

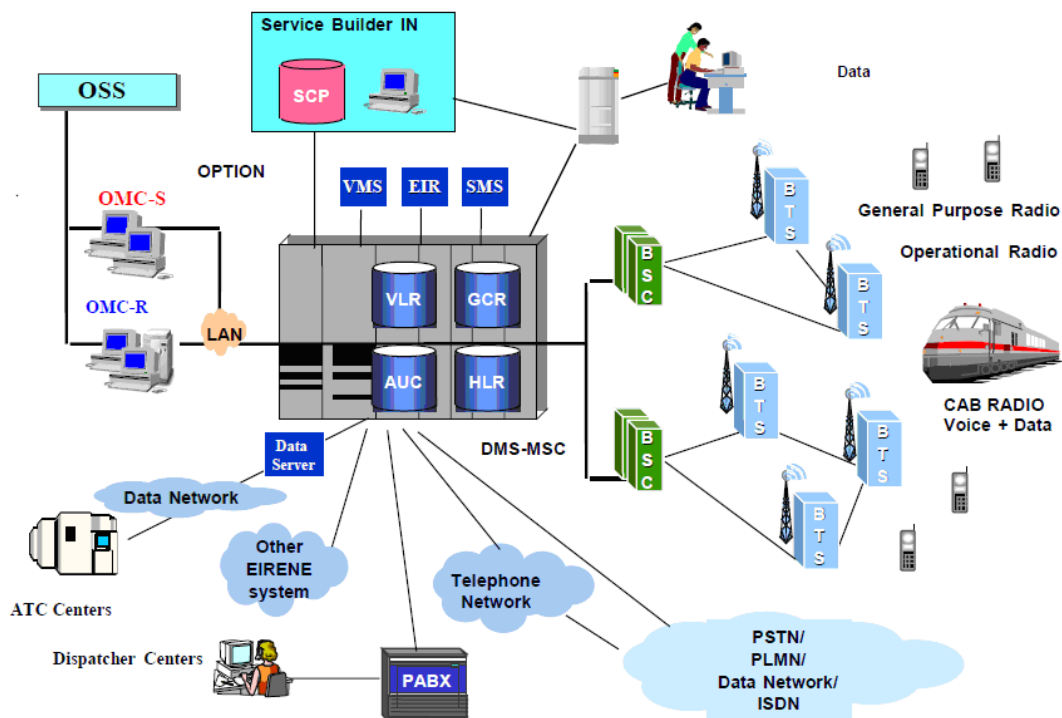


RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE

TRANSPORTA INSTITŪTS

V. POPOVS, A. VASILJEVS

**MATEMĀTISKIE MODEĻI UN
ALGORITMI MOBILO SAKARU TĪKLU
TERITORIĀLĀ RADIOPĀRKLĀJUMA
PROJEKTĒŠANĀ**



RĪGA 2019

УДК 621.371

Popovs V. , Vasiljevs A. Matemātiskie modeli un algoritmi mobilo sakaru tīklu teritoriālā radiopārklājuma projektēšanā. Rīga: RTU TI, 2019, 81/104.lpp.

Šīs lekcijas ir veltītas vienota radio pārklājuma projektēšanas pamatiem mobilo sakaru tīkla operatora apkalpošanas zonā.

Pirmās nodaļas ir veltītas mobilo termināļu un bāzes staciju moderno antenu sistēmu informācijas apkopšanai. Galvenajā daļā ir apkopota informācija par radioviļņu izplatīšanās matemātiskajiem modeļiem šūnās mobilajos sakaros izmantotajās frekvencēs, kā arī sniegts algoritms un programma (Matkad) teritorijas radio pārklājuma aprēķināšanai un apkalpošanas zonas digitālās kartes izveidošanai.

Projet MieGVF Programme Europeen TEMPUS (6 module): « Les principes généraux d'exploitation, les procédés technologiques et la gestion des circulations des lignes à grande vitesse », 2012-2015 izstrāde.

Recenzents: Dr.sc.ing., prof. **M.Mežītis**, RTU DzTI

Iespiests saskaņā ar Dzelzceļa transporta institūta Padomes 2018.gada 29.12. lēmumu. Protokols Nr. 2/12

ISBN 9984-32-919-4

© V.Popovs, A.Vasiljevs, 2019

SATURS

Saturs.....	3
Ievads	7
1. Mobilo sakaru tīklu antenu sistēmu un to parametru analīze	9
1.1. Mobilo terminālu antenu sistēmu analīze 3G/4G mobilajos sakaru tīklos.....	9
1.1.1. Plānās mikrosloksnes antenas.....	10
1.1.2. Planārās F-veida antenas (PIFA)	12
1.1.3. Adaptīvās (Smart) antenas.....	13
1.1.4. Mūsdienu tipveida mobilo staciju antenu parametri.....	15
1.2. Bāzes staciju antenu sistēmu analīze 3G/4G mobilajos sakaru tīklos.....	16
1.2.1. BTS visvirzienu antenas un sektorantenas	17
1.2.2. Plānās BTS paneļu antenas.....	18
1.2.3. Logoperiodiskās BTS antenas	19
1.2.4. Intelektuālās BTS antenas	20
1.2.5. Mūsdienu tipveida BTS antenu pamatparametri	22
2. Radioviļņu izplatīšanās īpatnības mobilajos sakaru tīklos.....	24
3. Radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi un algoritmi.....	27
3.1. Ievads	27
3.2. Radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu klasifikācija	29
3.3. Radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi.....	32
3.4. Radioviļņu izplatīšanās modeļu aprēķinu algoritms	42
3.5. Radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu aprēķināšana Mathcad programmā.....	44
4. Mobilā sakaru tīkla apkalpošanas zonas radiopārklājuma aprēķināšanas principi	47
4.1. Apkalpošanas zonas radiopārklājuma statistiskā aprēķinu metode.....	47
4.2. Apkalpošanas zonas radiopārklājuma determinētā aprēķinu metode	50
4.3. Mobilā sakaru tīkla parametru aprēķināšana.....	51
5. GSM-R tīkla apkalpošanas zonas projektēšana dzelzceļa līnijā Rīga – Jelgava	53
5.1. Dzelzceļa līnijas Rīga – Jelgava apraksts.....	53
5.2. Teritoriālā radiopārklājuma aprēķins dzelzceļa līnijai Rīga – Jelgava	55
5.2. GSM-R tīkla parametru aprēķini dzelzceļa līnijā Rīga – Jelgava	59
Secinājumi.....	63

Literatūra.....	65
Pielikumi.....	69

ANOTĀCIJA

Lekcijās ir veltīts radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu analīzei un izpētei ar mērķi efektīvi pielietot tos mobilo sakaru tīklu teritoriālā radiopārklājuma projektēšanā.

Lekcijas ir apskatītas mūsdienu mobilo terminālu un bāzes staciju antenu sistēmas, antenu tipiskie parametri ir apkopoti un piedāvāti tabulu veidā. Mobilo sakaru tīklu radiopārklājuma projektēšanas posmi ir secīgi aprakstīti, ir izskaitīti radioviļņu izplatīšanās principi un īpatnības. Radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu formulas ir sistematizētas, izstrādāta matemātisko modeļu automatizētā aprēķina programma Mathcad vidē, doti skaitliskā aprēķina piemēri. Piedāvāts teritoriālā radiopārklājuma projekts GSM-R tīkla īstenošanai dzelzceļa līnijā Rīga – Jelgava.

Lekcijas apskatītie projektēšanas un aprēķinu algoritmi ir paredzēti izmantošanai gan telekomunikāciju speciālistiem, kuri saskārās ar teritoriālā radiopārklājuma plānošanas uzdevumiem, gan studentiem, kuri apgūst profesiju dzelzceļa automātikas, telemehānikas un sakaru sistēmu specializācijā vai mobilo sakaru nozarē.

ABSTRACT

Lectures is devoted to the research and analysis of the radio wave propagation mathematical models with the objective to effectively use them for the cellular mobile radio network coverage design.

Lectures examines modern antenna systems for cellular mobile and base stations, radio wave propagation models and mobile network radio coverage design principles.

Mathematical models of the radio wave propagation are systematized, the numerical calculation examples in the Mathcad program are given. Cellular mobile network radio coverage design steps are sequentially described, radio wave propagation principles and characteristics are reviewed in detail. The proposed project of the GSM-R network implementation on the Riga – Jelgava railway line is completed, calculations of the network parameters with the coverage map and base station positioning are provided.

Developed calculation and design algorithms are meant for both telecom professionals, who are working on the radio coverage planning tasks, and students, studying wireless communication systems.

IEVADS

Mūsdienu mobilo sakaru tīklu veiksmīga ekspluatācija lielā mērā ir atkarīga ne tikai no pieejas tīkla infrastruktūras projektēšanas sākotnējos etapos, bet arī no adaptācijas pasākumiem, veicot tīkla turpmāko pielāgošanu mainīgo faktoru un nosacījumu ietekmē. Tādējādi mobilā sakaru tīklā teritoriālā radiopārklājuma izstrādes procesā jāiekļauj ne tikai kompleksā apkalpošanas zonas šūnu izmēru, klasteru struktūras un citu parametru aprēķināšana, bet arī visa tīkla, tā iekārtu testēšanas un adaptācijas periodi.

Mobilo sakaru tīkla adaptācijas gaitā tiek novērota un uzskaitīta apkārtējās vides faktoru (apvidus reljefa īpatnības, ēku, būvju, koku esamība utt.) ietekme uz radioviļņu izplatīšanos. Pēc novērojumu rezultātiem tiek novērtēta korekciju ieviešanas nepieciešamība. Šāda veida korekcijas nereti veido neviendabīgu klastera struktūru mobilā tīkla apkalpošanas zonā, kad bāzes stacijas (BTS) tiek uzstādītas nevis šūnu centros, kā tas tika plānots projektēšanas posmā, bet ar nobīdi.

Bāzes staciju aparatūras un to uzstādīšanas vietu izvēle, kā ir augstāk minēts, ir atkarīga no apkārtējās vides faktoriem. Likumsakarīgi, ka pilsētas ietvaros BTS šūnu pārklājuma laukums ir daudzreiz mazāks nekā, piemēram, lauku apvidū. Radiokanālu skaitu šūnā nosaka plānotais abonētu pārraidāmā trafika lielums, taču tā apjomi pastāvīgi aug, it īpaši palielinoties abonētu skaitam. Maksimālais teorētiskais attālums no bāzes stacijas līdz makrošūnas robežām GSM standartā sastāda aptuveni 35 km. Pārraidot signālu lielos

attālumos rodas laika aiztures, kas papildus pieprasa slotu laika saskaņošanu freimā no mobilās stacijas (MS) puses pie datu pakešu saņemšanas un nosūtīšanas.

Tādā veidā var izdalīt vairākus faktoros, kas ierobežo šūnu pārklājuma zonu lielumus:

- darba frekvences ietekme: frekvencei palielinoties (darba viļņa garumam samazinoties) samazinās arī šūna pārklājuma zona, tāpēc šūnu laukums GSM 900 tīklā ir ievērojami lielāks, nekā GSM 1800;
- ārējo faktoru ietekme: viļņu, līdz ar to arī radiosignālu rīšana brīvajā telpā ir daudzkārt vājāka, nekā pilsētās vai mežu masīvos.

Tādējādi, projektējot un rēķinot mobilā sakaru tīkla apkalpošanas zonas teritoriālo radiopārklājumu ir iepriekš nepieciešams:

- veikt BTS un MS antenu sistēmu apskatu, parametru analīzi, atlasīt visperspektīvākus modeļus;
- veikt BTS un MS raidīšanas un uztveršanas iekārtu parametru analīzi, atlasīt visperspektīvākus modeļus;
- analizēt decimetru un centimetru radioviļņu izplatīšanās matemātiskos modeļus, sastādīt aprēķina algoritmu radiosignāla jaudas atkarības noteikšanai uztveršanas punktā pie uzdotajiem BTS raidītāju jaudas un MS uztvērēja jūtības parametriem, noteikt šūnu maksimālus izmērus dotajam darba viļņu garuma diapazonam;
- izmantojot statistisko vai determinēto mobilā tīkla radiopārklājuma metodi, noteikt līdzkanālu atkārtības koeficientu, klastera struktūru, aprēķināt trafiku un kopējo tīkla kapacitāti;
- īstenot mobilā sakaru tīkla teritoriālā radiopārklājuma aprēķinus, konstruēt radiopārklājuma karti ar BTS izvietojumu.

1. MOBILO SAKARU TĪKLU ANTENU SISTĒMU UN TO PARAMETRU ANALĪZE

1.1. Mobilo terminālu antenu sistēmu analīze 3G/4G mobilajos sakaru tīklos

Radioviļņu sarežģītie izplatīšanās nosacījumi mobilajās sakaru tīklu sistēmās ir saistīti ar viļņu absorbciju, daudzkārtējo atstarošanos un izkliedi. Šādā gadījumā radioviļņu izplatīšanās likumsakarības, kas ir patiesas tiešredzamības gadījumos (LOS, Line of Sight), vairs nedarbojas un nevar būt izmantotas. MS iebūvēto antenu īpašības ir tieši atkarīgas no apkārtējās vides statistiskajiem parametriem un no tā, kā ar šo antenu aprīkotā ierīce ir novietota, piemēram, lietotāja rokās. Tādejādi, projektējot antenas UMTS un LTE standartu mobilajos sakaru tīklos frekvenču diapazonos no 450 līdz 3700 MHz (tabula 1.1), ir svarīgi ņemt vērā visus minētus faktoros.

Tabula 1.1

Frekvenču diapazonu sadalījums UMTS un LTE standartos

Standarts	Izmantotie frekvenču diapazoni, MHz
GSM (2G)	809-915, 935-960, 1710-1785, 1805-1880
UMTS (3G)	800, 850, 900, 1500, 1700, 1900, 2100
LTE (4G)	450, 700, 800, 850, 900, 1400, 1500, 1600, 1700, 1800, 1900, 2000, 2100, 2300, 2500, 2600, 3500, 3700

Pamata prasības, kas tiek izvirzītas moderno mobilo staciju antenu sistēmām:

- mazie gabarīti,
- plaša darba frekvenču josla;
- augsts pastiprinājuma koeficients;
- augsta radioviļņu pārraides un uztveršanas efektivitāte neatkarīgi no telpiskās orientācijas;
- augstās mehāniskās un temperatūras īpašības;

- mazs kaitīgā elektromagnētiska starojuma līmenis.

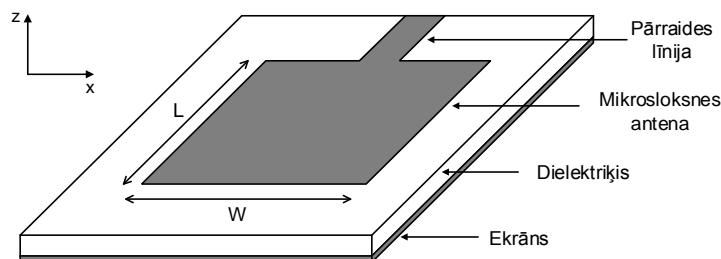
Mobilo staciju antenas var sadalīt divās grupās: iebūvētās un pieslēdzamās. Iebūvēto antenu starpā atšķir iekšējās, ārējās stieņa un ārējās izbīdāmās. Mobilo sakaru 3G-4G sistēmām ir lietderīgi apskatīt tikai iebūvētās iekšējās antenas.

Iekšējās antenas, parasti, ir vērstās antenas. Antenas starojuma vērsuma galvenā vāle ir virzīta pretējā virzienā no cilvēka galvas, kad viņš izmanto MS telefonsakariem. Aizsegt antenu ar roku telefonsarunu laikā nav rekomendēts — tas noved pie sakaru nosacījumu pasliktināšanās, un rezultātā raidītāja jauda tiek palielināta, MS strāvas patēriņš pieaug, ierīces akumulators paātrināti izlādējās, bet cilvēks tiek pakļauts pastiprinātajam apstarojumam.

Modernas iekšējās antenas galvenokārt izgatavo plānās mikrosloksnes (Patch) antenas vai planārās invertējamās mikrosloksnes antenas (PIFA) veidā.

1.1.1. Plānās mikrosloksnes antenas

Mikrosloksnes (Patch) antena pēc savas būtības ir metāliskais vadītājs, kas novietots virs zemētās pamatnes. Mikrosloksnes antena (att. 1.1) parasti tiek veidota shēmas plates veidā ar metāliskā slāņa garumu L un platumu W , kas ir novietots uz dielektriskās pamatnes ar dielektrisko caurlaidību ϵ_r .



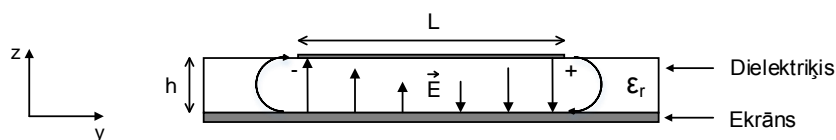
Att. 1.1. Mikrosloksnes (Patch) antenas konstrukcija

Mikrosloksnes pārraides līnija un zemējums tiek izpildīti no metāla ar augstu vadītspēju, parasti no vara. Pamatnes biezums h ir nozīmīgi mazāks par darba viļņa garumu λ (1.1).

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1.1)$$

Mikrosloksnes antenas metāla plāksnes un zemējuma biezumi nav kritiski svarīgi.

Elektriskās komponentes sadalījums starp mikrosloksnes antenu un zemējumu kādā laika momentā ir redzama attēlā 1.2. $E(t)$ izmaiņas noved pie elektromagnētiskā lauka izstarojuma (vai uztveršanās) telpā antenas apkārtnē.



Att. 1.2. Elektromagnētiskais lauks mikrosloksnes antenā

Apskatāmās mikrosloksnes antenas centrālo darba frekvenci f_0 var atrast no tuvinātās izteiksmes:

$$f_0 = \frac{c}{2 \cdot L \cdot \sqrt{\epsilon_r}}, \quad (1.2)$$

Variējot mikrosloksnes līnijas garuma L un pamatnes dielektriskās caurlaidības ϵ_r vērtības, rodas iespēja mainīt darba frekvenci un ietekmēt izstarojuma nosacījumus.

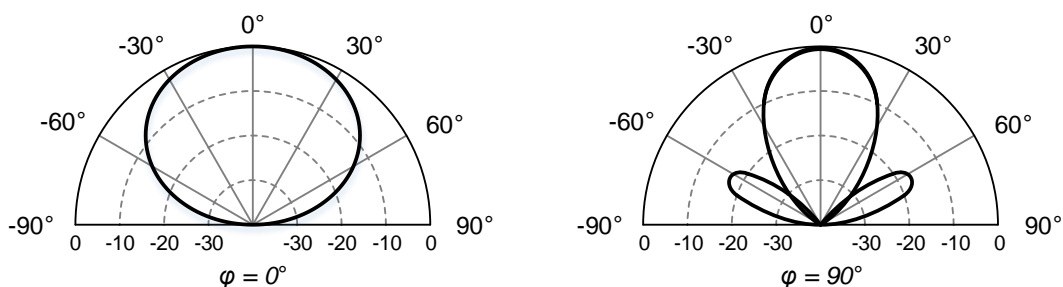
No vienādojuma (1.2) izriet, ka mikrosloksnes antenas garumam L jābūt ap pusi no elektromagnētiskā viļņa garuma, kas izplatās dielektriskas pamatnes vidē (1.3):

$$L = \frac{\lambda}{2}, \quad (1.3)$$

Mikrosloksnes antenas platums W (1.4) nosaka tās ieejas pretestību un caurlaides spēju. Kvadrāta antenai ieejas pretestība var sastādīt ap 300 Ω . Palielinot antenas platumu, ieejas pretestība var tikt samazināta, bet caurlaides spēja šajā gadījumā palielinās. Tomēr lai pazeminātu ieejas pretestību līdz 50 Ω ir bieži nepieciešams veidot diezgan platu antenu, kas rezultātā aizņem pārāk daudz vērtīgas vietas.

$$W = \frac{c}{2f_0} \cdot \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}, \quad (1.4)$$

Mikrosloksnes antenas elektromagnētiskais lauks (EML) ir lineāri polarizēts, pie tam vērsuma diagramma [12], atkarībā no leņķiskās azimutālās koordinātes φ , ir redzama attēlā 1.3. Mikrosloksnes antenas pastiprinājuma koeficients atrodas 7-10 dB robežās.



Att. 1.3. Taisnleņķa mikrosloksnes antenas vērsuma diagramma

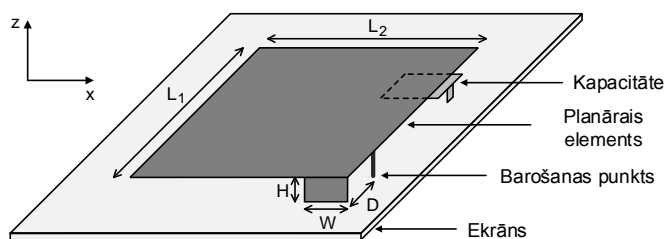
Taisnstūra plakanantenas ir šaurjoslas antenas, pie tam caurlaides josla tiem, parasti, nav lielāka par 3%.

1.1.2. Planārās F-veida antenas (PIFA)

Planārā F-veida antena (PIFA) — uz doto brīdi ir visbiežāk sastopamā mikrosloksnes antenas variācija [6]. PIFA antenas popularitātes iemesls ir skaidrojams ar vairākām priekšrocībām [30]:

- plata darba frekvenču josla (līdz 10% no rezonanses frekvences);
- mazi gabarīti un vairāku diapazonu vienlaicīgais atbalsts;
- relatīvi spēcīgs pastiprinājums gan vertikālajā, gan horizontālajā polarizācijas plaknē.

PIFA tipa planārās antenas konstrukcija ir parādīta attēlā 1.4:



Att. 1.4. Planārās F-veida antenas konstrukcija

PIFA antenas elektriskie raksturojumi ir atkarīgi no augšējās starojošās plaknes izmēriem, tās malu garumu L_1 un L_2 attiecības, šīs plaknes pacelšanas augstuma H virs ekrāna, vertikālās zemējuma plāksnes izmēra W , antenas barošanas punkta atrašanās vietas.

PIFA antenas salīdzinoši mazi gabarīti ir skaidrojami ar to, ka tās rezonanses frekvenci f_0 (1.5) noteic starojošās plaknes horizontālā pusperimetra lielums:

$$f_0 = \frac{c}{\lambda}, \quad (1.5)$$

Rezonanses viļņa garums ir atkarīgs no antenas konstrukcijas izmēriem un to aprēķina pēc formulām no tabulas 1.2 [9].

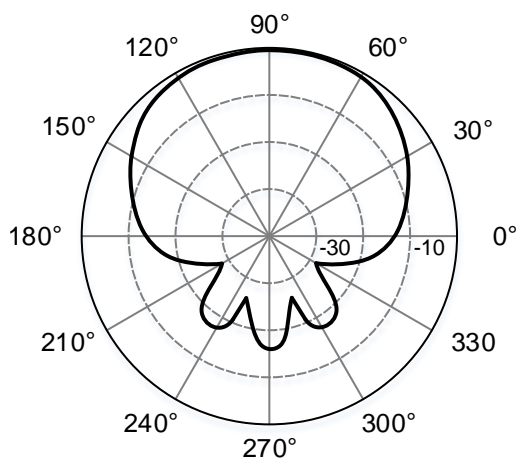
Vertikālās zemējuma plāksnes W izmēra un ar to kontaktējošā planārā elementa malas L_2 garuma sakritības gadījumā tiek nodrošināta PIFA antenas maksimālā caurlaides josla. Vertikālā zemējuma elementa platums papildus ietekmē antenas starojuma polarizāciju.

Tabula 1.2

PIFA antenas rezonanses frekvences aprēķināšanas formulas

Nosacījums	Rezonanses viļņa garums λ
$W = 0$	$\frac{\lambda}{4} = L_1 + L_2 + H$
$\frac{W}{L_2} = 1$	$\frac{\lambda}{4} = L_1 + H$

Viendiapazonu PIFA antenas vērsuma diagramma [12] ir parādīta attēlā 1.5, no kuras seko, ka starojuma galvenā maksimuma virziens ir ortogonāls antenas plaknei, bet tā platums ir ap 60° .



Att. 1.5. PIFA antenas vērsuma diagramma

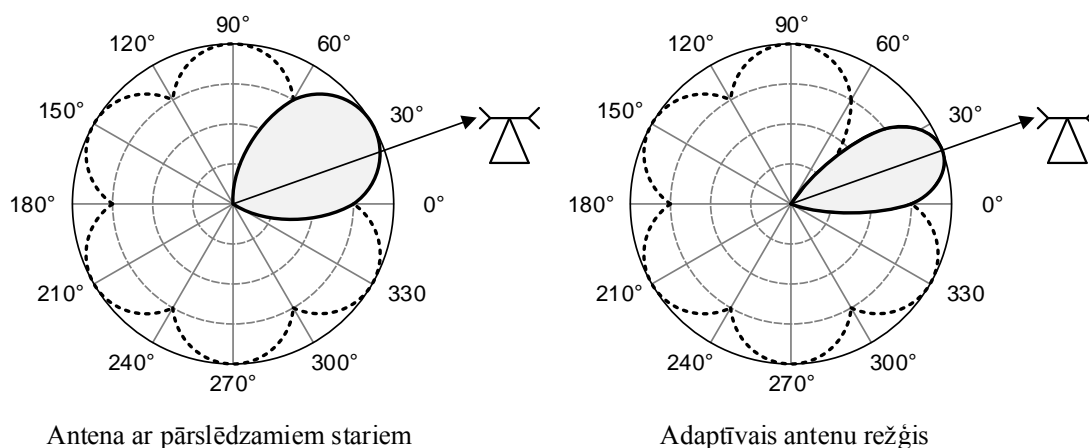
1.1.3. Adaptīvās (Smart) antenas

Idejas, kas tika veiksmīgi realizētas sarežģīto adaptīvo bāzes staciju antenu sistēmu izstrādes laikā, tagad pielieto arī intelektuālo antenu sistēmu izveidei priekš ceturtās paaudzes sakaru tīklu mobilajiem termināliem. Tādējādi, dotajā brīdī mūsdienu mobilo staciju

aparaturā var tikt izmantoti divi jauni antenu tipi: adaptīvās antenas un MIMO (multi-input, multi-output) antenu sistēmas.

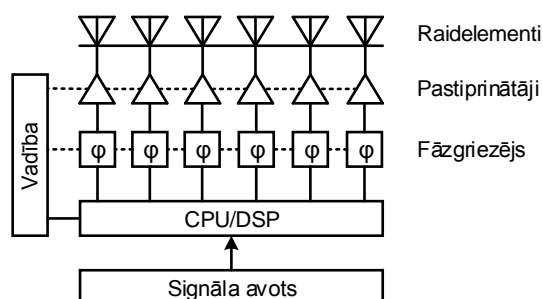
Adaptīvo vai smart antenu darbības princips balstās uz iespējas mainīt antenas parametrus un raksturlielumus, rezultātā koriģējot tās vērsuma diagrammu. Adaptīvās antenas var sadalīt divās grupās: antenas ar pārslēdzamiem stariem un adaptīvie antenu režģi.

Antena ar pārslēdzamiem stariem — tā ir antenu sistēma, kas ir veidota no izstarotājiem ar fiksēto vērsuma diagrammu. Vislabākā signāla līmeņa nodrošināšanai tiek izvēlēts konkrētais stars (att. 1.6), kas ļauj paaugstināt vai pazemināt pastiprinājumu pēc vajadzībām, bet tikai tajos virzienos, kur šie stari eksistē.



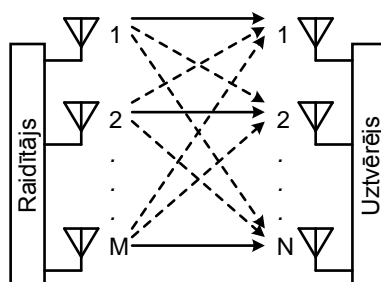
Att. 1.6. Adaptīvo antenu pielāgojamās vērsuma diagrammas

Adaptīvais antenu režģis — smart antenas sistēma, kas ļauj dinamiski mainīt antenas raksturlielumus pateicoties tās konstrukcijai, kurā ir pielietoti vairāki fāzgriezēji, pastiprinātāji vai vājinātāji (att. 1.7). Iekšējie elementi tiek vadīti caur procesoru, kas analizē ārējus un iekšējus faktorus, tādā veidā izveidojot staru vajadzīgajā virzienā ar attiecīgu pastiprinājumu vislabākā signāla nodrošināšanai ar vismazāko trokšņu līmeni.



Att. 1.7. Adaptīvā antenu režģa realizācijas shēma

MIMO (Multiple-Input, Multiple-Output) tehnoloģija balstās uz vairāku antenu izmantošanu signālu pārraidei un uztveršanai. Šāda pieeja ļauj palielināt ne tikai informācijas pārraides drošumu (izmantojot visas kopējā kanāla antenas (att. 1.8)), bet arī kopējo caurlaides spēju. Uz doto brīdi MIMO tehnoloģija jau tiek plaši pielietota bezvadu modemu un maršrutētāju antenu sistēmās.



Att. 1.8. MIMO antena ar M raidītājiem un N uztvērējiem

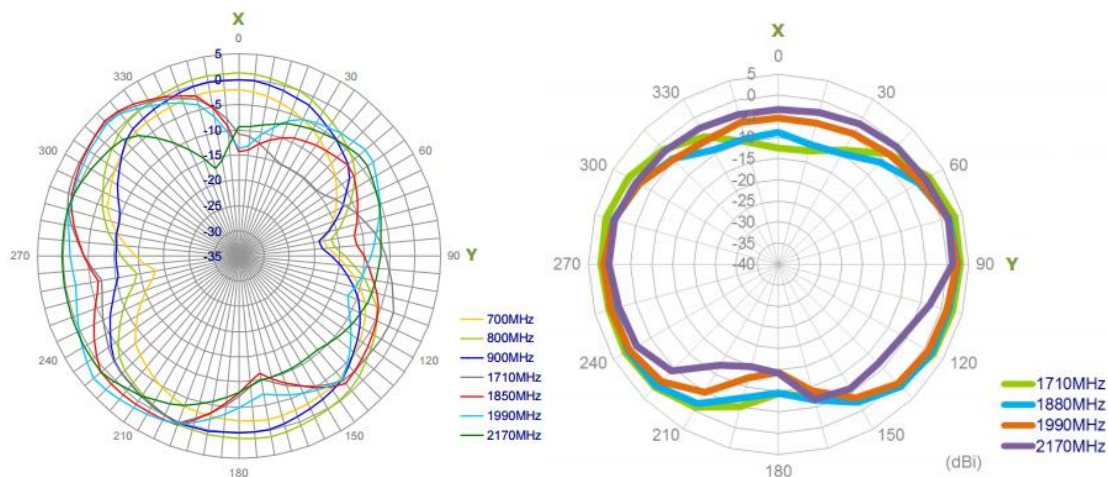
1.1.4. Mūsdienu tipveida mobilo staciju antenu parametri

Pēdējo gadu laikā plašu izplatību ieguva mikrosloksnes antenas, kas tiek veidotas pēc iespiesto shēmas plašu tehnoloģijas. Šīs tehnoloģijas priekšrocību klāstā ir samērojami labi raksturojumi pie zemām izmaksām un gatavās produkcijas kompakti izmēri, kas dod iespēju izmantot to gandrīz jebkādās ierīcēs. Tabulā 1.3 tiek piedāvātas tipveida mikroslokšņu antenas, kas šobrīd ir pieejamas tirgū, to parametri. Attēlā 1.9 ir redzami šo antenu vērsuma diagrammas [21].

Tabula 1.3

Tipveida mikroslokšņu antenas

Antenas tips	Frekvenču diapazoni, MHz	Ieejas pretestība, Ω	Pastiprinājuma koeficients, dB
2G/3G/4G visvirzienu patch antena	698-960, 1390-1435, 1710-1990, 1755-2170, 2400-2500, 2500-2700, 3400-3600	50	-1.3
2G/3G/4G PIFA antena	700-800, 824-896, 880-960, 1710-1880, 1850-1990, 1710-2170	50	-1.9
4G LTE MIMO 2*2 antena	703-803, 824-894, 880-960, 1565-1612, 1710-1880, 1850-1990, 1920-2170, 2400-2500, 2500-2700, 3400-3600	50	-1.84



Att. 1.9. Vērsma diagrammas:
a) PIFA antenai, b) visvirzienu mikrosloksnes antenai [21]

1.2. Bāzes staciju antenu sistēmu analīze 3G/4G mobilajos sakaru tīklos

Bāzes staciju (BTS, Base Transceiver Station) antenu-fīderu trakts mobilajos sakaru tīklos ir visas tīkla infrastruktūras galvenais elements, no kura, galvenokārt, ir atkarīga sakaru kvalitāte, nosacījumi vienmērīgā apkalpošanas zonas teritoriālā radiopārklājuma izveidei, no mobilo staciju uztveramo signālu stabilitāte, mobilās stacijas (MS, Mobile Station) atrašanas vietas noteikšanas precizitāte utt. Moderno BTS antenu ārējā konstrukcija izskatās vienkārši, taču iekšienē tās ir diezgan sarežģītas SAF (sevišķi augsto frekvenču) iekārtas, kas darbojās brīvā dabā augsta mitruma un būtisku temperatūras kritumu ietekmē, pakļautas apledošanai, lielām vēja slodzēm, agresīvām pilsētas vides un citiem faktoriem.

Parastajos mobilo sakaru sistēmās ar BTS antenu sistēmu palīdzību var panākt signāla jaudas pastiprināšanu no 7 līdz 15 dB, pie tam jāizpilda sekojošie nosacījumi:

- izstarojumam šūnā (vai sektorā ar leņķi 120°, 60°) jābūt vienmērīgam, jāsamazinās pēc aptuvenā likuma $1/r^n$, kur $2 < n < [4-5]$;
- jānomāc starpkanālu traucējumi (piemēram, izmantojot vērtās antenas);
- joslas platumam jābūt lielākam par 7% (stāvošā viļņa koeficients SWR (Standing Wave Ratio) $\leq 1,5$) lai nodrošinātu vienlaicīgo uztveršanu un nosūtīšanu lielā kanālu skaitā (līdz 30-60 kanāliem);
- vērsma diagrammai (ideālā gadījumā: vertikālajā plaknē — $\text{cosec}^2\theta$, bet horizontālajā — $F(\varphi) = 1$ vai $F(\varphi) = \sin \varphi$ sektora robežās) jānodrošina vienmērīgs

apkalpošanas zonas radiopārklājums pie stabilas signāla uztveršanas un minimāliem blakus vāļu līmeņiem;

- elektromagnētisko viļņu laika aizturei jābūt minimālai;

No antenu projektēšanas tehnoloģiju skatu punkta, augstāk minētajiem prasībām var atbilst šādas antenu sistēmas, kas tiek pielietotas dažādu valstu mobilajos sakaru tīklos:

- trīs izvietotās antenas ar izveidotām 120° leņķu sektoru vērsuma diagrammām šūnas robežās;
- sešas sektoru antenas ar izveidotām 60° leņķu sektoru vērsuma diagrammām šūnas robežās;

Pie tam tiek izmantotas trīs antenu izvietojumu veidi:

- telpiskais izvietojums, kad attālums starp antenām nav lielāks par $d < 10\lambda$;
- izvietojums pēc vērsuma diagrammas;
- izvietojums pēc elektromagnētisko viļņu polarizācijas.

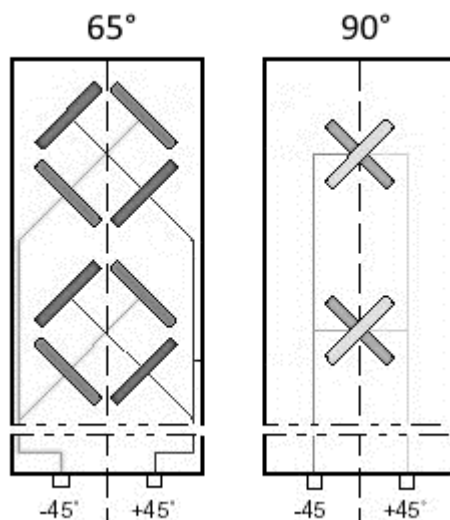
Atkarībā no risināmā teritoriālā pārklājuma aprēķina uzdevuma, tīklu projektētāji izmanto visvirzienu (Omni) un sektoru antenas ar viļņu vertikālo polarizāciju vai ar slīpo kross polarizāciju (XPol). Tādas antenas var būt gan viendiapazonu, gan arī divdiapazonu, trīsdiapazonu vai platjoslu.

1.2.1. BTS visvirzienu antenas un sektorantenas

Starp visām tirgū piedāvātajām GSM/UMTS mobilo tīklu antenām, lielāko daļu sastāda paneļa antenas ar kross polarizāciju (XPol) un ar vertikālo polarizāciju (VPol).

Kross polarizētā antena XPol (att. 1.10) sastāv no divām neatkarīgām izstarotāju sistēmām, kas pret atstarošanas ekrānu ir izvietoti simetriski ar $\pm 45^\circ$ nolieci. Sistēmas veido divas vērsuma diagrammas ar 65° un 90° lielu galvenās vāles platumu horizontālajā plaknē. Tādas antenas vienā korpusā var atrasties divas (XPol), četras (XXPol) vai arī sešas (XXXPol) neatkarīgas antenas. Šāda veida antenu konstrukcija atvieglo to uzstādīšanu (piemēram, uz ēku jumtiem vai sienām), kas ir īpaši svarīgs objektos, kur brīvas vietas aparatūrai nav daudz vai vietas noma ir dārga.

Dažām daudzdiapazonu antenām ir iebūvētie filtri, kas ļauj veikt pieslēgumu izmantojot tikai 2 savienotājus. Šādas antenas tiek lietotas radiopārklājuma nodrošināšanai ārpus telpām.



Att. 1.10 UMTS (XPol Multi-Band) daudzjoslu antenas

Visvirzienu antenas (Omni-Directional) ar vertikālo polarizāciju (VPol Omni) ir veidotas no virknes savā starpā savienoto pusvilnu vibratoru korpusa iekšpusē, kas izskatās pēc caurules. Dažiem modeļiem elektriskā slīpuma leņķis ir no 0° līdz 6° .

Antenām, kas paredzētas izmantošanai iekštelpās (VPol Indoor), ir samērā nelieli gabarīti un estētiskais ārējais izskats. Tos parasti stiprina zem griestiem un izmanto mobilā tīkla organizācijas ēkas iekšējās telpās.

1.2.2. Plānās BTS paneļu antenas

Bezvadu sakaru tīklu aparatūrai:

- standartos AMPS, DAMPS, CDMA, GSM, kas izmanto 806-970 MHz un 1710-1890 MHz frekvenču diapazonus,
- mikrošūnu sakaru standartā DECT, kas strādā 1880-1930 MHz frekvencēs,
- platjoslu interneta pieslēguma standartiem, kas raida diapazonos 2.4-2.485 GHz, 3.5-3.7 GHz un 5.6-5.8 GHz,

ir viena kopējā pazīme — antenas trakts vairākumā gadījumu ir uzbūvēts uz paneļu tipa antenu sistēmu bāzes. Tas pārsvarā ir saistīts ar to, ka frekvenču teritoriālais sadalījums

balstās uz apkalpošanas teritoriju dalīšanas sektoros apkārt bāzes stacijai. Noteiktās kanālu grupas darbojās savos sektoros un raida ar savu sektoru antenu, taču reizēm no paneļu antenām veido antenu režģus ar riņķa veida vērsuma diagrammu. Tas ir noderīgs gadījumos, kad antenas tiek novietotas uz radiocaurspīdīgiem balstiem (caurulēm, smailēm utt.), kur stieņa antenu ar riņķa diagrammu izmantošana nav iespējama.

Paneļa antenas konstrukcija — plakans kvadrāts vai četrstūris (att. 1.11), kura iekšpusē novietots viļņvads no foliēta tekstolīta vai metāla loksne.

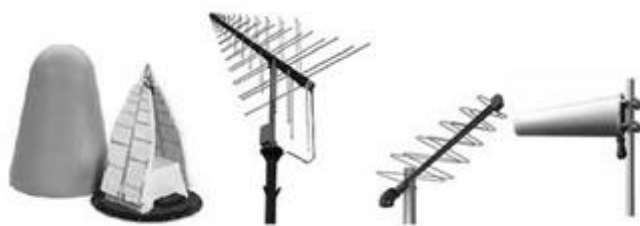


Att. 1.11. Iznesamā 3G, GSM1800, DECT paneļa antena ar augstu pastiprinājuma koeficientu

Paneļa BTS antenas 3G tīklos ļauj nodrošināt samērā augstu pastiprinājuma koeficientu līdz 20 dB. Maksimālā pievadītā jauda sastāda no 350 līdz 1000 W, taču projektējot mobilos sakaru tīklus tāda jauda lielākoties nav nepieciešama. Parasti BTS antenu pievadītā jauda nav lielāka par 50–150 W, bet iekštelpu antenām jauda nepārsniedz 10 W.

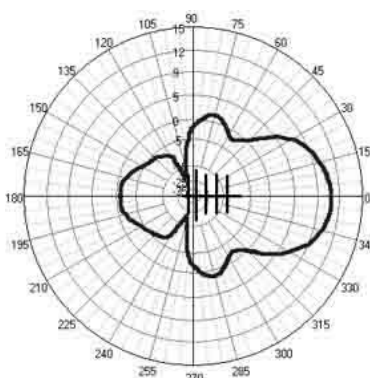
1.2.3. Logoperiodiskās BTS antenas

Mobilo sakaru tīklu sistēmās logoperiodiskās antenas (att. 1.12) tiek izmantotas kā antenas–donori atkārtotāju struktūrā, jo tās ļauj vienlaikus pieņemt signālus daudzos frekvenču diapazonos, piemēram, 900, 1800 un 2100 MHz.



Att. 1.12. Logoperiodisko antenu piemēri

Logoperiodiskās antenas vērsuma diagramma ir kaut kas vidējais starp panēļa antenas plato un adatveidas–parabolisko diagrammām (att. 1.13).



Att. 1.13 Logoperiodiskas antenas vērsuma diagramma

Šī īpašība ļauj savienoties ar korekto bāzes staciju bez precīziem spraugas uzstādījumiem, kā tas ir nepieciešams radioreleju sakaru līniju antenām. Pie tam, attālums līdz apkalpošajai bāzes stacijai var sasniegt vairākus kilometrus. Logoperiodiskās vertikāli polarizētās antenas tiek raksturotas ar samērā mazu vērsuma diagrammas platumu horizontālajā plaknē (22° – 65°), pastiprinājuma koeficients tiem sastāda 11–18 dBi un tos parasti izmanto sakaru līniju organizēšanai ceļu posmos.

1.2.4. Intelektuālās BTS antenas

Par adaptīvām antenām vai intelektuālām (Smart) antenām sauc antenu sistēmas ar elektrisko vadību un iespēju izmainīt vērsuma diagrammu. Visbiežāk intelektuālās antenas pēc savas struktūras ir adaptīvie antenu režģi, kas veidoti no diskrētiem elementiem (vāji virzītajiem vibratoriem), un katrs no tiem veic elektromagnētisko viļņu uztveršanu vai raidīšanu. Vērsuma diagramma veidojās šo elementu izstaroto viļņu interferences rezultātā.

Telpiskās kanālu multipleksēšanas tehnoloģijas SDMA (Space-Division Multiple Access) izmantošana un daudzstaru antena ar vadāmo vērsuma diagrammu ļauj optimizēt frekvenču un materiālo resursu sadalīšanu, uzlabojot abonentu apkalpošanas kvalitāti.

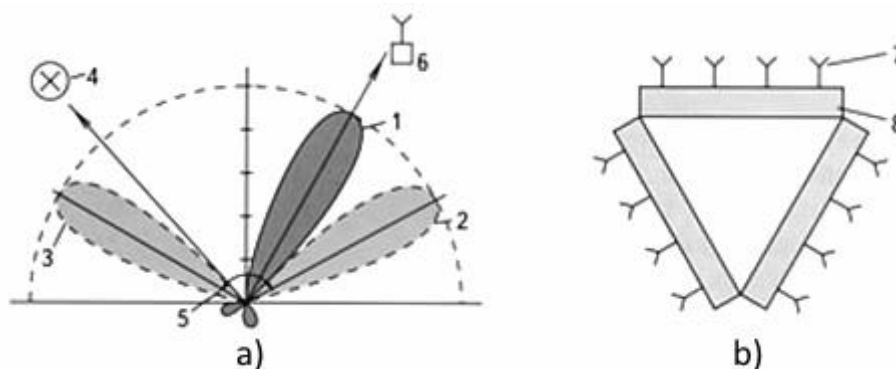
Pēdējos gados cenas uz DSP (Digital Signal Processor) ciparu signālu procesoriem, kā arī uz programmējamiem signālu procesoriem ir samazinājušās, kas ļauj plaši izmantot tos praksē moderno adaptīvo antenu izstrādē un ieviešanā.

Nepieciešams uzsvērt, ka adaptīvās antenas ir nepieciešamas tāpēc, ka mobilo tīklu abonētu skaits nepārtraukti un strauji pieaug, palielinās traucējumu biežums un trokšņu avotu skaits, un kopumā radioviļņu izplatīšanās nosacījumi kļūst sarežģītāki. Adaptīvās antenas — ir signālu procesora un antenu režģu kompleks optimālās vērsuma diagrammas veidošanai. Tas ļauj bāzes stacijas sistēmai mainīt starojuma virzienu, adaptēties signāla pārraides nosacījumiem un gala rezultātā nozīmīgi uzlabo sakaru kvalitāti. Jaunākie algoritmi, kas ir realizēti DSP procesoros, un to izmantošana intelektuālo antenu sistēmās ļauj izsekot mobilo staciju signālus ar minimālo interferenci un maksimālo uztveršanas kvalitāti.

Adaptīvā antena 120° sektoram parasti satur no 4 līdz 8 elementiem, ieejas un izejas ir savienotas ar fāzgriezējiem, pastiprinātājiem un vājinātājiem caur vadības shēmu.

Ja parastā divu elementu antena ar stara platumu 120° dod signāla pastiprinājumu 15 dB, tad adaptīvā antena ar 8 elementiem maksimāli dod 24 dB lielu pastiprinājumu. Tādu notaustīšanas antenu vērsuma diagramma ir redzama attēlā 1.14 a. Pamatelementi, kas veido antenu, parādīti attēlā 1.14 b, kur:

- 1 – adaptīvi izveidotais stars;
- 2, 3 – stara malējais stāvoklis pārseguma sektorā;
- 4 – traucējuma signāls;
- 5 – skanēšanas sektors (120°);
- 6 – mobilā stacija;
- 7 – antenas elementi;
- 8 – diagrammas veidojošā shēma.



Att. 1.14. Bāzes stacijas adaptīvā antena:

a) vērsuma diagramma ar skanēšanas sektoru 120°;

b) antena no 3 skanēšanas paneļiem

Antenai ir 12 izstarotāju rindas, katrā no tiem ir 8 elementi. Katra rinda, pēc būtības, ir režģis no dipoliem, 8 centrālās rindas ir ar aktīvajiem elementiem, citi 4 — ar pasīvajiem. Šaurs stars ar augstu pastiprinājumu tiek veidots, sasummējot signālus no visām rindām. Antenas izmērs frekvencei 3.6 GHz sastāda 0.7×0.6 m.

1.2.5. Mūsdienu tipveida BTS antenu pamatparametri

Tabulā 1.4 ir apkopoti sakaru tīklu bāzes staciju tipveida antenas, kuras plaši pielieto mobilo sakaru tīklos visā pasaulē. Dažādu antenu analīzei un salīdzināšanai tabulā ir doti šo antenu pamatparametru lielumi.

Tabula 1.4
Tipveida BTS antenu parametri

Antenas tips	Rezonanses frekvence, MHz	Ieejas pretestība, Ω	Vērsuma diagramma	Pastiprinājuma koeficients, dBi
Visvirzienu antena (VPol Single-Band Omni Outdoor)	1710-2220	50	vertikālā, 360^0	2
Visvirzienu antena (VPol Single-Band Outdoor)	1710-2180	50	vertikālā, 65^0	11
Vērstā divdiapazonu antena (VPol Dual-Band Omni Outdoor)	806 (824)-960 / 1710-2170	50	vertikālā, 60^0	8
Visvirzienu daudzjoslu antena (VPol Multi-Band Omni Outdoor)	870-960 / 1710-1880 / 1920-2170	50	vertikālā, 360^0	8
Visvirzienu divdiapazonu antena (VPol Dual-Band Omni Outdoor)	870-960 / 1920-2170	50	vertikālā, 360^0	8
Visvirzienu antena (VPol Single-Band Indoor)	1710-2500	50	vertikālā, 360^0	2
Visvirzienu divdiapazonu antena (VPol Dual-Band Omni Indoor)	806-960 / 1710-2700	50	vertikālā, 90^0	7
Daudzjoslu UMTS antena (XPol Multi-Band)	1710-2170	50	$+45^0, -45^0$	2 x 9
Vienjoslas UMTS antena (XPol Single-Band)	1710-2170	50	$+45^0, -45^0$	2 x 20
Divdiapazonu UMTS antena (XPol 2-Multi-Band)	824-960 / 1710-2170	50	$+45^0, -45^0$	19
Dubultotā daudzjoslu antena (XXPol 2-Multi-Band)	1710-2170 / 1710-2170	50	$+45^0, -45^0$	18

Antenas tips	Rezonanses frekvence, MHz	Ieejas pretestība, Ω	Vērsma diagramma	Pastiprinājuma koeficients, dBi
Trīsdiapazonu UMTS antena (XXXPol Triple-Band)	824-960 / 1710-1880 / 1710-2170	50	+45 ⁰ , -45 ⁰	18
Trīssektoru antena (XPol Tri-sector)	1710-2170	50	+45 ⁰ , -45 ⁰	18
Paneļa divdiapazonu krosspolarizētā antena DS900/1800-5	890-960 / 1710-1880	50	lineārā, vertikālā	5/6
Logoperiodiskā antena (LogPer 900)	790-960	50	vertikālā, 50 ⁰	12
Logoperiodiskā antena (LogPer Omni)	2500-2700	50	vertikālā, 360 ⁰	11

2. RADIOVILŅU IZPLATĪŠANĀS ĪPATNĪBAS MOBILAJOS SAKARU TĪKLOS

Mūsdienu mobilajos sakaru tīklos tiek izmantotas kā decimetru, tā arī centimetru (UHF) elektromagnētiskie viļņi, kas praktiski neatstarojās no atmosfēras jonizētajiem slāņiem un tajos neizkliedējās. Šo diapazonu viļņi nelielos attālumos izplatās galvenokārt Zemes viļņu veidā (tādu viļņu difrakcija ir vāji izteikta), bet lielākos attālumos — pateicoties troposfēras izkliedei un troposfēras viļņvadu virzošās iedarbības ietekmē. Pie tam, decimetru un centimetru diapazonu radioviļņiem atmosfēras jonizētajos slāņos gandrīz nav refrakcijas, tie brīvi iet caur šiem slāņiem un tos var izmantot kosmiskajiem radiosakariem.

Decimetru un centimetru diapazona elektromagnētiskie viļņi praktiski nav pakļauti molekulārajai adsorbīcijai un uz Zemes var izplatīties galvenokārt taisnvirzienā tiešās redzamības robežās (LOS, Line of Sight).

Apskatot radiosignālu izplatīšanos izotropo BTS raidītāja un MS uztvērēja antenu izmantošanas gadījumā ($G_t = G_r = 1$), signāla jaudas līmeņu P_r un P_t attiecību uztveršanas punktā un nosūtīšanas punktā var izteikt sekojošā vienādojuma veidā:

$$\frac{P_r}{P_t} = \left(\frac{\lambda}{4\pi \cdot r} \right)^2 = \left(\frac{c}{4\pi \cdot r \cdot f} \right)^2, \quad (2.1)$$

kur c – elektromagnētisko viļņu ātrums vakuumā, $3 \cdot 10^8$ m/s;

f – darba frekvence, Hz;

r – attālums starp BTS un MS, m.

Gadījumā, kad izmanto vērstās antenas, nepieciešams ņemt vērā arī raidītāja un uztvērēja antenu pastiprinājuma koeficientus G_t un G_r , tad P_r , un P_t jaudas attiecība būs vienāda:

$$\frac{P_r}{P_t} = G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{c}{4\pi \cdot f \cdot r} \right)^2, \quad (2.2)$$

kur G_t un G_r – raidītāja (Transmitter) un uztvērēja (Receiver) antenu pastiprinājuma koeficienti.

Elektromagnētiskās enerģijas zudumu traktā (Path Loss) un pārraides zudumu (Transmission Loss) novērtēšanai var izmantot vienādojumus (2.3) un (2.4):

$$L_{rt} = 10 \cdot \lg \frac{P_r}{P_t} < 0, \quad (2.3)$$

$$L_{tr} = 10 \cdot \lg \frac{P_t}{P_r} > 0, \quad (2.4)$$

kur P_t – raidītāja antenas starojuma jauda;

P_r – signāla jauda uztvērēja ieejā.

Zudumu lielumu izteikšana, no vienas puses, palīdz saprast fizikālus procesus, kas notiek radioviļņu izplatīšanās gaitā, bet no otras puses, gūt vienkāršus tuvinātus analītiskus vienādojumus elektromagnētiskās enerģijas zudumu noteikšanai.

Radiosignālam izplatoties reālos nosacījumos, ņemot vērā apkārtējās vides faktoru ietekmi, papildus garuma rimšanai rodas signāla vājinājums, kas ir atkarīgs no daudziem faktoriem, piemēram:

- signāla atstarošanās no objektiem, kas ir lielāki nekā viļņa garums;
- radioviļņu difrakcija objektos, kas ir BTS un MS tuvumā;
- radiosignāla izkliede neviendabīgumos, kad signāls vairākkārt atstarojās starp vairākiem objektiem, un šie objekti ir mazāki nekā viļņa garums;
- Doplera efekts, kas rodas mobilās stacijas pārvietošanas laikā.

Uztveramā signāla līmeņu svārstībām (fadingam) ir divas sastāvdaļas: ātrā un lēnā.

Lēnais fedings rodas, pārvietojot mobilo staciju lielā distancē, kas noved pie izplatīšanās vides nosacījumu un raksturlielumu izmaiņām, un rezultātā tiek novērots radiosignālā vājinājums. Vājinājuma lielums atkarīgs no attāluma starp BTS un MS.

Ātrais fedings rodas pie mobilās stacijas lokālā novietojuma izmaiņām vai tad, kad radioviļņi izplatās daudzstaru režīmā. Ātrais fedings izraisa signāla paplašinājumu laikā un kanāla raksturlielumu izmaiņas.

Mobilās stacijas radiosignāla uztveršanas punktā notiek daudzu elektromagnētisko viļņu interference. Šiem viļņiem ir savas atšķirīgas trajektorijas, amplitūdas, fāzes un citi parametri. Interferences ietekmē rezultējošais signāls uztveršanas punktā mainās un var būt gan lielāks par vidējo vērtību, gan arī mazāks, pie tam signāla fedings var kļūt diezgan liels.

Rezultējošā signāla kropļojumi bieži notiek tad, kad signāliem ar samērojamām amplitūdām sastāvdaļas atšķiras tik stipri, ka viena signāla simboli uzklājās cita signāla blakussimboliem. Šo parādību sauc par simbolu interferenci.

Daudzstaru signālu izplatīšanās režīma ietekmē, uztveršanas punktā rodas viens no sekojošiem interferences nosacījumiem:

- vairāki viena tipa signāli ir nobīdīti fāzē, pārklājās un rezultējošais signāls tiek vājināts;
- pamata un atstaroto signālu līmeņi ir vienādi, bet atrodas pretfāzē un rezultējošā signāla vērtība ir tuva nullei, sakari tiek pārtraukti;
- notiek impulsu signālu laika paplašināšana.

Signāla līmeņa izmaiņu diapazons pie ātrā fedinga var sasniegt 40 dB, no kuriem aptuveni 10 dB — vidējā līmeņa pārsniegšana, bet 30 dB — kritumi zem vidējā līmeņa. Pie nekustīgas mobilās stacijas, uztveramā signāla intensitāte gandrīz nemainās, bet atrodas kustībā, fluktuāciju periodiskums telpā sastāda apmēram pusi no viļņa garuma.

Fluktuāciju periods ir atkarīgs no mobilās stacijas pārvietošanas ātruma. Piemēram, ja ātrums $V = 50$ km/st. vai 13.9 m/s, tad fluktuāciju periods būs vienāds $T_f = \lambda/2V \approx 12$ ms, bet pie ātruma $V = 100$ km/st. — $T_f \approx 6$ ms.

Lēnais fedings tiek raksturots ar ēnu efektu, kuru izraisa dažādi šķēršļi (ēkas, meži, kalni utt.) starp BTS un MS tiešās redzamības nosacījumos, vai rodas pārvietojot mobilo staciju lielās distancēs. Lēnais fedings pirmajā tuvinājumā var pakļauties logaritmiski–normālajam sadalījuma līkumam, tā intensitāte parasti nepārsniedz 5–10 dB.

Ātrā fedinga novēršanai GSM standartā izmanto spektra paplašināšanas paņēmieni, bet simbolu interferences samazināšanai pielieto adaptīvus filtrus (ekvalaizerus). Lai mazinātu radiosignālu daudzstaru izplatīšanās sekas tiek izmantota aparatūra ar kanālu raucējumaizsargāto kodēšanu.

Apskatot radioviļņu izplatīšanās īpatnības var secināt, ka elektromagnētisko viļņu jaudas līmenis uztveršanas punktā atkarībā no attāluma starp raidītāju un uztvērēju tiek raksturots ar lielumu $1/r^n$, pie tam reālajos apstākļos apkārtējās vides faktoru ietekmē tiek novērotas signālu līmeņa svārstības, saistītas ar lēno un ātro fedingu, viļņu rimšanu.

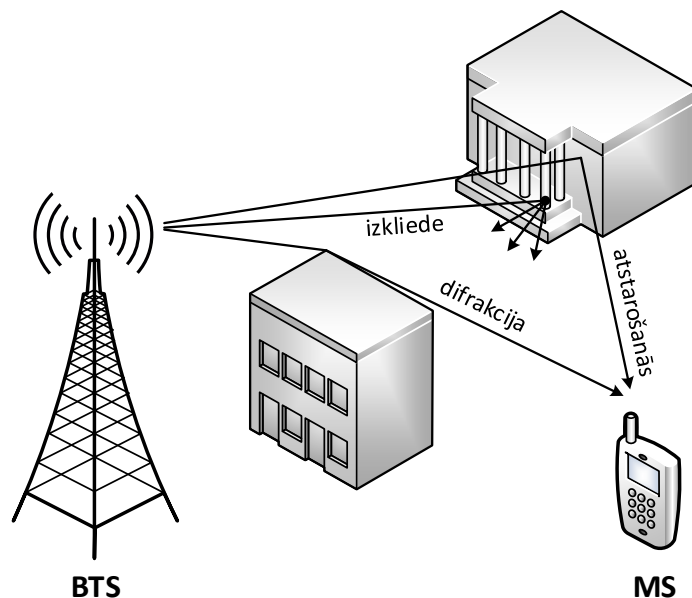
3. RADIOVIĻŅU IZPLATĪŠANĀS MATEMĀTIEKIE MODEĻI UN ALGORITMI

3.1. Ievads

Mūsdienās radioviļņu izplatīšanās jautājumiem tiek veltīts milzīgs daudzums darbu un pētījumu. Tajos tiek izskatītas dažādas radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu klasifikācijas metodes decimetru un centimetru viļņu diapazonos, kuri tiek izmantoti mobilajos sakaru tīklos.

Atkarībā no apkārtējās vides ietekmes, radioviļņu izplatīšanās modelēšanai var tikt izmantotas gan determinētās, gan statistiskās metodes; nereti pielieto arī pusdeterminētus, pusempīriskus un empīriskus modeļus.

Determinētie matemātiskie modeļi balstās uz radioviļņu izplatīšanās fizikas likumu izmantošanu. Aprēķinu pamatā ir vienu, divu vai daudzstaru radioviļņu izplatīšanās modeļi. Tajos tiek ņemti vērā šķēršļu ietekmes faktori radiosignālā izplatīšanās ceļā, kā arī vietējie nosacījumi kanālā (att. 3.1): rimšana brīvajā telpā, atstarojumi no objektiem, difrakcija, absorbcija, laušana un elektromagnētisko viļņu (EMV) kross polarizācija.



Att. 3.1. Šķēršļu ietekme uz radiosignāla izplatīšanos
ceļā no bāzes stacijas (BTS) uz mobilo staciju (MS)

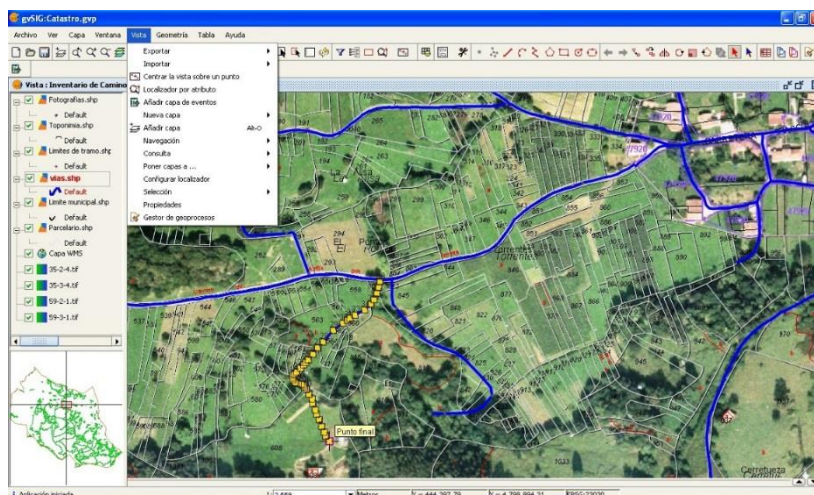
Statistiskajos matemātiskajos modeļos galvenokārt tiek izmantoti radioviļņu pārraides eksperimentu rezultāti pie izplatīšanās statistiski neviendabīgajā trasē un radiosignālu rimšanas vispārinātas matemātiskās formulas dažādajās apkārtējās vides tipos (pilsētā, piepilsētā, laukos, mežu masīvos utt.).

Pusempīriskie un empīriskie modeļi balstās uz signāla rimšanas attēlošanu radioviļņu izplatīšanās trasē rindas veidā, kurā ir iekļauti dažādi atlasīti (eksperimentāli iegūtie) empīriskie korekcijas koeficienti. Rezultātu pareizība, izmantojot šo aprēķinu metodes, ir tieši atkarīga no empīrisko korekcijas koeficientu precizitātes, un šie koeficienti ir patiesi tikai noteiktajā frekvenču diapazonā pie specifiskajiem apkārtējās vides nosacījumiem.

Jāuzsver, ka ņemot vērā faktiskus nosacījumus, radiosignāla zudumu aprēķinos pie elektromagnētisko viļņu izplatīšanās pa horizontālo zemes virsmu, plaši izmanto arī eksperimentālo pētījumu rezultātus. Piemēram, uz eksperimentu bāzes tika izstrādāti radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi statistiski neviendabīgajā vidē (ar savu viļņu rimšanas likumu dažādu apvidu tipiem), kas ļauj aprēķināt jaudas mediāno vērtību, atkarībā no attāluma līdz signāla uztveršanas vietai pie konkrētajiem mobilo sakaru nosacījumiem (ITU-R vai CEPT rekomendācijas).

Kombinētās metodes sevī apvieno determinēto un statistisko radioviļņu izplatīšanās modeļu atsevišķās īpatnības. Tādā veidā radiopārklājumu zonu modeļus, izstrādātus ar šo metožu palīdzību, var pielietot radiosignālu raksturlielumu precīzam aprēķinam dažos atsevišķajos gadījumos.

Mobilo sakaru operatoru lielākā daļa šūnu mobilo sakaru tīklu monitoringam un projektēšanai izmanto datorprogrammatūras produktus, kuru algoritmi un darbības principi ir balstīti uz augstāk minētajiem modeļiem. Tomēr apkalpošanas zonu ciparu apvidu kartes priekš šī uzdevuma nav atbilstoši precīzas, kas noved pie parametru vidējošanās aprēķinu gaitā un relatīvi lielām kļūdām gala rezultātā. Pēdējā laikā ģeogrāfisko informācijas sistēmu (GIS) (att. 3.2), kuru pamatā ir ģeogrāfisko datu bažu izmantošana, un ar to saistītu tehnoloģiju pielietošana ļauj paaugstināt radioviļņu izplatīšanās modelēšanas precizitāti radiosakaru pārraides trasē un pat novērtēt signālu izplatīšanas nosacījumus MS atrodoties kustībā.



Att. 3.2. Ģeogrāfiskā informācijas sistēma (GIS) gvSIG [8]

3.2. Radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu klasifikācija

Apskatīsim radioviļņu izplatīšanās matemātiskus modeļus mobilajos sakaru tīklos, ņemot vērā tipiskus izplatīšanās nosacījumus un režīmus. Tabulā 3.1 ir doti raksturīgākie radioviļņu izplatīšanās režīmi, uz kuru bāzes tiks veikta matemātisko modeļu klasifikācija, kas vēlāk ļaus precīzi novērtējot signālu jaudas atkarību uztveršanas punktā no vides un pārraides parametriem.

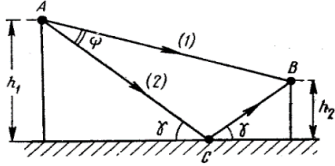
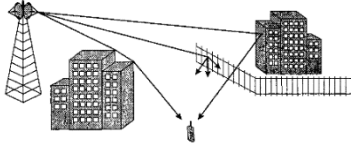


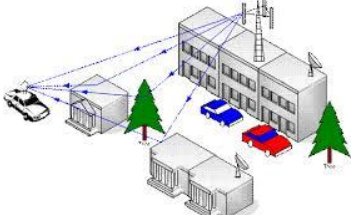
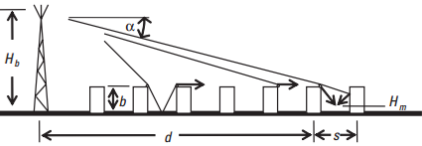
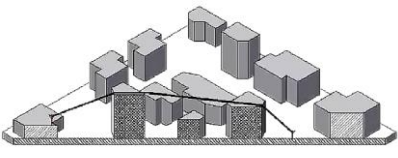
Tabulā 3.1 ir izmantoti sekojošie apzīmējumi:

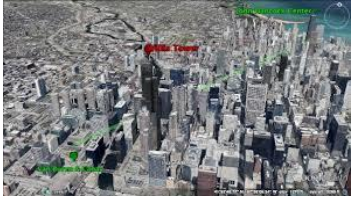
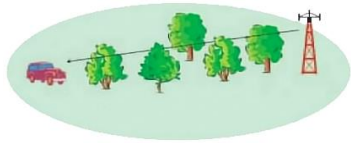
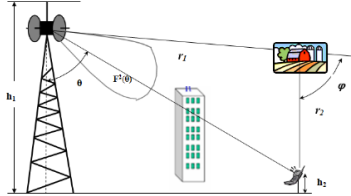
- R (Reflection) – atstarošanās,
- EMW (Electromagnetic Wave) – elektromagnētiskais vilnis (EMV),
- LOS (Line-of-Sight) – radioviļņu izplatīšanās tiešredzamības zonā,
- NLOS (Non Line-of-Sight) – radioviļņu izplatīšanās netiešās redzamības zonā,
- D/EMW (Diffraction of the EMW) – EMV difrakcija,
- A/EMW (Attenuation of the EMW) – EMV rimšana.

Tabula 3.1

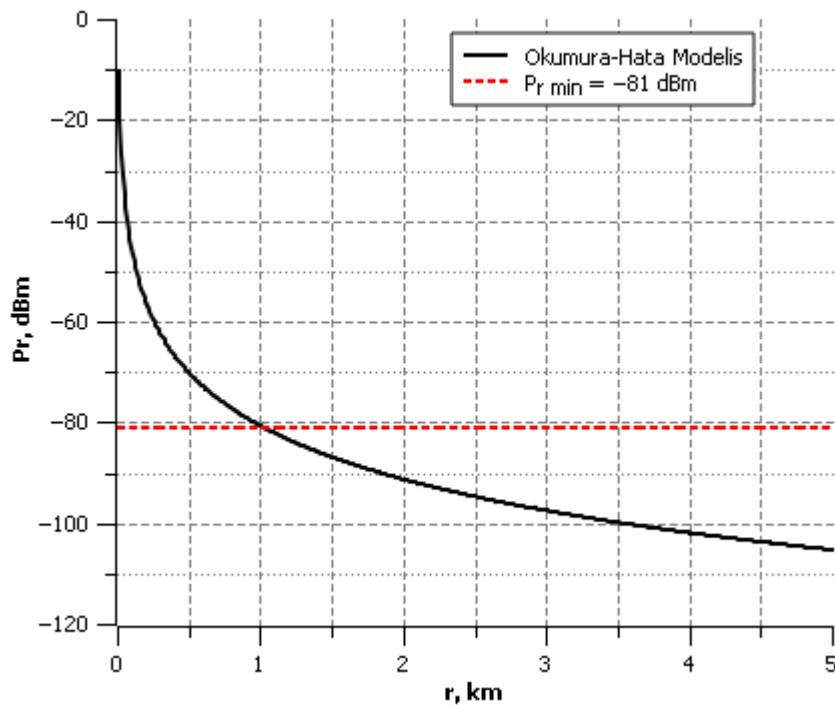
Radioviļņu izplatīšanās raksturīgie režīmi

№	Nosacījumi	Radioviļņu izplatīšanās režīms, modelis, šūnas tips
1		<p>Vienstaru režīms</p> <p>LOS</p> <p>makrošūna</p>

№	Nosacījumi	Radioviļņu izplatīšanās režīms, modelis, šūnas tips
2		<p>Divstaru režīms</p> <p>LOS+R/EMW makrošūna</p>
3		<p>Daudzstaru režīms</p> <p>LOS+NLOS+D/EMW+ΣR_i/EMW_i mikrošūna, pikošūna</p>
4		<p>Daudzstaru režīms blīvās apbūves nosacījumos</p> <p>Lee modelis LOS+NLOS+ΣR_i/EMW_i makrošūna</p>
5		<p>Daudzstaru režīms blīvās apbūves nosacījumos</p> <p>Okumura modelis LOS+NLOS+ΣR_i/EMW_i mikrošūna, pikošūna</p>
6		<p>Daudzstaru režīms blīvās apbūves nosacījumos</p> <p>Okumura-Hata modelis LOS+NLOS+ΣR_i/EMW_i mikrošūna, pikošūna</p>
7		<p>Daudzstaru režīms blīvās apbūves nosacījumos</p> <p>COST 231-Hata modelis LOS+NLOS+ΣR_i/EMW_i mikrošūna, pikošūna</p>
8		<p>Daudzstaru režīms pilsētā</p> <p>Walfisch-Ikegami modelis LOS+NLOS+ΣD_i/EMW_i makrošūna, mikrošūna, pikošūna</p>

№	Nosacījumi	Radioviļņu izplatīšanās režīms, modelis, šūnas tips
9		<p>Daudzstaru režīms blīvās apbūves nosacījumos</p> <p>Hata-Davidson modelis $LOS+NLOS+\Sigma R_i/EMW_i$ mikrošūna, pikošūna</p>
10		<p>Radioviļņu izplatīšanās mežā</p> <p>Pusdeterminētais modelis $LOS_1+A/LOS_F+Lateral/EMW+LOS_2$ mikrošūna, pikošūna</p>
11		<p>Radioviļņu izplatīšanās brīvajā telpā pie atstarošanas no mežu masīva</p> <p>Determinētais modelis $NLOS+\Sigma R_i/EMW_i$ mikrošūna, pikošūna</p>

Šajā darbā, kā redzams no tabulas 3.1 satura, ir apskatīti 11 radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi, kas tuvināti apraksta sakarības starp pārraidāmā signāla jaudas lielumu uztveršanas punktā un attālumu no bāzes stacijas raidītāja līdz uztvērējam pie noteiktajiem apkārtējās vides parametriem. Veicot signāla jaudas aprēķināšanu uztveršanas punktā un mainot attāluma starp BTS un MS vērtību, pie zināmā mobilās stacijas jūtības parametra $P_{r\ min}$ var noteikt šūnas maksimālo rādiusu R_{max} downlink režīmam (att. 3.3). Maksimālā šūnas rādiusa noteikšana ir viens no mobilo sakaru tīklu teritoriālā radiopārklājuma projektēšanas nozīmīgākajiem etapiem.



Att. 3.3. Maksimālā šūnas rādiusa noteikšana pēc Okumura-Hata modeļa ($P_{r \min} = -81$ dBm, $R_{\max} = 1.021$ km) [15]

3.3. Radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi

Tabulā 3.2 ir apkopoti matemātiskie modeļi [16, 29], ar kuru palīdzību var tikt noteikta elektromagnētisko viļņu jauda, ko izstaro sakaru tīkla bāzes stacija un kura tiek uztverta ar mobilo staciju pie sekojošiem parametriem:

- P_t – BTS antenas raidītāja jauda (uzdotā BTS raidītāja izejas jauda pie nosacījuma, ka raidītāja izeja un antenas ieeja ir salāgotas, BTS antenas lietderības koeficients ir vienāds ar 1), dBm;
- f – darba diapazona vidējā frekvence, MHz;
- λ – darba viļņa garums, m;
- G_t, G_r – BTS, MS antenu pastiprinājuma koeficienti;
- h_t, h_r – BTS, MS antenu pacelšanas augstumi, m;
- r – attālums no BTS raidītāja līdz MS uztvērējam, km;
- f_0 – normējošā frekvence, $f_0 = 1$ MHz;
- λ_0 – normējošais viļņa garums, $\lambda_0 = 1$ m;
- h_0 – normējošais augstums, $h_0 = 1$ m;

- r_0 – normējošais attālums starp BTS un MS, $r_0 = 1$ km.

Tabula 3.2

Mobilo sakaru sistēmu radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi

№	Modelis, šūna	Jaudas P_r aprēķināšanas formula MS uztveršanas punktā								
1	Vienstaru modelis <i>LOS</i>	$P_{rLOS} = P_t + 10 \lg G_t + 10 \lg G_r - 20 \lg(4\pi) + 20 \lg \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0} \right) < 0,$ <p>kur P_{rLOS} – signāla jauda MS uztveršanas punktā tiešredzamības nosacījumos, dBm;</p>								
2	Divstaru modelis <i>LOS₁ + R₂/EMW</i>	$P_r = P_{rLOS} + 10 \lg \psi, \text{ dBm}$ $\psi \approx 1 + R^2 + 2R \cdot \cos \left(\varphi + 4\pi \cdot \frac{h_t \cdot h_r}{\lambda \cdot r \cdot 10^3} \right),$ $0.8r > r > 18 \frac{h_t h_r}{\lambda},$ $P_r \approx P_t + 10 \lg G_t + 10 \lg G_r + 20 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + 20 \lg \left(\frac{h_r}{h_0} \right) - 40 \lg \left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0} \right), \text{ dBm}$ <p>kur ψ – lielums, kas tiek noteikts kā funkcija no zemes virsmas parametriem; R – atstarošanas koeficients, $R \leq 1$; φ – atstarošanas leņķis, parasti $\varphi = 3.142$ rad;</p>								
3	Daudzstaru modelis <i>LOS+NLOS+D/EMW+ΣR_i/EMW_i</i>	$P_r = P_{rLOS} - 10 \cdot n \cdot \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - (\pm X_g), \text{ dBm}$ <p>kur n – rimšanas eksponenta (tabula 3.3); X_g – gadījuma lielums pie Gausa normālsadalījuma, norāda uz signāla vājinājumu, kuru izraisa tā fedings; fedinga neesamības gadījumā $X_g = 0$;</p> <p style="text-align: center;">Tabula 3.3</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Izplatīšanās vide</th> <th>Rimšanas eksponenta n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Brīvā telpa (LOS)</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Piepilsēta (LOS/NLOS)</td> <td>2.7–3.5</td> </tr> <tr> <td>Pilsēta (NLOS)</td> <td>3–5</td> </tr> </tbody> </table>	Izplatīšanās vide	Rimšanas eksponenta n	Brīvā telpa (LOS)	2	Piepilsēta (LOS/NLOS)	2.7–3.5	Pilsēta (NLOS)	3–5
Izplatīšanās vide	Rimšanas eksponenta n									
Brīvā telpa (LOS)	2									
Piepilsēta (LOS/NLOS)	2.7–3.5									
Pilsēta (NLOS)	3–5									
4	Lee modelis <i>LOS+ΣR_i/EMW_i</i>	$P_r = P_{r0} - 10\gamma \cdot \lg \left(\frac{r}{r_{n0}} \right) - 10n \cdot \lg \left(\frac{f}{f_{n0}} \right) + 10 \lg(\alpha_0), \text{ dBm}$ $\alpha_0 = \left(\frac{h_t}{h_{tn0}} \right)^2 \cdot \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right)^v \cdot \left(\frac{P_{tmW} \cdot 10^3}{P_{tn0}} \right) \cdot \frac{G_t \cdot G_r}{4}, \text{ dBm}$								

$$v = \begin{cases} 2, & \text{ja } h_r > 10 \text{ m} \\ 1, & \text{ja } h_r < 3 \text{ m} \end{cases}$$

kur P_r – vidējais jaudas līmenis signāla uztveršanas punktā (Point-to-Point), dBm;
 α_0 – parametru korekcijas faktors, dBm;
 P_{mW} – BTS raidītāja jauda, mW;
 P_{r0} – nominālie zudumi nominālajā attālumā r_0 (tabula 3.4), dBm;
 γ – zudumu korekcijas koeficients atkarībā no attāluma (tabula 3.4);
 n – frekvences korekcija koeficients, atkarībā no vides, rekomendētie parametri ir doti tabulā 3.5, $2 \leq n \leq 3$;
 v – MS antenas augstuma korekcijas koeficients;
 f_{n0} – nominālā darba frekvence, $f_{n0} = 900 \text{ MHz}$;
 P_{m0} – nominālā BTS raidītāja jauda, $P_{m0} = 10 \text{ W}$;
 h_{m0} – nominālais BTS antenas pacelšanas augstums, $h_{m0} = 30.48 \text{ m}$;
 h_{rn0} – nominālais MS antenas pacelšanas augstums, $h_{rn0} = 3 \text{ m}$;
 r_{n0} – nominālais attālums starp BTS un MS, $r_{n0} = 1.6 \text{ km}$;

Tabula 3.4

Izplatīšanās vide	P_{r0} , dBm	γ
Brīvā telpa	-45	2
Lauku rajons	-49	4.35
Piepilsēta	-61.7	3.84
Pilsēta	-70	3.68
Metropoles rajonā	-84	3.05

Tabula 3.5

Izplatīšanās vide, frekvence f	n
Brīvā telpa, lauki, piepilsēta f < 450 MHz	2
Piepilsēta, metropoles rajonā f > 450 MHz	3

5

Okumura modelis
 $LOS + \Sigma R_i / EMW_i$

Modeļa ierobežojumi:

darba frekvenču diapazons: $f = 150-1920 \text{ MHz}$;
 BTS antenas pacelšanas augstums: $h_t = 30-1000 \text{ m}$;
 MS antenas pacelšanas augstums: $h_r = 1-10 \text{ m}$;
 attālums starp BTS un MS: $r = 1-100 \text{ km}$;

$$L_{rt} = L_{rt \text{ LOS}} - A_{mu}(f, r) + H(h_t) + H(h_r) + G_{area}, \text{ dB}$$

$$P_r = P_r \text{ LOS} - A_{mu}(f, r) + H(h_t) + H(h_r) + G_{area}, \text{ dBm}$$

$$H(h_t) = 20 \lg \left(\frac{h_t}{h_{m0}} \right), \text{ dB}$$

$$H(h_r) = \begin{cases} 10 \lg \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right), & \text{ja } h_r \leq 3 \text{ m} \\ 20 \lg \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right), & \text{ja } 3 < h_r < 10 \text{ m} \end{cases}, \text{ dB}$$

kur L_{rt} – signāla rimšana trasē, dB;

$A_{mu}(f, r)$ – rimšanas komponente pilsētai pie uzdotas frekvences f un attāluma r starp BTS un MS (tiek noteikts pēc grafika 3.4), dB;

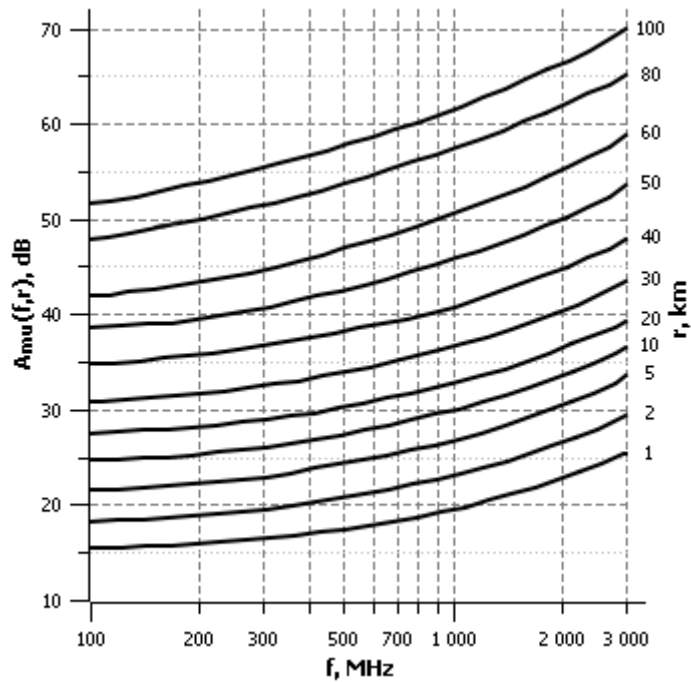
$H(h_t)$ – BTS antenas pastiprinājuma koeficients, dB;

$H(h_r)$ – MS antenas pastiprinājuma koeficients, dB;

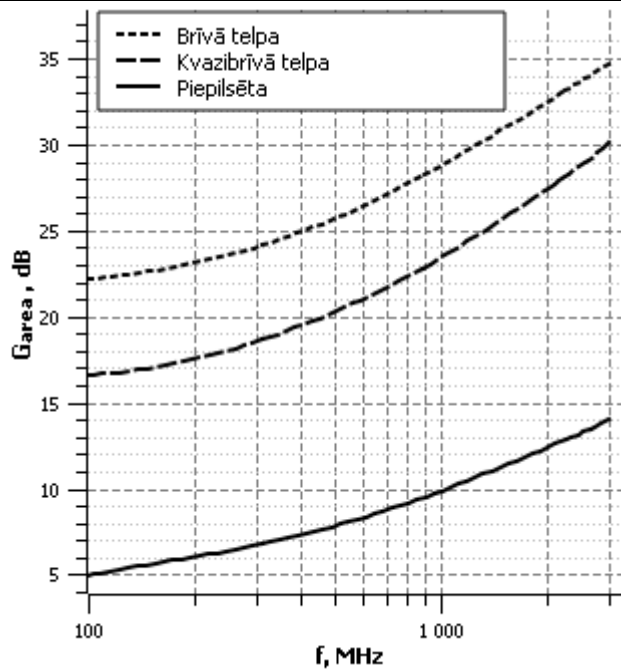
h_{m0} – nominālais BTS antenas pacelšanas augstums, $h_{m0} = 200 \text{ m}$;

h_{rn0} – nominālais MS antenas pacelšanas augstums, $h_{rn0} = 3 \text{ m}$;

G_{area} – signāla rimšanas korekcijas faktors atkarībā no vides, tiek noteikts pēc grafika 3.5, dB;



Att. 3.4. Signāla rimšanas komponente pilsētai



Att. 3.5. Signāla rimšanas korekcijas faktors

Modeļa ierobežojumi:
 darba frekvenču diapazons: $f = 150\text{--}1500$ MHz;
 BTS antenas pacelšanas augstums: $h_t = 30\text{--}200$ m;
 MS antenas pacelšanas augstums: $h_r = 1\text{--}10$ m;
 attālums starp BTS un MS: $r = 1\text{--}20$ km;

$$P_{r\ Hata} = P_t - 69.55 - 26.16 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - \left(44.9 - 6.55 \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right)\right) \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + 13.82 \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right) + a(f, h_r) + K(f)$$

kur $a(f, h_r)$ – labojuma koeficients MS antenas pacelšanas augstumam (tabula 3.6), dB;

$K(f)$ – zudumu komponente, atkarībā no vides (tabula 3.7), dB;

6 Okumura-Hata modelis
 $LOS + \Sigma R_i / EMW_i$

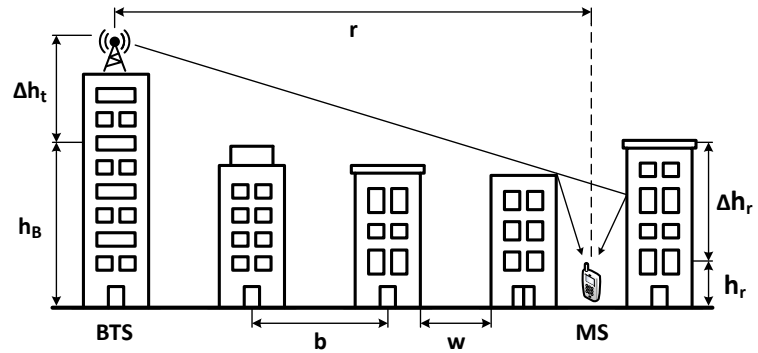
Tabula 3.6

Izplatīšanās vide	$a(f, h_r)$, dB
Brīvā telpa, piepilsēta, pilsēta	$\left(1.1 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - 0.7\right) \cdot h_r - \left(1.56 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - 0.8\right)$
Metropoles rajons, $f < 300$ MHz	$8.29 \left[\lg\left(1.54 \frac{h_r}{h_{r0}}\right) \right]^2 - 1.1$
Metropoles rajons, $f \geq 300$ MHz	$3.2 \left[\lg\left(11.75 \frac{h_r}{h_{r0}}\right) \right]^2 - 4.97$

		<p style="text-align: center;">Tabula 3.7</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Izplatīšanās vide</th> <th style="text-align: center;">K(f), dB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">Brīvā telpa</td> <td style="text-align: center;">$4.78 \left[\lg \left(\frac{f}{f_0} \right) \right]^2 - 18.33 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 40.94$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Piepilsēta</td> <td style="text-align: center;">$2 \left[\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 + 5.4$</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Pilsēta, metropoles rajons</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> </tbody> </table>	Izplatīšanās vide	K(f), dB	Brīvā telpa	$4.78 \left[\lg \left(\frac{f}{f_0} \right) \right]^2 - 18.33 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 40.94$	Piepilsēta	$2 \left[\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 + 5.4$	Pilsēta, metropoles rajons	0							
Izplatīšanās vide	K(f), dB																
Brīvā telpa	$4.78 \left[\lg \left(\frac{f}{f_0} \right) \right]^2 - 18.33 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 40.94$																
Piepilsēta	$2 \left[\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 + 5.4$																
Pilsēta, metropoles rajons	0																
7	<p>COST 231-Hata modelis $LOS + \Sigma R_i / EMW_i$</p>	<p>Modeļa ierobežojumi: darba frekvenču diapazons: $f = 150-2000$ MHz; BTS antenas pacelšanas augstums: $h_t = 30-200$ m; MS antenas pacelšanas augstums: $h_r = 1-10$ m; attālums starp BTS un MS: $r = 1-20$ km;</p> $P_r = P_t - A - B \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 13.82 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + a(f, h_r) -$ $- \left[44.9 - 6.55 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) \right] \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - C, \text{ dBm}$ $a(f, h_r) = \left(1.1 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.7 \right) \cdot h_r - \left(1.56 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.8 \right), \text{ dB}$ <p>kur A – zudumu pastāvīgā komponente (tabula 3.8), dB; B – frekvences korekcijas faktors (tabula 3.8); $a(f, h_r)$ – MS antenas augstuma labojuma koeficients, dB; C – zudumu korekcijas koeficients atkarībā no apkārtējās vides (tabula 3.9), dB;</p> <p style="text-align: center;">Tabula 3.8</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Darba diapazona frekvence f, MHz</th> <th style="text-align: center;">A, dB</th> <th style="text-align: center;">B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">$150 \leq f < 1500$</td> <td style="text-align: center;">69.55</td> <td style="text-align: center;">26.16</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">$1500 \leq f \leq 2000$</td> <td style="text-align: center;">46.33</td> <td style="text-align: center;">33.9</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Tabula 3.9</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Izplatīšanās nosacījumi</th> <th style="text-align: center;">C, dB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">Brīvā telpa, piepilsēta, pilsēta</td> <td style="text-align: center;">0</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Metropoles rajons</td> <td style="text-align: center;">3</td> </tr> </tbody> </table>	Darba diapazona frekvence f, MHz	A, dB	B	$150 \leq f < 1500$	69.55	26.16	$1500 \leq f \leq 2000$	46.33	33.9	Izplatīšanās nosacījumi	C, dB	Brīvā telpa, piepilsēta, pilsēta	0	Metropoles rajons	3
Darba diapazona frekvence f, MHz	A, dB	B															
$150 \leq f < 1500$	69.55	26.16															
$1500 \leq f \leq 2000$	46.33	33.9															
Izplatīšanās nosacījumi	C, dB																
Brīvā telpa, piepilsēta, pilsēta	0																
Metropoles rajons	3																
8	<p>Walfisch-Ikegami modelis $LOS/NLOS +$</p>	<p>Modeļa ierobežojumi: darba frekvenču diapazons: $f = 800-2000$ MHz; BTS antenas pacelšanas augstums: $h_t = 4-50$ m;</p>															

$\Sigma D_i/EMW_i$

MS antenas pacelšanas augstums: $h_r = 1-3$ m;
attālums starp BTS un MS: $r = 0.02-5$ km;



Att. 3.6. Pilsētas parametri radioviļņu izplatīšanās aprēķiniem

$$L_{rt} = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{msd}, & \text{ja } L_{rts} + L_{msd} \leq 0 \text{ dB} \\ L_0, & \text{ja } L_{rts} + L_{msd} > 0 \text{ dB} \end{cases} < 0, \text{ dB}$$

$$L_{LOS} = -42.6 - 26 \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - 20 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right), \text{ dB}$$

$$L_0 = -32.45 - 20 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - 20 \lg\left(\frac{r}{r_0}\right), \text{ dB}$$

$$L_{rts} = 16.9 + 10 \lg\left(\frac{w}{w_0}\right) - 10 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - 20 \lg\left(\frac{\Delta h_r}{h_0}\right) - L_{ori}, \text{ dB}$$

$$L_{msd} = -L_{bsh} - k_a - k_d \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - k_f \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) + 9 \lg\left(\frac{b}{b_0}\right), \text{ dB}$$

$$P_{rLOS} = P_r + L_{LOS} = P_t - 42.6 - 26 \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - 20 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right), \text{ dBm}$$

$$P_{rNLOS} = P_t + L_{rt}, \text{ dBm}$$

kur P_{rLOS} – BTS signāla jauda uztveršanas punktā tiešredzamības nosacījumos, dBm;
 P_{rNLOS} – BTS signāla jauda uztveršanas punktā netiešās redzamības nosacījumos, dBm;

L_{rt} – summārie zudumi trasē, dB;

L_{LOS} – zudumi trasē tiešredzamības nosacījumos, dB;

L_0 – zudumi brīvajā telpā NLOS modelim, dB;

L_{rts} – zudumi difrakcijas un izkliedes dēļ, dB;

L_{msd} – zudumi radioviļņu daudzstaru izplatīšanās dabas dēļ, dB;

L_{ori} – zudumi orientācijas dēļ (tabula 3.10), dB;

L_{bsh} – jaudas pastiprinājums gadījumos, kad BTS antena uzstādīta virs ēku jumtiem (tabula 3.11), dB;

w – ielu vidējais platums, parasti $w = 0.5b$ m;

w_0 – ielas platuma normējošā vērtība, $w_0 = 1$ m;

b – attālums starp pretī stāvošajām ēkām, m;
 b_0 – attāluma starp ēkām normējošā vērtība, $b_0 = 1$ m;
 h_B – ēku vidējais augstums, m;
 Δh_t – BTS antenas pacelšanas augstums virs ēku jumtiem, $\Delta h_t = h_t - h_B$, m;
 Δh_r – attālums no MS antenas līdz ēku jumtiem, $\Delta h_r = h_B - h_r$, m;
 φ – ielas orientācijas leņķis attiecībā pret vilni, parasti $\varphi = 90^\circ$;
 k_a – zudumi, atkarībā no attāluma starp BTS un MS un BTS antenas pacelšanas augstuma (tabula 3.11), dB;
 k_d – zudumu korekcijas koeficients atkarībā no attāluma starp BTS un MS (tabula 3.11);
 k_f – difrakcijas zudumu koeficients atkarībā no darba frekvences vērtības (tabula 3.12).

Tabula 3.10

Ielas orientācijas leņķis $\varphi, ^\circ$	L_{ori}, dB
$0 \leq \varphi < 35$	$-10 + 0.354\varphi$
$35 \leq \varphi < 55$	$2.5 + 0.075(\varphi - 35)$
$55 \leq \varphi < 90$	$4 - 0.114(\varphi - 55)$

Tabula 2.11

Augstums Δh_t , m; attālums r , km	L_{bsh}, dB	k_a	k_d
$\Delta h_t > 0$	$-181g(1 + \Delta h_t)$	54	18
$\Delta h_t \leq 0, r \geq 0.5$	0	$54 - 0.8 \cdot \Delta h_t$	$18 - 15 \frac{\Delta h_t}{h_B}$
$\Delta h_t \leq 0, r < 0.5$		$54 - 0.8 \cdot \Delta h_t \cdot 2r$	

Tabula 3.12

Izplatīšanās vide	k_f
Piepilsēta, pilsēta	$-4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right)$
Metropoles rajons	$-4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right)$

9

Hata-Davidson
modelis
 $LOS + \Sigma R_i /$
 EMW_i

Modeļa ierobežojumi:
 darba frekvenču diapazons: $f = 150-1500$ MHz;
 BTS antenas pacelšanas augstums: $h_t = 30-2500$ m;
 MS antenas pacelšanas augstums: $h_r = 1-10$ m;
 attālums starp BTS un MS: $r = 1-300$ km;

$$P_r = P_r \text{Hata} - A(h_t, r) + S_1(r) + S_2(h_t, r) + S_3(f) + S_4(f, r), \text{dBm}$$

$$P_{r\ Hata} = P_t - 69.55 - 26.16 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - \left(44.9 - 6.55 \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right)\right) \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + 13.82 \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right) + a(f, h_r) + K(f)$$

$$S_2(h_t, r) = \begin{cases} 0.00784 \cdot \left| \lg\left(\frac{9.98}{r}\right) \right| \cdot (h_t - 300) & \text{ja } h_t \geq 300\text{ m} \\ 0 & \text{ja } h_t < 300\text{ m} \end{cases}$$

$$S_3(f) = \frac{f}{250 \lg\left(\frac{1500}{f}\right)}$$

kur $P_{r\ HATA}$ – signāla jauda uztveršanas punktā pēc Okumura-Hata modeļa, dBm;
 $A(h, r)$, $S_1(r)$ – korekcijas faktori, atkarībā no attāluma starp BTS un MS (tabulas 3.13, 3.14), dB;
 $S_2(h, r)$ – korekcijas faktors, atkarībā no BTS antenas pacelšanas augstuma un attāluma starp BTS un MS, dB;
 $S_3(f)$ – korekcijas faktors, atkarībā no darba frekvenču diapazona, dB;
 $S_4(f, r)$ – korekcijas faktors, atkarībā no darba frekvenču diapazona un attāluma starp BTS un MS (tabula 2.13), dB.

Tabula 3.13

Attālums r, km	A(h, r), dB
$r < 20$	0
$20 \leq r < 300$	$0.62137 \cdot (r - 20) \cdot \left[0.5 + 0.15 \lg\left(\frac{h_t}{121.92}\right) \right]$

Tabula 3.14

Attālums r, km	$S_1(r)$, dB	$S_4(f, r)$, dB
$r < 64.38$	0	0
$64.38 \leq r < 300$	$0.174 \cdot (r - 64.38)$	$0.112 \lg\left(\frac{1500}{f}\right) \cdot (r - 64.38)$

$$P_r \approx P_t \text{LOS} - \alpha_{mF} \cdot r + 10 \lg[\zeta(r)],$$

kur α_{mF} – garuma rimšanas koeficients (tabula 3.15), dB/km;
 $\zeta(r)$ – korekcijas parametrs (virsmas viļņa ietekme) (tabula 3.15);

Tabula 3.15

Darba frekvence f, MHz	α_{mF} , dB/m	$\zeta(r)$
900	0.185	$10^{0.1}$
1800	0.36	

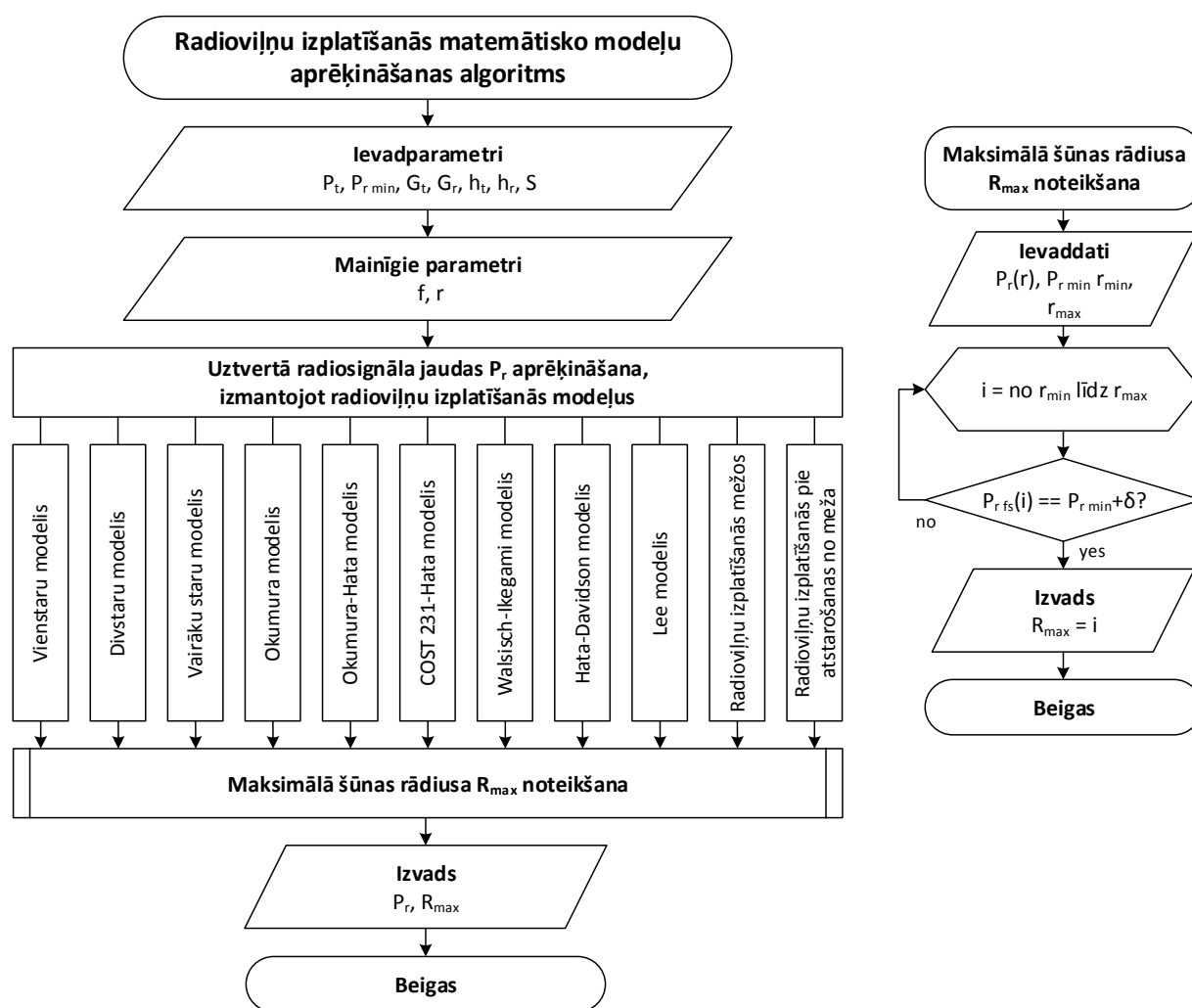
10

Radioviļņu izplatīšanās mežā [15, 26]
 $LOS_1 + A / LOS_F +$
 $Lateral / EMW +$
 LOS_2

11	<p>Radioviļņu izplatīšanās brīvajā telpā pie atstarošanas no mežu masīva [26] $NLOS + \Sigma R_i / EMW_i$</p>	$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2} \int_{V_F} \frac{F_t(\theta)^2 \cdot \sigma(\varphi)}{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot V_0} dV, \text{ W}$ <p>kur $F_t(\theta)$ – raidītāja antenas vērsma diagramma, $F_t(\theta) = 1$ visvirzienu antenām; V_F – meža masīva tilpums, m^3; V_0 – tilpuma normējošais parametrs, $V_0 = 1 \text{ m}^3$; φ – leņķis starp radioviļņa krišanas virzienu uz meža virsmas un no tās atstarotā stara virzienu, $^\circ$; $\sigma(\varphi)$ – tilpuma vienības izkliedes īpatnējais efektīvais laukums, m^2 r_1 – attālums no BTS raidītāja līdz meža masīvam, km; r_2 – attālums no meža masīva līdz MS uztvērējam, km;</p>
----	--	--

3.4. Radioviļņu izplatīšanās modeļu aprēķinu algoritms

Pamatojoties uz augstāk apskatīto mobilo sakaru tīklu radiosignālu izplatīšanās matemātisko modeļu analīzi, tika izstrādāts šo modeļu skaitliskā aprēķina algoritms (att. 3.7). Radiosignāla jaudas noteikšanai uztveršanas punktā katram modelim tiek izmantotas formulas no tabulas 3.2 un sākumdati — standarta parametri, kas tiek izmantoti pasaules mobilo sakaru tīklu pielietojamā BTS un MS aparatūrā.



Att. 3.7. Radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu un BTS šūnas maksimālā rādiusa R_{max} aprēķināšanas algoritms

No blokhēmas (att. 3.7) labas daļas izriet, ka atkarībā no mobilās stacijas MS uztvērēja jūtības vērtības $P_{r\min}$ un attiecīgā matemātiskā modeļa, kas nosaka $P_r(r)$ funkciju, programmas algoritms ļauj aprēķināt mobilā tīkla šūnas maksimālo rādiusu R_{max} .

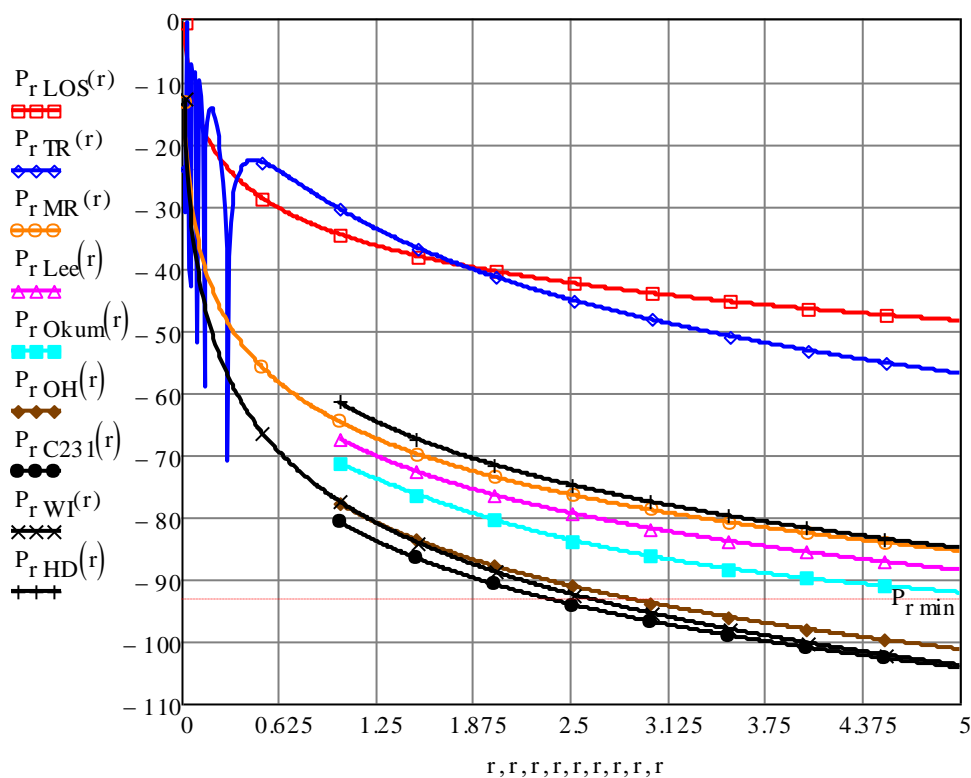
3.5. Radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu aprēķināšana

Mathcad programmā

Apkārtējās vides ietekmes faktoru uz radioviļņu izplatīšanu novērtēšanai un rezultātu, kas tika iegūti, izmantojot augstāk aprakstītus matemātiskus modeļus (tabula 3.2) un algoritmu (att. 3.7) salīdzināšanai, Mathcad datorprogrammā realizēts uztvertā radiosignāla jaudas P_r skaitliskais aprēķins (1. pielikums). Uztvertā signāla jauda tiek apzīmēta kā funkcija $P_r(r)$ (att. 3.8) no attāluma starp raidītāju (BTS) un uztvērēju (MS) downlink režīmā pie sekojošiem parametriem:

- uzdotā BTS raidītāja izejas jauda: $P_t = 50 \text{ W}$ (47 dBm);
- darba diapazona frekvence: $f = 900 \text{ MHz}$ ($\lambda = 0.33 \text{ m}$);
- BTS un MS antenu pastiprinājuma koeficienti: $G_t = 10$, $G_r = 1$.

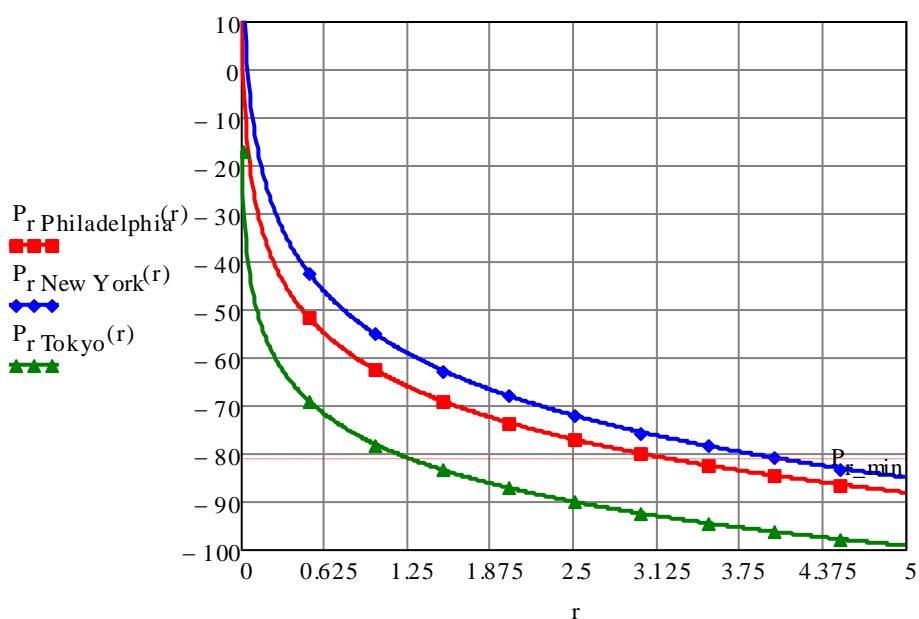
Aprēķinos tika ņemti vērā apkārtējās vides nosacījumi, kas ir specifiski katra matemātiska modeļa (tabula 3.1) gadījumā.



Att. 3.8. Radiosignāla jaudas uztveršanās punktā P_r (dBm) kā funkcijas no attāluma starp BTS un MS (downlink režīmā) salīdzinājums 9 matemātiskajiem modeļiem

Kā izriet no grafika 3.8, attālumam starp BTS raidītāju un MS uztvērēju palielinoties, signāla jauda tā uztveršanas punktā samazinās saskaņā ar radioviļņu izplatīšanās nosacījumiem. Piemēram, attālumā $r = 3$ km uztvertā signāla jauda tiešredzamības režīmā LOS būs $P_r = -44$ dBm, taču blīvās apbūves nosacījumos (Walfisch-Ikegami modelis) jauda šajā attālumā $P_r = -95$ dBm. Atkarībā no MS uztvērēja jūtības līmeņa, stabilie radiosakari var tikt traucēti: ja jūtība tiks samazināta līdz $P_{r\ min} = -93$ dBm, tad signāls no BTS, kas izplatās pēc Walfisch-Ikegami modeļa, šajā attālumā jau netiks pieņemts ar MS uztvērēju.

Grafiku (att. 3.8) salīdzināšanai tiek piedāvātas radiosignālu izplatīšanās eksperimentāli iegūtas atkarības (att. 3.9) Filadelfijas, Ņujorkas un Tokijo pilsētās, kas izceļas ar diezgan blīvu apbūvi. No grafika 3.3 izriet, ka $P_r(r)$ atkarība Filadelfijas pilsētai ir aptuveni aprakstīta ar Lee modeli, bet Tokijo tā ir līdzīga COST 231-Hata modelim.



Att. 3.9. Radiosignāla jaudas uztveršanās punktā P_r (dBm) atkarība no attāluma r (km) starp BTS un MS norādītajās pilsētās[18]

Tabulā 3.16 ir apkopotas aprēķināto maksimālo šūnu rādiusu vērtības konkrētajiem radioviļņu izplatīšanās matemātiskiem modeļiem atkarība no uzdotā MS uztvērēja jūtības lieluma $P_{r\ min} = [-81; -100]$ dBm.

Tabula 3.16
Maksimālais šūnas rādiuss $R_{\max 0}$ pie uzdotajiem
MS uztvērēja jūtības parametriem

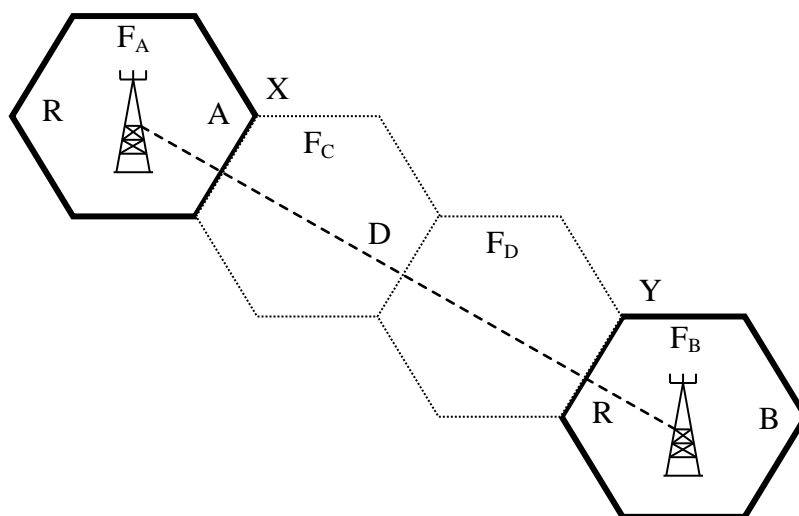
Matemātiskais modelis	R_{\max}, km ja $P_{r \min} = -81$ dBm	R_{\max}, km ja $P_{r \min} = -100$ dBm
Vienstaru modelis	210.253	1873.883
Divstaru modelis	19.911	59.452
Daudzstaru modelis	3.536	15.202
Lee modelis	2.818	11.827
Okumura modelis	2.077	9.141
Okumura-Hata modelis	1.255	4.584
COST 231-Hata modelis	1.026	3.748
Walfisch-Ikegami modelis	1.253	3.962
Hata-Davidson modelis	3.794	13.858

4. MOBILĀ SAKARU TĪKLA APKALPOŠANAS ZONAS RADIOPĀRKLĀJUMA APRĒĶINĀŠANAS PRINCIPI

4.1. Apkalpošanas zonas radiopārklājuma statistiskā aprēķinu metode

Mobilo sakaru tīklu apkalpošanas zonu veidošana ar statistisko metodi [16, 25] ir balstīta uz šūnu laukuma noteikšanu un attālumu starp BTS aprēķināšanu, izmantojot statistiskus datus par radioviļņu izplatīšanās veidi, kanālu parametriem un izmantojamās aparatūras elektriskiem raksturlielumiem.

Gadījumā, kad pilsētas vidē teritoriālā radiopārklājuma realizācijā mobilajam sakaru tīklam ir nelielas blakus šūnas, tiek apskatītas divas šūnas A un B (att. 4.1) ar bāzes stacijām BTS_A un BTS_B , kas ir uzstādīti šūnu centros. Apskatāmās šūnas ir riņķa līnijas ar rādiusiem R_A un R_B , kas ir vienādi ar šūnas maksimālo rādiusu R_{MAX} .



Att. 4.1. BTS izvietojums mobilā sakaru tīkla apkalpošanas zonā

Šūnu centri A un B atrodas viens no otra attālumā D , pie tam starp šīm šūnām atrodas citas šūnas, kuru darba frekvences atšķirās no A un B darba frekvencēm ($F_A = F_B \neq F_C$). Bāzes stacijām, kurām visvirzienu (Omni) antenas strādā uztveršanas un pārraides režīmā, pastiprinājuma koeficients $G = 0$ dB. Vidējā radiosignāla jauda, kurš tiek uztverts uz šūnas robežas (punktos X un Y), mainās pēc likuma $\sim 1/R^n$, kur R — attālums starp BTS un MS, bet pakāpes parametrs n raksturo jaudas plūsmas blīvuma izmaiņas likumu, atkarībā no

attāluma un no izplatīšanās nosacījumiem: vienstaru modelim $n = 2$; daudzstaru modelim pilsētā $n \approx 4-5$; daudzstaru modelim piepilsētās vai meža masīvos parametrs ir $3 < n < 4$ robežās.

Ja punkts P atrodas uz līnijas, kas savieno punktus A un B , tad vidējā radiosignāla jauda, uztverot punktā X no BTS_A — $P^A_X \approx 1/R^n$, bet no BTS_B — $P^B_X \approx 1/(D-R)^n$.

Reālā uztvertā signāla jauda ir nejaušs process, kas ietver strauju mainīgo komponenti (sadalīto pēc Releja likuma) un lēnu mainīgo komponenti (sadalīto pēc normālā logaritmiskā likuma). Kā ir redzams attēlā 4.1, bāzes stacijas BTS_A un BTS_B veic pārraidi vienādās frekvencēs $F_A = F_B$. Šajā gadījumā signāla vidējā līmeņa attiecība pret traucējumu līmeni (4.1) ir ierakstīta sekojošā veidā:

$$S/I = \left[\frac{D-R}{R} \right]^n, \quad (4.1)$$

Ir jāņem vērā, ka signāla fedings var notikt kā pēc Releja, tā arī pēc normālā logaritmiskā likuma.

Mobilā sakaru tīkla klasteru struktūras gadījumā, kad pie statistiski neatkarīgiem uztveramiem signāliem punktā X no visām šūnām nāk vienādu frekvenču signāli $F_A = F_B = F_i$, tad attiecību signāls/traucējums (4.2) var pierakstīt:

$$S/I = \left[R^n \cdot \sum_{i=1}^M \frac{1}{R^n_i} \right]^{-1}, \quad (4.2)$$

kur M – kopējais BTS skaits apkalpošanas zonā;

R_i – attālums no uztveršanas punkta X līdz bāzes stacijai BTS_M .

Ir vērts atzīmēt, ka vienādojums (4.2) ir patiess pie nosacījuma, ka BTS_A izstarotā signāla jauda ir pietiekamā lai nodrošinātu attiecīgu signāls/traucējums attiecību attālumā R , un ir lielāka, nekā radiosignāla jauda no bāzes stacijas BTS_B . Tādā veidā var secināt, ka mobilajā tīklā ir ierobežojumi pēc savstarpējo traucējumu kritērija, nevis pēc signāla un siltuma trokšņu līmeņa.

Tā kā apkalpošanas zonas teritoriālais radiopārklājums tiek panākts ar radiofrekvenču atkārtotās izmantošanas palīdzību (pilsētas nosacījumos pēc izmēriem nelielās šūnās), tad apļveida šūnu aproksimācijai sešstūra veidā, šūnu skaits klasterī (klasteru struktūra) tiek aprēķināts pēc vienādojuma (4.3):

$$N_{c-k} = \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{D}{R} \right)^2, \quad (4.3)$$

tad frekvenču atkārtotās izmantošanas koeficients būs vienāds:

$$c = \frac{1}{N_{c-k}}, \quad (4.4)$$

Klasteru struktūras raksturlielums N_{c-k} var pieņemt tikai diskrētus lielumus: 3, 4, 7, 9, 12, 13 utt., kurus nosaka no vienādojuma (4.5):

$$N_{c-k} = (k+1)^2 - kl, \quad (4.5)$$

kur k un l – veseli pozitīvie skaitļi.

Attiecības $D/R = q$, līdzkanālu atkārtotā koeficienta vērtību, parasti aprēķina no pieļaujamās signāla attiecības pret traucējumiem S/I un sakaru sistēmas raksturojumiem. Apkalpošanas zonu reālus izmērus, konkrētāk lielumu D , R , q , N_{c-k} vērtības, nosaka virkne faktoru:

- piedāvātās slodzes (trafika) intensitāte;
- mobilajam sakaru tīklam piešķirto radiokanālu kopējais skaits;
- pieļaujamā atteikumu intensitāte;
- frekvenču kanālu sadalīšanas stratēģija.

Ja slodzes intensitāte visā mobilā sakaru tīkla apkalpošanas zonā BTS starpā ir vienmērīga, tad sakaru tīkla projektēšanas uzdevums nelielajam šūnu skaitam pilsētas robežās ir vienkāršs. Ja slodzes intensitāte, tuvojoties pilsētas robežai, samazinās, tad sakaru tīkla būvēšanas izdevumu minimizēšanai BTS šūnu izmērus pilsētas nomalēs palielina (palielinās šūnu rādiusi), un lielums $q = D/R$ būs jau mainīgs. Tomēr šajā gadījumā rodas šūnu izmēru un mainīgā trafika lieluma saskaņošanas problēmas. Tādā veidā apkalpošanas zonas teritoriālā radiopārklājuma aprēķinā, izmantojot statistisko metodi, jāizpildās nosacījumam:

$$\left(\frac{D-R}{R} \right)^n = (1-q)^n \leq S/I, \quad (4.6)$$

kur S/I — signāla (Signal) līmeņa pieļaujamā attiecība pret traucējumu (Interference) līmeņi.

4.2. Apkalpošanas zonas radiopārklājuma determinētā aprēķinu metode

Pielietojot apkalpošanas zonas radiopārklājuma determinēto metodi [16, 25], bāzes stacijas var izvietot tā, lai minimizētu radio kanāla izmantošanas intervāla vidējo lielumu (šūnu skaitu vienā klasterī (4.3)) un vienlaicīgi sasniegt apmierinošu apkalpošanas līmeni visas mobilās sakaru sistēmas apkalpošanas zonas robežās.

Lai optimāli izvietotu bāzes stacijas, nepieciešams zināt radiosignāla vidējo līmeni, kas tiek izstarots no bāzes staciju iespējamām atrašanās vietām un uztverts ar mobilām stacijām jebkurā atrašanās punktā, pat ārpus projektējamo šūnu robežām. Informācija par signālu līmeņiem var tikt iegūta aprēķinu, mērījumu vai prognozēšanas ceļā.

Visiem BTS apkalpošanas apgabaliem ir dažādas šūnu formas un izmēri. Šūnu izvietojuma un tajos uzstādīto bāzes staciju optimizācija noved pie BTS skaita minimizācijas, ievērojot noteiktā nepieciešamā kanālu skaita nodrošināšanu. Viena BTS atrašanās vietā var būt uzdotas vairākās apkalpošanas zonās, ko var panākt, izmantojot virzītās antenas. Šis paņēmieni dod papildus brīvību apkalpošanas zonu formu un izmēru izvēlē, un dažos gadījumos palīdz samazināt frekvenču atkārtotās izmantošanas intervālu.

Pirms sākt realizēt efektīvā teritoriālā radiopārklājuma konstruēšanu, izmantojot determinēto metodi, nepieciešams veikt detalizētu nepieciešamo faktoru uzskaiti. Īpašu uzmanību jāpievērš:

- BTS uzstādīšanas vietas izvēlei;
- frekvenču kanālu izvēlei tīkla šūnās;
- izmērītajiem vai aprēķinātajiem radiosignāla jaudas līmeņiem.

Apkalpošanas zonās ar lielu BTS izvietojuma blīvumu, kur frekvenču nobīde starp bāzes stacijām tiek noteikta, izmantojot starpkanālu traucējumu kritēriju S/I , nevis pieļaujamā trokšņa līmeņa ierobežojumus pēc S/N parametra, maksimālās slodzes gadījumos ir iespējams veikt apkalpošanu vienas šūnas ietvaros, bet ar blakus BTS radioaparātūras palīdzību.

Tādā veidā determinētā metode pirmajā tuvinājuma var dot teritoriālā radiopārklājuma novērtējumu apskatāmās teritorijas noteiktam šūnu skaitam, ņemot vērā radioviļņu izplatīšanās apstākļus un atkārtotu frekvenču pielietošanu.

Apkalpošanas zonas radiopārklājuma izpētes rezultātus, kas iegūti izmantojot dažādas metodes, jāprecizē mobilā tīkla optimizācijas etapā. Projektēšanas efektivitāti nepieciešams paaugstināt, veicot radiokanāla raksturlielumu mērījumus.

4.3. Mobilā sakaru tīkla parametru aprēķināšana

Mūsdienu mobilo sakaru tīklu veiksmīgā ekspluatācija ir atkarīga ne tikai no tīkla plānošanas procesa, bet arī no tā pielāgošanas mainīgo nosacījumu ietekmē.

Kā jau tika atzīmēts, mobilā tīkla teritoriālā radiopārklājuma klasteru struktūras projektēšanu saprot kā apkalpošanas zonas BTS parametru komplekso aprēķinu, kad tiek izveidoti dažādu kārtu un konfigurāciju klasteri.

Radiopārklājuma klasteru struktūras adaptācija nozīmē bāzes stacijas grupu un klasteru kopuma korekciju jau sakaru tīkla ekspluatācijas laikā. Kā projektēšanas, tā arī iteratīva adaptācijas procesa gadījumos nepieciešams panākt optimālo šūnu uzstādīšanas variantu apkalpošanas zonā.

Apkalpošanas zonas radiopārklājuma skaitliskais aprēķins [15], ņemot vērā pieņēmumus uzdevuma nostādnē:

- 1) šūnu maksimālais rādiuss:

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r}{P_{r \min}} \cdot 10^{-\alpha l}} \cdot \frac{\lambda}{4\pi} \cdot A_f, \quad (4.7)$$

ja $P_{BTS} = 55 \text{ W}$, $G_{BTS} = G_{MS} = 1$, $P_{MS \min} = 10^{-13} \text{ W}$, $\lambda = 0.33 \text{ m}$, $A_f = 10^{-0.25} = 0.56$, tad šūnas maksimālais rādiuss brīvajā telpā $R_{\max} \approx 20 \text{ km}$;

- 2) makrošūnas maksimālais laukums:

$$S_{MC} = \pi \cdot R_{\max}^2, \quad (4.8)$$

ja $R_{\max} = 20 \text{ km}$, tad makrošūnas maksimālais laukums $S_{MC} = 1256 \text{ km}^2$;

- 3) makrošūnu skaits apkalpošanas zonā:

$$N_{MS} = \frac{S_z}{S_{MC}}, \quad (4.9)$$

kur S_z — apkalpošanas zonas laukums; ja $S_z = 64600 \text{ km}^2$, $S_{MC} = 1256 \text{ km}^2$, tad makrošūnu skaits $N_{MS} = 51$;

4) līdzkanālu atkārtotības koeficients:

pēc formulas (4.6): ja $n = 3$, tad līdzkanālu atkārtotības koeficients ir $q = 5.64$;
ja $n = 3.5$ — $q = 4.72$;

5) šūnu skaits klasterī vai klastera kārta:

pēc formulas (4.3): ja $q = 4.72$, tad klastera kārta $N_{c-k} \approx 7$ šūnas/klasterī;

6) klasteru skaits apkalpošanas zonā:

$$N_c = \frac{N_{MS}}{N_{c-k}} \quad (4.10)$$

ja $N_{MS} = 51$, $N_{c-k} \approx 7$, tad $N_c = 7$ klasteri.

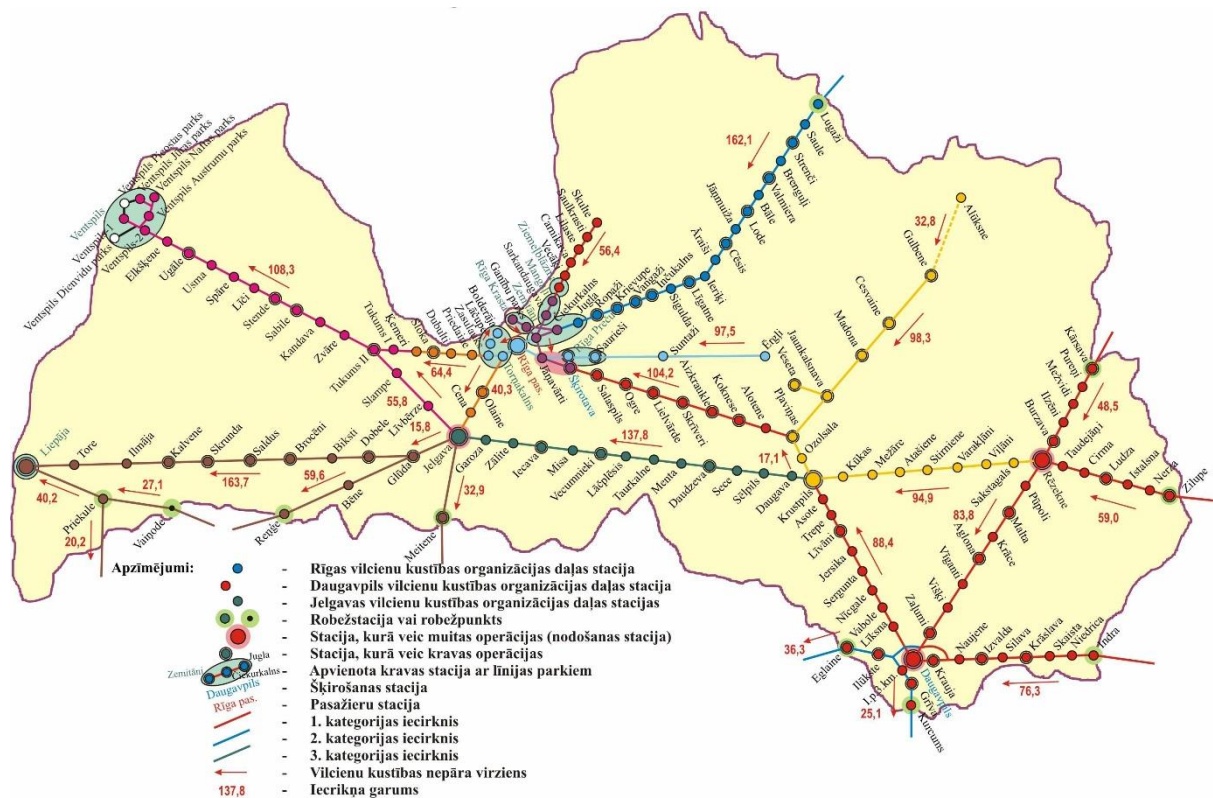
Tādā veidā mobilā tīkla struktūra, pēc aprēķinos iegūtajām parametriem, ir sekojoša:

- apkalpošanas zona ir iedalīta 7 klasteros, katrā no kuriem uzstādītas 7 identiskās šūnas;
- frekvenču atkārtotās izmantošanas koeficients ir: $C = 1/N_{c-k} = 1/7 = 0.143$.

5. GSM-R TĪKLA APKALPOŠANAS ZONAS PROJEKTĒŠANA DZELZCEĻA LĪNIJĀ RĪGA – JELGAVA

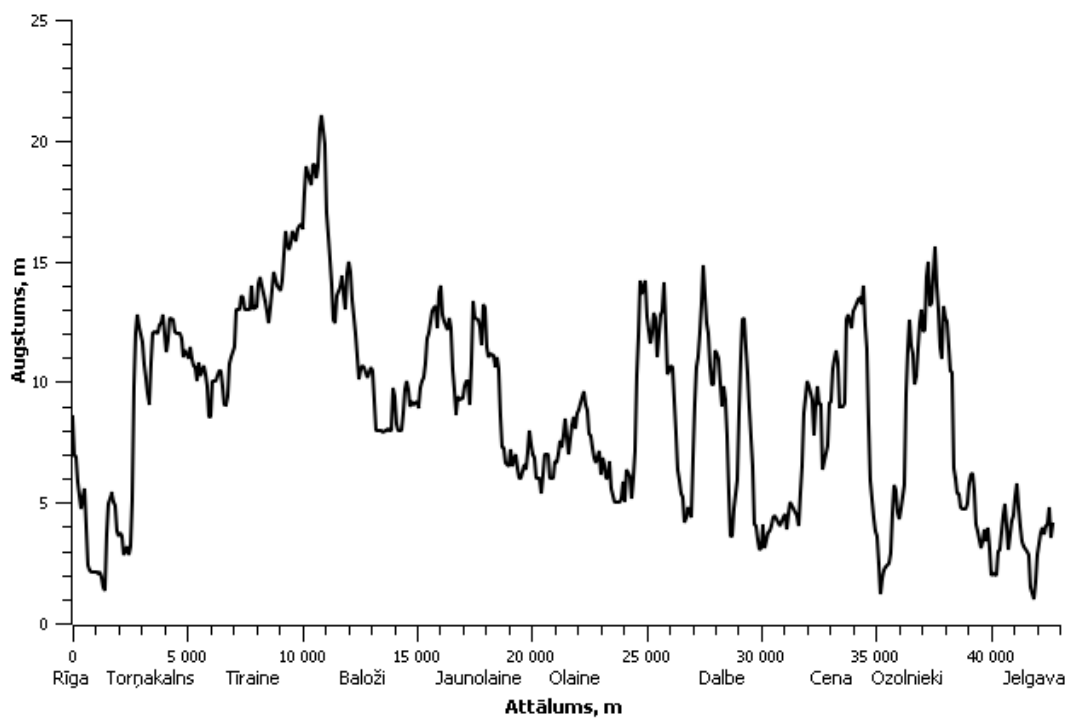
5.1. Dzelzceļa līnijas Rīga – Jelgava apraksts

Dzelzceļa līnija Rīga – Jelgava — ir 43 km garš elektrificētais ceļa posms, kuru izmanto gan pasažieru, gan kravu pārvadājumiem. Dzelzceļa līnija (att. 5.1) sevī iekļauj 5 stacijas un 8 pieturas: Rīga-Pasažieru, Torņakalns, Atgāzene, Turība, Tīraine, Baloži, Jaunolaine, Olaine, Dalbe, Cena, Ozolnieki, Cukurfabrika, Jelgava.



Att. 5.1. Latvijas dzelzceļu līniju un to aprīkojumu karte

Dzelzceļa līnija Rīga – Jelgava pārsvarā atrodas Viduslatvijas zemienē un savieno divus novadus — Vidzemi un Zemgali. Apskatāmās teritorijas reljefa profils ir attēlots grafikā 5.2.



Att. 5.2. Dzelzceļa līnijas Rīga – Jelgava reljefa profils

Attālumi starp stacijām un pieturām ir redzami tabulā 5.1.

Tabula 5.1

Attālumi starp stacijām un pieturām dzelzceļa līnijā Rīga – Jelgava

Stacija / pietura	Ordināta, km	Attālums līdz iepriekšējai pieturai, km
Rīga-Pasažieru	0	–
Torņakalns	2.7	2.7
Atgāzene	4.4	1.7
Turība	5.2	0.8
Tīraine	7.9	2.7
Baloži	12.8	4.9
Jaunolaine	17.8	5
Olaine	22	4.2
Dalbe	28.6	6.6
Cena	33.1	4.5
Ozolnieki	36.1	3
Cukurfabrika	40.8	4.7
Jelgava	43	2.2

5.2. Teritoriālā radiopārklājuma aprēķins dzelzceļa līnijai Rīga – Jelgava

Teritoriālā radiopārklājuma aprēķinu pirmajā posmā tiek novērtēti dati par apskatāmā zemes gabala struktūru, reljefa raksturu, būvju vai citu konstrukciju esamību, kas kopumā nosaka radiosignālu izplatīšanās īpatnības šajā vietā un vidē. Dzelzceļa līnija Rīga – Jelgava, galvenokārt, iet caur pilsētām un piepilsētu teritorijām, samērā īsos posmos — caur mežiem vai koku stādījumiem. Kā ir redzams no reljefa profila (att. 5.2), augstumu variācijas ir manāmas, bet to amplitūda nav liela, ietekme uz signālu izplatīšanas raksturu nav nozīmīga un to var neņemt vērā. Pilsētas uzbūves parametri, kas tiek izmantoti radioviļņu izplatīšanās matemātiskajos modeļos, kā arī bāzes staciju antenas uzstādīšanas kritēriji apskatāmajam gadījumā ir doti tabulā 5.2:

Tabula 5.2

Ievadparametri teritoriālā radiopārklājuma aprēķinam pilsētu robežās

Parametrs	Apzīmējums	Vērtība	Mērvienības
Vidējais ielu platums	w	10	m
Vidējais ēku augstums	h_B	20	m
Vidējais attālums starp ēkām	b	20	m
Ielas orientācijas leņķis attiecībā pret vilni	ϕ	90	°
BTS antenas pacelšanas augstums	h_t	30	m

Tā kā projektējamā GSM-R tīkla posmā Rīga – Jelgava bāzes staciju novietošana tiek plānota dzelzceļa staciju tuvumā, šiem objektiem tika izvēlēti augstāk minētajiem radioviļņu izplatīšanās nosacījumiem atbilstošie matemātiskie modeļi (tabula 3.1), kuri apraksta signālu jaudas atkarību no raidītāja un uztvērēja atrašanas punktiem. Rezultāti ir apskatāmi tabulā 5.3.

Tabula 5.3

Radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu izvēle maksimālo šūnu rādiusu noteikšanai

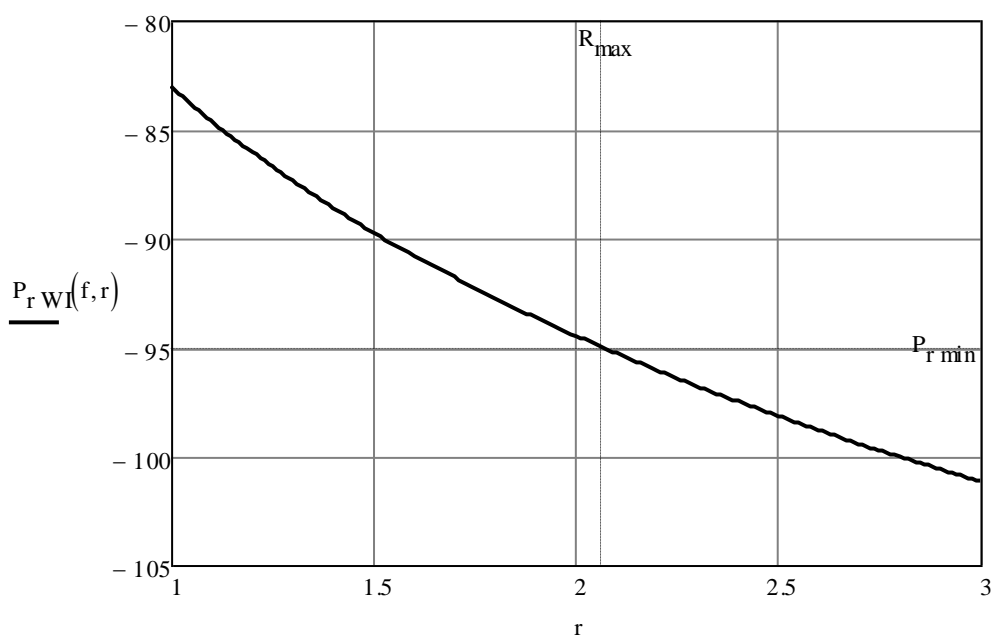
Stacija / pietura	Bāzes stacija	Matemātiskais modelis
Rīga-Pasažieru	BTS N1	Walfisch-Ikegami NLOS

Stacija / pietura	Bāzes stacija	Matemātiskais modelis
Turība	BTS N2	COST231-Hata, Urban Area
Baloži	BTS N3	Okumura-Hata, Suburban Area
Olaine	BTS N4	Okumura-Hata, Suburban Area
Dalbe	BTS N5	Okumura-Hata, Suburban Area
Ozolnieki	BTS N6	COST231-Hata, Suburban Area
Jelgava	BTS N7	COST231-Hata, Urban Area

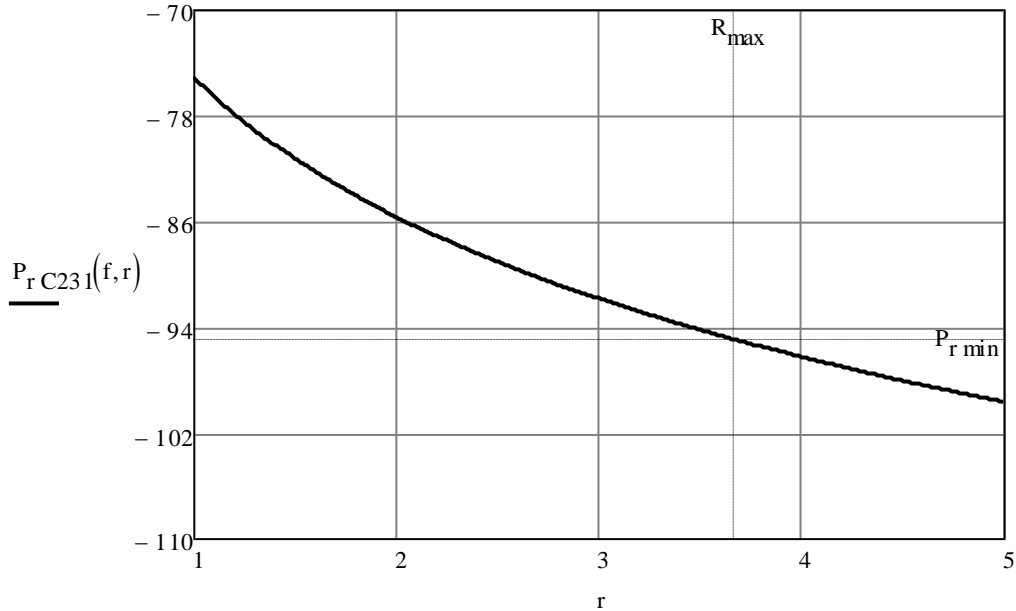
Maksimālā šūnu rādiusa aprēķini ir veikti Mathcad programmā (1. pielikums) saskaņā ar algoritmu (att. 3.7). Aprēķinos izmantoti sekojošie parametri:

- uzdotā BTS raidītāja maksimālā jauda: $P_t = 60 \text{ W}$ (47.78 dBm);
- darba diapazona frekvence: $f = 924.8 \text{ MHz}$ ($\lambda = 0.324 \text{ m}$);
- BTS un MS antenu sistēmu pastiprinājuma koeficienti: $G_t = 17$, $G_r = 1$;
- MS antenas pacelšanas augstums: $h_r = 3 \text{ m}$;
- MS uztvērēja jūtība (pēc EIRENE SRS norādījumiem [4]): $P_{r \min} = -95 \text{ dBm}$;

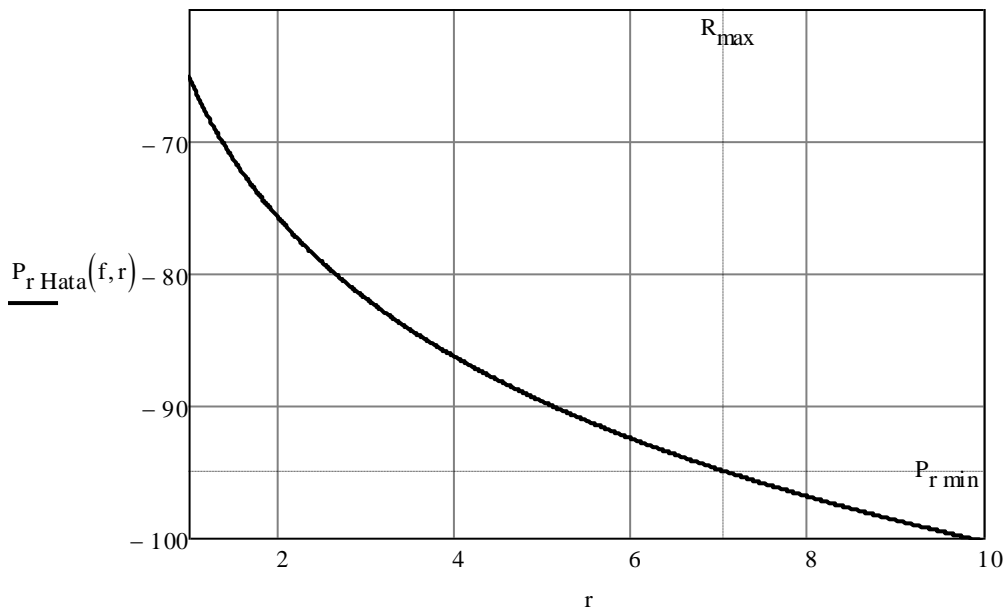
Grafikos 5.3, 5.4, 5.5 ir attēlota radiosignālu jaudas līmeņu izmaiņas MS uztveršanas punktā, atkarība no attāluma starp BTS raidītāju un MS uztvērēju, atzīmēti maksimālie teorētiskie šūnu rādiusi R_{max} pie radioviļņu izplatīšanas nosacījumiem, kurus sevī ietver apskatāmie matemātiskie modeļi (tabula 5.3). Signāla jaudai uztveršanas punktā krītot zem radiouztvērēja jūtības līmeņa $P_{r \min}$, stabilais sakaru kanāls vairs nevar tikt nodrošināts.



Att. 5.3. Uztvertā signāla jaudas P_r (dBm) atkarība no attāluma r (km) starp BTS un MS, rēķinot pēc Walfisch-Ikegami NLOS radioviļņu izplatīšanās modeļa



Att. 5.4. Uztvertā signāla jaudas P_r (dBm) atkarība no attāluma r (km) starp BTS un MS, rēķinot pēc COST 231-Hata radioviļņu izplatīšanās modeļa



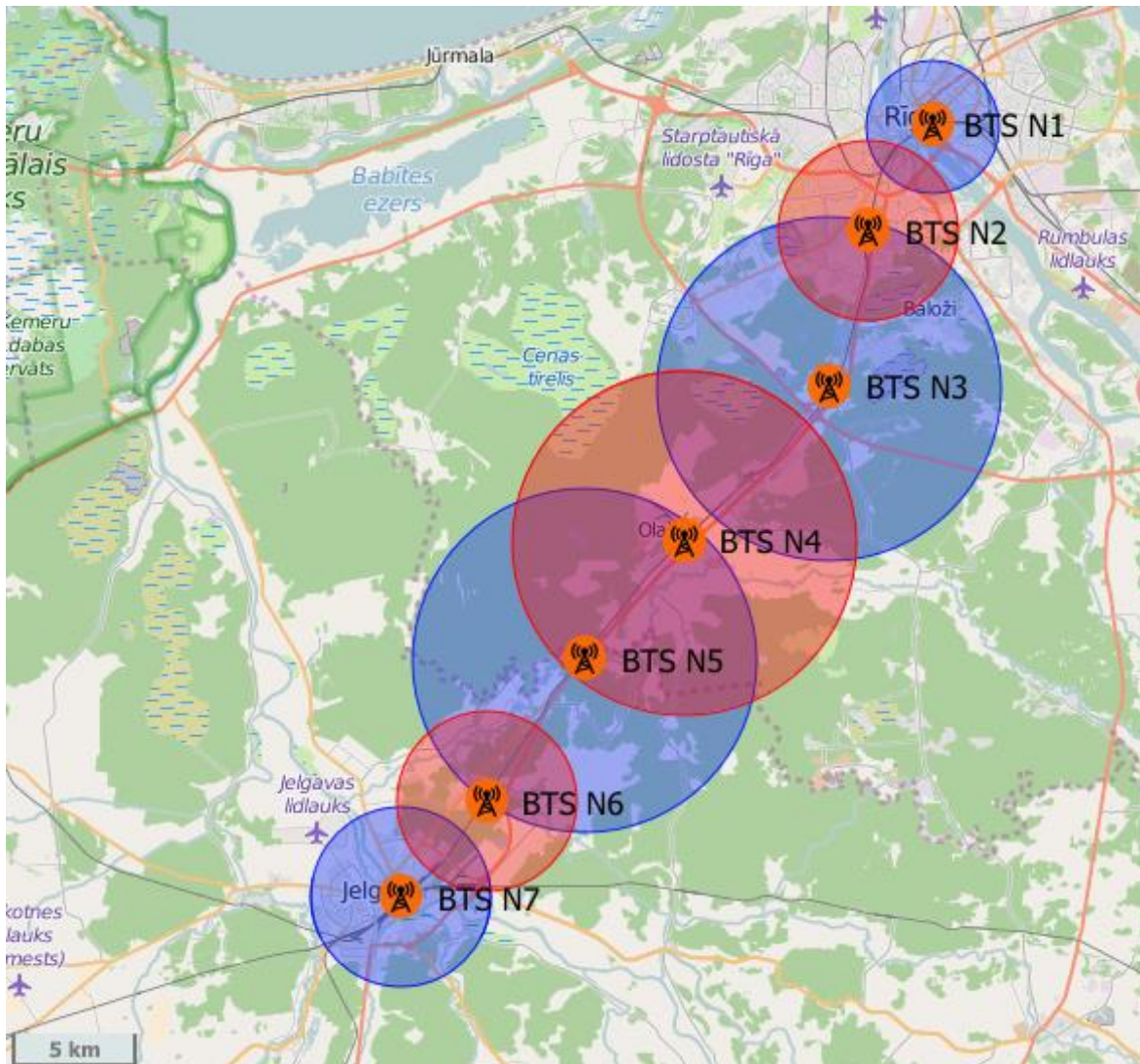
Att. 5.5. Uztvertā signāla jaudas P_r (dBm) atkarība no attāluma r (km) starp BTS un MS, rēķinot pēc Okumura-Hata radioviļņu izplatīšanās modeļa

Pēc aprēķinu veikšanas Mathcad programmā, tika noteiktas bāzes staciju šūnu maksimālo rādusū vērtības:

- Walfisch-Ikegami modelis, pilsēta — $R_{max} = 2.063$ km;
- COST231-Hata modelis, pilsēta — $R_{max} = 3.676$ km;
- Okumura-Hata modelis, piepilsēta — $R_{max} = 7.074$ km

Teritoriālā radiopārklājumā konstruēšanā izmantots vienslāņa šūnu arhitektūras princips ar augstu pārklājuma pakāpi (Single Layer, High Cell Overlap). Šī pieeja tika izvēlēta kā vislabāk līdzsvarota pie salīdzinoši nelielām aparatūras izmaksām un augsta mobilā tīkla sistēmas kopējā drošuma.

Kartē (att. 5.6) ir attēlots GSM-R bāzes staciju iekārtu izvietojanas plāns gar dzelzceļa līniju Rīga – Jelgava, atzīmētas katras bāzes stacijas pārklājuma zonas laukumi.



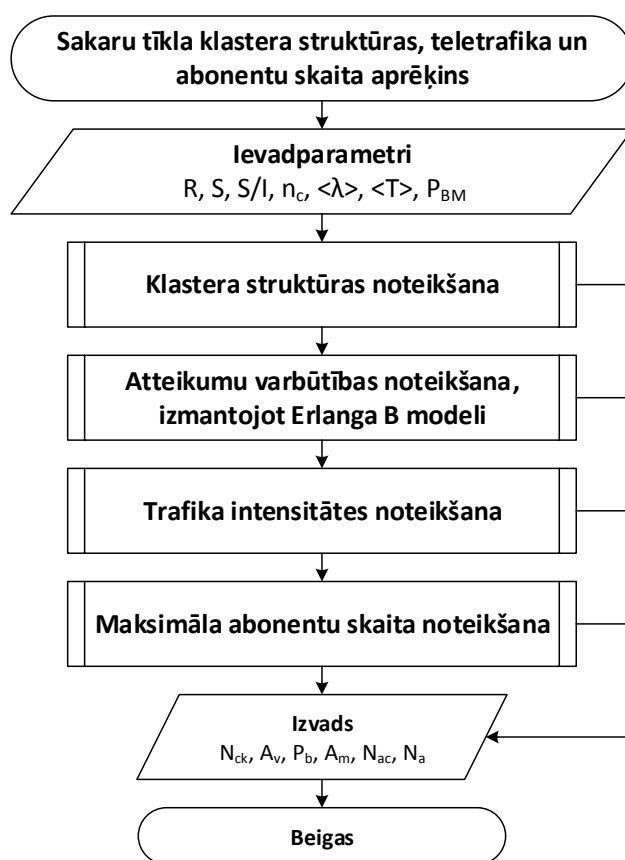
Att. 5.6. BTS izvietojums dzelzceļa līnijas Rīga – Jelgava GSM-R tīklā

Dotajā GSM-R tīkla realizācijas piemērā, sakaru nodrošināšanai dzelzceļa līnijā Rīga – Jelgava ir nepieciešamas 7 BTS, kuras pēc plāna tiek uzstādītas stacijās: Rīga–Pasažieru, Turība, Baloži, Olaine, Dalbe, Ozolnieki, Jelgava. Bāzes staciju uzstādīšana dzelzceļa staciju tiešā tuvumā ir argumentēta ar nepieciešamību ātri piekļūt pie pārraides iekārtām to apkalpošanas vai remontu gadījumā.

5.2. GSM-R tīkla parametru aprēķini dzelzceļa līnijā Rīga – Jelgava

Viens no nozīmīgākajiem tīkla projektēšanas uzdevumiem — tīkla kapacitātes pareizais aprēķins, kurai jābūt pietiekamai visu abonētu apkalpošanai un visu pakalpojumu nodrošināšanai. Veicot aprēķinus ir nepieciešams ņemt vērā slodzes palielināšanos trafika pieauguma rezultātā, saistītā ar jauno abonētu apkalpošanu.

Mobilā sakaru tīkla klasteru struktūras aprēķināšanai, teletrafika un maksimālā abonētu skaita noteikšanai tika izstrādāts algoritms (att. 5.7) un tā realizācija Mathcad programmā (2. pielikums). Ivadparametri (tabula 5.4) priekš šī algoritma tika ņemti no EIRENE SRS [4] rekomendācijām un eksistējošām GSM-R tīklu realizācijām.



Att. 5.7. Mobilā sakaru tīkla teletrafika aprēķina algoritms

Tabula 5.4**Ievadparametri mobilā sakaru tīkla teletrafika aprēķināšanai**

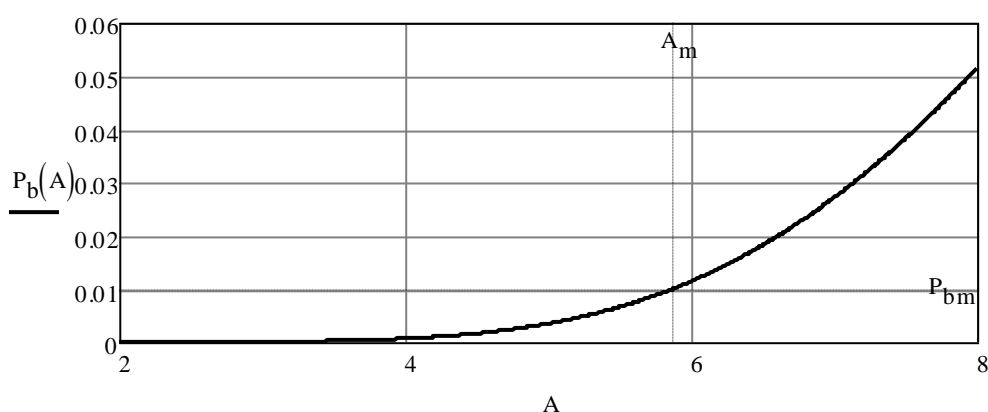
Parametrs	Apzīmējums	Vērtība	Mērvienība
Signāla un traucējumu attiecība	S/I	12	dB
Radiokanālu skaits	n_c	12	–
Vidējā zvanu intensitāte	$\langle \lambda \rangle$	10	zvani/st.
Vidējais zvanu ilgums	$\langle T \rangle$	1	min.
Atteikumu varbūtība	P_B	0.01	–

Parametri un aprēķinu rezultāti, iegūtie Mathcad programmā, ir redzami tabulā 5.5.

Tabula 5.5**Aprēķinātie parametri dzelzceļa līnijas Rīga – Jelgava GSM-R tīklam**

Parametrs	Apzīmējums	Vērtība	Mērvienība
Klasteru struktūra	N_{c-k}	4	–
Klasteru skaits apkalpošanas zonā	N_k	2	–
Trafika vidējā intensitāte	A_v	0.167	E
Abonentu skaits šūnā	N_{ac}	35	–
Abonentu skaits apkalpošanas zonā	N_a	246	–

Iegūtie aprēķinu rezultāti (tabula 5.5) rāda, ka pie šūnu skaita klasterī vienāda ar 4, apkalpošanas zonā no $m = 7$ šūnām tiks organizēti 2 klasteri. Pie līdzkanālu atkārtotības koeficienta lieluma $q = 3.5$, minimālais attālums starp BTS šūnām ar vienādām frekvencēm (frekvenču kanāliem) ir $D \geq 3.5R$. Grafikā (att. 5.8) ir atspoguļota atteikumu varbūtības atkarība no trafika lieluma vērtības. Pie atteikuma varbūtības vērtības $P_B = 0.01$, kas ir definēta tīkla projektēšanas uzdevumā ievadparametros, trafika maksimālā vērtība ir vienāda ar $A_m = 5.876 E$.



Att. 5.7. Atteikumu varbūtības P_b atkarība no trafika A (E) lieluma

Pamatojoties uz iegūtajiem aprēķinu rezultātiem (tabula 5.5) tiek piedāvāts frekvenču plāns bāzes staciju organizācijai (tabula 5.6) dzelzceļa līnijai Rīga – Jelgava GSM-R tīklā:

Tabula 5.6

GSM-R tīkla BTS frekvenču plāns dzelzceļa līnijai Rīga – Jelgava

Stacija / pietura	Bāzes stacija	Izdalītie ARFCN frekvenču kanāli
Rīga-Pasažieru	BTS N1	955, 962, 969
Turība	BTS N2	956, 963, 970
Baloži	BTS N3	957, 964, 971
Olaine	BTS N4	958, 965, 972
Dalbe	BTS N5	955, 962, 969
Ozolnieki	BTS N6	956, 963, 970
Jelgava	BTS N7	957, 964, 971

BTS šūnu konfigurāciju ar 3 ARFCN frekvenču kanāliem var realizēt, izmantojot četru sekciju XPol antenu ar 65° lielu galvenās vērsuma vāles platumu [10], kur divas pretējās sekcijas strādās vienā frekvenču kanālā, bet divas citas — savās attiecīgajās plānā paredzētajās frekvencēs.

SECINĀJUMI

Mūsdienās bezvadu tehnoloģijas ir augsti pieprasītas. Pēdējos gados mobilo sakaru pieejamība strauji pieaug, līdz ar ko mobilie telefoni spēj pilnībā aizstāt parastos vadu telefonus cilvēku ikdienišķajā dzīvē. Modernie viedtelefoni un viedierīces sniedz iespēju izmantot mobilo internetu, piekļūt informācijai no jebkuras vietas pārklājuma zonas robežas. Palielinoties abonentu skaitam, mobilo pakalpojumu izmantošanas laikam, sakaru operatori saskārās ar konstantu slodzes pieaugumu tīklā un ir spiesti meklēt risinājumus.

Radio tehnoloģijas tiek izmantotas gandrīz visās dzīves sfērās un GSM-R standarta izstrādāšana, pielietošana dzelzceļā ir tam labs piemērs. Mobilo sakaru standartu, interfeisu, iekārtu attīstība ir nenovēršamais, nepārtrauktais process, un ik gadu parādās vairāki darbi, pētījumi, vērstie uz to uzlabošanu. Liela nozīme ir mobilo sakaru tīklu projektēšanas jautājumiem, kuru risināšanai arī ir veltīts šis maģistra darbs.

Pamatojoties uz maģistra darba uzdevuma nostādni, darba izpildes gaitā ir panākti šādi rezultāti:

1. apskatītas mūsdienu mobilo sakaru tīklu bāzes staciju un mobilo terminālu antenu sistēmas, noteikti un tabulās apkopoti šo sistēmu tipiskie parametri;
2. izvērtēti mobilo sakaru tīklu apkalpošanas zonas radiopārklājuma izstrādes principi;
3. izpētīti 11 radioviļņu izplatīšanās matemātiskie modeļi, kas ir paredzēti radiosignāla jaudas noteikšanai uztveršanas punktā un mobilo sakaru tīklu sistēmu radiopārklājumu aprēķinam;
4. izstrādāti radiosignāla jaudas noteikšanas algoritmi mobilās stacijas uztveršanas punktā visiem 11 matemātiskiem modeļiem;
5. piedāvāti radioviļņu izplatīšanās matemātisko modeļu skaitliskie aprēķinu piemēri un dota automatizētā aprēķina programma Mathcad vidē;
6. izstrādāts mobilo sakaru tīklu sistēmu šūnu maksimālā pārklājuma zonas rādiusa noteikšanas algoritms, realizēts šūnas maksimālā rādiusa automatizētais aprēķins Mathcad programmā;

7. piedāvāts GSM-R tīkla projekts dzelzceļa līnijai Rīga – Jelgava ar radiopārklājuma zonas, šūnu klasteru struktūras, teletrafika aprēķiniem un frekvenču plāna realizāciju.

Maģistra darba tapšanas rezultātā tika uzrakstīti un zinātniskajos žurnālos publicēti sekojošie raksti:

- “Antenna Systems for Base Transceiver Stations in Cellular Mobile Networks. The Modern State and Development Perspectives” [27];
- “Antenna Systems for Mobile Terminals in Cellular Mobile Networks. The Modern State and Development Perspectives” [28];
- “Mathematical Models and Algorithms of Radio Wave Propagation in Cellular Mobile Communication Networks” [29].

Darba autors piedalījās Rīgas Tehniskās universitātes 56. starptautiskajā zinātniskajā konferencē ar referātiem “Mobilo termināļu antenu sistēmas šūnu mobilajos sakaru tīklos. Mūsdienu stāvoklis un attīstības perspektīvas”, “Bāzes staciju antenu sistēmas šūnu mobilajos sakaru tīklos. Mūsdienu stāvoklis un attīstības perspektīvas”, Viļņas tehnoloģiju un dizaina koledža “Technological Innovation for Sustainable Society – 2016” konferencē ar referātu “Mathematical Models and Algorithms of Radio Wave Propagation in Cellular Networks of Mobile Communication”, kuros tika apskatīti un risināti maģistra darba uzdevumi.

LITERATŪRA

1. Popovs V. GSM standarta šūnu mobilo sakaru sistēma. Projektēšanas problēmas. Rīga: RTI Izdevniecība, 2003, 362 lpp.
2. Alim M. A., Rahman M. M., Hossain M. M., Al-Nahid A., “Analysis of Large-Scale Propagation Models for Mobile Communications in Urban Area,” International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS), vol.7 (no.1), 2010.
3. Blaunstein N., Radio Propagation in Cellular Networks. London, United Kingdom: Artech House, 2000, 384 p.
4. COST Action 231, “Digital Mobile Radio Towards Future Generations Systems,” European Commission, Technical Report EUR 18957, 1999, 474 p.
5. European Integrated Railway Radio Enhanced Network (EIRENE), System Requirements Specification (SRS) Version 15.4.0. GSM-R Operators Group, 2014 [cited– May 10, 2016]. Available at: <http://www.uic.org/IMG/pdf/p0028d004.3r0.5-15.4.0.pdf>
6. Fujimoto K., James J. R., Mobile Antenna Systems Handbook. London: Artech House, Inc., 1994, 710 p.
7. Fujimoto K., Morishita H., Modern Small Antennas. New York: Cambridge University Press, 2014, 473 p.
8. Gibson J. D., The Mobile Communication Handbook. New York: IEEE Press, 1999
9. gvSIG Association, Portal gvSIG, 2006-2016 [cited–February 20, 2016]. Available at: <http://www.gvsig.com/>
10. Huynh M. C., “A Numerical and Experimental Investigation of Planar Inverted-F Antennas for Wireless Communication Applications,” Master thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, USA, 2000, 123 p.
11. Kathrein Inc., Professional Antennas for Mobile Communications. Kathrein Inc., Scala Division, 2013 [cited– May 10, 2016]. Available at: http://www.kathrein-scala.com/catalog/700-3800_C35.pdf
12. Lee W. C. Y., Mobile Communications Design Fundamentals, 2nd ed. New York, USA: Wiley, 1993, 398 p.
13. Milligan T. A., Modern Antenna Design, second edition. Hoboken: John Wiley&Sons, Inc., 2005, 614 p.

14. Parsons J. D., *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd ed. New York, USA: Wiley, 2000, 436 p.
15. Pinho P., Rocha Pereira J. F., "Optimisation of a PIFA Antenna Using Genetic Algorithms," in *Proceedings of the 3rd Conference on Telecommunications (ConfTele 2001)*, 2001.
16. Popovs V., *GSM standarta šūnu mobilo sakaru sistēmas. Projektēšanas problēmas*. Rīga: RTU Izdevniecība, 2003, 362 lpp.
17. Popovs V., Skudnovs V., Vasiljevs A., "Mathematical Models and Algorithms of Radio Wave Propagation in Cellular Networks of Mobile Communication," in *Proceedings of the Technological Innovation for Sustainable Society conference of the Vilnius College of Technologies and Design*, 2016.
18. Popovs V., *Tehniskā elektrodinamika, 4. daļa: Radioviļņu izplatīšanas, Lekcijas*. Rīga: RTU DzTI, 2003–2005, 74 lpp.
19. Singh Y., "Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength," *International Journal of Computer Applications*, vol.59 (no.11), Dec. 2012.
20. Siwiak K., *Radio wave Propagation and Antennas for Personal Communications*. London: Artech House, Inc., 1998, 418 p.
21. Siwiak K., Bahreini Y., *Radio wave Propagation and Antennas for Personal Communications*, 3rd ed. London, United Kingdom: Artech House, 2007, 494 p.
22. Taoglas, *Product Catalogue*. Taoglas, 2015 [cited– May 10, 2016]. Available at: <http://www.taoglas.com/store/>
23. Wong Kin-Lu, *Planar Antennas for Wireless Communications*. New York: Wiley-Inter Science, 2003, 301 p.
24. Zhang Z., *Antenna Design for Mobile Devices*. Wiley-IEEE Press, 2011, 304 p.
25. Весоловский К., *Системы подвижной радиосвязи*. Москва: Горячая линия–Телеком, 2006, 536 с.
26. Попов В. И., *Основы сотовой связи стандарта GSM*. Москва: Эко-Трендз, 2005, 296 с.
27. Попов В. И., *Распространение радиоволн в лесах*. Москва: Горячая линия–Телеком, 2015, 392 с.

28. Попов В. И., Скуднов В. А., Васильев А. С., “Антенны базовых станций в сотовых сетях мобильной связи. Современное состояние и перспективы развития,” Евразийский Союз Ученых (ЕСУ), №11 (20), часть 3, 2015, с. 138–150.
29. Попов В. И., Скуднов В. А., Васильев А. С., “Антенные системы мобильных терминалов в сотовых сетях мобильной связи. Современное состояние и перспективы развития,” Евразийский Союз Ученых (ЕСУ), №11 (20), часть 3, 2015, с. 132–137.
30. Попов В. И., Скуднов В. А., Васильев А. С., “Математические модели и алгоритмы распространения радиоволн в сотовых сетях мобильной связи,” Евразийский Союз Ученых (ЕСУ), №3 (24), часть 3, 2016, с. 68–80.
31. Слюсар В., “Антенны RIFA для мобильных средств связи,” Электроника: НТБ, 1/2007, 64-74 с., 2007.

PIELIKUMI

Uztvertā radiosignāla jaudas, šūnas maksimālā rādiusa automatizētā aprēķina piemērs

Dots:

$P_t W := 50$	W	bāzes stacijas raidītāja jauda
$G_t := 10$		bāzes stacijas raidītāja antenas pastiprinājuma koeficients
$G_r := 1$		mobilas stacijas uztvērēja antenas pastiprinājuma koeficients
$h_t := 50$	m	bāzes stacijas antenas pacelšanas augstums
$h_r := 1$	m	mobilas stacijas antenas pacelšanas augstums
$r := 0.1, 0.11, 0.20$	km	attālums starp bāzes staciju un mobilo staciju
$P_{r \min} := -100$	dBm	mobils stacijas uztvērēja jūtība
$k_e := 4$		signāla izplatīšanās vide: 0 — brīvā telpa (LOS) 1 — lauki 2 — piepilsēta 3 — pilsēta 4 — lielpilsēta

Normējošie parametri:

$P_0 := 1$	mW	$h_0 := 1$	m	$\lambda_0 := 1$	m
$r_0 := 1$	km	$w_0 := 1$	m	$b_0 := 1$	m
$f_0 := 1$	MHz				

Darba viļņa garums:

$c := 2.997910^8$ m·s⁻¹ gaismas ātrums vakuumā

$$\lambda(f) := \frac{c}{f \cdot 10^6} \quad \text{m}$$

BTS raidītāja jauda::

$$P_t := 10 \log \left(\frac{P_t W}{P_0 \cdot 10^{-3}} \right) = 46.99 \quad \text{dBm}$$

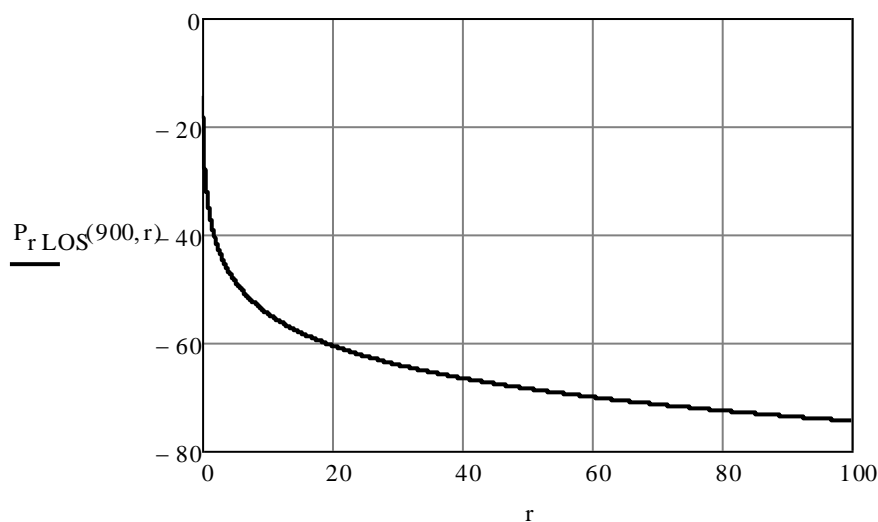
1. Vienstaru modelis (LOS):

$$P_{r \text{ LOS}}(f, r) := P_t + 10\log(G_t) + 10\log(G_r) - 20\log(4\pi) + 20\log\left(\frac{\lambda(f)}{\lambda_0}\right) - 20\log\left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0}\right) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r \text{ LOS}}(900, x) = P_{r \text{ min}}$$

$$R_{\text{LOS } 900} := \text{Find}(x) = 1.874 \times 10^3 \quad \text{km} \quad r := 0.1, 0.11, 100 \quad \text{km}$$



2. Divstaru modelis:

$$R := 1 \quad \text{atstarošanas koeficients } (R \leq 1)$$

$$\varphi := 180 \cdot \frac{\pi}{180} = 3.142 \quad \text{rad} \quad \text{atstarošanas leņķis}$$

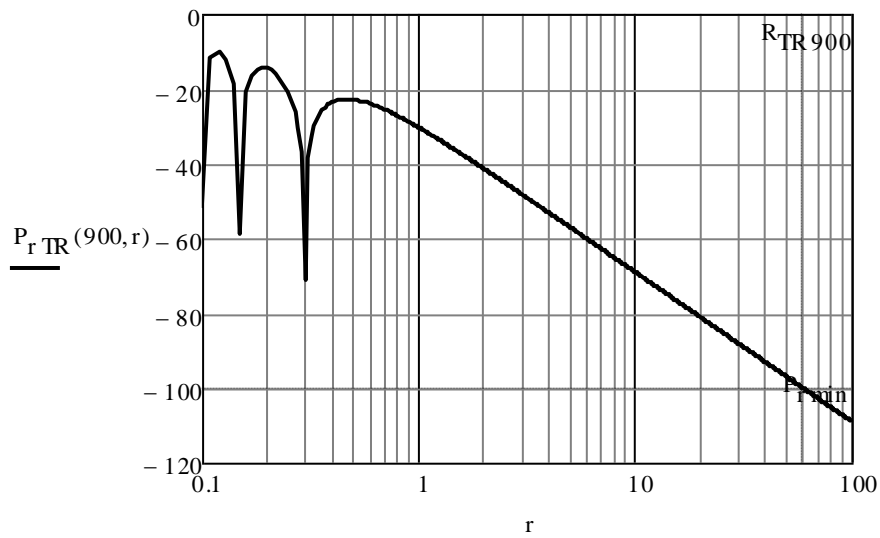
$$\psi(f, r) := 1 + R^2 + 2R \cdot \cos\left(\varphi + 4\pi \cdot \frac{h_t \cdot h_r}{\lambda(f) \cdot r \cdot 10^3}\right)$$

$$P_{r \text{ TR}}(f, r) := P_{r \text{ LOS}}(f, r) + 10\log(\psi(f, r)) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r \text{ TR}}(900, x) = P_{r \text{ min}}$$

$$R_{\text{TR } 900} := \text{Find}(x) = 59.459 \quad \text{km} \quad r := 0.1, 0.11, 100 \quad \text{km}$$



3. Daudzstaru modelis:

$$n := 3$$

rimšanas koeficients

$$P_{rMR}(f,r) := P_t + 10\log(G_t) + 10\log(G_r) + 20\log\left(\frac{\lambda(f)}{\lambda_0}\right) - 20\log(4\pi) - 10n\log\left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0}\right) \text{ dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

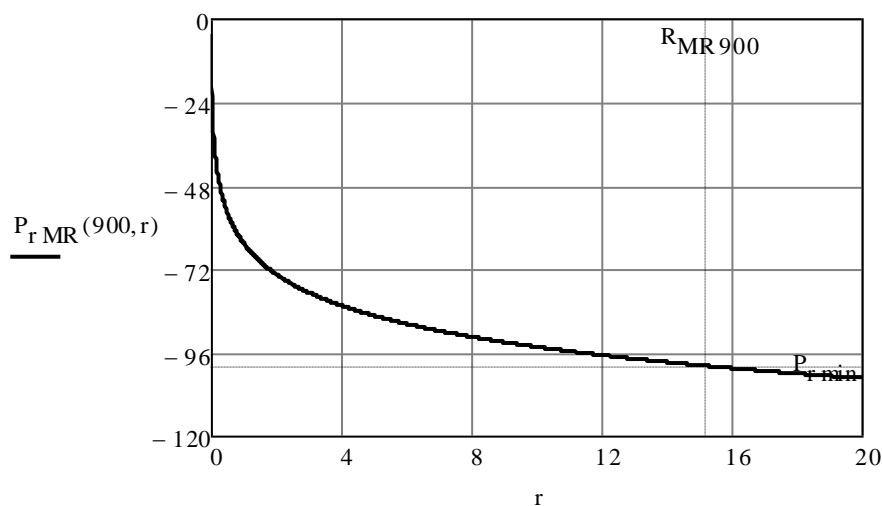
$$x := 1$$

Given

$$P_{rMR}(900,x) = P_{r\text{ min}}$$

$$R_{MR900} := \text{Find}(x) = 15.202 \text{ kr}$$

$$r := 0.01, 0.02, 20 \text{ kr}$$



4. Lee modelis:

Nominālie parametri:

$$P_{tn0} := 10 \text{ W}$$

$$h_{tn0} := 30.4 \text{ m}$$

$$h_{rn0} := 3 \text{ m}$$

$$f_{n0} := 900 \quad \text{MHz} \qquad r_{n0} := 1.6 \quad \text{km}$$

$$n(f) := \begin{cases} 2 & \text{if } k_e \leq 2 \vee f < 450 \\ 3 & \text{if } k_e > 2 \vee f \geq 450 \end{cases} \quad \text{frekvences korekcijas koeficients, } 2 \leq n \leq 3$$

$$v := \begin{cases} 2 & \text{if } h_r > 10 \\ 1 & \text{if } h_r < 3 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{MS antenas pacelšanas augstuma korekcijas koeficients}$$

$$P_{r0} := \begin{cases} -45 & \text{if } k_e \leq 0 \\ -49 & \text{if } k_e = 1 \\ -61.7 & \text{if } k_e = 2 \\ -70 & \text{if } k_e = 3 \\ -84 & \text{if } k_e \geq 4 \end{cases} \quad \text{dBm} \quad \text{nominālie zudumi nominālajā attālumā}$$

$$\gamma := \begin{cases} 2 & \text{if } k_e \leq 0 \\ 4.35 & \text{if } k_e = 1 \\ 3.84 & \text{if } k_e = 2 \\ 3.68 & \text{if } k_e = 3 \\ 3.05 & \text{if } k_e \geq 4 \end{cases} \quad \text{zudumu korekcijas koeficients}$$

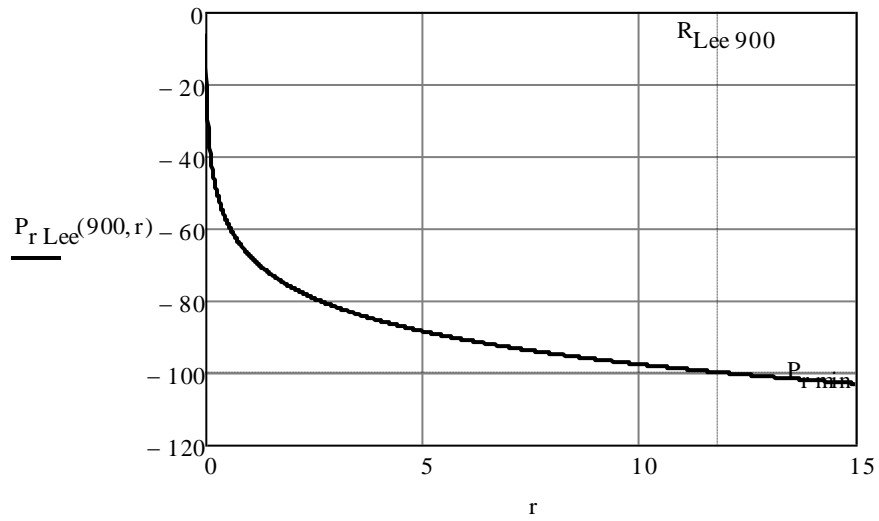
$$\alpha_0 := \left(\frac{h_t}{h_{tn0}} \right)^2 \cdot \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right)^v \cdot \frac{P_t W}{P_{tn0}} \cdot \frac{G_t \cdot G_r}{4} \quad \text{dBm} \quad \text{parametru korekcijas koeficients}$$

$$P_{r \text{ Lee}}(f, r) := P_{r0} - 10\gamma \log\left(\frac{r}{r_{n0}}\right) - 10n(f) \cdot \log\left(\frac{f}{f_{n0}}\right) + 10\log(\alpha_0) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \qquad \text{Given} \qquad P_{r \text{ Lee}}(900, x) = P_{r \text{ mir}}$$

$$R_{\text{Lee}900} := \text{Find}(x) = 11.827 \quad \text{km} \qquad r := 0.01, 0.02, 0.15 \quad \text{km}$$



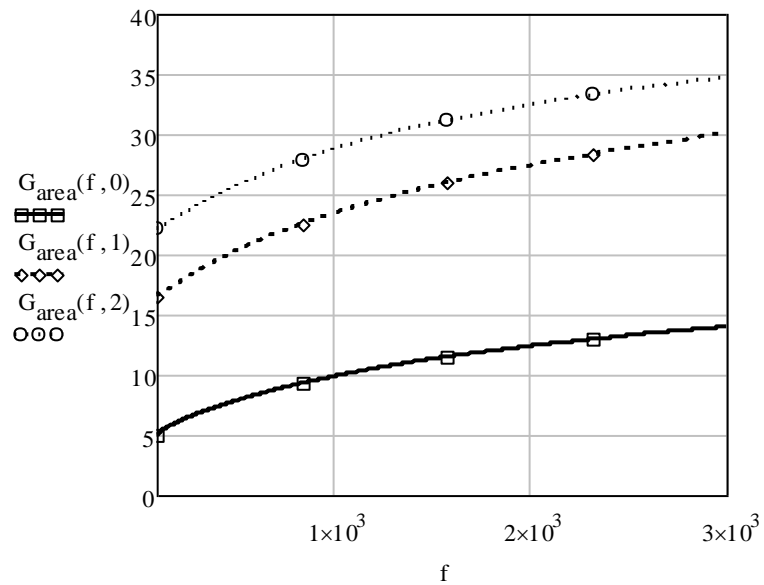
5. Okumura modelis:

Nominālie parametri:

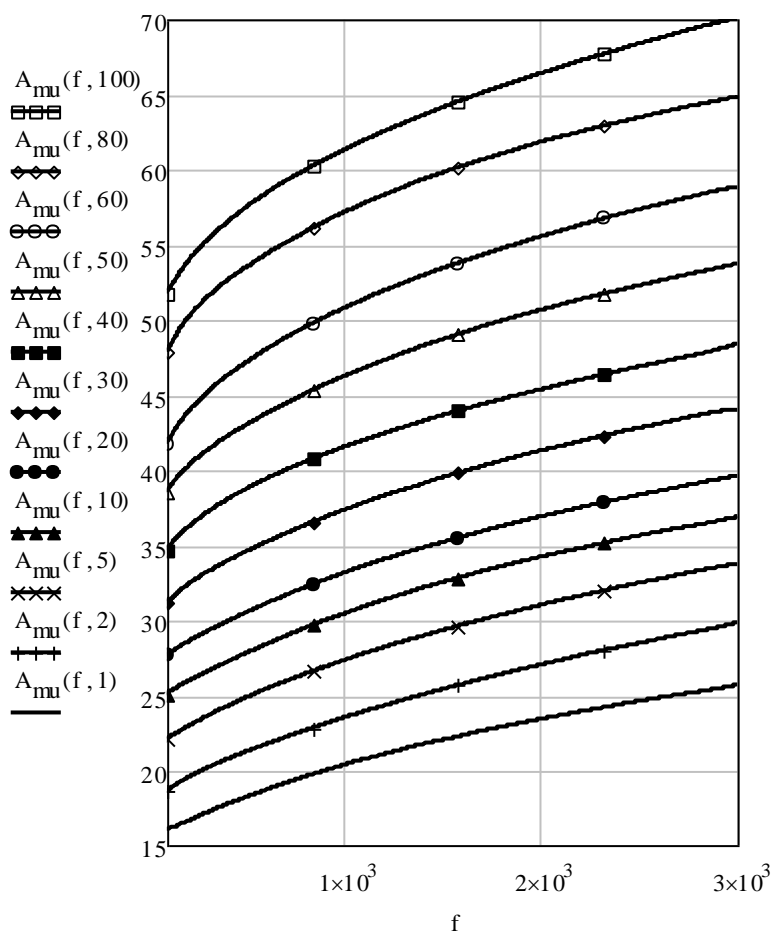
$h_{tn0} := 20$ m nominālais BTS antenas pacelšanas augstums

$h_{m0} := 3$ m nominālais MS antenas pacelšanas augstums

Signāla rimšanas korekcijas faktors atkarībā no apkārtējās vides tipa



Signāla rimšanas komponente pilsētai:



$$Hh_t := 20 \log \left(\frac{h_t}{h_{tn0}} \right) \quad \text{dB} \quad \text{BTS antenas pastiprinājuma koeficients}$$

$$Hh_r := \begin{cases} 10 \log \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right) & \text{if } h_r \leq 3 \\ 20 \log \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right) & \text{if } 3 < h_r < 10 \end{cases} \quad \text{dB} \quad \text{MS antenas pastiprinājuma koeficients}$$

$$P_{r \text{ Okump}}(f, r) := P_{r \text{ LOS}}(f, r) - A_{\mu}(f, r) + Hh_t + Hh_r + G_{\text{area}}(f, k_e) \quad \text{dBn}$$

$$r_p := (1 \ 2 \ 5 \ 10 \ 20 \ 30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 80 \ 100)^T \quad \text{kn}$$

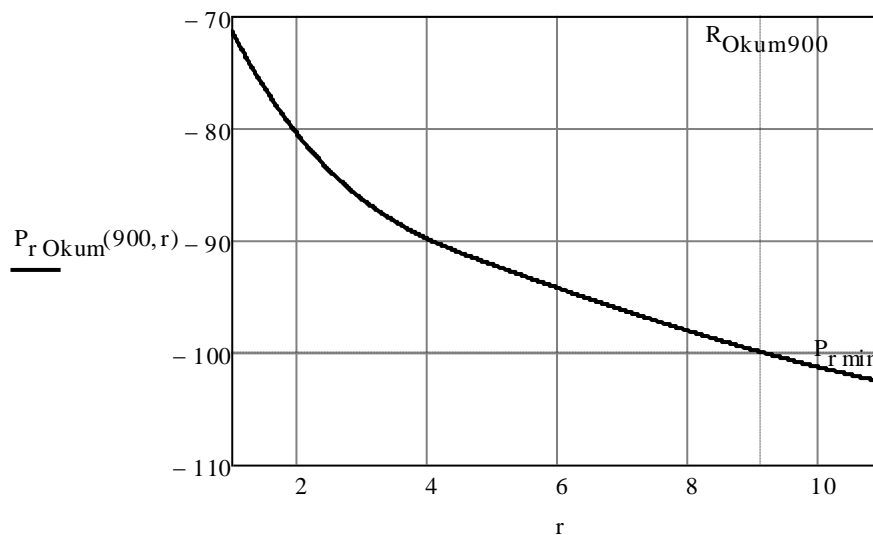
$$P_{r \text{ Okum}}(f) := \begin{cases} v \leftarrow 0 \\ \text{for } i \in 0..10 \\ v_i \leftarrow P_{r \text{ Okum}}(f, r_{p_i}) \\ v \end{cases} \quad \text{dBn}$$

$$P_{r \text{ Okum}}(f, r) := \text{interp}(\text{pspline}(r_p, P_{r \text{ Okum}}(f)), r_p, P_{r \text{ Okum}}(f), r) \quad \text{dBn}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r \text{ Okum}}(900, x) = P_{r \text{ min}}$$

$$R_{\text{Okum}900} := \text{Find}(x) = 9.143 \quad \text{kr} \quad r := 1, 1.01..11 \quad \text{kr}$$



6. Okumura-Hata modelis:

$$a(f, h_r) := \begin{cases} 8.29 \log \left(1.54 \frac{h_r}{h_0} \right)^2 - 1.1 & \text{if } 300 > f \wedge k_e > 3 \\ 3.2 \log \left(11.75 \frac{h_r}{h_0} \right)^2 - 4.97 & \text{if } 300 \leq f \wedge k_e > 3 \\ \left(1.1 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.7 \right) \cdot h_r - \left(1.56 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.8 \right) & \text{if } k_e \leq 3 \end{cases} \quad \text{dB}$$

labojuma koeficients MS antenas pacelšanas augstumam

$$K(f) := \begin{cases} 4.78 \log \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 - 18.33 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) + 40.94 & \text{if } k_e \leq 0 \\ 2 \log \left(\frac{f}{28} \right)^2 + 5.4 & \text{if } 0 < k_e \leq 2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{dB}$$

zudumu komponente atkarībā no vides

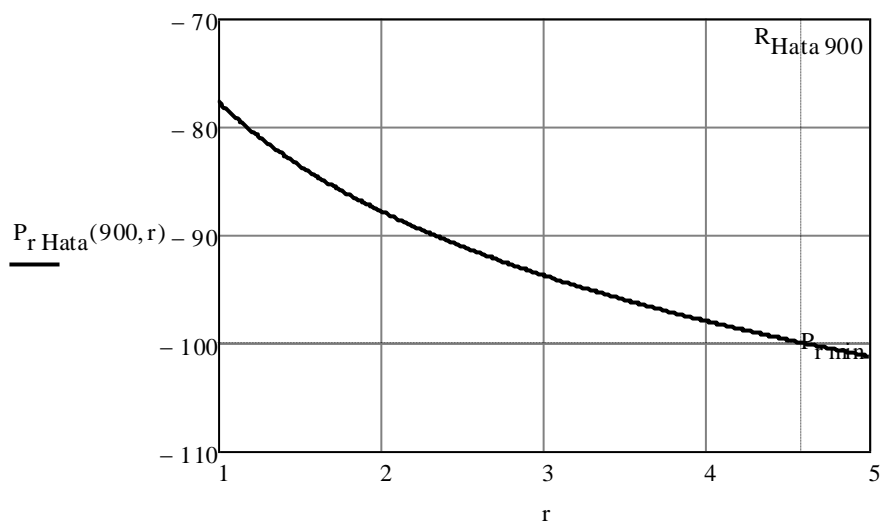
$$P_{r \text{ Hata}}(f, r) := P_t - 69.55 - 26.16 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) - \left(44.9 - 6.55 \log \left(\frac{h_t}{h_0} \right) \right) \cdot \log \left(\frac{r}{r_0} \right) \dots$$

$$+ 13.82 \log \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + a(f, h_r) + K(f) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r \text{ Hata}}(900, x) = P_{r \text{ min}}$$

$$R_{\text{Hata 900}} := \text{Find}(x) = 4.584 \quad \text{knr} \quad r := 1, 1.01..5 \quad \text{knr}$$



7. COST 231-Hata modelis:

$$A(f) := \begin{cases} 69.55 & \text{if } 150 \leq f < 1500 \\ 46.33 & \text{if } 1500 \leq f \leq 2000 \end{cases} \quad \text{dB} \quad \text{zudumu pastāvīgā komponente}$$

$$B(f) := \begin{cases} 26.16 & \text{if } 150 \leq f < 1500 \\ 33.9 & \text{if } 1500 \leq f \leq 2000 \end{cases} \quad \text{frekvences korekcijas faktors}$$

$$C(f) := \begin{cases} 3 & \text{if } k_e \geq 4 \\ 0 & \text{if } k_e < 4 \end{cases} \quad \text{dB} \quad \text{zudumu korekcijas koeficients atkarībā no apkārtējās vides}$$

$$\alpha(f, h_r) := \left(1.1 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) - 0.7 \right) \cdot h_r - \left(1.56 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) - 0.8 \right) \quad \text{dB} \quad \text{MS antenas augstuma labojuma koeficients}$$

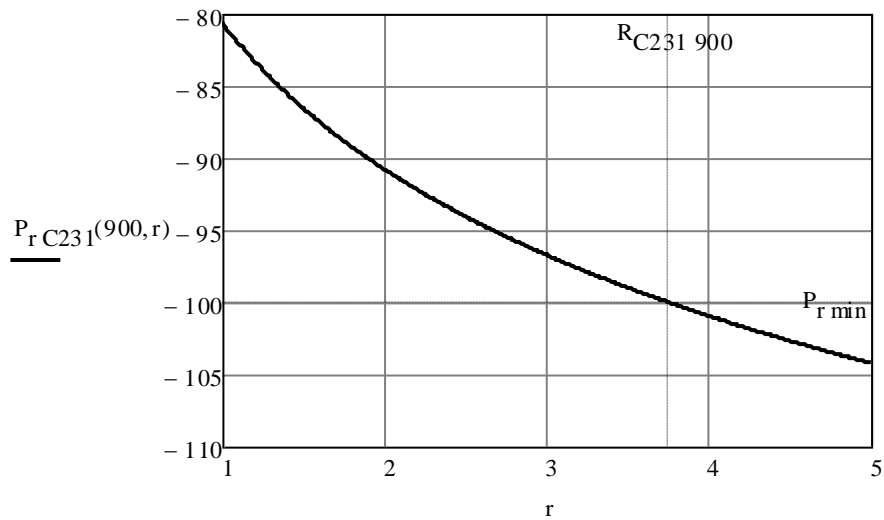
$$P_r \text{C231}(f, r) := P_t - A(f) - B(f) \cdot \log\left(\frac{f}{f_0}\right) + 13.82 \log\left(\frac{h_t}{h_0}\right) \dots \quad \text{dBm}$$

$$+ \alpha(f, h_r) - \left(44.9 - 6.55 \log\left(\frac{h_t}{h_0}\right) \right) \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - C(f)$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_r \text{C231}(900, x) = P_r \text{mii}$$

$$R_{\text{C231 900}} := \text{Find}(x) = 3.748 \quad \text{knr} \quad r := 1, 1.01..5 \quad \text{knr}$$



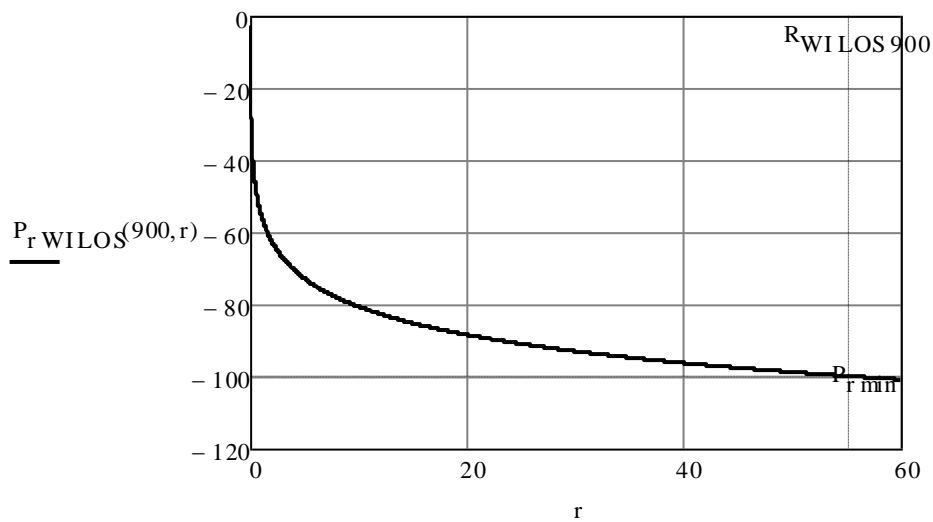
8.1. Walfisch-Ikegami LOS modelis:

$$P_{r \text{ WILOS}}(f, r) := P_t - 42.6 - 26 \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - 20 \log\left(\frac{f}{f_0}\right) \text{ dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r \text{ WILOS}}(900, x) = P_{r \text{ min}}$$

$$R_{\text{WILOS}900} := \text{Find}(x) = 55.27 \text{ km} \quad r := 0.01, 0.02, 60 \text{ km}$$



8.2. Walfisch-Ikegami NLOS modelis:

Pilsētas parametri:

$$h_B := 30 \text{ m} \quad \text{ēku vidējais augstums}$$

$$\Delta h_t := h_t - h_B = 20 \text{ m} \quad \text{BTS antenas pacelšanas augstums virs ēku jumtiem}$$

$\Delta h_r := h_B - h_r = 29$	m	attālums no MS antenas līdz ēku jumtiem
$b := 4C$	m	attālums starp pretī stāvošajām ēkām
$w := 2C$	m	ielu vidējais platums
$\phi := 9C$	°	ielas orientācijas leņķis attiecībā pret vilni

$$L_0(f, r) := -32.45 - 20 \log \left(\frac{r}{r_0} \right) - 20 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) \quad \text{dB} \quad \text{zudumi brīvajā telpā}$$

$$L_{\text{ori}} := \begin{cases} -10 + 0.354\phi & \text{if } 0 \leq \phi < 35 \\ 2.5 + 0.073\phi - 35 & \text{if } 35 \leq \phi < 55 \\ 4.0 - 0.114\phi - 55 & \text{if } 55 \leq \phi \leq 90 \end{cases} \quad \text{dB} \quad \text{zudumi orientācijas dēļ}$$

$$L_{\text{rts}}(f, r) := 16.9 + 10 \log \left(\frac{w}{w_0} \right) - 10 \log \left(\frac{f}{f_0} \right) - 20 \log \left(\frac{\Delta h_r}{h_0} \right) - L_{\text{ori}} \quad \text{dB} \quad \text{zudumi difrakcijas un izkliedes dēļ}$$

$$L_{\text{bsh}} := \begin{cases} -18 \log \left(1 + \frac{\Delta h_t}{h_0} \right) & \text{if } \Delta h_t > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{dB} \quad \text{jaudas pastiprinājums gadījumos, kad BTS antena uzstādīta virs ēku jumtiem}$$

$$k_a(r) := \begin{cases} 54 & \text{if } \Delta h_t > 0 \\ 54 - 0.8 |\Delta h_t| & \text{if } \Delta h_t \leq 0 \wedge r \geq 0.5 \\ 54 - 0.8 |\Delta h_t| \cdot 2r & \text{if } \Delta h_t \leq 0 \wedge r < 0.5 \end{cases} \quad \text{dB} \quad \text{zudumi atkarībā no attāluma starp BTS un MS un BTS antenas pacelšanas augstuma}$$

$$k_d := \begin{cases} 18 & \text{if } \Delta h_t > 0 \\ 18 - 15 \frac{|\Delta h_t|}{h_B} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{zudumu korekcijas koeficients atkarībā no attāluma starp BTS un MS}$$

$$k_f(f) := \begin{cases} -4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{if } k_e \geq 4 \\ -4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{difrakcijas zudumu koeficients atkarībā no darba frekvences vērtības}$$

$$L_{\text{msd}}(f, r) := -L_{\text{bsh}} - k_a(r) - k_d \cdot \log \left(\frac{r}{r_0} \right) - k_f(f) \cdot \log \left(\frac{f}{f_0} \right) + 9 \log \left(\frac{b}{b_0} \right) \quad \text{dB}$$

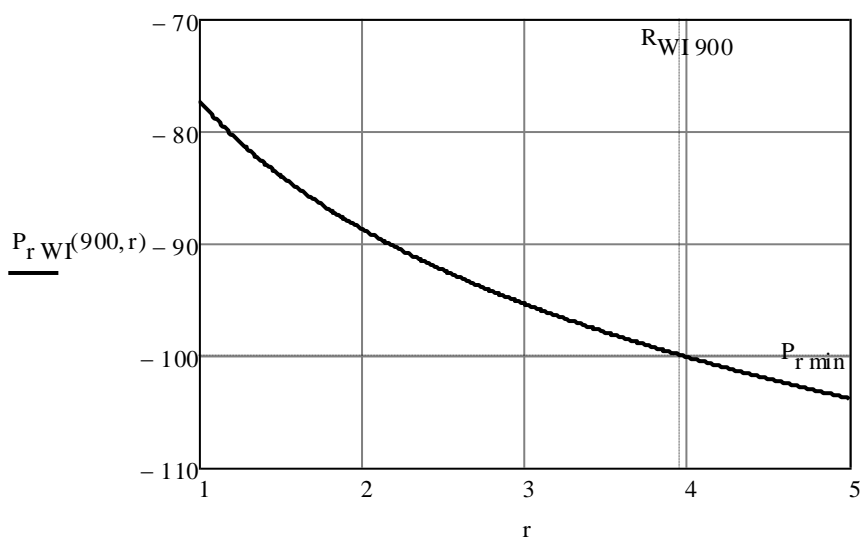
$$L_{\text{rt}}(f, r) := \begin{cases} L_0(f, r) + L_{\text{rts}}(f, r) + L_{\text{msd}}(f, r) & \text{if } L_{\text{rts}}(f, r) + L_{\text{msd}}(f, r) \leq 0 \\ L_0(f, r) & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{dB}$$

$$P_{\text{rWI}}(f, r) := P_t + L_{\text{rt}}(f, r) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{\text{rWI}}(900, x) = P_{\text{rmi}}$$

$$R_{\text{WI}900} := \text{Find}(x) = 3.962 \quad \text{km} \quad r := 1, 1.01..5 \quad \text{km}$$



9. Hata-Davidson modelis:

$$A(h_t, r) := \begin{cases} 0 & \text{if } r < 20 \\ 0.62137r - 20 \cdot \left(0.5 + 0.15 \log \left(\frac{h_t}{121.92} \right) \right) & \text{if } 20 \leq r < 300 \end{cases}$$

dB korekcijas faktori, atkarībā no attāluma starp BTS un MS

$$S_1(r) := \begin{cases} 0 & \text{if } r < 64.38 \\ 0.174r - 64.38 & \text{if } 64.38 \leq r < 300 \end{cases}$$

dB korekcijas faktors, atkarībā no BTS antenas pacenšas augstuma un attāluma starp BTS un MS

$$S_2(h_t, r) := \begin{cases} 0 & \text{if } h_t < 300 \\ 0.00784 \left| \log \left(\frac{9.98}{r} \right) \right| \cdot (h_t - 300) & \text{otherwise} \end{cases}$$

dB korekcijas faktors, atkarībā no darba frekvenču diapazona

$$S_3(f) := \frac{f}{250 \log \left(\frac{1500}{f} \right)}$$

dB korekcijas faktors, atkarībā no darba frekvenču diapazona un attāluma starp BTS un MS

$$S_4(f, r) := \begin{cases} 0 & \text{if } r < 64.38 \\ 0.112 \log \left(\frac{1500}{f} \right) \cdot (r - 64.38) & \text{otherwise} \end{cases}$$

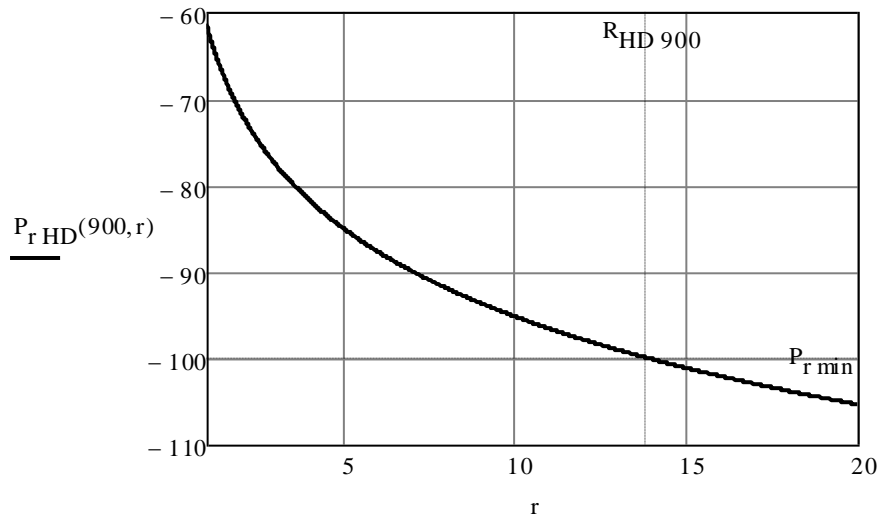
dB korekcijas faktors, atkarībā no darba frekvenču diapazona un attāluma starp BTS un MS

$$P_{rHD}(f, r) := P_{rHata}(f, r) - A(h_t, r) + S_1(r) + S_2(h_t, r) + S_3(f) + S_4(f, r) \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{rHD}(900, x) = P_{rmin}$$

$$R_{HD900} := \text{Find}(x) = 13.858 \quad \text{km} \quad r := 1, 1.01..20 \quad \text{km}$$



10. Radioviļņu izplatīšanās mežā

$$\alpha_{mF}(f) := \begin{cases} 0.185 & \text{if } f = 900 \\ 0.36 & \text{if } f = 1800 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \frac{\text{dB}}{\text{km}} \quad \text{garuma rimšanas koeficients}$$

$$\sigma(r) := 10^{0.1} \quad \text{korekcijas parametrs (virsmas viļņa ietekme)}$$

$$P_{r \text{ forest}}(f, r) := P_t + 10\log(G_t) + 10\log(G_r) - 20\log(4\pi) + 20\log\left(\frac{\lambda(f)}{\lambda_0}\right) + 10\log(\sigma(r)) - 20\log\left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0}\right) - \alpha_{mF}(f) \cdot r \cdot 10 \quad \text{dBm}$$

Šūnas maksimālā rādiusa aprēķins:

$$x := 1 \quad \text{Given} \quad P_{r \text{ forest}}(900, x) = P_{r \text{ min}}$$

$$R_{\text{forest } 900} := \text{Find}(x) = 21.515 \text{ km} \quad r := 0.01, 0.02, .50 \text{ km}$$

Mobilā sakaru tīkla parametru aprēķināšanas piemērs

Dots:

$R := 3$	km	pārklājuma zonas rādiuss
$S := 182$	km ²	apkalpošanas zonas laukums
$S/I_{dB} := 12$	dB	vidējā signāla līmeņa attiecība pret vidējo traucējumu līmeni
$n_c := 12$		radiokanālu skaits
$\langle \lambda \rangle := 10$	izs·st ⁻¹	vidējā zvanu intensitāte
$\langle T \rangle := 1$	min	vidējais sarunu ilgums
$P_{bm} := 0.01$		uzdotā kļūmes varbūtība

1. Maksimālais šūnas radiopārklājuma zonas laukums:

$$S_m := \pi \cdot R^2 = 28 \text{ km}^2$$

2. Šūnu skaits apkalpošanas zonā:

$$N_c := \text{ceil}\left(\frac{S}{S_m}\right) = 7$$

3. Līdzkanālu atkārtotības koeficients:

$$S/I := 10^{\frac{S/I_{dB}}{10}} = 15.849$$

$$n := 3$$

$$q := \sqrt[n]{S/I} + 1 = 3.512$$

4. Šūnu skaits klasterī:

$$N_{ck} := \text{floor}\left(\frac{1}{3} \cdot q^2\right) = 4$$

5. Klasteru skaits apkalpošanas zonā:

$$N_k := \text{ceil}\left(\frac{N_c}{N_{ck}}\right) = 2$$

6. Vidējā trafika intensitāte:

$$A_v := \langle \lambda \rangle \cdot \frac{\langle T \rangle}{60} = 0.167 \quad \text{E}$$

7. Kļūmes varbūtība (Erlanga B modelis):

$$P_b(A) := \frac{\frac{A^{n_c}}{n_c!}}{\sum_{n=0}^{n_c} \left(\frac{A^n}{n!}\right)}$$

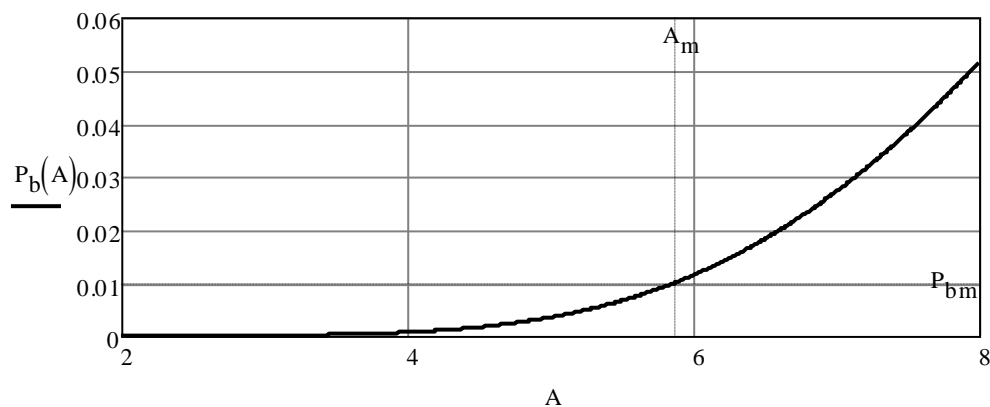
Kļūmes varbūtība pie uzdotās trafika intensitātes:

$$x := 1C \quad \text{Given} \quad P_b(x) = P_{br}$$

$$A_m := \text{Find}(x) = 5.876$$

$$A := 2,201..8$$

Maksimālās trafika intensitātes noteikšana, atkarībā no pieļaujamas atteikuma varbūtības:



8. Abonentu skaits vienā šūnā:

$$N_{ac} := \frac{A_m}{A_v} = 35.256$$

9. Abonentu skaits apkalpošanas zonā:

$$N_a := N_{ac} \cdot N_c = 246.791$$

MATHEMATICAL MODELS AND ALGORITHMS OF RADIO WAVES PROPAGATION IN CELLULAR NETWORKS OF MOBILE COMMUNICATION

V. I. Popov, V. A. Skudnov, A. S. Vasiljev
Riga Technical University, Riga, Latvia

popovs@latnet.lv; vladimir.skudnov@sotus.net; aleksejs.vasiljevs@ldz.lv

ABSTRACT

Uniform radio coverage of mobile communication network serviced areas is a challenging task, so is development of highly reliable 3G and 4G mobile communication services, it requires a great deal of attention. Mathematical modeling of radio wave propagation under the influence of environment is the main objective for the first phase of cellular network design process.

This article provides the classification of path loss mathematical models for mobile communication systems, proposes the algorithm of calculation for the received signal strength depending on the distance between the mobile and base station, environmental conditions and other wave propagation factors.

Keywords: *cellular networks of mobile communication, radio wave propagation, mathematical models and algorithms*

INTRODUCTION

Today a lot of work is being devoted to studies of radio wave propagation (RWP) in **cellular mobile communication networks (CMCN)**. These studies are proposing various methods of RWP model classification for decimeter (UHF) and centimeter (SHF) bands in CMCN.

Depending on the influence of environment, deterministic and statistical methods, as well as semi-determined, empirical and semi-empirical models are used for RWP modeling.

Determined mathematical models rely on physical laws of wave propagation. Calculations are based on one, two or multiple ray RWP models. These models take into account the obstacles in the path of radio waves and many other local factors (fig. 1), such as path loss in free space, reflection from objects, diffraction, absorption, refraction and cross-polarization of electromagnetic waves (EMW).

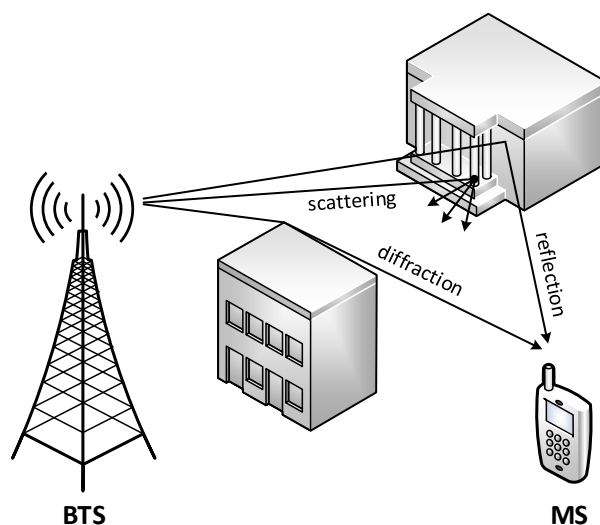


Figure 1. Obstacle Influence on the Radio Wave Propagation

Statistical mathematical models contain results of RWP experimental measurements in statistically heterogeneous path and radio signal attenuation formulas for different environments (urban, suburban, rural, metropolitan areas, forests etc.).

Semi-empirical and empirical models are based on path loss formulas, consisting of a number of empirical correction factors, which were determined from the data of experiments. Accuracy of calculated results in such case depends on the preciseness of chosen correction factor values and restrictions, defined by the original experimental conditions (frequency range, environment etc.).

It is important to point out, that results of experimental research for the real environmental conditions are often used to determine path loss of EMW propagating along the Earth's surface. Mathematical models of RWP in heterogeneous environment, as an example, have their own laws of attenuation for different surroundings and allow calculating median values of the received power depending on the distance to the receiver (considering ITU-R, CEPT recommendations). Combined methods represent a blend of deterministic and statistical models. RWP models, based on these methods, have applications in accurate measurements in specific situations.

Nowadays majority of CMCN operators are using mobile network development and monitoring software products that are based on models listed above. Sadly, imperfections of digitized maps, approximation and averaging of path loss values lead to calculation and planning errors. Improvements in model simulation accuracy have been made possible by the introduction of geographic information systems (GIS) (fig. 2) which use high-precision maps and geographical databases.

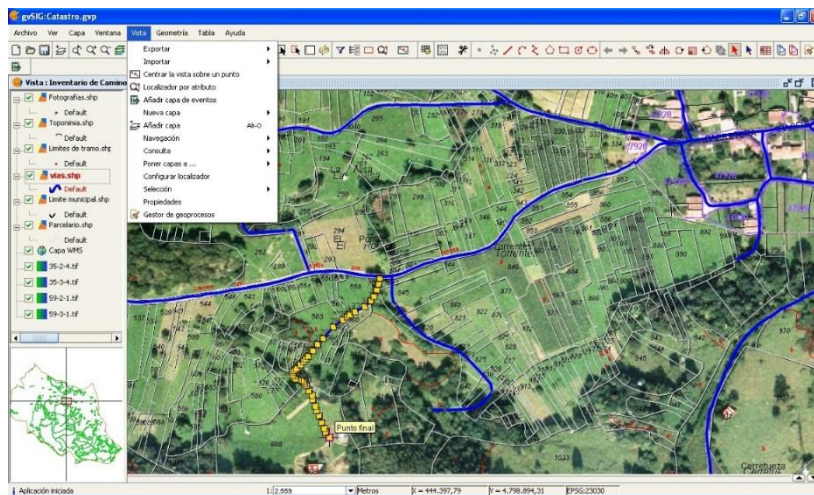


Figure 2. Example of the Geographic Information System—Open Source GIS gvSIG [5]

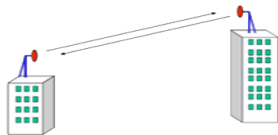
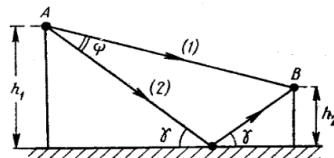
1. CLASSIFICATION OF RWP MODELS IN CMCN

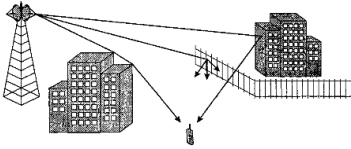


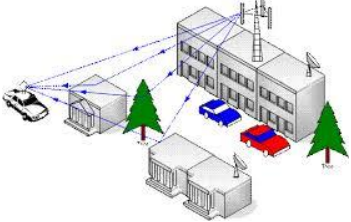
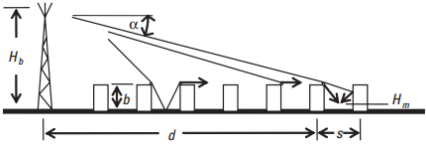
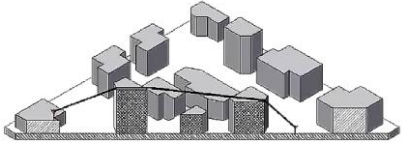
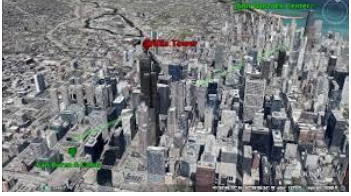
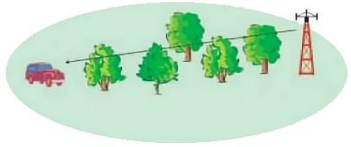
Let's take a look at the mathematical models of radio wave propagation in CMCN assuming standard conditions and propagation regimes are in place. Most characteristic regimes of a wave propagation between base transceiver station (BTS) and mobile station (MS) in the real world conditions are generalized in table 1.1 and serve as a basis for further mathematical model classification.

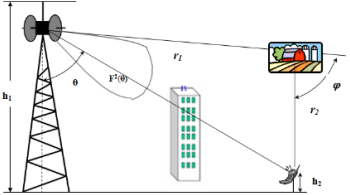
The following abbreviations are used in the table:

- R – reflection,
- EMW – electromagnetic wave,
- LOS – line-of-sight,
- NLOS – non-line-of-sight;
- D/EMW – diffraction of electromagnetic wave,
- A/EMW – attenuation of electromagnetic wave.

Table 1.1. Distinctive RWP Regimes in CMCN

No.	Conditions	RWP model, regime, cell type
1		<p>Free space</p> <p>LOS macrocell</p>
2		<p>Two-ray model</p> <p>LOS+R/EMW macrocell</p>

No.	Conditions	RWP model, regime, cell type
3		<p>Multiple ray model</p> <p>Log-distance path loss model</p> $LOS+NLOS+D/EMW+\sum R_i/EMW_i$ <p>macrocell, microcell,</p>
4		<p>Multiple ray model for urban conditions</p> <p>Lee model</p> $LOS+NLOS+\sum R_i/EMW_i$ <p>macrocell</p>
5		<p>Multiple ray model for urban conditions</p> <p>Okumura model</p> $LOS+NLOS+\sum R_i/EMW_i$ <p>microcell, microcell</p>
6		<p>Multiple ray model for urban conditions</p> <p>Okumura-Hata model</p> $LOS+NLOS+\sum R_i/EMW_i$ <p>microcell, picocell</p>
7		<p>Multiple ray model for urban conditions</p> <p>COST 231-Hata model</p> $LOS+NLOS+\sum R_i/EMW_i$ <p>microcell, picocell</p>
8		<p>Multiple ray model for urban conditions</p> <p>Walfish-Ikegami model</p> $LOS+NLOS+\sum D_i/EMW_i$ <p>macrocell, microcell, picocell</p>
9		<p>Multiple ray model for urban conditions</p> <p>Hata-Davidson model</p> $LOS+NLOS+\sum R_i/EMW_i$ <p>microcell, picocell</p>
10		<p>Radio wave propagation through the forest</p> <p>Semi-deterministic model</p> $LOS_1+A/LOS_F+Lateral/EMW+LOS_2$ <p>microcell, picocell</p>

No.	Conditions	RWP model, regime, cell type
11		<p style="text-align: center;">Radio wave propagation in free space with the reflection from the forest</p> <p style="text-align: center;">Deterministic model NLOS+ΣR_i/EMW_i microcell, picocell</p>

This paper, as it follows from the table 1.1, examines 11 path loss mathematical models, which represent the approximation of the received signal strength in relationship to the distance between BTS and MS, taking into account environment conditions, transmitter and receiver antennas parameters. The determining of received signal strength for an array of distances allows finding the maximum radius of BTS cell coverage area R_{max} (fig. 1.1) for a downlink transmission when P_r is equal to the MS receiver sensitivity $P_{r min}$, which is one of the main tasks in mobile cellular network area coverage planning.

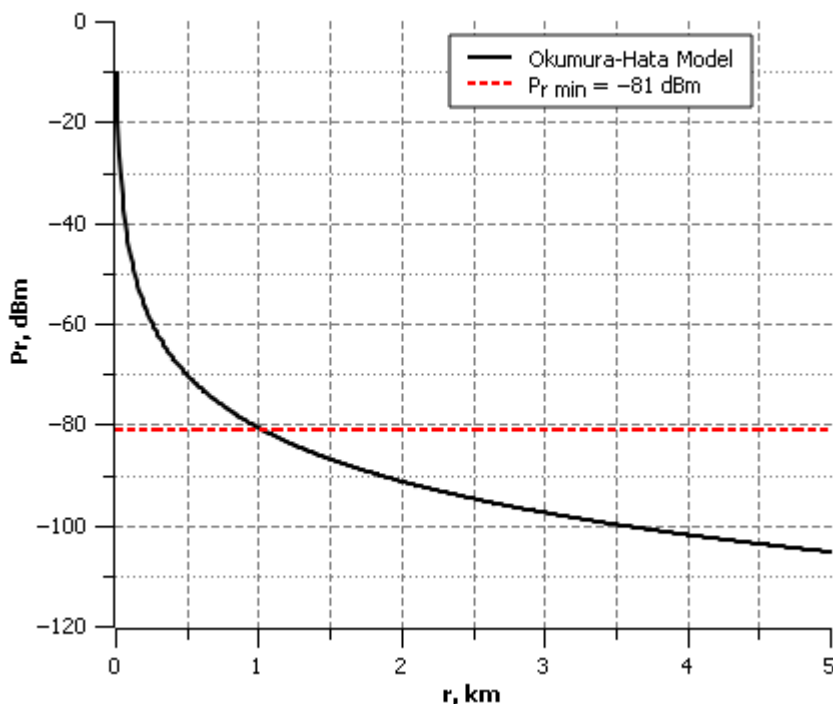


Figure 1.1. Finding Cell Tower Maximum Coverage Radius Using Okumura-Hata Model
($P_{r min} = -81$ dBm, $R_{max} = 1.021$ km) [2]

2. RWP MODELS IN CMCN

Mathematical models, which determine the power of harmonic electromagnetic wave (EMW) radiated by BTS antenna and received by MS, are shown in the table 2.1 with the following set of parameters:

- P_t – BTS transmitter power, dBm;
- f – operational frequency, MHz;
- λ – operational wavelength, m;

- G_t, G_r – BTS, MS antenna gain;
- h_t, h_r —BTS, MS antenna height, m;
- r – distance between BTS transmitter and MS receiver, km;
- f_0 – norming frequency, $f_0 = 1$ MHz;
- λ_0 – norming wavelength, $\lambda_0 = 1$ m;
- h_0 – norming height, $h_0 = 1$ m;
- r_0 – norming distance between BTS and MS, $r_0 = 1$ km.

Table 2.1. RWP Mathematical Models

No.	Model	Formulas								
1	Line-of-sight <i>LOS</i>	$P_{r\ LOS} = P_t + 10 \lg G_t + 10 \lg G_r - 20 \lg(4\pi) + 20 \lg \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right) - 20 \lg \left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0} \right) < 0,$ <p>where $P_{r\ LOS}$ – received signal strength in free space (LOS) environment, dBm;</p>								
2	Two-ray model <i>LOS₁ + R₂/EMW</i>	$P_r = P_{r\ LOS} + 10 \lg \psi, \text{ dBm}$ $\psi \approx 1 + R^2 + 2R \cdot \cos \left(\varphi + 4\pi \cdot \frac{h_t \cdot h_r}{\lambda \cdot r \cdot 10^3} \right),$ $0.8r > r > 18 \frac{h_t h_r}{\lambda},$ $P_r \approx P_t + 10 \lg G_t + 10 \lg G_r + 20 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + 20 \lg \left(\frac{h_r}{h_0} \right) - 40 \lg \left(\frac{r \cdot 10^3}{r_0} \right), \text{ dBm}$ <p>where ψ – value determined as a function of Earth's surface parameters; R – coefficient of reflection, $R \leq 1$; φ – reflection angle, usually $\varphi = 3.142$ rad;</p>								
3	Log-distance path loss model <i>LOS + NLOS + D/ EMW + ΣR_i/ EMW_i</i>	$P_r = P_{r\ LOS} - 10 \cdot n \cdot \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - (\pm X_g), \text{ dBm}$ <p>where n – attenuation exponent (table 2.2); X_g – random value for normal (Gaussian) distribution with a zero mean, representing signal attenuation condition, which was caused by its fading (in case of no fading $X_g = 0$);</p> <p style="text-align: center;">Table 2.2.</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Environment</th> <th>Attenuation exponent n</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Free space (LOS)</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>Suburban area (LOS/NLOS)</td> <td>2.7–3.5</td> </tr> <tr> <td>Urban area (NLOS)</td> <td>3–5</td> </tr> </tbody> </table>	Environment	Attenuation exponent n	Free space (LOS)	2	Suburban area (LOS/NLOS)	2.7–3.5	Urban area (NLOS)	3–5
Environment	Attenuation exponent n									
Free space (LOS)	2									
Suburban area (LOS/NLOS)	2.7–3.5									
Urban area (NLOS)	3–5									
4	Lee model <i>LOS + ΣR_i/EMW_i</i>	$P_r = P_{r0} - 10\gamma \cdot \lg \left(\frac{r}{r_{n0}} \right) - 10n \cdot \lg \left(\frac{f}{f_{n0}} \right) + 10 \lg(\alpha_0), \text{ dBm}$								

$$\alpha_0 = \left(\frac{h_t}{h_{m0}} \right)^2 \cdot \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right)^v \cdot \left(\frac{P_{tmW} \cdot 10^3}{P_{m0}} \right) \cdot \frac{G_t \cdot G_r}{4}, \text{ dBm}$$

$$v = \begin{cases} 2, & \text{if } h_r > 10 \text{ m} \\ 1, & \text{if } h_r < 3 \text{ m} \end{cases}$$

where P_r – median power level at the receiving point for point-to-point RWP, dBm;
 α_0 – adjustment factor, dB;
 P_{tmW} – BTS transmitter power, mW;
 P_{r0} – power at the r_{n0} point (table 2.3), dBm;
 γ – path loss correction due to distance (table 2.3);
 n – frequency correction factor, recommended values are given in table 2.4, $2 \leq n \leq 3$;
 v – MS antenna height correction factor;
 f_{n0} – nominal frequency, $f_{n0} = 900 \text{ MHz}$;
 P_{m0} – nominal BTS transmitter power, $P_{m0} = 10 \text{ W}$;
 h_{m0} – nominal BTS antenna height, $h_{m0} = 30.48 \text{ m}$;
 h_{rn0} – nominal MS antenna height, $h_{rn0} = 3 \text{ m}$;
 r_{n0} – nominal distance between BTS and MS, $r_{n0} = 1.6 \text{ km}$;

Table 2.3.

Environment	P_{r0} , dBm	β
Free space	-45	2
Rural area	-49	4.35
Suburban area	-61.7	3.84
Urban area	-70	3.68
Metropolitan center	-84	3.05

Table 2.4.

Environment, Frequency f	n
Open, rural, suburban area f < 450 MHz	2
Urban, metropolitan area f > 450 MHz	3

5

Okumura model
 $LOS + \Sigma R_i / EMW_i$

Limitations:
frequency range $f = 150-1920 \text{ MHz}$;
BTS antenna height $h_t = 30-1000 \text{ m}$;
MS antenna height $h_r = 1-10 \text{ m}$;
distance between BTS and MS $r = 1-100 \text{ km}$;

$$L_{rt} = L_{rt\text{ LOS}} - A_{mu}(f, r) + H(h_t) + H(h_r) + G_{area}, \text{ dB}$$

$$P_r = P_r\text{ LOS} - A_{mu}(f, r) + H(h_t) + H(h_r) + G_{area}, \text{ dBm}$$

$$H(h_t) = 20 \lg \left(\frac{h_t}{h_{tn0}} \right), \text{ dB}$$

$$H(h_r) = \begin{cases} 10 \lg \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right), & \text{если } h_r \leq 3 \text{ м} \\ 20 \lg \left(\frac{h_r}{h_{rn0}} \right), & \text{если } 3 < h_r < 10 \text{ м} \end{cases}, \text{ dB}$$

where L_{rt} – path attenuation, dB;

$A_{mu}(f, r)$ – median attenuation relative to free space (determined from the chart 2.1), dB;

$G(h_t)$ – BTS antenna gain factor, dB;

$G(h_r)$ – MS antenna gain factor, dB;

h_{tn0} – nominal BTS antenna height, $h_{tn0} = 200 \text{ m}$;

h_{rn0} – nominal MS antenna height, $h_{rn0} = 3 \text{ m}$;

G_{area} – gain correction factor depending on the environment (fig. 2.2), dB;

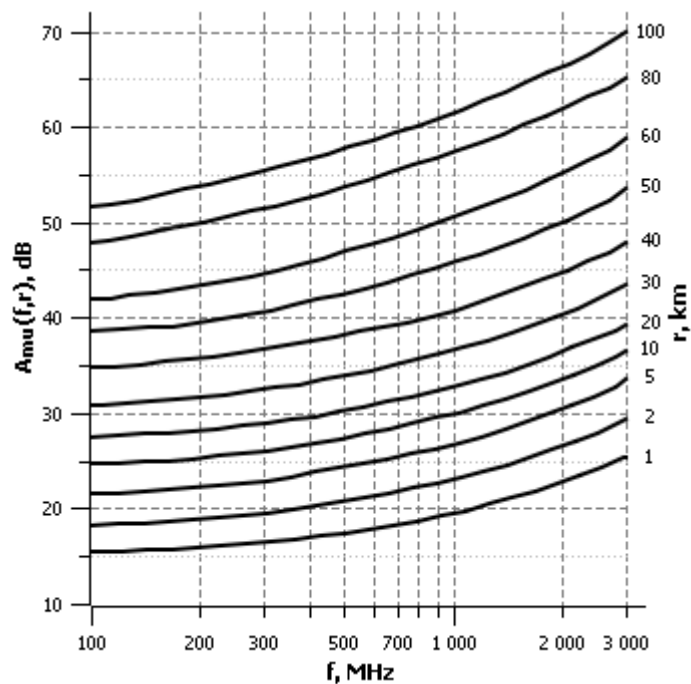


Figure 2.1. Attenuation Factor For Urban Areas

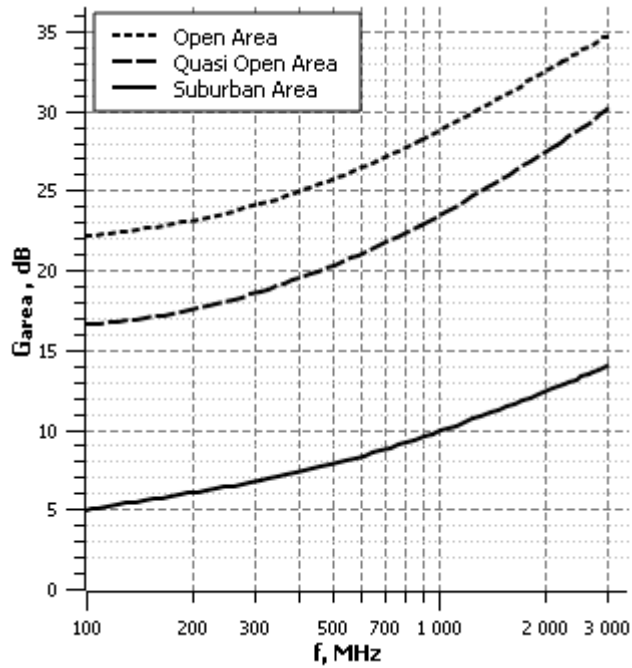


Figure 2.2. Gain Correction Factor

Limitations:

frequency range $f = 150-1500$ MHz;

BTS antenna height $h_t = 30-200$ m;

MS antenna height $h_r = 1-10$ m;

distance between BTS and MS $r = 1-20$ km;

$$P_{r \text{ Hata}} = P_t - 69.55 - 26.16 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - \left(44.9 - 6.55 \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right)\right) \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) + 13.82 \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right) + a(f, h_r) + K(f)$$

where $a(f, h_r)$ – correction factor for MS antenna height (table 2.5), dB;

K – correction factor that depends upon the environment (table 2.6), dB;

6

Okumura-Hata model
 $LOS + \Sigma R_i / EMW_i$

Table 2.5.

Environment	$a(f, h_r)$, dB
Open, suburban, urban area	$\left(1.1 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - 0.7\right) \cdot h_r - \left(1.56 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - 0.8\right)$
Metropolitan area, $f < 300$ MHz	$8.29 \left[\lg\left(1.54 \frac{h_r}{h_{r0}}\right) \right]^2 - 1.1$
Metropolitan area, $f \geq 300$ MHz	$3.2 \left[\lg\left(11.75 \frac{h_r}{h_{r0}}\right) \right]^2 - 4.97$

Table 2.6.

		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Environment</th> <th>K(f), dB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Open area</td> <td>$4.78 \left[\lg \left(\frac{f}{f_0} \right) \right]^2 - 18.33 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 40.94$</td> </tr> <tr> <td>Suburban area</td> <td>$2 \left[\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 + 5.4$</td> </tr> <tr> <td>Urban, metropolitan area</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Environment	K(f), dB	Open area	$4.78 \left[\lg \left(\frac{f}{f_0} \right) \right]^2 - 18.33 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 40.94$	Suburban area	$2 \left[\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 + 5.4$	Urban, metropolitan area	0							
Environment	K(f), dB																
Open area	$4.78 \left[\lg \left(\frac{f}{f_0} \right) \right]^2 - 18.33 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 40.94$																
Suburban area	$2 \left[\lg \left(\frac{f}{28} \right) \right]^2 + 5.4$																
Urban, metropolitan area	0																
7	<p>COST 231-Hata model $LOS + \Sigma R_i / EMW_i$</p>	<p>Limitations: frequency range $f = 150-2000$ MHz; BTS antenna height $h_t = 30-200$ m; MS antenna height $h_r = 1-10$ m; distance between BTS and MS $r = 1-20$ km;</p> $P_r = P_t - A - B \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) + 13.82 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + a(f, h_r) -$ $- \left[44.9 - 6.55 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) \right] \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) - C, \text{ dBm}$ $\alpha(f, h_r) = \left(1.1 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.7 \right) \cdot h_r - \left(1.56 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - 0.8 \right), \text{ dB}$ <p>where A – attenuation component (table 2.7), dB; B – frequency correction factor (table 2.7); $a(f, h_r)$ – correction factor for MS antenna height, dB; C – attenuation correction factor, depends on the environment (table 2.8), dB;</p> <p style="text-align: center;">Table 2.7.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Frequency range f, MHz</th> <th>A, dB</th> <th>B</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>$150 \leq f < 1500$</td> <td>69.55</td> <td>26.16</td> </tr> <tr> <td>$1500 \leq f \leq 2000$</td> <td>46.33</td> <td>33.9</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Table 2.8.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Environment</th> <th>C, dB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Open, suburban, urban area</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Metropolitan area</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table>	Frequency range f, MHz	A, dB	B	$150 \leq f < 1500$	69.55	26.16	$1500 \leq f \leq 2000$	46.33	33.9	Environment	C, dB	Open, suburban, urban area	0	Metropolitan area	3
Frequency range f, MHz	A, dB	B															
$150 \leq f < 1500$	69.55	26.16															
$1500 \leq f \leq 2000$	46.33	33.9															
Environment	C, dB																
Open, suburban, urban area	0																
Metropolitan area	3																
8	<p>Walfisch-Ikegami model $LOS/NLOS + \Sigma D_i / EMW_i$</p>	<p>Limitations: frequency range $f = 800-2000$ MHz; BTS antenna height $h_t = 4-50$ m; MS antenna height $h_r = 1-3$ m; distance between BTS and MS $r = 0.02-5$ km;</p>															

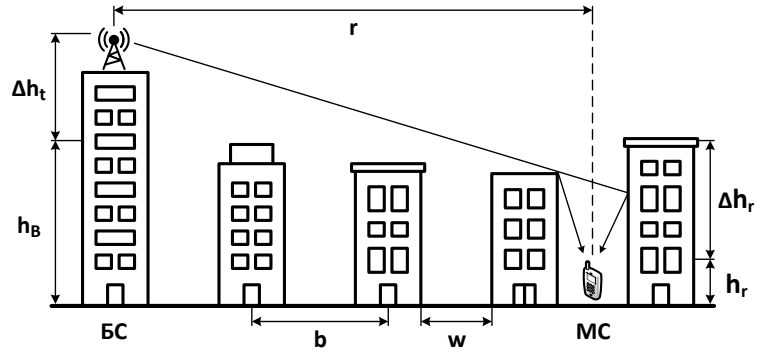


Figure 2.3. Definition of the Urban Parameters

$$L_{rt} = \begin{cases} L_0 + L_{rts} + L_{mds}, & \text{if } L_{rts} + L_{mds} \leq 0 \text{ dB} \\ L_0, & \text{if } L_{rts} + L_{mds} > 0 \text{ dB} \end{cases} < 0, \text{ dB}$$

$$L_{LOS} = -42.6 - 26 \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - 20 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right), \text{ dB}$$

$$L_0 = -32.45 - 20 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - 20 \lg\left(\frac{r}{r_0}\right), \text{ dB}$$

$$L_{rts} = 16.9 + 10 \lg\left(\frac{w}{w_0}\right) - 10 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) - 20 \lg\left(\frac{\Delta h_r}{h_0}\right) - L_{ori}, \text{ dB}$$

$$L_{msd} = -L_{bsh} - k_a - k_d \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - k_f \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) + 9 \lg\left(\frac{b}{b_0}\right), \text{ dB}$$

$$P_{rLOS} = P_r + L_{LOS} = P_t - 42.6 - 26 \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - 20 \lg\left(\frac{f}{f_0}\right), \text{ dBm}$$

$$P_{rNLOS} = P_t + L_{rt}, \text{ dBm}$$

where P_{rLOS} – received signal strength in line-of-sight (LOS) environment, dBm;

P_{rNLOS} – received signal strength in non-line-of-sight environment, dBm;

L_{rt} – path loss, dB;

L_{LOS} – path loss for free space (LOS) environment, dB;

L_{fs} – free space loss, dB;

L_{rts} – diffraction and scatter loss, dB;

L_{mds} – multiscreen diffraction loss, dB;

L_{ori} – orientation loss (table 2.9), dB;

L_{bsh} – shadowing gain due to BTS antenna location (table 2.10), dB;

b – average building separation, m;

w – average street width, usually $w = 0.5b$ m;

h_B – average building height, m;

Δh_t – BTS antenna height above the rooftops, $\Delta h_t = h_t - h_B$, m;

Δh_r – distance between MS antenna and rooftops, $\Delta h_r = h_B - h_r$, m;

φ – road orientation with respect to the direct radio path, usually $\varphi = 90^\circ$ (worst case);

k_a – correction factor (table 2.10), dB;
 k_d – distance factor (table 2.10);
 k_f – frequency factor (table 2.11).

Table 2.9.

Street orientation angle φ , °	L_{ori} , dB
$0 \leq \varphi < 35$	$-10 + 0.354\varphi$
$35 \leq \varphi < 55$	$2.5 + 0.075(\varphi - 35)$
$55 \leq \varphi < 90$	$4 - 0.114(\varphi - 55)$

Table 2.10.

Height Δh_t , m; distance r , km	L_{bsh} , dB	k_a	k_d
$\Delta h_t > 0$	$-181\lg(1 + \Delta h_t)$	54	18
$\Delta h_t \leq 0, r \geq 0.5$	0	$54 - 0.8 \cdot \Delta h_t$	$18 - 15 \frac{\Delta h_t}{h_B}$
$\Delta h_t \leq 0, r < 0.5$		$54 - 0.8 \cdot \Delta h_t \cdot 2r$	

Table 2.11.

Environment	k_f
Suburban, urban area	$-4 + 0.7 \left(\frac{f}{925} - 1 \right)$
Metropolitan area	$-4 + 1.5 \left(\frac{f}{925} - 1 \right)$

Limitations:
frequency range $f = 150-1500$ MHz;
BTS antenna height $h_t = 30-2500$ m;
MS antenna height $h_r = 1-10$ m;
distance between BTS and MS $r = 1-300$ km;

$$P_r = P_{r \text{ Hata}} - A(h_t, r) + S_1(r) + S_2(h_t, r) + S_3(f) + S_4(f, r), \text{ dBm}$$

$$P_{r \text{ Hata}} = P_t - 69.55 - 26.16 \lg \left(\frac{f}{f_0} \right) - \left(44.9 - 6.55 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) \right) \lg \left(\frac{r}{r_0} \right) +$$

$$+ 13.82 \lg \left(\frac{h_t}{h_0} \right) + a(f, h_r) + K(f)$$

$$S_2(h_t, r) = \begin{cases} 0.00784 \cdot \left| \lg \left(\frac{9.98}{r} \right) \right| \cdot (h_t - 300) & \text{if } h_t \geq 300 \text{ m} \\ 0 & \text{if } h_t < 300 \text{ m} \end{cases}$$

Hata-Davidson
model
 $LOS + \Sigma R_i /$
 EMW_i

9

		$S_3(f) = \frac{f}{250 \lg\left(\frac{1500}{f}\right)}$ <p>where $P_{r\ HATA}$ – received signal strength for Okumura-Hata model, dBm; $A(h_t, r)$, $S_1(r)$ – distance correction factor (table 2.12), dB; $S_2(h_t, r)$ – BTS antenna height correction factor, dB; $S_3(f)$ – frequency correction factor, dB; $S_4(f, r)$ – frequency and distance correction factor (table 2.13), dB.</p> <p style="text-align: center;">Table 2.12.</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Distance r, km</th> <th>A(h_t, r), dB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>r < 20</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>20 ≤ r < 300</td> <td>$0.62137 \cdot (r - 20) \cdot \left[0.5 + 0.15 \lg\left(\frac{h_t}{121.92}\right) \right]$</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">Table 2.13.</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Distance r, km</th> <th>S₁(r), dB</th> <th>S₄(f, r), dB</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>r < 64.38</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>64.38 ≤ r < 300</td> <td>$0.174 \cdot (r - 64.38)$</td> <td>$0.112 \lg\left(\frac{1500}{f}\right) \cdot (r - 64.38)$</td> </tr> </tbody> </table>	Distance r, km	A(h _t , r), dB	r < 20	0	20 ≤ r < 300	$0.62137 \cdot (r - 20) \cdot \left[0.5 + 0.15 \lg\left(\frac{h_t}{121.92}\right) \right]$	Distance r, km	S ₁ (r), dB	S ₄ (f, r), dB	r < 64.38	0	0	64.38 ≤ r < 300	$0.174 \cdot (r - 64.38)$	$0.112 \lg\left(\frac{1500}{f}\right) \cdot (r - 64.38)$
Distance r, km	A(h _t , r), dB																
r < 20	0																
20 ≤ r < 300	$0.62137 \cdot (r - 20) \cdot \left[0.5 + 0.15 \lg\left(\frac{h_t}{121.92}\right) \right]$																
Distance r, km	S ₁ (r), dB	S ₄ (f, r), dB															
r < 64.38	0	0															
64.38 ≤ r < 300	$0.174 \cdot (r - 64.38)$	$0.112 \lg\left(\frac{1500}{f}\right) \cdot (r - 64.38)$															
10	RWP through the forest [1, 17] $LOS_1 + A/LOS_F + Lateral/EMW + LOS_2$	$P_r \approx P_t LOS - \alpha_{mF} \cdot r + 10 \lg[\zeta(r)],$ <p>где α_{mF} – path attenuation factor (table 2.14), dB/m; $\zeta(r)$ – correction factor (table 2.14);</p> <p style="text-align: center;">Table 2.14.</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>Operational frequency f, MHz</th> <th>α_{mF}, dB/m</th> <th>$\zeta(r)$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>900</td> <td>0.185</td> <td rowspan="2" style="text-align: center; vertical-align: middle;">$10^{0.1}$</td> </tr> <tr> <td>1800</td> <td>0.36</td> </tr> </tbody> </table>	Operational frequency f, MHz	α_{mF} , dB/m	$\zeta(r)$	900	0.185	$10^{0.1}$	1800	0.36							
Operational frequency f, MHz	α_{mF} , dB/m	$\zeta(r)$															
900	0.185	$10^{0.1}$															
1800	0.36																
11	RWP in free space with the reflection from the forest [17] $NLOS + \Sigma R_i / EMW_i$	$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2}{(4\pi)^2} \int_{V_F} \frac{F_t(\theta)^2 \cdot \sigma(\varphi)}{r_1^2 \cdot r_2^2 \cdot V_0} dV, W$ <p>where $F_t(\theta)$ – BTS antenna radiation pattern, $F_t(\theta) = 1$ for omnidirectional antennas; V_F – volume of the forest, m³; V_0 – norming volume, $V_0 = 1$ m³; φ – angle between the direction of the main wave and its reflection from the forest, °; $\sigma(\varphi)$ – effective scattering area of a volume unit, m²;</p>															

		r_1 – distance between BTS and forest, km; r_2 – distance between forest and MS, km;
--	--	---

3. RWP CALCULATION ALGORITHM

RWP numerical calculation algorithm, based on the examined mathematical models, is shown in figure 3.1. The values of received signal strength for every model are found by using formulas from table 2.1 with appropriate standard BTS and MS parameters.

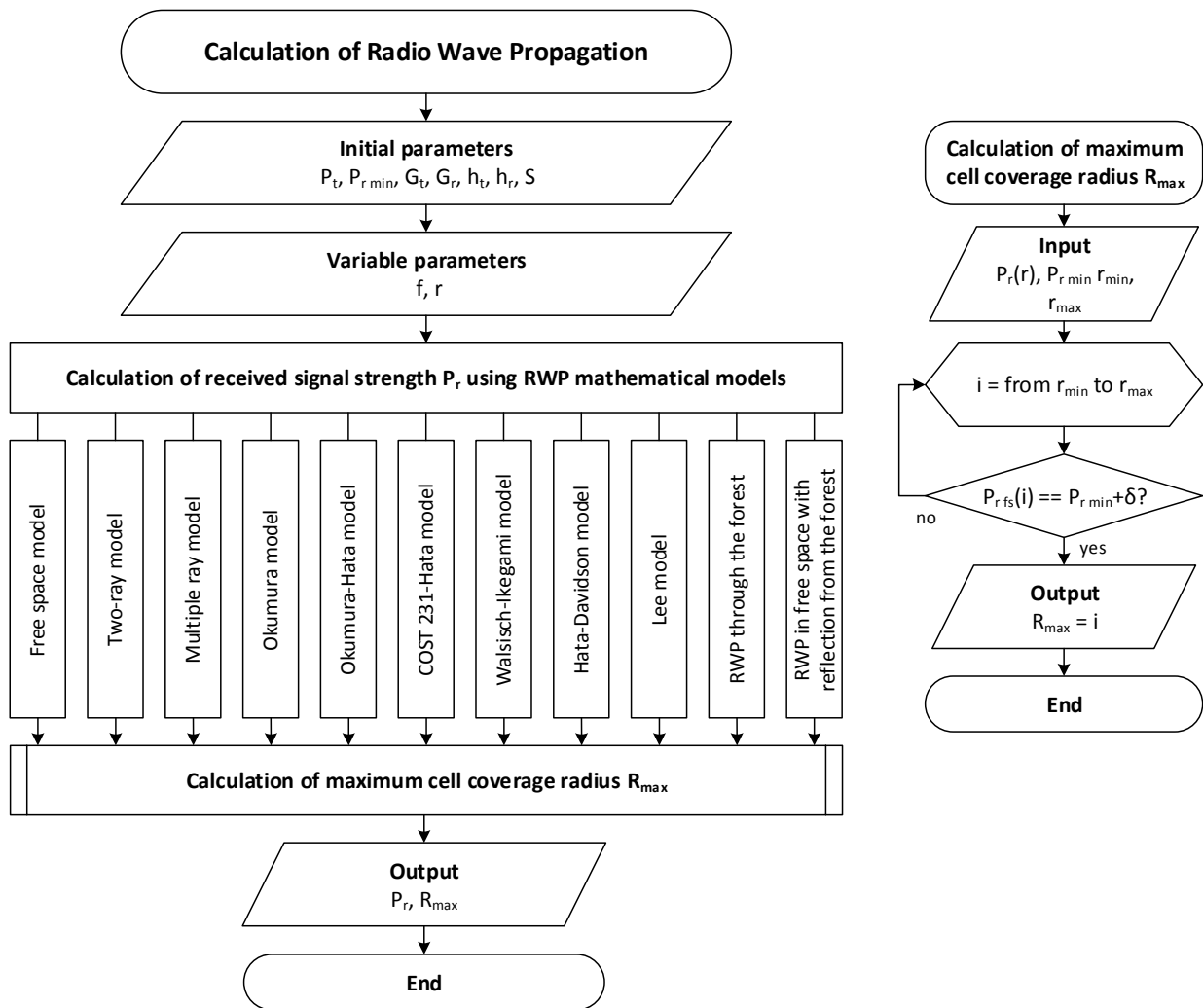


Figure 3.1. Algorithm for RWP Calculation Using Mathematical Models and Standard BTS and MS parameters

As it follows from the right part of the flowchart (fig. 3.1), maximum radius of BTS radio coverage area R_{max} depends on the values of MS receiver sensitivity $P_{r\ min}$ and received signal strength $P_r(r)$ for corresponding RWP model.

Example of the R_{max} numerical calculation using the proposed algorithm (fig. 3.1)

To estimate the influence of environment on the received signal strength (for downlink transmission), calculations of proposed algorithm were made using Mathcad engineering software. Comparison of the results, visible in figure 3.2, are true for the following parameters:

- BTS transmitter power: $P_t = 50 \text{ W}$ (47 dBm);
- Operational frequency: $f = 900 \text{ MHz}$ ($\lambda = 0.33 \text{ m}$);
- BTS, MS antenna gain: $G_t = 10$, $G_r = 1$.

Environmental conditions, specific for every mathematical model (table 2.1), were also taken into account.

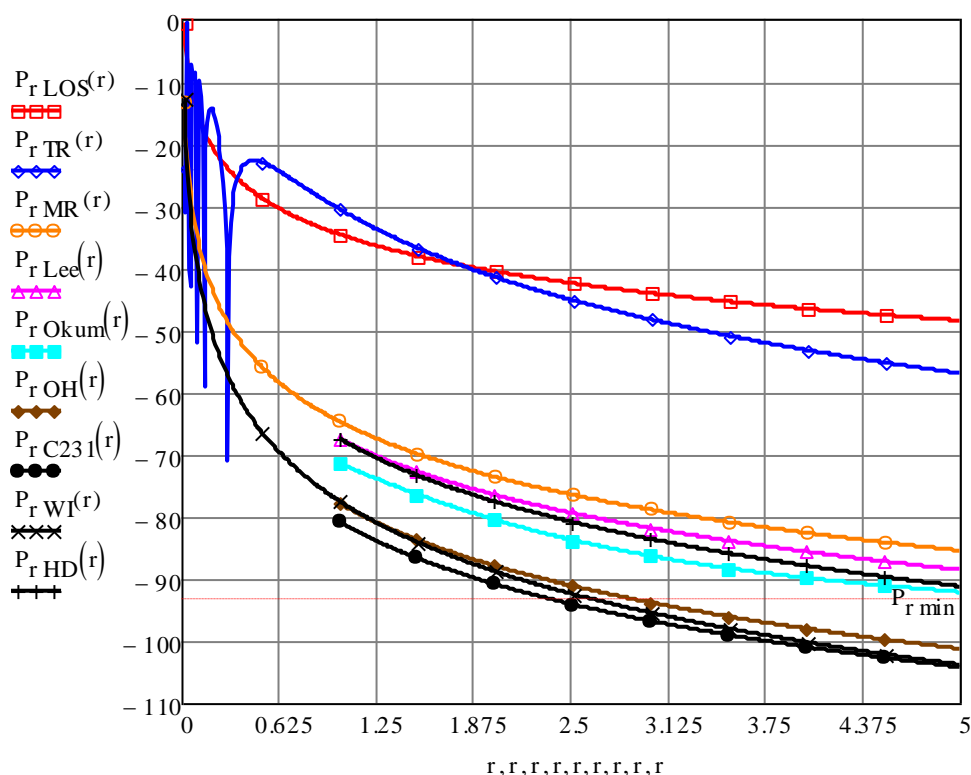


Figure 3.2. Comparison of the Received Signal Strength for 9 RWP models

Received signal strength is heavily dependent from wave propagation conditions, and it changes drastically with an increase in distance between BTS and MS (as it is shown in graph 3.2). For example, when distance $r = 3 \text{ km}$, signal strength $P_r = -44 \text{ dBm}$ for the LOS model, but in dense urban area conditions (Walfisch-Ikegami model) — $P_r = -95 \text{ dBm}$. The stability of the radio communication link depends on the MS receiver sensitivity level ($P_{r \min}$). If $P_{r \min} = -93 \text{ dBm}$ and the real path loss is equal to the calculated one (using Walfisch-Ikegami model), then signal from BTS couldn't be received by MS at 3 km distance already.

Experimentally gathered RWP data for Philadelphia, New York and Tokyo are shown in graph 3.3 to compare the real signal attenuation slopes with the calculated results (fig. 3.2).

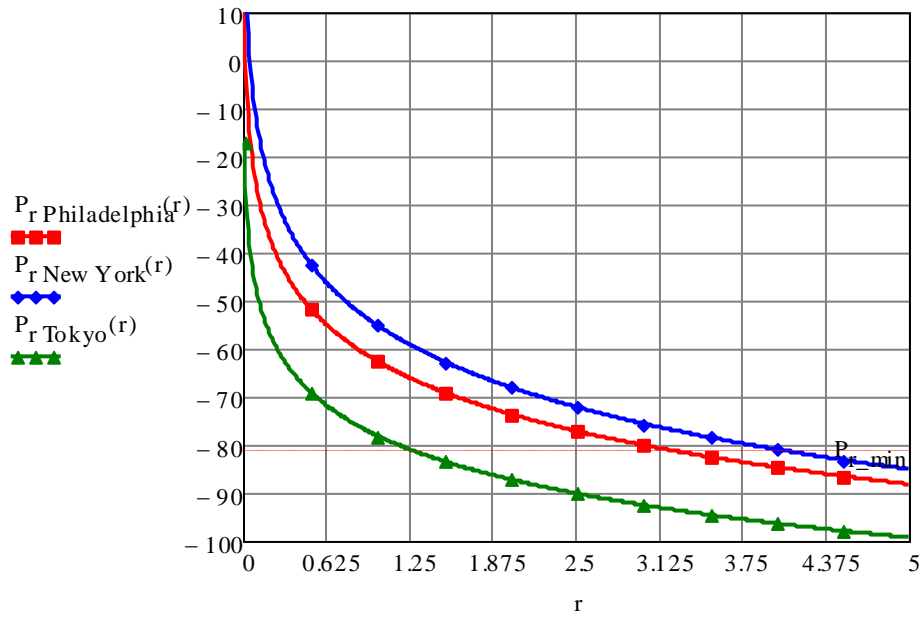


Figure 3.3. Received Signal Strength Relation to the Distance between BTS and MS (r , km) for Selected Urban Areas [11]

As it can be seen in figure 3.3, Lee model is most suitable for environmental conditions in Philadelphia, while COST 231-Hata model gives the best results for Tokyo.

Maximum cell coverage radiuses of calculated path loss models for two different MS receiver sensitivity settings ($P_{r\ min} = [-81; -100]$ dBm) are visible in the table 3.1.

Table 3.1. Maximum Cell Coverage Radius R_{\max} for Given MS Receiver Sensitivity $P_{r\ min}$

RWP model	R_{\max} , km	
	$P_{r\ min} = -81$ dBm	$P_{r\ min} = -100$ dBm
Free space model	210.253	1873.883
Two-ray model	19.911	59.452
Multiple ray model	3.536	15.202
Lee model	2.818	11.827
Okumura model	2.077	9.141
Okumura-Hata model	1.255	4.584
COST 231-Hata model	1.026	3.748
Walfisch-Ikegami model	1.253	3.962
Hata-Davidson model	2.526	8.837

CONCLUSIONS

1. This work discusses relatively simple RWP models for CMCN, which, using provided algorithm along with appropriate software (such as Mathcad), allows determining maximum coverage area of BTS cells, based on environment characteristics.

2. Every mathematical model is presented as a function of the received signal strength $P_r(P_t, G_t, G_r, f, h_t, h_r, r)$. Unlike in most of the models recommended by ITU-R и CEPT, formulas in table 2.1 comply with the strict mathematical laws. Expressions with common logarithms are reduced to dimensionless forms by introduction of the norming parameters. For instance, received path loss formula for the COST 231-Hata model in the book [7] looks like this:

$$L_{COST\ 231} = 46.3 + 33.9 \cdot \lg(f) - 13.82 \cdot \lg(h_t) - a(h_r) + [44.9 - 6.55 \cdot \lg(h_t)] \cdot \lg(r) + C, \quad (4.1)$$

That path loss $L_{tr} = 10 \cdot \lg(P_t / P_r) > 0$ doesn't match the actual reduction in the signal level when distance between BTS and MS increases, and expression (4.1), in overall, is mathematically incorrect, because quantities with dimensions are used as an logarithm arguments. This work proposes the following formula (4.2):

$$P_{r\ COST\ 231} = P_t - 46.3 - 33.9 \cdot \lg\left(\frac{f}{f_0}\right) + 13.82 \cdot \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right) + a(f, h_r) - \left[44.9 - 6.55 \cdot \lg\left(\frac{h_t}{h_0}\right)\right] \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right) - C, \quad (4.2)$$

which corresponds to the path loss $L_{tr} = 10 \cdot \lg(P_r / P_t) < 0$ and shows the real attenuation of the radio signal.

3. Path loss in Philadelphia, as shown in the graph 4.1 where experimental (fig. 3.3) and calculated (fig. 3.2) data are compared, can be expressed using Lee model, whereas COST 231-Hata model is a match to the measured path attenuation in Tokyo. Visible errors are possible due to the choice of parameters (BTS and MS antenna height, antenna gain, urban parameters, etc.).

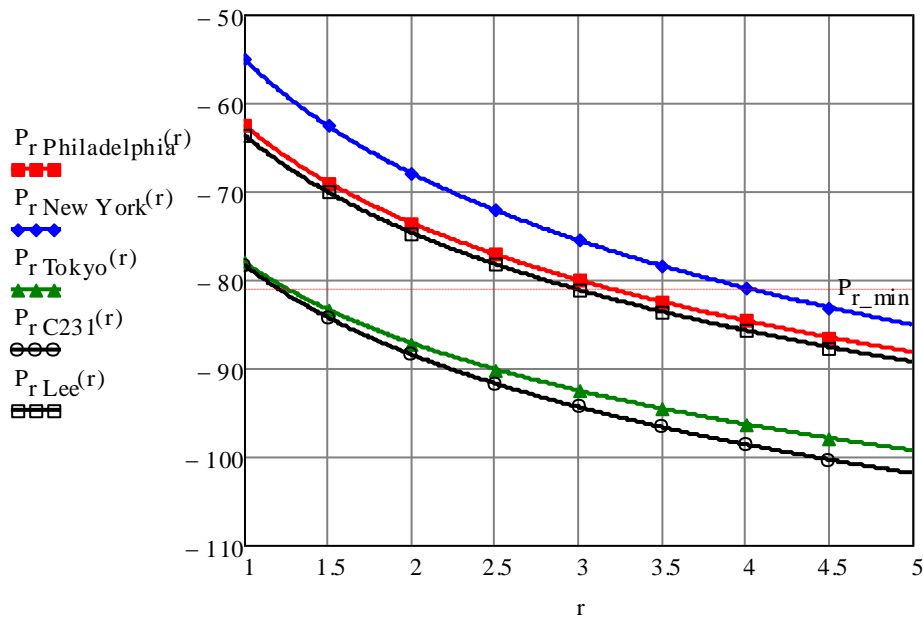


Figure 4.1. Comparison of the Experimental and Calculated Values of Received Signal Strength in Selected Cities

4. As a first approximation, calculations of the median received power $P_r(r)$ (for downlink regime) can be made using estimated engineering formula (4.3):

$$P_r = P_{rLOS} - 10 \cdot n \cdot \lg\left(\frac{r}{r_0}\right), \quad (4.3)$$

where r_0 – norming distance, $r_0 = 1$ km;
 n – attenuation exponent which depends on the environment (table 4.1).

Table 4.1.

Environment	Attenuation exponent n
Free space (LOS)	2
Suburban area (LOS/NLOS)	2.7–3.5
Urban area (NLOS)	3–5

For example, if the received power in LOS environment $P_{rLOS} = -60$ dBm at the distance $r = 1$ km from the BTS, and $P_r = -75$ dBm when the distance is $r = 3$ km, then the slope of experimentally acquired data for RWP in New York (fig. 3.3) can be roughly expressed using formula 4.3 with the coefficient $n = (-75 + 60) / (-10 \cdot 0.48) = 3.125$.

5. The developed algorithm (fig. 3.1), which was implemented using Mathcad software, allows not only calculating maximum coverage area of BTS cell towers, but also performing network clustering and designing the coverage map afterwards [1, 2, 13].

REFERENCES

1. Popovs V., GSM standarta šūnu mobilo sakaru sistēmas: Projektēšanas problēmas. Rīga: RTU Izdevniecība, 2003, 362 lpp.
2. Попов В. И., Основы сотовой связи стандарта GSM. Москва: Эко-Трендз, 2005, 296 с.
3. Blaunstein N., Radio Propagation in Cellular Networks. London, United Kingdom: Artech House, 2000, 384 p.
4. COST Action 231, “Digital Mobile Radio Towards Future Generations Systems,” European Commission, Technical Report EUR 18957, 1999, 474 p.
5. gvSIG Association, Portal gvSIG, 2006-2016 [cited–February 20, 2016]. Available at: <http://www.gvsig.com/>
6. Lee W. C. Y., Mobile Communications Design Fundamentals, 2nd ed. New York, USA: Wiley, 1993, 398 p.
7. Parsons J. D., The Mobile Radio Propagation Channel, 2nd ed. New York, USA: Wiley, 2000, 436 p.
8. Popovs V., Tehniskā elektrodinamika, 4. daļa: Radioviļņu izplatīšanas, Lekcijas. Rīga: RTU DzTI, 2003–2005, 74 lpp.

9. Popovs V., Skudnovs V., Vasiljevs A., “Antenna systems of base transceiver stations in cellular mobile networks. Modern state and perspective of development,” in Proceedings of the 56. International Scientific conference of the Riga Technical University, 2015.
10. Попов В. И., Скуднов В. А., Васильев А. С., “Антенны базовых станций в сотовых сетях мобильной связи. Современное состояние и перспективы развития,” Евразийский Союз Ученых (ЕСУ), №11 (20), часть 3, 2015, с. 138–150.
11. Singh Y., “Comparison of Okumura, Hata and COST-231 Models on the Basis of Path Loss and Signal Strength,” International Journal of Computer Applications, vol.59 (no.11), Dec. 2012.
12. Siwiak K., Bahreini Y., Radio wave Propagation and Antennas for Personal Communications, 3rd ed. London, United Kingdom: Artech House, 2007, 494 p.
13. Весоловский К., Системы подвижной радиосвязи. Москва: Горячая линия–Телеком, 2006, 536 с.
14. Шабунин С. Н., Лесная Л. Л., Распространение радиоволн в мобильной связи. Методические указания по курсу “Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства в системах мобильной связи”. Екатеринбург: УГТУ, 2000, 38 с.
15. Alim M. A., Rahman M. M., Hossain M. M., Al-Nahid A., “Analysis of Large-Scale Propagation Models for Mobile Communications in Urban Area,” International Journal of Computer Science and Information Security (IJCSIS), vol.7 (no.1), 2010.
16. Утц В. А., “Исследование потерь при распространении радиосигнала сотовой связи,” Вестник Балтийского государственного университета им. И. Канта, №5, 2011, с. 44 – 49.
17. Попов В. И., Распространение радиоволн в лесах. Москва: Горячая линия–Телеком, 2015, 392 с.