



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος

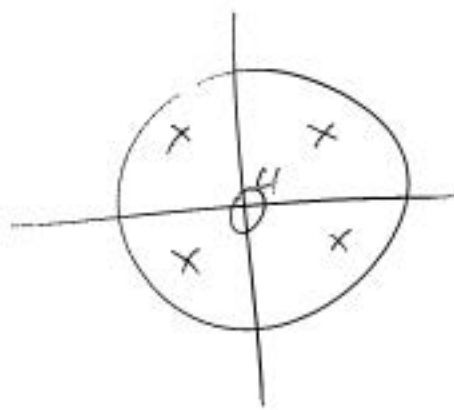
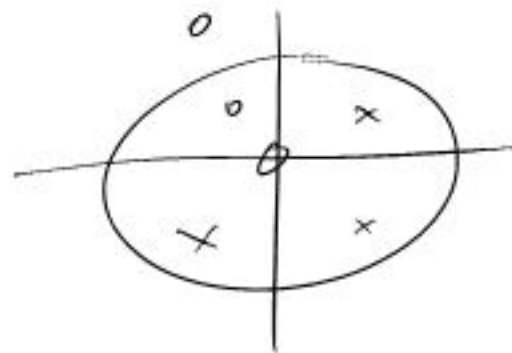
Διάλεξη 14η: Ανάλυση Συστημάτων σε All-pass
και Minimum-phase Συστήματα

Ιωάννης Στυλιανού

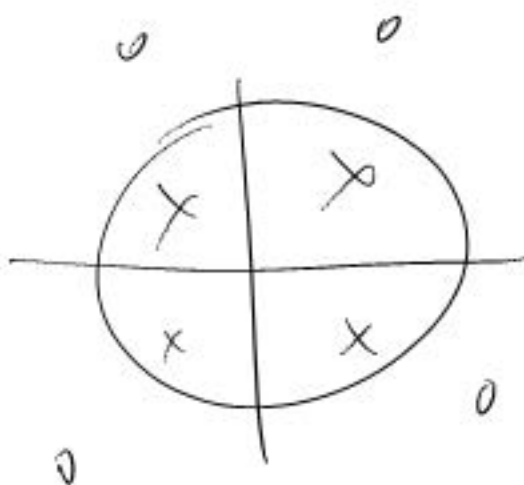
Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών

HY 370

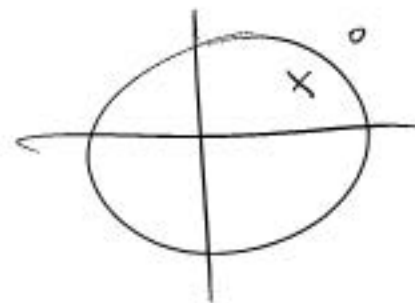
$$H(z) = \frac{b_0}{d_0} \frac{\prod_{k=1}^M (1 - c_k z^{-1})}{\prod_{k=1}^N (1 - d_k z^{-1})}$$



Minimum
Phase



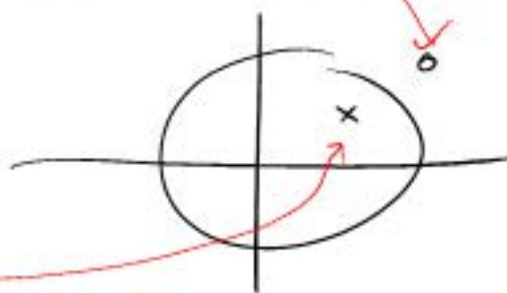
Maximum
Phase



All-pass

$$H_{ap}(z) = \frac{z^{-1} - a^*}{1 - az^{-1}}$$

$$|a| < 1$$



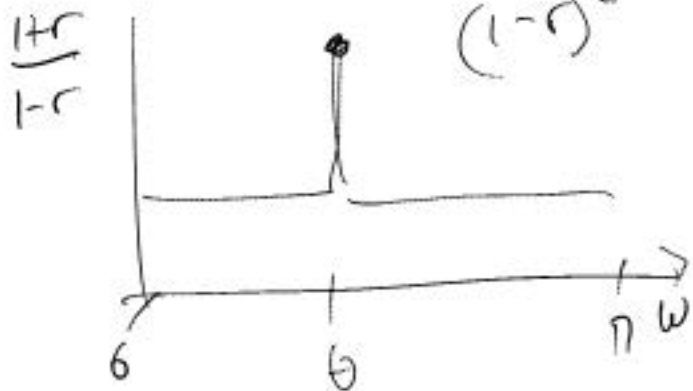
$$|H_{ap}(e^{j\omega})| = 1 \quad \forall \omega$$

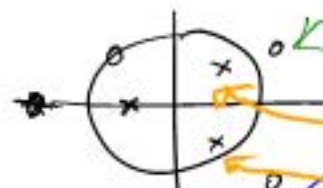
$$a = r \cdot e^{j\theta}$$

$$\angle H(e^{j\omega}) = -\omega - 2 \tan^{-1} \frac{r \sin(\omega - \theta)}{1 - r \cos(\omega - \theta)}$$

$$\left. \frac{d}{d\omega} \left\{ \angle H(e^{j\omega}) \right\} \right|_{\omega = \theta} = \frac{1 - r^2}{1 + r^2 - 2r \cos(\omega - \theta)} \Big|_{\omega = \theta} = - \frac{d}{d\omega} \left. \arg \left\{ H(e^{j\omega}) \right\} \right|_{\omega = \theta}$$

$$\frac{1 - r^2}{(1 - r)^2} = \frac{(1 - r)(1 + r)}{(1 - r)^2} = \frac{1 + r}{1 - r}$$





$$H_{ap}(z) = \prod_{k=1}^M \frac{z^{-1} - d_k}{1 - d_k z^{-1}} \cdot \prod_{k=1}^M \frac{(z^{-1} - b_k^*)}{(1 - b_k z^{-1})}$$

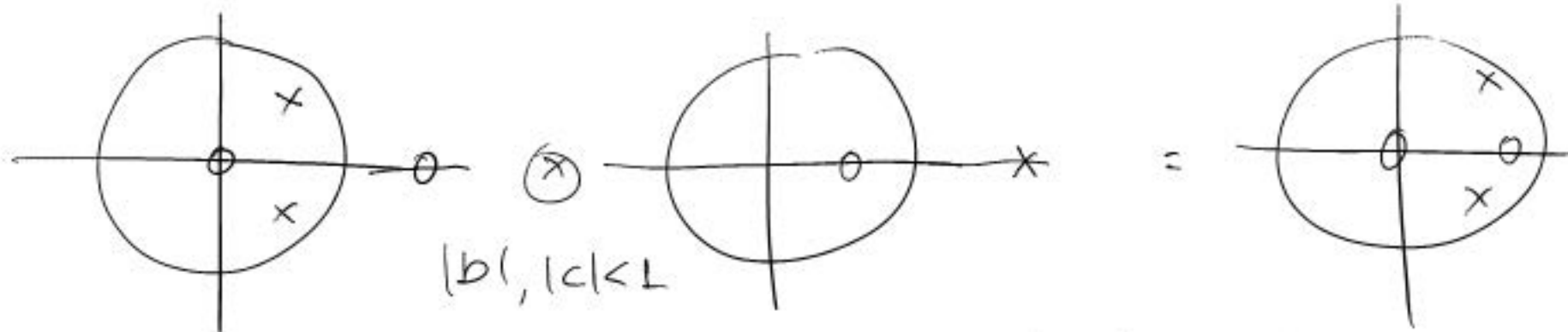
$$H_{ap}(z) = \frac{z^{-1} - a^*}{1 - a z^{-1}}$$

$$|d_k|, |b_k| < 1$$

$$\begin{aligned} z^{-1} - b_k^* &\sim \text{εKTÖS} \\ 1 - b_k z^{-1} &\sim \text{εRTÖS} \\ 1 - b_k z &\sim \text{εKTÖS} \end{aligned}$$

$$z^{-1} - b_k^* = 0 \Rightarrow \frac{1}{z} = b_k^* \Rightarrow z = \frac{1}{b_k^*} = \frac{1}{r} e^{-j\theta} = \frac{1}{r} \cdot e^{j\theta}$$

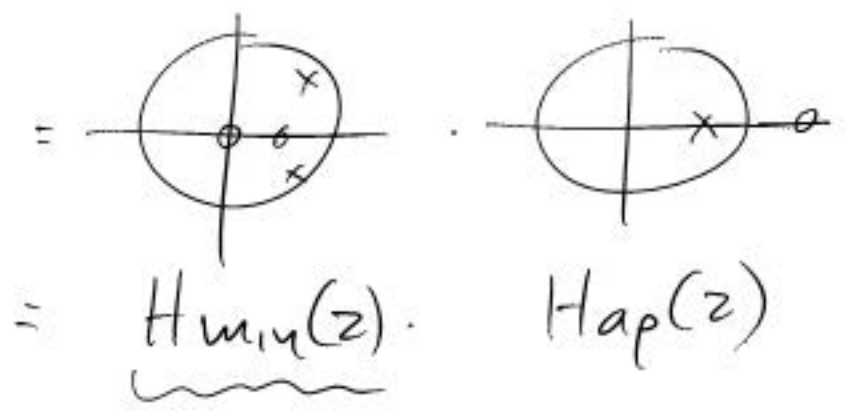
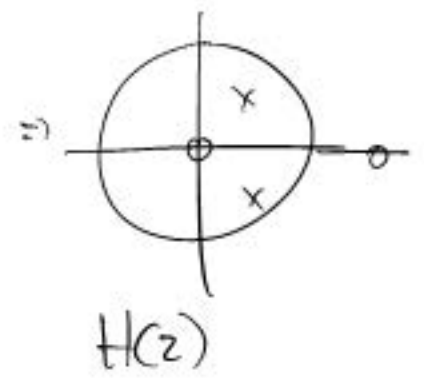
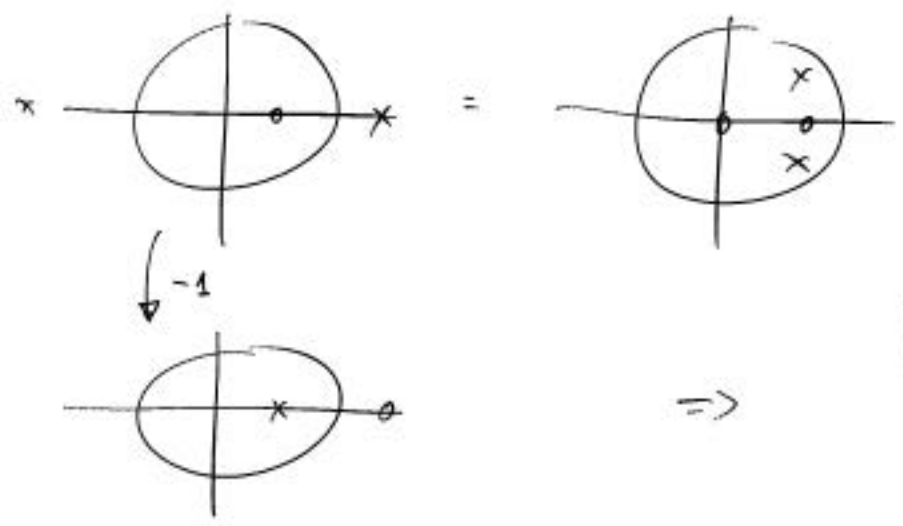
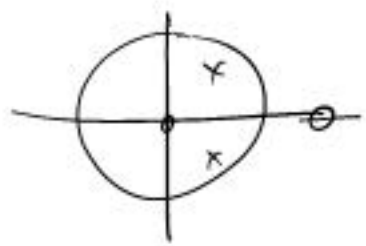
$$1 - b_k z = 0 \Rightarrow 1 = b_k z \Rightarrow z = \frac{1}{b_k} = \frac{1}{r} e^{j\theta}$$



$$h(z) = \frac{z^{-1} - b}{(1 - c z^{-1})(1 - c^* z^{-1})}$$

$$H_{ap}(z) = \frac{1 - b z^{-1}}{z^{-1} - b}$$

$$H_{min}(z) = \frac{1 - b z^{-1}}{(1 - c z^{-1})(1 - c^* z^{-1})}$$



$$\frac{z^{-1} - b}{(1 - cz^{-1})(1 - c^*z^{-1})}$$

$$= \frac{1 - bz^{-1}}{(1 - cz^{-1})(1 - c^*z^{-1})} \cdot \frac{z^{-1} - b}{1 - bz^{-1}}$$

$$H(z) = H_{min}(z) \cdot H_{ap}(z)$$

$$H(e^{j\omega}) = H_{min}(e^{j\omega}) \cdot H_{ap}(e^{j\omega})$$

$$|H(e^{j\omega})| = |H_{min}(e^{j\omega})|$$

$$\angle H(e^{j\omega}) = \angle H_{min}(e^{j\omega}) + \angle H_{ap}(e^{j\omega})$$

$$H(e^{j\omega}) = H_{\min}(e^{j\omega}) \cdot H_{\text{ap}}(e^{j\omega})$$

$$\text{grd}\{H(e^{j\omega})\} = \text{grd}\{H_{\min}(e^{j\omega})\} + \underbrace{\text{grd}\{H_{\text{ap}}(e^{j\omega})\}}_{+, \forall \omega} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{grd}\{H(e^{j\omega})\} \geq \text{grd}\{H_{\min}(e^{j\omega})\} \quad \textcircled{1}$$

$$\angle H(e^{j\omega}) = \angle H_{\min}(e^{j\omega}) + \underbrace{\angle H_{\text{ap}}(e^{j\omega})}_{-, \forall \omega}$$

$$\text{Phase lag} = -\angle H(e^{j\omega}) = \text{pl}\{H(e^{j\omega})\}$$

$$\text{pl}\{H(e^{j\omega})\} = \text{pl}\{H_{\min}(e^{j\omega})\} + \underbrace{\text{pl}\{H_{\text{ap}}(e^{j\omega})\}}_{+, \forall \omega} \quad \textcircled{2}$$

$$|H(e^{j\omega})| = |H_{\min}(e^{j\omega})| \quad \textcircled{3}$$

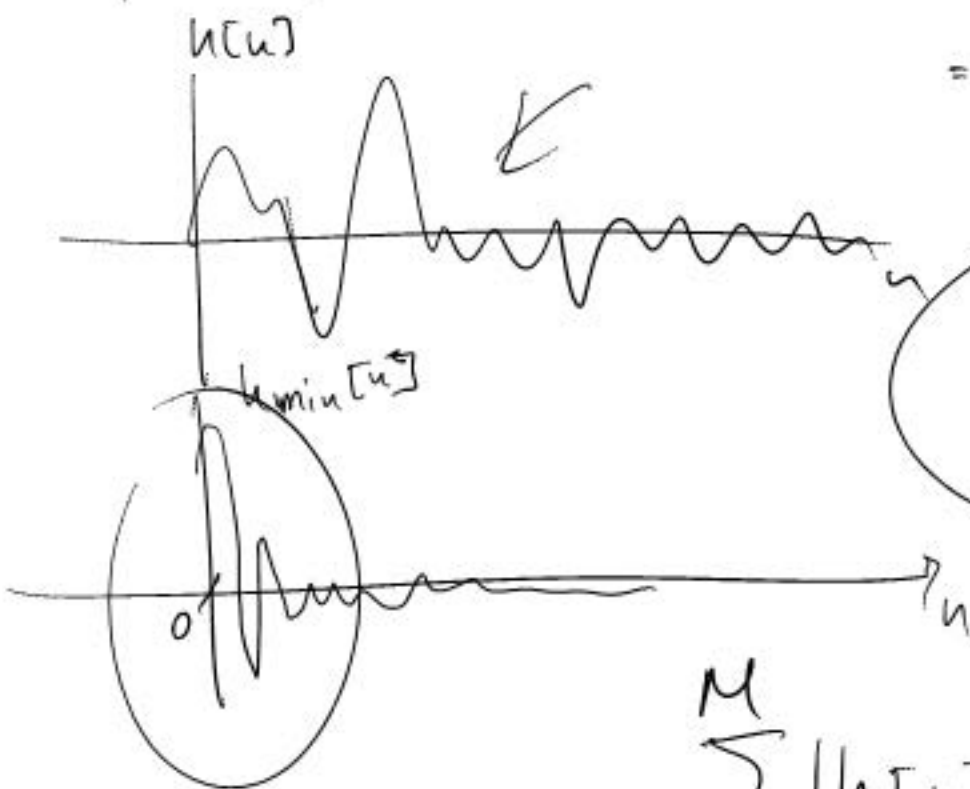
①, ③ $\Rightarrow H(z)$, $\frac{\text{poles}}{H_{\min}(z)}$ έχει το ίδιο ημίτονο
 αλλά έχει την ελάχιστη group delay

②, ③ Από όλα τα συστήματα που έχουν το ίδιο ημίτονο
 το σύστημα με το μικρότερο phase lag είναι το ελάχιστο group delay

$$\sum_{n=0}^{\infty} |h[n]|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |H(e^{j\omega})|^2 d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |H_{\min}(e^{j\omega})|^2 d\omega$$

$$|H(e^{j\omega})| = |H_{\min}(e^{j\omega})|$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} |h_{\min}[n]|^2$$

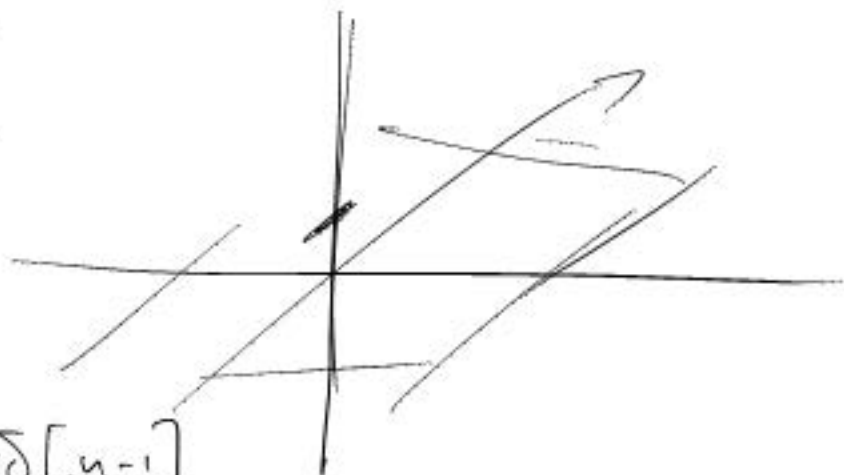


$$\text{grad}\{H(e^{j\omega})\} \geq \text{grad}\{H_{\min}(e^{j\omega})\}$$

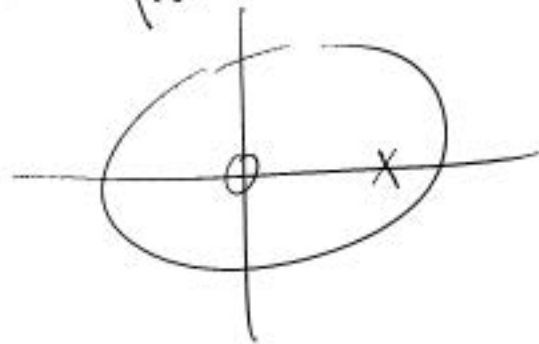
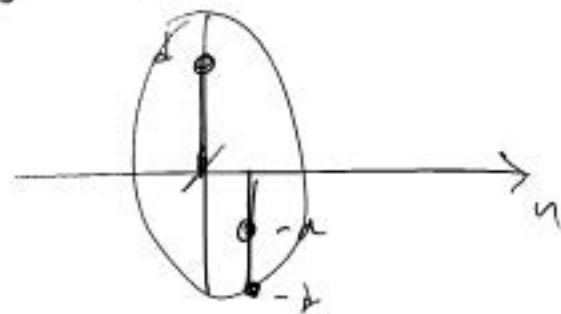
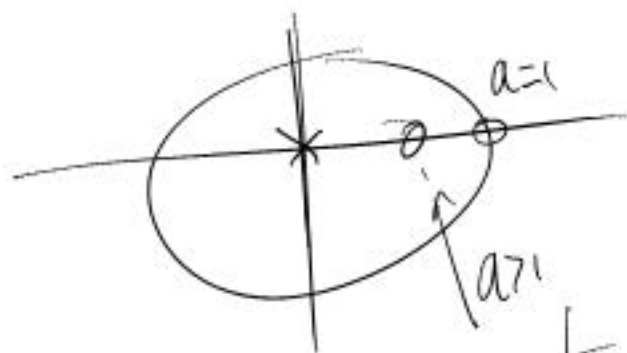
$$\sum_{n=0}^M |h[n]|^2 \leq \sum_{n=0}^M |h_{\min}[n]|^2$$

$$\delta[n] \xrightarrow{F} X(e^{j\omega}) = 1$$

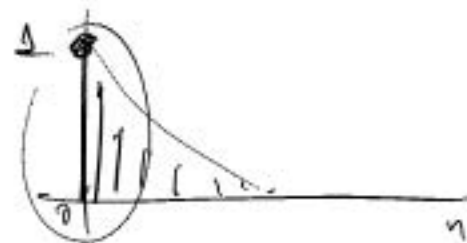
$$\delta[n] \xrightarrow{Z} X(z) = 1$$



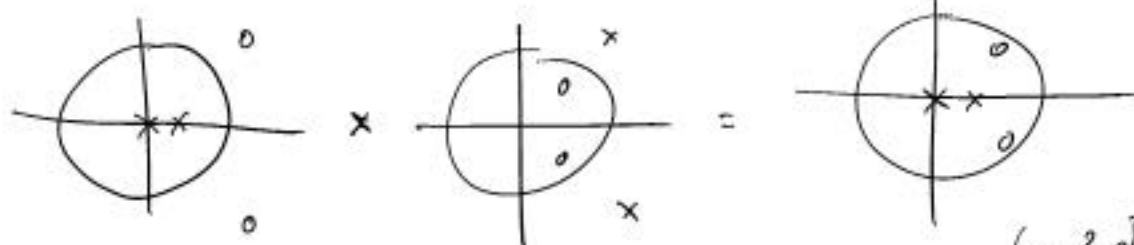
$$H(z) = 1 - \alpha z^{-1} \xrightarrow{Z^{-1}} \delta[n] - \alpha \delta[n-1]$$



$$\frac{1}{1 - \alpha z^{-1}} \rightarrow a^n u[n]$$



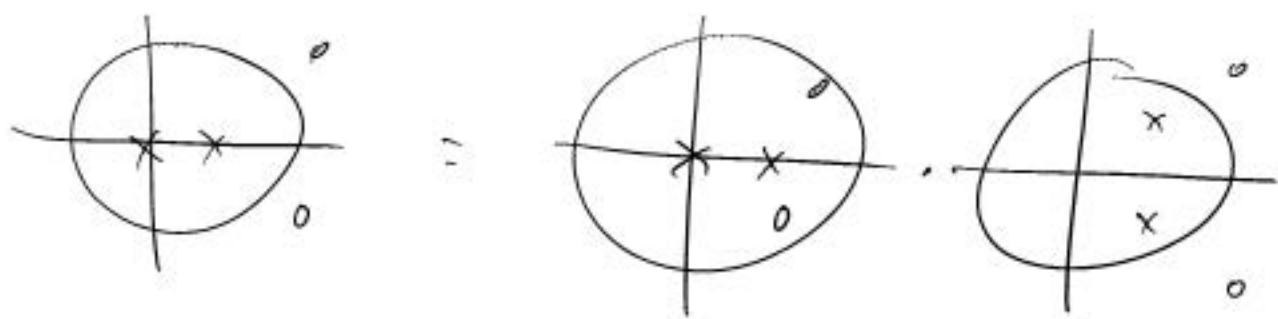
$$H(z) = \frac{(1 - \frac{3}{2} e^{j\pi/4} z^{-1})(1 - \frac{3}{2} e^{-j\pi/4} z^{-1})}{1 - \frac{1}{3} z^{-1}} = \left(\frac{3}{2}\right)^2 \frac{(z^{-1} - \frac{2}{3} e^{j\pi/4})(z^{-1} - \frac{2}{3} e^{-j\pi/4})}{1 - \frac{1}{3} z^{-1}}$$



$$\left(\frac{3}{2}\right)^2 \frac{(1 - \frac{2}{3} e^{j\pi/4} z^{-1})(1 - \frac{2}{3} e^{-j\pi/4} z^{-1})}{(1 - \frac{1}{3} z^{-1})}$$

$$H_{\text{min}}(z) = \frac{(1 - \frac{2}{3} e^{j\pi/4} z^{-1})(1 - \frac{2}{3} e^{-j\pi/4} z^{-1})}{(1 - \frac{1}{3} z^{-1})} \cdot A \left(\frac{3}{2}\right)^2$$

$$H_{\text{ap}}(z) = \frac{(1 - \frac{2}{3} e^{j\pi/4} z^{-1})(1 - \frac{2}{3} e^{-j\pi/4} z^{-1})}{(1 - \frac{3}{2} e^{j\pi/4} z^{-1})(1 - \frac{3}{2} e^{-j\pi/4} z^{-1})}$$



$$H(z) = H_{\text{min}}(z) \cdot H_{\text{ap}}(z) = \frac{(1 - \frac{3}{2} e^{j\pi/4} z^{-1})(1 - \frac{3}{2} e^{-j\pi/4} z^{-1})}{(1 - \frac{2}{3} e^{j\pi/4} z^{-1})(1 - \frac{2}{3} e^{-j\pi/4} z^{-1})}$$

$$H_{ap}(z) = \frac{(1 - \frac{3}{2}e^{+j\pi/4}z^{-1})(1 - \frac{3}{2}e^{-j\pi/4}z^{-1})}{(1 - \frac{2}{3}e^{j\pi/4}z^{-1})(1 - \frac{2}{3}e^{-j\pi/4}z^{-1})} =$$

$$= \frac{(\frac{3}{2}e^{j\pi/4})(z^{-1} - \frac{2}{3}e^{-j\pi/4}) \cdot (\frac{3}{2}e^{-j\pi/4})(z^{-1} - \frac{2}{3}e^{j\pi/4})}{(1 - \frac{2}{3}e^{j\pi/4}z^{-1})(1 - \frac{2}{3}e^{-j\pi/4}z^{-1})}$$

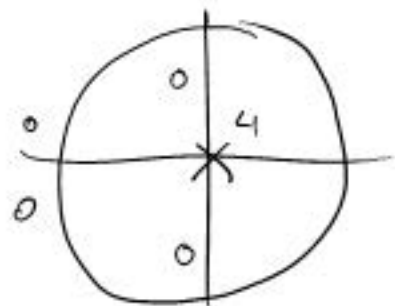
$$= \left(\frac{3}{2}\right)^2 \frac{z^{-1} - \frac{2}{3}e^{-j\pi/4}}{1 - \frac{2}{3}e^{j\pi/4}z^{-1}} \frac{z^{-1} - \frac{2}{3}e^{j\pi/4}}{1 - \frac{2}{3}e^{-j\pi/4}z^{-1}}$$

$$\frac{z^{-1} - a^*}{1 - az^{-1}} \quad \frac{z^{-1} - a^x}{1 - az^{-1}}$$

$$H(z) = H_{min}(z) \cdot H_{ap}(z)$$

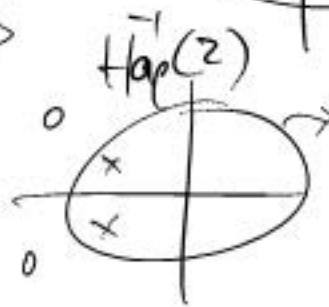
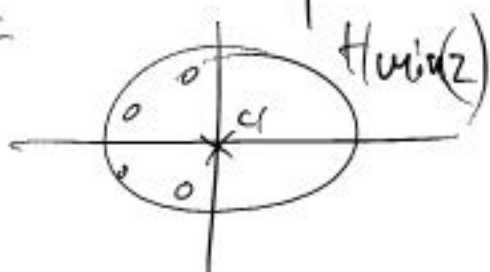
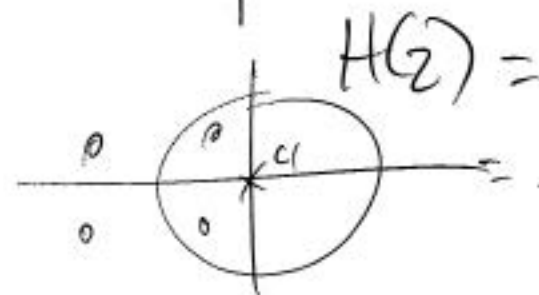
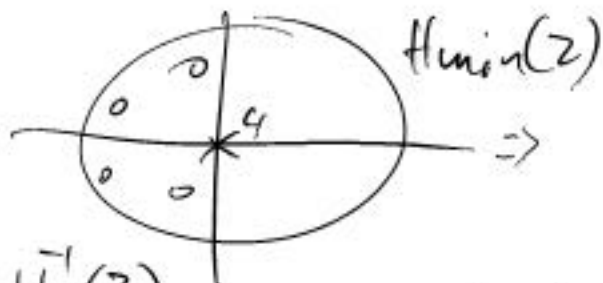
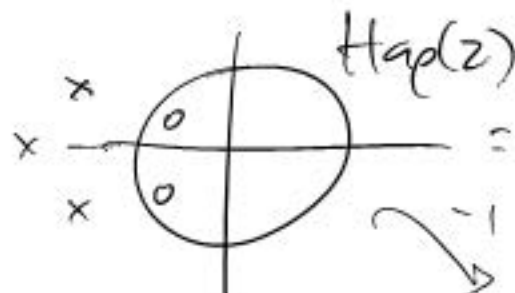
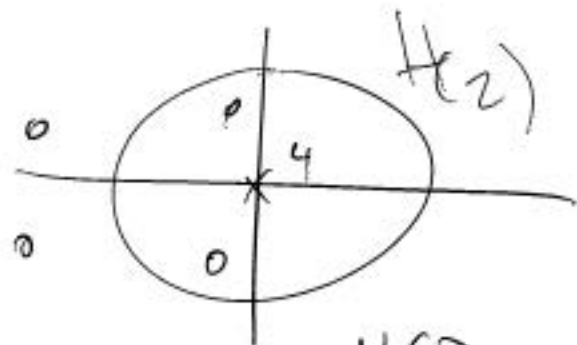
↑

$$H(z) = (1 - 0.9 e^{j0.6n} z^{-1}) (1 - 0.9 e^{-j0.6n} z^{-1}) \\ (1 - 1.25 e^{j0.8n} z^{-1}) (1 - 1.25 e^{-j0.8n} z^{-1})$$

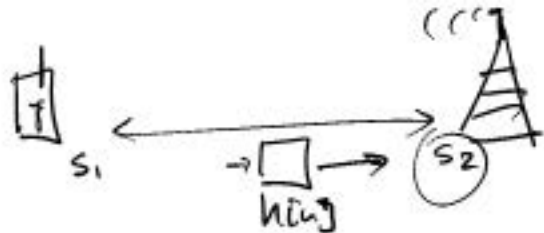


$$= (1.25)^2 (1 - 0.9 e^{j0.6n} z^{-1}) (1 - 0.9 e^{-j0.6n} z^{-1}) \\ (z^{-1} - 0.8 e^{j0.8n}) (z^{-1} - 0.8 e^{-j0.8n}) \Rightarrow$$

$$H_{min}(z) = (1.25)^2 (1 - 0.9 e^{j0.6n} z^{-1}) (1 - 0.9 e^{-j0.6n} z^{-1}) \\ (1 - 0.8 e^{j0.8n} z^{-1}) (1 - 0.8 e^{-j0.8n} z^{-1})$$

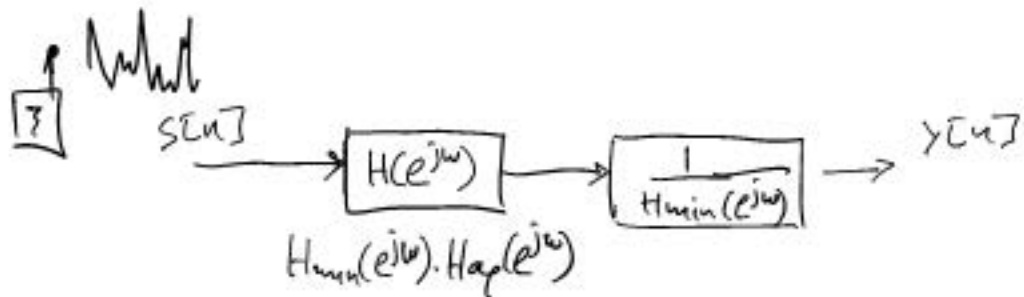


$$\frac{(z^{-1} - 0.8 e^{j0.8n}) \cdot *}{(1 - 0.8 e^{j0.8n} z^{-1}) \cdot *}$$



$$s_2[n] = h[n] * s_1[n] \rightsquigarrow \text{deconvolution} \rightsquigarrow h[n]$$

$$H(z) = H_{\min}(z) \cdot H_{\text{ap}}(z) \Rightarrow |H(e^{j\omega})| = |H_{\min}(e^{j\omega})|$$



$$Y(e^{j\omega}) = \frac{1}{H_{\min}(e^{j\omega})} \cdot \cancel{H_{\min}(e^{j\omega})} \cdot H_{\text{ap}}(e^{j\omega}) \cdot S(e^{j\omega}) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Y(e^{j\omega}) = H_{\text{ap}}(e^{j\omega}) \cdot S(e^{j\omega})$$

$$|Y(e^{j\omega})| = |S(e^{j\omega})|$$

$$\angle Y(e^{j\omega}) = \angle H_{\text{ap}}(e^{j\omega}) + \angle S(e^{j\omega})$$

Τέλος Ενότητας



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Κρήτης**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα αδειοδότησης

- Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση, Όχι Παράγωγο Έργο 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».

[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



- Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:
 - που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
 - που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
 - που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο
- Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ιωάννης Στυλιανού. «Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος. Διάλεξη 14η: Ανάλυση Συστημάτων σε All-pass και Minimum-phase Συστήματα». Έκδοση: 1.0. Ηράκλειο/Ρέθυμνο 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://www.csd.uoc.gr/~hy370>