

**ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΕΝΟΣ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΥ ΑΝΑΛΥΤΗ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΩΝ: ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ
ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ**

Γ. ΚΡΙΚΕΛΑΣ, Α. ΧΑΤΖΟΠΟΥΛΟΣ

**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΜΕΤΡΟΛΟΓΙΑΣ,
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ
ΒΙ.ΠΕ.Θ. ΣΙΝΔΟΣ, 57022, ΟΙΚ. ΤΕΤ. 45
gkrik@eim.gr**

ΠΕΡΙΛΗΨΗ:

Οι διανυσματικοί αναλυτές δικτυωμάτων είναι εξαιρετικά σύνθετα συστήματα. Για το λόγο αυτό η επαλήθευση των χαρακτηριστικών τους παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες, καθώς αφορά πολλές παραμέτρους (π.χ. ολίσθηση, γραμμικότητα κ.α.) ενώ ταυτόχρονα είναι και εξαιρετικά χρονοβόρος. Επίσης, η ακρίβεια των μετρήσεων τους επηρεάζεται από ένα σύνολο παραγόντων, που αφορούν τόσο το μοντέλο διακρίβωσης/διόρθωσης που θα επιλεγεί, όσο και από τα παραμένοντα σφάλματα μετά τη διακρίβωσή τους-ως εκ τούτου είναι αρκετά δύσκολο να εφαρμοσθεί στην πράξη μια διαδικασία μέτρησης που να ελαχιστοποιεί την επίδραση όλων αυτών των συντελεστών.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται πως επιδρούν τόσο η επιλογή του μοντέλου διακρίβωσης/διόρθωσης, όσο και τα παραμένοντα σφάλματα στην ακρίβεια των μετρήσεων ενός διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων. Παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα και προτείνονται τρόποι και τεχνικές μέτρησης που αποσκοπούν στη βελτιστοποίηση της ακρίβειας των μετρήσεων. Προτείνονται τέλος στοιχεία τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά τη διαδικασία επιλογής ενός συγκεκριμένου αναλυτή δικτυωμάτων.

ABSTRACT:

Vector network analyzers are extremely composite systems. For this reason their characteristics' verification presents particular difficulties, since it involves many parameters (i.e. drift, linearity etc.), while at the same time is extremely time-consuming. Moreover, the accuracy of their measurements is affected by a number of factors, referring both to the calibration/correction model as well as to the residual errors after their calibration-therefore it is quite hard to implement in practice a measurement procedure, which will minimize the effect of all these factors.

In the present work is examined how both the selection of the calibration/correction model the residual errors impinge on the measurement accuracy of a vector network analyzer. Comparative results are presented and ways and techniques of measurement are proposed, aiming at the betterment of the measurement's accuracy. At the end, the features that should be considered when choosing a specific network analyzer are proposed.

Λέξεις- Κλειδιά: Διανυσματικός αναλυτής δικτυωμάτων, βελτιστοποίηση, επαλήθευση, παραμένοντα σφάλματα, μοντέλο διόρθωσης

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα εργαστήρια υψηλών συχνοτήτων, στα οποία η καλή ακρίβεια των μετρήσεων είναι απαραίτητη, η ανάγκη χρήσης ποιοτικών καλωδίων και προσαρμογέων είναι δεδομένη. Αυτή η ανάγκη γίνεται μεγαλύτερη όσο αυξάνεται η συχνότητα των σημάτων που χρησιμοποιούνται. Παράλληλα με τη συχνότητα και την ακρίβεια των χαρακτηριστικών των σημάτων μεγαλώνει

και το κόστος απόκτησης του αντίστοιχου εξοπλισμού, όπως και το κόστος της συχνής διακρίβωσης των χαρακτηριστικών τους.

Για την ακριβή μέτρηση του επίπεδου ισχύος ενός σήματος γνωστής συχνότητας, συνήθως αρκεί ένας καλός μετρητής ισχύος. Όμως, στην περίπτωση ενός άγνωστου σήματος απαιτείται καταρχήν η συχνοτική διερεύνηση, η οποία πραγματοποιείται με ένα φασματικό αναλυτή. Εκτός από την μέτρηση σημάτων, αναγκαία είναι η παραγωγή επιθυμητών σημάτων με γεννήτριες. Για την μεταφορά των σημάτων χρησιμοποιούνται καλώδια και μετατροπείς οι οποίοι θα επηρεάσουν την συχνότητα, το επίπεδο ισχύος του σήματος και θα δημιουργηθεί μία καθυστέρηση φάσης.

Ειδικά στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, στα οποία είναι απαραίτητη η γνώση με ακρίβεια των παραπάνω παραμέτρων, βρίσκει εφαρμογή η διανυσματική ανάλυση δικτυωμάτων, η οποία προσδιορίζει την ηλεκτρική συμπεριφορά εξαρτημάτων ή κυκλωμάτων σε σύνθετα συστήματα. Η μέτρηση των παραπάνω χαρακτηριστικών γίνεται με τη βοήθεια αναλυτών δικτυωμάτων (Network Analysers), οι οποίοι χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Οι βαθμωτοί αναλυτές δικτυωμάτων (SNA) είναι η πρώτη και φτηνότερη κατηγορία ενώ οι διανυσματικοί αναλυτές δικτυωμάτων (VNA) είναι η δεύτερη. Ενώ η πρώτη κατηγορία μπορεί να προσδιορίσει το πλάτος του σήματος εξόδου σε σχέση με αυτό της εισόδου, η δεύτερη κατηγορία υπερέχει λόγω της δυνατότητας μέτρησης του σχετικού πλάτους αλλά και φάσης.

Οι SNA πλεονεκτούν σε σχέση με τους VNA στη ταχύτητα των μετρήσεων και στο χαμηλότερο κόστος. Οι VNA πλεονεκτούν στην μεγαλύτερη ακρίβεια των μετρήσεων. Όμως και οι δύο κατηγορίες αναλυτών δικτυωμάτων έχουν το μειονέκτημα της πολύ σύνθετης κατασκευής τους, γεγονός που κάνει αδύνατη την διακρίβωση των επιμέρους τμημάτων ή την πρόβλεψη του σφάλματος του συνολικού συστήματος μέτρησης. Αυτό που εφαρμόζεται στους αναλυτές δικτυωμάτων είναι η επαλήθευση των μετρολογικών τους χαρακτηριστικών που πραγματοποιείται με τη μέτρηση προτύπων μεγάλης ακρίβειας και εγνωσμένων τιμών (π.χ. σετ επαλήθευσης-verification kits) και η διερεύνηση της συμφωνίας μεταξύ των μετρούμενων τιμών και των γνωστών τιμών των προτύπων.

2. ΣΦΑΛΜΑΤΑ ΣΤΟΥΣ ΑΝΑΛΥΤΕΣ ΔΙΚΤΥΩΜΑΤΩΝ

Για τους αναλυτές δικτυωμάτων πριν από κάθε μέτρηση είναι σκόπιμη η «διακρίβωση» τους (που διαφέρει στην περίπτωση των αναλυτών, από τη συνήθη μετρολογική έννοια της διακρίβωσης, καθώς πρόκειται ουσιαστικά για ρύθμιση/διόρθωση)-για την ακρίβεια η εφαρμογή διόρθωσης των σφαλμάτων που υπάρχουν, μέσω της μέτρησης προτύπων ακριβείας με γνωστές τιμές (από σετ διακρίβωσης-calibration kits). Τα σφάλματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: τα συστηματικά (systematic), τα τυχαία (random) και τα ολίσθησης (drift).

Τα συστηματικά σφάλματα, τα οποία σχετίζονται με τη διαρροή και τις ανακλάσεις του σήματος καθώς και με τη συχνοτική απόκριση των τμημάτων του αναλυτή δικτυωμάτων, οφείλονται σε ατέλειες της διάταξης μέτρησης και των τμημάτων του αναλυτή δικτυωμάτων. Υπάρχουν έξι τύποι συστηματικών σφαλμάτων. Τα σφάλματα κατευθυντικότητας (directivity error) και το σφάλμα συνακρόασης (crosstalk error) σχετίζονται με διαρροή του σήματος στο κατευθυντικό συζεύκτη (directional coupler) και στην «υπό έλεγχο συσκευή» (DUT). Τα σφάλματα προσαρμογής εμπέδησης της πηγής και του φορτίου σχετίζονται με τις ανακλάσεις των κυμάτων και η σημαντικότητα τους αυξάνεται μαζί με την συχνότητα. Τέλος, υπάρχει το σφάλμα συχνοτικής απόκρισης λόγω ιχνηλάτησης ανάκλασης (reflection tracking error) και το σφάλμα συχνοτικής απόκρισης λόγω ιχνηλάτησης διάδοσης (transmission tracking error) που οφείλονται στις διαφορετικές αποκρίσεις μεταξύ των διαδρομών μέτρησης και αναφοράς του σήματος στους ακροδέκτες σύνδεσης. Τα συστηματικά σφάλματα μπορούν να υπολογιστούν και να αφαιρεθούν με τη βοήθεια γνωστών προτύπων διακρίβωσης.

Τα τυχαία σφάλματα που εμφανίζονται στους αναλυτές δικτυωμάτων συνήθως είναι ο ηλεκτρονικός θόρυβος, η επαναληψιμότητα των διακοπτικών συνδέσεων (switch repeatability)

και η επαναληψιμότητα των συνδέσεων των ακροδεκτών και των μετατροπέων. Κανένα από αυτά τα σφάλματα δεν μπορεί να αφαιρεθεί αλλά μπορεί να μειωθεί η επίδρασή τους. Το σφάλμα από τον ηλεκτρονικό θόρυβο μπορεί να μειωθεί παίρνοντας τον μέσο όρο από πολλές σαρώσεις ή ανεβάζοντας το επίπεδο ισχύος του σήματος αναφοράς που παράγεται από τη γεννήτρια σάρωσης. Το σφάλμα της επαναληψιμότητας των συνδέσεων των ακροδεκτών μπορεί να μειωθεί σημαντικά με τον προσεκτικό καθαρισμό των ακροδεκτών, με τη μέτρηση του βάθος της εσωτερικής ακίδας των καλωδίων και των μετατροπέων, με τη χρήση κατάλληλων ροπόκλειδων κατά το σφίξιμο των συνδέσεων και με τη χρήση μέσου όρου των μετρήσεων, επαναλαμβάνοντας τις συνδέσεις των ακροδεκτών σε κάθε μέτρηση.

Τα σφάλματα ολίσθησης παρουσιάζονται όταν αλλάζει η συμπεριφορά του συστήματος μέτρησης με την πάροδο του χρόνου, μετά τη βαθμονόμηση του. Η κύρια αιτία ολίσθησης είναι η αλλαγή θερμοκρασίας του περιβάλλον χώρου, η οποία επηρεάζει τα ηλεκτρονικά στοιχεία αλλά κυρίως επηρεάζει τις φυσικές διαστάσεις των εξαρτημάτων. Εκτός από την αλλαγή των χαρακτηριστικών λόγω της αλλαγής θερμοκρασίας υπάρχει και η αλλαγή λόγω γήρανσης, η οποία είναι πολύ πιο αργή αλλά είναι υπαρκτή και επηρεάζει κυρίως τα καλώδια και τους προσαρμογείς αλλά και τα πρότυπα αναφοράς, στα οποία η ακρίβεια των χαρακτηριστικών είναι ουσιώδης κατά τη βαθμονόμηση των αναλυτών δικτυωμάτων. Το σφάλμα της πρώτης ολίσθησης μειώνεται κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία του περιβάλλον χώρου, ιδιαίτερα κατά τη βαθμονόμηση του αναλυτή δικτυωμάτων. Μετά τη βαθμονόμηση και για όσο χρονικό διάστημα η θερμοκρασία δε μεταβάλλεται σημαντικά, ανάλογα μικρή μεταβολή αναμένεται να έχει και το σφάλμα ολίσθησης. Τέλος, το σφάλμα από την ολίσθηση των χαρακτηριστικών των προτύπων αναφοράς που χρησιμοποιούνται κατά τη βαθμονόμηση των αναλυτών δικτυωμάτων, μπορεί να διορθωθεί με συχνή διακρίβωση των χαρακτηριστικών τους και ενημέρωση των νέων τιμών των συντελεστών διόρθωσης.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι διόρθωσης σφαλμάτων στους αναλυτές δικτυωμάτων, η διόρθωση απόκρισης και η διανυσματική διόρθωση. Η πρώτη διορθώνει μόνο τα σφάλματα ιχνηλάτησης και είναι χαμηλής ακρίβειας, καθότι χρησιμοποιεί τα δεδομένα της βαθμονόμησης για κανονικοποίηση της μέτρησης. Η δεύτερη μέθοδος, όπως φαίνεται και από το όνομα της, χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε VNAs. Μοντελοποιεί τα σφάλματα με ένα δίθυρο και με τη βοήθεια γνωστών προτύπων διακρίβωσης υπολογίζει τις παραμέτρους σκέδασης (S-παραμέτρους) και στη συνέχεια μπορεί να υπολογίσει τις πραγματικές S-παραμέτρους της (DUT). Η μέθοδος διανυσματικής διόρθωσης χωρίζεται σε δύο βασικούς τύπους, ανάλογα με το πλήθος των θυρών που χρησιμοποιούν στο VNA.

Ο πρώτος τύπος είναι η βαθμονόμηση μίας θύρας (one-port calibration). Σε αυτή χρησιμοποιούνται τρία πρότυπα βαθμονόμησης, το ανοικτό κύκλωμα (open), το βραχυκύκλωμα (short) και το φορτίο (load), το οποίο έχει ίδια τιμή με τη θύρα του VNA. Με την ακριβή τιμή των τριών προτύπων μπορεί να υπολογιστεί το σφάλμα της κατευθυντικότητας, της προσαρμογής της εμπέδησης της πηγής και το reflection tracking. Όπως είναι προφανές, αυτός ο τύπος βαθμονόμησης είναι κατάλληλος για μέτρηση S-παραμέτρων DUT με μία θύρα, αλλά αν έχουν δύο θύρες τότε η ακρίβεια των μετρήσεων είναι μειωμένη.

Ο δεύτερος τύπος βαθμονόμησης είναι η βαθμονόμηση δύο θυρών (2-port calibration) η οποία δίνει αυξημένη ακρίβεια στη μέτρηση της DUT με μία και δύο θύρες. Για τον υπολογισμό των S-παραμέτρων της DUT χρησιμοποιείται ένα μοντέλο διόρθωσης, σύμφωνα με το οποίο τα έξι συστηματικά σφάλματα μοντελοποιούνται με ένα δίθυρο, το οποίο υπάρχει μεταξύ της θύρας του VNA που εκπέμπει και της DUT. Οι VNA χρησιμοποιούν ένα σύστημα τεσσάρων εξισώσεων για τον προσδιορισμό κάθε S-παραμέτρου. Όμως, επειδή το σύστημα εξισώσεων είναι σύνθετο, η κάθε S-παραμέτρος είναι συνάρτηση των υπολοίπων και ο προσδιορισμός της απαιτεί τη μέτρηση και των τεσσάρων S-παραμέτρων. Οπότε, για κάθε S-παραμέτρο γίνεται μέτρηση με το σήμα να εκπέμπεται και από τις δύο θύρες, δηλαδή εμπρόσθια (από τη θύρα 1

του VNA) και ανάστροφη (από τη θύρα 2 του VNA) σάρωση. Οι δύο σαρώσεις απαιτούν την μέτρηση των έξι τιμών των συστηματικών σφαλμάτων κατά την εμπρόσθια σάρωση, στην οποία το δίθυρο μοντελοποίησης των σφαλμάτων είναι μεταξύ της θύρας 1 και της DUT, και των έξι τιμών κατά την ανάστροφη σάρωση, στην οποία το δίθυρο μοντελοποίησης των σφαλμάτων είναι μεταξύ της θύρας 2 και της DUT.

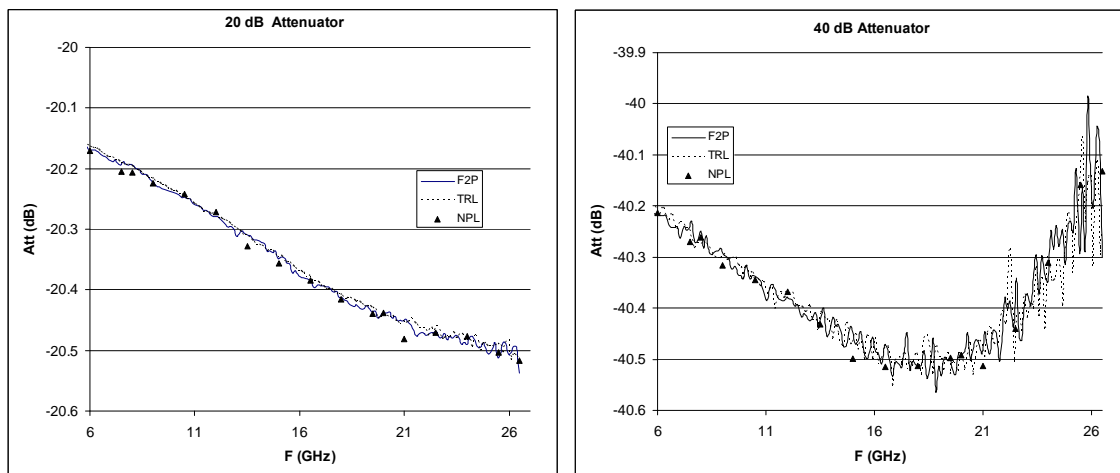
4. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΔΙΟΡΘΩΣΗΣ ΣΦΑΛΜΑΤΩΝ (F2P – TRL)

Για την μέτρηση με μεγάλη ακρίβεια των S-παραμέτρων δίθυρων DUT, εφαρμόζονται δύο μοντέλα διόρθωσης, το Full-2-Port (F2P) και το Through-Reflect-Line (TRL). Το πρώτο μοντέλο ονομάζεται συχνά και SOLT, από τα αρχικά των λέξεων Short, Open, Load και Thru, τα οποία χρησιμοποιεί κατά τη βαθμονόμηση. Εφαρμόζει και στις δύο θύρες του VNA τα πρότυπα αναφοράς Short και Open και για φορτίο συνήθως χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά πρότυπα, ένα για χαμηλές συχνότητες και ένα ολισθαίνον φορτίο (sliding load) για υψηλές συχνότητες. Επιπλέον, μετράει την απομόνωση των δύο θυρών, όταν η μία εκπέμπει και δεν υπάρχει συνδεδεμένο DUT, εφαρμόζοντας και στις δύο θύρες φορτία και τέλος μετράει και την απευθείας σύνδεση (thru) των δύο θυρών. Το πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι ο καλύτερος προσδιορισμών των σφαλμάτων σε ομοαξονικά DUT.

Το μοντέλο TRL διαφοροποιείται από το F2P λόγω της χρήσης «αερογραμμής» (airline). Το πλεονέκτημα αυτού του μοντέλου είναι η καλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις, αν χρησιμοποιηθεί αερογραμμή ανώτατης ποιότητας κατασκευής και προδιαγραφών στα χαρακτηριστικά του. Όμως, η χρήση του κυματοδηγού αποτελεί ταυτόχρονα και μειονέκτημα, διότι είναι εξαιρετικά δύσκολη η χρήση του και σε περίπτωση λανθασμένης σύνδεσης του είναι σχεδόν σίγουρη η αχρήστευσή του.

4.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Για την σύγκριση των δύο μοντέλων διόρθωσης πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις των χαρακτηριστικών δύο ομοαξονικών εξασθενητών της Hewlett Packard τύπου APC (3,5mm), οι οποίοι αποτελούν τμήματα ενός σετ επαλήθευσης (calibration kit) (HP 85053B) και τα χαρακτηριστικά τους έχουν μετρηθεί από το National Physical Laboratory (NPL).



Σχήμα 1

Σύγκριση μοντέλων διόρθωσης F2P-TRL σε εξασθενητή 20dB (αριστερά) και 40dB (δεξιά)

Ο πρώτος εξασθενητής είναι τύπου (part number) HP 85053-60001 και έχει τιμή εξασθένησης 20dB. Ο δεύτερος εξασθενητής είναι τύπου (part number) HP 85053-60002 και έχει τιμή εξασθένησης 40dB. Ο αναλυτής δικτυωμάτων που χρησιμοποιήθηκε είναι ο HP 8510C, ο οποίος είναι VNA με εύρος συχνοτήτων 45MHz έως 26,5GHz και στις δύο θύρες του συνδέθηκαν εύκαμπτα ομοαξονικά καλώδια 3,5mm HP 85131F. Για τη βαθμονόμηση του VNA

χρησιμοποιήθηκε το σετ βαθμονόμησης HP 85052C. Η διόρθωση των σφαλμάτων έγινε από το λογισμικό του VNA και η αυτοματοποίηση των μετρήσεων υλοποιήθηκε με τη βοήθεια εφαρμογής που αναπτύχθηκε στο περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού LabVIEW της National Instruments. Οι μετρήσεις έγιναν με τη χρήση μέσου όρου 256 τιμών, για ελαχιστοποίηση του θορύβου. Ο χώρος μέτρησης είναι το Εργαστήριο Υψηλών Συχνοτήτων του ΕΙΜ, στο οποίο μόνιμα η θερμοκρασία είναι σταθερή στους $23\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, η σχετική υγρασία στο $50\pm 10\%$ και ο VNA έχει προθερμανθεί για διάστημα μεγαλύτερο από μία εβδομάδα.

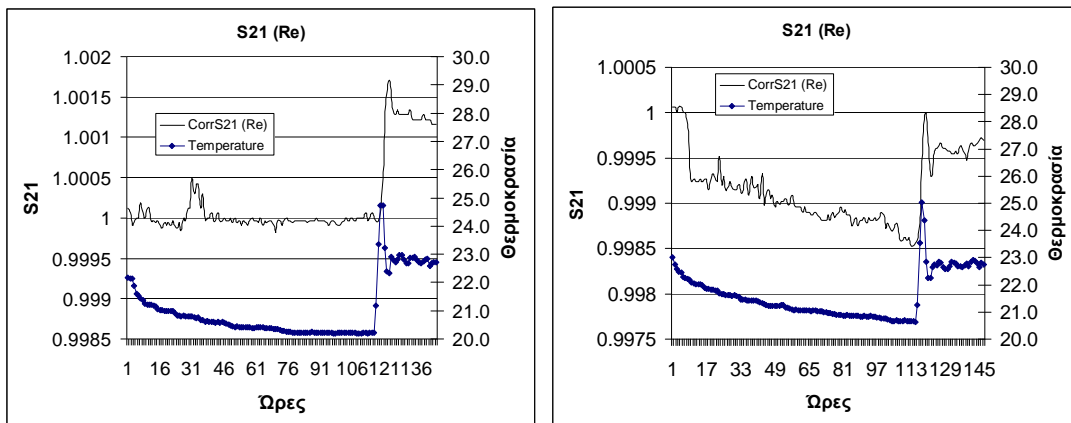
Στο σχήμα 1 απεικονίζονται οι μετρήσεις οι οποίες έγιναν με τα δύο μοντέλα διόρθωσης, F2P και TRL, με συνεχή και διακεκομμένη γραμμή αντίστοιχα, και με σημεία απεικονίζονται οι τιμές από την διακρίβωση των εξασθενητών από το NPL. Όπως είναι φανερό, με τη χρήση προτύπων βαθμονόμησης βέλτιστων χαρακτηριστικών (μετρολογικής ποιότητας) με πολύ καλά προσδιορισμένες τιμές, τα δύο μοντέλα διόρθωσης πραγματοποιούν μετρήσεις σχεδόν ίδιες και πολύ κοντά στις αναμενόμενες.

5. ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΙΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΤΩΝ VNA

Όπως αναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, υπάρχουν διάφορα είδη σφαλμάτων που επηρεάζουν τις μετρήσεις των VNA. Ορισμένα, όπως η αβεβαιότητα των προτύπων βαθμονόμησης, η ολίσθηση λόγω χρόνου μετά τη βαθμονόμηση, ο ηλεκτρονικός θόρυβος, η γραμμικότητα του δέκτη, η προσαρμογή των ειδικών τιμών εμπέδησης και η επαναληψιμότητα των συνδέσεων και της θέσης των καλωδίων, δεν μπορούν να αποφευχθούν. Ορισμένα, όμως, από αυτά, μπορούν να μειωθούν. Παρακάτω αναλύονται ορισμένα είδη σφάλματος και η επίδραση τους.

5.1 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ

Η μεταβολή της θερμοκρασίας, όπως αναφέρθηκε επηρεάζει τη συμπεριφορά των ηλεκτρονικών στοιχείων και τις φυσικές διαστάσεις όλων των εξαρτημάτων. Στο χώρο μετρήσεων πραγματοποιήθηκε ελεγχόμενη αργή πτώση της θερμοκρασίας κάτω τους 23°C , και μετά από πέντε ημέρες απότομη άνοδος και ξανά πτώση προς την αρχική τιμή των 23°C .



Σχήμα 2

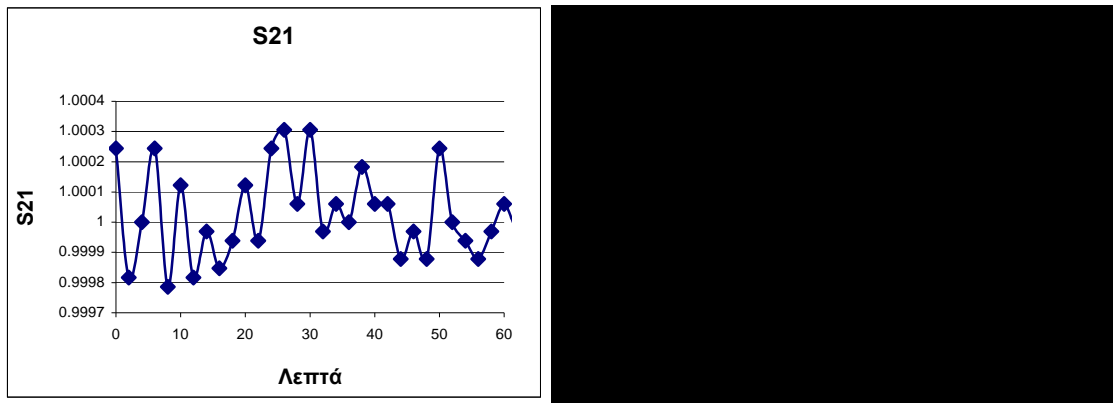
Επίδραση της θερμοκρασίας στη μέτρηση «thru»

Στην πρώτη περίπτωση του σχήματος 2 πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση με το σετ HP 85052C (3,5mm) με μοντέλο διόρθωσης F2P και στην συνέχεια μετρήθηκε το πραγματικό μέρος της παραμέτρου S_{21} . Προτιμήθηκε το πραγματικό μέρος από το φανταστικό μέρος της μέτρησης διότι αναμένεται να έχει πιο σταθερή συμπεριφορά. Στη δεύτερη περίπτωση του σχήματος 2 πραγματοποιήθηκε βαθμονόμηση με το σετ HP 85052C (3,5mm) με μοντέλο διόρθωσης TRL. Και στις δύο περιπτώσεις οι μετρήσεις έγιναν στον ίδιο χώρο, από τον ίδιο VNA, οι συνδέσεις και η βαθμονόμηση έγινε από τον ίδιο χειριστή και τα καλώδια κρατήθηκαν στην ίδια αρχική θέση και εντελώς ακίνητα σε όλη τη διάρκεια της μέτρησης. Στο σχήμα 2 απεικονίζεται η τιμή

της παραμέτρου S_{21} για συχνότητα 1GHz. Όπως είναι φανερό, η διακύμανση επηρεάζει σημαντικά τις μετρήσεις και κατά την επιστροφή της θερμοκρασίας εμφανίζονται φαινόμενα υστέρησης.

5.2 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟΥ ΘΟΡΥΒΟΥ

Για την επίδραση του ηλεκτρονικού θορύβου, πραγματοποιήθηκε η μέτρηση των S-παραμέτρων της σύνδεσης «thru» κάθε δύο λεπτά, μετά από βαθμονόμηση F2P. Για τη μέτρηση του θορύβου απενεργοποιήθηκε η δυνατότητα μέτρησης μέσου όρου (averaging) του VNA. Στο αριστερό τμήμα του σχήματος 3 φαίνονται οι τιμές της παραμέτρου S_{21} για συχνότητα 1 GHz, για τριάντα σαρώσεις. Στο δεξιό τμήμα φαίνεται η τρέχουσα τιμή της μέτρησης των παραμέτρων S_{11} και S_{22} , κανονικοποιημένη ως προς τη μέση τιμή των τριάντα μετρήσεων. Από τα σχήματα διακρίνεται ξεκάθαρα η επίδραση του ηλεκτρονικού θορύβου, η οποία αναμένεται να είναι μεγαλύτερη στις τιμές που αντιστοιχούν σε υψηλότερες συχνότητες.

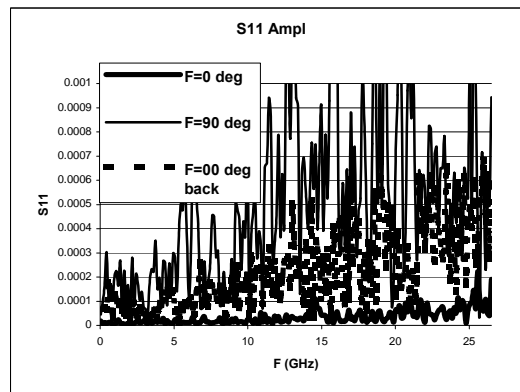


Σχήμα 3

Επίδραση του ηλεκτρονικού θορύβου στη μέτρηση «thru»

5.3 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΤΩΝ ΘΥΡΩΝ

Γενικά, όταν μεταδίδεται ένα σήμα μέσα από ένα καλώδιο, περιμένουμε να μεταβληθεί το πλάτος του και κυρίως η φάση του. Όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα του σήματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η και μεταβολή των χαρακτηριστικών του. Στις θύρες του VNA είναι σημαντικό να συνδεθούν καλώδια κατάλληλων προδιαγραφών εξασθένισης και εύρους συχνοτήτων διάδοσης για να μην επηρεάσουν τις μετρήσεις. Σε εργαστήρια όπου απαιτείται η υψηλότερη ακρίβεια, χρησιμοποιούνται ειδικά ημιεύκαμπα καλώδια τα οποία μένουν ακίνητα όσο το επιτρέπει η διάταξη της μέτρησης. Σε περίπτωση που επιθυμεί ο χειριστής να κινεί τα καλώδια, υπάρχουν ειδικά εύκαμπα καλώδια για την ελαχιστοποίηση του σφάλματος.



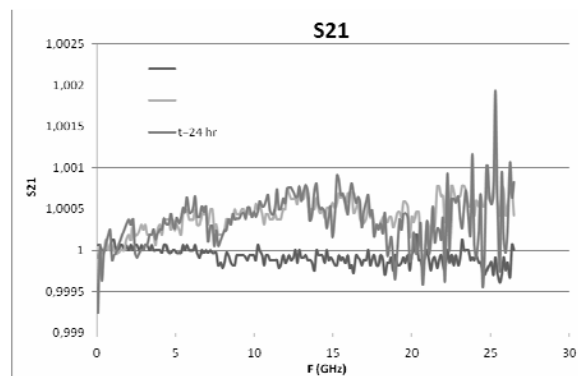
Σχήμα 4

Επίδραση της μετακίνησης της θέσης των καλωδίων σε μέτρηση παραμέτρου S_{11} φορτίου 50Ω

Για την επίδραση της κίνησης των καλωδίων, χρησιμοποιήθηκαν εύκαμπτα ομοαξονικά καλώδια 3,5mm HP 85131F και μετρήθηκε η παράμετρος S_{11} ενός φορτίου 50Ω, μετρολογικών χαρακτηριστικών. Τα καλώδια μετακινήθηκαν από την αρχική θέση κατά 90 μοίρες, με βήματα 15 μοιρών και στην συνέχεια έγινε η αντίστροφη διαδρομή, ακριβώς στα ίδια σημεία. Σε κάθε θέση πραγματοποιήθηκε μέτρηση της παραμέτρου S_{11} . Για λόγους ευκρίνειας παρουσιάζονται στο σχήμα 4, μόνο τρεις σαρώσεις, αυτή της αρχικής θέσης, μετά από γωνία 90 μοιρών και τελευταία η επιστροφή στην αρχική θέση. Ο κατακόρυφος άξονας περιορίστηκε μέχρι την τιμή 0,001, αν και η μέγιστη τιμή της παραμέτρου μετρήθηκε στα 0,0022. Σε αυτό το σχήμα φαίνεται καθαρά η επίδραση της θέσης καθώς και το φαινόμενο υστέρησης. Η χοντρή συνεχής γραμμή είναι η πρώτη μέτρηση, η λεπτή συνεχής αντιστοιχεί σε 90 μοίρες και η χοντρή διακεκομμένη αντιστοιχεί στην τελευταία μέτρηση.

5.4 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΟΛΙΣΘΗΣΗΣ ΛΟΓΩ ΧΡΟΝΟΥ

Η βαθμονόμηση του VNA πρέπει να επαναλαμβάνεται κατά τακτά χρονικά διαστήματα διότι οι τιμές των σφαλμάτων αλλάζουν με την πάροδο του χρόνου. Αν η θερμοκρασία του περιβάλλοντος παραμείνει σταθερή και δεν μεταβληθούν τα καλώδια ή κάποια άλλη παράμετρος που μπορεί να επηρεάσει την μέτρηση, τότε το σφάλμα λόγω ολίσθησης είναι μικρό αλλά υπαρκτό, όπως φαίνεται στο σχήμα 5, στο οποίο απεικονίζεται η παράμετρος S_{12} μιας σύνδεσης “thru” που μετρήθηκε στη διάρκεια 24 ωρών (από όπου είναι καθίσταται προφανές πως η μεγαλύτερη μεταβολή συμβαίνει στη διάρκεια των πρώτων ωρών). Όμως, τυχόν μεταβολή της θερμοκρασίας θα προκαλέσει πολύ μεγαλύτερη ολίσθηση των παραμέτρων, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.



Σχήμα 5

Επίδραση της ολίσθησης (drift) της παραμέτρου S_{22} ενός εξασθενητή 20dB

6. ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΟΓΗ ΕΝΟΣ ΔΙΑΝΥΣΜΑΤΙΚΟΥ ΑΝΑΛΥΤΗ

Ένα εργαστήριο που ενδιαφέρεται για την απόκτηση ενός καινούριου διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων (ιδιαίτερα αν προτίθεται να κάνει μετρήσεις υψηλής ακρίβειας) θα πρέπει να εξετάσει με μεγάλη προσοχή ένα σύνολο χαρακτηριστικών και παραμέτρων, δεδομένης της σύνθετης δομής των συστημάτων αλλά και του κόστους απόκτησής τους. Τα στοιχεία που προτείνονται στη συνέχεια για καθορισμό ή/και έλεγχο, προέκυψαν από συζητήσεις και ανταλλαγή απόψεων και εμπειριών κατά τις συναντήσεις μεταξύ αντιπροσώπων των Εθνικών Ινστιτούτων Μετρολογίας στον ευρωπαϊκό χώρο (Euramet-πρώην Euromet).

Καταρχάς θα πρέπει να εξετάσει κάποιος και να καθορίσει ένα σύνολο γενικών χαρακτηριστικών τα οποία πρέπει να πληροί ο αναλυτής: την επιθυμητή απόδοσή του, ποια σετ διακρίβωσης (calibration kits) είναι πιθανόν να απαιτηθούν, τη λειτουργικότητα και την τεκμηρίωσή του, την ποιότητα κατασκευής, το λόγο κόστους/απόδοσης αλλά και την πρόσβαση στην τεχνική υποστήριξη της κατασκευάστριας εταιρείας.

Έπειτα είναι απαραίτητο να καθοριστούν οι τεχνικές προδιαγραφές που θα καλύπτουν τις πραγματικές ανάγκες του εργαστηρίου: η περιοχή συχνοτήτων, αν οι μετρήσεις θα αφορούν ενεργές ή παθητικές συσκευές, αν θα είναι δύο ή περισσότερων θυρών, οι δυνατοί τρόποι διακρίβωσης (αλγόριθμοι, ηλεκτρονικοί ή μηχανικοί κλπ.), αν θα πρέπει να υπάρχει πρόσβαση και στα ανεπεξέργαστα και στα επεξεργασμένα δεδομένα, η ακρίβεια του συστήματος (γραμμικότητα, δυναμική περιοχή, θόρυβος, σταθερότητα, ταχύτητα).

Τέλος, σημαντικό είναι να γίνει αξιολόγηση των συστημάτων που είναι υποψήφια προς απόκτηση. Το πρώτο βήμα που πρέπει βέβαια να γίνει, είναι ο καθορισμός από το εργαστήριο των αποδεκτών ορίων για τις παραμέτρους που το ενδιαφέρουν και των συνθηκών και διαδικασιών με τις οποίες θα πραγματοποιηθεί ο έλεγχος. Επίσης πρέπει να συνυπολογισθεί ο απαιτούμενος χρόνος, καθώς η αξιολόγηση τέτοιων συστημάτων είναι εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία. Τέλος σημαντικό είναι να υπάρχει δυνατότητα άμεσης επικοινωνίας με τον κατασκευαστή, ενώ σε περίπτωση υψηλών απαιτήσεων ακριβείας μπορεί να απαιτηθεί η λύση απόκτησης τροποποιημένου συστήματος (με πιθανό αυξημένο κόστος). Είναι προφανές ότι η διαδικασία επιλογής ενός διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων δεν είναι καθόλου απλή υπόθεση!

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι αναλυτές δικτυωμάτων είναι ιδιαίτερα σύνθετα συστήματα μέτρησης, στα οποία η βαθμονόμηση είναι ουσιώδης για τη σωστή μέτρηση. Ο τύπος της βαθμονόμησης και η μέθοδος διόρθωσης των σφαλμάτων εξαρτάται από την αρχιτεκτονική του αναλυτή δικτυωμάτων, το μέγεθος που θα μετρηθεί και το πλήθος των θυρών της DUT, αλλά και από την επιθυμητή ακρίβεια. Έτσι, οι μετρήσεις μπορεί να είναι μια πιο απλή υπόθεση, όπως αν πρόκειται να μετρηθεί απλά η ανάκλαση σε ένα μονόθυρο DUT σε SNA με μία θύρα, ή να είναι πολύ πιο σύνθετη αν γίνεται η μέτρηση των S-παραμέτρων ενός δίθυρου σε VNA με δύο θύρες, με διαφορετική μέθοδο βαθμονόμησης.

Επίσης, η επιλογή του μοντέλου διόρθωσης είναι σημαντική. Π.χ. (ιδιαίτερα) σε μη ομοαξονικά DUT, η TRL αναμένεται να δώσει καλύτερη ακρίβεια. Η σύγκριση όμως δύο διαφορετικών μοντέλων διόρθωσης (TRL και SOLT) έδειξε ότι όταν τα πρότυπα βαθμονόμησης είναι υψηλής ποιότητας και η μεθοδολογία είναι σωστή και προσεκτικά σχεδιασμένη, τότε τα αποτελέσματα είναι τα καλύτερα δυνατά, ανεξάρτητα από το μοντέλο διόρθωσης. Αναλύθηκε επίσης ο σημαντικός ρόλος που παίζουν η διακύμανση της θερμοκρασίας, οι ρυθμίσεις του VNA, ο χειρισμός και η ποιότητα των εξαρτημάτων και ο χρόνος από την τελευταία βαθμονόμηση. Όλα τα παραπάνω στοιχεία αναδεικνύουν και το βαθμό δυσκολίας κατά την επιλογή του κατάλληλου μοντέλου ενός διανυσματικού αναλυτή δικτυωμάτων-προς αυτή την κατεύθυνση κατατέθηκαν διάφορες προτάσεις που θα μπορούσαν να διευκολύνουν ένα εργαστήριο στη διαδικασία επιλογής ενός τέτοιου συστήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βιβλία και εγχειρίδια

Agilent, “Application Note 1287-1”, (Understanding the Fundamental Principles of Vector Network Analysis) 2000.

Agilent, “Application Note 1287-2”, (Exploring the Architectures of Network Analyzers) 2000.

Agilent, “Application Note 1287-3”, (Applying Error Correction to Network Analyzer Measurements) 2000.

Agilent, “Application Note 1291-1”, (8 Hints for making Better Network Analyzer Measurements) 1997.

Agilent, “User’s Manual 8510C”, 1994.

Maurly Microwave Corporation “AN 5C-026 Verifying the Performance of Vector Analyzers”, 1997