Analog Haberleşme

Süperheterodin alıcı, açı modülasyonu, NBFM

Orijinal not: Ders11.pdf

UYARI Bu belge, el yazısı ders notlarından Claude (Anthropic) yardımıyla dijitale aktarılmıştır. Yardımcı kaynak olarak hazırlanmıştır; hata veya eksik içerebilir. Lütfen orijinal notları ve ders kaynaklarını esas alın.

NOTICE *This document was transcribed from handwritten lecture notes with the help of Claude (Anthropic). It is meant as a supplementary resource and may contain errors or omissions. Always check against the original notes and official course material.*

orj. s. 1

AM Radio Broadcasting (GM Radio yayını)

(? BT-448)

Genlik Modülasyonu (GM) Radyo Alıcısı
(süper heterodin alıcı – Superheterodyne receiver)

Intermediate frequency (IF) amplifier
f_{LO}: Local oscillator frequency

$$f_{LO} = f_c + f_{IF} \qquad f_c' = f_{LO} + f_{IF}$$

> **Şekil:** Bu sayfa basılı materyal içeriyor (Figure 3.34: Frequency-response characteristics of both IF and RF amplifiers; (a) f_{IF} merkezli B_c genişlikli IF bandı, (b) $f_c = f_{LO} - f_{IF}$ merkezli B_{RF} genişlikli RF bandı, (c) f_c ve $f_c' = f_{LO} + f_{IF}$ konumlarında iki bant, aralarında f_{LO} ve $2f_{IF}$); dijitalleştirilmedi. El yazısı eklemeler aşağıda aktarılmıştır; (c) şeklinin altına ayrıca "910 kHz" yazılmış.
> *(orijinal notta, s. 1)*

$$B_c < B_{RF} < 2f_{IF} \quad \text{(altlarında sırasıyla: 10 kHz, 910 kHz)}$$

$$455 \text{ kHz} = f_{IF} \quad \text{(intermediate frequency)}$$

$$\text{e.g.} \quad f_c = 1000, \quad f_{LO} = 1455, \quad f_c' = 1910, \quad f_c' - f_c = 910 \text{ kHz}$$

GM frekans yelpazesi: 535–1605 kHz
GM taşıyıcı frekans yelpazesi: 540–1600 kHz

$$B = BG\{m(t)\} = 5 \text{ kHz} \Rightarrow BG\{y_{DSB\text{-}LC\text{-}AM}(t)\} = 2B = 10 \text{ kHz}$$

1. istasyon:

$$y_1(t) = A_c\left[1 + \mu m_{n1}(t)\right]\cos(2\pi f_c t)$$

2. istasyon:

$$y_2(t) = A_c\left[1 + \mu m_{n2}(t)\right]\cos(2\pi f_c' t), \qquad f_c' : \text{Image station}$$

RF amplifier sadece y_1'i geçirir.



orijinal çizim, s. 1

orj. s. 2

> **Şekil:** Bu sayfa basılı materyal içeriyor (Figure 3.33: A superheterodyne receiver); dijitalleştirilmedi. Basılı blok diyagram: anten → RF amplifier → Mixer → IF amplifier → Detector → Audio frequency amplifier → Speaker; Local oscillator Mixer'e bağlı (RF amplifier'a kesikli çizgiyle de bağlı); Detector'dan IF amplifier'a Automatic volume control (AVC) geri beslemesi. El yazısı eklemeler: RF amplifier ve IF amplifier üzerinde (BGF); RF amplifier altında $f_c = f_{LO} - f_{IF}$; IF amplifier altında $f_{IF} = 455$ kHz, $B = 10$ kHz; RF amplifier çıkışı / Mixer girişi: $A_c[1 + \mu m_n(t)]\cos(2\pi f_c t)$; Mixer çıkışı / IF girişi: $A_c[1 + \mu m_{n1}(t)]\cos(2\pi f_{IF} t)$ + $2f_{IF}$ frekanslı bileşen ("$2f_{IF}$ frekanslı bileşen" kısmı turuncu çizgiyle iptal edilmiş); IF çıkışı / Detector girişi: $A_c[1 + \mu m_{n1}(t)]\cos(2\pi f_{IF} t)$; hoparlör girişi: $K m_1(t)$; Local oscillator altında $f_{LO} = f_c + f_{IF}$ ve "Tuning range (Ayarlama Aralığı): 995–2055 kHz".
>
> (orijinal notta, s. 2)

RF kuvvetlendiricisinin çıkışında

$$y_1(t) = A_c\,[1 + \mu\, m_{n1}(t)]\cos(2\pi f_c t)$$
$$y_2(t) = A_c\,[1 + \mu\, m_{n2}(t)]\cos(2\pi f_c' t) \quad \text{olsun}$$

$$f_c = \overset{\text{local osilator}}{f_{LO}} - f_{IF} \rightarrow \text{Intermediate frequency}$$
$$f_c' = f_{LO} + f_{IF} \quad \text{ve} \quad f_{LO} = f_c + f_{IF}$$

mixer çıkışı:

$$z_1(t) = A_c\,[1 + \mu\, m_{n1}(t)]\cos(2\pi f_{IF}(t)) + 2f_c \text{ frekanslı bileşen}$$
$$z_2(t) = A_c\,[1 + \mu\, m_{n2}(t)]\cos(2\pi f_{IF}(t)) + 2f_c \text{ frekanslı bileşen}$$

[z_2 satırının sonuna okla işaret edilmiş turuncu not: ? f_c''den gelen]

IF amplifier'ın girişine image station (f_c') gelmemeli yoksa çıkışta işaretler birbirine karışıyor. Bunun için RF amplifier'ın görevi dinlemek istediğimiz istasyonun image istasyonunu geçirmemektir.

IF amplifier'ın görevi de dinlemek istemediğimiz diğer frekansları geçirmemektir. (IF girişine dinlemek istemediğimiz frekanslar da geliyor.)

Çok yüksek frekansta olduğu için ilk başta direkt 10 kHz'le BGF yapamıyoruz. Bu kadar yüksek frekanslarda 10 kHz seçiciliği olan bir BGF tasarlanamıyor.

orj. s. 3

Açı (Angle) Modülasyonu

- Lineer değil
- Yüksek BG → Yüksek gürültü bağışıklığı
- Sabit Zarflı (A_c'den dolayı) → Modülasyon tekniklerinin sabit zarflı olması tercih edilir. Çünkü sabit zarflı olmazsa devre doymaya girebilir. Bu da sinyalde kesintiye neden olur.

$$y(t) = A_c \cos(\theta(t))$$

$$\theta(t) = 2\pi f_c t + \underbrace{\theta_0}_{\text{sabit}} \rightarrow \underbrace{f_i(t)}_{\substack{\text{Ani frekans} \\ \text{(Instaneous frequency)}}} = \underbrace{\frac{1}{2\pi}\frac{d\theta(t)}{dt}}_{f_c}$$

$$\rightarrow \theta(t) = 2\pi \int_{-\infty}^{t} f_i(\alpha)\, d\alpha$$

ifadeyi genelleştirelim

$$\theta(t) = 2\pi f_c t + \underbrace{\phi(t)}_{\substack{\text{Faz} \\ \text{mesaj işaretini} \\ \text{faza koyuyoruz}}} \rightarrow f_i(t) = f_c + \frac{1}{2\pi}\frac{d\phi(t)}{dt}$$

$\Rightarrow$ Ani frekans zamanın fonksiyonu oldu

$$\underbrace{f_i(t)}_{\substack{\text{modüle ettiğimiz} \\ \text{işaretin ani frekansı}}} - \underbrace{f_c}_{\substack{\text{taşıyıcı} \\ \text{frekansı}}} = \frac{1}{2\pi}\frac{d\phi(t)}{dt}$$

$\Rightarrow$ Ani frekansın taşıyıcıdan sapma miktarı

1) Phase Mod. (PM) / Faz Modülasyonu (FZM)

$$\phi(t) = k_p\, m(t) \qquad \theta(t) = 2\pi f_c t + k_p\, m(t)$$

(k_p: faz sapma sabiti (Phase deviation constant))

$$y_{FZM}(t) = A_c \cos\left(\overbrace{2\pi f_c t + k_p\, m(t)}^{\theta(t)}\right)$$

$$f_i(t) = f_c + \frac{1}{2\pi} k_p \frac{dm(t)}{dt}$$

orj. s. 4

2) Frequency Mod. (FM) / Frekans Modülasyonu (FRM)

$f_i(t) = f_c + k_f m(t)$ $\Rightarrow$ ani frekans, mesaj işaretiyle lineer olarak değişiyor.

(k_f: frekans sapma sabiti (frequency deviation constant))

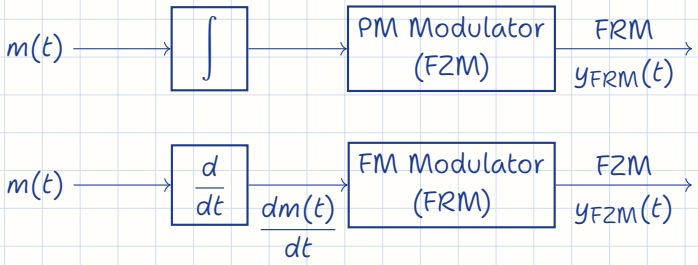
$$\Rightarrow \theta(t) = 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)\, d\tau$$

$$y_{FRM}(t) = A_c \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)\, d\tau\right)$$

$$y_{Açı}(t) = A_c \cos\left(2\pi f_c t + \phi(t)\right)$$

$$\hookrightarrow = k_p\, m(t) \quad \text{FZM}$$

$$\hookrightarrow = 2\pi k_f \int_{-\infty}^{t} m(\tau)\, d\tau \quad \text{FRM}$$



En genel halde

Mesaj işaretinin genliği ne olursa olsun bu modülasyon tekniğinin gücü: $P_y = \frac{A_c^2}{2}$

Genel üstel (Açı) Mod.

$$y_{\text{ÜM}}(t) = A_c \cos\left(2\pi f_c t + \phi(t)\right)$$

$$\phi(t) = \int_{-\infty}^{t} m(\tau)\, h(t-\tau)\, d\tau$$

Eğer $h(t) = k_p\, \delta(t) \rightarrow$ FZM elde ederiz
Eğer $h(t) = 2\pi k_f\, \upsilon(t) \rightarrow$ FRM elde ederiz.

Optimum performans ikisinin arasında sağlanır. Ancak bunu gerçekleştirmeye kalktığımızda hem verici hem alıcı karmaşıklaşıyor. Bu da maliyet vs. arttırıyor. Biz Radyo yayını yaptığımızdan alıcının basit olmasını istiyoruz.

Analog
5 Ocak Cuma 11.00
↪ Bonus Quiz
Buradan alınan puan ara sınava eklenecek.

orj. s. 5

> **Şekil:** Bu sayfa basılı materyal içeriyor (Figure 4.2: Frequency and phase modulations of square and sawtooth waves); dijitalleştirilmedi. Şekil: sol üstte kare dalga $m(t)$ (0–2 arası +1, 2–4 arası −1), sağ üstte $\int_{-\infty}^{t} m(\tau)\, d\tau$ (üçgen dalga: $t = 2$'de 2'ye çıkıp $t = 4$'te 0'a iniyor); altta solda FM signal ve PM signal, sağda "Equivalent" okuyla eşlenmiş FM signal ve PM signal grafikleri. El yazısı (kırmızı) eklemeler: $m(t)$ grafiğinde $t = 2$ noktasına okla "işaret(?) değişiyor"; sol FM grafiğinin solunda "YF: Yüksek frekans", "DF: Düşük frekans", altında $t \approx 1$ için "YF $f_c + k_f$", $t \approx 3$ için "DF $f_c - k_f$"; sağ üst FM grafiğinin altında 0–1 arası "DF", 1–3 arası "YF" (parantezle), 3–4 arası "DF"; sol PM grafiğinin solunda "frekans hiç değişmiyor", "faz mesajın(?) değiştiği yerde değişiyor" ve $t = 2$'de küçük kırmızı işaret; sağ alt PM grafiğinin altında 0–2 arası "$f_i(t) = f_c + k_f$", 2–4 arası "$f_c - k_f$" ve şeklin sağ altındaki formüllere kırmızı okla işaret ediliyor.
> *(orijinal notta, s. 5)*

$$f_i(t) = f_c + \overbrace{\frac{k_p}{2\pi}}^{k_f} \frac{dm(t)}{dt}$$

$$f_i(t) = f_c + k_f \frac{dm(t)}{dt}$$

Güç

$$y(t) = A_c \cos\left(2\pi f_c t + \phi(t)\right) \rightarrow \boxed{P_y = \frac{A_c^2}{2}}$$ güç hep buna eşit

BG

$$y(t) = Re\{\hat{y}(t)\}, \qquad \hat{y}(t) = A_c e^{j(2\pi f_c t + \phi(t))} \qquad [\,2\pi f_c t + \phi(t) = \theta(t)\,]$$

$$\hat{y}(t) = A_c e^{j2\pi f_c t} e^{j\phi(t)}$$

$$e^x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} \rightarrow e^{j\phi(t)} = 1 + j\phi(t) - \frac{\phi^2(t)}{2} - j\frac{\phi^3(t)}{3!} \cdots + j^n \frac{\phi^n(t)}{n!} + \cdots$$

$$\hat{y}(t) = A_c\left[\cos(2\pi f_c t) + j\sin(2\pi f_c t)\right] \cdot \left[1 + j\phi(t) - \frac{\phi^2(t)}{2} + \cdots + j^n \frac{\phi^n(t)}{n!} + \cdots\right]$$

$$y(t) = Re\{\hat{y}(t)\} = A_c\Big[\cos(2\pi f_c t) - \phi(t)\sin(2\pi f_c t) - \frac{\phi^2(t)}{2!}\cos(2\pi f_c t) + \frac{\phi^3(t)}{3!}\sin(2\pi f_c t) + \cdots\Big]$$

orj. s. 6

$$BG\{m(t)\} = B\ Hz \Rightarrow BG\{\phi(t)\} = B\ Hz$$

$$\hookrightarrow k_p\, m(t)\ (PM)$$

$$\hookrightarrow 2\pi k_f \int m(\tau)\, d\tau\ (FM)$$

$$BG\{\phi^2(t)\} = 2B \longrightarrow BG\{\phi^n(t)\} = nB$$

$BG\{y(t)\} \rightarrow \infty$ (Teorik)

$\rightarrow$ BG Teorikte sonsuzdur ancak güç zayıflar

Açı modülasyonu Efektif BG

Carson kuralı: $BG = 2B(\beta + 1)$, $B = BG\{m(t)\}$

FM(FRM):

$$\beta = \frac{\Delta f}{B}, \quad \Delta f = k_f m_p, \quad m_p = \max|m(t)|$$

(β: sapma oranı (deviation Ratio); Δf: Taşıyıcıdan max sapma miktarı (Max carrier frequency deviation), $f_i(t) = f_c + k_f m(t)$)

PM(FZM):

$$\beta = \frac{\Delta f}{B}, \quad \Delta f = \frac{k_p}{2\pi}\frac{dm_p(t)}{dt}, \quad \frac{dm_p(t)}{dt} = \max\left|\frac{dm(t)}{dt}\right|$$

$$\left(f_i(t) = f_c + \frac{k_p}{2\pi}\frac{dm(t)}{dt}\right)$$

> ⚠ **Dikkat!**
> Not: kitapta buradaki formül yanlıştır. (O formül özel bir durumun formülü). Genelleştirilmiş için buradaki formülleri kullanacağız.

$$\theta(t) = 2\pi f_c t + \overset{\text{faz}}{\phi(t)}$$

$\Delta\phi = \max|\phi(t)|$ maks faz sapması (max phase deviation)

FM(FRM):

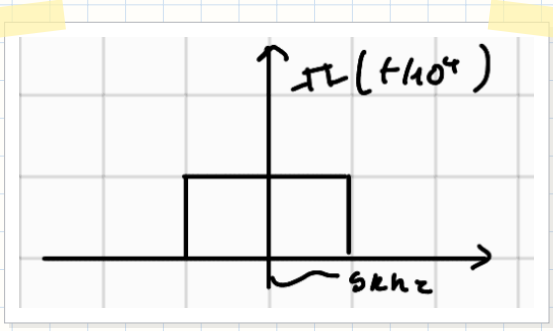
$$\Delta\phi = 2\pi k_f \max\left|\int m(\tau)\,d\tau\right|$$

PM(FZM):

$$\Delta\phi = k_p m_p, \quad m_p = \max|m(t)|$$

> **Örnek**
> $m(t) = 10\,\text{sinc}(10^4 t) \rightarrow$ Find the transmission BW of an FM modulated signal with $k_f = 4000$

$$m(t) = 10\,\text{sinc}(10^4 t) \rightarrow M(f) = \underset{A=\frac{1}{10^3}}{A}\,\Pi\left(\frac{f}{\tau}\right) = \frac{1}{10^3}\Pi\left(\frac{f}{10^4}\right)$$



orijinal çizim, s. 6

$$B = 5\text{ kHz} \qquad \beta = \frac{\Delta f}{B}, \quad \Delta f = k_f m_p = 4000 \cdot 10 = 40\text{ kHz}$$

$$\beta = \frac{40k}{5k} = 8 \Rightarrow BG = 2B(\beta + 1) = 2 \cdot 5k\,(8 + 1) = 90\text{ kHz}$$

(90 kHz sonucundan okla yukarıdaki not:) mesajın BG'si 5k iken FRM'ninki 90k da çok çok büyük

orj. s. 7

- Lineer değil (nonlinear)

$$\phi(t) = \begin{cases} k_p\, m(t) \\ 2\pi k_f \int m(\tau)\, d\tau \end{cases}$$

$$A_c \cos\left(2\pi f_c t + a_1\phi_1(t) + a_2\phi_2(t)\right) \neq A_c \cos\left(2\pi f_c t + a_1\phi_1(t)\right) + A_c \cos\left(2\pi f_c t + a_2\phi_2(t)\right)$$

$$k_f \ll k_p \ll 1 \Rightarrow |\phi(t)| \ll 1 \Rightarrow \phi^n(t) \approx 0,\ n \geq 2$$

$$y(t) \approx A_c\left[\cos(2\pi f_c t) - \phi(t)\sin(2\pi f_c t)\right]$$

↪ Dar bantlı açı modülasyonu (Narrow band angle mod)

BG az olan sabit zarflı bir modülasyon tekniği elde ettik

Narrow Band angle modulation

$$\left.\begin{matrix} k_f \ll 1 \\ k_p \ll 1 \end{matrix}\right\} \Rightarrow |\phi(t)| \ll 1 \Rightarrow \begin{cases} \cos(\phi(t)) \approx 1 \\ \sin(\phi(t)) \approx \phi(t) \end{cases}$$

$$\cos(a+b) = \cos a \cdot \cos b - \sin a \cdot \sin b$$

$$y(t) = A_c \cos\left(\underset{a}{2\pi f_c t} + \underset{b}{\phi(t)}\right)$$

$$= A_c\left[\cos(2\pi f_c t) \cdot \underbrace{\cos(\phi(t))}_{\approx 1} - \sin(2\pi f_c t) \underbrace{\sin\phi(t)}_{\approx \phi(t)}\right]$$

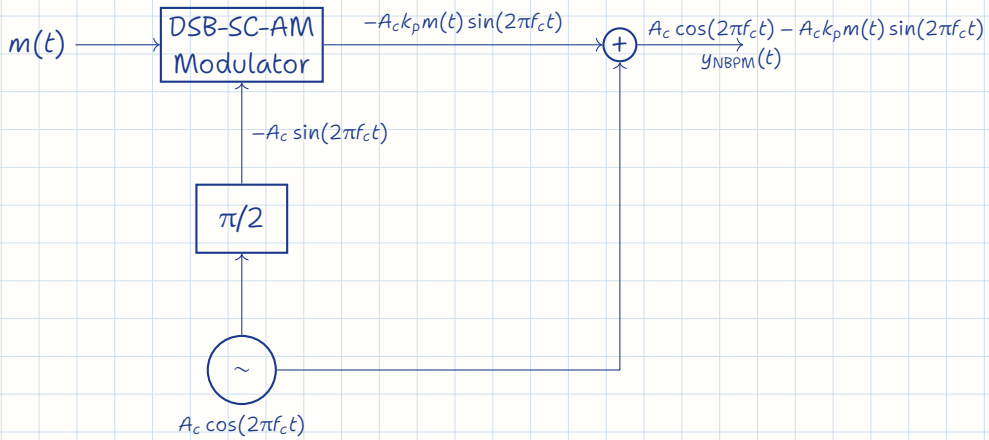
$$y(t) = \underbrace{A_c\left[\cos(2\pi f_c t) - \underbrace{\phi(t)}_{BG=B\,Hz}\ \sin(2\pi f_c t)\right]}_{BG=2B\ Hz}$$

$$\longrightarrow \phi(t) = k_p\, m(t)\ \text{(NBPM)}$$

$$\longrightarrow \phi(t) = 2\pi k_f \int m(\tau)\, d\tau\ \text{(NBFM)}$$

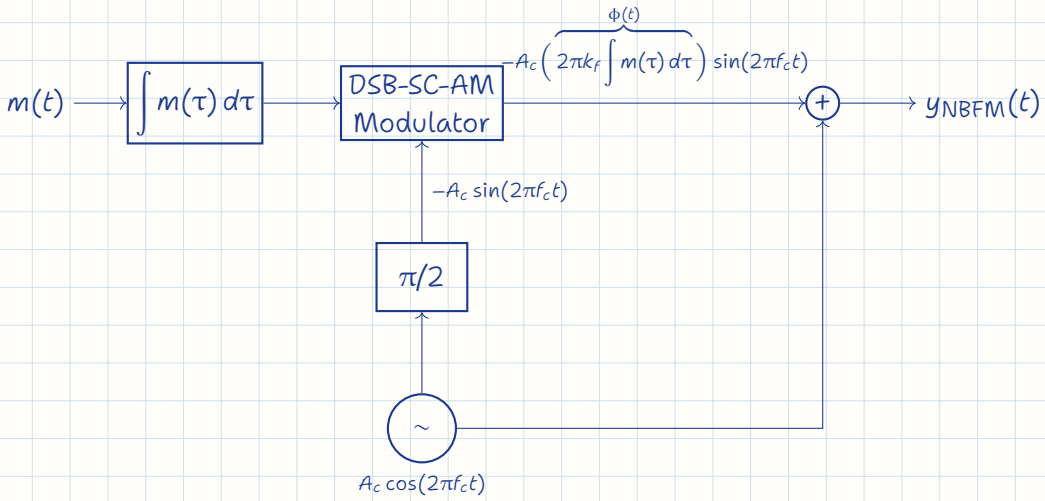
$$\Rightarrow BG\{y(t)\} = 2B\ Hz$$

NBPM Modulator



orj. s. 8

NBFM Modulator



Carson kuralı $BG = 2B(\beta + 1)$

$$\left.\begin{array}{l} \text{FM: } \Delta f = k_f m_p \xrightarrow{k_f \ll 1} \Delta f \ll \\ \text{PM: } \Delta f = \dfrac{k_p}{2\pi}\dfrac{dm_p}{dt} \xrightarrow{k_p \ll 1} \Delta f \ll \end{array}\right\} \begin{array}{l} \beta = \dfrac{\Delta f}{B} \ll 1 \\ BG = 2B(\beta+1) \approx 2B \end{array}$$

(NB $\overset{\text{Angle}}{A}$ M)

Wide Band Angle modulation (WBAM)

$$\left.\begin{array}{l} \text{FM: } \Delta f = k_f m_p \\ \text{PM: } \Delta f = \dfrac{k_p}{2\pi}\dfrac{dm_p}{dt} \end{array}\right\} \begin{array}{l} k_f \gg \\ k_p \gg \end{array} \Rightarrow \Delta f \gg \Rightarrow \beta = \frac{\Delta f}{B} \gg 1$$

$$BG = 2B(\beta+1) \approx 2B\beta \approx 2\Delta f$$