

ΔΟΥΦΟΡΙΚΕΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΚΑΙ ΖΕΥΞΕΙΣ

7^ο Εξάμηνο

Σώζος Κώστας

Υποσυστήματα δορυφορικών ζεύξεων

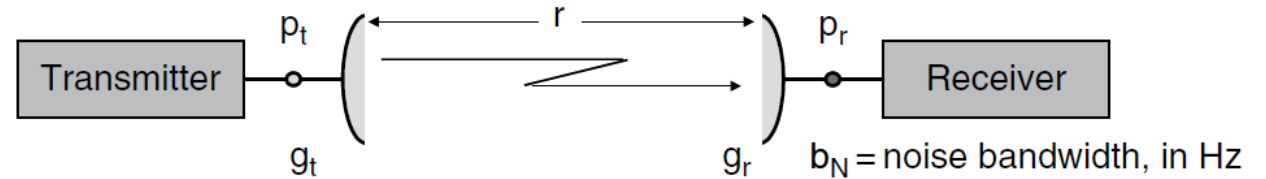
- Βασικές περιπτώσεις ζεύξεων
- Back of σημείο ενίσχυσης
- Συνολικό C/N
- Προδιαγραφές διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας του δικτύου

Ο λόγος c/n_o

- Το c/n_o είναι η κύρια παράμετρος που ενδιαφέρει για τον καθορισμό της συνολικής απόδοσης ενός συστήματος ασύρματων επικοινωνιών. Μπορεί να καθοριστεί σε οποιοδήποτε σημείο της σύνδεσης, όπως στους ακροδέκτες της κεραίας του δέκτη ή στην είσοδο του αποδιαμορφωτή.

$$\frac{c}{n} = \frac{p_r}{n_r}$$

$$\frac{c}{n} = \frac{p_r}{n_r} = \frac{p_t g_t g_r \left(\frac{1}{l_{FS} l_o} \right)}{k t_s b_N}$$



$$\frac{C}{N} = EIRP + \frac{G}{T} - L_{FS} + \sum L_o - 228.6 - B_N$$

$$k = -228.6 \frac{dBw}{KHz}$$

$$\frac{C}{N_0} = \frac{C}{N} + B_N \text{ (dBHz)}$$

Ο λόγος c/n_0

Η σημαντικότερη παράμετρος της επίδοσης ενός δορυφορικού link είναι ο λόγος c/n ή ισοδύναμα ο c/n_0 . Αν αντικαταστήσουμε τους τύπους για το g_t , g_r και l_{fs} έχουμε:

$$\frac{c}{n_0} = \frac{p_t g_t g_r}{l_{fs} l_o k t} = \frac{p_t \frac{4\pi\eta_t A_t}{\lambda^2} \frac{4\pi\eta_r A_r}{\lambda^2}}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 l_o k t} = p_t \eta_t \eta_r \frac{A_r A_t}{\lambda^2 r^2 l_o k t}$$

Στη συνέχεια μελετάμε τρεις τυπικές περιπτώσεις ζεύξεων με βάση την παραπάνω εξίσωση.

- Ζεύξεις με σταθερό μέγεθος κεραιών
- Ζεύξεις με σταθερό κέρδος κεραιών
- Ζεύξεις με σταθερά μεγέθη και κέρδη

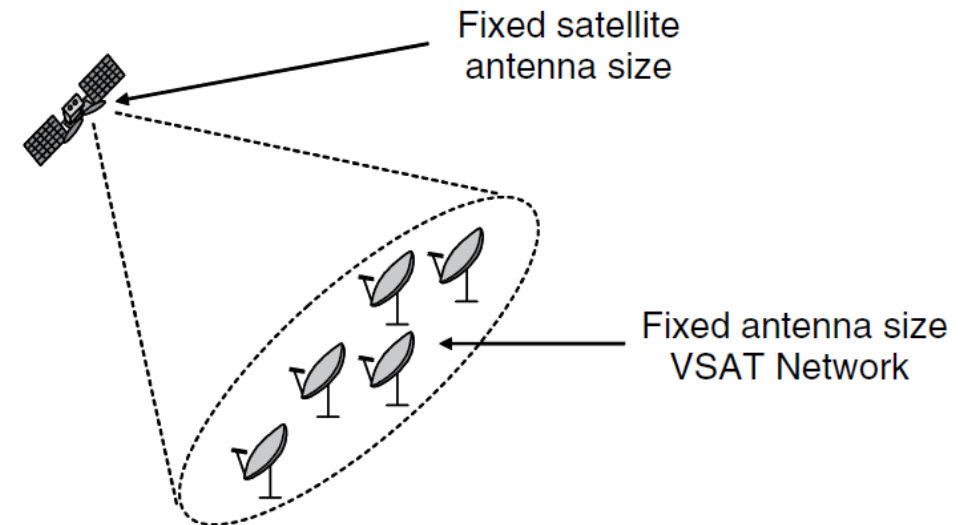
Ζεύξεις με σταθερό μέγεθος κεραιών

Έχουμε μια δορυφορική σύνδεση με σταθερό μέγεθος κεραίας και στα δύο άκρα. Ένα παράδειγμα αυτού του τύπου σύνδεσης είναι ένα δορυφορικό δίκτυο με πανομοιότυπες κεραίες για κάθε επίγειο τερματικό, όπως ένα δίκτυο VSAT. (Αυτή η συνθήκη είναι επίσης χαρακτηριστική μιας επίγειας ασύρματης σύνδεσης που υπάρχει οπτική επαφή.)

$$\frac{c}{n_0} = \frac{p_t}{\lambda^2 r^2 t_s} \left[\frac{\eta_t \eta_r A_r A_t}{l_o k} \right]$$

Η επίδοση του link βελτιώνεται με:

- Αύξηση του p_t
- **Αύξηση της συχνότητας (μείωση του λ)**
- Μείωση της απόστασης
- Μείωση της θερμοκρασίας θορύβου



Η αύξηση της απόδοσης με τη συχνότητα είναι σημαντική όταν εξετάζουμε μια σύνδεση με σταθερό μέγεθος κεραίας και στα δύο άκρα, επειδή αυτό σημαίνει καλύτερη απόδοση σε μια υψηλότερη ζώνη συχνοτήτων, με όλες τις άλλες παραμέτρους να παραμένουν ίδιες (αγνοούμε εδώ τις εξαρτώμενες από τη συχνότητα επιδράσεις άλλων απωλειών σύνδεσης).

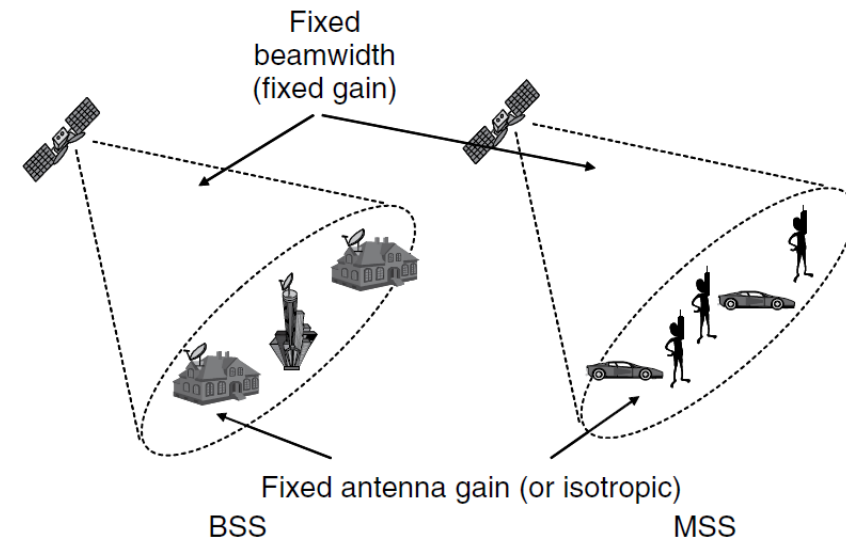
Ζεύξεις με σταθερό κέρδος κεραιών

Έχουμε μια δορυφορική εφαρμογή που απαιτεί τη διατήρηση συγκεκριμένου beamwidth στο έδαφος (για παράδειγμα, ένα δορυφορικό δίκτυο με κάλυψη ζώνης ώρας ή κάλυψη σημειακής δέσμης). Τυπικές εφαρμογές όπου το εύρος δέσμης μπορεί να είναι κρίσιμο είναι τα συστήματα κάλυψης σταθερής περιοχής, όπως τα κινητά δορυφορικά δίκτυα (MSS) ή οι δορυφορικές υπηρεσίες ραδιοτηλεοπτικών εκπομπών (BSS). Άλλα παραδείγματα είναι οι συνδέσεις δορυφόρου-δορυφόρου και τα συστήματα που χρησιμοποιούν σημειακές δέσμες για επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων ή βελτίωση της απόδοσης.

$$\frac{c}{n_0} = \frac{p_t g_t g_r}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 l_o k t} = \left[\frac{g_r g_t}{(4\pi)^2 l_o k} \right] \frac{p_t \lambda^2}{r^2 t}$$

Η επίδοση του link βελτιώνεται με:

- Αύξηση του p_t
- **Μείωση της συχνότητας (αύξηση του λ)**
- Μείωση της απόστασης
- Μείωση της θερμοκρασίας θορύβου



Τώρα το c/n_0 βελτιώνεται καθώς μειώνεται η συχνότητα! Αυτό το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι θα πρέπει να χρησιμοποιείται η χαμηλότερη δυνατή ζώνη συχνοτήτων εάν οι περιορισμοί του εύρους δέσμης είναι σημαντικοί και στα δύο άκρα της σύνδεσης.

Ζεύξεις με σταθερά μεγέθη και κέρδη

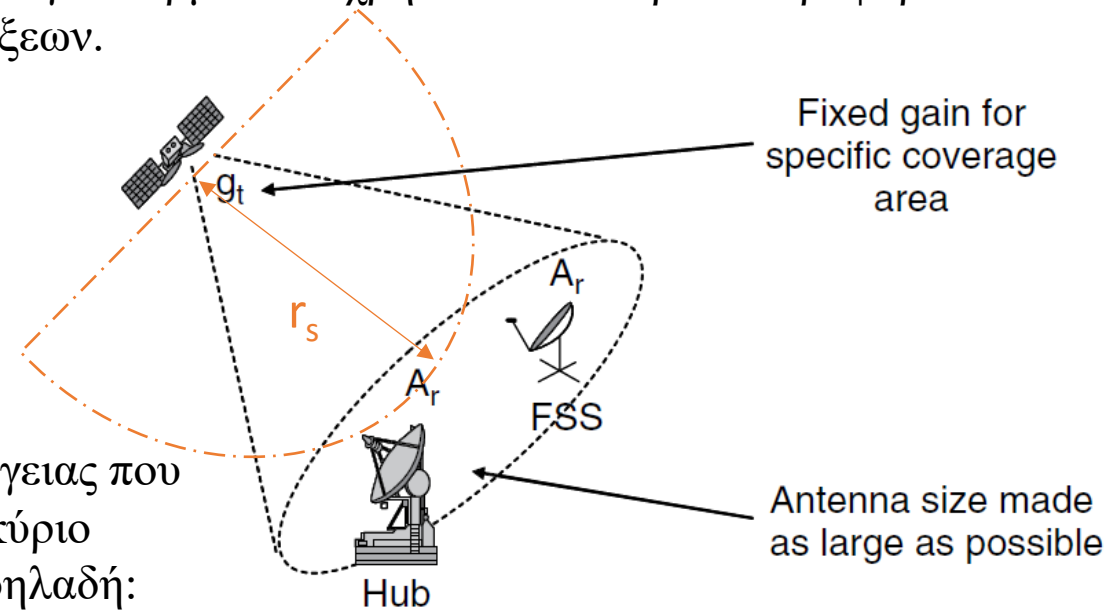
Τέλος, αν έχουμε μια σύνδεση όπου η απολαβή της κεραίας είναι σταθερή στο ένα άκρο, για μια συγκεκριμένη περιοχή κάλυψης, και το μέγεθος της κεραίας είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερο στο άλλο άκρο. Αυτή η κατάσταση είναι τυπική για ένα downlink, όπου η απολαβή της κεραίας μετάδοσης του δορυφόρου καθορίζεται από την επιθυμητή περιοχή κάλυψης και η κεραία λήψης του επίγειου τερματικού είναι όσο το δυνατόν μεγαλύτερη (υπό τους περιορισμούς του κόστους και της φυσικής θέσης). Αυτό θα μπορούσε να ισχύει για τερματικά χρηστών σταθερών δορυφορικών υπηρεσιών (FSS) ή τερματικά μεγάλων κόμβων τροφοδοτικών ζεύξεων.

Πρώτα ποσοτικοποιούμε την απαίτηση κάλυψης της δορυφορικής κεραίας μέσω της στερεάς γωνίας Ω . Η γωνία που καλύπτει μια περιοχή A_s στην επιφάνεια μιας σφαίρας ακτίνας d_s είναι:

$$\Omega = \frac{A_s}{r_s^2}$$

Αν κάνουμε την λογική υπόθεση ότι το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που εκπέμπεται από την κεραία του δορυφόρου συγκεντρώνεται στον κύριο λοβό, τότε το g_t είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη στερεά γωνία, δηλαδή:

$$g_t \approx \frac{1}{\Omega} = \frac{K}{\Omega} = \frac{K r_s^2}{A_s}$$



Ζεύξεις με σταθερά μεγέθη και κέρδη

$$\frac{c}{n_0} = \frac{p_t g_t g_r}{l_{fs} l_o k t_s} = \frac{p_t \frac{K r s^2}{A_s} \frac{4\pi \eta_r A_r}{\lambda^2}}{\left(\frac{4\pi r}{\lambda}\right)^2 l_o k t_s} = \frac{p_t}{t_s} \left[\frac{K \eta_r A_r}{4\pi A_s l_o k} \right]$$

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, όπως και προηγουμένως, η απόδοση της σύνδεσης βελτιώνεται:

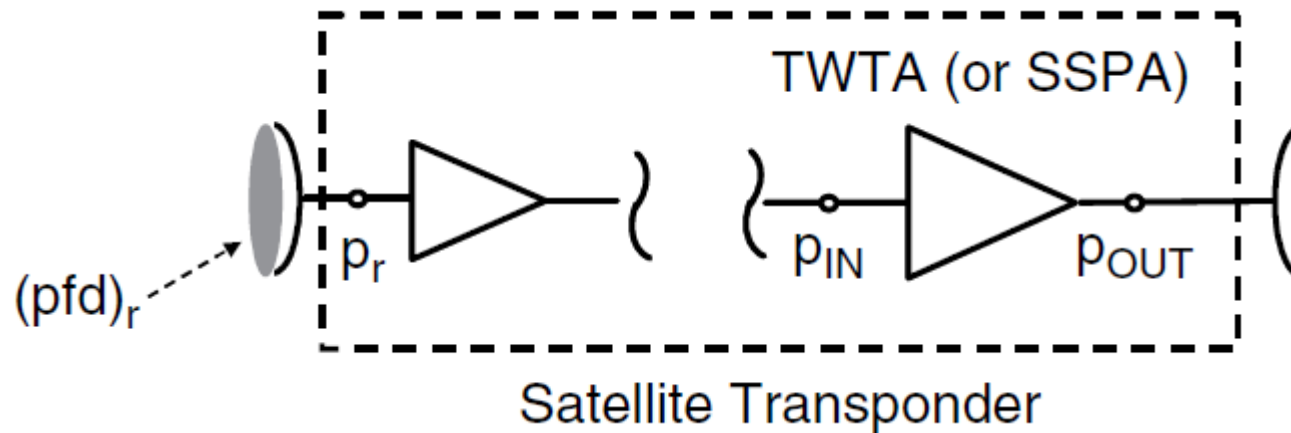
- καθώς αυξάνεται το p_t
- και καθώς μειώνεται το t_s
- Ωστόσο, δεν υπάρχει εξάρτηση από τη **συχνότητα ή το μήκος της διαδρομής!**

Μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η απόδοση ενός δορυφορικού συνδέσμου με απαίτηση για σταθερή περιοχή κάλυψης στη γη εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της κεραίας, αλλά δεν υπάρχει πλεονέκτημα συχνότητας (για παράδειγμα, ζώνη C έναντι ζώνης Ku ή ζώνης Ka) ή προτιμώμενη τροχιά (GSO έναντι LEO) για βελτιωμένη απόδοση. Άρα στα συστήματα FSS ή στα τερματικά μεγάλων κόμβων τροφοδοτικών ζεύξεων είναι μονόδρομος η τελειοποίηση των συστημάτων που ευθύνονται για τη μεγάλη ισχύ εκπομπής και το χαμηλό θόρυβο (ακριβοί ενισχυτές, φίλτρα κλπ).

Back off σημείο

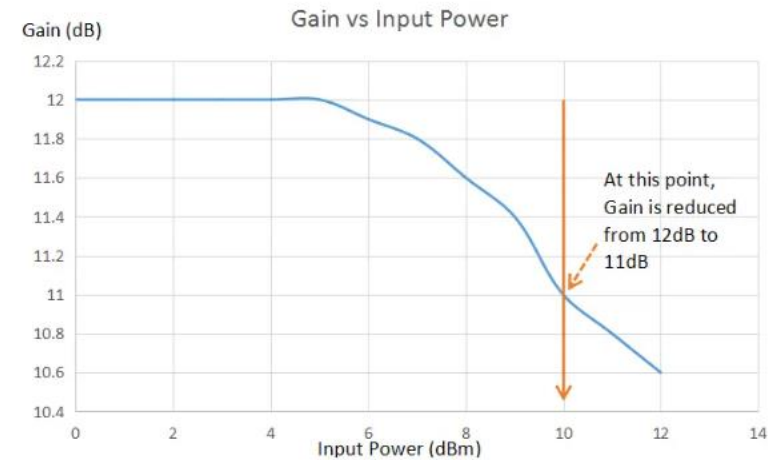
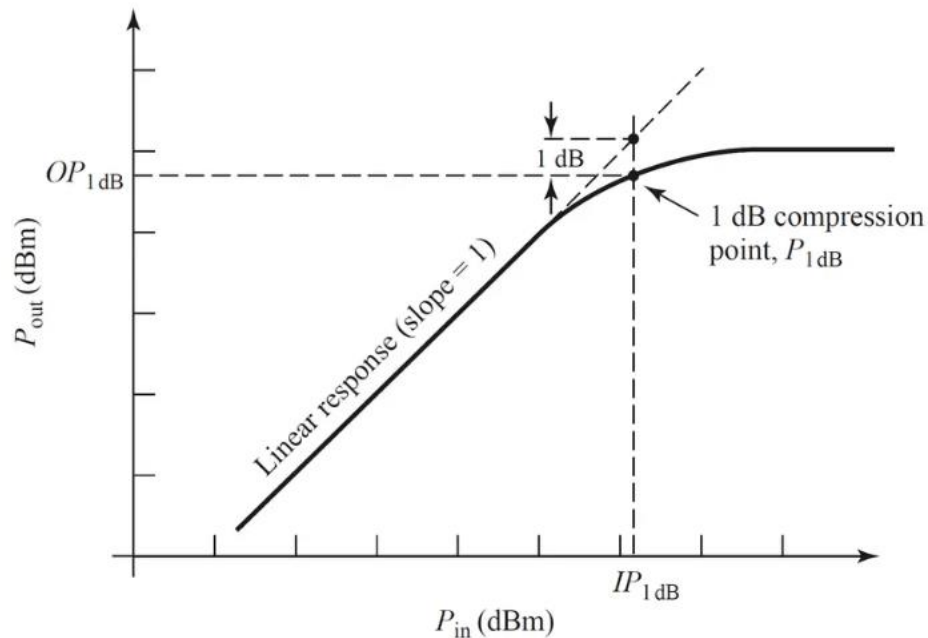
$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{up} = EIRP_{up} - L_{up} - k + \left(\frac{G}{T}\right)_{up}$$

Η απόδοση της άνω ζεύξης συχνά προσδιορίζεται από την απαίτηση σε πυκνότητα ροής ισχύος στην είσοδο της κεραίας του δορυφορικού δέκτη, ώστε να παραχθεί η επιθυμητή ισχύς εξόδου μετάδοσης του δορυφόρου. Η απόδοση του τελικού ενισχυτή ισχύος στον δορυφόρο, ο οποίος συνήθως αποτελείται από έναν μη γραμμικό ενισχυτή (TWTA, SSPA), είναι το κρίσιμο στοιχείο για τον καθορισμό της απαιτούμενης πυκνότητας ροής ισχύος για την ανερχόμενη ζεύξη.



Back off σημείο

- Κύριο χαρακτηριστικό των ενισχυτών υψηλής ισχύος είναι η μη γραμμικότητα που παρουσιάζουν κατά την ενίσχυση ενός σήματος, δηλαδή η τάση εξόδου, ειδικά σε υψηλά επίπεδα, δεν είναι ανάλογη της τάσης εισόδου, γιατί λειτουργούν στην περιοχή κόρου.
- Η μη-γραμμικότητα επιδρά στο πλάτος και στη φάση του σήματος, που ενισχύει ο αναμεταδότης



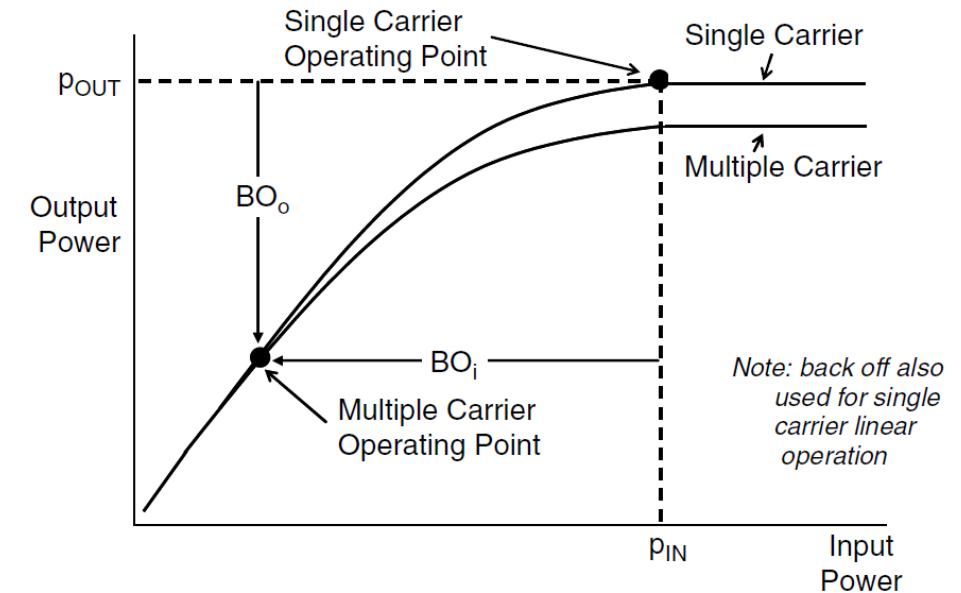
Back off σημείο

Κάθε αναμεταδότης έχει ένα ορισμένο σημείο λειτουργίας, το οποίο φυσικά επιθυμούμε να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στο σημείο κορεσμού, για να έχουμε μέγιστη απόδοση ενίσχυσης. Στο σημείο αυτό, ο αναμεταδότης λέγεται ότι λειτουργεί σε θέση αναδίπλωσης ισχύος (backoff, BO).

Όταν δύο ή περισσότερα διακριτά σήματα (διαφορετικές συχνότητες) εισέρχονται ταυτόχρονα στον HPA, «αναμιγνύονται» μέσα στον μη γραμμικό ενισχυτή. Αυτό δημιουργεί προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης (IM), ανεπιθύμητα/ψευδή σήματα σε νέες συχνότητες (π.χ. $f_1 \pm f_2$, $2f_1 - f_2$, κ.λπ.). Αυτά:

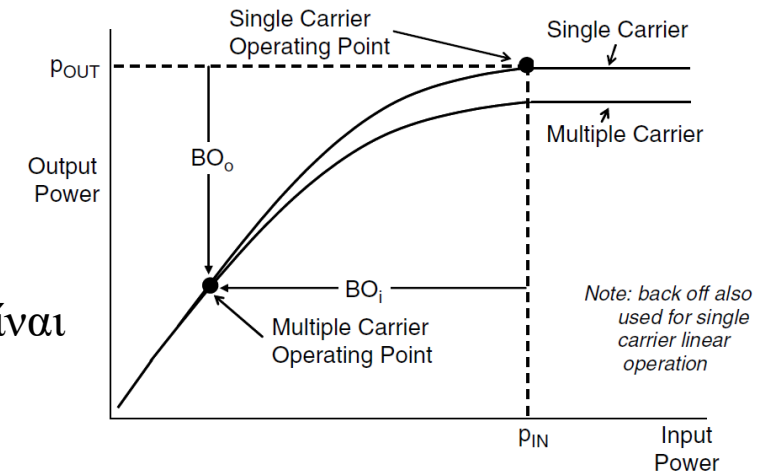
1. Λειτουργούν ως θόρυβος, υποβαθμίζοντας την ποιότητα (C/N) των επιθυμητών σημάτων.
2. Μπορούν να προκαλέσουν παρεμβολές σε γειτονικά κανάλια και άλλα συστήματα.
3. Αντιπροσωπεύουν σπατάλη της πολύτιμης ισχύος DC του δορυφόρου, η οποία μετατρέπεται σε άχρηστες παρεμβολές αντί για χρήσιμη ισχύ RF.

Το Backoff (BO) είναι απλά ο λόγος, εκφρασμένος σε dB, μεταξύ της μέγιστης ισχύος κορεσμένης εξόδου του ενισχυτή και της πραγματικής ισχύος εξόδου που χρησιμοποιείται για μια συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας.



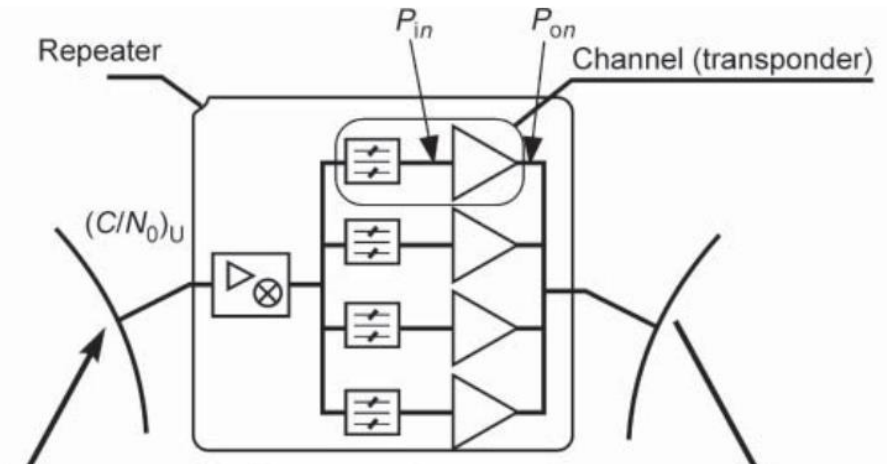
Multi-carrier per channel (MCPC) λειτουργία

Όταν υπάρχουν k φέροντα της ίδιας ισχύος, τότε η συνολική αναδίπλωση ισχύος θα είναι (σε dB) $\rightarrow IBO_{mc} = IBO_{sc} + 10\log(k)$ και $OBO_{mc} = OBO_{sc} + 10\log(k)$.



Συνεπώς, είναι προφανής ο λόγος του διαχωρισμού των σημάτων για την επεξεργασία τους από διάφορους αναμεταδότες. Άλλωστε, με τον διαχωρισμό αυτό γίνεται η διάθεση της ισχύος των ενισχυτών σε όσο το δυνατόν λιγότερα σήματα, αλλά και μειώνονται τα φαινόμενα ενδοδιαμόρφωσης, χαρακτηριστικό στην επεξεργασία πολλαπλών φερόντων.

Το σημείο λειτουργίας για λειτουργία πολλαπλών φερόντων πρέπει να υποχωρήσει στο γραμμικό τμήμα της συνάρτησης μεταφοράς για να μειωθούν οι επιδράσεις της ενδοδιαμόρφωσης. Το σημείο λειτουργίας πολλαπλών φερόντων ποσοτικοποιείται από την υποβάθμιση της ισχύος εξόδου, BO_o, και την υποβάθμιση της ισχύος εισόδου, BO_i, σε σχέση με την κορεσμένη έξοδο ενός φορέα, όπως φαίνεται στο σχήμα.



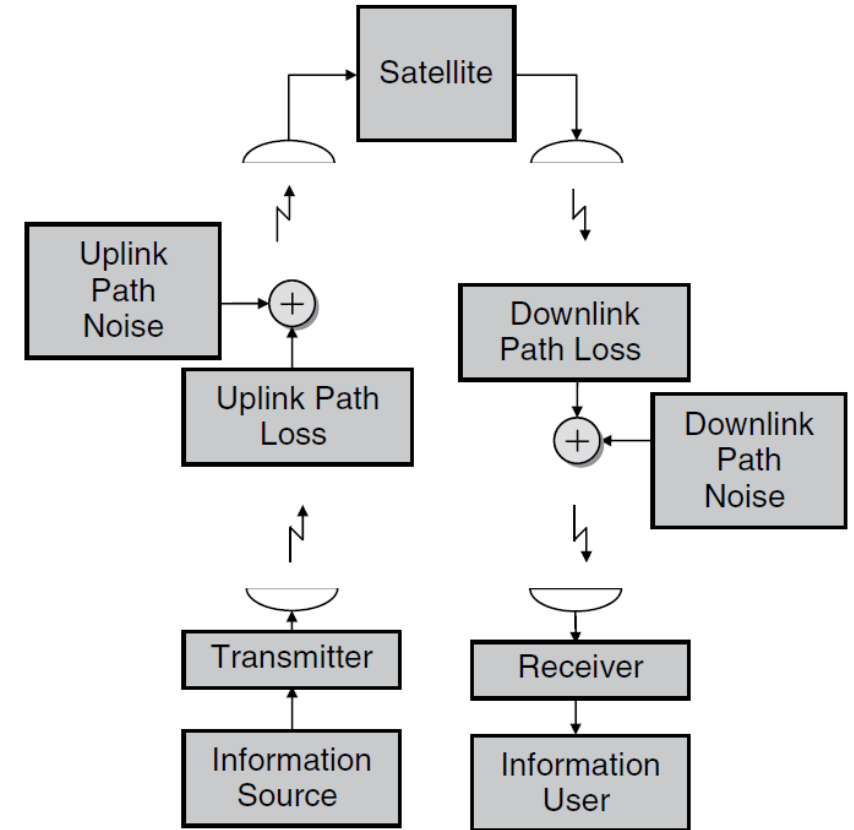
$$EIRP_{BO} = EIRP - BO$$

Συνολικό κανάλι

Ο συνολικός υπολογισμός του προϋπολογισμού της ζεύξης, και άρα του συνολικού C/N , εξαρτάται από το εάν ο δορυφόρος είναι εφοδιασμένος με έναν συμβατικό αναμεταδότη ή με έναν αναγεννητικό (regenerative) αναμεταδότη.

Στην πρώτη περίπτωση, ο ρόλος του αναμεταδότη είναι απλά η ενίσχυση του λαμβανόμενου σήματος της άνω ζεύξης (με ελάχιστη παραμόρφωση και θόρυβο) και η αλλαγή της συχνότητας του φέροντος. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο συχνά αποκαλείται και διαφανής (transparent) αναμεταδότης.

Στην περίπτωση του αναγεννητικού αναμεταδότη, το σήμα της άνω ζεύξης (γενικά ψηφιακό) από τον επίγειο σταθμό Α αποδιαμορφώνεται στον αναμεταδότη, μετά αναγεννάται, συχνά μετά την εφαρμογή κάποιας αποκωδικοποίησης και επεξεργασίας βασικής ζώνης, διαμορφώνεται ή εκ νέου ενισχύεται και μεταδίδεται στον επίγειο σταθμό Β. Η όλη διαδικασία ονομάζεται επεξεργασία επί του δορυφόρου (on-board processing, OBP).



Συνολικό κανάλιο για transparent δορυφόρους

Για το Uplink:

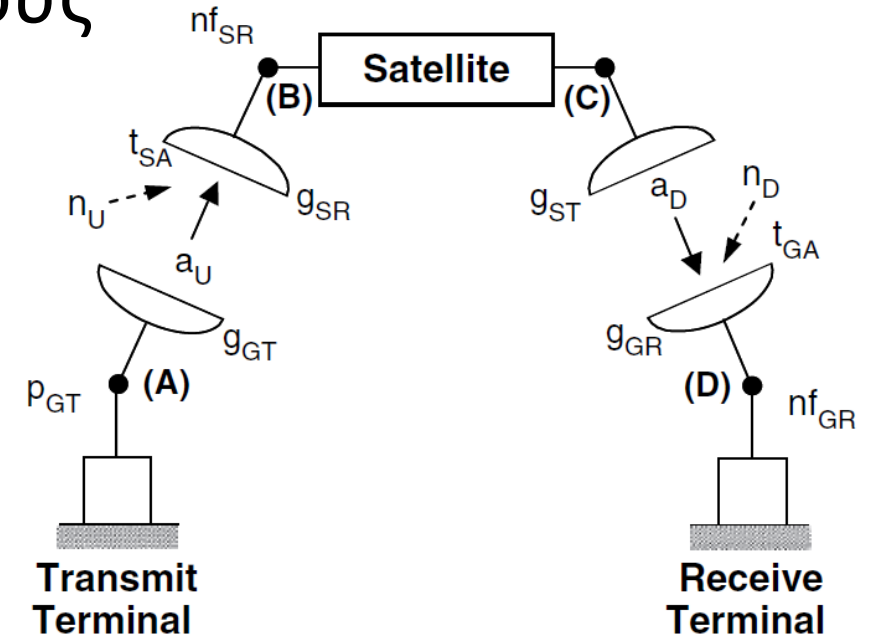
$$n_{SR} = k t_u \left(1 - \frac{1}{a_u} \right) b_u + k t_{SA} b_u + k 290(nf_{SR} - 1)b_u$$

$$\left(\frac{C}{n} \right)_U = \left(\frac{C_{SR}}{n_{SR}} \right) = \frac{p_{GT} g_{GT} g_{SR}}{l_u a_u k \left[t_u \left(1 - \frac{1}{a_u} \right) + t_{SA} + 290(nf_{SR} - 1) \right] b_u}$$

Για το Downlink:

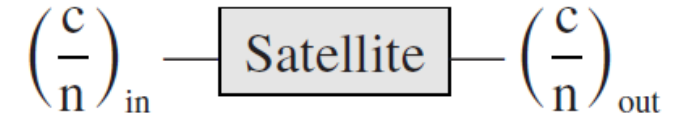
$$n_{GR} = k t_D \left(1 - \frac{1}{a_D} \right) b_D + k t_{GA} b_D + k 290(nf_{GR} - 1)b_D$$

$$\left(\frac{C}{n} \right)_D = \left(\frac{C_{GR}}{n_{GR}} \right) = \frac{p_{GT} g_{GT} g_{SR}}{l_D a_D k \left[t_D \left(1 - \frac{1}{a_D} \right) + t_{GA} + 290(nf_{GR} - 1) \right] b_D}$$



Συνολικός Θόρυβος =
1) Θόρυβος διαδρομής +
2) Θόρυβος κεραίας +
3) Θόρυβος δέκτη

Συνολικό κανάλι για transparent δορυφόρους



Συνθήκη 1: Η ισχύς μετάδοσης κατερχόμενης ζεύξης, p_{ST} , για έναν transparent δορυφόρο θα περιέχει τόσο το επιθυμητό φέρον, c_{ST} , όσο και τον θόρυβο που εισάγεται από την ανερχόμενη ζεύξη και από το ίδιο το δορυφορικό σύστημα, n_{ST} . Δηλαδή $p_{ST} = c_{ST} + n_{ST}$

Συνθήκη 2: Δεδομένου ότι δεν υπάρχει ενσωματωμένη επεξεργασία ή βελτίωση του σήματος, το c/n στην είσοδο του δορυφόρου πρέπει να ισούται με το c/n στην έξοδο του δορυφόρου. $\left(\frac{c}{n}\right)_U = \frac{c_{ST}}{n_{ST}} = \frac{c_{ST}}{p_{ST} - c_{ST}}$

$$c_{ST} = \frac{p_{ST}}{1 + \frac{1}{\left(\frac{c}{n}\right)_U}} \quad n_{ST} = \frac{p_{ST}}{1 + \left(\frac{c}{n}\right)_U}$$

Η συνεισφορά του $\left(\frac{c}{n}\right)_U$ στο σήμα και στο θόρυβο που φτάνει στην έξοδο (transmitter) του δορυφόρου.

$$c'_{GR} = \frac{c_{GR}}{1 + \frac{1}{\left(\frac{c}{n}\right)_U}} \quad n'_{GR} = n_{GR, system} + \frac{c_{GR}}{1 + \left(\frac{c}{n}\right)_U}$$

Η συνεισφορά του $\left(\frac{c}{n}\right)_U$ στο σήμα και στο θόρυβο που φτάνει στην έξοδο του συστήματος λήψης.

$$\left(\frac{c}{n}\right)_c = \frac{c'_{GR}}{n'_{GR}} = \frac{\frac{c_{GR}}{1 + \frac{1}{\left(\frac{c}{n}\right)_U}}}{n_{GR, system} + \frac{c_{GR}}{1 + \left(\frac{c}{n}\right)_U}}$$

Ο λόγος c/n για το συνολικό κανάλι από άκρη σε άκρη!

Συνολικό κανάλι για transparent δορυφόρους

$$\frac{c_{GR}}{n_{GR,system}} = \left(\frac{c}{n}\right)_D \rightarrow \left(\frac{c}{n}\right)_c = \frac{\frac{c_{GR}}{1 + \frac{1}{\left(\frac{c}{n}\right)_U}}}{n_{GR,system} + \frac{c_{GR}}{1 + \left(\frac{c}{n}\right)_U}} \quad c_{GR} = \left(\frac{c}{n}\right)_D * n \quad \rightarrow \quad \left(\frac{c}{n}\right)_c = \frac{\left(\frac{c}{n}\right)_u \left(\frac{c}{n}\right)_d}{1 + \left(\frac{c}{n}\right)_u + \left(\frac{c}{n}\right)_d}$$

$$\left(\frac{c}{n}\right)_c = \frac{\left(\frac{c}{n}\right)_u \left(\frac{c}{n}\right)_d}{1 + \left(\frac{c}{n}\right)_u + \left(\frac{c}{n}\right)_d} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{\left(\frac{c}{n}\right)_c} = \frac{1 + \left(\frac{c}{n}\right)_u + \left(\frac{c}{n}\right)_d}{\left(\frac{c}{n}\right)_u \left(\frac{c}{n}\right)_d} \quad \text{Για } c/n \gg 1 \quad \rightarrow \quad \left(\frac{c}{n}\right)_c^{-1} = \left(\frac{c}{n}\right)_u^{-1} + \left(\frac{c}{n}\right)_d^{-1}$$

Όταν $\left(\frac{c}{n}\right)_u > \left(\frac{c}{n}\right)_d$ λέμε ότι έχουμε έναν uplink limited transponder, ενώ στην αντίθετη περίπτωση ο transponder λέγεται downlink limited.

Ίδιοι τύποι ισχύουν και για το c/n_0 και το e_b/n_0 . $\left(\frac{c}{n_0}\right)_c^{-1} = \left(\frac{c}{n_0}\right)_u^{-1} + \left(\frac{c}{n_0}\right)_d^{-1} \quad \left(\frac{e_b}{n_0}\right)_c^{-1} = \left(\frac{e_b}{n_0}\right)_u^{-1} + \left(\frac{e_b}{n_0}\right)_d^{-1}$

❖ Σε όλους τους παραπάνω τύπους χρησιμοποιούμε γραμμικά τα μεγέθη και όχι λογαριθμικά σε dB!

Συνολική επίδοση για Transparent δορυφόρους

Περίπτωση 1: Μία σύνδεση είναι πολύ ισχυρότερη από την άλλη. Εξετάζουμε μια συνολική ζεύξη με πολύ μεγαλύτερο λόγο φέροντος προς θόρυβο στην ανερχόμενη ζεύξη.

$$\left(\frac{c}{n}\right)_u = 100 \rightarrow \left(\frac{C}{N}\right)_u = 20 \text{ dB}$$

$$\left(\frac{c}{n}\right)_d = 10 \rightarrow \left(\frac{C}{N}\right)_d = 10 \text{ dB}$$

$$\left(\frac{c}{n}\right)_c^{-1} = \left(\frac{c}{n}\right)_u^{-1} + \left(\frac{c}{n}\right)_d^{-1}$$

$$\frac{1}{\left(\frac{c}{n}\right)_c} = \frac{1}{100} + \frac{1}{10} = \frac{1}{9.0909}$$

$$\left(\frac{c}{n}\right)_c = 9.0909 \rightarrow \left(\frac{C}{N}\right)_c = 9.6 \text{ dB}$$

Άρα το συνολικό c/n είναι ελαφρώς ασθενέστερο από αυτό του ασθενέστερου καναλιού. Έτσι μια συνολική ζεύξη στην οποία ένα από τα δύο κανάλια είναι το κυρίαρχο θα αποδίδει πάντα χειρότερα από το ασθενέστερο κανάλι. Λέμε τότε ότι το link είναι uplink/downlink limited.

Συνολική επίδοση για Transparent δορυφόρους

Περίπτωση 2: Τα δύο κανάλια (uplink και downlink είναι ισοδύναμα).

$$\left(\frac{c}{n}\right)_u = 100 \rightarrow \left(\frac{C}{N}\right)_u = 10 \text{ dB}$$

$$\left(\frac{c}{n}\right)_d = 10 \rightarrow \left(\frac{C}{N}\right)_d = 10 \text{ dB}$$

$$\left(\frac{c}{n}\right)_c^{-1} = \left(\frac{c}{n}\right)_u^{-1} + \left(\frac{c}{n}\right)_d^{-1}$$

$$\frac{1}{\left(\frac{c}{n}\right)_c} = \frac{1}{10} + \frac{1}{10} = \frac{1}{5}$$

$$\left(\frac{c}{n}\right)_c = 9.0909 \rightarrow \left(\frac{C}{N}\right)_c = 7 \text{ dB}$$

- Το σύνθετο σύστημα λειτουργεί με μισό το c/n από τα δύο κανάλια. Έτσι, **ένας δορυφόρος με ίση απόδοση ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης θα λειτουργεί με μια τιμή 3 dB κάτω από την τιμή κάθε μεμονωμένης σύνδεσης.**
- Είναι δύσκολο να γενικευθεί η απόδοση της συνολικής ζεύξης πέρα από τις δύο αυτές απλές περιπτώσεις. Κάθε σύνθετο σύστημα πρέπει να αξιολογείται ξεχωριστά για να προσδιοριστεί η συνολική απόδοση.

Συνολική επίδοση για On Board Processing δορυφόρους

Η συνολική σύνθετη (ή από άκρο σε άκρο) απόδοση σύνδεσης για τον δορυφόρο OBP περιγράφεται από το BER ή την πιθανότητα σφάλματος, P_E , για μια συγκεκριμένη διαδικασία ψηφιακής μετάδοσης. Η συνολική απόδοση σφάλματος του ενσωματωμένου αναμεταδότη επεξεργασίας θα εξαρτηθεί από τις πιθανότητες σφάλματος τόσο στην ανερχόμενη όσο και στην κατερχόμενη ζεύξη.

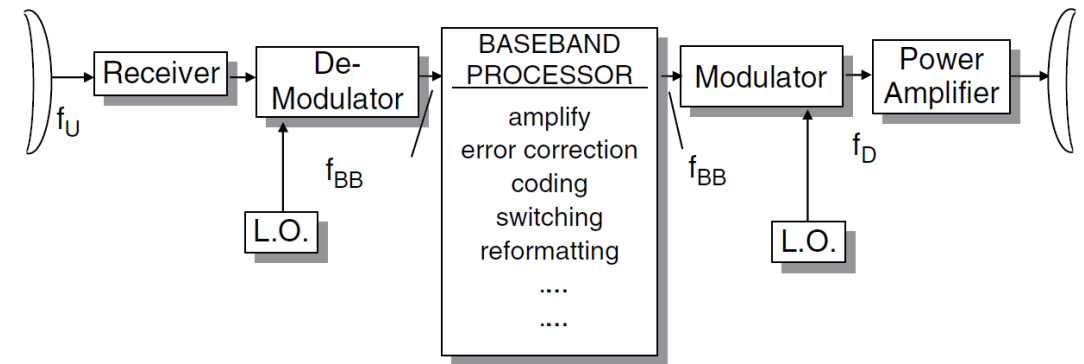
P_U = πιθανότητα σφάλματος ενός bit στο uplink (BER_U)

P_D = πιθανότητα σφάλματος ενός bit στο downlink (BER_D)

Ένα bit θα είναι σωστό στον σύνδεσμο από άκρο σε άκρο εάν είτε το bit είναι σωστό τόσο στον ανερχόμενο όσο και στον κατερχόμενο σύνδεσμο, είτε εάν είναι λανθασμένο και στους δύο συνδέσμους. Η συνολική πιθανότητα ένα bit να είναι σωστό, P_{COR} , είναι επομένως:

$$P_{cor} = (1 - P_u)(1 - P_d) + P_u P_d$$

Πιθανότητα λάθους και στα δύο κανάλια (καταλήγει σωστό!)



Συνολική επίδοση για On Board Processing δορυφόρους

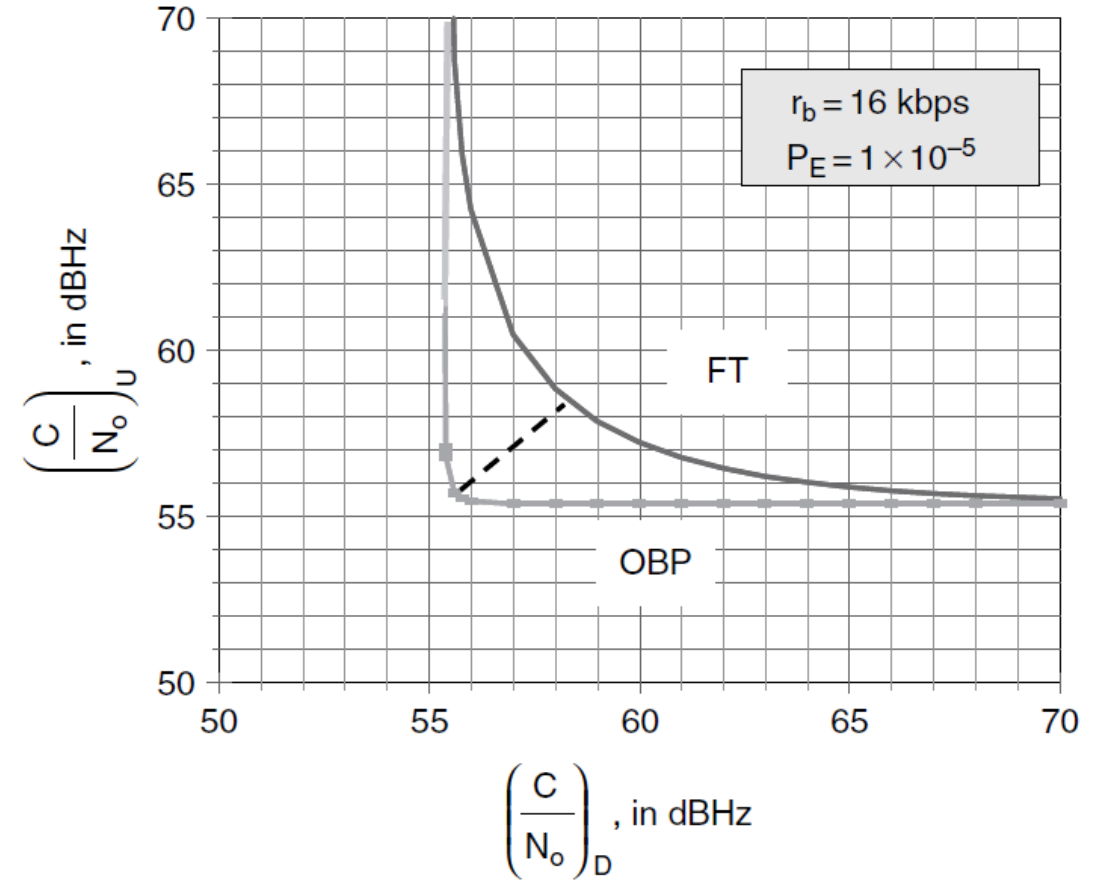
$$P_{cor} = (1 - P_u)(1 - P_d) + P_u P_d = 1 - (P_u + P_d) + 2P_u P_d$$

$$P_E = 1 - P_{cor} = P_u + P_d - 2P_u P_d$$

Το P_E δίνει τη συνολική πιθανότητα σφάλματος από άκρο σε άκρο (BER) για τον δορυφόρο OBP όσον αφορά τα BER ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης. Η σύνθετη πιθανότητα σφάλματος σύνδεσης θα εξαρτάται από τις παραμέτρους ανερχόμενης και κατερχόμενης ζεύξης και την επίδρασή τους στο e_b/n_0 για κάθε σύνδεση. Πρέπει να καθοριστεί μια συγκεκριμένη διαμόρφωση για να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ της πιθανότητας σφάλματος bit και e_b/n_0 του για κάθε σύνδεση. Στη συνέχεια, μπορεί να προσδιοριστεί η σύνθετη απόδοση σφάλματος.

Συνολική επίδοση για On Board Processing δορυφόρους

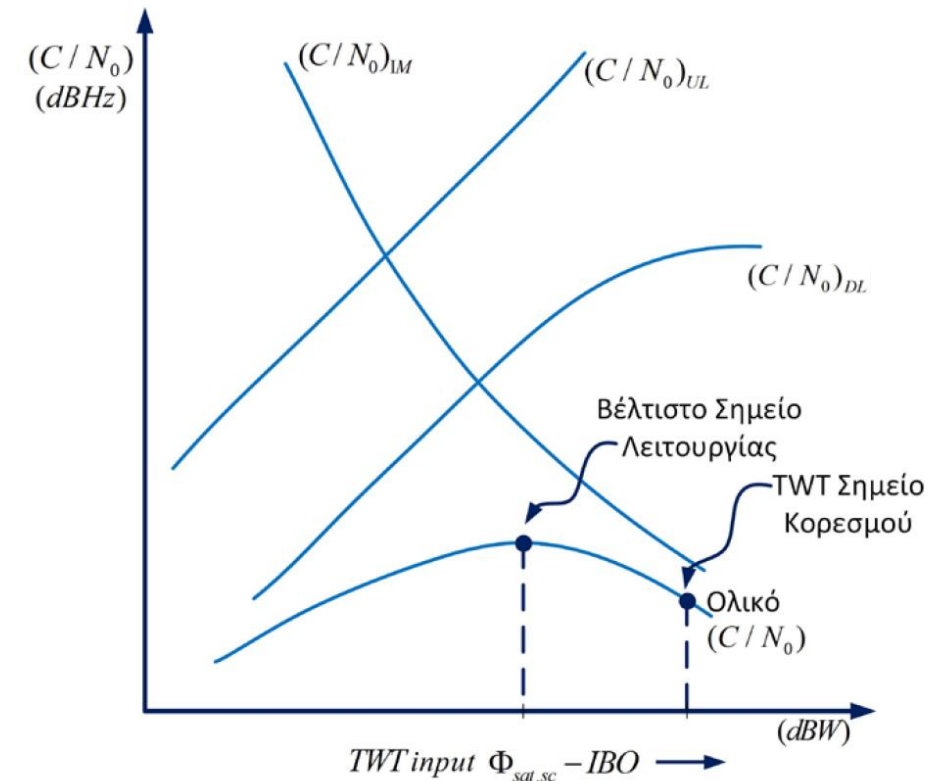
- Παράδειγμα σύγκρισης του απαιτούμενου C/N_o για έναν transparent (frequency translate) και έναν OBP δορυφόρο. Και τα δύο συστήματα απαιτούν ένα BER 10^{-5} για ρυθμό 16 kbps και διαμόρφωση BPSK.
- Οι αναμεταδότες OBP προσφέρουν ένα ξεχωριστό πλεονέκτημα για εφαρμογές όπου οι συνθήκες σύνδεσης μπορούν να αλλάξουν ή όταν τα διαθέσιμα περιθώρια ισχύος είναι περιορισμένα λόγω περιορισμών στην ισχύ μετάδοσης ή στο μέγεθος της κεραίας.



Επίδραση ενδοδιαμόρφωσης

- Το φαινόμενο της ενδοδιαμόρφωσης συμβαίνει, όταν τα πολλαπλά φέροντα μεταδίδονται μέσω του ενισχυτή υψηλής ισχύος (TWTA ή HPA) του αναμεταδότη και προκαλούνται προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης στο πλάτος και τη φάση. Αυτός είναι και ο λόγος λειτουργίας των ενισχυτών σε χαμηλότερη ισχύ απ' ό,τι η ισχύς κορεσμού (backoff).
- Όταν υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός διαμορφωμένων φερόντων, τα προϊόντα ενδοδιαμόρφωσης δεν είναι διακριτά, αλλά αντί αυτού εμφανίζονται ως ένα είδος θορύβου, που ονομάζεται θόρυβος ενδοδιαμόρφωσης. Ο λόγος φέροντος-προς-θόρυβο ενδοδιαμόρφωσης βρίσκεται συνήθως πειραματικά ή, σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί να προσδιοριστεί με υπολογιστικές μεθόδους. Μόλις γίνει γνωστός ο λόγος, μπορεί να συνδυαστεί με τον λόγο φέροντος-προς-θερμικό θόρυβο, σύμφωνα με την:

$$\left(\frac{c}{n_0}\right)_c^{-1} = \left(\frac{c}{n_0}\right)_u^{-1} + \left(\frac{c}{n_0}\right)_d^{-1} + \left(\frac{c}{n_0}\right)_{IM}^{-1}$$

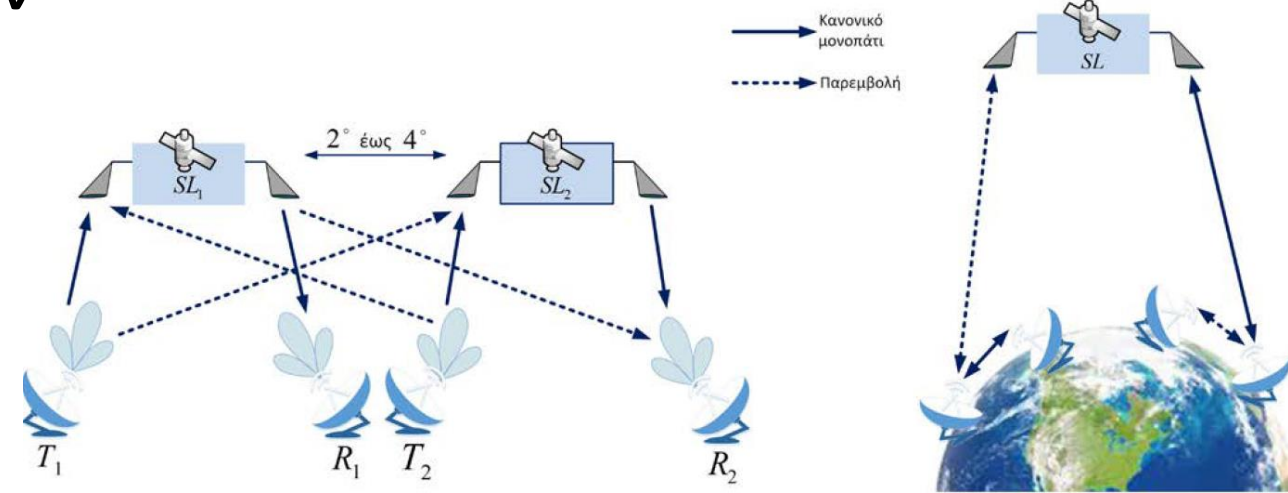


Επίδραση λοιπών παρεμβολών

Οι παρεμβολές εκπομπών μπορούν να προέρχονται από το ίδιο το δορυφορικό σύστημα, με τη μορφή μεταδόσεων σε γειτονικά κανάλια και κάθετα πολωμένες μεταδόσεις, καθώς και από άλλα δορυφορικά και επίγεια συστήματα, όπως:

- εκπομπές (ανεπιθύμητη ισχύς), που λαμβάνονται από έναν γειτονικό δορυφόρο από τους πλευρικούς λοβούς των επίγειων σταθμών του οικείου συστήματος (downlink)
- λήψη από τον εκάστοτε δορυφόρο των εκπομπών (ανεπιθύμητη ισχύς) εκτός άξονα (off-axis) της διεύθυνσης σκόπευσης από τους επίγειους σταθμούς, οι οποίοι λειτουργούν προς την κατεύθυνση ενός παρακείμενου δορυφόρου (uplink)
- επίγειες εκπομπές, κυρίως ζεύξεις αναμετάδοσης, που λειτουργούν στην ίδια (κοινή) ζώνη συχνοτήτων.

Ειδικά για την άνω ζεύξη, το πρόβλημα των παρεμβολών καθορίζει την απόσταση μεταξύ των δορυφόρων και περιορίζει τη χωρητικότητα της GEO τροχιάς σε οποιαδήποτε ζώνη συχνοτήτων. Το επίπεδο της παρεμβολής, που προκαλείται από την επίγεια μετάδοση στη λήψη του δορυφορικού σήματος, εξαρτάται από τη φασματική πυκνότητα της παρεμβολής του επίγειου σήματος και το εύρος ζώνης του δορυφορικού σήματος λήψης από τον επίγειο σταθμό.



Επίδραση λοιπών παρεμβολών

Ένα άλλο είδος παρεμβολής είναι η παρεμβολή γειτονικού καναλιού (adjacent channel interference) που συμβαίνει, όταν το εύρος ζώνης του αναμεταδότη ταυτόχρονα μοιράζεται από πολλά φέροντα, όπου οι κεντρικές συχνότητες έχουν μικρή απόσταση μεταξύ τους.

Όταν ο δορυφόρος μεταδίδει στους επίγειους σταθμούς, οι οποίοι βρίσκονται εντός του ίχνους του, τα διαφορετικά φέροντα φιλτράρονται από τον δέκτη, έτσι ώστε κάθε επίγειος σταθμός να λαμβάνει μόνο το προβλεπόμενο σήμα. **Το φιλτράρισμα θα ήταν πιο εύκολο να πραγματοποιηθεί, εάν υπήρχε μία μεγάλη ζώνη προστασίας (guard band) μεταξύ των γειτονικών καναλιών**, η οποία δεν είναι πάντα εφικτή, καθώς θα οδηγούσε στην αναποτελεσματική χρήση του εύρους ζώνης του αναμεταδότη.

Το αποτέλεσμα είναι ότι ένα μέρος της ισχύος του φέροντος του γειτονικού καναλιού από το επιθυμητό λαμβάνεται στον δέκτη, εξαιτίας της επικάλυψης των χαρακτηριστικών του πλάτους των φίλτρων, προκαλώντας κατά συνέπεια αύξηση του θορύβου.

Η πιο κοινή μέθοδος για την αντιμετώπιση όλων των προαναφερθεισών παρεμβολών είναι να συμπεριληφθεί μία πρόσθετη συνεισφορά θορύβου $(C/N_0)_I$ στον προϋπολογισμό της ζεύξης. Αυτή είναι η πιο απλή μέθοδος, για να υπάρχουν επαρκή περιθώρια ασφάλειας στον προϋπολογισμό ζεύξης. Αν προστεθεί και ο θόρυβος εξαιτίας παρεμβολών, τότε η εξίσωση η προηγούμενη εξίσωση επεκτείνεται ως εξής:

$$\left(\frac{C}{n_0}\right)_c^{-1} = \left(\frac{C}{n_0}\right)_o^{-1} + \left(\frac{C}{n_0}\right)_{IM}^{-1} + \left(\frac{C}{n_0}\right)_I^{-1}$$

Προδιαγραφές διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας του δικτύου

Τα κριτήρια και οι στόχοι ποιότητας, που χρησιμοποιούνται συνήθως για τη σχεδίαση των δορυφορικών ζεύξεων, είναι η διαθεσιμότητα (availability), η οποία αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου, όπου το σύστημα είναι λειτουργικό [$A = (\text{required time} - \text{down time}) / (\text{required time})$], και η επίδοση σφαλμάτων (error performance), η οποία αναφέρεται στον ρυθμό σφαλμάτων για το χρονικό διάστημα, όπου το σύστημα είναι διαθέσιμο.

Είναι συχνά απαραίτητο και προς το συμφέρον του σχεδιαστή να διευκρινιστούν ορισμένες παράμετροι του δορυφορικού συστήματος ζεύξης με στατιστικό τρόπο, λόγω της στοχαστικής φύσης του μέσου μετάδοσης. Αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο κατά την εξέταση των παραμέτρων, που επηρεάζονται από διαταραχές μετάδοσης μέσω της ατμόσφαιρας, διότι οι βασικοί μηχανισμοί διάδοσης ραδιοκυμάτων δεν είναι ντετερμινιστικοί και μπορεί να περιγραφούν μόνο με στατιστικό τρόπο.

Η επίδοση μπορεί να περιγραφεί μόνο με την πιθανότητα να ικανοποιούνται συγκεκριμένες τιμές για τα δύο κριτήρια ποιότητας ή, ισοδύναμα, με το ποσοστό του χρόνου, για το οποίο οι τιμές ικανοποιούνται. Τα κριτήρια αυτά, συνδέονται με τιμές κατωφλίου C/N για αναλογική μετάδοση ή BER για ψηφιακή μετάδοση.

Προδιαγραφές διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας του δικτύου

Οι παράμετροι απόδοσης με βάση τη στατιστική, ορίζονται συνήθως από ένα ποσοστό επί τοις εκατό σε ετήσια βάση $p(\%)$. Δηλαδή, είναι το ποσοστό του χρόνου σε ένα έτος ή ένα μήνα, όπου μία παράμετρος είναι ίση με ή υπερβαίνει μια συγκεκριμένη τιμή. Παραδείγματα παραμέτρων, που συχνά καθορίζονται σε ποσοστό επί τοις εκατό, είναι:

- λόγος φέροντος-προς-θόρυβο και όλες οι συναφείς παράμετροι: C/N , C/N_0 , E_b/N_0
- παράμετροι ατμοσφαιρικών επιδράσεων, όπως π.χ. εξασθένηση εξαιτίας βροχής, αποπόλωση
- λόγος σήματος-προς-θόρυβο S/N
- λόγος φέροντος-προς-παρεμβολή C/I

Οι δύο πιο συχνά χρησιμοποιούμενες χρονικές περίοδοι για τις προδιαγραφές των παραμέτρων **είναι η ετήσια και η περίοδος του χειρότερου μήνα**. Τα περισσότερα μοντέλα πρόβλεψης της διάδοσης και των απαιτήσεων σταθερών υπηρεσιών FSS καθορίζονται σε ετήσια βάση.

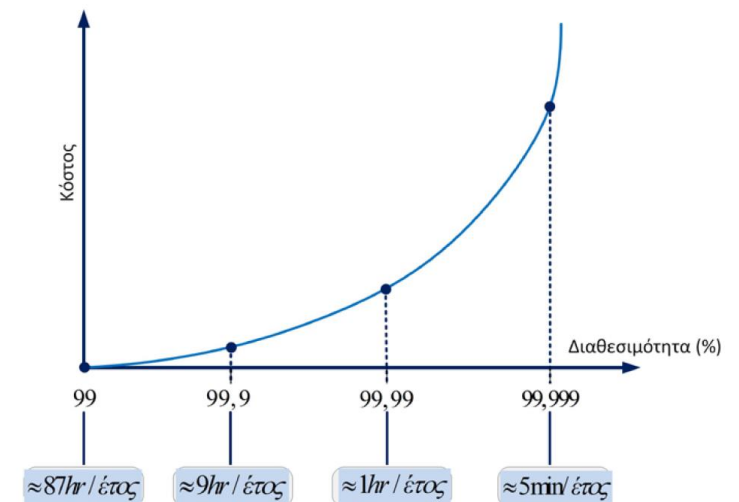
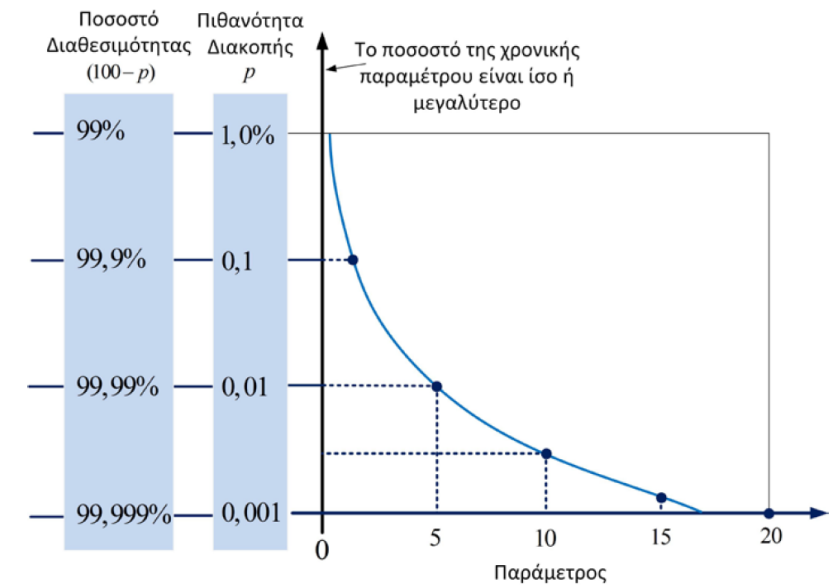
Οι υπηρεσίες ευρυεκπομπής (broadcasting services), συμπεριλαμβανομένης της ραδιοτηλεοπτικής μετάδοσης δορυφορικών υπηρεσιών, συχνά καθορίζονται με βάση τον χειρότερο μήνα. Οι παράμετροι που επηρεάζονται από την εξασθένηση εξαιτίας βροχής, για παράδειγμα ο λόγος C/N και ο λόγος SNR, θα έχουν χειρότερες τιμές τους μήνες με τη μεγαλύτερη βροχόπτωση.

Προδιαγραφές διαθεσιμότητας και αξιοπιστίας του δικτύου

Ετήσιες και μηνιαίες περίοδοι διακοπής, σε ώρες και λεπτά, που αντιστοιχούν στο εύρος των ποσοστιαίων τιμών του p και $(100-p)$, οι οποίες συναντώνται συνήθως στις προδιαγραφές ζεύξης των δορυφορικών επικοινωνιών.

Υπέρβαση διακοπής p (%)	Διαθεσιμότητα ή αξιοπιστία $100-p$ (%)	Χρόνος διακοπής της ζεύξης	
		Ετήσια βάση	Μηνιαία βάση
0	100	0 hr	0 hr
10	90	876 hr	73 hr
1	99	87,6 hr	7,3 hr
0,1	99,9	8,76 hr	44 min
0,05	99,95	4,3 8hr	22 min
0,01	99,99	53 min	4 min
0,005	99,995	26 min	2 min
0,001	99,999	5 min	0,4 min

Η διαθεσιμότητα ενός δορυφορικού συστήματος βάσει του Πίνακα και η σχέση με το κόστος υλοποίησης. Όσα περισσότερα ‘εννιάρια’ χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση του δορυφορικού συστήματος, δηλαδή πολύ μικρή πιθανότητα διακοπής, τόσο μεγαλύτερο είναι και το κόστος υλοποίησης. Ο λόγος προφανής, αφού θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν περισσότερες εφεδρείες σε όλες τις ζεύξεις επίγειου σταθμού και δορυφόρου.



Διαθεσιμότητα

- Η διαθεσιμότητα εκφράζεται από το χρονικό ποσοστό στη διάρκεια ενός έτους, όπου ο δέκτης διατηρεί τον συγχρονισμό του με τον πομπό, δηλαδή το σύστημα λειτουργεί έστω και με προβλήματα αποκωδικοποίησης του σήματος στον δέκτη. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ύπαρξη συγχρονισμού αποτελεί η διατήρηση του BER κάτω από μια κρίσιμη στάθμη κατωφλίου BER_{TH} , που συνήθως λαμβάνεται ίση προς 10^{-3} . Η διαθεσιμότητα, λοιπόν, εκφράζεται μέσω του χρόνου διακοπής T_{outage} στη διάρκεια ενός έτους ή ισοδύναμα μέσω της πιθανότητας διακοπής P_{outage} .

$$P_{outage} = P_r\{BER > BER_{th}\} \qquad T_{outage} = 525600 P_{outage} \frac{\text{min}}{\text{year}}$$

- **Οι ζεύξεις στη C-ζώνη μπορούν να σχεδιαστούν για αξιοπιστία 99,99%, επειδή η εξασθένηση εξαιτίας βροχής σπάνια υπερβαίνει τα 1-2 dB.** Ο χρόνος που αντιστοιχεί στο 0,01% ενός έτους είναι 52-53 min. Στο 0,01% οι στατιστικές της εξασθένησης εξαιτίας βροχής δεν είναι σταθερές και από χρόνο σε χρόνο σημειώνονται διακυμάνσεις. Μια ζεύξη σχεδιασμένη να έχει διακοπές με σύνολο 52min κάθε έτος μπορεί να έχει διακοπές αρκετών ωρών ένα έτος και καμία διακοπή το επόμενο.
- Οι περισσότερες ζεύξεις στην Ka-ζώνη δεν μπορούν να σχεδιαστούν για 99,99% αξιοπιστία, επειδή η εξασθένηση εξαιτίας βροχής γενικά υπερβαίνει τα 10dB, και συχνά τα 20dB, για 0,01% του χρόνου. **Χρόνοι διακοπών από 0,1 έως 0,5% ενός έτους (8 έως 40 ώρες) συνήθως είναι ανεκτοί στη Ka-ζώνη.**
- Ο επιτρεπόμενος χρόνος διακοπής για μία ζεύξη εξαρτάται εν μέρει από την κίνηση που μεταφέρεται. Η τηλεφωνική κίνηση χρειάζεται κανάλια πραγματικού χρόνου (χρήση ζωνών C ή Ku), ενώ οι μεταδόσεις διαδικτύου επηρεάζονται λιγότερο από τις σύντομες διακοπές (χρήση Ka-ζώνης).

Υπηρεσίες δορυφορικών δικτύων

- Η επιλογή της ζώνης συχνοτήτων για δορυφορικές επικοινωνίες συνεπάγεται συμβιβασμό μεταξύ διαφόρων περιορισμών. Όσο χαμηλότερη είναι η ζώνη συχνοτήτων, τόσο μικρότερο είναι το διαθέσιμο εύρος ζώνης αλλά και τόσο καλύτερα είναι τα χαρακτηριστικά διάδοσης (<100 MHz, η ιονόσφαιρα προκαλεί υψηλό βαθμό εξασθένησης. Το φάσμα 300 MHz-1 GHz είναι γεμάτο με επίγειες εφαρμογές, γεγονός που οδηγεί σε παρεμβολές μεταξύ διαφορετικών εφαρμογών).
- Για εφαρμογές, όπως οι κινητές δορυφορικές υπηρεσίες (MSS), τα χαρακτηριστικά διάδοσης είναι κρίσιμα και το εύρος ζώνης που απαιτείται είναι σχετικά μικρό, οπότε χρησιμοποιούνται χαμηλότερες ζώνες συχνοτήτων. Άλλες εφαρμογές, όπως η απευθείας μετάδοση σε οικιακές συσκευές (DTH) και οι ευρυζωνικές υπηρεσίες δεδομένων, είναι πρακτικές μόνο σε υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων.
- Με αυτές τις υψηλότερες ζώνες συχνοτήτων, οι κεραίες είναι πιο κατευθυντικές. Οι κατευθυντικές κεραίες προσφέρουν το πρόσθετο πλεονέκτημα της χρήσης χωρικού διαχωρισμού για την αποφυγή παρεμβολών μεταξύ συνδέσεων που χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα.

Service	Use	Band (Letter)	Band (GHz up/down)	Typical Frequencies (GHz)	
				Uplink	Downlink
Fixed Satellite Service (FSS)	Older systems (e.g. INTELSAT)	C	6/4	5.85 – 7.075	3.4 – 4.2
	Government	X	8/7	7.90 – 8.40	7.25 – 7.75
	Current operational developments (e.g. UTELSAT)	Ku	13/11 14/12	13.75 – 14.8	10.7 – 11.7
	Offers large bandwidth and little interference due to current limited use	Ka	30/20	28.0 – 30.0	17.7 – 19.7
	Developing technologies	V	50/40	50	40
Mobile Satellite Service (MSS)	Non-geostationary systems	VHF UHF		0.148 – 0.150 0.454 – 0.460	0.137 – 0.138 0.400 – 0.401
	Mostly geostationary systems (e.g. INMARSAT)	L		1.626 – 1.66	1.525 – 1.56
	Non-geostationary satellite phone systems (e.g. GLOBALSTAR)	L/S		1.61 – 1.625 (L)	2.483 – 2.5 (S)
	International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000)	S		1.98 – 2.01	2.17 – 2.20
	Non-geostationary systems	S		2.65 – 2.69	2.5 – 2.54
Broadcasting Satellite Service (BSS)		S	18/12 25/22	2.67 – 2.69	2.5 – 2.52
		Ku		17.7 – 18.2	11.2 – 12.2
		Ka		24.75 – 25.25	21.4 – 22.0
Space Operations Service (SOS)	Telemetry, tracking and command (TTC)	S		2.025 – 2.120	2.2 – 2.3

Υπηρεσίες δορυφορικών δικτύων

Η χρήση ραδιοσυχνοτήτων για διάφορες υπηρεσίες ρυθμίζεται από την Διεθνή Ένωση Τηλεπικοινωνιών (ITU).

Η ITU δημοσιεύει Κανονισμούς Ραδιοεπικοινωνιών που αναφέρονται στους ακόλουθους τύπους δορυφορικών υπηρεσιών:

Σταθερή Δορυφορική Υπηρεσία (FSS): Μια δορυφορική υπηρεσία που χρησιμοποιεί σταθερούς επίγειους τερματικούς σταθμούς. Με άλλα λόγια, η FSS είναι οποιαδήποτε δορυφορική υπηρεσία στην οποία ο επίγειος σταθμός δεν αλλάζει συχνά θέση. Παραδείγματα είναι:

- Επικοινωνίες από σημείο σε σημείο
- Εταιρικά δίκτυα
- Τερματικά πολύ μικρού ανοίγματος (VSAT)
- Μεταφερόμενα τερματικά που παραμένουν σταθερά κατά τη χρήση, όπως τερματικά δορυφορικής συλλογής ειδήσεων (SNG)

Κινητή δορυφορική υπηρεσία (MSS): Δορυφορική υπηρεσία που χρησιμοποιεί φορητούς επίγειους τερματικούς σταθμούς, κυρίως για τηλεφωνικές επικοινωνίες. Οι τερματικοί σταθμοί MSS μπορούν να τοποθετηθούν σε πλοίο, αεροπλάνο ή όχημα ή, όπως συμβαίνει με τα φορητά δορυφορικά τηλέφωνα, μπορούν ακόμη και να μεταφέρονται από ένα άτομο. Ο κύριος πάροχος υπηρεσιών MSS είναι η INMARSAT. Οι υπηρεσίες MSS χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- Ναυτική κινητή δορυφορική υπηρεσία (MMSS)
- Αεροναυτική κινητή δορυφορική υπηρεσία (AMSS)
- Χερσαία κινητή δορυφορική υπηρεσία (LMSS)

Υπηρεσίες δορυφορικών δικτύων

Υπηρεσία δορυφορικής μετάδοσης (BSS): Ένας τύπος σταθερής δορυφορικής υπηρεσίας που χρησιμοποιείται για την παροχή ψυχαγωγικού περιεχομένου ήχου και εικόνας απευθείας στους καταναλωτές. Χρησιμοποιούνται επίσης οι όροι «απευθείας δορυφορική μετάδοση» (DBS) ή «απευθείας μετάδοση στο σπίτι» (DTH).

- Η BSS-TV έχει σχεδιαστεί για την παροχή συμβατικών τηλεοπτικών σημάτων απευθείας στον καταναλωτή.
- Η BSS-HDTV έχει σχεδιαστεί για την παροχή τηλεοπτικών σημάτων υψηλής ευκρίνειας απευθείας στον καταναλωτή.
- Η BSS-Sound έχει σχεδιαστεί για την παροχή υψηλής ποιότητας ηχητικών σημάτων σε σταθερά και κινητά τερματικά καταναλωτών.

Άλλες υπηρεσίες:

Υπηρεσία διαστημικών επιχειρήσεων (SOS): Μια υπηρεσία ραδιοεπικοινωνίας που ασχολείται αποκλειστικά με τη λειτουργία διαστημικών σκαφών, ιδίως με την παρακολούθηση, την τηλεμετρία και την εντολή.

Υπηρεσία ερασιτεχνικών δορυφόρων (ASS) ή Amsat

Υπηρεσία δορυφόρων εξερεύνησης της Γης (ESSS)

Υπηρεσία δορυφόρων ραδιοεντοπισμού (RSSS)

Υπηρεσία δορυφόρων ραδιοπλοήγησης (RNSS)

Υπηρεσία διαστημικής έρευνας (SRS)

Υπηρεσία διασυνδέσεων δορυφόρων (ISS)

1 Ασκήσεις-COMPOSITE SATELLITE LINK ANALYSIS

Σχεδιάζετε ένα σύστημα δορυφορικής επικοινωνίας με transparent δορυφόρο LEO για μετάδοση δεδομένων 60 Mbps με QPSK διαμόρφωση.

1. Uplink

- Συχνότητα (f_{up}): 14.5 GHz
- Ισχύς Πομπού (P_{Tx}): 50 W
- Διάμετρος Κεραίας Πομπού (D_{Tx}): 1.8 m
- Απόδοση Κεραίας (η_{Tx}): 0.60
- Απόσταση (d): 1,200 km
- Απώλειες Ατμόσφαιρας (L_{atmup}): 10 dB

2. Δορυφόρος (Transparent):

- Κέρδος Κεραίας Δορυφόρου (G_{sat}): 20 dBi
- Θερμοκρασία Συστήματος Δορυφόρου (T_{sat}): 450 K
- Ισχύς HPA του Δορυφόρου (P_{sat}): 1.2 W
- Down Conversion: 14.5 GHz $\rightarrow$ 11.5 GHz

3. Downlink:

- Συχνότητα (f_{down}): 11.5 GHz
- Διάμετρος Κεραίας Λήπτη (D_{Rx}): 2.2 m
- Απόδοση Κεραίας (η_{Rx}): 0.58
- Θερμοκρασία Κεραίας (T_{ant}): 28 K
- Θερμοκρασία LNA (T_{LNA}): 80 K
- Συντελεστής Θορύβου (F): 1.0 dB
- Απόσταση (d): 1,200 km
- Απώλειες Ατμόσφαιρας ($L_{atmdown}$): 16 dB

4. Γενικά:

- Ρυθμός Δεδομένων (R_b): 60 Mbps
- Διαμόρφωση: QPSK (2 bits/symbol)
- Απαιτούμενο E_b/N_o για $BER=10^{-6}$: 10.5 dB

1 Ασκήσεις -COMPOSITE SATELLITE LINK

A. UPLINK

1. EIRP του επιγείου σταθμού (dBW)
2. Απώλειες Ελεύθερου Χώρου (dB)
3. C/N₀ στο δορυφόρο (dB-Hz)
4. C/N στο δορυφόρο (dB) - για εύρος BW = 36 MHz

1. EIRP Uplink:

$$P_{Tx}(\text{dBW}) = 10 \times \log_{10}(50) = 17.0 \text{ dBW}$$

$$G_{Tx} = 10 \log_{10}(109.66 f^2 d^2 \eta) = 10 \log_{10}(109.66 \cdot 14.5^2 \cdot 1.8^2 \cdot 0.6) = 46.5 \text{ dBi}$$

$$\text{EIRP}_{up} = 17.0 + 46.5 = 63.5 \text{ dBW}$$

2. FSPL Uplink:

$$L_{FSup} = 20 \times \log_{10}(1200) + 20 \times \log_{10}(14.5) + 92.44 = 61.6 + 23.22 + 92.44 = 177.26 \text{ dB}$$

3. C/N₀ στο Δορυφόρο:

$$G/T_{sat} = G_{sat} - 10 \times \log_{10}(T_{sat}) = 20 - 26.5 = -6.5 \text{ dB/K}$$

$$C/N_{0up} = \text{EIRP}_{up} + G/T_{sat} - \text{FSPL}_{up} - L_{atmup} - k = 63.5 - 6.5 - 177.26 - 10 + 228.6 = 98.34 \text{ dB-Hz}$$

4. C/N στο Δορυφόρο:

$$BW = 36 \text{ MHz} \rightarrow 10 \times \log_{10}(36 \times 10^6) = 75.6 \text{ dB-Hz}$$

$$C/N_{up} = C/N_{0up} - 75.6 = 98.34 - 75.6 = 22.74 \text{ dB}$$

1 Ασκήσεις -COMPOSITE SATELLITE LINK ANALYSIS

B. DOWNLINK

5. EIRP του δορυφόρου (dBW)

6. Απώλειες Ελεύθερου Χώρου (dB)

7. G/T του επιγείου δέκτη (dB/K)

8. C/N₀ στον επιγειακό δέκτη (dB-Hz)

9. C/N στον επιγειακό δέκτη (dB) - για εύρος BW = 36 MHz

5. EIRP Downlink:

$$P_{\text{sat}}(\text{dBW}) = 10 \times \log_{10}(1.2) = 1.76 \text{ dBW}$$

$$\text{EIRP}_{\text{down}} = P_{\text{sat}} + G_{\text{sat}} = 0.8 + 28 = 28.8 \text{ dBW}$$

6. FSPL Downlink:

$$L_{\text{FSup}} = 20 \times \log_{10}(1200) + 20 \times \log_{10}(11.5) + 92.44 = 61.6 + 21.21 + 92.44 = 175.25$$

7. G/T Επιγείου Δέκτη:

$$G_{Tx} = 10 \log_{10}(109.66 f^2 d^2 \eta) = 10 \log_{10}(109.66 11.5^2 2.2^2 0.58) = 46.1 \text{ dBi}$$

$$T_{\text{sys}} = T_{\text{ant}} + (10^{(F/10)} - 1) \times 290 = 28 + (1.259 - 1) \times 290 = 28 + 75 = 103 \text{ K}$$

$$T_{\text{sys}}(\text{dBK}) = 10 \times \log_{10}(103) = 20.1 \text{ dBK}$$

$$G/T_{\text{Rx}} = G_{\text{Rx}} - T_{\text{sys}}(\text{dBK}) = 46.1 - 20.1 = 25.5 \text{ dB/K}$$

8. C/N₀ Downlink:

$$C/N_{0\text{down}} = \text{EIRP}_{\text{down}} + G/T_{\text{Rx}} - \text{FSPL}_{\text{down}} - L_{\text{atmdown}} - k = 28.8 + 25.5 - 175.25 - 16 + 228.6 = 91.65 \text{ dB-Hz}$$

9. C/N Downlink:

$$C/N_{\text{down}} = C/N_{0\text{down}} - 75.6 = 91.65 - 75.6 = 16.05 \text{ dB}$$

1 Ασκήσεις -COMPOSITE SATELLITE LINK ANALYSIS

Γ. COMPOSITE LINK

10.Συνολικό C/N_o του συστήματος (dB-Hz)

11.Συνολικό C/N του συστήματος (dB)

12. E_b/N_o end-to-end (dB)

13.BER end-to-end

14.Πλεόνασμα Συνδέσμου (Link Margin)

10. Συνολικό C/N_o :

$$(C/N_o)_{\text{down_lin}} = 10^{(91.65/10)} = 1.46 \times 10^9 \text{ Hz}$$

$$(C/N_o)_{\text{up_lin}} = 10^{(98.34/10)} = 6.82 \times 10^9 \text{ Hz}$$

$$1/(C/N_o)_{\text{total}} = 0.146 \times 10^{-9} + 0.684 \times 10^{-9} = 0.83 \times 10^{-9}$$

$$(C/N_o)_{\text{total}} = 1/0.83 \times 10^{-9} = 1.2 \times 10^9 \text{ Hz} = 90.8 \text{ dB-Hz}$$

11. Συνολικό C/N :

$$C/N_{\text{total}} = (C/N_o)_{\text{total}} - 75.6 = 90.8 - 75.6 = 15.2 \text{ dB}$$

12. E_b/N_o end-to-end:

$$R_b(\text{dB}) = 10 \times \log_{10}(60 \times 10^6) = 77.8 \text{ dB-bit/s}$$

$$E_b/N_o = (C/N_o)_{\text{total}} - R_b(\text{dB}) = 90.8 - 77.8 = 13 \text{ dB}$$

13. BER end-to-end:

$$E_b/N_o (\text{linear}) = 10^{(13/10)} = 19.95$$

$$\text{BER} \approx Q^{-1}(\sqrt{39.9}) \approx Q^{-1}(6.316) \approx 2.5 \times 10^{-10}$$

14. Πλεόνασμα Συνδέσμου:

$$\text{Link Margin} = E_b/N_{o_{\text{available}}} - E_b/N_{o_{\text{required}}} = 13 - 10.5 = 2.5 \text{ dB}$$

2 Ασκήσεις

Ένας δορυφόρος σταθερής υπηρεσίας (FSS) που λειτουργεί στα 14.5 GHz αποτελείται από έναν επίγειο τερματικό σταθμό με κεραία διαμέτρου 4.5 m και πομπό ισχύος 1.5 kW. Ο δέκτης στον δορυφόρο GSO έχει κεραία 3 m και θερμοκρασία θορύβου συστήματος λήψης 550 K. Η απώλεια διαδρομής ελεύθερου χώρου για τη σύνδεση είναι 205.5 dB. Υποθέστε ότι η απόδοση και των δύο κεραιών είναι 0.55.

(α) Ποιο είναι το C/N_0 για την ανερχόμενη ζεύξη υπό συνθήκες καθαρού ουρανού με απώλεια εξασθένησης αερίων της ατμόσφαιρας 2.6 dB στη ζεύξη;

(β) Ποια θα είναι η προκύπτουσα C/N_0 εάν η ζεύξη υποστεί εξασθένηση λόγω βροχής 4 dB επιπλέον της εξασθένησης αερίων.

Η ανερχόμενη ζεύξη του προηγούμενου συστήματος λειτουργεί με έναν δορυφορικό αναμεταδότη μετατροπής συχνότητας (FT) με C/N κατερχόμενης ζεύξης που καθορίζεται από τον χειριστή του δορυφόρου στα 25 dB.

(γ) Ποια θα είναι η σύνθετη C/N (ελλείψει βροχής) εάν το εύρος ζώνης θορύβου του αναμεταδότη είναι 72 MHz;

(δ) Το σύστημα είναι περιορισμένο στην ανερχόμενη ή στην κατερχόμενη ζεύξη;

2 Ασκήσεις

$$T_x = 1500 \text{ W} = 31.76 \text{ dBW}$$

$$G_{tx} = 10 \log_{10}(109.66 f^2 d^2 \eta) = 10 \log_{10}(109.66 * 210.25 * 20.25 * 0.55) = 54.096 \text{ dBi}$$

$$G_{tx} = 10 \log_{10}(109.66 f^2 d^2 \eta) = 10 \log_{10}(109.66 * 210.25 * 9 * 0.55) = 50.574 \text{ dBi}$$

$$EIRP = 31.761 + 54.0958 = 85.8568 \text{ dBW}$$

$$\text{a)} \quad C = EIRP + Gr - LFS - Lo = 85.8568 + 50.57398 - 205.5 - 2.6 = 71.67 \text{ dB}$$

$$\frac{C}{N_0} = C - k - 10 \log_{10}(T_s) = -71.67 + 228.6 - 10 \log_{10}(550) \approx 129.5 \text{ dBHz}$$

$$\text{b)} \quad C = 85.8568 + 50.57398 - 205.5 - 2.6 - 4 = 67.67 \text{ dB}$$

$$\frac{C}{N_0} = 129.5 - 4 = 125.5 \text{ dBHz}$$

2 Ασκήσεις

c) Ο πάροχος καθορίζει ότι χρειάζεται το C/N στο downlink να είναι τουλάχιστον 25 dB.

$$\frac{C}{N}_{up} = \frac{C}{N_0}_{up} - 10\log_{10}(B) = 129.5 - 10\log_{10}(72 * 10^6) = 129.5 - 78.57 = 50.93 \text{ dB Hz}$$

$$\frac{1}{\left(\frac{C}{N}\right)_c} = \frac{1}{\frac{C}{N}_{up}} + \frac{1}{\frac{C}{N}_{down}}$$

$$\frac{C}{N} = -10\log_{10}\left(10^{-\frac{C}{N}_{up}} + 10^{-\frac{C}{N}_{down}}\right)$$

$$\frac{C}{N} = -10\log_{10}(10^{-5.1} + 10^{-2.5}) = -10\log_{10}(0.00000794 + 0.00316) = 24.99 \text{ dB}$$

d) Το downlink διαθέτει πολύ χαμηλότερο C/N άρα είναι downlink limited.

3 Ασκήσεις

Ένας διαχειριστής δικτύου εξετάζει δύο παρόχους δορυφορικών υπηρεσιών για την παροχή μιας υπηρεσίας δεδομένων που λειτουργεί με ρυθμό δεδομένων 32 kbps, χρησιμοποιώντας διαμόρφωση QPSK. Το πρώτο δίκτυο χρησιμοποιεί δορυφόρο μετατροπής συχνότητας (FT) και το δεύτερο χρησιμοποιεί δορυφόρο ενσωματωμένης επεξεργασίας (OBP). Η C/N_0 που απαιτείται στο downlink είναι 56 dB Hz. Ποια πρέπει να είναι η απαιτούμενη C/N_0 ανερχόμενης ζεύξης για καθέναν από τους δύο δορυφόρους (FT και OBP) προκειμένου να διατηρηθεί η λειτουργία σε BER 10^{-5} ; Ποια από τις δύο επιλογές δορυφόρου θα επιλέγατε; Γιατί;

$$\text{Για QPSK: } \text{BER} = Q(\sqrt{2E_b/N_0}). \quad \text{Για } \text{BER} = 10^{-5} \text{ έχουμε: } Q(\sqrt{2E_b/N_0}) = 10^{-5}$$

$$\text{Άρα } \frac{E_b}{N_0} = \frac{4.265^2}{2} = \frac{18.190225}{2} \approx 9.095 \text{ και σε dB } \frac{E_b}{N_0} \Rightarrow \approx \mathbf{9.59 \text{ dB}}.$$

$$E_b/N_0 \text{ (dB)} = C/N_0 \text{ (dB Hz)} - 10 \log_{10}(R_b) \text{ (dB)}. \quad \text{Εδώ } R_b = 32 \text{ kb/s} = 32000 \text{ bit/s}.$$

$$10 \log_{10}(R_b) = 10 \log_{10}(32000) = 10(\log_{10}(32) + 3) \approx 10(1.50515 + 3) = 45.0515 \text{ dB}.$$

Άρα με $C/N_0 = 56 \text{ dB Hz}$ έχουμε:

$$(E_b/N_0)_D = 56 - 45.0515 \approx 10.95 \text{ dB}$$

3 Ασκήσεις

Σε **FT (bent-pipe)** τα δύο σκέλη συνδυάζονται ως αντίστροφοι όροι στο E_b/N_0 : $\frac{1}{(E_b/N_0)_{\text{req}}} = \frac{1}{(E_b/N_0)_U} + \frac{1}{(E_b/N_0)_D}$.

• Το $(E_b/N_0)_{\text{req}} = 9.59 \text{ dB}$ αφού έχουμε QPSK.

• Υπολογισμός γραμμικά: $\frac{1}{(e_b/n_0)_U} = \frac{1}{9.095} - \frac{1}{12.44} \approx 0.10995 - 0.08030 = 0.02965$

$$\Rightarrow (e_b/n_0)_U = \frac{1}{0.02965} \approx 33.72 \quad \text{ή} \quad (E_b/N_0)_u = 15.28 \text{ dB}$$

Μετατροπή σε C/N_0 για το ρυθμό R_b : $\frac{C}{N_0} = (E_b/N_0)_u + 10\log_{10}(R_b) \approx 15.28 + 45.05 = 60.33 \text{ dB Hz}$

Σε **OBP** το σήμα αποδιαμορφώνεται και αναγεννάται στο δορυφόρο — επομένως κάθε σκέλος πρέπει **ατομικά** να ικανοποιεί το απαιτούμενο E_b/N_0 για το BER.

Άρα: $(E_b/N_0)_U = (E_b/N_0)_{\text{req}} = 9.59 \text{ dB}$

$$\frac{C}{N_0} = (E_b/N_0)_{\text{req}} + 10\log_{10}(R_b) = 9.59 + 45.05 = 54.63 \text{ dB Hz}$$

4 Ασκήσεις

Μια δορυφορική ανερχόμενη ζεύξη λειτουργεί σε συχνότητα 14.25 GHz. Το κέρδος της κεραίας του δορυφορικού δέκτη είναι 22 dBi και η θερμοκρασία θορύβου του δέκτη είναι 380 K, η οποία περιλαμβάνει τις όποιες απώλειες γραμμής. Η κορεσμένη ισχύς εξόδου του πομπού είναι 80 Watt και ο τελικός ενισχυτής ισχύος λειτουργεί με μείωση ισχύος εξόδου (BO) 2 dB. Η απώλειες διαδρομής ελεύθερου χώρου είναι 207.5 dB και οι ατμοσφαιρικές απώλειες είναι 1.2 dB για τη σύνδεση.

- Προσδιορίστε το απαιτούμενο eirp και το κέρδος της κεραίας στον σταθμό εδάφους για να διατηρηθεί ένα C/N_0 58 dBHz στη σύνδεση.
- Εάν η δορυφορική ανερχόμενη ζεύξη λειτουργούσε ως MCPC με 8 κανάλια, ποια μείωση εισόδου θα απαιτούνταν για να διατηρηθεί η ίδια πυκνότητα φέρουσας προς θόρυβο στη σύνδεση;

$$\alpha) \quad \frac{C}{N_0} = EIRP + G_r - 10\log_{10}(T_s) - L_{FS} - L_{atm} - k \quad EIRP = 58 - 22 + 25.8 + 207.5 + 1.2 - 228.6 = 41.9 \text{ dBW}$$

$$P_t = P_{t,sat} - BO = 10\log_{10}(80) - 2 = 17.03 \text{ dBW}$$

$$EIRP = G_t + P_t \rightarrow 41.9 = G_t + 17.03 \rightarrow G_t = 24.87 \text{ dB}$$

$$\beta) \quad BO_{mc} = BO_{sc} - 10\log_{10}(N) = 2 + 9.03 = 11.03 \text{ dB} \quad EIRP_{mc} = G_t + P_{t,sat} - BO_{mc} = 24.87 + 19.03 - 11.03 \text{ dBW}$$

5 Ασκήσεις

Ποιος είναι ο ετήσιος χρόνος διακοπής λειτουργίας για μια σύνδεση που λειτουργεί με διαθεσιμότητα σύνδεσης (α) 99,97 %, (β) 95 %, (γ) 100 %; Ποια θα είναι η μέση ετήσια διαθεσιμότητα σύνδεσης εάν μια σύνδεση έχει διαστασιολογηθεί ώστε να επιτρέπει μέγιστο χρόνο διακοπής λειτουργίας 60 λεπτών ανά μήνα; Ποιος σύνδεσμος απαιτεί μεγαλύτερο λόγο φέροντος προς θόρυβο για αποδεκτή λειτουργία: ένας σύνδεσμος με ετήσια διαθεσιμότητα 99,93 % ή ένας σύνδεσμος με διακοπή λειτουργίας όχι περισσότερο από 6 ώρες κατά το χειρότερο μήνα;

1) Ετήσιες ώρες διακοπής λειτουργίας για δεδομένες διαθεσιμότητες.

Ώρες διακοπής λειτουργίας = $(1 - \text{διαθεσιμότητα}) \times 8.760$.

(α) Διαθεσιμότητα = 99,97% $\rightarrow$ ποσοστό διακοπής λειτουργίας = 0,0003

Ώρες διακοπής λειτουργίας = $0,0003 \times 8.760 \approx 2,63$ ώρες/έτος.

(β) Διαθεσιμότητα = 95% $\rightarrow$ ποσοστό διακοπής λειτουργίας = 0,05

Ώρες διακοπής λειτουργίας = $0,05 \times 8.760 = 438$ ώρες/έτος.

(γ) Διαθεσιμότητα = 100% $\rightarrow$ ποσοστό διακοπής λειτουργίας = 0 $\rightarrow$ ώρες διακοπής λειτουργίας = 0 ώρες/έτος

2) Εάν η μέγιστη διακοπή λειτουργίας είναι 60 λεπτά ανά μήνα $\rightarrow$ ετήσια διαθεσιμότητα 60 λεπτά/μήνα
 $\rightarrow$ ετήσια διακοπή λειτουργίας = 12 ώρες/έτος.

Διαθεσιμότητα = $(8.760 - 12) / 8.760 = 1 - 12/8.760 = 0,998630137 \rightarrow 99,8630\% \approx 99,863\%$ ετήσια διαθεσιμότητα.

5 Ασκήσεις

3) Ποια σύνδεση απαιτεί μεγαλύτερο λόγο φέροντος προς θόρυβο (C/N);

Σύνδεση A: διαστασιολογημένη για ετήσια διαθεσιμότητα 99,93% $\rightarrow$ ετήσια διακοπή λειτουργίας = $(1 - 0,9993) \times 8.760 = 0,0007 \times 8.760 = 6,132$ ώρες/έτος.

Σύνδεση B: διαστασιολογημένη για διακοπή λειτουργίας όχι περισσότερο από 6 ώρες κατά τη διάρκεια του χειρότερου μήνα. Επειδή ο σύνδεσμος A επιτρέπει 6,132 ώρες διακοπής λειτουργίας/έτος, ενώ ο σύνδεσμος B επιτρέπει $>> 6$ ώρες/έτος, ο σύνδεσμος A επιβάλλει την αυστηρότερη απαίτηση διαθεσιμότητας (λιγότερες επιτρεπόμενες ώρες διακοπής λειτουργίας).

Μια αυστηρότερη απαίτηση διαθεσιμότητας σημαίνει ότι ο σύνδεσμος πρέπει να αντέχει λιγότερες εξασθενίσεις — επομένως πρέπει να σχεδιαστεί με μεγαλύτερο περιθώριο, το οποίο συνήθως επιτυγχάνεται με υψηλότερο απαιτούμενο λόγο φέουσας προς θόρυβο (C/N).