



Προϋπολογισμός Ισχύος Ζεύξης στο Downlink

Θεωρήστε δορυφορική ζεύξη μεταξύ γεωστατικού δορυφόρου προς επίγειο σταθμό, των οποίων η μεταξύ τους απόσταση είναι 38000 km, με τα εξής χαρακτηριστικά:

Δορυφόρος (12 GHz)

- Ισχύς εκπομπής του ενισχυτή 5 W.
- Απώλειες γραμμής μεταφοράς μεταξύ ενισχυτή και κεραίας 1.25.
- Παραβολική κεραία γωνίας ημίσειας ισχύος 2.8° και απόδοσης 67%.

Επίγειος Σταθμός A (12 GHz)

- Παραβολική κεραία διαμέτρου 2.2 m και απόδοσης 54%.
 - Θερμοκρασία θορύβου συστήματος 200 K.
 - Θέση στα όρια της κάλυψης του δορυφόρου (δηλαδή στα όρια της γωνίας θ_{3dB}).
- i) Αν θεωρηθεί τυπική ατμοσφαιρική εξασθένηση 0.3dB, να υπολογιστεί ο λόγος ισχύος του φέροντος προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου (C/N_0) (σε dBHz).
- ii) Να επανυπολογιστεί το (C/N_0) για συνθήκες βροχής θεωρώντας εξασθένηση 1 dB.
- iii) Αν το εύρος ζώνης θορύβου είναι 36 MHz και ο συντελεστής επέκτασης των φίλτρων Nyquist είναι 40 %, να βρεθεί το εύρος ζώνης των φίλτρων εκπομπής/λήψης, καθώς και η τάξη της διαμόρφωσης M-PSK, ώστε να επιτευχθεί ελάχιστος ρυθμός μετάδοσης bit 70 Mbps.
- iv) Να βρεθεί ο λόγος ισχύος του φέροντος προς την ισχύ του θορύβου και η πιθανότητα σφάλματος bit για διαμόρφωση QPSK με κωδικοποίηση Gray.

Σταθερά Boltzmann [k] = -228.6 dBW/(Hz K), ταχύτητα φωτός στο κενό $c = 3 \cdot 10^8$ m/sec και μέση θερμοδυναμική θερμοκρασία νεφών $T_m = 275$ K. Η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου για διαμόρφωση QPSK είναι $P_{se} = 2Q(\sqrt{C/N}) - Q^2(\sqrt{C/N})$.

Λύση

Δορυφόρος: Θα υπολογίσουμε την ενεργό ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς EIRP από το δορυφόρο. Για τον υπολογισμό θα πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε τα εξής (χρησιμοποιούμε τον εξής συμβολισμό για μετατροπή σε dB: $[x] = \log_{10}(x)$):

- Ισχύς εκπομπή του ενισχυτή $P = 5$ W, δηλαδή

$$[P] = 10 \log_{10}(5) \text{ dBW} = 7 \text{ dBW}.$$

- Απώλειες γραμμής μεταφοράς μεταξύ ενισχυτή και κεραίας $L_t = 1.25$, δηλαδή

$$[L_t] = 10 \log_{10}(1.25) \text{ dB} = 0.97 \text{ dB}.$$

- Μήκος κύματος σήματος

$$\lambda = c / F_c = 3 \times 10^8 / 12 \times 10^9 \text{ m} = 0.025 \text{ m}.$$

- Διάμετρος παραβολικής κεραίας

$$D_t = 70 \lambda / \theta_{t,3dB} = 70 \times 0.025 / 2.8 \text{ m} = 0.625 \text{ m}.$$



- Μέγιστη απολαβή κεραίας (στον κύριο άξονα)

$$G_{t_{\max}} = \eta_t \left(\frac{\pi D_t}{\lambda} \right)^2 = 0.67 \left(\frac{\pi 0.625}{0.025} \right)^2 = 4132.9 \Leftrightarrow$$

$$[G_{t_{\max}}] = 10 \log_{10}(4132.9) \text{ dBi} = 36.16 \text{ dBi.}$$

- Επίγειος σταθμός στα όρια κάλυψης της γωνίας $\theta_{t,3\text{dB}}$ σημαίνει $[L_{\theta_t}] = 3 \text{ dB}$ λιγότερη απολαβή της κεραίας εκπομπής του δορυφόρου ως προς τη μέγιστη, δηλαδή

$$[G_t] - [G_{t_{\max}}] - 3 \text{ dB} = 33.16 \text{ dBi.}$$

Με βάση τα παραπάνω, η ενεργός ιστροπική ακτινοβολούμενη ισχύς EIRP από το δορυφόρο είναι

$$[EIRP] = [P] - [L_t] + [G_t] = 7 - 0.97 + 33.16 \text{ dBW} = 39.17 \text{ dBW.}$$

Μέσο Διάδοσης: Για να υπολογίσουμε τις συνολικές απώλειες από το μέσο διάδοσης, θα πρέπει πρώτα να υπολογίσουμε:

- Τις απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου (λόγω απόστασης)

$$L_{fs} = \left(\frac{4 \pi d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4 \pi 38 \times 10^6}{0.025} \right)^2 = 3.65 \times 10^{20} \Leftrightarrow$$

$$[L_{fs}] = 10 \log_{10}(3.65 \times 10^{20}) = 10 \log_{10}(3.65) + 10 \log_{10}(10^{20}) = \\ = 5.62 + 200 \log_{10}(10) \text{ dB} = 205.62 \text{ dB.}$$

- Τυπική ατμοσφαιρική εξασθένιση $[L_a] = 0.3 \text{ dB}$.
- Εξασθένιση λόγω βροχής $[L_{\text{rain}}] = 1 \text{ dB}$.

Χωρίς βροχή: Οι συνολικές απώλειες από το μέσο διάδοσης χωρίς βροχή είναι

$$[L_m] = [L_{fs}] + [L_a] = 205.62 + 0.3 \text{ dB} = 205.92 \text{ dB.}$$

Δεδομένου ότι η τυπική ατμοσφαιρική εξασθένιση δεν είναι μηδενική, σημαίνει ότι δεν έχουμε συνθήκες καθαρού ουρανού και συνεπώς, η θερμοκρασία του θορύβου που συλλαμβάνει η κεραία είναι

$$T_a = T_m \left(1 - \frac{1}{L_a} \right) = 275 \left(1 - \frac{1}{10^{0.3/10}} \right) \text{ K} = 18.36 \text{ K.}$$

Με βροχή: Οι αντίστοιχες απώλειες από το μέσο διάδοσης όταν επιπλέον υπάρχει βροχή θα είναι

$$[L_{mr}] = [L_m] + 1 \text{ dB} = 206.92 \text{ dB.}$$

Η δε θερμοκρασία θορύβου της κεραίας είναι

$$T_{ar} = T_m \left(1 - \frac{1}{L_a L_{\text{rain}}} \right) = 275 \left(1 - \frac{1}{10^{0.3/10} 10^{1/10}} \right) \text{ K} = 71.14 \text{ K.}$$

Δηλαδή, η επιπλέον θερμοκρασία θορύβου στην κεραία του επίγειου σταθμού, λόγω παρουσίας της βροχής, είναι

$$\Delta T_a = T_{ar} - T_a = 71.14 - 18.36 \text{ K} = 52.79 \text{ K.}$$



Επίγειος Σταθμός: Προκειμένου να βρεθεί ο δείκτης ποιότητας του δέκτη (με ή χωρίς βροχή) θα πρέπει πρώτα να υπολογιστεί η απολαβή στο σύστημα λήψης.

Η μέγιστη απολαβή κεραίας (στον κύριο άξονα) είναι

$$G_{r_{\max}} = \eta_t \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 = 0.67 \left(\frac{\pi 0.625}{0.025} \right)^2 = 4132.9 \Leftrightarrow$$
$$[G_{r_{\max}}] = 10 \log_{10}(4132.9) \text{ dBi} = 36.16 \text{ dBi}.$$

Αρα, ο δείκτης ποιότητας του συστήματος λήψης χωρίς βροχή είναι

$$\left[\frac{G_r}{T_s} \right] = \left[\frac{G_{r_{\max}}}{T_s} \right] = [G_{r_{\max}}] - [T_s] = 36.16 - 10 \log_{10}(200) \text{ dBK}^{-1} = 23.15 \text{ dBK}^{-1}.$$

Υπό την παρουσία βροχής έχουμε μια αύξηση στη θερμοκρασία θορύβου κατά $\Delta T_a = 52.79 \text{ K}$, δηλαδή ο δείκτης ποιότητας του συστήματος λήψης με βροχή είναι

$$\left[\frac{G_r}{T_s} \right]_{rain} = \left[\frac{G_{r_{\max}}}{T_s + \Delta T_a} \right] = [G_{r_{\max}}] - [T_s + \Delta T_a] =$$
$$= 36.16 - 10 \log_{10}(200 + 52.79) \text{ dBK}^{-1} = 22.13 \text{ dBK}^{-1}.$$

Παρατηρούμε ότι υπό την παρουσία βροχής, η ποιότητα λήψης του δέκτη του επίγειου σταθμού υποβαθμίζεται κατά 1.02 dB, λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας θορύβου στην κεραία του.

i) Ο λόγος της ισχύος του φέροντος προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου (χωρίς βροχή) είναι

$$\left[\frac{C}{N_0} \right] = -[k] + [EIRP] - [L_m] + \left[\frac{G}{T_s} \right] =$$
$$= -(-228.6) + 39.17 - 205.92 + 23.15 \text{ dBHz} = 85 \text{ dBHz}.$$

ii) Ο λόγος της ισχύος του φέροντος προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου (χωρίς βροχή) είναι

$$\left[\frac{C}{N_0} \right]_{rain} = -[k] + [EIRP] - [L_{mr}] + \left[\frac{G}{T_s} \right]_{rain} =$$
$$= -(-228.6) + 39.17 - 205.92 + 22.13 \text{ dBHz} = 82.98 \text{ dBHz}.$$

Παρατηρούμε ότι η διαφορά στην ισχύ του φέροντος προς τη φασματική πυκνότητα ισχύος του θορύβου με και χωρίς βροχή είναι 2.02 dB και οφείλεται τόσο στην εξασθένιση του σήματος κατά τη διέλευσή του από το στρώμα βροχής (1 dB), όσο και την επιπλέον θερμοκρασία θορύβου στην κεραία του επίγειου σταθμού (1.02 dB).

iii) Με εύρος ζώνης θορύβου $B_n = 36 \text{ MHz}$, το εύρος ζώνης των φίλτρων εκπομπής/λήψης τύπου Nyquist είναι

$$B_w = (1 + \alpha) B_n = (1 + 0.4) 36 \text{ MHz} = 50.4 \text{ MHz}.$$

Ο δε ρυθμός μετάδοσης συμβόλων για διαμόρφωση M -PSK είναι

$$R_s = B_n = 36 \text{ Msymbols/sec}.$$



Δεδομένης της απαίτησης για ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης bit $R_b = 70$ Mbps, η τάξη της διαμόρφωσης M -PSK προκύπτει ως εξής

$$R_b = R_s \log_2(M) \Leftrightarrow M = \lceil 2^{R_b/R_s} \rceil = \lceil 2^{70/36} \rceil = \lceil 3.85 \rceil = 4$$

Συνεπώς, η κατάλληλη διαμόρφωση για να επιτευχθεί ο απαιτούμενος ρυθμός μετάδοσης είναι η QPSK.

iv) **Χωρίς βροχή:** Ο λόγος της ισχύος του φέροντος προς την ισχύ του θορύβου μπορεί να βρεθεί από την σχέση

$$[CNR] = \left[\frac{C}{N} \right] = \left[\frac{C}{N_0 B_n} \right] = \left[\frac{C}{N_0} \right] - [B_n] = 85 - 10 \log_{10}(36 \times 10^6) \text{ dB} = 9.44 \text{ dB}.$$

Η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου της διαμόρφωσης QPSK είναι

$$P_{se} = 2Q(\sqrt{CNR}) - Q^2(\sqrt{CNR}) = 2Q\left(\sqrt{10^{\frac{9.44}{10}}}\right) - Q^2\left(\sqrt{10^{\frac{9.44}{10}}}\right) = 3 \times 10^{-3}.$$

Αρα, δεδομένου ότι αποστέλλονται 2 bit ανά σύμβολο και εφαρμόζοντας κωδικοποίηση Gray, η πιθανότητα σφάλματος bit είναι

$$P_{be} \simeq \frac{P_{se}}{2} = 1.5 \times 10^{-3}.$$

Με βροχή: Ο λόγος της ισχύος του φέροντος προς την ισχύ του θορύβου μπορεί να βρεθεί από τη σχέση

$$\begin{aligned} [CNR]_{rain} &= \left[\frac{C}{N} \right]_{rain} = \left[\frac{C}{N_0 B_n} \right]_{rain} = \left[\frac{C}{N_0} \right]_{rain} - [B_n] = \\ &= 82.98 - 10 \log_{10}(36 \times 10^6) \text{ dB} = 7.42 \text{ dB}. \end{aligned}$$

Η πιθανότητα σφάλματος συμβόλου της διαμόρφωσης QPSK είναι

$$\begin{aligned} P_{se,rain} &= 2Q\left(\sqrt{CNR|_{rain}}\right) - Q^2\left(\sqrt{CNR|_{rain}}\right) = \\ &= 2Q\left(\sqrt{10^{\frac{7.42}{10}}}\right) - Q^2\left(\sqrt{10^{\frac{7.42}{10}}}\right) = 1.87 \times 10^{-2}. \end{aligned}$$

Αρα, δεδομένου ότι αποστέλλονται 2 bit ανά σύμβολο και εφαρμόζοντας κωδικοποίηση Gray, η πιθανότητα σφάλματος bit είναι

$$P_{be,rain} \simeq \frac{P_{se,rain}}{2} = 9.4 \times 10^{-3}.$$

Παρατηρούμε δηλαδή ότι με την παρουσία βροχής η πιθανότητα σφάλματος bit υποβαθμίζεται σχεδόν μία τάξη μεγέθους.