

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ MONTE CARLO (GUMS1) ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Σ. Ιακωβίδης¹, Χ. Αποστολίδης¹, Θ. Σαμαράς¹
¹Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
email: siako@physics.auth.gr

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της με αυτά της «κλασσικής» μεθόδου (GUM). Πιο συγκεκριμένα γίνεται εκτίμηση της αβεβαιότητας μέτρησης της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με συχνοεπιλεκτικό μετρητή, καθώς και της αβεβαιότητας του Συνολικού Λόγου Έκθεσης, χρησιμοποιώντας και τις δύο μεθόδους. Για την υλοποίηση των δύο μεθόδων επιλέχθηκε το περιβάλλον του λογισμικού MATLAB. Τα αποτελέσματα παρατίθενται συγκριτικά και καταδεικνύουν περιπτώσεις όπου η εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo μπορεί να οδηγήσει σε αποτελέσματα που αποκλίνουν σημαντικά από αυτά της GUM, όπως η ύπαρξη μη γραμμικού μοντέλου σύνδεσης των εισερχόμενων με το εξερχόμενο μέγεθος (π.χ. μοντέλο Λόγου Έκθεσης) ή η παρουσία μιας επικρατούσας μη κανονικής κατανομής εισερχόμενου μεγέθους (π.χ. αβεβαιότητα λόγω ατελούς προσαρμογής με U-shape κατανομή). Η απόκλιση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων μπορεί να οδηγήσει ακόμα και σε διαφορετικές αποφάσεις, όσον αφορά στην τήρηση ή μη των ορίων ασφαλούς έκθεσης.

Λέξεις - Κλειδιά: αβεβαιότητα, Monte Carlo, ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, λόγος έκθεσης

Abstract

The scope of the present work is the application of the Monte Carlo (GUMS1) method for evaluating uncertainty in electromagnetic field measurements and the comparison of the results with the ones obtained using the “standard” method (GUM). In particular, the two methods are applied in order to evaluate the E-field measurement uncertainty using a frequency selective meter and the Total Exposure Quotient uncertainty. The two methods were implemented using the MATLAB environment. Comparative results are presented in order to highlight cases where Monte Carlo method results deviate significantly from the ones obtained using GUM, such as the presence of a non linear mathematical model connecting the inputs with the output quantity (case of the Exposure Quotient model) or the presence of a dominant non normal distribution of an input quantity (case of U-shaped mismatch uncertainty). The deviation of the results obtained from the two methods can even lead to different decisions regarding the compliance with the exposure limits.

Keywords: uncertainty, Monte Carlo, electromagnetic radiation, exposure quotient

Σ. Ιακωβίδης, Χ. Αποστολίδης, Θ. Σαμαράς,
Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων
ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

1. Εισαγωγή

Η έκθεση στην ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελεί αντικείμενο εκτεταμένης επιστημονικής έρευνας, καθώς και ανησυχίας του πληθυσμού, όσον αφορά στις ενδεχόμενες επιπτώσεις της στην ανθρώπινη υγεία. Για το λόγο αυτό πραγματοποιούνται σχετικές μετρήσεις και έχουν θεσπιστεί επίπεδα αναφοράς των μετρούμενων μεγεθών, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ο περιορισμός τους σε τιμές μικρότερες από αυτά. Ο έλεγχος των υψίσυχων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων πραγματοποιείται μέσω της μέτρησης της έντασης (E) του ηλεκτρικού πεδίου, χρησιμοποιώντας συχνοεπιλεκτικό εξοπλισμό και σύμφωνα με πρότυπες μεθόδους (π.χ. ΕΛΟΤ EN 50492 : 2008, ΕΛΟΤ 1422-3 : 2007). Ακολουθώντας υπολογίζεται ο Συνολικός Λόγος Έκθεσης, η τιμή του οποίου καθορίζει τη συμμόρφωση ή όχι με τα όρια ασφαλούς έκθεσης.

Η αβεβαιότητα αποτελεί ένα ποσοτικό εργαλείο που εκφράζει την ποιότητα ενός αποτελέσματος μέτρησης. Μια δήλωση αβεβαιότητας επομένως πρέπει να συνοδεύει κάθε αποτέλεσμα μέτρησης, όπως άλλωστε επιβάλλεται από το διεθνές πρότυπο ISO/IEC 17025:2005 για τη διαπίστευση εργαστηρίων δοκιμών και διακριβώσεων. Ειδικότερα για τις μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ο υπολογισμός της αβεβαιότητας είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς καθορίζει τη συμμόρφωση ή όχι με τα επιτρεπτά όρια, και επομένως έχει επίπτωση σε αποφάσεις που σχετίζονται με την ανθρώπινη υγεία.

Η πρώτη πλήρης οδηγία που καθιέρωσε γενικούς κανόνες για την εκτίμηση και δήλωση της αβεβαιότητας, περιγράφεται στον “Οδηγό για την έκφραση της αβεβαιότητας στις μετρήσεις”, (“Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” - GUM) το 1993. Η επανέκδοσή του το 2008 που περιλαμβάνει κάποιες διορθώσεις, είναι η πρώτη που εκδόθηκε από την Μικτή Επιτροπή για τους Οδηγούς Μετρολογίας (JCGM) του Διεθνούς Γραφείου Μέτρων και Σταθμών (BIPM). Το 2008 εκδόθηκε επίσης μια συμπληρωματική οδηγία “Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method” (GUMS1) όπου περιγράφεται μια αριθμητική τεχνική που βασίζεται στη μέθοδο Monte Carlo (MC). Η εφαρμογή του GUM δε συνιστάται σε κάποιες περιπτώσεις, όπου η μέθοδος GUMS1 προσφέρει έναν εναλλακτικό τρόπο υπολογισμού της αβεβαιότητας.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού της αβεβαιότητας με τη χρήση της μεθόδου Monte Carlo για έναν συχνοεπιλεκτικό μετρητή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τα αντίστοιχα που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου GUM. Στη συνέχεια οι δύο μέθοδοι εφαρμόζονται για τον υπολογισμό της αβεβαιότητας του Συνολικού Λόγου Έκθεσης σε δύο υποτιθέμενα σενάρια μέτρησης (εσωτερικό και εξωτερικό περιβάλλον) και ακολουθεί σύγκριση των αποτελεσμάτων.

2. Συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων GUM και GUMS1

Σ. Ιακωβίδης, Χ. Αποστολίδης, Θ. Σαμαράς,
Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων
ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

2.1 Η μέθοδος GUM

Το θεωρητικό πλαίσιο που περιγράφεται στο GUM βασίζεται: α) στο νόμο διάδοσης των αβεβαιοτήτων, και β) στο θεώρημα κεντρικού ορίου. Προκειμένου, επομένως, να εφαρμοστεί ορθά η μέθοδος GUM πρέπει να πληρούνται οι προϋποθέσεις που εισάγουν η εφαρμογή τόσο του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων όσο και του θεωρήματος κεντρικού ορίου.

Έστω ότι $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_N)$ τα εισερχόμενα μεγέθη, Y το εξερχόμενο μέγεθος που μας ενδιαφέρει και

$$Y = f(\bar{X}) \quad (1)$$

το μαθηματικό μοντέλο που συνδέει το εξερχόμενο με τα εισερχόμενα μεγέθη. Σύμφωνα με το νόμο διάδοσης των αβεβαιοτήτων (GUM) η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα $u_c(y)$ του εξερχόμενου μεγέθους θα δίνεται από το πρώτης τάξης ανάπτυγμα Taylor της (1):

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (2)$$

όπου x_1, x_2, \dots, x_N και y οι καλύτεροι εκτιμητές των μεγεθών X_i και Y αντίστοιχα. Η παραπάνω προσεγγιστική σχέση δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα, όταν α) η συνάρτηση f είναι γραμμική, και β) τα εισερχόμενα μεγέθη X_i δεν είναι συσχετισμένα.

Από τη συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα u_c πολλαπλασιάζοντας με έναν παράγοντα κάλυψης k , προκύπτει η διευρυμένη αβεβαιότητα

$$U = k u_c(y) \quad (3)$$

Με αυτόν τον τρόπο ορίζεται ένα διάστημα κάλυψης $[y-U, y+U]$ το οποίο περιλαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό των τιμών του υπό μέτρηση φυσικού μεγέθους (π.χ. 95% με $k=1.96$ για κανονική κατανομή).

Σύμφωνα με το θεώρημα κεντρικού ορίου η κατανομή του εξερχόμενου μεγέθους προσεγγίζεται ικανοποιητικά από μια κανονική κατανομή με αναμενόμενη τιμή και διακύμανση που δίνονται από τις σχέσεις

$$E(Y) = \sum_{i=1}^N c_i E(X_i) \quad (4)$$

$$\sigma^2(Y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \sigma^2(X_i) \quad (5)$$

εάν ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις: α) Το εξερχόμενο μέγεθος είναι γραμμική συνάρτηση των εισερχόμενων μεγεθών (δηλ. $Y = \sum_{i=1}^N c_i X_i$). β) Τα εισερχόμενα μεγέθη είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους (μη-συσχετισμένα). γ) Η διακύμανση του εξερχόμενου μεγέθους

Σ. Ιακωβίδης, Χ. Αποστολίδης, Θ. Σαμαράς,
Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων
ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

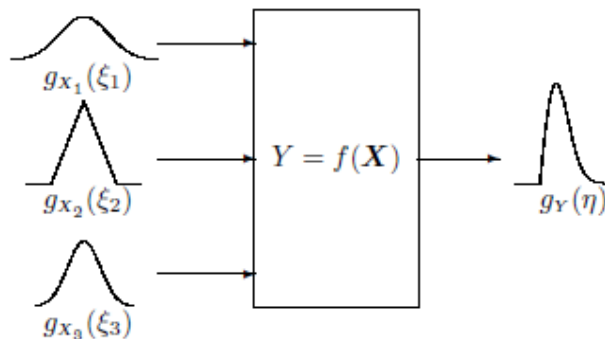
είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν οποιουδήποτε εισερχόμενου μεγέθους που δεν έχει κανονική κατανομή.

Συνοψίζοντας τις προϋποθέσεις εφαρμογής του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων και του θεωρήματος κεντρικού ορίου, μπορούμε να πούμε ότι: α) Εάν το μοντέλο δεν είναι γραμμικό ή/και τα εισερχόμενα μεγέθη είναι συσχετισμένα, δεν εφαρμόζονται ικανοποιητικά ούτε ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων ούτε και το θεώρημα κεντρικού ορίου. β) Εάν το μοντέλο είναι γραμμικό, τα εισερχόμενα μεγέθη μη συσχετισμένα αλλά υπάρχει μια επικρατούσα μη κανονική κατανομή εισερχόμενου μεγέθους τότε ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων εφαρμόζεται ικανοποιητικά ενώ το θεώρημα κεντρικού ορίου όχι.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στη β' περίπτωση ο υπολογισμός της αβεβαιότητας του εξερχόμενου μεγέθους είναι ικανοποιητικός αλλά η εκτίμηση των ορίων του διαστήματος εμπιστοσύνης δεν είναι εφικτή, καθώς δε γνωρίζουμε το είδος της κατανομής.

2.2 Η μέθοδος GUMS1

Η μέθοδος υπολογισμού των αβεβαιοτήτων που περιγράφεται στο GUMS1 περιλαμβάνει την εφαρμογή της αριθμητικής μεθόδου Monte Carlo και βασίζεται στη *διάδοση των κατανομών*. Με τη χρήση της μεθόδου λαμβάνουμε μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) για το μέγεθος εξόδου, από όπου μπορεί να ληφθεί η αναμενόμενη τιμή του μεγέθους, η τυπική του αβεβαιότητα και ένα διάστημα κάλυψης που αντιστοιχεί σε ορισμένη πιθανότητα κάλυψης. Πιο συγκεκριμένα αφού καθοριστούν τα μεγέθη εισόδου \bar{X} και οι κατανομές τους, πραγματοποιείται ένα πλήθος, έστω M , δειγματοληψιών και βάσει του μοντέλου (εξ. 1) υπολογίζεται ένα πλήθος M τιμών για το εξερχόμενο μέγεθος Y . Η διαδικασία αυτή αποτυπώνεται στο σχήμα 1.



Σχήμα 1: Σχηματική απόδοση της διάδοσης των αβεβαιοτήτων με τη μέθοδο GUMS1 για 3 ανεξάρτητα εισερχόμενα μεγέθη

Ακολούθως υπολογίζεται η αναμενόμενη τιμή του (y) ως ο μέσος όρος των M τιμών (y_r , $r = 1, \dots, M$)

$$y = \frac{1}{M} \sum_{r=1}^M y_r \quad (6)$$

Σ. Ιακωβίδης, Χ. Αποστολίδης, Θ. Σαμαράς,
Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων
ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

και η τυπική αβεβαιότητα $u(y)$, ως η τυπική απόκλιση του μεγέθους εξόδου:

$$u(y) = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{r=1}^M (y_r - y)^2} \quad (7)$$

Για τον υπολογισμό του διαστήματος κάλυψης υπάρχουν δύο επιλογές: α) Το πιθανοτικά συμμετρικό διάστημα κάλυψης (probabilistically symmetric coverage interval), που υπολογίζεται αφαιρώντας συμμετρικά από τα δύο άκρα της κατανομής τις τιμές που δεν περιλαμβάνονται σε αυτό (π.χ. για 95% διάστημα κάλυψης, αφαιρείται 2,5% των τιμών από το κάτω και 2,5% από το άνω άκρο της κατανομής). β) Το μικρότερο δυνατό διάστημα κάλυψης (shortest coverage interval) για τον υπολογισμό του οποίου επιλέγεται το μικρότερο σε εύρος διάστημα κάλυψης που περιλαμβάνει το επιθυμητό ποσοστό τιμών της κατανομής.

Η εφαρμογή της μεθόδου GUMS1 πλεονεκτεί έναντι της GUM σε περιπτώσεις όπου το μοντέλο είναι μη γραμμικό ή υπάρχει μία επικρατούσα ή περισσότερες μη κανονικές κατανομές των εισερχόμενων μεγεθών. Αντιθέτως απαιτεί περισσότερο υπολογιστικό χρόνο σε σχέση με αυτόν που απαιτείται για την εφαρμογή της GUM.

3. Εφαρμογή της μεθόδου GUMS1 σε μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Στις μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλών συχνοτήτων το μετρούμενο μέγεθος είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου E (V/m). Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με τη χρήση συχνοεπιλεκτικού μετρητή, η αβεβαιότητα του οποίου, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, διαφοροποιείται ανάλογα με την περιοχή συχνοτήτων (πίνακας 1). Ο έλεγχος της συμμόρφωσης ή μη με τα όρια ασφαλούς έκθεσης γίνεται μέσω του μεγέθους του Συνολικού Λόγου Έκθεσης Λ που ορίζεται ως:

$$\Lambda = \sum_{j=1}^K \frac{E_{meas,j}^2}{E_{lim,j}^2} \quad (8)$$

όπου $E_{meas,j}$ η μετρούμενη τιμή της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου στην j -οστή περιοχή συχνοτήτων, $E_{lim,j}$ το αυστηρότερο όριο σε αυτήν την περιοχή συχνοτήτων, και K το πλήθος των περιοχών συχνοτήτων, στις οποίες πραγματοποιείται μέτρηση. Τιμές του Συνολικού Λόγου Έκθεσης μικρότερες της μονάδας αντιστοιχούν σε συμμόρφωση με τα όρια ασφαλούς έκθεσης και μεγαλύτερες της μονάδας σε υπέρβαση αυτών.

3.1 Εκτίμηση της αβεβαιότητας στη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με συχνοεπιλεκτικό μετρητή

Οι επιμέρους παράγοντες που συνεισφέρουν στη συνολική αβεβαιότητα της μέτρησης για διάφορες περιοχές συχνοτήτων, ελήφθησαν από το πληροφοριακό έντυπο (datasheet) του κατασκευαστή του συχνοεπιλεκτικού μετρητή και παρατίθενται στον πίνακα 1 τόσο με

Σ. Ιακωβίδης, Χ. Αποστολίδης, Θ. Σαμαράς,
Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων
ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

γραμμικούς όρους (%) όσο και με λογαριθμικούς (dB). Στον ίδιο πίνακα φαίνεται και η κατανομή του κάθε παράγοντα αβεβαιότητας σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Πίνακας 1: Συνοπτική παρουσίαση αποτελεσμάτων εκτίμησης της αβεβαιότητας στη μέτρηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου με συχνοεπιλεκτικό μετρητή με τις μεθόδους GUM και GUMS1

Παράγοντας αβεβαιότητας	Κατανομή	75-300 MHz		900-1400 MHz		1.8-2.2 GHz		2.2-2.7 GHz	
		Τυπική αβεβαιότητα		Τυπική αβεβαιότητα		Τυπική αβεβαιότητα		Τυπική αβεβαιότητα	
		%	dB	%	dB	%	dB	%	dB
Αβεβαιότητα βασικής μονάδας	Κανονική	6.9	0.56	6.9	0.56	6.9	0.56	6.9	0.56
Αβεβαιότητα διακρίβωσης κεραίας	Κανονική	6.2	0.51	9.6	0.77	6.2	0.51	6.2	0.51
Ανισοτροπικότητα κεραίας	Ορθογωνική	3.4	0.29	5.6	0.46	10.9	0.87	12.9	1.01
Ατελής προσαρμογή κεραίας – β. μονάδας	U-shape	10.4	0.84	8.4	0.69	5.6	0.46	6.1	0.51
GUM	Άνω όριο 95% δ/τος κάλυψης	28.12	2.29	30.47	2.47	30.12	2.43	33.36	2.67
GUMS1 (A)	Άνω όριο 95% δ/τος κάλυψης	29.3		32.9		32.0		35.3	
GUMS1 (B)	Άνω όριο 95% δ/τος κάλυψης		2.21		2.45		2.38		2.59

Η εφαρμογή των μεθόδων GUM και GUMS1 έγινε με δύο διαφορετικές θεωρήσεις, όσον αφορά στις κατανομές των εισερχόμενων μεγεθών:

A) Εφαρμογή του είδους κατανομής που δίνει ο κατασκευαστής θεωρώντας γραμμικούς όρους (%).

B) Εφαρμογή του είδους κατανομής που δίνει ο κατασκευαστής θεωρώντας λογαριθμικούς όρους (dB).

Οι δύο αυτές θεωρήσεις απαντώνται συνηθέστερα σε πληροφοριακά έντυπα ή πιστοποιητικά διακρίβωσης διαφόρων κατασκευαστών και εργαστηρίων διακρίβωσης και ως εκ τούτου επιλέχθηκαν για την παρούσα μελέτη.

Το μαθηματικό μοντέλο που συνδέει τα εισερχόμενα μεγέθη με το εξερχόμενο δε δίνεται από τον κατασκευαστή. Επιλέχθηκε το πολλαπλασιαστικό μοντέλο (ETSI TR 100 028-1:2001 και ΕΛΟΤ 1422-3:2007):

$$Y=X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (9)$$

σε περίπτωση που τα εισερχόμενα μεγέθη εκφράζονται με γραμμικούς όρους (%) που ισοδυναμεί με το αθροιστικό μοντέλο:

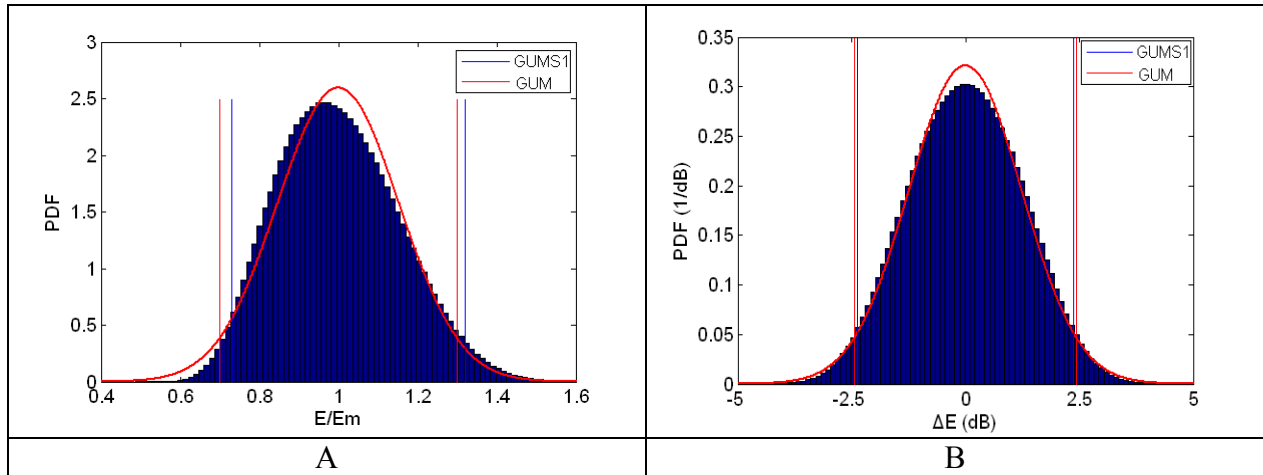
$$Y=X_1+X_2+X_3+X_4 \quad (10)$$

σε περίπτωση που τα εισερχόμενα μεγέθη εκφράζονται με λογαριθμικούς όρους (dB).

Σ. Ιακωβίδης, Χ. Αποστολίδης, Θ. Σαμαράς,
Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

Για τις θεωρήσεις A και B έγινε ο υπολογισμός της αβεβαιότητας με τις δύο μεθόδους (GUM και GUMS1). Για τον προσδιορισμό των απαραίτητων επαναλήψεων, υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB η προσαρμοστική μέθοδος Monte Carlo (GUMS1, 2008 και Fernandez et al., 2009). Βάσει των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι για πλήθος επαναλήψεων ίσο με 10^7 προκύπτει ικανοποιητική ακρίβεια δύο δεκαδικών ψηφίων. Για τον υπολογισμό του διαστήματος κάλυψης επιλέχθηκε το πιθανοτικά συμμετρικό διάστημα κάλυψης καθώς, λόγω της συμμετρίας του, υπάρχει ίση πιθανότητα υπέρβασης του άνω και κάτω ορίου. Έτσι είναι καταλληλότερο για λόγους σύγκρισης με το αντίστοιχο που προκύπτει από τη μέθοδο GUM, το οποίο είναι και αυτό πιθανοτικά συμμετρικό.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρουσιάζονται συνοπτικά στον πίνακα 1 όπου επιλέχθηκε το άνω όριο του 95% διαστήματος κάλυψης σαν μέτρο σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Στο σχήμα 2 φαίνονται αναλυτικά οι κατανομές των μεγεθών και τα όρια του διαστήματος κάλυψης για τις δύο μεθόδους και τις θεωρήσεις A και B, στην περιοχή συχνοτήτων 1.8 – 2.2GHz.



Σχήμα 2: Κατανομές και όρια 95% διαστήματος κάλυψης για το εξερχόμενο μέγεθος σύμφωνα με τις μεθόδους GUM (κόκκινο, γραμμή) και GUMS1 (μπλε, ιστόγραμμα) για την περιοχή συχνοτήτων 1.8-2.2GHz βάσει των δυο διαφορετικών θεωρήσεων A και B

3.2 Εκτίμηση της αβεβαιότητας του Συνολικού Λόγου Έκθεσης

Τα παραπάνω αποτελέσματα, και ειδικότερα αυτά της θεώρησης A, χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της αβεβαιότητας του Συνολικού Λόγου Έκθεσης Λ (εξ. 8) για δύο περιπτώσεις μέτρησης: σε εσωτερικό (indoor) και εξωτερικό (outdoor) περιβάλλον. Η θεώρηση A προτιμήθηκε έναντι των υπολοίπων, επειδή στο ισοζύγιο αβεβαιοτήτων που παρέχεται από τον κατασκευαστή ο υπολογισμός των αβεβαιοτήτων βάσει του GUM γίνεται θεωρώντας γραμμικούς όρους (%).

Στην περίπτωση του εσωτερικού περιβάλλοντος θεωρήθηκε ότι έχουμε εκπομπές στις εφαρμογές του ασύρματου τηλεφώνου (DECT) και του ασύρματου τοπικού δικτύου υπολογιστών (WiFi). Επομένως θεωρήθηκε η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στις ζώνες

Σ. Ιακωβίδης, Χ. Αποστολίδης, Θ. Σαμαράς,
Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

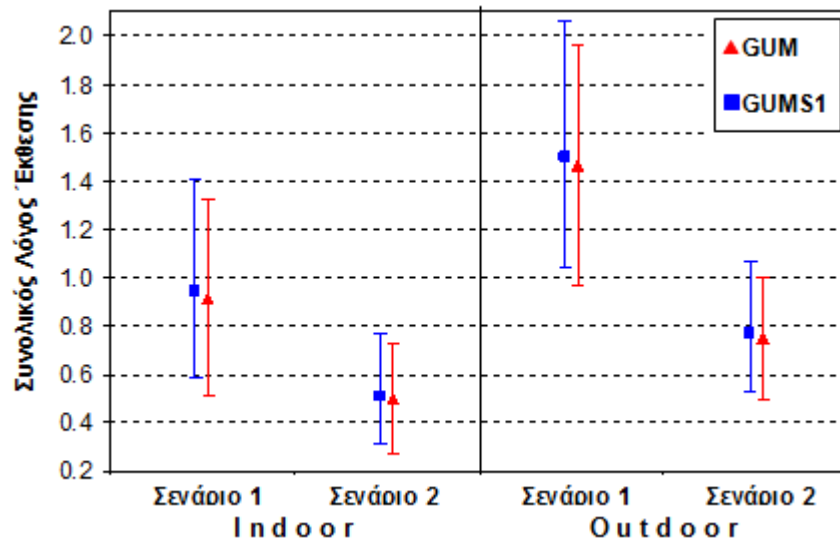
συχνοτήτων 1.8-2.2GHz και 2.2-2.7GHz. Στη δεύτερη περίπτωση (του εξωτερικού χώρου) θεωρήθηκε ότι έχουμε εκπομπές στις υπηρεσίες της ραδιοφωνίας (FM) και της κινητής τηλεφωνίας (GSM, DCS και UMTS). Επομένως λήφθηκε υπόψη η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στις ζώνες συχνοτήτων 75-300MHz, 900-1400MHz και 1.8-2.2GHz. Για την επιλογή της «μετρούμενης» τιμής ($E_{meas,j}$) χρησιμοποιήθηκαν δύο σενάρια:

- 1) $E_{meas,j} = E_{lim,j} - 2 \cdot u_{c,j} \cdot E_{lim,j}$
- 2) $E_{meas,j} = E_{lim,j} / 2$,

όπου $E_{lim,j}$ το αυστηρότερο όριο σε κάθε περιοχή συχνοτήτων και $u_{c,j}$ η συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα σε αυτή (κατά GUM). Υλοποιήθηκε, όπως και παραπάνω, η προσαρμοστική μέθοδος Monte Carlo και επιλέχθηκε πλήθος επαναλήψεων ίσο με 10^7 (για ακρίβεια 2 δεκαδικών ψηφίων). Και σε αυτήν την περίπτωση επιλέχθηκε το πιθανοτικά συμμετρικό διάστημα κάλυψης. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον πίνακα 2 και τα σχήματα 3 και 4 που ακολουθούν.

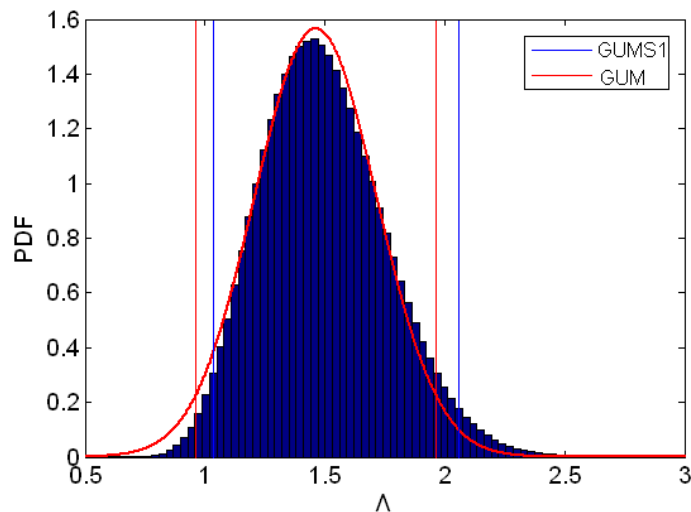
Πίνακας 2: Αποτελέσματα εκτίμησης της αβεβαιότητας στο συνολικό λόγο έκθεσης με τις μεθόδους GUM και GUMS1

Περίπτωση Μέτρησης	Σενάριο	GUM				GUMS1			
		Δ	$u(\Delta)$	Κάτω όριο 95% δ/τος κάλυψης	Άνω όριο 95% δ/τος κάλυψης	Δ	$u(\Delta)$	Κάτω όριο 95% δ/τος κάλυψης	Άνω όριο 95% δ/τος κάλυψης
Indoor	1	0.91	0.21	0.51	1.32	0.94	0.22	0.58	1.41
	2	0.5	0.11	0.28	0.72	0.51	0.12	0.31	0.77
Outdoor	1	1.46	0.25	0.96	1.96	1.50	0.26	1.04	2.06
	2	0.75	0.13	0.49	1.01	0.77	0.14	0.53	1.06



Σχήμα 3: Αποτελέσματα εκτίμησης της αβεβαιότητας στο Συνολικό Λόγο Έκθεσης με τις μεθόδους GUM και GUMS1

Σ. Ιακωβίδης, Χ. Αποστολίδης, Θ. Σαμαράς,
 Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
 Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



Σχήμα 4: Κατανομές και όρια 95% διαστήματος κάλυψης για το Συνολικό Λόγο Έκθεσης σύμφωνα με τις μεθόδους GUM (κόκκινο, γραμμή) και GUMS1 (μπλε, ιστόγραμμα) (Indoor-Σενάριο 1)

4. Συμπεράσματα

Η εφαρμογή της μεθόδου GUMS1 οδηγεί σε διαφορετικά αποτελέσματα συγκριτικά με την GUM, όσον αφορά την εκτίμηση της αβεβαιότητας στις μετρήσεις ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αυτό είναι εμφανές σε περιπτώσεις όπου είτε το μοντέλο δεν είναι γραμμικό (§3.1, θεώρηση A και §3.2) είτε υπάρχει μια κατανομή εισερχόμενου μεγέθους με μεγάλη (συγκριτικά με τις υπόλοιπες) αβεβαιότητα, η οποία είναι μη κανονική (§3.1, θεώρηση B).

Πιο συγκεκριμένα το μη γραμμικό μοντέλο (εξ. 9) που χρησιμοποιείται στη θεώρηση A της §3.1 (θεώρηση κατανομών με γραμμικούς όρους, %) έχει σαν αποτέλεσμα τη μη ορθή εφαρμογή τόσο του νόμου διάδοσης των αβεβαιοτήτων (εξ. 2) όσο και του θεωρήματος κεντρικού ορίου. Έτσι το εξερχόμενο μέγεθος δεν παρουσιάζει κανονική κατανομή (σχήμα 2A) και το διάστημα εμπιστοσύνης που υπολογίζεται με τις δύο μεθόδους παρουσιάζει απόκλιση.

Στην περίπτωση της θεώρησης B της §3.1 (θεώρηση κατανομών με λογαριθμικούς όρους, dB), το μοντέλο είναι γραμμικό επομένως ο νόμος διάδοσης των αβεβαιοτήτων εφαρμόζεται ορθά. Λόγω όμως της μη κανονικής (ορθογωνικής) κατανομής της ανισοτροπικότητας της κεραίας, της οποίας η συνεισφορά στη συνολική αβεβαιότητα είναι συγκριτικά μεγάλη, το θεώρημα κεντρικού ορίου δεν εφαρμόζεται ικανοποιητικά. Αυτό οδηγεί σε απόκλιση της τελικής κατανομής από την κανονική και κατά συνέπεια σε διαφορετική εκτίμηση των ορίων του διαστήματος κάλυψης (σχήμα 2B). Η απόκλιση αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται η συνεισφορά στην τελική αβεβαιότητα ενός εισερχόμενου μεγέθους με μη κανονική κατανομή, όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα του πίνακα 1.

Στο παράδειγμα της §3.2 η μη γραμμικότητα του μοντέλου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του Συνολικού Λόγου Έκθεσης, οδηγεί σε εμφανείς αποκλίσεις στον Σ. Ιακωβίδης, Χ. Αποστολίδης, Θ. Σαμαράς,

Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.

Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

προσδιορισμό του διαστήματος κάλυψης που υπολογίζεται με τις δύο μεθόδους. Αυτό μπορεί να έχει επίδραση στο εξαγόμενο συμπέρασμα ως προς τη συμμόρφωση με τα όρια που έχουν θεσπιστεί από την ελληνική νομοθεσία. Συγκεκριμένα, στο παράδειγμα μέτρησης σε εξωτερικό χώρο για το σενάριο 1 η εφαρμογή της μεθόδου GUM οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει πιθανή υπέρβαση των ορίων (το κάτω όριο του διαστήματος εμπιστοσύνης είναι μικρότερο της μονάδας), ενώ η εφαρμογή της μεθόδου GUMS1 οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπάρχει υπέρβαση των ορίων (ολόκληρο το διάστημα κάλυψης περιλαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας).

5. Βιβλιογραφία

ΕΛΟΤ 1422-3 “Συνεγκατάσταση κεραιών ραδιοεπικοινωνιών – Μέρος 3: Τεχνικές Δοκιμών και Μετρήσεων – Όρια”, 2007, Έκδοση 1η

ΕΛΟΤ EN 50492 “Βασικό πρότυπο για την επιτόπια μέτρηση της έντασης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε σχέση με την έκθεση του ανθρώπου σε γειτνίαση με σταθμούς βάσης”, 2008

GUM, Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), “*Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*”, JCGM 100:2008, First edition 2008

GUMS1, Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), “*Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the ‘Guide to the expression of uncertainty in measurement’ – Propagation of distributions using a Monte Carlo method*”, JCGM 101:2008, First edition 2008.

ETSI TR 100 028-1, “*Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Uncertainties in the measurement of mobile radio equipment characteristics; Part 1*”, 2001

Solaguren-Beascoa Fernandez M, Alegre Calderon JM, Bravo Diez PM, “*Implementation in MATLAB of the adaptive Monte Carlo method for the evaluation of measurement uncertainties*”, Accreditation and Quality Assurance, Volume 14, Issue 2, pp 95-106, 2009

ISO/IEC 17025 “*General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*”, 2005

Σ. Ιακωβίδης, Χ. Αποστολίδης, Θ. Σαμαράς,
Εργαστήριο Ραδιοεπικοινωνιών, Τμήμα Φυσικής, Α.Π.Θ.
Εφαρμογή της μεθόδου Monte Carlo (GUMS1) στην εκτίμηση της αβεβαιότητας μετρήσεων
ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας