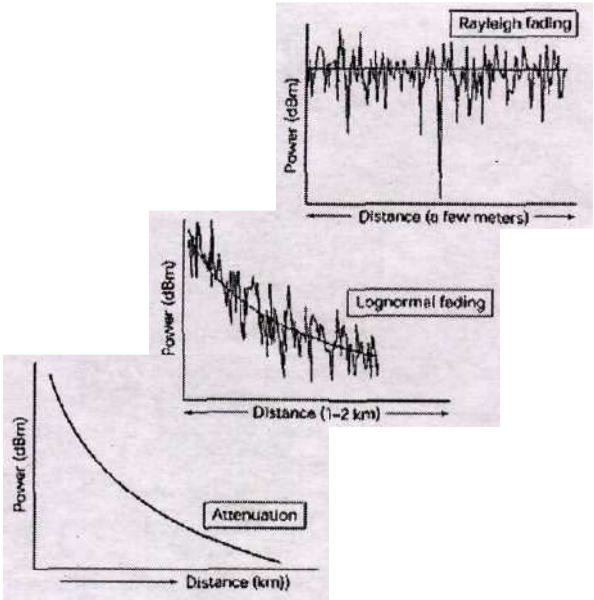
Kā redzams no 16. un 20. zīmējumiem, lauka intensitātes līmeņi vienos un tajos pašos izmērītās trases punktos ir dažādi, tas izskaidrojams ar lauka līmeņa mērīšanas metodiku atšķirību.

Pirmajā eksperimentā tika mērīts lauka līmenis konkrētajā trases punktā, pie stacionārās uztvērējantenas, bet otrajā eksperimentā radioviļņu izplatīšanās trase nav stacionāra, kas saistīts ar mobilās stacijas pārvietošanu pa trasi.



21.zīm.

kur Ec - mediānas vērtība (koherents lauks); Enc - (signāla līmeņa fluktuācijas) nekoherents lauks. Daudzkārtējas radioviļņu atstarošanās no meža apgabaliem rezultātā un BTS raidītājam strādājot nepārtrauktas izstarošanas režīmā tiek veidota sarežģīta interferences aina, kas noved pie uztvertā signāla pamirSanām. 21. zīm. attēlots tādu pamiršanu (fedingu) piemērs, kas saistītas ar uztvērēja kustību. Daudzstaru izplatīšanās noved pie tā, ka uztveršanas punktā tiek novēroti signāli ar dažādām laika aizturēm. Klājoties vienam uz otra, tie var novest pie ievērojamas signāla izkropļošanas. Šī parādība tiek saukta par signāla izkliedēšanu laikā. 22. zīm. attēlotas uztvertā signāla amplitūdas raksturīgās atkarības pie nejaušu pamiršanas parādību esamības.



22. zīm.

Mērījumi rāda, ka jaudas zudumi ir nejaušs lielums, kuram ir logaritmisks normāls sadalījums vidējās vērtības apkārtnē.

Secinājumi

Iegūtie rezultāti ļauj noteikt signāla jaudas mediānas vērtības (-51 dBm - -88 dBm), reducējot uztverto signālu līmeņus atkarībā no diskrētiem attālumiem (2. tabula).

2. tabula

Attālums starp BTS un MS R (km)	Uztvertā signāla jauda Pr (dBm) Eksperiments Nr.1	Uztvertā signāla jauda Pr (dBm) Eksperiments Nr.2
R =0,5	-53	-53
R=1	-55	-56
R=2	-70	-75
R=3	-65	-71
R=4	-81	-71
R=5	-73	-64
R=6	-84	-85

Iegūti aptuveni radioviļņu izplatīšanās rakstura novērtējumi mežaina apvidū.

Tomēr, Sie dati nevar tikt izmantoti uztvertā radiosignāla līmeņa fluktuāciju aprakstam attiecībā uz mediānas vērtību. Lai iegūtu signāla līmeņu sadalījumu atkarībā no norādītiem parametriem, ir vajadzīgi tālāki eksperimentāli pētījumi. Lai aprēķinātu elektriskā lauka intensitāti E katrā konkrētajā gadījumā, jāveido trases profils un, atkarībā no šī profila rakstura, jāveic aprēķins ar to vai citu metodi.

Secinājumi

Vispārināsim samērā nedaudzo augstāk apskatīto darbu eksperimentālos pētījumu datus par radioviļņu izplatīšanos meža masīvos:

1) Mērījumu rezultāti parādīja, ka mežam nav liela ietekme uz radioviļņu ar frekvencēm līdz 30 MHz izplatīšanos.

2) Frekvencēm diapazonā no 50 MHz līdz 60 GHz ir fiksēti sekojošie fakti:

2.1) UAF radioviļņu, kas izplatās meža masīvos, enerģētiskie raksturlielumi saistīti ar mežaugu segas biometriskiem parametriem.

Tiek novēroti izkliedēšanas efekti uz augu segas elementiem un tie ir jo stiprāki, jo lielāka ir frekvence. Tiek atzīmēts sarežģīts elektromagnētiskā lauka interferences raksturs meža vidē, dziļu telpisko pamiršanu esamība. Tāpēc UAF radioviļņu izplatīSanās meža vidē pamata likumsakarību analīzei jāapskata vidējie enerģētiskie raksturojumi. Meža vide ir lielā mērā radioabsorbējošā vide, pie kam efektīvā garumrimšanas koeficienta vērtības pieaug palielinoties frekvencei. Pie tiešā viļņa izplatīšanās caur meža vidi, elektromagnētiskā lauka līmeņa atkarībai no tāluma ir eksponenciāls raksturs, pie tam elektromagnētiskā lauka līmeņa atkarības eksponencialitātes pakāpe pie attāluma palielināšanas izmainās. Pie kaut kādas tāluma vērtības rimšanas pakāpe samazinās. Jo lielāka ir frekvence, jo šis attālums ir mazāks. Lai izkaidrotu šo konkrēto faktu, izvirza divus pieņēmums: pirmais - sānu viļņa lielas ietekmes esamība; otrais - daudzkārtējas izkliedēšanas efekti uz augu segas elementiem.

Tiek novērotas lauka līmeņa sezonas variācijas. *Ziema radioviļņu pavājināšana ir zemāka, nekā vasarā.* Tiek izvirzīti divi iespējamie šīs parādības iemesli: 1) lapu ietekme uz absorbēšanu pat pie aplūkojamā diapazona zemām frekvencēm; 2) koku zaru un lapu elektrisko īpašību izmaiņas atkarībā no to mitruma līmeņa (palielinās pavasarī un samazinās rudenī). Aplūkojamā diapazona zemu frekvenču (līdz 400 MHz) apgabalā tiek novērota atšķirīga radiosignālu pavājināšana dažādiem polarizāciju veidiem. Pie vertikālas radioviļņu polarizācijas - rimšana ir augstāka, nekā pie horizontālas.

Uzskata, ka tāda lauka uzvedība zemās frekvencēs ir saistīta ar vertikālu koku stumbru orientāciju un to dominējošo ietekmi uz radioviļņu izplatīšanās procesu. Palielinoties frekvencei, palielinās zaru loma, tāpat arī lapu loma, kas ir orientētas haotiski.

Efektīvo garumrimšanas koeficientu vērtības dažādās frekvencēs bija: Diapazonā no 100 līdz 500 MHz - *a~(0,053-0,174)dB/m* Diapazonā no 500 līdz 1200 MHz - *a~{0,2-0,35) dB/m* Diapazonā no 1200 līdz 3200 MHz - *a~(0,35-0,5) dB/m*

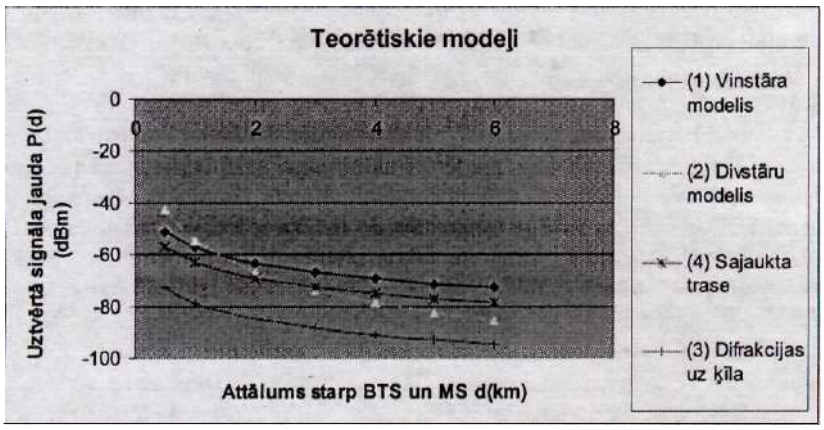
Slēdziens

UAF elektromagnētisko viļņu izplatīšanās meža masīvos teorētisko un eksperimentālo pētījumu salīdzinošā analīze

Lai novērtētu iegūtos teorētisko un eksperimentālo pētījumu rezultātus par UAF elektromagnētisko viļņu izplatīšanos meža masīvos, jāveic to salīdzinošā analīze, kā arījāizmanto eksperimentālie rezultāti, ko ieguvuši citi autori.

I. *Eksperimentālo rezultātu un šajā darbā izstrādāto modeļu salīdzinošā analīze.*

II. grafikā attēlotas radiosignālu jaudas P(d) mediānu normētu līmeņu skaitliskās vērtības MS atrašanas vietā kā funkcijas no attāluma starp MS un BTS - *d* 900 MHz darba frekvencei, pie nosacījuma, ka elektromagnētiskie viļņi, ko izstaro BTS antenas, ir vertikāli polarizēti.



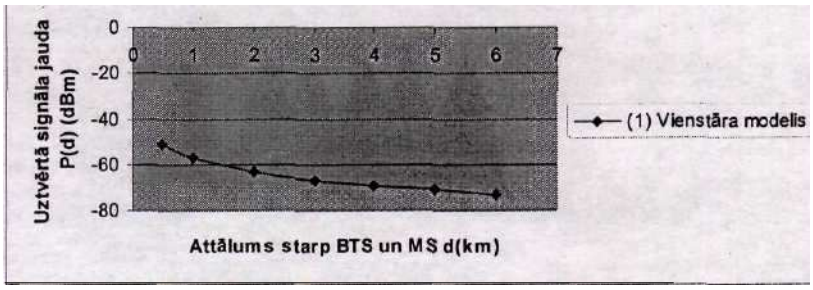
11. zīm. Uztverta signāla normēto līmeņu skaitlisko vērtību izmaiņu atkarības vidējā 900 MHz frekvencē, kas iegūtas pamatojoties uz teorētiskiem modeļiem.

a) Vienstara modelis, ko attēlo līkne (1), sniedz sekojošas funkcijas P(d) skaitliskās vērtības (3.2. nodaļa):

3.tabula

Attālums starp BTS un MS *d* (km)	Uztvertā signāla jauda P(*d*) (dBm)
0.5	-51.225
1	-57.246
2	-63.266
3	-66.788
4	-69.287
5	-71.225
6	-72.809

Vienstāra modelis

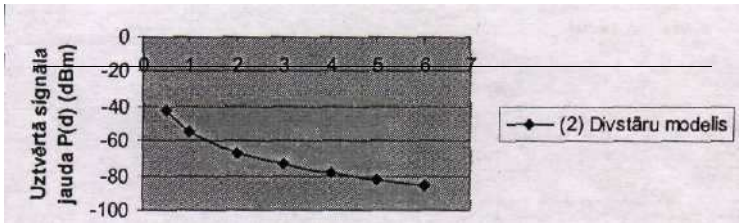


b) Divstaru modelis, ko attēlo līkne (2), sniedz sekojošas funkcijas P(d) skaitliskās vērtības (3.3. nodaļa):

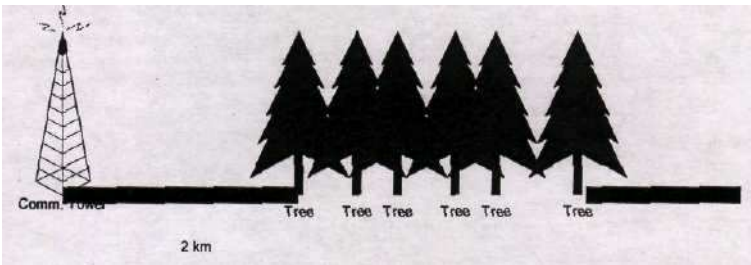
4.tabula

Attālums starp BTS un MS *d* (km)	Uztvertā signāla jauda P(*d*) (dBm)
0.5	-42.552
1	-54.539
2	-66.634
3	-73.678
4	-78.675
5	-82.552
6	-85.719

Divstāru modelis



Pie radioviļņu krišanas uz meža masīvu (23.zim.), kad mežmala atrodas 1 km attālumā no bāzes uztvērēja-raidītāja stacijas, jaudas līmeņa vērtības uztveršanas punktā tiek aprēķinātas pēc formulas:



23.zīm.

$$P(d)=P_0(d) + (-\alpha \cdot \Delta d), \qquad (73)$$

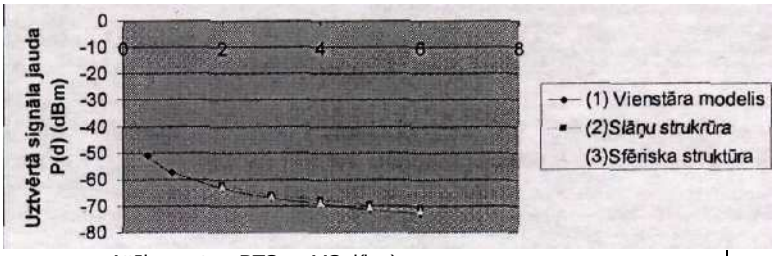
kur P_o (d) - jaudas līmenis, kas tiek noteikts vienstara modelim dBm punktā d_o=1km (jo radiovilnis līdz mežmalai izplatās brīvi), α - atbilstošā determinētā meža modeļa garumrimšanas koeficienta efektīvā vērtība (3.nodaja) - vai nu α = 0.162 dB/km (slāņveida struktūrai), vai arī α = 0.34 dB/rm - meža masīvam, kurā sfēriski koki regulāri izvietoti telpā, Δd - attālumu starpība starp uztveršanas punkta stāvokli un mežmalas atrašanās vietu (d_o=1km), km.

Funkciju P_0(d), P_1(d) un P_2(d) atkarības Šiem gadījumiem ir attēlotas 12.zīm. kā līknes 0, un 2, bet funkcijas P(d) skaitliskās vērtības dotas tabulā:

5.tabula

Attālums starp MS un BTS d (km)	Signāla līmenis MS uztveršanas punktā	
	P_1(d) Slāņveida mežs	P_2(d) Sfēriski koki
1	-62,586	-62,942
2	-65,768	-66,302
3	-67,927	-68,639
4	-69,525	-70,415
5	-70,769	-71,837
6	-62,586	-62,942

Signāla līmenis **MS uztveršanas punktā (Slāņu mežs un Sfēriskie koki)**



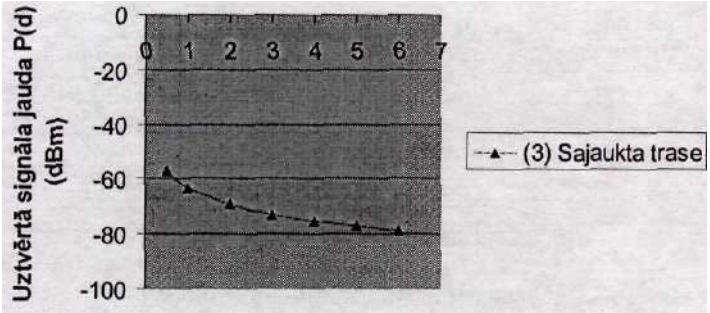
12.zīm.

d) Determinētais modelis jauktai trasei (3. nodaļa 3.6. paragrāfs), ko attēlo līkne 3 (13.zīm.), sniedz sekojošas funkcijas P(d) skaitliskās vērtības:

6.tabula

Attālums starp BTS un MS d (km)	Uztvertā signāla jaudas līmenis P(d) (dBm)
0.5	-56.881
1	-63.062
2	-69.156
3	-72.702
4	-75.212
5	-77.157
6	-78.745

Saiaukta trase



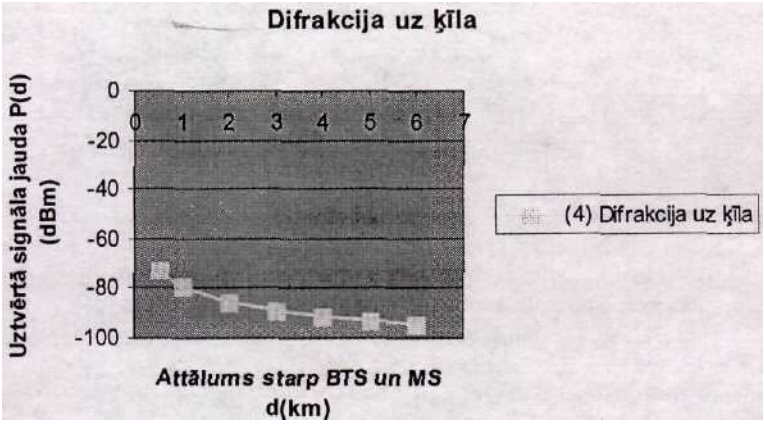
Attālums starp BTS un MS d(km)

13.zīm.

e) Difrakcijas modelis ķīlī, ko attēlo līkne 4 (14.zīm.), sniedz sekojošas funkcijas P(d) skaitliskās vērtības (3. nodaļa 3.4. paragrāfs):

7. tabula

Attālums starp BTS un MS d (km)	Uztvertā signāla jauda P(d) (dBm)
0.5	-72.637
1	-78.893
2	-85.029
3	-88.589
4	-91.107
5	-93.056
6	-94.647



14. zīm.

Tādējādi, no funkciju P(d) teorētisko modeļu salīdzinājuma, redzams, ka:

- divstaru modelim pie maziem attālumiem starp MS un BTS:

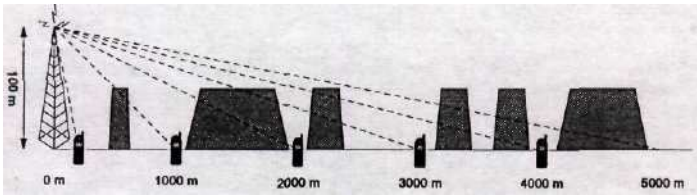
$d_{max} < 4h_1h_2/[\lambda\ (2\pi\text{-}\Phi)]$ salīdzinot ar vienstara modeli tiek novērotas signāla līmeņa svārstības (kas attēlotas 3.4. paragrāfā), bet, palielinoties attālumam d, funkcijas P(d) vērtības samazināšanās notiek saskaņā ar Vedenska likumu (jaudas līmeņa nobīde uz leju ir ap - 9 dBm);

determinētiem meža modeļiem (1.2. grafiks) (t.i. slāņveida un sfēriskām struktūrām) rodas radiosignāla kritums, sākot ar mežmalu signālam izplatoties dziļāk mežā, pie kam jaudas līmeņa nobīde uz leju slāņveida struktūrai ir - 0,68 dBm, sfēriskai struktūrai - 0,324 dBm);

difrakcijas gadījumam ķīlī, kad notiek radioviļņa difrakcija uz koku malām mežmalā, radiosignāla līmenis salīdzinot ar brīvu izplatīšanos krīt apmēram par 20 dBm (t.i. uz platas Šosejas, kas atrodas starp meža masīviem, radiosignāla līmenis būs par 20 dBm zemāks salīdzinot ar brīvu telpu);

jauktām trasēm, kad radioviļņi izplatās caur daļu trases brīvā telpā, pēc tam meža masīvā, tālāk atkal brīvā telpā utt., t.i. notiek heterogēna (neviendabīga) radiosignāla rimšana trasē un veicot aprēķinu, tas jāattēlo, izmantojot dažādus izplatīšanās modeļus: vienā trases daļā - vienstara modelis, citā - determinēts modelis ar efektīvo rimšanas koeficientu, trešajā trases daļā - difrakcijas modelis ķīlī utt.

24.zīm. shematiski ir attēlota mērīšanas trase, kas saistīta ar diskrētām d vērtībām, km = 0,5, 1.0, 2.0,3,4, 5, 6.



24.zīm.

Salīdzināsim eksperimentālā ceļā iegūtos rezultātus ar skaitliskajām jaudas vērtībām, kas aprēķinātas balstoties uz teorētiskiem modeļiem (15. zīm.).

Veicot aprēķinu tika pieņemts, ka vai nu radiovilnis izplatās tiešas redzamības zonā, vai uztveršanas punktā atnāk atstarotā un tiešā viļņa summa, vai arī radiovilnis izplatās meža, vai notiek radioviļņa difrakcija ķīlī, vai arī radiovilnis izplatās jauktā trasē.

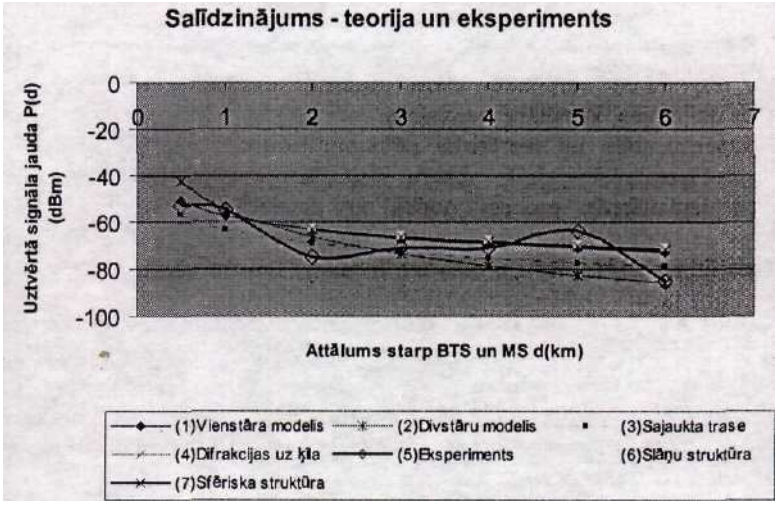
8. tabulā sniegtas jaudas līmeņu vērtības, kas eksperimentāli tika mērītas dažādos uztveršanas punktos, mainot attālumu no MS līdz BTS.

(d = 0.5., 1.0., 2.0.,3,4, 5,6) km.

8.tabula

Attālums starp BTS un MS d (km)	Uztvertā signāla jaudas līmeņu vērtības P(d) (dBm), kas iegūtas eksperimentāli
0.5	-53
1	-55
2	-75
3	-71
4	-71
5	-64
6	-85

Kā redzams no 15. zīmējuma, eksperimentālie iegūtie punkti nokļūst teorētiski iegūtu līkņu laukā, un dažādos punktos tie var vai nu sakrist ar punktiem, kas iegūti veicot aprēķinus, pamatojoties uz dažādiem radioviļņu izplatīšanās teorētiskiem modeļiem, vai arī stipri no tiem atšķirties.



15.zīm.

1) Pie MS attālumā d = 0,5 km no BTS eksperimentālā vērtība sakrīt ar vērtību, kas iegūta aprēķina ceļā, balstoties uz vienstara modeli (-53 dBm).

2) 1 km attālumā signāla līmenis eksperimenta laikā bija (-56 dBm), kas ir augstāks nekā vērtībai, kas iegūta, balstoties uz vienstara modeli (-57,246 dBm), kas acīmredzot izskaidrojams ar to, ka rezultējoŠais lauks uztveršanas punktā ir divu vai vairāku radioviļņu interferences rezultāts.

3) 2 km attālumā no BTS tiek novērota straujš signāla līmeņa kritums pirmajos 100 metros, pie tam radiovilnis izplatījās meža masīvā un radiosignāla līmenis bija (-75 dBm), t.i. tas bija par 12 dB zemāks nekā pie brīvas izplatīšanās. ŠT vērtība ir arī zemāka par to, kas izriet no determinētiem modeļiem (slāņveida - (-63,428 dBm) un sfēriskām (-63,606 dBm) struktūrām) dotajā attālumā, kas liecina par straujāku radioviļņu rimšanu mežā pie tiešas izplatīšanās. Pie tālākas raidītāja novietošanas dziļāk mežā, signāla līmenis samazinājās atbilstoši viļņa vājinājumam brīvā telpā.

3) Attālumā no 3 km līdz 4 km radiosignāla līmeņu vērtība eksperimentam bija - 71 dBm, vienstara modelim - 69,287 dBm, determinētiem modeļiem - 68,639 dBm (sfēriskā struktūra) - 67,927 dBm (slāņveida struktūra), jauktai trasei - 72,702 dBm, t.i. eksperimentālās vērtības nokļuva apgabalā, ko ierobežo līkne vienstara modelim un jauktai trasei.

4) Attālumā no 4 km līdz 5,5 km radiosignālu līmeņu vērtības pārsniedz līmeņus vienstara modelim un to vērtības eksperimentam ir - 64 dBm, vienstara

modelim - 71 dBm, determinētiem modeļiem - 69,525 dBm (slāņveida struktūra) un - 70,415 dBm (sfēriskā struktūra).

Atzīmēsim, ka lauka līmeņa atkarība no tāluma ir eksponenciāla, pie kam nelielam iespiešanās dziļumam mežā rimšanas pakāpe ir liela; palielinoties iekļūšanas dziļumam, šī pakāpe samazinās.

Eksperimentālo un teorētisko pētījumu rezultātu analīze par radioviļņu izplatīšanās īpatnībām mobilo sakaru sistēmās parādīja, ka meža apstākļos radioviļņu izplatīšanās process notiek ar daudzkārtēju viļņu atstarošanos, difrakcijas un izkliedēšanas efektiem, kas noved pie sarežģīta elektromagnētiskā lauka sadalījuma telpā, pie tam efektīvo mediānu līmeņu vērtības iekļūst vērtību laukā, kas tiek iegūtas, balstoties uz teorētiskiem modeļiem.

Aprēķināto un izmērīto vērtību nesakrišana ir saprotama, tomēr teorētiskā izteiksme Jauj pareizi noteikt pavājināšanās atkarības raksturu no tāluma starp izstarotāju un uztveršanas punktu.

2. Šī darba rezultātu salīdzinoša analīze ar citu autoru iegūtiem rezultātiem par radioviļņu izplatīšanos meža masīvos frekvencēs (800-l200MHz), kas ir tuvas vidējai 900 MHz frekvencei.

Sakarā ar autora eksperimentu un citu autoru veikto eksperimentu atšķirībām gan pēc bāzes staciju antenu pacelšanas augstuma, tā arī pēc meža blīvuma un mitruma un trases veida, iegūtās signāla pavājināšanās vērtības atšķiras viena no otras (3. nodaļa, 3.5.1. tabula).

Tomēr rezultāti sniedz pārliecību tajā ziņā, ka pie makrošūnu projektēšanas, kurās var atrasties meža masīvi, izstrādātie modeļi ļauj izmantot determinētus modeļus meža masīvu integrālās ietekmes uz signāla līmenī novērtēšanai mobilo staciju izvietošanas punktos, kad tie pārvietojas mežā.

Statistiskie modeļi ļauj aprakstīt meža masīvu izkliedējošās īpašības decimetru diapazonā. Balstoties uz daudzkārtējas viļņu izkliedēšanas teoriju paradīts, ka lai aprakstītu vidējo lauku un tieša viļņa intensitāti, jāpielieto modelis viendabīga slāņa veidā ar efektīviem elektriskiem parametriem. Šos parametrus nosaka blīvums, vidējie izmēri, kompleksās koku dielektriskās caurlaidības vērtības, kā arī izstarošanas frekvence. Tiešais vilnis uztvertā signāla intensitāti ietekmē visvairāk.

Darba rezultāti ļauj prognozēt radiosakaru apstākļus meža rajonos atkarībā no trases garuma, antenu augstuma, frekvences un meža masīva parametriem. Bez tam, iegūtie rezultāti var tikt pielietoti pie apgriezto uzdevumu risināšanas, kas nepieciešami mežu pētīšanai ar radiofiziskajām metodēm.

Slēdzienā ir paveikts teorētisko un eksperimentālo rezultātu vispārinājums un noformulēti promocijas darba galvenie zinātniskie rezultāti.

Formulu un zīmējumu numerācija tiek sniegta pa nodaļām.

Autora publikācijas:

1. V.Popov, J.Čaiko. Effective complex permittivity of forest media. Rīga: Latvijas Fizikas un Tehnisko Zinātņu Žurnāls, 2001, No.2, pp.46-50.
2. V.Popov, J.Čaiko. Modelling of radiowave propogation through forestland. Rīga: Latvijas Fizikas un Tehnisko Zinātņu Žurnāls, 2001, No.5.
3. V.Popov, J.Čaiko. The structure of forest areas that define electromagnetic waves propagation conditions. 42. Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, 2001. gada 11.-13. oktobris.pp.61-69.
4. J.Čaiko,V.Popov. Radiowave Propagation in Forest Areas-Ritov's Simulator. 43. RTU Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, 2002. gada 11.-13. oktobris.
5. J.Čaiko. Milimetra viļņu izplatīšanas sakaru kanālā modelēšana 44. RTU Starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, 2003. gada 11.-13. oktobris.