ΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΜΕ ΤΟ ΠΡΩΤΟΚΟΛΛΟ NTP

Χαράλαμπος Σαραφίδης και Χαρίτων Πολάτογλου
Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο, 54124 Θεσσαλονίκη
email: hsara@physics.auth.gr

Περίληψη

Το πρωτόκολλο NTP (Network Time Protocol) εξακολουθεί να αποτελεί την βάση του συγχρονισμού μεταξύ υπολογιστών και δικτυακών σταθμών και ακόμη και μετά την ανάπτυξη του εξελιγμένου PTP θα συνεχίσει να αποτελεί μια φθηνή και σχετικά αξιόπιστη λύση. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται συγκριτικές μετρήσεις συγχρονισμού με χρήση του πρωτοκόλλου NTP. Τα εσωτερικά ρολόγια διαφορετικών υπολογιστών και κινητών τηλεφώνων συγκρίθηκαν με διάφορους αξιόπιστους διακομιστές σε διαφορετικά δίκτυα και υπό διαφορετικές συνθήκες δικτυακού φόρτου, με χρήση ελεύθερου λογισμικού. Διαπιστώθηκε ότι η κίνηση στο τοπικό αλλά και μητροπολιτικό δίκτυο επηρεάζει την σταθερότητα των μετρήσεων, ο μεγαλύτερος φόρτος εισάγει περισσότερο θόρυβο με αποτέλεσμα την μικρή υποβάθμιση της χρονικής πληροφορίας. Ο θόρυβος αναλύθηκε με στατιστική Allan για να διαπιστωθεί η φύση και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, ενώ παρατίθεται και μια εκτίμηση της αβεβαιότητας που μπορεί να εισαχθεί στον συγχρονισμό μεταξύ δύο συσκευών. Η αύξηση του θορύβου δεν εμποδίζει την διάκριση του θορύβου στον συγχρονισμό από την σταθερή μετατόπιση του ρολογιού του κάθε υπολογιστή σε σχέση με τον παγκόσμιο χρόνο UTC που λαμβάνεται από τους διακομιστές. Εξετάζεται η χρήση της μεθοδολογίας για την διδασκαλία των σχετικών εννοιών της μετρολογίας στην τριτοβάθμια εκπαίδευση.

Λέξεις-Κλειδιά: Χρόνος, πρωτόκολλο NTP, διακομιστής NTP.

Abstract

The Network Time Protocol (NTP) is still the basic time synchronization protocol used to maintain the clocks of computers and network stations. Even after the development of more advance infrastructures based on the Precise Time Protocol (PTP) it will continue to be used as a cheap and robust solution. In the present work NTP computer clock comparisons are presented. The internal real time clocks of different computers and mobile devices were compared with a pool of trustworthy NTP servers under different network conditions by using a freely available software. Heavy traffic in local or wide area network affects the stability of the measurements, heavy network load introduces noise and degrades the time information. Noise was analysed with Allan statistics in order to detect its characteristic parameters while an uncertainty estimation for the time comparisons is introduced. Increased noise does not prevent the observation of the distinct character of the local machine's time base drift compared to the UTC time. The possibility of using the relevant methodology in education for teaching specific metrology concepts at university level is discussed.

Λέξεις-Κλειδιά: Time, NTP, NTP server.

1. Εισαγωγή – χρόνος και δικτυακός συγχρονισμός

Η έννοια του χρόνου και το αντίστοιχο φυσικό μέγεθος είναι μία ιδιαίτερη περίπτωση στον κόσμο μας, θεμελιώδες μέγεθος στο SI και επακόλουθα αυστηρά ορισμένο αλλά και έννοια με ιδιαίτερη παρουσία σε φιλοσοφικής φύσεως κείμενα. Ταυτόχρονα, αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι της καθημερινότητάς μας, παρά το γεγονός ότι συνήθως τείνουμε να αγνοούμε την αυστηρότητα του ορισμού κάνοντας ενίοτε χρήση και όρων που έχουν καταργηθεί. Μετά την παρουσίαση του πρώτου εμπορικού ατομικού ρολογιού σχετικά χαμηλού κόστους το 1964, η πρόσβαση σε υψηλής πιστότητας και αξιοπιστίας χρονική πληροφορία έγινε πρακτικά εύκολη και αναπτύχθηκαν πολλές εφαρμογές που αξιοποιούν την δυνατότητα αυτή. Συστήματα όπως το παγκόσμιο σύστημα εντοπισμού θέσης (GPS) και εξελίξεις όπως οι σημαντικές βελτιώσεις στα δίκτυα επικοινωνιών δεν θα μπορούσαν να υλοποιηθούν χωρίς την διάδοση αυτών των υψηλής πιστότητας συσκευών καθώς βασίζονται στην μέτρηση του χρόνου με μεγάλη ακρίβεια (David W. Allan, Ashby, & Hodge, 1997; D W Allan et al., 1995).

Πολλές τεχνολογικές εφαρμογές διέπονται από κανονισμούς και τεχνικές προδιαγραφές που απαιτούν σχετικά μικρότερη ακρίβεια, Υπάρχουν και πολλές εφαρμογές των οποίων η απαιτούμενη χρονική ακρίβεια είναι μικρότερη από αυτή των ατομικών ρολογιών αλλά ιδιαίτερα σημαντική και αυστηρά ορισμένη. Για παράδειγμα στο παγκοσμιοποιημένο διεθνές περιβάλλον συναλλαγών μέσω δικτύων είναι πολύ σημαντική η έννοια του συγχρονισμού των διαφόρων υπολογιστικών συστημάτων. Η ακρίβεια των αρχείων καταγραφής για τον εντοπισμό προβλημάτων και δικτυακών επιθέσεων, η χρονική σήμανση εγγράφων, υπηρεσίες ταυτοποίησης, υπηρεσίες κατανομής πόρων, υπηρεσίες διεκπεραίωσης χρηματικών συναλλαγών είναι μερικά παραδείγματα όπου είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο συγχρονισμός της χρονικής πληροφορίας μεταξύ διαφορετικών και συχνά απομακρυσμένων υπολογιστικών συστημάτων. Τα εσωτερικά ρολόγια των υπολογιστών δεν μπορούν σε καμία περίπτωση να τηρήσουν αυτές τις προδιαγραφές ενώ η χρήση ταλαντωτών υψηλής ακρίβειας ως χρονική βάση στα υπολογιστικά συστήματα είναι μεν τεχνικά εφικτή αλλά κατά βάση απαγορευτική λόγω υψηλού οικονομικού κόστους. Η λύση στα συγκεκριμένα προβλήματα βρέθηκε με την ανάπτυξη πρωτοκόλλων δικτυακού συγχρονισμού με πιο σημαντικό το πρωτόκολλο NTP (Network Time Protocol) (Levine, 2008; D L Mills, Martin, Burbank, & Kasch, 2010; David L Mills, 1985; David L Mills & Group, 2006). Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο επιτρέπει τον συγχρονισμό απομακρυσμένων κόμβων του διαδικτύου από ειδικούς διακομιστές χρόνου. Χρησιμοποιεί δικτυακά πακέτα μεγέθους από 60 ως 128 bytes ανάλογα με το αν συμπεριλαμβάνεται κρυπτογράφηση ή όχι ενώ η χρονική πληροφορία για τον συγχρονισμό έχει μέγεθος 8 bytes και περιλαμβάνει διάφορες προβλέψεις όπως την πιθανότητα εισαγωγής εμβόλιμου δευτερολέπτου (leap second) (Levine & Mills, 2000). Τα 64 αυτά bit της χρονικής πληροφορίας χωρίζονται εξίσου σε ακέραιο και δεκαδικό μέρος, από αυτό προκύπτει ότι η ανάλυση της χρονικής πληροφορίας είναι 232 ps ενώ ο μεγάλος κύκλος της εποχής (epoch) του NTP διαρκεί 49710 ημέρες, 6 ώρες, 28 λεπτά και 16 δευτερόλεπτα. Η πρώτη «αλλαγή έτους» του πρωτοκόλλου θα συμβεί την Πέμπτη 7 Φεβρουαρίου 2036 την ώρα UTC 6:28:16, εφόσον εξακολουθεί να χρησιμοποιείται. Χρησιμοποιεί πρωτόκολλο μετάδοσης UDP/IP στην θύρα 123.

Αν θεωρήσουμε ότι μία χρονική στιγμή t_0 ο χρόνος του ρολογιού ενός δικτυακού κόμβου συγχρονίζεται με τον αντίστοιχο ενός αξιόπιστου χρονικού διακομιστή, τότε η συνάρτηση T(t) που δίνει την διαφορά μεταξύ των δύο ρολογιών σε μία μελλοντική χρονική στιγμή t μπορεί να προσεγγιστεί από την εξίσωση 1:

$$T(t) = T(t_0) + R\cdot(t-t_0) + \tfrac{1}{2}\, D\cdot(t-t_0)^2 \qquad (1)$$

Η τιμή $T(t_0)$ είναι η χρονική διαφορά των δύο ρολογιών την χρονική στιγμή του συγχρονισμού, R η συχνοτική απόκλιση των δύο ρολογιών η οποία προκαλεί γραμμική διαφοροποίηση του χρόνου μεταξύ τους και D η γραμμική μετατόπιση του ρυθμού με τον οποίο τρέχει το ρολόι του δικτυακού κόμβου σε σχέση με τον ρολόι του διακομιστή, που οφείλεται στην γήρανση του ταλαντωτή. Η D δίνει εξάρτηση δεύτερου βαθμού ως προς τον χρόνο. Αυτοί οι όροι περιέχουν συστηματικές αποκλίσεις, που μπορούν γενικά να διορθωθούν και τυχαίες διακυμάνσεις οι οποίες δεν μπορούν να διορθωθούν. Κάποια πρωτόκολλα συγχρονισμού όπως το νεότερο Precise Time Protocol (PTP) προσπαθεί να εκτιμήσει μόνο τον όρο $T(t_0)$, σε αντίθεση το πρωτόκολλο NTP προσπαθεί επιπρόσθετα να εκτιμήσει και την παράμετρο R. Η παράμετρος D συνήθως δεν λαμβάνεται υπόψη γιατί δεν επηρεάζει σημαντικά την χρονική πληροφορία σε σχέση με τις άλλες δύο και εν μέρει διορθώνεται από αυτές. Βασικός σκοπός του NTP είναι ο προσδιορισμός των παραμέτρων $T(t_0)$ και R ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση $T(t)$ για $t > t_0$. Σε μια τυπική περίπτωση η παράμετρος R μπορεί να έχει συστηματικές αποκλίσεις της τάξης των αρκετών εκατοντάδων ppm και μικρότερες τυχαίες με αποτέλεσμα η συσσωρευμένη χρονική απόκλιση να ανάγεται σε κάποια δευτερόλεπτα ανά ημέρα, μια ιδιαίτερα υψηλή τιμή. Η τήρηση κάποιων νομικών προδιαγραφών όπως η απαίτηση για χρονική ακρίβεια λίγων εκατοντάδων ms σε σχέση με τον χρόνο UTC συνεπάγεται την ανάγκη συχνών επανεκτιμήσεων των παραμέτρων $T(t_0)$, R, ακόμη και 2-3 φορές ανά ώρα. Ανάλογα με τις δικτυακές συνθήκες και τα χρονικά διαστήματα ανάμεσα στους συγχρονισμούς, οι αποκλίσεις μεταξύ των δύο ρολογιών, η διαφορά φάσης μεταξύ τους δηλαδή, μπορεί να έχει χαρακτήρα τυχαίο (jitter) ή βηματικό (wander) (David L Mills, 2006).

Σχήμα 1: Αρχή λειτουργίας συγχρονισμού μέσω του πρωτοκόλλου NTP

Η αρχή της λειτουργίας του NTP παριστάνεται στο Σχ. 1. Μία χρονική στιγμή t_1^{cl} σύμφωνα με το δικό του ρολόι, ο δικτυακός κόμβος αποστέλλει ένα αίτημα λήψης χρονικής πληροφορίας το οποίο λαμβάνεται από τον διακομιστή χρόνου την χρονική στιγμή t_1^s, σύμφωνα με το ρολόι του διακομιστή χρόνου. Το πακέτο συγχρονισμού αποστέλλεται από τον διακομιστή την χρονική στιγμή t_2^s και λαμβάνεται από τον δικτυακό κόμβο την χρονική στιγμή t_2^{cl}, με την χρονοσήμανση να γίνεται πάντα βάσει του τοπικού ρολογιού. Με την υπόθεση ότι ο χρόνος διαδρομής της απάντησης (t_2^{cl} - t_2^s) είναι ίσος με τον χρόνο διαδρομής του αιτήματος (t_1^s - t_1^{cl}) ο δικτυακός κόμβος – πελάτης μπορεί να προσδιορίσει αυτό τον χρόνο διαδρομής σύμφωνα με την εξίσωση 2:

$$\text{Χρόνος Διαδρομής} = (t_2^{cl} - t_1^{cl}) - (t_2^s - t_1^s) \quad (2)$$

Το πακέτο συγχρονισμού περιέχει τους χρόνους λήψης και αποστολής της απάντησης από τον διακομιστή, σύμφωνα με το ρολόι του διακομιστή, συνεπώς εύκολα προκύπτει ότι η χρονική απόκλιση του ρολογιού του από τον διακομιστή είναι:

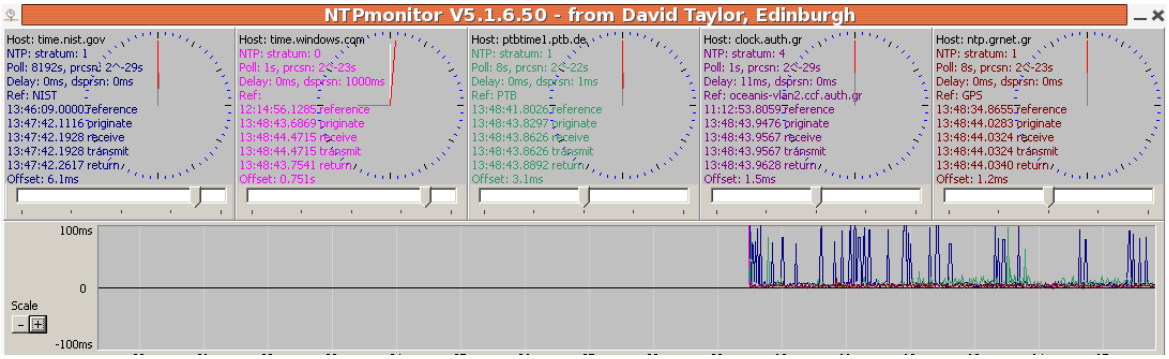
$$\text{Χρονική Απόκλιση} = [(t_1^s - t_1^{cl}) + (t_2^s - t_2^{cl})]/2 \quad (3)$$

Το αδύναμο σημείο του πρωτοκόλλου είναι ακριβώς η βασική του υπόθεση, ότι ο χρόνος μετάβασης του αιτήματος από τον δικτυακό κόμβο προς τον διακομιστή είναι ίσος με τον χρόνο διαδρομής της απάντησης. Ειδικά όταν η διαδρομή περνάει από πολλούς κόμβους του δικτύου ευρείας περιοχής κάτι τέτοιο δεν μπορεί να ισχύει, γενικά φόρτος είτε στο τοπικό δίκτυο είτε στο δίκτυο ευρείας περιοχής ακυρώνει την συγκεκριμένη υπόθεση. Από

τα παραπάνω προκύπτει ότι η μελέτη των χρονικών αποκλίσεων μεταξύ δύο απομακρυσμένων δικτυακών σταθμών εκ των οποίων ο ένας λειτουργεί ως αξιόπιστος διακομιστής χρόνου μπορεί να δώσει πληροφορίες τόσο για τις συνθήκες του δικτύου όσο και για τα χαρακτηριστικά των εσωτερικών ρολογιών των σταθμών. Ταυτόχρονα, μία πειραματική διαδικασία λήψης μετρήσεων μπορεί να υποστηρίξει την διδασκαλία των σχετικών εννοιών, όπως της «σταθερότητας» και του «ρυθμού μεταβολής» ενός μεγέθους σε αντιδιαστολή με την τιμή του μεγέθους μία δεδομένη χρονική στιγμή.

2. Μεθοδολογία

Η πειραματική μας μεθοδολογία βασίστηκε στην λήψη μετρήσεων της χρονικής διαφοράς του ρολογιού κάποιου δικτυακού κόμβου από την χρονική πληροφορία που αυτός λάμβανε μέσω πρωτοκόλλου NTP από μερικούς αξιόπιστους διακομιστές. Χρησιμοποιήθηκε το ελεύθερα διαθέσιμο λογισμικό NTP Monitor έκδοσης 5.1.6 (Taylor, 2013). Το συγκεκριμένο λογισμικό μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να ζητάει κάθε 60 s χρονική πληροφορία από μια σειρά επιλεγμένων από τον χρήστη διακομιστών NTP. Στην περίπτωσή μας επιλέξαμε 5 αξιόπιστους διακομιστές, τον διακομιστή του Εθνικού Μετρολογικού Ινστιτούτου των ΗΠΑ (NIST – time.nist.gov), την δεξαμενή διακομιστών time.windows.com που αποτελεί την προρυθμισμένη πηγή χρονικού συγχρονισμού τον υπολογιστών που τρέχουν το λειτουργικό σύστημα Windows, τον διακομιστή του Εθνικού Μετρολογικού Ινστιτούτου της Ο.Δ. Γερμανίας (PTB – ptbtime1.ptb.de), τον διακομιστή χρόνου του ΑΠΘ (clock.auth.gr) και τον διακομιστή του Εθνικού Δικτύου Έρευνας και Τεχνολογίας (ΕΔΕΤ – ntp.grnet.gr).



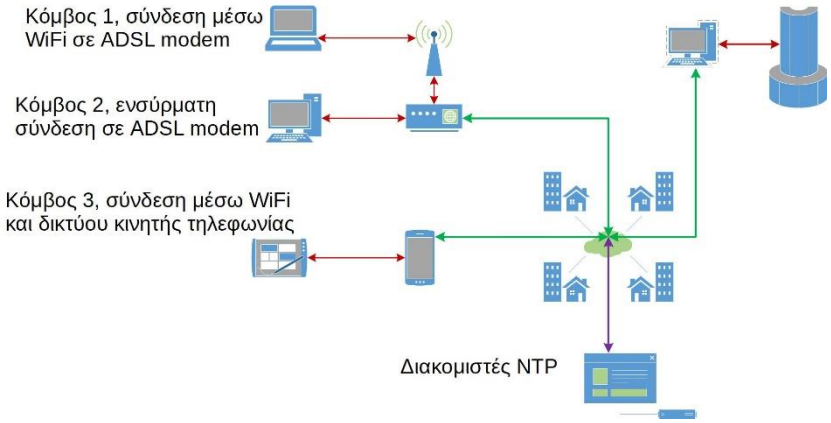
Σχήμα 2: Εικόνα από το λογισμικό NTP Monitor που χρησιμοποιήθηκε για τις μετρήσεις

Η διαφορετική χωροθέτηση των επιλεγμένων διακομιστών δημιουργεί συνθήκες παρατήρησης διαφορών που οφείλονται στο δίκτυο ευρείας περιοχής, οπότε μπορούμε να παρατηρήσουμε τυχόν διαφορές μεταξύ κοντινά χωροθετημένων διακομιστών και πιο μακρινών. Στην δεύτερη περίπτωση παρεμβάλλονται περισσότερες συνδέσεις και ενδιάμεσοι κόμβοι. Για την εξομοίωση της επίδρασης των συνθηκών σε επίπεδο μητροπολιτικού ή τοπικού δικτύου έγιναν ταυτόχρονες μετρήσεις από διαφορετικές συσκευές με διαφορετικού τύπου πρόσβαση στο διαδίκτυο, οπότε μπορούμε να παρατηρήσουμε τυχόν διαφορές από τις μετρήσεις προς τον ίδιο διακομιστή. Υλοποιήθηκαν διάφορα σενάρια συγκριτικών μετρήσεων. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα για δύο από αυτά.

2.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων πρώτου σεναρίου

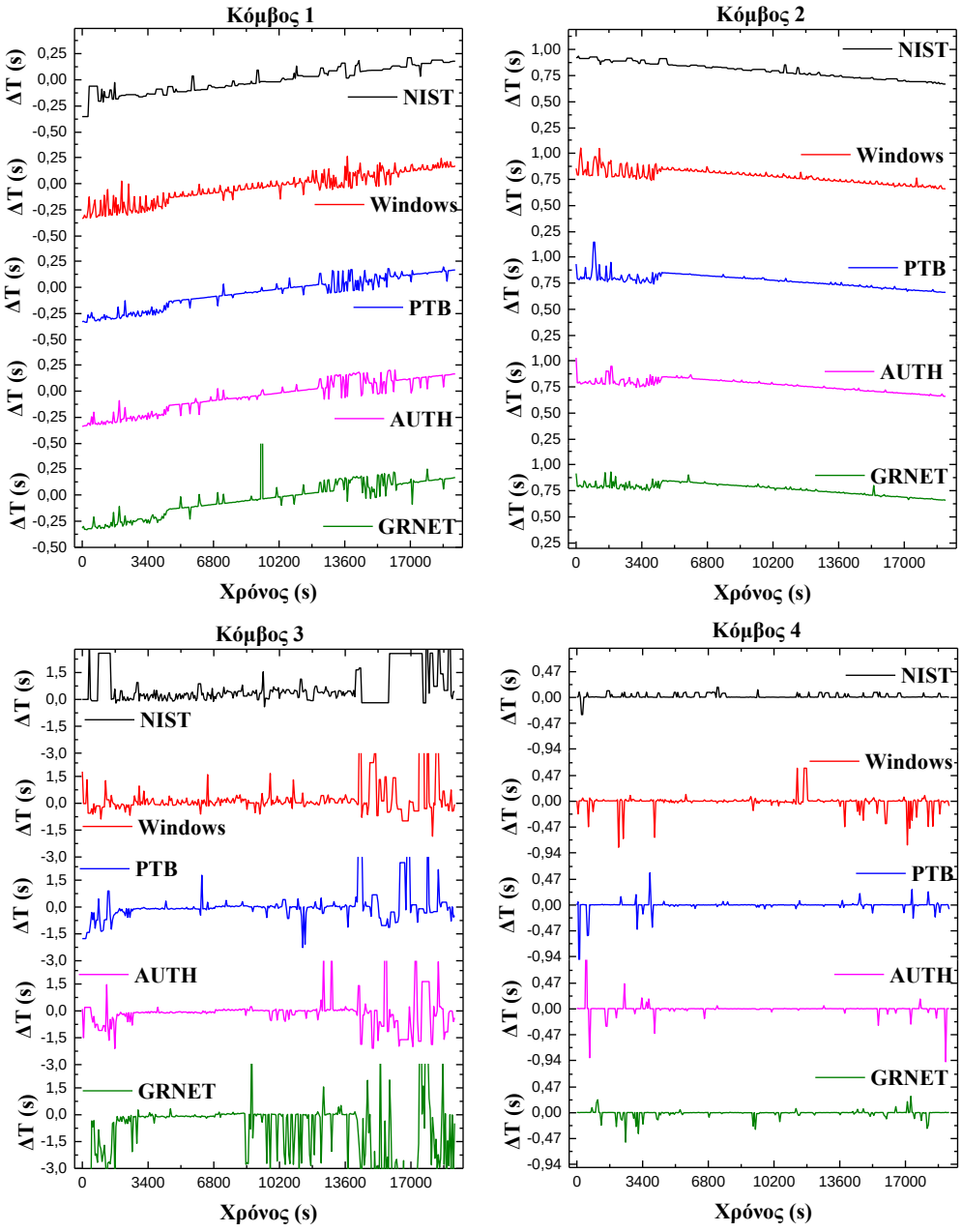
Το πρώτο σενάριο παρουσιάζεται διαγραμματικά στο Σχ. 3 και αφορούσε μετρήσεις από 4 διαφορετικούς κόμβους. Οι δύο κόμβοι ήταν προσωπικοί υπολογιστές με λειτουργικό σύστημα windows και είχαν πρόσβαση στο διαδίκτυο μέσω μιας οικιακής σύνδεσης ADSL συγχρονισμένης στα 6 MBps. Ο ένας σταθμός συνδέονταν στο modem ασύρματα ενώ ο

δεύτερος ενσύρματα από διαφορετικό χώρο, με τμήμα της σύνδεσης να υλοποιείται μέσω ηλεκτρικής καλωδίωσης με κατάλληλους προσαρμογείς. Ο τρίτος κόμβος ήταν μία φορητή ταμπλέτα η οποία συνδέονταν στο διαδίκτυο με την τεχνική tethering μέσω κινητού τηλεφώνου. Ο τέταρτος κόμβος ήταν ένας εικονικός υπολογιστής με λειτουργικό σύστημα Ubuntu Linux και έτρεχε το λογισμικό μετρήσεων μέσω του εξομοιωτή Wine. Ο εικονικός αυτός υπολογιστής έτρεχε στην υποδομή Okeanos του ΕΔΕΤ και προφανώς οι συνθήκες συγχρονισμού με τον διακομιστή του ΕΔΕΤ ήταν οι βέλτιστες δυνατές. Γι' αυτό τον λόγο θα τις θεωρούμε ως μετρήσεις αναφοράς. Αντίστοιχα, στους οικιακούς υπολογιστές εισάχθηκε αρχικά μεγάλη δικτυακή κίνηση με μεταφορές αρχείων μεταξύ εφαρμογών cloud computing ώστε να παρατηρηθεί η επίδραση του φόρτου του τοπικού δικτύου στις μετρήσεις.

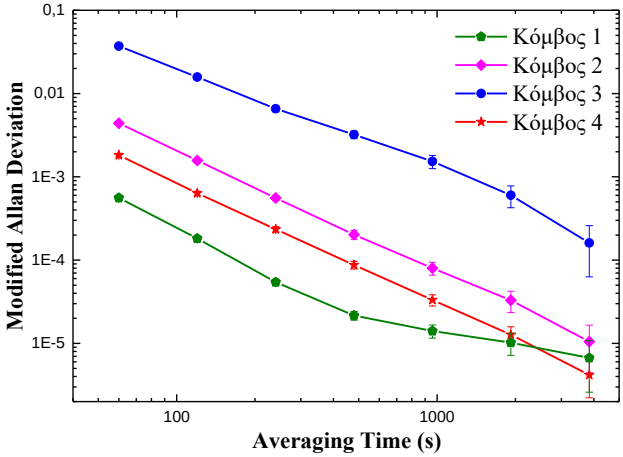


Σχήμα 3: Διάταξη του πρώτου σεναρίου μετρήσεων

Στο Σχ. 4 παρουσιάζονται τα διαγράμματα για κάθε κόμβο και για κάθε διακομιστή. Στον κατακόρυφο άξονα είναι η διαφορά των δύο ρολογιών με αναφορά το ρολόι του κόμβου, ΔΤ (s). Στον οριζόντιο άξονα είναι ο χρόνος σε δευτερόλεπτα. Όλα τα διαγράμματα έχουν εύρος τιμών 1 s εκτός από αυτό του κόμβου 3 όπου το εύρος είναι το 6 s. Από τα διαγράμματα μπορούμε να εξάγουμε αρκετά συμπεράσματα. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι ο συγχρονισμός μέσω του δικτύου κινητής είναι κακός, εμφανίζει ιδιαίτερα μεγάλο θόρυβο. Διαπιστώνουμε ότι οι μετρήσεις στον κόμβο 1 έχουν μεγαλύτερο θόρυβο από τις μετρήσεις στον κόμβο 2. Αυτή η διαφορά μπορεί να οφείλεται μόνο στο τοπικό δίκτυο, και παρά την περιπλοκότητα της ενσύρματης σύνδεσης αυτή δείχνει να υπερτερεί της ασύρματης. Σε όλες τις μετρήσεις παρατηρούμε αυξημένο θόρυβο στην πρώτη περίπου ώρα της διαδικασίας, αυτή η παρατήρηση παραπέμπει σε αυξημένο φόρτο στο μητροπολιτικό ή στο δίκτυο ευρείας περιοχής. Η ημέρα που λήφθηκαν οι συγκεκριμένες μετρήσεις ήταν εργάσιμη (Τρίτη) και η περίοδος ενδιαφέροντος ήταν 15:30-16:30 περίπου. Πιθανώς να υπάρχει κάποια συσχέτιση με την λειτουργία επιχειρήσεων και οργανισμών. Αντίστοιχα υπάρχει μία αύξηση του θορύβου αργότερα, σε μετρήσεις που αντιστοιχούν μετά τις 18:30 το απόγευμα, αν και κάτι τέτοιο δεν παρατηρείται στην περίπτωση του κόμβου 2. Στην περίπτωση των κόμβων 1 και 2 είναι εμφανής η παράμετρος R, η γραμμική μετατόπιση του ρολογιού τους σε σχέση με κάθε διακομιστή. Από ένα διάγραμμα με επαρκές καθαρό τμήμα μπορούμε να προσδιορίσουμε τον συγκεκριμένο όρο με καλή ακρίβεια, προκύπτει η τιμή -1.295×10^{-5} για τον κόμβο 1, που αντιστοιχεί σε απόκλιση 1.12 s/day και η τιμή $+2.252 \times 10^{-5}$ για τον κόμβο 2, αντιστοιχεί σε απόκλιση 1.95 s/day. Ο κόμβος 4 είναι ιδιαίτερα σταθερός, $R = -2.443 \times 10^{-7}$ ή 0.02 s/day ενώ ο κόμβος 3 έχει επίσης μικρό R, 2.896×10^{-6} ή 0.25 s/day, παρά τον υψηλό θόρυβο που διαπιστώνουμε στις μετρήσεις.



Σχήμα 4: Μετρήσεις πρώτου σεναρίου

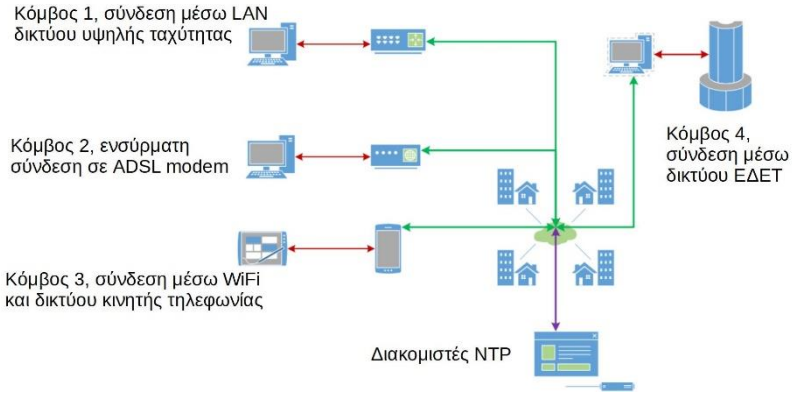


Σχήμα 5: Τροποποιημένη στατιστική Allan για τις μετρήσεις του πρώτου σεναρίου

Η ανάλυση του θορύβου έγινε με την χρήση στατιστικής Allan, και πιο συγκεκριμένα με χρήση της τροποποιημένης συνάρτησης Allan (Allan Modified Variance) (D.W. Allan & Barnes, 1981). Στο Σχ. 5 παρουσιάζονται οι καμπύλες της τροποποιημένης στατιστικής Allan για τις μετρήσεις που λήφθηκαν από τους τέσσερις κόμβους. Από την προσαρμογή με ειδικό λογισμικό προέκυψε ότι τρεις κόμβοι (1, 2, 4) εμφανίζουν λευκό θόρυβο στην φάση των ρολογιών τους ενώ ο κόμβος 2 εμφανίζει θόρυβο τύπου «flicker» (Rutman & Walls, 1991).

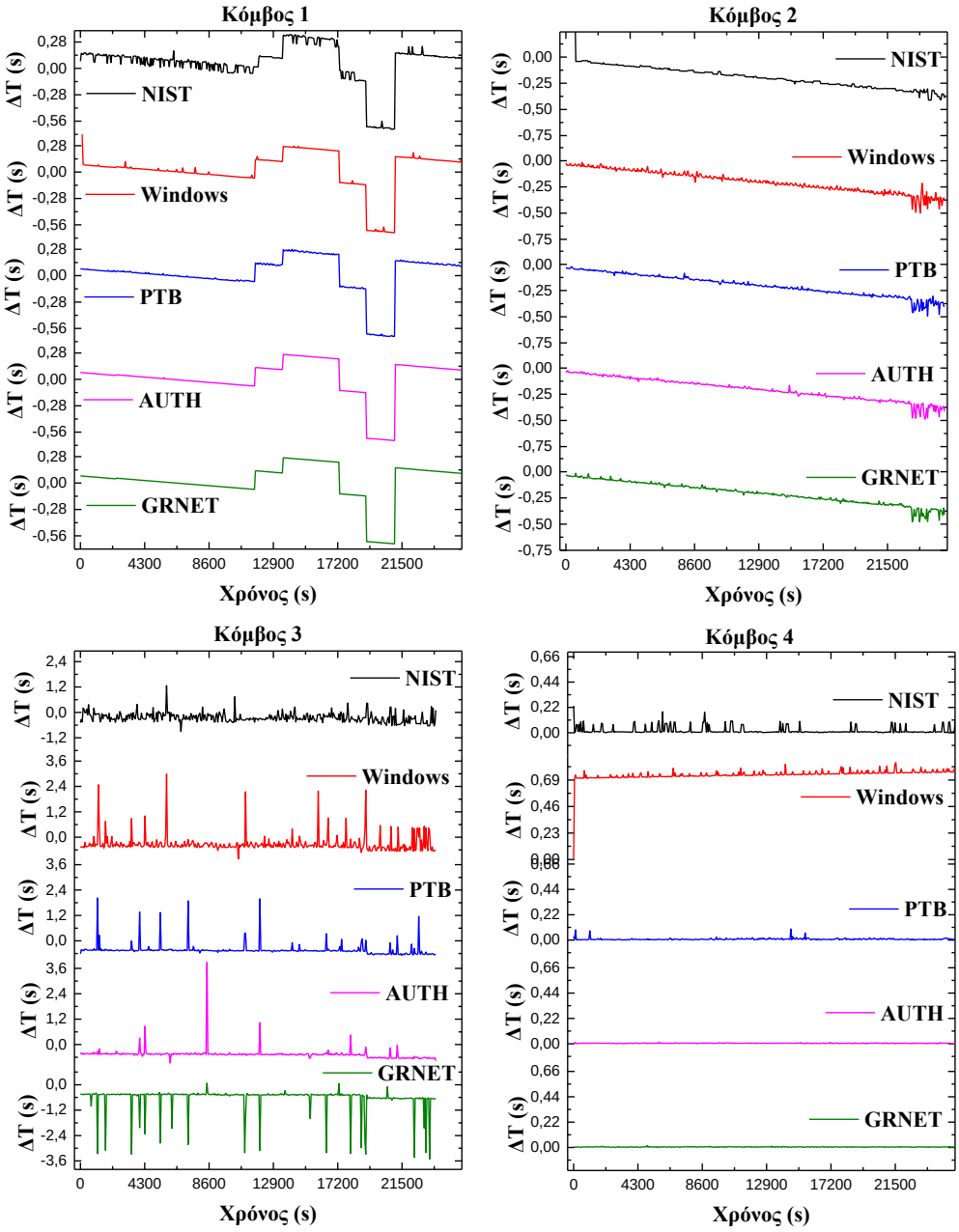
2.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων δεύτερου σεναρίου

Στο δεύτερο σενάριο μετρήσεων που παρουσιάζουμε αντικαταστήσαμε τον κόμβο 1 του προηγούμενου με έναν σταθερό υπολογιστή συνδεδεμένο στο τοπικό δίκτυο υψηλής ταχύτητας του τμήματος Φυσικής του ΑΠΘ. Οι υπόλοιποι κόμβοι ήταν οι ίδιοι (Σχ. 6).

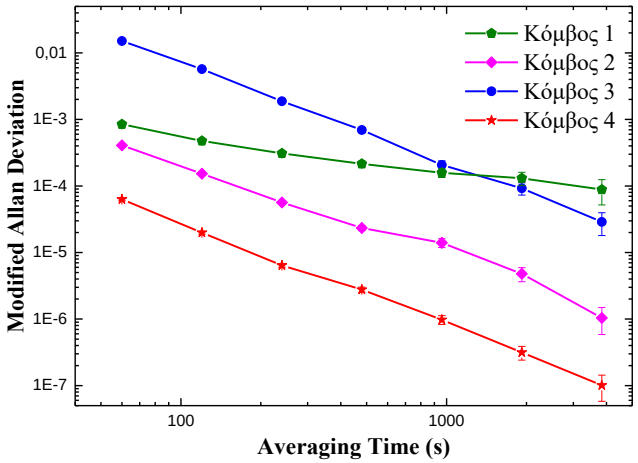


Σχήμα 6: Διάταξη του δεύτερου σεναρίου μετρήσεων

Στο Σχ. 7 παρουσιάζονται τα διαγράμματα για κάθε κόμβο και για κάθε διακομιστή αντίστοιχα με το Σχ. 4. Παρατηρούμε ένα ενδιαφέρον φαινόμενο στην περίπτωση του κόμβου 1, το ρολόι του παρουσιάζει κάποια βήματα (steps), μετά από τα οποία όμως η συχνότητά του παραμένει σταθερή. Παρατηρήθηκε ότι αυτά τα βήματα προκύπτουν κάθε φορά που ο υπολογιστής μπαίνει σε λειτουργία μειωμένης κατανάλωσης ενέργειας λόγω των ρυθμίσεών του. Και σε αυτή την περίπτωση παρατηρούμε ότι ο συγχρονισμός μέσω του δικτύου κινητής εμφανίζει μεγαλύτερο θόρυβο, λόγω καλύτερης κάλυψης του δικτύου στην τοποθεσία που έγιναν οι μετρήσεις ο θόρυβος ήταν μικρότερος από το πρώτο σενάριο. Η ποιότητα γενικά των μετρήσεων ήταν σαφώς καλύτερη, κάτι που σε όλες τις περιπτώσεις μπορεί να αποδοθεί στον μικρότερο φόρτο στο τοπικό δίκτυο. Προς το τέλος των μετρήσεων εισάχθηκε δικτυακός φόρτος στο τοπικό δίκτυο του κόμβου 2 και όπως είναι φανερό από το Σχ. 7 ο θόρυβος στις μετρήσεις αυξήθηκε. Η γραμμική μετατόπιση R είχε τιμή -1.299×10^{-5} για τον κόμβο 1, που αντιστοιχεί σε απόκλιση 1.12 s/day, για τον κόμβο 2 προέκυψε η τιμή -1.307×10^{-5} , αντιστοιχεί σε απόκλιση 1.13 s/day. Ο κόμβος 4 είναι πάλι ιδιαίτερα σταθερός, $R = +1.468 \times 10^{-8}$ ή 0.002 s/day ενώ ο κόμβος 3 έχει επίσης μικρό R, 2.599×10^{-6} ή 0.22 s/day, παρά τον υψηλό θόρυβο που διαπιστώνουμε ξανά στις μετρήσεις. Στην τελευταία περίπτωση δεν έχουμε πρακτικά μεταβολή σε σχέση με το πρώτο σενάριο. Στις μετρήσεις του κόμβου 4 παρατηρήθηκε και μία σημαντική απόκλιση για τον διακομιστή time.windows.com, η οποία δεν είναι ξεκάθαρο που οφείλεται. Η ανάλυση με την τροποποιημένη στατιστική Allan έδωσε τα ίδια αποτελέσματα για τους κοινούς κόμβους. Το φαινόμενο των βημάτων στην φάση του ρολογιού του κόμβου 1 αντανακλάται στα αποτελέσματα, η καμπύλη έχει πολύ μικρότερη κλίση δηλαδή δεν βελτιώνεται ιδιαίτερα με την αύξηση του χρονικού διαστήματος υπολογισμού.



Σχήμα 7: Μετρήσεις δεύτερου σεναρίου



Σχήμα 8: Τροποποιημένη στατιστική Allan για τις μετρήσεις του δεύτερου σεναρίου

2.3 Χρήση της μεθοδολογίας για εκπαιδευτικούς σκοπούς

Η συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία που ακολουθήσαμε είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα και για διδακτικούς σκοπούς σε επίπεδο τριτοβάθμιας εκπαίδευσης. Είναι ιδιαίτερα εύκολα υλοποιήσιμη με τις υπάρχουσες υποδομές. Παρέχει μεγάλο αριθμό δεδομένων προς επεξεργασία και παρατήρηση διαφορετικών φαινομένων, όπως έχουμε αναλύσει. Ο κυριότερος λόγος όμως που προτείνεται η χρήση της σε σχετικά πανεπιστημιακά μαθήματα είναι η χρησιμότητά της στην κατανόηση κάποιων ειδικών εννοιών. Οι διδασκόμενοι καταρχήν μπορούν να συνειδητοποιήσουν κάποια πράγματα για την έννοια του χρόνου και την τήρησή της από ηλεκτρονικές συσκευές. Οι υπολογισμοί της συχνοτικής απόκλισης της χρονικής βάσης των ρολογιών των υπολογιστών προκαλούν συχνά έκπληξη στους διδασκόμενους που δεν μπορούν να συνειδητοποιήσουν πως είναι δυνατόν ένα ακριβό και περίπλοκο ηλεκτρονικό σύστημα να αποκλίνει ακόμη και κάποια δευτερόλεπτα ημερησίως. Αντιλαμβάνονται την ανάγκη για συχνό συγχρονισμό και έλεγχο της αναφοράς που χρησιμοποιούν για την μέτρηση του χρόνου, μία διαδικασία που πλέον στις περισσότερες συσκευές γίνεται μεν αυτόματα αλλά σε περίπτωση αστοχίας ή κάποιας κακής ρύθμισης μπορεί να δημιουργηθούν προβλήματα. Η σύνδεση με τις θεωρητικές έννοιες και πληροφορίες σχετικά με τον χρόνο και την μέτρησή του υποβοηθείται αρκετά από αυτά τα πειράματα.

Είναι επίσης ιδιαίτερα σημαντικό ότι η φύση των συγκεκριμένων μετρήσεων βοηθάει ιδιαίτερα την κατανόηση κάποιων όρων μετρολογίας, όπως των διαφορετικών ειδών σταθερότητας ενός σήματος. Περισσότερες λεπτομέρειες συνήθως αφορούν φοιτητές που παρακολουθούν συγκεκριμένα μεταπτυχιακά προγράμματα ειδίκευσης καθώς η συχνοτική ανάλυση του θορύβου ενός ηλεκτρονικού σήματος είναι περίπλοκο και προχωρημένο αντικείμενο, εν τούτοις κάποια βασικά στοιχεία μπορούν να αξιοποιηθούν και σε προπτυχιακό επίπεδο. Στις μετρήσεις που παρουσιάσαμε διακρίνονται καθαρά τόσο η σταθερότητα σε μεγάλη χρονική κλίμακα (long term stability) όσο και η διαφορετικού χαρακτήρα σταθερότητα σε μικρή χρονική κλίμακα (short term stability). Η δεύτερη συνίσταται στον τυχαίο θόρυβο μεταξύ διαδοχικών και γενικά κοντινών μετρήσεων ενώ η πρώτη στην γραμμική μετατόπιση του ενός ταλαντωτή σε σχέση με την αναφορά λόγω διαφορετικής συχνότητας (drift) και σε φαινόμενα όπως οι απότομες μετατοπίσεις (βήματα – steps) στην φάση. Ο διαχωρισμός και η κατανόηση αυτών των εννοιών και των επιπτώσεών τους σε σχετικές μετρήσεις είναι σημαντικός στην μετρολογική εκπαίδευση φοιτητών θετικών επιστημών και μηχανικής. Τέλος, σημαντική είναι και η συνεισφορά των πειραματικών αυτών μεθοδολογιών στην κατανόηση της φύσης των δυναμικών μεγεθών και της ιδιαίτερης στατιστικής που χρειάζονται για την μελέτη τους, η απλή στατιστική με χρήση εννοιών όπως η τυπική απόκλιση δεν είναι σωστό να εφαρμόζεται σε δυναμικά μεταβαλλόμενα μεγέθη, για τα τελευταία πιο κατάλληλες είναι άλλες στατιστικές όπως η τροποποιημένη στατιστική Allan που χρησιμοποιήσαμε.

3. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται δικτυακές μετρήσεις μετάδοσης χρονικής πληροφορίας μέσω του πρωτοκόλλου NTP και με χρήση ελεύθερα διαθέσιμου λογισμικού. Οι μετρήσεις έγιναν από διάφορους σταθμούς εργασίας οι οποίοι είχαν διαφορετική πρόσβαση στο διαδίκτυο και χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικοί διακομιστές χρόνου ως πηγή της πληροφορίας. Οι διακομιστές ήταν χωρικά και συνεπακόλουθα δικτυακά διαχωρισμένοι σε μεγάλο βαθμό. Επιβεβαιώθηκε ότι ο φόρτος του δικτύου παίζει μεγάλο βαθμό στην ποιότητα των μετρήσεων, οι οποίες συνίστανται στον προσδιορισμό της χρονικής διαφοράς φάσης μεταξύ του ρολογιού του σταθμού εργασίας και του διακομιστή. Ακόμη και σε σχετικά μέτριο δικτυακό φόρτο η χρονική πληροφορία μπορεί να είναι

επαρκώς αξιόπιστη για πολλές εφαρμογές οπότε το πρωτόκολλο NTP θα συνεχίσει να χρησιμοποιείται ευρύτατα παρά την βάσει κανονισμών αντικατάστασή του από το πρωτόκολλο PTP σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Ταυτόχρονα, η μεθοδολογία που παρουσιάσαμε αποτελεί ένα χρήσιμο εκπαιδευτικό εργαλείο πολύ χαμηλού κόστους για την διδασκαλία κάποιων μετρολογικών εννοιών.

4. Βιβλιογραφία

Allan, D. W., Ashby, N., & Hodge, C. C. (1997). The Science of Timekeeping. *Hewlett Packard Application Note*, *1289*, 88. Retrieved from http://www.allanstime.com/Publications/DWA/Science_Timekeeping/TheScienceOfTimekeeping.pdf

Allan, D. W., & Barnes, J. A. (1981). A Modified "Allan Variance" with Increased Oscillator Characterization Ability. In *Thirty Fifth Annual Frequency Control Symposium* (pp. 470–475). Ft. Monmouth. http://doi.org/10.1109/FREQ.1981.200514

Allan, D. W., Lepek, A., Cutler, L., Giffard, R., Kusters, J., & UT., A. T. F. G. (1995). *The Impact of the HP 5071A on International Atomic Time. Appendix A.* Defense Technical Information Center. Retrieved from https://books.google.gr/books?id=d02GnQAACAAJ

Levine, J. (2008). A review of time and frequency transfer methods. *Metrologia*, *45*(6). http://doi.org/10.1088/0026-1394/45/6/S22

Levine, J., & Mills, D. L. (2000). Using the Network Time Protocol to Transmit International Atomic Time. In *Proceedings of the 32th Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting* (pp. 431–440).

Mills, D. L. (1985). *RFC 958 - Network Time Protocol (NTP)*. Retrieved from https://tools.ietf.org/html/rfc958

Mills, D. L. (2006). *Computer network time synchronization: the Network Time Protocol*. *Group*. CRC Press.

Mills, D. L., & Group, F. (2006). *Network The Network Time Protocol*.

Mills, D. L., Martin, J., Burbank, J., & Kasch, W. (2010). *RFC 5905 - Network Time Protocol Version 4: Protocol and Algorithms Specification*.

Rutman, J., & Walls, F. L. (1991). Characterization of frequency stability in precision frequency sources. *Proceedings of the IEEE*, *79*(7), 952–960. http://doi.org/10.1109/5.84972

Taylor, D. (2013). NTP Monitor. Retrieved from http://www.satsignal.eu/software/net.htm