

Vilniaus universiteto Fizikos fakultetas, Radiofizikos katedra
Telekomunikacijų sistemų mokomoji laboratorija

Laboratorinis darbas Nr. 5

**Įvairių ryšio sistemų radijo sąsajų signalų tyrimas 80-3000 MHz
ruože**

Vilnius, 2008

1. Darbo tikslas:	3
2. Darbo užduotys:	3
3. Metodiniai nurodymai.....	3
3.1 Matavimo standas	3
3.1 Darbo eiga	4
4. Teorinis įvadas	12
4.1 DM radijas	12
4.2 Antžeminė analoginė televizija.....	14
4.3 GSM.....	16
4.4 Ortogonalioji dažninio tankinimo moduliacija	21
5. Papildoma literatūra	28

1. Darbo tikslas:

Susipažinti su įvairių sistemų radijo sąsajos signalais.

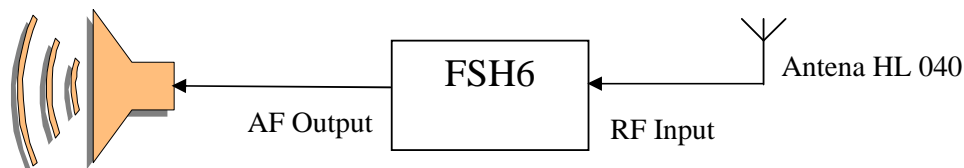
2. Darbo užduotys:

1. Stebėti FM radijo, analogines TV, DVB-T, GSM , 3G, LAN signalų spektrus ir juos palyginti.
2. Išmatuoti stebėtų sistemų signalų pasirinktų dažninių kanalų parametrus (spektrų plotį, o kur galima - nešlių ir ponešlių dažnius).
3. Išmatuoti GSM radijo signalo tarpsnio ir ciklo trukmę.
4. Parinkus tinkamas skiriamąją ir video spektroanalizatoriaus juostas, kokybiškai demoduluoti pasirinktus FM radijo stoties ir analoginės TV audio signalus.
5. Mokėti paaiškinti FM radijo, analogines TV, DVB-T ir GSM radijo signalų sandarą ir formavimo principus.

3. Metodiniai nurodymai

3.1 Matavimo standas

Sujungiame matavimo standą pagal 3.1 pav. pateiktą schemą.



3.1 pav. Matavimo stendo sandara

Šiame darbe signalų spektras yra stebimas spektro analizatoriumi FSH6 (Rohde&Schwarz). Centrinis dažnis yra nustatomas paspaudus „FREQ” (dažnis) mygtuką, įvedus norimą dažnį jo reikšmė yra patvirtinama mygtukais „Hz”, „kHz”, „MHz” arba „GHz”. Analogiškai galima įvesti pradinį ir galinį dažnius, kuriuos stebėsime analizatoriaus ekrane. Šiuo atveju prieš įvedant reikšmę reikia funkciniiais klavišais „F1” – „F5” aktyvuoti norimą poziciją. Tuomet užrašas, informuojantis apie įvedamą reikšmę, yra rašomas raudoname fone. Norimą stebėti dažnių juostą galima įvesti paspaudus mygtuką „SPAN” (aprėptis).

Signalas – triukšmo santykį galima pagerinti tinkamai nustatius skiriamosios juostos plotį (RBW) ir video juostos plotį (VBW), kurie yra aktyvuojami nuspaudus mygtuką „BW“ (juosta). Be to spektro skanavimo laiką galima pasirinkti nuspaudus mygtuką „SWEEP“ (skleisti).

Matuojant signalo plotį naudokite žymeklį, kuris įjungiamas paspaudus mygtuką „MARKER“ (žymeklis) ir funkciniais klavišais pasirinkus „SET MARKER“ (nustatyti žymeklį).

Nustatius SPAN=0, spektroanalizatorius tampa oscilografu signalui su užduotu centriniu dažniu ir apribota skiriamąja juosta. Tinkamai parinkus skleidimo laiką (SWEEP), RBW ir VBW, galima stebėti šio signalo laikines priklausomybes.

3.1 Darbo eiga

Norėdami palyginti įvairių moduliacijų signalus persipieškite jų spektrus į darbo žurnalą.

Analoginėms radijo stotims yra išskirtas 88 – 108 MHz dažnių ruožas. Pasirinkite radijo stotį, kurios signalas pakankamai stiprus. Parinkite SPAN, SWEEP trukmę, RBW ir VBW tokius, kad signalo dažninė priklausomybė būtų rodoma korektiškai (RBW << signalo juosta B; VBW tokia, kad būtų pakankamai maži triukšmai; sklaidymo trukmė pakankamai ilga). Paspauskite „MARKER“ ir funkcinių klavišų pagalba paruoškite spektroanalizatorių dažninei demoduliacijai. Parinkę tinkamus RBW ir VBW, ausinukuose turite girdėti kokybiškai demoduliuotą audio signalą.

Analoginei TV ir DVB-T yra išskirtas 470- 862 MHz diapazonas. Pavyzdžiui, nacionalinės televizijos pirmoji programa Vilniuje yra transliuojama 35 kanalu. Jo užimamų dažnių juosta 582 – 590 MHz (centrinis dažnis 586 MHz). Vaizdo nešlio dažnis yra 583,25 MHz, garso ponešlio – 589,75 MHz. Tinkamai suderinus analizatorių ir orientavus anteną, spektre galima išskirti spalvų ponešlį. Korektiškai išmatuokite pasirinkto analoginės TV signalo spektrą (juosta, nešlio ir ponešlių dažnius). Išmatuokite audio signalo užimamą dažnių juostą ir palyginkite ją su FM stoties signalo dažnių juosta. Demoduliuokite audio signalą.

DVB-T standartu skaitmeninė televizija Vilniuje šiuo metu yra transliuojama šiais dažniais: 706,0 MHz, 730,0 MHz, 762,0 MHz, 786,0 MHz, 818,0 MHz. Kai kurie DVB-T signalo parametrai yra pateikti lentelėje:

1 lentelė. DVB-T signalo parametrai

DVB-T dažnių juosta (MHz)	470 – 862
Kanalo juostos plotis B (MHz)	8
Ponešlių skaičius N	2K moda: 2048 4K moda: 4096 8K moda: 8192
Ponešlių moduliacija	QPSK, 16QAM, 64QAM
Simbolio trukmė T_s (μ s)	2K moda: 224 + saugos intervalas 8K moda: 896 + saugos intervalas
Saugos intervalas (T_s dalis)	1/4, 1/8, 1/16, 1/32
Šaltinio kodavimas	4 Mbit/s MPEG2

Išmatuokite DVB-T signalo spektro plotį ir spektrą perneškite į darbo žurnalą. Palyginkite analoginės ir skaitmeninės TV signalų spektrus.

GSM ryšio „aukštyn“ spektras užima 880-915 ir 1710- 1785 MHz dažnių ruožus, o ryšio „žemyn“ – 925-960 ir 1805 – 1880 MHz.

Žemiau 2-4 lentelėse pateikti dažniniai GSM kanalai, kuriems naudoti yra suteikti leidimai Lietuvos mobiliojo ryšio operatoriams (operatoriai dažniausiai turi teisę perleisti naudoti dažninius kanalus kitiems operatoriams).

2 lentelė. UAB TELE2

Radijo kanalo numeris	Bazinės stoties siuntimo kanalo vidurio dažnis, MHz	Bazinės stoties priėmimo kanalo vidurio dažnis, MHz
71	949,200	904,200
72	949,400	904,400
73	949,600	904,600
74	949,800	904,800
75	950,000	905,000
1012	932,600	887,600
1013	932,800	887,800
1014	933,000	888,000
1015	933,200	888,200
1016	933,400	888,400
1017	933,600	888,600
1018	933,800	888,800
1019	934,000	889,000
1020	934,200	889,200
1021	934,400	889,400
1022	934,600	889,600
1023	934,800	889,800

1024	935,000	890,000
------	---------	---------

3 lentelė. UAB „Omnitel“

Radio kanalo numeris	Bazinės stoties siuntimo kanalo vidurio dažnis, MHz	Bazinės stoties priėmimo kanalo vidurio dažnis, MHz
975	925,200	880,200
976	925,400	880,400
977	925,600	880,600
978	925,800	880,800
979	926,000	881,000
980	926,200	881,200
981	926,400	881,400
982	926,600	881,600
983	926,800	881,800
984	927,000	882,000
985	927,200	882,200
986	927,400	882,400
987	927,600	882,600
988	927,800	882,800
989	928,000	883,000
990	928,200	883,200
29	940,800	895,800
30	941,000	896,000
31	941,200	896,200
32	941,400	896,400
33	941,600	896,600
34	941,800	896,800
35	942,000	897,000
36	942,200	897,200
37	942,400	897,400
38	942,600	897,600
39	942,800	897,800
40	943,000	898,000
76	950,200	905,200
77	950,400	905,400
78	950,600	905,600
79	950,800	905,800
80	951,000	906,000
81	951,200	906,200
82	951,400	906,400
83	951,600	906,600
84	951,800	906,800
85	952,000	907,000
86	952,200	907,200
87	952,400	907,400
88	952,600	907,600
89	952,800	907,800

90	953,000	908,000
91	953,200	908,200
92	953,400	908,400
93	953,600	908,600
94	953,800	908,800
95	954,000	909,000
96	954,200	909,200
97	954,400	909,400
98	954,600	909,600
99	954,800	909,800
100	955,000	910,000
101	955,200	910,200
102	955,400	910,400
103	955,600	910,600
669	1836,60	1741,60
670	1836,80	1741,80
671	1837,00	1742,00
672	1837,20	1742,20
673	1837,40	1742,40
674	1837,60	1742,60
675	1837,80	1742,80
676	1838,00	1743,00
677	1838,20	1743,20
678	1838,40	1743,40
679	1838,60	1743,60
680	1838,80	1743,80
681	1839,00	1744,00
682	1839,20	1744,20
683	1839,40	1744,40
684	1839,60	1744,60
685	1839,80	1744,80
686	1840,00	1745,00
687	1840,20	1745,20
688	1840,40	1745,40
689	1840,60	1745,60
690	1840,80	1745,80
691	1841,00	1746,00
692	1841,20	1746,20
693	1841,40	1746,40
694	1841,60	1746,60
695	1841,80	1746,80
696	1842,00	1747,00
697	1842,20	1747,20
698	1842,40	1747,40
699	1842,60	1747,60
700	1842,80	1747,80
701	1843,00	1748,00

702	1843,20	1748,20
703	1843,40	1748,40
704	1843,60	1748,60
705	1843,80	1748,80
706	1844,00	1749,00
707	1844,20	1749,20
708	1844,40	1749,40
709	1844,60	1749,60
710	1844,80	1749,80
711	1845,00	1750,00
712	1845,20	1750,20
713	1845,40	1750,40
714	1845,60	1750,60
715	1845,80	1750,80
716	1846,00	1751,00
717	1846,20	1751,20
718	1846,40	1751,40
719	1846,60	1751,60
720	1846,80	1751,80
721	1847,00	1752,00
722	1847,20	1752,20
723	1847,40	1752,40
724	1847,60	1752,60
725	1847,80	1752,80
726	1848,00	1753,00
727	1848,20	1753,20
728	1848,40	1753,40
729	1848,60	1753,60
730	1848,80	1753,80
731	1849,00	1754,00
732	1849,20	1754,20
733	1849,40	1754,40
734	1849,60	1754,60
735	1849,80	1754,80
736	1850,00	1755,00
737	1850,20	1755,20
738	1850,40	1755,40
739	1850,60	1755,60
740	1850,80	1755,80
741	1851,00	1756,00
742	1851,20	1756,20
743	1851,40	1756,40
744	1851,60	1756,60
745	1851,80	1756,80
746	1852,00	1757,00
747	1852,20	1757,20
748	1852,40	1757,40

749	1852,60	1757,60
750	1852,80	1757,80
751	1853,00	1758,00
752	1853,20	1758,20

4 lentelė. UAB “Bitė Lietuva”

Radio ryšio kanalo numeris	Bazinės stoties siuntimo kanalo vidurio dažnis, MHz	Bazinės stoties priėmimo kanalo vidurio dažnis, MHz
47	944,400	899,400
48	944,600	899,600
49	944,800	899,800
50	945,000	900,000
51	945,200	900,200
52	945,400	900,400
53	945,600	900,600
54	945,800	900,800
55	946,000	901,000
56	946,200	901,200
57	946,400	901,400
58	946,600	901,600
59	946,800	901,800
60	947,000	902,000
61	947,200	902,200
62	947,400	902,400
63	947,600	902,600
64	947,800	902,800
65	948,000	903,000
66	948,200	903,200
67	948,400	903,400
68	948,600	903,600
69	948,800	903,800
70	949,000	904,000
104	955,800	910,800
105	956,000	911,000
106	956,200	911,200
107	956,400	911,400
108	956,600	911,600
109	956,800	911,800
110	957,000	912,000
111	957,200	912,200
112	957,400	912,400
113	957,600	912,600
114	957,800	912,800
115	958,000	913,000
116	958,200	913,200
117	958,400	913,400
118	958,600	913,600
119	958,800	913,800

566	1816,000	1721,000
567	1816,200	1721,200
568	1816,400	1721,400
569	1816,600	1721,600
570	1816,800	1721,800
571	1817,000	1722,000
572	1817,200	1722,200
573	1817,400	1722,400
574	1817,600	1722,600
575	1817,800	1722,800
576	1818,000	1723,000
577	1818,200	1723,200
578	1818,400	1723,400
579	1818,600	1723,600
580	1818,800	1723,800
581	1819,000	1724,000
582	1819,200	1724,200
583	1819,400	1724,400
584	1819,600	1724,600
585	1819,800	1724,800
586	1820,000	1725,000
587	1820,200	1725,200
588	1820,400	1725,400
589	1820,600	1725,600
590	1820,800	1725,800
591	1821,000	1726,000
592	1821,200	1726,200
593	1821,400	1726,400
594	1821,600	1726,600
595	1821,800	1726,800
596	1822,000	1727,000
597	1822,200	1727,200
598	1822,400	1727,400
599	1822,600	1727,600
600	1822,800	1727,800
601	1823,000	1728,000
602	1823,200	1728,200
603	1823,400	1728,400
604	1823,600	1728,600
605	1823,800	1728,800
606	1824,000	1729,000
607	1824,200	1729,200
608	1824,400	1729,400
609	1824,600	1729,600
610	1824,800	1729,800
611	1825,000	1730,000
612	1825,200	1730,200

613	1825,400	1730,400
614	1825,600	1730,600
615	1825,800	1730,800
616	1826,000	1731,000
617	1826,200	1731,200
618	1826,400	1731,400
619	1826,600	1731,600
620	1826,800	1731,800
621	1827,000	1732,000
622	1827,200	1732,200
623	1827,400	1732,400
624	1827,600	1732,600
625	1827,800	1732,600
626	1828,000	1733,000
627	1828,200	1733,200
628	1828,400	1733,400
629	1828,600	1733,600
630	1828,800	1733,800
631	1829,000	1734,000
632	1829,200	1734,200
633	1829,400	1734,400
634	1829,600	1734,600
635	1829,800	1734,800
636	1830,000	1735,000
637	1830,200	1735,200
638	1830,400	1735,400
639	1830,600	1735,600
640	1830,800	1735,800
641	1831,000	1736,000
991	928,400	883,400
992	928,600	883,600
993	928,800	883,800
994	929,000	884,000
995	929,200	884,200
996	929,400	884,400
997	929,600	884,600
998	929,800	884,800
1010	932,200	887,200
1011	932,400	887,400

Pasirinkite ryšio žemyn dažninį GSM kanalą su pakankamai stipriu signalu ir suderinkite spektroanalizatorių korektiškam signalo spektro stebėjimui. Kuris Lietuvos mobiliojo ryšio operatorius turi leidimą naudoti šį dažninį kanalą? Palyginkite stebimą spektrą su teoriniu. Laikinį GSM signalo kitimą galima stebėti įvedus $SPAN = 0$, tinkamai parinkus RBW, VBW ir skleidimo trukmę. Kadangi BS

siųstuvą „tyli“ saugos intervalo metu, nesunku stebėti blyksnius (taip pat tarpsnius) ir išmatuoti jų trukmę (geriausia matuojant trukmę naudoti vienkartinį skleidimo paleidimą). Žinant, kad ciklas yra sudarytas iš 8 tarpsnių, nesunku išmatuoti ir ciklo trukmę. Parinkus tinkamai dažninį kanalą, galima stebėti, kaip siųstuvą siunčia nevienodos galios signalus atskiruose tarpsniuose. Tokiu atveju galima matyti, kaid laikinio signalo periodas yra 8 tarpsniai.

3G tinklo ryšio žemyn dažnių juosta yra 2110 – 2170 MHz, o ryšio aukštys 1920-1980 MHz. Leidimai naudoti dažnius yra skirti visiems trims operatoriams (leidimų turėtojais turi teisę leisti naudoti jų dažnius kitiems operatoriams):

UAB „Bitė Lietuva“ turi teisę naudoti keturis 5 MHz pločio duplexinius radijo ryšio kanalus iš 1920,3 – 1940,1 MHz ir 2110,3 – 2130,1 MHz radijo dažnių juostų;

UAB „Tele2“ turi teisę naudoti keturis 5 MHz pločio duplexinius radijo ryšio kanalus iš 1959,9 – 1979,7 MHz ir 2149,9 – 2169,7 MHz radijo dažnių juostų;

UAB „Omnitel“ turi teisę naudoti keturis 5 MHz pločio duplexinius radijo ryšio kanalus iš 1940,1 – 1959,9 MHz ir 2130,1 – 2149,9 MHz radijo dažnių juostų.

Pasirinkite ryšio žemyn dažninį 3G kanalą su pakankamai stipriu signalu ir suderinkite spektroanalizatorių korektiškam signalo spektro stebėjimui. Kuris Lietuvos mobiliojo ryšio operatorius turi leidimą naudoti šį dažninį kanalą? Išmatuokite 3G signalo spektro plotį.

Bevielio LAN signalams perduoti yra naudojama 2,40-2,4835 GHz dažnių juosta. Pasirinkite kanalą su pakankamai stipriu signalu ir suderinkite spektroanalizatorių korektiškam signalo spektro stebėjimui. Šiuo atveju reikia padidinti spektro skanavimo laiką. Išmatuokite WLAN signalo spektro plotį.

4. Teorinis įvadas

4.1 DM radijas

DM (dažnio moduliacija, *angl.* –FM) radijui yra išskirtas vadinamojo VHF (*very high frequencies*) diapazono dalis – 88÷108 MHz dažnių ruožas. Labai dažnai šis dažnių ruožas vadinamas tiesiog FM diapazonu, nors trumpinio FM”, parašyto prie radijo imtuvo dažnių skalės, reikšmė yra “*frequency modulation*”. Radijo stočių nešliai šiame diapazone išdėstyti $\Delta f_c = 200$ kHz intervalais.

DM radijas yra skirtas aukštos kokybės audio signalui (15 kHz juostos) perduoti. Jei stotis perduoda monofoninį garsą, aukštadažnis nešlys dažnine moduliacija (su

Formatuota: taškai ir numeravimas

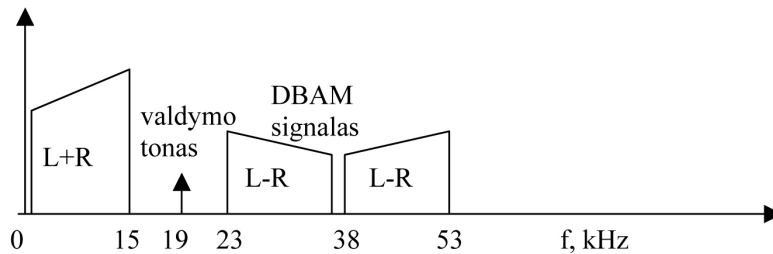
deviacija $f_d = 75$ kHz) moduluojamas $\Delta f = 15$ kHz bazinės juostos (moduluojančiuoju) audiosignalu. Šiuo atveju transliuojamo aukštadažnio signalo juostos plotis:

$$B_{\text{mono}} = 2f_d + 2\Delta f = 180 \text{ kHz. (1)}$$

Esant stereofoninio garso transliacijai, bazinės juostos signalo struktūra tampa gerokai sudėtingesnė (4.1 pav.). Kad monofoninis imtuvas galėtų priimti programas, transliuojančias stereofoninį garsą, 0÷15 kHz juostoje patalpinamas kairė + dešinė (L+R) signalas. Sudėtiniame signale talpinamas taip pat **skirtuminis** kairė – dešinė (L–R) signalas, užimantis 23÷53 kHz dažnių ruožą. Skirtuminiu signalu DBAM (dvišonė benešlė amplitudės moduliacija) vyksmu moduluojamas 38 kHz nešlys (vadinamasis **subnešlys**). Bazinės juostos signale nėra 38 kHz nešlio. Vietoje jo transliuojamas pagal fazę sinchroninis su subnešliu 19 kHz **valdymo tonas**. Šiuo sudėtinio bazinės juostos signalu DM vyksmu (su dažnio deviacija $f_d = 75$ kHz, kaip ir monofoninės transliacijos atveju) moduluojamas aukštadažnis nešlys. Šiuo atveju $\Delta f = 53$ kHz ir aukštadažnio signalo juostos plotis

$$B_{\text{stereo}} = 2f_d + 2\Delta f = 256 \text{ kHz. (2)}$$

yra truputį didesnis, negu $\Delta f_c = 200$ kHz. Taigi, kai transliuojamas stereofoninis garsas, reikalinga didinti radijo stočių nešlių išdėstymo intervalą.



4. 1 pav. Sudėtinio bazinės juostos signalo spektras, kai transliuojamas stereofoninis garsas

4.2 Antžeminė analoginė televizija

Antžemeinei televizijos transliacijai yra išskirta keletas dažnių ruožų metrinių ir decimetrinių bangu diapazonuose. Taip pat daug kur TV programos transliuojamos ir 2,4 GHz ruože. Lietuvoje priimtas TV kanalo plotis yra 8 Mhz. TV kanalu perduodamas vaizdo (6 MHz juostoje), PAL sistemos spalvų ir DM radijo kokybės monofoninis garso signalai. Aukštadažnis nešlys moduluojamas vadinamąja **prislopintos šoninės juostos amplitudės moduliacija** (*angl. Vestigial sideband – VSB*) Iš dalies slopinama žemadažnė šoninė juosta.

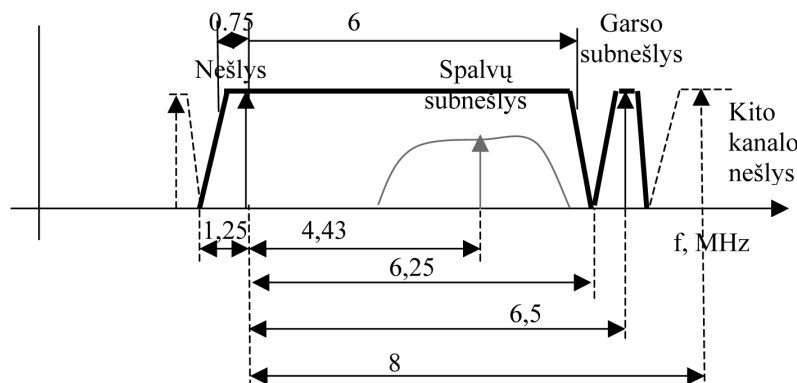
Tegu turime VAM signalą, siunčiamą kartu su amplitudės A nešliu:

$$x(t) = \frac{A_c A_m}{2} \cos(\omega_c + \omega_m) + A \cos \omega_c t, \quad (3)$$

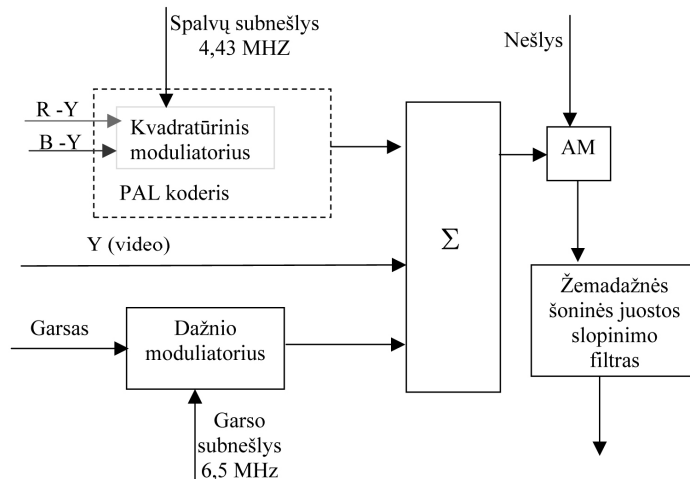
čia A_m ir ω_m yra harmoninio informacinio signalo amplitudė ir dažnis, A_c ir ω_c – nešlio amplitudė ir dažnis, A – papildomai siunčiamo nešlio amplitudė. Jei kartu su VAM signalu siunčiamas didelės amplitudės nešlys, priimtąjį signalą galime išreikšti:

$$x(t) \approx \left(\frac{A_c A_m}{2} \cos \omega_m t + A \right) \cos \omega_c t. \quad (4)$$

(4) lygybė yra tokia pat, kaip ir moduluotos gaubtinės signalo formos išraiška. Vadinasi, VAM signalas gali būti detektuojamas gaubtinės detektoriumi, jei siunčiamas didelės amplitudės nešlys. Pasirodo, kad norint prislopintos šoninės juostos signalą demoduliuoti gaubtinės detektoriumi, pakanka siųsti gerokai mažesnės galios nešlio dažnio sandą. Taigi, prislopintos šoninės juostos AM televizijoje leidžia ne tik sutaupyti dažnių juostą, bet ir įgalina TV imtuvė demoduliacijai naudoti gaubtinės detektorių. Aukštadažnio TV signalo spektras parodytas 4.2 pav., o signalo gavimo principas – 4.3 pav..



4.2 pav. Aukštadažnio TV signalo spektras, esant PAL spalvinei sistemai



4.3 pav. TV signalo gavimo principas (PAL spalvų sistema)

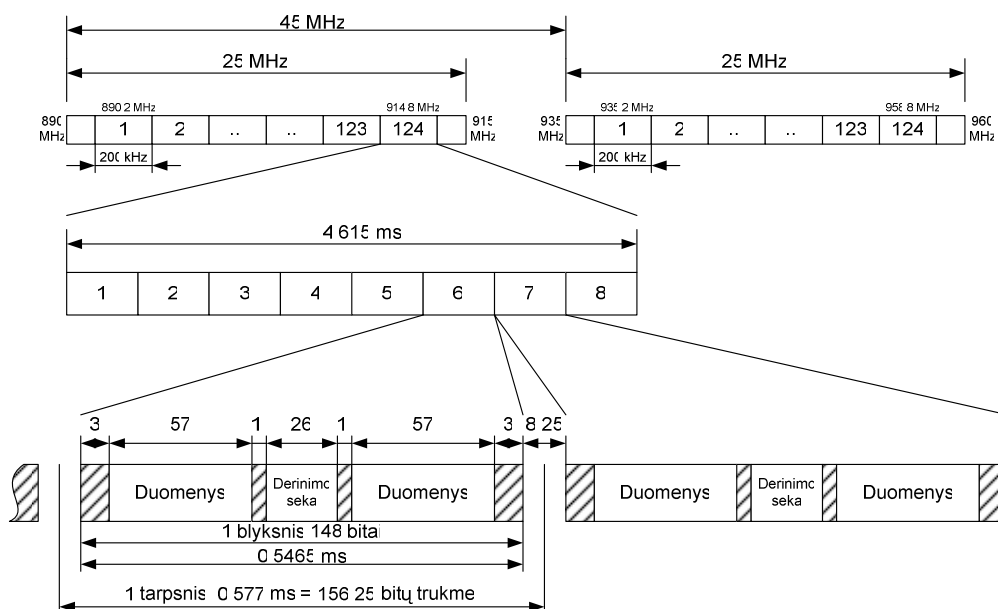
Lietuvoje naudojamos TV sistemos ryškio (Y) videosignalas užima 0÷6 MHz juostą. Y signalas yra sudarytas iš trijų laike sutankintų signalų: periodiškai pasikartojančių kadrų (1) ir eilučių (2) sinchroimpulsų bei informacinio videosignalu (3), kuris išdėstytas atkarpėlėse tarp periodinių eilučių sinchroimpulsų. Tokio signalo spektras nėra išsitiesinis. Jei perduodamas stovinčias vaizdas, t.y. eilutėse su tuo pačiu eilės numeriu kadras po kadro visą laiką perduodamas tas pats signalas, tai šis signalas bus periodinis. Jo spektras yra linijinis, sudarytas iš linijų n/T , kur T – pasikartojimo periodas, n – sveikasis skaičius. Stovinčio vaizdo signalo pasikartojimo periodas yra TV kadrų pasikartojimo dažnis ($f_k = 25$ Hz.).

Atkripkite dėmesį: TV kadras sudarytas iš dviejų vadinamųjų puskadrių, todėl kadrų sinchroimpulsų pasikartojimo dažnis $f_{ks} = 50$ Hz. Vadinasi, stovinčiojo vaizdo spektras yra linijinis, sudarytas iš kartotinių 25 Hz dažnių. Pasirodo, *judančiam vaizdui* Y signalo spektro linijos išplinta, užimdamos keletą Hz juostas. Realus užimto spektro plotis (išmetus visas „tuščias“ juostas) Y signalui tėra vos keli šimtai kHz. Yra principinė galimybė, panaudojus dažninį tankinimą, patalpinti kitą informaciją į tuščias spektro juostas. Būtent taip daroma su spalvų signalu. Skirtingose analoginės TV spalvinės sistemos tankinimo procedūra skirtinga. Čia pateikiame PAL spalvinės sistemos signalų tankinimo principus. Vadinamaisiais **spalvų skirtuminais signalais** R-Y (raudona – ryškis) ir B-Y (mėlyna – ryškis) kvadratiniais būdu moduluojamas subnešlys, kurio dažnis parenkamas taip, kad moduluoto signalo spektras atsidurtų ryškio signalo spektro tarpuose. Subnešlio dažnis turi būti parenkamas labai tiksliai (1 Hz tikslumu). Tada ryškio ir moduluoto spalvinio signalų

spektrai nepersikloja ir gali būti atgaminti TV imtuve. Garso signalu atliekama $f_g = 6,5$ MHz nešlio dažninė moduliacija, analogiškai, kaip DM radijuje. Taigi, kompleksiniame TV signale, garsinė informacija talpinama aukštadažnėje ($f > 6,25$ MHz) spektro dalyje. Kompleksiniu TV signalu AM vyksmu moduluojamas radijo dažnių nešlys, filtru prislopinant žemadažnę šoninę juostą.

4.3 GSM

GSM – (sutrumpinimas iš *Groupe Spécial Mobile*, vėliau pervadintas į *Global Standart for Mobile Communications*) globalus mobilių telefonų ryšio standartas. GSM yra antros kartos tinklas (2G). Nuo 2004 metų yra labiausiai paplitęs mobilių telefonų ryšio standartas pasaulyje. 4.4 pav. parodyta dažninių kanalų (GSM-900), laikinio tankinimo ciklą, tarpsnų ir blyksnių sandara GSM sistemoje.



4.4 pav. Dažniniai kanalai (GSM-900), laikinio tankinimo ciklas, tarpsnis ir blyksnis GSM sistemoje.

GSM signalas yra moduluojamas naudojant **Gauso minimaliąją manipuliaciją** (GMM- angl. - *Gaussian minimum shift keying –GMSK*). GMM signalo spektras yra labai efektyviai sutelktas darbiname siųstuvo dažnių intervale ir labai menka moduluoto signalo galia tenka dažniams už šio intervalo ribų. Gauso minimaliosios

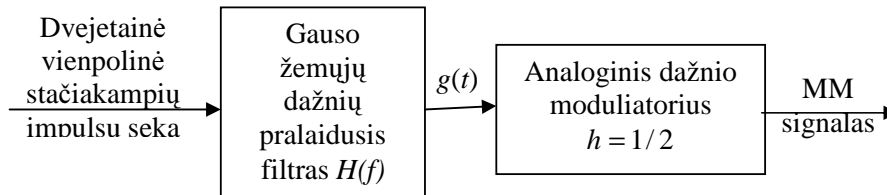
manipuliacijos signalą gauname minimaliosios manipuliacijos (MM) moduliatorių papildžius filtru, kurio dažninis atsakas yra Gauso varpas (4.5 pav.):

$$H(f) = \exp\left[-\frac{f^2}{B^2}\right], \quad (5)$$

B yra filtro juosta, kurioje $|H(f)| \geq \exp(-1)$. Lygybę (5) perrašykime taip:

$$H(f) = \exp\left[-\left(\frac{\ln 2}{2}\right)\frac{f^2}{W^2}\right], \quad (6)$$

dabar W yra labiau įprasta filtro dažnių juosta 3 dB lygyje.



4.5 pav. GMM signalo moduliatorius, panaudojant analoginį dažnio moduliatorių

Tokio filtro impulsinį atsaką galime surasti naudodamiesi atvirkštine Furje transformacija. Užrašysime tik atsakymą:

$$h(t) = \sqrt{2\pi/\ln 2} W \exp\left(-\frac{2\pi^2}{\ln 2} W^2 t^2\right). \quad (7)$$

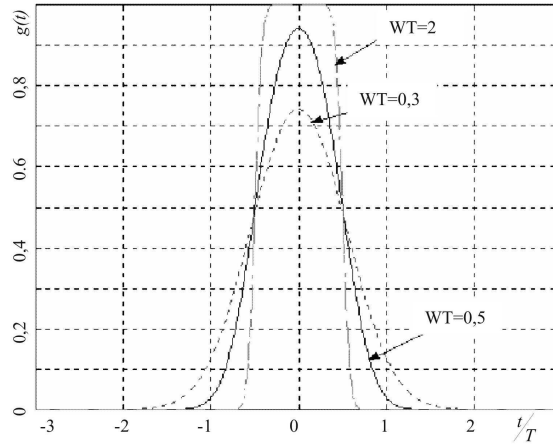
Kadangi į filtrą paduodami stačiakampiai trukmės T impulsai, tai impulso forma filtro išėjime $g(t)$ yra funkcijos $rect(t/T)$ ir $h(t)$ konvoliucija:

$$\begin{aligned} g(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} rect\left(\frac{t}{T}\right) h(t-\tau) d\tau = \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} h(t-\tau) d\tau = \\ &= \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \sqrt{2\pi/\ln 2} W \exp\left(-\frac{2\pi^2}{\ln 2} W^2 (t-\tau)^2\right) d\tau \end{aligned} \quad (8)$$

Vėlgi užrašysime tik atsakymą:

$$g(t) = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\pi \sqrt{\frac{2}{\ln 2}} WT \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right) \right) - \operatorname{erfc} \left(\pi \sqrt{\frac{2}{\ln 2}} WT \left(\frac{t}{T} + \frac{1}{2} \right) \right) \right]. \quad (9)$$

Kaip matyti, impulso forma filtro išėjime priklauso nuo bedimensinio parametro WT (vadinamo **juosta-trukmė**), kur W – filtro 3 dB juosta ir T – bito trukmė. 4.6 pav. pavaizduota impulso forma Gauso filtro išėjime, esant įvairioms parametro juosta-trukmė vertėms.

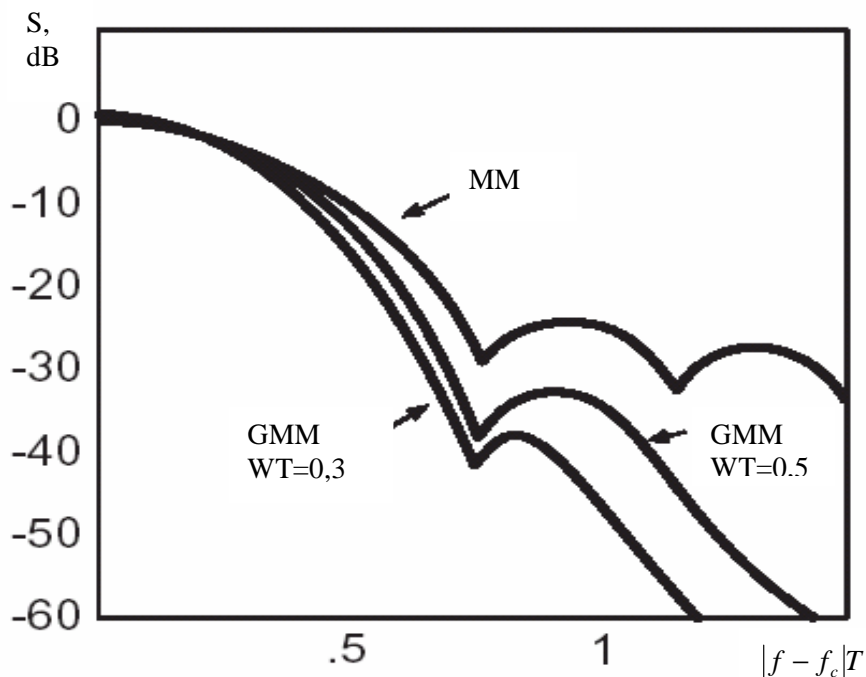


4.6 pav. Impulso forma Gauso filtro išėjime, esant įvairioms parametro juosta-trukmė vertėms

Kai filtro juosta $W \gg (\frac{1}{T} = R)$, t.y. filtro juosta daug didesnė už signalo spartą, filtras praleidžia beveik neiškraipytą stačiakampį impulsą. Signalo spartai didėjant (t.y. trumpėjant įėjimo impulso trukmei), išėjimo impulsas vis daugiau ir daugiau išplinta bei suapvalėja jo viršūnę.

Iš 4.6 pav. matyti, kad impulsas $g(t)$ netenkina priešastingumo principo, nes $g(-\frac{T}{2}) \neq 0$, t.y. jis turi nenulinę vertę dar prieš prasidedant filtro įėjimo impulsui $\operatorname{rect}(\frac{t}{T})$. Norint patenkinti priešastingumo principą, Gauso filtras turi veikti dar ir kaip užlaikymo linija, užlaikanti impulsą laiko intervalu τ . Tada filtro išėjimo impulso centras pasistumia į laikus $t = \tau$ ir, jei tik τ yra pakankamas, galima teigti, jog $g(-\frac{T}{2}) \approx 0$. Griežtai kalbant, $g(nT) \neq 0$ (n - sveikasis skaičius). Taigi, kadangi šis impulsas tęsiasi už bito intervalo, tam tikro lygio tarpimbolinė interferencija atsiranda jau moduliatoriuje. Tačiau GMM signalas pasižymi labai dideliu spektriniu

efektyvumu. 4.7 pav. palyginta GMM ir MM signalų galios spektrinio tankio priklausomybė nuo normalizuoto dažnio. Matyti, kad GMM signalo spektras turi ne tik gerokai mažesnius šoninius lapelius, bet ir gerokai greičiau silpnėja, tolstant nuo nešlio dažnio pagrindiniame lapelyje. Būtent pastaroji savybė nulėmė GMM taikymą GSM judriojo ryšio sistemoje. GSM-e naudojama moduliacija su juosta -laikas parametru $WT = 0,3$. Esant tokiam WT ir signalo spartai $R = 271$ kbps, 99% galios yra sutelkta 250 kHz juostoje.



4.7 pav. GMM signalo galios spektrinio tankio priklausomybė nuo normalizuoto dažnio

Dėl griežtų reikalavimų mazgų parametrams 4.5 pav. GMM modulatorius, nors ir labai paprastos struktūros, tačiau nėra labai tinkamas koherentiniam moduliavimui. Tokio analoginio dažnio modulatoriaus deviacijos indeksas h turi būti labai tiksliai lygus 0,5, tačiau, dėl mažiausių parametų nestabilumo jis nukrypsta bėgant laikui ir keičiantis aplinkops temperatūrai. Panaudojant kvadratūrinį fazės moduliatorių (4.8 pav.), moduliacijos indekso vertė išlieka gerokai pastovesnė. Be to, pastaroji schema pigesnė. Analitiškai galime aprašyti signalo formą modulatoriaus išėjime:

$$S_{MM} = \cos\left(\int g(t)dt\right)\cos(2\pi f_c t) + \sin\left(\int g(t)dt\right)\sin(2\pi f_c t). \quad (10)$$

Iš čia:

$$S_{MM} = x_1(t)\cos 2\pi f_c t + x_2(t)\sin 2\pi f_c t = x(t)\cos[2\pi f_c t - \varphi(t)] = x(t)\cos[\Theta(t)]. \quad (11)$$

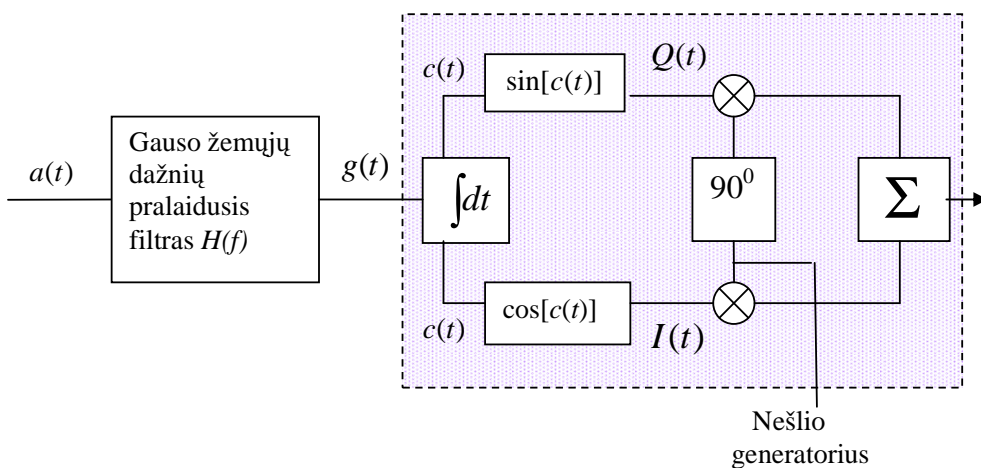
Čia:

$$x(t) = \sqrt{x_1^2(t) + x_2^2(t)} = 1, \\ \varphi(t) = \arctg \frac{x_2(t)}{x_1(t)} = \arctg [tg \left(\int g(t) dt \right)] = \int g(t) dt. \quad (12)$$

Signalo akimirksninį dažnį galime išreikšti taip:

$$f = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{d\Theta}{dt} \right) = f_c - \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left(\int g(t) dt \right) = f_c - \frac{g(t)}{2\pi}. \quad (13)$$

Tegu perduodant logines būsenas $g(t)$ įgyja tik dvi vertes $g(t) = \pm \frac{\pi}{2T_b}$, (t. y. signalas $g(t)$ yra simetrinis dvilygis dvipolis su amplitude $\pi/2T_b$). Tada $f_{1,2} = f_c \pm \frac{1}{4T_b}$, o tai reiškia, kad turime DDM (dvilygė dažnio manipuliacija) signalą su deviacijos indeksu $h=1/2$. Kad gautume GMM, tereikia tokį moduliatorių papildyti atitinkamu Gauso filtru.



4.8 pav. GMM signalo moduliatorius, panaudojant kvadratūrinį moduliatorių

4.4 Ortogonalioji dažninio tankinimo moduliacija

Visada yra geriau, kai sistema naudoja plokščiąjį dažnių srityje fedingo kanalą. Tokioms sistemoms tampa nereikalingi kai kurie elementai, malšinantys fedingo efekto įtaką, pvz.: įvairinimo technika, ekvalaizeris. Bet norint naudoti plokščiąjį dažnių srityje kanalą, reikia apsiriboti siaura kanalo juosta, o tai reiškia mažą perduodamų kanalų simbolių spartą. Yra įmanoma informaciją kanalu perduoti lygiagrečiai: nuoseklų srautą suskaidome į lygiagrečius blokus, o paskui bloko bitus (debitus, tribitus...- priklausomai nuo moduliacijos rūšies) perduodame lygiagrečiai, kiekvienam simboliui paskirdami atskirą siaurajuostį dažninį kanalą (naudojame skirtingus nešlių dažnius). Įeinančius į moduliatorius signalus pavadinkime **ponešlių simboliais**. 4.9 pav. parodyta tokio moduliatoriaus struktūra, kai naudojama KFM. Spartos R įeinantįjį srautą, atvaizduotą dvilygiu dvipoliu signalu, suskirstome $2N$ bitų lygiagrečiais blokais. Į KFM radijo moduliatorius paduotų dabitų sparta yra $1/T_s = R/2N$. Nešlių dažnius (ponešlius) parinkime taip:

$$f_n = f_0 + \frac{n}{T_s} = f_0 + \frac{nR}{2N}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, N. \quad (14)$$

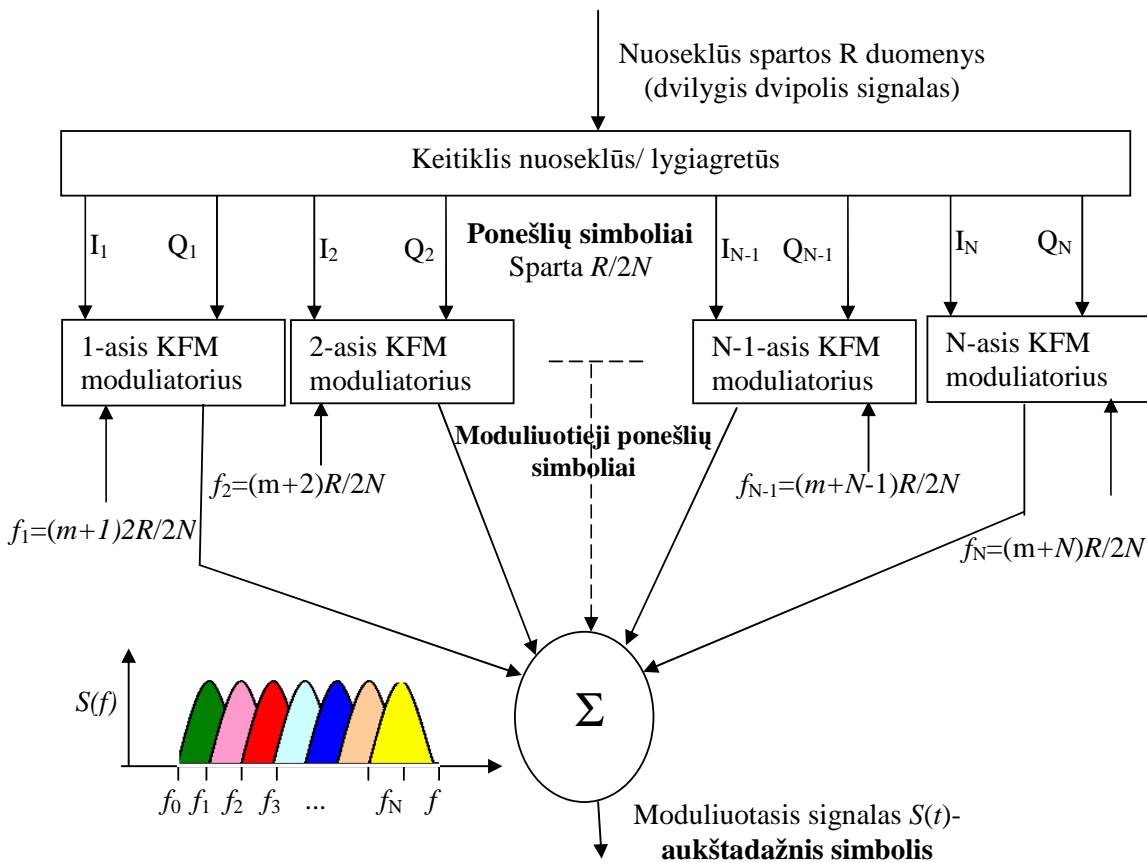
Toks užrašas reiškia koherentinę moduliaciją visiems ponešiams (f_0 yra $1/T_s$ m-toji harmonika), kadangi:

$$\frac{T_s}{T_n} = T_s \left(f_0 + \frac{n}{T_s} \right) = m + n \quad (15)$$

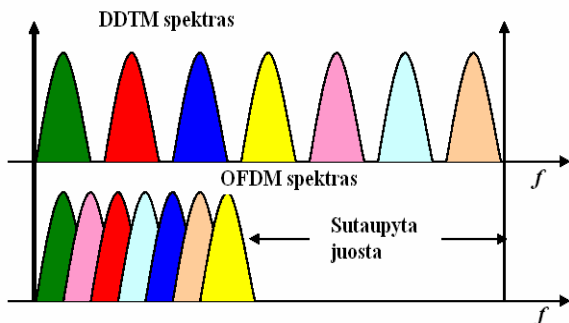
yra sveikasis skaičius (simbolio trukmė yra bet kurio ponešlio periodo T_n kartotinė). Be to, simboliai, perduodami skirtingais nešliais (juos pavadinkime **moduliuotaisiais ponešlių simboliais**), yra ortogonalūs.

Ortogonalumas yra išskirtinis **ortogonaliosios dažninio tankinimo moduliacijos** (angl.- *orthogonal frequency division multiplexing (modulation)* – OFDM) bruožas, leidžiantis atskirti ją nuo **daugianešlės dažninio tankinimo moduliacijos** (DDTM) vyksmo. Esant DDTM, dažniniai kanalai nepersikloja (4.10 pav.). OFDM atveju, net persiklojant skirtingų ponešlių simboliams dažnių srityje, imtuvas turi galimybę, panaudodamas koreliatorius, tuos simbolius išskirti. Taigi, informacijai pernešti galima naudoti patogiausius ir paprasčiausius radioimpulsus, turinčius pakankamai

platų spektrą (pavyzdžiui, stačiakampius). Signalo (**aukštadažnio simbolio**) formą 8 pav. modulatoriaus išėjime galime užrašyti taip:



4.9 pav. Ortogonaliosios dažninio tankinimo moduliacijos principas



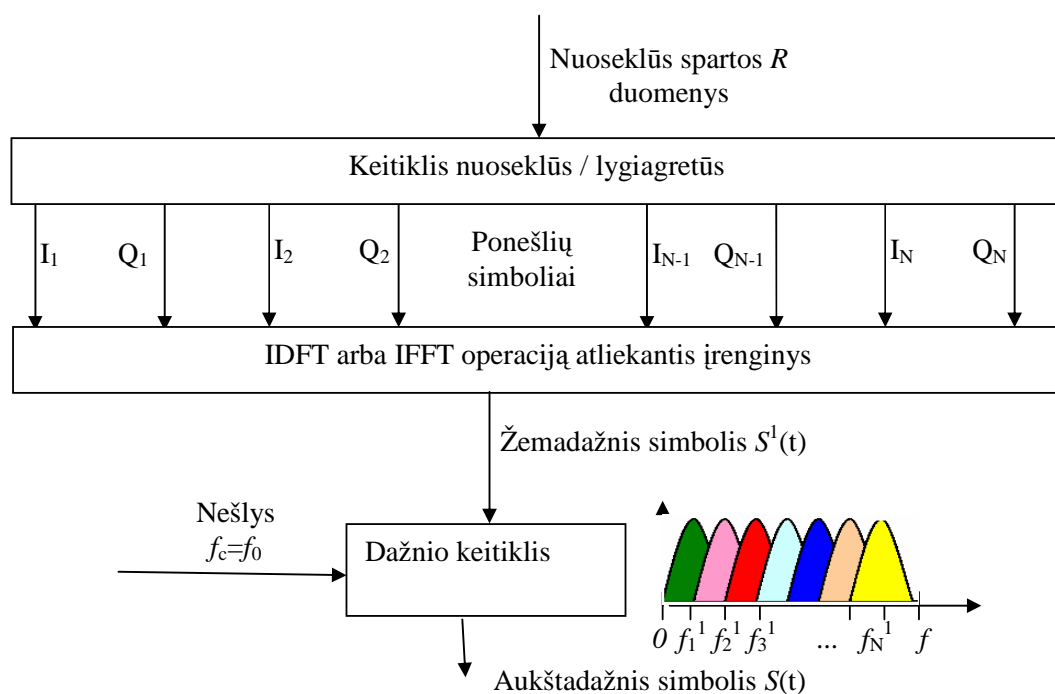
4.10 pav. DDTM ir OFDM signalų spektrai

$$S(t) = \sum_{n=1}^N \left(I_n \cos \left(2\pi \left(f_0 + n \frac{R}{2N} \right) t \right) + Q_n \sin \left(2\pi \left(f_0 + n \frac{R}{2N} \right) t \right) \right). \quad (16)$$

4.9 pav. pavaizduotas modulatorius labai sunkiai įgyvendinamas praktiškai. Jam reiktų daugybės nešlių, analoginių daugintuvų ir filtrų.

Galima atlikti signalo apdorojimą žemuose dažniuose (4.11 pav.) ir pasigaminti naują signalą su perstumtu spektru į žemuosius dažnius (jį pavadinkime **žemadažniu simboliu**) $S^1(t)$. Panaudojus dažnio keitimą tokį signalą būtų galima patalpinti į reikalingą dažnių juostą. Jei parinksime keitiklio generatoriaus dažnį $f_c = f_0$, tai signalą $S^1(t)$ galime užrašyti lygtyje (4.6.4) prilygindami $f_0 = 0$.

$$S^1(t) = \sum_{n=1}^N \left(I_n \cos \left(2\pi \frac{nR}{2N} t \right) + Q_n \sin \left(2\pi \frac{nR}{2N} t \right) \right). \quad (17)$$



4.11 pav. Ortogonaliosios dažninio tankinimo moduliacijos principas

Pasinaudokime kompleksinių skaičių aritmetika ir pažymėkime:

$$\begin{aligned} d_n &= I_n - iQ_n, \\ C_n &= \cos(2\pi f_n t) + i \sin(2\pi f_n t) = \exp(i2\pi f_n t). \end{aligned} \quad (18)$$

Čia: d_n – kompleksinis ponešlio simbolis, C_n – kompleksinis ponešlis. Nesunku pastebėti, kad:

$$S^1(t) = \operatorname{Re}\left(\sum_{n=1}^N d_n C_n\right) = \operatorname{Re}\left(\sum_{n=1}^N d_n \exp(i2\pi f_n t)\right) = \operatorname{Re}\left(\sum_{n=1}^N d_n \exp(i2\pi \frac{nR}{2N} t)\right). \quad (19)$$

Matyti, kad d_n yra ne kas kita, o kompleksinių nešlių, kurių dažnis f_n , kompleksinės amplitudės. Taigi turėdami diskretų signalo vaizdą dažnių srityje, t.y. $d_n(f_n)$, mes norime turėti signalą $S^1(t)$ (t.y. laiko srityje). Tokį vyksmą vykdo atvirkštinė diskrečioji (taip pat greitoji) Furje transformacija (angl.- *Inverse Diskrete Furier Transform - IDFT* ir *Inverse Fast Furier Transform - IFFT*). IDFT (IFFT) pagalba kompleksinis vektorius, aprašytas N diskrečiųjų verčių ir vaizduojantis signalo kompleksinį spektrą, paverčiamas taip pat N diskrečiųjų verčių kompleksiniu vektoriumi, kuris jau nusako laikinį signalo vaizdą. IDFT vyksmas yra aprašomas formule:

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x_n \exp(i2\pi \frac{kn}{N}), \quad (20)$$

čia $k = 1, 2, 3, \dots$

Jei į 19 formulę įrašysime diskrečiąsias laiko vertes $t = k\Delta T$, kur $\Delta T = 2/R$ (diskretizavimo periodas atitinka dibito trukmę), gausime:

$$S^1(t) = \operatorname{Re}\left(\sum_{n=1}^N d_n \exp(i2\pi \frac{nRk2}{2NR})\right) = \operatorname{Re}\left(\sum_{n=1}^N d_n \exp(i2\pi \frac{nk}{N})\right). \quad (21)$$

Lygybės (21) suma visiškai atitinka IDFT išraišką (20). Realioji IDFT rezultato dalis yra mūsų ieškomasis žemadažnis simbolis, t.y. signalas $S^1(t)$, kurio spektrą dažnio keitimo vyksmu galime perstumti į perdavimo juostą ir tokiu būdu gauti aukštadažnį simbolį $S(t)$.

Dabar šiek tiek labiau detalizuosime OFDM modulatoriaus struktūrinę schemą (11 pav.). IDFT vykdo programinis duomenų apdorojimo įrenginys, be to, ir kitose moduliacijos pakopose, jeigu tik galima, yra geriau operuoti ne su signalais (t.y. aparatūriškai), o su duomenimis (t.y. programiškai). Šiuo atveju galima visiškai

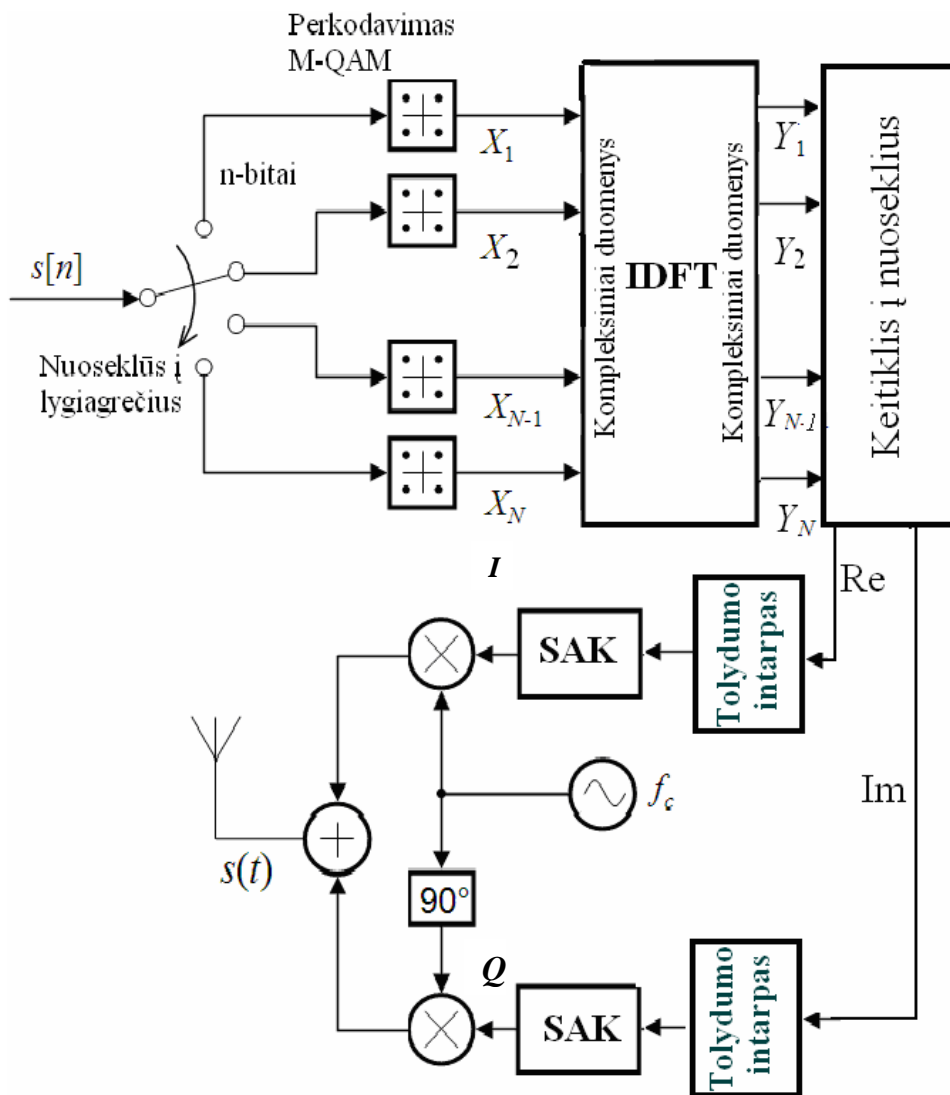
suformuoti duomenų pavidalo žemadažnį simbolį ir tik po šios OFDM moduliacijos vyksmo pakopos skaičius-analogas keitiklio (SAK) pagalba suteikti jam signalo pavidalą.

Norint patalpinti daugiau informacijos, ponešlių simboliams formuoti geriau naudoti daugialygę moduliaciją (pvz., M-QAM). Šiam tikslui nuoseklus duomenų srautas suskaidomas į $k = \log_2 M$ bitų lygiagrečius blokus, kurie perkodavimo įrenginiu pagal atitinkamos moduliacijos atitikmių žvaigždyną paverčiami kompleksiniu duomenų masyvu $X_n = I_n - iQ_n$. Kompleksinio atvaizdavimo įvedimas šioje vietoje reiškia tik tai, kad IDFT procesorius, operuodamas kompleksiniais skaičiais, ponešlių simbolius I_n laiko realiosiomis, o Q_n – menamomis subendrinto ponešlio simbolio X_n dalimis. Toliau IDFT (IFFT) procesorius duomenų masyvą X_n (dažninį signalo vaizdą), paverčia duomenų masyvu Y_n (laikiniu signalo vaizdu). Norėdami pastarąjį duomenų masyvą paversti realiu laikiniu signalu, privalome jį nuosekliai (laike) nuskaityti prieš paduodami į SAK. Taigi, po keitiklio lygiagretūs-nuoseklūs (duomenys) turime pilną OFDM žemadažnio simbolio vaizdą duomenų pavidale.

Jeigu siųstuvus perdavinėtų simbolius tolydžiai vienas po kito, signale, veikiamame multitrajektorinio fedingo, turėtume tarpsimbolinę interferenciją (**tarpsimbolinius trukdžius**). OFDM pasižymi tuo, kad informacija perduodama lygiagrečiai, o tai reiškia didelę radijokanalų perduodamų simbolių trukmę. Pavyzdžiui, skaitmeninės antžeminės TV (DVB-T) simbolio trukmė gali siekti beveik 1 ms. Fedingo kanalo laikinės sklaidos parametras Δt yra gerokai mažesnis ir GSM atveju miestuose tesudaro keletą μS . Žinoma, didelio narvelio ir didelio ryšio atstumo atveju (taip yra TV), šis parametras gali būti ir dešimtys μS . Tačiau visada $T_s \gg \Delta t$. Siunčiamus simbolius suspaudus laike ir, įvedus taip vadinamą **saugos intarpą** $\tau > \Delta t$ (jo metu siųstuvus nieko nesiunčia), galima panaikinti tarpsimbolinę interferenciją. Saugos intarpas sunaikina tarpsimbolinius trukdžius, tačiau nuosavieji simbolio trukdžiai, susiję su pereinamaisiais vyksmais simbolio pradžioje ir pabaigoje, išlieka. Todėl saugos intarpo vietoje į tarpsnį, esantį prieš simbolio pradžią, nukopijuojama žemadažnio simbolio dalis (vadinamasis **tolydumo intarpas** – angl.- *cyclic prefix*), atitinkanti simbolio pabaigą. Čia išnaudojama ponešlių simbolių savybė talpinti savyje sveiką kiekį sinusoidės periodų: t.y. nešlio fazė simbolio pradžioje yra ta pati,

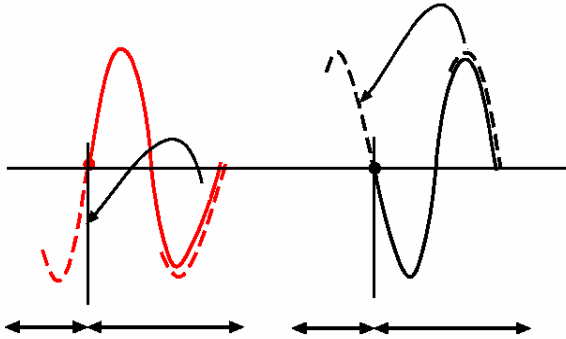
kaip ir simbolio pabaigoje. Visi ponešlių simbolių radijoimpulsai dėl šios operacijos išlieka tolydūs (4.13 pav.), tačiau radijoimpulsas prasideda anksčiau, negu simbolis. Tinkamai parinkus tolydumo tarpsnio trukmę, galima pasiekti, kad atitinkami pereinamieji vyksmai imtuve vyktų tolydumo tarpsnio metu, o „švarias“ ponešlių sinusoides stebėtume netrumpesniame laiko intervale, negu simbolio (žinoma, suspausto laike) trukmė.

Taigi, nuoseklių duomenų pavidalo žemadažnio simbolio su tolydumo intarpu realiąją ir menamąją dalis paduodame į skaičius-analogas keitiklius (4.12 pav.).



4.12 pav. Detalizuota OFDM modulatoriaus struktūra

Remdamiesi (18) ir (19) lygybėmis ir priėmę $X_n=d_n=I_n-Q_n$, įeinančius į kvadratinį moduliatorių signalus I ir Q , galime taip užrašyti:



4.13 pav. Saugos (tolydumo) intarpas. Dalis informacijos iš žemadažnio simbolio galo nukopijuojama ir patalpinama simbolio pradžioje. Taip išlaikomas žemadažnių ponešlių radijoimpulsų tolydumas.

Tolydumo intarpas Pradinis simbolis Tolydumo intarpas Pradinis simbolis

$$\begin{aligned}
 I(t) &= \operatorname{Re} \left(\sum_{n=1}^N X_n C_n \right) = \operatorname{Re} \left(\sum_{n=1}^N (I_n - iQ_n) \exp(i2\pi f_n t) \right) = \\
 &= \operatorname{Re} \left(\sum_{n=1}^N (I_n - iQ_n) [\cos(2\pi f_n t) + i \sin(2\pi f_n t)] \right) = \\
 &= \sum_{n=1}^N I_n \cos(2\pi f_n t) + Q_n \sin(2\pi f_n t) \\
 Q(t) &= \sum_{n=1}^N I_n \sin(2\pi f_n t) - Q_n \cos(2\pi f_n t)
 \end{aligned} \tag{22}$$

Kadangi $\cos(90^\circ + \alpha) = -\sin \alpha$ (t.y. 90° fazės posūkis 4.12 pav. reškia neigiamą sin nešlį) tai kvadratinio moduliatoriaus išėjime turėsime:

$$\begin{aligned}
 S(t) &= I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t) = \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N I_n \cos[2\pi(f_n + f_c)t] + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N I_n \cos[2\pi(f_n - f_c)t] + \\
 &+ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N Q_n \sin[2\pi(f_n + f_c)t] + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N Q_n \sin[2\pi(f_n - f_c)t] + \\
 &+ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N I_n \cos[2\pi(f_n + f_c)t] - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N I_n \cos[2\pi(f_n - f_c)t] + \\
 &+ \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N I_n \cos[2\pi(f_n + f_c)t] - \frac{1}{2} \sum_{n=1}^N Q_n \sin[2\pi(f_n - f_c)t] = \\
 &= \sum_{n=1}^N I_n \cos[2\pi(f_n + f_c)t] + \sum_{n=1}^N Q_n \sin[2\pi(f_n + f_c)t]
 \end{aligned} \tag{23}$$

Aukštadažniame signale yra tik f_n+f_c dažniai (viršutinė dažnių juosta). Galėjome signalui $I(t)$ panaudoti dažnio keitimą (signalų daugintuvą) ir, kaip 4.11 pav., gauti aukštadažnį signalą. Tačiau tokiu atveju reikėtų filtruoti vieną iš šoninių spektro juostų. Pasinaudojus tuo, jog IFFT procesorius apdoroja kompleksinį signalą, dažnio keitimą galima atlikti su kvadratūriniu moduliatoriumi, nenaudojant jokių papildomų filtrų.

5. Papildoma literatūra

1. T. Halonen, J. Homero, J. Melero. GSM, GPRS and EDGE Performance. John Wiley & Sons, 2003.
2. B. Walke, P. Seidenberg, M.P. Althoff, UMTS The fundamentals. John Wiley & Sons, 2003.
3. Understanding telecommunications I and II. Student litteratur, Lund. 1998.
4. P.Mohana Shankar. Introduction to wireless systems. John Wiley & Sons, 2002.