



Teknik Pengolahan Sinyal

Konversi Sinyal

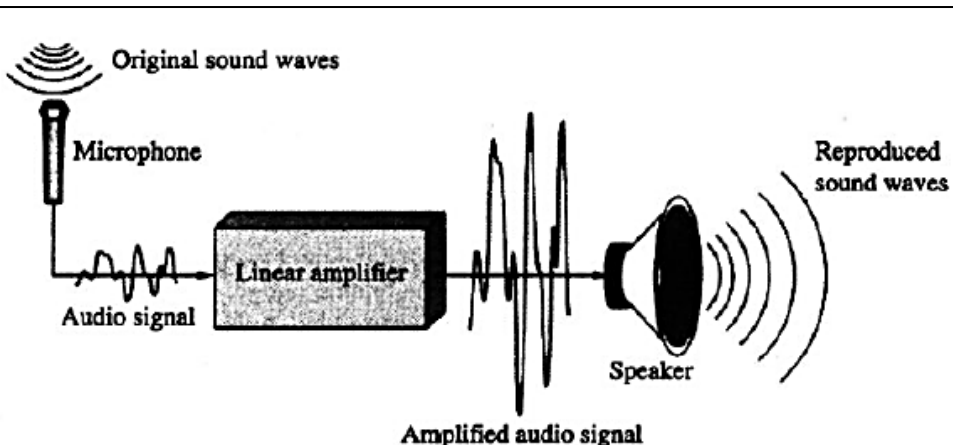
Aqil Aqthobirrobbany, S.T., M.Eng.



Pendahuluan

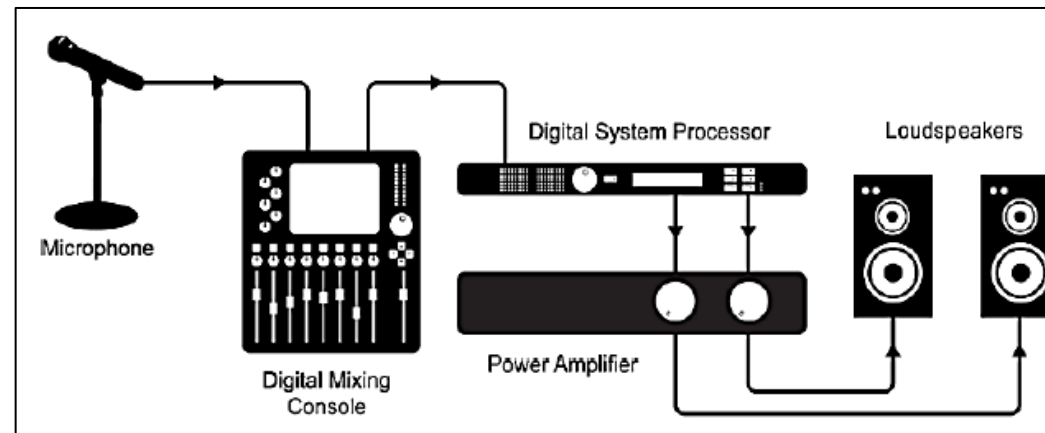


Sebagian besar sinyal-sinyal untuk maksud praktis, seperti **suara, sinyal biologis, sinyal seismik, sinyal radar, sinyal sonar, dan berbagai sinyal komunikasi seperti sinyal audio dan video, adalah sinyal analog**. Untuk memproses sinyal analog dengan alat digital, pertama-tama perlu mengkonversinya menjadi bentuk digital, yaitu mengkonversi menjadi suatu deret angka yang mempunyai presisi terbatas. Prosedur ini dinamakan **konversi analog-ke-digital (A/D)** dan alat pengkonversinya dinamakan **ADC (Analog-to-Digital Converter)**.



Sumber:

<https://slideplayer.com/slide/2433690/8/images/9/Analog+Example.jpg>



Sumber:

<http://digitalsoundandmusic.com/wp-content/uploads/2014/05/Figure1-2.gif>

**Perbandingan
Sistem Analog
(Kiri) dan Sistem
Digital (Kanan)
Pada Perangkat
Sound System**

Konversi Analog-ke-Digital (ADC)



Konversi A/D terbagi dalam tiga-langkah proses, yaitu:

1. Pencuplikan (sampling)

Ini adalah konversi suatu **sinyal waktu-kontinu** menjadi suatu **sinyal waktu-diskrit** yang diperoleh dengan mengambil “cuplikan” sinyal waktu-kontinu pada saat waktu diskrit. Jadi jika $X_a(t)$ adalah masukan terhadap pencuplik, keluarannya adalah $X_a(nT_p) \equiv x(n)$ dengan T_p dinamakan **selang pencuplikan**.

2. Kuantisasi (Quantization)

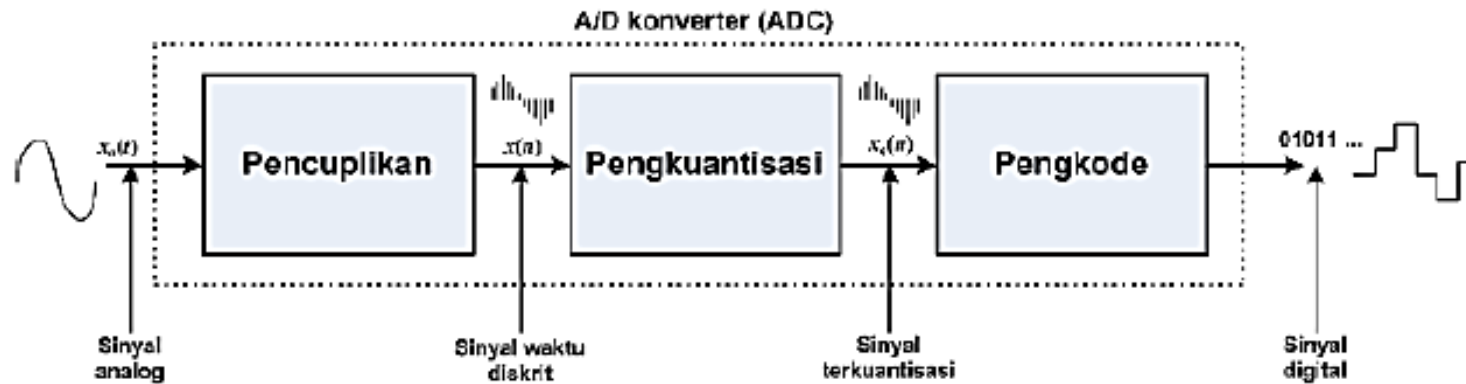
Ini adalah konversi sinyal yang **bernilai-kontinu waktu-diskrit** menjadi **sinyal (digital) bernilai-diskrit waktu-diskrit**. Nilai setiap cuplikan sinyal digambarkan dengan suatu nilai terpilih dari himpunan berhingga nilai-nilai yang mungkin. Selisih antara cuplikan $x(n)$ yang tidak terkuantisasi dan keluaran $X_q(n)$ yang terkuantisasi dinamakan **Kesalahan Kuantisasi (Quantization Error)**.

Konversi Analog-ke-Digital (ADC)



Konversi A/D terbagi dalam tiga-langkah proses, yaitu:

3. **Pengkodean (Coding).** Dalam proses pengkodean, setiap nilai diskrit $X_q(n)$ digambarkan dengan suatu barisan biner.



Blok diagram dasar ADC

Pencuplikan Sinyal Analog

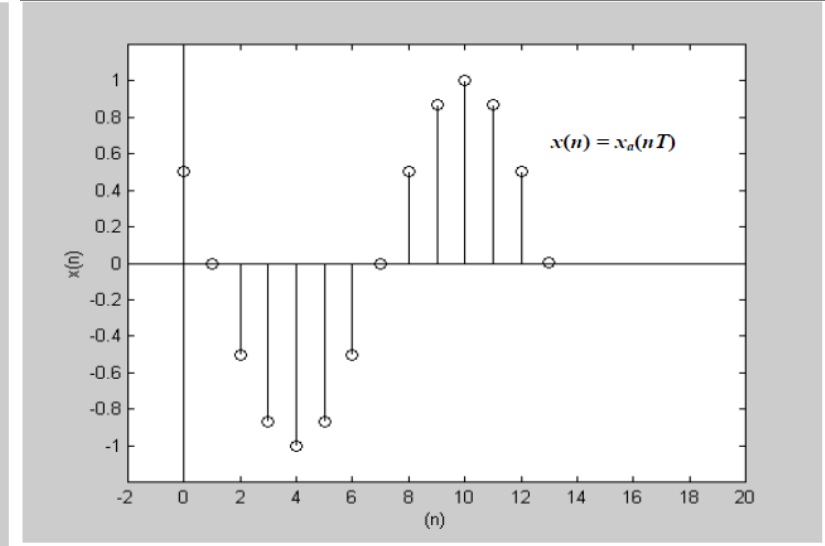
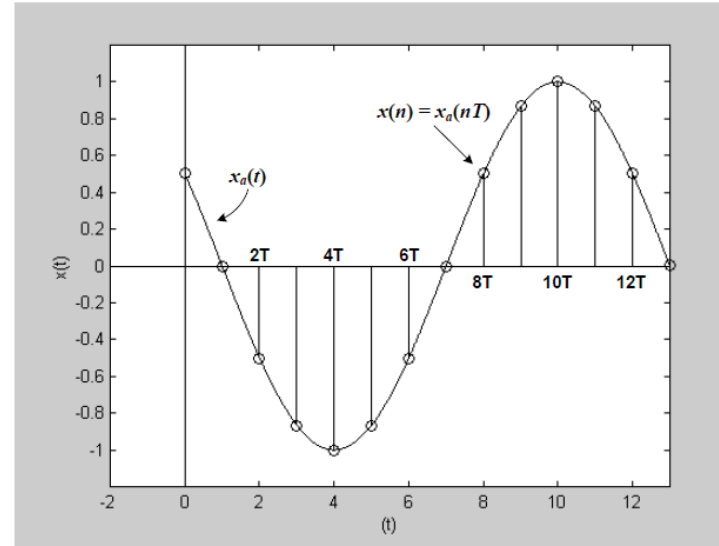
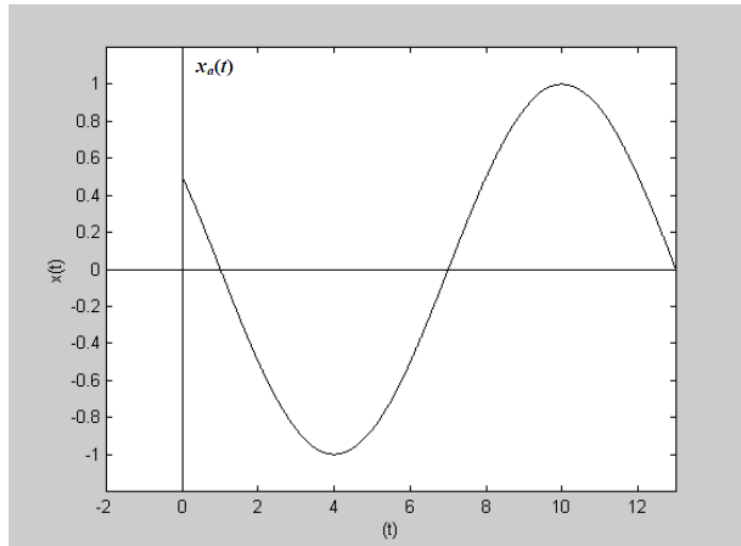


Pencuplikan yang digunakan untuk mencuplik sinyal analog dalam bahasan ini adalah pencuplikan periodik.

Dideskripsikan sebagai:

$$x(n) = X_a(nT_p) \quad -\infty < n < \infty$$

Dengan $x(n)$ adalah sinyal waktu diskrit yang diperoleh dengan “mengambil cuplikan-cuplikan” sinyal analog $X_a(t)$ setiap T detik. Selang waktu T_p antara cuplikan yang berurutan dinamakan periode pencuplikan atau selang cuplikan dan kebalikannya:



Pencuplikan Sinyal Analog



$\frac{1}{T_p} = F_p$ F_p dinamakan sebagai **laju pencuplikan (cuplikan per detik)** atau **frekuensi pencuplikan**.

Pencuplikan periodik menetapkan suatu hubungan antara variabel waktu t dan n dari sinyal waktu-kontinu dan dari sinyal waktu-diskrit, sebagai:

$t = nT_p = \frac{n}{F_p}$ Sebagai konsekuensi dari persamaan disamping, terdapat hubungan antara variabel frekuensi untuk sinyal analog dan variabel frekuensi untuk sinyal diskrit.. Perhatikan sinyal analog sinusoida berikut:

$x_a(t) = A \cos(\omega_a t + \theta)$ Yang bila dicuplik secara periodik pada laju $F_p = 1/T_p$ cuplikan per detik,
 $x_a(t) = A \cos(2\pi F_a t + \theta)$ menghasilkan:

$$\begin{aligned} x_a(nT_p) &= A \cos(2\pi F_a nT_p + \theta) \\ &= A \cos\left(\frac{2\pi F_a n}{F_p} + \theta\right) \end{aligned}$$

Pencuplikan Sinyal Analog



$x_a(t) = A \cos(\omega_a t + \theta)$ Yang bila dicuplik secara periodik pada laju $F_p = 1/T_p$ cuplikan per detik, menghasilkan:

$$x_a(t) = A \cos(2\pi F_a t + \theta)$$

$$\begin{aligned} x_a(nT_p)x(n) &= A \cos(2\pi F_a T_p + \theta) \\ &= A \cos\left(\frac{2\pi F_a n}{F_p} + \theta\right) \end{aligned}$$

Perhatikan kembali sinyal diskrit sinusoida seperti yang ditulis berikut:

$$\begin{aligned} x(n) &= A \cos(\omega_d n + \theta) \\ x(n) &= A \cos(2\pi F_d n + \theta) \end{aligned}$$

Jika kita membandingkan dua persamaan diatas, variabel frekuensi F_a dan F_d berhubungan secara linear, yaitu:

$$F_d = \frac{F_a}{F_p}$$

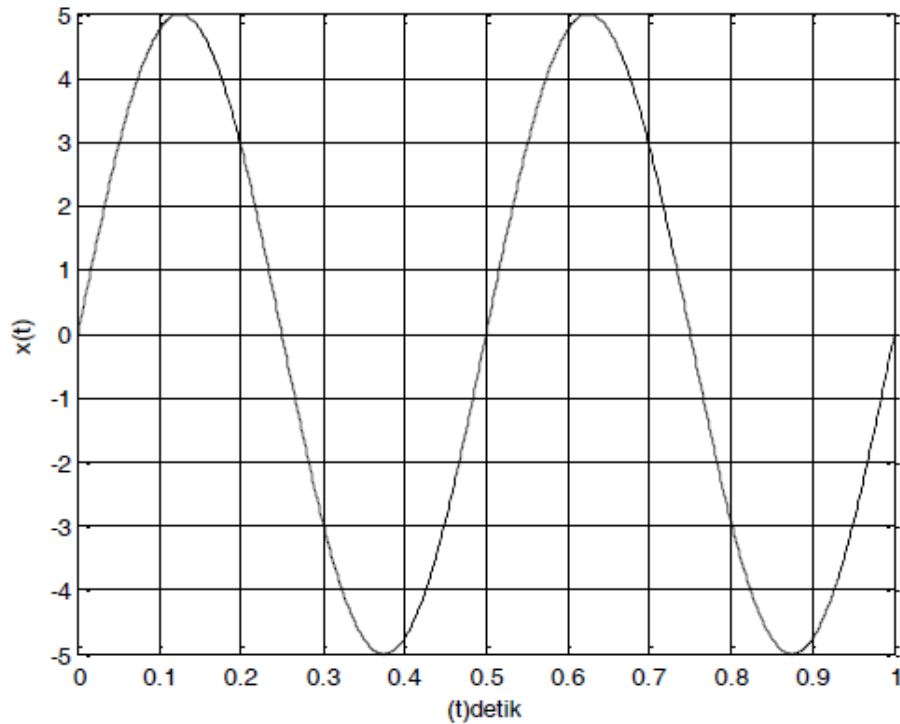
F_a = Frekuensi sinyal analog
 F_d = Frekuensi sinyal diskrit

Pencuplikan Sinyal Analog

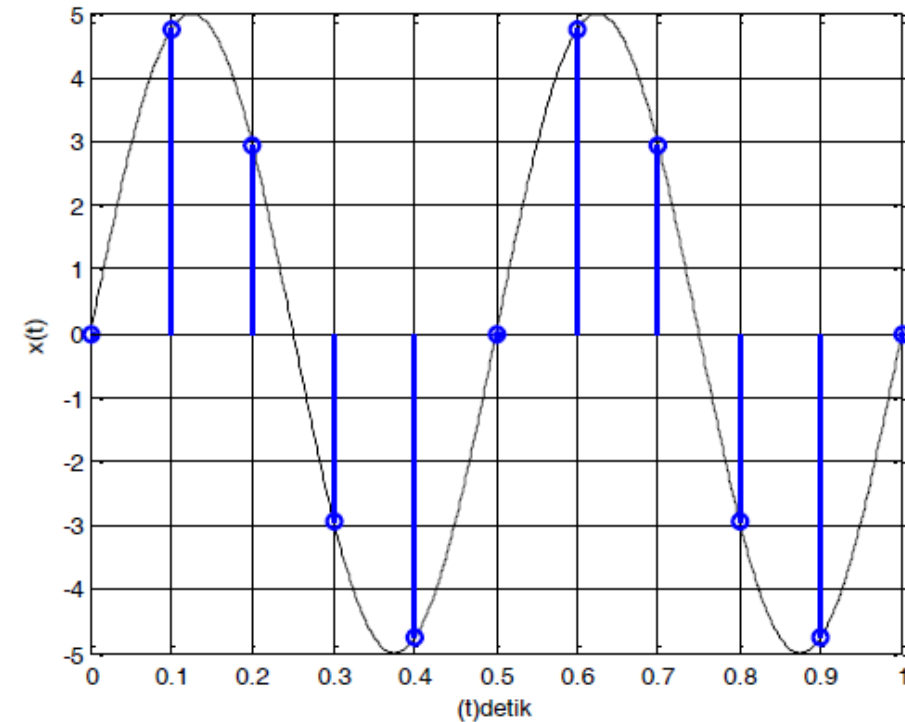


Contoh

Buat ilustrasi grafik untuk sinyal sinusoida $x_a(t) = 5 \sin(\omega_a t)$, frekuensi analog = 2 Hz, dicuplik sebanyak 10 cuplikan perdetik.



sinyal sinusoida $x_a(t) = 5 \sin(\omega_a t)$



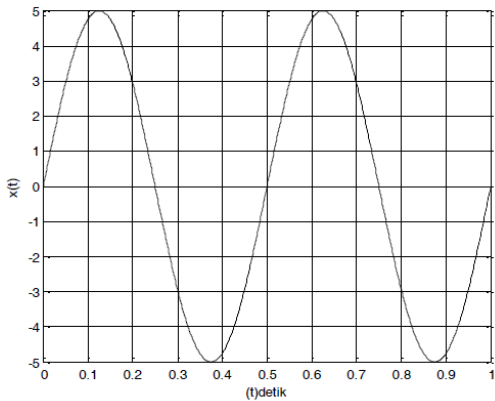
sinyal sinusoida $x_a(t) = 5 \sin(\omega_a t)$ dicuplik dengan 10 cuplikan atau 10 sampling per detik

Pencuplikan Sinyal Analog

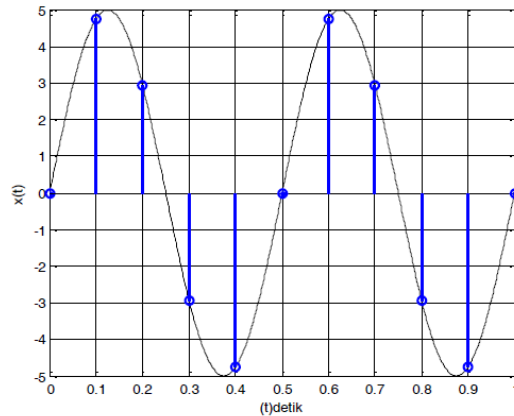


Contoh

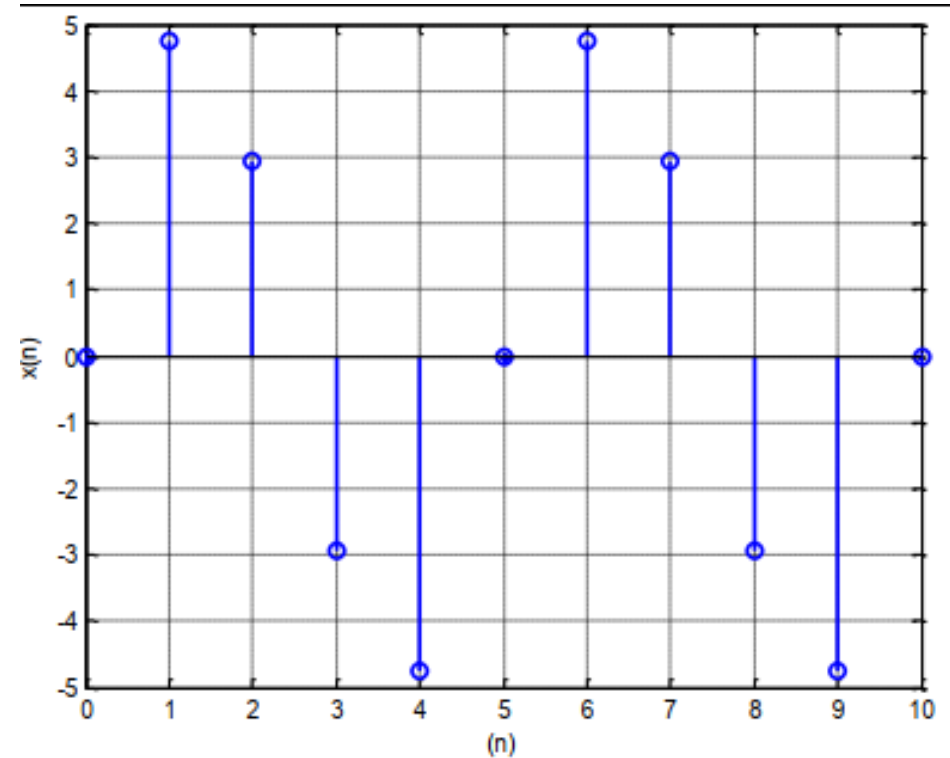
Buat ilustrasi grafik untuk sinyal sinusoida $x_a(t) = 5 \sin(\omega_a t)$, frekuensi analog = 2 Hz, dicuplik sebanyak 10 cuplikan perdetik.



sinyal sinusoida
 $x_a(t) = 5 \sin(\omega_a t)$



sinyal sinusoida $x_a(t) = 5 \sin(\omega_a t)$ dicuplik dengan
10 cuplikan atau 10
sampling per detik



Hasil sampling sinyal sinusoida $x_a(t) = 5 \sin(\omega_a t)$ sebanyak
10 cuplikan dalam 1 detik

Pencuplikan Sinyal Analog



Contoh

Karena $F_p = 1/T_p$, maka:

$$F_d = F_a \cdot T_p$$

$$\omega_d = 2\pi F_d = 2\pi F_a T_p$$

$$\omega_d = \omega_a \cdot T_p$$

interval variabel frekuensi sinusoida waktu-kontinu F_a dan frekuensi sinusoida waktu diskrit F_d adalah:

$$-\infty < n < \infty$$
$$-\frac{1}{2} \leq F_d \leq \frac{1}{2} \text{ untuk } -\pi \leq \omega_d \leq \pi,$$

Jika sinusoida waktu-kontinu dicuplik dengan laju frekuensi pencuplikan $F_p = 1/T_p$, frekuensinya harus berada dalam interval:

Pencuplikan Sinyal Analog



$$-\infty < n < \infty$$
$$-\frac{1}{2} \leq F_d \leq \frac{1}{2} \text{ untuk } -\pi \leq \omega_d \leq \pi,$$

Jika sinusoida waktu-kontinu dicuplik dengan laju frekuensi pencuplikan $F_p = 1/T_p$, frekuensinya harus berada dalam interval:

$$-\frac{1}{2} \leq F_d \leq \frac{1}{2}$$
$$-\frac{1}{2} \leq F_a \cdot T_p \leq \frac{1}{2}$$

$$-\frac{1}{2T_p} \leq F_a \leq \frac{1}{2T_p}$$

 Atau:
$$-\frac{1}{2T_p} \leq \frac{\omega_a}{2\pi} \leq \frac{1}{2T_p}$$

$$-\frac{\pi}{T} \leq \omega_a \leq \frac{\pi}{T}$$

 $\Leftrightarrow -\frac{2\pi}{2T} \leq \omega_a \leq \frac{2\pi}{2T}$

Karena itu, nilai frekuensi tertinggi yang sesuai adalah:

$$F_{a \text{ maks}} = \frac{1}{2T} = \frac{F_p}{2}$$

$$\omega_{a \text{ maks}} = \frac{\pi}{T} = \pi \cdot F_p$$

Pencuplikan Sinyal Analog



Contoh

Untuk melihat apa yang terjadi dengan frekuensi-frekuensi di atas $F_p/2$, mari kita perhatikan contoh soal berikut.

$$x_1(t) = 3 \sin 2\pi(10)t$$

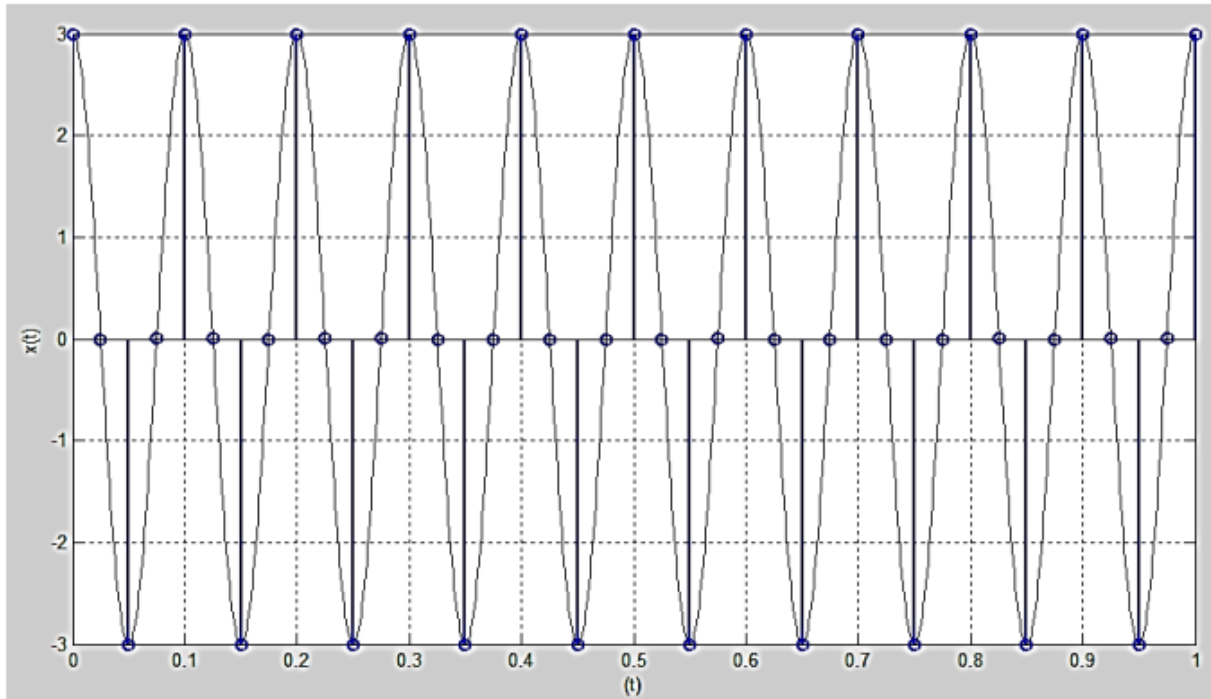
$$x_2(t) = 3 \sin 2\pi(50)t$$

Sinyal dicuplik dengan laju $F_p = 40 \text{ Hz}$. Buat ilustrasi hasil pencuplikan dari setiap sinyal.

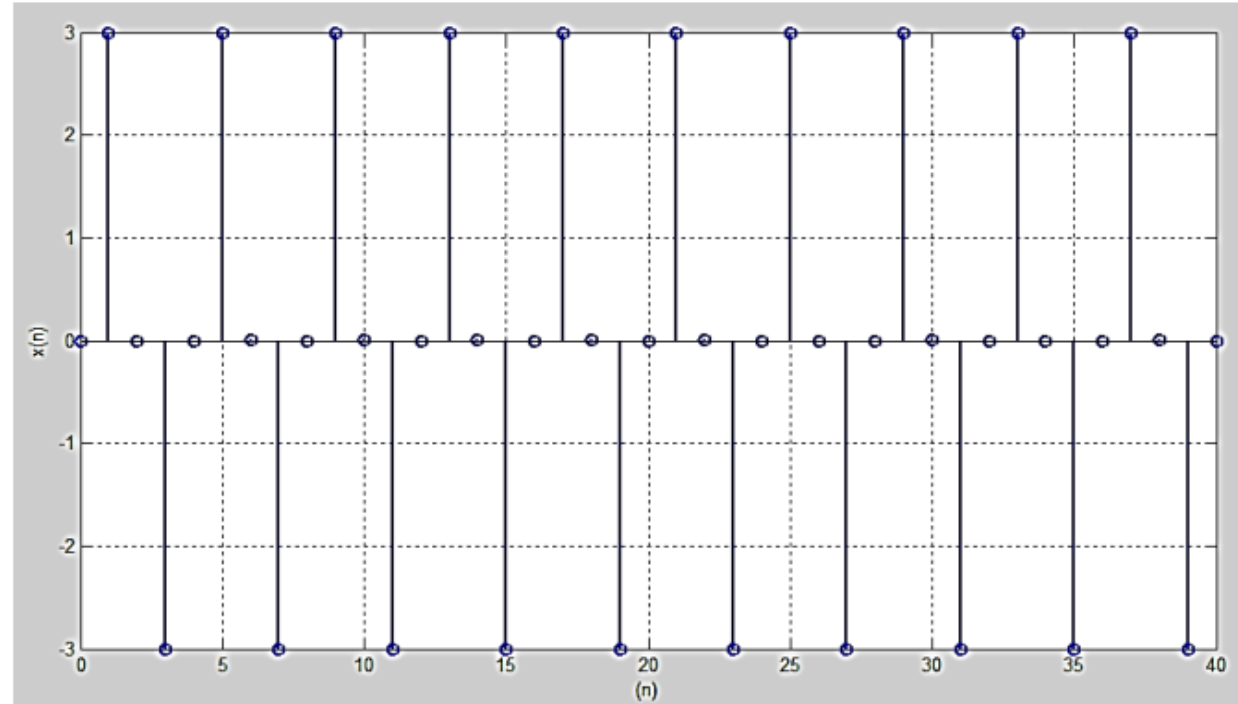
Pencuplikan Sinyal Analog



$$x_1(t) = 3 \sin 2\pi(10)t$$



sinyal sinusoida $x_a(t) = 3 \cos(2\pi 10t)$ dengan frekuensi
pencuplikan 40 Hz

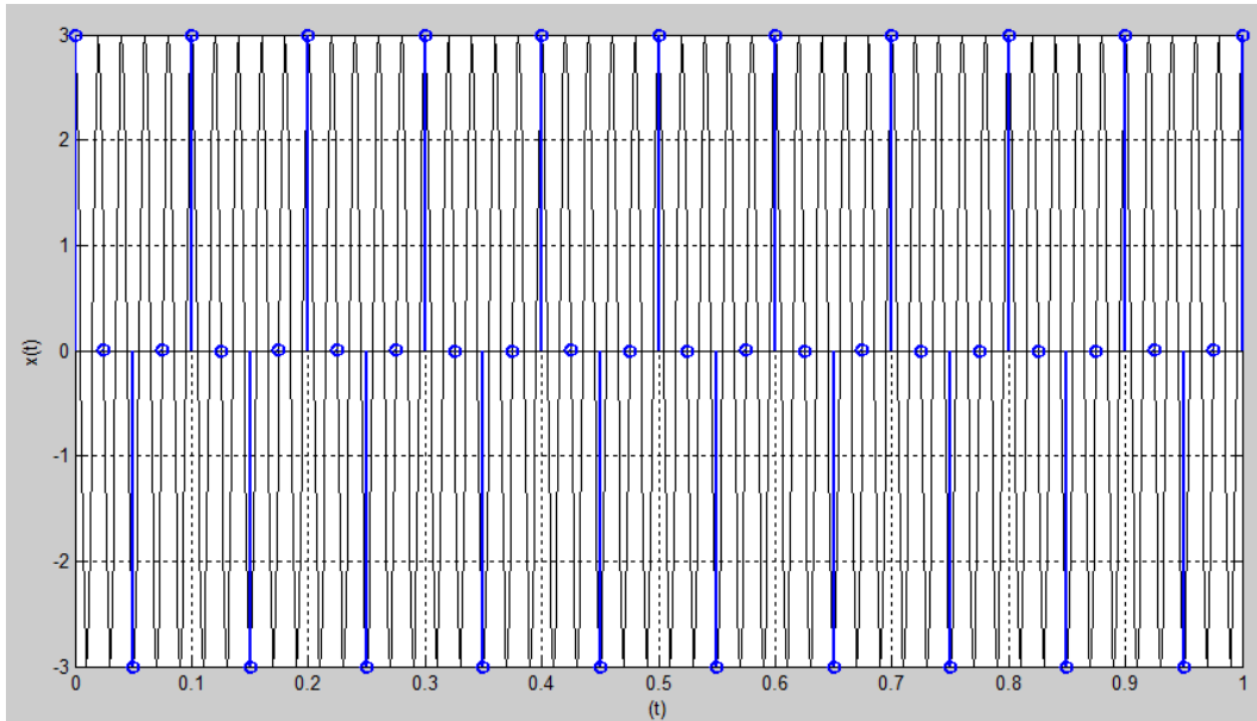


Hasil Pencuplikan sinyal sinusoida $x_a(t) = 3 \cos(2\pi 10t)$
dengan frekuensi pencuplikan 40 Hz

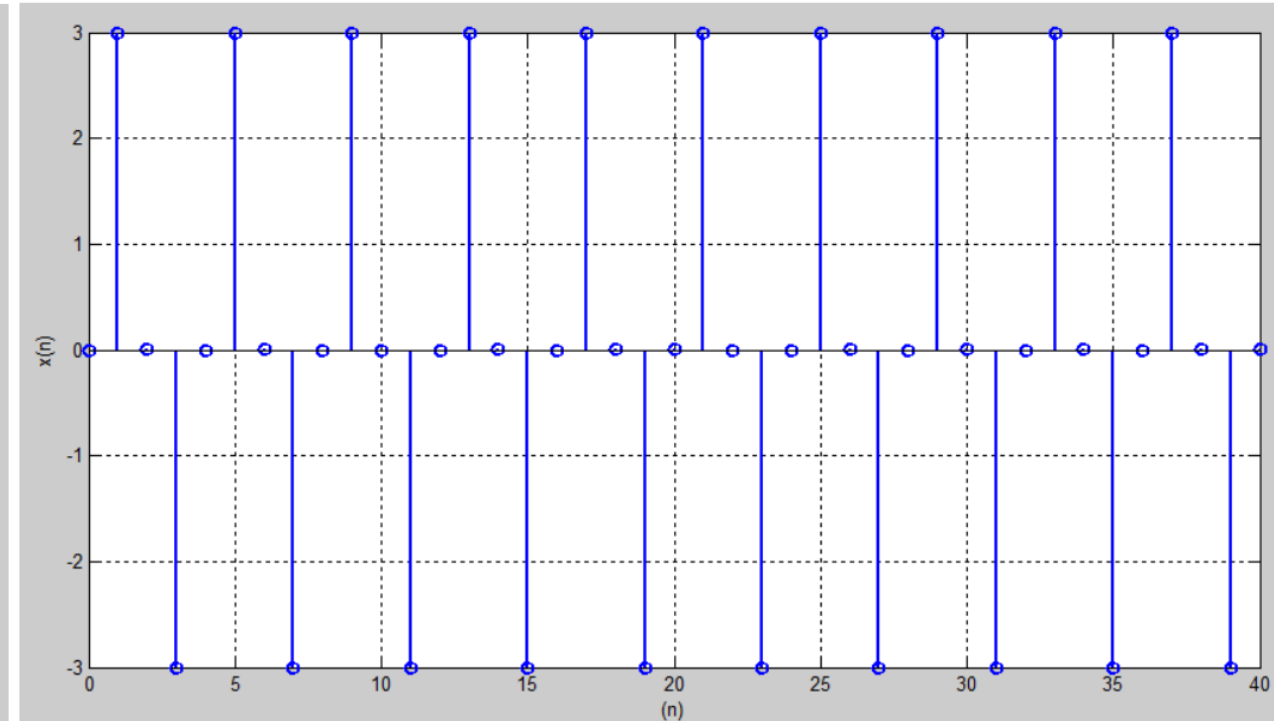
Pencuplikan Sinyal Analog



$$x_2(t) = 3 \sin 2\pi(50)t$$



sinyal sinusoida $x_a(t) = 3 \cos(2\pi 50t)$ dengan frekuensi
pencuplikan 40 Hz

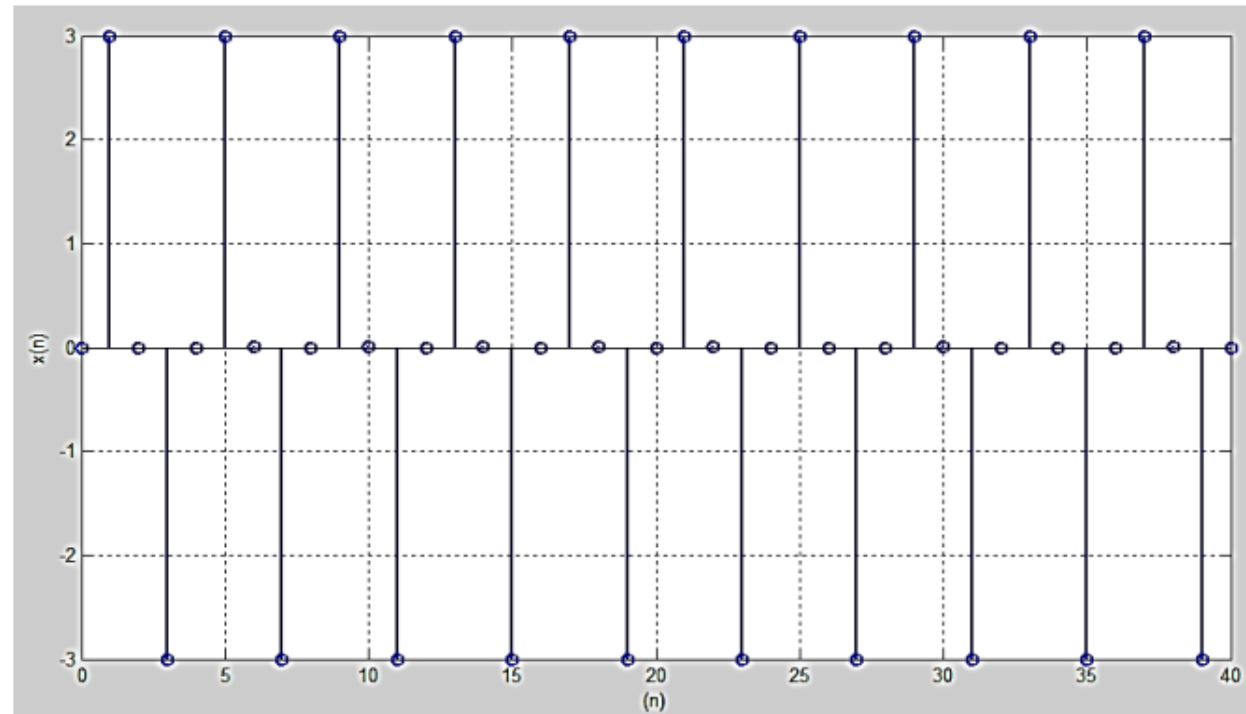


Hasil Pencuplikan sinyal sinusoida $x_a(t) = 3 \cos(2\pi 50t)$
dengan frekuensi pencuplikan 40 Hz

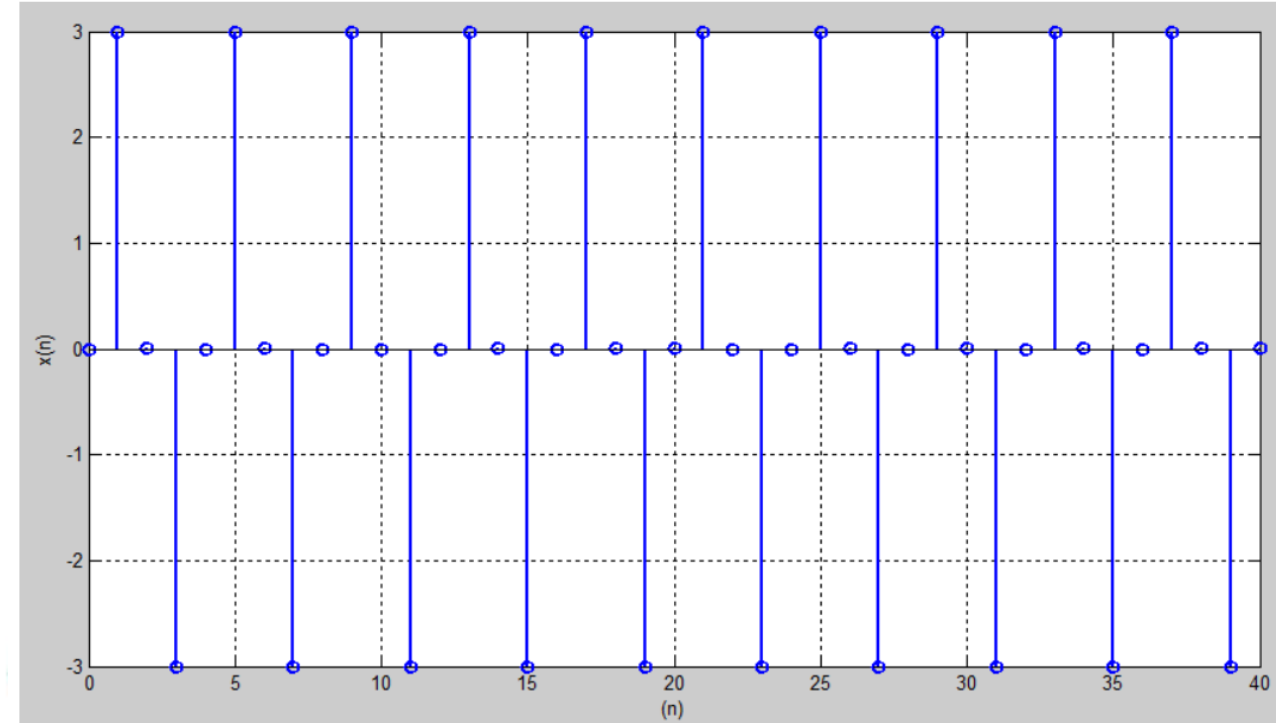
Pencuplikan Sinyal Analog



Hasil Pencuplikan $x_1(t)$ dan $x_2(t)$



Hasil Pencuplikan sinyal sinusoida $x_a(t) = 3 \cos(2\pi 10t)$
dengan frekuensi pencuplikan 40 Hz



Hasil Pencuplikan sinyal sinusoida $x_a(t) = 3 \cos(2\pi 50t)$
dengan frekuensi pencuplikan 40 Hz

Pencuplikan Sinyal Analog



Hasil pencuplikan diatas memiliki hasil yang sama, analisisnya adalah:

$$x_1(t) = 3 \sin 2\pi(10)t \implies F_{a1} = 10 \text{ Hz}; F_{a1} < F_p/2$$

$$x_2(t) = 3 \sin 2\pi(50)t \implies F_{a2} = 50 \text{ Hz}; F_{a2} < F_p/2$$

Yang dicuplik dengan laju $F_p = 40 \text{ Hz}$. Maka sinyal waktudiskrit yang dihasilkan adalah:

$$x_1(n) = \cos 2\pi \left(\frac{10}{40} \right) n = \cos \frac{\pi}{2} n$$

$$x_2(n) = \cos 2\pi \left(\frac{50}{40} \right) n = \cos \frac{5\pi}{2} n$$

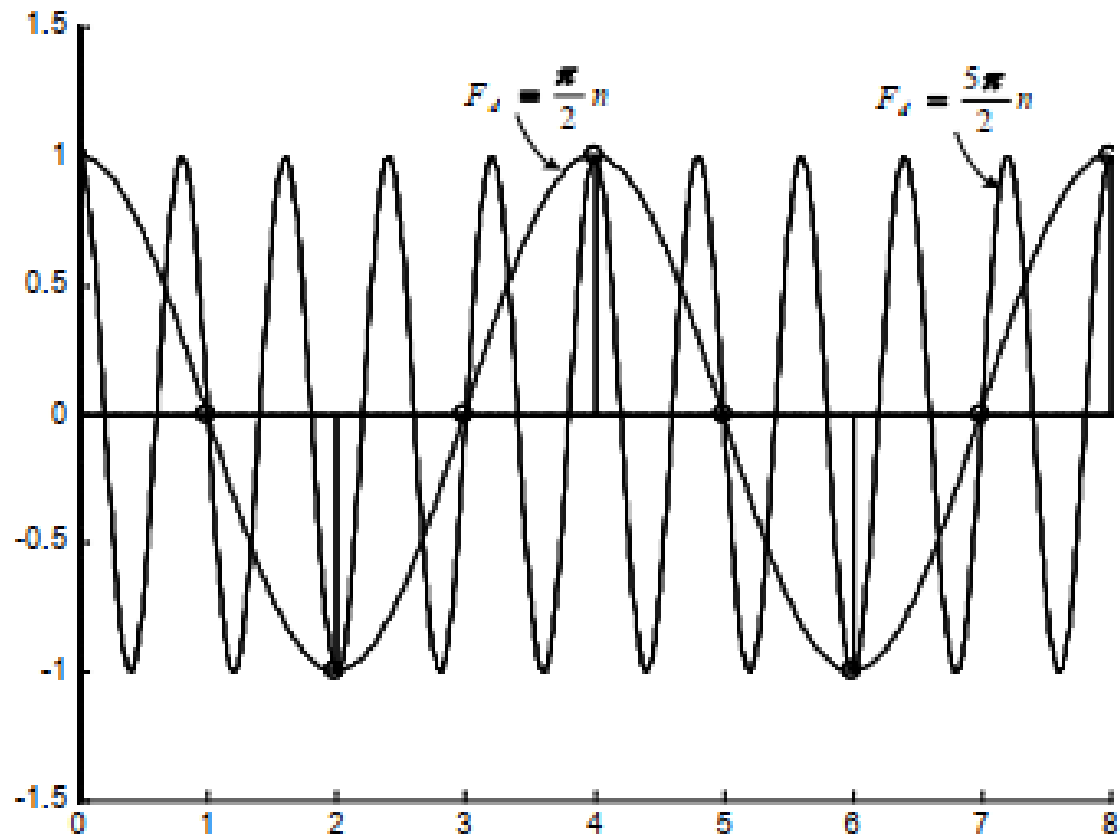
Yang dicuplik dengan laju $F_p = 40 \text{ Hz}$. Maka sinyal waktu-diskrit yang dihasilkan adalah:

$$x_1(n) = \cos 2\pi \left(\frac{10}{40} \right) n = \cos \frac{\pi}{2} n$$

$$x_2(n) = \cos 2\pi \left(\frac{50}{40} \right) n = \cos \frac{5\pi}{2} n$$

Padahal, $\cos \frac{5\pi}{2} n = \cos \left(2\pi n + \frac{\pi}{2} n \right) = \cos \frac{\pi}{2} n$, artinya kedua sinyal tersebut adalah identik. Bisa dikatakan **$x_1(t)$ adalah alias dari $x_2(t)$** dengan laju pencuplikan $F_p = 40 \text{ Hz}$, atau 40 cuplikan per-detik. Namun sinyal $x_3(t)$, $x_4(t)$, ..., dst pada frekuensi $f_{a3} = 90 \text{ Hz}$, $f_{a4} = 130 \text{ Hz}$, ... dst, juga merupakan alias dari sinyal $x_1(t)$. Dikenal sebagai **fenomena pengaliansan (aliasing)**.

Pencuplikan Sinyal Analog

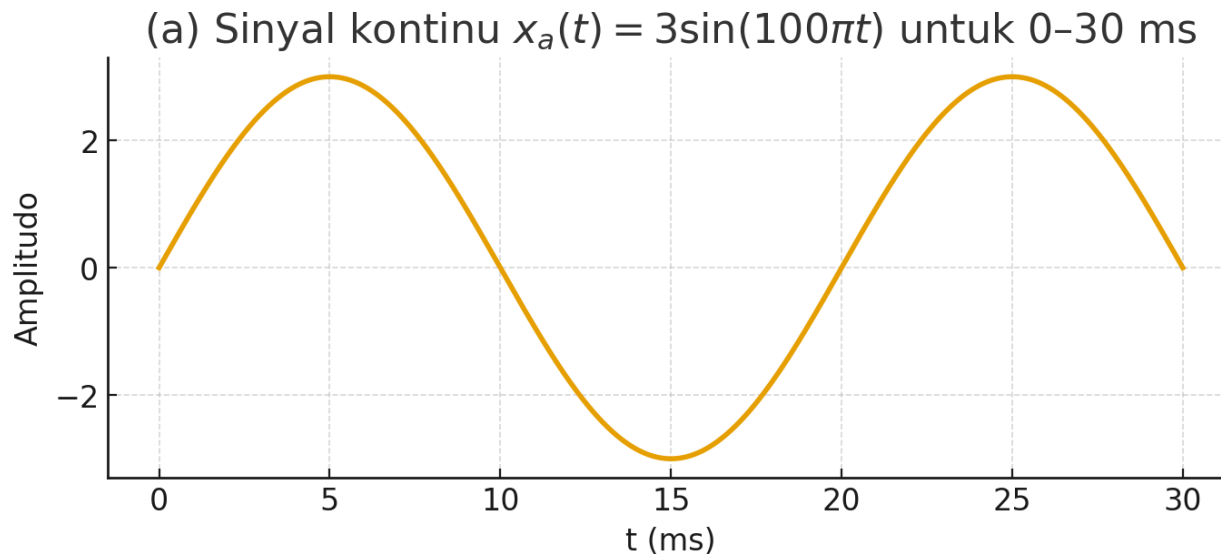


Soal



Diketahui persamaan sinyal sinusoida analog: $x_a(t) = 3\sin(100\pi t)$

- Buatlah sketsa sinyal $x_a(t)$ untuk $0 \leq t \leq 30$ ms
- Sinyal $x_a(t)$ dicuplik dengan laju pencuplikan $F_p = 300$ cuplikan/s. Tentukan frekuensi sinyal waktu-diskrit $x(n) = x_a(nT)$, $T = 1/F_p$, dan perhatikan bahwa sinyal tersebut periodik.



(a) Sketsa $x_a(t)$ untuk $0 \leq t \leq 30$ ms

- Amplitudo: $A = 3$.
- Frekuensi sudut: $\omega = 100\pi$ rad/s.
- Frekuensi: $f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{100\pi}{2\pi} = 50$ Hz.
- Periode waktu kontinu: $T_0 = \frac{1}{f} = 0,02$ s = 20 ms.

Sketsa dari 0–30 ms memperlihatkan 1,5 periode sinyal:

- $t = 0$: $x_a(0) = 0$ (menanjak).
- $t = 5$ ms ($T_0/4$): puncak = +3.
- $t = 10$ ms ($T_0/2$): nol.
- $t = 15$ ms ($3T_0/4$): lembah = -3.
- $t = 20$ ms: kembali 0 (selesai 1 periode).
- $t = 25$ ms: puncak lagi = +3.
- $t = 30$ ms: menuju nol (setengah periode tambahan).

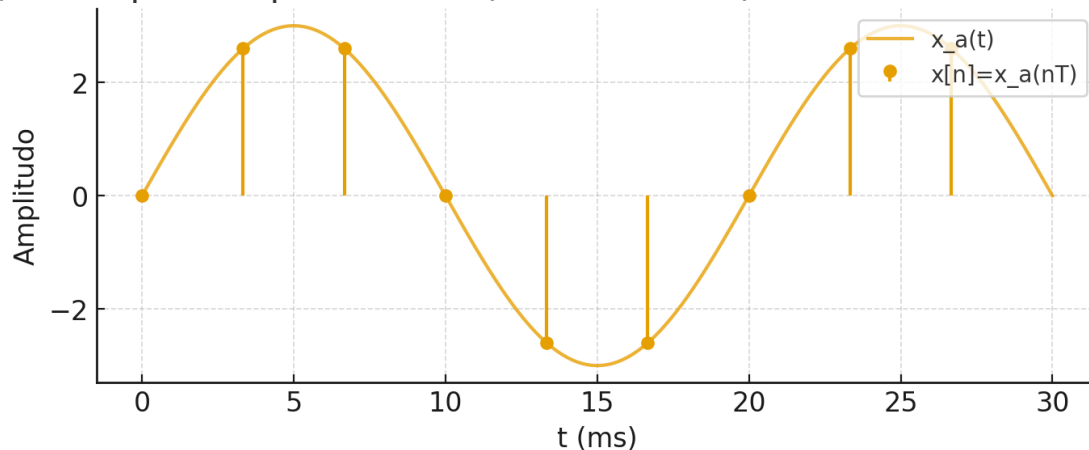
Soal



Diketahui persamaan sinyal sinusoida analog: $x_a(t) = 3\sin(100\pi t)$

- Buatlah sketsa sinyal $x_a(t)$ untuk $0 \leq t \leq 30$ ms
- Sinyal $x_a(t)$ dicuplik dengan laju pencuplikan $F_p = 300$ cuplikan/s. Tentukan frekuensi sinyal waktu-diskrit $x(n) = x_a(nT)$, $T = 1/F_p$, dan perlihatkan bahwa sinyal tersebut periodik.

(b) Pencuplikan $F_p = 300$ Hz ($T = 3.333$ ms) — Periodik $N_0 = 6$ sampel



(b) Pencuplikan dengan $F_p = 300$ cuplikan/s

- Periode cuplik: $T = \frac{1}{F_p} = \frac{1}{300}$ s = 3,333 ms.
- Sinyal diskrit: $x[n] = x_a(nT) = 3\sin(\omega nT)$.

Sinyal waktu-diskrit $x(n)$ didapat dengan mengganti t dengan nT : $x(n) = x_a(nT) = 3\sin(100\pi \cdot nT)$
 $x(n) = 3\sin(100\pi \cdot n \cdot \frac{1}{300})$
 $x(n) = 3\sin(\frac{100\pi}{300}n)$
 $x(n) = 3\sin(\frac{\pi}{3}n)$

Frekuensi diskrit (rad/sampel):

$$\Omega = \omega T = 100\pi \cdot \frac{1}{300} = \frac{\pi}{3} \text{ rad/sampel.}$$

Dalam "cycle per sampel":

$$f_d = \frac{f}{F_p} = \frac{50}{300} = \frac{1}{6} \text{ cycle/sampel.}$$

Periode diskrit (dalam jumlah sampel):

$$N_0 = \frac{2\pi}{\Omega} = \frac{2\pi}{\pi/3} = 6 \text{ sampel.}$$

Karena N_0 bilangan bulat, $x[n]$ periodik dengan periode 6 sampel.