

Την Τρίτη μάθημα 8:30 χωρίς διάλειμμα

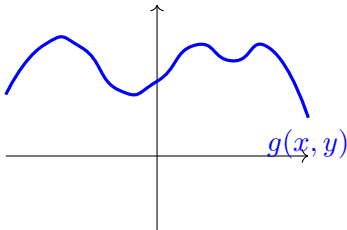
Σήμα - σύστημα

$$\underbrace{g}_{\text{εξαρτημένη}} = f(\underbrace{t}_{\text{ανεξάρτητη}})$$

$$g = f(\vec{r}, t) \quad \vec{E}(\vec{r}, t)$$

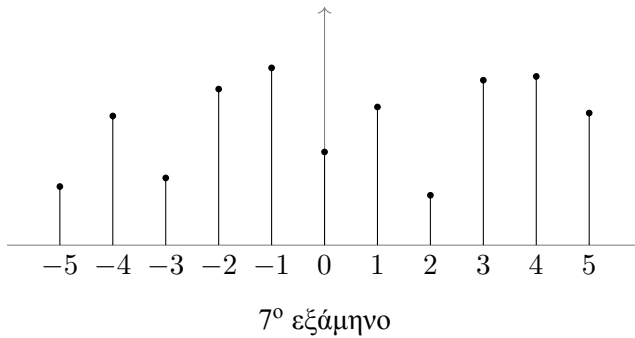
Αναλογικό

Αν t συνεχής $\in \mathbb{R}$
και y συνεχής $\in \mathbb{R}$



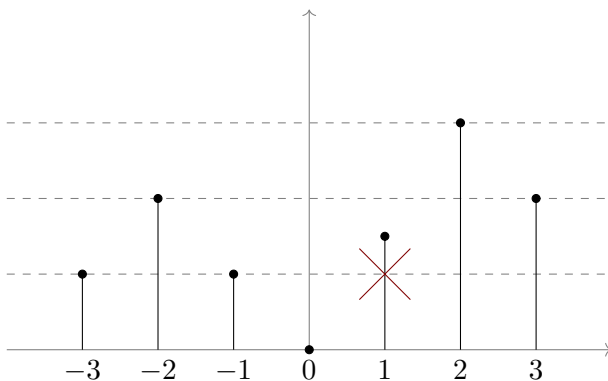
Διακριτού χρόνου / Διακριτό (discrete)

t διακριτό $\rightarrow \mathbb{Z}, n \in \mathbb{Z}$
 g συνεχής $\in \mathbb{R}$



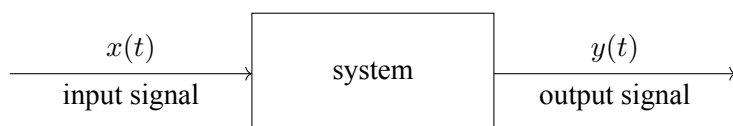
Κβαντισμένο

$n \in \mathbb{Z}$
 g διακριτή



Στοχαστικό Περιέχει και τις τρεις κατηγορίες

0.1 Σύστημα



0.2 Περιοδικά σήματα

Αν $\exists T \in \mathbb{R} : \forall t \in \mathbb{R} \quad x(t) = x(t + T)$ τότε $x(t)$ **περιοδικό σήμα** με περίοδο T .
Ή θα είναι 0, ή θα συνεχιστεί για πάντα.

$$\int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt = \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} x(t) dt \quad \forall t$$

Η σύνθεση μιας συνάρτησης με μια περιοδική συνάρτηση είναι περιοδική;

Απόδ. Έστω g μία περιοδική συνάρτηση:

$$\begin{aligned} (f \circ g)(x) &= f(g(x)) = f(g(x + T)) = \\ &= (f \circ g)(x + T) \end{aligned}$$

0.3 Συμμετρίες

- Αν $x(t) = x(-t) \quad \forall t$ τότε η $x(t)$ λέγεται **άρτια συνάρτηση** (even function).
- Αν $x(t) = -x(-t) \quad \forall t$ τότε η $x(t)$ λέγεται **περιττή συνάρτηση** (odd function).

$$\forall x(t) \quad \exists x_0(t), x_e(t) : x(t) = x_e(t) + x_0(t)$$

Απόδ.

$$\begin{aligned} x_e(t) &= \frac{x(t) + x(-t)}{2} \\ x_o(t) &= \frac{x(t) - x(-t)}{2} \end{aligned}$$

$$\underbrace{x_e}_{\text{άρτια}} y_e = z_e$$

$$x_o y_o = z_e$$

$$x_e y_o = z_o$$

$$\int_{-A}^A x_o(t) dt = 0$$

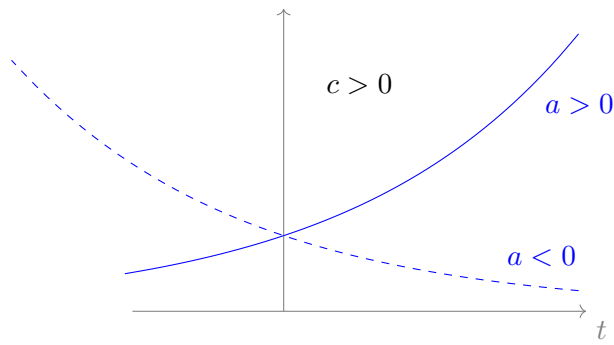
$$\int_{-\infty}^{\infty} x_o(t) dt = ? \text{ (εξαρτάται)}$$

$$\lim_{A \rightarrow \infty} \int_{-A}^A x_o(t) dt = 0 \quad (\text{principal Cauchy value})$$

Χαρακτηριστικά σήματα

1) Εκθετικό σήμα

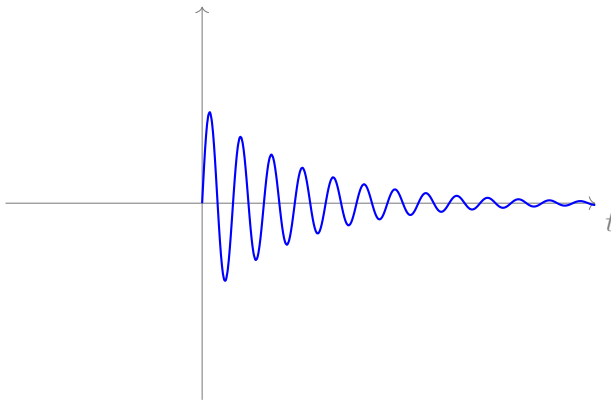
$$x(t) = ce^{at} \quad a \in \mathbb{R} \quad c > 0$$



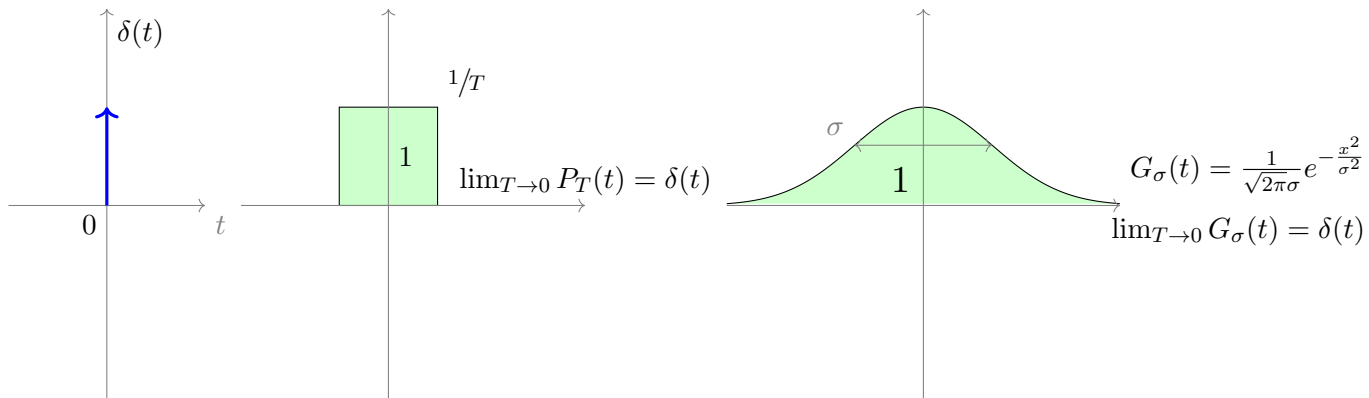
$$x(t) = ce^{(\sigma t + j\omega)t} = ce^{\sigma t} e^{j\omega t} = ce^{\sigma t} [\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)]$$

2) (Συν)ημιτονοειδή σήματα

$$x(t) = A \cos(\omega t \pm \phi) = a \operatorname{Re} \left\{ e^{j(\omega t \pm \phi)} \right\} = A \frac{e^{j(\omega t \pm \phi)} + e^{-j(\omega t \pm \phi)}}{2}$$



3) Δέλτα Dirac $\delta(t)$



Ορ.

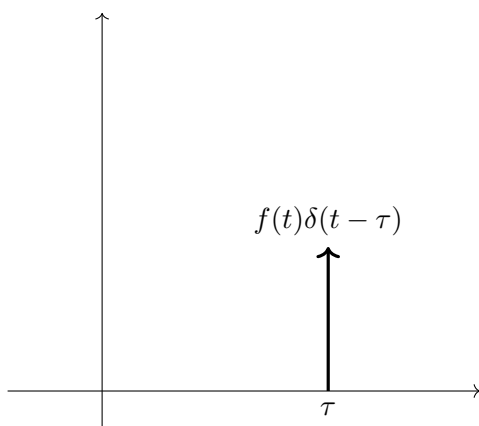
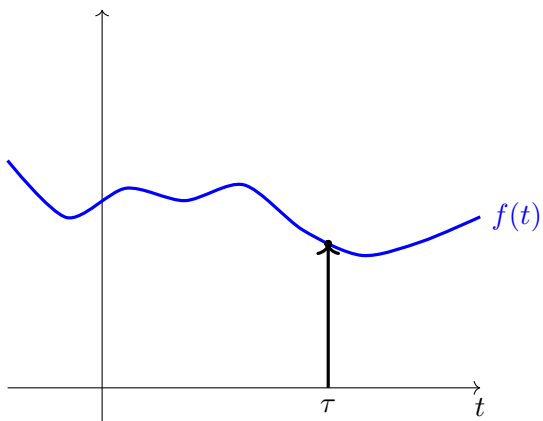
$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t) dt = f(0) \quad \forall f(t)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - \tau) dt = f(\tau)$$

$$\boxed{\int_{-\infty}^{\infty} f(\tau) \delta(t - \tau) d\tau = f(t)}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \delta(t - \tau) d\tau = f(t)$$



Ιδιότητες της $\delta(t)$

1. Κλιμάκωση

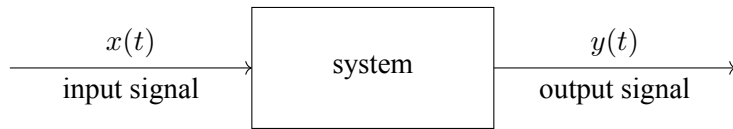
$$a \in \mathbb{R} : \delta(at) = \frac{1}{|a|} \delta(t)$$

Απόδ.

$$\underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \boxed{\delta(at)} dt}_{\substack{at = \xi \\ dt = \frac{d\xi}{a}}} = \int_{-\infty(a)}^{\infty(a)} \phi\left(\frac{\xi}{a}\right) \delta(\xi) \frac{d\xi}{a} = \frac{1}{|a|} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\phi\left(\frac{\xi}{a}\right)}{|a|} \delta(\xi) d\xi = \frac{\phi(0)}{|a|} = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \boxed{\frac{\delta(t)}{|a|}} dt$$

$$2. f(t)\delta(t) = f(0)\delta(t)$$

$$3. f(t)\delta(t - \xi) = f(\xi)\delta(t - \xi)$$



$$y(t) = \mathcal{L} \{x(t)\}$$

$$\forall x_1(t) x_n(t)$$

$$y_1(t) = \mathcal{L} \{x_1(t)\}$$

$$y_2(t) = \mathcal{L} \{x_2(t)\}$$

Για const $a_1, a_2 \in \mathbb{R}$

$$x(t) = a_1 x_1(t) + a_2 x_2(t)$$

$$y(t) = \mathcal{L} \{x(t)\}$$

ανν

$$y(t) = a_1 y_1(t) + a_2 y_2(t)$$

τότε

\mathcal{L} : γραμμικό σύστημα

- $g(t) = \mathcal{L} \{x(t)\}$

$$x'(t) = x(t - \tau)$$

$$\text{ανν } y'(t) = \mathcal{L} \{x'(t)\} = \mathcal{L} \{x(t - \tau)^2\} = y(t - \tau)$$

τότε το σύστημα \mathcal{L} είναι αμετάβλητο κατά τη μετατόπιση.



Υποστηρίζω ότι ένα γραμμικό & AKM σύστημα περιγράφεται πλήρως από την κρουστική απόκριση $h(t)$.

Απόδ. Από παραπάνω, γνωρίζουμε ότι $x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\delta(t - \tau) d\tau$

$$y(t) = \mathcal{L} \{y(t)\} = \mathcal{L} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\delta(t - \tau) d\tau \right\}$$

$$\stackrel{\text{linearity}}{=} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{L} \{x(\tau)\delta(t - \tau)\} d\tau$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \mathcal{L} \{\delta(t - \tau)\} d\tau$$

$$\stackrel{\text{AKM}}{\stackrel{\text{TSI}}{=}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \underbrace{h(t - \tau)}_{\text{linear time-shift invariant}} d\tau$$

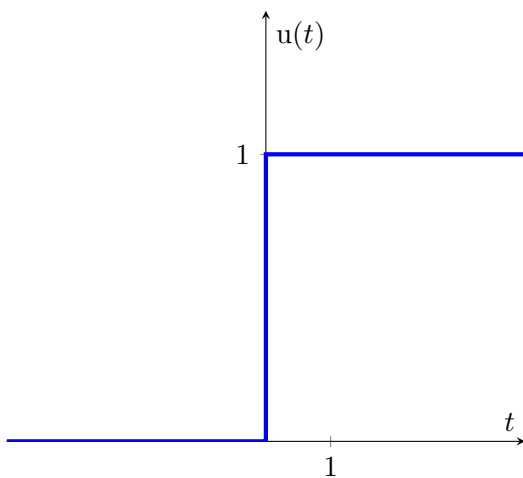
- $\delta(t) = \delta(-t)$ άρτια συνάρτηση
- $\delta^{(n)}(t) = \frac{d^n}{dt^n} \delta(t)$, για την οποία αποδεικνύεται ότι:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta^{(n)}(t) \phi(t) dt = (-1)^n \phi^{(n)}(t) \Big|_{t=0}$$

0.3.1 Βηματική Συνάρτηση (Unit Step Function)

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} u(t) \phi(t) dt = \mathcal{N}_u \{ \phi(t) \} = \int_0^{\infty} \underbrace{\phi(t)}_{\text{number}} dt$$

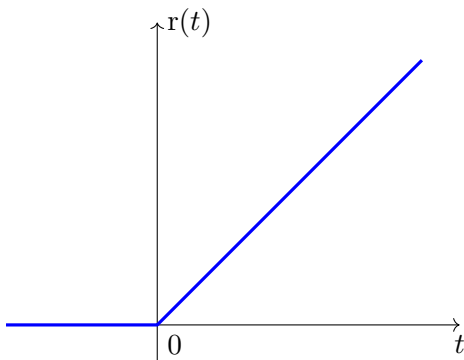


$$\delta(t) = \frac{d}{dt} u(t)$$

$$u(t) = \int_{-\infty}^t \delta(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} \delta(t - \xi) d\xi$$

0.3.2 Ράμπα

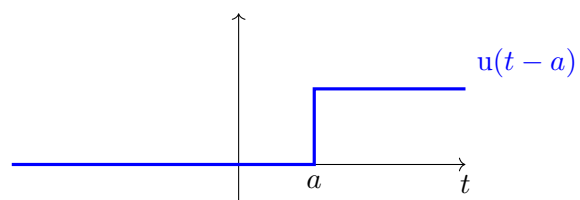
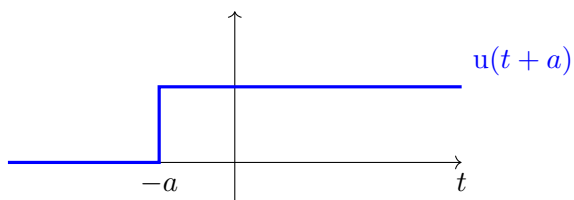
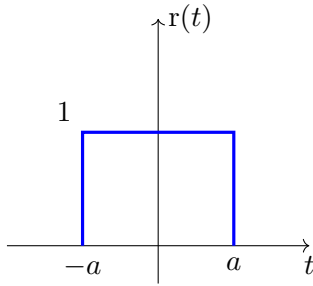
$$r(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau = \begin{cases} t & t \geq 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} = tu(t)$$



$$u(t) = \frac{d}{dt} r(t)$$

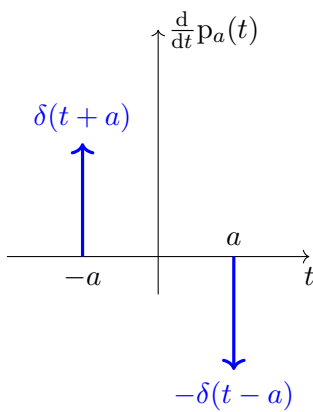
0.3.3 Ορθογωνικός παλμός (Rectangular Pulse function)

$$p_a(t) = \begin{cases} 1 & |t| < a \\ 0 & |t| > a \end{cases}$$



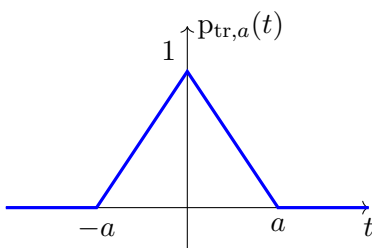
$$p_a(t) = u(t+a) - u(t-a)$$

$$\frac{d}{dt}p_a(t) = \delta(t+a) - \delta(t-a)$$

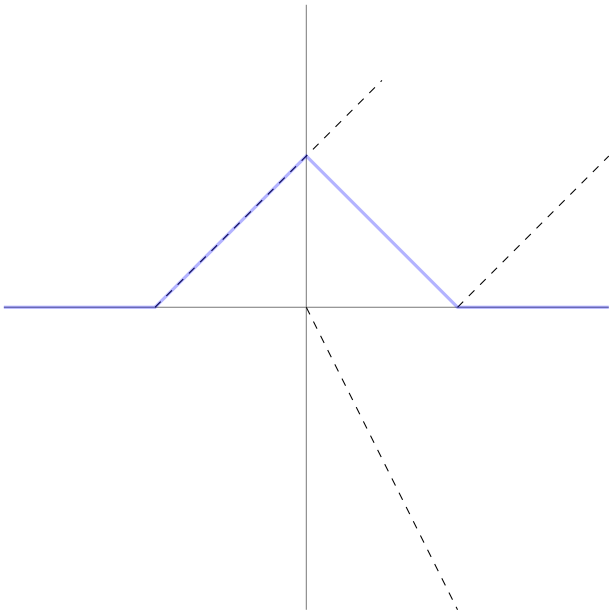


0.3.4 Τριγωνικός Παλμός (Triangular Pulse function)

$$p_{tr,a} = \begin{cases} 1 - \frac{|t|}{a} & |t| < a \\ 0 & |t| > a \end{cases}$$



$$p_{tr,a}(t) = \frac{1}{a} [r(t+a) + r(t-a) - 2r(t)]$$



0.4 Χαρακτηριστικά Μεγέθη

1) Μέση τιμή (Mean Value)

$$\overline{x(t)} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} x(t) dt$$

Αν περιοδική τότε

$$\begin{aligned} \bar{x}(t) &= \frac{1}{T} = \int_0^T x(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) dt \end{aligned}$$

2) Ενεργός τιμή (Root Mean Square Value)

$$\overline{\overline{x(t)}} = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt \right]^{1/2}$$

Αν ημιτονοειδές σήμα $\bar{x}(t) = \frac{x_{\max}}{\sqrt{2}}$

3) Ενέργεια - Ισχύς

- Στιγμιαία ισχύς (Instant power)

$$p(t) = x^2(t)$$

- Μέση ισχύς (Mean power)

$$\overline{p(t)} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt = \left(\overline{\overline{x(t)}} \right)^2$$

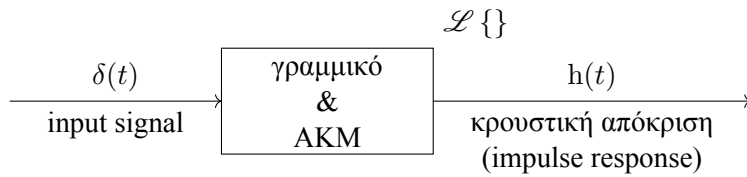
- Ενέργεια (Energy)

$$W = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt = \int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt = (t_2 - t_1) \left(\overline{\overline{x(t)}} \right)^2$$

$$\text{Σήματα} \begin{cases} \text{Σήμα ενέργειας αν } \lim_{T \rightarrow \infty} W < \infty \\ \text{Σήμα ισχύος αν } \lim_{T \rightarrow \infty} \overline{p(t)} > 0 \\ \text{Υπάρχουν και σήματα που δεν είναι ούτε ενέργειας, ούτε ισχύος.} \end{cases}$$

0.5 Συνέλιξη

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \delta(t - \tau) d\tau$$



$$h(t) = \mathcal{L}\{\delta(t)\}$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) d\tau = \underbrace{x(t)}_{\text{είσοδος}} \underbrace{*}_{\text{συνέλιξη}} \underbrace{h(t)}_{\text{κρουστική απόκριση}}$$

Συνέλιξη - Convolution

$$z(t) = x(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) y(t - \tau) d\tau$$

- $x(t) * y(t) = y(t) * x(t)$ **Αντιμεταθετική**

$$\int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) y(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \lambda) y(\lambda) [-d\lambda] = \int_{-\infty}^{\infty} y(\lambda) x(t - \lambda) d\lambda = y(t) * x(t)$$

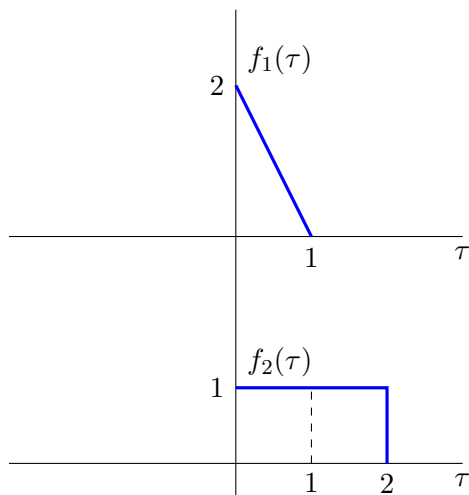
- $x_1(t) * [x_2(t) * x_3(t)] = [x_1(t) * x_2(t)] * x_3(t)$ **Προσεταιριστική**

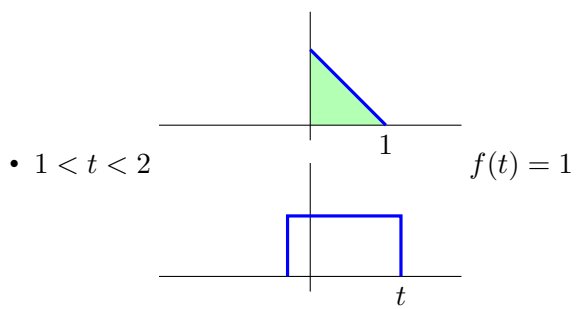
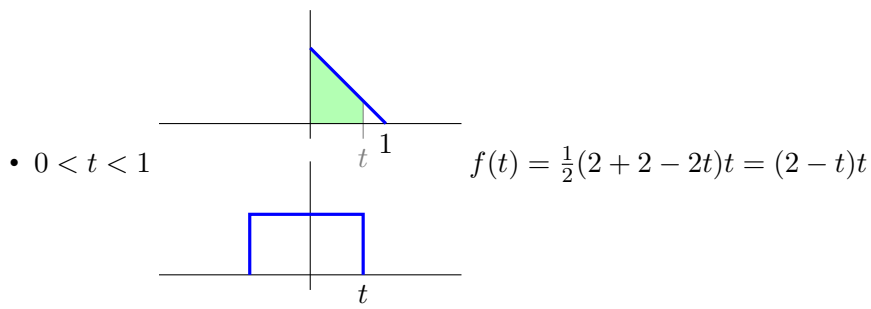
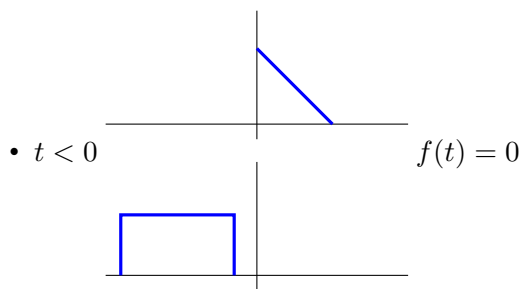
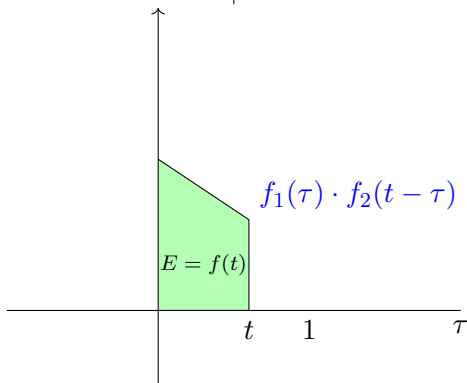
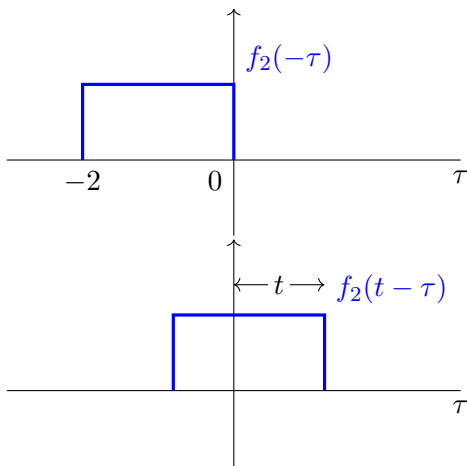
Παρ.

$$f_1(t) = 2(1 - t) [u(t) - u(t - 1)]$$

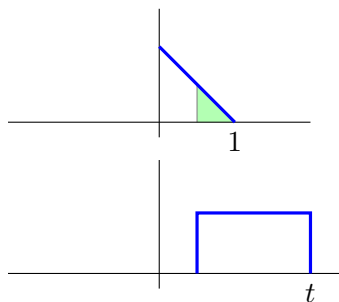
$$f_2(t) = u(t) - u(t - 2)$$

Γραφική μέθοδος υπολογισμού συνέλιξης



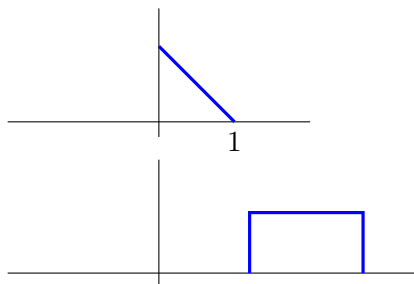


$$\bullet \quad 2 < t < 3$$

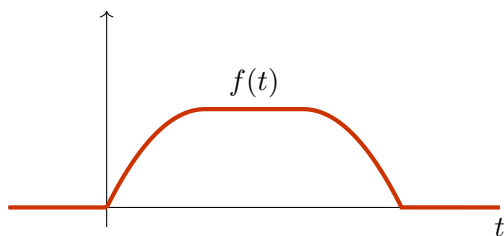


$$f(t) = \frac{(t-1) \cdot 2 \cdot \left(\frac{1-(t-2)}{2}\right)}{2} = (t-1)(3-t)$$

$$\bullet \quad t > 3$$



$$f(t) = 0$$



Αναλυτική μέθοδος Παρατηρώ ότι:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t, \tau) u(t - \xi) u(\phi - \tau) d\tau = \int_{\xi}^{\phi} f(t, \tau) d\tau u(\phi - \xi)$$

$$\begin{aligned} f(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \underbrace{2(1-\tau)}_{x(\tau)} [u(\tau) - u(\tau+1)] [u(t-\tau) - u(t-\tau-2)] d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) [u(\tau)u(t-\tau) - u(\tau-1)u(t-\tau) - u(\tau)u(t-\tau-2) + u(\tau-1)u(t-\tau-2)] d\tau \\ &= \int_0^t x(\tau) d\tau u(t) - \int_1^x x(\tau) d\tau u(t-1) - \int_0^{t-2} x(\tau) d\tau u(t-2) + \int_1^{t-2} x(\tau) d\tau u(t-3) \\ &= (2t-t^2)u(t) - [2t-t^2-1]u(t-1) - [2(t-2)-(t-2)^2]u(t-2) + [2(t-2)-(t-2)^2-1]u(t-3) \end{aligned}$$

Ex

$$f_1(t) = e^t u(-t)$$

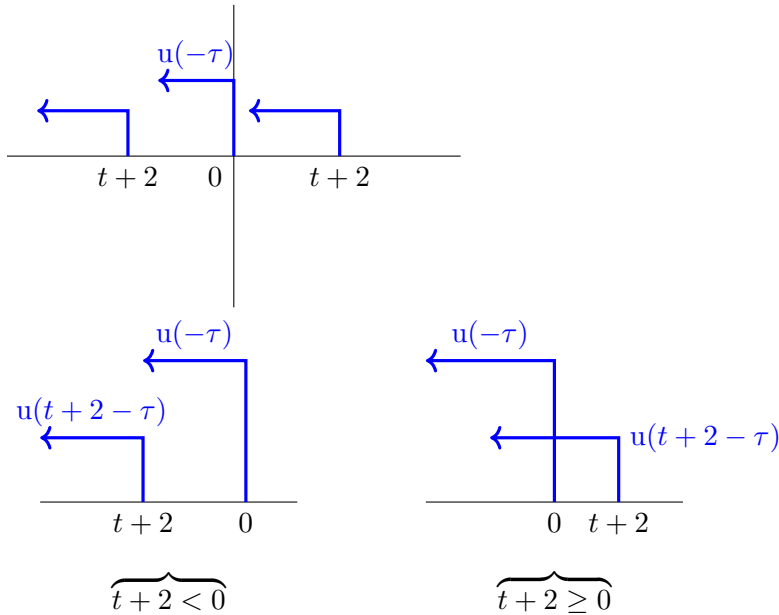
$$f_2(t) = u(t+2) - u(t+1)$$

$$f = f_1 * f_2$$

$$\begin{aligned}
f &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(-\tau) u(-(t-\tau)+2) d\tau \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(-\tau) u(\tau-t+2) d\tau \\
&= \int_{t-2}^0 e^{\tau} d\tau u(2-t) \\
&= e^{\tau} \Big|_{t-2}^0 u(2-t) \\
&= [1 - e^{t-2}] u(2-t)
\end{aligned}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t, \tau) u(\tau - \xi) u(\phi - \tau) d\tau = \int_{\xi}^{\phi} f(t, \tau) d\tau u(\phi - \xi)$$

Ex.



$$x(t) = e^t u(-t)$$

$$y(t) = u(t+2)$$

$$\begin{aligned}
z(t) &= x(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(-\tau) u[(t-\tau)+2] d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(-\tau) u(t+2-\tau) d\tau \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} [1 - u(t)] u(t+2-\tau) d\tau \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(t+2-\tau) d\tau - \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(\tau) u(t+2-\tau) d\tau \\
&= \int_{-\infty}^{t+2} e^{\tau} d\tau u(t+2 - (-\infty)) \overset{1}{\rightarrow} - \int_0^{t+2} e^{\tau} d\tau u(t+2) \\
&= e^{t+2} - [e^{t+2} - 1] u(t+2)
\end{aligned}$$

Ex.

$$x(t) = e^t u(-t)$$

$$y(t) = u(t+2) - u(t+1)$$

$$\begin{aligned} z(t) &= x(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) y(t-\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(-\tau) [u(t-\tau+2) - u(t-\tau+1)] d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(-\tau) u(t-\tau+2) d\tau - \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(-\tau) u(t-\tau+1) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} [1 - u(\tau)] u(t-\tau+2) d\tau - \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} [1 - u(\tau)] u(t-\tau+1) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(t-\tau+2) d\tau - \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(\tau) u(t-\tau+2) d\tau - \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(t-\tau+1) d\tau + \int_{-\infty}^{\infty} e^{\tau} u(\tau) u(t-\tau+1) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{t+1} e^{\tau} d\tau - \int_{-\infty}^{t+1} e^{\tau} d\tau - \int_0^{t+2} e^{\tau} d\tau u(t+2) + \int_0^{t+1} e^{\tau} d\tau u(t+1) \\ &= \int_{t+1}^{t+2} e^{\tau} d\tau - [e^{t+2} - 1] u(t+2) + [e^{t+1} - 1] u(t+1) \end{aligned}$$

$\exists h(t)$ ανν LTI

$$\begin{aligned} y(t) &= x(t) * h(t) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t-\tau) d\tau \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) x(t-\tau) d\tau \end{aligned}$$

Έστω ότι η $x(t) = e^{j\omega t}$

$$\begin{aligned} y(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{j\omega(t-\tau)} d\tau = e^{j\omega t} \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \\ &= x(t) \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau}_{h(t) \xrightarrow{FT} H(\omega)} \end{aligned}$$

$$x(t) = A_1 e^{j\omega_1 t} + A_2 e^{j\omega_2 t}$$

$$y(t) = A_1 e^{j\omega_1 t} H(\omega_1) + A_2 e^{j\omega_2 t} H(\omega_2)$$

Κεφάλαιο 1 Συναρτησιακοί χώροι

Διανυσματικός χώρος S

$$\bar{x}, \bar{y} \in S$$

Εσωτερικό γινόμενο

$$\langle \bar{x}, \bar{y} \rangle \in \mathbb{C}$$

$$1) \langle \bar{x}, \bar{y} \rangle = \langle \bar{y}, \bar{x} \rangle^*$$

$$2) c \langle \bar{x}, \bar{y} \rangle = \langle c\bar{x}, \bar{y} \rangle$$

$$3) \langle \bar{x} + \bar{y}, \bar{z} \rangle = \langle \bar{x}, \bar{z} \rangle + \langle \bar{y}, \bar{z} \rangle$$

$$4) \langle \bar{x}, \bar{x} \rangle \geq 0 \text{ με } \langle \bar{x}, \bar{x} \rangle = 0 \text{ ανν } \bar{x} = \bar{0}$$

Νόρμα

$$\bar{x} \in S$$

$$\|\bar{x}\| \geq 0$$

$$1) \|\bar{x}\| = 0 \text{ ανν } \bar{x} = \bar{0}$$

$$2) \|a\bar{x}\| = |a| \|\bar{x}\| \quad x \in \mathbb{C}$$

$$3) \|\bar{x} + \bar{y}\| \leq \|\bar{x}\| + \|\bar{y}\|$$

Μέτρο: Απόσταση μεταξύ $\bar{x}, \bar{y} \in S$

$$1) d(\bar{x}, \bar{y}) \geq 0 \quad d(\bar{x}, \bar{y}) = 0 \text{ ανν } \bar{x} = \bar{y}$$

$$2) d(\bar{x}, \bar{y}) = d(\bar{y}, \bar{x})$$

$$3) d(\bar{x}, \bar{y}) \leq d(\bar{x}, \bar{z}) + d(\bar{y}, \bar{z}) \quad \bar{z} \in S$$

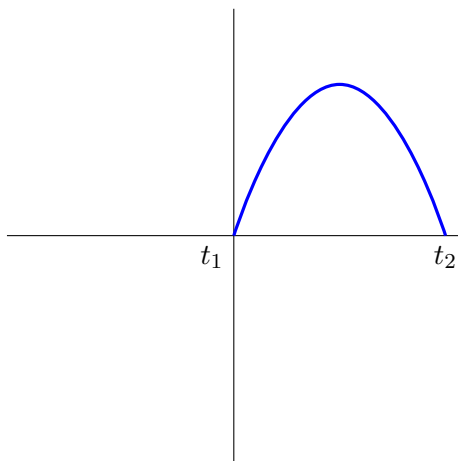
Συναρτησιακός χώρος

$$x(t), y(t) \in S = \{x(t)/x(t) : [t_1, t_2] \rightarrow \mathbb{R}\}$$

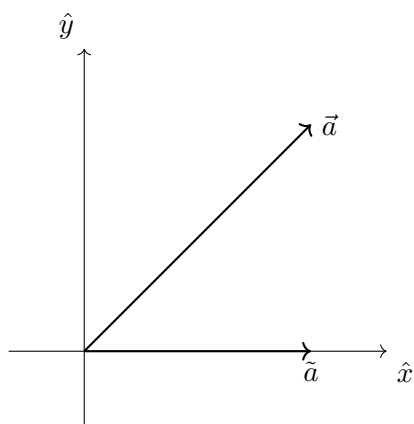
$$\langle x(t), y(t) \rangle = \int_{t_1}^{t_2} x(t)y(t) dt$$

$$\|x(t)\| = \left[\int_{t_1}^{t_2} x^2(t) dt \right]^{1/2}$$

$$d(x(t), y(t)) = \left[\int_{t_1}^{t_2} [x(t) - y(t)]^2 dt \right]^{1/2}$$



$$\begin{aligned} \text{Αν } \langle \phi_1(t), \phi_2(t) \rangle &= 0 & \phi_1(t) &\perp \phi_2(t) \\ \langle \phi_1(t), \phi_1(t) \rangle &= 1 & \phi_1(t) &\text{ κανονική} \end{aligned}$$



Τερατοχώρος

\hat{x}, \hat{y} όχι εξαρτημένα (συνευθειακά)

Ποια είναι η καλύτερη προσέγγιση για το \vec{a} εφ' όσον δεν υπάρχει το \vec{y} ;

\tilde{a} best γιατί $d(\vec{a}, \tilde{a}) \min$.

Άρα:

$$\tilde{a} = k\hat{x}$$

$$\vec{a} = a_x\hat{x} + a_y\hat{y}$$

$$\vec{a} - \tilde{a} = (a_x - k)\hat{x} - a_y\hat{y}$$

$$d(\vec{a}, \tilde{a}) = \sqrt{(a_x - k)^2 + a_y^2}$$

$$\frac{d}{dk} (d(\vec{a}, \tilde{a})) = \frac{a_x - k}{\dots} = 0 \implies k = a_x = \tilde{a} \cdot \hat{x}$$

$$\vec{a} \cdot \hat{x} = a_x$$

Η βέλτιστη έκφραση του \vec{a} στο δισδιάστατο χώρο είναι το ίδιο το \vec{a} .

Μη κάθετα διανύσματα

$$\vec{a} = a_x \hat{x} + a_y \hat{y}$$

$$\vec{a} - \tilde{a} = (a_x - k) \hat{x} + a_y \hat{y}$$

$$d(\vec{a}, \tilde{a}) = \|\vec{a} - \tilde{a}\| = \sqrt{(\vec{a} - \tilde{a}) \cdot (\vec{a} - \tilde{a})} = \left([(a_x - k) \hat{x} + a_y \hat{y}] \cdot [(a_x - k) \hat{x} + a_y \hat{y}] \right)^{1/2}$$

$$\left[(a_x - k)^2 + a_y^2 + 2(a_x - k)a_y \hat{x} \cdot \hat{y} \right]^{1/2}$$

$$\vec{a}_{\text{best}} = (\vec{a} \cdot \hat{x}) \hat{x} \neq a_x$$

$$\boxed{\vec{a} \cdot \hat{x} = a_x + a_y \cos \phi \neq a_x}$$

Συναρτησιακός κόσμος $\phi_n(t)$ παράγουν χώρο με το μηχανισμό:

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \phi_n(t) \quad t \in \Delta$$

$\phi_n(t)$ ανεξάρτητες μεταξύ τους (βάση απειροδιάστατου χώρου)

$\hat{f}(t) = \sum_{n=0}^M \underbrace{\hat{a}_n}_{\neq a_n, \text{ επειδή η βάση δεν είναι ορθοκανονική}} \phi_n(t)$ βέλτιστη, ώστε η απόσταση με την f να είναι ελάχιστη

$$\begin{aligned} \overbrace{I^2}^{\text{σφάλμα}} &= \int_{\Delta} [f(t) - \hat{f}(t)]^2 dt \\ &= \int_{\Delta} \left[\sum_{n=0}^{+\infty} a_n \phi_n(t) - \sum_{n=0}^M \hat{a}_n \phi_n(t) \right]^2 dt \\ &= \int_{\Delta} f^2(t) dt + \int_{\Delta} \left(\sum_{n=0}^M \hat{a}_n \phi_n(t) \right)^2 dt - 2 \int_{\Delta} \left[f(t) \sum_{n=0}^M \hat{a}_n \phi_n(t) \right] dt \end{aligned}$$

Άρα:

$$\begin{aligned} I^2 &= \int_{\Delta} f^2(t) dt + \int_{\Delta} \sum_{n=0}^M [\hat{a}_n \phi_n(t)]^2 dt + 2 \int_{\Delta} \left[\sum_{n=0}^M \sum_{m=n+1}^M \hat{a}_n \cdot \hat{a}_m \phi_n(t) \phi_m(t) \right] dt - 2 \int_{\Delta} \sum_{n=0}^M \hat{a}_n f(t) \phi_n(t) dt \\ &= \int_{\Delta} f^2(t) dt + \sum_{n=0}^M \hat{a}_n^2 \int_{\Delta} \phi_n^2(t) dt + 2 \sum_{n=0}^M \sum_{m=n+1}^M \hat{a}_n \hat{a}_m \int_{\Delta} \phi_n(t) \phi_m(t) dt - 2 \sum_{n=0}^M \hat{a}_n \int_{\Delta} f(t) \phi_n(t) dt \\ \underbrace{\frac{d(I^2)}{d \hat{a}_i}}_{\text{από 0 έως } n} &= 2 \hat{a}_i \int_{\Delta} \phi_i^2(t) dt + 2 \sum_{m \neq i} \hat{a}_m \int_{\Delta} \phi_i(t) \phi_m(t) dt - 2 \int_{\Delta} f(t) \phi_i(t) dt = 0 \end{aligned}$$

Έστω ϕ_i μοναδιαία $\iff \int_{\Delta} \phi_i^2(t) dt = 1$ και ϕ_i ορθογώνια $\iff \int_{\Delta} \phi_1 \phi_2(t) dt = 0$

Αν η $\{\phi(t)\}$ ορθοκανονική

$$2 \hat{a}_i - 2 \int_{\Delta} f(t) \phi_i(t) dt = 0 \implies \hat{a}_i = \int_{\Delta} f(t) \phi_i(t) dt$$

$$2a \langle \phi, \phi \rangle + \sum \sum \hat{a}_n \langle \phi_i, \phi_n \rangle - 2 \langle f, \phi \rangle = 0$$

$$f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \phi_n(t)$$

$$\int_{\Delta} f(t) \phi(t) dt = a_i$$

$$\langle f, \phi_i \rangle = \left\langle \sum_{n=0}^{\infty} a_n \phi_n, \phi_i \right\rangle = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \langle \phi_n, \phi_i \rangle$$

Ηθικό δίδαγμα: Αν η βάση του χώρου είναι ορθοκανονική και μας ζητηθεί να υπολογίσουμε μία προσέγγιση της συνάρτησης σε έναν υποχώρο, μπορούμε άμεσα να υπολογίσουμε την προβολή της συνάρτησης πάνω στη βάση.

Ex. $f(t) = e^{-3t}u(t)$ $\phi_1(t) = e^t u(t)$ & $\phi_2(t) = e^{-2t} u(t)$

$$\hat{f}(t) = a_1 e^{-t} u(t) + a_2 e^{-2t} u(t)$$

$$\int [a_1 \phi_1 + a_2 \phi_2 - f] \phi_1 dt = 0$$

$$\int_0^{\infty} [a_1 e^{-t} + a_2 e^{-2t} - e^{-3t}] e^{-t} dt = 0 \implies$$

$$a_1 \int_0^{\infty} e^{-2t} dt + a_2 \int_0^{\infty} e^{-3t} dt - \int_0^{\infty} e^{-4t} dt = 0 \implies \boxed{\frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{3} - \frac{1}{4} = 0}$$

$$\int [a_1 e^{-t} + a_2 e^{-2t} - e^{-3t}] e^{-2t} dt = 0 \implies \boxed{\frac{a_1}{2} + \frac{a_2}{4} - \frac{1}{5} = 0}$$

$$a_1 = 3/10, a_2 = 6/5$$

Ex. $f(t) = e^{-3t}u(t)$ $\phi_1(t) = e^t u(t)$ & $\phi_2(t) = e^{-2t} u(t)$ & $\phi_3(t) = e^{-3t} u(t)$
 $f(t) = \sum_{n=0}^N a_n \phi_n(t)$ $\{\phi_n(t)\}$ ορθοκανονική

$$E \triangleq \int_{\Delta} f^2(t) dt = \int \left(\sum a_n \phi_n(t) \sum a_n \phi_n(t) \right) dt +$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} a_n \int_{\Delta} \phi_n^2(t) dt \overset{1}{\nearrow} + \sum_{m \neq n} a_m a_n \int_{\Delta} \phi_m(t) \phi_n(t) dt \overset{0}{\nearrow}$$

$$E = \sum_{n=0}^{\infty} a_n^2 \quad \text{Parseval} \int \text{theorem}$$

Κεφάλαιο 2 Ανάλυση Fourier

2.0.1 Περιοδικές συναρτήσεις με περίοδο T

$$x_k = \sqrt{\frac{2}{T}} \cos(k\omega t) \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \text{ θεμελιώδης κυκλική συχνότητα}$$

$$\langle x_k(t), x_n(t) \rangle = \int_{-T/2}^{T/2} x_k(t) x_n(t) dt = \int_{-T/2}^{T/2} \cos(k\omega t) \cos(n\omega t) dt = \begin{cases} n \neq k \rightarrow 0 \\ n = k \rightarrow 1 \end{cases}$$

$$y_k = \sqrt{\frac{2}{T}} \sin(k\omega t) \quad \langle y_k, y_n \rangle = \begin{cases} n \neq k \rightarrow 0 \\ n = k \rightarrow 1 \end{cases}$$

$$\text{Υποστηρίζω ότι κάθε περιοδική } f(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$$

Οραματίζομαι ότι αν η παραπάνω $f(t)$ είναι σήμα εισόδου σε ένα σύστημα, τα ημίτονα και συνημίτονα ως ιδιοσυναρτήσεις θα παραμείνουν αμετάβλητα, και θα τροποποιηθούν μόνο τα a_n, b_n .

$$z_k(t) = e^{jk\omega t}$$

$$\langle z_k, z_n \rangle = \begin{cases} k \neq n \rightarrow 0 \\ k = n \rightarrow T \end{cases}$$

$$z_k(t) = \frac{1}{\sqrt{T}} e^{jk\omega t}$$

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega t} \quad \text{εκθετική σειρά}$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad \text{τριγωνομετρική σειρά A}$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \phi_n) \quad \text{τριγωνομετρική σειρά B}$$

Οι συντελεστές μπορούν να βρεθούν από τις προβολές της συνάρτησης πάνω στα ημίτονα και τα συνημίτονα:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad n \neq 0$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$$

$$F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega t} dt$$

Συνθήκες Dirichlet

- 1) $\int_{-T/2}^{T/2} |f(t)| dt < \infty$
- 2) Πεπερασμένο πλήθος ασυνεχειών εντός T
- 3) Πεπερασμένος αριθμός τοπικών ακροτάτων εντός T

$f(t)$ περιοδική T

Μορφή	Σειρά	Συντελεστές	Αλλαγές
Εκθετική	$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} F_n e^{jn\omega t}$	$F_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega t} dt$	$F_0 = a_0/2$ $F_n = 1/2(a_n - jb_n)$
Τριγωνομετρική Α	$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$	$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega t) dt$ $b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(n\omega t) dt$ $a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$	$a_n = (F_n + F_{-n})$ $b_n = j(F_n - F_{-n})$ $a_0 = 2F_0$
Τριγωνομετρική Β	$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \phi_n)$		$A_0 = a_0/2$ $A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = 2 F_n $ $\phi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{W}{T} = \frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt = \frac{a_0^2}{4} + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n^2 + b_n^2 \\
 &= F_0^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} |F_n|^2 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |F_n|^2
 \end{aligned}$$

Άσκηση για το σπίτι Να βρεθούν η εκθετική και η τριγωνομετρική σειρά του σήματος:

2.1 Μετασχηματισμός Fourier

Φορέας συνάρτησης είναι το διάστημα του πεδίου ορισμού της στο οποίο η συνάρτηση δεν είναι 0 (από $\min x$ για το οποίο δεν είναι 0 ως το αντίστοιχο $\max x$).

$$\begin{aligned}
 \tilde{f}(t) &= \sum_k f(t - kT) \\
 \downarrow T\text{-περιοδική} &\rightarrow \tilde{f}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(\omega_0 n t) + b_n \sin(\omega_0 n t) \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T} \\
 f(t) &= \begin{cases} \tilde{f}(t) & -T/2 \leq t \leq T/2 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Μετασχηματισμός Fourier

$$\begin{aligned}
 F(\omega) &\triangleq \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \\
 f(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega
 \end{aligned}$$

Προσοχή

Όταν παίρνουμε τύπους από τυπολόγια, ελέγχουμε τον ορισμό του μετασχηματισμού Fourier, για διαφορές στη σύμβαση!

Αντίστοιχος ορισμός

$$F(\mathfrak{f}) \triangleq \int_{-\infty}^{\infty} e^{-j2\pi\mathfrak{f}t} dt$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\mathfrak{f}) e^{j2\pi\mathfrak{f}t} d\mathfrak{f}$$

(όπου \mathfrak{f} η συχνότητα)

Η αρνητική συχνότητα δεν έχει καμία φυσική σημασία!

2.1.1 Ιδιότητες

•

$$F(\omega) = A(\omega)e^{j\Phi(\omega)} = \underbrace{F_R(\omega)}_{\text{Re}\{F(\omega)\}} + j \underbrace{F_i(\omega)}_{\text{Im}\{F(\omega)\}}$$

$$A(\omega) = |F(\omega)|$$

•

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) (\cos(\omega t) - j \sin(\omega t)) dt = \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \cos \omega t dt}_{\text{Re}\{F(\omega)\}} - j \underbrace{\int_{-\infty}^{\infty} f(t) \sin \omega t dt}_{\text{Im}\{F(\omega)\}}$$

Αν $f(t) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ είναι άρτια

$F(\omega)$ είναι πραγματική $F(\omega) \equiv \text{Re}\{F(\omega)\}$ και είναι άρτια

Αν $f(t) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ είναι περιττή

$F(\omega)$ είναι φανταστική $F(\omega) = j \text{Im}\{F(\omega)\}$ και είναι περιττή

Κάθε συνάρτηση είναι άθροισμα μίας άρτιας και μίας περιττής. Έστω $f(t) = f_e(t) + f_o(t)$. Τότε:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (f_o(t) + f_e(t)) (\cos \omega t - j \sin \omega t) dt$$

$$= \cancel{\int_{-\infty}^{\infty} f_o \cos \omega t dt} + \int_{-\infty}^{\infty} f_e \cos \omega t dt - j \int_{-\infty}^{\infty} \sin \omega t dt - j \cancel{\int_{-\infty}^{\infty} f_e \sin \omega t dt}$$

Αν η f είναι πραγματική:

$\text{Re}\{F(\omega)\}$ είναι άρτια

$\text{Im}\{F(\omega)\}$ είναι περιττή

$A(\omega) = |F(\omega)| = \sqrt{\text{Re}^2\{F(\omega)\} + \text{Im}^2\{F(\omega)\}}$ είναι άρτια

$\Phi(\omega) = \arctan \frac{\text{Im}\{F(\omega)\}}{\text{Re}\{F(\omega)\}}$ είναι περιττή.

Αν η $f(t) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ και άρτια:

$$- \text{Im}\{F(\omega) = 0\}$$

$$- \Phi(\omega) = 0$$

Αν η $f(t) : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ είναι περιττή:

$$- \text{Re}\{F(\omega)\} = 0$$

• Αν $f_1(t) \xrightarrow{\text{FT}} F_1(\omega)$ και $f_2(t) \xrightarrow{\text{FT}} F_2(\omega)$

$\forall a_1, a_2 \in \mathbb{C}$ σταθερά:

$$f(t) = a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t) \xrightarrow{\text{FT}} F(\omega) = a_1 F_1(\omega) + a_2 F_2(\omega)$$

Γραμμικότητα του Fourier Transform

- Συμμετρική ιδιότητα (το διπλάσιο τυπολόγιο)

$$\text{Av } f(t) \xrightarrow{\text{FT}} F(\omega) \quad F(t) \xrightarrow{\text{FT}} 2\pi f(-\omega)$$

•

$$\begin{aligned} f(t) \rightarrow F(\omega) &= A(\omega)e^{j\Phi(\omega)} \\ f(t - \tau) \rightarrow e^{-j\omega\tau} F(\omega) &= A(\omega)e^{j(\Phi(\omega) - \omega\tau)} \end{aligned}$$

•

$$\begin{aligned} f(t) &\rightarrow F(\omega) \\ e^{j\omega_0 t} f(t) &\rightarrow F(\omega - \omega_0) \\ \text{π.χ } \cos(\omega_0 t) f(t) &= \frac{e^{j\omega_0 t} + e^{-j\omega_0 t}}{2} f(t) \xrightarrow{\text{FT}} \frac{1}{2} [F(\omega - \omega_0) + F(\omega + \omega_0)] \end{aligned}$$

Κλιμάκωση στο χρόνο

$$\begin{aligned} f(t) &\rightarrow F(\omega) \\ f(at) &\rightarrow \frac{1}{|a|} F\left(\frac{\omega}{a}\right) \quad \text{γιατί; να αποδειχθεί στο σπίτι!} \end{aligned}$$

Τι συμβαίνει με τη συνέλιξη

$$\begin{aligned} g(t) &= x(t) * h(t) \\ x(t) &\rightarrow X(\omega) \\ h(t) &\rightarrow H(\omega) \\ y(t) &\rightarrow Y(\omega) = X(\omega)H(\omega) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} y(t) &= x(t) \cdot h(t) \\ y(t) &\rightarrow Y(\omega) = \frac{1}{2\pi} X(\omega) * H(\omega) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\xi) H(\omega - \xi) d\xi \end{aligned}$$