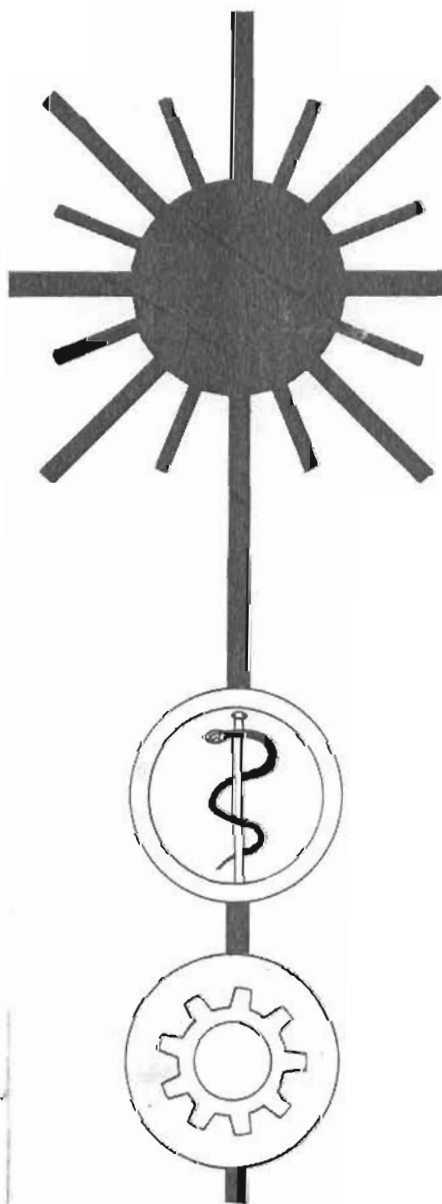




7^ο

ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ
ΣΥΝΕΔΡΙΟ



Laser

&

Εφαρμογές

25-27 ΜΑΗ 1989 ΑΘΗΝΑ

ΣΥΝΔΡΟΜΗ: ΕΜΠ - ΠΑ - ΕΙΕ - ΕΛΚΕΠΑ - ΕΚΕΦΕ 'Α' - SOPHIS - BC

ΣΥΛΛΟΓΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΕΝΑ LASER DOPPLER ANEMOMETRO

Β. Σακελλάρης, Σ.Β. Παράς και Α.Ι. Καράμπελας
Ερευνητικό Ινστιτούτο Τεχνικής Χημικών Διεργασιών και
Τμήμα Χημικών Μηχανικών
Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
540 06 ΘΕΣΣ/ΝΙΚΗ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία αυτή έχει σαν αντικείμενο την ανάπτυξη λογισμικού (software) για τη συλλογή, αποθήκευση και επεξεργασία πειραματικών δεδομένων από ένα Laser Doppler ανεμόμετρο (LDA). Το μετρούμενο μέγεθος είναι η τοπική χρονικά μεταβαλλόμενη ταχύτητα ροής ενός ρευστού.

Τα πειραματικά δεδομένα των μετρήσεων μεταφέρονται από το LDA σε μικρο-υπολογιστή και αποθηκεύονται. Στα δεδομένα αυτά (που είναι σημεία μιάς ασυνεχούς και τυχαίας δειγματοληψίας, με ρυθμό που επιβάλλεται από το ίδιο το πείραμα) εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος "ανακατασκευής", με τον οποίο επιδιώκεται η αναπαραγωγή, όσο το δυνατόν πιο πιστά, της πραγματικής μορφής του μετρούμενου μεγέθους. Στη συνέχεια, το ανακτηθέν σήμα υποβάλλεται σε στατιστική επεξεργασία (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, συντελεστές λοξότητας και κυρτότητας, συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας). Υπολογίζονται επίσης η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης (autocorrelation function) και το φάσμα συχνοτήτων (power spectrum). Όλα τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αυτής είναι δυνατό να παρουσιασθούν σε μορφή διαγραμμάτων στην οθόνη του υπολογιστή καθώς επίσης και στον εκτυπωτή ή σε plotter.

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας και καλής λειτουργίας του λογισμικού, τροφοδοτήθηκαν δεδομένα ενός "συνθετικού" σήματος. Διαπιστώθηκε η ιδιαίτερα ικανοποιητική συμφωνία των αποτελεσμάτων του προγράμματος με τα θεωρητικά αναμενόμενα.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνική της μέτρησης ταχύτητας ρευστών, Laser Doppler Anemometry (LDA) βασίζεται στην αρχή της μετατόπισης της συχνότητας ακτινοβολίας laser που προσπίπτει σε κινούμενο αντικείμενο (φαινόμενο Doppler) και είναι γνωστή από το 1964 (Drain, 1980). Η συχνότητα μιάς ανακλώμενης δέσμης από ένα σωματίδιο που κινείται μαζί με το ρευστό, είναι ανάλογη του εσωτερικού γινομένου της διαφοράς των

διανυσμάτων της προσπίπτουσας και ανακλώμενης δέσμης επί το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου (Buchhave and George, 1979).

Η μεταβολή της συχνότητας f_D (Doppler shift) είναι δυνατό να μετρηθεί απ' ευθείας μόνο για ιδιαίτερα μεγάλες ταχύτητες. Στην πράξη χρησιμοποιείται είτε η μέθοδος της δέσμης αναφοράς (Reference beam mode), είτε συνήθεστερα η διαφορική μέθοδος ή μέθοδος των κροσσών συμβολής (differential or fringe mode), όπου γίνεται χρήση και μιάς δεύτερης δέσμης laser. Οι δύο αυτές δέσμες οδηγούνται στην επιφάνεια ενός φωτοανιχνευτή, του οποίου το σήμα εξόδου περιέχει τη μεταβολή της συχνότητας (Doppler shift) (φαινόμενο ετεροδύναμης).

Η μέθοδος των κροσσών συμβολής πήρε το όνομά της από τους κροσσούς που σχηματίζονται στην τομή των δύο ακτίνων laser που αποτελεί το "μετρητικό όγκο" του συστήματος. Η εστίαση των ακτίνων και η απομάκρυνση ανεπιθύμητου φωτός laser ανακλώμενου από περιοχές έξω από τον μετρητικό όγκο, καθώς και φωτός του περιβάλλοντος, πραγματοποιείται από το οπτικό σύστημα του οργάνου.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα της μεθόδου, έναντι της μέχρι τώρα σχεδόν αποκλειστικά χρησιμοποιουμένης για μετρήσεις ταχύτητας μεθόδου του "θερμού σύρματος" (hot wire anemometry), είναι το γεγονός ότι η μέτρηση γίνεται χωρίς να εισάγονται διαταραχές στο υπό μελέτη πεδίο ροής από το μετρητικό όργανο.

Με τις μεθόδους μέτρησης που αναφέρθηκαν, όπου χρησιμοποιείται ένα ζεύγος ακτίνων laser, μπορεί να μετρηθεί μόνο μία συνιστώσα της ταχύτητας - εκείνη που βρίσκεται στο επίπεδο των δύο ακτίνων, και είναι κάθετη στη διχοτόμο της σχηματιζόμενης γωνίας τους. Στις περιπτώσεις που απαιτείται ο ταυτόχρονος προσδιορισμός όλων των συνιστωσών της ταχύτητας το πρόβλημα λύνεται με τη χρήση και άλλων ακτίνων laser διαφορετικού χρώματος ή διαφορετικού επιπέδου πόλωσης (DISA, 1982). Με κατάλληλο συνδυασμό ακουστικο-οπτικής και ηλεκτρονικής μετατόπισης της συχνότητας των ακτίνων (frequency shifting), είναι δυνατή η μέτρηση ταχύτητας ακόμη και σε περιοχές που αυτή αλλάζει πρόσημο (DISA, 1982).

Μεγάλη σημασία για την εφαρμογή της μεθόδου, έχει το μέγεθος των σωματιδίων που ανακλούν το φως. Τα σωματίδια αυτά θα πρέπει να είναι αρκετά μικρά για να ακολουθούν πιστά τη ροή, αλλά συγχρόνως και αρκετά μεγάλα για να διασκορπίζουν αρκετό φως για τη σωστή λειτουργία του φωτοανιχνευτή και του επεξεργαστή σήματος.

Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα, που δημιουργούνται στις μετρήσεις με LDA, είναι ότι οι μετρήσεις της ταχύτητας δεν γίνονται συνεχώς αλλά μόνον όταν διέρχονται τα κατάλληλα σωματίδια από τον μετρητικό όγκο. Η μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται ένα σωματίδιο για να διασχίσει το μετρητικό όγκο (ή ένα ορισμένο αριθμό κροσσών συμβολής μέσα σ' αυτόν) είναι ισοδύναμη με τη μέτρηση της ταχύτητας, εφ' όσον είναι καθορισμένη (από το οπτικό σύστημα και το μήκος κύματος

λ του laser) η απόσταση των κροσσών συμβολής (Buchhave and George, 1979). Επομένως, η μέτρηση της ταχύτητας γίνεται με μεταβαλλόμενο ρυθμό συλλογής δεδομένων, που καθορίζεται από την πιθανότητα άφιξης ενός σωματιδίου στον μετρητικό όγκο.

Το γεγονός ότι τα σωματίδια διασχίζουν τον μετρητικό όγκο με ένα ρυθμό ανάλογο με τη στιγμιαία ταχύτητα προκαλεί αποκλίσεις (bias), όταν οι στατιστικές ποσότητες υπολογίζονται απ'ευθείας από τα συγκεντρωμένα σημεία του δείγματος (Buchhave and George, 1979; Durao et al, 1980). Έτσι, για τυρβώδη ροή με ομοιόμορφη κατανομή σωματιδίων, σε περιόδους με σχετικά υψηλή ταχύτητα γίνονται περισσότερες μετρήσεις σε σύγκριση με περιόδους με μικρότερη ταχύτητα. Αν η μέση τιμή της ταχύτητας του δείγματος υπολογισθεί αθροίζοντας τις ταχύτητες όλων των σωματιδίων που μετρήθηκαν και διαφώντας με τον αριθμό των σωματιδίων, θα είναι μεγαλύτερη από την πραγματική μέση τιμή, θα παρουσιάζει δηλαδή κάποια απόκλιση προς τις υψηλότερες τιμές της ταχύτητας (McLaughlin and Tiederman, 1973; Adams et al, 1984).

Ο ρυθμός συλλογής δεδομένων μπορεί επίσης να επηρεάζεται από διακυμάνσεις στη συγκέντρωση των σωματιδίων λόγω διακυμάνσεων πυκνότητας, από ανάμιξη διαφορετικών ρευστών, από χημικές αντιδράσεις κ.ά., με αποτέλεσμα μεγαλύτερες αποκλίσεις κατά τον απ' ευθείας υπολογισμό των στατιστικών μεγεθών.

Στη βιβλιογραφία αναφέρονται διάφορες μέθοδοι (Adams et al, 1984), που προσπαθούν να εξαλείψουν τις αποκλίσεις (bias) στη μέτρηση της ταχύτητας. Τελευταία άρχισε να χρησιμοποιείται μια καινούργια μέθοδος για τη διόρθωση των αποκλίσεων της ταχύτητας του δείγματος, που υπερέχει σε σχέση με άλλες μεθόδους σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα και προσομοιωμένα μοντέλα ροής και συλλογής δεδομένων (Veynante and Candel, 1987). Η μέθοδος αυτή αναφέρεται σαν μέθοδος ανακατασκευής του σήματος (Signal Reconstruction), και επιτρέπει αναπαραγωγή του αρχικού σήματος από τις υπάρχουσες μετρήσεις, δίνοντας στη συνέχεια τη δυνατότητα νέας συλλογής δεδομένων με σταθερό ρυθμό, ανεξάρτητο από το ρυθμό συλλογής δεδομένων της αρχικής μέτρησης. Με τη μέθοδο αυτή δημιουργούνται νέα δείγματα με χρονικά ισαπέχοντα σημεία τα οποία καθιστούν δυνατό τον υπολογισμό του φάσματος συχνοτήτων και της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζεται η μεθοδολογία της συλλογής και επεξεργασίας των μετρήσεων από ένα σύστημα "Laser Doppler " Ανεμομέτρου, καθώς και αξιολόγηση του λογισμικού που αναπτύχθηκε για την εφαρμογή της.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Ο απαιτούμενος πειραματικός εξοπλισμός για την πραγματοποίηση μετρήσεων με τη μέθοδο LDA, αποτελείται από τέσσερα βασικά τμήματα (Σχήμα 1):

1. Η μονάδα παραγωγής της δέσμης laser

Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται ένα Ar-ion laser, ωστόσο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και άλλος τύπος laser όπως laser He-Ne κλπ. ανάλογα με τις απαιτήσεις του πειράματος σε ισχύ.

2. Το οπτικό σύστημα

Το οπτικό σύστημα αποτελείται από σειρά φακών, φίλτρων, πρισμάτων και κατόπτρων, που σκοπό έχουν να χωρίσουν την αρχική δέσμη σε δύο παράλληλες, και να τις εστιάσουν στον μετρητικό όγκο. Στη συνέχεια, το ανακλώμενο φως φιλτράρεται και εσπιάζεται στην επιφάνεια του φωτοπολλαπλασιαστή.

3. Το σύστημα επεξεργασίας σήματος

Αυτό περιλαμβάνει μία σειρά από διαφορετικές συσκευές συνδεδεμένες μεταξύ τους και αποτελεί το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας του ηλεκτρικού σήματος που δίνει ο φωτοπολλαπλασιαστής. Τα βασικότερα τμήματά του είναι ο μετρητής παλμών (Counter Processor), η συσκευή μετατόπισης συχνότητας (Frequency Shifter) και η μονάδα αποθήκευσης (Buffer Interface).

Ο μετρητής παλμών παίζει βασικά το ρόλο χρονομετρητή, μετρώντας το χρόνο που χρειάζεται ένα σωματίδιο να διασχίσει ένα ορισμένο αριθμό κροσσών συμβολής. Εφαρμόζοντας έναν αλγόριθμο αξιολόγησης (validating algorithm) στο αποτέλεσμα της μέτρησης, είναι δυνατόν να απορρίψει μετρήσεις που δεν ικανοποιούν ορισμένα κριτήρια.

Η συσκευή μετατόπισης συχνότητας ενεργοποιεί ένα κελλί Bragg που παρεμβάλλεται στο οπτικό σύστημα και αλλάζει τη συχνότητά σε μία από τις δύο δέσμες του laser. Η μετατόπιση της συχνότητας είναι αναγκαία για τη διάκριση της διεύθυνσης της ροής σε περιπτώσεις που η ταχύτητα αλλάζει πρόσημο, ή σε περιπτώσεις τυρβώδους ροής με μηδενική μέση τιμή της ταχύτητας.

Η μονάδα αποθήκευσης χρησιμεύει για την προσωρινή αποθήκευση των μετρήσεων και τη σύνδεση του μετρητή παλμών με τον υπολογιστή, που είναι ο τελικός αποδέκτης των μετρήσεων.

4. Ο υπολογιστής

Το λογισμικό για τη συλλογή και επεξεργασία των μετρήσεων έχει σχεδιασθεί για να λειτουργήσει σε μικρο-υπολογιστή IBM ή συμβατό με 640 KB RAM, με δυνατότητα γραφικών και "κάρτα" σύνδεσης IEEE-488. Η χρήση κάποιου μαθηματικού επεξεργαστή (8087, 80287) δίνει μεγαλύτερη ταχύτητα στους υπολογισμούς.

ΣΥΛΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Για κάθε αποδεκτή μέτρηση ο μετρητής παλμών στέλνει σε ψηφιακή μορφή στη συσκευή αποθήκευσης, της οποίας το μέγεθος είναι 1024 bytes, τη συχνότητα Doppler (f_D) και τον χρόνο που μεσολάβησε από την προηγούμενη μέτρηση. Σε

περίπτωση που η μνήμη υπερχειλίσει πριν προλάβει ο υπολογιστής να την αδειάσει, η λειτουργία του μετρητή παλμών διακόπτεται, μέχρι να δημιουργηθεί και πάλι ελεύθερος χώρος. Η δυνατότητα για πραγματοποίηση μετρήσεων με υψηλούς ρυθμούς άφιξης δεδομένων εξασφαλίζεται με μία γρήγορη κεντρική μονάδα υπολογιστή και το κατάλληλο λογισμικό (software) και φτάνει τα 5 KHz. Οι μετρήσεις φυλάγονται σε δυαδική μορφή στη μνήμη του υπολογιστή (RAM) μέχρι να ολοκληρωθεί το πείραμα και στη συνέχεια αποθηκεύονται στο δίσκο. Υπάρχει δυνατότητα συνεχούς συλλογής 90.000 μετρήσεων.

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας είναι η μετατροπή της συχνότητας Doppler σε ταχύτητα : $U = f_D \cdot \delta r$, όπου δr είναι η απόσταση δύο κροσσών συμβολής, που είναι ορισμένη και εξαρτάται από την γωνία (Θ) που σχηματίζουν οι δύο δέσμες και το μήκος κύματος (λ) της ακτινοβολίας του laser ($\delta r = \lambda / \sin(\Theta/2)$).

Η στατιστική επεξεργασία περιλαμβάνει τον υπολογισμό μεγεθών όπως η μέση τιμή, η τυπική απόκλιση, η κυρτότητα και η λοξότητα της κατανομής της ταχύτητας καθώς επίσης και τον υπολογισμό της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας.

Σημαντικό μέρος της όλης επεξεργασίας είναι ο υπολογισμός του φάσματος συχνοτήτων (PSD) που γίνεται με δύο μεθόδους, δηλαδή με απευθείας μετασχηματισμό Fourier (FFT) των τιμών του δείγματος (περιοδόγραμμα), και με FFT της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Τα αποτελέσματα είναι δυνατόν να παρουσιασθούν γραφικά στην οθόνη του υπολογιστή, και να σχεδιασθούν σε εκτυπωτή ή plotter.

ΑΝΑΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΣΗΜΑΤΟΣ (SIGNAL RECONSTRUCTION)

Η μέθοδος αυτή αποσκοπεί στην ανακατασκευή του πραγματικού σήματος, ώστε στη συνέχεια να γίνει συλλογή δεδομένων σε ίσα χρονικά διαστήματα, προϋπόθεση απαραίτητη για τον υπολογισμό του φάσματος συχνοτήτων και της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης. Από το ανακατασκευασμένο σήμα υπολογίζονται επίσης και όλα τα στατιστικά μεγέθη.

Για την ανακατασκευή του σήματος χρησιμοποιείται μία επέκταση του θεωρήματος του Shannon που αναπτύχθηκε από τους Clark, Palmer και Lawrence (1985). Υποθέτουμε ένα σήμα $f(t)$ με μετρήσεις στα χρονικά διαστήματα $t = t_n$ με $n = \dots, -1, 0, 1, \dots$ όπου το t_n δεν είναι αναγκαστικά μία σειρά ομοιόμορφα κατανομημένων πραγματικών τιμών. Έστω $T_n = nT_0$ ένα περιοδικό σύνολο χρονικών στιγμών. Υποθέτουμε ότι υπάρχει μία μονοσήμαντη αντιστοιχία $g(t)$ τέτοια ώστε $T_n = g(t_n)$ και επίσης ότι η συνάρτηση $h(\tau) = f(g^{-1}(\tau))$ περιορίζεται (band limited) στη συχνότητα f_0 .

Τότε, αν εκλέξουμε τη χρονική περίοδο T_0 έτσι ώστε $T_0 = 1/(2f_0)$, αποδεικνύεται ότι η $f(t)$ μπορεί να ανακατασκευαστεί από τα δείγματα της $f(t_n)$ σύμφωνα με τη σχέση:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f(t_n) \frac{\sin(2\pi f_0(g(t)-nT_0))}{2\pi f_0(g(t)-nT_0)}$$

Αυτή η σχέση έχει όμοια μορφή και προέρχεται από την κλασσική σχέση του Shannon. Ωστόσο τα δείγματα της συνάρτησης $f(t_n)$ δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα χρονικά. Από την παραπάνω εξίσωση, μπορεί να γίνει ομοιόμορφη συλλογή δεδομένων της f . Οι τιμές της συνάρτησης $g(t)$ θα βρεθούν με παρεμβολή ανάμεσα στα γνωστά $g(t_n)$ σημεία. Ο μόνος περιορισμός είναι ότι η παρεμβολή θα πρέπει να δίνει μία μονότονη και αντιστρέψιμη συνάρτηση g . Σ' αυτήν την εργασία (όπως και σ' αυτήν των Veynante and Candel, (1987)) χρησιμοποιήθηκε γραμμική παρεμβολή για τον προσδιορισμό της g .

Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το ότι οι υπολογισμοί χρησιμοποιούν τους χρόνους κατά τους οποίους οι τιμές της ταχύτητας είναι γνωστές χωρίς υποθέσεις σχετικά με τη διαδικασία συλλογής δεδομένων. Κατά συνέπεια αυτή η τεχνική μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία δεδομένων ταχύτητας σε δυσμενείς περιπτώσεις όπως π.χ. ροή με ανομοιόμορφη κατανομή σωματιδίων.

ΕΛΕΓΧΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του προγράμματος και των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για την επεξεργασία των δεδομένων, το πρόγραμμα τροφοδοτήθηκε με στοιχεία που προέκυψαν από ένα "συνθετικό σήμα" με τυχαία συλλογή δεδομένων.. Το σήμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το άθροισμα δύο τριγωνομετρικών συναρτήσεων με συχνότητες $f_1=0.7$ Hz και $f_2=5.3$ Hz, και το ίδιο πλάτος. Διαμορφώθηκε δείγμα 500 σημείων σε τυχαίες χρονικές στιγμές. Η συνάρτηση πιθανότητας των χρονικών διαστημάτων μεταξύ διαδοχικών σημείων ακολουθούσε κατανομή Poisson. Στο Σχήμα 2, όπου παρουσιάζεται ένα τμήμα του "συνθετικού" σήματος, τα σημεία της αρχικής δειγματοληψίας και το αντίστοιχο ανακατασκευασθέν σήμα, διαπιστώνεται μία πολύ καλή συμφωνία μεταξύ τους.

Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα στατιστικά μεγέθη που υπολογίσθηκαν, τόσο από την συλλογή δεδομένων όσο και από την ανακατασκευή του σήματος, καθώς και τα αναμενόμενα θεωρητικά. Όπως φαίνεται στον πίνακα, η μέση τιμή του αρχικού σήματος παρουσιάζει απόκλιση προς μεγαλύτερη τιμή, (περίπου 70%), ενώ το ανακτηθέν σήμα δίνει μία μέση τιμή με σφάλμα 7% από την θεωρητικά αναμενόμενη.

Στο Σχήμα 3 παρουσιάζεται το φάσμα συχνοτήτων υπολογισμένο με δύο μεθόδους (απ' ευθείας FFT και FFT μέσω της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης), όπου

διακρίνονται καθαρά οι κορυφές που αντιστοιχούν στις συχνότητες f_1 και f_2 του "συνθετικού" σήματος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Αποτελέσματα στατιστικής επεξεργασίας

Στατιστικό Μέγεθος	"Συνθετικό" σήμα	Αρχική συλλογή	Ανακατασκευή
Μέση τιμή	0.014	0.024	0.015
Τυπική απόκλιση	1.002	0.990	0.996
Λοξότητα	-0.013	0.011	-0.008
Κυρτότητα	-0.751	-0.688	-0.720

Γενικά, διαπιστώνεται η πολύ καλή συμφωνία των αποτελεσμάτων του προγράμματος με τα θεωρητικά αναμενόμενα, και επομένως η καλή λειτουργία των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν. Το πρόγραμμα που αναπτύχθηκε είναι φιλικό, απλό στη λειτουργία του και ευέλικτο, με δυνατότητα επιλογών και τροποποίησης της συμπεριφοράς του, σύμφωνα με τις ανάγκες ή τις επιθυμίες του χρήστη. Είναι γραμμένο σε γλώσσα C με χρήση μερικών υπορουτινών σε γλώσσα Assembly και Fortran. (Σακελλάρης Β. ,1989)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Adams E.W., J.K. Eaton and J.P. Johnston (1984). An Examination of Velocity bias in a highly turbulent separated and reattaching flow. 2nd International Symposium on Applications of Laser Anemometry to Fluid Mechanics, 4.1, Lisbon.
2. Buchhave P., W.K. George Jr. and J.L. Lumley, (1979). The Measurement of Turbulence with the LDA, Ann.Rev. Fluid Mech., 11, 443-503.
3. Clark J., M. Palmer and P. Lawrence (1985). A Transformation Method for the Reconstruction of Functions from Nonuniformly Spaced Samples, Trans. Acous., Speech, Signal Proc., Vol. ASSP-33, No.4, pp. 1151-1165.
4. DISA (1982). LDA Counter Processor Instruction Manual
5. Drain L.E. (1980). The Laser Doppler Technique, J.Wiley & Sons Ltd.
6. Durao D.F.G, J. Laker and J.H. Whitelaw (1980). Bias effects in LDA, J. Phys.E: Sci. Instrum., 13, 442-445.
7. McLaughlin D.K. and W.G. Tiederman, (1973). Biasing correction for individual realisation of LDA measurements in turbulent flows. Phys. of Fluids, 16, 2082
8. Σακελλάρης Β. (1989), Συλλογή και Επεξεργασία Μετρήσεων απο ένα LDA. Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Χημ. Μηχ. Α.Π.Θ.
9. Veynante D and S.M. Candel (1987). Application of Nonlinear Spectral Analysis and Signal Reconstruction to LDV, submitted for publication in Experiments in Fluids.