ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΔΕΚΤΩΝ – ΜΕΤΡΗΤΙΚΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ SOFTWARE DEFINED RADIO ΓΙΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΦΑΙΝΟΜΕΝΩΝ ΔΙΑΔΟΣΗΣ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΟΥ ΣΗΜΑΤΟΣ ΣΤΙΣ ΦΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΖΩΝΕΣ KA ΚΑΙ Q

Απόστολος Ζ. Παπαφραγκάκης[1] και Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος[2]
[1,2]Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Ηρώων Πολυτεχνείου 9, Ζωγράφου, Αττική
e-mail: [1]apapafrag@mail.ntua.gr, [2]thpanag@ece.ntua.gr

Περίληψη

Η σχεδιαζόμενη μετάβαση δορυφορικών υπηρεσιών στις φασματικές ζώνες Ka και Q παρά τα πλεονεκτήματά της έχει να αντιμετωπίσει μεγάλες προκλήσεις σε επίπεδο διάδοσης σήματος. Στις συχνότητες αυτές η απόσβεση λόγω των διαφόρων ατμοσφαιρικών φαινομένων παίζει σημαντικό ρόλο, περιορίζοντας την επίδοση και διαθεσιμότητα των ζεύξεων, καθιστώντας έτσι απαραίτητη την ακριβή μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η ανάπτυξη δεκτών οι οποίοι χρησιμοποιώντας σήματα-beacons από τον δορυφόρο ALPHASAT συλλέγουν μετρήσεις με στόχο την πραγματοποίηση μιας εκτεταμένης στατιστικής ανάλυσης των διαφόρων μεγεθών ενδιαφέροντος και την ανάπτυξη τεχνικών άμβλυνσης διαλείψεων. Η παρούσα εργασία συνιστά μια απόπειρα παρουσίασης τόσο της σχεδίασης όσο και των παραμέτρων λειτουργίας του μετρητικού εξοπλισμού/δεκτών, καθώς και κάποιων πρώτων αποτελεσμάτων.

Λέξεις-Κλειδιά: μελέτη διάδοσης, δορυφορικοί δέκτες, Software Defined Radio, Alphasat

Abstract

The planned transition of the various satellite services to the Ka and Q frequency bands despite its inherent advantages has to cope with challenges in terms of signal propagation. Regarding these bands, the signal attenuation due to the various atmospheric phenomena plays an important role, limiting the performance and availability of links and therefore requiring stringent modeling of the channel. To this end, the design and deployment of satellite receivers to collect data using ALPHASAT's beacon signals was considered purposeful. Upon completion of this measurement campaign, an extensive statistical analysis of the collected data shall follow in order to assist in channel modeling and in the development of fading mitigation techniques. In this work, the design and operational parameters of the receiving equipment is presented, along with some first results.

Keywords: propagation study, satellite receivers, Software Defined Radio, Alphasat

1. Εισαγωγή

Οι ολοένα αυξανόμενες απαιτήσεις για υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης σε συνδυασμό με την εξάντληση του διαθεσίμου φάσματος για δορυφορικές επικοινωνίες επιβάλλουν τη μετάβαση των συστημάτων και υπηρεσιών σε ανώτερες φασματικές ζώνες όπως η Ka και

οι Q/V (Arapoglou et al. 2011). Η μετάβαση αυτή θα δώσει τη δυνατότητα για ανάπτυξη νέων δορυφορικών συστημάτων υψηλούς ρυθμαπόδοσης (High Throughput Satellite, HTS), παρέχοντας αξιοσημείωτα μεγαλύτερη χωρητικότητα δικτύου και ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων σε δορυφορικές ζεύξεις τροφοδοσίας (feeder links) τάξεως δεκάδων Tbps (De Gaudenzi et al. 2012, Kyrgiazos et al. 2012). Ωστόσο, η διάδοση του σήματος στις ζώνες αυτές είναι πολύ πιο ευαίσθητη στα διάφορα ατμοσφαιρικά φαινόμενα και κυρίως στις ατμοσφαιρικές κατακρημνίσεις-βροχή (έντονη εξασθένηση - τάξεως δεκάδων dB) (Ippolito 2008), εγείροντας έτσι ζητήματα αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας των ζεύξεων. Η χρήση ενός απλού περιθωρίου διαλείψεων (fade margin) ή ελέγχου ισχύος, τεχνικές που χρησιμοποιούνται με επιτυχία σε συστήματα με χαμηλότερες συχνότητες λειτουργίας, κρίνεται τόσο ασύμφορη όσο και ανεπαρκής στη συγκεκριμένη περίπτωση (Arapoglou et al. 2011, Gharanjik et al. 2015, De Gaudenzi 2012). Είναι επομένως απαραίτητη η χρήση εξειδικευμένων τεχνικών άμβλυνσης διαλείψεων (Fading Mitigation Techniques, FMTs) (Panagopoulos et al. 2004), οι οποίες με τη σειρά τους προϋποθέτουν ακριβή μοντελοποίηση του καναλιού διάδοσης.

Παρά το γεγονός ότι κατά το παρελθόν προτάθηκαν στη διεθνή βιβλιογραφία διάφορα μοντέλα για χρήση στις εν λόγω συχνότητες, τα μοντέλα αυτά είτε κρίνονται ελλιπή είτε μη καθολικά εφαρμόσιμα για χρήση σε οποιαδήποτε γεωγραφική περιοχή. Για την πρόταση ενός νέου μοντέλου διάδοσης είναι απαραίτητη η ύπαρξη πραγματικών μετρήσεων, η συλλογή και στατιστική ανάλυση των οποίων χρησιμοποιείται τόσο για την ανάπτυξή του όσο και για την εκτίμηση της ακρίβειάς του. Η συλλογή μετρήσεων όμως συνιστά πολύπλοκη διαδικασία, καθώς απαιτεί εξειδικευμένο, ακριβό εξοπλισμό και μακροχρόνια παρατήρηση σε παγκόσμια κλίμακα προκειμένου τα δεδομένα να είναι αντιπροσωπευτικά. Την περασμένη δεκαετία καταβλήθηκε μια πρώτη προσπάθεια συλλογής μετρήσεων διάδοσης στις συχνότητες αυτές χρησιμοποιώντας τους δορυφόρους ESA OLYMPUS και ITALSAT F1 (Paraboni et al. 2002, Ventouras et al. 2006), ωστόσο η χωροχρονική συσχέτιση των φαινομένων διάδοσης δεν μελετήθηκε σε βάθος.

Τα τελευταία χρόνια, με πρωτοβουλία και υπό τον συντονισμό του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Agency, ESA) έγιναν διαθέσιμα σήματα-beacons για τη διεξαγωγή νέων μετρήσεων στις ζώνες Ka και Q (19.701 και 39.402 GHz) από τον δορυφόρο ALPHASAT (25.0º E). Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την ωρίμανση της τεχνολογίας και τις νέες τεχνικές Software Defined Radio (SDR), αποτέλεσε το κίνητρο για την ανάπτυξη δεκτών για διεξαγωγή μετρήσεων σε αυτές τις φασματικές

ζώνες, για πρώτη φορά σε ελληνικό έδαφος. Οι αναπτυχθέντες δέκτες αποτελούν πλέον μέρος του πανευρωπαϊκού δικτύου μετρήσεων του Alphasat Aldo Paraboni Propagation Experimenters (ASAPE) καθώς και του ερευνητικού προγράμματος της ESA «ASALASCA» (Ventouras et al. 2017). Στα επόμενα κεφάλαια θα παρουσιαστεί η αρχιτεκτονική των δεκτών, οι αρχές λειτουργίας τους καθώς και κάποια πρώτα αποτελέσματα μετρήσεων και στατιστικής ανάλυσης.

2. Χρήση beacons για διεξαγωγή μετρήσεων διάδοσης

Η μεγάλη πλειοψηφία των δορυφόρων εκπέμπουν εκτός των άλλων σήματα τηλεμετρίας και beacons. Τα σήματα beacons, συνήθως αδιαμόρφωτα, σταθερής ισχύος σήματα Continuous Wave (CW), χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για τον εντοπισμό του δορυφόρου από επίγειους σταθμούς/προσανατολισμό κεραιών ή και ως σήματα πιλότοι για σκοπούς τηλεμετρίας. Η φύση των σημάτων αυτών (σταθερή ισχύς και μικρό φασματικό περιεχόμενο) τα καθιστούν κατάλληλα για τη διεξαγωγή μετρήσεων διάδοσης.

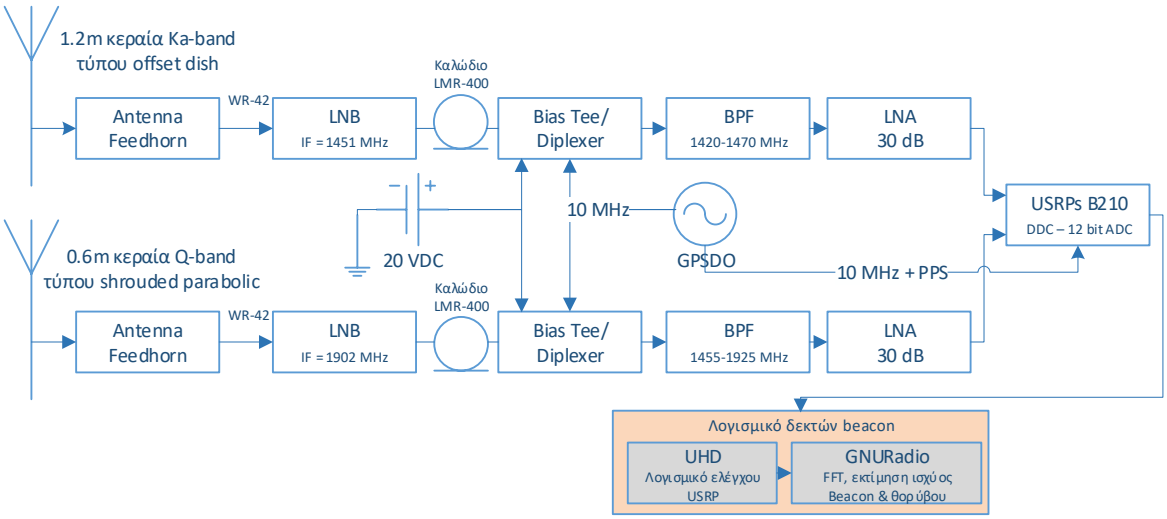
Ο δορυφόρος ALPHASAT στις 25.0º Ε αν και προορισμένος για εμπορικούς σκοπούς (εμπορική ονομασία Inmarsat-4A F4) φέρει διάφορα τηλεπικοινωνιακά φορτία-payloads για τη διεξαγωγή πειραματικών δραστηριοτήτων υπό την αιγίδα του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (European Space Agency, ESA). Ένα εξ' αυτών είναι και το περιώνυμο Technology Demonstration Payload (TDP) #5, το οποίο αποτελείται από δύο beacons, στα 19.701 GHz (Ka-band) και 39.402 (Q-band) GHz αντίστοιχα. Οι μετρητικοί δορυφορικοί δέκτες που παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία λαμβάνουν τα εν λόγω beacons με κατάλληλα σχεδιασμένο και υλοποιημένο εξοπλισμό με σκοπό τη συλλογή μετρήσεων διάδοσης στις φασματικές ζώνες Ka και Q.

3. Αρχιτεκτονική των υλοποιηθέντων μετρητικών δορυφορικών δεκτών

Οι δέκτες που κατασκευάστηκαν για τον σκοπό του πειράματος αποτελούνται κατά το πλείστον από εξαρτήματα ήδη διαθέσιμα στην αγορά προκειμένου περί ελαχιστοποίησης τόσο του κόστους και του χρόνου υλοποίησης όσο και τη γρήγορη αντιμετώπιση και αποκατάσταση τυχόν βλαβών. Η βασική αρχιτεκτονική των δεκτών είναι κοινή και για τις δύο συχνότητες και παρουσιάζεται στο παρακάτω απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα (Σχ. 1).

Για την περίπτωση της Ka-band χρησιμοποιείται δορυφορικό παραβολικό κάτοπτρο τύπου offset διαμέτρου 1.2 m ενώ για την περίπτωση της Q-band χρησιμοποιείται παραβολικό κάτοπτρο τύπου shrouded, διαμέτρου 0.6 m. Το λαμβανόμενο σήμα κυματοδηγείται σε κατάλληλα Low Noise Blocks (LNBs) όπου το σήμα φιλτράρεται, ενισχύεται και υποβιβάζεται στη συχνότητα πριν μεταφερθεί στο επόμενο στάδιο. Μετά από δεύτερο

φιλτράρισμα και ενίσχυση, το σήμα οδηγείται σε ένα Universal Software Radio Peripheral (USRP) B210 της Ettus, το οποίο και αναλαμβάνει το κομμάτι της δειγματοληψίας, κβάντισης και ψηφιοποίησης του λαμβανόμενου σήματος. Τα ψηφιακά δείγματα μεταφέρονται τελικά σε έναν υπολογιστή ο οποίος εφοδιασμένος με λογισμικό που αναπτύχθηκε με βάση το GNU Radio εκτελεί το τελευταίο στάδιο επεξεργασίας και αποθήκευσης.



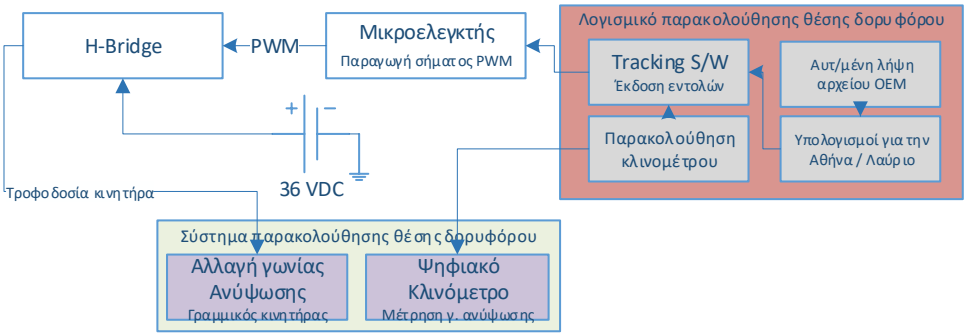
Σχήμα 1: Συνοπτικό μπλοκ διάγραμμα της αρχιτεκτονικής των δεκτών

Η μέτρηση της λαμβανόμενης ισχύος αλλά και του επιπέδου θορύβου γίνεται χρησιμοποιώντας τεχνικές εκτίμησης Fast Fourier Transform (FFT). Το επίπεδο θορύβου είναι ένα χρήσιμο μέγεθος, καθώς επηρεάζεται από τα διάφορα φαινόμενα διάδοσης και η γνώση της τιμής του μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια των μετρήσεων (Papafragkakis et al. 2017). Το δυναμικό εύρος (dynamic range) υπολογίζεται περί τα 40 dB και 37 dB για τους δέκτες Ka (Ζωγράφου και Λαύριο αντίστοιχα). Για τους δέκτες Q το δυναμικό εύρος αγγίζει τα 37 dB.

Τόσο η λαμβανόμενη ισχύς όσο και ο θόρυβος μετρώνται και αποθηκεύονται με ρυθμό δειγματοληψίας 10 Hz χρησιμοποιώντας χρονοσφραγίδες (timestamps) συγχρονισμένες μέσω GPS Disciplined Oscillator (GPSDO). Έτσι διασφαλίζεται πλήρως η ακρίβεια των μετρήσεων στο πεδίο του χρόνου. Επιπλέον, προκειμένου όλοι οι ταλαντωτές/ρολόγια να παραμείνουν σε πλήρη συγχρονισμό, επιστρατεύονται οι έξοδοι 10 MHz και Pulse Per Second (PPS) του GPSDO.

Παρά το γεγονός ότι ο ALPHASAT είναι γεωστατικός δορυφόρος η φαινόμενη θέση του από τη Γη μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ημέρας λόγω μικρής κεκλιμένης τροχιάς. Η

εν λόγω κεκλιμένη τροχιά συντηρείται σκοπίμως για οικονομία καυσίμων και προκειμένου να παραταθεί η διάρκεια ζωής του. Η μικρή απόκλιση στην τροχιά (εκτιμέμωνη τιμή μικρότερη των 3 μοιρών κατά τη διάρκεια του πειράματος) εισάγει μια απόκλιση της τάξης των ±2 ° στη γωνία ανύψωσης των κατόπτρων και μικρότερη των 0,2° στο αζιμούθιο. Η τελευταία μπορεί να αγνοηθεί καθώς είναι πολύ αργά μεταβαλλόμενη και δεν επηρεάζει ουσιαστικά τις μετρούμενες τιμές. Ωστόσο η μεταβολή στη φαινόμενη γωνία ανύψωσης χρήζει αντιμετώπισης μέσω κατάλληλου σχήματος παρακολούθησης του δορυφόρου (tracking system).



Σχήμα 2: Συνοπτικό μπλοκ διάγραμμα της αρχιτεκτονικής του συστήματος παρακολούθησης δορυφόρου (tracking system)

Για το σκοπό αυτό αναπτύχθηκε πλήρως αυτοματοποιημένο λογισμικό το οποίο σε συνδυασμό με ψηφιακά κλινόμετρα και γραμμικούς κινητήρες που έχουν εγκατασταθεί στα κάτοπτρα αλλά και αρχεία Orbit Ephemeris Messages (OEM) που παρέχουν τη θέση του δορυφόρου κάθε στιγμή, είναι σε θέση να παρακολουθούν και να στοχεύουν το κάτοπτρο στο δορυφόρο με ακρίβεια καλύτερη από 0.05°. Η βασική αρχιτεκτονική λειτουργίας του συστήματος παρακολούθησης του δορυφόρου παρατίθεται στο παραπάνω μπλοκ διάγραμμα (Σχ. 2).

Σχήμα 3: Οι δέκτες στην πολυτεχνειούπολη (αριστερά) και στο Λαύριο (δεξιά)

3. Λεπτομέρειες πειράματος

Συνολικά σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν τέσσερις δέκτες, δύο για τη ζώνη Ka και δύο για τη ζώνη Q. Η εγκατάστασή τους πραγματοποιήθηκε στο συγκρότημα της πολυτεχνειούπολης Ζωγράφου καθώς και στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου και έγινε σε ζεύγη αποτελούμενα από έναν δέκτη Ka και έναν Q ανά τοποθεσία.

Σχήμα 4: Τα κεραιοσυστήματα των δεκτών στην πολυτεχνειούπολη (αριστερά) και στο Λαύριο (δεξιά)

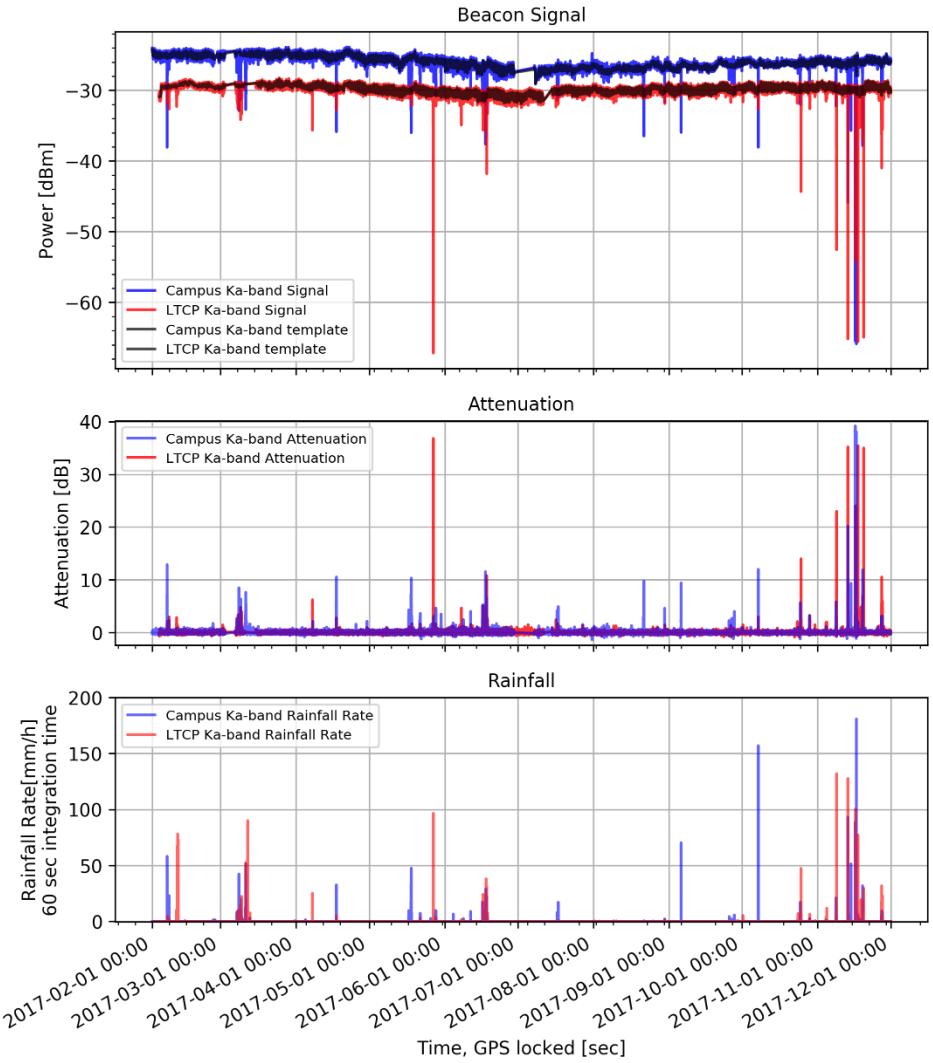
Οι δύο τοποθεσίες απέχουν περί τα 36,5 km σε ευθεία γραμμή και διαφέρουν ως προς τις κλιματικές συνθήκες καθώς η μεν πολυτεχνειούπολη βρίσκεται στους πρόποδες του Υμηττού, το δε Λαύριο βρίσκεται νοτιότερα, σε χαμηλό υψόμετρο και δίπλα στη θάλασσα. Η επιλογή των θέσεων αυτών επιτρέπει την εξέταση σεναρίων διαφορισμού θέσης (site diversity) και την εκμετάλλευσή τους για την άμβλυνση διαλείψεων (Papafragkakis et al. 2016).

Οι δέκτες Ka βρίσκονται σε αδιάλειπτη λειτουργία από τον Ιούλιο του 2016 ενώ οι δέκτες Q εγκαταστάθηκαν και λειτουργούν από τον Ιούλιο του 2017. Παράλληλα με τους δέκτες λειτουργεί και εξοπλισμός για την υποστήριξη των μετρήσεων με μετεωρολογικά δεδομένα. Πιο συγκεκριμένα, μετρούνται μεγέθη όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η ατμοσφαιρική πίεση, η ταχύτητα και διεύθυνση του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία και φυσικά η βροχόπτωση. Τα μετεωρολογικά δεδομένα είναι πλήρως συγχρονισμένα με τους δέκτες και αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων προκειμένου να εξεταστεί η συσχέτισή τους με τα διάφορα φαινόμενα διάδοσης.

4. Πρώτα αποτελέσματα

Όπως ήδη ειπώθηκε, οι μετρήσεις είναι ακόμα σε εξέλιξη. Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 5) παρουσιάζεται ένα κομμάτι των συλλεχθέντων δεδομένων με τη μορφή χρονοσειρών που

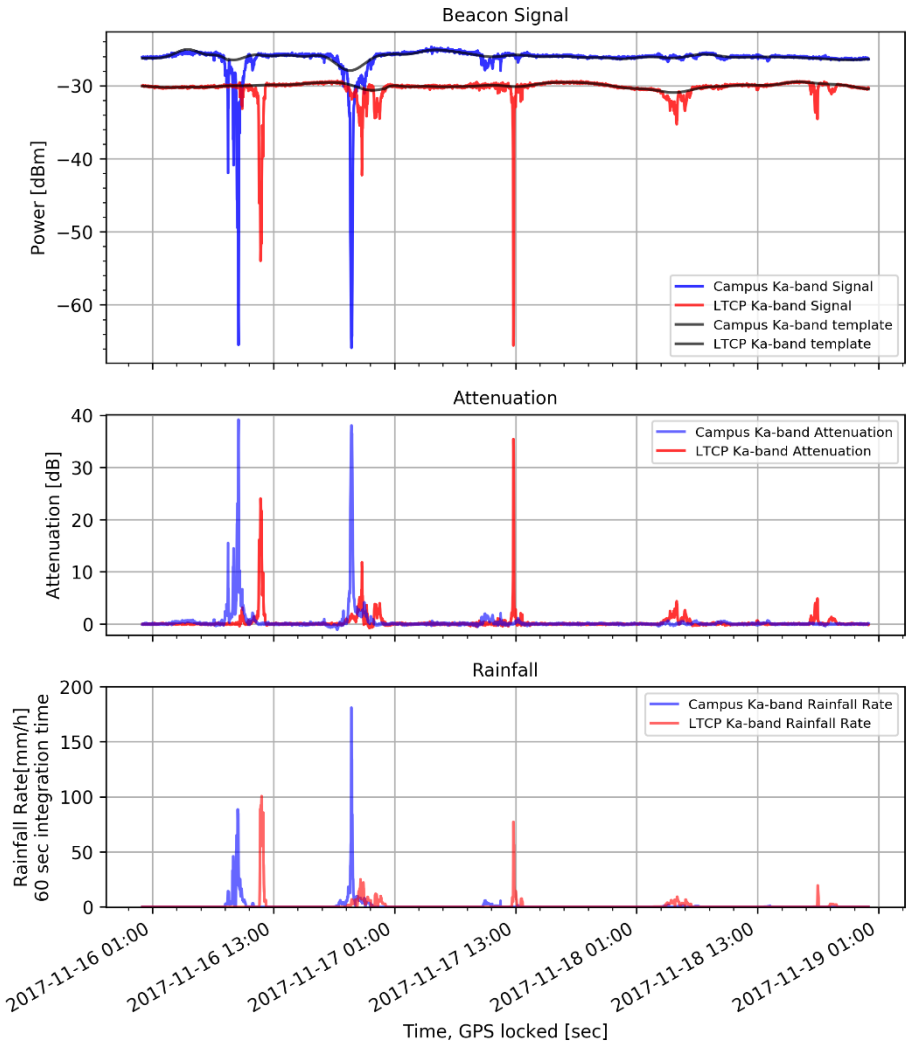
αφορούν τους μήνας Φεβρουάριο έως και Νοέμβριο του έτους 2017 για τους δύο σταθμούς στη ζώνη Ka μαζί με τα αντίστοιχα δεδομένα βροχόπτωσης.



Σχήμα 5: Χρονοσειρές δεδομένων για τη ζώνη Ka για τις δύο τοποθεσίες, από 02/2017 έως και 11/2017

2.1 Παράδειγμα διαφορισμού θέσης (site diversity) στην Ka-band

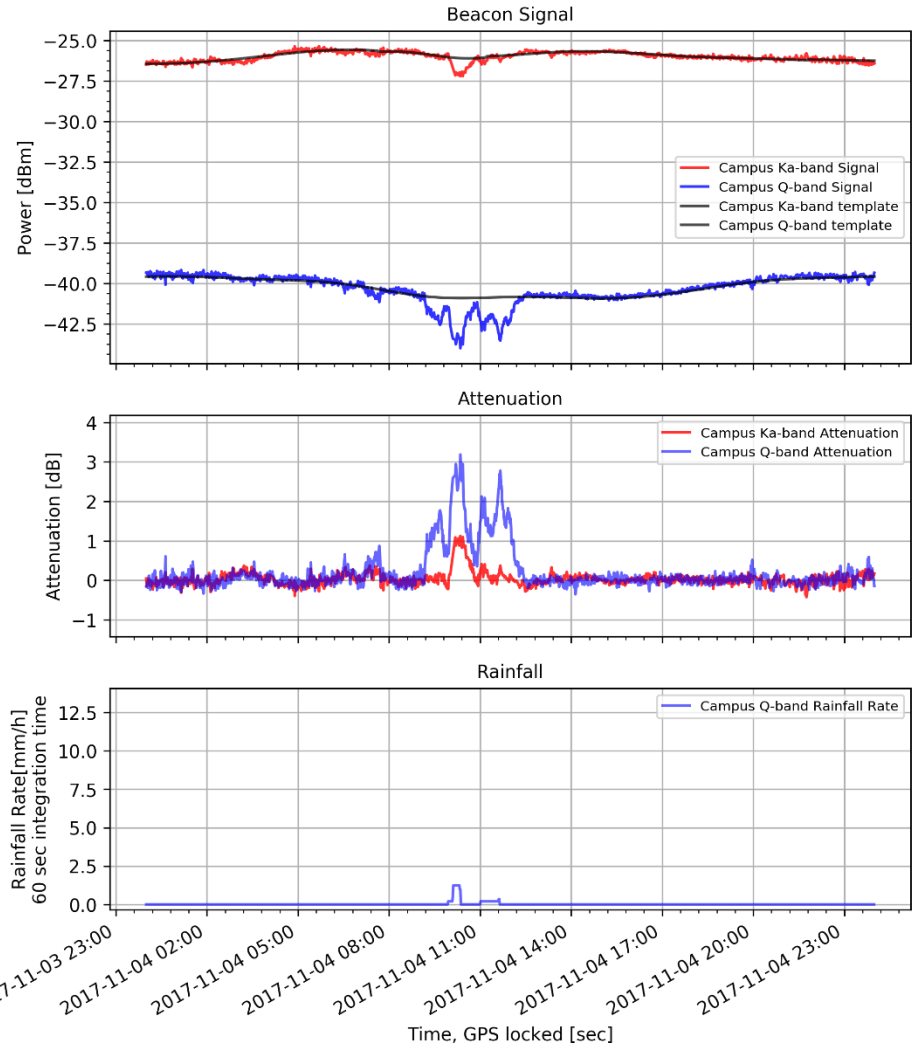
Στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 6) παρουσιάζονται δεδομένα για τρεις ημέρες, από 16/11/2017 έως και 18/11/2017 οπότε και παρατηρήθηκαν αξιόλογα φαινόμενα. Στο σχήμα γίνεται εμφανής η χρονική υστέρηση που παρουσιάζεται μεταξύ των φαινομένων μεταξύ Ζωγράφου και Λαυρίου, γεγονός που θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για τη χρήση σχήματος διαφορισμού θέσης (site diversity).



Σχήμα 6: Παράδειγμα site diversity - χρονοσειρές ζώνης Ka των δύο τοποθεσιών, από 16/11/2017, έως 18/11/2017

2.2 Παράδειγμα διαφορισμού συχνότητας (frequency diversity)

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η διαφορετική επίπτωση που έχουν τα ατμοσφαιρικά φαινόμενα στη διάδοση του σήματος στις ζώνες Ka και Q παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα (Σχ. 7) δεδομένα διάρκειας μίας ημέρας (04/11/2017) για τους σταθμούς Ka και Q στην πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου. Παρά το μικρό ρυθμό βροχόπτωσης, η ζώνη Q αντιμετωπίζει μη αμελητέα εξασθένηση (τάξεως 3 dB) ενώ η ζώνη Ka λιγότερο από 1 dB και μάλιστα για αρκετά μικρότερο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 7: Παράδειγμα frequency diversity – χρονοσειρές για την πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου την 04/11/2017

3. Συμπεράσματα – Προεκτάσεις

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκε η ανάπτυξη δορυφορικών δεκτών για την εκτέλεση μετρήσεων διάδοσης στις φασματικές ζώνες Ka και Q καθώς και κάποια αποτελέσματα από τους πρώτους μήνες λειτουργίας τους. Το πέρας των μετρήσεων θα ακολουθήσει εκτεταμένη στατιστική ανάλυση των διαφόρων μεγεθών ενδιαφέροντος (στατιστικά πρώτης και δεύτερης τάξης των φαινομένων διαλείψεων), καθώς και βελτίωση ή πρόταση νέων μοντέλων για τις συχνότητες αυτές. Τέλος, με την αξιοποίηση των δεδομένων θα μπορέσουν να μελετηθούν και να αναπτυχθούν σύγχρονες τεχνικές FMTs.

4. Βιβλιογραφία

Arapoglou P.-D., Shankar M. R. B., Panagopoulos A. D, Ottersten B.: “Gateway diversity strategies in Q/V band feeder links”, 17th Ka Broadband Communications Conference, 2011, Palermo, Italy

De Gaudenzi R., Re E., Angeletti P.: “Smart Gateways Concepts for High-Capacity Multi-beam Networks”, 30th AIAA International Communications Satellite System Conference (ICSSC), International Communications Satellite Systems Conferences (ICSSC), 2012

Gharanjik A., Shankar M. R. B., Arapoglou P. D., Ottersten B.: “Multiple Gateway Transmit Diversity in Q/V Band Feeder Links”, IEEE Transactions on Communications, vol. 63, no. 3, pp. 916-926, 2015

Ippolito L.J. “Satellite Communications Systems Engineering: Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance”. 2008, Jon Wiley

Kyrgiazos A., Evans B., Thompson P., Jeannin N.: “Gateway diversity scheme for a future broadband satellite system”, 2012 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop (SPSC), pp. 363-370, 2012, Baiona

Panagopoulos A. D., Arapoglou P.-D. M., Cottis P. G.: “Satellite Communications at Ku, Ka and V Bands: Propagation Impairments and Mitigation Techniques”, IEEE Communication Surveys and Tutorials, 2004

Papafragkakis A. Z., Kourogiorgas C. I., Panagopoulos A. D., S. Ventouras: “Site Diversity Experimental Campaigns in Greece and UK Using ALPHASAT at Ka and Q Band”, Loughborough Antennas and Propagation Conference LAPC 2016, 2016, Loughborough

Papafragkakis, A. Z., Panagopoulos A. D., Ventouras S.: “Combined Beacon and Noise Satellite Propagation Measurements Using Software Defined Radio”, 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2017, Paris

Paraboni A., Riva C., Valbonesiand L. and Mauri M.: “Eight years of ITALSAT copular attenuation statistics at Spino d’Adda”, Space Commun. 18, pp.59-64, 2002

Ventouras S, Callaghan S.A, and Wrench C.L.: “Long-term statistics of tropospheric attenuation from the Ka/U band ITALSAT satellite experiment in the United Kingdom”, Radio Science, Vol. 41, 2006

Ventouras S. et al.: “Large Scale Assessment of Ka/Q Band Atmospheric Channel Across Europe with ALPHASAT TDP5: The Augmented Network”, 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2017, Paris