Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΜΗΚΟΥΣ ΚΩΔΙΚΗΣ ΛΕΞΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΡΥΘΜΟΥ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΣΕ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΕΚΠΕΜΠΟΜΕΝΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΚΑΛΩΔΙΩΣΗΣ ΤΥΠΟΥ SPACEWIRE

Α. Θ. Μπακλέζος[1], Χ. Δ. Νικολόπουλος[1], Σ. Τσατάλας[2] και Χ. Ν. Καψάλης[1]

[1]Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου
[2]EMTECH Διαστημική Μ.ΙΚΕ, Κορίνθου 32, Μεταμόρφωση
e-mail: an.baklezos@gmail.com

Περίληψη

Η επιθυμητή ταχύτητα ζεύξης (Link Speed) καθώς και το απαραίτητο μήκος τη κωδικής λέξης (σε διφία – bits) των ψηφιακών συστημάτων επιδρούν σημαντικά στο σχεδιασμό των μονάδων εξοπλισμού διαστημικών αποστολών όσον αφορά τη λειτουργία τους αλλά και τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Σε αυτήν την εργασία αξιολογείται η συμπεριφορά μιας διασύνδεσης διαφορικής σηματοδοσίας χαμηλής τάσης (LVDS - Low Voltage Differential Signaling/Spacewire) μέσω μετρήσεων ακτινοβολούμενου πεδίου καθώς και μέσω μετρήσεων του φάσματος του απευθείας σήματος που διατρέχει το καλώδιο. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν διάφορες τιμές συχνότητας παλμών και μήκους κωδικής λέξης και από τα αποτελέσματα είναι ξεκάθαρο ότι υψηλότερες συχνότητες παλμών αυξάνουν τις εκπομπές ακτινοβολίας του συστήματος. Οι ακτινοβολούμενες εκπομπές επηρεάζονται επίσης από το μήκος της κωδικής λέξης, γεγονός που καταδεικνύεται απ' ότι το πλάτος και η απόσταση των φασματικών γραμμών της συνιστώσας του πεδίου μεταβάλλονται καθώς διαφοροποιείται το μήκος της κωδικής λέξης. Ο καθορισμός των συχνοτήτων περιοχών εμφάνισης των ακτινοβολούμενων ηλεκτρομαγνητικών πεδίων καθώς και του πλάτους τους συναρτήσει της συχνότητας επανάληψης του παλμού και του μήκους της κωδικής λέξης αποτελεί παράγοντα του συστήματος που μπορεί να οδηγήσει στην επιθυμητή ηλεκτρομαγνητική καθαρότητα σε περιοχές ενδιαφέροντος.

Λέξεις-Κλειδιά: Ηλεκτρομαγνητική Συμβατότητα, Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές, Μέτρηση Ακτινοβολίας Ηλεκτρικού Πεδίου, LVDS, SpaceWire.

1 Εισαγωγή

Το σύστημα ψηφιακών ζεύξεων Spacewire (SpW) / Low Voltage Differential Signaling (LVDS) χρησιμοποιείται σε αρκετές τρέχουσες αλλά και σε μελλοντικές αποστολές της Ευρωπαϊκής Διαστημικής Υπηρεσίας (European Space Agency – ESA). Για παράδειγμα στις: GAIA, ExoMars, BepiColombo and Sentinel 1 – 3 & 5, JUICE, EUCLID, THOR and PLATO. Αντίστοιχα η NASA το χρησιμοποιεί σε αποστολές όπως SWIFT, Lunar Reconnaissance Orbiter, LCROSS, GOES-R και άλλες (ESA SpaceWire 2016) Οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές (Electromagnetic Interference) που μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία των συστημάτων και υποσυστημάτων είναι ένας από τους βασικούς παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά τη σχεδίαση κάθε

Α. Θ. Μπακλέζος, Χ. Δ. Νικολόπουλος και Χ. Ν. Καψάλης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Σ. Τσατάλας, EMTECH Διαστημική Μ.ΙΚΕ

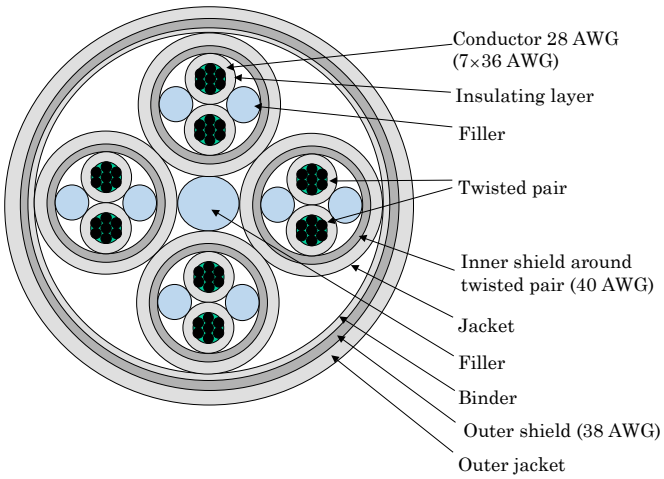
διαστημικής αποστολής (Leininger et al. 2012, Nicoletto et al. 2014). Η μελέτη των παραμέτρων της ζεύξης από τη σκοπιά της επίδραση στην επίδοση του συστήματος και των ακτινοβολουμένων πεδίων είναι κομβική στην βέλτιστη σχεδίαση των εξαρτήσεων των καλωδιώσεων (harnesses) του διαστημοπλοίου.
Η μέτρηση των διάφορων παραμέτρων προσφέρει από τη μια επίγνωση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα καθώς και επικύρωση των αναδυόμενων θεωριών. Στην περίπτωση ενός συστήματος SpW/LVDS, ο αναγκαίος εξοπλισμός για την συγκρότηση ενός συστήματος με σκοπό την μέτρηση του είναι αρκετά ακριβός και δεν είναι ευρέως διαθέσιμος.
Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια χαμηλού κόστους υλοποίηση ενός ημιαμφίδρομου (half duplex) συστήματος και χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των ακτινοβολουμένων εκπομπών καθώς και της φασματικής πυκνότητας του κωδικοποιημένου LVDS σήματος απευθείας από το κάθε ζεύγος αγωγών του καλωδίου.
Δυο από τις πιο σημαντικές παραμέτρους μιας ζεύξης είναι η ταχύτητα ζεύξης και το μήκος της σχηματομορφής (pattern length). Και οι δυο ποσότητες επιδρούν στο φασματικό περιεχόμενο του μεταδιδόμενου σήματος στο καλώδιο και κατ' επέκταση στις ακτινοβολούμενες εκπομπές του συστήματος. Στην παρούσα εργασία διαφορετικές συχνότητες παλμών και μήκη σχηματομορφών δεδομένων εισόδου συγκρίνονται όσον αφορά τη φασματική πυκνότητα του παραγομένου σήματος πάνω στο καλώδιο καθώς και τις ακτινοβολούμενες εκπομπές.
Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται εν συντομία το σύστημα SpW/LVDS. Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται το ανεπτυγμένο σύστημα και η μεθοδολογία μέτρησης. Τέλος, στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων και ο σχολιασμός τους.

2 Σύντομη Επισκόπηση του Συστήματος

2.1 Περιγραφή Καλωδίου SpaceWire

Το καλώδιο τύπου SpaceWire αποτελείται από 4 συνεστραμμένα ζεύγη αγωγών, με το κάθε ζεύγος να είναι θωρακισμένο, και μια ολική θωράκιση όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Τα ζεύγη χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση διαφορικού σήματος με την χαρακτηριστική διαφορική εμπέδηση του ζεύγους να είναι $(100 \pm 6)\ \Omega$.
Αν και υπάρχουν διάφοροι τύποι καλωδιώσεων και συνδέσμων (connectors) SpaceWire (ECSS 2003, ECSS 2012), στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η ευρύτερα χρησιμοποιουμένη παραλλαγή. Σε αυτή επίσης χρησιμοποιείται ένας σύνδεσμος micro-miniature D-type. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται μια εγκάρσια του καλωδίου, ενώ ο θηλυκός σύνδεσμος που εγκαταστάθηκε στον υλοποιημένο LVDS driver απεικονίζεται στο Σχήμα 4.

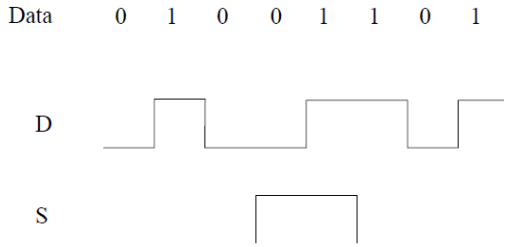
Α. Θ. Μπακλέζος, Χ. Δ. Νικολόπουλος και Χ. Ν. Καψάλης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Σ. Τσατάλας, EMTECH Διαστημική Μ.ΙΚΕ



Σχήμα 1: Εγκάρσια τομή καλωδίου Spacewire (ECSS, E. 2012)

2.2 Τεχνικές Σηματοδοσίας και Κωδικοποίησης

Η τεχνική LVDS όπως περιγράφεται στο ANSI/TIA/EIA-644 (Telecommunications Industry Association 2012) χρησιμοποιεί ισοσταθμισμένα (balanced) σήματα για να προσφέρει ζεύξεις πολύ υψηλής ταχύτητας με χαμηλή απόκλιση τάσης (voltage swing) γύρω στα 350 mV. Η ισοσταθμισμένη ή διαφορική σηματοδοσία παρέχει αρκετό περιθώριο θορύβου (noise margin) και χαμηλή κατανάλωση ισχύος σε υψηλές ταχύτητες [5].
Το πρότυπο SpaceWire χρησιμοποιεί κωδικοποίηση Data-Strobe (DS). Σε αυτό το σχήμα, τα προς μετάδοση δεδομένα κωδικοποιούνται μαζί με το ρολόι μετάδοσης (clock) σε δυο σήματα Data και Strobe ώστε το ρολόι να ανακτάται με την εκτέλεση μιας πράξης XOR αναμεσά στις γραμμές σημάτων Data και Strobe. Οι τιμές δεδομένων μεταδίδονται απευθείας και το σήμα Strobe μεταβαίνει στην άλλη κατάσταση (χαμηλή →υψηλή και το ανάποδο) οπότε το σήμα Data παραμένει ίδιο από ένα διάστημα bit στο επόμενο. Χρησιμοποιώντας κωδικοποίηση DS αυξάνεται η ανοχή στην λόξωση (skew) σε περίπου χρόνο διάρκειας 1-bit σε σχέση με το 0,5 bit χρόνο που προσφέρει η απλή κωδικοποίηση data και clock. Μια ζεύξη SpaceWire αποτελείται από δυο ζεύγη διαφορικών σημάτων. Το ένα μεταδίδει τα σήματα D(Data) και S(Strobe) στην μια διεύθυνση και το δεύτερο μεταδίδει τα αντίστοιχα σήματα στην αντίθετη διεύθυνση. Έτσι για κάθε αμφίδρομη ζεύξη απαιτούνται 8 αγωγοί (ECSS, E. 2012). Το σχήμα κωδικοποίησης DS αναπαρίσταται στο Σχήμα 2.



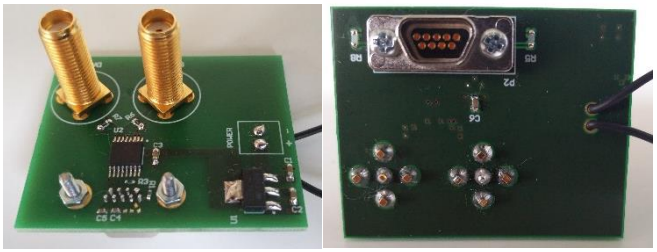
Σχήμα 2: Σχήμα κωδικοποίησης σημάτων Data-Strobe (DS) (ECSS, E. 2012)

3 Σχεδιασμός και Υλοποίηση της Μετρητικής Διάταξης

Η διάταξη της μέτρησης αναπαρίσταται στο Σχήμα 3 και είναι σε συμφωνία με τα ευρωπαϊκά πρότυπα (ECSS, E. 2003). Τοποθετείται 1 m καλωδίου SpW σε ύψος 0.05 m πάνω από ένα επίπεδο γείωσης φτιαγμένο από αλουμίνιο διαστάσεων 2.5 x 1 x0.005m. Το καλώδιο τοποθετείται 0.1 m από την άκρη του επιπέδου γείωσης.

Σχήμα 3: Διάταξη μέτρησης ακτινοβολούμενων εκπομπών ηλεκτρικού πεδίου.

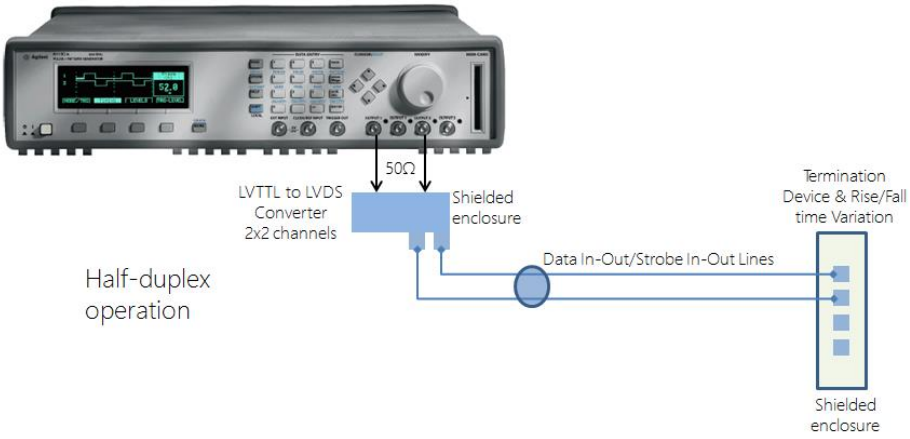
Ο άξονας της κεραίας μέτρησης των ακτινοβολουμένων εκπομπών είναι κάθετος στην διεύθυνση του καλωδίου. Η κεραία είναι τοποθετημένη 1 m από το μέσο του καλωδίου και σε ύψος 1.2 m, ενώ το επίπεδο αλουμινίου (γείωσης) είναι σε ύψος 0.9 m.



Σχήμα 4: Υλοποίηση τυπωμένου κυκλώματος του προγράμματος οδήγησης LVDS

Αποσκοπώντας στην προσομοίωση της λειτουργίας μιας ζεύξης SpW/LVDS σχεδιάστηκε και κατασκευάσθηκε μια μικρών διαστάσεων κάρτα προτυπωμένων στοιχείων PCB (Σχήμα 4) η οποία δρα σαν μια πλήρης συσκευή διεπαφής LVDS. Η συσκευή διεπαφής οδηγεί το σήμα από την έξοδο 50 Ω της γεννήτριας στο 100 Ω καλώδιο SpW. Η συσκευή διεπαφής τροφοδοτείται από τις εξόδους της γεννήτριας Agilent 81130A με τα σήματα Data και Strobe και παρέχει έξοδο LVDS. Με τη χρήση μιας δεύτερης πανομοιότυπης συσκευής τροφοδοτούμενης από μια δεύτερη γεννήτρια υποστηρίζεται πλήρης αμφίδρομη λειτουργία. Επιπρόσθετα η συσκευή διεπαφής διευθετεί αντιστάσεις τερματισμού για τα σήματα που τροφοδοτούνται από το άλλο άκρο της ζεύξης. Η κάρτα PCB της διεπαφής LVDS καθώς και οι αντιστάσεις τερματισμού είναι κλεισμένες σε θωρακισμένο κουτί γειωμένο στο αλουμινένιο επίπεδο γείωσης. Έτσι το καλώδιο τερματίζεται με αντιστάσεις 100 Ω (Σχήμα 5) προσομοιώνοντας την ημιαμφίδρομη λειτουργία της ζεύξης SpW/LVDS.

Α. Θ. Μπακλέζος, Χ. Δ. Νικολόπουλος και Χ. Ν. Καψάλης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Σ. Τσατάλας, EMTECH Διαστημική Μ.ΙΚΕ



Σχήμα 5: Ημιαμφίδρομη λειτουργία της ζεύξης SpW/LVDS

Για την μέτρηση της φασματικής πυκνότητας των διαφορικών σημάτων πάνω στο καλώδιο, η μέτρηση γίνεται σε κάθε ζεύγος αγωγών ανεξάρτητα πάνω στις αντιστάσεις τερματισμού 100 Ω.

4 Αποτελέσματα μετρήσεων ζεύξης SpW/LVDS

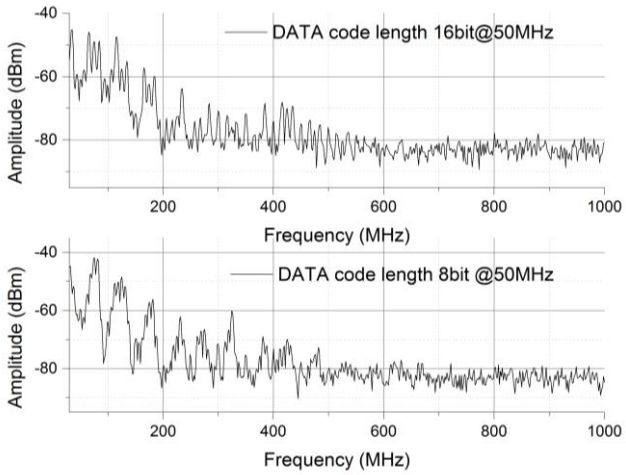
Όλες οι μετρήσεις διενεργήθηκαν στο ανηχοϊκό θάλαμο (Μ: 6.75 m× Π: 3.35 m× Υ: 2.75 m) του εργαστηρίου Ασυρμάτου και Επικοινωνίας Μεγάλων Αποστάσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας για την μέτρηση ακτινοβολούμενων εκπομπών καθώς και τη μέτρηση φασματικής πυκνότητας του σήματος πάνω στο καλώδιο παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.
Για όλες τις μετρήσεις στο εύρος συχνοτήτων 30 MHz – 1 GHz, το εύρος ζώνης 6 dB επιλέγεται να είναι 100 KHz. Επίσης ο χρόνος μέτρησης είναι 0.015 s και ο ελάχιστος χρόνος μέτρησης είναι 0.15 s / MHz.

Πίνακας 1: Εξοπλισμός Μετρήσεων

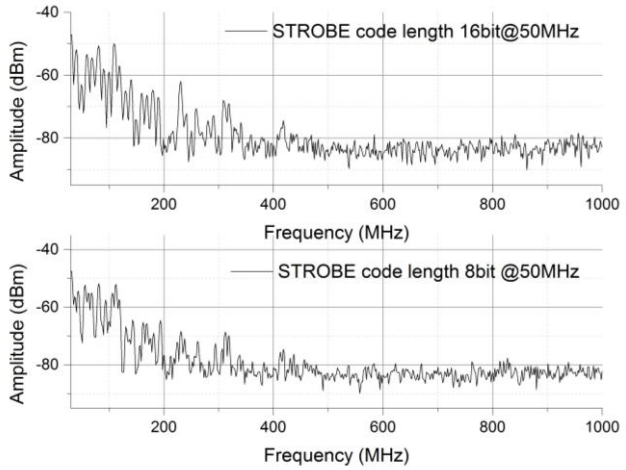
Schaffner CBL6141A	Bilog Antenna, 30 MHz – 2 GHz, VSWR: <2.0:1
Schaffner SMR 4503	EMI Measuring Receiver, 9 kHz – 2.75 GHz
Agilent 81130A	Arbitrary Function Generator
SpaceWire assembly	2.5 metres-long. Cable AWG 28. Standard construction and wiring per ECSS-E-ST-50-12C
Anritsu MS2721A	Handheld Spectrum Analyzer

Για την επίδειξη της επίδρασης του μήκους σχηματομορφής στην φασματική πυκνότητα του σήματος χρησιμοποιούνται δυο διαφορετικές κώδικες λέξεις με μήκος 8 bit και 16 Bit. Τα δυο σενάρια μήκους σχηματομορφής μετρήθηκαν για συχνότητες παλμών 50, 100 and 150 MHz και τα συγκριτικά αποτελέσματα στην περίπτωση του σήματος Data παρουσιάζονται στα Σχήματα 6, 8 και 10. Στην περίπτωση του φάσματος του σήματος STROBE τα συγκριτικά αποτελέσματα των μετρήσεων παρουσιάζονται στα Σχήματα 7, 9 και 11 αντίστοιχα.

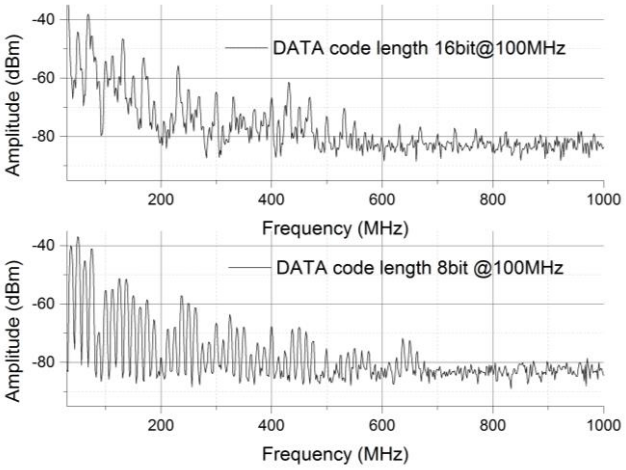
Α. Θ. Μπακλέζος, Χ. Δ. Νικολόπουλος και Χ. Ν. Καψάλης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Σ. Τσατάλας, EMTECH Διαστημική Μ.ΙΚΕ



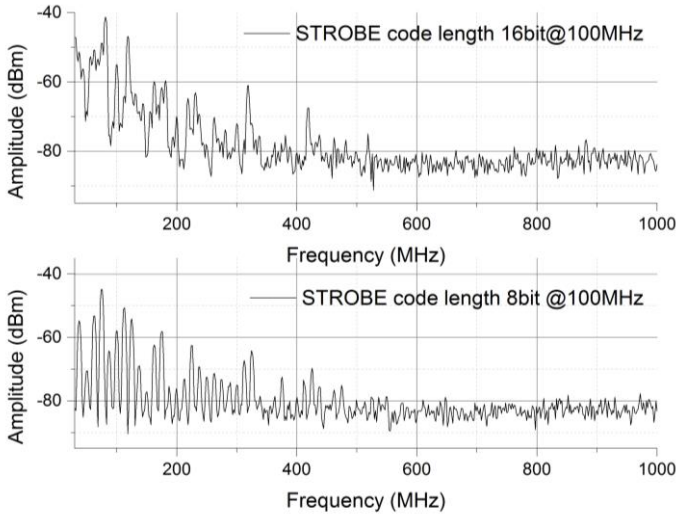
Σχήμα 6: Συγκριτικά διαγράμματα Διαφορετικών Μηκών κωδικών λέξεων με ρυθμό μετάδοσης παλμού 50 MHz



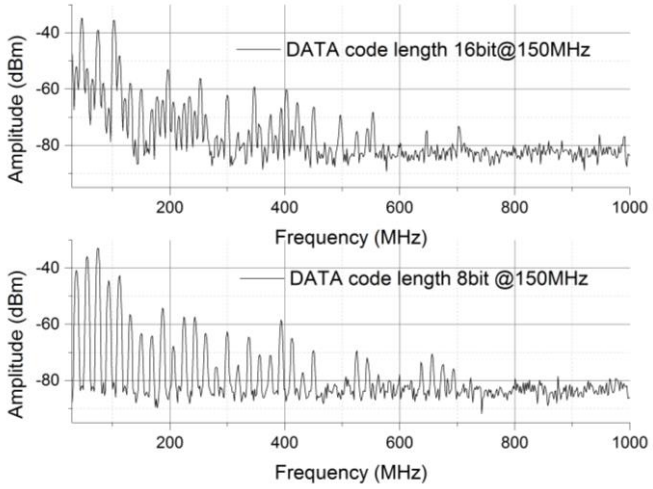
Σχήμα 7: Συγκριτικά διαγράμματα Διαφορετικών Μηκών κωδικών λέξεων με ρυθμό μετάδοσης παλμού 50 MHz



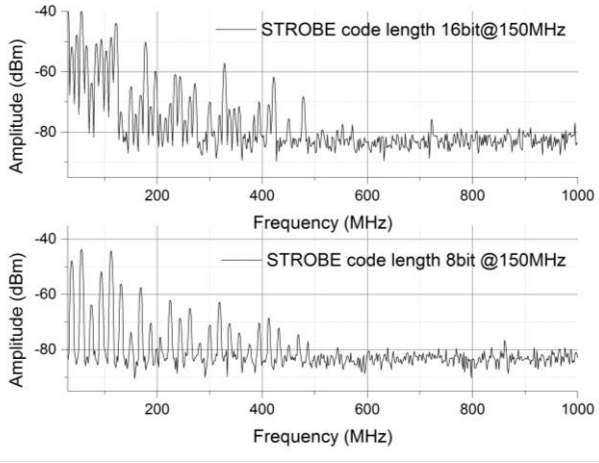
Σχήμα 8: Συγκριτικά διαγράμματα Διαφορετικών Μηκών κωδικών λέξεων με ρυθμό μετάδοσης παλμού 100MHz



Σχήμα 9: Συγκριτικά διαγράμματα Διαφορετικών Μηκών κωδικών λέξεων με ρυθμό μετάδοσης παλμού 100MHz



Σχήμα 10: Συγκριτικά διαγράμματα Διαφορετικών Μηκών κωδικών λέξεων με ρυθμό μετάδοσης παλμού 150MHz

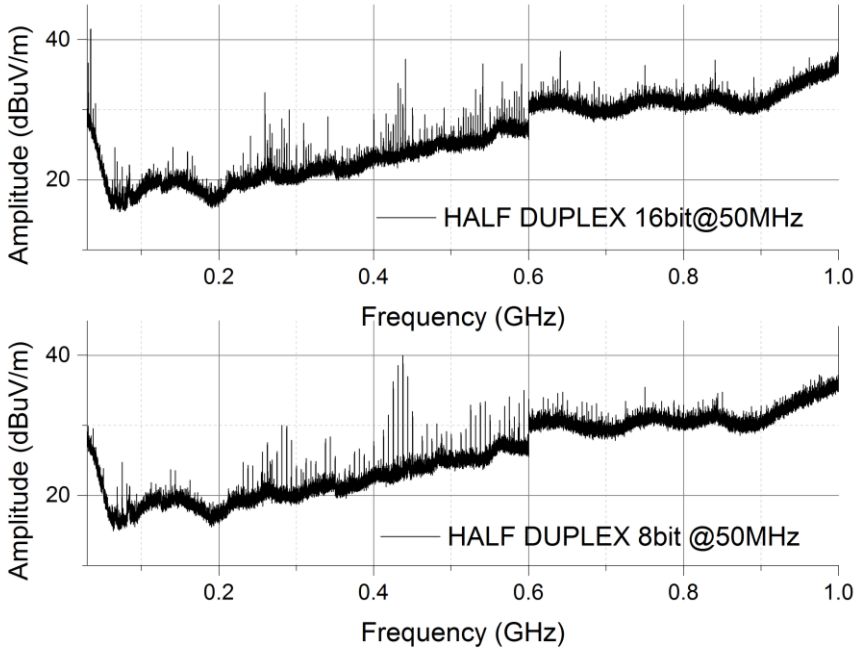


Σχήμα 11: Συγκριτικά διαγράμματα Διαφορετικών Μηκών κωδικών λέξεων με ρυθμό μετάδοσης παλμού 150MHz

---

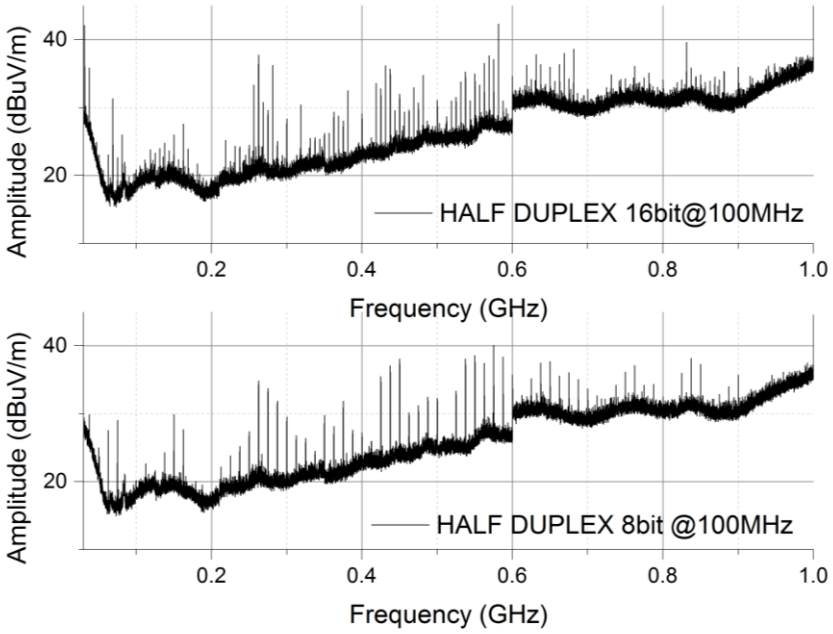
Α. Θ. Μπακλέζος, Χ. Δ. Νικολόπουλος και Χ. Ν. Καψάλης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Σ. Τσατάλας, EMTECH Διαστημική Μ.ΙΚΕ

Τα συγκριτικά αποτελέσματα των μετρήσεων ακτινοβολούμενων εκπομπών στην περίπτωση του ρυθμού παλμών 50MHz ημιαμφίδρομης λειτουργίας για μήκος σχηματομορφής 8 bit και 16 bit παρουσιάζονται στο Σχήμα 12. Είναι ξεκάθαρο ότι η μεγαλύτερη σχηματομορφή (16 bit) παρουσιάζει μειωμένο πλάτος και διαπόσταση στις φασματικές συνιστώσες (spacing) σε σχέση με τη σχηματομορφή των 8 bit. Αυτή η συμπεριφορά επαναλαμβάνεται ανεξάρτητα της ταχύτητας ζεύξης (pulse rate) όπως φαίνεται από τα Σχήματα 13 και 14.



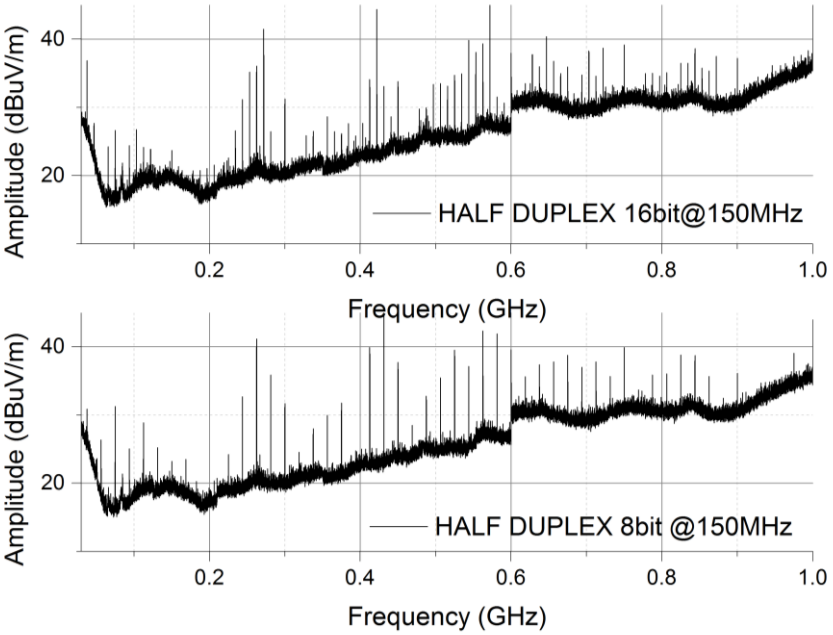
Σχήμα 12: Συγκριτικά διαγράμματα εκπομπών EMI με ρυθμό μετάδοσης 50MHz, Λειτουργία half duplex και κάθετη πόλωση.

Συγκριτικά αποτελέσματα των ακτινοβολούμενων εκπομπών στην περίπτωση του ρυθμού των 100 MHz, ημιαμφίδρομης λειτουργίας για μήκος σχηματομορφής 8 bit και 16 bit παρουσιάζονται στο Σχήμα 13. Όπως παρατηρείται από τα Σχήματα 12, 13 και 14 όσο αυξάνεται η ταχύτητα ζεύξης τα επίπεδα ακτινοβολούμενων εκπομπών αυξάνονται σε όλο το εύρος του μετρούμενου φάσματος. Αυτή η καθορισμένη επίδραση της μεταβολής του ρυθμού (συχνότητας) της ζεύξης καθώς και του μήκους σχηματομορφής μπορούν να χρησιμοποιηθούν με σκοπό τη μείωση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών (EMI) σε μια ή περισσότερες φασματικές περιοχές ενδιαφέροντος. Μια ανεπιθύμητη φασματική γραμμή (Παρεμβολή) μπορεί να μετακινηθεί μακριά από μια ευαίσθητη περιοχή ή τουλάχιστον να μειωθεί το πλάτος της με την μεταβολή του μήκους της σχηματομορφής (κωδικής λέξης).



Σχήμα 13: Συγκριτικά διαγράμματα εκπομπών EMI με ρυθμό μετάδοσης 100MHz, Λειτουργία half duplex και κάθετη πόλωση.

Συγκριτικά αποτελέσματα των ακτινοβολούμενων εκπομπών στην περίπτωση του ρυθμού των 150 MHz, ημιαμφίδρομης λειτουργίας για μήκος σχηματομορφής 8 bit και 16 bit παρουσιάζονται στο Σχήμα 14.



Σχήμα 14: Συγκριτικά διαγράμματα εκπομπών EMI με ρυθμό μετάδοσης 150MHz, Λειτουργία half duplex και κάθετη πόλωση.

5 Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διενεργήθηκαν ένα σύνολο μετρήσεων σε μια ζεύξη SpW/LVDS και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται με σκοπό να ξεκαθαρίσουν τη συσχέτιση του μήκους σχηματομορφής και της συχνότητας των παλμών τόσο στα επίπεδα ακτινοβολούμενων εκπομπών όσο και στο φάσμα των σημάτων πάνω στο καλώδιο. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ξεκάθαρα υποδεικνύουν ότι όσο το μήκος της κωδικής λέξης (μήκος σχηματομορφής) αυξάνεται το πλάτος και η διαπόσταση των φασματικών συνιστωσών μειώνεται. Επιπλέον όσο αυξάνεται η ταχύτητα της ζεύξης το πλάτος των ακτινοβολούμενων εκπομπών επίσης αυξάνεται. Αυτά τα συμπεράσματα μπορούν να ωφελήσουν τη σχεδίαση ευαίσθητων διαστημικών συστημάτων μιας και παρέχουν έναν τρόπο να μειωθούν οι ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε φασματικές περιοχές ενδιαφέροντος, ενισχύοντας τη στιβαρότητα (robustness) του συστήματος

6 Βιβλιογραφία

Electrical Characteristics of Low Voltage Differential Signaling (LVDS) Interface Circuits, TIA/EIA 644:2001 (R2012)

European Cooperation for Space Standardization, Standard ECSS-E-40-12A "*Space engineering, SpaceWire - Links, nodes, routers and networks*", January 2003

European Cooperation for Space Standardization, Standard ECSS-E-ST-20-07, C Rev. 1, "*Space engineering, Electromagnetic compatibility*", February 2012.

Leininger M., Thurecht F., Pfeiffer E. and Ruddle A., "*Advanced grounding methods in the presence of carbon fibre reinforced plastic structures*", Proc. 2012 ESA Workshop on Aerospace EMC, ESA SP-702, May 2012, Venice, Italy.

Nicoletto, M., Boschetti D. and P. Savi. "*High Speed Digital Lines routed on non-metallic Spacecraft structures.*" Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), 2014 International Symposium on. IEEE, 2014

Spacewire.esa.int. (2016). SpaceWire - Missions. [online] Available at: http://spacewire.esa.int/content/Missions/Missions.php

Α. Θ. Μπακλέζος, Χ. Δ. Νικολόπουλος και Χ. Ν. Καψάλης, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών

Σ. Τσατάλας, EMTECH Διαστημική Μ.ΙΚΕ