ΤΟ ΑΝΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΕΘΝΙΚΟ ΠΡΟΤΥΠΟ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΙ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΣΤΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ

Χ. ΣΑΡΑΦΙΔΗΣ, Μ. ΧΟΛΙΑΣΤΟΥ, Γ. ΚΡΙΚΕΛΑΣ, Ε. ΦΛΟΥΔΑ, Σ. ΣΔΡΑΚΑΣ
ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ, ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ
ΒΙ.ΠΕ.Θ. – ΣΙΝΔΟΣ, Ο.Τ. 45, 57022, ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
hsara@eim.org

Περίληψη: Στην παρούσα εργασία περιγράφεται η εγκατάσταση και τα χαρακτηριστικά του αναβαθμισμένου Εθνικού Προτύπου Χρόνου και Συχνότητας, που έχει εγκατασταθεί στο Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας. Το σύστημα αποτελείται από μια συστοιχία ατομικών ρολογιών καισίου και σύστημα λήψης δεδομένων από το παγκόσμιο γεωγραφικό σύστημα αναφοράς (GPS). Ο σχεδιασμός της διάταξης ακολούθησε τις προδιαγραφές του διεθνούς γραφείου μέτρων και σταθμών (BIPM) και έγινε με σκοπό την συμμετοχή του EIM στη δημιουργία του παγκόσμιου ατομικού χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα παράγει τον Εθνικό Χρόνο, UTC(EIM), μέσω τριών ατομικών ρολογιών Καισίου. Ταυτόχρονα παρέχει πρότυπα σήματα συχνότητας 1, 5 και 10 MHz με αβεβαιότητα της τάξης του 10^{-14}, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αναφορά σε διάφορες μετρήσεις και διακριβώσεις. Ένα από τα ατομικά πρότυπα συγχρονίζεται ανά τακτά διαστήματα με τον χρόνο UTC, όπως λαμβάνεται από το GPS. Λόγω των ειδικών προδιαγραφών και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε κατά την διαδικασία της εγκατάστασης η θέση της κεραίας είναι γνωστή με ακρίβεια της τάξης του εκατοστόμετρου με αποτέλεσμα η αβεβαιότητα στην εξαγωγή του χρόνου UTC να είναι 10 ns.

Λέξεις - Κλειδιά: Εθνικός Χρόνος, Ατομικός Χρόνος, UTC, GPS, Μετρήσεις Συχνότητας.

1. Εισαγωγή

Ένα από τα βασικά μεγέθη του διεθνούς συστήματος είναι ο χρόνος. Είναι από τα πλέον σημαντικά μεγέθη, γιατί υπεισέρχεται σε πολλά είδη μετρήσεων. Πολλές από τις τεχνολογικές εφαρμογές στην εποχή μας βασίζονται είτε στον χρόνο είτε στο αντίστροφό του, την συχνότητα.

Απαιτήσεις υψηλής ακρίβειας στην τήρηση του χρόνου ή ανάγκη για ύπαρξη πηγής συχνότητας υψηλής ακρίβειας υπάρχουν σε πολλές σύγχρονες εφαρμογές. Τα συστήματα τηλεπικοινωνιών χρειάζονται συγχρονισμό καλύτερο από 100 ns ενώ για δορυφορικά συστήματα πλοήγησης όπως το Παγκόσμιο Σύστημα Εντοπισμού (GPS, Global Positioning System) ακόμη και τα λίγα ns είναι σημαντικά. Ο έλεγχος και η διαχείριση ενός μεγάλου δικτύου ηλεκτροδότησης έχει επίσης υψηλές απαιτήσεις ακρίβειας τόσο για την εξασφάλιση της σταθερότητάς του όσο και για τον εντοπισμό των βλαβών. Η καινούργια τεχνική της συμβολομετρίας στην αστρονομία, μέσω της οποίας πολλαπλασιάζεται η ευαισθησία οπτικών και ραδιοκυματικών αστρονομικών οργάνων αλλά και η πλοήγηση των διαστημικών οχημάτων εξαρτώνται δραματικά από τον καλό συγχρονισμό των σταθμών ελέγχου στην επιφάνεια της γης [1-2].

Αλλά και σε πιο απλές και ανθρώπινες εφαρμογές η ακριβής τήρηση του χρόνου είναι σημαντική. Στην εποχή της παγκοσμιοποίησης όπου οι συναλλαγές γίνονται ηλεκτρονικά σε πλανητική κλίμακα είναι ιδιαίτερα σημαντικός ο όσο το δυνατόν καλύτερος συγχρονισμός μεταξύ των επιμέρους πλευρών. Ειδικά ηλεκτρονικά πιστοποιητικά (time stamps) χρησιμοποιούνται για την επικύρωση και την χρονική

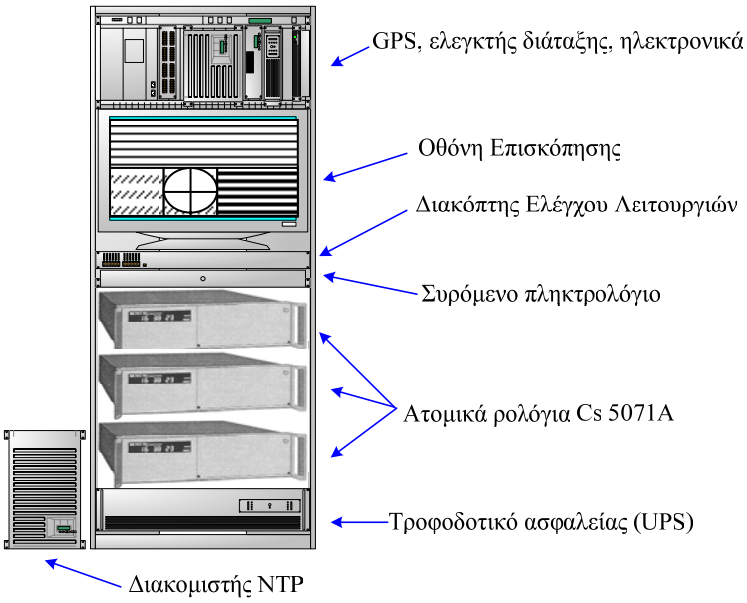
σήμανση των συναλλαγών και ήδη σε αρκετές χώρες ο συγχρονισμός των διακομιστών χρονικής σήμανσης συναλλαγών έχει υποχρεωτικά πιστοποίηση και σύνδεση από το Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας [3].

Ακόμη πιο σημαντική είναι στις μέρες μας η ύπαρξη ενός αξιόπιστου προτύπου συχνότητας, μιας και πολλές εφαρμογές απαιτούν ιχνηλασιμότητα και εξασφαλισμένη ακρίβεια σε αυτό το μέγεθος. Τα τηλεοπτικά δίκτυα, οι ραδιοφωνικοί σταθμοί, οι εταιρίες τηλεπικοινωνιών χρειάζονται πρότυπα αναφοράς και για την εύρυθμη λειτουργία τους. Σχεδόν όλες οι ηλεκτρονικές συσκευές, από έναν υπολογιστή μέχρι ένα radar μέτρησης ταχύτητας οχημάτων χρειάζονται μία πηγή συχνότητας, συνήθως έναν κρύσταλλο χαλαζία, στον οποίο βασίζεται η λειτουργία των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων τους. Εν τέλει, πολλά συστήματα που μετράνε διάφορα μεγέθη (όπως μήκος, τάση, πίεση, ταχύτητα) βασίζονται στην συχνότητα, μιας και η τελευταία μπορεί να μετρηθεί και να διαχειριστεί από τα ηλεκτρονικά κυκλώματα με μεγάλη ακρίβεια.

Το Εθνικό Πρότυπο Χρόνου και Συχνότητας εξελίχθηκε από την εταιρία Timing Solutions (TSC) ειδικά για το Ελληνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας. Οι στόχοι της υλοποίησης ήταν οι ακόλουθοι: α) Η συνεχής και αξιόπιστη μέτρηση του παγκόσμιου χρόνου (UTC, Universal Coordinated Time), β) Η συμμετοχή του ΕΙΜ στην παραγωγή του παγκόσμιου χρόνου μέσω της συνεισφοράς στον TAI (Temps Atomique International), γ) Η αξιόπιστη και συνεχής παραγωγή του Εθνικού Χρόνου, ο οποίος θα πρέπει να ορισθεί ως ο επίσημος χρόνος αναφοράς της χώρας με νομικό πλαίσιο κατά τα πρότυπα άλλων κρατών, δ) Η αξιόπιστη και συνεχής παραγωγή πρότυπων συχνοτήτων αναφοράς, ε) Η ιχνηλασιμότητα όλων των παραπάνω μεγεθών στα διεθνή πρότυπα και στ) Η ύπαρξη προβλέψεων για την μετάδοση των πρότυπων μεγεθών στα υπόλοιπα εργαστήρια του ΕΙΜ αλλά και εκτός ΕΙΜ.

2. Περιγραφή Εθνικού Προτύπου Χρόνου και Συχνότητας

Το Εθνικό Πρότυπο Χρόνου και Συχνότητας έχει υλοποιηθεί σε ειδική βάση (rack) και βρίσκεται στο Εργαστήριο Χρόνου και Συχνότητας του ΕΙΜ υπό αυστηρά ελεγχόμενες κλιματικές συνθήκες. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζουμε σχηματικά τα κυριότερα μέρη:



Σχήμα 1: Το Εθνικό Πρότυπο Χρόνου και Συχνότητας

Το σύστημα βασίζεται σε τρία ατομικά ρολόγια ^{133}Cs 5071A, των εταιριών Hewlett Packard και Agilent. Το σύστημα GPS καθώς και ο ελεγκτής και τα υπόλοιπα

ηλεκτρονικά της διάταξης έχουν ενσωματωθεί στην διάταξη από την εταιρία Timing Solutions και έχει ληφθεί μέριμνα για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ενσωμάτωσή τους σε ένα ενιαίο λειτουργικά σύνολο· με άλλα λόγια το σύστημα παρουσιάζει υψηλό βαθμό ολοκλήρωσης. Ο έλεγχος και η επισκόπηση της λειτουργίας του συστήματος γίνεται με την βοήθεια τυπικών συσκευών εισόδου – εξόδου (πληκτρολόγιο, οθόνη CRT) αλλά υπάρχει και η δυνατότητα ελέγχου από απόσταση. Παρακάτω θα επεκταθούμε περισσότερο.

Η τροφοδοσία της διάταξης γίνεται από τις ειδικές πρίζες ασφαλείας του ΕΙΜ. Εδώ βρίσκεται και η πρώτη πρόβλεψη για την αδιάλειπτη παροχή της διάταξης με ενέργεια, καθώς το ηλεκτρικό δίκτυο του ινστιτούτου διαθέτει προστασία από απότομες μεταβολές τάσης και σε περίπτωση διακοπής της ηλεκτροδότησης του κτιρίου ενεργοποιούνται αυτόματα και άμεσα ηλεκτροπαραγωγά ζεύγη ώστε να μην υπάρξει ανωμαλία στην παροχή ρεύματος των οργάνων. Όπως φαίνεται και στο Σχ. 1 η βάση ενσωματώνει σύστημα αδιάλειπτης παροχής τάσης, το οποίο σε περίπτωση σοβαρής βλάβης στο ηλεκτρικό δίκτυο του ΕΙΜ μπορεί να τροφοδοτήσει για μερικές ώρες το πλαίσιο με τα ηλεκτρονικά συστήματα της διάταξης. Σε μια τέτοια περίπτωση το μόνο που δεν μπορεί να λειτουργήσει είναι η οθόνη επισκόπησης καθώς τα ατομικά ρολόγια ενσωματώνουν δικές τους μπαταρίες για την περίπτωση διακοπής της εξωτερικής τροφοδοσίας. Οι βασικές λειτουργίες της διάταξης δεν διακόπτονται.

Το ατομικό πρότυπο χρόνου 5071A αναπτύχθηκε αρχικά από την εταιρία Hewlett Packard ενώ στην συνέχεια η διάθεσή του πέρασε διαδοχικά στις εταιρίες Agilent και Symmetricom. Είναι το πλέον διαδεδομένο εμπορικά διαθέσιμο ατομικό πρότυπο χρόνου σήμερα καθώς συνδυάζει ακρίβεια και αξιοπιστία. Διαθέτει μια σειρά εξόδων από τις οποίες μπορούμε να πάρουμε τα πρότυπα ηλεκτρονικά σήματα για επεξεργασία: 3 εξόδους σήματος 1 PPS (pulse per second) με εύρος παλμού 20 μs και λογική TTL, 2 προγραμματιζόμενες εξόδους ημιτονικού σήματος με επιλογή 5 ή 10 MHz, και δύο εξόδους ημιτονικού σήματος 1 MHz και 100 kHz (όλες οι ημιτονικές έξοδοι είναι 50Ω – $1V_{rms}$). Υπάρχουν δύο είσοδοι για παλμούς συγχρονισμού (1 PPS με εύρος 100ns – 100 μs) μέσω των οποίων το πρότυπο μπορεί να συγχρονιστεί και να οδηγηθεί από εξωτερική πηγή χρόνου. Επιπρόσθετα υπάρχει η δυνατότητα διασύνδεσης με ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω σειριακής θύρας RS 232C για την λήψη των παραμέτρων λειτουργίας της συσκευής και τον απομακρυσμένο έλεγχο.

Η συσκευή μπορεί να λειτουργήσει ακόμη και σε δύσκολες ατμοσφαιρικές συνθήκες (θερμοκρασία 0 – 55 ºC, ατμοσφαιρική πίεση μέχρι της αντίστοιχης ύψους 6000m) αλλά οι βέλτιστες επιδόσεις επιτυγχάνονται σε ελεγχόμενες εργαστηριακές συνθήκες. Μερικές χαρακτηριστικές προδιαγραφές του οργάνου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

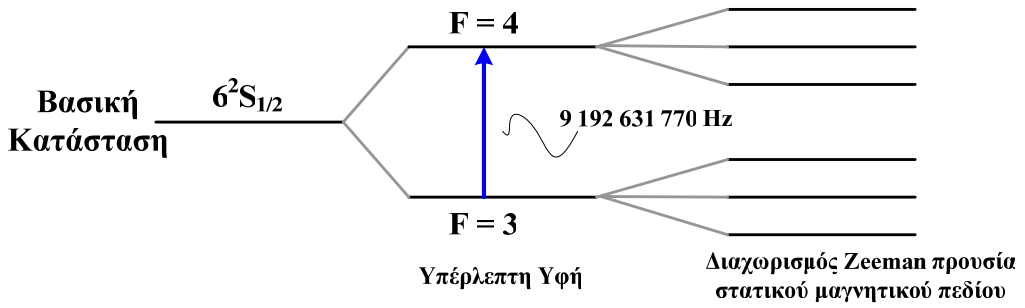
Ακρίβεια	$\pm 1 \times 10^{-12}$
Επαναληψιμότητα	$\pm 5 \times 10^{-13}$
Σταθερότητα (short term) εξόδων 5 και 10 MHz (root Alan Variance), σε παρένθεση ο χρόνος ολοκλήρωσης	$\leq 8.5 \times 10^{-14}$ (10^4 s) $\leq 3.0 \times 10^{-14}$ (1 d) $\leq 2.0 \times 10^{-14}$ (5 d) $\leq 2.5 \times 10^{-14}$ (30 d)

Πίνακας 1: Προδιαγραφές ατομικού ρολογιού 5071A

<u>Αρχή Λειτουργίας</u>

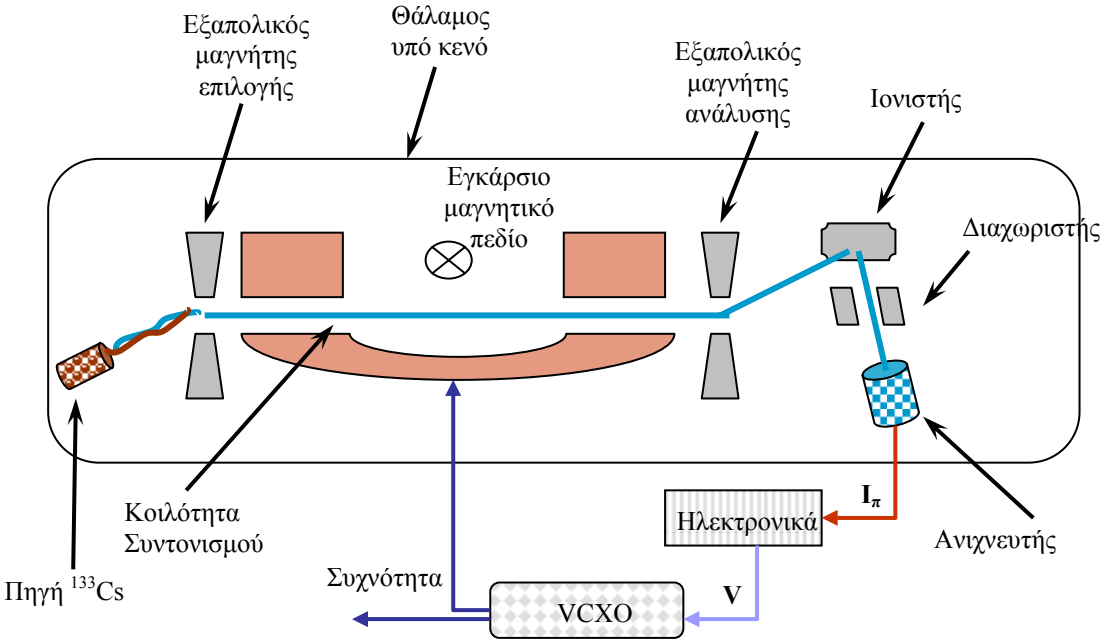
Το άτομο του ^{133}Cs στην βασική του κατάσταση έχει υπέρλεπτη υφή, δηλαδή οι ενεργειακές υπο-καταστάσεις αποεκφυλίζονται μερικώς σε δύο επίπεδα, λόγω της μαγνητικής αλληλεπίδρασης των ηλεκτρονίων με τον πυρήνα. Αυτό οφείλεται στην τροχιακή στροφορμή των ηλεκτρονίων και στον διανυσματικό χαρακτήρα της, ο βαθμός

ευκολίας για την διευθέτηση της στροφορμής προς κάποια διεύθυνση είναι διαφορετικός και αυτό δίνει την διαφορά στην δυναμική ενέργεια των καταστάσεων. Οι λόγοι που επιλέχθηκε το άτομο του Cs είναι συνοπτικά οι ακόλουθοι: α) η βασική του κατάσταση έχει υπέρλεπτη υφή δύο μόνο ενεργειακών επιπέδων β) σε θερμοκρασία δωματίου όλα τα άτομα του στοιχείου βρίσκονται στην βασική κατάσταση ισομερώς μοιρασμένα στις δύο υποκαταστάσεις γ) οι υποκαταστάσεις έχουν μεγάλο χρόνο ζωής, η διπολική μαγνητική μετάβαση δεν συμβαίνει εύκολα αυθόρμητα δ) η συχνότητα της μετάβασης ανιχνεύεται εύκολα και με ακρίβεια και ε) τα δύο ενεργειακά επίπεδα δεν μετακινούνται από μέτρια ηλεκτρικά πεδία, η συχνότητα της μετάβασης δηλαδή είναι σταθερή [4].



Σχήμα 2: Ενεργειακό διάγραμμα της βασικής κατάστασης του ατόμου ^{133}Cs.

Η αρχή λειτουργίας ενός προτύπου Cs παρουσιάζεται στο Σχ. 3. Ένας ειδικός φούρνος δημιουργεί ένα ρεύμα ατόμων το οποίο περνάει από έναν εξαπολικό μαγνήτη. Το μαγνητικό πεδίο διαχωρίζει την δέσμη των ατόμων ανάλογα με την ενεργειακή τους κατάσταση, τα άτομα που βρίσκονται στο ενεργειακό επίπεδο με κβαντικό αριθμό F = 4 κατευθύνονται προς την μικροκυματική κοιλότητα συντονισμού. Εκεί ακτινοβολούνται δύο φορές (μέθοδος Ramsey) με αποτέλεσμα μερικά από αυτά να αλλάζουν κατάσταση. Αυτά ακριβώς τα άτομα που έχουν υποστεί την μετάβαση κατευθύνονται από τον δεύτερο μαγνήτη επιλογής προς έναν ιονιστή και στην συνέχεια καταμετρούνται με έναν ανιχνευτή ιονισμού.



Σχήμα 3: Αρχή λειτουργίας ατομικού προτύπου χρόνου

Η ίδια γενική αρχή λειτουργίας ισχύει για όλα τα ατομικά πρότυπα. Η μικροκυματική κοιλότητα σαρώνεται με μια σειρά από συχνότητες και παρακολουθείται η απόκριση του ταλαντωτή. Όταν η συχνότητα που εφαρμόζεται στην κοιλότητα συντονισμού ταυτίζεται με την ιδιοσυχνότητα μετάπτωσης μεταξύ των δύο ενεργειακών επιπέδων τότε το σήμα του πολλαπλασιαστή εμφανίζει μία κορυφή με φασματικό πλάτος αντιστρόφως ανάλογο του χρόνου που χρειάζονται τα άτομα για να διασχίσουν την μικροκυματική κοιλότητα. Τα εμπορικά συστήματα όπως το 5071A που έχουν μικρού μήκους κοιλότητες πετυχαίνουν φασματικά πλάτη της τάξης των 500 Hz. Τα πρωτεύοντα ρολόγια των μεγάλων μετρολογικών ινστιτούτων πετυχαίνουν ελαφρά καλύτερες επιδόσεις, με αρκετά πιο μεγάλο κόστος. Λόγω του τρόπου λειτουργίας αυτά τα ατομικά πρότυπα ονομάζονται παθητικά.

<u>Βασικοί Ορισμοί</u>

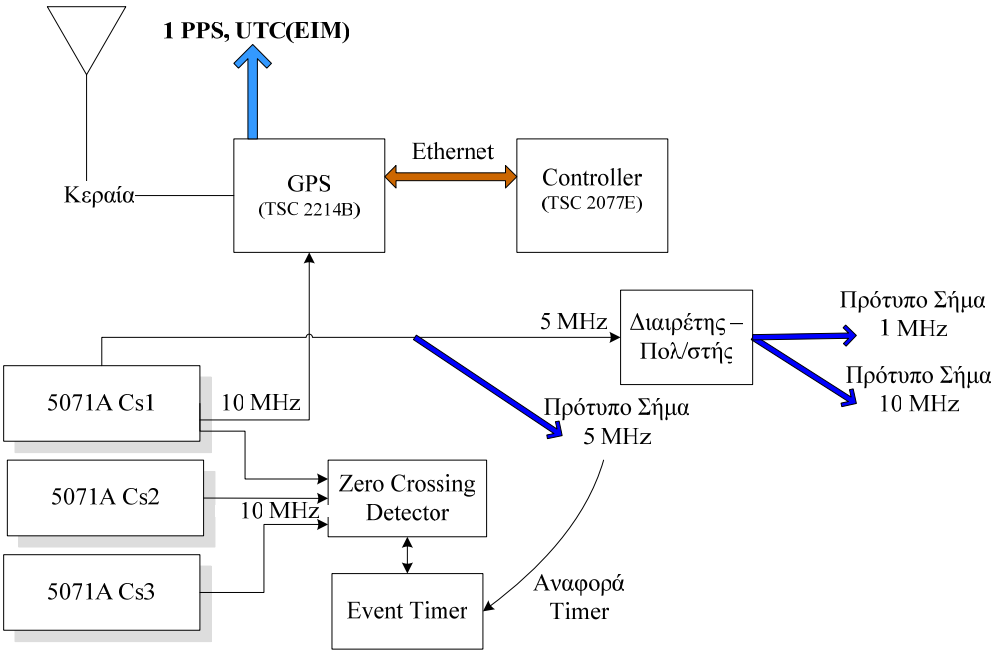
Πριν προχωρήσουμε στην περιγραφή των υπόλοιπων τμημάτων της διάταξης και του τρόπου λειτουργίας θα αναφέρουμε επιγραμματικά κάποιους ορισμούς σχετικά με τον παγκόσμιο χρόνο. Στο διεθνές σύστημα η μονάδα του χρόνου είναι το δευτερόλεπτο (s, second) και ορίζεται ως η χρονική διάρκεια 9,192,631,770 περιόδων της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στην μετάβαση μεταξύ των δύο υπέρλεπτων επιπέδων της βασικής κατάστασης του ατόμου ^{133}Cs (Σχ. 2). Ο διεθνής ατομικός χρόνος ή διεθνής ατομική κλίμακα χρόνου TAI (Temps Atomique International) είναι πρακτικά ο ατομικός χρόνος όπως προκύπτει στατιστικά από έναν αριθμό ατομικών ρολογιών του πλανήτη. Στην σημειολογία ακολουθεί το Γρηγοριανό ημερολόγιο (έτος, μήνας, ημέρα, ώρα, λεπτό). Κάθε μέρα θεωρείται ότι διαρκεί ακριβώς 86400 s. Ο TAI παράγεται από το Διεθνές γραφείο μέτρων και σταθμών (BIPM), το οποίο συλλέγει στοιχεία από 58 (2006) εργαστήρια στον κόσμο. Κάθε εργαστήριο που συμμετέχει εξάγει τον τοπικό ατομικό χρόνο και τον αποστέλλει στο BIPM. Μετά από κάποιους ελέγχους σχηματίζεται ένας μέσος όρος με συντελεστές βαρύτητας, ο EAL (Echelle Atomique Libre). Ο EAL διορθώνεται από τα πρωτεύοντα ρολόγια, κάποια συστήματα εξαιρετικά υψηλής ακρίβειας και έτσι προκύπτει η μονάδα κλίμακας, το δευτερόλεπτο κατά SI. Είναι χαρακτηριστικό ότι τα τελευταία χρόνια η διόρθωση που υφίσταται ο EAL είναι σχεδόν σταθερή, κάτι που δείχνει την εξαιρετική μακροπρόθεσμη σταθερότητα των πρωτευόντων ρολογιών αλλά και την καλή απόδοση των εμπορικών συστημάτων που συνεισφέρουν στην δημιουργία του.

Ο TAI συγχρονίστηκε με τον αστρονομικό χρόνο UT1 την 1/1/1958. Όμως έκτοτε αποκλίνουν. Ο λόγος είναι ότι η περιστροφή της Γης δεν είναι σταθερή. Στις μέρες μας η Γη χρειάζεται 86400.002 s για να περιστραφεί μία φορά. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι ο UT1 καθυστερεί περίπου 2 ms την ημέρα σε σχέση με τον σταθερό ατομικό χρόνο. Η καθυστέρηση αυτή οφείλεται κυρίως στις παλίρροιες και καθώς δεν είναι σταθερή, πρέπει να παρακολουθείται διαρκώς. Την 1/1/2007 η διαφορά μεταξύ TAI και UT1 ήταν 33 s. Για νομικούς και πρακτικούς λόγους ο αστρονομικός χρόνος δεν πρέπει να αποκλίνει σε μεγάλο βαθμό από τον ατομικό. Δημιουργήθηκε λοιπόν μια παραλλαγή του TAI, ο UTC (Universal Coordinated Time) ο οποίος ενίοτε συγχρονίζεται με τον αστρονομικό χρόνο, έτσι ώστε η διαφορά τους να είναι πάντα κάτω από ένα δευτερόλεπτο. Η διαδικασία συγχρονισμού συνίσταται στην εισαγωγή ή αφαίρεση ενός δευτερολέπτου από τον UTC. Η τελευταία φορά που συνέβη αυτό ήταν τον Ιανουάριο του 2006 και μέχρι στιγμής υπήρξαν 33 εισαγωγές εμβόλιμων δευτερολέπτων και καμία αφαίρεση, η Γη μάλλον καθυστερεί αντί να αυξάνει τον ρυθμό περιστροφής της. Ο UTC ονομάζεται και χάρτινο ρολόι, καθώς δημιουργείται και δημοσιεύεται από το BIPM και κάθε χρήστης με ιχνηλασιμότητα στα διεθνή πρότυπα μπορεί να ελέγξει την τοπική του χρονική κλίμακα.

Περιγραφή Λειτουργίας

Όπως προαναφέραμε, το Εθνικό Πρότυπο Χρόνου και Συχνότητας μπορεί να μετρήσει τον χρόνο UTC με μεγάλη ακρίβεια και να δημιουργήσει την τοπική χρονική κλίμακα, που ονομάζεται UTC(ΕΙΜ). Η λήψη του χρόνου UTC γίνεται μέσω συστήματος GPS με αβεβαιότητα μόλις 10 ns. Η εξαιρετική αυτή τιμή έχει επιτευχθεί μέσω μιας σειράς προβλέψεων: α) Ειδική κατασκευή του υλικού και του λογισμικού του δέκτη GPS, β) ειδική διαδικασία εύρεσης των συντεταγμένων της κεραίας του δέκτη με ειδικό σύστημα και γ) διακρίβωση όλου του συστήματος συμπεριλαμβανομένων και των καλωδίων στο Εθνικό Μετρολογικό Ινστιτούτο των ΗΠΑ (NIST) και εισαγωγή των αντίστοιχων παραμέτρων αντιστάθμισης στο λογισμικό του δέκτη. Η διακρίβωση συμπεριλάμβανε ακόμη και την αντικεραυνική προστασία του συστήματος.

Η θέση της κεραίας του δέκτη GPS του συστήματος προσδιορίστηκε στις ακόλουθες συντεταγμένες: γεωγραφικό πλάτος 40,68878365 μοίρες, γεωγραφικό μήκος 22.79971642 μοίρες, ύψος 53.2909 μέτρα με πλαίσιο αναφοράς το παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα WGS84 [5]. Στο σύστημα συντεταγμένων ITRF2000 [6] οι συντεταγμένες είναι: X = 4464808.4700 Y = 1876806.6594 και Z = 4136313.3107 μέτρα. Σε όλες τις περιπτώσεις η τυπική απόκλιση των μετρήσεων της θέσης της κεραίας είναι της τάξης του ενός εκατοστού του μέτρου. Για την διαδικασία χρησιμοποιήθηκε ειδικό σύστημα GPS το οποίο είχε την δυνατότητα λήψης του κωδικοποιημένου σήματος P1. Λήφθηκαν μετρήσεις επί 4 ώρες και στην συνέχεια έγινε χρήση της υπηρεσίας SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center) [7], μέσω της οποίας συσχετίζονται τα δεδομένα που λαμβάνονται από τις μετρήσεις στην άγνωστη τοποθεσία με γνωστές με μεγάλη ακρίβεια κοντινές θέσεις.



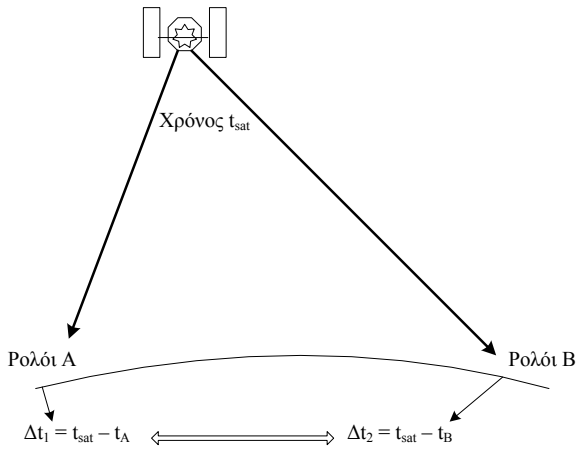
Σχήμα 4: Απλοποιημένο διάγραμμα του Εθνικού Προτύπου Χρόνου και Συχνότητας

Η αρχή λειτουργίας του συστήματος παρουσιάζεται απλοποιημένη στο Σχ. 4 και μπορεί να συνοψιστεί στα ακόλουθα: Αρχικά γίνεται λήψη του χρόνου UTC από το σύστημα δορυφόρων GPS μέσω του ειδικού δέκτη. Στην συνέχεια ένα συγκεκριμένο και

δηλωμένο ατομικό πρότυπο συγχρονίζεται με τον χρόνο UTC και αποτελεί την τοπική αναπαράσταση του χρόνου UTC με αβεβαιότητα 10 ns. Υπάρχει η δυνατότητα απευθείας σύγκρισης των άλλων δύο προτύπων χρόνου 5071A με την χρονική κλίμακα του συστήματος, γιατί, όπως θα περιγράψουμε αναλυτικά παρακάτω, αυτό είναι απαραίτητο για την υλοποίηση της συμμετοχής του ΕΙΜ στην δημιουργία του ατομικού χρόνου.

Όπως φαίνεται και στο Σχ. 4 το ατομικό πρότυπο που οδηγείται στον χρόνο UTC μέσω του GPS παρέχει το πρότυπο σήμα των 5 MHz και μέσω ενός διαιρέτη – πολλαπλασιαστή τα πρότυπα σήματα 1 και 10 MHz. Έτσι προκύπτει η ιχνηλασιμότητα των πρότυπων ημιτονικών σημάτων στον χρόνο UTC. Το πρότυπο παλμικό σήμα (1 PPS) παρέχεται από το GPS μέσω ενός διανεμητή παλμών και είναι το σήμα που αποτελεί την τοπική αναφορά UTC· είναι ο Εθνικός Χρόνος.

Το Εθνικό Πρότυπο Χρόνου και Συχνότητας ενσωματώνει και προβλέψεις για την απομακρυσμένη μετάδοση του Εθνικού Χρόνου. Τόσο ο δέκτης GPS όσο και ο ελεγκτής είναι στην ουσία υπολογιστές που λειτουργούν με το λειτουργικό σύστημα UNIX και ενσωματώνουν την λειτουργία NTP (network time protocol – πρωτόκολλο δικτυακού χρόνου). Το συγκεκριμένο πρωτόκολλο είναι η πλέον εύκολη και διαδεδομένη λύση για μετάδοση χρόνου και συγχρονισμό συστημάτων. Χρησιμοποιεί το διαδίκτυο και το κυριότερο μειονέκτημα είναι η αυξημένη αβεβαιότητα που κυμαίνεται από μερικά μs μέχρι λίγα ms. Στο ΕΙΜ έχει αναπτυχθεί ένας διακομιστής που παρέχει υπηρεσίες NTP. Ο συγκεκριμένος διακομιστής συγχρονίζεται απευθείας με το εθνικό πρότυπο (διακομιστής stratum – 1) και λόγω της ειδικής διευθέτησής του πετυχαίνει σχετικά μικρή αβεβαιότητα.



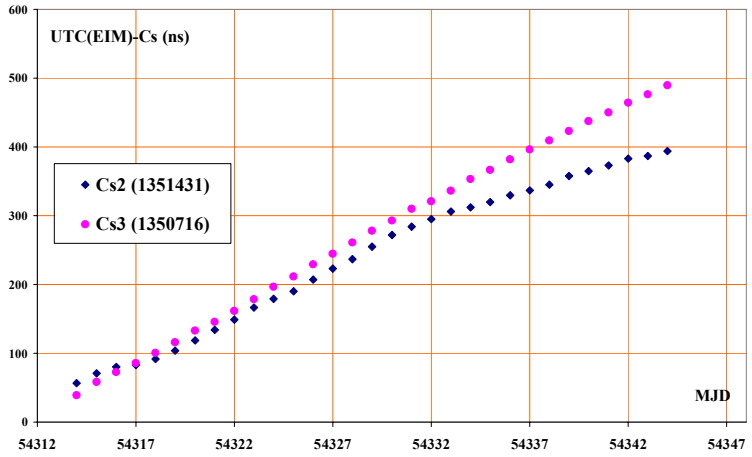
Σχήμα 5: Η μέθοδος Common View

Όπως προαναφέραμε, η πρώτη λειτουργία του Εθνικού Προτύπου Χρόνου και Συχνότητας είναι η παροχή του χρόνου UTC(ΕΙΜ) (η τοπική αναπαράσταση του UTC) και η σύγκρισή του με τον UTC. Ο δέκτης GPS ακολουθεί τις προδιαγραφές της τεχνολογίας Common View (κοινής θέασης). Η ομώνυμη τεχνική είναι ένας διαδεδομένος και αξιόπιστος τρόπος για την πραγματοποίηση συγκρίσεων μεταξύ απομακρυσμένων συστημάτων. Συνίσταται στην ταυτόχρονη παρατήρηση κάποιου δορυφόρου από δύο διαφορετικά ρολόγια που βρίσκονται σε γνωστές θέσεις. Κάθε ρολόι μετρά την διαφορά του με τον χρόνο του δορυφόρου και στην συνέχεια μπορεί να γίνει απευθείας σύγκριση μεταξύ των δύο ρολογιών και μάλιστα χωρίς να υπεισέρχεται στο αποτέλεσμα το ρολόι του δορυφόρου. Φυσικά θα πρέπει και οι δύο παρατηρητές να έχουν προκαθορίσει ακριβώς το ποιόν δορυφόρο θα παρατηρήσουν και πότε. Το BIPM εκδίδει κάθε λίγους μήνες έναν κατάλογο που καθορίζει επακριβώς ποιοι δορυφόροι θα χρησιμοποιηθούν για την μέτρηση του UTC από τα μετρολογικά εργαστήρια και τις συγκρίσεις που θα γίνουν μεταξύ τους. Επίσης καθορίζονται και οι χρονικές στιγμές στις οποίες θα γίνουν οι

παρατηρήσεις. Έτσι τα μετρολογικά εργαστήρια εξασφαλίζουν ιχνηλασιμότητα στον UTC ελέγχοντας ταυτόχρονα τις τοπικές χρονικές τους κλίμακες. Ο ελεγκτής του Εθνικού Συστήματος Χρόνου και Συχνότητας παράγει αυτόματα ένα ειδικό αρχείο αναφοράς με τις μετρήσεις του UTC το οποίο αποστέλλεται κάθε μήνα στο BIPM. Το αρχείο αυτό ακολουθεί τις θεσμοθετημένες προδιαγραφές που καθορίστηκαν από μια ειδική ομάδα εργασίας [8].

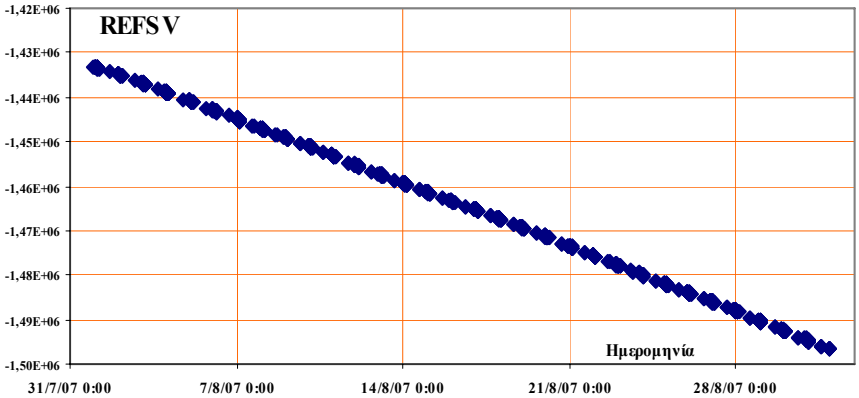
Ένα άλλο πλεονέκτημα της τεχνικής Common View είναι η απάλειψη κάποιων παραμέτρων που είναι κατά προσέγγιση κοινές και για τις δύο τοποθεσίες, όπως συστηματικά σφάλματα και καθυστερήσεις στην ιονόσφαιρα.

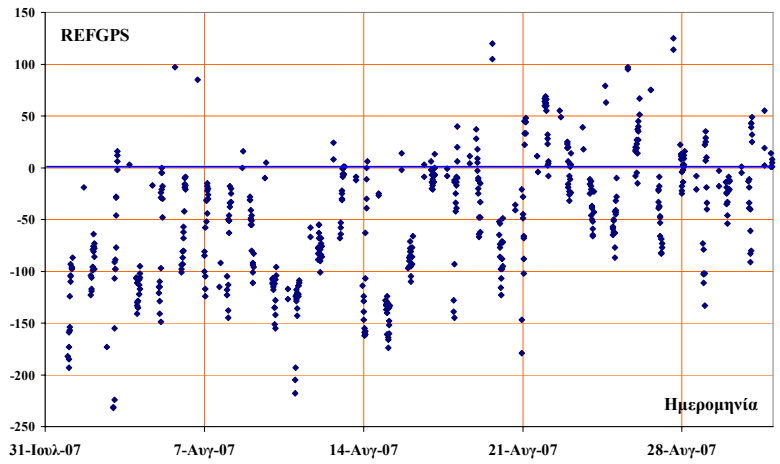
Μία άλλη σημαντική λειτουργία του Εθνικού Προτύπου Χρόνου και Συχνότητας είναι η υλοποίηση της συμμετοχής του ΕΙΜ στον Παγκόσμιο Ατομικό Χρόνο (TAI). Για τον σκοπό αυτό ο ελεγκτής του συστήματος δημιουργεί ένα ειδικό αρχείο αναφοράς που περιέχει τις διαφορές των δύο «ελεύθερων» (free running) ατομικών προτύπων σε σχέση με το ατομικό ρολόι που οδηγείται στον UTC. Στο αρχείο αυτό περιέχονται τιμές μετρήσεων της διαφοράς κάθε «ελεύθερου» ρολογιού από τον χρόνο UTC(ΕΙΜ). Οι μετρήσεις αυτές λαμβάνονται στην αρχή της κάθε ημέρας (ώρα 0 UTC). Ένα αρχείο αναφοράς που περιέχει μετρήσεις ανά 5 ημέρες προετοιμάζεται και αποστέλλεται στο BIPM για να συμπεριληφθεί στην παραγωγή του Ατομικού Χρόνου. Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται ενδεικτικά οι μετρήσεις του Αυγούστου 2007.



Σχήμα 6: Μετρήσεις της διαφοράς από την τοπική κλίμακα των Ατομικών Προτύπων Χρόνου του ΕΙΜ για τον μήνα Αύγουστο 2007.

Το ΕΙΜ έχει ήδη ενταχθεί στα εργαστήρια που συνεισφέρουν στην παραγωγή του παγκόσμιου χρόνου και συμπεριλαμβάνεται στην μηνιαία αναφορά που εκδίδει το BIPM (Circular T). Αξίζει να σημειωθεί ότι τα πρώτα αποτελέσματα παρουσιάζουν μέγιστη απόκλιση |UTC(EIM)- UTC| = 12 ns, διαφορά που κρίνεται ιδιαίτερα ικανοποιητική [9].

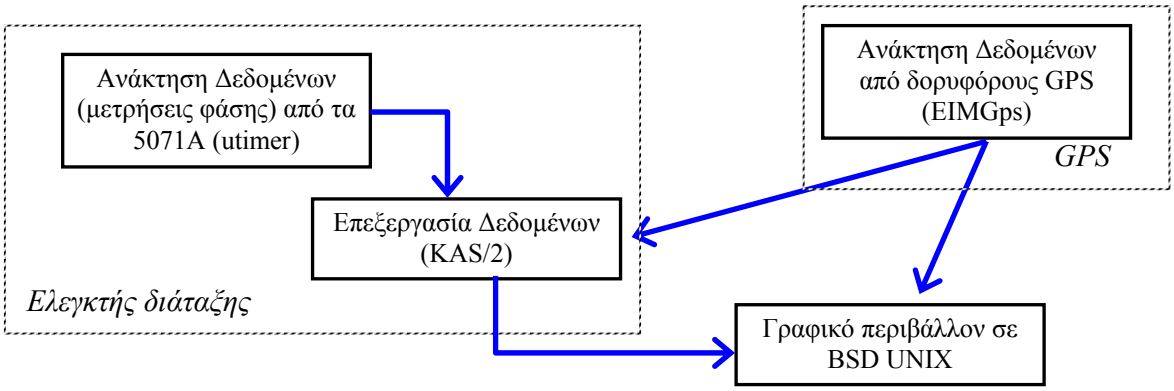




Σχήμα 7: Παρατηρήσεις του δορυφόρου No 1 του συστήματος GPS από τον δέκτη του Εθνικού Προτύπου Χρόνου και Συχνότητας για τον Αύγουστο 2007, δεδομένα μετά από πρώτη διόρθωση (επάνω) και μετά από την τελική επεξεργασία (κάτω). Οι μονάδες είναι 0,1 ns.

Επίσης, μία ακόμη κρίσιμη λειτουργία του Εθνικού Προτύπου Χρόνου και Συχνότητας είναι η τήρηση μιας υψηλής ακρίβειας τοπικής χρονικής κλίμακας. Στην τήρηση αυτού του χρόνου το σύστημα χρησιμοποιεί δεδομένα και από τα τρία ατομικά ρολόγια. Υπό φυσιολογικές συνθήκες αυτή η πρόβλεψη μοιάζει μη αναγκαία, υπάρχει όμως για λόγους ασφαλείας. Σε περίπτωση βλάβης στο σύστημα GPS ή κάποιου άλλου απρόβλεπτου γεγονότος που θα οδηγήσει σε απώλεια των δορυφορικών δεδομένων, αυτή η τοπική χρονική κλίμακα θα αντικαταστήσει τον Εθνικό Χρόνο. Η αξιοπιστία μιας χρονικής κλίμακας που θα βασίζεται σε τρία ατομικά ρολόγια είναι σαφώς μεγαλύτερη από κάποια που θα βασίζεται σε λιγότερα. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ανίχνευσης τυχόν τεχνικού προβλήματος σε κάποιο από τα ατομικά πρότυπα που θα προκαλούσε ασταθή λειτουργία.

Το λογικό διάγραμμα ροής του λογισμικού του Εθνικού προτύπου χρόνου και συχνότητας παρουσιάζεται απλοποιημένο στο Σχ. 8:



Σχήμα 8: Η λογική ροή δεδομένων στο λογισμικό του Εθνικού Προτύπου Χρόνου και Συχνότητας

Το πρόγραμμα KAS/2 είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία των δεδομένων φάσης των ατομικών προτύπων. Υπολογίζει με διάφορους κατοχυρωμένους αλγόριθμους την διόρθωση που θα εισαχθεί στο πρώτο ατομικό ρολόι, αυτό δηλαδή που δίνει την τοπική απεικόνιση του χρόνου UTC. Στην δημιουργία της τοπικής κλίμακας ο αλγόριθμος KAS/2 χρησιμοποιεί και τα τρία διαθέσιμα ατομικά πρότυπα, στην δημιουργία της κλίμακας που αποστέλλεται στο BIPM για την συμμετοχή στον προσδιορισμό του παγκόσμιου χρόνου αυτό που οδηγείται στον UTC θεωρείται ως αναφορά για τα άλλα δύο. Οι προβλέψεις αυτές δίνουν υψηλή αξιοπιστία στην τήρηση του Εθνικού Χρόνου ακόμη και σε περιπτώσεις βλαβών ή άλλων ιδιαίτερων καταστάσεων.

3. Συμπεράσματα

Το Εθνικό Πρότυπο Χρόνου και Συχνότητας είναι μια ιδιαίτερα εξελιγμένη διάταξη σύμφωνα με τις τελευταίες εξελίξεις στον τομέα της μέτρησης του παγκόσμιου χρόνου UTC και της αξιοποίησης ατομικών ρολογιών. Η λήψη του χρόνου UTC από το σύστημα GPS είναι συνεχής και με μικρή αβεβαιότητα της τάξης των 10 ns. Για την παραγωγή της τοπικής χρονικής κλίμακας αξιοποιούνται τρία ατομικά πρότυπα κάτι που σε συνδυασμό με το επιλεγμένο μοντέλο 5071A δίνει εξαιρετικά υψηλή αξιοπιστία ακόμη και σε περίπτωση βλάβης στο δορυφορικό σύστημα. Ταυτόχρονα, με την πρόσφατη βελτίωση και αναβάθμιση του συστήματος καθίσταται δυνατή η δημιουργία αρχείων αναφοράς έτσι ώστε το ΕΙΜ να συμμετέχει στην παραγωγή του παγκόσμιου χρόνου, η διαδικασία έχει ήδη ξεκινήσει σε δοκιμαστικό στάδιο. Όσον αφορά την παραγωγή πρότυπων σημάτων αναφοράς, η διάταξη παρέχει εξαιρετικά σταθερά σήματα 1 PPS, και 1, 5 και 10 MHz με ιχνηλασιμότητα στο Εθνικό Πρότυπο και μέσω αυτού σύντομα και στα διεθνή πρότυπα.

4 . Βιβλιογραφία

[1] A. Bauch, *Meas. Sci. Technol.* **14** (2003), 1159-1173.

[2] A. Bauch, H. R. Telle, *Rep. Prog. Phys* **65** (2002), 789-843.

[3] ΗΠΑ, Securities and Exchange Commission – approved rule of the National Association of Securities Dealers. Securities Exchange Act of 1934 Rel. No. 48573.

[4] K.-H. Weber and C. J. Sansonetti, *Phys. Rev. A* **35** (1987), 4650.

[5] NIMA Technical Report **TR8350.2**, "*Department of Defense World Geodetic System 1984, Its Definition and Relationships With Local Geodetic Systems*", Third Edition.

[6] Ray, J. et al., *Report of the Working Group on ITRF Datum*, 1999.

[7] Scripps Orbit and Permanent Array Center (SOPAC), Cecil H. and Ida M. Green Institute of Geophysics and Planetary Physics (IGPP), Scripps Institution of Oceanography (SIO), University of California, San Diego, http://sopac.ucsd.edu/.

[8] D. W. Allan, C. Thomas, *Metrologia* **31**, (1994), 69-79.

[9] Circular T No 236, BIPM, Sept. 2007 (www.bipm.org).