



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών
ΔΠΜΣ “Γεωπληροφορική”

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΓΕΙΟΥ RADAR ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΗ ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΩΝ ΥΨΗΛΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ

ΑΝΔΡΟΥΛΑΚΗ ΑΓΓΕΛΙΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ:
Β. ΓΚΙΚΑΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια πολλών προσώπων, κάθε ένα από τα οποία αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ξεχωριστά.

Πρωτίστως, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Γκίκα Βασίλη, για τις πολύτιμες συμβουλές και οδηγίες του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας, αλλά και την καθοδήγηση και συμπαράστασή του σε γενικότερο επίπεδο.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω ευχαριστίες προς την ΔΕΗ ΑΕ, ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου, τον Διευθυντή Σταθμού κ. Γ. Βάκρino, τον Τομεάρχη Συντήρησης κ. Α. Οικονομίδη καθώς και τον Μηχανικό Σχεδιασμού Μηχανολογικής Συντήρησης κ. Ε. Καραγιάννη για την παροχή της σχετικής άδειας εκτέλεσης του πειράματος, για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά τους στην πραγματοποίηση των εργασιών υπαίθρου καθώς και για τη διάθεση χρήσιμων πληροφοριών σχετικά με το Ενεργειακό Κέντρο Λαυρίου και ειδικότερα για τη Μονάδα Ι στην οποία ανήκει η μελετούμενη καπνοδόχος.

Ακόμα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα και φίλο κ. Μπίμη Θανάση, για τις συμβουλές του, τη συνεργασία και την ουσιαστική βοήθεια που προσέφερε σε πρακτικά και οργανωτικά θέματα.

Επιπλέον, ένα μεγάλο “ευχαριστώ” στους γονείς μου Μαρία και Μάνο Ανδρουλάκη και στον αδερφό μου Μιχάλη, οι οποίοι βρίσκονται πάντα στο πλευρό μου και στηρίζουν με αμέριστη αγάπη και φροντίδα κάθε μου προσπάθεια.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	4
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	9
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	12
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	13
ABSTRACT	14
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

1.1 Είδη Μετακινήσεων / Παραμορφώσεων – Μέθοδοι Παρακολούθησης Δυναμικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων	18
1.2 Παρακολούθηση Δομικής “Υγείας” Τεχνικών Έργων (Structural Health Monitoring - SHM)	20
1.2.1 Γενικά	20
1.2.2 Κίνητρα εφαρμογής SHM	21

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

2.1 Γενικά	23
------------	----

2.2 Όργανα Παρακολούθησης Δυναμικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων	24
2.2.1 Επιταχυνσιόμετρα (Accelerometers)	24
2.2.2 Οπτικές ίνες (Optical fibre sensors) και αισθητήρες γραμμικής παραμόρφωσης (linear deformation transducers)	25
2.2.3 Κλισίμετρα (Inclinometers)	26
2.2.4 Παραμορφωσιόμετρα (Strain gauges)	27
2.2.5 Ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου (Robotic Total Station, RTS)	28
2.2.6 Σύστημα δορυφορικού εντοπισμού θέσης (Global Navigation Satellite Systems)	28
2.2.7 Επίγειο σύστημα radar συνθετικού ανοίγματος (GB-SAR)	30

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΕΠΙΓΕΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ RADAR ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ (GB-SAR)

3.1 Γενικά	31
3.2 Αρχή λειτουργίας Radar	31
3.2.1 Χαρακτηριστικά ραδιοκυμάτων	32
3.2.2 Ακτινική Ανάλυση (Range Resolution)	34
3.2.3 Φαινόμενο Doppler	36
3.3 Σύστημα IBIS	38
3.3.1 Γενικά	38
3.3.2 Λειτουργία IBIS-S	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

4.1 Εισαγωγή	54
4.2 Σειρές Fourier	55
4.3 Μετασχηματισμός Fourier	57
4.3.1 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)	56
4.3.2 Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (FFT)	60
4.4 Windowing	61
4.4.1 Είδη συναρτήσεων παραθύρου	63

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

5.1 ΔΕΘ/ΑΗΣ ΚΕΡΑΤΕΑΣ - ΛΑΥΡΙΟΥ	67
5.1.1 Γενική περιγραφή	67
5.1.2 Ιστορικά στοιχεία	69
5.2 Κατασκευή Μελέτης	71
5.2.1 Καπνοδόχος Μονάδας I	71
5.2.2 Σκοπός λειτουργίας καπνοδόχου	71
5.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά καπνοδόχου Μονάδας I	72
5.3 Σχεδιασμός Πειράματος	73
5.3.1 Γενικά	73
5.3.2 Παράμετροι συλλογής δεδομένων πεδίου	73

5.4 Συλλογή Δεδομένων Πεδίου	77
5.4.1 Χρόνος διεξαγωγής πειράματος	77
5.4.2 Παράμετροι λογισμικού χειρισμού συστήματος IBIS-S	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

6.1 Πρόγραμμα Εκ των υστέρων Επεξεργασίας Μετρήσεων IBISDV	81
6.1.1 Γενικά	81
6.1.2 Δημιουργία νέου project	81
6.1.3 Ορισμός παραμέτρων επεξεργασίας και έναρξη επεξεργασίας δεδομένων	82
6.1.4 Επιλογή συγκεκριμένων σημείων κατασκευής	85
6.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων	88
6.2.1 Εξαγωγή δυναμικών χαρακτηριστικών καπνοδόχου	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

7.1 Εισαγωγή	102
7.2 Συμπεράσματα	102
7.2.1 Αναφορικά με το σύστημα παρακολούθησης IBIS-S	102
7.2.2 Αναφορικά με τη δυναμική συμπεριφορά της καπνοδόχου	103
7.3 Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	103

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ IBIS-S ΚΑΙ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ	105
---------------------------------------------------------------------------	------------

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΛΑΥΡΙΟΥ	109
-----------------------------------------------------------------------------------------	------------

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ	111
-----------------------------	------------

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1.1	Αρχές και οργάνωση ενός SHM συστήματος
Σχήμα 2.1	Σχηματική παράσταση ενός επιταχυνσιομέτρου
Σχήμα 2.2	Σχηματική παράσταση μίας οπτικής ίνας
Σχήμα 2.3	Σχηματική παράσταση ενός αισθητήρα γραμμικής παραμόρφωσης
Σχήμα 2.4	Σχηματική παράσταση ενός κλισιομέτρου
Σχήμα 2.5	Σχηματική παράσταση διάταξης ενός παραμορφωσίμετρου
Σχήμα 2.6	Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης
Σχήμα 3.1	Αρχή λειτουργίας radar
Σχήμα 3.2	Σύνθεση ηλεκτρομαγνητικού κύματος
Σχήμα 3.3	Μετάδοση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε αντικείμενα κοντινής απόστασης
Σχήμα 3.4	Αντανάκλαση ηλεκτρομαγνητικού κύματος από αντικείμενα κοντινής απόστασης
Σχήμα 3.5	Ακτινική ανάλυση
Σχήμα 3.6	Μορφή κύματος τεχνικής SF-CF ως προς τη συχνότητα
Σχήμα 3.7	Μορφή κύματος τεχνικής SF-CF ως προς τον χρόνο
Σχήμα 3.8	Εκτίμηση ακτινικής ανάλυσης μέσω της τεχνικής SF-CW
Σχήμα 3.9	Διάγραμμα έντασης σήματος – απόστασης
Σχήμα 3.10	Ακτινική και εδαφική ανάλυση
Σχήμα 3.11	Τεχνική Συμβολομετρίας
Σχήμα 3.12	Ακρίβεια μετρήσεων συναρτήσει της αναλογίας σήματος/θορύβου
Σχήμα 3.13	Αισθητήρας IBIS-S
Σχήμα 3.14	Διεπαφές αισθητήρα IBIS-S
Σχήμα 3.15	Οπτικό τηλεσκόπιο
Σχήμα 3.16	Λοβός κεραίας
Σχήμα 3.17	Κεραία IBIS-H20
Σχήμα 3.18	Πρότυπο κατακόρυφου (α) και οριζόντιου (β) επιπέδου κεραίας IBIS-H20
Σχήμα 3.19	Τρόπος σύνδεσης συστήματος IBIS-S
Σχήμα 3.20	Ροή εκ των υστέρων επεξεργασίας μετρήσεων
Σχήμα 4.1	Ανάλυση σύνθετης χρονοσειράς
Σχήμα 4.2	Κανόνας τραπεζίου
Σχήμα 4.3	Δειγματοληψία συχνότητας μετασχηματισμού Fourier διακριτού χρόνου (DTFT)
Σχήμα 4.4	Σχηματική αναπαράσταση ζεύγους Fourier
Σχήμα 4.5	Παραδοχή ότι το μετρούμενο σήμα επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο
Σχήμα 4.6	Διαγράμματα συχνοτήτων σημάτων με ακέραιο και μη αριθμό περιόδων
Σχήμα 4.7	Εφαρμογή συνάρτησης παραθύρου
Σχήμα 4.8	Γενική μορφή συνάρτησης παραθύρου Kaiser-Bessel
Σχήμα 4.9	Συνάρτηση παραθύρου Kaiser-Bessel με window beta “2” και “4”
Σχήμα 4.10	Συνάρτηση παραθύρου Kaiser-Bessel με window beta “6” και “8”
Σχήμα 4.11	Συνάρτηση παραθύρου Hanning
Σχήμα 5.1	Τοποθεσία ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου
Σχήμα 5.2	Διάταξη μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου

- Σχήμα 5.3 Τοπογραφικό διάγραμμα του ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου
- Σχήμα 5.4 Εγκαταστάσεις Μονάδας IV στον ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου
Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου
- Σχήμα 5.5 Εγκαταστάσεις Μονάδας V στον ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου
- Σχήμα 5.6 Καπνοδόχοι Μονάδας I (αριστερά) & II (δεξιά) ΔΕΘ/ΑΗΣ
Κερατέας - Λαυρίου
- Σχήμα 5.7 Τρόπος ανύψωσης καυσαερίων από την καπνοδόχο
- Σχήμα 5.8 Σημείο εγκατάστασης οργάνου κατά τη συλλογή της πρώτης ομάδας
μετρήσεων
- Σχήμα 5.9 Σκόπευση καπνοδόχου Μονάδας I από οριζόντια απόσταση 10 m
- Σχήμα 5.10 Σημεία χονδρικού προσανατολισμού συστήματος IBIS-S
- Σχήμα 5.11 Παράθυρο ρυθμίσεων λογισμικού IBIS-S Controller για δυναμικά
φαινόμενα
- Σχήμα 5.12 Παράθυρο ορισμού γεωμετρικής διάταξης συστήματος
IBIS-S - κατασκευής
- Σχήμα 6.1 Οθόνη που εμφανίζεται με την ολοκλήρωση της διαδικασίας
δημιουργίας project
- Σχήμα 6.2 Επιλογές επεξεργασίας – range window
- Σχήμα 6.3 Ορισμός γεωμετρικής διάταξης συστήματος IBIS-S - καπνοδόχου
- Σχήμα 6.4 Επιλογή τύπου κεραίας και γωνίας ύψους μεταξύ οργάνου-καπνοδόχου
- Σχήμα 6.5 Επιλογή σημείων κατασκευής
- Σχήμα 6.6 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής
- Σχήμα 6.7 Επιλεγμένα σημεία με βάση το διάγραμμα Thermal SNR
- Σχήμα 6.8 Σχηματική αναπαράσταση επιλεγμένων σημείων πάνω στην
καπνοδόχο
- Σχήμα 6.9 Οθόνη Range-bin Dynamic Analysis
- Σχήμα 6.10 Εντοπισμός φαινομένου Clutter στο πολικό διάγραμμα
- Σχήμα 6.11 Απαλοιφή φαινομένου clutter
- Σχήμα 6.12 Ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης καπνοδόχου
- Σχήμα 6.13 Δευτερεύουσες συχνότητες ταλάντωσης καπνοδόχου
- Σχήμα 6.14 Ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης καπνοδόχου σύμφωνα με παλαιότερη
έρευνα
- Σχήμα 6.15 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής όλων των
παρατηρούμενων σημείων της
- Σχήμα 6.16 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με
ύψος 61.3 m και 82.3 m
- Σχήμα 6.17 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με
ύψος 89.6 m και 97.9 m
- Σχήμα 6.18 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με
ύψος 105 m και 112.5 m
- Σχήμα 6.19 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με
ύψος 119.5 m και 127.4 m
- Σχήμα 6.20 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με
ύψος 134.8 m και 142.6 m
- Σχήμα 6.21 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείου με
ύψος 146.3 m
- Σχήμα 6.22 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείου με
ύψος 67.3 m από 835 – 870 sec
- Σχήμα 6.23 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείου με
ύψος 105 m από 835 – 870 sec

- Σχήμα 6.24 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείου με ύψος 142.6 m από 835 – 870 sec
- Σχήμα 6.25 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με ύψος 67.3 m, 105 m και 142.6 m από 835 – 870 sec
- Σχήμα 6.26 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με ύψος από 67.3 m έως 146.3 m για χρονικό διάστημα παρατήρησης από 1745 - 1754 sec
- Σχήμα 6.27 Ιστόγραμμα projected μετατόπισης σημείου με ύψος 146.3 m
- Σχήμα 6.28 Ιστόγραμμα projected ταχύτητας σημείου με ύψος 146.3 m
- Σχήμα 6.29 Ιστόγραμμα projected επιτάχυνσης σημείου με ύψος 146.3 m
- Σχ. Παραρτήματος Α1 Υπολογισμός στοιχείων γεωμετρικής διάταξης
οργάνου – κατασκευής μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel
- Σχ. Παραρτήματος Β1 Ολοκληρωμένο τοπογραφικό διάγραμμα (με υπόμνημα)
Ενεργειακού Κέντρου Ηλεκτροπαραγωγής Λαυρίου

Ευρετήριο Πινάκων

- Πίνακας 3.1 Γωνιακά ανοίγματα κυρίως λοβού κεραίας IBIS-H20 στα -3 dB και -10 dB
- Πίνακας 6.1 Επιλογή σημείων καπνοδόχου με εκπεμπόμενο σήμα υψηλής έντασης
- Πίνακας 6.2 Τιμές μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης επιλεγμένων σημείων

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στόχος της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η χρήση της τεχνολογίας επίγειου συστήματος radar συνθετικού ανοίγματος για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς υψηλής καπνοδόχου της ΔΕΗ ΑΕ (ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας – Λαυρίου). Πρόκειται για το σύστημα IBIS-S της ΣΑΤΜ ΕΜΠ. Το σύστημα IBIS-S βασίζεται στην αρχή λειτουργίας του radar και έχει τη δυνατότητα παρακολούθησης δυναμικών κυρίως μετατοπίσεων πολλών σημείων ταυτόχρονα, με μεγάλη ακρίβεια.

Η υλοποίηση του έργου περιλαμβάνει μία σειρά από προπαρασκευαστικές εργασίες οι οποίες αποσκοπούν στην εξοικείωση με το σύστημα IBIS-S, στην εγκατάσταση και λειτουργία του. Το αντικείμενο του κυρίως πειράματος περιλαμβάνει τη διεξαγωγή μετρήσεων, με συνθήκες ισχυρού ανέμου (15 m/s), για τη συλλογή δεδομένων και τον υπολογισμό των κινηματικών χαρακτηριστικών της καπνοδόχου (μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση).

Η επεξεργασία των μετρήσεων πραγματοποιείται με το πρόγραμμα εκ των υστέρων επεξεργασίας του συστήματος IBIS (IBIS Data Viewer). Σε πρώτο στάδιο ορίζονται οι παράμετροι επεξεργασίας, στη συνέχεια επιλέγονται τα προς μελέτη σημεία της κατασκευής και τέλος πραγματοποιείται η επεξεργασία και η ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι το μέγιστο εύρος μετακίνησης του υψηλότερου παρατηρούμενου σημείου της καπνοδόχου (146.3 m από το έδαφος) ισούται με 13.47 mm και ότι η κύρια συχνότητα ταλάντωσης της καπνοδόχου ισούται με 0.32 Hz.

ABSTRACT

The aim of this work is the use of ground-based microwave interferometry system for monitoring the dynamic behavior of a high chimney at the Energy Center Power of Lavrio of public power corporation in Greece. This is the IBIS-S system of NTUA. The IBIS-S system is based on the principle of operation of radar and has the ability to monitor mainly dynamic displacements of many points simultaneously, with ultra-high accuracy at long observation distances.

The project includes a series of preparatory work aimed at learning the installation and operation of IBIS-S system. The main objective of the experiment involves performing measurements during a day with strong wind (15 m/s), data collection and calculation of kinematic characteristics of the chimney (displacement, velocity, acceleration) as well as dominant frequency.

The processing of the measurements takes place with the post-processing program of the system, IBIS Data Viewer. After selecting the parameters of the processing and select chimney's points of interest, the process and analysis of the results take place.

The analysis of results shows that maximum displacement of the highest observed point of the chimney (146.3 m above the ground) equals to 13.47 mm. Also, analysis reveals a natural frequency of the structure of 0.32 Hz.

Γενικά

Η σύγχρονη τάση σχεδιασμού τεχνικών έργων και κατασκευών περιλαμβάνει τη διαδικασία της διάγνωσης της δομοστατικής ακεραιότητας (Structural Health Monitoring) της κατασκευής. Συγκεκριμένα, μέσω παρατήρησης και ανάλυσης της κινηματικής συμπεριφοράς της κατασκευής επιτυγχάνεται η έγκαιρη διάγνωση και πρόβλεψη τυχών βλαβών της κατασκευής. Με τον τρόπο αυτό, η δυναμική συμπεριφορά της μελετούμενης κατασκευής μετράται απευθείας, αντί να προβλέπεται μέσω μοντέλων. Η καταγραφή της κινηματικής συμπεριφοράς της κατασκευής επιτυγχάνεται μέσω ποικίλων οργάνων, όπως επιταχυνσιόμετρα, κλισίμετρα κ.τ.λ. Ένα από τα πιο σύγχρονα όργανα είναι το σύστημα IBIS-S. Πρόκειται για ένα επίγειο σύστημα radar συνθετικού ανοίγματος (SAR) με δυνατότητα παρακολούθησης στατικών και δυναμικών φαινομένων. Οι δυνατότητες του συγκεκριμένου συστήματος είναι μεγάλες, κάτι που το καθιστά ένα χρήσιμο και αποτελεσματικό όργανο παρακολούθησης της κινηματικής συμπεριφοράς της εκάστοτε κατασκευής.

Αντικείμενο της Εργασίας

Σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου της Μονάδας I της ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας – Λαυρίου, της ΔΕΗ ΑΕ με χρήση της τεχνολογίας επίγειου συστήματος radar συνθετικού ανοίγματος συγκεκριμένα του συστήματος IBIS-S της ΣΑΤΜ ΕΜΠ.

Η επιλογή της συγκεκριμένης κατασκευής πραγματοποιήθηκε λόγω του μεγάλου ύψους της καπνοδόχου σε συνδυασμό με τους ισχυρούς ανέμους που πνέουν στην περιοχή του ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου.

Οι επιμέρους στόχοι που τέθηκαν για την επίτευξη του συγκεκριμένου στόχου είναι:

- η διασύνδεση, εκμάθηση και ο πειραματικός έλεγχος του συστήματος IBIS-S

- προκειμένου να επιτευχθεί η καταγραφή της κινηματικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου η συλλογή δεδομένων μετατόπισης της καπνοδόχου με τη χρήση του συστήματος καταγραφής IBIS-S της ΣΑΤΜ ΕΜΠ
- η επεξεργασία των μετρήσεων και εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την κινηματική συμπεριφορά της καπνοδόχου
- ο υπολογισμός της μετατόπισης, της ταχύτητας, της επιτάχυνσης και της συχνότητας ταλάντωσης της καπνοδόχου κατά τη διάρκεια παρακολούθησής της

Δομή Εργασίας

Συνολικά η παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει επτά κεφάλαια, τα περιεχόμενα των οποίων παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Στο Πρώτο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην ανάγκη παρακολούθησης της συμπεριφοράς τεχνικών έργων και κατασκευών και στην διαδικασία με την οποία αυτό επιτυγχάνεται. Συγκεκριμένα εισάγεται η έννοια της παρακολούθησης της δομικής “υγείας” των κατασκευών (Structural Health Monitoring) και παρουσιάζονται τα στάδια υλοποίησής της καθώς και τα αξιώματα τα οποία τη διέπουν.

Στο Δεύτερο Κεφάλαιο αναφέρονται οι επικρατέστερες μέθοδοι και τα όργανα μέτρησης της δυναμικής συμπεριφοράς διαφόρων τεχνικών έργων και κατασκευών, όπως τα επιταχυνσιόμετρα, οι οπτικές ίνες και οι αισθητήρες γραμμικής παραμόρφωσης, τα κλισίμετρα, τα παραμορφωσίμετρα καθώς και οι γεωδαιτικοί σταθμοί αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου, συστήματα δορυφορικού εντοπισμού θέσης και επίγεια συστήματα radar συνθετικού ανοίγματος.

Στο Τρίτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται γενικά η αρχή λειτουργίας των radars και ακολουθεί η παρουσίαση του συστήματος IBIS-S. Συγκεκριμένα, στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η αρχή λειτουργίας του συστήματος, τα τεχνικά του χαρακτηριστικά, τα συστατικά του μέρη, το λογισμικό χειρισμού του καθώς και το λογισμικό εκ των υστέρων επεξεργασίας των μετρήσεων που συλλέχθηκαν με το σύστημα IBIS-S.

Το Τέταρτο Κεφάλαιο αναφέρεται στη φασματική επεξεργασία σήματος και στο μαθηματικό υπόβαθρο στο οποίο αυτή βασίζεται. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι έννοιες των σειρών Fourier, του διακριτού μετασχηματισμού Fourier και του ταχύ μετασχηματισμού Fourier καθώς και η έννοια της συνάρτησης παραθύρου (windowing).

Στο Πέμπτο Κεφάλαιο παρουσιάζεται η διαδικασία συλλογής δεδομένων. Αρχικά, δίνονται συνοπτικά στοιχεία για τον ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου και για την καπνοδόχο της Μονάδας I η οποία μελετάται. Ακολουθεί η περιγραφή του τρόπου σχεδιασμού του κυρίως πειράματος και της διαδικασίας συλλογής των δεδομένων.

Στο Έκτο Κεφάλαιο αναφέρεται ο τρόπος επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων. Συνεπώς, παρουσιάζεται το λογισμικό εκ των υστέρων επεξεργασίας των μετρήσεων IBISDV και ορίζονται οι παράγοντες επεξεργασίας. Εξάγονται τα αποτελέσματα της κινηματικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου και παρουσιάζονται στατιστικά στοιχεία για επιλεγμένα σημεία της καπνοδόχου.

Στο Όγδοο Κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα βασικότερα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία. Τέλος, παρουσιάζονται προτάσεις για περαιτέρω διεύρυνση των συμπερασμάτων σχετικά με το σύστημα IBIS-S και με την κινηματική συμπεριφορά της καπνοδόχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

1.1 Είδη Μετακινήσεων / Παραμορφώσεων – Μέθοδοι Παρακολούθησης Δυναμικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων

Η σημασία της ασφαλούς λειτουργίας των τεχνικών έργων είναι μεγάλη, τόσο για τη διασφάλιση της ορθολογικής λειτουργίας τους, όσο και του περιορισμού των επιπτώσεων που θα προκύψουν από τυχόν μερική ή ολική αστοχία της κατασκευής. Μεγάλα τεχνικά έργα, όπως γέφυρες, φράγματα, ψηλά κτίρια, υψηλοί πύργοι και ιστοί χρήζουν συστηματικής παρακολούθησης, με στόχο την πρόβλεψη τυχόν μελλοντικών αστοχιών τους.

Μόνιμες παραμορφώσεις μπορεί να προκληθούν σε μία κατασκευή απότομα (π.χ. λόγω σεισμικής δράσης) ή προοδευτικά (π.χ. λόγω ιδίου βάρους) και ενδέχεται να έχουν ουσιαστική επίδραση στη στατική της επάρκεια. Αντίθετα, μετακινήσεις ημι-μόνιμου και δυναμικού χαρακτήρα (π.χ. λόγω του ανέμου) προκαλούνται από μικρο-μεταβολές της γεωμετρίας της κατασκευής, οι οποίες συνίστανται σε παροδική στατική μετατόπιση τμήματος της κατασκευής συνήθως προς μία κατεύθυνση και ταλάντωση γύρω από μία μέση θέση. Οι παραμορφώσεις αυτές, εφόσον βρίσκονται εντός των ορίων μελέτης, είναι αναμενόμενες και επιθυμητές και αποτελούν το αποτέλεσμα της απορρόφησης της ενέργειας των μεταβαλλόμενων εξωτερικών φορτίσεων (π.χ. της δράσης του ανέμου). Ειδικότερα, η ημι-μόνιμη (ή ημι-στατική) συνιστώσα παραμόρφωσης εκφράζει τη μέση εκτροπή από τη θέση ηρεμίας της κατασκευής για χρονικό διάστημα που διαρκεί το αίτιο που την προκαλεί. Αντίθετα, η δυναμική συνιστώσα αναφέρεται στις αποκρίσεις της κατασκευής με τη μορφή ταλαντώσεων και συχνότητες κοντά στην ιδιοσυχνότητα της κατασκευής και μπορεί να διακριθεί περαιτέρω σε επικρατούσες και δευτερεύουσες συνιστώσες. Οι επικρατούσες συνιστώσες σχετίζονται με την απόκριση της κατασκευής κοντά στην ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης, ενώ οι δευτερεύουσες εκφράζουν ένα πλήθος συχνοτήτων απορρόφησης και λαμβάνουν εν γένει μικρότερες τιμές από την τιμή της ιδιοσυχνότητας.

Η μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς των τεχνικών έργων είναι αναγκαίο να πραγματοποιείται τόσο κατά το σχεδιασμό και την κατασκευή τους όσο και κατά τη λειτουργία τους.

Στη φάση σχεδιασμού η προεκτίμηση - προσομοίωση της απόκρισης της κατασκευής σε εξωτερικούς παράγοντες φορτίσεων στηρίζεται είτε στην εφαρμογή κατάλληλων αριθμητικών μοντέλων τα οποία προϋποθέτουν γνώση των αναμενόμενων φορτίσεων που επενεργούν στην κατασκευή και των φυσικών παραμέτρων της (υλικό, γεωμετρία, γήρανση), είτε στην πειραματική μέτρηση των αποκρίσεων ομοιωμάτων πολύ μικρότερης κλίμακας μέσω προσομοιωτών (π.χ. σεισμική τράπεζα, ανεμοσήραγγα). Ωστόσο, στην περίπτωση ειδικών έργων (όπως ευμεγέθεις, υψηλές, εύκαμπτες ή ιδιόμορφες κατασκευές) τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις δύο μεθόδους δεν μπορούν να περιγράψουν με πληρότητα και αξιοπιστία τη δυναμική συμπεριφορά των κατασκευών, με αποτέλεσμα να είναι επιβεβλημένη η απευθείας παρακολούθηση των παραμορφώσεων (full-scale deformation monitoring) επί της κατασκευής.

Η διαδικασία περιλαμβάνει καταγραφή των μεταβολών της γεωμετρίας του έργου στο χρόνο με τη λήψη μετρήσεων από αισθητήρες που εγκαθίστανται σε χαρακτηριστικά σημεία της κατασκευής, είτε μέσω μετρήσεων πειραματικής μηχανικής, είτε μέσω γεωδαιτικών μεθόδων. Τα συστήματα πειραματικής μηχανικής προσδιορίζουν ικανοποιητικά τις συνιστώσες της δυναμικής συμπεριφοράς (συχνότητες ταλάντωσης) της κίνησης που παρουσιάζει μία κατασκευή – ωστόσο, εν γένει υστερούν στον προσδιορισμό του εύρους της ταλάντωσης και των χαρακτηριστικών της ημι-μόνιμης (σταθερής ή σταδιακά μεταβαλλόμενης) παραμόρφωσης που συνεπάγεται η συνεχής φόρτιση της κατασκευής. Αντίθετα, η εφαρμογή γεωδαιτικών μεθοδολογιών και μετρήσεων με τη χρήση ειδικών αισθητήρων παρέχουν άμεσα τη θέση (συντεταγμένες) των σημείων παρακολούθησης σε προκαθορισμένο σύστημα αναφοράς και με γνωστή χρονική αναφορά. Κατά συνέπεια, είναι δυνατός ο προσδιορισμός των μετατοπίσεων στα σημεία καταγραφής της κατασκευής, καθώς και των κινηματικών χαρακτηριστικών τους (ταχύτητα, επιτάχυνση).

Η συγκριτική ανάλυση των υπολογισμένων (εκτιμώμενων από αριθμητικά μοντέλα) και μετρημένων μετατοπίσεων συμβάλλουν στην αξιολόγηση των μοντέλων, επαληθεύουν τα αποτελέσματα των μετρήσεων με αποτέλεσμα την εξαγωγή

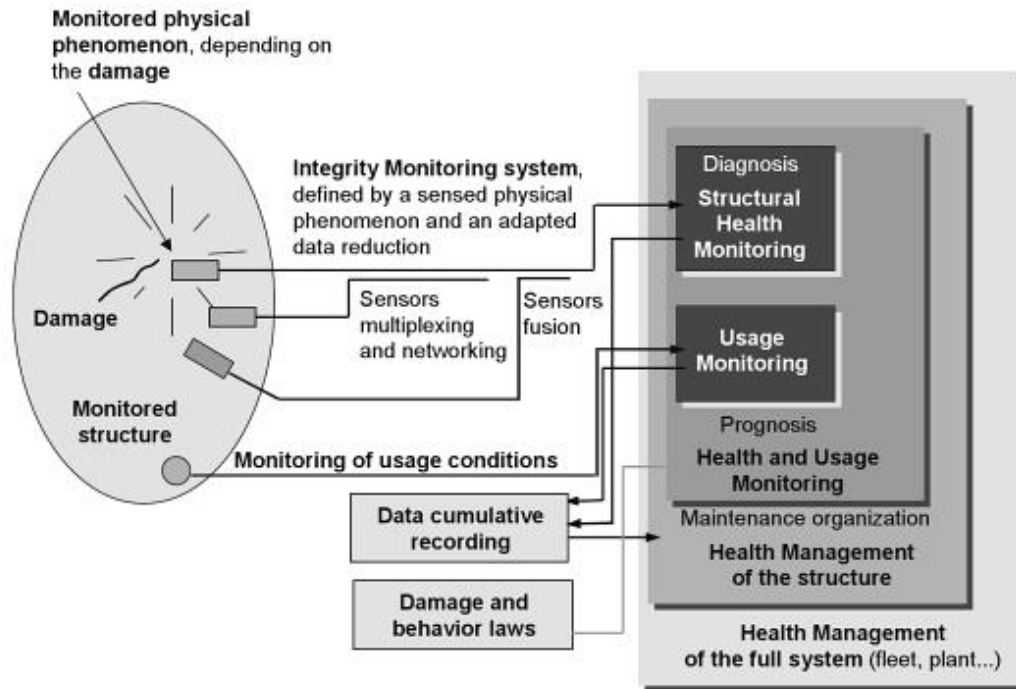
ασφαλέστερων συμπερασμάτων σχετικά με τη δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής.

1.2 Παρακολούθηση Δομικής “Υγείας” Τεχνικών Έργων (Structural Health Monitoring - SHM)

1.2.1 Γενικά

Η συμπεριφορά της κατασκευής προσεγγίζεται κατά τη φάση σχεδιασμού της - ωστόσο, κατά τη διάρκεια λειτουργίας της επιδρούν παράγοντες που τη μεταβάλλουν. Η διαδικασία παρακολούθησης της δομικής υγείας των κατασκευών (SHM) καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας τους έχει ως στόχο τη διάγνωση της κατάστασης των δομικών της στοιχείων και τη συλλογή δεδομένων σχετικά με τον τρόπο με τον οποίο αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Με τον τρόπο αυτό, προκύπτει μία πλήρης βάση δεδομένων του ιστορικού της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής, από την οποία μπορεί να προκύψει πρόγνωση τυχόν αστοχίας της κατασκευής και γενικότερα η υπολειπόμενη διάρκεια ζωής της, προγραμματισμός της διαδικασίας συντήρησής της καθώς και επαναπροσδιορισμός του τρόπου σχεδιασμού της.

Επομένως, η διαδικασία SHM δεν αποτελεί απλώς μία εξελεγμένη μέθοδο “μη καταστροφικής” αξιολόγησης της κατάστασης των δομικών στοιχείων της κατασκευής. Περιλαμβάνει τη διασύνδεση αισθητήρων, τη συλλογή και μεταφορά δεδομένων, τον υπολογισμό των ασκούμενων δυνάμεων επί της κατασκευής και την άμεση εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη συμπεριφορά της. Με τον τρόπο αυτό, δίνεται η δυνατότητα επανεξέτασης του τρόπου σχεδιασμού και συντήρησης της κατασκευής. Τα παραπάνω δίνονται σχηματικά στο Σχήμα 1.1.



Σχ. 1.1 Αρχές και οργάνωση ενός SHM συστήματος [Daniel Balageas et all, 2006]

Fig. 1.1 Principle and organization of a SHM system [Daniel Balageas et all, 2006]

1.2.2 Κίνητρα εφαρμογής SHM

Τα κίνητρα για την παρακολούθηση της δομικής υγείας των κατασκευών είναι πολλά, δεδομένου ότι:

- επιτρέπει τη βέλτιστη χρήση της κατασκευής, την επιμήκυνση του χρόνου ζωής της και την αποφυγή τυχόν καταστροφικής αστοχίας της,
- βοηθά στη βελτίωση της ποιότητας των δομικών μερών της κατασκευής και στη χρήση καινοτόμων υλικών κατά την κατασκευή του τεχνικού έργου
- διαφοροποιεί δραστικά την οργάνωση των εργασιών συντήρησης της κατασκευής, σύμφωνα με τις επιδόσεις της, κατανέμοντας τη ροή των εργασιών συντήρησης σε βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες, αποφεύγοντας άσκοπες αποσυναρμολογήσεις συστατικών μερών της κατασκευής και ελαχιστοποιώντας την ανθρώπινη συμμετοχή και κατά συνέπεια τα ανθρώπινα λάθη, αυξάνοντας την αξιοπιστία του ελέγχου.

Όλα τα παραπάνω, συντελούν στη βελτίωση της ασφάλειας της κατασκευής, το οποίο αποτελεί σημαντικό κίνητρο ιδιαίτερα μετά από κάποια θεαματικά ατυχήματα λόγω

λαθών κατά τη διαδικασία της κατασκευής ή μη ικανοποιητικής συντήρησης. Επιπλέον, οι κατασκευές με ενσωματωμένα συστήματα SHM παρουσιάζουν μειωμένο κόστος συντήρησης συγκρινόμενες με κατασκευές στις οποίες δεν εφαρμόζονται συστήματα SHM.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΟΡΓΑΝΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

2.1 Γενικά

Λόγω της μεγάλης σημασίας της παρακολούθησης της δυναμικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων και κατασκευών, η επιλογή των οργάνων μέτρησης των κινηματικών αυτών χαρακτηριστικών είναι ιδιαίτερα κρίσιμη.

Οι παράμετροι που καθορίζουν την επιλογή των κατάλληλων μεθόδων και οργάνων παρακολούθησης είναι:

- η χωρική κάλυψη: πρόκειται για την έκταση της κατασκευής που παρακολουθείται από το όργανο. Η έκταση μπορεί να είναι σημειακή είτε επιφανειακή
- η συχνότητα δειγματοληψίας του οργάνου: επιλέγεται όργανο με δυνατότητα ανίχνευσης και καταγραφής της συχνότητας ταλάντωσης της κατασκευής. Συνεπώς, σύμφωνα με τον κανόνα του Nyquist, το όργανο που επιλέγεται πρέπει να έχει διπλάσια τουλάχιστον συχνότητα δειγματοληψίας από τη βασική συχνότητα ταλάντωσης της κατασκευής που μελετάται
- η απαιτούμενη ακρίβεια καταγραφής των δεδομένων: ποικίλει ανάλογα με το αντικείμενο παρακολούθησης
- η εμβέλεια παρατήρησης κάθε οργάνου: η μέγιστη απόσταση μεταξύ οργάνου και κατασκευής κατά την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς της κατασκευής
- η επίδραση της ατμόσφαιρας στα μετρούμενα μεγέθη: ανάλογα με τις ατμοσφαιρικές συνθήκες που επικρατούν στο πεδίο την ώρα των μετρήσεων απαιτείται η χρήση των κατάλληλων μεθόδων και οργάνων μέτρησης
- η δυνατότητα παρατήρησης σε δυσμενείς καιρικές συνθήκες: οι ατμοσφαιρικές συνθήκες κάτω από τις οποίες πραγματοποιείται η καταγραφή της συμπεριφοράς του τεχνικού έργου επιβάλλουν τη χρήση των κατάλληλων οργάνων και μεθοδολογιών
- η δυνατότητα πρόσβασης στην κατασκευή: ολισθαίνοντα πρανή, φορείς γεφυρών, μέτωπα, υψηλοί ιστοί και εσωτερικό σπράγγων είναι κατά κανόνα

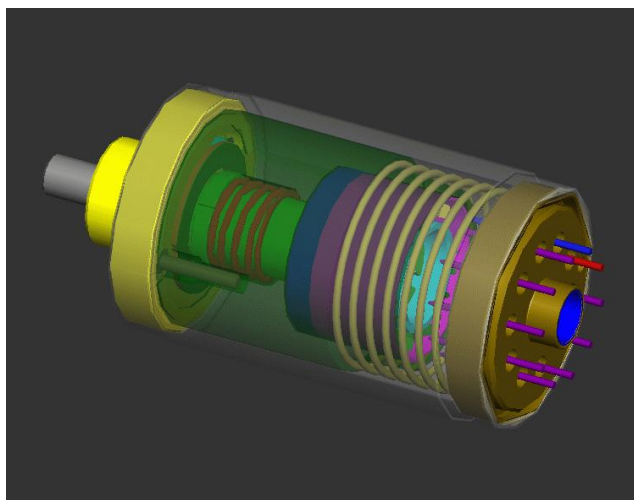
δυσπρόσιτα ή απρόσιτα σημεία, οπότε πρέπει να χρησιμοποιηθούν κατάλληλα όργανα και μεθοδολογίες

- η πληρότητα των δεδομένων: για την ολοκληρωμένη παρακολούθηση κατασκευών με σύνθετη συμπεριφορά, η λήψη μετρήσεων σε χαρακτηριστικά σημεία της είναι σημαντική. Η αντίθετη περίπτωση μπορεί να οδηγήσει σε εσφαλμένα συμπεράσματα
- η ασφαλής εφαρμογή της μεθόδου και χρήση του εξοπλισμού: η διαδικασία λήψης των μετρήσεων πρέπει να είναι απόλυτα ασφαλής.

2.2 Όργανα Παρακολούθησης Δυναμικής Συμπεριφοράς Τεχνικών Έργων

2.2.1 Επιταχυνσιόμετρα (Accelerometers)

Η αρχή λειτουργίας ενός επιταχυνσιόμετρου στηρίζεται στη μέτρηση των δυνάμεων και των μετατοπίσεων που δέχεται ένα δοκίμιο μάζας (Σχήμα 2.1). Συγκεκριμένα, τα επιταχυνσιόμετρα ανοιχτού κύκλου λειτουργίας (open loop) μετράνε απευθείας την μετατόπιση του δοκιμίου μάζας η οποία προκαλείται από εξωτερική διέγερση που δρα απευθείας στον αισθητήρα, ενώ τα επιταχυνσιόμετρα κλειστού κύκλου λειτουργίας (close loop) μετράνε τη δύναμη που χρειάζεται ώστε το δοκίμιο μάζας να παραμείνει ακίνητο αντιδρώντας στη δύναμη που προκαλεί τη μετατόπισή του. Υπάρχουν επιταχυνσιόμετρα καταγραφής υψίσυχνων αλλά και χαμηλόσυχνων κινήσεων. Τα επιταχυνσιόμετρα αποτελούν ένα από τα κυριότερα όργανα καταγραφής της δυναμικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων.



Σχ. 2.1 Σχηματική παράσταση ενός επιταχυνσιομέτρου [www.wikipedia.org]

Fig. 2.1 Schematic diagram of an accelerometer [www.wikipedia.org]

Οι συσκευές αυτές παρέχουν με αξιοπιστία το φάσμα συχνοτήτων κίνησης μίας κατασκευής – ωστόσο υστερούν στον υπολογισμό του εύρους της μετατόπισης, δεδομένου ότι η μετατροπή των μετρημένων επιταχύνσεων σε μετατοπίσεις απαιτεί την εφαρμογή διπλής ολοκλήρωσης.

2.2.2 Οπτικές ίνες (Optical fibre sensors) και αισθητήρες γραμμικής παραμόρφωσης (linear deformation transducers)

Εκτός από τις προηγούμενες μεθόδους, τα τελευταία χρόνια έχει διαδοθεί ευρέως η χρήση οπτικών ινών καθώς και αισθητήρων γραμμικής παραμόρφωσης.

Με τη χρήση των οπτικών ινών, ο υπολογισμός της παραμόρφωσης στηρίζεται στη μεταβολή της φυσικής κατάστασης (μήκος) του αισθητήρα παρατήρησης. Συγκεκριμένα, οι οπτικές ίνες αποτελούνται από ένα ζεύγος καλωδίων τα οποία συνδέονται με έναν αισθητήρα ή ενισχυτή (Σχήμα 2.2). Το ένα καλώδιο εκπέμπει ηλεκτρικό σήμα συγκεκριμένης έντασης το οποίο ανακλάται από το κινούμενο σώμα – κατασκευή. Το δεύτερο καλώδιο λαμβάνει το ανακλώμενο σήμα και το μεταφέρει στον αισθητήρα. Ανάλογα με την μετατόπιση του σώματος μεταβάλλεται και η ένταση της ανακλώμενης ακτίνας, οπότε και η υπολογίζεται η τιμή της.

Οι σύγχρονοι αισθητήρες οπτικών ινών ονομάζονται Optical Fibre Grating (FBG). Χρησιμοποιούνται ευρέως σε τεχνικά έργα λόγω του χαμηλού τους κόστους, της ευελιξίας και αντοχής τους και της μεγάλης ακρίβειας στην καταγραφή μετακινήσεων.



Σχ. 2.2 Σχηματική παράσταση μίας οπτικής ίνας [www.sensors.crd.gr]

Fig. 2.2 Schematic diagram of an optical fiber [www. sensors.crd.gr]

Αντίστοιχη είναι η λειτουργία και των αισθητήρων γραμμικής παραμόρφωσης (linear deformation transducer) (Σχήμα 2.3). Το σημείο στο οποίο διαφέρουν ως προς τις οπτικές ίνες είναι ότι αντί της εκτομής σήματος διαθέτουν ένα σύρμα με το οποίο συνδέονται με το κινούμενο σώμα και μέσω της μεταβολής του μήκους του σύρματος υπολογίζεται η μετατόπιση του κινούμενου σώματος.

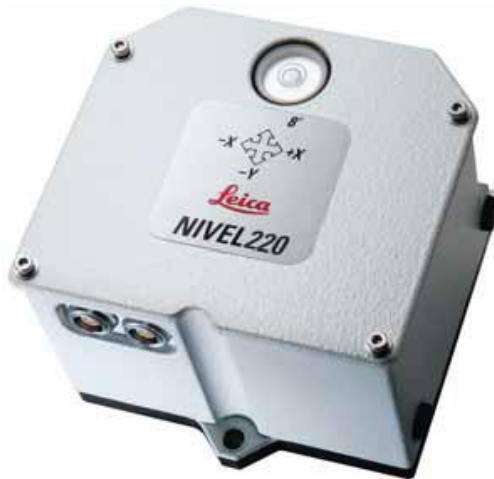


Σχ. 2.3 Σχηματική παράσταση ενός αισθητήρα γραμμικής παραμόρφωσης [www.hbm.com]

Fig. 2.3 Schematic diagram of a linear deformation transducer [www.hbm.com]

2.2.3 Κλισίμετρα (Inclinometers)

Το κλισίμετρο είναι ένα όργανο με το οποίο προσδιορίζεται την κλίση μίας κατασκευής. Ο προσδιορισμός της κλίσης στηρίζεται στη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης μεταξύ ηλεκτροδίων στην ελεύθερη επιφάνεια αγωγίμου υγρού το οποίο ισορροπεί σε ειδική μικρο-κάψουλα στο εσωτερικό περίβλημα του οργάνου. Τα σύγχρονα κλισίμετρα για την παρακολούθηση των κατασκευών έχουν μικρό μέγεθος και βάρος και παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης σε δύο άξονες με ακρίβεια της τάξης του 0.001 mrad. Τα κλισίμετρα μπορούν να τοποθετηθούν χωρίς καμιά ουσιαστική επίδραση στην κατασκευή σε μεμονωμένα σημεία ενδιαφέροντος ανιχνεύοντας παραμορφώσεις και δημιουργώντας διασυνδεδεμένες συστοιχίες με κοινό καταγραφικό κέντρο. Η μεγάλη ευαισθησία των κλισιμέτρων στις θερμοκρασιακές μεταβολές ($\pm 0.0047 \text{ mrad}/^\circ\text{C}$) (www.leica.com) καθώς και η αδυναμία λήψης αξιόπιστων μετρήσεων σε υψηλές συχνότητες ($>5 \text{ Hz}$) λόγω της αδράνειας του υγρού, τα καθιστούν μη ικανοποιητικά για την παρακολούθηση δυναμικών παραμορφώσεων υψηλής συχνότητας. Αντίθετα, δεδομένης της γεωμετρίας της κατασκευής, μπορούν να αποδώσουν ικανοποιητικά στον προσδιορισμό μόνιμων ή ημι-μόνιμων παραμορφώσεων.



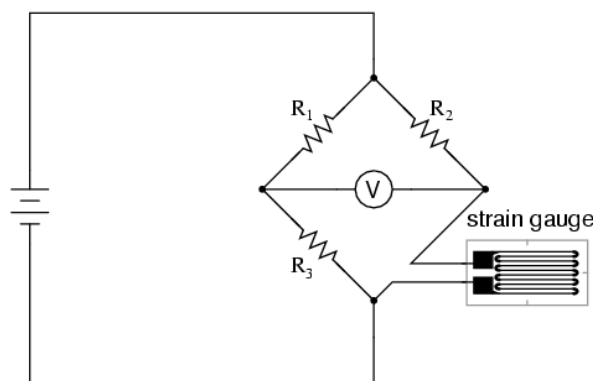
Σχ. 2.4 Σχηματική παράσταση ενός κλισιομέτρου [www.leica.com]

Fig. 2.4 Schematic diagram of an inclinometer [www. leica.com]

2.2.4 Παραμορφωσίμετρα (Strain gauges)

Το παραμορφωσίμετρο μετρά την παραμόρφωση ($\Delta l/l$) ενός αντικειμένου. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην διαφορά ηλεκτρικής αντίστασης που παρατηρείται σε μία αγώγιμη εύκαμπτη λωρίδα όταν αυτή παραμορφώνεται ελαστικά και η οποία προσκολλάται πάνω στο μετρούμενο αντικείμενο.

Η συνήθης διάταξη ενός παραμορφωσίμετρου αποτελείται από μία συστοιχία τεσσάρων αντιστάσεων (γέφυρα Wheatstone), γνωστών ονομαστικών τιμών, η οποία συνδέεται με μία ηλεκτρική πηγή. Στη μία από τις αντιστάσεις αυτές συνδέεται η εύκαμπτη μεταλλική λωρίδα (Σχήμα 2.5). Όταν παραμορφώνεται η λωρίδα, αλλάζει η αντίστασή της με αποτέλεσμα να διαταράσσεται η ισορροπία της γέφυρας Wheatstone. Επομένως, ανάλογα με την μεταβολή στην τιμή της αντίστασης υπολογίζεται το μέτρο της παραμόρφωσης το οποίο δέχεται η μεταλλική λωρίδα.



Σχ. 2.5 Σχηματική παράσταση διάταξης ενός παραμορφωσίμετρου [www.electronicsteacher.com]

Fig. 2.5 Schematic diagram of a strain gauge [www. electronicsteacher.com]

2.2.5 Ρομποτικός γεωδαιτικός σταθμός αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου (Robotic Total Station, RTS)

Ο γεωδαιτικός σταθμός αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου αποτελεί εξέλιξη του γεωδαιτικού σταθμού. Οι ιδιότητές του μεταξύ άλλων το καθιστούν χρήσιμο στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών.

Συγκεκριμένα, ένα τέτοιο όργανο αναγνωρίζει αυτόματα τον τοποθετημένο πάνω στην κατασκευή στόχο (τοπογραφικό πρίσμα), τον παρακολουθεί κατά την κίνησή του και υπολογίζει τη θέση του σε τρεις διαστάσεις. Για την αυτόματη αναγνώριση και παρακολούθηση το όργανο ενσωματώνει σύστημα αυτόματης αναγνώρισης στόχου καθώς και διάταξη σερβομηχανισμού. Παράλληλα, η δημιουργία ραδιοζεύξης μεταξύ οργάνου και κατάφωτου παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης των καταγραφών του οργάνου από απόσταση, μέσω τηλεχειριστηρίου.

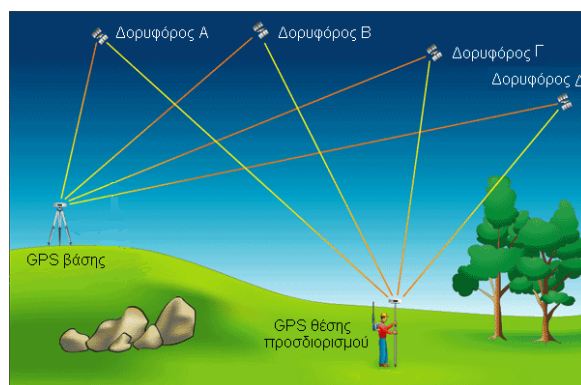
Τα πλεονεκτήματα της συγκεκριμένης τεχνολογίας είναι η επιτάχυνση της διαδικασίας πεδίου και η εξάλειψη σφαλμάτων ανάγνωσης με την καταγραφής των μετρήσεων εντός του οργάνου ή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή με τη χρήση ειδικού προγράμματος. Βασικός περιορισμός της μεθόδου είναι η απαίτηση ανεμπόδιστης οπτικής επαφής μεταξύ οργάνου και στόχου με τη μεταξύ τους απόσταση να μην υπερβαίνει τα 500 – 700 m και με συχνότητα δειγματοληψίας έως 10 Hz.

2.2.6 Σύστημα δορυφορικού εντοπισμού θέσης (Global Navigation Satellite Systems)

Την τελευταία δεκαετία, η τεχνολογία των δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού θέσης χρησιμοποιείται στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς τεχνικών έργων. Το σύστημα δορυφορικού εντοπισμού θέσης αποτελείται από τρία βασικά μέρη. Το Τμήμα του διαστήματος (γεωδαιτικοί δορυφόροι σε τροχιά), το τμήμα ελέγχου (κέντρα παρακολούθησης) και το τμήμα των χρηστών (επίγειοι δέκτες).

Για την παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς κατασκευών, όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, εφαρμόζονται τεχνικές σχετικού κινηματικού εντοπισμού θέσης

είτε σε πραγματικό χρόνο (real time kinematic), είτε σε εκ των υστέρων επεξεργασία (post-processed kinematic). Σύμφωνα με την τεχνική σχετικού κινηματικού εντοπισμού χρησιμοποιούνται δύο δέκτες οι οποίοι λαμβάνουν ταυτόχρονα δορυφορικό σήμα από τουλάχιστον πέντε κοινούς δορυφόρους. Ο ένας από τους δύο δέκτες τοποθετείται στο κινούμενο σημείο (rover receiver) ενώ ο δεύτερος δέκτης (base receiver) τοποθετείται σε σταθερό σημείο γνωστών συντεταγμένων (Σχήμα 2.6). Με τον τρόπο αυτό, οι διακυμάνσεις των μετρούμενων μεγεθών για τον σταθερό δέκτη (base receiver) θεωρούνται σφάλματα και αποστέλονται ως διορθώσεις στις μετρήσεις του κινητού δέκτη (rover receiver), με αποτέλεσμα την μείωση των σφαλμάτων στις καταγραφές του κινητού δέκτη. Η απόσταση μεταξύ των δύο δεκτών πρέπει να είναι μικρή (<20 km) έτσι ώστε οι ατμοσφαιρικές συνθήκες να είναι όμοιες με αποτέλεσμα τα λαμβανόμενα από τους δύο δέκτες δορυφορικά σήματα να επηρεάζονται από αντίστοιχα σφάλματα.



Σχ. 2.6 Σχετικός κινηματικός προσδιορισμός θέσης [www.google.com]

Fig. 2.6 Relative kinematic GNSS surveying [www.google.com]

Σε αντιδιαστολή με τις μεθόδους πειραματικής μηχανικής, σύμφωνα με τις οποίες τα χαρακτηριστικά της κίνησης προσδιορίζονται από μετρήσεις μονοδιάστατων (μη χωρικών) μεγεθών, οι γεωδαιτικές μέθοδοι παρέχουν πρωτογενώς τη θέση του αισθητήρα μέτρησης ως προς κάποιο γνωστό σύστημα αναφοράς. Βασικοί εγγενείς περιορισμοί του συστήματος που υποβαθμίζουν την ακρίβεια της μεθόδου είτε την καθιστούν ολοκληρωτικά ανεφάρμοστη αποτελεί η απαίτηση “ανοιχτού ορίζοντα” (ώστε να εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη λήψη του δορυφορικού σήματος από τουλάχιστον τέσσερις κοινούς δορυφόρους), η απουσία ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, καθώς και συνθήκες που προκαλούν πολλαπλές διαδρομές στο σήμα

GPS (multipath). Επίσης, σε εφαρμογές παρακολούθησης μεταλλικών κατασκευών πρέπει να λαμβάνονται υπόψη πρακτικοί περιορισμοί εγκατάστασης των δεκτών / κεραιών και των παρελκόμενων τους, καθώς και ο περιορισμένος αριθμός των υποψήφιων σημείων ελέγχου. Επισημαίνεται ότι για τις ανάγκες παρακολούθησης των κατασκευών, ορισμένα συστήματα σύγχρονων δεκτών GPS παρέχουν τη δυνατότητα μέτρησης με υψηλή συχνότητα δειγματοληψίας (έως 20 Hz), χαρακτηριστικό που καλύπτει τις συχνότητες απόκρισης των περισσότερων κατασκευών. Στον προσδιορισμό των μετακινήσεων των κατασκευών όπου απαιτείται μεγάλη ακρίβεια χρησιμοποιείται η εκ των υστέρων επεξεργασία των μετρήσεων (post-processing), ενώ σε περιπτώσεις όπου υπάρχει σύστημα προειδοποίησης για περίπτωση αστοχίας της κατασκευής η επεξεργασία των μετρήσεων πραγματοποιείται σε πραγματικό χρόνο (real time).

2.2.7 Επίγειο σύστημα radar συνθετικού ανοίγματος (GB-SAR)

Τα επίγεια συστήματα radar συνθετικού ανοίγματος υπολογίζουν την απόσταση μεταξύ οργάνου – στόχου μέσω μέτρησης του χρόνου μετάδοσης και επιστροφής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προς τον στόχο. Με τον τρόπο αυτό, μέσω διαδοχικών εκπομπών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προσδιορίζεται η ακτινική μετατόπιση των σημείων μίας κατασκευής από τη θέση παρατήρησης, με την πάροδο του χρόνου.

Βασικά πλεονεκτήματα της χρήσης τέτοιων οργάνων στην παρακολούθηση της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών είναι η παρακολούθηση στόχου σε μεγάλες αποστάσεις από το όργανο, ανεξάρτητα από ατμοσφαιρικές συνθήκες, η υψηλή συχνότητα καταγραφής καθώς και η μεγάλη ακρίβεια στις μετρούμενες μετακινήσεις.

Ο τρόπος λειτουργίας τέτοιων συστημάτων παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

ΕΠΙΓΕΙΟ ΣΥΣΤΗΜΑ RADAR ΣΥΝΘΕΤΙΚΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ (GB-SAR)

3.1 Γενικά

Ο όρος RADAR αποτελεί συντομογραφία των λέξεων RAdar Detection And Ranging. Αποτελεί ένα βασικό ηλεκτρονικό σύστημα ηλεκτρομαγνητικού εντοπισμού και παρακολούθησης κινητών στόχων. Η μεγάλη αξία του radar οφείλεται στις σημαντικές δυνατότητες ανίχνευσης και παρακολούθησης στόχων σε μεγάλες αποστάσεις και με μεγάλη ακρίβεια.

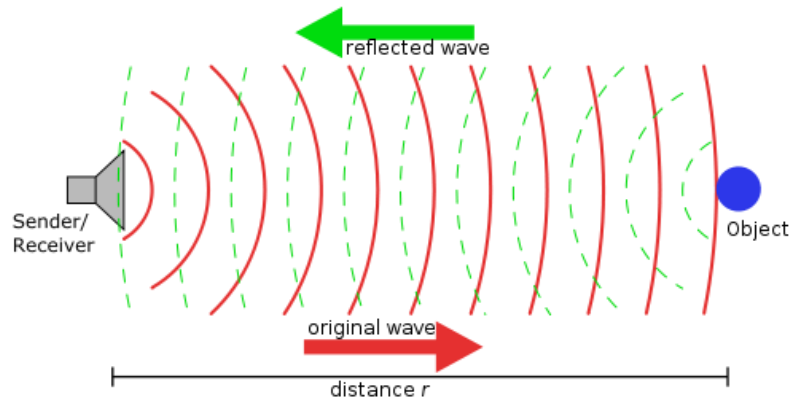
Η αφετηρία ανάπτυξης ενός τέτοιου συστήματος ξεκίνησε το 1886, όταν ο Γερμανός φυσικός Rudolf Hertz απέδειξε πειραματικά ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι δυνατό να εστιασθούν με τη μορφή δέσμης, όπως οι ακτίνες φωτός, και ότι όταν αυτά διοχετεύονται με κατάλληλο τρόπο στο χώρο ανακλώνται από ηλεκτρικά αγωγίμα αντικείμενα. Στις αρχές της δεκαετίας του 1920, ξεκίνησε η εξέλιξη του radar από ομάδα Αμερικανών και Βρετανών επιστημόνων και συνεχίζεται μέχρι σήμερα με εντυπωσιακά επιτεύγματα. Συγκεκριμένα, το πρώτο radar που τέθηκε σε λειτουργία με πολύ ικανοποιητικά αποτελέσματα ήταν κατασκευή του Εθνικού Εργαστηρίου Φυσικής (National Physical Laboratory, NPL) της Μ. Βρετανίας.

Σήμερα αποτελεί βασικό εξοπλισμό τόσο για τον έλεγχο εναέριας κυκλοφορίας, όσο και για τη ναυσιπλοΐα, τη μετεωρολογία και, φυσικά για στρατιωτικούς σκοπούς.

3.2 Αρχή λειτουργίας Radar

Η αρχή λειτουργίας των radar είναι απλός. Αρχικά, από την κεραία – πομπό του radar εκπέμπονται κύματα συγκεκριμένου φάσματος και κατεύθυνσης, γνωστά ως σήματα radar. Όταν τα σήματα αυτά έρθουν σε επαφή με αντικείμενα, ένα μέρος τους απορροφάται από αυτά ενώ το υπόλοιπο ανακλάται προς όλες τις κατευθύνσεις. Το radar διαθέτει μία επιπλέον κεραία, η οποία λειτουργεί ως δέκτης και προσλαμβάνει την ακτινοβολία που ανακλάται από τα αντικείμενα. Συνήθως, η κεραία – δέκτης είναι τοποθετημένη σε γνωστές θέσεις ως προς την κεραία – πομπό. Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζονται η θέση αλλά και η φύση των

αντικειμένων - στόχων που συναντά το σήμα. Η κίνηση ενός αντικειμένου ανιχνεύεται από το radar μέσω της διαφοράς συχνότητας στο σήμα (φαινόμενο Doppler).



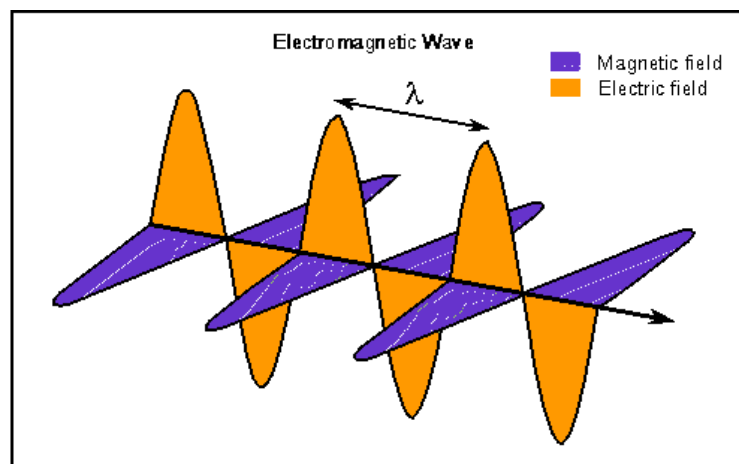
Σχ. 3.1 Αρχή λειτουργίας radar [www.wikipedia.org]

Fig. 3.1 Operating principle of radar [www.wikipedia.org]

3.2.1 Χαρακτηριστικά ραδιοκυμάτων

Βασικά χαρακτηριστικά των ραδιοκυμάτων αποτελούν η ταχύτητα, η συχνότητα και η ισχύς διάδοσής τους. Η γνώση της ταχύτητάς τους είναι θεμελιώδους σημασίας για την θεωρία λειτουργίας των radar.

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα συντίθενται από ηλεκτρικά και μαγνητικά κύματα, καθένα από τα οποία διαδίδεται κάθετα ως προς το άλλο κατά τη διεύθυνση διάδοσής τους.



Σχ. 3.2 Σύνθεση ηλεκτρομαγνητικού κύματος [www.sch.gr]

Fig. 3.2 Composition of electromagnetic wave [www.sch.gr]

Βασικά χαρακτηριστικά τέτοιων σημάτων είναι το μήκος κύματος και η συχνότητα. Μήκος κύματος είναι η απόσταση μεταξύ διαδοχικών κορυφών που αντιστοιχεί σε χρονικό διάστημα μίας περιόδου (T), ενώ ως συχνότητα διάδοσης ορίζεται το αντίστροφο της περιόδου ($1/T$). Τα ραδιοκύματα αποτελούν ένα τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και κυμαίνονται μεταξύ μερικών kHz και μερικών GHz.

Στο κενό, τα ραδιοκύματα κινούνται ακτινικά από τη θέση της πηγής διάδοσης. Η ταχύτητα διάδοσης των ραδιοκυμάτων στο κενό είναι ίση με την παγκόσμια σταθερά της ταχύτητας του φωτός, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Η ταχύτητα των ραδιοκυμάτων διαφοροποιείται από την ταχύτητα του φωτός όταν το μέσο διάδοσης είναι ένα υλικό. Όταν τα ραδιοκύματα μεταδίδονται σε μη αγώγιμα υλικά, όπως ο αέρας, η τιμή της ταχύτητας είναι χαμηλότερη από την ταχύτητα του φωτός και δίνεται από τον τύπο:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (3.1)$$

όπου: ϵ : διηλεκτρική σταθερά
 μ : διαπερατότητα του υλικού

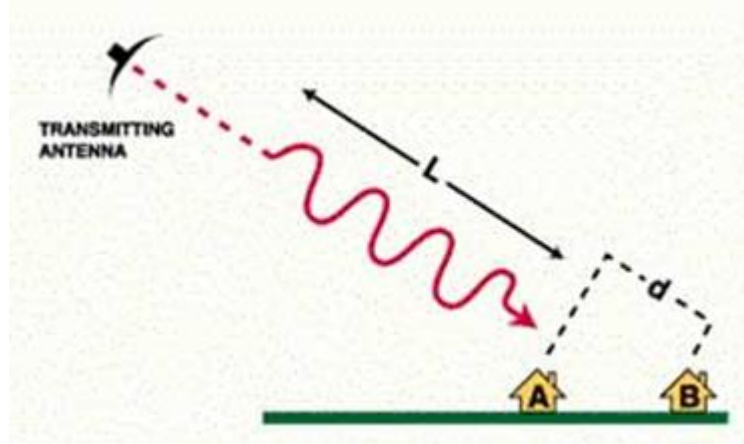
Διαιρώντας την ταχύτητα του φωτός c με την τιμή v , προκύπτει η τιμή του δείκτη διάθλασης του συγκεκριμένου υλικού. Το φαινόμενο της διάθλασης συμβαίνει όταν τα ραδιοκύματα περνούν διαμέσου υλικών με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης. Συγκεκριμένα, όταν μία ακτίνα μεταβαίνει από ένα υλικό με μικρό δείκτη διάθλασης σε ένα άλλο με μεγαλύτερο δείκτη διάθλασης, η ακτίνα κάμπτεται με τα κοίλα προς τα άνω (κυρτή). Αντίθετα, όταν η ακτίνα μεταβαίνει από ένα υλικό με μεγάλο δείκτη διάθλασης σε ένα υλικό με μικρότερο δείκτη διάθλασης, η ακτίνα κάμπτεται με τα κοίλα προς τα κάτω (κοίλη). Ο δείκτης διάθλασης στην ατμόσφαιρα δεν είναι σταθερός και εξαρτάται από τη θερμοκρασία, την ατμοσφαιρική πίεση και την υγρασία. Όσο αυξάνεται το υψόμετρο, όπου κατά τεκμήριο η θερμοκρασία, η μερική πίεση του ξηρού αέρα και η υγρασία μειώνονται αντίστοιχα, μειώνεται και ο δείκτης διάθλασης. Ενδεικτική τιμή του δείκτη διάθλασης του αέρα που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια της γης είναι $n=1,0003$. Δεδομένου ότι η ταχύτητα διάδοσης των ραδιοκυμάτων είναι αντιστρόφως ανάλογη του δείκτη διάθλασης, τα ραδιοκύματα κινούνται γρηγορότερα στην ανώτερη ατμόσφαιρα από ότι κοντά στην επιφάνεια της

γης. Επίσης, κοντά στην επιφάνεια της γης λόγω της μείωσης του δείκτη διάθλασης καθώς αυξάνεται το υψόμετρο, παρατηρείται μία προς τα κάτω κάμψη των ακτίνων, κάτι το οποίο επιφέρει σφάλματα στις μετρήσεις του radar.

Η αντανάκλαση κατά την οποία η ακτίνα δημιουργεί μία σαφή γωνία με την λεία επιφάνεια του στόχου ονομάζεται κατοπτρική αντανάκλαση, ενώ η ακανόνιστη αντανάκλαση από μία τραχιά επιφάνεια καλείται διάχυτη αντανάκλαση. Στις εφαρμογές των radar, προβλήματα δημιουργεί η διάχυτη αντανάκλαση.

3.2.2 Ακτινική Ανάλυση (Range Resolution)

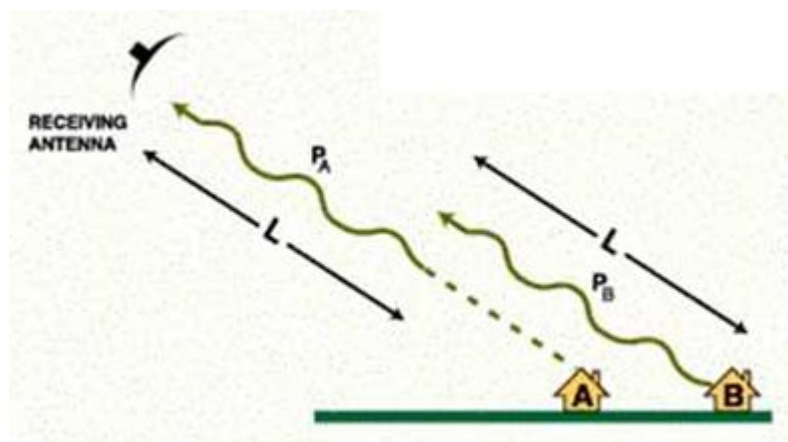
Για να αναγνωρίσει το radar αντικείμενα που βρίσκονται στην ίδια κατεύθυνση και απέχουν την ίδια περίπου απόσταση από αυτό πρέπει να λάβει τα ανακλώμενα από τα αντικείμενα αυτά σήματα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Στο Σχήμα 3.3 φαίνονται δύο αντικείμενα με μεταξύ τους απόσταση d – ως προς τη διεύθυνση σκόπευσης του οργάνου - και το μήκος L του παλμού που στέλνει το radar.



Σχ. 3.3 Μετάδοση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε αντικείμενα κοντινής απόστασης [earth.esa.int]
Fig. 3.3 Transmission of electromagnetic radiation to nearby objects [earth.esa.int]

Προκειμένου το radar να αναγνωρίσει τους δύο στόχους ως δύο διαφορετικά αντικείμενα, πρέπει η μεταξύ τους απόσταση d να είναι τουλάχιστον μεγαλύτερη από $L/2$ ($d > L/2$). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4, όπου τα ανακλώμενα από το αντικείμενο A και B σήματα εμφανίζονται ως P_A και P_B , αντίστοιχα, το σήμα που εκπέμπεται από το radar και ανακλάται από το αντικείμενο B διανύει απόσταση $2d$ μεγαλύτερη από

εκείνη που διανύει το σήμα που εκπέμπεται και στη συνέχεια ανακλάται από το σώμα Α.



Σχ. 3.4 Αντανάκλαση ηλεκτρομαγνητικού κύματος από αντικείμενα κοντινής απόστασης[earth.esa.int]

Fig. 3.4 Reflection of electromagnetic wave from nearby objects [earth.esa.int]

Επομένως, η διαφοροποίηση των δύο αντικειμένων από το radar επιτυγχάνεται μόνο όταν η μεταξύ τους απόσταση ισούται τουλάχιστον με το ήμισυ του, εκπεμπόμενου από το radar, μήκους του εκπεμπόμενου παλμού.

Η ελάχιστη απόσταση που πρέπει να απέχουν δύο αντικείμενα, που βρίσκονται κατά μήκος του σκοπευτικού άξονα του radar, ώστε να αναγνωρίζονται ως ξεχωριστά από αυτό ονομάζεται ακτινική ανάλυση (range resolution).

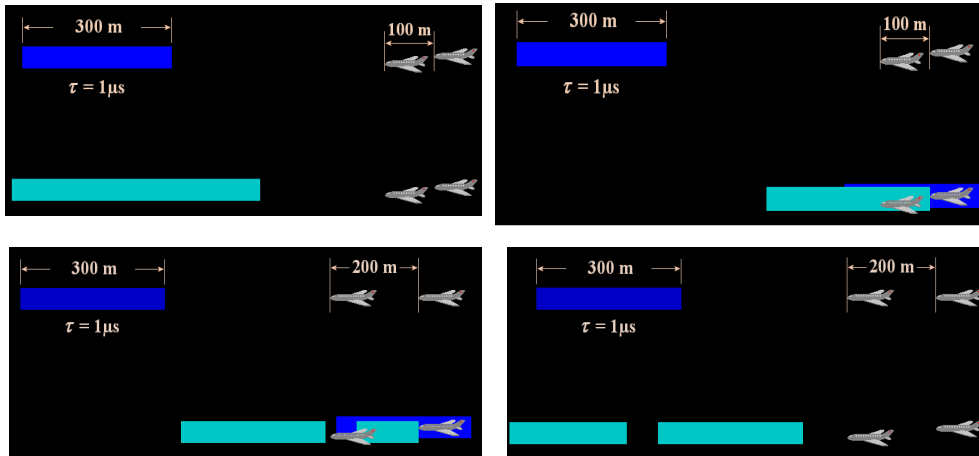
Ο βαθμός της ακτινικής ανάλυσης εξαρτάται από το πλάτος του παλμού (διάρκεια εκπομπής παλμού), από τον τύπο και το μέγεθος των στόχων, καθώς και από την απόδοση του δέκτη. Ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα radar πρέπει να είναι σε θέση να διακρίνει στόχους που να απέχουν μεταξύ τους όσο το μισό της διάρκειας του παλμού τ . Επομένως, η τιμή της ακτινικής ανάλυσης δίνεται από τον τύπο (Taylor 2001):

$$\Delta_r \geq \frac{c\tau}{2} \quad (3.2)$$

όπου: c : ταχύτητα φωτός στο κενό

τ : διάρκεια παλμού

Στο Σχήμα 3.5 φαίνεται η επιστροφή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στην περίπτωση όπου τα δύο αντικείμενα αναγνωρίζονται ως ένα και στην περίπτωση όπου τα αντικείμενα απέχουν μεταξύ τους απόσταση μεγαλύτερη της ακτινικής ανάλυσης.



Σχ. 3.5 Ακτινική ανάλυση [www.radartutorial.eu]

Fig. 3.5 Range resolution [www.radartutorial.eu]

3.2.3 Φαινόμενο Doppler

Η συχνότητα και το μήκος κύματος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων επηρεάζονται από την σχετική κίνηση μεταξύ της πηγής του σήματος και ενός παρατηρητή. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως φαινόμενο Doppler. Συγκεκριμένα, εάν ο παρατηρητής πλησιάζει την πηγή, αυξάνεται η συχνότητα του κύματος ενώ το μήκος κύματός του μειώνεται. Αντίθετα, αν ο παρατηρητής απομακρύνεται από την πηγή, η συχνότητα μειώνεται και το μήκος κύματος μεγαλώνει. Επομένως, η κίνηση ενός αντικειμένου ως προς την πηγή των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων προκαλεί μία διαφορά μήκους κύματος $\Delta\lambda$, η οποία εξαρτάται από την ταχύτητα καθώς και τη διεύθυνση κίνησης του αντικειμένου. Η ποσότητα αυτή δίνεται από τον τύπο:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_{rest} v_{radial}}{c} \quad (3.3)$$

όπου:

c : ταχύτητα του φωτός (ή η ταχύτητα διάδοσης αν πρόκειται για άλλο υλικό)

λ_{rest} : μήκος κύματος που θα μετρούνταν εάν η πηγή ήταν ακίνητη

v_{radial} : ταχύτητα κίνησης της πηγής κατά την διεύθυνση σκόπευσης

Όταν ο στόχος κινείται υπό γωνία σε σχέση με τον σκοπευτικό άξονα του οργάνου, η διαφορά στο μήκος κύματος $\Delta\lambda$ υπολογίζεται μόνο κατά το τμήμα της κίνησης κατά μήκος του σκοπευτικού άξονα του οργάνου.

Το σύστημα των radar χρησιμοποιεί το φαινόμενο Doppler για τον προσδιορισμό της ταχύτητας του στόχου. Πολλά radar χρησιμοποιούν την πληροφορία από το φαινόμενο Doppler μόνο για τον προσδιορισμό την κατεύθυνση κίνησης του στόχου. Ως γνωστόν, τα radar μεταδίδουν ραδιοκύματα σε κάποιο εύρος μηκών κύματος (ή συχνοτήτων), τα οποία στη συνέχεια ανακλώνται από τον στόχο. Σε αυτήν την περίπτωση, ο στόχος δρα ως πηγή και η ταχύτητά του μπορεί να προσδιοριστεί από τη διαφορά μεταξύ του μήκους κύματος (ή της συχνότητας) του μεταδιδόμενου και τελικά ανακλώμενου σήματος.

Στη θεωρία των radar, κάθε ανεπιθύμητη αντανάκλαση ονομάζεται ασάφεια (clutter). Η ασάφεια αυτή μπορεί να αποκρύψει επιθυμητούς στόχους. Ο περιορισμός της ασάφειας γίνεται με διάφορες τεχνικές. Μία από αυτές βασίζεται στο ότι οι στόχοι ενδιαφέροντος κινούνται, ενώ ως επί το πλείστον το clutter δεν κινείται. Επομένως, εντοπίζεται, αφού σύμφωνα με το φαινόμενο Doppler όταν πρόκειται για ακίνητα αντικείμενα δεν παρουσιάζεται διαφορά συχνότητας των κυμάτων που αυτά αντανακλούν. Με τον τρόπο αυτό, εντοπίζονται μόνο τα σαφώς κινούμενα αντικείμενα. Η παραπάνω μεθοδολογία ονομάζεται Moving Target Indication Filtering (MTI).

Συνοψίζοντας, η επίδραση της ατμόσφαιρας είναι καθοριστικής σημασίας στη λειτουργία των radar, αφού αποτελεί το κύριο μέσο διάδοσης των ραδιοκυμάτων. Επίσης, το φαινόμενο Doppler διαδραματίζει έναν ζωτικής σημασίας ρόλο στη λειτουργία των radar. Η γνώση των χαρακτηριστικών κάθε συστήματος radar, του στόχου καθώς και των περιβαλλοντικών συνθηκών συμβάλλουν στον προσδιορισμό

της μέγιστης απόστασης στην οποία κάθε σύστημα radar ανιχνεύει έναν στόχο. Τα συστήματα radar χρησιμοποιούνται σε μία πληθώρα εφαρμογών, όπως στον έλεγχο της εναέριας κυκλοφορίας, στην μετεωρολογία, ακόμα και σε στρατιωτικές εφαρμογές. Για την πληρέστερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας τους απαιτείται η γνώση του θεωρητικού αλλά και φυσικού υποβάθρου των συστημάτων αυτών.

3.3 Σύστημα IBIS

3.3.1 Γενικά

Το σύστημα IBIS αποτελεί ένα καινοτόμο σύστημα επίγειου radar με δυνατότητες παρακολούθησης στατικών και δυναμικών φαινομένων. Το συγκεκριμένο σύστημα αναπτύχθηκε από την εταιρία IDS S.p.A σε συνεργασία με το τμήμα Ηλεκτρονικής και Τηλεπικοινωνιών του Πανεπιστημίου της Φλωρεντίας. Τα στατικά φαινόμενα παρατηρούνται μέσω της λειτουργίας IBIS-L του συστήματος, ενώ τα δυναμικά μέσω της λειτουργίας IBIS-S.

Τα καινοτόμα χαρακτηριστικά του συστήματος IBIS είναι:

- απομακρυσμένη παρακολούθηση του στόχου: δυνατότητα παρακολούθησης στόχου σε απόσταση έως 1 km (για IBIS-S) και έως 4 km (για IBIS-L) χωρίς την ανάγκη μετάβασης σε αυτόν και χρήσης ειδικού εξοπλισμού, π.χ. κατάφωτου
- ευρεία ζώνη παρακολούθησης: ταυτόχρονη παρακολούθηση περιοχής μερικών km² σε πραγματικό χρόνο, αντί της παρακολούθησης μεμονωμένων σημείων
- λειτουργία ανεξαρτήτως συνθηκών: νύχτα, ημέρα, με ομίχλη και βροχή
- υψηλή ακρίβεια: 0.1 mm ακρίβεια μέτρησης σε κανονικές συνθήκες και 0.01 mm σε ειδικές συνθήκες
- συχνότητα μετρήσεων: έως και 200 Hz
- αυτόνομη λειτουργία: συνεχόμενης λειτουργίας χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση καθώς και δυνατότητα έγκαιρης προειδοποίησης σε περίπτωση κινδύνου.

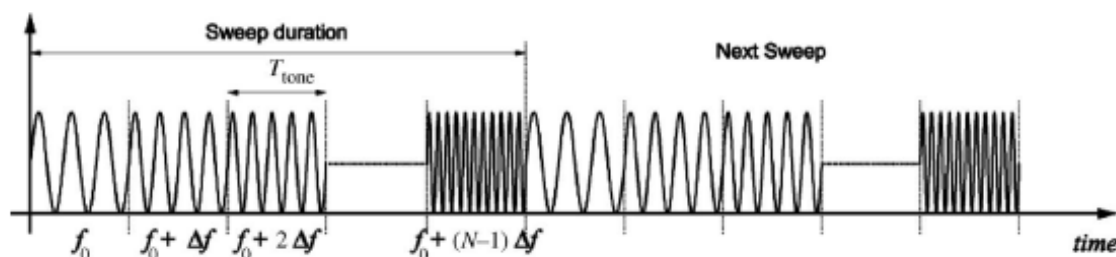
3.3.2 Λειτουργία IBIS-S

3.3.2a Αρχή λειτουργίας

Οι βασικές λειτουργίες του αισθητήρα IBIS-S είναι η ανίχνευση της μετακίνησης διαφόρων σημείων-στόχων που είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικές αποστάσεις από το όργανο. Οι λειτουργίες αυτές επιτυγχάνονται με τη χρήση δύο τεχνικών των radar:

- i. την τεχνική διαδοχικής ενίσχυσης συνεχούς κύματος (SF-CW: Stepped-Frequency Continuous Wave) και
- ii. τη συμβολομετρία (interferometry technique) (Henderson and Lewis 1998)

Τεχνική διαδοχικής ενίσχυσης συνεχούς κύματος (SF-CW). – Χρησιμοποιείται για την ανίχνευση διαφορετικών στόχων κατά μήκος της διεύθυνσης σκόπευσης του radar. Συγκεκριμένα, ένα radar που χρησιμοποιεί την τεχνολογία αυτή μεταδίδει συνεχόμενες ομάδες ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, η κάθε μία από τις οποίες αποτελείται από N παλμούς (tones) των οποίων η συχνότητα αυξάνεται γραμμικά κατά σταθερή ποσότητα Δf , όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.6.

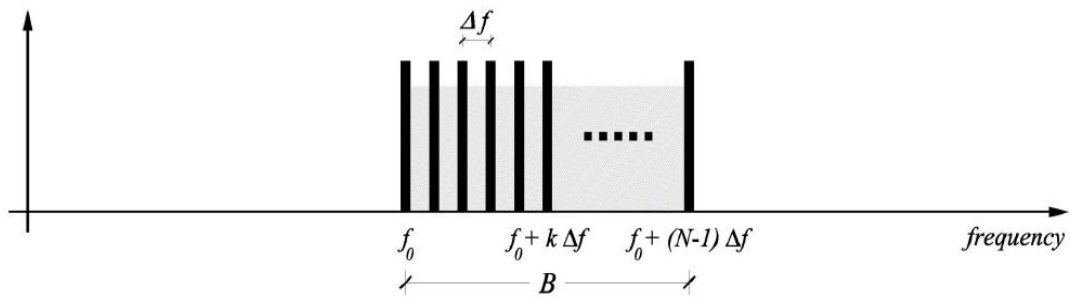


Σχ. 3.6 Μορφή κύματος τεχνικής SF-CW ως προς τη συχνότητα [Bernardini – Gentile - Ricci]

Fig. 3.6 Frequency domain representation of the SF-CW waveform [Bernardini – Gentile - Ricci]

Με αυτόν τον τρόπο, σε κάθε τέτοια ομάδα ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων επιτυγχάνεται ένα εύρος συχνοτήτων, Σχήμα 3.7.

$$B = (N - 1)\Delta f \quad (3.4)$$



Σχ. 3.7 Μορφή κύματος τεχνικής SF-CW ως προς τον χρόνο [Bernardini – Gentile - Ricci]

Fig. 3.7 Time domain representation of the SF-CW waveform [Bernardini – Gentile - Ricci]

Η ακτινική ανάλυση Δ_r , η οποία εκφράζει την ελάχιστη απόσταση που μπορεί να ανιχνευθεί κατά μήκος του σκοπευτικού άξονα του radar, συνδέεται με την διάρκεια του παλμού μέσω του τύπου (Taylor 2001):

$$\Delta_r = \frac{c\tau}{2} \quad (3.5)$$

όπου: c : ταχύτητα φωτός στο κενό

τ : διάρκεια παλμού

Δεδομένου ότι η διάρκεια του παλμού ισούται με $\tau = 1/B$, η τιμή του Δ_r εκφράζεται και ως εξής:

$$\Delta_r = \frac{c}{2B} \quad (3.6)$$

όπου: c : ταχύτητα φωτός στο κενό

B : εύρος συχνοτήτων

Συνεπώς, όσο μεγαλύτερο είναι το εύρος συχνοτήτων που εμφανίζονται σε έναν παλμό, τόσο μικρότερη είναι η τιμή Δ_r , επομένως, τόσο περισσότερο το radar μπορεί να ανιχνεύσει στόχους που βρίσκονται πιο κοντά ο ένας στον άλλο, κατά μήκος της ακτίνας σκόπευσής του.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η χρήση της τεχνολογίας SF-CW παρέχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- το σήμα των radar συνεχούς κύματος (CW radars), παρόλο που έχει χαμηλότερη ισχύ, έχει τόση εμβέλεια όσο και τα σήματα των παλμικών radar
- η συχνότητα των εκπεμπόμενων και λαμβανόμενων κυμάτων ελέγχεται με μεγάλη ακρίβεια, αφού για τη δημιουργία σημάτων σταδιακά ενισχυόμενης συχνότητας χρησιμοποιείται η ειδική καινοτόμος συσκευή Direct Digital Synthesizer.

Η διάρκεια κάθε παλμού πρέπει να είναι τέτοια ώστε κατά την επιστροφή του σήματος ακόμα και από το πιο απομακρυσμένο σημείο του προς μέτρηση αντικειμένου στα όρια εμβέλειας του συστήματος αυτό να ανιχνεύεται από τον δέκτη του οργάνου. Επομένως, η διάρκεια κάθε tone (T_{tone}) εξαρτάται από την μέγιστη απόσταση μεταξύ του προς μέτρηση αντικειμένου και του radar και δίνεται από τον τύπο:

$$T_{\text{tone}} = \frac{2R_{\text{max}}}{c} \quad (3.7)$$

όπου: R_{max} : μέγιστη κεκλιμένη απόσταση radar – στόχου
 c : ταχύτητα φωτός στο κενό

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, το radar πρώτα λαμβάνει το εκπεμπόμενο σήμα από τον πιο απομακρυσμένο στόχο και στη συνέχεια εκπέμπει τον παλμό που ακολουθεί.

Ο αριθμός N των tones που συνθέτουν έναν παλμό υπολογίζεται ως εξής:

$$N = \frac{2R_{\text{max}}}{\Delta r} \quad (3.8)$$

όπου: R_{max} : μέγιστη κεκλιμένη απόσταση radar – στόχου
 Δr : ακτινική ανάλυση

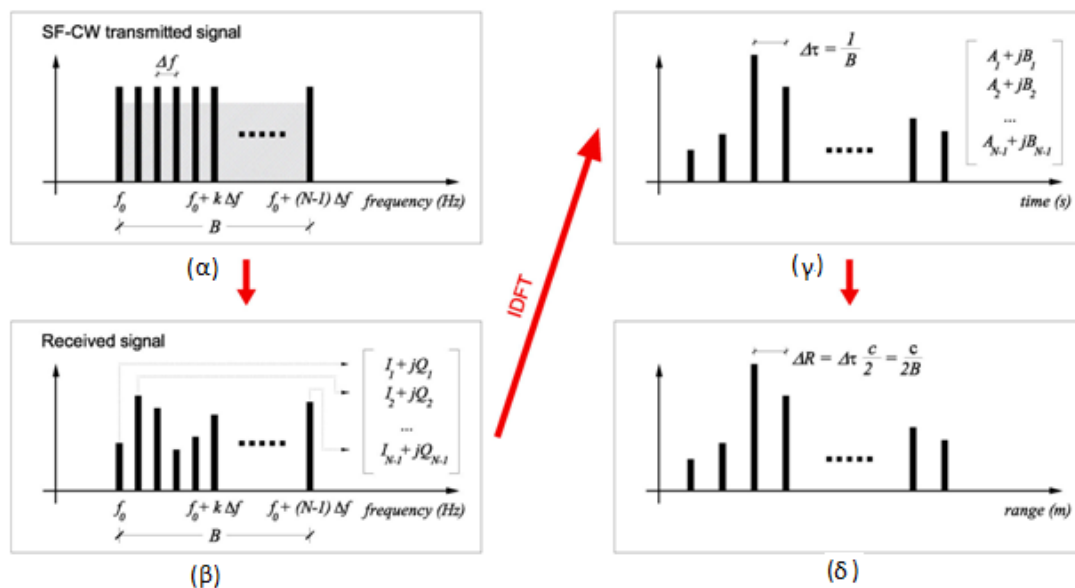
Από τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει ότι ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας f_{max} εξαρτάται από την μέγιστη απόσταση και την ακτινική ανάλυση, όπως φαίνεται και από τον τύπο:

$$f_{\text{max}} \cong \frac{1}{NT_{\text{tone}}} = \frac{c}{2NR_{\text{max}}} = \frac{c\Delta r}{4R_{\text{max}}^2} \quad (3.9)$$

- όπου:
- N : αριθμός των tones
 - T_{tone} : μέγιστη κεκλιμένη απόσταση radar – στόχου
 - c : ταχύτητα φωτός στο κενό
 - R_{max} : μέγιστη κεκλιμένη απόσταση radar – στόχου
 - Δ_r : ακτινική ανάλυση

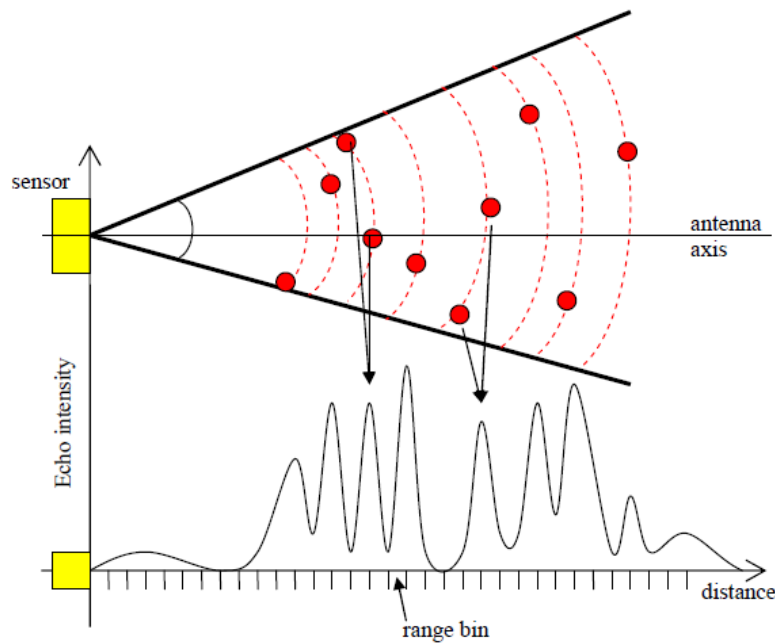
Επομένως, ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας μειώνεται καθώς αυξάνεται η μέγιστη απόσταση που μετράται – καθώς το σύστημα περιμένει περισσότερο χρόνο να λάβει το εκπεμπόμενο σήμα και από τον πιο απομακρυσμένο στόχο. Αντίθετα, η τιμή του μέγιστου ρυθμού δειγματοληψίας αυξάνεται με την αύξηση της ακτινικής ανάλυσης Δ_r .

Σύμφωνα με την αρχή λειτουργίας του συστήματος, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται από το όργανο προσπίπτει στα αντικείμενα και μέρος αυτής ανακλάται στο όργανο και λαμβάνεται από τον δέκτη του. Το σήμα που επιστρέφει αποτελείται από N δείγματα, κατ' αντιστοιχία με τις N διακριτές συχνότητες που παρήχθησαν κατά την εκπομπή του, Σχήμα 3.8 (α). Εφαρμόζοντας τον Αντίστροφο Μετασχηματισμό Fourier (IDFT), το διάγραμμα συχνοτήτων του λαμβανόμενου σήματος μετατρέπεται σε διάγραμμα χρόνου, Σχήμα 3.8 (β). Τέλος, δεδομένου ότι η ταχύτητα κίνησης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό είναι ίση με την ταχύτητα του φωτός, c , και με γνωστά τα χρονικά διαστήματα μεταξύ κάθε παλμού διαφορετικής συχνότητας ($\Delta\tau$), προκύπτει το διάγραμμα όπου φαίνεται η απόσταση κάθε σημείου-στόχο από το όργανο, Σχήμα 3.8 (γ), καθώς και η μεταξύ τους απόσταση που δεν μπορεί να είναι μικρότερη από Δ_r , αφού αλλιώς δε διαχωρίζονται και θεωρούνται από το όργανο ως ένα σημείο-στόχος, Σχήμα 3.8 (δ).



Σχ. 3.8 Εκτίμηση ακτινικής ανάλυσης μέσω της τεχνικής SF-CW [Bernardini – Gentile - Ricci]

Fig. 3.8 Evaluation of high-resolution range profile from SF-CW waveform [Bernardini – Gentile - Ricci]



Σχ. 3.9 Διάγραμμα έντασης σήματος - απόστασης [IBIS-S Controller User Manual]

Fig. 3.9 Diagramme echo intensity – distance [IBIS-S Controller User Manual]

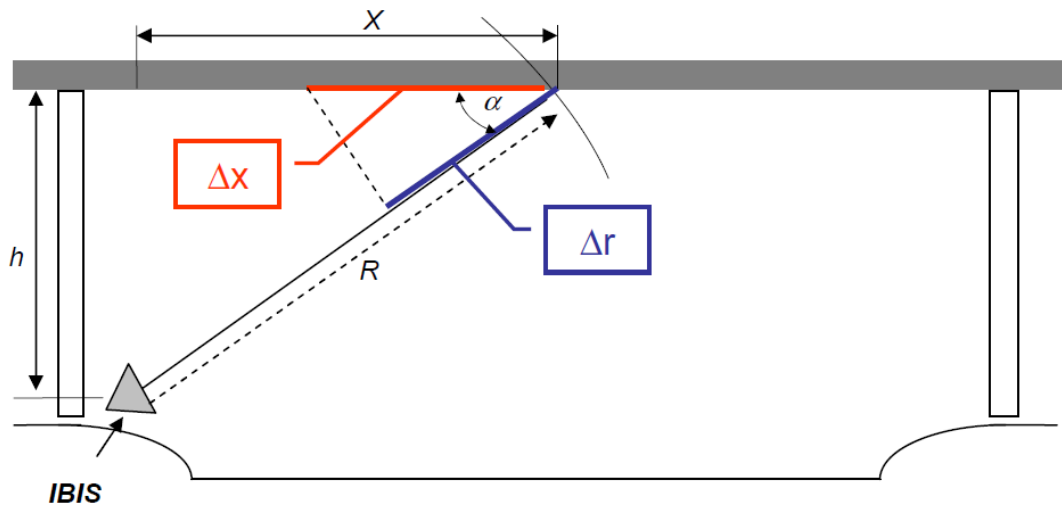
Στο Σχήμα 3.9, τα σημεία σε κύκλο αντιστοιχούν σε θέσεις με καλή επιστροφή σήματος. Όπως φαίνεται, διαφορετικοί στόχοι ανιχνεύονται μεμονωμένα αν είναι τοποθετημένοι σε διαφορετικές αποστάσεις από το radar. Αντίθετα, όταν στην ίδια ακτινική απόσταση (range bin) συμπίπτουν πολλά σημεία τα οποία απέχουν ίδια απόσταση από το radar, καταγράφεται το άθροισμα της ανακλώμενης από αυτά ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα στοιχεία που καταγράφονται για κάθε range bin κατά τη λειτουργία του συστήματος IBIS-S είναι η ισχύς καθώς και η φάση του ανακλώμενου από τον στόχο σήματος.

Η ακτινική ανάλυση αντιστοιχεί σε ανηγμένη οριζόντια απόσταση Δx (ground range resolution) και υπολογίζεται σύμφωνα με τη γεωμετρία που σχηματίζουν ο αισθητήρας και το αντικείμενο ενδιαφέροντος:

$$\Delta x = \frac{\Delta_r}{\cos a} = \frac{\Delta_r R}{X} \quad (3.10)$$

όπου: Δ_r : ακτινική ανάλυση
 a : γωνία πρόσπτωσης σκοπευτικής ακτίνας radar σε κατασκευή
 R : κεκλιμένη απόσταση μεταξύ radar - στόχου
 X : οριζόντια απόσταση μεταξύ radar – στόχου

Σχηματικά, τα παραπάνω στοιχεία δίδονται στο Σχήμα 3.10.



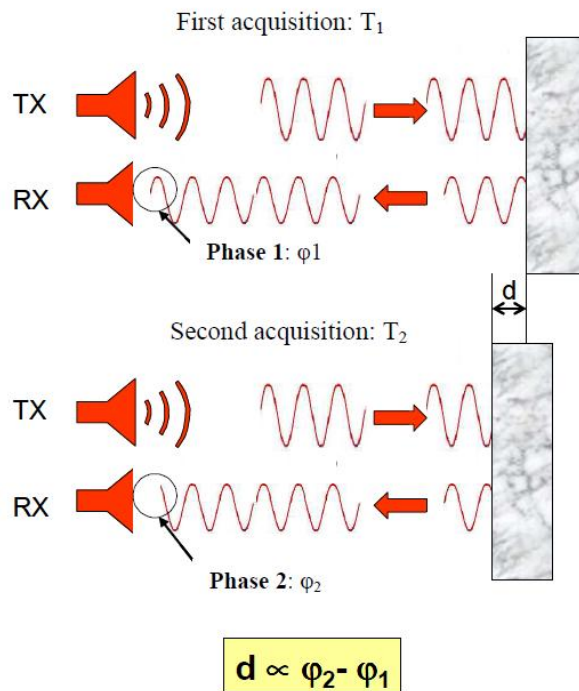
Σχ. 3.10 Ακτινική και εδαφική ανάλυση [IBIS-S Controller User Manual]

Fig. 3.10 Range resolution and ground range resolution [IBIS-S Controller User Manual]

Τεχνική συμβολομετρίας (Interferometry technique). – Χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μετατόπισης σε κάθε φατνίο ακτινικής απόστασης από τον αισθητήρα (Henderson and Lewis 1998). Ειδικότερα, ο υπολογισμός της μετατόπισης γίνεται μέσω της σύγκρισης των τελικών φάσεων που λαμβάνει ο δέκτης σε διαδοχικές χρονικές στιγμές από το υπόψη φατνίο. Δεδομένου ότι κατά την κίνηση ενός αντικειμένου παρουσιάζονται διαφορές φάσης στο σήμα που ανακλάται από το αντικείμενο προς το radar, ανάλογες της κίνησής του, υπολογίζεται η μετατόπισή του κατά μήκος της ακτίνας σκόπευσης του radar σύμφωνα με την σχέση:

$$d_r = -\frac{\lambda}{4\pi} \Delta\theta \quad (3.11)$$

όπου: λ : μήκος κύματος
 $\Delta\theta$: διαφορά φάσης μεταξύ των δύο διαδοχικών χρονικών στιγμών



Σχ. 3.11 Τεχνική Συμβολομετρίας [IBIS-S Controller User Manual]

Fig. 3.11 Interferometric technique [IBIS-S Controller User Manual]

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο παραπάνω τύπος δίνει την ακτινική μετατόπιση όλων των σημείων που βρίσκονται εντός της εμβέλειας του radar, δηλαδή την μετατόπιση κατά μήκος του σκοπευτικού άξονα του radar. Για τον υπολογισμό της πραγματικής μετατόπισης αρχικά απαιτείται η γνώση της διεύθυνσης κίνησης, καθώς και η γεωμετρία μεταξύ οργάνου και κατασκευής.

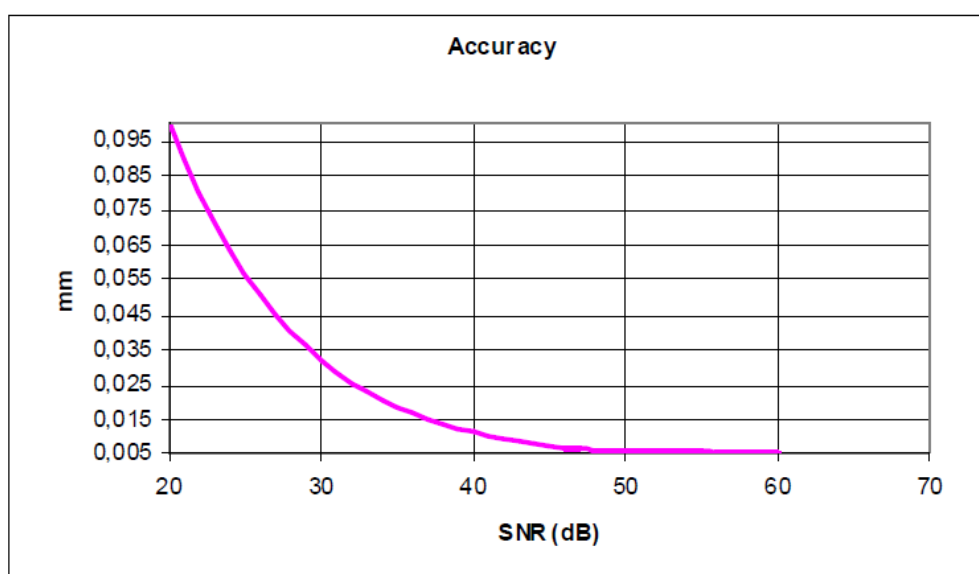
3.3.2β Τεχνικά χαρακτηριστικά

Η λειτουργία του συστήματος IBIS-S εξαρτάται από τις συνθήκες που επικρατούν κατά την λειτουργία του οργάνου και από το είδος των ρυθμίσεων που ορίζονται σε αυτό. Τα βέλτιστα χαρακτηριστικά λειτουργίας του οργάνου δίδονται παρακάτω:

- Μέγιστη συχνότητα καταγραφής των μετρήσεων έως 200 Hz
- Μέγιστη απόσταση καταγραφής:
 - στατικών φαινομένων: 1000 m
 - δυναμικών φαινομένων: 500 m
- Μέγιστη ακτινική ανάλυση (range resolution): 0.75 m
- Μέγιστη ακρίβεια μέτρησης μετακινήσεων κατά την διεύθυνση σκόπευσης: 0.01 mm

Η ανακλαστικότητα μπορεί να βελτιωθεί με την εγκατάσταση τεχνητών ανακλαστήρων σε συγκεκριμένες θέσεις του αντικειμένου παρατήρησης. Με τον τρόπο αυτόν, βελτιώνεται η αναλογία σήματος/θορύβου, δηλαδή η ένταση του λαμβανόμενου από τον στόχο σήματος.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ακρίβεια καταγραφής των μετακινήσεων από το σύστημα IBIS-S εξαρτάται από την πυκνότητα του σήματος ή από την αναλογία σήματος/θορύβου. Στο Σχήμα 3.12 φαίνεται η συσχέτιση της ακρίβειας με την αναλογία σήματος/θόρυβο.



Σχ. 3.12 Ακρίβεια μετρήσεων συναρτήσει της αναλογίας σήματος/θορύβου [IBIS-S Controller User Manual]

Fig. 3.12 Graph of measurement accuracy as a function of the signal to noise ratio [IBIS-S Controller User Manual]

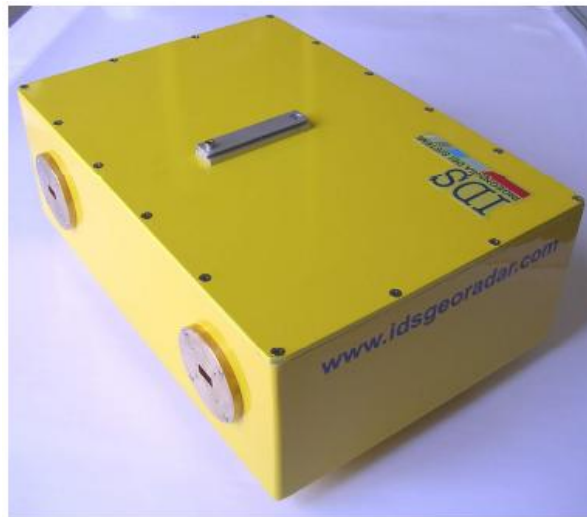
Η διάδοση των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων επηρεάζεται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες, κυρίως από τη θερμοκρασία και την υγρασία. Παρόλα αυτά, η καταγραφή δυναμικών φαινομένων από το σύστημα IBIS-S δεν επηρεάζεται ουσιαστικά από αυτές, δεδομένου ότι η συχνότητα των ατμοσφαιρικών μεταβολών είναι αρκετά πιο αργή από τη συχνότητα των δυναμικών φαινομένων που καταγράφει το σύστημα IBIS-S, η απόσταση μεταξύ οργάνου και στόχου είναι μικρή και τέλος, τα χρονικά διαστήματα καταγραφής είναι μικρά, της τάξης των 10 min. Αντίθετα, κατά την

παρατήρηση “στατικών” φαινομένων για μεγάλο χρονικό διάστημα η επίδραση της ατμόσφαιρας δεν μπορεί να αγνοηθεί, ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου η απόσταση μεταξύ οργάνου και στόχου είναι μεγάλη.

3.3.2γ Μέρη συστήματος IBIS-S

Το σύστημα IBIS-S αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα:

Αισθητήρας IBIS-S. – Η μονάδα του αισθητήρα παράγει, εκπέμπει και λαμβάνει ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ο αισθητήρας είναι ένα κίτρινο κουτί διαστάσεων 375x270x115 mm, 12 kg (Σχήμα 3.13).

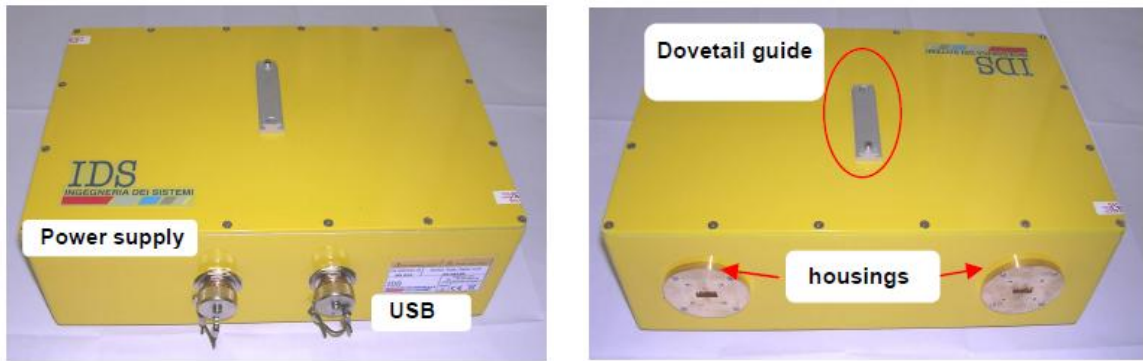


Σχ. 3.13 Αισθητήρας IBIS-S [IBIS-S System User Manual]

Fig. 3.13 IBIS-S sensor [IBIS-S System User Manual]

Ο αισθητήρας διαθέτει τις ακόλουθες διεπαφές:

- μία υποδοχή τύπου A USB στο πίσω μέρος της συσκευής
- μία 12πολη υποδοχή για παροχή ενέργειας στο πίσω μέρος της συσκευής
- δύο υποδοχές / περιβλήματα για τις κεραίες στο μπροστινό τμήμα της συσκευής
- έναν οδηγό για την στερέωση του τηλεσκοπίου στην κορυφή της συσκευής
- μία οπή με βιδωτό σπείρωμα στο κάτω μέρος της συσκευής, το οποίο επιτρέπει στον αισθητήρα να τοποθετηθεί σε τρίποδα



Σχ. 3.14 Διεπαφές αισθητήρα IBIS-S [IBIS-S System User Manual]

Fig. 3.14 Interfaces of IBIS-S sensor [IBIS-S System User Manual]

Οπτικό τηλεσκόπιο. – Το οπτικό τηλεσκόπιο (Σχήμα 3.15) εφαρμόζεται σε ειδικό οδηγό ο οποίος βρίσκεται στην κορυφή του αισθητήρα IBIS-S. Με το οπτικό τηλεσκόπιο προσανατολίζεται ο αισθητήρας έτσι ώστε οι κεραιές του να στοχεύουν τον επιθυμητό στόχο.

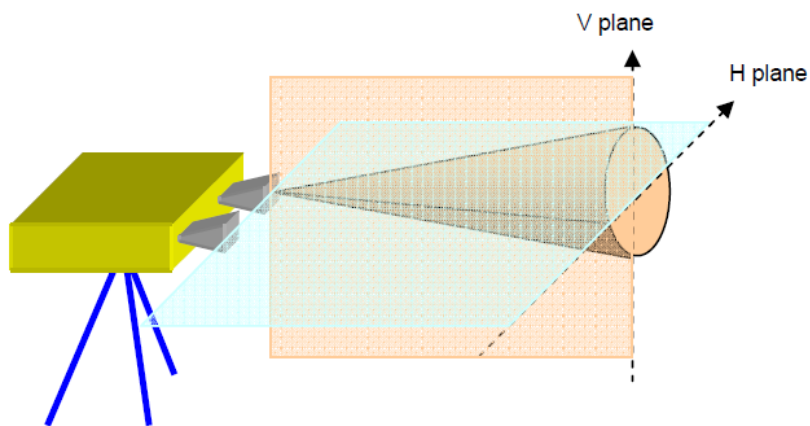


Σχ. 3.15 Οπτικό τηλεσκόπιο [IBIS-S System User Manual]

Fig. 3.15 Optical telescope [IBIS-S System User Manual]

Κεραίες. – Το σύστημα IBIS-S διαθέτει ζεύγος κεραιών. Με την πρώτη εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικά κύματα ενώ από την δεύτερη λαμβάνει τα ανακλώμενα από τα αντικείμενα – στόχους ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

Κάθε μία από τις κεραιές αυτές χαρακτηρίζεται από τον κυρίως λοβό, δηλαδή την γωνιακή περιοχή εντός της οποίας συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο τμήμα της ισχύος της ακτινοβολίας. Ο λοβός διαχωρίζεται σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.16. Σύμφωνα με τα παραπάνω, ο προσανατολισμός του οργάνου πρέπει να είναι τέτοιος ώστε η περιοχή ενδιαφέροντος να καλύπτεται από τον λοβό της κεραιάς.



Σχ. 3.16 Λοβός κεραίας [IBIS-S System User Manual]

Fig. 3.16 Antenna beam [IBIS-S System User Manual]

Στο σύστημα IBIS υπάρχουν δύο είδη κεραιών, καθένα από τα οποία λειτουργεί σε διαφορετικό φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Για τυπικές εφαρμογές χρησιμοποιείται το ζεύγος κεραιών IBIS-H20 που λειτουργεί στο τμήμα Ku της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, δηλαδή μεταξύ 17.1 και 17.3 GHz και σε εύρος συχνοτήτων 200 MHz. Συνεπώς έχει δυνατότητα μέγιστης ακτινικής ανάλυσης 0.75 m. Οι κεραιές αυτές λειτουργούν σε κάθετη πόλωση και έχουν μέγιστο εύρος έντασης 20dBi. Τα χαρακτηριστικά ανοίγματα του κυρίως λοβού της κεραίας στα -3dB και -10dB δίνονται στον Πίνακα 3.1.



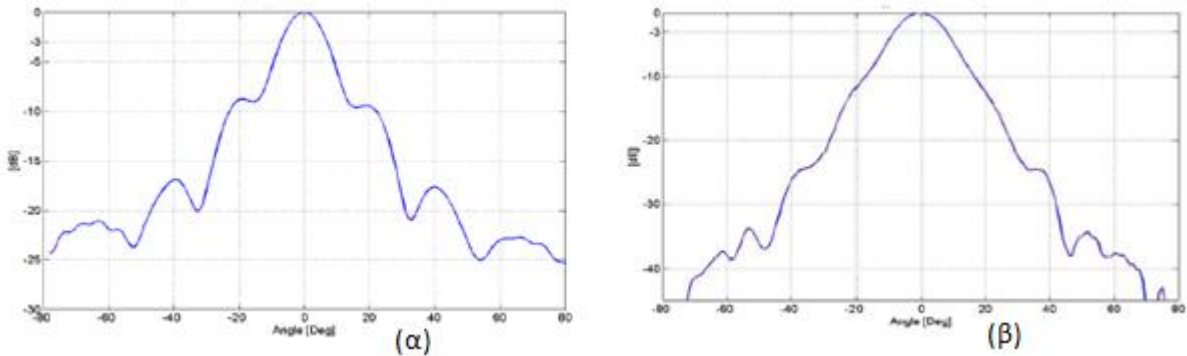
Σχ. 3.17 Κεραία IBIS-H20 [IBIS-S System User Manual]

Fig. 3.17 AntennaS IBIS-H20 [IBIS-S System User Manual]

IBIS-H20	Horizontal Plane	Vertical Plane
-3 dB	17°	15°
-10 dB	34°	45°

Πίνακας. 3.1 Γωνιακά ανοίγματα κυρίως λοβού κεραίας IBIS-H20 στα -3 dB και -10 dB
 Table 3.1 Angular width of the main lobes of the IBIS-H20 antennas at -3 dB and -10 dB

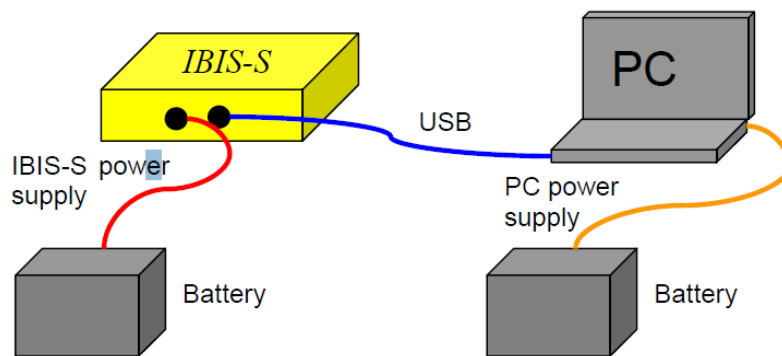
Σχηματικά, η σχέση μεταξύ γωνιακού ανοίγματος του λοβού της κεραίας IBIS-H20 και της απώλειας σήματος δίνονται στο Σχήμα 3.18 (α), (β).



Σχ. 3.18 Πρότυπο κατακόρυφου (α) και οριζόντιου (β) επιπέδου κεραίας IBIS-H20
 [IBIS-S System User Manual]

Fig. 3.18 IBIS-H20 vertical (α) and horizontal (β) plane pattern
 [IBIS-S System User Manual]

Στο Σχήμα 3.19 δίνεται σχηματικά ο τρόπος σύνδεσης του συστήματος IBIS-S.



Σχ. 3.19 Τρόπος σύνδεσης συστήματος IBIS-S [IBIS-S System User Manual]

Fig. 3.19 Connection scheme of IBIS-S system [IBIS-S System User Manual]

3.3.2δ Λογισμικό χειρισμού συστήματος IBIS-S

Το λογισμικό IBIS-S Controller χρησιμεύει στη συλλογή, διαχείριση και επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται κατά τη στατική ή δυναμική λειτουργία του συστήματος IBIS-S.

Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι εγκατεστημένο στον φορητό Η/Υ του συστήματος.

Η χρήση του λογισμικού χωρίζεται σε ενότητες, οι οποίες αντιστοιχούν στα διαδοχικά βήματα που πρέπει να πραγματοποιηθούν ώστε να επιτευχθεί η συλλογή, η διαχείριση και μία πρώτη επεξεργασία των μετρήσεων. Συγκεκριμένα, οι ενότητες στις οποίες χωρίζεται το λογισμικό αναλύονται παρακάτω.

Initial Survey Type Selection. – Στην ενότητα αυτή καθορίζεται ο τύπος του φαινομένου που πρόκειται να καταγραφεί. Επομένως, επιλέγεται η καταγραφή στατικών φαινομένων με, είτε η καταγραφή δυναμικών φαινομένων με συχνότητα δειγματοληψίας από. Επιπλέον, σε περίπτωση χρήσης δύο συστημάτων, μέσω της επιλογής “Working Modality” ορίζεται η σχέση μεταξύ τους.

Parameter Setting and Pointing. – Στην ενότητα αυτή ορίζονται οι παράμετροι συλλογής των δεδομένων, όπως μέγιστη συχνότητα καταγραφής και συχνότητα δειγματοληψίας, τύπος κεραίας, καταγραφής.

Data Capture Geometry. – Στην ενότητα αυτή ορίζεται η σχετική γεωμετρία μεταξύ οργάνου και στόχου κατά τη συλλογή των δεδομένων.

Mission Selection. – Στην ενότητα αυτή ορίζεται όνομα στην ομάδα των δεδομένων που καταγράφονται.

Survey Management. – Στην ενότητα αυτή δίνεται εντολή για έναρξη συλλογής των δεδομένων, ενώ παράλληλα δίδεται η δυνατότητα στον χρήστη να παρακολουθεί τη συλλογή σε πραγματικό χρόνο.

Survey Processing. – Μέσω της ενότητας αυτής δύνεται η δυνατότητα προ-επεξεργασίας των δεδομένων που συλλέχθηκαν. Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτει η συχνότητα κίνησης και η μετατόπιση της κατασκευής. Κατά τη συγκεκριμένη διαδικασία, τα δεδομένα φιλτράρονται ενώ όσα από αυτά δεν επιστρέφουν την επιθυμητή ένταση σήματος εξαιρούνται από τη διαδικασία.

3.3.2ε Λογισμικό εκ των υστέρων επεξεργασίας μετρήσεων IBIS Data Viewer

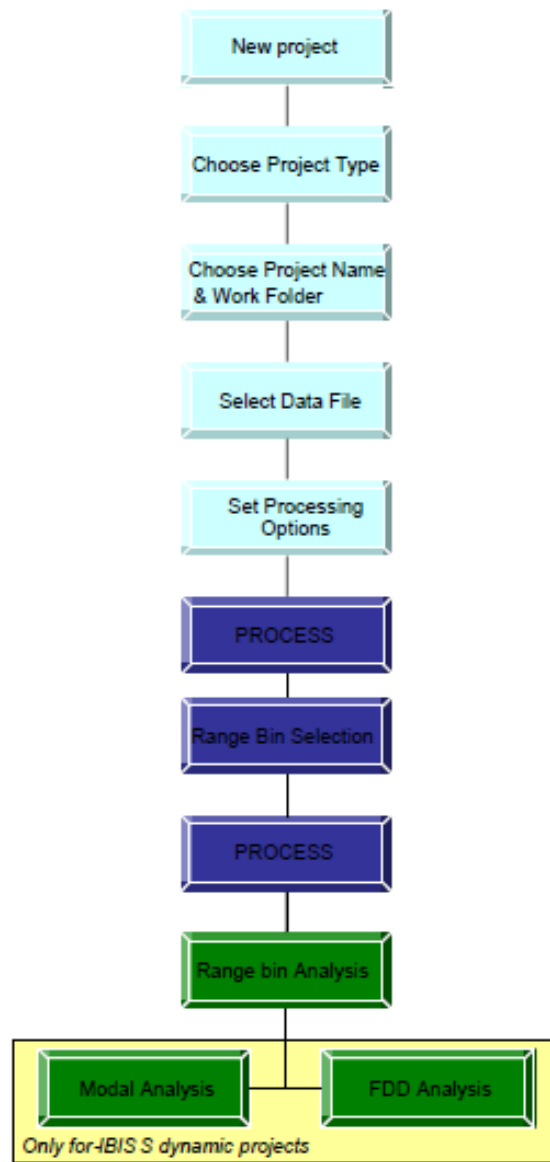
Η ολοκληρωμένη επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιείται μέσω του λογισμικού εκ των υστέρων επεξεργασίας IBIS Data Viewer (IBISDV).

Στη συνέχεια, από το διάγραμμα έντασης σήματος που προκύπτει δίνεται η δυνατότητα επιλογής σημείων της κατασκευής, με καλή επιστροφή σήματος, για τα οποία ενδιαφέρει η μελέτη της φασματικής και κινηματικής τους συμπεριφοράς. Συγκεκριμένα, προκύπτουν στοιχεία σχετικά με:

- το πλάτος του σήματος που καθένα από τα επιλεγμένα σημεία επιστρέφουν στο radar
- τη φάση του σήματος
- τη μετατόπιση
- την ταχύτητα
- την επιτάχυνση

κάθε σημείου, είτε ως προς τον χρόνο είτε ως προς τη συχνότητα. Τα παραπάνω στοιχεία δίδονται είτε κατά τη διεύθυνση σκόπευσης του οργάνου είτε ανηγμένα ως προς την πραγματική κίνηση της εκάστοτε κατασκευής. Τέλος, υπάρχει δυνατότητα εξαγωγής στατιστικών συμπερασμάτων για τα παραπάνω στοιχεία.

Σχηματικά η πορεία εκ των υστέρων επεξεργασίας των μετρήσεων του συστήματος IBIS-S δίνεται στο Σχήμα 3.20.



Σχ. 3.20 Ροή εκ των υστέρων επεξεργασίας μετρήσεων [IBISDV Software User Manual]

Fig. 3.20 Data post-processing flowchart [IBISDV Software User Manual]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

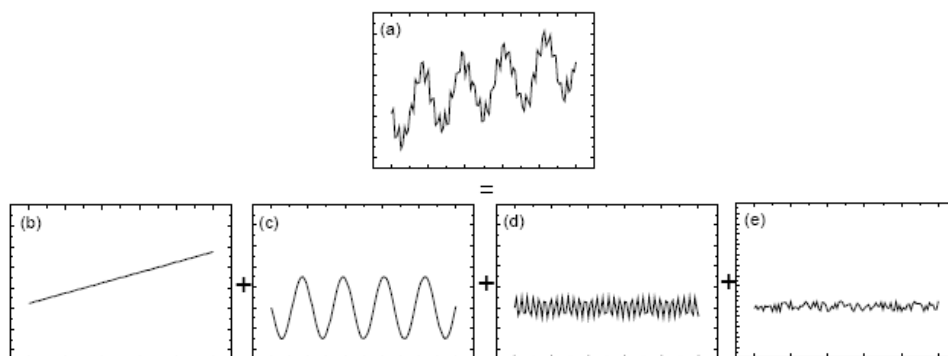
ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΗΜΑΤΟΣ

4.1 Εισαγωγή

Ο όρος σήμα αναφέρεται σε οποιαδήποτε συνάρτηση που συνδέει φυσικές, γεωμετρικές ή άλλες ποσότητες μεταξύ τους. Με τον όρο επεξεργασία σήματος αναφερόμαστε στην ανάλυση και τον χειρισμό του σήματος με στόχο, μεταξύ άλλων, τον υπολογισμό κυρίως παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τη φύση των δεδομένων και τη συνάρτηση σήματος.

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας ενδιαφέρουν σήματα περιοδικού κυρίως χαρακτήρα. Τα υπόψη σήματα μπορεί εν γένει να περιγραφούν ως άθροισμα επιμέρους σημάτων. Ειδικότερα, στο Σχήμα 4.1 φαίνεται πώς αναλύεται η χρονοσειρά του Σχήματος 4.1 (a) στις τέσσερις συνιστώσες από τις οποίες συντίθεται και οι οποίες εκφράζονται:

- τη γραμμική μεταβολή ή τάση (Σχήμα 4.1 (b))
- την περιοδική διακύμανση ημιτονοειδούς μορφής της κύριας συχνότητας (Σχήμα 4.1 (c))
- την περιοδική διακύμανση δευτερεύουσας συχνότητας (Σχήμα 4.1 (d))
- τον θόρυβο των μετρήσεων (Σχήμα 4.1 (e))



Σχ. 4.1 Ανάλυση σύνθετης χρονοσειράς

Fig. 4.1 Analysis of complex time series

Ο προσδιορισμός των βασικών παραμέτρων (εύρος, κύρια συχνότητα) σημάτων όπως αυτό του Σχ. 4.1 μπορούν να προκύψουν με διαφορετικές μεθοδολογίες. Σε αυτή τη διαδικασία η τεχνική ανάλυσης σειρών Fourier είναι η επικρατέστερη.

4.2 Σειρές Fourier

Τα ηλεκτρομαγνητικά σήματα χαρακτηρίζονται από περιοδικότητα και επομένως μπορούν να περιγραφούν από περιοδικές συναρτήσεις. Μία περιοδική συνάρτηση $x(t)$ μπορεί εν γένει να εκφραστεί ως άθροισμα ημιτονοειδών συναρτήσεων ως εξής:

$$x(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) + \dots \quad (4.1)$$

που τελικά προσεγγίζεται από ένα πεπερασμένο όπως:

$$x(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (4.2)$$

Ο όρος $A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ ονομάζεται πρώτη αρμονική, ο όρος $A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2)$ δεύτερη αρμονική κ.λ.π. Ο όρος A_i αποτελεί το πλάτος του σήματος, το ω_i τη συχνότητα εμφάνισης και το φ_i τη φάση του σήματος.

Με τη χρήση της τριγωνομετρικής ταυτότητας:

$$\sin(n\omega t + \varphi_n) = \sin(\varphi_n) \cos(n\omega t) + \cos(\varphi_n) \sin(n\omega t) \quad (4.3)$$

προκύπτει

$$x(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n [\sin(\varphi_n) \cos(n\omega t) + \cos(\varphi_n) \sin(n\omega t)] \quad (4.4)$$

Θέτοντας $a_0 = A_0$, $a_n = A_n \sin(\varphi_n)$, $b_n = A_n \cos(\varphi_n)$ και $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$,

όπου f η συχνότητα και T η περίοδος της συνάρτησης, προκύπτει ο παρακάτω τύπος:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[a_n \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \right] \quad (4.5)$$

Οι συντελεστές της σειράς υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega t) dt \quad (4.6)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \sin(n\omega t) dt \quad (4.7)$$

Η σχέση 4.1 αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του θεωρήματος Fourier, σύμφωνα με το οποίο οποιαδήποτε περιοδική συνάρτηση μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα αρμονικών συναρτήσεων, με συχνότητες ακέραια πολλαπλάσια της συχνότητάς της. Οι σχέσεις που συνδέουν τους συντελεστές μεταξύ τους είναι

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (4.8)$$

$$\varphi_n = \tan^{-1} \left(\frac{a_n}{b_n} \right) \quad (4.9)$$

Με τη χρήση της θεωρίας των μιγαδικών αριθμών, τα τριγωνομετρικά αναπτύγματα των σειρών μπορεί να απεικονιστούν και σε εκθετική μορφή. Η συγκεκριμένη μορφή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη κατά τον Μετασχηματισμό Fourier.

Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τις ταυτότητες Euler ισχύει:

$$\cos(2\pi nft) = \frac{1}{2} (e^{i2\pi nft} + e^{-i2\pi nft}) \quad (4.10)$$

$$\sin(2\pi nft) = \frac{1}{2i} (e^{i2\pi nft} - e^{-i2\pi nft}) \quad (4.11)$$

Συνεπώς, η εκθετική μορφή των σειρών Fourier προκύπτει ως εξής:

$$x(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} c_n e^{i2\pi nft} \quad (4.12)$$

όπου το c_n υπολογίζεται από τη σχέση:

$$c_n = \frac{1}{2} (a_n - ib_n) \quad (4.13)$$

Αναπτύγματα αυτής της μορφής βρίσκουν πολλές εφαρμογές. Για παράδειγμα, εφαρμόζονται ευρύτατα στον τομέα των τηλεπικοινωνιών για τη μεταφορά του συνεχούς σήματος της φωνής, μέσω δορυφόρων κ.α.. Η μεταφορά του ψηφιοποιημένου σήματος της φωνής απαιτεί την επεξεργασία και μεταφορά μεγάλου

όγκου δεδομένων. Συνεπώς, με την ανάπτυξη του σήματος σε ένα τριγωνομετρικό άθροισμα αρκεί να μεταφερθούν μόνο τα στοιχεία του εύρους της συχνότητας και της φάσης και στον προορισμό να εφαρμοστεί η αντίστροφη διαδικασία ώστε να αναπαραχθεί το πρωτογενές σήμα. Μία τέτοια διαδικασία είναι πολύ πιο οικονομική.

4.3 Μετασχηματισμός Fourier

Η ανάλυση Fourier επιτυγχάνει την αναπαράσταση ενός οποιοδήποτε περιοδικού σήματος σε άθροισμα ημιτόνων, όλων των δυνατών συχνοτήτων, τα οποία αθροιζόμενα σχηματίζουν το ολικό αρχικό σήμα. Κάθε ένα από τα επιμέρους ημίτονα συμμετέχει με το αντίστοιχο πλάτος στο ολικό σήμα και ο μετασχηματισμός Fourier αποδεικνύει κατά πόσο συμμετέχει κάθε πιθανή συχνότητα στον σχηματισμό του ολικού σήματος. Με αυτόν τον τρόπο, μετασχηματίζονται συναρτήσεις από το πεδίο του χρόνου σε συναρτήσεις στο πεδίο των συχνοτήτων (frequency domain), οπότε και περιγράφεται η συμπεριφορά του σήματος στο συγκεκριμένο πεδίο.

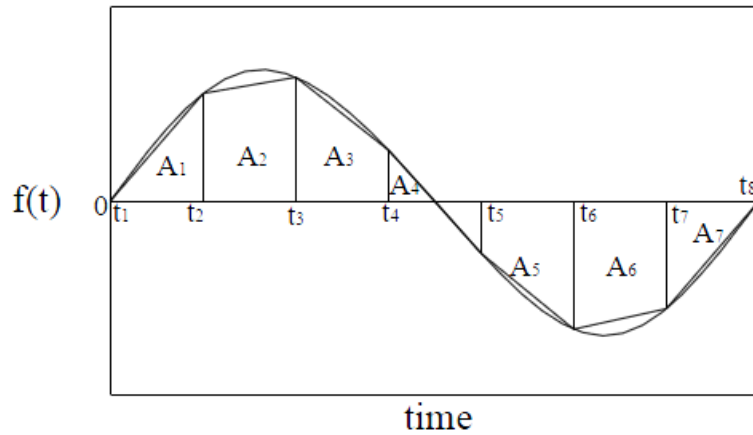
Η ανάλυση ενός σήματος μέσω του μετασχηματισμού Fourier προϋποθέτει το σήμα να πληροί συγκεκριμένες συνθήκες - ιδιότητες (συνθήκες Dirichlet). Ειδικότερα:

1. η $f(x)$ να είναι απόλυτα ολοκληρώσιμη σε μία περίοδο
2. ο αριθμός των μεγίστων και ελαχίστων του $f(x)$ να είναι πεπερασμένος στο διάστημα μιας περιόδου
3. η $f(x)$ να είναι τμηματικά συνεχής με πεπερασμένο αριθμό ασυνέχειας στο διάστημα της περιόδου

4.3.1 Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier (DFT)

Για τα σήματα διακριτού χρόνου πεπερασμένου μήκους, η μετάβαση στο πεδίο των συχνοτήτων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια του διακριτού μετασχηματισμού Fourier (Discrete Fourier Transform: DFT).

Η μέθοδος στην οποία στηρίζεται στην εφαρμογή του κανόνα των τραπεζίων, σύμφωνα με την οποία είναι εφικτή ο καταμερισμός μίας συνεχούς συνάρτησης σε άπειρο πλήθος διαστημάτων με αποτέλεσμα τη δημιουργία απείρων τραπεζίων και τη μετέπειτα άθροιση των εμβαδών τους (Σχήμα 4.2).



Σχ. 4.2 Κανόνας τραπεζίου [Μαριτσούδης, 2008]

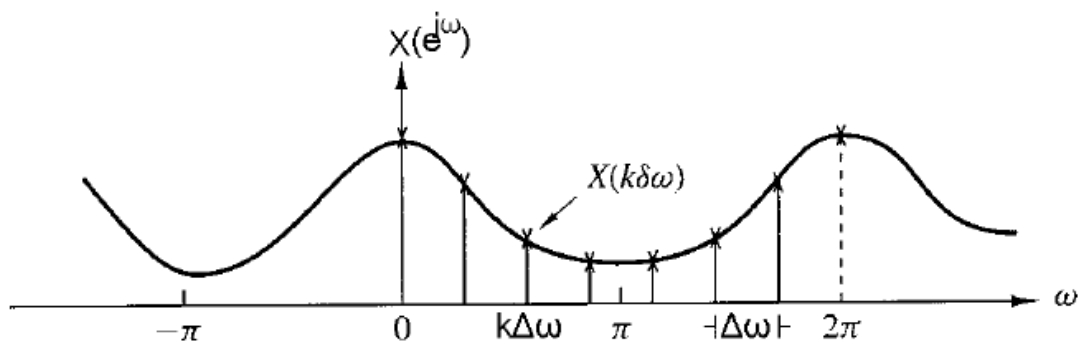
Fig. 4.2 Trapezoidal rule [Maritsoudis, 2008]

Ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier (DFT) υπολογίζει τη συνεχή συνάρτηση του μετασχηματισμού Fourier διακριτού χρόνου (DTFT) σε διακριτές συχνότητες.

Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (DTFT) της πεπερασμένου μήκους N ακολουθίας $x(n)$, δηλαδή $x(n)=0$ για $n<0$ και $n\geq N$, ισούται με:

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} \quad (4.14)$$

Λαμβάνοντας δείγματα της συνεχούς συνάρτησης $X(e^{j\omega})$ σε ισαπέχοντα διαστήματα στη συχνότητα $\omega_k = k\Delta\omega = k\left(\frac{2\pi}{N}\right)$, $k=0,1,\dots,N-1$ (Σχήμα 4.3).



Σχ. 4.3 Δειγματοληψία συχνότητας μετασχηματισμού Fourier διακριτού χρόνου (DTFT) [“Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος και Εικόνας”, Σκορδάς, Αναστασόπουλος]

Fig. 4.3 Frequency sampling of Discrete Fourier Transform (DTFT) [“Digital Signal and Imaging Processing”, Skordas, Anastasopoulos]

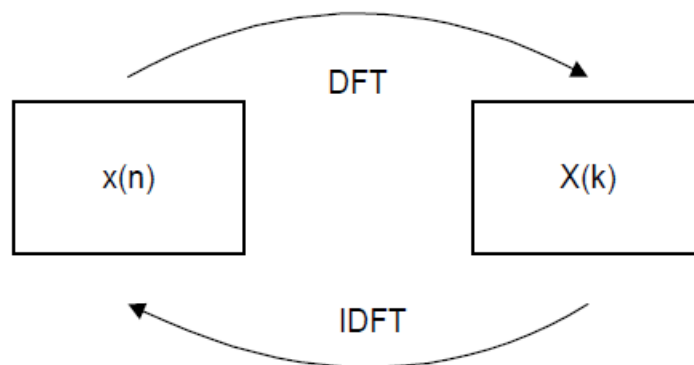
Με τον τρόπο αυτό, δημιουργούνται τα παρακάτω δείγματα:

$$X(k) = X\left(\frac{2\pi k}{N}\right) = X(e^{i\omega})\Big|_{\omega=\frac{2\pi k}{N}} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{i2\pi kn}{N}} \quad (4.15)$$

Επειδή τα συγκεκριμένα δείγματα προκύπτουν από τον υπολογισμό του μετασχηματισμού Fourier $X(e^{i\omega})$ σε N ισαπέχουσες διακριτές συχνότητες, η σχέση (4.15) ονομάζεται διακριτός μετασχηματισμός Fourier (Discrete Fourier Transform, DFT) της $x(n)$. Αποδεικνύεται ότι η ακολουθία $x(n)$ ανακτάται από τα δείγματα $X(k)$ στη συχνότητα, με βάση την εξίσωση (4.16), η οποία αποτελεί τον αντίστροφο μετασχηματισμό Fourier (inverse DFT, IDFT).

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{i2\pi kn/N} \quad (4.16)$$

Οι σχέσεις 4.15, 4.16 αποτελούν το ζεύγος του DFT. Η μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας και αντιστρόφως απεικονίζονται στο Σχήμα 4.4.



Σχ. 4.4 Σχηματική αναπαράσταση ζεύγους Fourier [“Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος και Εικόνας”, Σκορδάς, Αναστασόπουλος]

Fig. 4.4 Schematic representation of Fourier pair [“Digital Signal and Imaging Processing”, Skordas, Anastasopoulos]

4.3.2 Ταχύς Μετασχηματισμός Fourier (FFT)

Ο ταχύς μετασχηματισμός Fourier προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$F_k = F\left(\frac{k}{NT}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} f(nT_s) e^{-\frac{2\pi nk}{N}} \quad (4.17)$$

όπου F_k είναι το σήμα που προκύπτει από τον μετασχηματισμό μίας χρονοσειράς που αποτελείται από N διακριτές τιμές, N το πλήθος των διακριτών τιμών της χρονοσειράς που μετασχηματίζεται και T_s το χρονικό διάστημα μεταξύ τιμών της χρονοσειράς.

Με τον FFT προκύπτει ένα νέο σήμα N τιμών, όπου κάθε τιμή αντιστοιχεί σε μία συχνότητα. Οι τιμές απέχουν μεταξύ τους κατά συχνότητα ίση με:

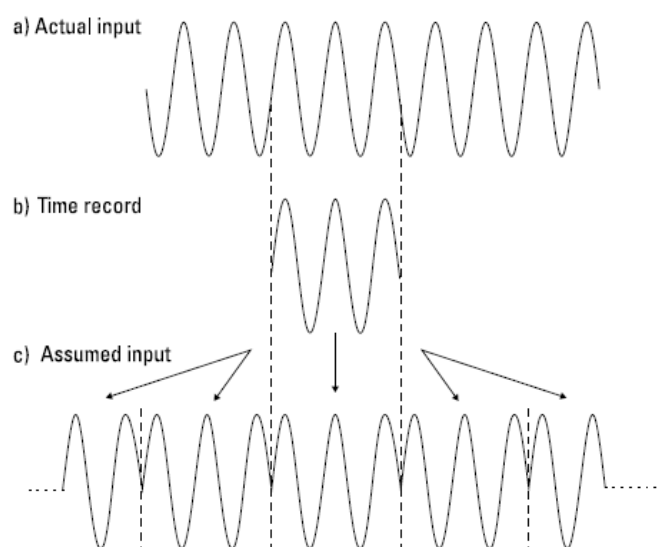
$$f_s = \frac{1}{NT_s} \quad (4.18)$$

Ένα ενδιαφέρον στοιχείο του FFT είναι η δυνατότητα εκτέλεσης των υπολογισμών που απαιτούνται στις ίδιες θέσεις μνήμης, αφού δεν απαιτείται επιπλέον χώρος για την αποθήκευση των ενδιάμεσων αποτελεσμάτων.

Τέλος, το πλέον ουσιαστικό στοιχείο του FFT είναι η μειωμένη υπολογιστική πολυπλοκότητά του, δηλαδή το συνολικό πλήθος πράξεων (πολλαπλασιασμών και προσθέσεων).

4.4 Windowing

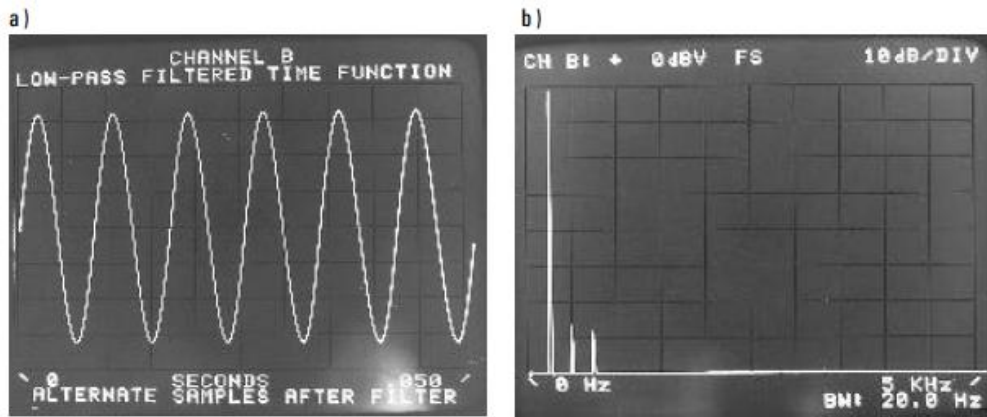
Ο μετασχηματισμός Fourier κάνει τη σιωπηρή παραδοχή ότι το μετρούμενο σήμα επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο και πέραν του πεπερασμένου διαστήματος παρατήρησης - καταγραφής του. Σε περιπτώσεις όπου το καταγεγραμμένο τμήμα του σήματος αποτελείται από ακέραιο αριθμό περιόδων, η τελική μορφή του σήματος περιγράφεται επιτυχώς, σε αντίθεση με τις περιπτώσεις όπου το καταγεγραμμένο σήμα αποτελείται από μη ακέραιο αριθμό επαναλήψεων (Σχήμα 4.5).



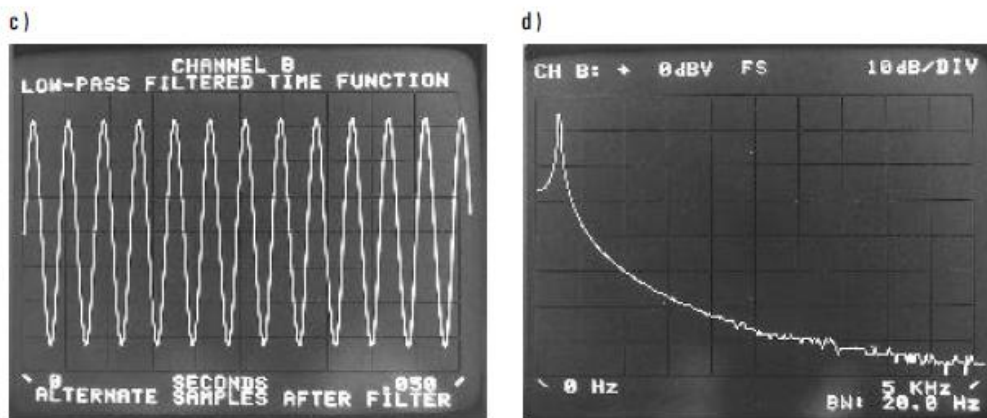
Σχ. 4.5 Παραδοχή ότι το μετρούμενο σήμα επαναλαμβάνεται με τον ίδιο τρόπο [“The Fundamentals of Signal Analysis”, Hewlett Packard]

Fig. 4.5 Assumption that signal is repeated at the same way [“The Fundamentals of Signal Analysis”, Hewlett Packard]

Αποτέλεσμα των παραπάνω είναι το διάγραμμα συχνοτήτων ενός ημιτονοειδούς σήματος να μην αποτελείται από μία μόνο κύρια συχνότητα (Σχήμα 4.6).



a) & b) Sine wave periodic in time record



c) & d) Sine wave not periodic in time record

Σχ. 4.6 Διαγράμματα συχνοτήτων σημάτων με ακέραιο και μη αριθμό περιόδων [“The Fundamentals of Signal Analysis”, Hewlett Packard]

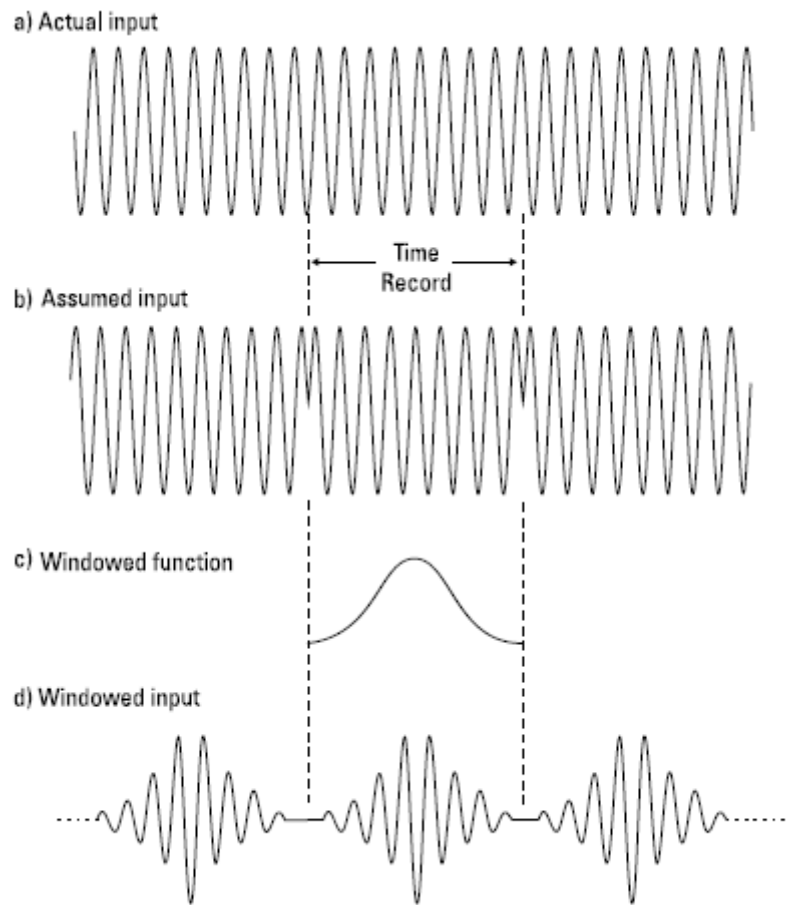
Fig. 4.6 Frequency diagrams of sine waves periodic and not in time record [“The Fundamentals of Signal Analysis”, Hewlett Packard]

Το συγκεκριμένο πρόβλημα ονομάζεται “φασματικής διαρροής” (“spectral leakage”) και οφείλεται στην καταγραφή του σήματος για πεπερασμένο χρονικό διάστημα.

Οι επιπτώσεις της φασματικής διαρροής μπορούν να μειωθούν, μειώνοντας την επίδραση των ατελειών στο τέλος του καταγεγραμμένου σήματος. Κάτι τέτοιο, οδηγεί στην ιδέα του πολλαπλασιασμού του σήματος με συναρτήσεις που μειώνουν σταδιακά την ένταση του σήματος μέχρι να μηδενιστεί στην περιοχή όπου εμφανίζονται οι ατέλειές του.

Η διαδικασία πολλαπλασιασμού ενός σήματος με συνάρτηση η οποία σταδιακά τείνει στο μηδέν ονομάζεται “windowing” και η συνάρτηση που εφαρμόζεται “window function” (“συνάρτηση παραθύρου”). Συγκεκριμένα, η συνάρτηση παραθύρου είναι μία μαθηματική συνάρτηση σε μορφή καμπάνας η οποία πολλαπλασιάζεται με

το σήμα αποδυναμώνει σταδιακά την ισχύ στα άκρα του και αφήνει αναλλοίωτες τις τιμές του στο μέσο του χρονικού διαστήματος παρατήρησης (Σχήμα 4.7).



Σχ. 4.7 Εφαρμογή συνάρτησης παραθύρου [“The Fundamentals of Signal Analysis”, Hewlett Packard]

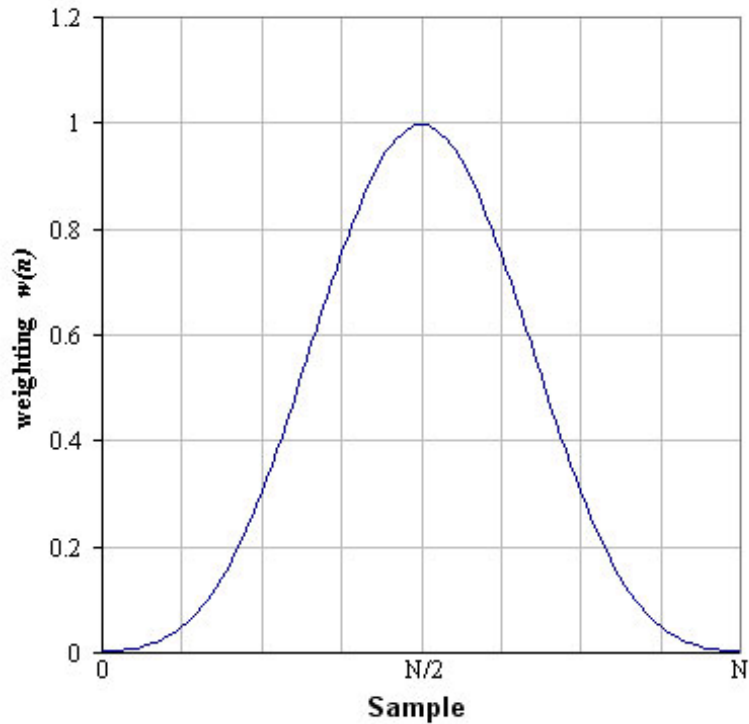
Fig. 4.7 Windowing function [“The Fundamentals of Signal Analysis”, Hewlett Packard]

Η διαδικασία του windowing μειώνει το φαινόμενο της φασματικής διαρροής, χωρίς βέβαια να την εξαλείφει εντελώς.

4.4.1 Είδη συναρτήσεων παραθύρου

Υπάρχουν διάφορες μορφές συναρτήσεων παραθύρων, ανάλογες με τις διάφορες μορφές των σημάτων. Δύο συνήθεις συναρτήσεις παραθύρου είναι οι παρακάτω:

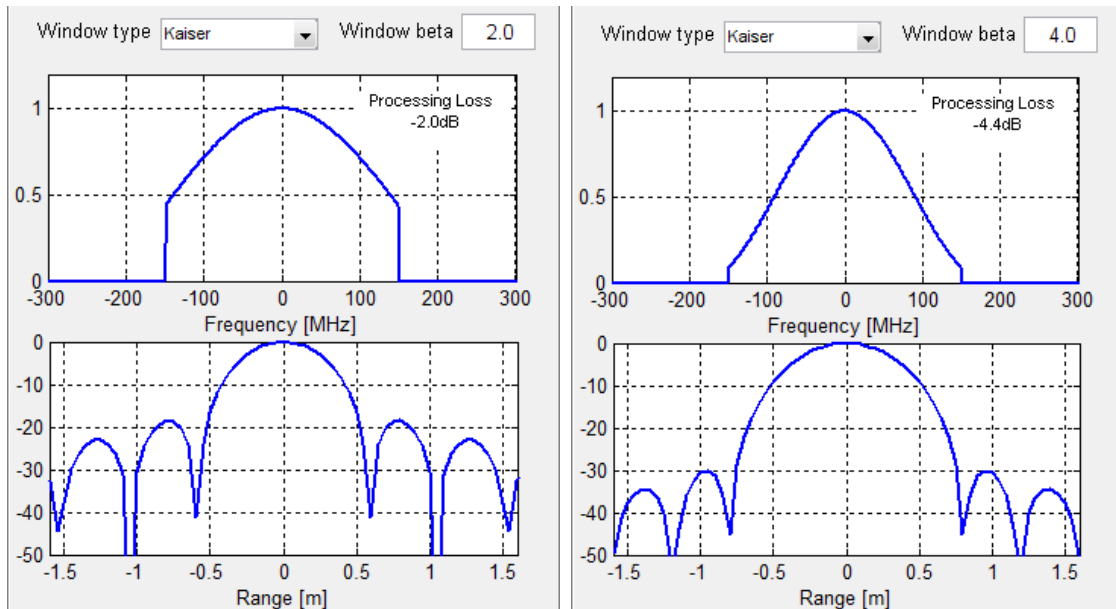
Kaiser–Bessel window. – Η γενική μορφή του παραθύρου Kaiser-Bessel δίνεται στο Σχήμα 4.8.



Σχ. 4.8 Γενική μορφή συνάρτησης παραθύρου Kaiser-Bessel [www.diracdelta.co.uk]

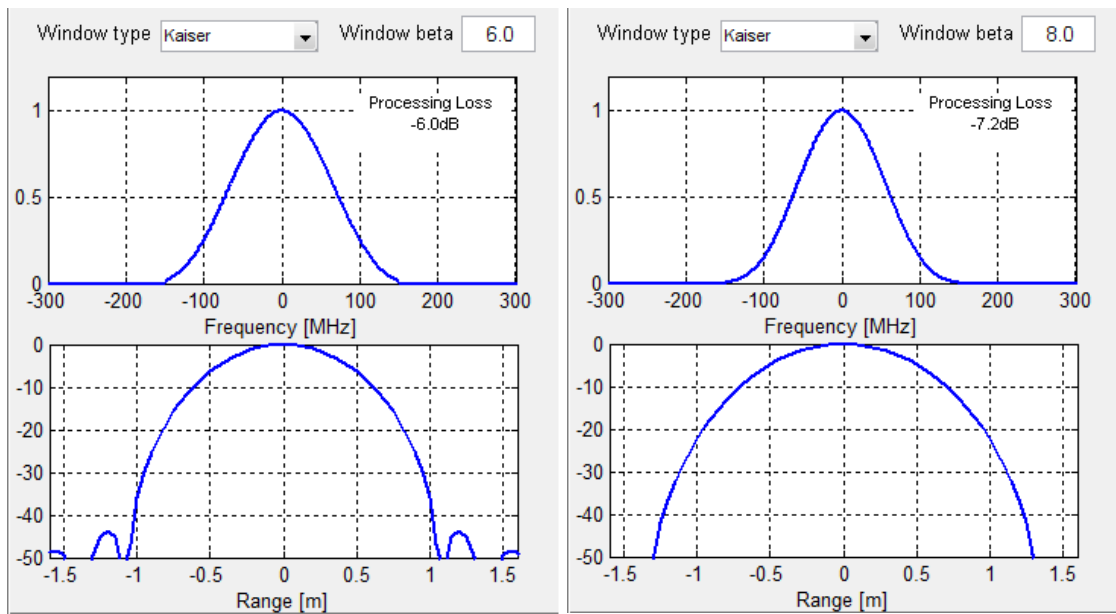
Fig. 4.8 General shape of window function Kaiser-Bessel [www.diracdelta.co.uk]

Η μορφή του παραθύρου διαφοροποιείται ανάλογα με τον συντελεστή “window beta”, οι συνήθεις τιμές του οποίου είναι 2, 4, 6, 8 (Σχήμα 4.9, 4.10). Όσο πιο κοντά είναι μεταξύ τους οι παρατηρούμενοι στόχοι, τόσο μικρότερη πρέπει να είναι η τιμή του συγκεκριμένου συντελεστή. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις όπου οι στόχοι απέχουν μεταξύ τους $>2m$ ενδείκνυται τιμή window beta: 6.



Σχ. 4.9 Συνάρτηση παραθύρου Kaiser-Bessel με window beta “2” και “4”

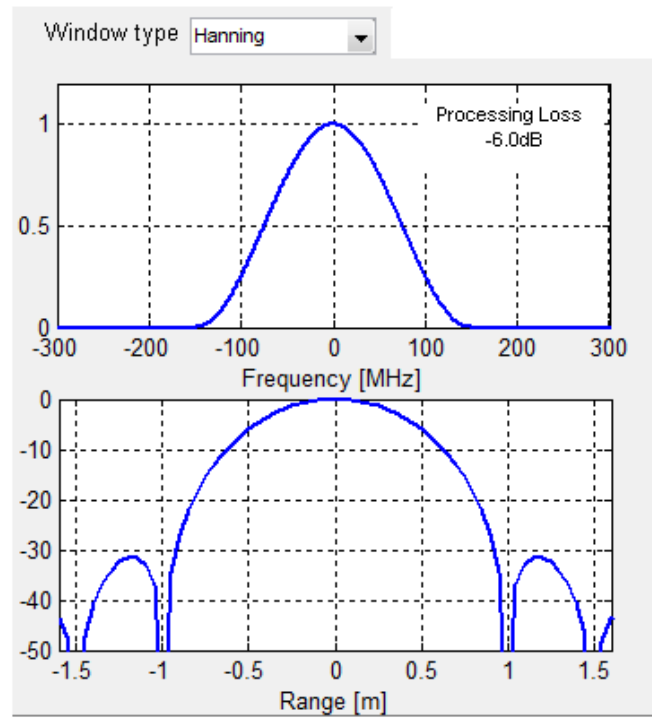
Fig. 4.9 Window function Kaiser-Bessel – window beta “2” and “4”



Σχ. 4.10 Συνάρτηση παραθύρου Kaiser-Bessel με window beta “6” και “8”

Fig. 4.10 Window function Kaiser-Bessel – window beta “6” and “8”

Hanning window. – Η μορφή του παραθύρου Hanning δίνεται στο Σχήμα 4.13.



Σχ. 4.11 Συνάρτηση παραθύρου Hanning

Fig. 4.11 Window function Hanning

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΠΕΔΙΟΥ

Η κατασκευή που επιλέχθηκε να μελετηθεί κατά το κυρίως πείραμα, είναι μία υψηλή καπνοδόχος στον ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου. Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μία σύντομη αναφορά στον ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου, ακολουθεί η περιγραφή της καπνοδόχου καθώς και η διαδικασία συλλογής των δεδομένων.

5.1 ΔΕΘ/ΑΗΣ ΚΕΡΑΤΕΑΣ - ΛΑΥΡΙΟΥ

5.1.1 Γενική περιγραφή

Ο ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου βρίσκεται στον Όρμο Αγ. Νικολάου, 40 km Νοτιοανατολικά της Αθήνας και μόλις 3.5 km Βορειοανατολικά της πόλης του Λαυρίου (Σχήμα 5.1).

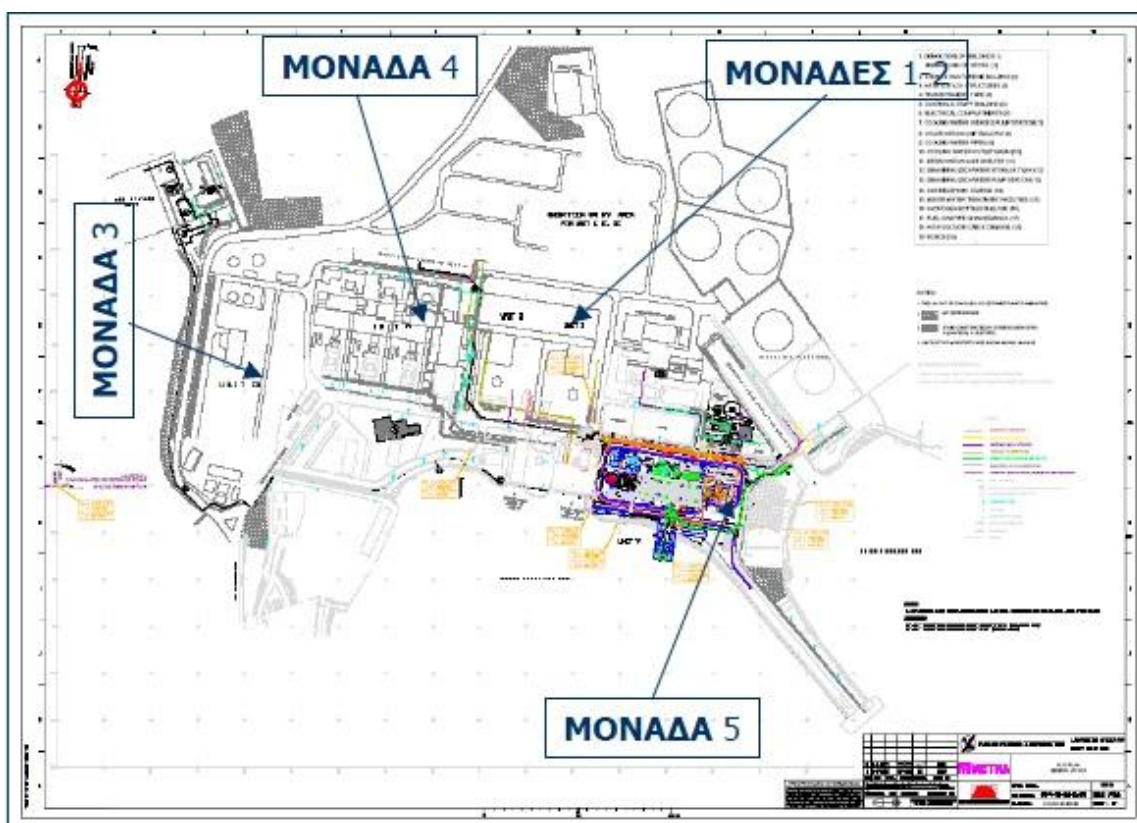


Σχ. 5.1 Τοποθεσία ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου [www.google.com]

Fig. 5.1 Location of the steam-electric power plant of Lavrio [www.google.com]

Αποτελεί ένα από τα πιο σύγχρονα και πιο μεγάλα κέντρα παραγωγής ηλεκτρισμού της «ΔΗΜΟΣΙΑΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΑΕ – ΔΕΗ ΑΕ», καθώς παρέχει περίπου το 10% της συνολικής ισχύος της ΔΕΗ. Εκτείνεται σε περιοχή 404997 m² και συνολικά η εγκαταστημένη σε αυτό ισχύς υπολογίζεται σε ~1580 MW. Η γραμμή παραγωγής του συνδέεται με το εθνικό δίκτυο μεταφοράς με γραμμές 400 kV και 500 kV. Διαθέτει πέντε αυτόνομα συγκροτήματα παραγωγής ρεύματος με τα παρακάτω χαρακτηριστικά και η θέση τους φαίνεται το Σχήμα 5.2:

- Μονάδα I: πετρελαϊκή, 150 MW
- Μονάδα II: πετρελαϊκή, 300 MW
- Μονάδα III: συνδυασμένου κύκλου, 180 MW
- Μονάδα IV: συνδυασμένου κύκλου, 560 MW
- Μονάδα V: συνδυασμένου κύκλου, 385 MW



Σχ. 5.2 Διάταξη μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στον ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου [EnergyTec 2006, Αργυριάδης, Μπονατάκη, ΔΜΚΘ/ΔΕΗ ΑΕ]

Fig. 5.2 Power-generator units layout at the steam-electric power plant Lavrio [EnergyTec 2006, Argyriadis, Mponataki, DEI Co]

Αναλυτικά, το τοπογραφικό διάγραμμα του ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου δίνεται στο Σχήμα 5.3.



Σχ. 5.3 Τοπογραφικό διάγραμμα του ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου [έντυπο υλικό από ΔΕΗ ΑΕ]
Fig. 5.3 Topographic chart of the steam-electric power plant of Lavrio [printed matter from DEI Co]

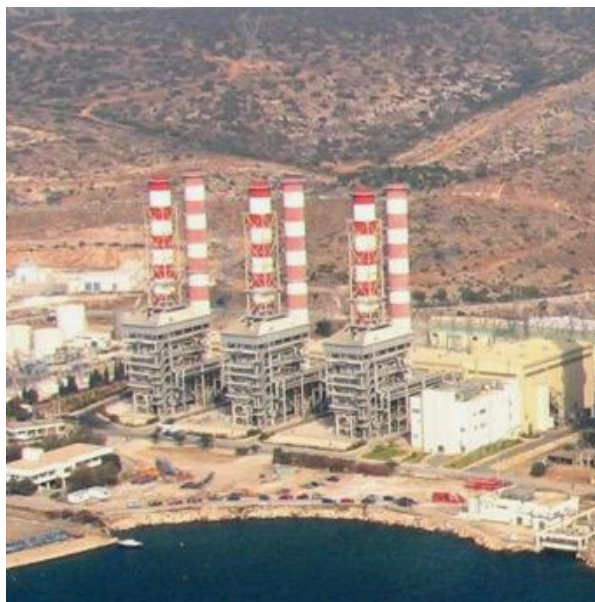
Η γενική διάταξη του εργοστασίου μελετήθηκε έτσι ώστε να δημιουργούνται ένα σύνολο ορθολογικά τοποθετημένων εγκαταστάσεων, οι οποίες να παρέχουν όλες τις αναγκαίες λειτουργικές δυνατότητες. Στο τοπογραφικό διάγραμμα (Σχήμα 5.5) διακρίνονται τα μηχανοστάσια, οι λέβητες και ο λοιπός εξοπλισμός όλων των Μονάδων, τα διάφορα κτίρια καθώς και χώροι πρασίνου. Αναλυτικά, το υπόμνημα του παραπάνω τοπογραφικού διαγράμματος δίνεται στο Παράρτημα Β.

5.1.2 Ιστορικά στοιχεία

Η κατασκευή των εγκαταστάσεων στον ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας – Λαυρίου ξεκίνησε το 1969 και τέθηκε σε λειτουργία το 1972, όταν αποπερατώθηκε η κατασκευή της Μονάδας Ι.

Η Μονάδα ΙΙ τέθηκε σε λειτουργία το 1973, ενώ η Μονάδα 3, με τη σημερινή της μορφή, κατασκευάστηκε στο χρονικό διάστημα μεταξύ 1995 – 1998 από τον οίκο BABCOCK Energy.

Δύο χρόνια αργότερα, το 2000, μελετήθηκε και κατασκευάστηκε η Μονάδα IV (Σχήμα 5.4) από τον οίκο ALSTOM.



Σχ. 5.4 Εγκαταστάσεις Μονάδας IV στον ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου [EnergyTec 2006, Αργυριάδης, Μπωνατάκη, ΔΜΚΘ/ΔΕΗ ΑΕ]

Fig. 5.4 Establishments of power-generator unit IV at the steam-electric power plant of Lavrio [EnergyTec 2006, Argyriadis, Mponataki, DEI Co]

Τέλος, το 2004 ανατέθηκε στην εταιρία ΜΕΤΚΑ η κατασκευή της Μονάδας V (Σχήμα 5.5), η οποία λειτουργεί με φυσικό αέριο. Η έναρξη της εμπορικής της λειτουργίας ξεκίνησε τον Απρίλιο του 2006.



Σχ. 5.5 Εγκαταστάσεις Μονάδας V στον ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου [www.metka.gr]

Fig. 5.5 Establishments of power-generator unit V at the steam-electric power plant of Lavrio [www.metka.gr]

5.2 Κατασκευή Μελέτης

5.2.1 Καπνοδόχος Μονάδας I

Η κατασκευή η οποία επιλέχθηκε για τη μελέτη της δυναμικής της συμπεριφοράς είναι η καπνοδόχος της Μονάδας I του ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου. Μαζί με την καπνοδόχο της Μονάδας II, αποτελούν τις δύο υψηλές καπνοδόχους του ΔΕΘ/ΑΗΣ (Σχήμα 5.6).



Σχ. 5.6 Καπνοδόχοι Μονάδας I (αριστερά) & II (δεξιά) ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου

Fig. 5.6 Chimneys of power-generator units I (left) & II (right) at the steam-electric power plant of Lavrio

5.2.2 Σκοπός λειτουργίας καπνοδόχου

Ρόλος κάθε καπνοδόχου είναι η επαγωγή των καυσαερίων στην ατμόσφαιρα. Συγκεκριμένα, λόγω του μεγάλου ύψους κάθε καπνοδόχου, δημιουργούνται συνθήκες υπερπίεσης στο εσωτερικό της με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται η έκλυση των καυσαερίων.

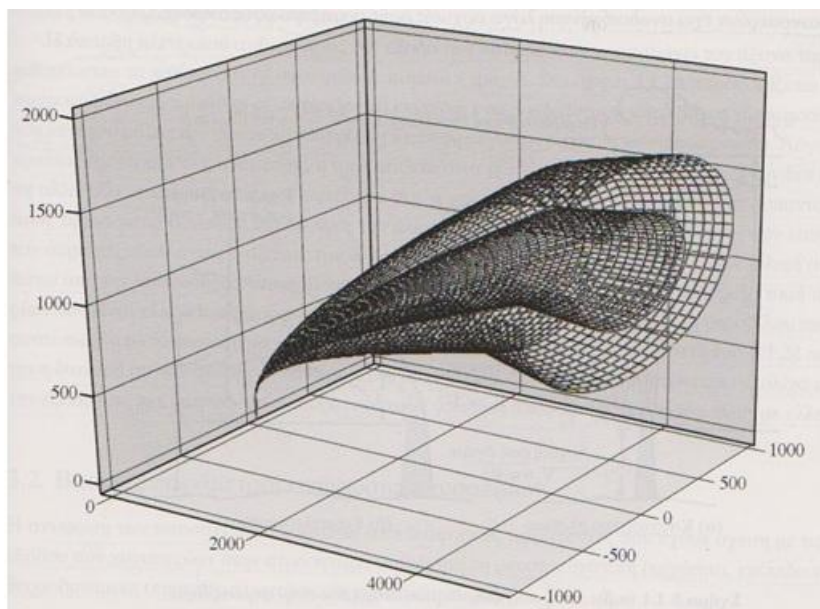
Κάθε λέβητας πρέπει να διαθέτει ξεχωριστή καπνοδόχο, εκτός των περιπτώσεων χρήσης αέριων καυσίμων. Κάθε καπνοδόχος πρέπει να κατασκευάζεται από ανθεκτικά και άκαυστα υλικά και να έχει δείκτη πυραντίστασης όχι μικρότερο από δύο ώρες. Επίσης, κάθε καπνοδόχος πρέπει να στηρίζεται με ασφάλεια πάνω σε τοίχο, δάπεδο ή στο έδαφος.

5.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά καπνοδόχου Μονάδας I

Η καπνοδόχος της Μονάδας I έχει σχήμα κυλίνδρου, είναι διπλού τοιχώματος και συνολικού ύψους 149 m. Το υλικό κατασκευής της καπνοδόχου είναι οπλισμένο σκυρόδεμα, κατάλληλο να αντέχει υψηλές θερμοκρασίες.

Η επιλογή κυλινδρικού σχήματος ελαχιστοποιεί την τριβή των καυσαερίων στα τοιχώματα της κατασκευής και επομένως διευκολύνει την ομαλή μετάβασή τους στην ατμόσφαιρα.

Το μεγάλο ύψος της καπνοδόχου συνεισφέρει πρώτον, στη δημιουργία μεγάλης διαφοράς πίεσης ώστε τα καυσαέρια να διοχετεύονται γρήγορα στην ατμόσφαιρα και δεύτερον, στη βέλτιστη διάχυση του καπνού στην ατμόσφαιρα με κύριο σκοπό την αποφυγή ρύπανσης κατοικημένων περιοχών. Συγκεκριμένα, το ελάχιστο ύψος καπνοδόχου, ιδιαίτερα όταν αυτή γειτνιάζει με κτίρια, υπολογίζεται από ειδικούς κανόνες («Πηγές, διασπορά και έλεγχος ατμοσφαιρικής ρύπανσης», Μπεργελές, 2006). Στο Σχήμα 5.7 δίνεται ενδεικτικά ο τρόπος ανύψωσης του καυσαερίου στην ατμόσφαιρα.



Σχ. 5.7 Τρόπος ανύψωσης καυσαερίων από την καπνοδόχο [«Πηγές, διασπορά και έλεγχος ατμοσφαιρικής ρύπανσης», Μπεργελές, 2006]

Fig. 5.7 Lifting gas from the chimney [«Πηγές, διασπορά και έλεγχος ατμοσφαιρικής ρύπανσης», Μπεργελές, 2006]

Η σταδιακή μείωση του πλάτους της καπνοδόχου όσο αυξάνεται το ύψος της έχει ως στόχο την επιτάχυνση της εξόδου των καυσαερίων. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτόν, χαμηλώνει το κέντρο βάρους της κατασκευής και επομένως επιτυγχάνεται η καλύτερη ευστάθειά της. Επίσης, λόγω χαμηλότερης θερμοκρασίας στα υψηλά τμήματα της καπνοδόχου ο όγκος των αερίων στην κορυφή είναι μικρότερος και επομένως δεν απαιτείται ίδια επιφάνεια κατασκευής στη βάση και στην κορυφή της.

Τέλος, η ύπαρξη διπλού τοιχώματος στην καπνοδόχο εξυπηρετεί τη διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας σε όλο το ύψος της κατασκευής, έτσι ώστε το καυσαέριο να συναντά ομοιόμορφη θερμοκρασία και να μην εμποδίζεται η έξοδός του προς την ατμόσφαιρα. Σε περίπτωση που το καυσαέριο δεν μεταβαίνει ομαλά προς την ατμόσφαιρα, δημιουργούνται ταλαντώσεις στην κατασκευή (τιράγιο).

5.3 Σχεδιασμός Πειράματος

5.3.1 Γενικά

Στόχος της πειραματικής διαδικασίας αποτελεί η συλλογή δεδομένων με το σύστημα IBIS-S με σκοπό τη μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου της Μονάδας I. Κατά τη διάρκεια του πειράματος, πραγματοποιήθηκαν δύο ομάδες καταγραφών, διάρκειας 30 min η καθεμία.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε καθώς και οι γεωμετρία μεταξύ οργάνου και κατασκευής κατά τη συλλογή των δεδομένων.

5.3.2 Παράμετροι συλλογής δεδομένων πεδίου

Εξοπλισμός. – Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτέλεση του κυρίως πειράματος αποτελούνταν από:

- αισθητήρα IBIS-S
- 2 κεραίες συστήματος IBIS-S τύπου IBIS-H20
- τρίποδα συστήματος IBIS-S
- φορητό H/Y PANASONIC CF-19
- 2 συσσωρευτές 12 V

- φορτιστή συσσωρευτών
- καλώδιο διασύνδεσης αισθητήρα IBIS-S με φορητό Η.Υ
- καλώδιο τροφοδοσίας αισθητήρα IBIS-S από συσσωρευτή
- καλώδιο τροφοδοσίας φορητού Η/Υ από συσσωρευτή
- καλώδιο εξωτερικής τροφοδοσίας φορητού Η/Υ (220 V, 50 Hz)
- γεωδαιτικό σταθμό Leica TS09 (Reflector less)
- τρίποδα
- τρικόχλιο
- 2 πασετάκια

Εγκατάσταση οργάνου. – Η εγκατάσταση του οργάνου κατά την πρώτη ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκε σε απόσταση 44 m από την καπνοδόχο της Μονάδας I (Σχήμα 5.8), ενώ η εγκατάσταση του οργάνου κατά τη δεύτερη ομάδα μετρήσεων σε απόσταση 10 m, αντίστοιχα.



Σχ. 5.8 Σημείο εγκατάστασης οργάνου κατά τη συλλογή της πρώτης ομάδας μετρήσεων
 Fig. 5.8 Location of the instrument during the first set of measurements

Συγκεκριμένα, η γεωμετρική διάταξη μεταξύ οργάνου και κατασκευής κατά την πρώτη ομάδα μετρήσεων περιγράφεται ως εξής:

- οριζόντια απόσταση μεταξύ οργάνου και καπνοδόχου: 44 m
- ύψος οργάνου: 1.2 m
- γωνία ανοίγματος του κυρίως λοβού της χρησιμοποιούμενης κεραίας (IBIS-H20) σε οριζόντιο επίπεδο στα -3dB: 17°
- γωνία ανοίγματος του κυρίως λοβού της χρησιμοποιούμενης κεραίας (IBIS-H20) σε κατακόρυφο επίπεδο στα -3dB: 15°
- ύψος επιθυμητού σημείου σκόπευσης επί της καπνοδόχου, ως προς το οριζόντιο επίπεδο: 147.7 m
- κεκλιμένη απόσταση οργάνου – καπνοδόχου: 153 m
- γωνία ύψους του οργάνου ως προς το σημείο σκόπευσης της καπνοδόχου: 73°
- μήκος του κατακόρυφου τμήματος της καπνοδόχου από το οποίο το όργανο λαμβάνει επιστροφή σήματος με απώλεια -3dB: 173.4 m
- μήκος που αντιστοιχεί στη γωνία ανοίγματος της κεραίας κατά το οριζόντιο επίπεδο από το οποίο το όργανο λαμβάνει επιστροφή σήματος με απώλεια -3dB: 53.1 m

Αντίστοιχα, η γεωμετρική διάταξη μεταξύ οργάνου και κατασκευής κατά την δεύτερη ομάδα μετρήσεων περιγράφεται ως εξής:

- οριζόντια απόσταση μεταξύ οργάνου και καπνοδόχου: 10 m
- ύψος οργάνου: 2 m
- γωνία ανοίγματος του κυρίως λοβού της χρησιμοποιούμενης κεραίας (IBIS-H20) σε οριζόντιο επίπεδο στα -3dB: 17°
- γωνία ανοίγματος του κυρίως λοβού της χρησιμοποιούμενης κεραίας (IBIS-H20) σε κατακόρυφο επίπεδο στα -3dB: 15°
- ύψος επιθυμητού σημείου σκόπευσης επί της καπνοδόχου, ως προς το οριζόντιο επίπεδο: 122.6 m
- κεκλιμένη απόσταση οργάνου – καπνοδόχου: 121 m
- γωνία ύψους του οργάνου ως προς το σημείο σκόπευσης της καπνοδόχου: 85°
- μήκος του κατακόρυφου τμήματος της καπνοδόχου από το οποίο το όργανο λαμβάνει επιστροφή σήματος με απώλεια -3dB: 161.4 m

- μήκος που αντιστοιχεί στη γωνία ανοίγματος της κεραίας κατά το οριζόντιο επίπεδο από το οποίο το όργανο λαμβάνει επιστροφή σήματος με απώλεια -3dB : 78.1 m.



Σχ. 5.9 Σκόπευση καπνοδόχου Μονάδας I από οριζόντια απόσταση 10 m

Fig. 5.9 Shooting chimney of power-generator units I from horizontal distance 10 m

Η μέτρηση των οριζόντιων και κατακόρυφων αποστάσεων μεταξύ οργάνου και καπνοδόχου πραγματοποιήθηκε με τον reflector less γεωδαιτικό σταθμό Leica TS09.

Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε χονδρικός προσανατολισμός του συστήματος IBIS-S, μέσω σημείων που μετρήθηκαν στις κορυφές δύο γειτονικών κτιρίων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.10.



Σχ. 5.10 Σημεία χονδρικού προσανατολισμού συστήματος IBIS-S [Google Earth]

Fig. 5.10 Points for approximate orientation of IBIS-S system [Google Earth]

5.4 Συλλογή Δεδομένων Πεδίου

5.4.1 Χρόνος διεξαγωγής πειράματος

Η εκτέλεση του πειράματος απαιτούσε κατάλληλες καιρικές συνθήκες, δηλαδή δυνατό άνεμο χωρίς βροχή. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η μέρα που επιλέχθηκε ως κατάλληλη ήταν η 22^η Μαρτίου 2011, οπότε και πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της πειραματικής διαδικασίας, μετά από σχετική συνεννόηση με τη διοίκηση του ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου. Συγκεκριμένα, εκείνη την ημέρα επικρατούσαν άνεμοι βόρειοι – βορειοανατολικοί, εντάσεων ~ 15 m/s, δηλαδή 7 Beaufort

Σύμφωνα με ανεμολογικά δεδομένα που συλλέχθηκαν μεταξύ Ιουνίου 1998 και Νοεμβρίου 2002, στην περιοχή του Λαυρίου ο συχνότερα εμφανιζόμενος άνεμος είναι Βόρειος, εντάσεως 3-5 Beauford, ενώ η μέγιστη τιμή ταχύτητας ριπής ανέμου σημειώθηκε μήνα Δεκέμβριο, με ταχύτητα ανέμου 27.6 m/s, δηλαδή 10 Beaufort.

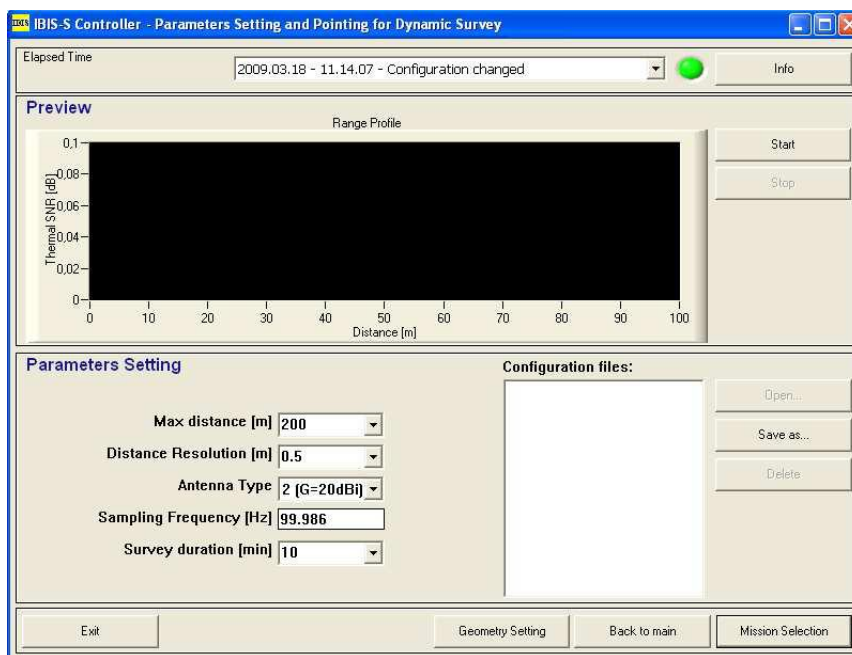
Η συλλογή δεδομένων κατά την πρώτη ομάδα μετρήσεων πραγματοποιήθηκε μεταξύ 12:20 και 12:50, ενώ η δεύτερη μεταξύ 13:20 και 13:50.

5.4.2 Παράμετροι λογισμικού χειρισμού συστήματος IBIS-S

Ο χειρισμός του συστήματος IBIS-S πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού IBIS-S Controller, το οποίο είναι εγκατεστημένο στον φορητό Η/Υ του συστήματος, PANASONIC CF-19.

Στο υπόψη λογισμικό ορίστηκαν οι παράμετροι συλλογής των δεδομένων. Συγκεκριμένα, στην ενότητα “Parameters Settings, ορίστηκαν:

- η μέγιστη απόσταση μεταξύ οργάνου και κατασκευής, σε m (Max distance)
- η περιοχική ανάλυση, σε m (Distance Resolution)
- ο τύπος της χρησιμοποιούμενης κεραίας (Antenna Type)
- η συχνότητα δειγματοληψίας, σε Hz (Sampling Frequency)
- η διάρκεια καταγραφής, σε min (Survey duration)



Σχ. 5.11 Παράθυρο ρυθμίσεων λογισμικού IBIS-S Controller για δυναμικά φαινόμενα [IBIS-S Controller User Manual]

Fig. 5.11 Parameters settings and pointing window for dynamic measurements [IBIS-S Controller User

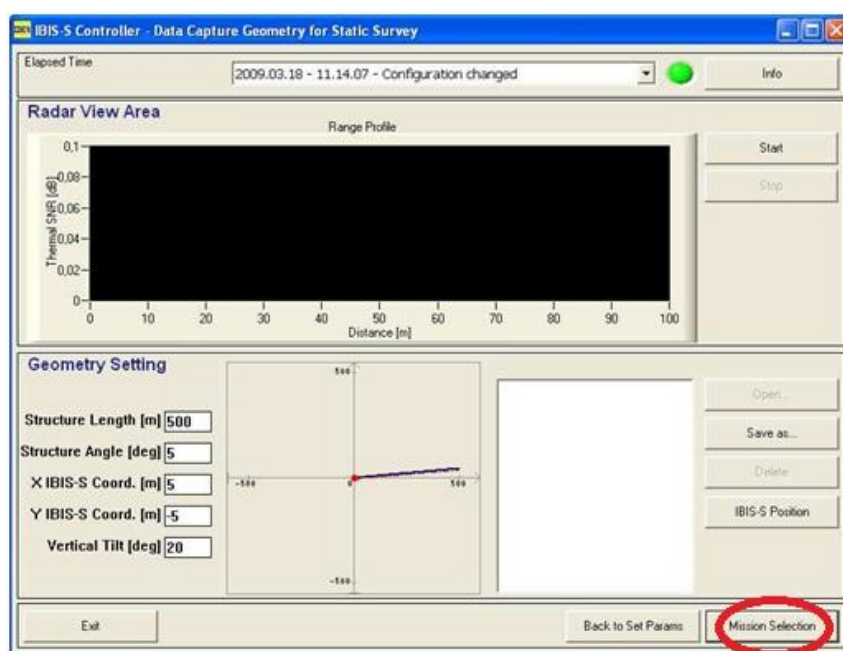
Συγκεκριμένα, στην πρώτη ομάδα συλλογής δεδομένων οι παραπάνω παράμετροι έλαβαν τις ακόλουθες τιμές:

- μέγιστη απόσταση μεταξύ οργάνου και κατασκευής: 160 m
- περιοχική ανάλυση: 0.5 m
- τύπος της χρησιμοποιούμενης κεραίας: 2 (G=20 dBi)
- συχνότητα δειγματοληψίας: 100 Hz
- διάρκεια καταγραφής: 30 min

Αντίστοιχα, για τη δεύτερη ομάδα συλλογής δεδομένων ορίστηκαν οι εξής παράμετροι:

- μέγιστη απόσταση μεταξύ οργάνου και κατασκευής: 155 m
- περιοχική ανάλυση: 0.5 m
- τύπος της χρησιμοποιούμενης κεραίας: 2 (G=20 dBi)
- συχνότητα δειγματοληψίας: 100 Hz
- διάρκεια καταγραφής: 30 min

Και στις δύο περιπτώσεις, τελικά η συχνότητα δειγματοληψίας, για διάρκεια 30 min, διαμορφώθηκε από το λογισμικό σε 99.06 Hz. Στη συνέχεια, μέσω της επιλογής “Geometry Setting” εμφανίζεται το παράθυρο του Σχήματος 5.12, όπου ορίστηκε η γεωμετρική διάταξη οργάνου – κατασκευής.



Σχ. 5.12 Παράθυρο ορισμού γεωμετρικής διάταξης συστήματος IBIS-S - κατασκευής [IBIS-S Controller User Manual]

Συγκεκριμένα, για την πρώτη ομάδα δεδομένων ορίστηκαν τα εξής:

- μήκος κατασκευής (Structure Length): 150 m
- γωνία ύψους κατασκευής (Structure Angle): 90 deg
- συντεταγμένες IBIS-S κατά την οριζόντια διεύθυνση (X IBIS-S Coord) (θετική τιμή όταν το σύστημα IBIS-S βρίσκεται δεξιά της κατασκευής, ενώ αρνητική τιμή όταν βρίσκεται αριστερά): 44 m
- συντεταγμένες IBIS-S κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (Y IBIS-S Coord) (θετική τιμή όταν το σύστημα IBIS-S βρίσκεται πάνω από την κατασκευής, ενώ αρνητική τιμή όταν βρίσκεται από κάτω): 0 m, αφού το σύστημα IBIS-S βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τη βάση της καπνοδόχου
- γωνία ύψους οργάνου (Vertical Tilt): 74°

Αντίστοιχα, για τη δεύτερη ομάδα μετρήσεων ορίστηκε η εξής γεωμετρική διάταξη στο λογισμικό χειρισμού του συστήματος IBIS-S:

- μήκος κατασκευής (Structure Length): 150 m
- γωνία ύψους κατασκευής (Structure Angle): 90 deg
- συντεταγμένες IBIS-S κατά την οριζόντια διεύθυνση (X IBIS-S Coord) (θετική τιμή όταν το σύστημα IBIS-S βρίσκεται δεξιά της κατασκευής, ενώ αρνητική τιμή όταν βρίσκεται αριστερά): 10 m
- συντεταγμένες IBIS-S κατά την κατακόρυφη διεύθυνση (Y IBIS-S Coord) (θετική τιμή όταν το σύστημα IBIS-S βρίσκεται πάνω από την κατασκευής, ενώ αρνητική τιμή όταν βρίσκεται από κάτω): 0 m, αφού το σύστημα IBIS-S βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με τη βάση της καπνοδόχου
- γωνία ύψους οργάνου (Vertical Tilt): 85°.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό περιλαμβάνονται τα βήματα επεξεργασίας των μετρήσεων που περιγράφονται στο κεφάλαιο 5, καθώς και η ανάλυση των σχετικών αποτελεσμάτων. Η επεξεργασία των μετρήσεων πραγματοποιείται με το πρόγραμμα εκ των υστέρων επεξεργασίας του συστήματος IBIS-S, IBISDV. Στόχος αποτελεί η ανάλυση της κινηματικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου, σύμφωνα με τα δεδομένα που συλλέχθηκαν.

6.1 Πρόγραμμα Εκ των υστέρων Επεξεργασίας Μετρήσεων IBISDV

6.1.1 Γενικά

Το πρόγραμμα IBISDV επεξεργάζεται τα αρχεία με κατάληξη gdb τα οποία δημιουργούνται κατά τη διάρκεια συλλογής δεδομένων από το σύστημα IBIS. Τα βασικά στοιχεία τα οποία προκύπτουν από την επεξεργασία των συλλεγμένων δεδομένων είναι:

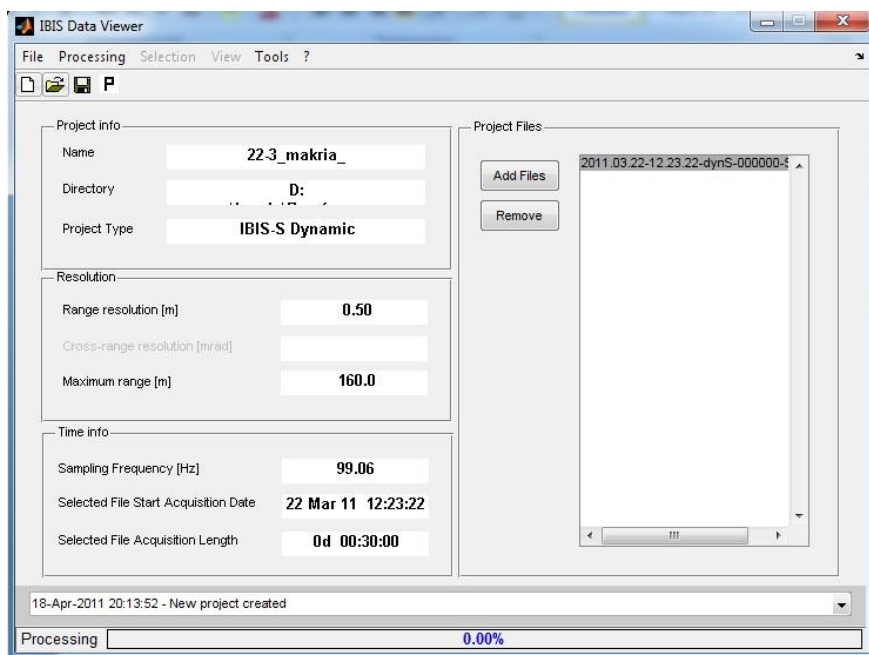
- η ισχύς της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας από την παρατηρούμενη κατασκευή
- η μετατόπιση επιλεγμένων σημείων της παρατηρούμενης κατασκευής
- οι κύριες συχνότητες κίνησης της κατασκευής

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικά τα στάδια επεξεργασία των μετρήσεων.

6.1.2 Δημιουργία νέου project

Αρχικά, δημιουργείται ένα νέο “project” και στη συνέχεια επιλέγεται ο τύπος των δεδομένων καταγραφής – εν προκειμένω, δυναμική καταγραφή.

Στη συνέχεια, δίνεται το όνομα του project, επιλέγεται ο χώρος αποθήκευσής του και επιλέγεται το αρχείο των μετρήσεων που υπόκεινται σε επεξεργασία. Επίσης, σε αυτή τη φάση επαληθεύονται από τον χρήστη βασικές παράμετροι καταγραφής των μετρήσεων – όπως η τιμή της ακτινικής ανάλυσης, της μέγιστης απόστασης καταγραφής, της συχνότητας καταγραφής και η διάρκεια μέτρησης.



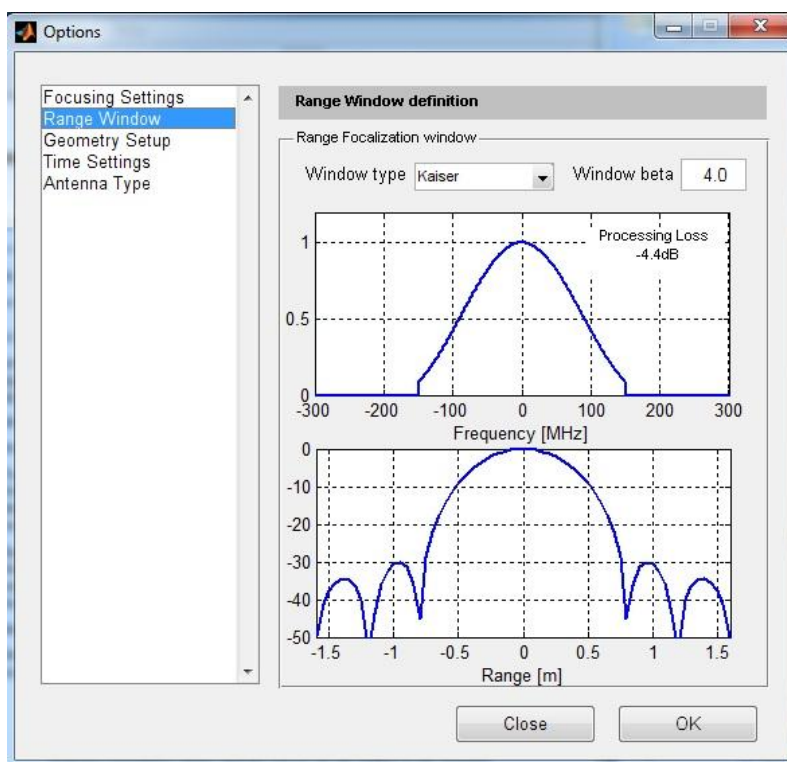
Σχ. 6.1 Οθόνη που εμφανίζεται με την ολοκλήρωση της διαδικασίας δημιουργίας project [IBISDV Software]

Fig. 6.1 Finishing the project creation process [IBISDV Software]

6.1.3 Ορισμός παραμέτρων επεξεργασίας και έναρξη επεξεργασίας δεδομένων

Σε αυτή τη φάση ορίζονται οι βασικές παράμετροι επεξεργασίας των δεδομένων.

Συγκεκριμένα, ορίζεται ο τύπος παραθύρου (“Window type”) καθώς και η τιμή του παραθύρου (“Window beta”) (Σχήμα 6.2).

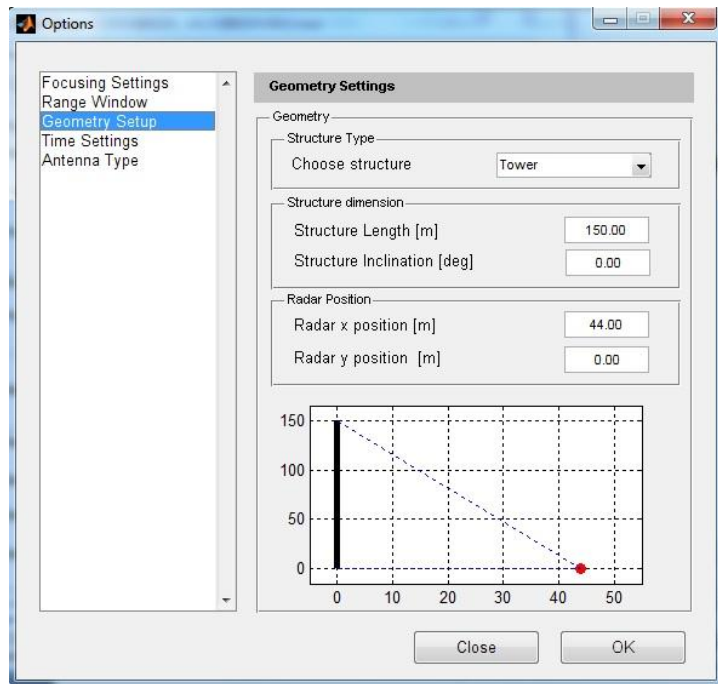


Σχ. 6.2 Επιλογές επεξεργασίας-range window [IBISDV Software]

Fig. 6.2 Processing options-range window [IBISDV Software]

Στη συγκεκριμένη περίπτωση, μετά από διαδοχικές δοκιμές, επιλέγεται τύπος παραθύρου “Kaiser” με τιμή “4”. Με τον τρόπο αυτό, αποδυναμώνεται διαδοχικά η ένταση που λαμβάνεται από σημεία γειτονικά του κεντρικού σημείου σκόπευσης, όπως φαίνεται στο δεύτερο πλαίσιο του Σχήματος 6.2.

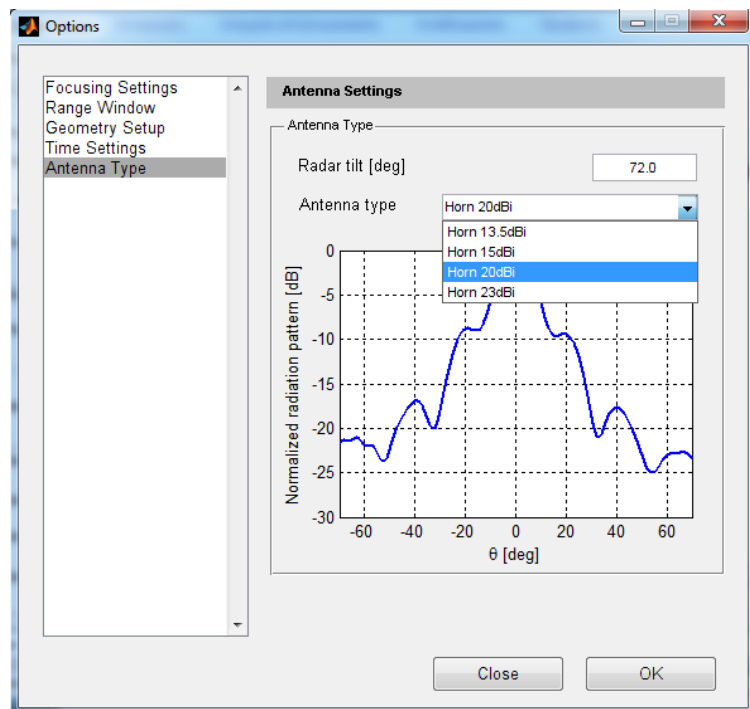
Στη συνέχεια, ορίζεται η σχετική γεωμετρία μεταξύ συστήματος IBIS-S και κατασκευής. Ειδικότερα, επιλέγεται ο τύπος της παρατηρούμενης κατασκευής, ορίζονται οι διαστάσεις της καθώς και η θέση του οργάνου ως προς την κατασκευή. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ορίζεται τύπος κατασκευής “Tower”, μήκος κατασκευής 150 m, κλίση της κατασκευής 0 deg. Επιπλέον, ορίζεται η θέση του οργάνου από τη βάση της κατασκευής (44 m) και υψομετρικά στο ίδιο επίπεδο (Radar y position: 0 m) (Σχήμα 6.3).



Σχ. 6.3 Ορισμός γεωμετρικής διάταξης συστήματος IBIS-S - καπνοδόχου [IBISDV Software]

Fig. 6.3 Geometry settings between IBIS-S and structure [IBISDV Software]

Τέλος, επιλέγοντας “Antenna Type” επιλέγεται, από τη διαθέσιμη λίστα, ο τύπος της κεραίας που χρησιμοποιήθηκε καθώς και η γωνία ύψους του οργάνου κατά την ώρα σκόπευσης της κατασκευής (“Radar tilt”) (Σχήμα 6.4). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ως γωνία ύψους του οργάνου ορίζεται 72 deg και ο τύπος της κεραίας που χρησιμοποιήθηκε είναι “Horn 20dBi”.

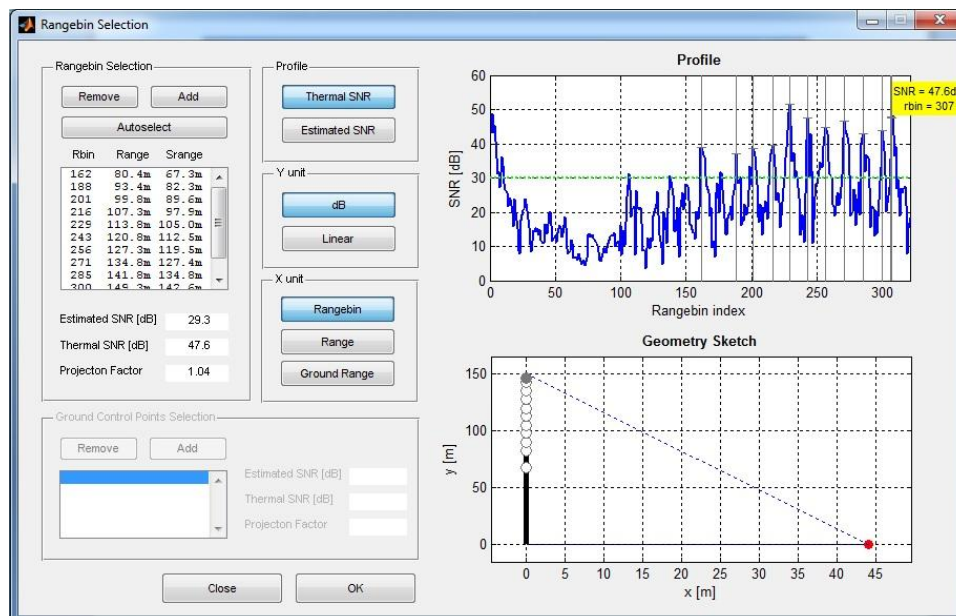


Σχ. 6.4 Επιλογή τύπου κεραίας και γωνίας ύψους μεταξύ οργάνου-καπνοδόχου [IBISDV Software]

Fig. 6.4 Selection of antenna type and radar tilt [IBISDV Software]

6.1.4 Επιλογή συγκεκριμένων σημείων κατασκευής

Ακολουθεί η επιλογή συγκεκριμένων σημείων της κατασκευής μέσω του μενού: “Selection → Rangebin selection”, οπότε εμφανίζεται το Σχήμα 6.5.



Σχ. 6.5 Επιλογή σημείων κατασκευής [IBISDV Software]

Fig. 6.5 Point selection of the structure [IBISDV Software]

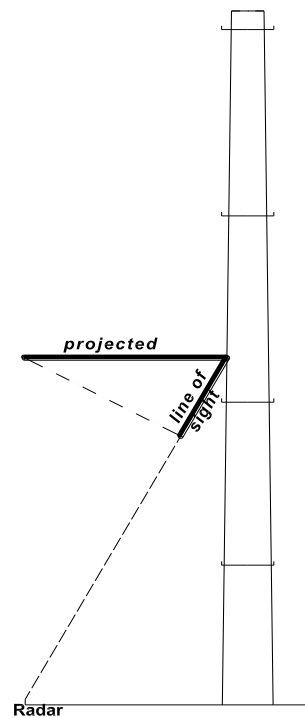
Το διάγραμμα “Profile” (πάνω αριστερά) παρέχει την ένταση του επιστρεφόμενου σήματος. Το διάγραμμα “Geometry Sketch” (κάτω αριστερά) αναπαριστά τη γεωμετρία μεταξύ οργάνου και κατασκευής.

Η επιλογή συγκεκριμένων σημείων της κατασκευής, βασίζεται τόσο στην εκπεμπόμενη από αυτά ακτινοβολία, όσο και στη θέση τους στην κατασκευή. Συγκεκριμένα, τα σημεία που επιλέγονται φαίνονται στο πλαίσιο “Rangebin Selection”, όπου εκτός από στοιχεία αναφορικά με τη θέση (rangebin, απόσταση από το σύστημα) παρέχεται και η εκπεμπόμενη από τα σημεία αυτά ακτινοβολία στο όργανο (“Thermal SNR” / “Estimated SNR”).

Αναλυτικά, με τον όρο “Thermal SNR” περιγράφεται ο λόγος της ισχύος του ληφθέντος σήματος, από συγκεκριμένο σημείο, ως προς τη θερμική ισχύ του αισθητήρα. Ο όρος “Estimated SNR” δίνει το λόγο της μέσης τιμής ως προς την τυπική απόκλιση του πλάτους του σήματος από το εκάστοτε σημείο μέτρησης. Και οι δύο δείκτες εκφράζονται σε dB.

Η επιλογή των καταλληλότερων σημείων της κατασκευής μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα, είτε αυτοματοποιημένα.

Επιπρόσθετα, κάθε επιλεγμένο σημείο χαρακτηρίζεται από την τιμή “Projection Factor” η οποία σχετίζεται με τη σχετική γεωμετρία μεταξύ οργάνου και κατασκευής κατά τη συλλογή των δεδομένων και χρησιμεύει στον υπολογισμό της ανηγμένης, ως προς τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής, μετατόπισης. Συγκεκριμένα, η τιμή “Projection Factor” εκφράζει τον συντελεστή με τον οποίο πολλαπλασιάζεται η παρατηρούμενη τιμή της μετατόπισης (Line of sight), έτσι ώστε να προκύψει η τιμή της μετατόπισης κατά τη διεύθυνση κίνησης της εκάστοτε κατασκευής (Σχήμα 6.6).



Σχ. 6.6 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής

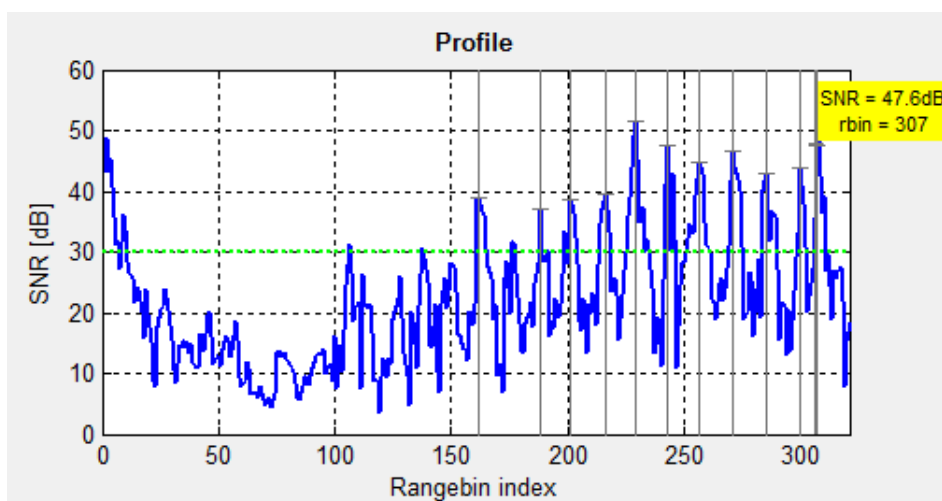
Fig. 6.6 Projected displacement

Από το συγκεκριμένο πείραμα επιλέγονται σημεία με έντονη επιστροφή σήματος. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 6.1 δίνεται το ύψος ως προς τη βάση της καπνοδόχου καθώς και η τιμή του “Thermal SNR” κάθε σημείου που επιλέγεται:

α/α	Ύψος σημείου (m)	Thermal SNR (dB)
1	67.3	39.0
2	82.3	37.1
3	89.6	38.5
4	97.9	39.4
5	105	51.5
6	112.5	47.6
7	119.5	44.6
8	127.4	46.8
9	134.8	43
10	142.6	43.8
11	146.3	47.6

Πίνακας. 6.1 Επιλογή σημείων καπνοδόχου με εκπεμπόμενο σήμα υψηλής έντασης
 Table 6.1 Selection chimney's points with transmitted signal of high power

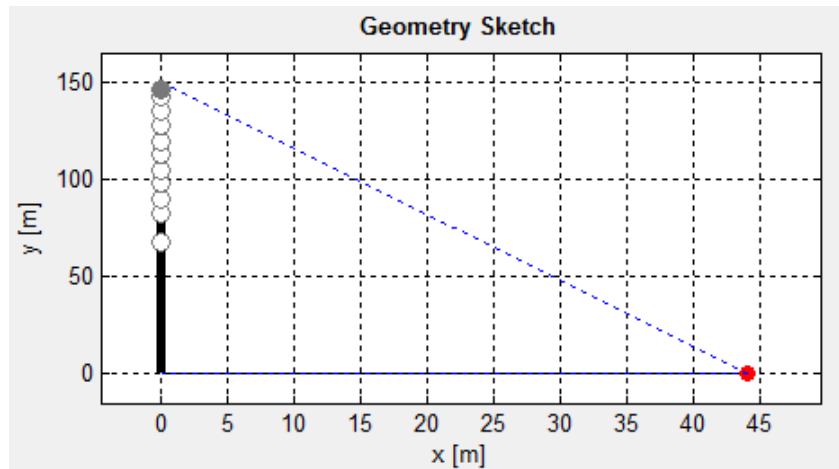
Η επιλογή συγκεκριμένων σημείων της κατασκευής με στόχο την ενδελεχή μελέτη της δυναμικής συμπεριφοράς τους εξαρτάται από τον βαθμό ανακλαστικότητάς τους όπως προκύπτει από τον λόγο σήματος θορύβου (signal to noise ratio). Ειδικότερα, θέσεις που αντιστοιχούν σε κορυφές του διαγράμματος 6.7 αποτελούν υποψήφια σημεία για τα οποία μπορεί να προκύψουν τα κινηματικά τους χαρακτηριστικά με ιδιαίτερη αξιοπιστία.



Σχ. 6.7 Επιλεγμένα σημεία με βάση το διάγραμμα Thermal SNR [IBISDV Software]

Fig. 6.7 Selected points according to the diagram of Thermal SNR [IBISDV Software]

Στο Σχήμα 6.8 φαίνεται η θέση των επιλεγμένων σημείων στην κατασκευή.

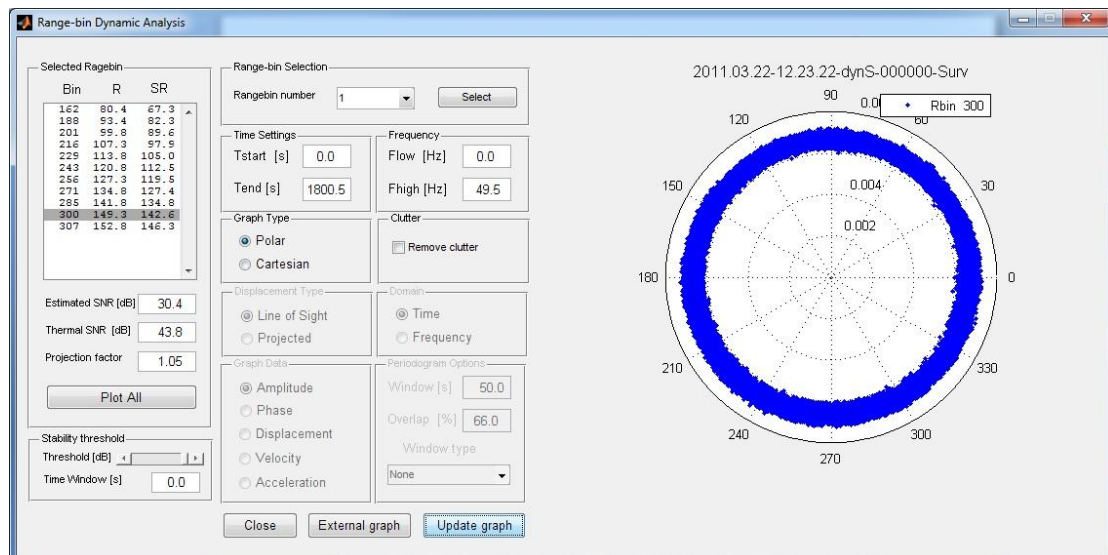


Σχ. 6.8 Σχηματική αναπαράσταση επιλεγμένων σημείων πάνω στην καπνοδόχο [IBISDV Software]

Fig. 6.8 Schematic representation of selected points on the chimney [IBISDV Software]

6.2 Ανάλυση Αποτελεσμάτων

Ακολουθεί η ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς των επιλεγμένων σημείων (Σχήμα 6.9).



Σχ. 6.9 Οθόνη Range-bin Dynamic Analysis [IBISDV Software]

Fig. 6.9 Screen of Range-bin Dynamic Analysis [IBISDV Software]

Στο υπόψη Σχήμα, στο πεδίο “Time Settings” φαίνεται η χρονική διάρκεια της συλλογής των δεδομένων σε sec, από το ξεκίνημα (“Tstart”) έως το τέλος της

(“Tend”). Οι τιμές του συγκεκριμένου πλαισίου αλλάζουν, ανάλογα με το επιθυμητό χρονικό διάστημα παρατήρησης της κατασκευής.

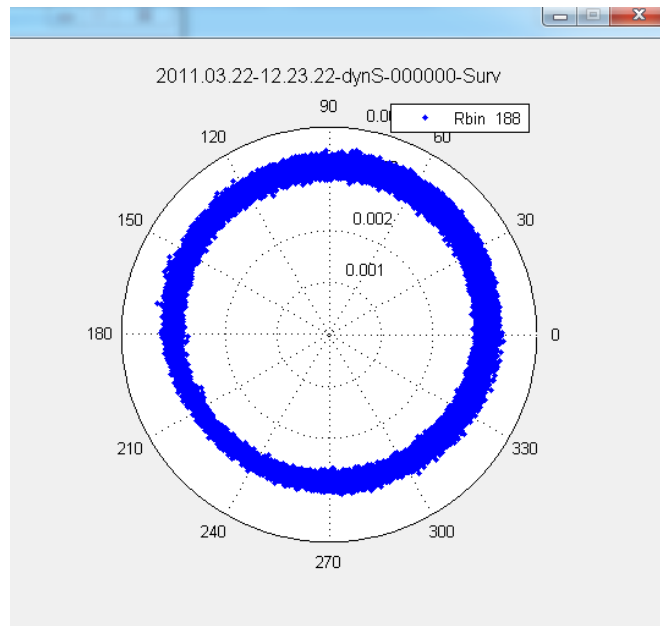
Στο πλαίσιο “Frequency” φαίνεται η ελάχιστη (“Flow”) και η μέγιστη (“Fhigh”) συχνότητα (Hz) που έχει καταγραφεί κατά τη διάρκεια του κυρίως πειράματος. Ως αρχικές τιμές στο συγκεκριμένο πλαίσιο η τιμή Flow ισούται με 0 ενώ η τιμή Fhigh ισούται με το ήμισυ της συχνότητας δειγματοληψίας.

Στο πλαίσιο “Graph Type” ορίζεται ο τύπος του γραφήματος που απεικονίζεται στο διάγραμμα αριστερά. Οι τύποι διαγραμμάτων είναι δύο ειδών:

- το πολικό διάγραμμα (“Polar”)
- το καρτεσιανό διάγραμμα (“Cartesian”)

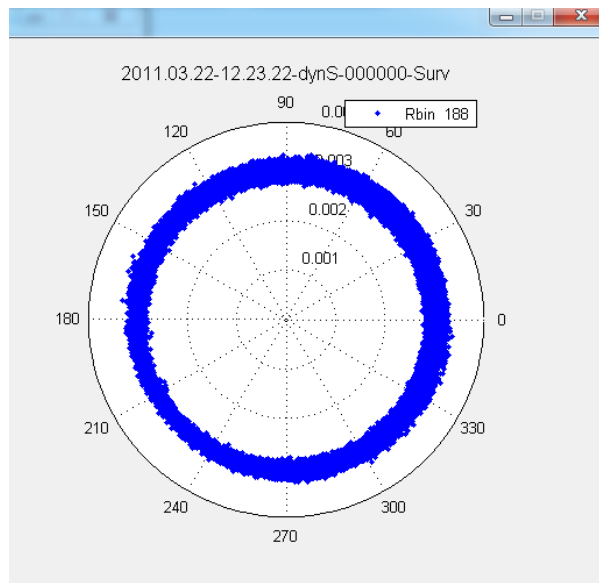
Το πολικό διάγραμμα είναι κυκλικό και η ακτίνα αντιστοιχεί στο εύρος (amplitude) του σήματος, ενώ ο άξονας που απεικονίζεται περιμετρικά του διαγράμματος δείχνει τις τιμές της φάσης του σήματος που παίρνει το συγκεκριμένο σημείο κατά τη μετατόπισή του.

Μέσω του πολικού διαγράμματος εντοπίζονται τα rangebins όπου η παρουσία ενός στατικού (μη κινούμενου) αντικειμένου με ισχυρή ανακλαστικότητα σήματος επηρεάζει την τιμή της φάσης που επιστρέφει από τα κινούμενα στοιχεία (φαινόμενο “Clutter”), όπως καταγράφεται από το σύστημα IBIS-S και επομένως, δίνει λανθασμένα συμπεράσματα ως προς τη μετατόπιση που παρατηρείται στο συγκεκριμένο rangebin. Συγκεκριμένα, όταν ο κύκλος που σχηματίζουν οι τιμές του πολικού διαγράμματος είναι έκκεντρος ως προς το κέντρο του συστήματος των πολικών αξόνων (Σχήμα 6.10), εμφανίζεται το φαινόμενο “clutter” και η αποκατάσταση των μετρήσεων επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής “Remove clutter” στο πλαίσιο “Clutter”. Με τον τρόπο αυτό, ανακτώνται οι σωστές τιμές φάσεως για τα παρατηρούμενα κινούμενα στοιχεία, οπότε καταγράφεται ορθά η μετατόπισή τους (Σχήμα 6.11).



Σχ. 6.10 Εντοπισμός φαινομένου Clutter στο πολικό διάγραμμα [IBISDV Software]

Fig. 6.10 Clutter phenomenon at polar diagram [IBISDV Software]



Σχ. 6.11 Απαλοιφή φαινομένου clutter [IBISDV Software]

Fig. 6.11 Remove clutter function [IBISDV Software]

Για κάθε επιλεγμένο τμήμα της κατασκευής δίνονται από το λογισμικό επεξεργασίας IBISDV στοιχεία για:

- το πλάτος της ανακλώμενης από αυτό ακτινοβολίας (“Amplitude”)
- την τιμή της φάσης του (“Phase”)
- τη μετατόπιση (“Displacement”)

- την ταχύτητα (“Velocity”) καθώς και
- την επιτάχυνση της κίνησής του (“Acceleration”)

Η πληροφορία της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης κάθε στοιχείου της κατασκευής δίνεται είτε επί του σκοπευτικού άξονα του συστήματος IBIS-S (“Line of sight”), είτε ανηγμένη στη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής, ως προς τον σκοπευτικό άξονα (“Projected”).

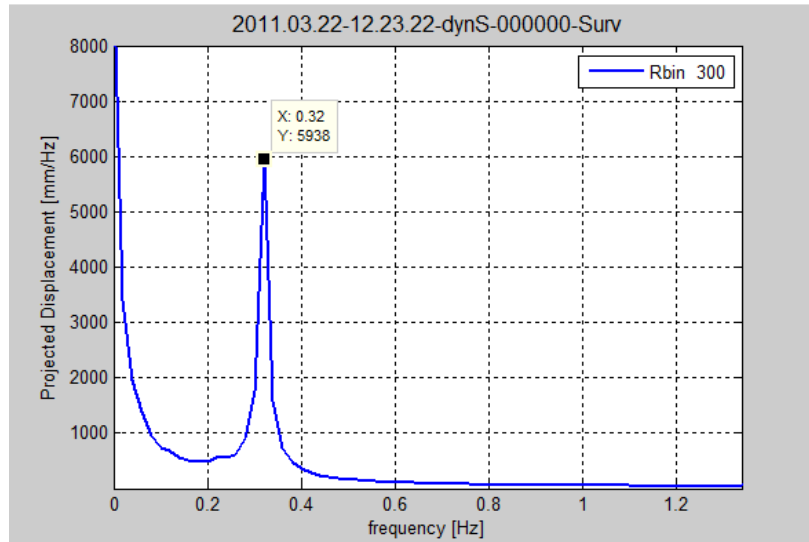
Επιπλέον, μέσω του πλαισίου “Domain”, επιλέγεται σε ποιο πεδίο θα εμφανιστούν τα αποτελέσματα της επεξεργασίας, στο πεδίο του χρόνου (“Time”) ή στο πεδίο των συχνοτήτων (“Frequency”).

Με την επιλογή της εμφάνισης των δεδομένων στο πεδίο των συχνοτήτων ενεργοποιείται το πλαίσιο “Periodogram Options”. Στο συγκεκριμένο πλαίσιο ορίζονται οι παράμετροι διαμόρφωσης του διαγράμματος συχνοτήτων του επιλεγμένου τμήματος της κατασκευής. Αναλυτικά, το διάγραμμα συχνοτήτων απεικονίζει στον άξονα x τις τιμές των συχνοτήτων του προς παρακολούθηση φαινομένου ενώ στον y άξονα απεικονίζεται η επιλεγμένη από το πλαίσιο “Graph Data” ποσότητα. Στο παράθυρο “Window” ορίζονται, σε sec, το χρονικό διάστημα για το οποίο υπολογίζεται το διάγραμμα συχνοτήτων. Τέλος, στο πεδίο “Window type” επιλέγεται ο τύπος του παραθύρου που θα χρησιμοποιηθεί. Οι επιλογές που δίνονται είναι μεταξύ των τύπων παραθύρου “Hanning” και “Kaiser Bessel”.

Από το πλαίσιο “Stability Threshold” δίνεται η δυνατότητα απαλοιφής δεδομένων τα οποία χαρακτηρίζονται από απότομες και μεγάλες διακυμάνσεις του πλάτους της εκπεμπόμενης από αυτά ακτινοβολίας. Το συγκεκριμένο φαινόμενο σχετίζεται με τη διέλευση κινούμενων αντικειμένων μεταξύ του αντικειμένου – στόχου και συστήματος IBIS-S. Συγκεκριμένα, στο παράθυρο “Time Window” ορίζεται το διάστημα στο οποίο εντοπίζονται τα δεδομένα με τις έντονες διακυμάνσεις και των οποίων η ένταση υπερβαίνει την τιμή που ορίζεται στο παράθυρο “Threshold”, οπότε και απαλείφονται.

6.2.1 Εξαγωγή δυναμικών χαρακτηριστικών καπνοδόχου

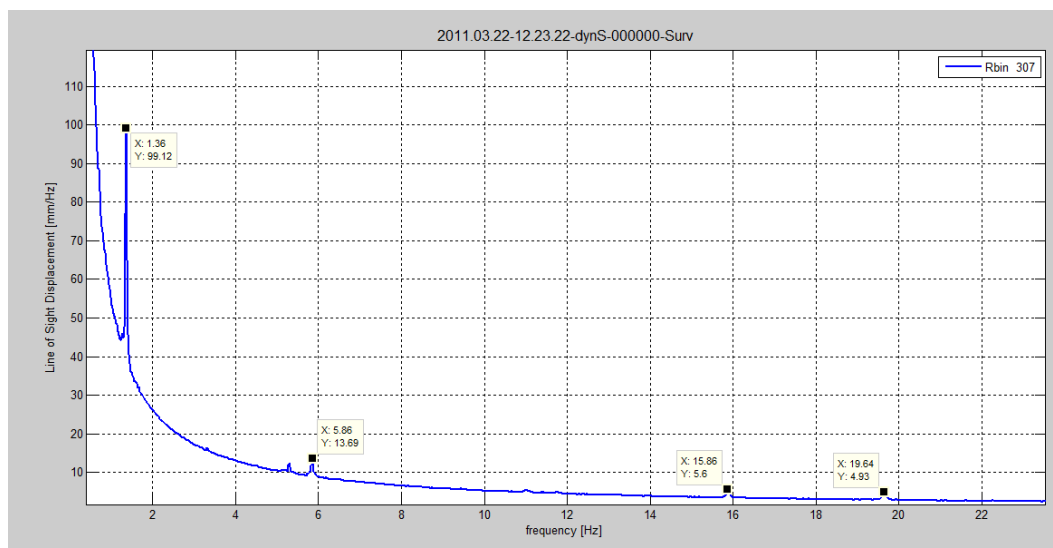
Σύμφωνα με το διάγραμμα συχνοτήτων όλων των επιλεγμένων σημείων της καπνοδόχου, η βασική συχνότητα (ιδιοσυχνότητα) ταλάντωσής της ισούται με 0.32 Hz (Σχήμα 6.12).



Σχ. 6.12 Ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης καπνοδόχου [IBISDV Software]

Fig. 6.12 Resonant frequency of the chimney [IBISDV Software]

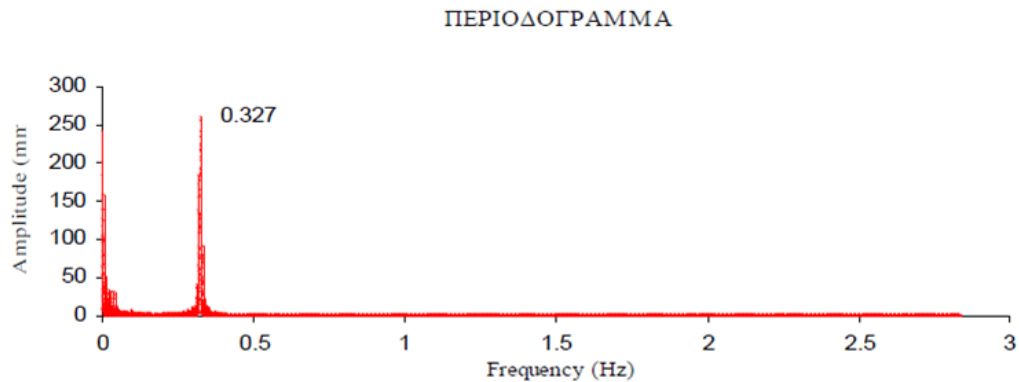
Οι δευτερεύουσες συχνότητες ταλάντωσης που διαμορφώνουν την κίνηση της κατασκευής ισούνται με 1.36 Hz, 5.86 Hz, 15.86 Hz και 19.64 Hz (Σχήμα 6.13).



Σχ. 6.13 Δευτερεύουσες συχνότητες ταλάντωσης καπνοδόχου [IBISDV Software]

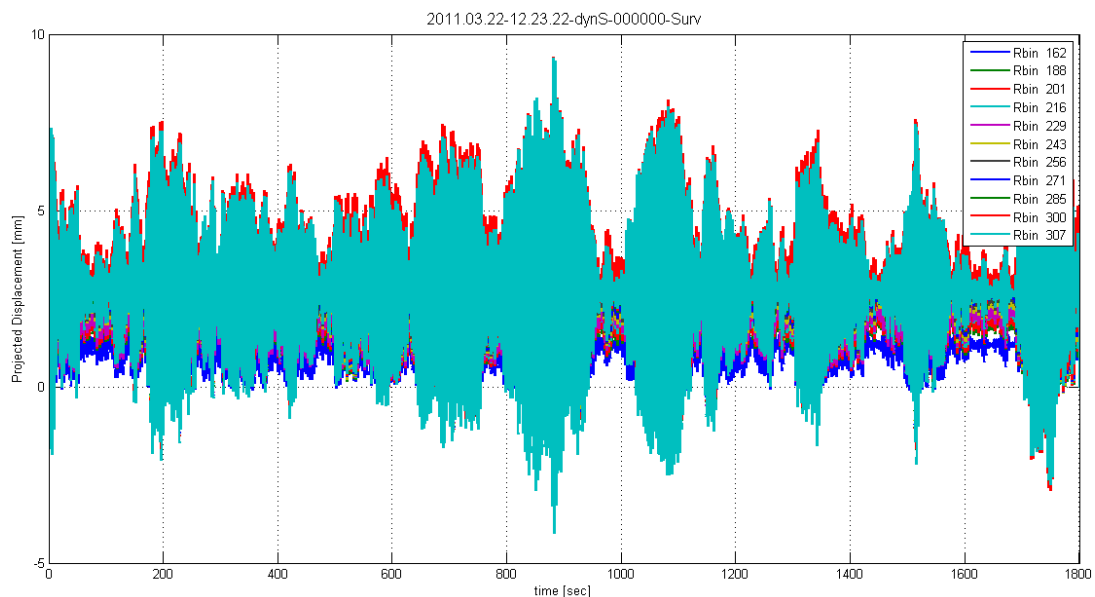
Fig. 6.13 Minor frequencies of the chimney [IBISDV Software]

Από παλαιότερη παρακολούθηση των δυναμικών χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης καπνοδόχου - Μαρितσούδης, 2008 - προκύπτει ότι η τιμή της ιδιοσυχνότητας ταλάντωσης της κατασκευής ισούται με 0.327 Hz (Σχήμα 6.14).

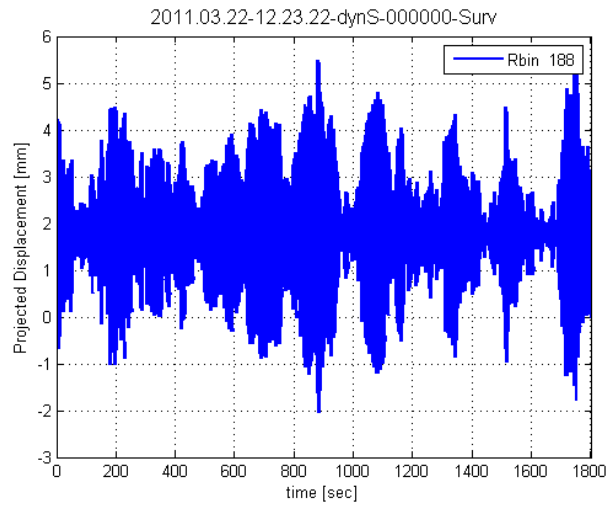
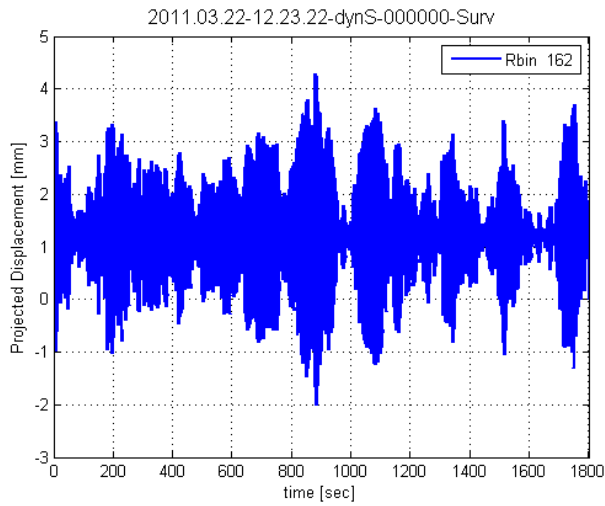


Σχ. 6.14 Ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης καπνοδόχου σύμφωνα με παλαιότερη έρευνα [Μαρितσούδης, 2008]
 Fig. 6.14 Resonant frequency of the chimney according to older research [Maritsoudis, 2008]

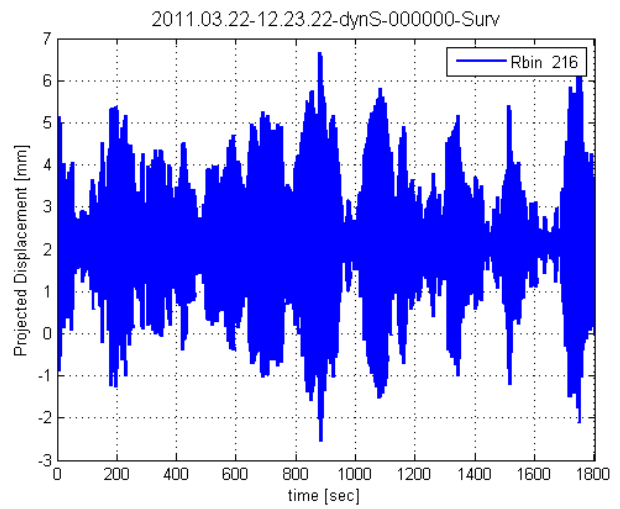
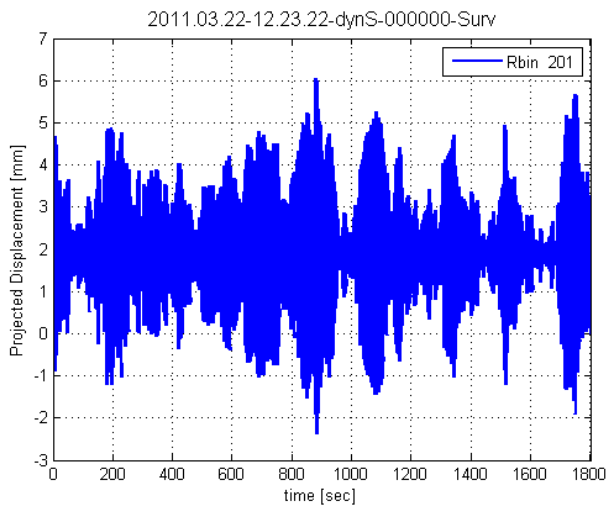
Τα παρακάτω δυναμικά χαρακτηριστικά της κατασκευής εξάγονται στην κύρια συχνότητα ταλάντωσης της. Το Σχήμα 6.15 απεικονίζει τις μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής (“Projected”) όλων μαζί των παρατηρούμενων σημείων. Επιπλέον, δίνονται μεμονωμένα διαγράμματα της αντίστοιχης μετατόπισης για κάθε παρατηρούμενο σημείο της κατασκευής (Σχήματα 6.16 έως 6.21).



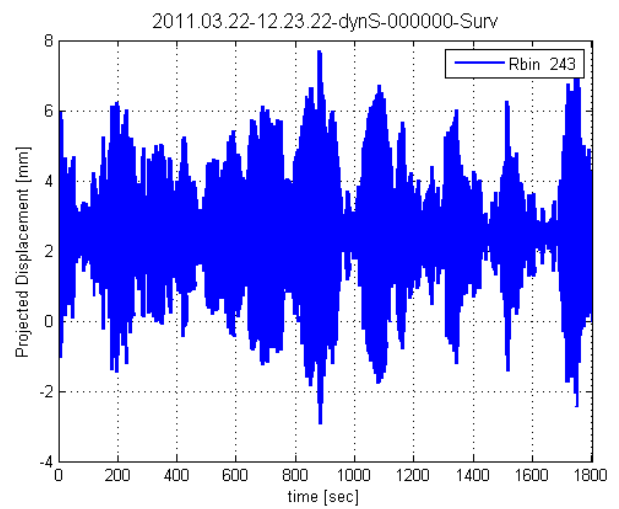
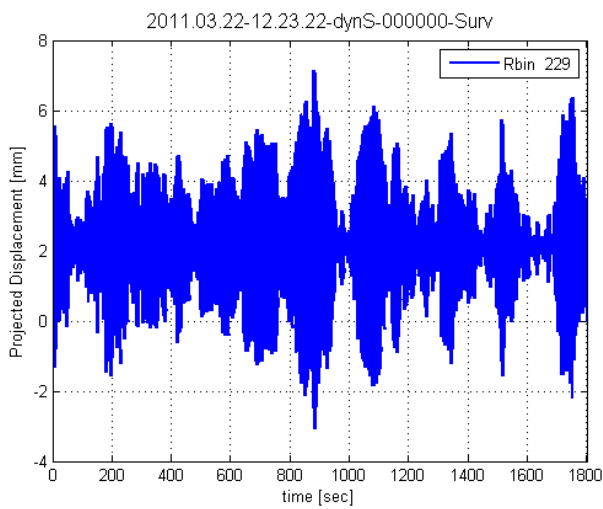
Σχ. 6.15 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής όλων των παρατηρούμενων σημείων της
 Fig. 6.15 Projected displacement of all the selected points of the structure



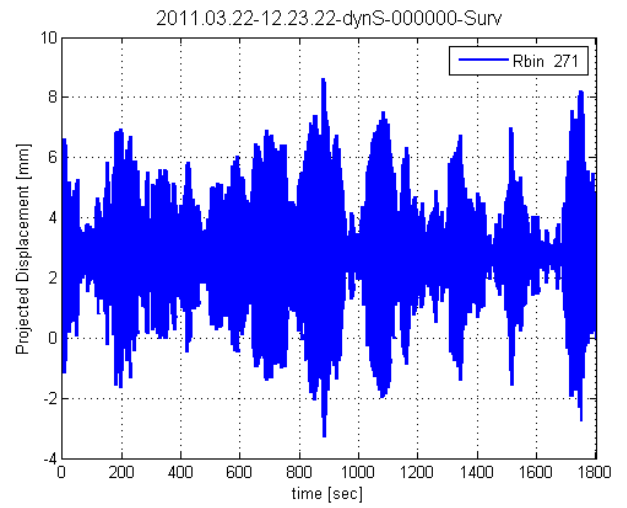
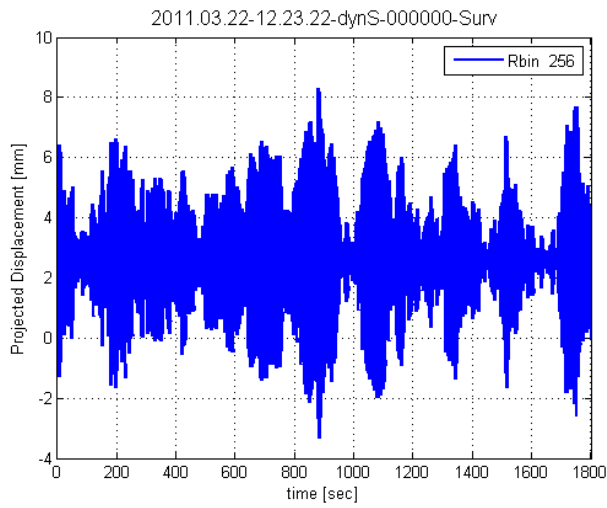
Σχ. 6.16 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με ύψος 61.3 m και 82.3 m
 Fig. 6.16 Projected displacement of points with height 61.3m and 82.3 m



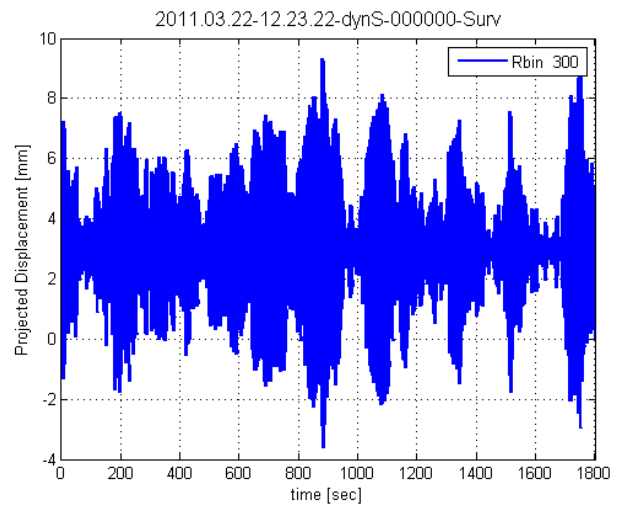
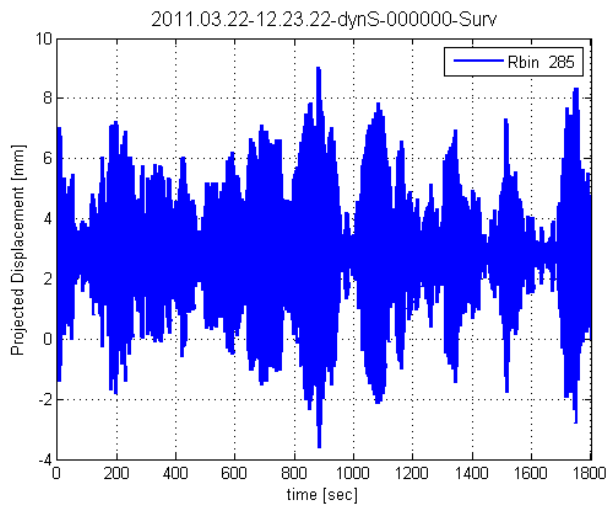
Σχ. 6.17 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με ύψος 89.6 και 97.9 m
 Fig. 6.17 Projected displacement of points with height 89.6 m and 97.9 m



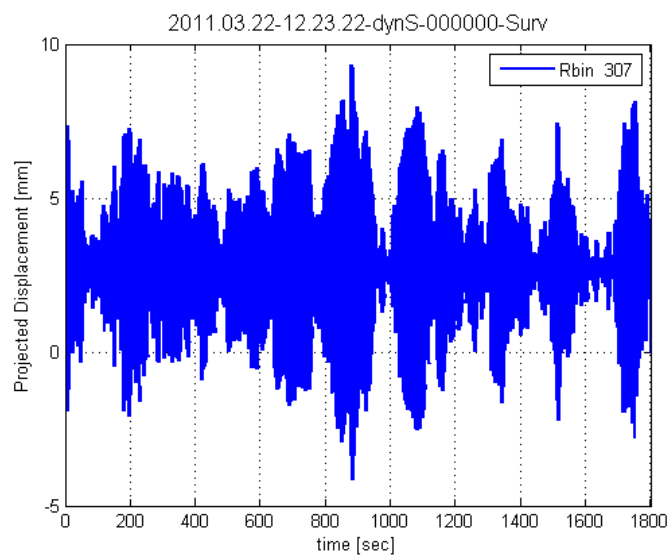
Σχ. 6.18 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με ύψος 105 και 112.5 m
 Fig. 6.18 Projected displacement of points with height 105 m and 112.5 m



Σχ. 6.19 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με ύψος 119.5 και 127.4 m
 Fig. 6.19 Projected displacement of points with height 119.5 m and 127.4 m

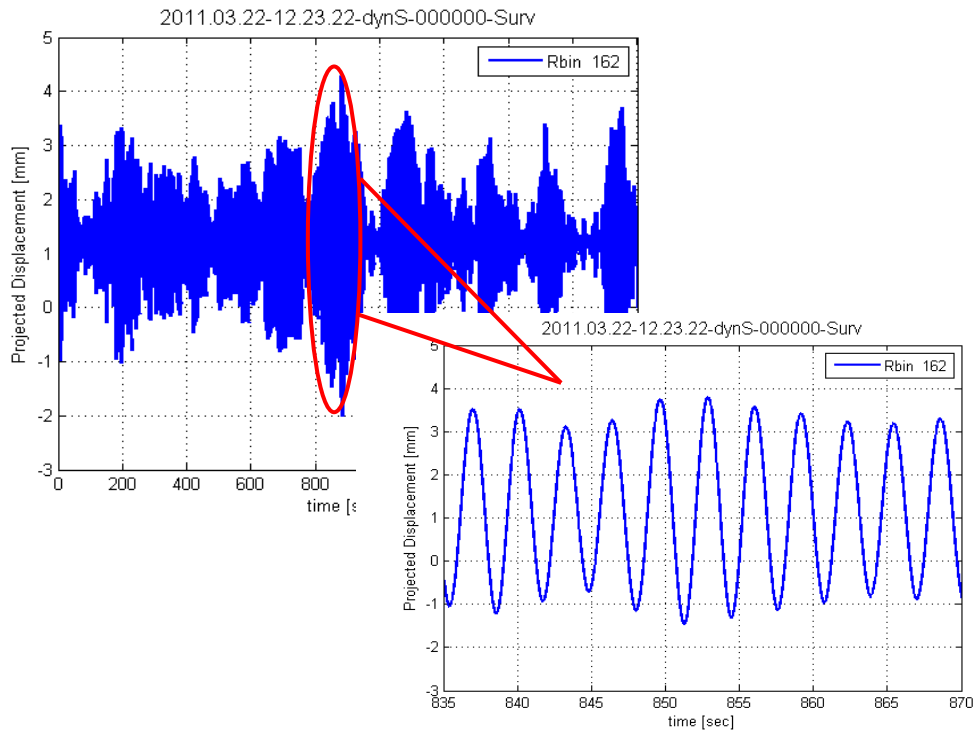


Σχ. 6.20 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με ύψος 134.8 & 142.6 m
 Fig. 6.20 Projected displacement of points with height 134.8 m and 142.6 m

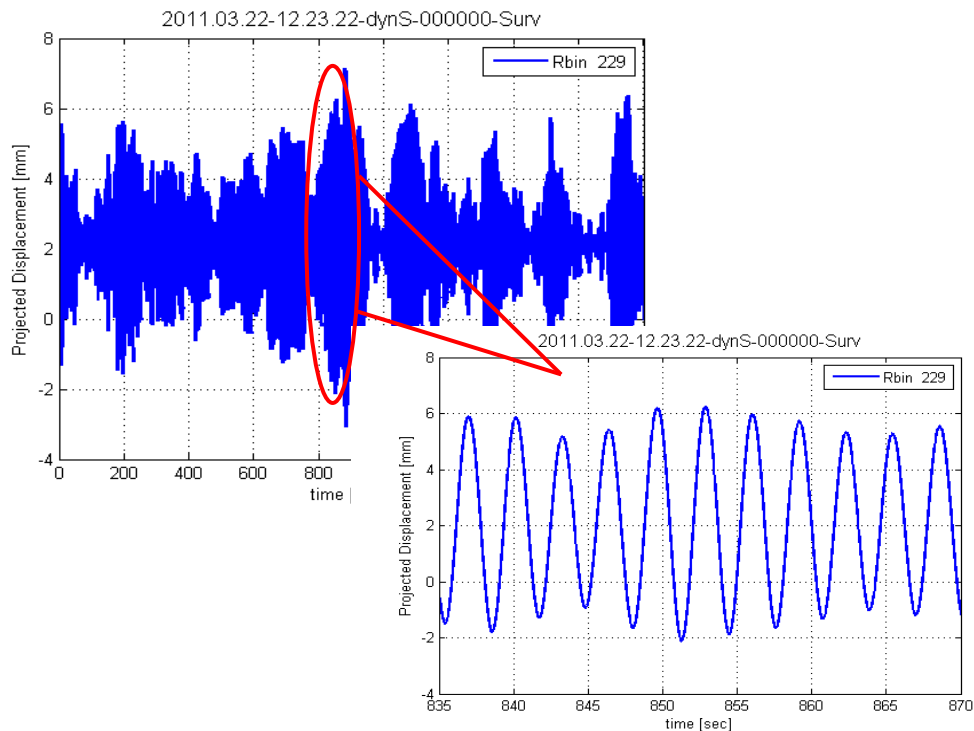


Σχ. 6.21 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείου με ύψος 146.3 m
 Fig. 6.21 Projected displacement of point with height 146.3 m

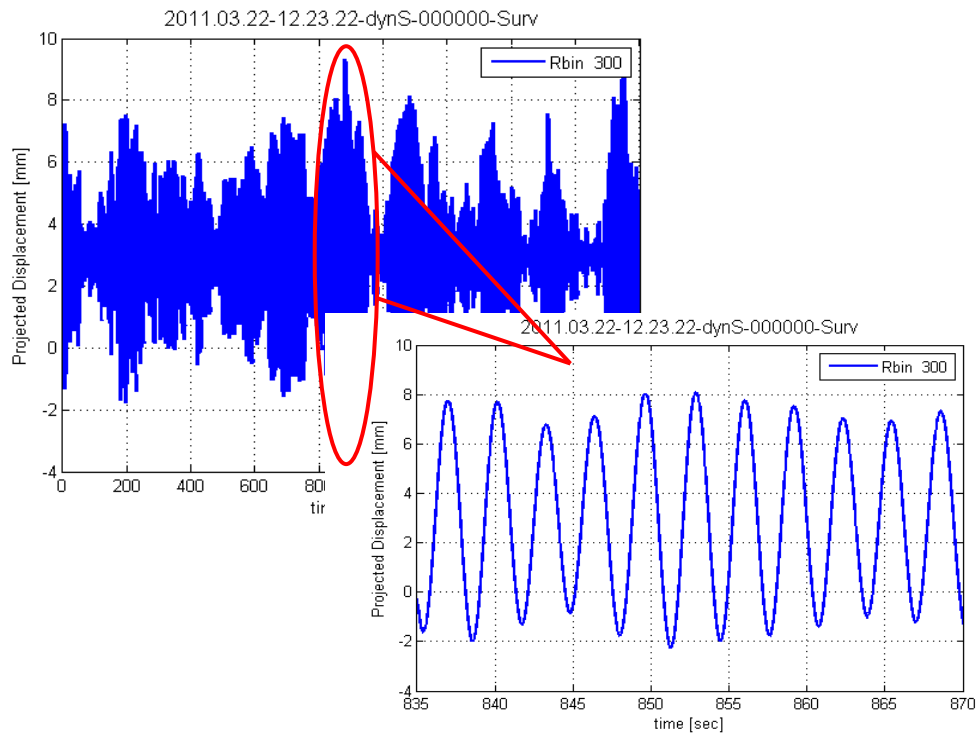
Στη συνέχεια, παρουσιάζονται εστιασμένα τα διαγράμματα μετατόπισης για τρία χαρακτηριστικά σημεία της καπνοδόχου τα οποία, σύμφωνα με τη γεωμετρία της καπνοδόχου, αποτελούν τους τρεις υψηλότερους εξώστες της. Συγκεκριμένα, στα Σχήματα 6.22, 6.23 και 6.24 δίνεται η μετατόπιση στα σημεία - εξώστες (ύψους 67.3 m, 105 m και 142.6 m) για χρονικό διάστημα 35 sec.



Σχ. 6.22 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείου με ύψος 67.3 m από 835 - 870 sec
 Fig. 6.22 Projected displacement of point with height 67.3 m from 835 - 870 sec



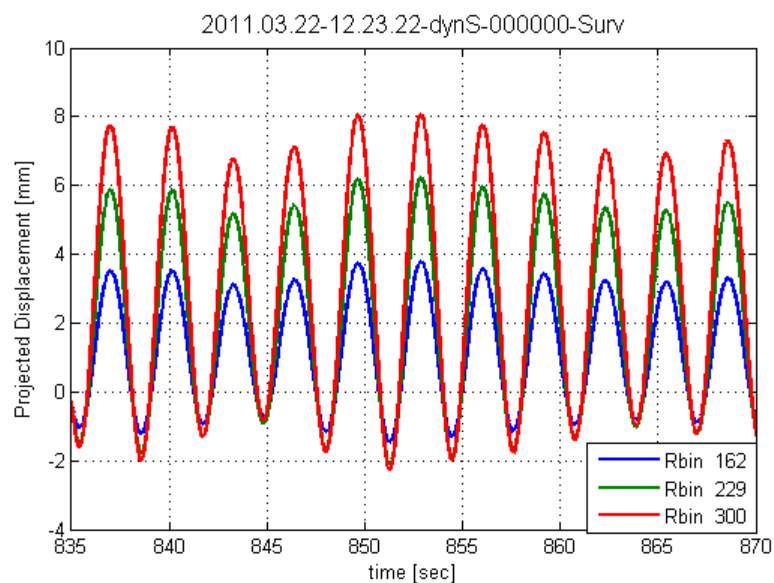
Σχ. 6.23 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείου με ύψος 105 m από 835 - 870 sec
 Fig. 6.23 Projected displacement of point with height 105 m from 835 - 870 sec



Σχ. 6.24 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείου με ύψος 142.6 m από 835 - 870 sec

Fig. 6.24 Projected displacement of point with height 142.6 m from 835 - 870 sec

Συγκεντρωτικά οι μετατοπίσεις των τριών σημείων για το χρονικό διάστημα από 835 – 870 sec δίνεται στο Σχήμα 6.25. Παρατηρείται ότι κατά την ίδια χρονική περίοδο παρατήρησης τα σημεία που βρίσκεται ψηλότερα στην κατασκευή εμφανίζουν μεγαλύτερη μετατόπιση σε σχέση με τα χαμηλότερου υψομέτρου σημεία.



Σχ. 6.25 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με ύψος 67.3 m, 105 m και 142.6 m από 835 - 870 sec

Fig. 6.25 Projected displacement of point with height 67.3 m, 105 m and 142.6 m from 835 - 870 sec

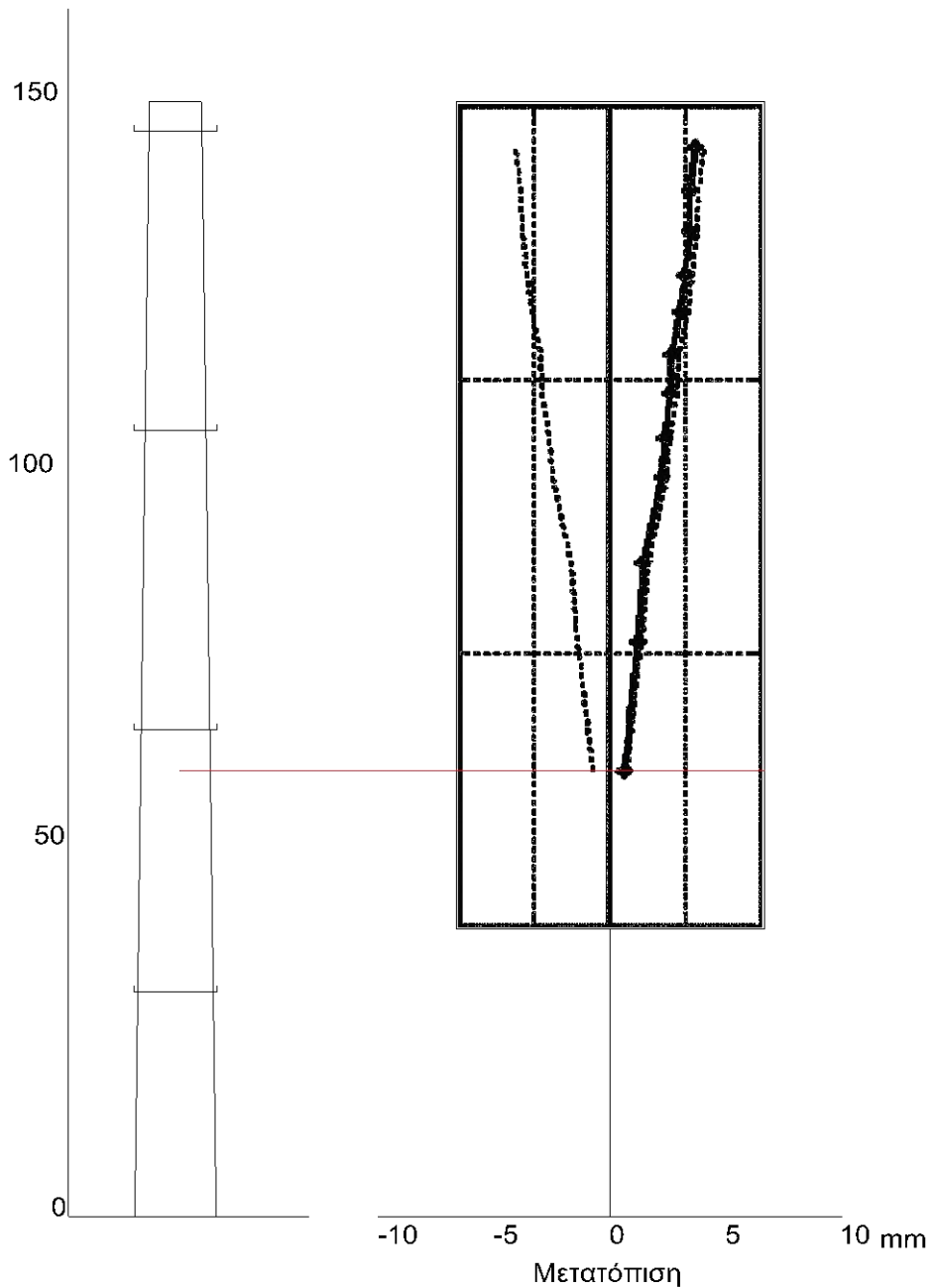
Στον Πίνακα 6.2 δίνονται οι τιμές της μετατόπισης, της ταχύτητας και της επιτάχυνσης – τόσο κατά τη διεύθυνση σκόπευσης (“Line of sight”), όσο και την ανηγμένη στη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής (“Projected”) – για κάθε επιλεγμένο τμήμα της κατασκευής.

α/α	Ύψος Σημείου από βάση καπνοδόχου (m)	Παρατηρήσεις	Line of Sight	Projected
1	67.3	Εύρος Μετατόπισης (mm)	5.27	6.29
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	4.67	5.58
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	5.58	6.66
2	82.3	Εύρος Μετατόπισης (mm)	6.64	7.52
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	6.24	7.07
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	7.78	8.82
3	89.6	Εύρος Μετατόπισης (mm)	7.57	8.44
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	7.03	7.83
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	8.65	9.64
4	97.9	Εύρος Μετατόπισης (mm)	8.39	9.20
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	7.78	8.53
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	11.08	12.15
5	105	Εύρος Μετατόπισης (mm)	9.42	10.20
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	8.48	9.19
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	10.02	10.86
6	112.5	Εύρος Μετατόπισης (mm)	9.91	10.64
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	9.13	9.80
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	10.28	11.03
7	119.5	Εύρος Μετατόπισης (mm)	10.89	11.60
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	9.94	10.59
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	12.25	13.05
8	127.4	Εύρος Μετατόπισης (mm)	11.24	11.89
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	10.41	11.01
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	12.41	13.12
9	134.8	Εύρος Μετατόπισης (mm)	12.01	12.63
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	10.95	11.52
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	14.28	15.02
10	142.6	Εύρος Μετατόπισης (mm)	12.37	12.94
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	11.35	11.87
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	14.82	15.51
11	146.3	Εύρος Μετατόπισης (mm)	12.89	13.47
		Μέγιστη Ταχύτητα (mm/s)	11.47	11.98
		Μέγιστη Επιτάχυνση (mm/s ²)	16.47	17.20

Πίνακας. 6.2 Τιμές μετατόπισης, ταχύτητας, επιτάχυνσης επιλεγμένων σημείων

Table 6.2 Displacement, velocity and acceleration of selected points

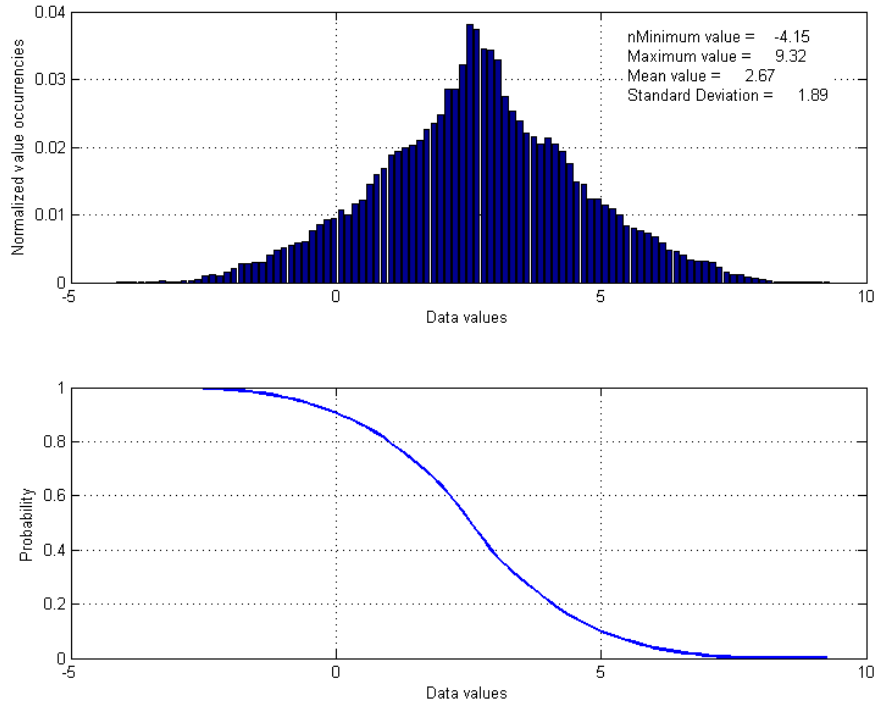
Στο Σχήμα 6.26 δίνεται παραστατικά η μετατόπιση των σημείων της καπνοδόχου με υψόμετρο από 67.3 m έως 146.3 m στο χρονικό διάστημα παρατήρησης μεταξύ 1745 και 1754 sec. Χαρακτηριστικό είναι ότι τα σημεία μετατοπίζονται ταυτόχρονα, με εύρος μετακίνησης ανάλογο του ύψους τους.



Σχ. 6.26 Μετατόπιση κατά τη διεύθυνση κίνησης της κατασκευής σημείων με ύψος από 67.3 m έως 146.3 m για χρονικό διάστημα παρατήρησης από 1745 - 1754 sec

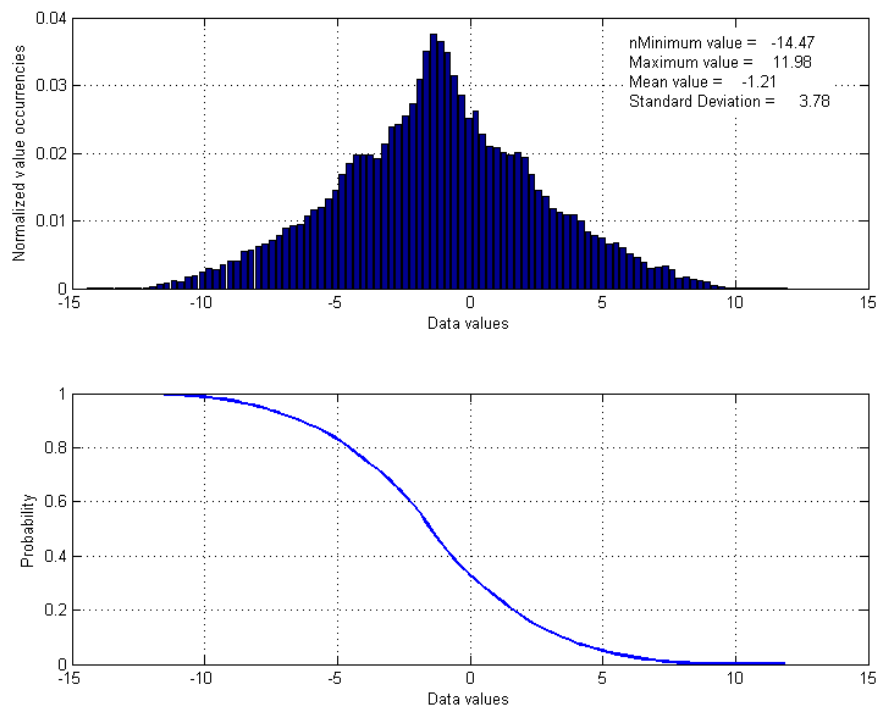
Fig. 6.26 Projected displacement of point with height from 67.3 m up to 146.3 m from period time between 1745 - 1754 sec

Παρακάτω, δίνονται ενδεικτικά τα ιστογράμματα της μετατόπισης (Projected) (Σχήμα 6.27), της ταχύτητας (Σχήμα 6.28) και της επιτάχυνσης (Σχήμα 6.29) του υψηλότερου σημείου της κατασκευής (146.3 m).



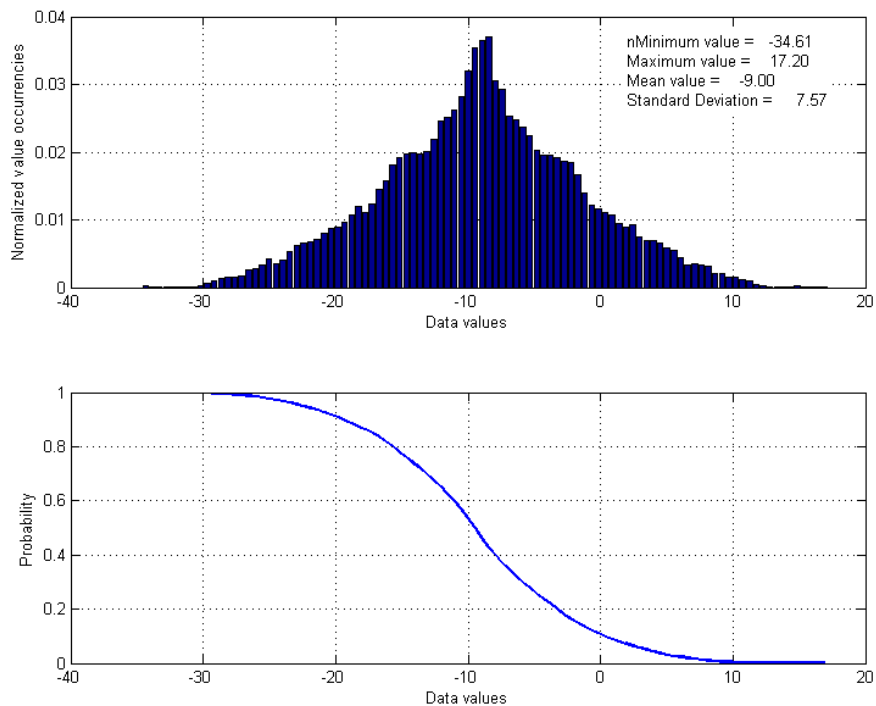
Σχ. 6.27 Ιστόγραμμα projected μετατόπισης σημείου με ύψος 146.3 m

Fig. 6.27 Histogram of projected displacement of point with height 146.3 m



Σχ. 6.28 Ιστόγραμμα projected ταχύτητας σημείου με ύψος 146.3 m

Fig. 6.28 Histogram of projected velocity of point with height 146.3 m



Σχ. 6.29 Ιστογράμμα projected επιτάχυνσης σημείου με ύψος 146.3 m

Fig. 6.29 Histogram of projected acceleration of point with height 146.3 m

Τα ιστογράμματα και για τα τρία μεγέθη (μετατόπιση, ταχύτητα, επιτάχυνση) ακολουθούν κανονική κατανομή γύρω από τη μέση τιμή. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου ότι η ομοιόμορφη κατανομή των μετρήσεων γύρω από μία μέση τιμή είναι χαρακτηριστικό της φύσης των γεωδαιτικών δεδομένων και οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η δυναμική συμπεριφορά της καπνοδόχου είναι ομοιόμορφη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν κατά την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς της υψηλής καπνοδόχου στον ΑΗΣ Λαυρίου με το σύστημα IBIS-S. Συγκεκριμένα, παρατίθενται συμπεράσματα σχετικά με το σύστημα παρακολούθησης IBIS-S καθώς και σχετικά με την κινηματική συμπεριφορά της καπνοδόχου. Επιπλέον, παρατίθενται καταρχήν σκέψεις για περαιτέρω διερεύνηση των συμπερασμάτων που προκύπτουν.

7.2 Συμπεράσματα

7.2.1 Αναφορικά με το σύστημα παρακολούθησης IBIS-S

Επιβεβαιώνεται η δυνατότητα του συστήματος IBIS-S να παρακολουθεί την κινηματική συμπεριφοράς κατασκευών κατακόρυφης διάταξης, όπως η καπνοδόχος, χωρίς την τοποθέτηση ανακλαστήρων πάνω στην κατασκευή.

Επιπλέον, διαπιστώνεται η δυνατότητα ταυτόχρονης παρακολούθησης της κινηματικής συμπεριφοράς διαφορετικών σημείων της κατασκευής από το σύστημα IBIS-S, όταν αυτά είναι τοποθετημένα σε διαφορετικές αποστάσεις από αυτό. Συνεπώς, για την παρακολούθηση των επιθυμητών σημείων του στόχου απαιτείται προσεκτική τοποθέτηση του συστήματος IBIS-S ως προς την κατασκευή – στόχο. Για τον σκοπό αυτό, πριν τη συλλογή των δεδομένων στο συγκεκριμένο πείραμα υπολογίζεται η σχετική γεωμετρία μεταξύ συστήματος IBIS-S και καπνοδόχου μέσω του υπολογιστικού φύλλου του Excel.

Τέλος, με το σύστημα IBIS-S καταγράφεται η κινηματική συμπεριφορά της κατασκευής κατά τη διεύθυνση σκόπευσής της. Επομένως, για την εκτίμηση της πραγματικής κινηματικής της συμπεριφοράς απαιτείται εκ των προτέρων η γνώση της διεύθυνσης κίνησης της κατασκευής, ώστε τα μετρημένα μεγέθη να αναχθούν στα πραγματικά.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η χρήση του συστήματος IBIS-S με σκοπό την παρακολούθηση των κινηματικών χαρακτηριστικών της καπνοδόχου αποδεικνύεται εύκολη, γρήγορη, αποτελεσματική και αξιόπιστη.

7.2.2 Αναφορικά με τη δυναμική συμπεριφορά της καπνοδόχου

Η κινηματική συμπεριφορά της καπνοδόχου εμφανίζεται ομαλή, καθώς η μετατόπιση που παρατηρείται είναι ανάλογη του ύψους του εκάστοτε σημείου. Συγκεκριμένα, όσο πιο ψηλά επί της καπνοδόχου βρίσκεται το παρατηρούμενο σημείο, τόσο πιο μεγάλο είναι το εύρος της κίνησής του (μετατόπιση) κάτι το οποίο είναι και το αναμενόμενο. Αναλυτικά, το μέγιστο εύρος της οριζόντιας μετατόπισης του υψηλότερου επιλεγμένου προς παρατήρηση σημείου της καπνοδόχου ισούται με 1.347cm, ενώ στο χαμηλότερο σημείο ισούται με 0.629cm.

Επιπλέον, συνολικά το παρατηρούμενο τμήμα της καπνοδόχου εμφανίζει ομοιόμορφη κίνηση καθώς καθ' όλη τη διάρκεια της παρατήρησης, αφού όλα τα παρατηρούμενα σημεία κινούνται προς την ίδια κάθε φορά κατεύθυνση.

Η κύρια συχνότητα ταλάντωσης της καπνοδόχου ισούται με 0.32 Hz. Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα συμφωνεί με την κύρια συχνότητα ταλάντωσης της καπνοδόχου η οποία έχει υπολογιστεί από την διπλωματική εργασία του φοιτητή Μαριτσούδη Δημήτρη (2008) και η οποία ισούται με 0.33 Hz. Στη διπλωματική εργασία του Δ. Μαριτσούδη, πραγματοποιήθηκε παρατήρηση της οριζοντιογραφικής μετατόπισης της καπνοδόχου του ΔΕΘ/ΑΗΣ Λαυρίου με τη χρήση του ρομποτικού γεωδαιτικού σταθμού αυτόματης αναγνώρισης και παρακολούθησης στόχου Leica TCA 1800, η συχνότητα δειγματοληψίας του οποίου κυμαίνεται μεταξύ 4.5 και 5.5 Hz. Δεδομένου ότι τα δεδομένα της δεν είναι χρονικά ισαπέχοντα, η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με περιοδόγραμμα Lomb.

7.3 Προτάσεις Για Περαιτέρω Διερεύνηση

Ακολουθούν ορισμένες προτάσεις προκειμένου να διερευνηθούν περαιτέρω τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης μελέτης.

Συγκεκριμένα, σχετικά με τον έλεγχο του συστήματος παρακολούθησης IBIS-S προτείνεται:

- η χρήση εναλλακτικών μεθοδολογιών και αισθητήρων για την παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου, με σκοπό τον έλεγχο των αποτελεσμάτων που προκύπτουν μέσω του συστήματος IBIS-S και τη συνδυαστική επεξεργασία των μετρήσεων
- η σύγκριση αποτελεσμάτων με θεωρητικά μοντέλα κίνησης της καπνοδόχου, όπως προκύπτουν από αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης και όχι από πραγματικές μετρήσεις.

Σχετικά με την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την κινηματική συμπεριφορά της καπνοδόχου προτείνεται:

- η συσχέτιση της κινηματικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου με τις ανεμολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή μελέτης κατά τη διάρκεια παρατήρησης της κατασκευής. Απαραίτητα δεδομένα για τη συσχέτιση κρίνονται η ταχύτητα και η κατεύθυνση (σε γωνία) του ανέμου
- η συνεχής παρακολούθηση της κινηματικής συμπεριφοράς της καπνοδόχου για τουλάχιστον 24 ώρες, ώστε να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με τα κινηματικά της χαρακτηριστικά σε μεταβολές ανέμου και θερμοκρασίας του περιβάλλοντος
- η ανάλυση / αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με σκοπό την παραγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων σχετικά με το πρόγραμμα συντήρησης της συγκεκριμένης καπνοδόχου
- η περαιτέρω αξιολόγηση των αποτελεσμάτων σε συνεργασία με ειδικούς με σκοπό τη βελτίωση του τρόπου σχεδιασμού αντίστοιχων κατασκευών.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΓΕΩΜΕΤΡΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ IBIS-S ΚΑΙ ΚΑΠΝΟΔΟΧΟΥ

A1 Γενικά

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται το υπολογιστικό φύλλο Excel το οποίο δημιουργήθηκε για τον εκ τω προτέρων υπολογισμό χαρακτηριστικών στοιχείων της γεωμετρικής διάταξης μεταξύ του συστήματος IBIS-S και της εκάστοτε κατασκευής. Τα γεωμετρικά στοιχεία της εκάστοτε κατασκευής καθώς και ο προσανατολισμός σκόπευσης του οργάνου εισάγονται ως δεδομένα στο υπολογιστικό φύλλο. Ως αποτελέσματα εξάγονται στοιχεία σχετικά με τη σχετική θέση του συστήματος IBIS-S και της κατασκευής.

A2 Περιγραφή Υπολογιστικού Φύλλου Excel

Στο Σχήμα Παραρτήματος 1 φαίνεται η μορφή του υπολογιστικού φύλλου.

Αρχικά εισάγονται δεδομένα καθώς και μετρημένα στοιχεία όπως:

- η γωνία ανοίγματος του λοβού της εκάστοτε χρησιμοποιούμενης κεραίας σε οριζόντιο επίπεδο (Hz antenna angle)
- η γωνία ανοίγματος του λοβού της αντίστοιχης κεραίας σε κατακόρυφο επίπεδο (V antenna angle)
- η οριζόντια απόσταση μεταξύ οργάνου και κατασκευής (Hz dist from target)
- το ύψος οργάνου (Y.O.)

Ακολουθούν 3 επιλογές ως προς το ποιο από τα υπόλοιπα στοιχεία της γεωμετρικής διάταξης μεταξύ οργάνου και κατασκευής είναι το στοιχείο το οποίο θα θεωρείται εξ αρχής γνωστό. Τα στοιχεία μεταξύ των οποίων επιλέγεται ποιο θα θεωρείται γνωστό είναι:

- η κεκλιμένη απόσταση μεταξύ οργάνου και στόχου (S)

- η γωνία ύψους του οργάνου ως προς το σημείο σκόπευσης της κατασκευής (β)
- το ύψος του επιθυμητού σημείου σκόπευσης επί της κατασκευής ως προς το οριζόντιο επίπεδο (Υ.Σ. μέση)

H22		f_x	
1			
2	Δεδομένα	Hz antenna angle (°) =	17
3		V antenna angle (°) =	15
4			
5	Μετρήσεις	Hz dist from target (m) =	44
6		Υ.Ο. (m) =	1.2
7			
8			
9		ΓΝΩΣΤΑ	ΥΠΟΛΟΓΙΣΩ
10			β angle antenna-target(°) = 71.95
11			Υ.Σ. μέση (m) = 136.2
12			Δοριζόντια(m) = 47.0
13			Υ.Σ. πάνω (m) = 237.4
14			δΥπάνω(m) = 101.2
15			Υ.Σ. κάτω (m) = 93.2
16			δΥκάτω(m) = 43.0
17	ή		
18		S from target (m) =	142
19			
20		β angle antenna-target(°) =	72
21			1.26
22			
23			
24	ή		
25			
26		Υ.Σ. μέση (m) =	141
27			139.8
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			

Σχήμα Παραρτήματος Α1: Υπολογισμός στοιχείων γεωμετρικής διάταξης οργάνου – κατασκευής μέσω υπολογιστικού φύλλου Excel

Appendix Table A1: Calculation of geometry between radar and structure with Excel

Αφού πραγματοποιηθεί η επιθυμητή επιλογή, ανάλογα με το τι είναι ευκολότερα γνωστό, εισάγεται στο υπολογιστικό φύλλο η τιμή της και ακολουθεί ο υπολογισμός των υπόλοιπων γεωμετρικών στοιχείων μεταξύ οργάνου και κατασκευής.

Στο Σχήμα Παραρτήματος 1, ανάλογα με το ποιο είναι το γεωμετρικό στοιχείο που θεωρείται γνωστό, δίνονται δεξιά του τα γεωμετρικά στοιχεία που υπολογίζονται κάθε φορά. Με τον τρόπο αυτό, όποιο από τα 3 γεωμετρικά στοιχεία επιλεγεί να θεωρηθεί γνωστό, εισάγοντας την τιμή του στο υπολογιστικό φύλλο του Excel, υπολογίζονται αυτόματα τα υπόλοιπα δύο.

Τα υπόλοιπα γεωμετρικά στοιχεία που υπολογίζονται στις τρεις παραπάνω περιπτώσεις είναι:

- το μήκος που αντιστοιχεί στη γωνία ανοίγματος της κεραίας κατά το κατακόρυφο επίπεδο από το οποίο το όργανο λαμβάνει επιστροφή σήματος με απώλεια -3dB ή -10dB, ανάλογα με τον τύπο κεραίας που έχει επιλεγεί (δΥπάνω+δΥκάτω)
- το μήκος που αντιστοιχεί στη γωνία ανοίγματος της κεραίας κατά το οριζόντιο επίπεδο από το οποίο το όργανο λαμβάνει επιστροφή σήματος με απώλεια -3dB ή -10dB, ανάλογα με τον τύπο κεραίας που έχει επιλεγεί (Δοριζόντια)
- το ύψος του σημείου που αντιστοιχεί στο κάτω άκρο του τμήματος της κατασκευής από το οποίο το όργανο λαμβάνει επιστροφή σήματος με απώλεια -3dB ή -10dB (Υ.Σ.κάτω) και
- το ύψος του σημείου που αντιστοιχεί στο επάνω άκρο του τμήματος της κατασκευής από το οποίο το όργανο λαμβάνει επιστροφή σήματος με απώλεια -3dB ή -10dB (Υ.Σ.πάνω)

Τα παραπάνω γεωμετρικά στοιχεία που υπολογίζονται μέσω του υπολογιστικού φύλλου του Excel δίνονται στο Σχήμα 5.1.

Οι υπολογισμοί των γεωμετρικών αυτών στοιχείων βασίζονται, ανάλογα με το στοιχείο που θεωρείται κάθε φορά γνωστό, στους τριγωνομετρικούς υπολογισμούς του Πίνακα Παραρτήματος 1:

		<u>Γνωστό γεωμετρικό στοιχείο</u>		
		S from target	β angle antenna-target	Υ.Σ.μέση
<u>Υπολογιζόμενα γεωμετρικά στοιχεία</u>	S from target	---	$\frac{Hz}{\cos \beta}$	$\sqrt{Υ.Σ.μέση^2 + Hz^2}$
	β angle antenna-target	$\cos^{-1}\left(\frac{Hz}{S}\right)$	---	$\tan^{-1}\left(\frac{Υ.Σ.μέση}{Hz}\right)$
	Υ.Σ.μέση	$\sqrt{S^2 - Hz^2} + Υ.Ο.$	$Hz \cdot \tan \beta + Υ.Ο.$	---
	Δοριζόντια	$\sqrt{S^2 - Hz^2} - Hz \cdot \tan\left[\cos^{-1}\left(\frac{Hz}{S}\right)\right] - \frac{Hz_{ant}}{2}$	$Hz \cdot \tan \beta - \tan\left(\beta - \frac{Hz_{ant}}{2}\right)$	$Υ.Σ.μέση - Hz \cdot \tan\left[\cos^{-1}\left(\frac{Hz}{\sqrt{Hz^2 + Υ.Σ.μέση^2}}\right) - \frac{Hz_{ant}}{2}\right]$
	Υ.Σ.πάνω	$Hz \cdot \tan\left(\beta + \frac{V}{2}\right) + Υ.Ο.$	$Hz \cdot \tan\left(\beta + \frac{V}{2}\right) + Υ.Ο.$	$Hz \cdot \tan\left(\beta + \frac{V}{2}\right) + Υ.Ο.$
	δΥπάνω	Υ.Σ.πάνω - Υ.Σ.μέση	Υ.Σ.πάνω - Υ.Σ.μέση	Υ.Σ.πάνω - Υ.Σ.μέση
	Υ.Σ.κάτω	$Hz \cdot \tan\left(\beta - \frac{V}{2}\right) + Υ.Ο.$	$Hz \cdot \tan\left(\beta - \frac{V}{2}\right) + Υ.Ο.$	$Hz \cdot \tan\left(\beta - \frac{V}{2}\right) + Υ.Ο.$
	δΥκάτω	Υ.Σ.μέση - Υ.Σ.κάτω	Υ.Σ.μέση - Υ.Σ.κάτω	Υ.Σ.μέση - Υ.Σ.κάτω

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΔΕΘ/ΑΗΣ ΚΕΡΑΤΕΑΣ - ΛΑΥΡΙΟΥ

B1 Γενικά

Στην ενότητα αυτή δίνεται το ολοκληρωμένο τοπογραφικό διάγραμμα του ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου, αφού συνοδεύεται από το αναλυτικό του υπόμνημα (Σχήμα Παραρτήματος Β1).

ΤΟΠΟΓΡΑΦΙΚΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΛΑΥΡΙΟΥ



- | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Μηχανοστάσιο Μονάδας I 2. Μηχανοστάσιο Μονάδας II 3. Λεβητοστάσιο Μονάδας I 4. Λεβητοστάσιο Μονάδας II 5. Καπνοδόχος Μονάδας I 6. Καπνοδόχος Μονάδας II 7. Ενδιάμεσος σταθμός περισυλλογής βιομηχανικών αποβλήτων 8. Δεξαμενή (100 m³) και Αντλιοστάσιο Diesel 9. Αεροσυμπιεστές 10. Παραγωγή Υδρογόνου 11. Αντλιοστάσιο Νερού Ψύξης Μονάδων 1,2,3 & 4 12. Ηλεκτρολογικός χώρος υδροληψίας 13. Χλωριωτές - Δεξαμενές υποχλωριώδους Νατρίου 14. Παραγωγή χλωρίου - Δεξαμενή υποχλωριώδους Νατρίου 15. Κύριος και Βοηθητικός Μ/Σ Μονάδας I 16. Κύριος και Βοηθητικός ΜΣ Μονάδας II 17. Υποσταθμός 150 kV 18. Υποσταθμός 400 kV 19. Υποσταθμός 20 kV τοπικής διανομής 20. Α-Μ/Σ 400/150 kV 21. Κύριο επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων 22. Αποθήκες 23. Κύριο επεξεργασίας πετρελαίου καύσης 24. Αντλιοστάσιο Πετρελαίου 25. Δεξαμενές Diesel (I, II) 26. Δεξαμενές Μαζούτ (III - VII) 27. Αποκλειστική τάφρος ψυκτικού νερού | <ol style="list-style-type: none"> 28. Διοικητήριο 29. Χώροι υγιεινής - Αποδυτήρια 30. Χημείο 31. Κύριο αφαλάτωσης νερού 32. Αποστακτήρες θαλασσινού νερού 33. Δεξαμενές νερού 34. Δεξαμενή αφαλατωμένου νερού 35. Κύριο διύλισης νερού 36. Κύριο εγκαταστάσεων αφαλάτωσης 37. Αποθήκη 38. Μηχανουργείο - Ηλεκτρολογείο 39. Αποθήκη 40. Αποθήκη 41. Συνεργείο Οχημάτων - Αποθήκη 42. Ξυλουργείο - Βαφείο 43. Εσπαστόριο - Καντίνα 44. Ξενονάς 45. Αποθήκη 46. Αρχαίο Χυτήριο Αργυρούχου Μολύβδου 47. Εγκατάσταση Βιολογικού Καθαρισμού 48. Προβλήτα 49. Δεξαμενές Νερού 50. Κύριο γραφείων 51. Χώρος στάθμευσης οχημάτων 52. Κύρια Είσοδος 53. Αίθουσα Αεριοστροβίλων Μονάδας IV 54. Αεριοστροβίλος Νο 1 55. Αεριοστροβίλος Νο 2 56. Αεριοστροβίλος Νο 3 57. Κύριο Ελέγχου Αεριοστροβίλων 58. Αίθουσα Ατμοστροβίλων - Μηχανοστάσιο 59. Κύριο ελέγχου Μονάδας IV 60. Παρακαμπτήριο Καπνοδόχοι 61. Λέβητες ανακτίσεως θερμότητας (A, B, C) | <ol style="list-style-type: none"> 62. Καπνοδόχοι Λεβήτων 63. Κύριο Γεννήτριας Ανάγκης (Black Start Diesel) 64. Κύριοι και Βοηθητικοί Μ/Σ Μονάδας IV 65. Υποσταθμός κλειστού τύπου 400kV (GIS) 66. Αίθουσα Ατμοστροβίλων - Μηχανοστασίου Μονάδας & Κύριο Ελέγχου Μονάδας III 67. Λέβητας Ανακτίσεως Θερμότητας Νο 1, Μονάδας III 68. Καπνοδόχος λέβητα Νο 1 Μονάδας III 69. Αεριοστροβίλος Νο 1, Μονάδας III 70. Αεριοστροβίλος Νο2, Μονάδας III 71. Λέβητας Ανακτίσεως Θερμότητας Νο 2, Μονάδας III 72. Καπνοδόχος λέβητα Νο 2, Μονάδας III 73. Κύριοι και Βοηθητικοί Μ/Σ Μονάδας III 74. Δεξαμενές Αφαλατωμένου νερού 75. Δεξαμενές Diesel και Αντλιοστάσιο Diesel 76. Αντλιοστάσιο νερού αναπλήρωσης, Water Injection και Αντλίες διαβροχής Μ/Σ 77. Αντλιοστάσιο Diesel 78. Κύριο Μηχανολογικής Συντήρησης 79. Κύριο σταθμού σύνδεσης με ΔΕΓΠΑ 80. Σταθμοί Υποθιθασμού πίεσης - Μέτρησης Φυσικού Αερίου |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Σχήμα Παραρτήματος Β1: Ολοκληρωμένο τοπογραφικό διάγραμμα (με υπόμνημα) ΔΕΘ/ΑΗΣ Κερατέας - Λαυρίου [έντυπο υλικό από ΔΕΗ ΑΕ]

Appendix Table B1: Topographic chart of the steam-electric power plant of Lavrio [printed matter from DEI Co]

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ

D. Balageas – C.Fritzen - A. Güemes, (2006), Structural Health Monitoring, ISTE, Great Britain

Σ. Δασκαλάκης – Β.Γκίκας, (2008), Παρακολούθηση και Ανάλυση Δυναμικής Συμπεριφοράς Μεταλλικών Κατασκευών με Χρήση Γεωδαιτικής Μεθοδολογίας, Αθήνα

Δ. Μαριτσούδης (2008), Παρακολούθηση δυναμικής συμπεριφοράς της υψηλής καπνοδόχου του ΑΗΣ Λαυρίου της ΔΕΗ Α.Ε., ΕΜΠ, Αθήνα

G. Armer, (2001), Monitoring and assessment of structures, SpoN Press, Boston

C. Gentile – G. Bernardini – P. Ricci, (2008), Operational Modal Analysis of a cable-stayed bridge from conventional and radar-based measurements, 7th European Conference on Structural Dynamics, Milan

C. Gentile, (2009), Radar-based measurement of deflections on bridges and large structures: advantages, limitations and possible applications, IV ECCOMAS Thematic Conference on Smart Structures and Materials

G. Bernardini - C. Gentile – P. Ricci, A new interferometric radar for full-scale testing of bridges: 1.Radar techniques and static tests, Italy

C. Gentile - G. Bernardini, Application of radar technology to deflection measurements and OMA of bridges, Italy

L. Varshney, (2002), Technical Report – Radar Principles, Syracuse Research Corporation, North Syracuse, NY

Χ. Αργυριάδης – Ε. Μπονατάκη, (2006), Ένταξη Μονάδων Φυσικού Αερίου στο Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτροπαραγωγής: Αναδρομή – Τεχνολογίες, 1^η Διεθνής Έκθεση Ενέργειας – Πηγές, Τεχνολογίες, Διαχείριση, Αθήνα

<http://www.hbm.com>

<http://earth.esa.int>

<http://en.wikipedia.org>

<http://www.radartutorial.eu>

<http://www.sensors.crd.gr>

<http://users.sch.gr>