

VILNIAUS UNIVERSITETAS
FIZIKOS FAKULTETAS
RADIOFIZIKOS KATEDRA
Telekomunikacijų sistemų laboratorija

Laboratorinis darbas Nr.7

**Keturlygės fazės manipuliacijos (KFM) ir
minimaliosios manipuliacijos (MM) modeliavimas Matlabu**

Vilnius, 2007

1. Darbo tikslas

Sumodeliuoti Matlabu ir palyginti keturlygės fazės manipuliacijos ir minimaliosios manipuliacijos signalus.

2. Darbo užduotys

1. Mokėti paaiškinti KFM ir MM signalų teorinius gavimo principus.
2. Susipažinti su „Matlab“ MM bei KFM moduliatorių veikimo principais bei sintakse.
3. Naudojantis „Matlab“ MM ir KFM moduliatoriais išnagrinėti šių manipuliacijų susidarymo pakopas ir mokėti paaiškinti kiekvienoje pakopoje gautą signalą bei jo spektrą.
4. Sumodeliuoti KFM bei MM signalų galios spektrinius tankius ir juos palyginti.
5. Atkurti KFM signalo atitikmių (fazė- simbolis) žvaigždyną.
6. Surasti KFM signalo trūkius ir susieti nešlio fazės pokyčius su visais galimais perėjimais simbolis- simbolis. Gautus rezultatus pateikti grafiškai.
7. Išmatuoti KFM klaidingų bitų kiekio, BER (bitų klaidų sparta), klaidingų simbolių kiekio ir SER (simbolių klaidų sparta) priklausomybę nuo S/N (signalu/triukšmo santykis dB), esant fiksuotai filtro dažnių pralaidumo juostai $\Delta f = F_d$. Gautus rezultatus pateikti grafiškai ir palyginti juos su teorinėmis kreivėmis. Pastaba: norint stebėti klaidingus bitus, kai S/N 9÷10 dB, reikia parinkti pakankamai ilgą informacinio signalo seką. Kai informacinio signalo seka ilga, kad nebūtų perpildymo, reikia maksimaliai sutrumpinti moduluoto signalo masyvus. Tai atliekama parenkant maksimalų galimą informacinio signalo dažnį ir minimalų diskretizavimo dažnį.
8. Išmatuoti MM BER (bitų klaidų sparta) priklausomybę nuo S/N, kai filtro dažnių pralaidumo juosta yra lygi $\Delta f = 1,5 \cdot F_d$. Gautus rezultatus pateikti grafiškai ir palyginti juos su teorine kreive.
9. Išmatuoti MM BER priklausomybę nuo filtro dažnių pralaidumo juostos esant fiksuotai S/N santykio vertei. Nubrėžti grafiką ir paaiškinti gautus rezultatus.

3. Teorinis įvadas

3.1 Keturlygė fazės manipuliacija

Koherentinė keturlygė fazės manipuliacija (KFM *angl.* Quaternary phase shift keyng – QPSK) ir jos atmainos gana plačiai taikomos judriojo ryšio sistemose. Ši moduliacija naudojama

tokiuose populiariuose standartuose, kaip IS 54, JDC, IS 95 ir net gi 3G standarte IMT 2000. Ji yra dažniau taikoma judriajame ryšyje nei, pavyzdžiui, DFM (dvilygė fazės manipuliacija), nes pasižymi siauresne užimamų dažnių juosta (kiekvienas siunčiamasis KFM simbolis perneša du bitus informacijos, DFM – tik vieną).

KFM rūšys:

- paprastoji KFM;
- paslinktoji KFM (*angl.*- Offset QPSK- OQPSK);
- KFM su $\pi/4$ atitikmių žvaigždyno pasukimu – $\pi/4$ -KFM;
- diferencinė KFM su $\pi/4$ atitikmių žvaigždyno pasukimu – $\pi/4$ -DKFM.

3.1.1 Paprastoji KFM

Naudojamos dvi paprastosios KFM formos su skirtingais atitikmių fazė–simbolis žvaigždynais. Pirmosios paprastosios KFM atmainos signalą galima užrašyti taip:

$$S_i(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E}{T_s}} \cos[2\pi f_c t + (2i+1)\pi/4], & 0 \leq t < T \\ 0, & \text{kitur.} \end{cases} \quad (1)$$

Antrosios (vadinamosios pasuktosios) KFM signalas užrašomas taip:

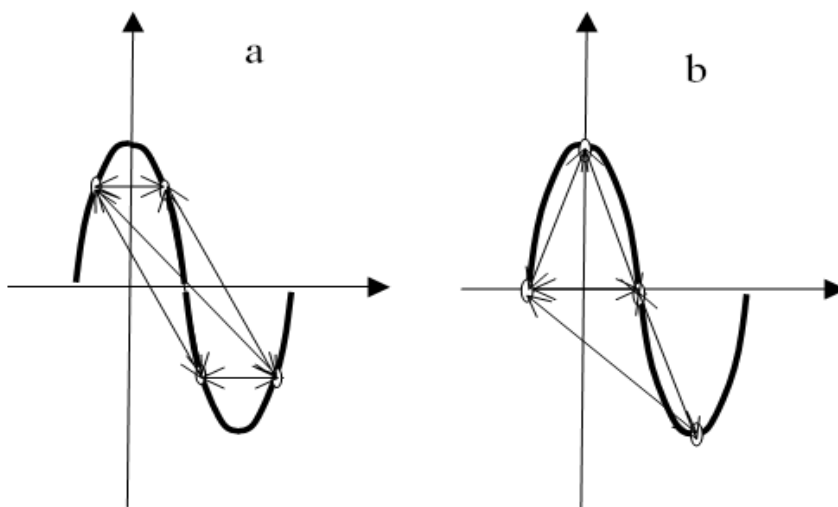
$$S_i(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E}{T_s}} \cos[2\pi f_c t + (i+1)\pi/2], & 0 \leq t < T \\ 0, & \text{kitur.} \end{cases} \quad (2)$$

Čia: T_s - simbolio (radioimpulso) trukmė, $T_s = n/f_c$ (n – sveikasis skaičius), $i = 0,1,2,3$. Simbolio trukmė yra du kartus didesnė už bito trukmę $T_s = 2 \cdot T_b$. Signalų fazė atskaitoma nuo simbolio pradžios, taigi aukščiau pateiktos (1) ir (2) formulės skiriasi tik kosinusoidės trūkio vieta ties perėjimu simbolis–simbolis. KFM atveju kiekvienas simbolis reiškia taip vadinamąjį dabitą–dviejų, pradiniam informaciniame signale esančių šalia, bitų kombinaciją. 1 lentelėje yra pateiktos galimos atitiktys tarp duomenų dabitų ir moduluoto nešlio fazių simboliuose.

1 Lentelė. Moduluoto nešlio fazės ir dabitų atitiktys paprastosios KFM signale.

Duomenų dabitai	Moduluoto nešlio fazė (nepasuktoji KFM)	Moduluoto nešlio fazė (pasuktoji KFM)
11	$\pi/4$	0
01	$3\pi/4$	$\pi/2$
00	$5\pi/4$	π
10	$7\pi/4$	$3\pi/2$

1 pav. yra parodytos nešlio trūkio vietos ir galimi akimirksninės įtampos šuoliai ties perėjimais simbolis–simbolis nepasuktosios (a) ir pasuktosios (b) KFM signale.



1 pav. Akimirksninės įtampos šuoliai nepasuktosios (a) ir pasuktosios (b) KFM signale.

Lygybes (1) ir (2) galima užrašyti bendru atveju taip:

$$S_i(t) = \begin{cases} \sqrt{\frac{2E}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + i\pi/2 + \varphi_0), & 0 \leq t < T \\ 0, & \text{kitur.} \end{cases} \quad (3)$$

Šioje (3) lygybėje pradinė fazė $\varphi_0 = \pi/2$ taikoma pasuktosios, o $\varphi_0 = \pi/4$ – nepasuktosios KFM atveju.

Lygybei (3) galime suteikti kitą pavidalą, panaudojus kampų sumavimo formulę:

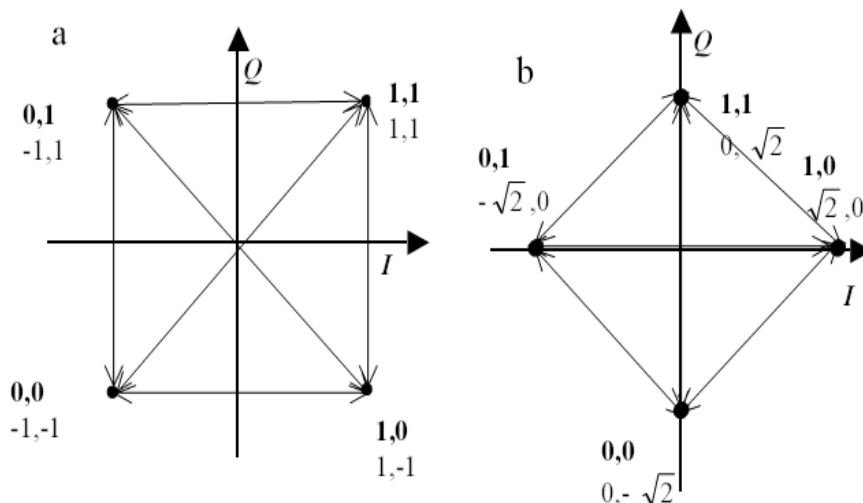
$$S_i(t) = \sqrt{\frac{2E}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \cos(i\pi/2 + \varphi_0) + \sqrt{\frac{2E}{T_s}} \sin(2\pi f_c t) \sin(i\pi/2 + \varphi_0) \quad (4)$$

Pirmasis (4) lygybės narys apibūdina I (sinfazinį), o antrasis – Q (kvadratūrinį) sandus. I sandas apima lyginius, o Q – nelyginius informacinio signalo bitus. Lygybę (4) patogiu perrašyti, panaudojant kompleksinio kintamojo simboliką:

$$S_i(t) = \text{Re} \left\{ \sqrt{\frac{2E}{T_s}} \exp j[(i\pi/2 + \varphi_0)] \exp(j2\pi f_c t) \right\} \quad (5)$$

I (5) lygybėje esantį dydį $\sqrt{\frac{2E}{T_s}} \exp j[(i\pi/2 + \varphi_0)] = A$ galime žiūrėti, kaip į kompleksinę

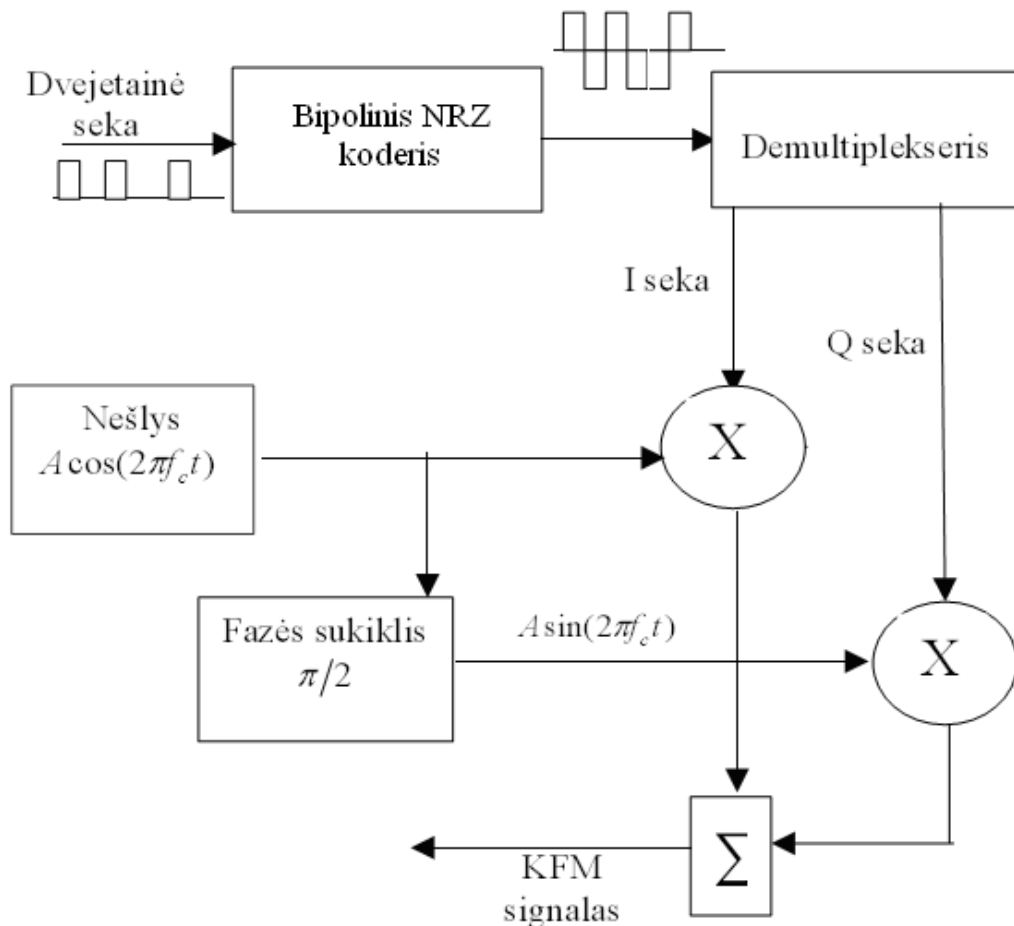
nešlio amplitudę. Atidėję pastarąją kompleksinėje plokštumoje ir išrašę prie diskrečiųjų amplitudės verčių atitinkančias dibitų vertes, gausime atitikmių žvaigždyną. Atitikmių žvaigždynai nepasuktajai ir pasuktajai KFM pavaizduoti 2 pav.



2 pav. Nepasuktosios (a) ir pasuktosios (b) KFM signalų atitikmių žvaigždynai.

Paveiksle linijomis su rodyklėmis taip pat parodyti galimi kosinusoidės kompleksinės amplitudės šuoliai, esant įvairioms kaimyninių dibitų kombinacijoms. Ties perėjimu simbolis–simbolis KFM signale susidaro akimirksninės įtampos šuoliai, kurie nėra pageidautini. Staigus ir didelis signalo įtampos pokytis sukelia netiesinius iškreipymus siųstuvo grandinėse ir didina siųstuvo šalutinę spinduliuotę.

Paprastosios KFM modulatoriaus struktūrinė schema pavaizduota 3 pav. Bipolinis NRZ koderis įeinančią informacinę dvejetainę loginių būsenų seką paverčia dvipoliniu stačiakampių impulsų signalu, kur loginis „1” atitinka teigiamą impulsą (t.y. 1), o loginis „0” atitinka neigiamą impulsą (t.y. -1). Čia vieno impulso trukmė yra T ($T=T_b$). Demultiplekseris suformuoja dvi lygiagrečias I ir Q sekas, kurių impulsų trukmės yra dvigubai didesnės negu pradinio (informacinio) signalo t.y. $2T$. I stačiakampių impulsų seką dauginame iš aukšto dažnio nešlio t.y. kosinuso funkcijos, kurios amplitudė kinta nuo -1 iki 1. Šis veiksmas yra tapatus kosinuso funkcijos fazės pastūmimui į 0 arba į π . Tuo pačiu momentu Q stačiakampių impulsų seką dauginame iš pasukto per $\pi/2$ aukšto dažnio nešlio t.y. sinuso funkcijos. Sudėjus abu šiuos signalus gauname nepasuktąjį KFM signalą. Norint gauti pasuktąjį KFM signalą, tereikia I ir Q signalų atžvilgiu nešlio fazę pasukti per $\pi/4$.

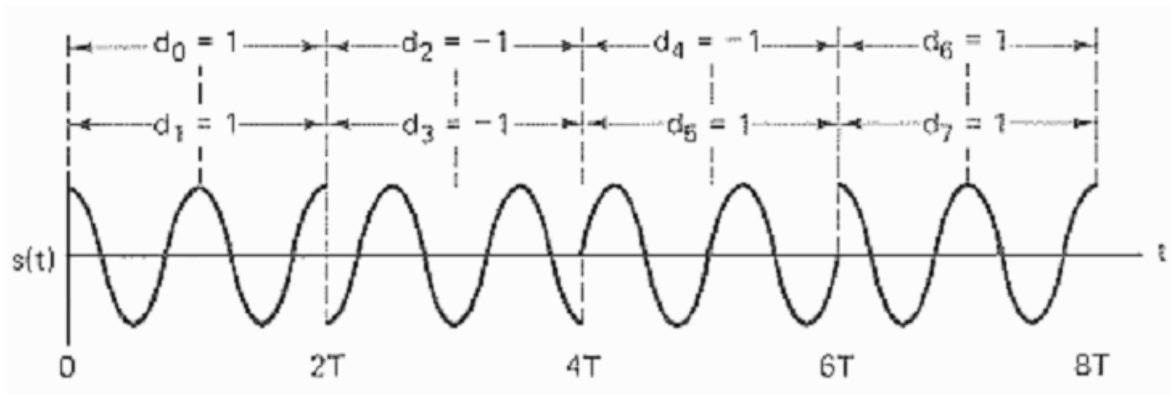


3 pav. Nepasuktosios KFM modulatorius.

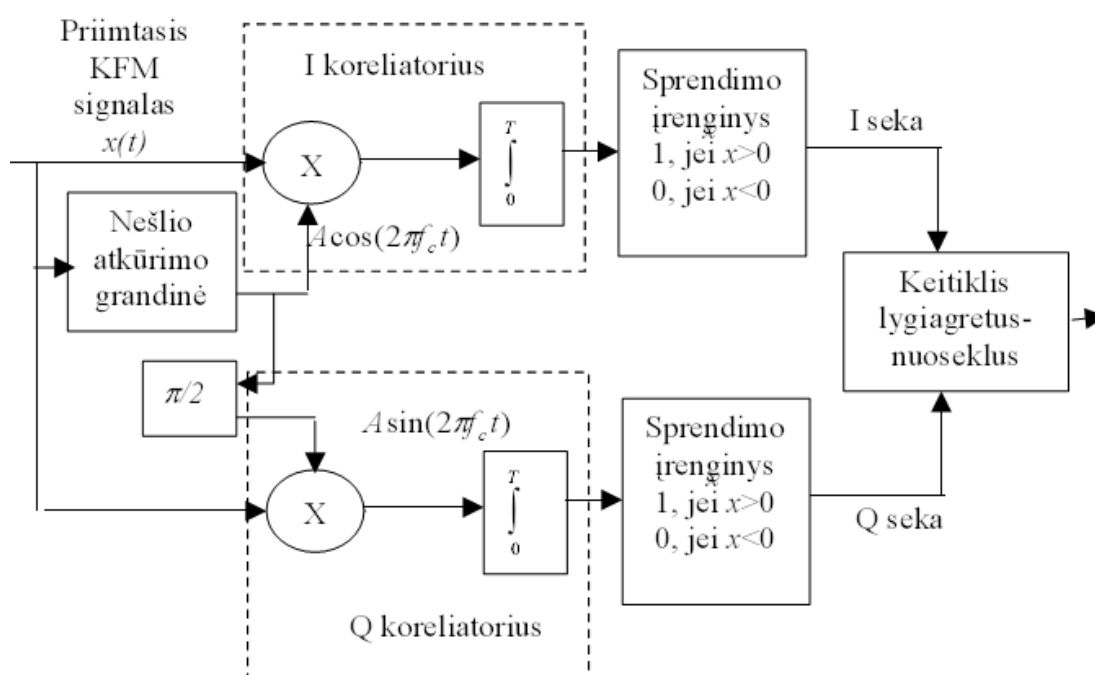
KFM signalo atveju kiekvienas simbolis perneša du bitus informacijos. Dėl to sumažėja dažnių juosta, lyginant su DFM, ir padidėja spektrinis efektyvumas. Šis vyksmas yra galimas, kadangi I ir Q signalai yra ortogonalūs vienas kitam. KFM nešlio fazė gali keistis tik kas $2T$ laiko intervalą. Jeigu pereinat nuo $2T$ į kitą intervalą nei vienas iš I ir Q sekos elementų tuo laiko momentu nekeičia ženklo, tai nešlio fazė išlieka nepakitusi. Jei vienas iš I ir Q sekos elementų tuo laiko momentu keičia ženklą, tai nešlio fazė keičiasi per $\pi/2$. Jei abu I ir Q sekos elementai keičia ženklą, tai fazė pasislenka per π . Tai vaizdžiau galime pamatyti 4 pav.

Jeigu KFM signalą filtruotume kad sumažintume jo spektre esančius šoninius lapelius, tai gautasis signalas jau nebeturėtų pastovios gaubtinės. Jo gaubtinė sumažėtų keičiantis nešlio fazei.

KFM signalo demodulatorius (5 pav.) sudarytas iš nešlio atkūrimo grandinės ir dviejų DFM signalo demoduliatorių (I ir Q kanalams). I kanalo koreliatorius naudoja atkurtą sinchroninį kosinusinį, Q kanalo – pasuktą – sinusinį nešlius. Demoduluota lygiagrečių dabitų seka keičiama nuoseklia, dvigubai spartesne už I ir Q, duomenų seka.



4 pav. KFM signalo nešlio fazės pokyčio pavyzdys.



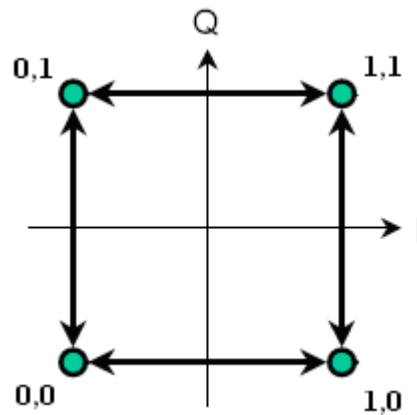
5 pav. KFM signalo demodulatorius.

3.1.2 Pastumtoji KFM

Ši KFM rūšis padeda sumažinti pagrindinį paprastosios KFM trūkumą. Jeigu dibitai 00 ir 11 arba 01 ir 10 yra greta, KFM signalas keičia fazę per π . Siųstuvo filtras didelių fazės pokyčių akimirkomis labai sumažina nešlio amplitudę. Tomis akimirkomis nešlio atkūrimo grandinei gresia pamesti nešlio fazę, kadangi tuo metu akimirksninis S/N faktorius gerokai mažesnis už vidutinę jo vertę. Pastumtoje KFM I ir Q sekos yra pastumtos laike viena kitos atžvilgiu per bito trukmę T. Taigi, perėjimo metu I ir Q sekose gali keistis tik vienas bitas.

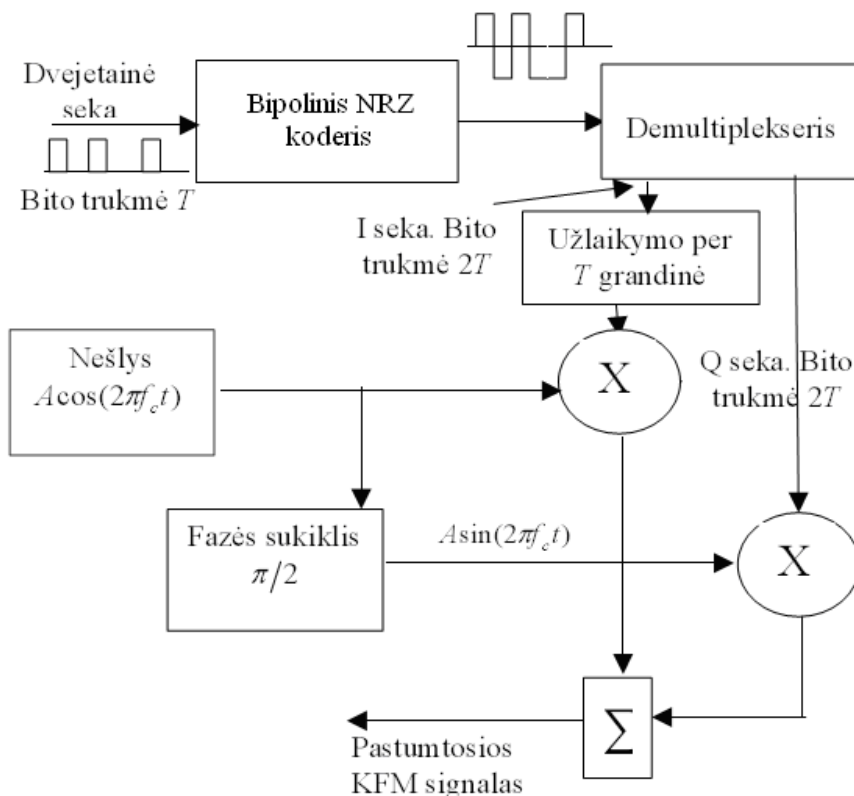
Perėjimai $01 \leftrightarrow 10$ ir $00 \leftrightarrow 11$ tada vyksta dviem etapais: per tarpines būsenas 00 arba 11 (perėjimui $01 \leftrightarrow 10$) ir 01 arba 10 (perėjimui $00 \leftrightarrow 11$). Tokiu būdu pastumtosios KFM signale

išvengiama fazės pokyčių per π ir didelių momentinės įtampos šuolių. Tai iliustruoja pastumtosios KFM atitikmių žvaigždynas (6 pav.).



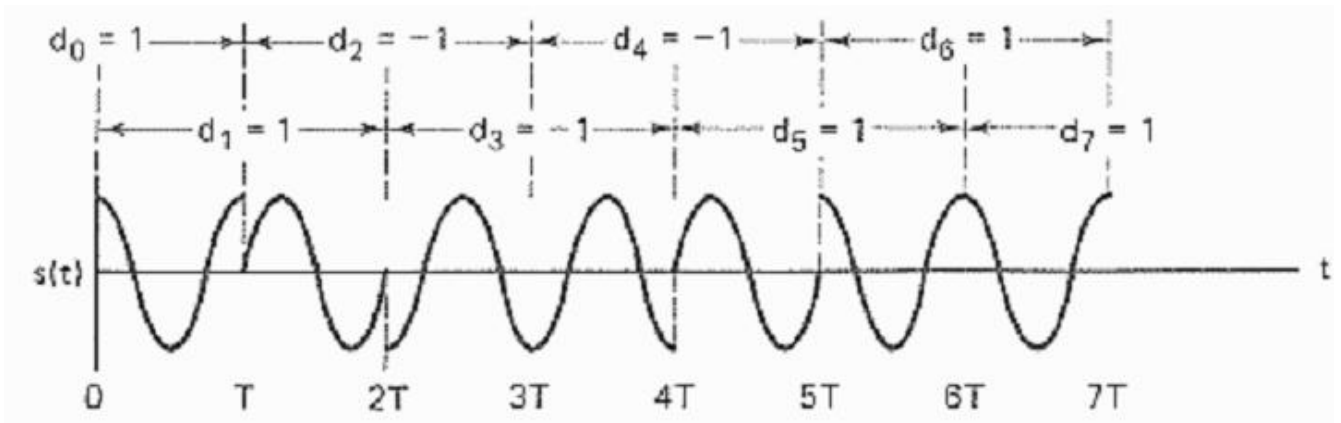
6 pav. Pastumtosios KFM atitikmių žvaigždynas.

Pastumtosios KFM modulatoriaus struktūrinė schema pavaizduota 7 pav. Kaip ir paprastosios KFM atveju, bipolinis NRZ koderis įeinančią informacinę dvejetainę loginių būsenų seką paverčia dvipoliniu stačiakampių impulsų signalu, kur loginis „1” atitinka teigiamą impulsą (t.y. 1), o loginis „0” atitinka neigiamą impulsą (t.y. -1). Čia vieno impulso trukmė yra T ($T=T_b$). Demultiplekseris suformuoja dvi lygiagrečias I ir Q sekas, kurių impulsų trukmės yra dvigubai didesnės negu informacinio signalo t.y. $2T$. Tada I seka yra užlaikoma per bito trukmę. Toliau viskas vyksta analogiškai kaip ir paprastosios KFM modulatoriaus schemeje.



7 pav. Pastumtosios KFM modulatorius.

Dėl to, kad I seka yra užlaikyta, KFM signalo nešlio fazė keičiasi dažniau (t.y. kas T laiko trukmę) ir ji negali pakisti daugiau nei per $\pi/2$. 8 pav. pateiktas pavyzdys, kad būtų lengviau įsivaizduoti, kaip kinta fazė pastumtosios KFM signalo.

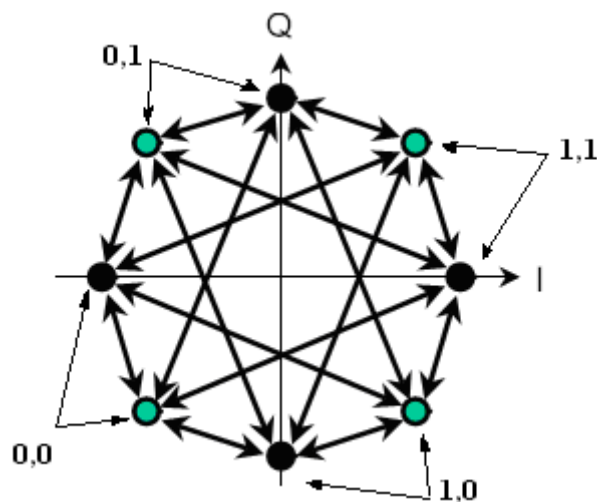


8 pav. Pastumtosios KFM signalo nešlio fazės pokyčio pavyzdys.

Tokį signalą filtruojant fazės trūkių akimirkomis gaubtinės amplitudė mažiau keičiasi.

3.1.3 $\pi/4$ -KFM ir $\pi/4$ -DKFM

Du paprastojoje KFM dažniausiai naudojami atitikmių žvaigždynai (žr. 2 pav.) yra pasukti vienas kito atžvilgiu per $\pi/4$. Vadinamojoje $\pi/4$ -KFM naudojami abu žvaigždynai: pereinant nuo simbolio prie simbolio prie nešlio fazės pridėjama $\pm\pi/4$, t.y. perjungiamas vis kitas atitikmių žvaigždynas. Taigi nešlio kompleksinė amplitudė gali įgauti bet kurią iš aštuonių verčių. Šios manipuliacijos atitikmių žvaigždynas yra pateiktas 9 pav.



9 pav. $\pi/4$ -KFM atitikmių žvaigždynas.

Vietoje $\pm\pi/2$ ir $\pm\pi$ fazės pokyčių, esančių paprastosios KFM signale, atsiranda $\pm\pi/4$ ir $\pm3\pi/4$ fazės perėjimai. Taigi nufiltruoto $\pi/4$ -KFM signalo gaubtinė simbolis–simbolis perėjimų metu yra mažiau slopinama.

Plačiai naudojama diferencialinė $\pi/4$ -KFM forma– $\pi/4$ -DKFM. $\pi/4$ -DKFM signale su i -tojo dibito verte siejama ne konkreti kosinusoidės fazė simbolio radioimpulse, o fazės pokytis pereinant nuo i -tojo radioimpulso prie $(i+1)$ -ojo radioimpulso. 2 lentelėje yra pateiktos $\pi/4$ -KFM moduliacijos moduluoto nešlio fazės pokyčio ir perduodamų dabitų atitikty.

2 lentelė. $\pi/4$ -KFM moduliacijos moduluoto nešlio fazės pokyčio ir perduodamų dabitų atitikty.

Perduodamo dibito vertė	Fazės pokytis
00	$\pi/4$
01	$3\pi/4$
10	$-3\pi/4$
11	$-\pi/4$

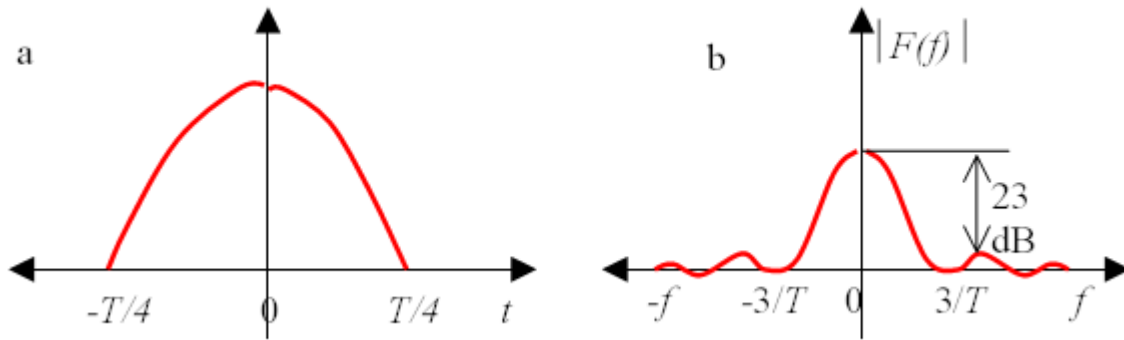
3.1.4 Minimalioji manipuliacija (MM)

Viena iš paprasčiausių pastoviosios gaubtinės moduliacijos formų yra vadinamoji minimalioji manipuliacija (MM). MM gali būti nagrinėjama kaip pastumtoji KFM, kurioje moduluojančiame signale vietoje stačiakampių impulsų naudojami nupjautos kosinusoidės (NC) formos impulsai. NC formos impulsas turi pusės kosinusoidės forma. Šis impulsas aprašomas tokia funkcija:

$$f(t) = \cos\left(\frac{2\pi}{T}t\right), \quad |t| < \frac{T}{4}, \quad (6)$$

$$f(t) = 0, \text{ kitur.}$$

NC impulso formas bei spektras yra pavaizduoti 10 pav.



10 pav. a) NC impulso forma; b) spektras.

MM kaip ir pastumtosios KFM atveju, I seka užlaikoma per bito trukmę T . Tada šios abi sekos sudauginamos su harmoniniu signalu, kurio dažnis yra keturis kartus mažesnis negu informacinio signalo sparta. Šitai dvipolinė stačiakampių impulsų seka pakeičiama atitinkama NC (nupjautos kosinusoidės) impulsų seka. I ir Q NC sekos yra tolydiniai signalai. Trūkius turi tik tų signalų išvestinės (loginės būsenos keitimosi akimirkomis). Aišku, kad moduliotojo signalo kintantieji parametrai, kuriuos keičia moduluojantysis signalas, taip pat neturės trūkių. Moduliavimo metu vykdomė tik tolydinių laiko funkcijų daugybą ir sumavimą, o modulioto signalo forma (t.y. tuo pačiu amplitudė ir fazė) turi būti tolydinė. Trūkius gali turėti tik amplitudės ir fazės išvestinės. O kaip žinoma, fazės išvestinė yra dažnis.

Tegu Q ir užlaikytasis I NRZ signalai yra $b_Q(t)$ ir $b_{I\dot{U}\dot{Z}}(t)$. Tada atsižvelgiant į (4) ir (6) lygybes MM signalą S_{MM} galime užrašyti taip:

$$S_{MM} = b_{I\dot{U}\dot{Z}}(t) \cos\left(\frac{2\pi t}{4T}\right) \cos(2\pi f_c t) + b_Q(t) \sin\left(\frac{2\pi t}{4T}\right) \sin(2\pi f_c t). \quad (7)$$

Čia f_c – nešlio dažnis. (7) lygybę galime perrašyti taip:

$$S_{MM} = x_1(t) \cos(2\pi f_c t) + x_2(t) \sin(2\pi f_c t) = x(t) \cos[2\pi f_c t - \varphi(t)]. \quad (8)$$

Čia:

$$\begin{aligned} x(t) &= \sqrt{x_1^2(t) + x_2^2(t)}, \\ \varphi(t) &= \arctg \frac{x_2(t)}{x_1(t)}, \\ x_1(t) &= b_{I\dot{U}\dot{Z}}(t) \cos\left(\frac{2\pi t}{4T}\right), \\ x_2(t) &= b_Q(t) \sin\left(\frac{2\pi t}{4T}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

Kadangi $b_Q(t)$ ir $b_{I\dot{U}\dot{Z}}(t)$ gali įgyti tik ± 1 vertes, signalo amplitudę galime išreikšti taip:

$$x(t) = \sqrt{x_1^2(t) + x_2^2(t)} = \sqrt{b_{IU\check{Z}}^2(t) \cos^2\left(\frac{2\pi t}{4T}\right) + b_Q^2(t) \sin^2\left(\frac{2\pi t}{4T}\right)} = \sqrt{2}. \quad (10)$$

Vadinasi MM signalo gaubtinės amplitudė yra pastovi. Pažiūrėsime, koks yra MM signalo dažnis. Perrašykime (7), panaudodami kampų sumavimo formules:

$$S_{MM} = \frac{1}{2} b_{IU\check{Z}}(t) \left[\cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi t}{4T}\right) + \cos\left(2\pi f_c t - \frac{2\pi t}{4T}\right) \right] + \frac{1}{2} b_Q(t) \left[\cos\left(2\pi f_c t - \frac{2\pi t}{4T}\right) - \cos\left(2\pi f_c t + \frac{2\pi t}{4T}\right) \right]. \quad (11)$$

Iš čia matyti, kad MM signalo momentinis dažnis gali įgyti tik dvi vertes:

$$\begin{aligned} f_+ &= f_c + \frac{1}{4T}, \text{ kai } \dots b_Q(t) = -b_I(t) \\ f_- &= f_c - \frac{1}{4T}, \text{ kai } \dots b_Q(t) = b_I(t) \end{aligned} \quad (12)$$

Vadinasi, minimalioji manipuliacija yra kartu ir dvilygės dažnio manipuliacijos (DDM) forma. Dydis $h = T(f_+ - f_-)$ vadinamas deviacijos indeksu. Minimaliosios manipuliacijos atveju deviacijos indeksas yra $h = 1/2$. Tai reiškia, kad $f_+ - f_- = 1/2T$ (t.y. didesniojo ir mažesniojo dažnių skirtumas yra lygus pusei bito spartos). Taigi į simbolį turi tilpti puse didesniojo dažnio kosinusoidės daugiau, negu mažesniojo dažnio atveju. MM signalas yra konstruojamas iš keturių kosinusoidžių:

$$\begin{aligned} s_1(t) &= \sqrt{\frac{2E_b}{T}} \cos(2\pi f_1 t), \\ s_2(t) &= -\sqrt{\frac{2E_b}{T}} \cos(2\pi f_1 t), \\ s_3(t) &= \sqrt{\frac{2E_b}{T}} \cos(2\pi f_2 t), \\ s_4(t) &= -\sqrt{\frac{2E_b}{T}} \cos(2\pi f_2 t). \end{aligned} \quad (13)$$

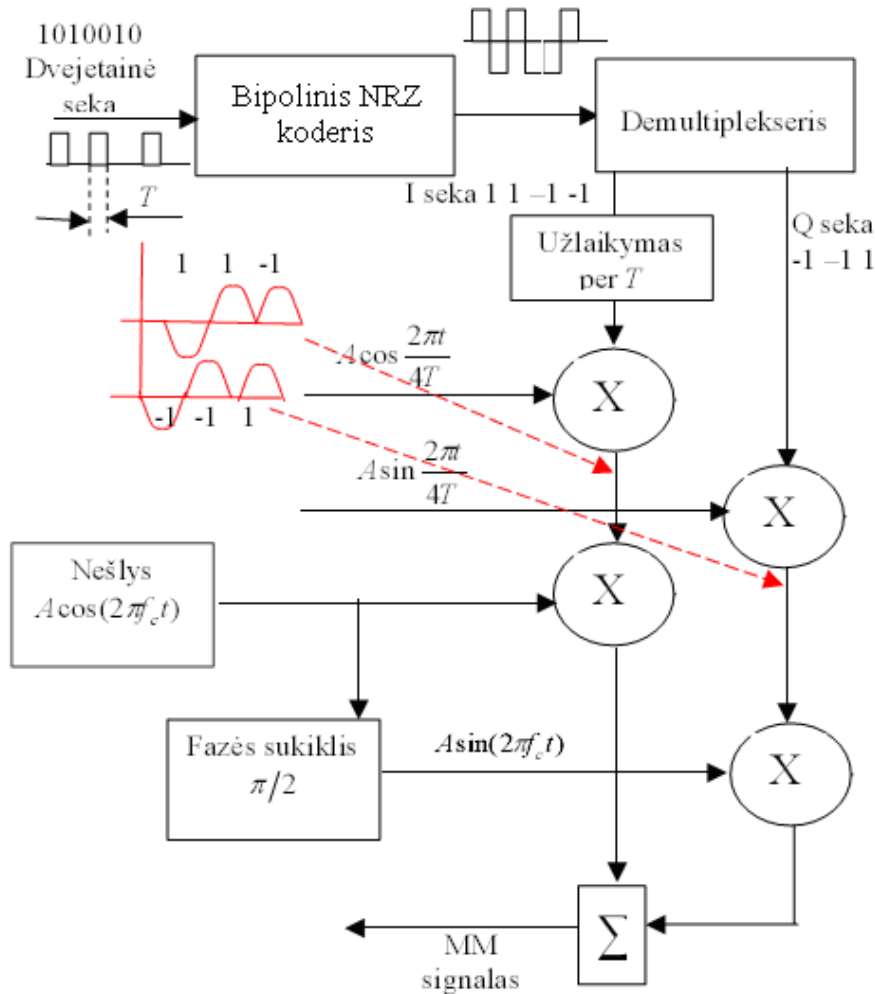
Dėliojant šias kosinusoides pagal tam tikras taisykles, pereinant nuo simbolio prie simbolio galima išlaikyti signalo tolydumą, t.y. pereinant nuo simbolio prie simbolio, nors signalo dažnis ir keičiasi, naujasis radioimpulsas prasideda toje pačioje kosinusoidės vietoje, kur baigiasi ankstesnysis. Tokia dažninės moduliacijos forma dažnai vadinama tolydžiosios fazės dažnio manipuliacija (TFDM *angl.* continuous- phase frequency shift keying– CPFSK).

Deviacijos indeksas $h = 1/2$ yra mažiausias, kuriam esant simboliai su momentiniais dažniais f_+ ir f_- gali būti ortogonalūs. Būtent iš čia kilęs minimaliosios manipuliacijos pavadinimas MM. Modulatoriaus išėjimo signalo momentinis dažnis keičiasi tik tuomet, kai kuri nors iš $Q(t)$ ar $I(t)$

impulsų sekų keičia savo poliarumą (žr. į 11 lygybę). Priminsime, kad šios sekos pastumtos laike per bito trukmę T . Vadinasi, dažnio bėgiojimo sparta yra lygi ne sekų I ir Q spartai $R_{I,Q} = 1/2T$, o formuojančio tas sekas signalo spartai, t.y. $R = 1/T$. Pagrindiniai MM skiriamieji bruožai yra trys:

- signalas yra pastovios gaubtinės,
- signalas tolydus tarpimbolinėse sandūrose,
- moduliacijos indekso vertė $h = 1/2$.

MM modulatoriaus struktūrinė schema yra pavaizduota 11 pav.



11 pav. MM signalo modulatorius.

Bipolinis NRZ koderis dvejetainę loginių būsenų seką paverčia dvipoliniu stačiakampių impulsų signalu, kur loginis „1” atitinka teigiamą impulsą (t.y. 1), o loginis „0” atitinka neigiamą impulsą (t.y. -1). Čia vieno impulso trukmė yra T ($T=T_b$). Demultiplekseris suformuoja dvi lygiagrečias I ir Q sekas, kurių impulsų trukmės yra dvigubai didesnės negu pradinio signalo. I seka užlaikoma per bito trukmę T . Q impulsų seka sudauginama su sinusiniu harmoniniu signalu, kurio dažnis yra keturis kartus mažesnis, negu informacinio signalo sparta. Kadangi I seka atsilieka nuo Q sekos per bito trukmę T , tai ji dauginama su kosinusiniu harmoniniu signalu. Gauname NC I ir Q signalus. Tada I NC impulsų seką dauginame iš aukšto dažnio nešlio, t.y. kosinuso funkcijos, o Q

NC impulsų seką sudauginame su pasuktu per $\pi/2$ aukšto dažnio nešliu, t.y. sinuso funkcija. Šiuos signalus sudedame ir gauname MM signalą, kuris turi pastovią gaubtinę ir tolydžią fazę. Fazė keičiasi tiesiškai kas T laiko intervalą.

Norint apibrėžti klaidų spartą pirmiausia reikia apibrėžti signalo triukšmo santykį skaitmeninėse ryšių sistemose. S/N faktorių galime užrašyti taip:

$$\frac{S}{N} = \frac{S}{N_0 B} = \frac{S T_b}{N_0 B T_b} = \frac{E_B R}{N_0 B}; \quad (14)$$

čia: S ir N signalo ir triukšmo galios, B–kanalo juosta, N_0 –triukšmo spektrinis tankis, T_b –bito (simbolio) trukmė, $R = 1/T_b$ –signalo sparta ir $E_B = S T_b$ –bito (simbolio) trukmės signalo energija, kuri dažniausiai vadinama bito (simbolio) energija.

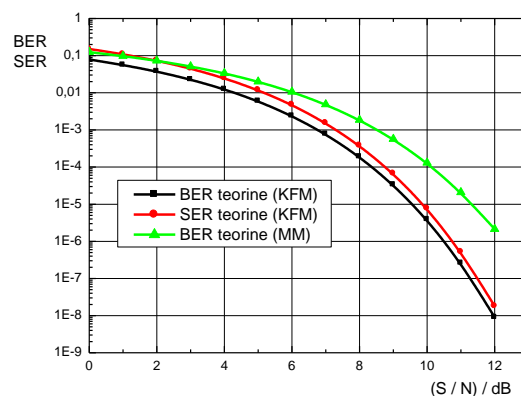
Demoduliuvus KFM signalą, esant adityviniam Gauso triukšmui, klaidų sparta (bitų klaidų sparta) yra išreiškiama taip:

$$p(e) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{E}{N_0}} \quad [\text{BER}] \quad (15)$$

M–lygių moduliacijų atvejais klaidoms apibūdinti dažnai naudojama simbolių klaidų sparta (*angl.* -symbol error rate-SER). Keturių manipuliacijos atveju, kai simbolis atitinka dibitą, simbolių klaidų sparta išreiškiama taip:

$$p_s(e)[\text{SER}] = 2p(e) - p^2(e). \quad (16)$$

Demoduliuvus MM signalą, esant adityviniam Gauso triukšmui, klaidų sparta (bitų klaidų sparta) yra išreiškiama ta pačia formule kaip ir KFM atveju.



12 pav. Teorinės KFM ir MM klaidų spartos priklausomybės nuo signalo/triukšmo santykio.

4. Matlab programinis paketas

MATLAB (iš žodžių MATrix LABoratory) yra daugiaplatformė firmos MathWorks programinė įranga, skirta įvairių mokslo šakų problemoms spręsti, ypač matematinėms. Susipažinti su MATLAB valdymo kalba bei jos taikymo ypatybėmis padeda komandos „intro“ ir „demo“, įvedamos ties ženklu „>“. Sistemos aplinkoje galima dirbti dviem režimais:

- dialoginiu, kai skaičiavimai atliekami iš karto, užrašius komandą arba išraišką Matlab komandiniame lange (Command Windows);
- programiniu, kai uždavinio sprendimo algoritmas užrašomas Matlab programavimo kalba ir saugomas M-faile (M-file).

Komandiniame lange įvedimo vietą žymi simbolis `>>`. Užrašius išraišką ir paspaudus „enter“ ekrane išvedamas rezultatas.

Pagrindinis MATLAB kalbos elementas yra matrica. Skaliamas užrašomas kaip 1x1 dydžio matrica. Atmintis matricai skiriama automatiškai, tad išmatavimų nurodyti nereikia. Matricos elementai vienas nuo kito atskiriami tarpais arba kableliais, o eilutės– kabliataškiais arba CR (Carriage Return). Vedami duomenys apgaubiami laužtiniais skliaustais.

Kabliataškis operatoriaus gale anuliuoja operatoriaus rezultato išvedimą į ekraną. Kintamųjų vardų pirmasis simbolis turi būti raidė, po kurios seka raidės arba skaičiai (iš viso iki 19 simbolių). MATLAB skiria didžiąsias ir mažąsias raides. Funkcijų vardai rašomi mažosiomis raidėmis, pvz. `inv(A)`.

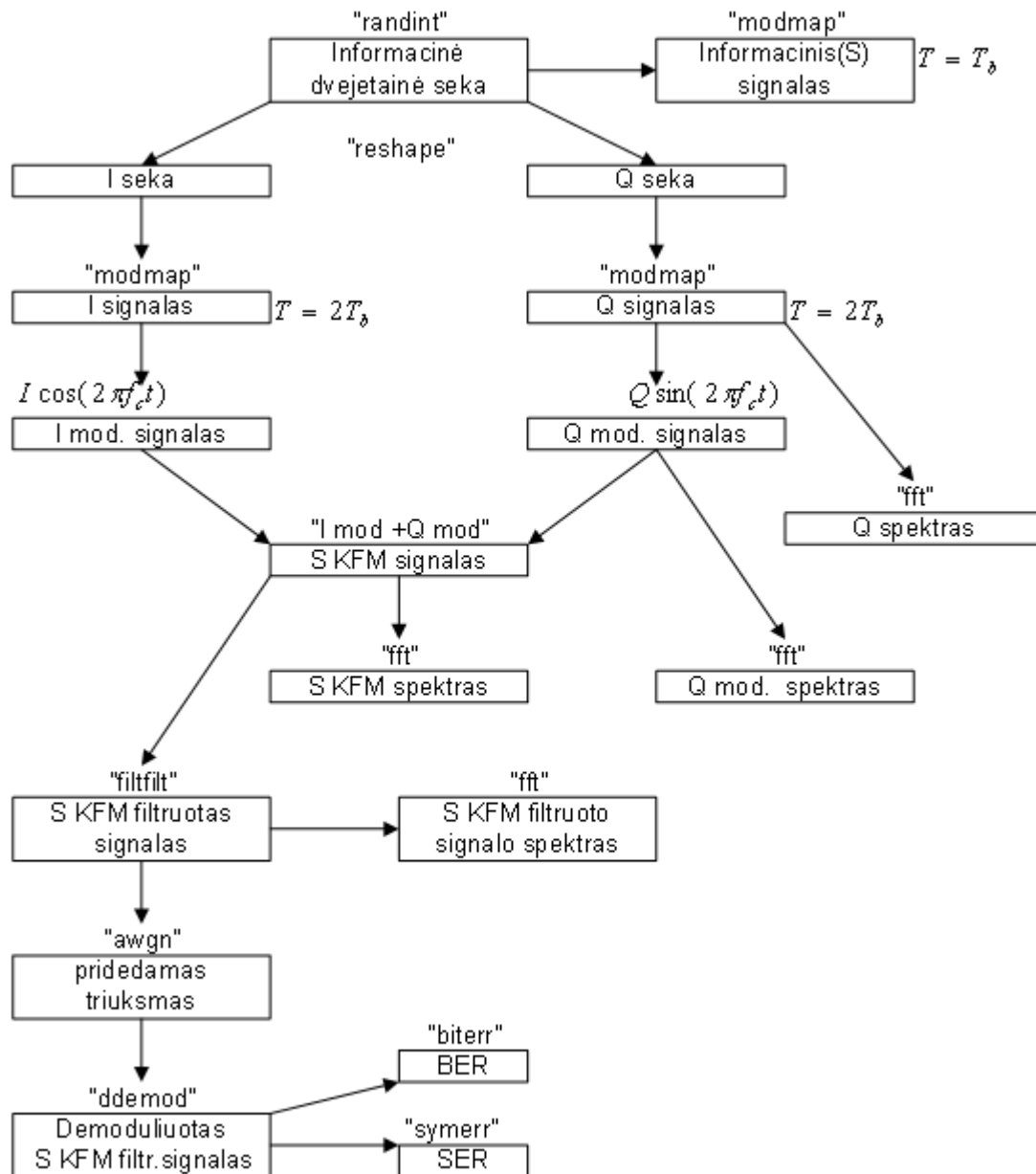
Aritmetinėse išraiškose naudojami šie aritmetinių operacijų ženklai: `+`, `-`, `*`, `/`, `\` (atvirkštinė dalyba), `^` (kėlimas laipsniu). Didžiausią prioritetą turi kėlimas laipsniu, po to daugyba ir dalyba, sudėtis ir atimtis. Vienodo prioriteto operacijos vykdomos iš kairės į dešinę. Norint pakeisti eiliškumą, naudojami skliaustai. Būtina apskliausti trupmenos skaitiklyje arba vardiklyje esančias išraiškas. Išraiškose galima naudoti vidines ir išorines funkcijas. Vidinės funkcijos saugomos Matlab bibliotekose, o išorinės (jas gali programuoti vartotojas) – M-failuose. Funkcijų argumentai rašomi skliausteliuose, pvz. `sin(x)`.

Matlab yra programavimo kalba, naudojama algoritmams koduoti. Operatorių seką galima surašyti į bylą ir vykdyti kaip vieną komandą. Programa saugoma tekstinėje byloje su prievardžiu „.m“, kuris sukuriamas „file menu“ komanda (New→M-file). M-failas gali būti tiek scenarijus (script), kuriame saugoma Matlab operatorių seka, tiek funkcija (function), priimanti argumentų reikšmes ir grąžinanti rezultatus.

Matlab kalboje yra du pagrindiniai skirtumai nuo kai kurių kitų algoritminių kalbų: nereikia aprašyti skaitinio tipo kintamųjų, masyvų ir matricų; nėra nukreipimo sakinio „goto“.

Informaciją apie esamas standartines funkcijas galima gauti komanda „help”. Pvz., užrašę „help dmod”, gausite informaciją, kaip naudoti funkciją „dmod”. „Help” be jokių argumentų išveda visų standartinių funkcijų sąrašą.

5. KFM signalo modeliavimas „Matlab“ paketu.

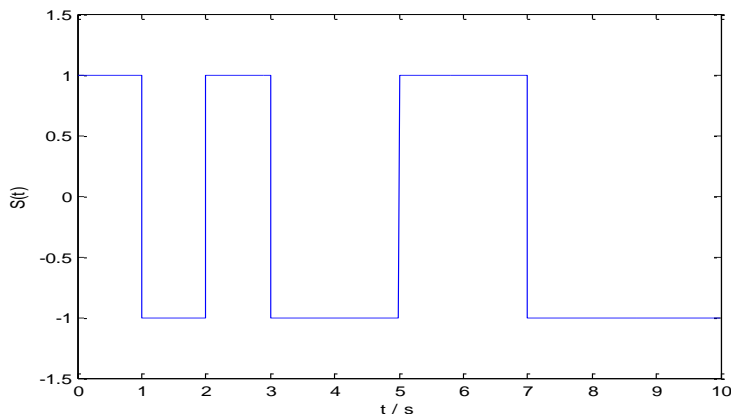


13 pav. „Matlab“ KFM modulatoriaus modelio struktūrinė schema.

KFM signalo modeliavimas „Matlab“ paketu vyksta pagal 13 pav. pateiktą KFM „Matlab“ modulatoriaus schemą. Visų pirma pasinaudojus „randint“ funkcija yra sukuriama vienos eilutes matrica, užpildyta atsitiktinėmis loginėmis būsenomis (0 arba 1), t.y. sukuriama informacinė loginių būsenų seka. Panaudojus „modmap“ funkciją ji yra paverčiama dvipoliniu stačiakampių impulsų

signalu, kur loginis „1” atitinka teigiamą impulsą (t.y. 1), o loginis „0” atitinka neigiamą impulsą (t.y. -1). Čia vieno impulso trukmė yra $T = T_b$ (T_b – bito trukmė). Šio signalo vaizdą galime pamatyti 14 pav., kai informacinė seka yra:

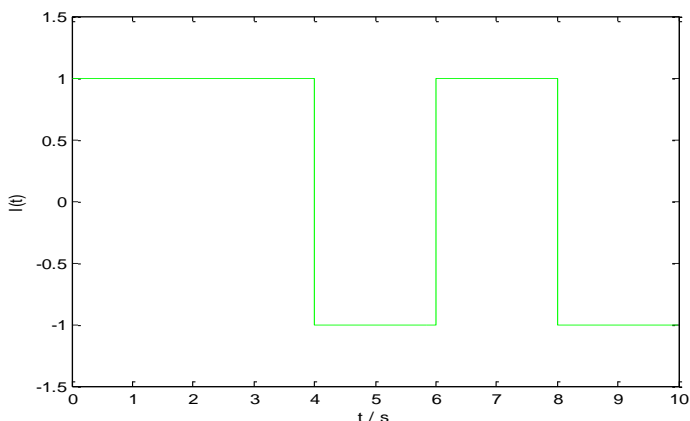
1,0,1,0,0,1,1,0,0,0; ($a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$);



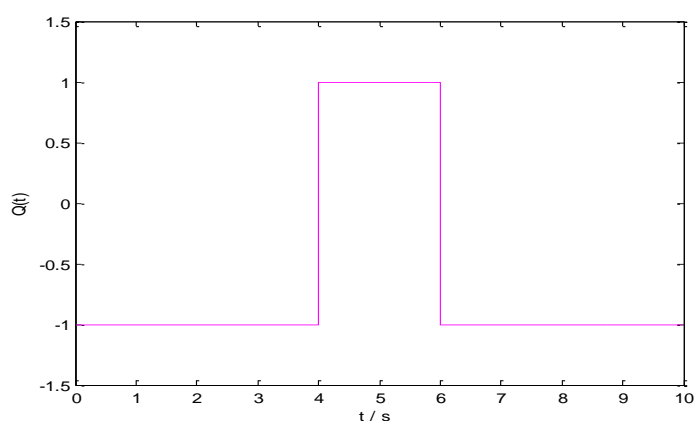
14 pav. Įeinantis informacinis signalas.

Pasitelkus „reshape“ funkciją, informacinė vienos eilutės matrica yra paverčiama dviejų eilučių matrica, kur pirmą eilutę atitinka lyginės informacinės sekos loginės būsenos (I seka), o antra eilutė – nelyginės (Q seka). Tada jos yra atvaizduojamos stačiakampiais impulsais panaudojus „modmap“ funkciją. Čia vieno impulso trukmė yra $T = 2T_b$, t.y. dvigubai didesnė negu informacinio signalo. I signalas yra pateiktas 15 pav., o Q signalas – 16 pav., kai I sekos elementai yra: 1, 1, 0, 1, 0; (a_0, a_2, a_4, a_6, a_8), o Q sekos elementai: 0, 0, 1, 0, 0; (a_1, a_3, a_5, a_7, a_9).

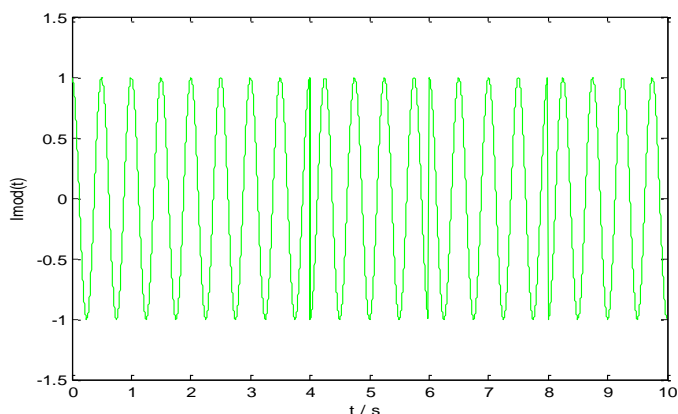
I stačiakampių impulsų signalą sudauginame su aukšto dažnio nešliu, t.y. kosinuso funkcija, kurios amplitudė kinta nuo -1 iki 1. Šis veiksmas yra tapatus kosinuso funkcijos fazės pastumimui į 0 arba į π . Q stačiakampių impulsų signalą sudauginame su pasuktu per $\pi/2$ aukšto dažnio nešliu, t.y. sinuso funkcija. I ir Q moduluoti signalai yra pateikti 17 ir 18 pav.



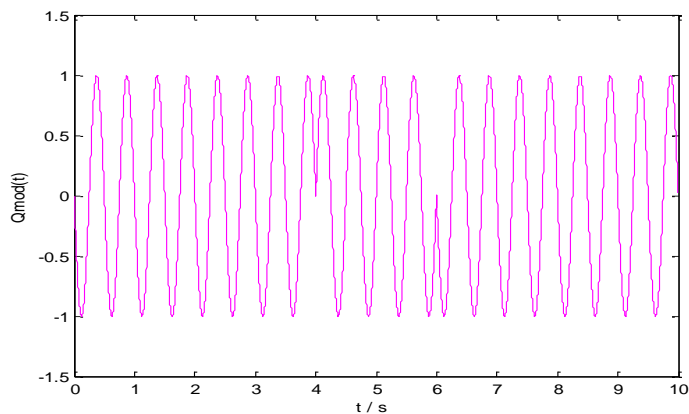
15 pav. I signalas.



16 pav. Q signalas.

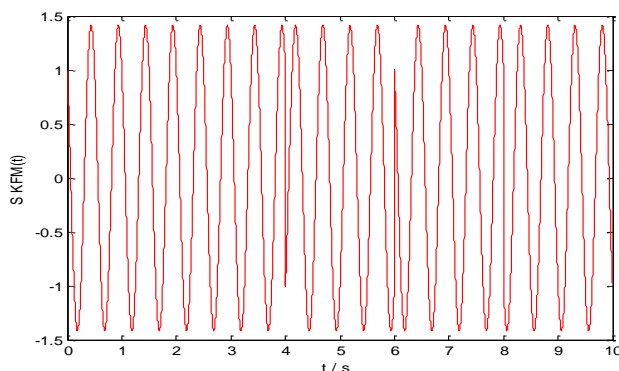


17 pav. Moduluotasis I signalas.



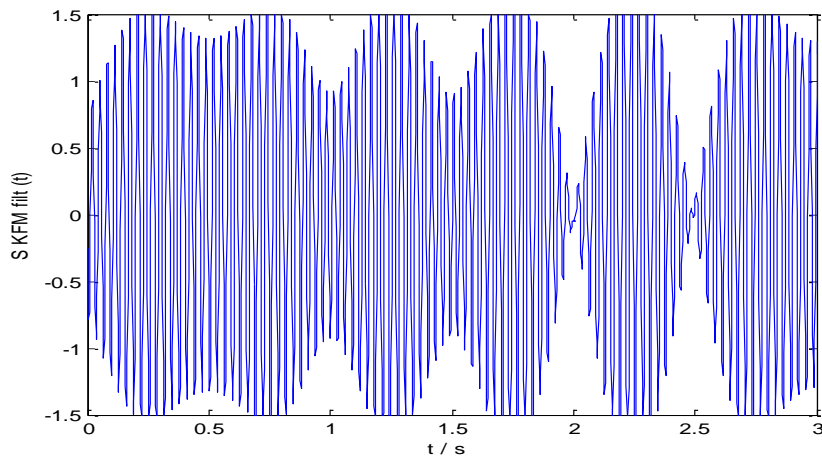
18 pav. Moduluotasis Q signalas.

Moduluotus I ir Q signalus sudedame ir gauname nepasuktosios KFM signalą. KFM signalo forma yra pateikta 19 pav.



19 pav. KFM signalas.

Naudojant „fft“ (greitoji Furje transformacija) funkciją yra atvaizduojami KFM, Q signalo bei moduluoto Q signalo galios spektriniai tankiai, kuriuos galima pamatyti paleidus programą. Panaudojus „filtfilt“ funkciją, KFM laikinis signalas yra nufiltruojamas Betervorto (butter) filtru. Nufiltruotas KFM signalas yra pateiktas 20 pav. Gautasis signalas jau nebeturi pastovios gaubtinės. Nešlio fazei keičiantis per π gaubtinė artėja prie nulio.

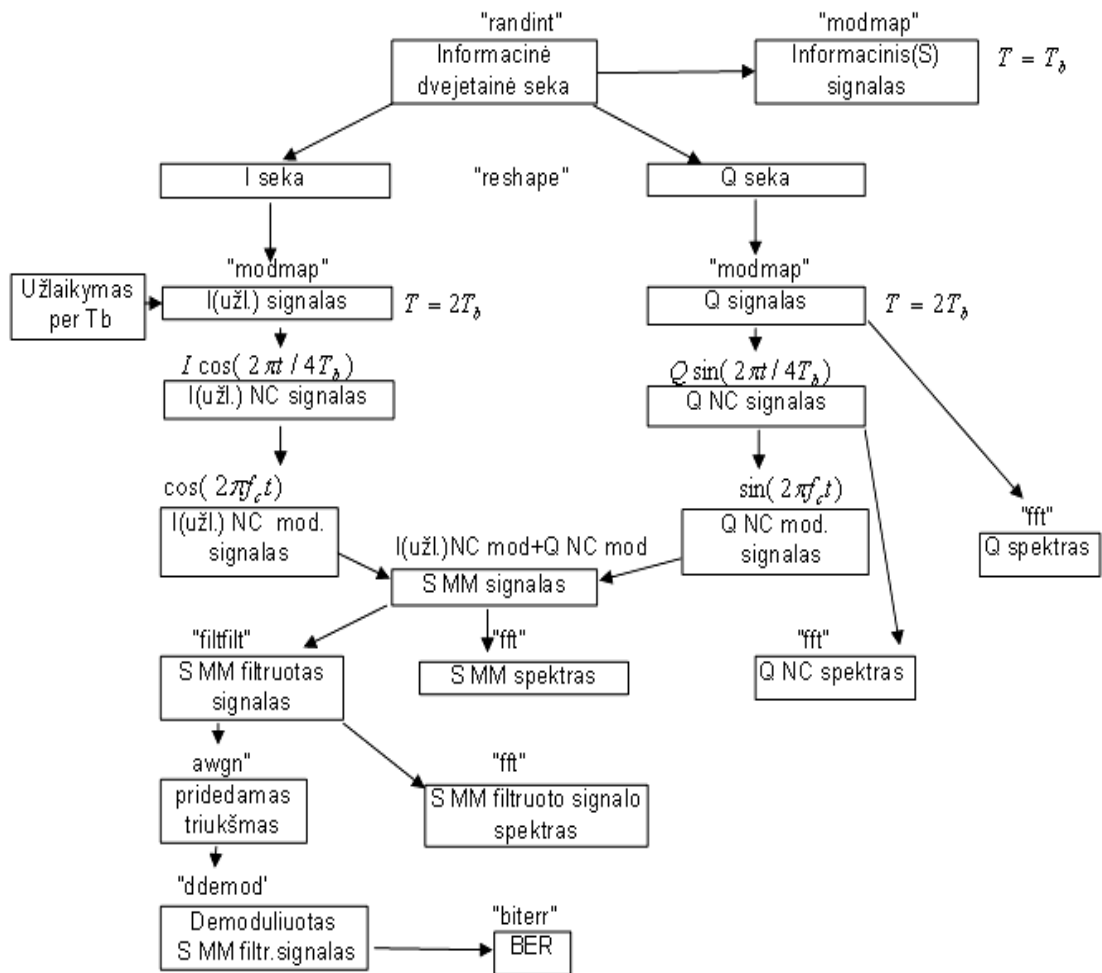


20 pav. Filtruotas KFM signalas.

Nufiltruoto signalo galios spektras yra atvaizduojamas panaudojus prieš tai aprašytą „fft“ funkciją. Tada prie nufiltruoto laikinio KFM signalo, panaudojus „awgn“ funkciją, yra pridedamas baltasis Gauso triukšmas, kuris modeliuoja triukšmą kanale. Signalo–triukšmo santykį dB galima keisti pačioje programoje. Suminis signalas, panaudojant „ddemod“ funkciją, yra demoduliuojamas keturlygiu kvadratūriniu demoduliatoriumi ir yra apskaičiuojamos bitų bei simbolių klaidų spartos, kurias „Matlab“ programiniame pakete atitinka „biterr“ bei „symerr“ funkcijos.

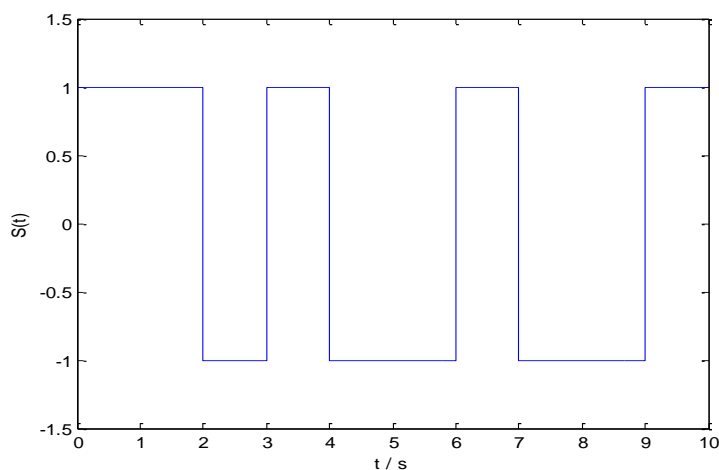
6. MM signalo modeliavimas „Matlab“ paketu.

MM signalo modeliavimas „Matlab“ paketu vyksta pagal 21 pav. pateiktą MM „Matlab“ modulatoriaus schemą. Kaip ir KFM modulatoriaus atveju, naudojant „randint“ funkciją yra sukuriama vienos eilutės matrica, užpildyta atsitiktinėmis loginėmis būsenomis (0 arba 1), t.y. sukuriama informacinė loginių būsenų seka. Panaudojus „modmap“ funkciją ji yra paverčiama dvipoliniu stačiakampių impulsų signalu, kur loginis „1“ atitinka teigiamą impulsą (t.y. 1), o loginis „0“ atitinka neigiamą impulsą (t.y. -1). Čia vieno impulso trukmė yra $T = T_b$ (T_b – bito trukmė).



21 pav. Matlab MM modulatoriaus modelio struktūrinė schema.

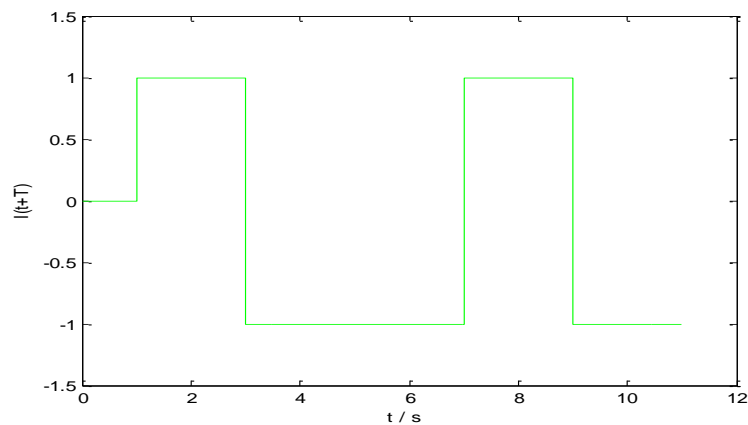
Šio signalo vaizdą galime pamatyti 22 pav., kai informacinė seka yra: 1,1,0,1,0,0,1,0,0,1; ($a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9$).



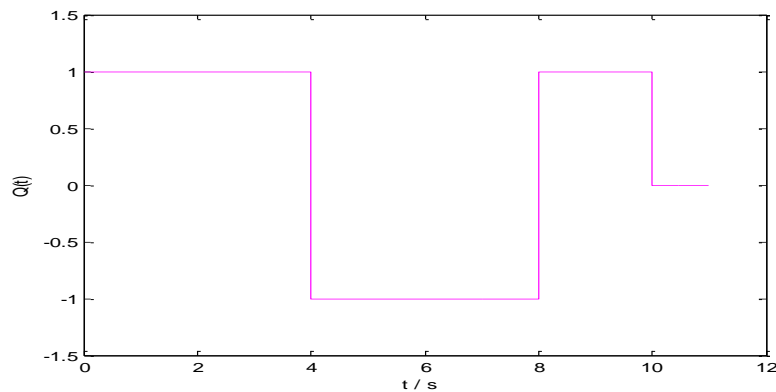
22 pav. Įeinantis informacinis signalas.

Pasitelkę „reshape“ funkciją informacinė vienos eilutės matrica yra paverčiama dviejų eilučių matrica, kur pirmą eilutę atitinka lyginės informacinės sekos logines būsenas (I seka), o

antra eilutė–nelygines (Q seka). Tada naudojant „modmap“ funkciją jos yra verčiamos stačiakampiais impulsais, kai vieno impulso trukmė yra $T = 2T_b$, t.y. dvigubai didesnė negu informacinio signalo. Po šio veiksmo prie I signalo pradžios yra pridėdama nulinė matrica, kurios ilgis atitinka vieno bito trukmę. Taip yra gaunamas I signalo užlaikymas per T_b trukmę. Prie Q signalo pabaigos pridėdame tokio pat ilgio kaip ir I signalui nulinę matricą tam, kad abu signalai (I ir Q) būtų vienodo ilgio. Tai būtina sąlyga atliekant tolimesnius veiksmus. I užlaikytasis signalas yra pateiktas 23 pav., o Q signalas 24 pav., kai I sekos elementai yra: 1, 0, 0, 1, 0; (a_0, a_2, a_4, a_6, a_8), o Q sekos elementai: 1, 1, 0, 0, 1; (a_1, a_3, a_5, a_7, a_9).

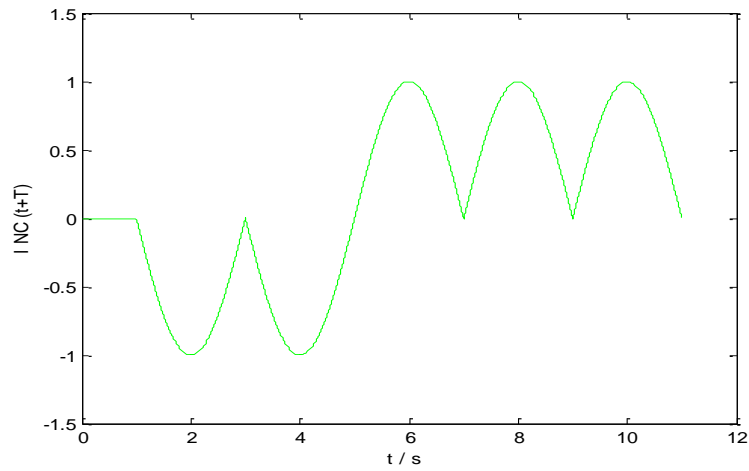


23 pav. I užlaikytasis signalas.

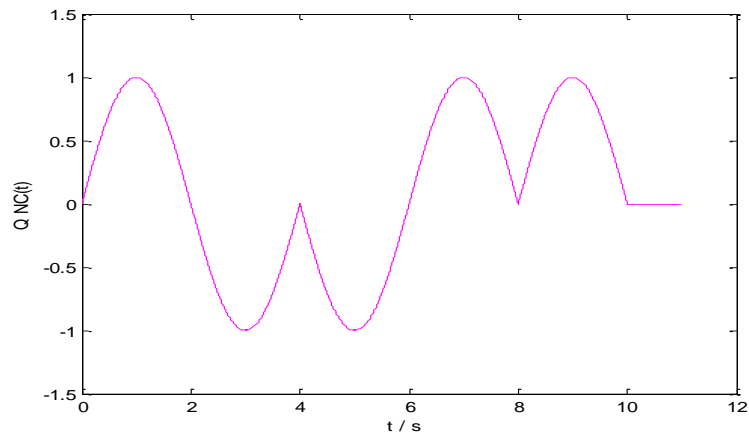


24 pav. Q signalas.

Q signalas dauginamas iš sinusinio harmoninio signalo, kurio dažnis yra keturis kartus mažesnis negu informacinio signalo sparta. Šitaip sudauginus, Q dvipolinis stačiakampių impulsų signalas pakeičiamas atitinkamai NC (nupjautos kosinusoidės) impulsų signalu, kur kas antras NC impulsas turi priešingą ženklą, negu jo originalas. I signalas atsilieka nuo Q signalo per bito trukmę T_b . Jis dauginamas iš kosinusinio harmoninio signalo, kurio dažnis taip pat keturis kartus mažesnis už informacinio signalo dažnį, kadangi postūmis laike per T_b yra ekvivalentus harmoninio signalo fazės postūmiui per $\pi/2$. I užlaikytasis NC bei Q NC signalai yra pateikti 25 ir 26 pav.

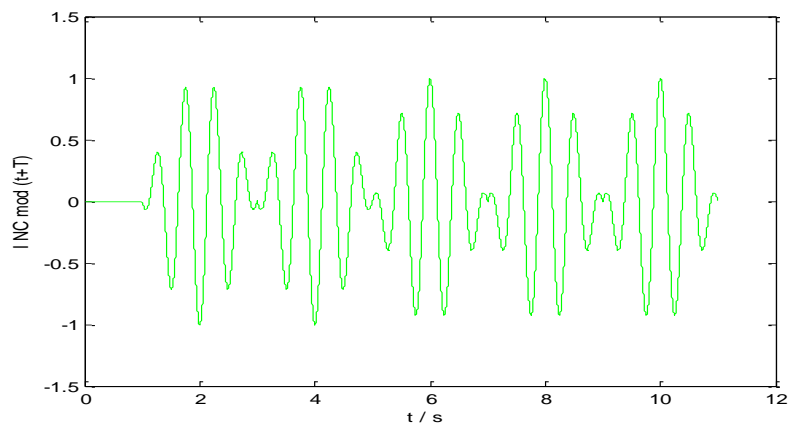


25 pav. I užlaikytasis NC signalas.

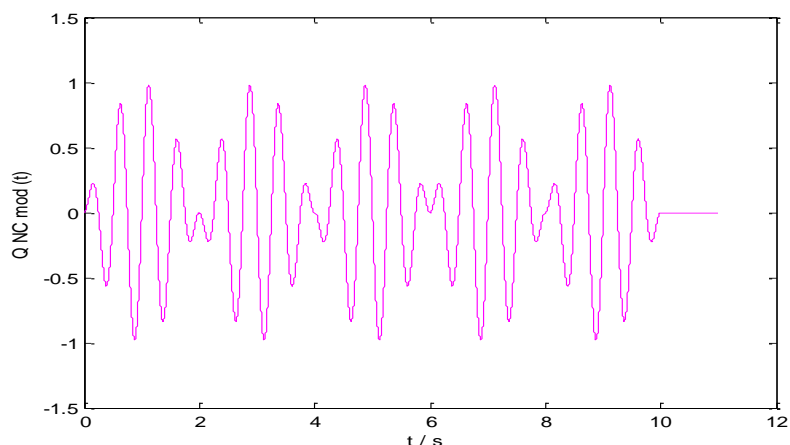


26 pav. Q NC signalas.

I užlaikytąjį NC signalą sudauginame su aukšto dažnio nešliu, t.y. kosinuso funkcija. Q NC signalą sudauginame su pasuktu per $\pi/2$ aukšto dažnio nešliu, t.y. sinuso funkcija. Taip yra atliekama šių signalų moduliacija. Jų vaizdai yra pateikti 27 ir 28 pav.

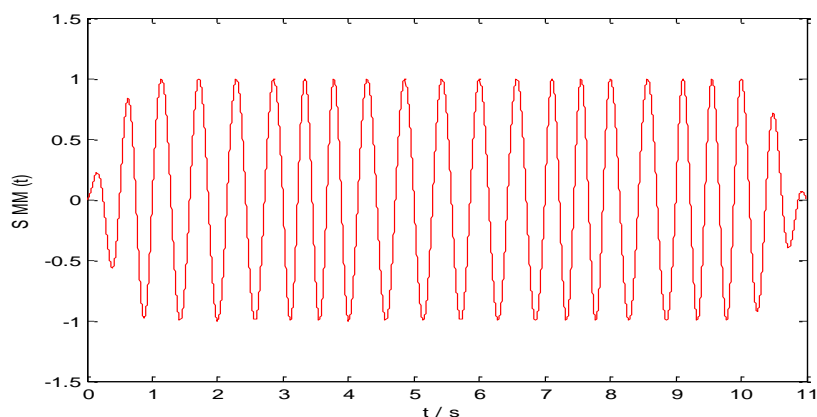


27 pav. Aukšto dažnio I signalas.



28 pav. Aukšto dažnio Q signalas.

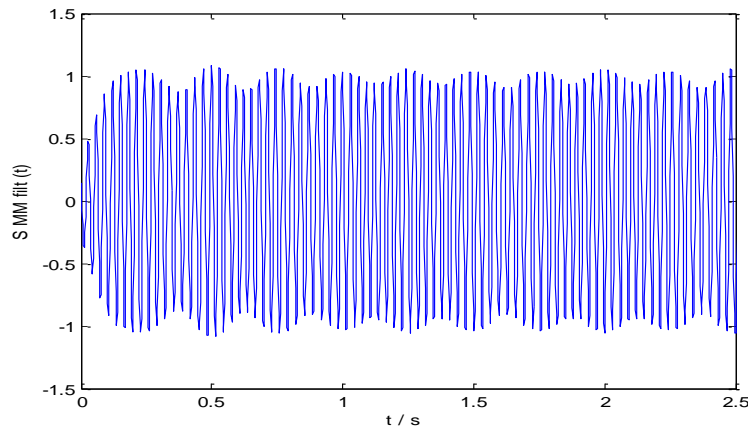
Sudėję aukšto dažnio I ir Q signalus gauname MM (minimaliosios manipuliacijos) signalą. Šio signalo vaizdas yra pateiktas 29 pav. Matome, kad MM signalas yra pastovios gaubtinės ir jo fazė yra tolydi.



29 pav. MM signalas.

Naudojant „fft“ (greitoji Furje transformacija) funkciją yra atvaizduojami MM, Q stačiakampių impulsų, bei Q NC impulsų signalų galios spektriniai tankiai, prieš tai atėmus nulines matricas, kurios buvo pridėtos programos pradžioje. Taip yra daroma tam, kad nulinis lygis neįtakotų spektrų. Panaudojus „filtfilt“ funkciją, MM laikinis signalas yra nufiltruojamas Betervorto (butter) filtru. Nufiltruotas MM signalas yra pateiktas 30 pav. Matome, kad gautojo signalo gaubtinė yra daugmaž pastovi. Taip yra dėl to, kad MM yra gaunama iš nupjautų kosinusoidžių signalų, kurios spektras maksimaliai sukauptas pagrindiniame pliūpsnyje, o šoniniai pliūpsniai yra gana maži. Taigi, filtruojant MM signalą, mažai keičiasi signalo amplitudė simbolių keitimosi akimirkomis.

Nufiltruoto signalo galios spektras yra atvaizduojamas panaudojus prieš tai aprašytą „fft“ funkciją. Prie nufiltruoto laikinio MM signalo, panaudojus „awgn“ funkciją, yra pridamas baltasis Gauso triukšmas, kuris modeliuoja ryšio sistemos triukšmą kanale. Signalo–triukšmo santykį dB pasirinktinai galima keisti pačioje programoje. Tada toks signalas, panaudojant „ddemod“ f-ją, yra



30 pav. Filtruotasis MM signalas.

demoduliuojamas dažniniu „msk“ demoduliatoriumi ir pasitelkus „biterr“ funkciją yra apskaičiuojama bitų klaidų sparta.

7. Metodiniai nurodymai

Nukopijuokite failus KFM.m ir MM.m į savo susikurtą sektuvą. Atsidarykite KFM arba MM m-failą. Įveskite pagrindinius parametrus, kuriais valdoma programa:

N – informacinio signalo loginių bitų skaičius. Šį skaičių reikia parinkti $N=2^n$, kai $n=1,2,3,\dots$

Fd – parametras apibrėžia bitų spartą;

Fs – diskretizavimo dažnis;

Fc – nešlio dažnis;

filt.eil – Betervorto filtro eilė (2 – 20);

filt_dazn_juost – Betervorto filtro dažnių juosta (Fd eilės t.y. artima bitų spartai);

snr – signalo/triukšmo santykis, kurio skaitinės vertės atitinka dB.

Dažnių vertės atitinka hercus. Turi būti išpildyti reikalavimai: $(F_s > F_c > F_d/2)$ ir F_s/F_d santykis turi būti teigiamas sveikas skaičius. Filtravimui pasirenkamas Betervorto (Butterworth) filtras.

Matuojant MM bei KFM klaidų spartas abiem atvejais tikslingiau būtų parinkti tuos pačius užduodamus parametrus (išskyrus filtro dažnių juostą) tam, kad gautas priklausomybes būtų galima palyginti. Be to, užduodamas bitų skaičius N turėtų būti bent jau 10^4 eilės, kad gautūsi tikslesni matavimai ir nubrėžtas priklausomybes būtų galima lyginti su teorinėmis.

Atidarykite „Matlab“ programą. Savo susikurtą segtuvą Matlab'o darbams perkeltkite į „current directory“. „Matlab“ komandų lange surinkus komandą „KFM“ arba „MM“ modelis pradeda veikti.

8. Literatūra

- 1. Kežionis A. Radijo sąsaja šiuolaikinėse telekomunikacijų sistemose. Vilnius, 2008.**
2. A.B. Sergienko. Cifrovaja obrabotka signalov. Piter,2002.
3. A. D. Poularikas. Signals and systems primer with MATLAB (2007, CRC Pres) ISBN 978-0-8493-7267-4.