

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

მობილური კავშირის ქსელების
პროექტირების საფუძვლები
(ლექციების კურსი)

პროფ. ჯ. ბერიძე
ასოც. პროფ. შ. კვიციანი

თბილისი

2018 წ.

სარჩევი

**Tavi 1. Tanamedrove usadeno telekomunikaciis Teoriuli safuZvlebi -----
-----3gv.**

**Tavi 2. radiosignalis gadacemis fizikuri garemos maxasiaTeblebi da radiotalRebis
gavrcelebis Taviseburebebi-----21gv**

Tavi 3.modulaciis saxeebi kavSiris cifrul arxSi-----47gv

**Tavi 4. OFDM sixSiruli arxebis orTogonaluri multipleqsireba-----
-----66gv**

Tavi 5. saarxo (makoreqtirebeli) kodireba-----77gv

თავი 6. მობილური ქსელების დაგეგმარება-----83გვ

Tavi 1.

Tanamedrove usadeno telekomunikaciis Teoriuli safuZvlebi

gansazRvrebis mixedviT, radioteqnoqia aris “*radiosignalebis formirebis, gadacemis, miRebis (damuSavebis) saSualebaTa erToblioba, rac qmnis erTian teqnologiur process~, romlis gamoyenebac iTvaliswinebs radiosixSiruli resursiT sargeblobas~* [1]. meore mxriv, Setyobinebis (da misi amsaxveli signalis) gadasacemad gamoyenebul saSualebaTa erTobliobas *kavSiris arxi* ewodeba. maSasadame, radioteqnologiis SesaZleblobaTa winaswar ganmsazRvreli erT-erTi sakvanZo faqtori aris radioarxi (radioarxebis erToblioba), romlis saSualebiTac xorcieldeba satelekomunikacio kavSiri (link) BWN-is kvanZebis Soris.

radioarxis umniSvnelovanesi maxasiaTebeli aris informaciis gadacemis siCqare. sxvadasxva radioteqnologiisaTvis damaxasiaTebelia mniSvnelovani gansxvaveba informaciis gadacemis siCqarebsa da arxis sixSiruli zolis gamoyenebis efeqturobaSi (efeqturoba fasdeba informaciis gadacemis siCqaris fardobiT arxis zolis siganesTan). ufro maRali efeqturoba niSnavs imas, rom informaciis (magaliTad, monacemebis) gadacemis aucilebeli siCqare miiRweva gamoyofili radiosixSiruli resursis ufro viwro zoliT, rac mniSvnelovania aseTi resursebis mzardi deficitis gamo. Sesabamisad, BWN radioteqnologiebisa da masSi gamoyenebuli radioarxebis sixSiruli efeqturobis urTierTkavSiri warmoadgens mocemuli Tavის ganxilvis erT-erT obieqts.

BWN radioteqnologiis sxva mniSvnelovani aspekti ganpirobebulia imiT, rom kvanZTaSorisi arxebis radiosixSiruli resursi, arcTu iSviaTad, saerToa da am arxebis radiosignalebi iqmneba sixSireTa erTian zolSi. yvela momxmareblisTvis saerTo (erTian) sixSirul zolSi SeRweva, warmoqmnilni arxebis eleqtromagnituri Tavsebadobis pirobebis gaTvaliswinebiT, SesaZlebeli xdeba formiT an droiT orTogonaluri radiosignalebis gamoyenebis pirobebSi. Sesabamisad am TavSi mocemuli masala exeba signalwarmomqmneli saSualebebis da mravlobiTi SeRwevis meTodebis urTierTkavSirs.

bolos, Tanamedrove BWN-iT informaciis gadacema xorcieldeba konfidencialobis dacvis gaTvaliswinebiT, romelic miiRweva momxmarebelTa autentifikaciiTa da Setyobinebis daSifvris gziT. am procedurebs, Cveulebriv, miakuTvneben Setyobinebis gardaqmnis arasaqselo donebs (ix. sur. 1.13). moxseniebuli masalis mocemul TavSi Casma ganpirobebulia daSifvris

operaciebis SesrulebiT qselze damokidebuli doneebis protokolebiT da, Sesabamisad, - Txrobis struqturuli erTianobis uzrunvelyofis aucileblobiT.

1.1. kavSiris usadeno arxi

1.1.1. kavSiris usadeno arxis sabazo teqnologiebi

1.1.1.1. signali da speqtri. ZiriTadi cnebebi. telekomunikaciaSi *signali niSnavs* fizikur process, romelic sainformacio Setyobinebas gamosaxavs gadacemis, damuSavebisa da aRqmisaTvis mosaxerxebeli formiT. cneba `signali~ dakavSirebulia cnebebTan `monacemebi~ (data) da `informacia~ (information), Tumca isini sxvadasxva semantikur kategorias ganekuTvneba. arsiT signali warmoadgens informaciisa da monacemebis fizikur formas.

telekomunikaciaSi yvelaze farTod gavrclebulia signalis warmodgenis eleqtruli forma, romelic asaxavs Zabvis damokidebulebas droze $U(t)$. signalebis aseTi maTematikuri warmodgena maTi klasifikaciisa da Sedarebis saSualebas izleva.

usadeno kavSiris garemoSi maTematikuri modelebiT aRwerili signalebi informaciulobis mixedviT iyofa determinirebul da SemTxveviT signalebad. *determinirebuli signali* ewodeba signals, romlis parametrebis mniSvnelobebic drois nebismier momentSi cnobilia. *SemTxveviTi signalis* parametrebis mniSvnelobebi winaswar ar aris cnobili da SeiZleba ganisazRvros raRac albaTobiT [2]. determinirebuli signalis klasikur magaliTad SeiZleba gamodges harmoniuli signali, romlis maTematikur models Semdegi saxe aqvs:

$$S(t) = A \sin(2\pi f_0 t + \phi) = A \sin(\omega_0 t + \phi) \text{ an } S(t) = A \cos(\omega_0 t + \phi), (1.1)$$

sadac A - signalis amplitudaa;

f_0 - sixSire;

ω_0 - kuTxuri sixSire;

ϕ - sawyisi faza.

SemTxveviTi signalis magaliTad SeiZleba gamodges nebismieri xelSeSla - misi parametrebi winaswar ar aris cnobili.

determinirebuli signali, Tavis mxriv, SeiZleba iyos: *perioduli an araperioduli*. perioduli signali meordeba raRac drois Sualedis Semdeg, araperioduli signali ki erTsa da imave pirobebSi ar meordeba [2]. es ukanaskneli formis mixedviT iyofa *analogur da diskretul signalebad*.

analoguri signali uwyveti funqciaa, romelic gansazRvrulia argumentis yoveli mniSvnelobisaTvis. amave dros funqciis mniSvnelobis winaswarmetyveleba drois nebismieri

momentisaTvis SeiZleba didi sizustiT. diskretuli signalis aRmweri maTematikuri funqcia aseve uwyvetia Tavisi mniSvnelobebis mixedviT, magram ganisazRvreba mxolod argumentis diskretuli mniSvnelobebisaTvis. amplitudis mixedviT daqvantul diskretul signals *cifruli signali* ewodeba. cifruli signalis parametrebis mniSvnelobebi SeiZleba davakavSiroT aTvlis konkretul sistemasTan da davamuSaoT ricxviTi meTodebiT [2]. mobiluri kavSirisa da usadeno SeRwevis yvela Tanamedrove sistema cifrulia, amitom, Semdgom ZiriTadi yuradReba cifrul signalebsa da maT cifrul damuSavebas mieqceva.

signalis gamosaxvis formas, romelic Seesabameba mis maTematikur aRweras damoukidebeli argumentis funqciis saxiT, *dinamikuri* forma ewodeba. signalis gamosaxvis am tradiciuli formis garda, iyeneben misi maTematikuri aRweris formas, e.w. *Sebrunebuli argumentis* saSualebiT (magaliTad, t drois Sebrunebuli argumenti aris f sixSire). am formas *speqtruli forma* ewodeba. aseTi warmodgenis SesaZlebloba ganpirobebulia signalis dinamikuri aRweris TvisebebiT, romelTa saSualebiTac nebismieri rTuli signali SeiZleba Caiweros drois mimdevrobiT momentebSi warmoqmnil elementaruli signalebis jamis saxiT (e. i. daiSalos harmoniul Semdgenebad). Tu am elementaruli signalebis xangrZlivoba miiswrafvis nulisaken, zRvarSi miviRebT signalis zust asaxvas. es daSla aiwereba rxevis amplitudisa da sawyisi fazis funqciebis uwyveti an diskretuli argumentiT, romlis rolSic gamodis funqciis cvlilebis sixSire misi warmodgenis intervalSi. daSlis elementaruli signalebis amplitudaTa erTobliobas *signalis amplituduri speqtri* ewodeba, xolo fazaTa erTobliobas - *signalis fazuri speqtri*. es ori speqtri erTad warmoqmnis *signalis sixSirul speqtrs* [2].

Tu cnobilia signalis forma (funqciis mniSvnelobis damokidebuleba argumentis mniSvnelobaze), speqtris gamoTvla SeiZleba furies gardaqmnebis saSualebiT. sxva sityvebiT, perioduli funqcia, romelic mocemulia T periodis intervalze da SemosazRvrulis ω naWer-naWer uwyvetia pirveli rigis wyvetebis sasruli ricxviT (dirixles piroba), SeiZleba warmovadginoT furies mwkrivis saxiT [2]:

$$S(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} S_n \exp(jn\Delta\omega t), \quad S_n = S(n\Delta\omega), \quad \Delta\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (1.2)$$

sadac S_n e.w. mwkrivis woniTi koeficientebia.

diskretuli speqtris pirvel sixSirul mdgenels ($n=1$) signalis ZiriTadi (centraluri) sixSire ewodeba, xolo sxva sixSireebs – harmonikebi. araperioduli signalis speqtris agebisaTvis gamoiyeneba e.w. *furies integraluri gardaqmna* [2].

signalis speqtris cnebasTan mWidrodaa dakavSirebuli signalis speqtruli simkvrivis gansazRvreba, romelic axasiaTebis misi energiis an simZlavris ganawilebas sixSirul diapazonSi. *signalis energiis speqtruli simkvrive* ganisazRvreba TanafardobiT [2, 3]:

$$\psi(t) = |\hat{S}(t)|^2, \quad (1.3)$$

sadac $\hat{S}(t)$ aris $S(t)$ signalis furie-saxe.

signalis speqtruli simkvrivis sixSiris mixedviT integrirebiT SeiZleba ganisazRvros misi energia [3].

signals, romlis speqtric iwyeba raRac mudmivi SemdgeniT (Cveulebriv $f = 0$) da SemosazRvrulia zemodan, *sawyisi signali* ewodeba (ucxour literaturaSi *baseband signal – sixSireTa sabazo zolis signali*). aseTi signali formirdeba momxmareblis damaboloebel mowyobilobaSi da sawyisi saxiT gadaicema misi damuSavebis traqtSi. *modulirebuli signali gadaicema radiosixSireebis areSi radiosignalis formirebis procesSi (ufro efeqturSi radiogadacemisaTvis)*.

TviT radiosignalisa da misi Sesabamisi radiogamosxivebis speqtruli Tvisbebi damokidebulia gadamtanis modulaciis meTodsa da mamodulirebeli signalis formaze. mobiluri kavSirisa da usadeno SeRwevis Tanamedrove sistemebSi gavrclebulia marTkuTxa *ფორმის impulsis* mqone signalebi (sur. 1.1, a). maTi speqtruli simkvrivis funqcia foTlis formisaa da misi momvlebi icvleba $\left(\frac{\omega T_c}{2}\right)^{-1} \sin\left(\frac{\omega T_c}{2}\right)$ kanoniT, rasac Seesabameba nulebis arseboba speqtrul simkvriveSi $1/T_c$ -s jerad sixSireebze (ix. sur. 1.1, b). Sesabamisi radioimpulsis speqtris momvlebi simetriulia radiosignalis gadamtani f_0 sixSiris mimarT (ix. sur. 1.1, g).

aseTi radiosignalis daumaxinjeblad gadacema SesaZlebelia mxolod usarulo siganis sixSireebis arxiT, rac mowmobs misi realizaciis SeuZleblobas. analogiuri daskvna vrceldeba xangrZlivobiT SezRuduli sxva formis impulsebis gamoyenebis SemTxvevaSic. maTi speqtruli simkvrivis, rogorc sixSiris funqciis gansazRvris are, usaruloa. ZiriTadi gansxvaveba daiyvaneba mxolod speqtruli simkvrivis momvlebis formaze. es niSnavs imas, rom signalis impulsur gadacemas sixSireTa SezRudul zolSi Tan axlavs damaxinjebebi. speqtris integrireba funqciis grafikis intervalebSi gviCvenebs, rom pirveli intervalis farglebSi, Cveulebriv, Tavmoyrilia signalis energiis 90%-ze meti da sxva intervalebSi _ mxolod 10%-ze naklebi. sawyisi signalisa da radiosignalis speqtrebis Tanafardoba winaswar gansazRvravs signalebis or kategoriad dayofis

kriteriums. signalebi iyofa e.w. `viwrozolian~ signalebad da signalebad speqtris gafarToebiT (maT zogjer arcTu mTlad sworad, `farTozolians~ uwodeben). viwrozoliani signalebis ganmsazRvrelis Tvisebaa is, rom sawyisi signalisa da **მესამისი** radiosignalis speqtres siganebis fardoba erTeulis rigis sididea. maTgan gansxvavebiT, signalebisaTvis speqtris gafarToebiT es fardoba aRwevs aTeulebisa da aseulebis rigis sidides.

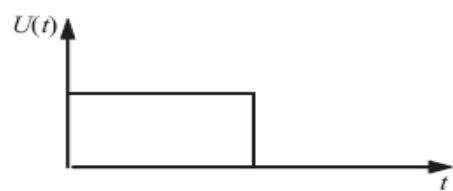
signalebis sxvadasxva formiT warmodgenisTvis damatebiT iyeneben maTi analizis sxvadasxvagar meTodebs. telekomunikaciis TeoriaSi erT-erTi yvelaze gavrebuli meTodi aris korelaciuri analizi, romelic SesaZleblobas iZleva damyardes signalebs Soris urTierTkavSiri da urTierTdamokidebuleba (magaliTad, Sefasdes msgavsebis xarisxi). signalebs Soris urTierTkavSiris xarisxs gamosaxaven korelaciis koeficientis normirebuli erTeulebiT, romelic iRebs mniSvnelobas 1-dan -1-mde SualedSi (Sesabamisad signalebis sruli damTxvevisas da ardamTxvevisas).

$S(t)$ signalis Sedarebisas mis drois mixedviT dayovnebul $S(t+\hat{\delta})$ asITan, iyeneben avtokorelaciis funqciis cnebas (Auto Correlation Function, ACF), rogorc msgavsebis sazoms, romelic gamoiTvleba formuliT [3]:

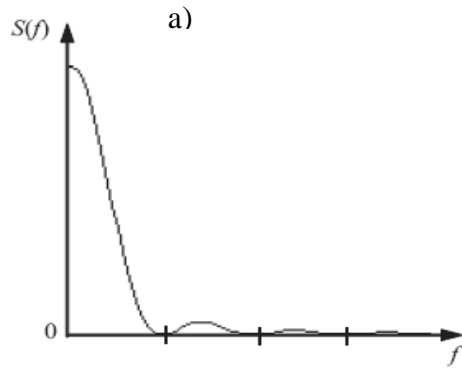
$$R_s(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t)S(t+\tau)dt, \quad -\infty < \hat{\delta} < \infty \quad (1.4)$$

$\hat{\delta}$ cvladi, romelic gansazRvრავს signalis aslis dayovnebas, asrulebs `skaneris parametris~ rols. signalis ACF-s Semdegi Tvisebebi aqvs:

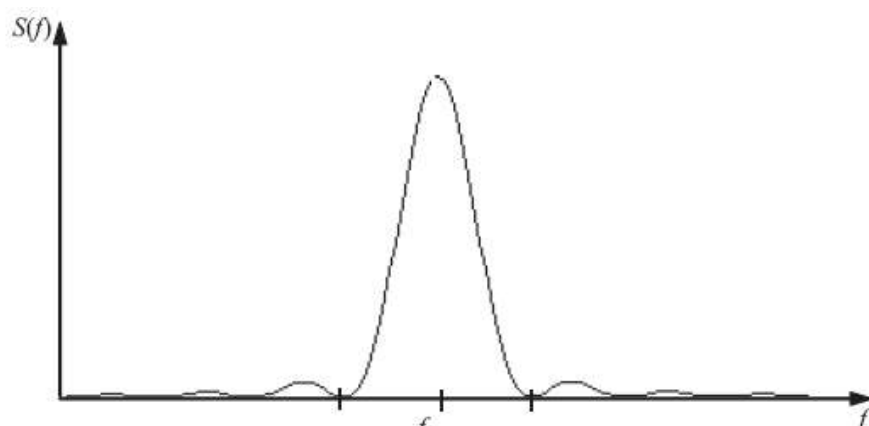
- $R(\hat{\delta})$ $\hat{\delta}$ -s mixedviT simetriulia nulis mimarT;
- $R(\hat{\delta})$ -s mniSvneloba nulze maqsimaluria yvela $\hat{\delta}$ -saTvis;
- ACF aris signalis energiis speqtruli simZlavris furie - saxe da piriqiT;
- ACF-is mniSvneloba drois mixedviT nulovani Zvris SemTxvevaSi ricxobrivad signalis energiis tolia.



a)



b)



sur. 1.1. marTkuTxa videoimpulsi, misi energetikuli speqtri da marTkuTxa radioimpulsis
speqtri

perioduli signalis korelaciuri maxasiaTeblebis gansazRvrisadmi midgoma ramdenadme gansxvavebulia. am SemTxvevaSi ACF gamoiTvleba signalisa da misi daZruli aslis skalaruli namravlis gasaSualebis gziT, T periodis farglebSi [3]:

$$R_s(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} S(t)S(t + \tau)dt. \quad (1.5)$$

am SemTxvevaSi ACF warmoadgens simZlavris speqtruli simkvrivis furie-saxes, xolo mniSvneloba nulze signalis saSualo simZlavris tolia [3].

1.1.1.2. radioarxis ganzogadebuli modeli da ZiriTadi maxasiaTeblebi radioarxi aris radioteqnikuri saSualebebisa da radiotalRebis erToblioba, romlis daniSnulebaa Setyobinebis gadacema gamgzavnidan mimRebamde (sur. 1.2).

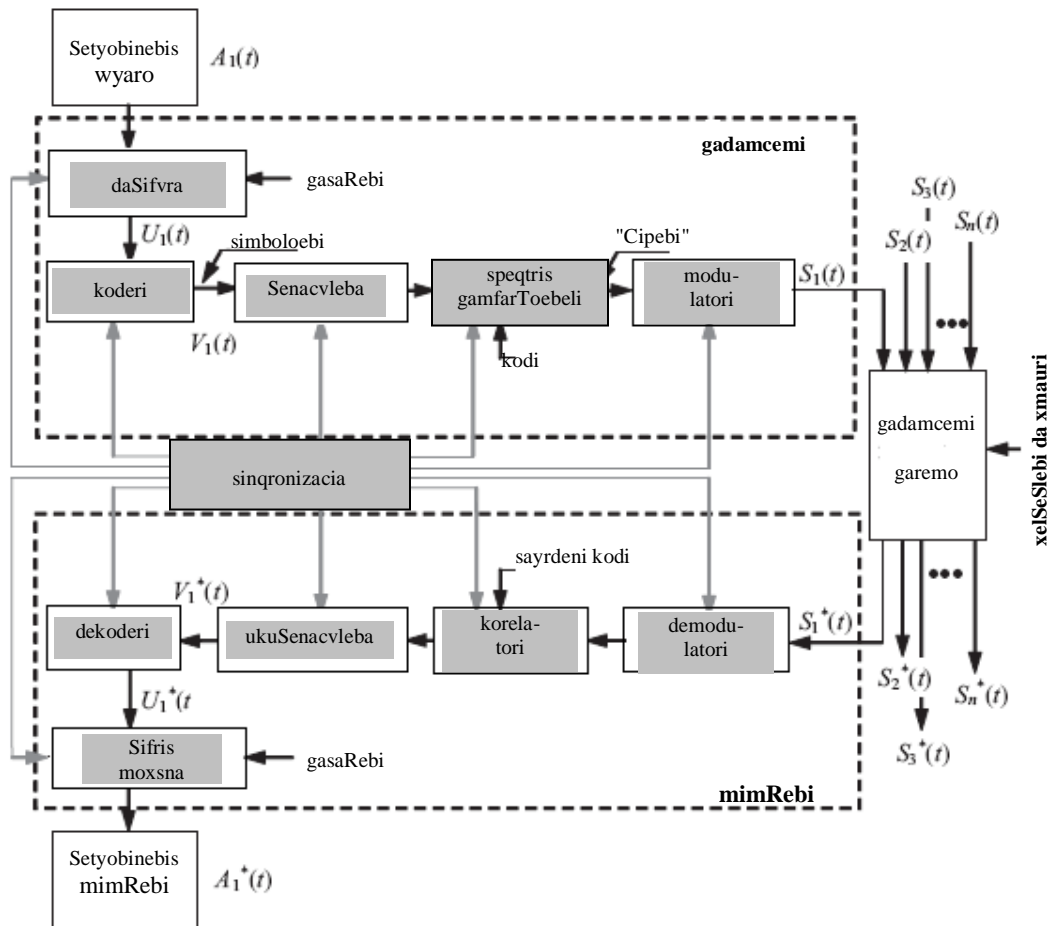
radioarxebis, rogorc eleqtrokavSiris arxebis saxesxvaobis ganmasxvavebeli niSnebi, aris Semdegi:

- gamoiyeneba radiosignalebi, romlebic an radiogamosxivebaa an _ eleqtrowredSi radiogamosxivebis sixSiris signali;
- garemod gamoiyeneba `eTeris sivrce~, sadac radiosignali vrceldeba radioxazSi, romelic gadamcemi da mimRebi antenebisa da radiotalRebis gavrcelbis garemos erTobliobaa.

radiokavSiris sistemebis Sesaxeb teqnikur literaturaSi radioarxis cnebas sxva ganmartebac aqvs [1]: *`radioarxi aris radiosixSiruli speqtris nawili, romlis daniSnuleba gamosxivebaa da ganisazRvreba sixSireebis dadgenili sazRvrebiT an centraluri sixSiriTa da Sesabamisi sixSireTa zolis siganiT~*

BWN kavSiris arxebis specifikuri Tavisebureba aris Semdegi saerTo radioresursebis gamoyeneba:

- sixSiruli – yvela arxis radiosignalis formireba xorcieldeba radiosixSireebis erTi zolis gamoyenebiT;
- droiT – erT arxSi Setyobinebis gadacemis moTxovna drois mixedviT ar aris damokidebuli sxva arxebSi gadacemis moTxovnis warmoSobaze, am moTxovnebis erTdroulad warmoSobis CaTvlit;
- sivrciT – BWN-is farglebSi mimRebi sadguris adgilsamyofeli SeiZleba iyos nebismieri (garda fiqsirebuli mdebareobis sadgurisa fiWuri kavSiris qselis farglebSi).



sur. 1.2. cifruli kavSiris arxis ganzogadebuli struqturuli modeli

BWN-is erTi qselis arxTa simravlis erToblivi muSaoba, saerTo sixSirul-droiT da/an sivrciTis resursis gamoyenebiT, iTvaliswinebs am resursis ganawilebis koordinacias sxvadasxva arxs Soris. sxvadasxva saxis BWN-Si resursebis ganawilebis SesaZleblobebi mniSvnelovnad gansxvavdeba. magaliTad, sivrciTis resursebis ganawileba xorcieldeba mxolod uaxlesi fiWuri sistemebis infrastruqturul BWN-Si da municipalur kavSirebSi, romlebic moicavs sabazo sadgurebs, sadac ekonomiurad gamarTlebulia rTuli saanteno sistemebis gamoyeneba, romlebic uzrunvelyofen mimarTul gamosxivebas. BWN-Si, romlis sadgurebic aramimarTul antenebs iyeneben, sivrciTis resursis ganawileba arxebS Soris gamoricxulia.

Tanamedrove BWN-Si radioarxebS Soris ganawilebis tipuri obieqtia sixSirul-droiTi resursi. misi ganawileba fiWuri kavSirebisa da WiMAX-is tipis qselebSi xorcieldeba sabazo sadgurebis mier qselTan misaerTebeli samomxmareblo sadgurebis moTxovniT, ukve mierTebuli sadgurebis kavSirebis gawyvetis gareSe. lokalur da personalur qselebSi es resursi nawildeba, Setyobinebis gadacemis moTxovnebis mqone sadgurebs Soris, `SejibrebiTi~ SeRwevis principiT.

Tanamedrove fiWuri kavSirisa da usadeno SeRwevis sistemebis radioarxebis pirvelxarisxovani Tavisebureba aris is, rom gadacemidan mimRebamde Setyobinebis gadacemisaTvis gamoiyeneba cifruli signalebi. Setyobinebis gamgzavni da mimRebi aris kvanZebis e.w. hostebi (host) – damaboloebeli mowyobilobebi (kompiuteri, videofoni da sxv.), romlebic momxmareblebs awvdian interfeisebs sxvadasxva saxis momsaxurebis gawevisaTvis da qmnian cifrul signalebs.

radiosignalebis formireba, gadacema, miReba da damuSaveba radioarxebSi xorcieldeba gadacemebiTa da mimRebebiT, romlebic mierTebulni arian hostebTan (erT boloSi) da radioxazebTan (meore boloSi). host-wyarodan gadacems miwodeba gasagzavni Setyobinebis $U(t)$ sawyisi cifruli signalebi. adresatis hostSi mimRebidan Semodis radioarxiT gadmocemuli miRebuli Setyobinebis $U^*(t)$ cifruli signali. Setyobinebis gadacema xarisxiania rodesac gadacemuli Setyobineba calsaxad aisaxeba miRebuliT: $U(t) \rightarrow U^*(t)$. aseTi asaxva aris radioarxebis elementebiT gardaqmnaTa mTeli jaWvis Sedegi: $U(t) \rightarrow V(t) \rightarrow S(t) \rightarrow S^*(t) \rightarrow V^*(t) \rightarrow U^*(t)$, sadac $S(t)$ da $S^*(t)$ – gadacemis mier gamosxivebuli da mimRebis mier miRebuli radiosignalebia; $V(t)$ da $V^*(t)$ – Sesabamisad kodirebuli da dekodirebuli signalebi.

sawyisi cifruli signalebis kodireba gadacem mxares mdgomareobs $U(t)$ Setyobinebis simboloebis nakadis gardaqmnaSi $V(t)$ simboloebis nakadad, romlebiTac ganisazRvrebamodulatoris mier Seqmnili $S(t)$ radiosignalebi (ix. sur. 1.2).

gadamcem mowyobilobaSi $A(t)$ wyaros Setyobineba gardaiqmneba $U(t)$ pirvelad eleqtrul signalad, romelic mosaxerxebulia Semdgomi damuSavebisa da kavSiris arxiT gadacemisaTvis. Setyobinebis simboloTa speqtrobi ganlagebulia sixSiris sabazo zolSi (baseband). zemoT **arweril mzadeba**, Cveulebriv, moicavs *efeqtur kodirebas* – Setyobinebis gardaqmnas statistikurad damoukidebel Tanabaralbatur simboloebad da Setyobinebis niSnis warmosadgenad saWiro simboloTa saSualo ricxvis Semcirebas (*siWarbis Semcireba*). am procedurebis erTobliobas xSirad *wyaros kodireba* ewodeba. gadasacemi informaciis arasanqcionirebuli SeRwevisagan dacvisaTvis Setyobineba SeiZleba daiSifros.

samomxmareblo doneze eleqtruli signalebis wardgenis formis SeTanxmeba hostebis Semaval/gamomaval cifrul eleqtrul signalebTan Seesabameba Ria sistemebis sabazo modelis wardgeniT donis protokolebs (ix. Tavi 1), kerZod, am signalebis kodirebisa da daSifvris mareglamentirebel protokolebs (ix. *wyaros kodireba*~) [3]. Semdeg Cven vvaraudoT, rom radioarxebis Sesaval/gamosavali cifruli signalebi warmoadgenen bitebis nakads (orobiTi eleqtruli simboloebis nakadi).

Semdegi damuSaveba daiyvaneba pirveladi signalis meoreul $V(t)$ signalad gardaqmnaze da SeiZleba Sedgebodes ramdenime etapisagan (makoreqtirebeli kodireba, Senacvleba, speqtris gafarToeba), romlebic sruldeba kavSiris arxiT gadacemis utyuarobis gazrdisa da Secdomebis Tavidan asacileblad. xelSeSlamdgradi kodirebis gamoyeneba ganpirobepbulia damaxinjebebis arseboiT radioxazebiT gadacemis dros. pirveladi signalebis simboloTa Senacvleba da speqtris gafarToeba damatebiTi RonisZiebebia, romlebic saSualebas iZleva miviRoT energetikuli mogeba signalebis gadacemis dros an mogvigoT miRebis xarisxi (SevamciroT Secdomebis raodenoba).

bolo stadiaze meoreuli dabalsixSiruli signali arxis koderis gamosavlelidan miewodebamodulators da gardaiqmneba $S(t)$ maRalsixSirul radiosignalad, romelic vargisia usadeno arxiT gadacemisaTvis, garemos Taviseburebebis (maxasiaTeblebis) gaTvaliswinebiT.

gadaqmnebi, romelTa daniSnulebaa signalebis wrfivi gaZliereba, ar aris moxseniebuli, vinaidan isini ZiriTadi funqცი გარდაყმნების ტანმხლებია. gadacemisa da mimRebis mier Sesrulebuli gardaqmnebi, urTierTsapirispiroa signalebis Sesabamisi asaxvis mixedviT. mimRebi

ukugardaqmnis miRebul $S^*(t)$ signals, romelic moicavs $U^*(t)$ signalis demodulacias, sakorelacio damuSavebas, deSenacvlebasa da gardaqmnas $A^*(t)$ Setyobinebis Sesabamisad.

gadamcemSi gadamtani sixSiris modulacia uzrunvelyofs $S(t) = s(t)\cos(2\delta f_0 t + \phi(t))$ radiosignalis formirebas, romlis $s(t)$ momvlebi da $\phi(t) = 2\delta f_0 t + \phi(t)$ faza gansazRvraven am signalis cvlilebas, romelic $V(t) \rightarrow S(t)$ asaxvis Sesabamisia. radiosignalis speqtri ganlagebulia f_0 gadamtani sixSiris midamoebSi. pirveladi sawyisi signalis gadasacemad aucilebeli sixSiruli zolis sigane ganisazRvrebaba bitebis nakadis gadacemis siCqariT, kodirebis parametrebiTa da gadamtanis modulaciiT. cifruli kavSiris sistemebis radioarxebSi gadamtanebis modulaciis meTodebi ganixileba mocemuli Tavis 1.5 paragrafSi.

radioarxis modelis ganxiluli elementebi uzrunvelyofs OSI sabazo modelis fizikuri donis funqciebis Sesrulebas, romelTa warmodgenac xorcieldeba ori zemdgomi donis, MAC-donisa da saqselo donis, protokolebis Sesabamisad. arxis ganxilvad modelSi es garemoeba gaTvaliswinebulia ori elementis - kontrolerisa da arxis muSaobis sinqronizatoris arsebobiT. sinqronizacia uzrunvelyofs gadamcemsda da mimRebSi erTiani SeTanxmebuli drois aRricxvas, rac iZleva signalebis sinqronuli da sinfazuri gadacemis/miRebis SesaZleblobas. arxis kontroleri asrulebs sixSirul-droiTi resursis miwodebis marTvis funqcias. fiWuri kavSiris sistemebSi aseTi marTva daiyvaneba resursis ganawilebaze, rogorc SeerTebis damyarebasTan (control channel) dakavSirebuli Setyobinebebis gadacemisaTvis, ise, samomxmareblo Setyobinebebis (traffic channel) gadacemisaTvis. BWA-is sistemebSi sixSirisa da drois resursebis marTva daiyvaneba radiosignalebis gadacemis saerTo garemoSi abonentebis mravaljeradi SeRwevis uzrunvelyofaze, misi dakavebulobis avtonomiuri kontrolis (Carrier Sensing Multiple Access - CSMA) saSualebiT.

radiosixSiris resursis ganawileba radioarxebs Soris aucilebelia arXTaSorisi urTierTxelSeSlis warmoqmnis Tavidan acilebisaTvis. urTierTxelSeSlis ararsebobis kriteriumi, gamoyenebuli radiomiRebis meTodebis Sesabamisad, aris arxebis signalebis orTogonalobis pirobebis dacva. signalebis droiTi da speqtruli warmodgenisaTvis mocemuli piroba SeiZleba Caiweros Semdegnairad [3]:

$$\begin{array}{cc} \text{droiTi warmodgena} & \text{speqtruli warmodgena} \\ \int_{-\infty}^{\infty} S_i(t)S_j(t)dt = \begin{cases} const & i = j; \\ 0 & i \neq j. \end{cases} & \int_{-\infty}^{\infty} S_i(\omega)S_j(\omega)d\omega = \begin{cases} const & i = j; \\ 0 & i \neq j. \end{cases} \end{array}$$

aq i da j indeqsebi aRniSnaven i -ur da j -ur arxebs.

mocemuli Tanafardobidan naTelia, rom signalis droiTi intervalis an sixSiruli zolis gayofa, romelSic is gadaicema, uzrunvelyofs signalebis orTogonalurobas. urTierTgavlenis Tavidan acilebis saSualebebs ewodeba droiTi (time division) da sixSiruli (frequency division) dayofis meTodebi. am meTodebTan erTad, farTod gamoiyeneba arxebis koduri dayofis meTodi. **Termino** `koduri dayofis~ sinonimia `arxis dayofa signalis formis mixedviT~.

dasarul aRvniSnoT, rom BWN-is kvanZebs Soris kavSiri dupleqsuria, romlis drosac `*Setyobineba miRebisTanave gadaicema*`. kavSiris aseTi saxe gulixmobs qselis kvanZebs Soris ori radioarxis arsebobas. gadacema/miRebis erTdroulobis moTxovnis mkacrad dacva niSnavs, rom erTi arxiT signalis gadacema da meoriT miReba xorcieldeba drois erTsa da imave SualedSi. amisaTvis ki aucilebeli pirobaa, rom arxebis sixSiruli zolebi erTmaneTisagan daSorebuli iyos (sixSiruli dupleqsi, inglisurisagan frequency division duplex, FDD). miuxedavad amisa, termini `dupleqsuri kavSiri~ Setyobinebebis gacvlasTan dakavSirebiT im SemTxvevaSic gamoiyeneba, rodesac arxebis sixSiruli zolebi SeTavsebulia. am dros arxebis urTierTxelSeSla gamoiricxeba erT arxSi signalebis gadacemisa da meoreSi miRebis morigeobis xarjze, fanjris (kadris) fiqsirebuli drois farglebSi. dupleqsuri kavSiris aseT saxesxvaobas Seesabameba termini `droiTi dupleqsi~ (inglisurisagan time division duplex, TDD).

radioarxebis ZiriTadi maxasiaTeblebis CamonaTvali, romlebic Seesabameba Setyobinebis gadacemis fizikur doneze Sesasrulebel funqciebs, moicavs:

- maxasiaTeblebs, romlebic Seesabameba gamoyofil radioresurs;
- sainformacio Setyobinebebis gadacemis maxasiaTeblebs.

arxebis tipuri maxasiaTeblebi, romlebic gamoiyeneba Semdgom BWN fiWuri kavSiris da ugamtaro SeRwevis ganxilvisas, mocemulia qvemoT.

radioarxis sixSireTa zoli. radiosixSiruli menejmentis praqtikaSi gamoiyeneba sami maxasiaTebeli, romlebic axasiaTebis sixSirul zols da dakavSirebulia radioarxSi gamoyenebuli signalebis speqtrul TvissebebTan: sixSiris saWiro zoli (necessary bandwidth), dakavebuli sixSiruli zoli (occupied bandwidth) da mikuTvnebuli sixSiruli zoli (assigned bandwidth).

sixSiris saWiro zoli (Δf_{saW}) radiosixSiruli resursis gamoyenebis maCvenebelia. es aris `sixSiruli zolis sigane, romelic sakmarisia informaciis gadasacemad saWiro siCqariTa da xarixiT~ [1]. Setyobinebis gadacemis cifruli arxis mimarT xarixxis moTxovnas ukavSireben gadacemuli bitebis dasaSveb damaxinjebas. amave dros, bitebis (simboloebis) gadacemis siCqare emTxveva maTi mimdevrobis sixSires da ukupporciulia maTi xangrZlivobis: $R_B =$

$1/T_B$. saerTod, aucileblad iTvleba is sixSiruli zoli, romelic uzrunvelyofs radioimpulsis speqtruli simkvrivis centraluri (ZiriTadi) foTlis daumaxinjebel gatarebas. urTierTkavSiri simbloebis gadacemis siCqaresa da saWiros sixSirul zols Soris ganisazRvrebTanafardobiT:

$$\ddot{A}f_{saW} = 2/T_B = 2R_B. \quad (1.6)$$

dakavebuli zoli ($\ddot{A}f_{dak}$). es maCvenebeli, ganisazRvrebTanafardobiT arasasurvele gamosxivebis (unwanted emission) doniT radioarxis saWiros sixSiruli zolis gareT. arasasurvele gamosxiveba aris xelSeSlebis erT-erTo wyaro mezobeli sixSiruli arxisaTvis da maTi dasaSvebi done ganisazRvrebTanafardobiT radiosasualebebis eleqtromagnituri Setavsebadobis uzrunvelyofis moTxovnebiT. ITU-s ganmartebis mixedviT, dakavebuli sixSiruli zoli is zolia, romlis gareTac `misi sazRvriszeda da sazRvrisqveda sixSireebze radiogamosxivebis simZlavre Seadgens saerTo gamosxivebuli simZlavris dadgenil nawils~ [1]. arasasurvele gamosxivebis tipuri reglamentirebuli jamuri simZlavre aris 1%. adre Cven movixseniT, rom marTkuTxa impulsis energetikuli speqtris ZiriTadi foTlis simZlavris wili Seadgens daaxloebiT 90%-s. Sesabamisad, sixSireTa aucilebeli zolis gareT Tavmoyrilia ZiriTadi gamosxivebis 10%-mde simZlavre. misi aRmofxvrisa da $\ddot{A}f_{saW}$ da $\ddot{A}f_{dak}$ mniSvnelobebis daaxloebisaTvis atareben RonisZiebebs arasasurvele gamosxivebis CasaxSobad. CasaxSobis done ganisazRvrebTanafardobiT radiogamosxivebis speqtruli niRbiT. cnobebi sxvadasxva radiosasualebis radiogamosxivebis speqtruli niRbebis Sesaxeb ganxilulia konkretuli sistemebisadmi miZRvnil Semdgom TavebSi.

mikuTvnebuli sixSiruli zoli ($\ddot{A}f_{mik}$) aris speqtruli menejmentis normatiuli maCvenebeli, zoli `romlis farglebSic sadgurs aqvs radiogamosxivebis ufleba~ [1]. mikuTvnebuli sixSiruli zolis siganes, radiosixSiruli zolis ekonomiuri gamoyenebis moTxovnidan gamomdinare, gansazRvraven rogorc aucilebeli (saWiros) sixSiruli zolis siganisa da gadamtani sixSiris gadaxris absoluturi sididis ($|\ddot{A}f_0|$) gaormagebuli mniSvnelobis jams:

$$\ddot{A}f_{mik} = \ddot{A}f_{saW} + 2|\ddot{A}f_0|. \quad (1.7)$$

BWN-is arxebSi $\ddot{A}f_{mik}$ mniSvneloba amJamad Seadgens aTeul da aseul mghc-s.

monacemebis gadacemis siCqare radioarxis ewodeba bitebis nakadis teqnikur siCqares, romlebic gadaicema fizikuri donis protokolebis Sesabamisad. iTvleba, rom bitebis nakadis simbloebi, romlebic Seesabameba orobiTi Tvlis sistemis niSnebs `0~ da `1~, erTimeores uwyvetad mihyvebian. ase rom, monacemebis gadacemis R_D siCqare (data rate) ganisazRvrebTanafardobiT bitebis T_B xangrZlivobiT:

$$R_D = 1/T_B. \quad (1.8)$$

xSirad monacemebis gadacemis siCqaris ganzomileba $[R_D]=\text{bit/wm}$ emTxveva informaciis gadacemis siCqaris ganzomilebas [1]. aseTi damTxveva sulac ar niSnavs imas, rom $R_D=I$. es ki imis Sedegia, rom termini `biti~ warmoadgens semantikur omonims da gamoiyeneba orobiTi simbolos aRniSvnisTvis, rogorc SetyobinebaSi arsebuli informaciis materialuri erTeuli. Cveulebriv, radioarxSi xelSeSlebis zemoqmedebis Sedegad, Secdomebs bituri simbolos gadacemas, mivyavarT imasTan, rom $R_D > I$. amrigad, informaciis gadacemis siCqare ganisazRvrebis sami faqtoriT:

- bitebis nakadis gadacemis siCqariT anu monacemebis gadacemis siCqariT;
- TiToeuli biti simbolos mier gadatanili informaciis raodenobiT;
- gadacemis dros simbolos damaxinjebis albaTobiT.

axis gamtarunarianoba. gansazRvrebis Tanaxmad [4] axis gamtarunarianoba ewodeba am arxiT drois erTeulSi gadacemuli informaciis maqsimalur raodenobas, aRebuls signalis yvela SesaZlo wyarodan. orobiTi simetriuli arxisaTvis gamtarunarianobas gansazRvraven TanafardobiT:

$$C = R_B[\log_2 m + p_{\text{Sec}} \log_2 p_{\text{Sec}} + (1 - p_{\text{Sec}}) \log_2(1 - p_{\text{Sec}})],$$

sadac m gadacemuli simboloebis anbanis moculobaa (zomaa).

rogorc moyvanili Tanafardobidan Cans, cdomilebis albaTobis cvlilebas $0 \leq p_{\text{Sec}} \leq 0,5$ Seesabameba axis gamtarunarianobis cvlileba 1-dan 0-mde. situacias, rodesac $C=0$ ($p_{\text{Sec}}=0,5$) axis `wyveta~ ewodeba (am SemTxvevaSi gamosavali orobiTi mimdevroba SeiZleba miRebul iqnes arxiT raime signalebis gadacemis gareSe – sakmarisia isini mxolod gamoicno) [4].

praqtikaSi axis gamtarunarianobis gaangariSebisas iyeneben sxva formulas, romelsac zogjer Senonis Teoremis maTematikuri asaxva an Senonis zRvari ewodeba [4]:

(1.9)

$$C = \Delta F \cdot \lg \left(1 + \frac{P_s}{P_j} \right)$$

sadac P_s da P_j signalisa da xelSeSlebis simZlavris Sebisas;

ÄF aris axis sixSiruli zolis sigane.

mocemuli formula miuTitebs, rom SesaZlebelia axis gatarebis zolis siganisa da signalis simZlavris gacvla (da piriqit) gamtarunarianobis Secvlis gareSe.

ოპტიკა 2

2.1.2. რადიოსიგნალის გაცემის ფიზიკური გარემოს მაქსიმალური და რადიოსიგნალის გავრცელების ტიპების კლასიფიკაცია

გაცემის მერ გომოსივებული რადიოსიგნალი, მიმდინარეობს სივრცეში, გარე გარემოში ან ვაკუუმში. მაქსიმალური ანტენაში მიმდინარეობს გავრცელება, დამახასიათებელია ამოვსების და ტროპოსფერული დაბრუნება გარემოში, იონოსფერული ან მიწისპირა ობიექტიდან არეკვლით და ა.შ. უსადენო კავშირის ტიპების არსებობს რადიოსიგნალის გავრცელების მექანიზმები სხვადასხვაგვარია: ტიპური გარემოში გავრცელებიდან კვლავ არეკვლით, დიფრაქცია და გაფანტვაში [5].

რადიოსიგნალის გავრცელება გარემოში გარეგანი სივრცეში ან გარემოში *გაცემის ენერგეტიკული დაკარგვის (transmission loss for radio links)*. ისინი განისაზღვრება ორი ძირითადი ფაქტორით: აპარატურის ელემენტების მაქსიმალური და რადიოსიგნალის გავრცელების გარემოში ტიპებით [5]. განსხვავებენ რადიოსიგნალის (რადიოსიგნალის, როგორც არსებობს სტრუქტურული სივრცეში) სივრცეში დაკარგვის:

- რადიოსიგნალის ხარისხი საერთო დაკარგვის (total loss of a radio link), რომელიც ახასიათებს გაცემის გომოსივლეს და მიმდინარეობს სივრცეში მიმდინარეობს ტანაფარდობა;
- სისტემის დაკარგვის (system loss), რომელიც ახასიათებს გაცემის ანტენის სივრცეში და მიმდინარეობს ანტენის გომოსივლეს სივრცეში ტანაფარდობა;
- რადიოსიგნალის ხარისხი გაცემის დაკარგვის (transmission loss of a radio link), რომელიც ახასიათებს გაცემის ანტენის მერ გომოსივებულ და მიმდინარეობს ანტენის მერ მიმდინარეობს სივრცეში ტანაფარდობა;

- radiokavSiris xazis sabazo (ZiriTadi) danakargebi (bas³c transm³ss³on loss of a rad³o l³nk), romlebic saSualebas izleva gaTvaliswinebul iqnes electromagnituri talRebis mileva garemoSi gavrcelebis dros.

moce mul paragrafSi ganixileba faqtorebi, romlebic axasiaTebS garemomcvel sivrceSi radiotalRebis gavrcelebas da, Sesabamisad, radiokavSiris xazis sabazo danakargebis gansazRvras. pirobiTad am sabazo danakargebs or Semadgenlad yofen [6]:

- danakargebi, romlebic electromagnituri talRebis Tavisufal sivrceSi gavrcelebis danakargebis (free space basic transmission loss) equivalenturia;
- danakargebi, romlebic emateba Tavisufal sivrceSi gavrcelebis danakargebs (loss relat³ve to free space).

2.1.2.1. radiotalRebis gavrceleba Tavisufal sivrceSi. radiotalRebis realur garemoSi gavrcelebis danakargebi upiratesad gamowveulia maTi gafantviT. sivrceSi gamosxivebuli radiotalRebis energia vrceldeba zedapirze, romelic aRiwereba antenis mimarTulobis diagramis (**md**) formiT. gamomsxiveblidan mimRebis TandaTanobiT **daSorebisas zedapiris farTobi** matulobs, maSin rodesac gamosxivebuli energia aseve Tanabrad nawildeba antenis **md**-is zedapiris farTobze. amitom, electromagnituri energiis simkvrive zedapiris erTeulze pirvel da meore SemTxvevebSi gansxvavdeba: gamomsxiveblisagan daSorebisas igi mcirdeba. electromagnituri energiis simkvrivis aseT Semcirebas Tavisufal sivrceSi danakargebi (L_{Ts}) ewodeba [7]. amosavali Tanafardoba maTi angariSis dros aseTi saxisaa:

$$L_{Ts} = \frac{P_{gad}}{P_{mimR}} = \frac{P_{gad}}{\prod_{mimR} S_{mimR} \eta_{mimR}}, \quad (2.1)$$

sadac L_{Ts} aris danakargebi Tavisufal sivrceSi;

P_{gad} – gadamcemi antenis mier gamosxivebuli simZlavre;

P_{mimR} – mimRebi antenis mier miRebuli simZlavre;

D_{mimR} – miRebis wertilSi simZlavris nakadis simkvrive,

$$D_{mimR} = \frac{P_{gad} \eta_{gad} G_{gad}}{4\pi d^2};$$

$$S_{mimR} \text{ mimRebi antenis moqmedi farTobia, } S_{mimR} = \frac{G_{mimR} \lambda^2}{4\pi};$$

G_{mimR} da G_{gad} mimRebi da gadamcemi antenebis gaZlierebis koeficientebia;

ζ_{mimR} . da ζ_{gad} . mimRebi da gadamcemi antenebis margi qmedebis koeficientebia;
 d manZilia mimReb da gadamcem antenebs Soris;
 \ddot{e} talRis sigrZea.

zemoT mocemuli simZlavris nakadis simkvrivisa da mimRebi antenis moqmedi farTobis gamosaxulebebis SetaniT (2.1)-Si miviRebT:

$$L_{Ts} = \frac{P_{\text{gad}} 4\pi d^2 4\pi}{P_{\text{gad}} \eta_{\text{gad}} G_{\text{gad}} G_{\text{mimR}} \lambda^2 \eta_{\text{mimR}}} = \frac{(4\pi d)^2}{G_{\text{gad}} G_{\text{mimR}} \eta_{\text{gad}} \eta_{\text{mimR}} \lambda^2}. \quad (2.2)$$

gadamcem da mimReb antenebad izotropuli gamomsxiveblebis gamoyenebisas gamosaxuleba (2.2) (fiderSi danakargebis gaTvaliswinebis gareSe) gamartivdeba da miviRebT:

$$L_{Ts} = (4\ddot{e})^2 d^2 / \ddot{e}^2.$$

xSirad saWiroa gamosxivebuli energiis Tavmoyra sivrcis raRac areSi. amisTvis gamoiyeneba mimarTuli antenebi. antenebis mimarTulobiTi Tvisebebis gaTvaliswinebiT Tavisufal sivrcesi danakargebis gamoTvlis gamosaxuleba logaritmul formiT miiRebs Semdeg saxes [7]:

$$L_{Ts} = 20\lg(4\ddot{e}d) - 20\lg \ddot{e} - 10\lg(G_{\text{gad}} G_{\text{mimR}})$$

Tavisufal sivrcesi radiotalRebis gavrclebis modeli gansakuTrebiT farTod gamoiyeneba sistemis daproeqtetebis sawyis stadiaSi, vinaidan misi meSveobiT saSualeba gveZleva swrafad SevafasoT dasaproeqtetebeli radioxazebis energetikuli parametrebi. dazustebuli daproeqtetebis iyeneben ufro zust modelebs, romlebic saSualebas izlevian gaTvaliswinebul iqnes mravali meorexarixovani faqtori, romlebic gavlenas axdenen radiotalRebis gavrclebis realur procesebze.

magaliTad, $\bar{L}_p(d)$ saSualo danakargebi radiotalRebis gavrclebisas gadamcem da mimReb antenebs Soris d manZilze damokidebulebiT SeiZleba gamoiTvalos rogorc d -s n -uri xarixis funqcia, romelic gamosaxul iqneba d_0 etalonuri manZilis erTeulebiT (gadamcemi antenis Soreul zonaSi ganTavsebul wertilamde):

$$\bar{L}_p(d) \cong \left(\frac{d}{d_0} \right)^n. \quad (2.3)$$

$\bar{L}_p(d)$ sidide, Cveulebriv, gamoisaxeba decibelebiT (db):

$$\bar{L}_p(d)(\text{db}) = \bar{L}_s(d_0)(\text{db}) + 10n \lg \left(\frac{d}{d_0} \right).$$

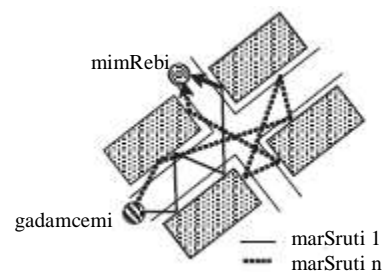
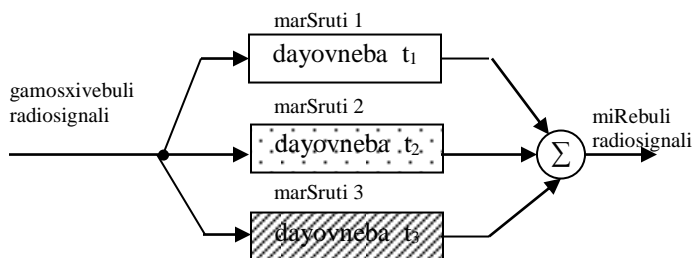
მირებულის, რომ d_0 დიდი ზომის ფიზიკური 1 კმ-ის თვით, 100 მ-ის კი – მცირე ზომის ფიზიკური. $L_S(d_0)$ სიდიდე დგინდება ემპირიულად.

(2.3)-სი n ხარისხის მათემატიკური დამოკიდებულება სივრცით, ანტენის სიმაღლე და გავრცელების გარემოზე. თავისუფალი სივრცის სიგნალის სიზღვრე მანძილის კვადრატის უპროპორციულად მცირდება, ე.ი. $n=2$, ხოლო ვინაობის არსებობის შემთხვევაში $n > 2$, ყალბი კუბის გავრცელების კი ვლინდება ე.წ. "ტელურის" ეფექტი და $n < 2$.

2.1.2.2. რადიოტელურის მრავალხვიური გავრცელების მოვლა

უდასოვროდ სისტემების გამოყენებული რადიოტელურის დიაპაზონის რადიოტელურის საერთო **ტელურის** დაბრუნების ცუდი გარემოების უნარი და ზრდად ურთივე გავრცელება. რადიოტელურის გავრცელების გზაზე, ამრეკლავი, ტოპოგრაფიული მატერიალური ობიექტების არსებობის გამო მიმდებარე ანტენაზე მრავალხვიური არეკვლის შედეგად მოხდება ერთი და იმავე სიგნალის მრავალი ასლი, რაც მირებულის შექმნის ე.წ. *მრავალხვიური ინტერფერენცია* (სურ. 2.3). მრავალხვიური ინტერფერენციის შედეგად ჯამური სიგნალი მირებულის შექმნის დროს უნაკლები, განსხვავებული ამპლიტუდის მქონე, საკუთარი ასლების ინტერფერენცია. ვინაიდან პირდაპირი და არეკლილი სიხვეები სხვადასხვა მანძილს გადის, სიგნალის ასლები ერთმანეთს განსხვავდება. ამას გარდა მირებულის შექმნის სიგნალის ამპლიტუდები შეიძლება როგორც შეამდნენ, ისე გამოაკლდნენ ერთმანეთს (სტანტან ერთმანეთი). ასეთ მოვლას *მიუცემა* ეწოდება. მიუცემის დინამიკურმა დიაპაზონმა შეიძლება 40 დბ-ს მიაღწიოს [5].

განსხვავებულ სივრცით გადამცემის პროცესზე მრავალხვიური ინტერფერენციის გავლენის ორ მხარეს. თუ მირებულ სიგნალს (ასლებს) სივრცით მაქსიმალური დროებით არაა რამდენად ერთი გადამცემი სიმბოლო ხანგრძლივობა, ინტერფერენცია მოხდება, **სიმბოლოს ხანგრძლივობის** ფარგლებში და მას სიგნალის ინტერფერენცია ეწოდება. თუ მაქსიმალური დროებით სიგნალს სივრცით არაა რამდენად ხანგრძლივობა ერთ გადამცემი სიმბოლო, მაშინ ინტერფერენციის შედეგად შეამდნება სიგნალები, რომლებიც განსხვავებულ სიმბოლოებს უკავშირდებიან. ის შედეგად ადგილი ექნება ე.წ. *სიმბოლოს ინტერფერენცია*, რომელიც სიგნალის მირებულის ხარისხის ტელურის გამოცემა დამახინჯების უფრო დიდი ეფექტი.



sur. 2.3. radiotalRebis gavrcelebis mravalsxiviani buneba

2.1.2.3. radiotalRebis gavrcelebis ZiriTadi modelebi. ganasxvaveben realur garemoSi radiotalRebis gavrcelebis sam ZiriTad meqanizms: *arekvla, gafantva da difraqcia.*

arekvla xdeba maSin, rodesac radiotalRa ecema obieqts, romlis zomebic mniSvnelovnad aRemateba talRis sigrZes.

difraqcia xdeba maSin, rodesac radiotalRa ecema **ბასრპირიან** dabrkolebebs (magaliTad, saxlis saxuravs, qarxnis milebs da a.S.), romlebic am SemTxvevaSi meoreuli talRis aRmZvrebilia. swored difraqciis **gamos**, rom zogjer eleqtromagnituri energia gadamcemsa da mimRebs Soris vrceldeba ara pirdapiri xedvis xazze.

radiotalRebis gafantvis efeqti vlindeba maTi gavrcelebisas iseT garemoSi, romelic gajerebulia mcire zomis obieqtebiT (talRis sigrZeze gacilebiT naklebi zomis, magaliTad, wvimis wveTebi, setyva - xorxoSela da sxv.). Tu talRa xvdeba uswormasworo zedapirs, esec iwvevs energiis gafantvas an arekvlas yvela mimarTulebiT. qalaqSi gafantvis gamomwvevi tipuri dabrkolebebia – ganaTebis boZebi, sagzaო niSnebi, xeebi da sxv.

radiotalRebis gavrcelebis trasaze danakargebis SefasebisaTvis iyeneben meTodebis or jgufs: *statistikursa da determinirebuls.* statistikuri meTodebi efuZneba radiotalRebis gavrcelebis procesebis xangrZlivi gamokvlebebis Catarebas realur garemoSi eqsperimentuli Sedegebis miRebiT. determinirebuli meTodebi gvTavazoben radiotalRebis trasebis profilebis grafikul agebas da mis Semdgom analizs. am ori meTodis safuZvelze miRebulia sxvadasxva garemoSi radiotalRebis gavrcelebis mravali modeli. 2.1 cxrilSi mocemulia tipuri modelebi, romlebsac yvelaze xSirad iyeneben Tanamedrove mobiluri kavSirisa da usadeno SeRwevis sistemebis daproeqtebisas.

radiotalRebis gavrcelbis ZiriTadi modelebi, gamoyenebuli Tanamedrove mobiluri
kavSirisa da usadeno Serwevis sistemebis daproeqtetebisas

modelis dasaxeleba	modelis maTematikuri forma	modelis ZiriTadi parametrebis mniSvnelobebi
1	2	3
<p>radiotalRebis pirdapiri xedvis pirobebSi gavrcelbis modeli (ix. ITU-R Rec. P-530)</p>	$L_{ls} = A_g + L_{dif} + L_t + L_a + L_r$	<p>A_g – danakargebi at- mosferoSi; L_{dif} – difraqciuli danakargebi; L_t – danakargebi, ga-mowveuli signalis miyuCebiT radiotal- Rebis mravalsxiviani gavrcelbisas; L_a – danakargebi, ga- mowveuli refraqciiT; L_r – danakargebi, gamowveuli hidro-meteoruli movlen.</p>
<p>radiotalRebis difraqciuli gavrcelbis modeli (ix. ITU-R Rec. P-526)</p>	$L_{dif} = -20 \lg \left(\frac{\sqrt{[1 - C(v) - S(v)]^2 + [C(v) - S(v)]^2}}{2} \right)$	<p>$C(v)$ da $S(v)$ – frenelis kompleqsuri integralis namdvili da warmosaxviTi nawilebi</p>

cxr.2.1 pagrZeLeba

1	2	3
<p>xatas empiriuli modeli</p>	$L_{\text{gareubani}} = L_{\text{qalaqi}} - 2 \lg(f / 28)^2 - 5,4;$ $L_{\text{sofeli}} = L_{\text{qalaqi}} - 4,78(\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 40,94.$ $L_{\text{qalaqi}} = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg h_1 + (44,9 - 6,55 \lg h_1) \lg d + a(h_2) + a(v_r) + a(b) + a(h_1; f);$	<p>f – muSa sixSire; h_1 – gadamcemi antenis simaRle; h_2 – mimRebi antenis simaRle; d – trasis sigrZe; b – dasaxlebis simkvrive; d_0 – pirdapiri xedvis manZili; $a(h_2), a(v_r), a(b), a(h_1; f)$ – Sesworebis koefi-cientebi</p>
<p>parsonis modeli</p>	$L_{\text{saerTo}} = 20 \lg(0,7h_1) + 81 \lg h_2 - 0,025 f - 26 \lg(0,025 f) + 86 \lg\left(\frac{f+100}{156}\right) - \left(40 + 14,5 \lg\left(\frac{f+100}{156}\right)\right) \lg d - 0,265 b + 0,37(h_1 - h_2) - 0,87v + 5,5$	<p>f – muSa sixSire; h_1 – gadamcemi antenis simaRle; h_2 – mimRebi antenis simaRle; d – trasis sigrZe; v – garemos urbani-zaciis xarisxi</p>
<p>modeli COST 231 (xatas modifirebuli modeli)</p>	$L_{\text{qalaqi}} = 46,3 + 33,9 \lg f - 13,82 \lg h_1 - a(h_2) + (44,9 - 6,55 \lg(h_1)) \lg d + C_m;$	<p>f – muSa sixSire; h_1 – gadamcemi antenis simaRle; h_2 – mimRebi antenis simaRle; d – trasis sigrZe; C_m – damatebiTi danakargebi (0-3db)</p>

2.1.3. xelSeSla, damaxinjeba da miyuCeba **ugamtar**o kavSiris arxSi

2.1.3.1. xelSeSlebs ZiriTadi saxeebi. radioarxiT gadacemuli signalebi ganicdian sxvadasxvagvari dabrkolebis zemoqmedebas. xelSeSla SeiZleba iyos: xelovnuri da bunebrivi. bunebriv xelSeSlebs xSirad xmauri ewodeba. esaa: radioaparaturis sakuTari (Siga) xmauri, dedamiwis siTburi gamosxivebis xmauri, aseve aramiwieri xmauri, atmosferos xmauri da sxv.

siTburi xmauri radioaparaturis sxvadasxva wredSi warmoiqmneba atomebisa da molekulebis siTburi moZraobis gamo. siTburi xmauris energia Tanabradaa ganawilebuli sixSireTa farTo diapazonSi, ris Sedegadac miRebulia, rom am xmauris speqtri CaiTvalos Tanabrad. siTburi xmauris am Tvisibis gamo mas xSirad `TeTr xmauri~ ewodeba. TeTri xmauris simZlavre Δf gatarebis zolis mqone pasiuri wredis gamosavlelze ganisazRvreba $P_{xm} = N_o \Delta f$ gamosaxulebiT, sadac N_o aris 1 hc sixSirul zolze mosuli xmauris simZlavris simkvrive [5]. signalis mdgradi miRebis uzrunvelsayofad aucilebelia misi simZlavre, sul cota, mravaljer aRematebodes xmauris simZlavres $P_{sig} \gg P_{xm}$.

atmosferuli xmauri warmoiqmneba atmosferoSi swrafi ganmuxtvebis (elvis) Sedegad. **o8o** gamoirCeva impulsuri xasiaTiT, didi simZlavriT da aqvs farTo speqtri. bolos, aramiwieri xmauri ganpirobebulia iseTi movlenebiT, rogoricaa TermobirTvuli procesebi da elementaruli damuxtuli nawilakebis moZraoba kosmosSi, atmosferosa da miwis zedapiris mier mzis sxivebis STanTqma – areklva da sxv. aramiwier xmaurs aqvs dinamikuri diapazoni daaxloebiT 11 db da SesamCnevni xdeba 20 mghc sixSireze zeviT [5].

sasargeblo signalze zemoqmedebis mixedviT ganasxvaveben aditiur da multiplikatiur (araaditiur) xelSeSlebs. *aditiuri* xelSeSlebi ganpirobebulia garemoSi sxvadasxva warmomavlobis radiogamosxivebis arsebobiT: bunebrivis (bunebrivi gamomsxiveblebisagan) da xelovnuris (ZiriTadad, sxva radioarxebisagan). *multiplikatiuri* xelSeSlebi, xSirad miyuCebabad (*fading*) wodebuli, ganpirobebulia radiosignalebis gadacemis garemos mdgomareobiT (neli miyuCebebi inglisuridan – *slow fading*) da radiotalRebis mravalsxiviani gavrcelebis movleniT (swrafi miyuCebebi - *fast fading*).

gadacemuli da miRebuli radiosignalebis urTierTkavSiri, gansazRvruli $S(t) \rightarrow S^*(t)$ asaxviT (ix. § 2.1.1.2), zogadad gamoisaxeba TanafardobiT:

$$S^*(t) = \acute{a}(t) S(t) + n(t),$$

sadac

$\acute{a}(t)$ aris Tanamamravli, romelic iTvaliswinebs $S(t)$ signalis milevas (Sesustebas) da miyuCebas;

$n(t)$ – Tanamamravli, romelic axasiaTebis aditiuri xelSeSlebis moqmedebas.

naTqvamidan gamomdinareobs, rom aditiuri xelSeSla vlindeba signalisagan damoukideblad, maSin, rodesac multiplikatiuri warmoiqmneba mxolod signalis arsebobis pirobebSi da gamovlindebian misi donis cvlilebiT.

orive dasaxelevuli xelSeSliS (aditiurisa da multiplikatiuris) saerTo Tviseba aris droSi maTi cvlilebebis SemTxveviToba. Sesabamisad $S(t) \rightarrow S^*(t)$ asaxva SemTxveviTi procesia, romlis Tvisebac vlindeba $U(t)$ signalis (radioarxis Sesavalze) asaxvaSi, radioarxis gamosavalze $U^*(t)$ signalSi. gamosavleli signalebis Sesabamisobis xarisxi Sesasvlel signalebTan ganisazRvrebaba gamoyenebuli saarxo kodirebisa da modulaciis meTodebiT, orive saxis xelSeSlebis statistikuri maxasiaTeblebiT, agreTve miRebuli (P_{sig}) signalebisa da (P_{xm}) xmauris xelSeSlebis simZlavreTa TanafardobiT. sxva Tanabar pirobebSi fardobis P_{sig}/P_{xm} gazrda Seesabameba radioarxi \circ signalebis gadacemis utyuarobis gazrdas. P_{sig}/P_{xm} fardobis kontroliT SesaZlebelia sasargeblo signalis donis regulireba ise, rom uzrunvelyofil iqnes SetyobinebaTa gadacemis saWiro utyuaroba.

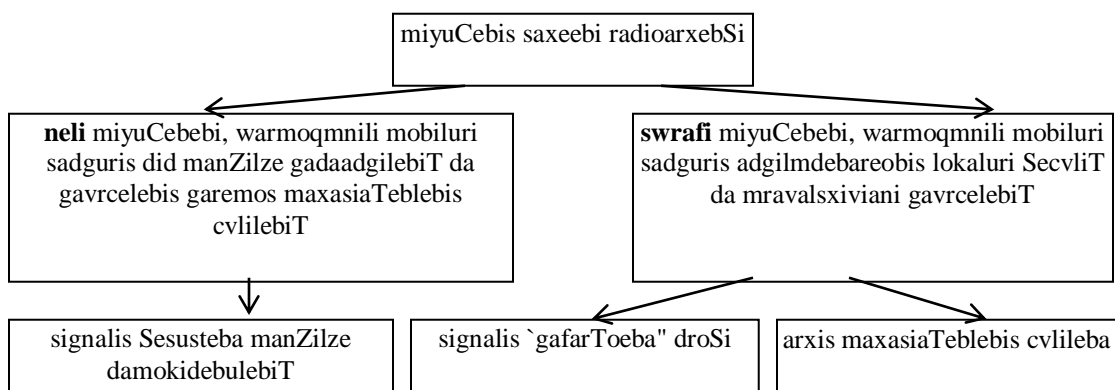
samomxmareblo sadguris gadaadgilebisas erTdroulad ori procesi xorcieldeba:

- rezultirebuli signalebis warmomqmneli radiotalRebis fazuri Tanafardobebis cvlileba, am radiotalRebis gavrcelbebis gzebis SenarCunebiT;
- kvlavarekvilis wertilebis Secvla da, rogorc Sedegi, radiotalRebis gavrcelbebis gzebis Secvla.

orive procesi iwvevs rezultirebuli signalis momvlebis donis cvlilebas, magram am cvlilebebis xasiaTebi mniSvnelovnad gansxvavdeba. miRebuli signali $r(t)$ momvlebiT da $\acute{o}(t)$ sruli faziT SeiZleba Caiweros $S(t) = r(t)\cos[\acute{o}(t)]$ saxiT. es momvlebi SeiZleba warmodgenil iqnes, rogorc $r(t) = U(t) \cdot r_0(t)$, sadac pirveli Tanamamravli gansazRvravs momvlebis nel cvlilebebs (miyuCebes), dakavSirebuls radiotalRebis gavrcelbebis gzebis cvlilebasTan, meore Tanamamravli swrafi miyuCebesbia, dakavSirebuli fazuri Tanafardobebis cvlilebebTan.

2.1.3.2. swrafi da neli miyuCebesbi. *miyuCebesSi* gulisxmoben signalis donis mouwesrigebel cvlilebebs miRebis wertilSi, gamowveuls radiogadacemis pirobebiTa da radiotalRebis gavrcelbebis garemos TvisebebiT. radiokavSiris arxebSi miyuCebis ZiriTadi saxeebis klasifikacia da maTi gamovlenis meqanizmebi mocemulia 2.4 suraTze [3, 8, 9].

neli miyuCebebi axasiaTeben antenis mier miRebuli signalis ganmsazRvrelī eleqtruli velis daZabulobis momvlebis efeqturi mniSvnelobis (\dot{A}_{ef}) SemTxveviT cvlilebas. neli miyuCebebis warmoqmna ganpirobegulia radiotalRebis refraqciis pirobebis cvlilebiT (atmosferos mdgomareobis cvlileba, naleqi, dRisa da Ramis cvla da a.S.), agreTve mobiluri sadguris gadaadgilebiT iseT manZilze, romelic mniSvnelovnad aWarbebs talRis sigrZes.



sur. 2.4. radiokavSiris arxebSi miyuCebis ZiriTadi saxeebis klasifikacia

miyuCebis es saxe aRiwereba miRebuli signalis momvlebis myisi mniSvnelobebis logariTmul-normaluri ganawilebis kanoniT da misi albaTobebis ganawilebis simkvrivis $p(x)$ funqcias aqvs saxe:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x \sigma_x}} \cdot \exp\left\{-\frac{[\lg x - m_x]^2}{2\sigma_x^2}\right\},$$

sadac

m_x aris maTematikuri molodini (db);

σ_x^2 – signalis miyuCebis dispersia (db).

\dot{A}_{ef} -is logariTmuli mniSvnelobebis ganawilebis integraluri funqcia $F(x)$ ganisazRvrebTa TanafardobiT:

$$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{t} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - m_x}{\sigma}\right)^2\right] dt = \frac{1}{2}\left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - m_x}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right],$$

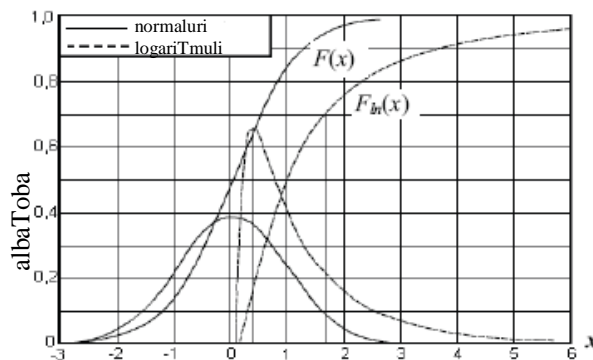
sadac,

$$\operatorname{erf}\left(\frac{\ln x - m_x}{\sigma\sqrt{2}}\right) \quad \text{albaTobis integralia} \quad . \quad \operatorname{erf}(\xi) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\xi e^{-t^2} dt$$

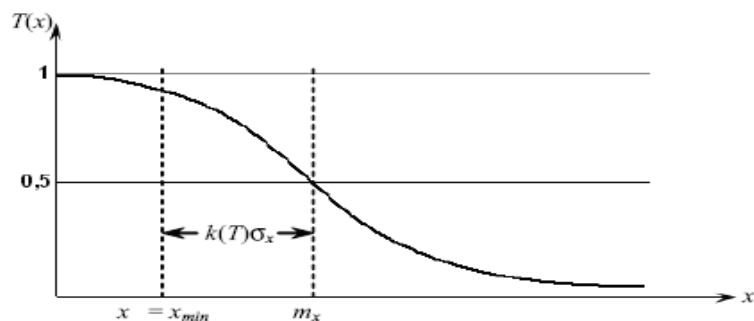
2.5 suraTze mocemulia \hat{A}_{erf} -is logariTmuli mniSvnelobebis ganawilebis integraluri funqciisa da albaTobis simkvrivis grafikebi.

miRebis wertilSi eleqtruli velis daZabulobis mimarT normatiuli monacemebi, Cveulebrivad, mocemulia medianuri sididis m_x logariTmuli mniSvnelobebis saxiT. albaToba imisa, rom neli miyuCebebis Sedegad x realuri mniSvneloba naklebia Tu aWarbebs m_x -s aris 50%. T drois xvedriTi wili, romlis ganmavlobaSi mniSvnelobebi $x \leftrightarrow E_{\text{erf}}$ aWarbebs garkveul zRvrul mniSvnelobas $x_{zR} = X$ emTxveva $p(x > X) = 1 - F(X)$ mniSvnelobas, sadac $X = 20 \lg x_{zR}$ (T sidide izomeba procentobiT, %). X -is Semicrebas m_x -is mimarT Seesabameba T -s gazrda, xolo matebas T -s Semicreba (sur. 2.6).

swrafi miyuCebebi, warmoqmnili mobiluri terminalis gadaadgilebiT mokle manZilze (talRebis sigrZis Tanazomadi), gansazRvraven miRebis wertilSi eleqtruli velis cvlilebas, gamowveuls radiotalRebis mravalsxiviani gavrclebiT.



sur. 2.5. miRebis wertilSi eleqtruli velis daZabulobis realuri da logariTmuli mniSvnelobebis simkvrivis albaToba da integraluri funqcia



sur. 2.6. gadaWarbebis drois fardobiTi wilis damokidebuleba sasazRvro doneze $x_{zR} = x_{min}$

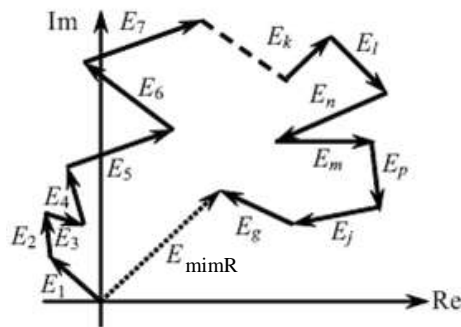
eleqtromagnituri talRebis mravalsxivianobis fizikuri meqanizmebi gansxvavdeba sxvadasxva sixSireze, magram maTi Sedegi erTnairia, kerZod, E_{mimR} signali mimRebi antenis Sesasvlelze ganisazRvrebaxvadasxva sxivis elementaruli E_i signalebis veqtoruli jamiT (sur. 2.7), e.i.

$$E_{mimR} = \sum_{i=1}^n E_i e^{i\phi_i},$$

sadac

ϕ_i aris i -uri sxivis droiTi Zvra fazis mixedviT;

n – sxivTa ricxvi.



sur. 2.7. miRebis wertilSi jamuri daZabulobis velis formirebis principi radiotalRebis mravalsxiviani gavrcelobis

miRebis wertilSi sxvadasxva gziT mosuli gansxvavebuli fazis mqone ramdenime signalis jamuri signali SeiZleba iyos saSualo doneze rogorc maRali, ise dabali. am dros signalis miyuCeba, gamowveuli maTi fazebis da amplitudebis araxelsayreli damTxveviT, SeiZleba Zalian Rrma aRmoCndes.

rodesac gadamcemi mimRebisatvis imyofeba pirdapiri xedvis zonis gareT, am ukanasknelis Sesasvlelze aRiniSneba radiosignalebis mxolod gafantuli komponentebi. Tu isini

modian sxvadasxva mimarTulebidan da Tanazomadi intensivobiT, maSin swrafi miyuCebis Sesabamisi eleqtruli velis E_{mimR} momvlebis cvlileba mimRebi antenis Sesasvlelze aRiwereba **releis** ganawilebis funqciiT (ix. sur. 2.8.):

$$p(x) = \frac{x}{\sigma_{\text{ef}}^2} \exp\left[-\left(\frac{x}{2\sigma}\right)^2\right], \quad x > 0$$

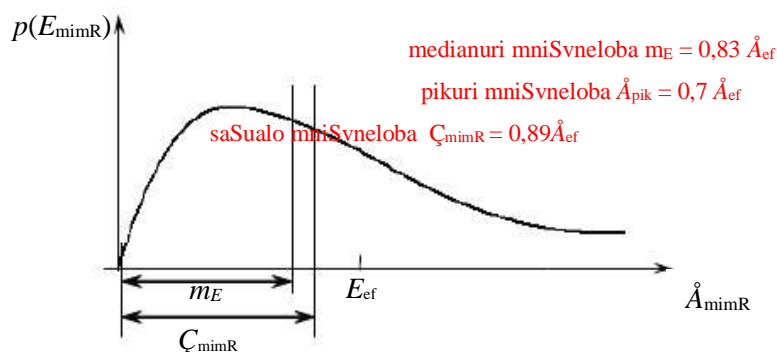
es imas niSnavs, rom mTeli im drois ganmavlobaSi, sanam \dot{A}_{ef} SeiZleba ucvlelad CaiTvalos, myisieri mniSvnelobis simkvrivis albaToba eqvemdebareba Semdeg Tanafardobas:

kidev erTxel xazga: $p(E_{\text{mimR}}) = \frac{E_{\text{mimR}}}{E_{\text{ef}}^2} \exp\left[-\left(\frac{E_{\text{mimR}}}{2E_{\text{ef}}}\right)^2\right]$, $E_{\text{mimR}} > 0$ maSin emorCileba releis ganawilebis kanons, Tu miKebis wertuSi arsebobs mravaljer arekiiii sxivebis didi raodenoba da ar aris pirdapiri sxivi. Tu arsebobs pirdapiri sxivi, romelic sxvas amplitudiT Warbobs momvlebis myisieri mniSvnelobebis ganawileba aRiwereba relei-raisis kanoniT [3]:

$$p(x) = \frac{x}{\sigma_x^2} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \cdot \exp(-K) \cdot I_0\left(\frac{x}{\sigma_x} \sqrt{2K}\right), \quad x \geq 0,$$

sadac $I_0(z)$ beselis pirveli saxis nulovani rigis modificirebuli funqciaa [10];

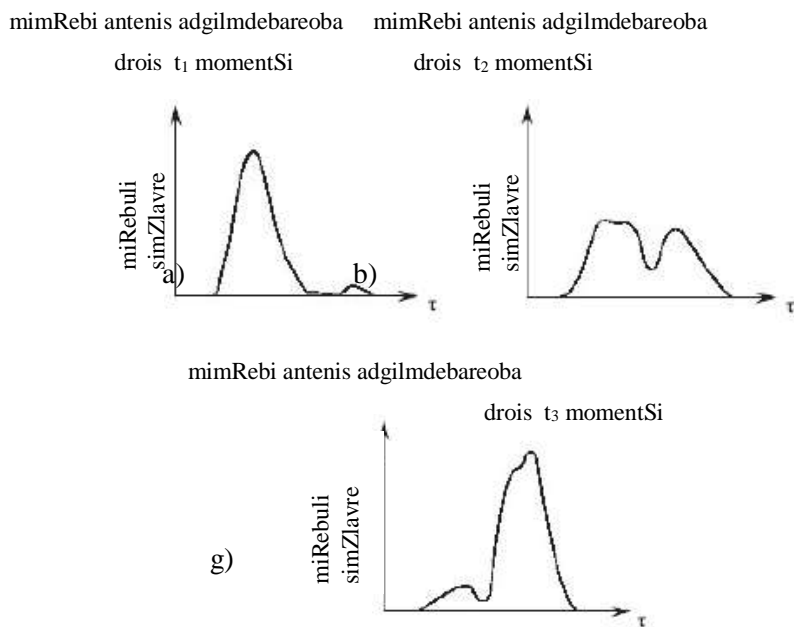
K parametria, romelic axasiaTebis pirdapiri sxivis energiisa da signalis jamuri gafantuli energiis fardobas (rodesac gadamcemsda da mimRebs Soris ar arsebobs pirdapiri xedvis xazi $K = 0$).



sur. 2.8. eleqtruli velis daZabulobis myisieri mniSvnelobebis ganawilebis simkvrive miRebis wertuSi (E_{mimR})

swrafi miyuCebebis gamovlenis Sedegebi mocemulia 2.9 suraTze, sadac naCvenebia mravalsxiviani arxis reaqcia mokle impulsebze mimRebi sadguris antenis sxvadasxva adgilmdebareobis drois (erTjeradi cvlileba Seadgens 0,4 ě-s) drois sxvadasxva momentSi, damokidebuli ô dayovnebaze [3].

am SemTxvevaSi TviT ô dayovneba aris droSi signalis gafarToebis Sedegi, romelic gamowveulia miyuCebiani arxis impulsuri maxasiaTeblebis `araoptimalurobiT~. dakvirvebis t dro dakavSirebulia sivrcul cvlilebebTan, romlebic gansazRvavs arxis `arastacionarul~ moqmedebas. 2.9 sur-ze Cans, rom TiToeuli ganxiluli momentisaTvis gamoZaxili mniSvnelovnad gansxvavdeba erTmaneTisagan amplitudiTa da miRebuli simZlavriT (TiToeuli figuris mier Semoxazuli farTobis mixedviT).



sur. 2.9. mravalsxiviani arxis reaqcia mokle impulsebze

dayovnebis drosa da antenis adgilmdebareobaze [3]

signalis `gafarToeba~ sixSirul areSi (droiTis analogiurad) xasiaTdeba *arxis koherentulobis zoliT* (es sixSireTa is area, romelSic signalis speqtris Semdgenebi iTvleba korelirebulebad, xolo arxi maT atarebs daaxloebiT erTnairi mileviTa da fazaTa wrfivi cvliT – (sur. 2.10, b). aseve analogiurad, arxis arastacionaruli moqmedeba droSi xasiaTdeba arxis koherentulobis droiT, xolo sixSirul areSi – arxis miyuCebis siCqariT anu e.w. speqtris *dopleriseuli gafarToebiT* (Doppler spread).

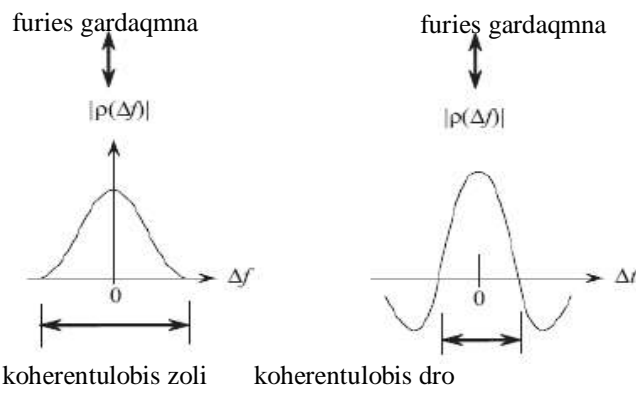
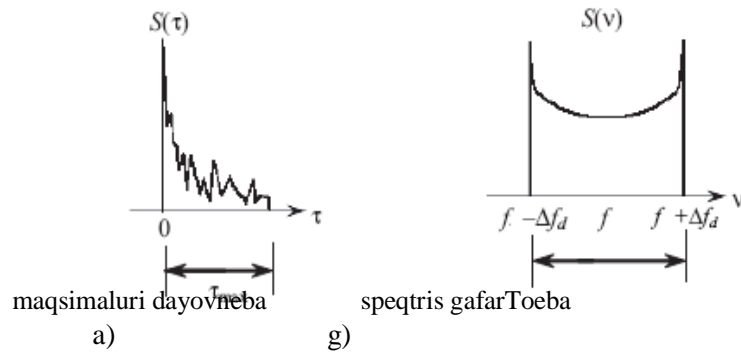
amrigad, swrafi miyuCeba damaxasiaTebelia arxisaTvis, romelSic koherentulobis dro naklebia simbolos xangrZlivobaze $T_{koh} < \dot{O}_s$, da korelaciis intervali mcirea signalis gadacemisaTvis saWiro drosTan SedarebiT. am drois ganmavlobaSi miyuCebis xasiaTi araerTxel icvleba, rac iwvevs signalis damaxinjebas.

nel miyuCebas adgili aqvs, Tu $T_{koh} > \dot{O}_s$. aq drois intervali, romlis ganmavlobaSi arxis moqmedebas korelirebuli xasiaTi aqvs, metia, vidre simbolos gadacemis dro. gadacemuli simboloebi ar maxinjdeba formiT, magram, iseve rogorc amplituduri miyuCebis dros, gadacemis xarixis gauareseba gamowveulia signali/xmauri fardobis SemcirebiT.

arxSi miyuCebis modelirebis erT-erTi meTodi SemogvTavaza f. belom (Phillip A. Bello) [11]. mis modelSi mimRebis antenaze mosuli signalebi arakorelirebulad aris navaraudebi. kerZod damtkicebulia [11], rom aseTi arxi, farTo gagebiT, stacionarulia rogorc droiT, ise sixSirul areSi. miyuCebiani arxisaTvis aseTi modelis gamoyenebis Sedegad, belom miiRo universaluri damokidebulebebi, romelTa meSveobiTac SesaZlebelia arxis aRwera drois nebismier momentsa da nebismier sixSireze.

sur. 2.10 (a, b, g, d) gamosaxulia oTxi aseTi funqcia, romlebic Seadgenen belos modelis safuZvels mobiluri radiokavSiris arxebisaTvis [8, 9]. 2.10, a sur-ze naCvenebia mravalsxivianobas daqvemdebarebuli $S(\hat{\omega})$ signalis intensivobis profilis $\hat{\omega}$ dayovnebase damokidebuleba. $S(\hat{\omega})$ funqcia gansazRvravs gansaxilveli signalis miRebuli gafantuli simZlavris damokidebulebas $\hat{\omega}$ dayovnebase, mimRebis Sesavalze pirveli mosuli signalis drois mimarT. amis codna saSualebas gvaZlevs ganvsazRvroT, Tu rogoraa damokidebuli miRebuli signalis simZlavre dayovnebase, daumaxinjebel signalTan SedarebiT. maqsimaluri dayovneba ($\hat{\omega}_{max}$) aris dro pirveli da bolo komponentebis miRebaTa Soris, romlis Semdegac gafantuli mravalsxiviani komponentis simZlavre aRmoCndeba yvelaze mZlavri komponentisaTvis dawesebul zRvrul mniSvnelobaze qvemoT. aRsanisnavia, rom idealur sistemaSi (dayovneba nulis tolia) $S(\hat{\omega})$

funqcia Sedgeba delta funqciis saxis erTi impulsisagan, romlis woniTi koeficienti jamuri simZlavis tolia.



a) mravalsxviani gavrcelbis intensivobis profili, $S(\delta)$;

b) sixSireTa gancalkevebis korelaciuri funqcia, $|\tilde{n}(\Delta f)| - (S(\delta)$ funqciis furie-saxe);

g) e.w. dopleris simZlavis speqtri – dopleriseuli cvlilebis funqcia;

d) drois gancalkevebis korelaciuri funqcia, $|\tilde{n}(\Delta f)| - (S(\delta)$ funqciis furie-saxe)

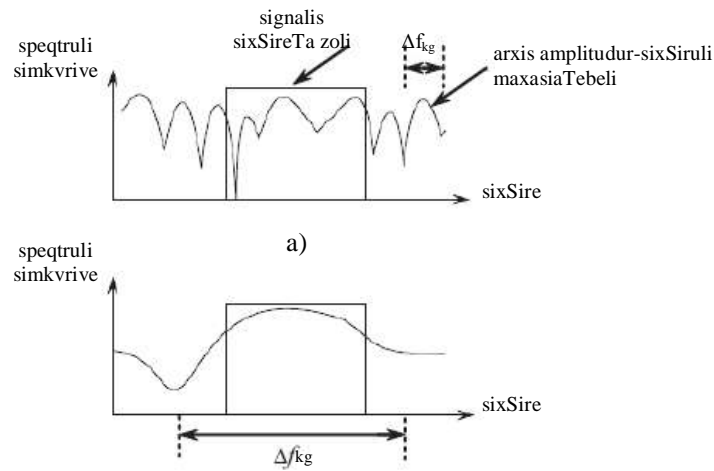
sur. 2.10. arxis korelaciuri funqciebisa da simZlavris simkvrivis funqciebis

Tanafardobebi [3]

urTierTkavSiri signalis gavrcelbis maqsimalur $\hat{\sigma}_{\max}$ dayovnebas da miyuCebian arxSi simbolos gadacemis T_s dros Soris SeiZleba ganvixiloT gadacemis xarisxis Semcirebis ori meqanizmis - sixSirul-seleqciuri miyuCebisa da sixSirul-araseleqciuri (amplituduri) miyuCebis poziciidan:

- sixSirul-seleqciur miyuCebas miviRebT im SemTxvevaSi, Tu signalis speqtris sigane $\ddot{A}F_S$ sWarbobs koherentulobis zolisas (igive piroba SeiZleba gamoisaxos $\hat{\sigma}_{\max} > T_s$ utolobis saxiT). arxi araerTgvarovnad axdens gavlenas signalis speqtris sxvadasxva ubanze, vinaidan koherentulobis zols gareT isini ganicdian damoukidebel damaxinjebebs. amasTanave mravalsxiviani komponentebi miRebis wertilSi midian im simbolos droiTis intervalis zRvars gareT, romelic miiReba `ZiriTad sxivze~ (sixSirul-seleqciuri miyuCebis Cveulebrivi Tanamgzavria simboloTaSorisi interferencia);
- radioarxi *sixSirul-araseleqciuria* da eqvemdebareba *amplitudur miyuCebas*, Tu signalis gavrcelbis maqsimaluri dayovneba naklebia mis xangrZlivobaze: $\hat{\sigma}_{\max} < T_s$. amasTanave signalis ZiriTadi mravalsxiviani komponentebi aswreben mimRebSi moxvedras simbolos ZiriTadi nawilis miRebis drois ganmavlobaSi. yvela speqtruli mdgeneli eqvemdebareba arxis erTian zemoqmedebas, radgan $\ddot{A}f_{koh}$ koherentulobis zoli ufro farToa, vidre $\ddot{A}F_S$ sistemis zoli. simboloTa interferencia praqtikulad ar xdeba (droiTis gafantva ar iwvevs SesamCnev zeddebas mezobel simboloebs Soris). da mainc, signalebis gadacemis xarisxi uaresdeba vinaidan maT dauyofad komponentebs SeuZlia Sejamdnen arakoherentulad, rac iwvevs signali/xmauri fardobis mniSvnelovan Semcirebas.

amplituduri da sixSirul-seleqciuri miyuCebebis damaxasiaTebeli speqtruli diagrama mocemulia 2.11 suraTze [8, 9].



sur. 2.11. sixSirul-seleqciuri (a) da amplituduri (b) miyuCebebis ilustracia [3]

signalis gafarToeba drois mixedviT aseve SeiZleba ganvixiloT sixSirul areSi $|\tilde{n}(\Delta f)|$ funqciis gamoyenebiT, **romelic axasiaTebis or signalze arxis reaqsiebs korelacias**, rogorc am signalebis sixSireTa sxvaobis funqcias. koherentulobis zoli Δf_{koh} aris im sixSireTa ubnis siganis statistikuri sazomi, romlis farglebSic signalis sixSirul komponentebis aqvT amplituduri korelaciis didi albaToba. am zolSi arxi praqtikulad erTnairad moqmedebis yvela speqtrul mdgenelze, magaliTad, gamoavlina Tu ara miyuCeba. koherentulobis zolis sigane Δf_{koh} da signalis maqsimaluri dayovneba $\hat{\sigma}_{max}$ erTmaneTTan dakavSirebulia miaxloebiTi TanafardobiT - $\Delta f_{koh} \approx 1/\hat{\sigma}_{max}$.

koherentulobis (korelaciis) dro T_{koh} drois intervalia, romlis ganmavlobaSic arxis maxasiaTeblesi mniSvnelovnad ar icvleba. T_{koh} parametri da $|\tilde{n}(\Delta f)|$ funqcia Seicaven informacias arxi miyuCebis siCqaris Sesaxeb.

2.1.3.3. dopleris efeqti. momxmareblis mowyobilobis (terminalis) adgilis Secvla sul ufro mniSvnelovan rols asrulebs Tanamedrove telekomunikaciaSi, **რადგან** warmoqmnis problemebs, romlebic uSualodaa dakavSirebuli terminalis gadanacvlebasTan. erT-erTi aseTi negatiuri faqtori aris efeqti, romelic pirvelad aRwera avstrielma fizikosma da astronomma kristian doplerma (Doppler) 1842 wels da mis pativsacemad dopleris efeqti uwodes.

dopleris efeqtis arsi isaa, rom signalis wyaros an/da mimRebis (an/da gavrcelobis garemos) erTmaneTis mimarT moZraobisas icvleba miRebuli signalis talRis sigrZe rac pirdapirproporciuladaa damokidebuli gadamcemis (mimRebis) gadaadgilebis siCqaresa da mimarTulebaze. Tu wyaro gadaadgildeba mimRebiken talRis sigrZe mcirdeba, xolo Tu Sordeba – izrdeba:

$$\lambda = \frac{(c - V_{\text{obs}})}{f_0},$$

sadac

f_0 muSa sixSirea;

c – garemoSi eleqtromagnituri talRis gavrcelebis siCqarea (is axlosaa vakuuSi sinaTlis gavrcelebis siCqarTan $\approx 3 \cdot 10^8$ m/wm);

V_{gad} – radiosignalis wyaros (an mimRebis) gadaadgilebis siCqarea (dadebiTia Tu wyaro uaxlovdeba mimRebs da uaryofiTia Tu Sordeba).

uZravi wyarosa da moZravi mimRebisaTvis es formula iRebs saxes:

$$f = f_0 \left(1 + \frac{V_{\text{mimR}}}{c} \right)$$

sadac

V_{mimR} – radiosignalis mimRebis moZraobis siCqarea.

amitom, miRebuli signalis sixSiris Zvris sidide Δf_d damokidebuli iqneba mimRebis moZraobis siCqareze, gadamcemis muSa sixSiresa da mimRebsa da gadamcems Soris mimarTulebis á kuTxeze: $\Delta f_d = V_{\text{mimR}} f_0 \cos \alpha$. sixSiris aseTi cvlileba iwvevs e.w. dopleriseul gafantvas (sixSiris parazitul deviacias). aseTi gafantvis Sedegad mimRebSi gadamtanis sixSiris speqtri aRmoCndeba `gadRabnili~ $\Delta f = f_0 \pm \Delta f_d$ zolSi da gadamtani sixSiris mniSvneloba _ arastabiluri drois mixedviT.

uswormasworo adgilze mimRebis araTanabari siCqariT moZraobisas SeimCneva miRebuli sasargeblo signalis amplitudisa da fazis damatebiTi cvlilebebi. es, Tavis mxriv, iwvevs miRebis wertilSi sixSirul-seleqciur miyuCebas, gamovlenils signalis speqtris garkveul nawilSi.

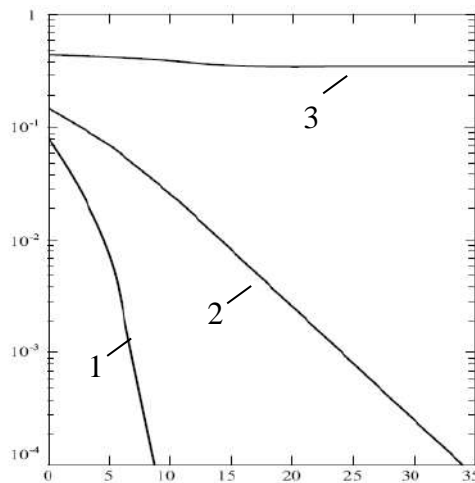
arxis arastabiluri moqmedebis 2.10 sur-ze gamosaxuli maxasiaTeblis analogiuri SesaZlebelia iyos sixSiris dopleriseuli Zvris í areSic. $S(\hat{r})$ speqtris sazRvrebis wamaxvileba da cicabovneba dopleriseuli Zvris Sedegia da gamowveulia samomxmareblo sadguris antenis gadanacvlebiT stacionarul gamfantav obieqtebs Soris. $S(\hat{r})$ -s mniSvneloba udidesia im SemTxvevaSi, rodesac gamfantavi obieqti ganTavsebulia mobiluri sadguris antenis uSualod win an ukan. $S(\hat{r})$ funqcia warmoadgens $\tilde{n}(\Delta f)$ funqciis furie-saxes da saSualebas iZleva miaxloebiT Sefasdes speqtris gafarToebis xarisxi, rogorc arxis mdgomareobis cvlilebis siCqaris funqcia. vinaidan dopleriseuli gafarToeba sixSiris mixedviT da arxis koherentulobis dro T_{koh}

ukuproporciuli sidideebia, ($T_{koh} \approx 1/\Delta f_d$), Δf_d -s mniSvneloba, SeiZleba ganxilul iqnes, rogorc arxSi miyuCebis Cveulebrivi siCqare [8, 9].

2.1.3.4. radiointerfeisis parametrebis SerCevis meTodologia usadeno kavSiris sistemaSi. gamoyofen Semdeg ZiriTad meqanizmebs, romelTa saSualebiTac miyuCeba amcirebs usadeno farTozoliani qselis funqcionirebis xarisxs [3, 9]:

- sixSirul-seleqciuri miyuCebebi iwvevs araTanabari amplitudur-sixSiruli maxasiaTeblis mqone filtriT filtraciis eqivalentur efeqts, rac amaxinjebis speqtris da, Sesabamisad, miRebuli signalis formas;
- fiWur kavSirSi, sadac pirdapiri da ukuarxebis sixSiruli gancalkeveba mravaljer aRemateba koherentulobis zols, sixSirul-seleqciur miyuCebes mivyavarT arxebis asimetriulobamde, rac arTulebs moZravi da sabazo sadgurebis gadamcemebis simZlavreebis marTvis procedurebs;
- sixSirul-seleqciur miyuCebes Tan axlavs miRebuli signalebis gafarToebs (gaxangrZliveba) droSi, rasac, yvelaze xSirad mivyavarT simboloTaSoris interferenciamde;
- SecdomaTa paketebis gamoCena, romelic warmoiqmneba signalis momvlebis donis Semicirebisas garkveuli zRvruli mniSvnelobis qveviT. SecdomaTa paketebis warmoqmna da xangrZlivobis albaToba damokidebulia zRvruli donis gadakveTis sixSiresa da miyuCebebis xangrZlivobaze.

zemoTqmulis mixedviT, SeiZleba davaskvnaT, rom swraf da sixSirul-seleqciur miyuCebes SeswevT unari yvelaze ufro uaryofiTi gavlena moaxdinon usadeno kavSirebis sistemebis maxasiaTeblebze. 2.12 suraTze naCvenebia damokidebulebebi, romlebic xarisxobrivad axasiaTeben xelSeSlebisa da miyuCebebis sxvadasxva saxis gavlenas radioarxiT monacemebis gadacemis xelSeSlamdgradobaze [3]. mruDi 1 axasiaTebs aditiuri TeTri gausis xmauriani arxiT gadacemis xelSeSlamdgradobas. mruDi 2 (e.w. *releis zRvari* [3]) axasiaTebs kavSiris utyuarobis daqveiTebas fardobis signali/xmauris Semicirebis Sedegad (signalis energetikis Semicireba gafantvis mizeziT). es ukanaskneli damaxasiaTebelia amplituduri (mdovre) miyuCebebisaTvis pirdapiri xedviT gavrcelbuli komponentebis ararsebobis pirobebSi. bolos, mruDi 3 warmoadgens kavSiris xarisxis maxasiaTebels, romelsac SeiZleba adgili hqondes sixSirul-seleqciuri an swrafi miyuCebebis dros.



sur. 2.12. **ganzogadebuli ilustracia, damaxasiaTebeli signalebis gadacemisa miyuCebian radioarxebSi [3,9]**

usadeno kavSiris swrafmiyuCebian radioarxSi muSaobisunarianobis uzrunvelyofis ZiriTad meTodebs miekuTvneba nebismieri gancalkevebis meTodebi: `aSkara~ da `araaSkara~. maTi klasifikacia mocemulia 2.13 suraTze.

koherentulobis zolis sigane Δf_{koh} adgens gadacemis siCqaris zeda zRvars sixSirul-seleqciuri miyuCebebisa da simboloTaSorisi interferenciis armqone kavSiris arxebSi:

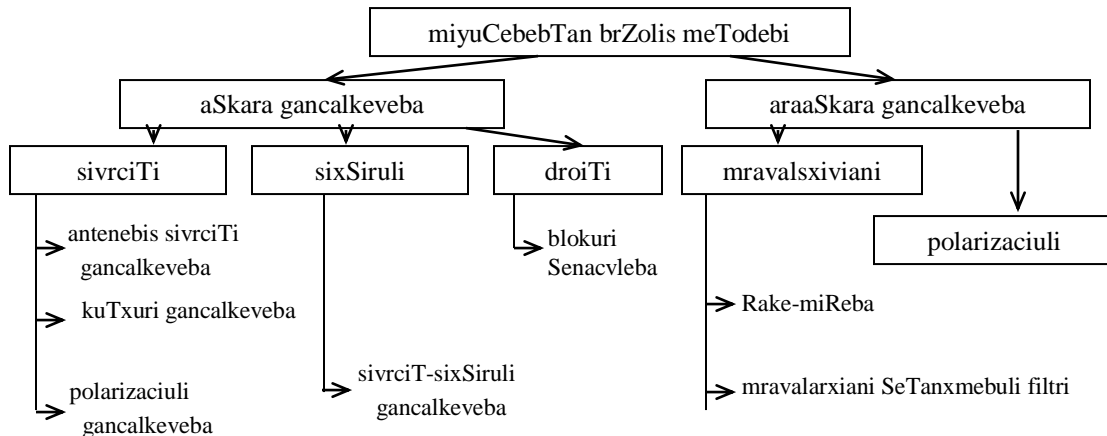
$$\Delta f_{koh} > \Delta F_S \approx 1/T_s. \quad (2.4)$$

meore mxriv, swrafi miyuCebebisagan gamowveuli damaxinjebebis Tavidan acileba SesaZlebelia, Tu uzrunvelyofili iqneba informaciis gadacemis ufro maRali siCqare, vidre maTi miyuCebis siCqarea, e.i.

$$\Delta F_S > \Delta f_d, \text{ anu } T_s < T_0, \quad (2.5)$$

sadac $T_0 \approx T_{koh}$ swrafi miyuCebis saSualo periodia.

ukanaskneli gamosaxuleba Tavisi arsiT gansazRvavs pirobebs, romlis drosac radioarxi ganicdis mdovre miyuCebibs. faqtobrivad es imas niSnavs, rom simboloTaSorisi interferenciis ararsebobis aucilebeli piroba aris amplituduri miyuCebibis **arseboba**.



sur. 2.13. miyuCebebTan brZolis ZiriTadi meTodebi

amrigad, (2.4) analogiurad, signalis speqtris Δf_d dopleriseuli gafarToebs adgens informaciis gadacemis siCqaris qveda zRvars, romlis drosac SesaZlebelia ar arsebobdes swraf miyuCebebTan dakavSirebuli damaxinjebebi. (2.4)-sa da (2.5)-is Tanaxmad SevajamoT pirobebi, romlebic unda daakmayofilos radiointerfeisis sistemebma, romlebic ar ganicdian sixSirul-seleqciur da swraf miyuCebibs:

$$\Delta f_{koh} > \Delta F_S > \Delta f_d \text{ an } \hat{\sigma}_{\max} < T_s < T_0$$

radioarxis koherentulobis zoli unda iyos mniSvnelovnad didi, vidre simboloebis gadacemis siCqare, xolo es ukanaskneli, Tavix mxriv, unda sWarbobdes miyuCebis siCqares. sxva sityvebiT, Tu Δf_{koh} adgens signalebis gadacemis siCqaris zeda zRvars, maSin Δf_d adgens signalebis gadacemis siCqaris qveda zRvars.

ოპტიმიზაცია 3

მოდულირების სხვადასხვა სახის ციფრული არხები

3.1.1. მოდულირებისა და მანიპულირების ტანამედროვე მეთოდები

სეთობინების მანიპულირების გადასაცემად რადიოტალენტების სასაუბრობო აუცილებელია გადამტანი სხვადასხვა სახის სიგნალი, რომელიც ცალკეადაა დაწესებული სეთობინების *მოდულირების ეფექტურობის მაჩვენებლის რეგულირების (გადამტანის) ერთიანი რამდენიმე პარამეტრის ცვლილების პროცესის გადასაცემის (მანიპულირების) სეთობინების შესაბამისად*. პრაქტიკაში გამოყენებული მოდულირების ზირითადი მნიშვნელობები ასევე ისე დაკავშირებულია გადამტანი რეგულირების მნიშვნელობების ცვლილებასთან, როგორც ამპლიტუდა, ფაზა და სიხშირე (ასეთი მოდულირების პრინციპები ილუსტრირებულია სურ. 3.1).

თუ მაჩვენებლის რეგულირების პარამეტრები უზრუნველყოფენ, მაშინ ასეთი სხვადასხვა მოდულირების უზრუნველყოფის (ანალოგიური) ეფექტურობა, ხოლო თუ ისინი იყენებენ გარკვეულ სიხშირეებზე მნიშვნელოვან – ციფრული. ასეთ შემთხვევაში მოდულირების მანიპულირების ეფექტურობა. ტანამედროვე სახის სიხშირეების ტელეკომუნიკაციურ სისტემების ინფორმაციის გადაცემის ხარისხის გაზრდის მიზნით უზრუნველყოფენ სეთობინების დისკრეტულად გარდაქმნიან. ამიტომ, შემდგომ ცხვენ ვილარაქებთან მოხლოდ ციფრული მოდულირების მეთოდებზე, აქტუალურზე, ახალი ტაობის უსაფრთხო სახის სისტემებისათვის.

მოდულირების უსაფრთხო აუცილებლად დაკავშირებულია ურთიერთსაინფორმაციო რესურსების სპექტრული ეფექტურობისა და ინფორმაციის გადაცემის უზრუნველყოფის მოხლოდნისათვის სიხშირის კომპრომისის მოხლოდნისათვის. ერთი მხრივ, გადაცემის ხარისხი მათულობის სპექტრის გაზრდასთან ერთად, რაც გამომდინარეობს შენის თეორიისა. მეორე მხრივ, ხვედრითი (ზოლის ერთეულზე) გადაცემის სიხშირე, სისტემის საბონტო თვადობა და მისი თავსებადობა სხვა რადიოელექტრონულ სისტემებთან განისაზრვება გამოყენებული სიგნალების სპექტრის კომპაქტობით. გადაცემის ენერგეტიკული ეფექტურობა უზრუნველყოფილია იქნება ევკლიდის სიხშირეების სიგნალების ვექტორების სიხშირის მინიმალური მანიპულირების მაქსიმიზაციით.

ციფრული მოდულირების მნიშვნელობები, სხვა ტანამედროვე პირობების, მნიშვნელოვან განსხვავდება ხელსეხლოდობით. მაგალითად, გასის არხისათვის სიხშირის მიხედვით სიხშირის ალბათობის განსაზრვება გამოსახულია [12]:

$$P_e = 1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}\right) = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}\right) \quad (3.1)$$

sadac $E_A = E_1 + E_2 - E_{1,2} = 0$ erTmaneT isagan garCevadi 1 da 2 signalebis energiaTa sxvaobaa;

$E_{1,2}$ – signalebis “urTierTenergiaa” da ricxobrivad maTi aranormirebuli urTierTkorelaciis funqciis tolia;

N_0 – TeTri xmauris speqtruli simkvrivea;

$$\Phi(y) = (2\sqrt{2\pi}) \int_0^y \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz \quad \text{bis integrali (laplasiis funqcia);}$$

$Q(y)$ markumis funqciaa.

magaliTad, amplituduri manipulaciis SemTxvevaSi (signalis ori mdgomareoba, asaxuli “0” an “1” impulsiT, sur. 3.14) sxvaobiTi energia signalis energiis tolia

$E_A = E_S$ (vinaidan $E_1 = E_S, E_2 = E_{1,2} = 0$). amitom, P_{AM}

$$= 1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{E_S}{2N_0}}\right)$$

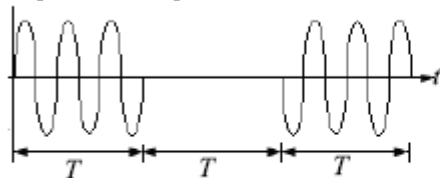
sixSiruli manipulaciisas, romelic Seesabameba ori erTnari energiis mqone, Tanabaralbaturi signalebis gadacemas or erTmaneTis argadamkveT sixSirul zolSi ($E_1 = E_2 = E_S$), maTi energiebis sxvaoba toli iqneba (ix. sur. 2.14):

$$\begin{aligned} E_{1,2} &= \int_0^T S_1(t)S_2(t)dt = \int_0^T A_0^2 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \cos(\omega_2 t + \phi_2) dt = \\ &= \frac{A_0^2}{2} \int_0^T \cos(\omega_1 - \omega_2)t dt + \frac{A_0^2}{2} \int_0^T \cos(\omega_1 + \omega_2)t dt = \\ &= \frac{A_0^2}{2} \int_0^T \cos(\omega_1 - \omega_2)t dt = \frac{A_0^2}{2} \sin \omega T = E_S \frac{\sin \omega T}{\omega T} \end{aligned}$$

Tu $\omega T \gg 1$, maSin $E_{1,2} = 0$, saidanavomiviRebT: $\Delta P_{FM} = 1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{E_S}{N_0}}\right)$.

signalis droiTi gamosaxva signalis veqtoruli gamosaxva

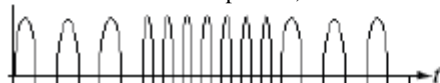
amplituduri manipulacia, $M=2$



“1”
 S_1
 S_2
“0”

$$P_{AM} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{2N_0}}\right)$$

sixSiruli manipulacia, $M=2$



“0”
 S_2
 $\sqrt{E_S}$
 $\sqrt{2E_S}$
 S_1

$$P_{FM} = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right)$$

sur. 3.1. ამპლიტუდური, სიხშირული და ფაზური მანიპულაციის
 პრინციპების ილუსტრაცია

გასათვალისწინებელია, რომ ამპლიტუდური და სიხშირული მოდულაციების ხელსეხმარებლობის
 შესახებ მოცემული შედეგი მარტივების სიგნალების საშუალო სიხშირის დიაპაზონში
 ამპლიტუდური მანიპულაციის დროს გამოიყენება ე.წ. სიგნალი "აქტიური პაუზი" (0-ის გადამცემის
 შესაბამისად გადამცემის გამორთვა). აქვე აღვნიშნავთ, რომ თუ შევადარებთ ამპლიტუდური
 AM და სიხშირული FM მოდულაციების სკემების ხელსეხმარებლობას სიგნალების ერთნაირი საშუალო
 სიხშირის დიაპაზონში, ისინი ერთნაირი არაა.

სიგნალები ობიექტი ფაზური მანიპულაციის ტექნიკურ ლიტერატურაში ყველაზე ხშირად მოხსენიება
 აბრევიატურით BPSK (Binary Phase Shift Keying). ვინაიდან ამ შემთხვევაში $E_1 = E_2 = E_s$, ხოლო
 ერთნაირი ენერჯია

$$E_{1,2} = \int_0^T S_1(t)S_2(t)dt = \int_0^T S_1^2(t)dt = E_s$$

სიგნალო ვექტორები ყველაზე მეტად არიან განსაზღვრული ევკლიდესის სივრცეში (იხ. სურ.
 2.14). (2.6) გამოსახულების თანახმად, შედგომის ალბათობა ბიტი ამ შემთხვევაში ტოლია:

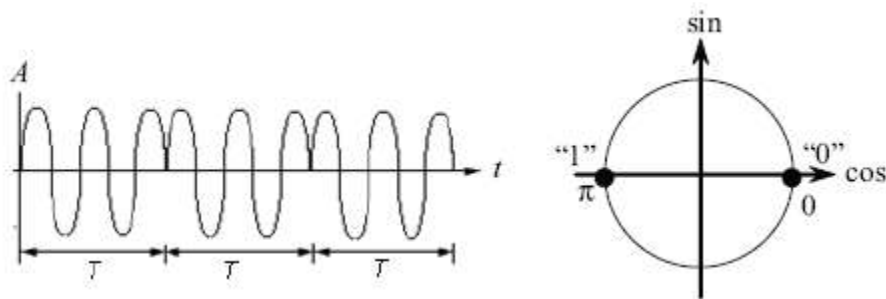
$$P_{PM} = 1 - \Phi\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}}\right) \quad (3.3)$$

ამრიგად, ფაზური მანიპულაციის სიგნალი გამოირჩევა ყველაზე მაღალი ხელსეხმარებლობით.
 პირველ რიგში, სიგნალი ობიექტი ამპლიტუდური მანიპულაციის არაა საკმარისი ხელსეხმარებლობა და ვერ
 უზრუნველყოფს გადამცემის მუშაობის საკმარისად ეფექტურ ენერჯიას. მესამე და შემდგომი

Taobis usadeno kavSiris sistemebSi amplituduri modulacia gamoiyeneba mxolod fazur modulaciasTan SerwymiT. Semdgom paragrabSi mocemulia Tanamedrove satelekomunikacio sistemebSi gamoyenebuli modulaciis ZiriTadi meTodebis mokle mimoxilva.

3.2.2. gadamtanis fazuri modulaciis cifruli meTodebi

3.2.2.1. orobiTi fazuri manipulacia. yvelaze martivi cifruli signalis fragmenti, orobiTi fazuri manipulaciiT (BPSK) gamosaxulia 3.2 suraTze.



sur. 3.2. signalis fragmenti orobiTi fazuri manipulaciiT da misi fazuri mdgomareobebis diagrama

BPSK modulatoris funqciaa Secvalos maRalsixSiruli gadamtanis rxevis faza 0-iT an π -iT, monacemTa gadasacemi mimdevrobis bitis mimdinare mniSvnelobis Sesabamisad. logikuri '1'-is gadacemas Seesabameba fazis Zvra 180° -iT, logikuri '0'-isas ki – Zvris ararseboba.

signalebis anbani BPSK-s dros warmodgenilia Semdegi saxis funqciebis monakveTebis (T_b intervalze) wyviliT:

$$S_1(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t) \quad \text{; gadacemisaTvis}$$

$$S_2(t) = \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t + \pi) \quad \text{s gadacemisaTvis}$$

sadac E_b orobiTi simbolos (bitis) energiaa;

\dot{O}_b – orobiTi simbolos xangrZlivoba.

amrigad, rezultirebuli BPSK signali SeiZleba ase Caiweros:

$$S_{BPSK}(t) = V(t) \sqrt{\frac{2E_b}{T_b}} \cos(2\pi f_c t)$$

sadac $V(t)$ aris gadacemuli diskretuli Setyobineba, romelic iRebs +1 da -1 mniSvnelobebis. orobiTi fazuri modulacia (PM) misi dabali speqtruli efeqturobis gamo arcTu xSirad moixmareba Tanamedrove usadeno telekomunikaciebSi. ufro xSirad gamoiyeneba misi `gafarToebuli~varianti - QPSK (Quadrature Phase Shift Keying).

3.2.2.2. kvadraturuli fazuri manipulacia (QPSK). igi diskretuli fazuri manipulaciis saxesxaobaa, romelsac gadamtani sixSiris oTxi fazuri mdgomareoba axasiaTebis (sur. 3.3):

$$S_{QPSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f_c t + \frac{\pi}{2}(i-1)\right), \quad i = 1, \dots, 4. \quad (3.5)$$

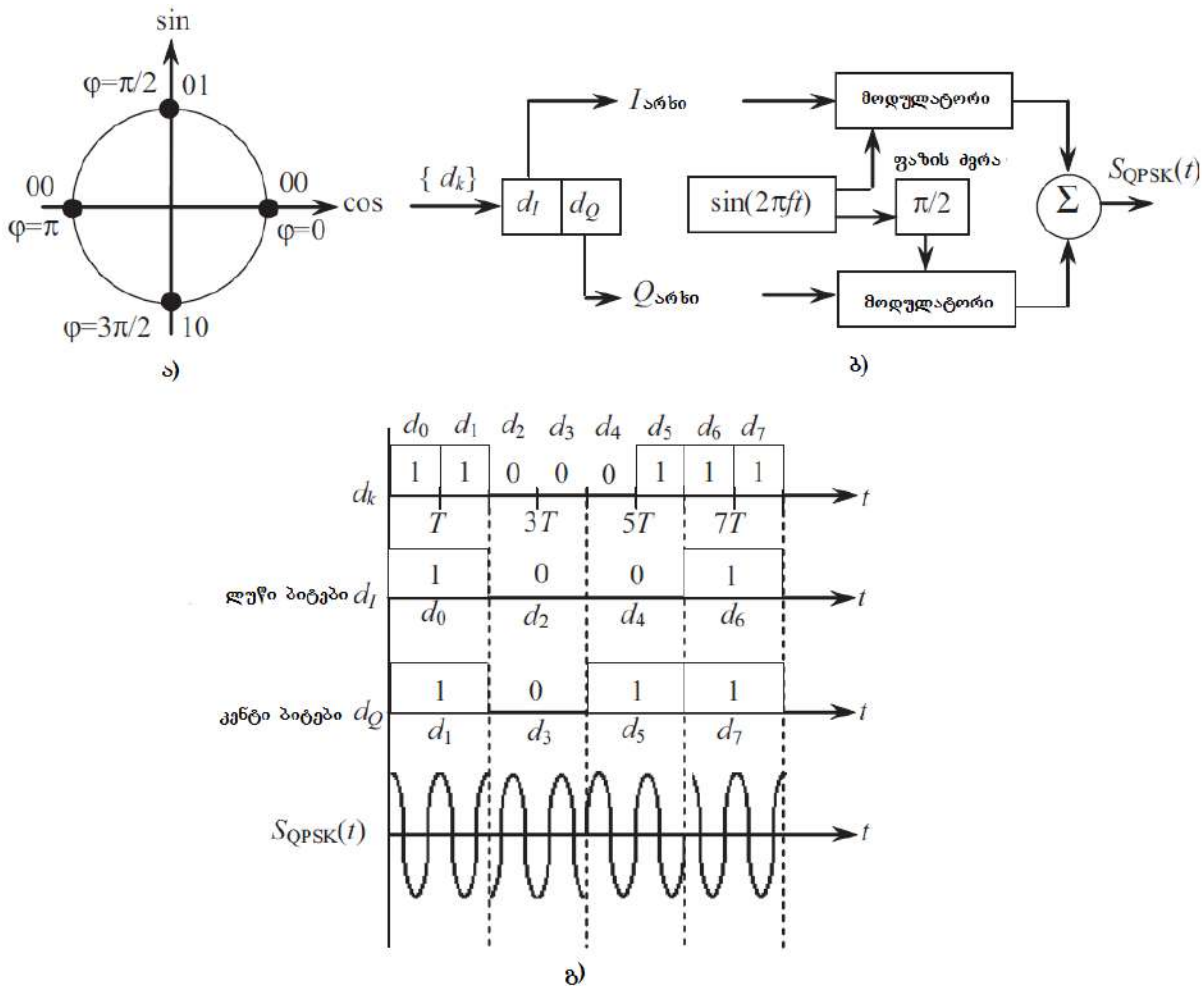
trigonometriuli igiveobis gaTvaliswinebiT, QPSK signali SeiZleba warmovidginoT ori BPSK signalis jamis saxiT, romelTa fazebic kvadraturaSi imyofebian:

$$S(t) = A \sin(2\delta f t + \phi(t)) = A \sin(2\delta f t) \cos \phi(t) + A \cos(2\delta f t) \sin \phi(t).$$

QPSK modulatorSi (sur. 2.16) gadasacemi monacemebis d_k nakadi daiyofa luw da kent bitebad. luwi bitebi miewodeba sinfazur arxs da modulacias iwveven $\sin(2\delta f t + \delta/4)$ signalis faziT modulacias, kenti bitebi ki – kvadraturul arxs da iwveven misi orTogonaluri $\cos(2\delta f t + \delta/4)$ signalis modulacias. Sejamebis Semdeg warmoiqmneba modulirebuli $S_{QPSK}(t)$ signali. kvadraturul arxSi d_I da d_Q **simboloebis** xangrZlivoba orjer aWarbebs bitebis d_k sawyisi mimdevrobis xangrZlivobas.

QPSK-s sqemis mniSvnelovani naklia kvadraturul arxSi orive simbolos erTdrouli cvlilebis dros, magaliTad, $(+1, -1) \rightarrow (-1, +1)$ an $(+1, +1) \rightarrow (-1, -1)$, formirebadi signalis fazis 180° -iT nextomi winmswrebtan SedarebiT. signalis viwrozolian filtrSi gavlisas es iwvevs parazitul amplitudur modulacias, momvlebis Cavardnebs. Tavis mxriv, es dakavSirebulia

გვერდითი გამოსახვის დონის გაზრდასთან [13]. ამ პრობლემის თავიდან აცილების მიზნით გამოიყენება ე.წ. Offset QPSK («QPSK დაზვრით») სქემა, სადა კვადრატულ არხში შეყვანილი ერთი ელემენტის ხანგრძლივობის ტოლი დროითი დაყოფა. რის შედეგადაც ფორმირებული სიმბოლოს ფაზის ცვლილება ყოველ მომენტში განისაზღვრება ტანმომდევრობის კვადრატის მხოლოდ ერთი ელემენტით, რაც გამორიცხავს ფაზის ნახტომებს მისი [13].



სურ. 3.3. კვადრატული ფაზური მანიპულაციის პრინციპი [13]:

ოთხი ფაზური მდგომარეობა სასუალებას იძლევა ერთი სიმბოლოთი გადაცემის ორი ბიტი. ინფორმაციის გადაცემის სიჩქარე BPSK-სთან შედარებით ორჯერ იზრდება ზოლის გაფართოების გარეშე. მოგება მიიღება ხელსეხლამდგობის შემცირებით, რადგან სიგნალის კვადრატული მდგომარეობები (სინუსური და კოსინუსური) **ორტოგონალურების** და არა მანძილის ერთმანეთის ჯვარედინ ხელსეხლებს. ევკლიდეს მანძილი

mezobeli veqtorebs Soris, romelic gansazRvravs signalebis erTmaneTSi arevis albaTobebidan udidess, signalebis xangrZlivobis (da Sesabamisad, maTi energiis) gaTvaliswinebiT ucvleli rCeba.

3.2.2.3. mraValpoziciiani fazuri modulacia. Tanamedrove mobiluri kavSirisa da farTozolian radioSeRwevis sistemebSi aseve iyeneben fazuri modulaciis saxeebs, mdgomareobis 4-ze meti mniSvnelobiT. PM signali $M = 2^k$ fazuri mdgomareobiT (k erTi simbolos mier gadacemul bitebis raodenobaa) aiwereba Semdegi gamosaxulebiT:

$$S_{f\text{-PSK}}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos\left(2\pi f t + \frac{2\pi}{M}(i-1)\right), \quad i = 1, \dots, M. \quad (3.6)$$

modulaciis aseTi wesi cnobilia saerTo saxelwodebiT M -uri fazuri manipulacia (M -ary PSK), Tumca praqtikaSi Cveulebriv iyeneben 8-PSK da gacilebiT iSviaTad 16-PSK sqemas. saqme is aris, rom simboloTa fazuri mdgomareobis gazrda, maTi xangrZlivobis gazrdis miuxedavad (gadacemis siCqaris ucvelelobisas) iwvevs mezobeli signalebis veqtorebis mniSvnelovan daaxloebas. magaliTad, simbolos energiis 3-jeradi gazrda 8-PSK-s dros BPSK-Tan mimarTebaSi arasrulad uvevs kompensacias minimaluri evkliduri manZilis Semcirebas mezobeli signalebis veqtorebs Soris (romelTa Soris kuTxe mcirdeba $\delta/4$ -mde).

marTlac, d_{\min} , romelic gansazRvravs signalebis SesaZlo mdgomareobebS Soris minimalur manZils, gamosaxuls erT bitze (simboloze) mosuli saSualo energiit, tolia:

$$d_{\min} = d \times \sqrt{E_c},$$

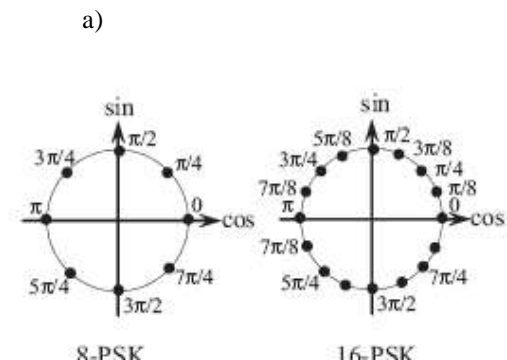
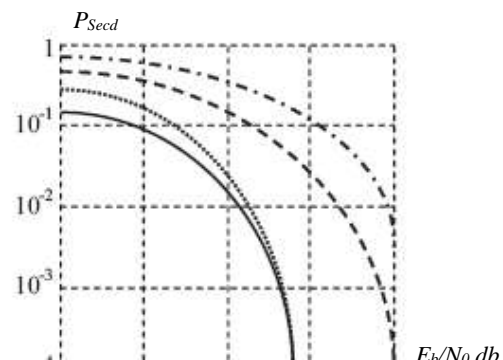
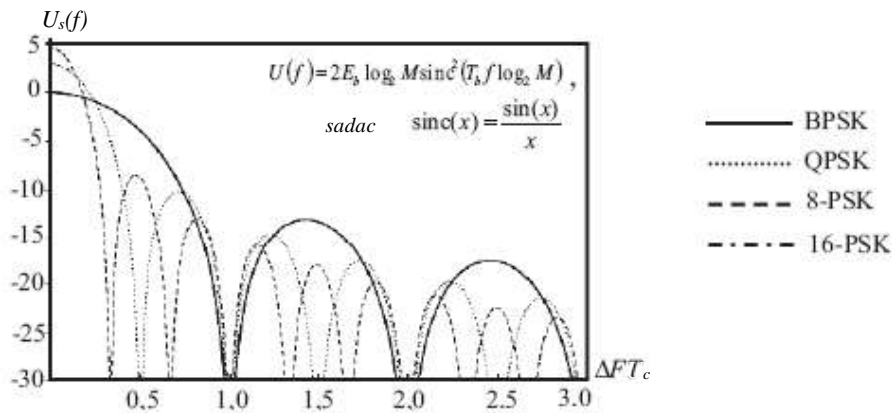
sadac d signalTa erTobliobaSi poziciebs Soris minimaluri manZilia.

cnobilia, rom $d = \sqrt{2 \cdot (1 - \cos \alpha)}$, sadac $\alpha = 2\delta/\lambda$. magaliTad, 4-PSK-sTvis $\alpha=90^\circ$, 8-PSK-sTvis $\alpha=45^\circ$. amrigad, 4-PSK-sTvis $d = 1.41$, 8-PSK-sTvis $d = 0.765$. gansazRvroT d_{\min} . 4-PSK-s SemTxvevaSi ($E_s=2E_b$) $d_{\min} = 1,41 \times \sqrt{2E_b} = 2,82 \times \sqrt{E_b}$, maSin rodesac 8-PSK-sTvis ($E_s=3E_b$) $d_{\min} = 0,765 \times \sqrt{3E_b} = 1,32 \times \sqrt{E_b}$. maSasadame, sxvadasxva fazuri modulaciisaTvis, anbanis gazrdasTan erTad (poziciebis~ raodenobis zrda) d_{\min} -is mniSvneloba mcirdeba, rac amcirebs xelSeSlamdgradobas.

8-PM-is dros xelSeSlamdgradobis Semcireba aRwevs 3,5 db-s BPSK-Tan SedarebiT (daaxloebiT aseTive unda iyos signalis energiis zrda, rac veqtorebis daaxloebis kompensacia iqneba da Seamcirebs Secdomebis albaTobas wina (BPSK) mniSvnelobamde [12]).

fazamanipulirebuli signalebis speqtrebi, rodesac $M=2, 4, 8$ da 16 , maTi fazuri diagramebi da xelSeSlamdgradobis maxasiaTeblebi mocemulia 3.17 suraTze [14].

dasaxelebuli mizezebi, informaciis gadacemis siCqaris uciloblad zrdis moTxovnasTan erTad, ganapirobebs modulaciis axali wesebis SemuSavebas, romlebic uzrunvelyofen misaReb xelSeSlamdgradobas, gacilebiT ufro farTo sasignalo anbanisaTvis, vidre 8-PSK-sa da 16-PSK-s SemTxvevaSi. aseTi SesaZleblobebi damaxasiaTebelia modulaciis kombinirebuli wesebisaTvis, romelTa Soris SeiZleba gamoiyos kvadraturuli amplituduri manipulacia.



sur. 3.4. speqtrebi (a), xelSeSlamdgradoba (b) da fazuri diagramebi (g) sxvadasxva saxis fazuri manipulaciis dros [14]

3.2.3. kvadraturuli amplituduri manipulacia (QAM)

teqnikur literaturaSi farTod gavrcelebuli abreviatura **QAM** (*Quadrature Amplitude Modulation*) aRniSnavs mravalpoziciiani kombinirebuli amplitudur-fazuri manipulaciis nairsaxeobas, sadac gadasacemi signali xasiaTdeba f_c gadamtanis amplitudis sinfazuri (I) da kvadraturuli (Q) mdgenelebiT [15]:

$$S_{QAM}(t) = \sqrt{\frac{2E_{\min}}{T}} \alpha_i \cos(2\pi f_c t) + \sqrt{\frac{2E_{\min}}{T}} \beta_j \sin(2\pi f_c t), 0 \leq t \leq T ; i = 1, \dots, M, \quad (3.7)$$

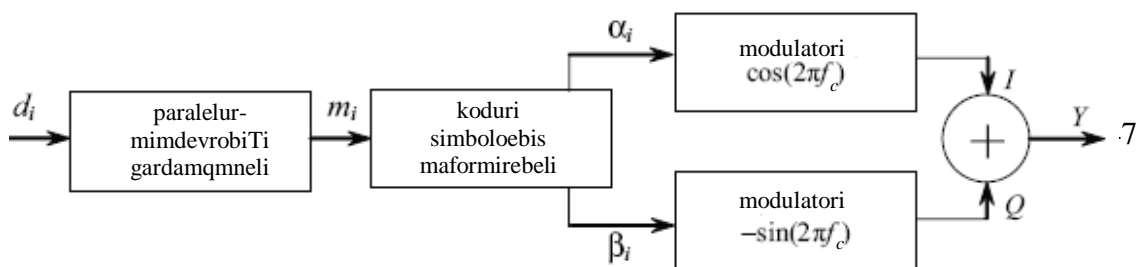
sadac f_c gadamtani rxevebis sixSirea;

T_S gadsacemi simbolos xangrZlivobaa;

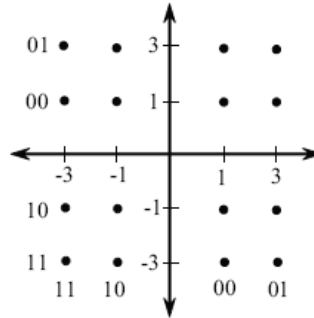
E_{\min} umciresamplitudiani signalis energiaa;

$\hat{\alpha}_i$ da $\hat{\beta}_j$ damoukidebeli mTeli ricxvebis wyvilia, romelic SerCeulia TanavarskvლvedSi~ signalis (simbolos) poziciis Sesabamisad.

QAM modulatoris struqturuli sqema mocemulia 3.5 suraTze [15]. $\{d_0, d_1, \dots, d_k\}$ orobiTi simboloebi **პარალერულ-მიმდევრობითი გარდამქმნელით** transformirdeba modulatoris organzomilebian $\{m_0, m_1, \dots, m_k\}$ simboloebad. bitebis ricxvi TiToeul simboloSi ganisazRvreba mdgomareobaTa ricxviT QAM TanavarskvლvedSi. magaliTad, 64-QAM-is SemTxvevaSi es ricxvi toli iqneba $\log_2 M = 6$. koduri simboloebis maformirebeli TiToeul m_j simbolos gardaqmnis $\hat{\alpha}_i$ da $\hat{\beta}_j$ wyvil simboloebad, romlebic gamoiyeneba gadamtanis **sinfazuro da kvadraturulo** mdgenelebis amplituduri modulaciisaTvis. miRebuli rxevebi Sejamdeba da Sedegad formirdeba rezultirebeli QAM signali. 16-QAM-is Tanavarskvლvededi naCvenebia 2.19 suraTze.



sur.3.18. QAM modulatoris struqturuli sqema



sur. 3.5. greis diagramiT gadmocemuli 16-QAM-is Tanavarskvavedi

vaCvenoT QAM-is upiratesoba adre ganxiluli mravalpoziciani fazuri manipulaciis meTodebTan SedarebiT. ganvixiloT 16-PSK-sa da 16-QAM-is sqemebi, romlebic erTmaneTs Seesabameba gamoyenebuli simboloebis informaciuli tevadobiT.

16-PSK-sTvis sasignalo Tanavarskvavedis wertilTa Soris minimaluri manZili tolia $d_{\min} = 0,395 \times \sqrt{4E_b} = 0,79 \times \sqrt{4E_b}$.

16-QAM-isTvis d_{\min} ganisazRvreba gamosaxulebiT

$$d_{\min} = 2A\sqrt{\frac{T_S}{2}} = \sqrt{2A^2T_S}, \quad (3.8)$$

sadac A signalis amplitudaa, romelic mis energiasTan dakavSirebulia TanafardobiT

aris signalis amplitudis saSualo mniSvneloba;

A_{\min} da A_{\max} amplitudebis modulebis minimaluri da maqsimaluri mniSvnelobebi;

\bar{E} _ signalis energiis saSualo mniSvneloba.

16-QAM-is SemTxvevaSi, $A_{\min}=A$; $A_{\max}=3A$, saidanac $\bar{A} = \sqrt{10A^2} = A\sqrt{10}$. maSasadame, $\bar{E} = \frac{10A^2T_S}{2} = 5A^2T_S$, saidanac $A^2 = \frac{\bar{E}}{5T_S}$. **SevitanoT miRebulo Tanafardobebo (3.8)-Si.** vipoviT,

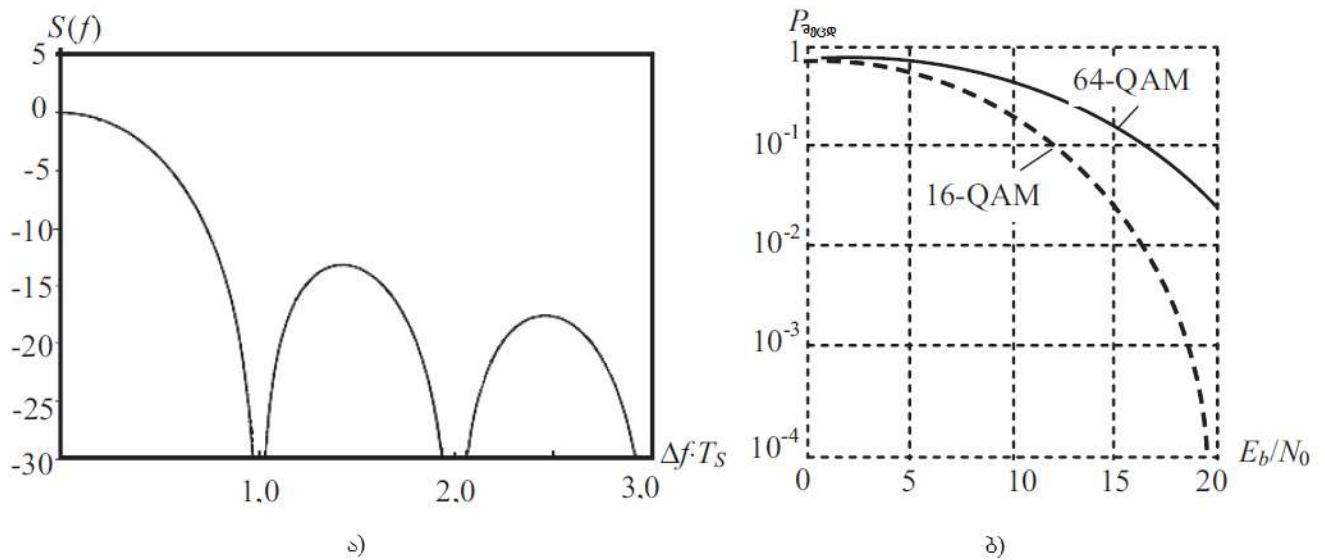
rom 16-QAM-isTvis:

$d_{\min} = \sqrt{\frac{2 \times 4 \bar{E}_b}{5}} = 1,26\sqrt{\bar{E}_b}$ – erTnaxevarze metjer sWarbobs 16-PSK-s analogiur manZils.

QAM signalis speqtri (sur. 3.6, a) emTxveva $T = T_0 \cdot \log_2 M$ xangrZlivobis radioimpulsis speqtrs, sadac T_0 informaciuli simbolos xangrZlivobaa da aRiwereba Semdegi damokidebulebiT [14]:

$$U_{QAM}(f) = \frac{E_s}{2} \left[\left(\frac{\sin[\pi(f-f_c)T_s]}{[\pi(f-f_c)]T_s} \right)^2 + \left(\frac{\sin[\pi(f+f_c)T_s]}{[\pi(f+f_c)]T_s} \right)^2 \right],$$

3.6, b, suraTze naCvenebia simboloebis miRebis Secdomis albaTobis damokidebuleba signali/xmauri fardobasTan, romelic axasiaTebis QAM-is xelSeSlamdgradobas.



sur. 3.6. QAM-is speqtri (a) da xelSeSlamdgradobis maxasiaTeblebi (b)

Tanamedrove farTozolovani SeRwevis da mobiluri (fiWuri) kavSiris sistemebSi gamoiyeneba QAM-is Semdegi saxeebi: 16-QAM, 32-QAM, 64-QAM, 128-QAM da 256-QAM.

3.2.4. gadamtanis sixSiruli manipulacia

sixSiruli manipulasi (Frequency Shift Keying) aris cifruli modulaciis saxe, romlis drosac informaciul bits an simbolos Seesabameba garkveuli sixSiris harmoniuli gadamtani rxeva. sixSirulad manipularebuli signali aRiwereba ase:

$$S_{FSK}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_i t + \varphi), \quad 0 \leq t \leq T_s - T_{vis}, \quad (3.8)$$

sadac $f_i = f_0 \pm \Delta f/2$, xolo f_0 centraluri sixSirea;

Δf -signalebs Soris sixSireTa sxvaoba;

$T_s = T$ – gadasacemi simbolos (bitis) xangrZlivoba.

kavSiris usadeno sistemebSi gamoyenebul sixSiruli manipulaciis wesebs Soris, yvelaze gavrcelebulia e.w. *manipulacia sixSiris minimaluri ZvriT* (MSK) da *gausis manipulacia minimaluri sixSiruli ZvriT* (GMSK).

MSK modulacia (Minimum Shift Keying) aris sixSiruli manipulaciis saxe, romlis drosac signalis faza uwyvetad icvleba. sixSireebis zeda da qveda mniSvnelobebi, romlebic Seesabameba '0' -isa da '1' -is gadacemas, gansxvavdebian informaciis gadacemis siCqaris mniSvnelobis naxebris toli sididiT:

$$f_{qveda} = f_0 - F_s/4 \quad \text{da} \quad f_{zeda} = f_0 + F_s/4, \quad (3.9)$$

sadac f_0 arxis centraluri sixSirea;

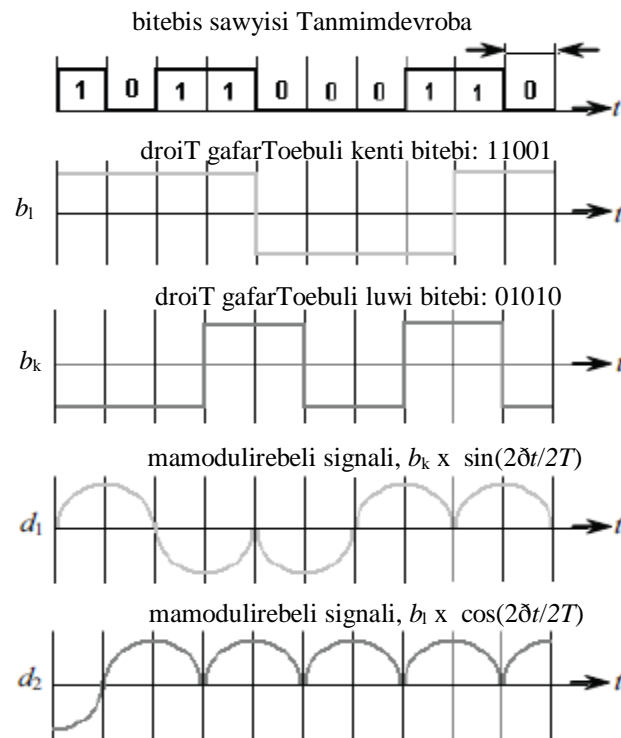
$F_s = 1/T$ monacemTa bitebis (simboloebis) gadacemis siCqarea.

rogorc iyo naCvenebi sixSirulad manipularebuli signalebis sxvaobiTi energia $E_{1,2} = E_s \frac{\sin \Delta\omega T}{\Delta\omega T}$ damokidebulia maT urTierTgancalkevebulobaze (urTierTdaSorebaze). '0' da '1' simboloebis gadamcemi signalebi orTogonaluria $\Delta\omega T = \delta(2l+1)$ wertilSi, sadac l – mTelia. cxadia, zeda da qveda sixSireebis (2.8) minimalur Zvras, romelic uzrunvelyofs orTogonalobas, Seesabameba $\Delta\omega T = \delta$ wertili, an $\Delta f = 1/2T = F_s/2$. mocemuli garemoeba ganapirobebs MSK modulaciis saxels. amasTanave sixSiruli modulaciis *indeqsi* tolia $m_{MKS} = \Delta f \cdot T = 0,5$, xolo fazis naxtomi simbolos (bitis) intervalze aris $\Delta\omega = \pm \Delta\omega T = \pm \delta/2$.

signalis formirebis wesis mixedviT, MSK modulacia OQPSK-s (offset QPSK) msgavsia (ix. § 2.2.2.2). ZiriTadi gansxvaveba maT Soris aris is, rom OQPSK-s marTkuTxa mamodularebeli signalebi (romelTa speqtri umaRles harmonikebs Seicavs) icvleba sinusoidebis (kosinusoidebis) naxevertalRovani monakveTebiT (sur. 2.21). es signalis speqtrs ufro

kompaqturs xdis. MSK signalis simZlavris simkvrivis speqtri ganisazRvreba gamosaxulebiT [14]:

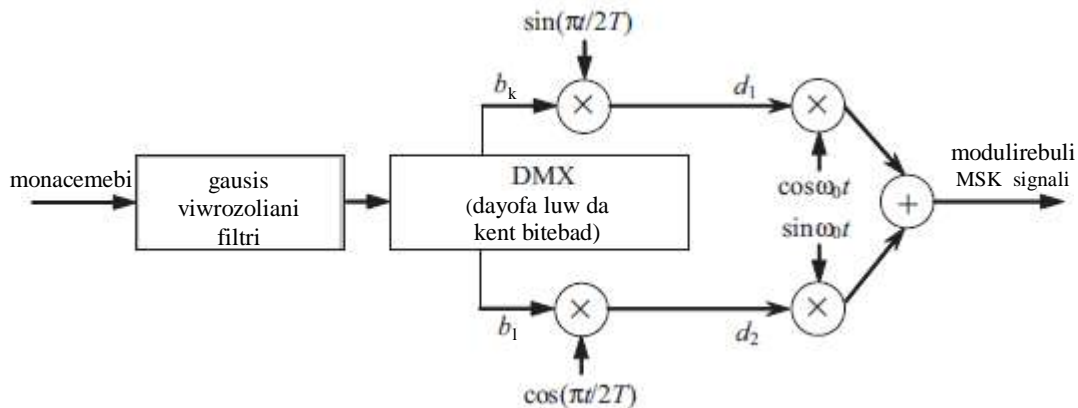
$$U_{MSK}(f) = \frac{4E_s}{\pi^2} \cdot \frac{1 + \cos 2\pi T_s \Delta f}{(1 - 4T_s^2 \Delta f^2)^2} .$$



sur. 3.7. MSK signalebis formirebis droiTdiagramebi [16]

პირველი დროის დიაგრამა სურ. 3.7 წარმოადგენს მონაცემების ბიტების ტანმიმდევრობას მოდულატორის შესასვლელზე, მეორე და მესამე - ლუი და კენტი $b_{\text{ლუი}}$ და $b_{\text{კენტი}}$ ბიტების ტანმიმდევრობებს, მიუძღვება MSK მოდულატორის კვადრატული არხის შესასვლელზე (მოდულატორის სტრუქტურული სქემა მოცემულია 3.8 სურ-ზე).

ბიტების ხანგრძლივობა მოდულატორის კვადრატულ არხში საწყისად შედარებით ორჯერ მეტია. სურ. 3.7 მე-4 და მე-5 დიაგრამებზე ნაჩვენებია მამოდულირებელი ფუნქციები, მიღებული ლუი და კენტი მიმდევრობების გამრავლებით კვადრატულ დაბალსიხშირულ სიგნალებზე $\sin\left(\frac{\pi t}{2T}\right)$ და $\cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right)$.
 შედეგად რადიოსიხშირული სიგნალი მიიღება კვადრატული არხის მამოდულირებელი ფუნქციების გადამტან $\cos\omega_0 t$ და $\sin\omega_0 t$ ჰარმონიკებზე გამრავლებით და მათი შემდგომი შეჯამებით.



სურ. 3.8. MSK (GMSK) მოდულატორის სტრუქტურა

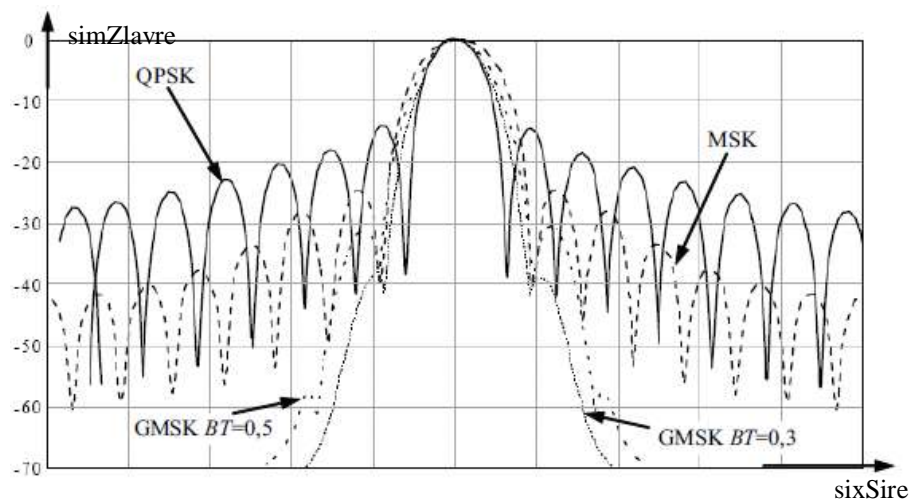
სიგნალის სპექტრის შემდგომი შევიწროება მიიწვევა მამოდულირებელი გზავნილების დამატებითი ფილტრაციის ხარჯზე `გაუსის` დაბალსიხშირული ფილტრით (სახელი წარმოიშობა ამ ფილტრის იმპულსური მაქსიმალური ფორმისგან). მამოდულირებელი იმპულსების d_1 და d_2 გზავნილთა ფორმა ასეთი ფილტრის გამოსავალზე ზარისმაგვარი ხდება, ხოლო შედეგად მიღებული სიგნალის სპექტრი – კიდევ უფრო

kompaqturi. modulaciis Sesabamis saxes *gausisseburi* MSK-i (Gaussian Minimum Shift Keying, GMSK) ewodeba.

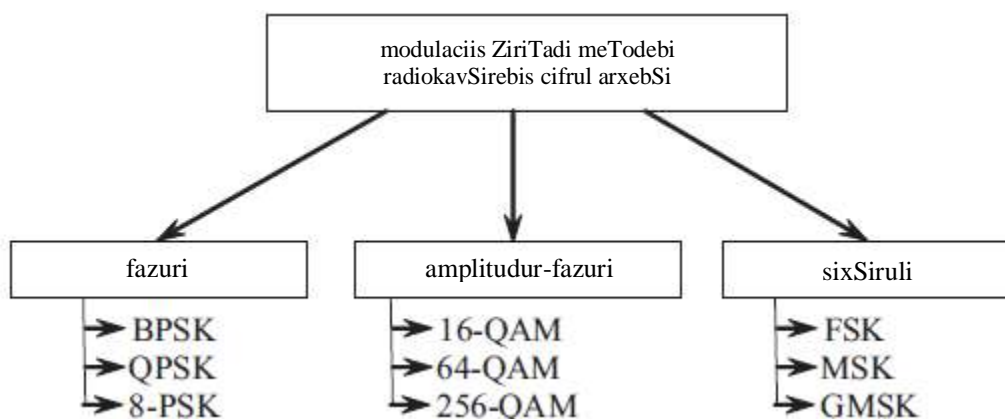
signalis speqtris kompaqturobis maxasiaTebel parametradi, xSirad iyeneben BT sidides – simbolos xangrZlivobis namravls maformirebeli filtris zolis siganeze. am parametrs `momsworebeli~ ewodeba. magaliTad, GSM sistemaSi $F_S \approx 270$ khc da $\Delta f = 81.3$ khc, saidanac $BT = 0,3$.

Sedarebis mizniT, 2.23 sur-ze naCvenebia QPSK, MSK da GMSK signalebis speqtrobi [14]. MSK-sTan ($BT=0,5$) SedarebiT ufro kompaqturi GMSK ($BT=0,3$) speqtri miiReba signalebs Soris orTogonalobis darRvevis fasad, rac negatiurad aisaxeba maT xelSeSlamdgradobaze.

Tanamedrove usadeno kavSiris sistemebSi gamoyenebuli cifruli modulaciis saxeebis klasifikacia naCvenebia 2.24 suraTze.



sur. 3.9. QPSK, MSK da GMSK signalebis simZlavreTa speqtrebi
 ($BT=0,3$ -sa da $BT=0,5$ -saTvis, Sesabamisd) [14]



sur. 3.10. Tanamedrove cifruli modulaciis ZiriTadi wesebi

თავი 4.

OFDM sixSiruli arxebis ortogonalური multipleქსირება

signali usadeno kavSiris qselSi sixSirul-seleqciuri miyuCebis Sedegad maxinjdeba, rac ganpirobegulia radiotalRebis gavrcelēbis mravalsxivianobi. mocemuli efeqti SeimCneva signalis ufro farTo zolis dros, vidre arxis koherentulobis zolis siganea. Tanamedrove ganaSenianebisTvis

dayovnebis (gafantvis drois) mniSvnelobis tipuri saSualo kvadratuli gadaxrisas $\Delta f = (1/2)mkwm$, arxis koherentulobis zolis sigane Seadgens, daaxloebiT, 100÷200 khc-s [17]. arxis zolis siganis aseTi SezRudviT SeuZlebelia informaciis gadacemis perspeqtiuli moTxovnebis adekvaturi siCqaris uzrunvelyofa amitom perspeqtiuli usadeno sistemebis radiointerfeisi iqmneba signalwarmoqmnis axali principebis bazaze, romelic dakavSirebulia e.w. *OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)* teqnologiasTan da *signalebis speqtris gafarToebis* meTodebTan multipleqsirebaSi igulisxmeba erTi fizikuri arxis monacemebis gadacemis organizeba monacemebis ramdenime logikur arxe. ganasxvaveben multipleqsirebas sixSiriT, droiT da kodiT. termin `multipleqsirebis~ (*Multiplexing*) arseboba OFDM-modulaciis axali meTodis dasaxelebaSi, razec laparaki iqneba qvemoT, leqsikurad gasagebi iqneba Semdgomi Txrobisas.

OFDM-is ZiriTadi idea isaa, rom arxis gatarebis zoli iyofa viwro zolebis jgufad (subarxebad), TiToeuls aqvs sakuTari qvegadamtani. yvela qvegadamtanze signali gadaicema erTdroulad, rac saSualebas izleva uzrunvelyofil iqnes informaciis gadacemis praqtikulad nebismierad didi saerTo siCqare, TiToeul calke subarxSi gadacemis dabali siCqariT. arsebiTad, OFDM farTozolian sixSirul-seleqciur arxs gardaqmnis mraval paralelur, sixSirul-araseleqciur, viwrozolian arxad. aseTi sqema warmatebiT upirispirdeba mravalsxivianobas, Tu simboloTa droiT xangrZlivoba yvela qvegadamtanze aWarbebs signalis udides dayovnebas.

qvegadamtanebis orTogonaloba da simboloTaSorisi interferenciis Tavidan acileba uzrunvelyofilia signalis struqturaSi *cikluri prefiqsis* SemotaniT (ganixileba qveviT).

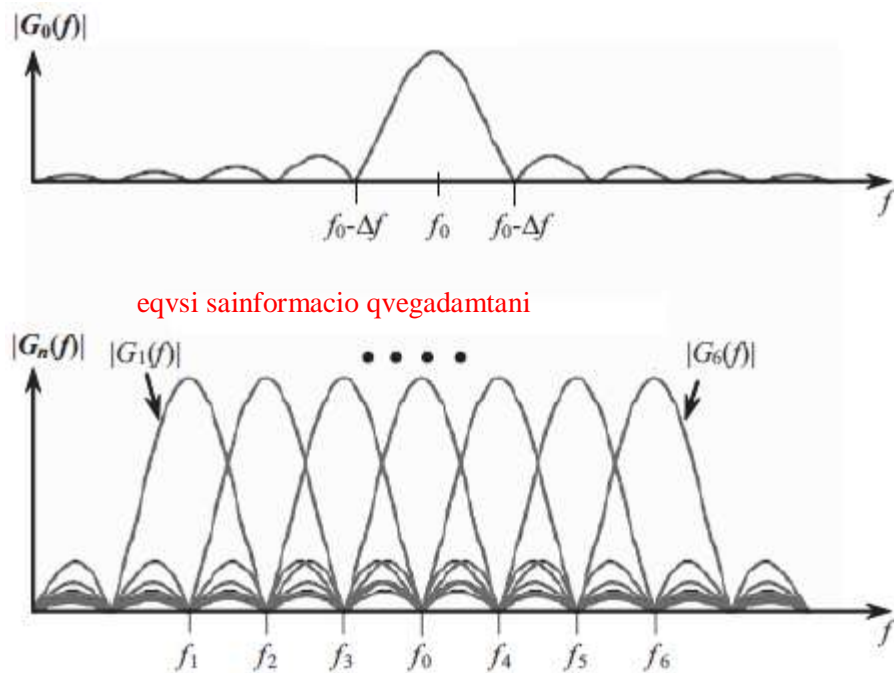
OFDM-is signali Sedgeba N orTogonaluri qvegadamtanisgan, modulirebuli monacemebis N paraleluri nakadiT. aseTi saxiT organizebuli subarxebis sixSiruli damoukidebloba uzrunvelyofilia qvegadamtanebis urTierTorTogonalobiT, romelic ganisazRvreba TanafardobiT (nax. 4.1):

$$\int_0^{T_S} \sin 2\pi f_n t \times \sin 2\pi f_k t dt = 0 \quad (4.1)$$

gamosaxuleba (4.1)-Si cvladi T_S – OFDM-simbolos xangrZlivobaa, f_n da f_k – Sesabamisad, n -uri da k -uri subarxebis gadamtani sixSireebia. amasTanave TiToeuli simbolo gadaicema droiT SezRuduli sinusoidaluri funqciiT. signalis elementis speqtri k subarxis qvegadamtanze aiwereba Semdegi funqciiT:

$$\frac{\sin 2\pi(f - f_k)}{2\pi(f - f_k)}$$

gadamtani



sur. 4.1. eqvs orTogonalur qvegadamtaniani OFDM-is signalis speqtri

orTogonalurqvegadamtaniani subarxebis formireba xorcieldeba gadamcemSi monacemTa simboloebis nakadis furies **ukudiskretuli gardaqmnis** (Inverse Discrete Fourier

Transform, IDFT) proceduris meSveobiT. am gardaqmnis moculoba ise airCeva, rom arc erTma subarxma ar ganicados Rrma miyuCeba. praqtikaSi IDFT (gadacem mxares) da DFT (furies diskretuli gardaqmna mimReb mxares) gardaqmnis realizacia xorcieldeba furies swrafi gardaqmnis (Fast Fourier Transform, FFT) algoriTmiT da asrulebs FFT- procesori.

4.1. sur-ze mocemulia OFDM signalis speqtris magaliTi eqvsi qvegadamtaniT sainformacio subarxebis formirebisaTvis da erTi centraluri aramodulirebuli gadamtaniT, romelic ar gamoiyeneba monacemebis gadasacemad. praqtikaSi aseve ar gamoiyeneba sixSiruli zolebis poziciebis garkveuli raodenoba DFT-s fanjris sazRvrebTan, rac xels uwyobs zolsgareTa gamosxivebebis donis Semcirebas.

amrigad, OFDM-modulatoris funqciebi daiyvaneba Sedgenili uwyveti signalis formirebande, romelic Seicavs N qvegadamtans, romelTagan udidesi nawili modulirebulia sainformacio simboloebiT T_S intervalze:

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a_k \times \cos(2\pi f_k t + \phi_k) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \operatorname{Re}(\hat{a}_k \times e^{j2\pi f_k t}),$$

sadac $\hat{a}_k = a_k \times e^{j\phi_k}$ – aris kompleksuri mamodulirebeli signali (QPSK an QAM);

T_S – simbolos xangrZlivoba;

a_k – simbolos amplituda;

$k = 1, 2, \dots, (N-1)$.

OFDM modulatoris funqciebis realizeba DFT cifruli procesoris bazaze varaudobs uwyveti droidan diskretulze ($t=nT$) gadasvlas. am dros (2.10) gamosaxuleba diskretizaciis periodis $T=T_S/N$ gaTvaliswinebiT miiRebs saxes:

$$S_n = S(nT) = \frac{1}{N} \operatorname{Re} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{a}_k \times e^{j2\pi k n \frac{T}{T_S}} = \frac{1}{N} \operatorname{Re} \sum_{k=0}^{N-1} \hat{a}_k \times e^{jkn \frac{2\pi}{N}}. \quad (4.3)$$

miRebuli gamosaxuleba aris paralelurad gadacemuli simboloebis furies **ukudiskretuli gardaqmnis** – IDFT nakrebis namdvili nawili. demodulaciis dros mimRebi mowyobiloba signalidan amoiRebs droiT anaTvlebs $\dot{S}(nT)$ da, gamoiyenebs ra maT mimarT DFT-s, formirebas ukeTebis gadmocemuli sainformacio simboloebis Sefasebas:

(4.4)

$$\hat{a}_k = \sum_{n=0}^{N-1} \dot{S}(nT) e^{-jkn \frac{2\pi}{N}}$$

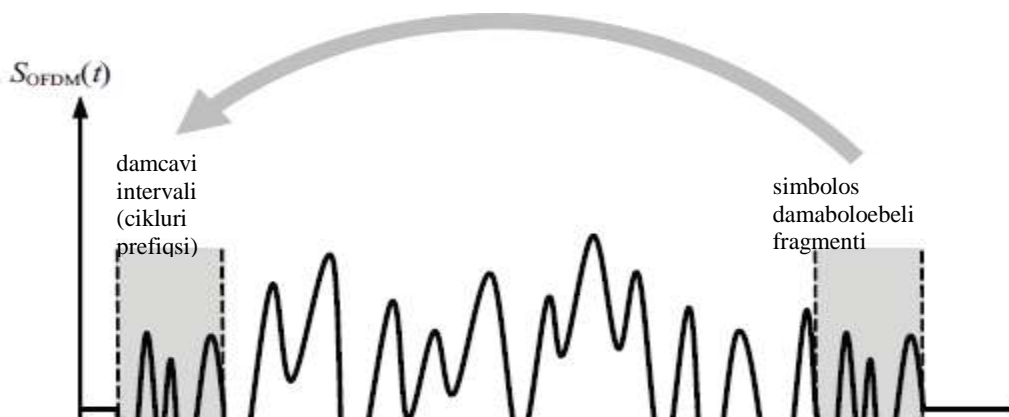
OFDM signalis miyuCebiani radioarxiT (e.i. sixSirul-seleqciuri arxiT) gadacemis dros dgeba ori problema. jer erTi, arxis sixSirul-seleqciuri maxasiaTebeli arRvevs orTogonlobas modulirebul qvegadamtanebs Soris, rac iwvevs arxTaSoris interferencias (mocemul SemTxvevaSi mas umjobesia ewodos `subarxTaSorisi~). meorec, erTi da imave gadamcemiT erTmaneTis miyolebiT gadacemuli simboloebis zeddebis gamo miiReba simboloTaSorisi interferencia.

es ukanaskneli SeiZleba Tavidan aviciloT, TiToeuli gadacemuli simbolos Semdeg damcavi intervalis datovebiT (cxadia, am intervalis xangrZlivobam unda gadaaWarbos signalis gavrcelebis maqsimalur dayovnebas). miuxedavad amisa, `Cveulebrivi~ damcavi intervali ver uzrunvelyofs mezobel qvegadamtanebze simboloebis orTogonalurobis SenarCunebas, ris gamoc maTi simboloebi ganicdian arxTaSoris interferencias.

aseTi saxis urTierTxelSeSlis acilebisaTvis gamoiyeneba `aqturi~ damcavi intervali, saxelwodebiT `cifruli prefiqsi~. cifrauli prefiqsi warmoadgens OFDM simbolos sainformacio fragmentis $\Delta_{\text{fin}}=A$ xangrZlivobis daboloebis ganmeorebas, amave fragmentis dawyebis win, `miwerils~ IDFT procesoris gamosavlelze (sur. 2.26).

amrigad, Δ intervalze gansazRvruli cikluri **prefiqsi aris**

$$p_{CP}(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{j2\pi f_k t}, \quad -\Delta \leq t \leq 0, \quad (4.5)$$



sur. 4.2. OFDM simboloSi damcavi intervalis formireba

signalis Semoklebuli perioduli gagrZeleba. ase rom, droSi gafarToebuli (prefiqsis damatebis xarjze) signali SeiZleba ase Caiweros:

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} a_k e^{j2\pi f_k t}, \quad -\Delta \leq t \leq NT. \quad (4.6)$$

pirobis Tanaxmad, prefiqsis xangrZlivobas irCeven imaze mets, vidre arxis mravalsxivianobiT gamowveuli signalis gavrclebis maqsimaluri dayovnebaa ($\Delta > \Delta_h$). arxis gavlenis gasaTvaliswineblad ukanasknels, Cveulebriv, modelirebas ukeTeben $[0, \Delta_h]$ intervaliT [18] SemosazRvruli impulsuri maxasiaTebliT. arxis gadamcem funqcias sixSirul areSi sazRvraven rogorc furies gardaqmnas am impulsuri maxasiaTeblidan. am dros varaudoben, rom nebismier f_k qvegadamtanze gadacemis maxasiaTeblis mniSvneloba

$$H_k = \int_0^{\Delta_h} h(t) e^{j2\pi f_k t} dt \quad (4.7)$$

mudmivi sididea (praqtikaSi igi mdovred cvladia, radgan varaudoben, rom miyuCeba subarxSi mdovrea – ix. § 2.1). aseT arxSi gatarebuli signali (navaraudebi $[0, nT]$ intervalze integrirebadad) SeiZleba warmovidginoT Semdegi saxiT

$$r(t) = s(t) \times h(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} H_k a_k e^{j2\pi f_k t}, \quad 0 \leq t \leq NT. \quad (4.8)$$

advili dasanaxia, rom (4.8) gansxvavdeba (4.7)-sgan mxolod mudmivi (TiToeuli subarxis farglebSi) H_k koeficientiT gansxvavdeba. cikluri prefiqsis gamoyenebis wyalobiT, gansazRvruli

integrali, gamoTvlati intervalze $[0, nT]$ nebismieri f_k sixSirisaTvis, ar icvlis Tavis mniSvnelobas simboloebis Soris droiT_i Zvrisas (Ä-s farglebSi) sxvadasxva qvegadamtanze. arxis H_k koeficientebis Soris gansxvaveba advilad aRmoifxvreba ekvalaizeris saSualebiT [18].

amrigad, rodesac virCevT cikluri prefiqsis xangrZlivobas $\Delta > \Delta_h$ pirobiT (igi unda iyos meti udidesi gavrcelobis dayovnebase), SesaZlebeli xdeba mezobeli sixSireebis droSi momijnave simboloebis urTierTgavlenis acileba. cikluri prefiqsis gamoyeneba saSualebas iZleva aRmovfxvraT, rogorc arxTaSorisi, ise simboloTaSorisi interferencia (vinaidan prefiqsi erTdroulad damcavi intervalicaa).

acicilebs ra arxTaSorisi da simboloTaSorisi interferenciebs, cikluri prefiqsi warmoadgens kavSiris xelSeSlamdgradobis gazrdis erTerT saSualebas droiT_i siWarbis gamoyenebis xarjze. miRebuli mogebis `fasi~, rogorc energetikuli danaxarjebis TvalsazrisiT, ise informaciis gadacemis siCqaris Semcirebis mixedviT, erTnairia da ganisazRvreba erTi da imave sididiT (ix. sur. 2.26):

$$\delta_E = \delta_R = \frac{T_{inf}}{T_{inf} + \Delta}$$

4.3 suraTi naTels xdis OFDM teqnologiis ZiriTad ideebs gadamcem traqtSi signalebis formirebis magaliTiT. 4.2 cxrilSi mocemulia OFDM-is safuZvelze agebuli kavSiris sistemebis ZiriTadi parametrebi.

cxrili 4.2

OFDM-is signalebis terminebi, gansazRvrebepi da parametrebi

parametri	gansazRvreba (maxasiaTebeli)
nominaluri zoli ΔF	sistemisaTvis gamoyofili sixSiruli zoli $\Delta F = F_s / n_s$
gamoyenebul sixSireTa zoli ΔF_u	signalis mier faqtobrivad dakavebuli sixSiruli zoli: $\Delta F_u = N_u \times \Delta f$. gamoyenebuli zoli nominalurze naklebia
diskretizaciis sixSire F_s	uwyveti signalis anaTvlebis sixSire (OFDM-is sasignalo procesoris sataqto sixSire)
diskretizaciis faqtori (sampling factor) n_s	diskretizaciis sixSiris fardoba sixSiruli arxis zolis siganesTan $n_s = F_s / \Delta F$ (tipuri mniSvneloba daaxloebiT 8/7)
FFT fanjris moculoba, $N = N_{FFT}$	FFT-s moculoba, ganxorcielebuli sasignalo procesoris mier. tipuri mniSvneloba: 256 (OFDM-isTvis) an 2048 (OFDMA-isTvis). martiv simboloTa erTobliobas, gadacemuls erTdroulad N_{FFT} qvegadamtaniT, zogjer FFT simbolos uwodeben
sixSiruli gancalkeveba qvegadamtanebis Soris, Δf	manZili sixSirul RerZze or mezobel qvegadamtans Soris: $\Delta f = F_s / N_{FFT}$ $= F_s / N$
OFDM simbolos sasargeblo nawilis xangrZlivoba, T_{inf}	OFDM simbolos `sainformacio~ nawilis xangrZlivoba (droiT _i xangrZlivoba) $T_{inf} = 1/\Delta f$ (orTogonalobis intervali)

dacviti intervalis (cikluri prefiqsis) xangrZlivoba, T_{CP}	$T_{CP} = G \times T_{inf}$. damcavi intervalis xvedritma G wilma SeiZleba miiRos mniSvnelobebi 1/4, 1/8, 1/16 an 1/32
OFDM simbolos xangrZlivoba, T_s	OFDM simbolo Sedgeba sasargeblo (sainformacio) nawilisa da damcavi prefiqsisagan $T_s = T_{inf} + T_{CP}$
gamoyenebul qvegadamtanTa raodenoba, N_u	gamoyenebul qvegadamtanTa ricxvi $N_u < N_{FFT}$ damokidebulia damcavi zolis zomaze. igi moicavs qvegadamtanebs monacemebis gadasacemad da sapiloto qvegadamtanebs: $N_u = N_{data} + N_{pilot}$, magaliTad $N_{FFT} = 256$ SemTxvevaSi $N_u = 200$
`nulovani~ qvegadamtanebi	sixSiruli poziciebi, gamoyenebuli damcavi zolis warmosaqmnelad. maT aseve miakuTvneben aramodulirebul gadamtans OFDM arxis centralur sixSirul poziciaze

moviyvanoT ricxviti magaliti, romelic damaxasiaTebelia OFDM teqnologiit agebuli satelekomunikacio sistemis signalebis tipuri parametrebisavis [19]:

- FFT fanjris moculoba: $N_{FFT} = 256$ qvegadamtani;
- gamoyenebul `sainformacio~ qvegadamtanTa raodenoba: $N_u = 200$;
- maT Soris sapiloto qvegadamtanebis raodenoba: $N_{pilot} = 8$;
- monacemTa gadasacemad gamoyenebul qvegadamtanTa ricxvi: $N_{data} = 192$;
- sistemisavis gamoyofili sixSiruli zolis sigane: $\Delta F = 7$ mghc;
- diskretizaciis faqtori (sampling factor) $n_s = 8/7$.

Ziritadi warmoebuli parametrebis angariSi:

- diskretizaciis sixSire (anaTvlebis an simboloebis mimdevrobis faqtobrivi sixSire):

$$F_s = n_s \times \Delta F = 8/7 \times 7 \text{ mghc} = 8 \text{ mghc};$$

- gancalkeveba qvegadamtanebs Soris:

$$\Delta f = F_s / N_{FFT} = 8 \text{ mghc} / 256 = 31,25 \text{ khc};$$

- simbolos sasargeblo nawilis xangrZlivoba:

$$T_{inf} = 1 / \Delta f = 1 / 31,25 \text{ khc} = 32 \text{ mkwm};$$

- damcavi intervalis xangrZlivoba: ganisazRvreba maqsimaluri sxvaobit pirdapiri xedvis farglebSi trasis sigrZesa da signalebis gavrcelbis maqsimaluri dayovnebis mqone traqtebs

Soris – Δ traq:

- Tu $G = 1/4$, $T_{CP} = G \times T_{inf} = 1/4 \times 32 \text{ mkwm} = 8 \text{ mkwm}$; Δ traq = $c \times T_{CP} = 2,4 \text{ km}$;
- Tu $G = 1/8$, $T_{CP} = G \times T_{inf} = 1/8 \times 32 \text{ mkwm} = 4 \text{ mkwm}$; Δ traq = $c \times T_{CP} = 1,2 \text{ km}$;
- Tu $G = 1/16$, $T_{CP} = G \times T_{inf} = 1/16 \times 32 \text{ mkwm} = 2 \text{ mkwm}$; Δ traq = $c \times T_{CP} = 0,6 \text{ km}$;
- Tu $G = 1/32$, $T_{CP} = G \times T_{inf} = 1/32 \times 32 \text{ mkwm} = 1 \text{ mkwm}$; Δ traq = $c \times T_{CP} = 0,3 \text{ km}$;

- simbolos xangrZlivoba ($G = 1/4$ -sTvis):

$$T_S = 32 \text{ mkwm} + 8 \text{ mkwm} = 40 \text{ mkwm};$$

- kadrSi bitebis ricxvi ($N_S = 20$ simbolo) Seadgens $T_{\text{kadr}} = 800 \text{ mkwm}$;

- kadrSi bitebis ricxvi (QPSK-modulaciisaTvis):

$N_b = (N_u - N_{\text{pilot}}) \times N_S \times \log_2 M = (200 - 8) \times 20 \times 2 = 7680$, sadac M anbanis moculobaa, xolo $\log_2 M$ – gadacemul simboloze mosuli informaciis bitebis raodenobaa (2 biti QPSK-sTvis);

- monacemebis gadacemis rezultirebuli siCqare:

$$R = N_b / T_{\text{kadr}} = 9,6 \text{ mgbt/wm}.$$

თავი 5

საარხო (მაკორეტირებელი) კოდირება

5.1. მაკორეტირებელი კოდირების ამოცანები და ზირიტადი პრინციპები

5.1.1. კოდირების ამოცანები ტელეკომუნიკაციაში. ფართო გაგებით, ცნება *კოდირება ინფორმაციის უარმოდგენის* სინონიმია. სეტიობინებას სეტიობინებათა სასრული სიმრავლიდან სეიზლება სეუფარდოტ რიგითი ნომერი (რიცხვი), რომლის უარმოდგენაც ატვლის რომელიმე რაც სისტემაში უარმოყმნის *კოდს*. რადიოარხით სეტიობინების გადაცემა დაკავსირებულა ხელსეისების ზემოყმდებასთან და სეცდომების უარმოსობასთან. მონაცემების გადაცემის უტუარობის გაზრდის მიზნით იყენებენ **კოდების** სპეციალურ სახეებს – *ეფექტურსა და ხელსეისლამდგრადს*.

კოდირების სესახებ სენონის ტეორემის თანახმად, სეტიობინების გადაცემის სიყვარულს არხისათვის ხელსეისების გარეშე სეიზლება გაიზარდოს არხის გამტარუნარიანობამდე, სეტიობინების თანაბარლბატურ სტატისტიკურად დამოუკიდებელ სიმბოლოებად გარდაყმნის სედეგად. ეს ამცირებს სეტიობინებათა გამოსახვისათვის საურო სიმბოლოთა სასუალო რიცხვს (ამცირებს სიუარბეს). მოცემული პროცედურა, რომელსაც სეტიობინების უაროს კოდირება ეწოდება, სასუალებას იზლევა ეს სეტიობინება ან გადავცე, ან მოვამზადოთ სემდგომი საარხო კოდირებისათვის, ნისანთა ნაკლები რიცხვით და ამით გამოვატავისუფლებოთ არსებული სიუარბის რეზერვს. ვინაიდან ასეთი პროცედურა ტავისი არსით დაიყვანება კავსირის სისტემის დროითი ან სიხსირული ეფექტურობის გაზრდამდე, მას ხსირად *ეფექტური კოდირება* ეწოდება.

მიდგომები, რომლებიც გამოიყენება ეფექტური კოდირების, ინტუიციურად ნატელია და ცენი აზრით არ იტოვებს დეტალურ განმარტებას. მაგალიტად, ცნობების გადაცემა ფრადი ფონის სესახებ მულტიმედიაში სეიზლება განხორციელდეს ერთი რიცხვითი მნიშვნელობით და არ მოიტოვებს ყველა პიქსელის ცხადად არუერას. ეფექტური კოდირების მეტოდის კლასიკური მაგალიტია ე.უ. სენონ-ფანოს პროცედურა, რომლის პრინციპები რეალიზებულა უმეტეს კომპიუტერულ პროგრამა-არქივატორში. სეტიობინებათა ცალკეული სახეობისათვის დამოსახვებულა ეფექტური კოდირების სპეციალური მეტოდეები. მაგალიტად, სალარაკო სეტიობინებების სეკუმსვისათვის ეს არის ალგორითმი CELP (Code- Excited Linear Prediction), გამოსახულებისათვის – სტანდარტი JPEG (Joint Photographic Experts Group), ვიდეომონაცემების კომპრესიისათვის სხვადსხვა სერიის MPEG (Moving Pictures Experts Group) სტანდარტები.

xelSeSlamdgradi kodirebis idea Teoriulad dasabuTebulia *Senonis TeoremiT xelSeSlebiani arxebisaTvis*. am TeoremiT mtkicdeba, rom arxis gamtarunarianobaze naklebi warmadobis Setyobinebis wyarosaTvis aucileblad arsebobs kodirebis wesi, romelic uzrunvelyofs informaciis gadacemas, Secdomis nebismierad mcire albaTobiT. Teorema ar exeba mocemuli SesaZleblobis uzrunvelmyofi kodebis agebis wesebs. misi damtkicebis procedurebis ganxilvidan [20] irkveva, rom Secdomis nebismierad mcire albaToba miiRweva mxolod *kodur niSanTa mimdevrobis xangrZlivobis usasrulod zrdisas*.

informaciis uSecdomod gadacemisaTvis saWiro makoreqtirebeli kodebis asagebad saWiroa kodebSi siWarbis Setana, romlis moculoba arxSi xelSeSlebis Sedegad arsebuli danakargebis proporciulia.

5.1.2. xelSeSlamdgradi kodirebis ZiriTadi principebi. kods, romelsac aqvs Secdomis aRmoCenis da gasworebis unari, xelSeSlamdgradi kodi ewodeba. kodebis viwro kategoria aris makoreqtirebeli kodebi, romlebic Secdomebis gasworebis saSualebas iZleva. Secdomebis aRmoCenis ZiriTadi idea arsiT bunebrivi enis teqstSi orTografiuli Secdomebis aRmoCenis msgavsia. Secdoma romelime sityvaSi unda aRmoifxvras Tu simbolos an asos Secvlam es sityva gardaqmna mocemuli enis `nebadarTul~ sityvaTa siaSi (leqsikonSi) ararsebul Canawerad. igive SeiZleba vTqvaT Secdomebis gasworebis ideasTan dakavSirebiT. vxelmZRvanelobT intuciiT da vcvliT arasworad daweril sityvas am enis leqsikonis im sityviT, romelic ganxiluli Canawerisagan niSanTa minimaluri ricxviT gansxvavdeba. magaliTad, Tu romeliRac teqstSi Sevxdit Canawers `kodulacia~, Cven mas ufro SevcvliT sityviT `modulacia~ (romelic misgan erTi poziciiT gansxvavdeba), vidre `populacia~ (ori pozicia) da miTumetes ara sityviT `federacia~ (gansxvaveba eqvsi pozicia).

sinamdvileSi, adamiani sxvadasxva saxis Setyobinebis Sinaarsis aTvisebisas, xelmZRvanelobs Tavisi intuciiT, lingvistikuri codniTa da semantikuri mosazrebebiT. kodirebis teqnikaSi mizanSewonilia ufro martivi, formalizebuli wesebis gamoyeneba. praqtikaSi gadasacemi simboloebis mimdevrobas amateben Warb simboloebs ise, rom isini akmayofilebdnen, zogierT damatebiT moTxovnebs, romelTa Semowmebac mimReb mxares saSualebas miscems aRmoaCinos da gasworos Secdomebi. cnobil kodTa umetesobis aseTi SesaZlebloba ganpirobebulia maTi algebruli struqturiT, ris gamoc am konstruqcias xSirad *algebruli kodi ewodeba*.

ganvixiloT xelSeSlamdgradi kodirebis sabazo principebi da cnebebi. termini *kodi* aRniSnavs yvela nebadarTuli koduri sityvis erTobliobas an maTi agebis wess. kodis sityvebi Sedgeba sainformacio da Semmowmebeli simboloebisagan, romlebic umartives SemTxvevaSi poziciebiT gansxvavdeba (aseT kodebs *dayofadi an sistematuri* ewodeba). sainformacio simboloebi – simboloTa mimdevroebia, romlebic arxis koderis Sesavalze Semodis. rom vTqvaT, swored isinia gadasacemi Setyobineba. Semmowmebeli simboloebis formireba xdeba sainformacio simboloebisagan kodis agebis wesebis Sesabamisad. am wesis mixedviT dekodirebis dros mimRebis mier miRebuli koduri sityvisagan warmoiqmneba miRebul SemmowmeblebTan Sesadarebeli Semmowmebeli simboloebi (romeITa identifikaciad xdeba maTi poziciis mixedviT). Tu isini erTmaneTs ar emTxveva, es niSnavs, rom gadacemis dros daSvebulia Secdoma.

koduri sityvebis gansxvavebis sazomad gamoiyeneba *d koduri manZili* (poziciaTa ricxvi, romliTac koduri sityvebi erTmaneTisagan gansxvavdeba). orobiTi kodis sityvebs Soris minimaluri koduri manZilis gansazRvrisaTvis unda Sejamdes es koduri sityvebi modulus mixedviT da jamSi daiTvalos erTianebis raodenoba.

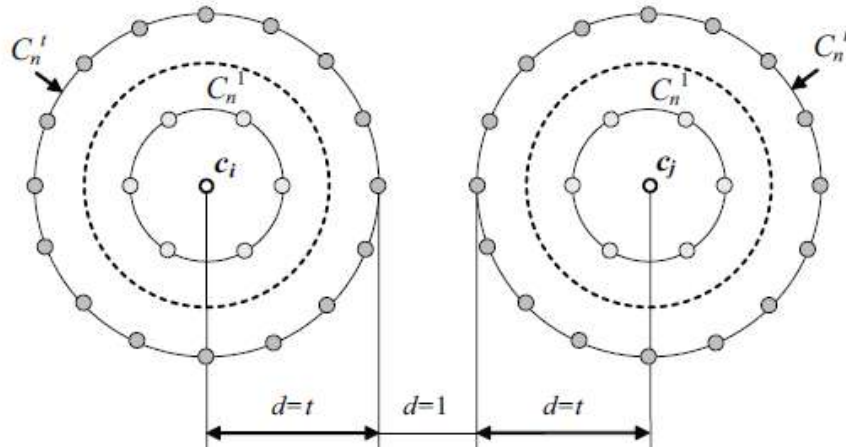
minimalur manZils, kodis yvela nebadarTul **sakodo** sityvaTa wyvilebs Soris, *minimaluri* koduri *manZili* ewodeba. am manZils hemingis manZilsac uwodeben.

zemoTqmulidan gamomdinareobs, rom dekodirebis dros kodirebuli sityvis miRebis xarixis SefasebisaTvis mizanSewonilia airCes kodis nebadarTuli sityva minimaluri manZiliT miRebuli sityvis mimarT. aseTi kodireba `optimaluria~ da mas maqsimalurad sarwmuno dekodirebis principi ewodeba.

imisTvis, rom kodma erTdroulad aRmoaCinos aranakleb S Secdomisa, mas unda hqondes nebadarTul sityvebs Soris minimaluri manZili $d_{\min} \geq s+1$. kodi saSualebas iZleva Seasworos SecdomaTa yvela konfiguracia, t-mde (CaTvliT) Secdomebis Semcveli, Tu TiToeul maTgans mivyavarT iseT akrZalul sityvamde, romelic damaxinjebul kodur sityvasTan ufro `axlosaa~, vidre amave kodis nebismieri sxva nebadarTuli sityva.

yvela sityva, romelic warmoqmnilia romeliRac nebadarTuli koduri c_i sityvis simboloebis $p \leq t$ damaxinjebiT, warmoqmnis qvesimravles, romelic naCvenebia 5.1 **sur-ze** koncentruli wrewirebis saxiT (Semoxazuli am sityvis Sesabamisi wertilis garSemo). TiToeul aseT qvesimravleSi n sigrZis kodis nebadarTul sityvaTa raodenoba tolia C_n^p (e.i. jgufTeBaTa ricxvis n -sagan p -Ti).

5.1 **sur-ze** advili SesamCnevia, rom miTiTebuli qvesimravleebi, rom ar gadaikveTon, minimaluri hemingis manZili nebadarTul kodur sityvebs Soris unda akmayofilebdes Tanafardobas $d_{\min} \geq 2t+1$. Tu xelSeSlis zemoqmedebis gamo koduri sityva gadava `Tavisi~ wris erT romelime wertilSi nomriT $p \in \{1, 2, \dots, t\}$, koderi aseT Secdomas gaasworebs.



sur. 5.1. kodis makoreqtirebeli SesaZleblobis hemingis manZilze damokidebuleba

amrigad, makoreqtirebeli kodebis sawyis parametrebia:

- kodis sigrZe n (ricxobrivad igi tolia sityvaSi simboloTa raodenobis);
- **sakodo** sityvaSi sainformacio simboloebis raodenoba k ;
- minimaluri koduri manZili d_{\min} (hemingis manZili).

kodis sigrZe n da misi sainformacio nawilis sigrZe k cal saxad gansazRvraven Semmowmebel simboloTa ricxvs $n-k$, *kodis siWarbes*, agreTve *kodirebis siCqares*. es ori ukanaskneli, *kodirebis mogebasTan* erTad, nebismieri xelSeSlamdgradi kodis umniSvnelovanesi maxasiaTebelia.

kodis siWarbe ganisazRvrebba kodis sainformacio nawilze damatebuli Semmowmebeli elementebis ricxvis SefardebiT mis saerTo sigrZesTan (sainformacio nawilis sigrZesTan):

$$\chi = \frac{n-k}{n} = 1 - \frac{k}{n}; \quad \chi_2 = \frac{n-k}{k} = \frac{n}{k} - 1.$$

siWarbe axasiaTebis `zeddebul xarjs~ romelsac adgili aqvs Setyobinebis gadacemis dros. kodebs, romlebic uzrunvelyofen gansazRvrul makoreqtirebel unars, minimaluri SesaZlo siWarbisas, optimaluri ewodeba.

kodis siCqare $R_c = \frac{k}{n} = 1 - \chi$ axasiaTebis informaciis gadacemis xvedriT

Semcirebas gadacemis utyuarobis gazrdisaTvis, kodirebis mocemuli wesis dros. is aseve axasiaTebis xelSeSlamdgradobis gazrdis fass, rogorc kodirebuli Setyobinebebis gadasacemad saWiro sixSiruli zolis gafarToebas, arakodirebuli Setyobinebebis gadacemisaTvis saWiro zolTan SedarebiT.

makoreqtirebeli kodis yvelaze saukeTeso informaciuli maxasiaTebelia kodirebis energetikuli mogeba. is ricxobrivad tolia signali/xmauris fardobis sxvaobisa, Setyobinebis kodirebuli da arakodirebuli gadacemis dros, simboloebis miRebis Secdomis albaTobis gansazRvruli mniSvnelobisaTvis. kodirebis mogebas xSirad decibelebiT (db) gamosaxaven.

algebruli kodebi iyofa or did klasad: blokur da uwyvet kodebad. pirvelisaTvis kodireba daiyvaneba k gadasacemi sainformacio simbolosagan n -simboloiani koduri sityvis Camoyalibebaze. meore SemTxvevaSi kodireba xorcieldeba blokebad dayofis gareSe (uwyvetad), magram aseve daiyvaneba siWarbis **Sesatanad** gadasacem sainformacio mimdevrobaSi.

blokur kodebs xSirad aRniSnaven rogorc (n,k) kodebi. aq n makoreqtirebeli kodis sigrZea, k - masSi informaciuli elementebis raodenoba (rogorc zemoT iyo aRniSnuli).

თავი 6.

მობილური ქსელების დაგეგმარება

6.1 ტრაფიკისა და დაფარვის ანალიზი, სისტემის ღირებულება

დასაგეგმარებელი სისტემის ღირებულება არის ერთ-ერთი მნიშვნელოვანი ფაქტორი. ქსელის მშენებლობაზე დაბანდებული თანხა ამოღებული უნდა იქნას მოცემული დროის პერიოდში. კონკრეტული სისტემის პროექტირებაზე მუშაობენ ტექნიკური, ფინანსური და მარკეტინგის სპეციალისტები, რომლებიც ადგენენ ბიზნეს-გეგმას. ამ გეგმაში ტელეკომუნიკაციური ბაზრის პირობებისა და ოპერატორის ტექნიკური და ფინანსური შესაძლებლობების გათვალისწინებით

შეფასდება შესაძლო დანახარჯების რაოდენობა და მოსალოდნელი მოგება კონკრეტული რეალიზაციის შედეგად.

6.2 სისტემის გამტარუნარიანობის შეფასება

სისტემის პროექტირების საწყის ეტაპზე გამტარუნარიანობის ქვეშ იგულისხმება მომსახურებადი აბონენტების შესაძლო რაოდენობა. პროექტირების ამ ეტაპზე გამტარუნარიანობა უნდა შეირჩეს მოცემულ რეგიონში მობილური კავშირის პოტენციალურ მომხმარებლების დასაკამაყოფილებლად

6.3 დაფარვა, მომსახურების ზონა

ქალაქის მობილური კავშირის რადიოდაფარვის ზონა უნდა მოიცავდეს ქალაქის მთელ ტერიტორიას, გარეუბნების დასახლებული პუნქტების და მიმოსვლის გზების ტერიტორიებს.

6.4 გამომახებების ბლოკირების ალბათობები (GOS- Grade of service)

დაფარვის მოცემული სიდიდის და ტრაფიკის არხების მოცემული რაოდენობისათვის გამოითვლება გამომახებების ბლოკირების სიდიდე. ეს არის შეერთებების დამყარების წარუმატებელი მცდელობების პროცენტული მნიშვნელობა

მთელ გამომახებებში, გამოწვეული გადატვირთვებით ქსელში. ბლოკირების ალბათობა იანგარიშება ერლანგის ფორმულით. გამომახებების წარმოქმნა (შემოსვლა) იმ მომენტში, როდესაც ყველა არხი დაკავებულია იანგარიშება გამოსახულებით:

$$B_{\text{ბლოკ}} = \frac{A^N}{N! \sum_{Z=0}^N \frac{A^Z}{Z!}} \quad (6.1)$$

სადაც N – ტრაფიკის არხების რაოდენობა; A – მომსახურებადი დატვირთვა, ერლანგი. ერთ აბონენტზე მოსული დატვირთვა იანგარიშება გამოსახულებით:

$$A = \frac{nT}{3600} \quad (6.2)$$

სადაც n – შეერთებების რაოდენობაა დროის გარკვეულ ინტერვალში, მაგ.:

1 სთ, ან 3600 წმ; თ- საუბრის საშუალო დრო შეერთების განმავლობაში, წმ. საოპერატორო ლიცენზირების მოთხოვნების შესაბამისად საერთო სარგებლობის მობილური კავშირის ქსელებში (PLMN) გამოძახებების ბლოკირების ალბათობა მიიღება $P_{bl} \leq 5\%$, ხოლო ერთ აბონენტზე მოსული ხვედრითი დატვირთვა 0,015 ერლანგია. ზოგჯერ პროექტირების დროს ჩაიდება გაზრდილი მოთხოვნები – ჯამური ტრაფიკი უდიდესი დატვირთვის საათში (უდს) აღმავალ-დაღმავალი მიმართულებით 0.025 ერლ, ბლოკირების ალბათობა - 2%. მობილური ქსელების ოპერატორების სტატისტიკით, პოსტსაბჭოთა სივრცეში (რუსეთი, უკრაინა, საქართველო) ერთი აბონენტის მიერ შექმნილი დატვირთვა 0,007-0,016 ერლ ფარგლებშია.

ერლანგის B ფორმულით გათვლის შედეგები მოყვანილია ცხრილში 6.1.-ში.

ცხრილი 6.1. ერლანგის ცხრილი

n	.007	.008	.009	.01	.02	.03	.05	.1	.2	.4	n
1	.00705	.00806	.00908	.01010	.02041	.03093	.05263	.11111	.25000	.66667	1
2	.12600	.13532	.14416	.15259	.22347	.28155	.38132	.59543	1.0000	2.0000	2
3	.39664	.41757	.43711	.45549	.60221	.71513	.89940	1.2708	1.9299	3.4798	3
4	.77729	.81029	.84085	.86942	1.0923	1.2589	1.5246	2.0454	2.9452	5.0210	4
5	1.2362	1.2810	1.3223	1.3608	1.6571	1.8752	2.2185	2.8811	4.0104	6.5955	5
6	1.7531	1.8093	1.8610	1.9090	2.2759	2.5431	2.9603	3.7584	5.1086	8.1907	6
7	2.3149	2.3820	2.4437	2.5009	2.9354	3.2497	3.7378	4.6662	6.2302	9.7998	7
8	2.9125	2.9902	3.0615	3.1276	3.6271	3.9865	4.5430	5.5971	7.3692	11.419	8
9	3.5395	3.6274	3.7080	3.7825	4.3447	4.7479	5.3702	6.5464	8.5217	13.045	9
10	4.1911	4.2889	4.3784	4.4612	5.0840	5.5294	6.2157	7.5106	9.6850	14.677	10
11	4.8637	4.9709	5.0691	5.1599	5.8415	6.3280	7.0764	8.4871	10.857	16.314	11
12	5.5543	5.6708	5.7774	5.8760	6.6147	7.1410	7.9501	9.4740	12.036	17.954	12
13	6.2607	6.3863	6.5011	6.6072	7.4015	7.9667	8.8349	10.470	13.222	19.598	13
14	6.9811	7.1154	7.2382	7.3517	8.2003	8.8035	9.7295	11.473	14.413	21.243	14
15	7.7139	7.8568	7.9874	8.1080	9.0096	9.6500	10.633	12.484	15.608	22.891	15
16	8.4579	8.6092	8.7474	8.8750	9.8284	10.505	11.544	13.500	16.807	24.541	16
17	9.2119	9.3714	9.6171	9.6516	10.656	11.368	12.461	14.522	18.010	26.192	17
18	9.9751	10.143	10.296	10.437	11.491	12.238	13.385	15.548	19.216	27.844	18
19	10.747	10.922	11.082	11.230	12.333	13.115	14.315	16.579	20.424	29.498	19
20	11.526	11.709	11.876	12.031	13.182	13.997	15.249	17.613	21.635	31.152	20
21	12.312	12.503	12.677	12.838	14.036	14.885	16.189	18.651	22.848	32.808	21
22	13.105	13.303	13.484	13.651	14.896	15.778	17.132	19.692	24.064	34.464	22
23	13.904	14.110	14.297	14.470	15.761	16.675	18.080	20.737	25.281	36.121	23
24	14.709	14.922	15.116	15.295	16.631	17.577	19.031	21.784	26.499	37.779	24
25	15.519	15.739	15.939	16.125	17.505	18.483	19.985	22.833	27.720	39.437	25
26	16.334	16.561	16.768	16.959	18.383	19.392	20.943	23.885	28.941	41.096	26
27	17.153	17.387	17.601	17.797	19.265	20.305	21.904	24.939	30.164	42.755	27
28	17.977	18.218	18.438	18.640	20.150	21.221	22.867	25.995	31.388	44.414	28
29	18.805	19.053	19.279	19.487	21.039	22.140	23.833	27.053	32.614	46.074	29
30	19.637	19.891	20.123	20.337	21.932	23.062	24.802	28.113	33.840	47.735	30
31	20.473	20.734	20.972	21.191	22.827	23.987	25.773	29.174	35.067	49.395	31
32	21.312	21.580	21.823	22.048	23.725	24.914	26.746	30.237	36.295	51.056	32

6.5 დასაშვები სიხშირეების ანალიზი

პროექტირების დროს დასაშვები (მისაწვდომი) სიხშირეების ანალიზისათვის მნიშვნელოვანია ელექტრომაგნიტური თავსებადობის (ემთ) უზრუნველყოფა; ემთ განიხილება ორ დონეზე:

- სისტემთაშორისო ემთ;
- შიდასისტემური ემთ.

სისტემთაშორისო ემთ გულისხმობს მობილური კავშირის მიმღებ-გადამცემი სადგურების ქვესისტემის (BSS) ერთობლივ მუშაობას სამოქალაქო და სპეციალური დანიშნულების სხვა რადიოელექტრონულ საშუალებებთან, რომლებიც მუშაობენ იგივე სიხშირულ დიაპაზონში, კოორდინირებული დაშორებების საზღვრებში. სისტემთაშორისი ემთ უზრუნველყოფა მიიღწევა სიხშირული დიაპაზონის სათანადო დაყოფით და იგი ხორციელდება ოპერატორების მიერ რადიოსიხშირეების გამოყენების ლიცენზირების დროს. სისტემთაშორისი ემთ უზრუნველყოფს ერთ ობიექტზე დაყენებული სხვადასხვა რადიოელექტრონული საშუალების ისეთ ერთობლივ მუშაობას, როდესაც არ არსებობს როგორც მათი სიხშირეების ასევე მათი ჰარმონიკებისა და ინტერმოდულაციების დროს წარმოქმნილი სიხშირეების ურთიერთხელშეშლა.

6.6 კავშირის ხარისხი

მობილური კავშირის სისტემაში ხარისხი განისაზღვრება მრავალი ფაქტორით:

- ბლოკირების ალბათობით(GOS);
 - RX Quslity;
 - SQI (Speech Quality Index).

აბონენტების განაწილების ანალიზი

პროექტირების საწყის ეტაპზე გაანალიზდება:

- ტერიტორიის განაშენიანების სიმკვრივე და არათანაბრობა;
- მოცემულ რაიონში საავტომობილო მიმოსვლის მიმართულება და დატვირთულობა;
- არსებული ტელეკომუნიკაციური ქსელების (PSTN და PLMN) დატვირთვის სტატისტიკა.

ამ მონაცემების საფუძველზე განისაზღვრება მობილური კავშირის ქსელის ტოპოლოგია. საბაზო სადგურების ქვესისტემის (BSS) სტრუქტურა აიგება ფიქური სტრუქტურის საფუძველზე. ფიქების რადიუსი შეირჩევა სააბონენტო დატვირთვის სიმკვრივისა და მოთხოვნილი გამტარუნარიანობის მიხედვით. განასხვავებენ ფიქების ზომების სამ გრადაციას:

- მაკროფიქა (რადიუსით 3,5 ÷ 35 კმ) ;
- მიკროფიქა (რადიუსით 0.5 ÷ 3,5 კმ) ;
- პიკოფიქა (რადიუსით < 0,5 კმ).

ხშირად მიკროფიქები ჩაისმება მაკროფიქებში, რაც ლოკალურად გაზრდილი ტრაფიკის შემთხვევაში უზრუნველყოფს საჭირო გამტარუნარიანობის მიღწევას.

პროექტირების დროს გაითვალისწინება აგრეთვე სხვა ტექნიკური, ეკონომიური და სოციალური ფაქტორები, კერძოდ:

- რეგიონებში სხვა მობილური ოპერატორის არსებობა ან შემოსვლის შესაძლებლობა. თუ ასეთი ოპერატორი არსებობს მაშინ ფასდება მისი მუშაობა, ფასების პოლიტიკა, გაითვალისწინება მისი ქსელის დადებითი და უარყოფითი მხარეები;
- ფასდება მოსახლეობის გადახდისუნარიანობა და მატერიალური კეთილდღეობა.

საბაზო სადგურების (BTS) რაოდენობის განსაზღვრა

პროექტირების საწყის ეტაპზე საჭიროა ე.წ. ნომინალური ფიქური გეგმის შედგენა. ეს გეგმა წარმოადგენს მომავალი ფიქური ქსელის გრაფიკულ გამოსახულებას და გამოიყურება, როგორც გეოგრაფიულ რუკაზე დატანილი ფიქების კრებული. ამისათვის ჯერ საჭიროა განისაზღვროს საბაზო სადგურების რაოდენობა, რომელიც გამოითვლება ორი პარამეტრით:

- უწყვეტი რადიოდაფარვის უზრუნველყოფა;
- საჭირო გამტარუნარიანობის უზრუნველყოფა.

საწყის ეტაპზე შეუძლებელია საჭირო სიზუსტით განისაზღვროს სისტემაში დატვირთვის განაწილება. პროექტირების ამ ეტაპზე საჭიროა უზრუნველყოფილი იქნას მოცემული ტერიტორიის უწყვეტი რადიო დაფარვა. საჭიროა, BTS -ებს შორის ისეთი მანძილის შერჩევა, რომ თუ საჭიროების შემთხვევაში GSM-900 სისტემას დაემატება GSM-1800 (გამტარუნარიანობის გაზრდის მიზნით), დაკმაყოფილებული იქნას მოთხოვნები სიგნალის სიმძლავრისა და ხარისხის მიმართ.

გამტარუნარიანობის საჭირო სიდიდის მიღწევისათვის არსებობს ორი მეთოდი მიმღებ გადამცემების რიცხვის გაზრდა და ნახევარსისწრაფიანი არხების (Hr) გამოყენება.

BTS-ებს შორის ოპტიმალური მანძილის შერჩევა დამოკიდებულია ადგილმდებარეობაზე და სიხშირულ დიაპაზონზე. ფიჭების ზომები, რეკომენდებული კომპანია ERICSSON-ის მიერ ორდიპაზონიანი ქსელებისათვის მოყვანილია ცხრილში 6.2.

ცხრილი 6.2. ფიჭის ოპტიმალური ზომები

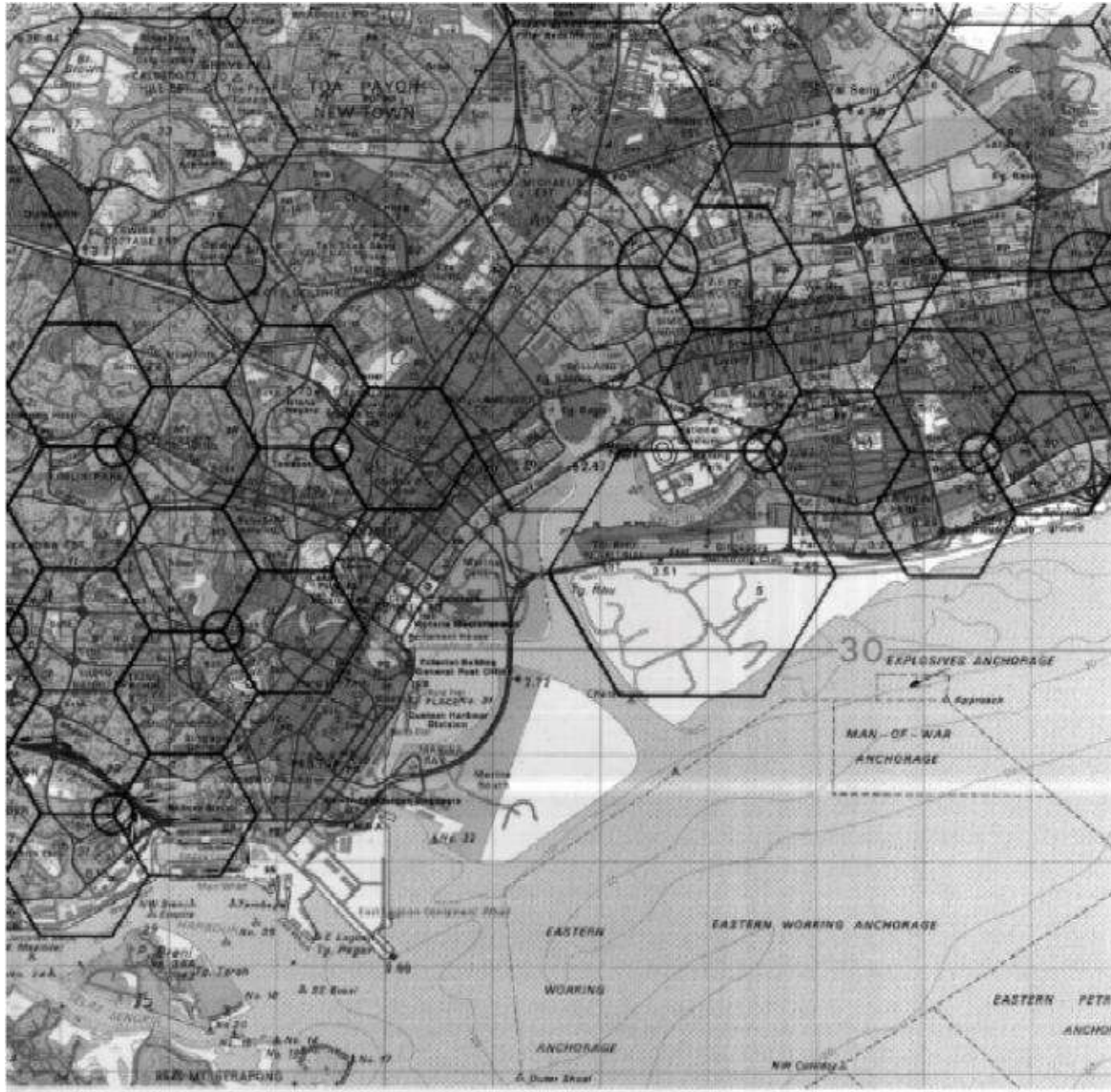
	GSM 1800		GSM 900	
	ფიჭის რადიუსი, კმ	დაშორება BTS-ებს შორის, კმ	ფიჭის რადიუსი, კმ	დაშორება BTS-ებს შორის, კმ
ქალაქი	2.7	4.0	3.7	5.6
ქალაქის შემოგარენი	5	7.5	8.1	12.2
ღია ადგილმდებარეობა	22	33	27	41

ცხრილში მოყვანილი სიდიდეები წარმოადგენენ Bთშ-ების რაოდენობის შეფასების ზომებს უწყვეტი რადიოდაფარვის მიღწევისათვის.

იქ სადაც მოსალოდნელია ტრაფიკის დიდი მნიშვნელობა, გათვალისწინებულია BTS-ების უფრო ახლო-ახლო განლაგება.

6.7 ნომინალური ფიჭური გეგმის რუქის შედგენა

მას შემდეგ რაც შეკრებილი იქნება მონაცემები დატვირთვის საჭირო მნიშვნელობის და მოთხოვნილი რადიოდაფარვის შესახებ დგება ნომინალური ფიჭური გეგმა, რომელიც წარმოადგენს ქსელის დატანას გეოგრაფიულ რუქაზე



ნახ. 6.1. ნომინალური ფიქური გეგმა დაფარვის ზონის ანგარიში და ინტერფერენციები

ნომინალური ფიქური გეგმის შედგენის შემდეგ ხდება რადიოდაფარვის, სიხშირეებისა და ინტერფერენციების გაანგარიშება.

ასეთი გაანგარიშებისათვის არსებობს სპეციალური კომპიუტერული პროგრამები, რომლებშიც ჩადებულია ადგილმდებარეობის ციფრული რუკები და ქალაქში და ქალაქის შემოგარენებში რადიოტალღების გავრცელების ემპირიული მოდელები (მაგ.: ოკამურა-ხატას, ლი-ს და სხვა). ასეთი გაანგარიშების შედეგები საშუალებას იძლევა:

- განისაზღვროს საბაზო სადგურების მიერ დაფარვის ზონები;
- განისაზღვროს ინტერფერენციის ზონები მომავალ ქსელში.

გამოთვლების პროგრამების საწყის მონაცემებს წარმოადგენენ:

- სიხშირული დიაპაზონი;
- Bთმ-ების განლაგება;
- Bთმ-ების გასხივებული სიმძლავრე;
- ანტენური სისტემების პარამეტრები.

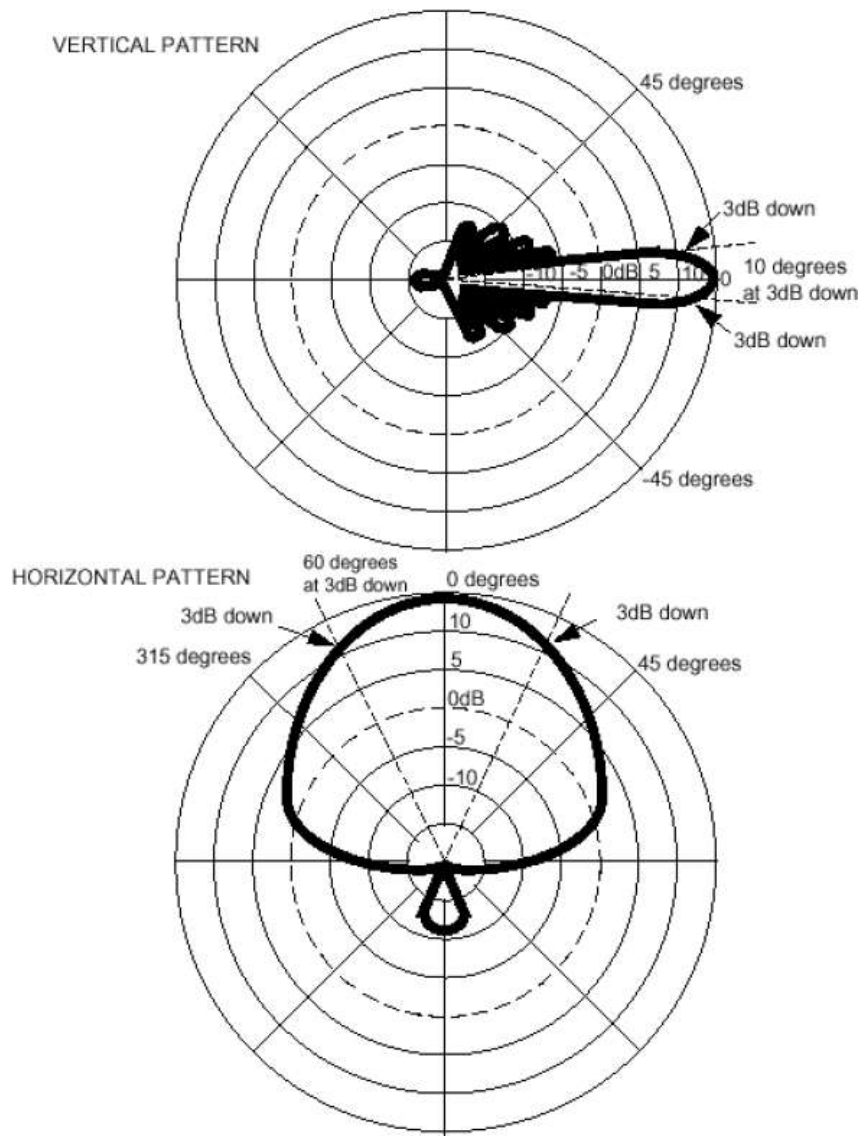
ამასთანავე აუცილებელია ანტენების მიმართულებით ქსელების დიაგრამების გათვალისწინება.

ცხრილ 6.3.-ში მოყვანილია მონაცემების მაგალითი, რომლებიც გამოიყენება გაანგარიშებების პროცესში.

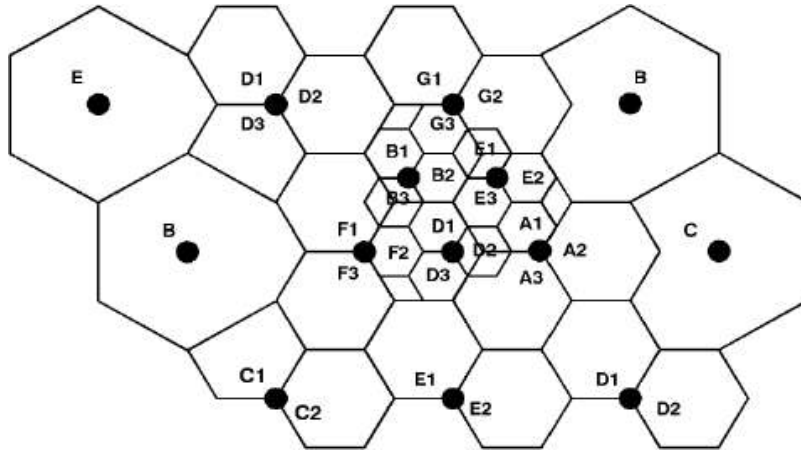
ცხრილი 6.3. Aლღონ 7331.06 ანტენის პარამეტრები

პარამეტრი	მნიშვნელობა
გაძლიერების კოეფიციენტი	16 dBi
პოლარიზაცია	X- პოლარიზაცია 45 ⁰
მიმართულებითი ქმედების სიგანე ვერტიკალურ სიბრტყეში 3 დბ დონეზე	9 ⁰
მიმართულებითი ქმედების სიგანე ჰორიზონტალურ სიბრტყეში 3 დბ დონეზე	65 ⁰
მაქსიმალური შესასვლელი სიმძლავრე	300 ვტ/პორტზე

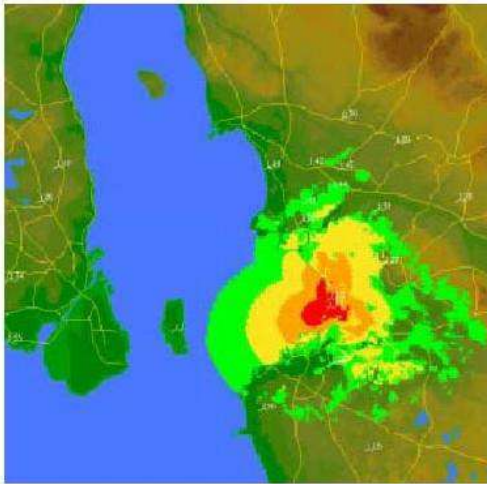
ამ ანტენის მიმართულებითი ქმედების დიაგრამა ნაჩვენებია ნახ. 6.2-ზე.



ნახ.6.2. მიმართულებითი ქმედების ნორმირებული დიაგრამები ვერტიკალურ და ჰორიზონტალურ სიბრტყეში ანტენისათვის Allgon 7331.06 900 მგჰც სიხშირეზე.



ნახ.6.4. ფიჭების იდეალური ფორმა



ნახ.6.5. ფიჭების რეალური ფორმა

გარდა აღნიშნული პრობლემებისა GSM სისტემაში არსებობს ე.წ. “დროითი დისპერსიის” პრობლემა და იგი დაკავშირებულია დაშორებული ობიექტებიდან არეკლილ სიგნალებთან. ამ პრობლემის შესაფასებლად გამოიყენება ხარისხის მაჩვენებელი-ძირითადი სიგნალის დონის ფარდობა არეკლილი სიგნალის დონესთან (C/R- Carrier to Reflection).

ღია სივრცეებში რადიოტალღები ვრცელდება პირდაპირი ხედვით, საკმაოდ დიდ მანძილებზე, სიგნალების მცირე მილევის გამო. მაგრამ ფიჭის მაქსიმალური რადიუსი შეადგენს 35 კმ-ს. ეს განპირობებულია დროითი გათანაბრების პრობლემის არსებობით (time Alignment). ამის თავიდან აცილებისათვის საჭიროა სისტემური ოპციების გამოყენება, მაგალითად ოპცია

Extended range. ამ დროს გამოიყენება ორი ერთმანეთის მეზობელი TDMA ინტერვალი (TS), რაც ზრდის TA-ს მნიშვნელობას და შესაბამისად მომსახურების ზონა შეიძლება გაიზარდოს 72 კმ-მდე.

6.8. სიხშირეების განმეორებითი გამოყენება

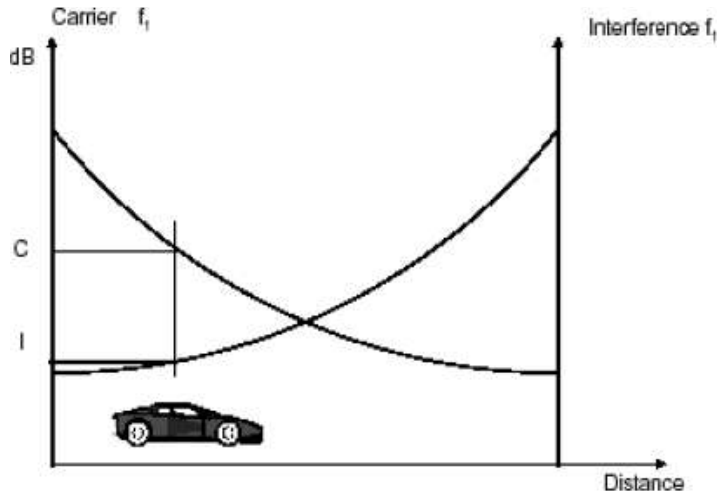
სიხშირეების განმეორებითი გამოყენების აუცილებლობა განპირობებულია იმით, რომ გამოსაყენებელი სიხშირეების რესურსი (რაოდენობა) შეზღუდულია, ხოლო რადიოდაფარვით საჭიროა დიდი ტერიტორიების დაფარვა. ქსელური პროექტირების კლასიკური თეორიის თანახმად ფიჭები ჯგუფდებიან კლასტერებში, რომლებშიც გამოიყენება სიხშირეების ფიქსირებული ნაკრები და ამ სიხშირეების ნაკრებები გამოიყენება ხელმეორედ, გარკვეული მანძილების შემდეგ. გარდა რადიოდაფარვის ზონის გაფართოებისა სიხშირეების განმეორებითი გამოყენებით სრულდება მეორე ამოცანაც – გამტარუნარიანობის გაზრდა.

6.9 ინტერფერენცია

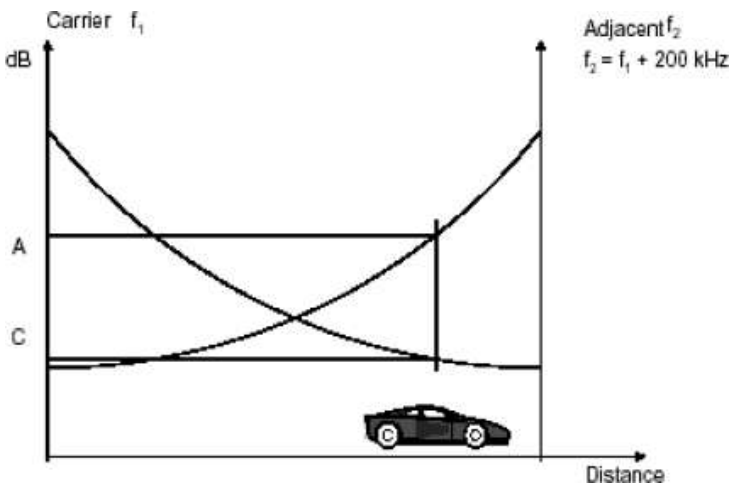
სიხშირეების განმეორებითი გამოყენების უარყოფით მხარეს წარმოადგენს ინტერფერენციის წარმოქმნა. ინტერფერენცია ეს არის რადიოდაფარვის ადგილებში ერთი და იგივე სიხშირის სიგნალების მისვლა ორი (ან რამდენიმე) სხვადასხვა BTS-დან და მათი ურთიერთხელშეშლა. ქსელის პროექტირების პროცესში ფასდება ე.წ. შიდასისტემური ემთ (ელექტრომაგნიტური თავსებადობა) – C/I, C/A.

C/I – ჩარრიერ ტო Interference – ინტერფერენცია ძირითად არხზე.

C/A – ჩარრიერ ტო Adjacent – ინტერფერენცია მეზობელ არხზე. (+,- 200 , 400 კჰც)



ნახ. 6.6. ინტერფერენცია ძირითად არხზე



ნახ. 6.7. ინტერფერენცია მეზობელ არხზე

GSM – სისტემაში ჩადებულია შემდეგი მოთხოვნები ინტერფერენციაზე:

- $C/I < 9$ დბ; $C/A < 9$ დბ (+/- 200 კპც); $R/A < 41$ დბ (+/- 400 კპც).

შიდასისტემური ინტერფერენციის მოყვანილი პირობების შესრულების დროს უზრუნველყოფილი იქნება მოცემულ ქსელში მოქმედი რადიოელექტრონული საშუალებების ურთიერხელშემლის მინიმიზაცია. შიდასისტემური ემთ გულისხმობს შემდეგ საკითხების გადაწყვეტას:

- საბაზო სადგურების მიმღებ-გადამცემი მოწყობილობების გაერთიანების

დროს საჭირო სიხშირული განმხოლოების უზრუნველყოფას მიმღებ-გადამცემ საეთერო ტრაქტში და საანტენო-საფიდერო სისტემაში;

- ერთი ფიჭის ფარგლებში მეზობელ რადიოარხებზე გასხივების გამორიცხვას, აგრეთვე ურთიერთ მიმართული გასხივების გამორიცხვას მომიჯნავე ფიჭებს შორის.

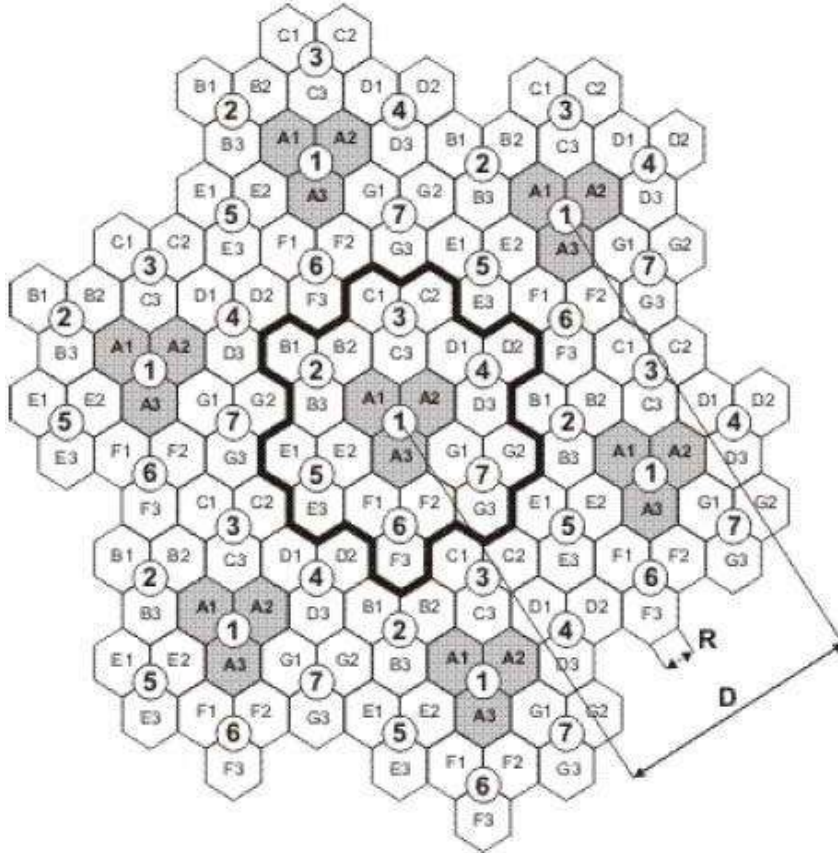
6.10 ფიჭების კლასტერული სტრუქტურის ფორმირება და სიხშირეების განაწილება დიაპაზონში 900 მგჰც

ფიჭების ჯგუფს, რომელშიც სიხშირეები არ განმეორდება, კლასტერი ეწოდება. მის განმსაზღვრელ პარამეტრს წარმოადგენს მეზობელ ფიჭებში გამოყენებული სიხშირეების რიცხვი. ძირითადი იდეა, რომელსაც ემყარება ფიჭური კავშირი დამყარებულია სიხშირეების განმეორებით გამოყენებაზე არა მომიჯნავე ფიჭებში. საბაზო სადგურები, რომლებზეც დასაშვებია გამოყოფილი სიხშირეების ნაკრებიდან ერთი და იგივე სიხშირეების განმეორებითი გამოყენება ერთმანეთისაგან დაშორებულია მანძილით, რომლებსაც ეწოდება “დამცავი ინტერვალი”. სიხშირეები კლასტერის შიგნით, ისე განაწილდება, რომ მინიმალური იყოს ინტერფერენცია მეზობელი არხის მიმართ.

ვთქვათ კლასტერში არის 21 ფიჭა (ნახ.6.8.) და ამ კლასტერისათვის გამოყოფილია გარკვეული სიხშირული დიაპაზონი. მაშინ თითოეულ ფიჭას მიეკუთვნება საერთო სიხშირული დიაპაზონის $1/21$ ნაწილი. თუ ფიჭებს დავნომრავთ, როგორც A1, A2, A3, G1, G2, G3 მაშინ მეზობელ ფიჭებშიც ასეთივე ნუმერაცია იქნება და ფიჭებს ერთნაირი ნომრით სხვადასხვა კლასტერში ექნებათ ერთიდაიგივე სიხშირე. სწორედ მაშინ იქნება ძირითად არხზე (სიხშირეზე) ინტერფერენციის პრობლემა.

ინტერფერენციის მინიმიზაციისათვის საჭიროა შენარჩუნებული იქნას მაქსიმალური დაშორება სხვადასხვა კლასტერში ერთიდაიგივე სიხშირეზე მომუშავე ფიჭებს შორის. კლასტერის შიგნით სიხშირეების განაწილების მიღებული სქემა კლასტერისათვის $7/21$ ნაჩვენებია ნახ. 10.8.-ზე, სადაც შემდეგი აღნიშვნებია:

N_n s, სადაც N_f -ფიჭების რაოდენობაა კლასტერში, N_s – სიხშირეების რაოდენობა კლასტერში. სამსექტორიანი ფიჭების შემთხვევაში კლასტერის აღნიშვნა იქნება $1/3$.



ნახ.6.8. კლასტერი 7/21, გამოყენების კოეფიციენტი $K_{გამ}=4,58$

სიხშირეების განმეორებითი გამოყენების დროს მხედველობაშია მისაღები ერთნაირსიხშირიანი ფიჭების მინიმალური დასაშვები სივრცითი განცალკევება, რომელიც განისაზღვრება მეზობელი არხის მიმართ ძირითად არხზე ინტერფერენციის მაქსიმალური მნიშვნელობით – c/I . სიდიდე c/I ასევე მოქმედებს გადაცემული სიგნალის ხარისხზე. საერთაშორისო ორგანიზაციების რეკომენდაციებით GSM სტანდარტისათვის c/I არ უნდა იყოს ნაკლები 9 დბ-ზე. Eრიცხსონ-ის კომპანიის მოწყობილობებში ეს სიდიდე 12 დბ-ის ტოლია.

მანძილი (დაშორება) ორ ერთნაირსიხშირიან ფიჭას შორის ქვ ფასდება ფიჭის რადიუსის ერთეულებით და იანგარიშება ასე:

$$q_{ფ} = \frac{D_{ფ}}{R} = \sqrt{3 * K_{გამ}} \quad (6.1)$$

სადაც $D_{ფ}$ – მინიმალური დაშორებაა ორ ერთნაირსიხშირიან ფიჭებს შორის (სხვადასხვა კლასტერში), რომელიც აკმაყოფილებს მოთხოვნას C/I .

ეს გამოსახულება გამოიყენება პროექტირების დროს ანგარიშისათვის, დაშვებით, რომ ფიჭა ექვსწახნაგა.

GSM სისტემაში მიღებულია, რომ $q \geq 3$, ე.ი. ფიჭები ერთნაირი სიხშირეებით სივრცეში დაშორებული უნდა იყვნენ ერთმანეთისაგან არანაკლებ 3დ მანძილით.

მეორე მოთხოვნით – პარამეტრი C/I არ უნდა იყოს 12 დბ-ზე ნაკლები (ქსელში ექვსი ერთნაირსიხშირიანი ფიჭის არსებობის დროს). C/I პარამეტრის ანგარიშისათვის გამოიყენება გამოსახულება:

$$C/I = 10 \log \left(\frac{1}{j} * q_{\text{ფ}}^y \right) \quad (6.2)$$

სადაც j – ინტერფერირებადი ფიჭების რიცხვია; y – მობილურ სადგურსა (Mშ) და საბაზო სადგურს (BTS) შორის რადიოტალღების გავრცელების მონაკვეთზე კარგების პარამეტრია. ეს პარამეტრიც დამოკიდებულია ფიჭის ადგილმდებარეობაზე და მისი მნიშვნელობები მოცემულია ცხრილში 6.4.

ცხრილი 6.4 კარგების პარამეტრის მნიშვნელობა ქალაქის სხვადასხვა რაიონებისათვის

	ქალაქის განაშენიანება	ქალაქის გარეუბანი	ღია სივრცე
y	4	3,5	3

მაგალითად თუ კლასტერში 7 ფიჭაა ($K=7$), მაშინ 6 ფიჭა ($j=6$) ესაზღვრება მომსახურე ფიჭას $D1=4.58r1$ მანძილზე. თუ ფიჭების ამ კრებულის გარდა არ არსებობენ სხვა კლასტერები იმავე სიხშირეზე მომუშავე ფიჭებით, მაშინ

$$C/I = 10 \log \left(\frac{1}{j} q_{\text{ფ}}^y \right) = 10 \log \frac{1}{j} \left(\sqrt{3K_{\text{გამ}}} \right)^y = 10 \log \frac{1}{6} \left(\sqrt{3 * 7} \right)^4 = 18,6 \text{დბ}$$

ამგვარად, მობილური კავშირის ქსელების პროექტირების დროს შეიძლება გამოყენებული იქნას ზემოთმოყვანილი კლასტერული სტრუქტურა რომელშიც $K_{\text{გამ}} > 3$. თუ ქსელში კლასტერების რიცხვი 6-ზე მეტია ($j > 6$), მაშინ C/I ოდნავ მცირდება. ამიტომ მსხვილ ქსელებში სიდიდეს იღებენ გარკვეული მარაგით, ე.ი. ზრდიან გაანგარიშებულ მნიშვნელობასთან შედარებით.

საბაზო სადგურების განლაგების ობიექტების შერჩევა და ანტენების განლაგება

საბაზო სადგურების დაყენების წერტილების შერჩევის დროს მხედველობაში მიიღება ქსელის კონფიგურაცია, რადიოდაფარვის ტერიტორია და

მისი თავისებურებები (განაშენიანება ქალაქში), მოსალოდნელი სააბონენტო ტრაფიკი BTS-ის მოქმედების ზონაში, ქსელის ტოპოლოგიური მოდელი და სიხშირულ-ტერიტორიული გეგმა.

BTS-ების განლაგების დროს საჭიროა გათვალისწინებული იქნას:

- ქსელის ნომინალურ გეგმასთან მიზმა;
- ობიექტის ტიპი;
- ანტენების განლაგების ადგილი;
- ანტენების სივრცითი განცალკევება;
- არსებული დაბრკოლებები;
- Bთშ-ის ელკვება;
- სატრანსპორტო ქსელის არსებობა ან ახლის ორგანიზაცია;
- ხელშეკრულება ობიექტის მფლობელთან.

Bთშ-ების განლაგების ობიექტების შერჩევისათვის საჭირო იქნება შემდეგი ხელსაწყოების გამოყენება: ციფრული ფიტოაპარატი და ვიდეოკამერა, ბინოკლი, GPS-მიმღები, კომპასი და სიგნალის დონის გამზომი ხელსაწყო (ხელსაწყოები).

Bთშ-ის განლაგების ობიექტის შერჩევის შემდეგ საჭიროა დავაფიქსიროთ მონაცემები ამ ობიექტების შესახებ: კოორდინატები (გრძედი და განედი), სიმაღლე ზღვის დონიდან, მისამართი, ობიექტის სიმაღლე მიწის ზედაპირიდან. ბიექტებს Bთშ-ების განლაგებისათვის შეიძლება წარმოადგენდნენ: სამრეწველო, ადმინისტრაციული, საცხოვრებელი ან საზოგადოებრივი შენობები, სპეციალური ლითონკონსტრუქციები შენობების სახურავები და კედლები, საანტენო და

განათების ანძები, საკვამლე მიწები და სხვა.

რადიოდაფარვის ანგარიშის დროს ანტენების განლაგების სიმაღლეები იანგარიშება სპეციალური პროგრამებით. საშუალო ქალაქისათვის განაშენიანების მიხედვით ანტენების ჩამოკიდების სიმაღლე შეადგენს (20÷40) მ. ანტენების უფრო მაღალ სიმაღლეზე ჩამოკიდებამ შეიძლება გამოიწვიოს ინტერფერენციული ხელშეშლების გაზრდა, უფრო ნაკლებზე – დაფარვის ზონის შემცირება ან არამყარი მიღება ფიჭის გარე საზღვრებთან. ხშირად ანტენების ორიენტაციით მიიღწევა სანიტარულ-დამცავი ზონების ორგანიზება.

მიღებული სიგნალების გაძლიერებისათვის ხშირად აუცილებელია მიმღები და გადამცემი ანტენების სივრცითი განცალკევება (დაშორება). ზოგჯერ მიმართავენ ანტენების იზოლაციის მეთოდებსაც. ანტენების ჰორიზონტალური განცალკევების დროს გადამცემი და მიმღები ანტენების განლაგება BTS-ში ერთმანეთისაგან (12-18)λ მანძილზეა (λ - გასხივებული სიხშირის ტალღის სიგრძეა), რაც GSM-900

სისტემისათვის შედგენს (4÷5) მეტრს, ხოლო GSM-1800-თვის (2÷3) მეტრს. ანტენების ვერტიკალური განცალკევების შემთხვევაში (12-18) λ უნდა გამრავლდეს 5-ზე. ე.ი. გადამცემ და მიმღებ ანტენებს შორის მანძილი ამ შემთხვევაში უნდა შეადგენდეს (20÷25) მ GSM-900-ში და (10 ÷15) მ GSM-1800-ში. ანტენების იზოლაციის დროს ჰორიზონტალური იზოლაცია შეადგენს 0,4 მ, ხოლო ვერტიკალური იზოლაციის დროს – 0.2 მ.

საბაზო სადგურების განლაგების ადგილის შერჩევის დროს დიდი მნიშვნელობა აქვს პირდაპირ ხედვის შექმნას Bთშ-დან მიმღებ მობილურ სადგურებამდე (MS). სხვა სიტყვებით რომ ვთქვათ აუცილებელია საბაზო სადგურების ანტენების ისეთი განლაგება, რომ არ გადაიკვეთოს ფრენელის პირველი ზონა, რომელიც GSM-900-თვის შეადგენს ანტენიდან 5 მეტრს. გარდა ფრენელის პირველი ზონისა საჭიროა სანიტარულ-დამცავი ზონის შექმნაც, რაც ნიშნავს რომ არ უნდა მოხდეს ანტენის სიახლოვეს განლაგებული შენობების სახურავის დასხივება, სადაც შეიძლება სამუშაოს ასრულდებდნენ ადამიანები. ამის გათვალისწინებით საჭიროა, რომ ანტენის მიმართულეებითი ქმედების დიაგრამის მოქმედების ზონაში არ ხვდებოდნენ შენობა-ნაგებობები (30-35) მ –ის დაშორებით.

6.11 მოწყობილობების განლაგება

საბაზო სადგურების მოწყობილობები (მიმღებ-გადამცემი ბლოკები) უმჯობესია განლაგდეს ანტენებთან ახლოს. ეს განპირობებულია ორი პირობით: ჯერ ერთი რაც ახლოსაა ანტენა გადამცემთან (მიმღებთან) მით უფრო ნაკლებია სიგნალის მიღევა. მეორეც, რაც მოკლეა მანძილი ანტენამდე მით ნაკლებია დანახარჯები ფიდერზე, რაც საკმაოდ ძვირადღირებული ელემენტია. გარდა ამისა სათავსი სადაც განლაგდება მიმღებ გადამცემი აპარატურა უნდა იყოს მოსახეხებელი გაფართოებისათვის, ამის საჭიროების გამოჩენის შემთხვევაში.

6.12 საბაზო სადგურის ელექტრული კვება

ამისათვის გამოიყენება მისი რეზერვირების სისტემა. კერძოდ პირველ რიგში Bთშ იკვებება ელექტროგადამცემი ხაზიდან. Bთშ-ის აუცილებელ შემადგენელ ნაწილს წარმოადგენს აკუმულატორების ბატარეა, რომლის პერიოდული ავტომატური დამუხტვა ხდება ელექტრული ქსელიდან, ან დიზელ-გენერატორიდან,

ელექტრულ ქსელში ძაბვისარ არსებობის შემთხვევაში. ბოლო ხანებში განიხილება აკუმულატორების დამუხტვა მზის ბატარეების გამოყენებით.

6.13 სატრანსპორტო ქსელი

GSM-ქსელის ფუნქციონირებისათვის აუცილებელია Bთშ-ის კავშირი BSC-თან (იმ შემთხვევაში როდესაც BSC არ არის მოცემულ BTS-ში განლაგებული). ასეთი კავშირი შესაძლებელია: რადიოარხით, ოპტიკურ-ბოჭკოვანი კაბელით და სპილენძის

გამტარიანი კაბელით. რა სახის კავშირით მოხდეს Bთმ-ის კავშირი Bშჩ- თან და Mშჩ-თან ეს წარმოადგენს მობილური ქსელის პროექტირების ამოცანას.

6,14 ხელშეკრულება არენდის გამცემთან

ქსელის მშენებლობის ან გაფართოების პროცესში საჭიროა Bთმ-ების განლაგებისათვის ობიექტების შერჩევა და ამ ობიექტების მფლობელებთან არენდის ხელშეკრულების გაფორმება. ასეთი ხელშეკრულებების არსებობის გარეშე ქსელის მშენებლობის გადაწყვეტილება არ მიიღება.

6.15 პროექტის შედგენა და ქსელის აგება

პროექტის საბოლოო ვერსიის შესადგენად საჭიროა მონაცემები, კერძოდ:

- ინფორმაცია რადიოდაფარვის შესახებ;
- ინფორმაცია BTS-ების განლაგების შესახებ;
- ინფორმაცია MSC-ს განლაგების შესახებ;
- ინფორმაცია BSC-ს (BSC-ების) განლაგების შესახებ;
- ინფორმაცია სატრანსპორტო ქსელის შესახებ.

ამ ინფორმაციების საფუძველზე დგება ქსელის მშენებლობის საბოლოო ფიჭური გეგმა. მიეკუთვნება დასახელებები მშენებარე ობიექტებს (BTS, BSC, MSC), მზადდება ფაილები ფიჭური პარამეტრების ჩასატვირთად Bშჩ-ში (ჩელლ Dესიგნ Dატა). ამ მონაცემებში არსებობს ყველა ინფორმაცია ფიჭების შესახებ. ქსელის მშენებლობის ეტაპზე განისაზღვრება გამოყენებული მოწყობილობების ტიპები და მათი განლაგების წესები. აირჩევა ანტენების სისტემები, Bთმ-ების მიმღებ-

გადამცემების კონფიგურაციები, გაანალიზდება სატრანსპორტო ქსელთან მიერთების პირობები. თუ საჭიროება მოითხოვს რადიოსარელეო ხაზების გამოყენებას, განისაზღვრება Bთმ-დან სხვა Bთმ-ბისკენ ან Mშჩ-კენ პირდაპირი ხედვის არსებობის შესაძლებლობა.

თუ განგარიშები ადასტურებენ, რომ სრულდება რადიოდაფარვის და ინტერფერენციის ყველა პირობები და სატრანსპორტო ქსელი მისაღებია, მაშინ ფორმდება არენდის ხელშეკრულებები Bთმ-ების განსალაგებელი ობიექტების მფლობელებთან და იწყება ქსელის სამონტაჟო და გასაშვებ-გასამართი სამუშაოები.