



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης

Ενότητα 9: Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου

Μιχαήλ Λογοθέτης

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών
και Τεχνολογίας Υπολογιστών

Συνιστώμενο Βιβλίο:

Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως και Εφαρμογές
Μιχαήλ Δ. Λογοθέτη

Εκδόσεις : Παπασωτηρίου

Δεύτερη Έκδοση



Το βιβλίο αυτό απευθύνεται κατ' αρχήν σε τηλεπικοινωνιακούς μηχανικούς και μηχανικούς Η/Υ. Δεδομένης όμως της διεισδυτικότητας της Θεωρίας Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως στον γενικότερο επιστημονικό τομέα των μηχανικών, συνιστάται η γνώση του αντικειμένου του βιβλίου αυτού σ' όλους τους Ηλεκτρολόγους/Ηλεκτρονικούς Μηχανικούς και ιδιαιτέρως σε όλους όσους εξειδικεύονται στον τομέα των τηλεπικοινωνιακών δικτύων ή δικτύων υπολογιστών ως διαχειριστές, αναλυτές ή σχεδιαστές.

Πρόθεση του συγγραφέα είναι το βιβλίο αυτό να αποτελέσει εγχειρίδιο μελέτης για προπτυχιακούς φοιτητές. Συνιστάται δε ως βασικό υπόβαθρο στους φοιτητές που ενδιαφέρονται να ακολουθήσουν μεταπτυχιακές σπουδές στους προαναφερθέντες τομείς.

Copyright © 2012 Α. Παπασωτηρίου & ΣΙΑ Ο.Ε. – Μιχαήλ Δ. Λογοθέτης



Σκοποί ενότητας

- Περιγραφή και ανάλυση δικτύων απωλειών μορφής γινομένου
- Περιγραφή και ανάλυση της έννοιας του «ορίου γινομένου» για τηλεφωνικά δίκτυα



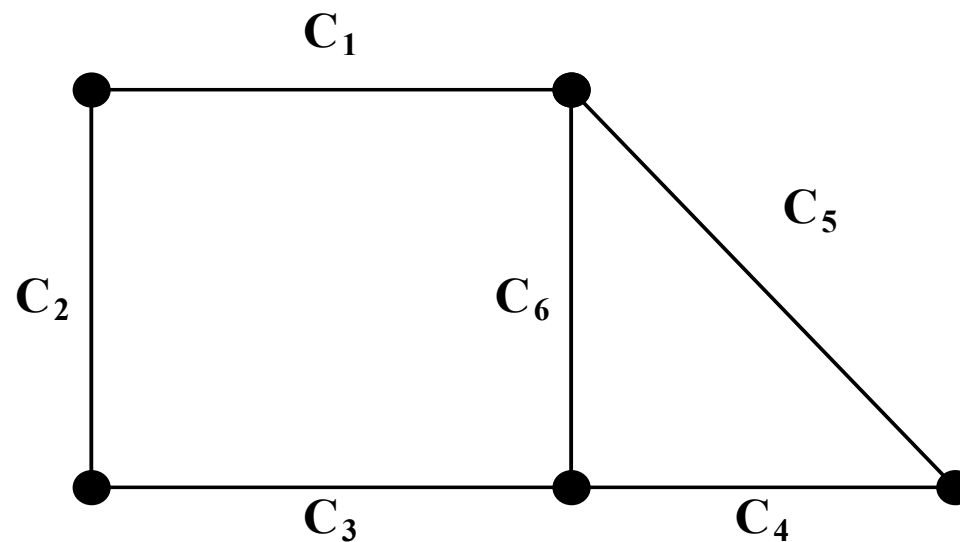
Περιεχόμενα ενότητας

- Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου
- Το «όριο γινομένου» για τηλεφωνικά δίκτυα



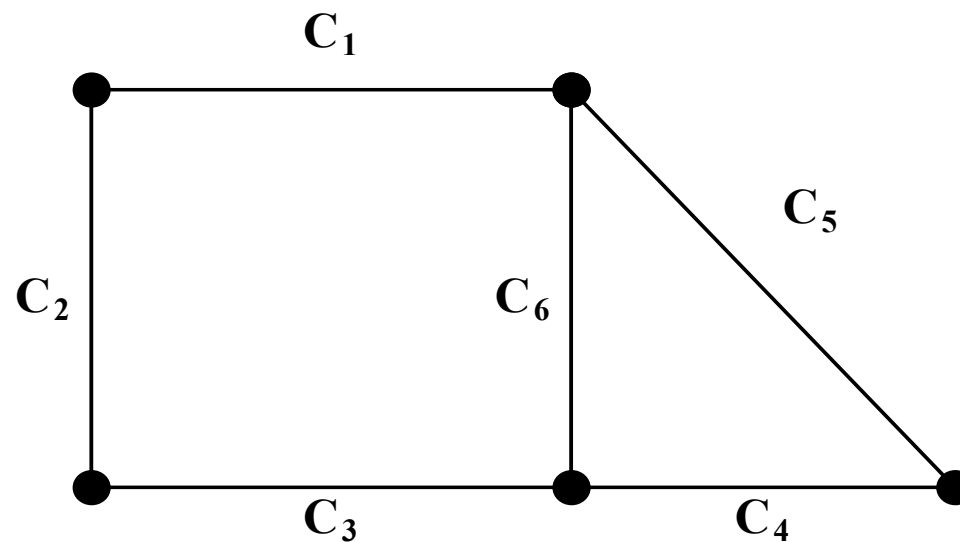
Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (1)

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται ένα τηλεφωνικό δίκτυο μεταγωγής κυκλώματος. Το δίκτυο αυτό αποτελείται από ένα σύνολο κόμβων και ζεύξεων με κάθε ζεύξη j να έχει χωρητικότητα C_j . Μία ή περισσότερες διαδοχικές ζεύξεις αποτελούν μια διαδρομή (route). Παρατηρούμε ότι ένα ζεύγος κόμβων μπορεί να συνδέεται μέσω περισσότερων από μια διαδρομές.



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (2)

Θεωρούμε ότι στο δίκτυο εφαρμόζεται **σταθερή δρομολόγηση (fixed routing)**. Δηλαδή, για κάθε ζεύγος κόμβων υπάρχει και μια προκαθορισμένη διαδρομή. Μια κλήση τοποθετείται σ' αυτή την διαδρομή αν υπάρχει τουλάχιστον ένα ελεύθερο trunk (π.χ., ένα trunk = 64 kbps) σε κάθε μία από τις ζεύξεις της διαδρομής αυτής. Διαφορετικά, η κλήση φράσσεται και χάνεται.



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (3)

Έστω μια διαδρομή του δικτύου αποτελούμενη από J ζεύξεις, κάθε μία από τις οποίες έχει χωρητικότητα C_j μονάδες εύρους ζώνης και έστω K ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών κλήσεων στο δίκτυο.

Ορίζουμε τις ποσότητες:

λ_k, μ_k : ο ρυθμός άφιξης (Poisson αφίξεις) και ο ρυθμός εξυπηρέτησης των κλήσεων της κατηγορίας k αντιστοίχως.

$\alpha_k = \lambda_k / \mu_k$: το προσφερόμενο φορτίο κίνησης (σε erl) των κλήσεων της κατηγορίας k .

b_k : το εύρος ζώνης που απαιτεί κάθε κλήση κατηγορίας k .

R_k : η διαδρομή (route) των κλήσεων της κατηγορίας k μέσα στο δίκτυο (ισχύει ότι $R_k \subseteq \{1, \dots, J\}$).



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (4)

Μια κλήση κατηγορίας k γίνεται δεκτή στο δίκτυο αν υπάρχει διαθέσιμο το εύρος ζώνης b_k σε κάθε ζεύξη $j \in R_k$.

Κάθε κλήση που γίνεται δεκτή στο δίκτυο καταλαμβάνει b_k μονάδες εύρους ζώνης για όσο χρόνο εξυπηρετείται. Οι κλήσεις για τις οποίες δεν υπάρχουν διαθέσιμες οι b_k μονάδες εύρους ζώνης, φράσσονται και χάνονται.

Το στοχαστικό αυτό σύστημα ονομάζεται **δίκτυο απωλειών μορφής γινομένου (product form loss network).**



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (5)

Προκειμένου να αναλύσουμε ένα δίκτυο μορφής γινομένου ορίζουμε τα εξής:

K: το σύνολο των κατηγοριών των κλήσεων του δικτύου.

K_j: το σύνολο των κατηγοριών των κλήσεων του δικτύου που χρησιμοποιούν την ζεύξη j , $\mathbf{K}_j = \{k \in \mathbf{K} : j \in \mathbf{R}_k\}$.

n_k : ο αριθμός των κλήσεων της κατηγορίας k στο δίκτυο ($\mathbf{n} = \{n_1, \dots, n_K\}$)

S: το σύνολο των καταστάσεων του δικτύου:

$$\mathbf{S} = \left\{ \mathbf{n} \in \mathbf{I}^{\mathbf{K}} : \sum_{k \in \mathbf{K}_j} b_k n_k \leq C_j, \quad j = 1, \dots, J \right\} \quad (1)$$



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (6)

I: το σύνολο των μη αρνητικών ακεραίων.

S_k: το υποσύνολο των καταστάσεων για τις οποίες μια κλήση κατηγορίας k γίνεται δεκτή στο δίκτυο κατά την άφιξή της σ' αυτό,

$$\mathbf{S}_k = \left\{ \mathbf{n} \in \mathbf{S} : \sum_{l \in \mathbf{K}_j} b_l n_l \leq C_j - b_k, \quad j \in \mathbf{R}_k \right\} \quad (2)$$

X_k(t): ο (τυχαίος) αριθμός των κλήσεων της κατηγορίας k στο δίκτυο την χρονική στιγμή t.

X(t): (X₁(t), ..., X_k(t)) η κατάσταση του δικτύου την χρονική στιγμή t.

{X(t)}: η σχετική στοχαστική διαδικασία.

X_k: ο αριθμός των κλήσεων της κατηγορίας k στην κατάσταση ισορροπίας (τυχαία μεταβλητή).



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (7)

$U_j = \sum_{k \in K_j} b_k X_k$ το εύρος ζώνης που χρησιμοποιείται στην ζεύξη j στην κατάσταση ισορροπίας (τυχαία μεταβλητή).

B_k : το ποσοστό των κλήσεων κατηγορίας k που φράσσονται. Επειδή έχουμε αφίξεις Poisson, ισχύει:

$$B_k = 1 - P(U_j \leq C_j - b_k, j \in R_k) \quad (3)$$

TH_k : η διεκπεραιωτική ικανότητα του δικτύου για τις κλήσεις κατηγορίας k :

$$TH_k = \lambda_k (1 - B_k) = \mu_k E[X_k] \quad (4)$$

όπου $E[X_k]$ είναι η μέση τιμή του X_k .



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (8)

Y_k : ένα σύνολο ανεξάρτητων τυχαίων μεταβλητών ($k = 1, \dots, K$) που ακολουθεί την κατανομή Poisson με παράμετρο α_k . Δηλαδή:

$$P(Y_k = n) = \frac{\alpha_k^n}{n!} e^{-\alpha_k}, \quad n \in I \quad (5)$$

Επίσης:

$$V_j = \sum_{k \in K_j} b_k Y_k \quad (6)$$

Εν συνεχεία εισάγουμε την ακόλουθη σημειογραφία:

$$\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_K), \quad \mathbf{Y} = (Y_1, \dots, Y_K), \quad \mathbf{V} = (V_1, \dots, V_K), \quad \mathbf{C} = (C_1, \dots, C_K)$$

Επίσης θέτουμε ως \mathbf{b}_k ένα διάνυσμα διάστασης J του οποίου το στοιχείο j έχει τιμή b_k αν οι κλήσεις κατηγορίας k διέρχονται από την ζεύξη j , ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία έχουν τιμή μηδέν.



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (9)

Θεώρημα 1 (δικαιολογεί τον όρο «δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου»)

Η πιθανότητα μονίμου καταστάσεως για ένα δίκτυο απωλειών δίνεται από την έκφραση:

$$P(\mathbf{X} = \mathbf{n}) = \frac{P(\mathbf{Y} = \mathbf{n})}{P(\mathbf{V} \leq C)} = \frac{1}{G} \prod_{k=1}^K \frac{\alpha_k^{n_k}}{n_k!}, \mathbf{n} \in \mathbf{S} \quad (7)$$

όπου $G = \sum_{\mathbf{n} \in \mathbf{S}} \prod_{k=1}^K \frac{\alpha_k^{n_k}}{n_k!}$ η σταθερά κανονικοποίησης.

Η πιθανότητα απώλειας κλήσεως κατηγορίας k υπολογίζεται ως εξής:

$$B_k = 1 - \frac{P(V \leq C - b_k)}{P(V \leq C)} = 1 - \frac{\sum_{\mathbf{n} \in S_k} \prod_{l=1}^K \frac{\alpha_l^{n_l}}{n_l!}}{\sum_{\mathbf{n} \in S} \prod_{l=1}^K \frac{\alpha_l^{n_l}}{n_l!}} \quad (8)$$



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (10)

Θεώρημα 2

Υποθέτουμε ότι οι εκθετικές κατανομές του χρόνου εξυπηρέτησης των κλήσεων αντικαθίστανται με αυθαίρετες κατανομές $F_k(\cdot)$, $k \in K$ με πεπερασμένες μέσες τιμές $1/\mu_k$, $k \in K$.

Αποδεικνύεται (άρθρο [1]) ότι οι πιθανότητες μονίμου καταστάσεως έχουν λύση μορφής γινομένου, η οποία δίδεται από το θεώρημα 1.

Το γεγονός ότι το αποτέλεσμα της μορφής γινομένου εξαρτάται μόνο από την μέση τιμή του χρόνου εξυπηρέτησης, και όχι από την κατανομή του, είναι μια ιδιαίτερα σημαντική πληροφορία. Π.χ. μολονότι η μετάδοση εικόνων (σταθερού μεγέθους) μέσω ενός δικτύου μεταγωγής κυκλώματος είναι μια υπηρεσία με συγκεκριμένους χρόνους εξυπηρέτησης, το θεώρημα 2 δηλώνει ότι η υπηρεσία αυτή μπορεί να μοντελοποιηθεί ως ένα δίκτυο απωλειών μορφής γινομένου.

[1] D.Y. Burman, J.P. Lehoczky, Y. Lim, “*Insensitivity of Blocking Probabilities in a Circuit-Switching Network*”, Advances in Applied Probability, 1984.



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (11)

Πόρισμα 1 (Τύποι παραγώγων)

Οι επόμενες εξισώσεις (άρθρο [2]) ισχύουν για ένα δίκτυο απωλειών μορφής γινομένου:

$$\frac{\partial B_l}{\partial \alpha_k} = \begin{cases} -\frac{1}{\alpha_k \alpha_l} \text{cov}(X_k, X_l) & l \neq k \\ -\frac{1}{\alpha_k^2} \{ \text{var}(X_k) - E[X_k] \} & l = k \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{\partial TH_l}{\partial \lambda_k} = \frac{\mu_l}{\lambda_k} \text{cov}(X_k, X_l) \quad (10)$$

[2] S. Jordan, P.P. Varaiya, "Control of Multiple Service, Multiple Resource Communications Networks", IEEE Trans. On Comm., No.42, 1994.



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (11)

Απόδειξη:

Επειδή:

$$\frac{\partial P(\mathbf{X} = \mathbf{0})}{\partial \alpha_k} = -P(\mathbf{X} = \mathbf{0})^2 \sum_{\mathbf{n} \in \mathbf{S}} \frac{\partial}{\partial \alpha_k} \prod_{i=1}^K \frac{\alpha_i^{n_i}}{n_i!} = P(\mathbf{X} = \mathbf{0})^2 \sum_{\mathbf{n} \in \mathbf{S}} \frac{n_k}{\alpha_k} \frac{P(\mathbf{X} = \mathbf{n})}{P(\mathbf{X} = \mathbf{0})} = -\frac{P(\mathbf{X} = \mathbf{0})}{\alpha_k} E[X_k]$$

Θα έχουμε:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E[X_l]}{\partial \alpha_k} &= \sum_{\mathbf{n} \in \mathbf{S}} n_l \frac{\partial}{\partial \alpha_k} \left(\prod_{i=1}^K \frac{\alpha_i^{n_i}}{n_i!} \right) P(\mathbf{X} = \mathbf{0}) = \sum_{\mathbf{n} \in \mathbf{S}} n_l \left[\frac{n_k}{\alpha_k} P(\mathbf{X} = \mathbf{n}) + \frac{P(\mathbf{X} = \mathbf{n})}{P(\mathbf{X} = \mathbf{0})} \frac{\partial P(\mathbf{X} = \mathbf{0})}{\partial \alpha_k} \right] \\ &= \frac{1}{\alpha_k} \sum_{\mathbf{n} \in \mathbf{S}} n_k n_l P(\mathbf{X} = \mathbf{n}) - \frac{1}{\alpha_k} E[X_k] \sum_{\mathbf{n} \in \mathbf{S}} n_l P(\mathbf{X} = \mathbf{n}) = \frac{\text{cov}(X_k, X_l)}{\alpha_k} \end{aligned}$$

Το επιθυμητό αποτέλεσμα προκύπτει από την τελευταία σχέση και τις μερικές παραγώγους των σχέσεων:

$$TH_l = \mu_l E[X_l], \quad B_l = 1 - \frac{E[X_l]}{\alpha_l}$$



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (12)

Τα αποτελέσματα του πορίσματος 1 είναι μεγάλης πρακτικής σημασίας όταν μελετούμε την απόδοση ενός δικτύου απωλειών μορφής γινομένου με την μέθοδο της προσομοίωσης του δικτύου.

Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να προβλέψουμε την πιθανότητα απωλείας κλήσεως αλλά έχουμε μια πολύ γενική ιδέα για την τιμή του προσφερομένου φορτίου κίνησης $\alpha=(\alpha_1, \dots, \alpha_k)$. Στην περίπτωση αυτή είναι προτιμότερο να προσομοιώσουμε το σύστημα όχι μόνο για την ονομαστική τιμή του φορτίου κίνησης α αλλά και για μικρομεταβολές του φορτίου αυτού $\alpha+\Delta\alpha_k, \forall k \in K$.

Αυτή η διαδικασία απαιτεί $K+1$ προσομοιώσεις, πράγμα που οδηγεί σε ιδιαίτερα πολλούς υπολογισμούς αν έχουμε μεγάλη τιμή του K .

Εναλλακτική προσέγγιση είναι να προσομοιώσουμε το σύστημα αρχικά με την ονομαστική τιμή α , εν συνεχεία να υπολογίσουμε τα $B_k, E[X_k]$ και τα $\text{cov}(X_k, X_l)$ και να χρησιμοποιήσουμε το πόρισμα 1 για να υπολογίσουμε την απόδοση για τις μικρομεταβολές του φορτίου κίνησης.

Αυτή η διαδικασία απαιτεί σαφώς λιγότερους υπολογισμούς.



Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου (13)

Πόρισμα 2 (ελαστικότητα αποτελέσματος)

$$\frac{\partial B_l}{\partial \alpha_k} = \frac{\partial B_k}{\partial \alpha_l}, \quad \text{για όλα τα } l \leq k, l \leq K \quad (11)$$

Το πόρισμα 2 είναι άμεσο επακόλουθο του πορίσματος 1, δεδομένου ότι το T_{H_k} αυξάνει, αυξανόμενου του λ_k .



Το «όριο γινομένου» για τηλεφωνικά δίκτυα (1)

Έστω ότι το τηλεπικοινωνιακό δίκτυο υποστηρίζει κλήσεις μιας υπηρεσίας, όπως είναι η περίπτωση των τηλεφωνικών δικτύων όπου $b_k=1$, $k \in K$. Έστω $E_c(\alpha)$ ότι είναι η πιθανότητα απωλείας κλήσεως για ένα σύστημα απωλειών (Erlang) με προσφερόμενη κίνηση α και C εξυπηρετητές. Ισχύει:

$$E_c(\alpha) = \frac{\frac{\alpha^c}{C!}}{\sum_{c=0}^c \frac{\alpha^c}{c!}}$$

Ορίζουμε ως $\overline{\alpha}_j$ το συνολικό προσφερόμενο φορτίο κίνησης στην j ζεύξη:

$$\overline{\alpha}_j = \sum_{k \in K_j} \alpha_k \quad (12)$$

Το επόμενο θεώρημα παρουσιάζει ένα απλό άνω όριο για την πιθανότητα απωλείας κλήσεως όταν η κλήση διεκπεραιώνεται μέσω μιας διαδρομής με αυθαίρετο αριθμό ζεύξεων.



Το «όριο γινομένου» για τηλεφωνικά δίκτυα (2)

Θεώρημα 3

Η πιθανότητα απωλείας κλήσεως για μια κατηγορία κλήσεων k περιορίζεται από το όριο, το οποίο καλείται **όριο γινομένου (product bound)** (άρθρο [3]):

$$B_k \leq 1 - \prod_{j \in R_k} \left(1 - E_{C_j}(\overline{\alpha_j})\right) \quad (13)$$

Σε εφαρμογές στις οποίες το όριο είναι μικρό και οι διαδρομές των κλήσεων μικρές, η (13) είναι μια άριστη προσέγγιση της πιθανότητας απωλείας κλήσεως. Όταν όμως οι διαδρομές είναι μεγάλες, η προσέγγιση αυτή δίδει μη αξιόπιστα αποτελέσματα.

[3] W. Whitt, “Blocking when Service is required from Several Facilities Simultaneously”, AT&T Technical Journal, No.64, 1985.



Το «όριο γινομένου» για τηλεφωνικά δίκτυα (3)

Παράδειγμα (μη αξιοπιστίας της (13))

Έστω η περίπτωση όπου όλες οι ζεύξεις έχουν την ίδια χωρητικότητα C και έστω ότι υπάρχει μόνο μια κατηγορία κλήσεων που χρησιμοποιεί όλες τις ζεύξεις. Έχουμε δηλαδή ότι $\alpha_j = \alpha_1$ για όλες τις ζεύξεις $j=1,\dots,J$.

Το όριο γινομένου,

$$B_k \leq 1 - (1 - E_C(a_1))^J \quad (14)$$

μπορεί να φθάσει πολύ κοντά στην μονάδα αυξάνοντας το J ενώ η πραγματική πιθανότητα απωλείας κλήσεως είναι $E_C(a_1)$ για όλες τις ζεύξεις!!



Το «όριο γινομένου» για τηλεφωνικά δίκτυα (4)

Σημειώνουμε στο σημείο αυτό ότι το όριο γινομένου είναι ένα άνω όριο, επομένως είναι λογικό να αναζητήσουμε μικρότερες τιμές, οι οποίες θα δίδουν καλύτερες προσεγγίσεις.

Μια τέτοια προσέγγιση είναι να μειώσουμε το φορτίο κίνησης $\overline{\alpha_j}$ στην ζεύξη j , λαμβάνοντας υπόψη τις απώλειες στις άλλες ζεύξεις.

Η προσέγγιση αυτή ονομάζεται **προσέγγιση μειωμένου φορτίου (reduced load approximation)** και μελετάται στην επόμενη ενότητα!



Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα Πανεπιστημίου Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την 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 Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.00.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Μιχαήλ Λογοθέτης. «Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κίνησης. Δίκτυα απωλειών μορφής γινομένου». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <https://eclass.upatras.gr/courses/EE772/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 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-sa/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.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων

Το Έργο αυτό κάνει χρήση του ακόλουθου έργου:

Εικόνες/Σχήματα/Διαγράμματα/Φωτογραφίες/Πίνακες

[1] Μιχαήλ Λογοθέτης, *Θεωρία Τηλεπικοινωνιακής Κινήσεως και Εφαρμογές*, 2^η έκδοση, Παπασωτηρίου, 2012

