

4. gyakorlat: Analóg modulációs eljárások

O.4.1. Kétoldalsávós AM jel előállítás és demodulációja

Az ideális (torzítatlan) kétoldalsávós amplitúdómodulált (AM-DSB) jel időfüggvénye

$$s(t) = (U + x(t)) \cdot \cos(2\pi Ft + \phi) \quad (*)$$

alakú, ahol $x(t)$, $t \in (-\infty, \infty)$ az átmásolandó, ún. moduláló jel. (Vizsgálatainkban ezt a moduláló jelet vagy véges energiájú, vagy zérus egyenszintű, stacionárius jellel modellezzük.) Az $s(\cdot)$ modulált jelnek láthatóan két komponense van: az U amplitúdójú, F frekvenciájú, ϕ fázisú vivő, továbbá a modulációs tartalmat hordozó

$$s(t) = x(t) \cdot \cos(2\pi Ft + \phi),$$

amelyet a diszkrét vivőfrekvenciás összetevő hiányára utalva elnyomott vivőjű (Supressed Carrier) AM-DSB jelnek nevezünk. Az elnyomott vivőjű jel(összetevő) spektruma

$$S(f) = \frac{1}{2} \cdot e^{j\phi} \cdot X(f - F) + \frac{1}{2} \cdot e^{-j\phi} \cdot X(f + F) \quad (**)$$

Látható, ha az F vivőfrekvencia nagyobb, mint a moduláló jel B sávszélessége, akkor a moduláló jel összetevőinek egy-egy másolata a vivő bal és jobboldalán egyaránt megjelenik, ez indokolja a kétoldalsávós jelzöt. Leszögezhető továbbá, hogy a moduláló jel szorzása a szinuszos vivővel egy olyan (lineáris, de nem eltolásinvariáns) transzformáció, amely a frekvenciatartományban a jel spektrumának a (**)-szerinti átalakítását (eltolás jobbra és balra, majd összegzés) jelenti. Ez a felismerés az alapja a modulációs tartalom visszaállítására szolgáló (demodulációs) eljárásnak: a vivőfrekvenciás jellel történő ismételt szorzás hatására a moduláló jel összetevői visszatolódnak eredeti helyzetükbe. Keletkeznek egyéb jelösszetevők is, de ezek (ha $F > B$), szűrővel eltávolíthatóak. A beavatkozás hatása az időfüggvényen:

$$2 \cdot s(t) \cdot \cos(2\pi Ft + \psi) = x(t) \cdot \cos(\psi - \phi) + x(t) \cdot \cos(2\pi \cdot 2F \cdot t + \psi + \phi)$$

illetve a frekvenciatartományi képfüggvényen:

$$e^{j\psi} \cdot S(f - F) + e^{-j\psi} \cdot S(f + F) = \frac{1}{2} \cdot e^{j(\psi + \phi)} \cdot X(f - 2F) + \frac{1}{2} \cdot e^{j(\psi - \phi)} \cdot X(f + F - F) + \\ \frac{1}{2} \cdot e^{-j(\psi - \phi)} \cdot X(f - F + F) + \frac{1}{2} \cdot e^{-j(\psi + \phi)} \cdot X(f + 2F)$$

A módszer érzékeny a demoduláló vivő fázisára, tökéletes eredmény csak akkor várható, ha a demoduláló vivő fázisa igazodik a vett jel vivőjéhez (amely diszkrét komponens formájában nincs is feltétlenül jelen). Ha $\psi = \phi$, akkor a demodulált jel megegyezik a moduláló jellel, ha azonban $\psi = \phi - \pi/2$, akkor a demodulált jel azonosan zérus. Ez módot ad rá, hogy ugyanabban a frekvenciasávban egyidejűleg két független jel továbbítását valósítsuk meg. A modulált vivők egyikének fázisa legyen ui. ϕ , másikának fázisa pedig $\phi - \pi/2$. A két modulált jel összege az egyes modulált jelek sávjával azonos frekvenciasávot foglal el. Két demodulátort használunk, egyikük $\psi = \phi$, másikuk $\psi = \phi - \pi/2$ fázisú vivővel dolgozik. Az eljárást QAM-nek, kvadratúra-amplitúdómodulációnak nevezik.

Ahhoz, hogy a demodulált jel torzítatlan legyen, az ekvivalens alapsávi rendszernek kell – késleltetéstől eltekintve – konstans, frekvenciafüggetlen átvitelt

biztosítania. Ez a feltétel akár úgy is teljesíthető, ha a modulált jelre ható szűrő az egyik oldalsávot teljesen elnyomja. A nemkívánt oldalsáv elnyomásáról sáv szélességsökkentés céljából rendszerint az adóban gondoskodnak, a keletkezett jelet egyoldalsávós (SSB, árnyaltabban USB vagy LSB) jelnek nevezik. Előfordul, hogy az egyik oldalsávot csaknem torzítatlanul, a másikat csonkán viszik át, de úgy, hogy az ekvivalens rendszer frekvenciafüggetlen (VSB, analóg TV műsorszórás).

O.4.2. Demoduláció burkoló detektorral

Az a csúcseyenirányító, amelyben az RC tag időállandóját megfelelően választjuk meg, a modulált jel lokális maximumaira támaszkodva tkp. a jel amplitúdóját, pontosabban annak abszolút értékét állítja elő. (*) alakú modulált jelet feltételezve így a demodulátor kimenetén $\hat{x}(t) = |U + x(t)|$ jelenik meg. Ez általában nem azonos a $U + x(t)$ „amplitúdó” időfüggvényével, kivéve, ha az a megfigyelt időszakban nem vált előjelet, azaz, ha

$$U > |x(t)|, \quad \forall t \in (-\infty, \infty).$$

Ha e feltételt nem tartjuk be, akkor az „amplitúdó” előjelváltásainak hiánya miatt durva torzítás keletkezik, ilyenkor beszélünk „túlmodulációról”.

Szokás – különösen szinuszos jelekre vonatkoztatva – a moduláció mélységéről beszélni. Modulációs indexnek az

$$m = \max |x(t)|/U = X/U$$

arányt szokták nevezni. Ez az arány jellemző egyébként arra is, milyen hányadot képviselnek a „hasznos” oldalsávok a modulált jel teljesítményében. Ha c a moduláló jel csúcstényezője, akkor

$$\frac{\text{hasznos}}{\text{összes}} = \frac{X^2/c^2}{U^2 + X^2/c^2} = \frac{m^2}{c^2 + m^2}.$$

O.4.3. Szögmodulált jelek előállítás és demodulációja

A szögmodulált jelek alaptípusának azt a szinuszosnak tűnő jelet nevezzük, amelynek állandó az amplitúdója, a fázisában pedig van egy additív összetevő (a modulációs tartalom), amely az $x(t)$, $t \in (-\infty, \infty)$ moduláló jel valamilyen invertálható lineáris transzformáltja: $s(t) = U \cdot \cos(2\pi Ft + m(t) + \phi)$

Ha a modulációs tartalom lassan változik (F -hez képest), akkor ez a jel szakaszonként szinuszos arculatot mutat, csak a szinuszos jel frekvenciája szakaszonként más és más értékű. Ebben az értelemben lehet arról beszélni, hogy a szögmodulált jel frekvenciája időfüggő, s pillanatnyi frekvenciája:

$$f_p = F + \frac{1}{2\pi} \cdot m'(t).$$

A modulációs tartalom és a moduláló jel közötti legegyszerűbb kapcsolat az arányosság, ekkor fázismodulációról beszélünk. Másik jellegzetes helyzet, amikor a modulációs tartalom deriváltja arányos a moduláló jellel, ez a frekvenciamoduláció. Bármilyen is ez a kapcsolat, a moduláció mélységét, azt, hogy milyen mértékű változást okoz a moduláció ténye a vivőfrekvenciás jelen, kétféleképpen is jellemezni lehet. A két jellemző a fázis és a frekvencialöklet. Értelmezésük rendre:

$$\Phi_D = \max_t(|m(t)|) \quad \text{és} \quad f_D = \frac{1}{2\pi} \cdot \max_t(|m'(t)|)$$

(A visszanyerhető modulációs tartalom egy additív konstans erejéig határozatlan, ezért megköveteljük, hogy zérus átlagértékű legyen. Így a fázislököt fenti értelmezése egyértelmű.) Vannak esetek, amikor a jellemzésre nem az időfüggvények maximumát, hanem az effektív értékét használjuk.

Jellemzően frekvenciamodulált jelet állít elő az az oszcillátor, amelynek a rezgési frekvenciáját a moduláló jellel közel arányosan változtatjuk, pl. egy dióda zárófeszültségét – s így kapacitását – vezérelve.

A szögmodulált jel kvadratúramodulált alakban is felírható:

$$s(t) = U \cdot \cos(m(t)) \cdot \cos(2\pi Ft + \phi) - U \cdot \sin(m(t)) \cdot \sin(2\pi Ft + \phi)$$

Ennek a jelnek nyilván az F vivőfrekvencia környezetében vannak a spektrális komponensei. Az elfoglalt sáv szélességét a modulációs tartalom szinuszos, illetve koszinuszos, ám egyaránt nemlineáris függvényeinek a sávszélessége szabja meg. Érzékelhető, hogy ez a sávszélesség a modulációs tartalom sávszélességétől és – ami meglepőbb – nagyságától, a fázislöketektől függ. Ha például a fázislököt kicsi (0.1 nagyságrendű), akkor $\cos(m(t)) \cong 1$ és $\sin(m(t)) \cong m(t)$ minden időpillanatban, és így

$$s(t) \cong U \cdot \cos(2\pi Ft + \phi) - U \cdot m(t) \cdot \sin(2\pi Ft + \phi).$$

Ilyenkor tehát a szögmodulált jel sávszélessége azonos a kétoldalsávós AM jel sávszélességével, sőt, a szögmodulált jel előállítható egy AM-DSB/SC jelből, csak a modulálatlan kvadratúravivő megfelelő szintű hozzáadásáról kell gondoskodni.

Ha a modulált jel fázislökete nem kicsi, akkor a helyzet lényegesen bonyolultabb, s a sávszélesség legalább a fázislökettel arányosan nő. Gyakran használható a sávszélesség becslésére a frekvencialököt: abban a sávban, amelyben a modulált jel pillanatnyi frekvenciája bolyong, mindenképpen vannak a jelnek spektrális komponensei, tehát a jel sávszélessége mindenképpen nagyobb, mint $2f_D$. Ha a moduláló jel sávszélessége B , akkor a bemutatott alap gondolatok segítségével az elfoglalt sáv szélességére egyszerű becslések adhatók:

$$B_v \cong 2B \cdot (1 + \Phi_D) \quad \text{illetve} \quad B_v \cong 2 \cdot (f_D + B)$$

Hogyan lehet folyamatosan mérni a szögmodulált jel fázisát – ez valójában a demoduláció módszere. Manapság a legelterjedtebb megoldás a fázistolós szorzó alkalmazása (P.6.3. példa), a legszemléletesebb viszont a hagyományos frekvenciadiszkriminátor. Tekintsük ui. az állandó amplitúdójú, ingadozó frekvenciájú szinuszos jelet, s vezessük egy olyan lineáris hálózatra, szűrőre, amelynek az amplitúdókarakterisztikája a vivő környékén a frekvenciával arányosan változik! Ha helytálló az a kép, hogy a modulált jel időről-időre ugyanúgy viselkedik, mint a pillanatnyi frekvenciájának megfelelő frekvenciájú valódi szinuszos jel, akkor várható, hogy a szűrő kimenő jelének amplitúdója a pillanatnyi frekvenciával arányosan fog változni. Noha ez a kép szemléletes, tulajdonképpen meglepő, hogy tökéletesen pontos is. Legyen ugyanis a szűrés a deriválás (amplitúdókarakterisztikája valóban arányos a frekvenciával, hiszen átviteli függvénye $j2\pi f$), ekkor a derivált jel:

$$s'(t) = -U \cdot (2\pi F + m'(t)) \cdot \sin(2\pi Ft + m(t) + \phi)$$

Ennek a jelnek a burkolója valóban arányos a pillanatnyi frekvenciával, s így a modulációs tartalom deriváltjával is. Ez a demodulációs módszer – kifinomult formában a deriválást rezgőkörök valósítják meg – frekvenciamodulált rendszerekben közvetlenül a moduláló jelet szolgáltatja, fázismodulált adásnál a kapott jelet még integrálni kell.

P.4.1. AM-DSB jelek összetevői, jelformái

Szinuszos moduláló jelet feltételezve írjuk és rajzoljuk fel egy 50 és egy 150 százalékosan kimodulált kétoldalsávú AM jel időfüggvényét! Adjuk meg mindkét esetben képletben és rajzban is, milyen jel keletkezik, ha a demodulációt burkoló detektorra bizzuk! Számítsuk ki mindkét esetre az oldalsávokban megjelenő jelösszetevők és a teljes modulált jel teljesítményének arányát! Mi változik, ha a szinuszos moduláló jel helyett szimmetrikus háromszögjelet alkalmazunk? Vegyük számba, ábrázoljuk a modulált jel spektrális összetevőit!

Megoldás:

A szinuszos moduláló jelnél:

$$s(t) = (U + A \cdot \cos(2\pi f_m t + \alpha)) \cdot \cos(2\pi F t + \phi)$$

ami a szokásos trigonometrikus átalakítások után:

$$s(t) = U \cdot \cos(2\pi F t + \phi) + \frac{1}{2} A \cdot \cos(2\pi(F - f_m)t + \phi - \alpha) + \frac{1}{2} A \cdot \cos(2\pi(F + f_m)t + \phi + \alpha)$$

alakú lesz. A modulált jel spektrális összetevői innen visszaolvashatóak.

A modulált jel teljesítménye:

$$P_{\text{összes}} = \frac{1}{2} U^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{A}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{A}{2}\right)^2$$

Az oldalsávok összteljesítménye ebből a második és a harmadik tag összege, a teljesítmények aránya pedig:

$$\frac{P_{\text{hasznos}}}{P_{\text{összes}}} = \frac{\left[\frac{1}{2} \left(\frac{A}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{A}{2}\right)^2\right]}{\left[\frac{1}{2} U^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{A}{2}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{A}{2}\right)^2\right]} = \frac{\left[\frac{A^2}{4}\right]}{\left[\frac{1}{2} U^2 + \frac{A^2}{4}\right]} = \frac{m^2}{2 + m^2}$$

Persze ez közvetlenül is adódott volna, hiszen a szinuszos jel csúcstényezője $\sqrt{2}$.

Érdeemes megfigyelni, milyen rossz is a "hatásfok" az 50 százalékos modulációs indexnél (mindössze kb. 11 százalék), s a túlmodulált esetben is csak alig több 50 százaléknál.

Háromszögjelnél több jelösszetevő van, ezek az alapharmonikus páratlan felharmonikusai. A modulált jel összetevőinek frekvenciái $F \pm (2k+1)f_m$ alakúak. A háromszögjel csúcstényezője $\sqrt{3}$, ezért a "hatásfok" csak kb. 8 százalék (illetve 43).

P.4.2. AM jel vizsgálata

Egy AM modulátor kimenő jele:

$$s_{AM}(t) = 3\cos(1800\pi t) + 10\cos(2000\pi t) + 3\cos(2200\pi t).$$

Határozza meg

- az AM moduláció típusát,
- az $s_m(t)$ moduláló jelet,
- az f_v vivőfrekvenciát,
- $s_{AM}(t)$ maximális és minimális értékét,
- a modulációs mélységet,
- a vivőfrekvenciás komponensben és az oldalsávokban lévő teljesítmények arányát!

Megoldás:

Attól függően, mekkora a vivőfrekvencia, mindenféle modulációs eljárás elképzelhető, persze mind eltérő moduláló jelekkel. A feladat e) kérdése arra utal, hogy kétoldalsávú jelről lehet szó, hiszen a modulációs mélységet csak ilyen jelekre értelmeztük. Ha tudjuk (vagy feltételezzük), hogy a moduláló jelnek egyetlen szinuszos komponense van (ez tűnik a legegyszerűbb helyzetnek), akkor az 1000 egységnyi vivőfrekvencia mellett azonosítható a két oldalsávi összetevő, 100-100 egységnyire a vivőtől. Amplitúdójuk azonos, fázisuk a vivő fázisára szimmetrikus, a jel tehát egy kétoldalsávú AM jel. E gyanu bizonyítéka, hogy a modulált jel időfüggvénye átírható a

$$s_{AM}(t) = 3\cos(1800\pi t) + 10\cos(2000\pi t) + 3\cos(2200\pi t) \\ = (10 + 6\cos(200\pi t))\cos(2000\pi t)$$

alakba, ahol már a moduláló jel is felismerhető:

$$s_m(t) = 6\cos(200\pi t).$$

Az egyértelműséget az biztosítja, hogy az egyenszintet - AM jeleknél - sohasem tekintjük a moduláló jel tartozékának.

A vivő időfüggő amplitúdójának legnagyobb értéke $10+6=16$ egység, ez a modulált jel maximális értéke is egyúttal. A modulált jel legnegatívabb értéke természetesen - 16 egység.

A modulációs mélység $m = \frac{6}{10}$, az adóteljesítmény hasznosításának hatásfoka pedig

$$\frac{\text{hasznos}}{\text{összes}} = \frac{m^2}{c^2 + m^2} = \frac{0.36}{2 + 0.36} = 0.15$$

P.4.3. Jellegzetes zéhá feladat

Egy AM DSB modulátor 60 kHz vivőfrekvenciájú, 20% modulációs mélységű, 1.8 V csúcsertékkű jelet állít elő. A szinuszos moduláló jel frekvenciája 10 kHz.

- a) Rajzolja fel a modulált jel valamely legalább 200 μs terjedelmű szakaszát!
- b) Írja fel a modulált jel időfüggvényét! Milyen egységben kell az időt a felírt képletbe behelyettesíteni?
- c) Határozza meg a modulált jel egyes szinuszos összetevőinek frekvenciáját és amplitúdóját!
- d) Hogyan lehetne ezt a jelet demodulálni? Rajzolja fel a javasolt demodulátor blokkvázlatát és specifikálja a blokkvázlat egyes elemeit!

Megoldás:

A rajzolgatástól itt eltekintünk, de felhívjuk rá a figyelmet, hogy talán nem is azzal kell (érdeemes) kezdeni a feladat megoldását. Az időfüggvény felírása amúgy is kérdés, ha az megszületett, akkor a rajz már nem okozhat gondot.

A kétoldalsávú AM jel $s_{AM}(t) = (U + m(t)) \cdot \cos(2\pi Ft + \phi)$ alakú. Most $m(\cdot)$ szinuszos, frekvenciája 10 kHz, amplitúdója pedig U 20 százaléka, azaz $0.2U$. A modulált jel csúcsertéke $U + \max(m(t)) = 1.2 \cdot U$. Ebből U értékére 1.5 V adódik.

Ahhoz, hogy a modulált jel könnyen felrajzolható legyen, már csak az a felismerés szükséges, hogy képletünkben F jelenti a vivőfrekvenciát, s hogy a moduláló jel

egyetlen $100 \mu s$ időtartamú periódusa alatt a vivőnek hat periódusa is lezajlik. A frekvencia- és az időegység megválasztásánál arra kell vigyázni, hogy szorzatuk 1 legyen. Ha kHz és ms a két egység, akkor:

$$s_{AM}^{[V]}(t) = (1.5^{[V]} + 0.3^{[V]} \cdot \cos(2\pi \cdot 10 \cdot t^{[ms]})) \cdot \cos(2\pi \cdot 60 \cdot t^{[ms]} + \phi)$$

A három szinuszos összetevő $0.15 V$, $1.5 V$ és $0.15 V$ amplitúdójú, frekvenciáik 50 , 60 és $70 kHz$.

Demoduláció céljára akár szorzó, akár burkoló demodulátor alkalmazható. A demodulátor tartozéka egy aluláteresztő szűrő is, határfrekvenciája legalább $10 kHz$.

P.4.4. Ismeretlen modulált jel vizsgálata

Egy modulátor az

$$s_m(t) = 3^{[V]} \cdot \cos(3\pi \cdot t^{[ms]} + 2)$$

bemenő jel hatására a

$$s_{??}(t) = 4^{[V]} \cdot \cos(500\pi \cdot t^{[ms]} + 21 + 5 \sin(3\pi^{[ms]} + 2))$$

modulált jelet állítja elő.

- Milyen fajtájú modulációs módszerről van itt szó?
- Mekkora a moduláló jel és a modulált jel amplitúdója?
- Mekkora a modulált jel fázis- és frekvencialökete?
- Becsülje meg a modulált jel sávzélességét!

Megoldás:

- A modulált jel amplitúdója állandó, tehát csak szögmodulációról lehet szó. A szög *deriváltja* valóban arányos a moduláló jellel, tehát frekvenciamodulált jellel van dolgunk.
- Mindkét jel *szinuszos*, van amplitúdójuk, sorrendben $3V$ és $4V$.
- A szögmodulált jelnek mindkét jellemzője létezik, függetlenül a moduláció altípusától. A fázisilötyögés maximuma 5 radián , ez tehát a fázislökete. A frekvencialökete a fázis deriváltjának maximális értékéből számítható:

$$f_D = \frac{1}{2\pi} \cdot 5 \cdot 3\pi = 7.5$$

egysége pedig kHz , hiszen ez kompatibilis a ms léptékű idővel.

- Többféle becslés is szóba jöhet. Egy durva becslés szerint

$$B_S \cong 2(f_D + B),$$

ahol B a moduláló jel sávzélessége. Ez most itt $18 kHz$. Szinuszos moduláló jelre alkalmazható a

$$B_S \cong 2 \cdot f_m \cdot (1 + \sqrt{m_f} + m_f)$$

becslés, ahol f_m és m_f a moduláló jel frekvenciája valamint fázislökete. Ebből most

$$B_S \cong 2 \cdot 1.5 \cdot (1 + \sqrt{5} + 5) \cong 3 \cdot 8.24 = 24.72 kHz$$

P.4.5. A kislöketeű fázismodulátor nemlineáris torzítása

Tanultuk, hogy kislöketeű szögmodulált (fázismodulált) jelek előállításának kézenfekvő módszere a

$$s(t) \cong U \cdot \cos(2\pi Ft + \phi) - U \cdot m(t) \cdot \sin(2\pi Ft + \phi)$$

szabály megvalósítása (AM-DSB/SC és 90 fokkal eltolt vivő). Ez a kifejezés nyilván a modulált jel kvadratúrafelbontása. Vizsgáljuk meg közelebbről, milyen is ez a modulált jel!

Megoldás:

Írjuk fel a modulált jel ún. modulációs felbontását! Ez valójában nem jelent mást, mint az eredő jel amplitúdójának és fázisának meghatározását. Tkp. középiskolai trigonometriai ismeretekből következik, hogy

$$s(t) \cong U \cdot \sqrt{1+m^2(t)} \cdot \cos(2\pi Ft + \arctan m(t)).$$

Eredményünk tanulságai:

- járulékos AM jött létre, ez nem öröm, de nem is nagy baj, a frekvenciasokszorozón múlik, érzékeny-e a bemenő jel ezen fogyatékosására.

- a modulációs tartalomban van némi nemlineáris torzulás, hiszen nem $m(t)$, hanem $\arctan(m(t))$ a tényleges tartalom. Az árkusz tangens függvény sorfejtésében az elsőfokú tag után harmadfokú következik, ha tehát a fázislököt 0.1 körüli, akkor a hiba mindössze néhány (kb. három) tízezred, relatív értékben néhány ezrelék. 0.5 (radiános) fázislökötnél a hiba már kb. 5 század, azaz 10 százalék.

- fordított értelmű tanulság is levonható. Ha előállítunk egy tisztességes fázismodulált jelet, majd sávját korlátozzuk, akkor a kislökötű jelhez hasonló szerkezetű jelet állítunk elő, csak a lökete nem kicsi. Várható következmény: nemlineáris torzítás.

P.4.6. Szögmodulált jelek demodulálása fázistolós szorzóval

A szögmodulált jelek demodulálásának egyik kedvelt módszere, hogy a modulált jelet és T -vel késleltetett származékát összeszorozzák, majd a szorzatot aluláteresztő szűrővel szűrik. Mutassuk meg, hogy ekként elő lehet állítani magát a modulációs tartalmat!

Megoldás:

Noha a feladat megfogalmazásában a késleltetés kapott hangsúlyt, valójában szerepet játszik egy φ értékű fázistolás is, s ez a fázistolás a késleltetés értékétől függetlenül választható meg. A szorzat így

$$U \cos(2\pi Ft + m(t)) \cdot U \cos(2\pi Ft - \varphi + m(t - T)) = \\ \frac{U^2}{2} \cos(\varphi + m(t) - m(t - T)) + \frac{U^2}{2} \cos(2\pi 2Ft - \varphi + m(t) + m(t - T))$$

Az aluláteresztő szűrő az összeg második tagját eltávolítja, így kimenetén már csak az első taggal találkozunk. Ha φ értékét ügyesen választjuk meg (pl. 270 fok), akkor ez viszont éppen az $m(t) - m(t - T)$ különbség szinusza lesz, amely kis argumentumok esetén éppen az argumentum, ami viszont kb. $T \cdot m'(t)$ (a modulációs tartalom deriváltja). Ez frekvenciamodulációnál éppen a moduláló jel.

Érdeemes végiggondolni, hogyan működik ugyanez az eljárás, ha a feldolgozás előtt a modulált jelet négyszögesítjük. **Útmutatás:** a négyszögjel sorfejtését érdemes alkalmazni, s a szorzatból kiválogatni a „kisfrekvenciás” tagokat. Szerepet kap még a szimmetrikus háromszögjel sorfejtése is...

G.4.1. Gyakorló feladat

Kétoldalsávós jelet szorzó demodulátorral demodulálunk, de az alkalmazott jel nem szinuszos, hanem szimmetrikus négyszögjel (valójában arról van szó, hogy nem igazi négyegyed-es analóg szorzót, hanem kapcsolóüzemű szorzót használunk). Vizsgálja meg, milyen következményei lehetnek ennek a változtatásnak (mennyiben változnak a demodulátor szűrőjével szemben támasztott követelmények)!

G.4.2. Gyakorló feladat

Szinuszos moduláló jellel 100 százalékosan kimodulált (kétoldalsávós) jelnek az alsó oldalsávját szűrővel eltávolítjuk. A szűrés az vivőt és a felső oldalsávot nem változtatja meg. A keletkezett jelet burkoló demodulátorral kíséreljük meg demodulálni. Számítással határozza meg, milyen jel keletkezik az ideálisnak tekinthető burkoló demodulátor kimenetén! Rajzolja fel a jelalakot és elemezze az eredményt!

G.4.3. Gyakorló feladat

Kétoldalsávós AM jelet olyan teljesítményerősítővel erősítünk, amely lényegében a bemeneti jelének harmadik hatványával arányos jelet állít elő. Lesz-e a demodulált jelnek számottevő erősségű második harmonikusa? Vizsgálja meg, milyen mértékű nemlineáris torzítást okoz ez a demodulált jelben szinuszos moduláló jel és különféle modulációs indexek esetén!

G.4.4. Gyakorló feladatok

Ugyanazon szinuszos moduláló jel segítségével előállítunk egy frekvenciamodulált és egy fázismodulált jelet is. Mindkét modulált jel amplitúdója, fázislökete és frekvencialökete azonos, rendre 20 mV , 4.71 radián , és 31.4 kHz . Hányszorosára nő (illetve csökken) a modulált jelek amplitúdója, teljesítménye, fázislökete és frekvencialökete,

- ha a moduláló jel effektív értéke a felére csökken?
- ha a moduláló jel frekvenciája a másfélszeresére nő?
- ha a moduláló jel teljesítménye a felére csökken?

G.4.5. Gyakorló feladatok

Szimmetrikus háromszögjellel (alapfrekvenciája 1 kHz) vezérlünk egy frekvenciamodulált jelet előállító modulátort. A modulált jel vivőfrekvenciája 100 kHz , teljesítménye (50 ohmos terhelésen) 2 watt , frekvencialökete 5 kHz .

- Mekkora a modulált jel fázislökete?
Hányszorosára nő (illetve csökken) a modulált jel amplitúdója, teljesítménye, fázislökete és frekvencialökete,
- ha a moduláló jel effektív értéke a felére csökken?
- ha a moduláló jel frekvenciája a másfélszeresére nő?