

# Study of Space to Earth Communication Link (5437)

Students: Orel Ben-Reuven and Tomer Fait

Instructor: Alexander Hodisan

*April 2021*





# תוכן עניינים

- מבוא
- רקע תאורטי:
  - לוויינים
  - אנטנות והפסדים
  - רעש
  - ביצועי ה-Link
  - זמן נראות
- תקני תקשורת
- חישוב ה-Link Budget
- הצגת ממשק גרפי

# מבוא

- מאז העשור השני של המאה ה-21, עם ההוזלה של תחום הלוויינות, מאות לוויינים משוגרים לחלל מדי שנה ונותנים פתרונות לשלל תחומים בפריסה עולמית. ללוויינים יתרונות נרחבים, והבולטים ביניהם הינם היכולת לספק כיסוי של שטחים נרחבים על פני כדור הארץ, ולתקשר עם צרכנים רבים בו-זמנית ללא הגבלות גיאוגרפיות, פוליטיות וטכניות. לוויינים יכולים לתמוך במספר רב של רשתות תקשורת, יכולים להתאים את יכולות השידור והקליטה שלהן ולהשתלב בצורה טובה עם מערכות תקשורת קיימות.
- בתקשורת לוויינית, הלוויין ותחנת הקרקע צריכים להסכים ביניהם על מאפייני התקשורת על מנת למקסם את קצב התעבורה. בתקני תקשורת מודרניים, כגון DVB-S2 ו-DVB-S2X שבהם נתמקד בפרויקט זה, מאפייני השידור נקבעים על ידי רשימה של שילובים של קודים לתיקון שגיאות ומודולציות, שילובים אלו מכונים Modcods. תקני תקשורת אלו מאפשרים התאמה של קונפיגורציית השידור בזמן אמת. בעזרת ההתאמה של קונפיגורציית השידור לתנאי הקליטה, ניתן למקסם את קצב העברת המידע בכל רגע נתון.
- בפרויקט זה סקרנו את הגורמים המשפיעים על איכות הקליטה של הלוויין לאורך מסלולו. לבסוף, בנינו ממשק מחשבון המתחשב בנתונים של אנטנות הקליטה והשידור וההפסדים ביניהם, ומחשב את ה-modcods האופטימליים מבחינת ביטי המידע המשודרים לאורך מסלול הלוויין.



# לויינים – מסלול GEO

- משמש לתקשורת טלוויזיה, רדיו, מזג אוויר ועוד.
- סובב את כדור הארץ במשך 24 שעות בגובה 35,786 קילומטר מעל קו המשווה ולכן מופיע כ"נייח" מעל כדור הארץ.
- טווח השידור של לוויין מסוג זה נרחב וכתוצאה ניתן לספק כיסוי גלובלי עם כמות מועטה של לוויינים.
- לתחנת הקרקע יש קשר תמידי עם הלוויין, ולכן אין צורך ברשתות תקשורת מורכבות.
- גובהו הרב גורם להשהיה גבוהה בתקשורת וקליטה חלשה בקרקע.
- זמן החיים – 15 ומעלה שנה.

# לוויינים – מסלול MEO

- משמש לתקשורת סלולרית, ניווט, צילום ועוד.
- גובהם בתחום 8-24 אלף קילומטר ובעלי זמן הקפה של 6-14 שעות כתלות במסלול שלהם.
- מכסים פחות שטח על כדור הארץ ולכן נדרשים ל 10-15 לוויינים על מנת לספק כיסוי גלובלי.
- קירבתם לכדור הארץ מאפשרת תקשורת יותר מהירה, יציבה ואמינה.
- על מנת לאפשר תקשורת רציפה עם תחנת הקרקע נדרשת העברת מידע בין לוויינים ומעקב של תחנת הקרקע אחר מיקום הלוויינים.
- זמן החיים – 10-15 שנה (נמצאים בקרבה לחגורת Van Allen).



# לוויינים – מסלול LEO

- משמשים לתקשורת סלולרית, אינטרנט, צילום ועוד.
- גובהם בתחום 320-2000 קילומטר ובעלי זמן הקפה של 90 דקות עד 3 שעות.
- על מנת לספק כיסוי גלובלי נדרשים יותר מ-32 לוויינים.
- התקשורת עם הקרקע זולה ומתבצעת במהירויות גבוהות ובאמינות גבוהה.
- זמן החיים – 3-7 שנים (כתוצאה מאיבוד מהירות).



# לוויינים – CubeSats

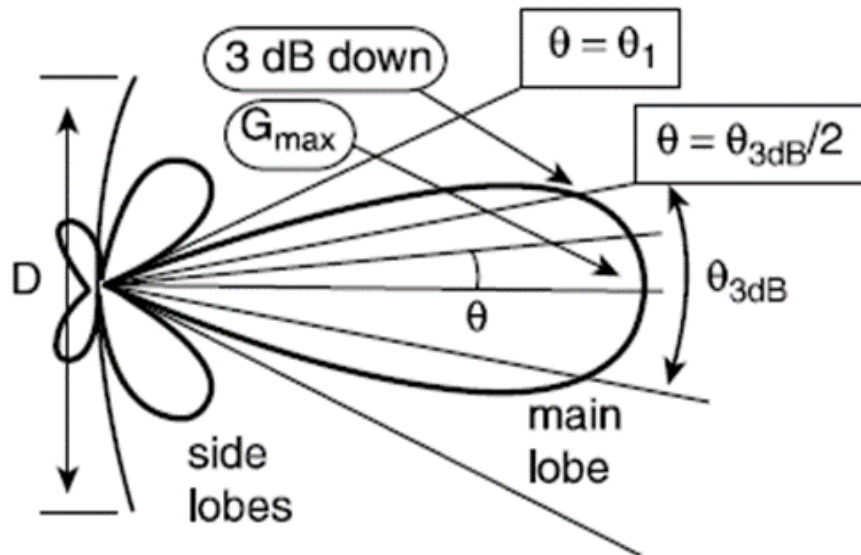
- לוויני CubeSat הוצעו ע"י אוניברסיטאות קליפורניה וסטנפורד. לוויינים אלו הינם מסוג LEO ובנויים מיחידות U שגודלן 10X10X10 ס"מ ומשקלן עד 1.3 ק"ג. לוויינים אלו זולים לייצור ומהירים לפיתוח. יתרון נוסף של לוויינים מסוג זה הוא שניתן לשגר אותם ב"טרמפ" ביחד עם לוויינים גדולים. לוויני CubeSat הינם בעלי שימוש נרחב במגוון תחומים: השכלה, הדגמת טכנולוגיות, מדע, תקשורת, איסוף מידע, צבא ובעצם כל תחומי החלל.





# אנטנות – עקום קרינה

- אנטנה איזוטרופית – פולטת הספק בעוצמה שווה לכל הכיוונים במרחב.
- שבח האנטנה (Gain) – היחס בין עוצמת הקרינה למה שניתן להשיג מאנטנה איזוטרופית באותו הספק שהוזן לאנטנה.
- רוחב אלומה ( $\text{HPBW}, \theta_{3\text{dB}}$ ) - המרחק (בזוויות) בין שתי הנקודות של פונקציית הכיוונית, בהן ערך הפונקציה יורד למחצית מערך השיא.





## אנטנות – הספק משודר

- $P_T$  - ההספק המשודר
- $P_{TX}$  - הספק ביציאת המשדר
- $L_{FTX}$  - הפסדים בין המשדר לאנטנה

$$P_{TX}[dBW] = P_T[dBW] + L_{FTX} [dB]$$

- נגדיר Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) בצורה הבאה:

$$EIRP [dBW] = G_T + P_{TX} - L_{FTX} [dBW]$$



## אנטנות – הספק נקלט

- ההספק הנקלט על ידי אנטנה במרחק  $R$  מאנטנת השידור  $P_R$  הוא:

$$P_R = EIRP - L_{FS} + G_R [dBW]$$

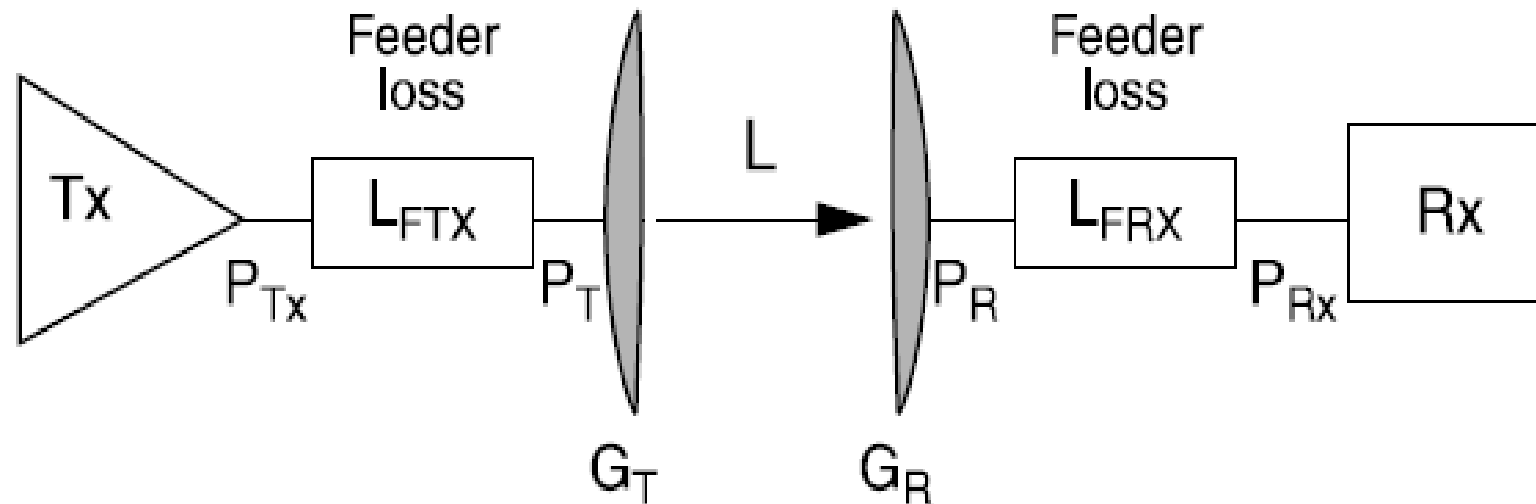
- כאשר  $L_{FS}$  הוא הפסד התווך החופשי:

$$L_{FS} = \left( \frac{4\pi \cdot R}{\lambda} \right)^2$$



## אנטנות – הפסדים נוספים

- בנוסף להפסדי התווך החופשי וההפסדים בין האנטנות למשדר ולמקלט, קיימים הפסדים נוספים בין אנטנות הקליטה והשידור





## אנטנות – הפסדים נוספים

- הפסדים אטמוספריים  $L_A$  - גלים אלקטרומגנטיים עוברים הנחתה באטמוספירה כתוצאה מאינטראקציה עם גזים, עננים, גשם, שלג וקרח.
- הפסדי יישור - אנטנות השידור והקליטה אינן מכוונות אחת כלפי השנייה בצורה מושלמת.

$$L_T = 12 \cdot \left( \frac{\theta_T}{\theta_{3dB}} \right)^2$$

$$L_R = 12 \cdot \left( \frac{\theta_R}{\theta_{3dB}} \right)^2$$

- הפסדי פולריזציה  $L_{POL}$  - לאטמוספירה יש הנחתות ושינוי פאזה שונה עבור קיטובים שונים ולכן הגלים משנים את קיטובם במעבר דרך האטמוספירה וכתוצאה מכך נגרם אי תיאום של הקיטוב במקלט. בנוסף, יכולות להיווצר אי תאימות בפולריזציה במשדר והמקלט.

## אנטנות – סיכום

- ניתן לבטא את היחס בין ההספק הנקלט למשודר בעזרת נוסחת פריץ (Friis's formula):

$$\frac{P_{RX} [W]}{P_{TX} [W]} = \frac{G_{T,MAX} \cdot G_{R,MAX}}{L \cdot L_{FTX} \cdot L_{FRX}}$$

כאשר  $L$  הוא סה"כ כול ההפסדים שדיברנו עליהם:

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_{FS} \cdot L_A \cdot L_T \cdot L_R}$$



## אנטנות – סיכום

- דרך נפוצה לכתוב את נוסחת Friis לפי איברי המערכת מתקבלת ע"י:

$$\frac{P_{RX}[W]}{P_{TX}[W]} = \eta_{cdt} \eta_{cdr} (1 - |\Gamma_r|^2)(1 - |\Gamma_t|^2) \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 D_{gt}(\theta_t, \phi_t) D_{gr}(\theta_r, \phi_r) |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a^*|^2$$

כאשר:

- $\eta_{cdt}, \eta_{cdr}$  הפסדים אוהמים ודיאלקטריים באנטנת המקלט והמשדר בהתאמה.
- $(1 - |\Gamma_t|^2), (1 - |\Gamma_r|^2)$  הפסדים מהחזרות באנטנת המקלט והמשדר בהתאמה (אי-תאום אימפדנסים).
- $\left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2$  הפסד תווך חופשי.
- $D_{gt}(\theta_t, \phi_t), D_{gr}(\theta_r, \phi_r)$  כיווניות אנטנת המקלט והמשדר בהתאמה.
- $|\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a^*|^2$  הפסדי אי-תאום פולריזציה בין המשדר למקלט.

## רעש - הגדרות

- רעש הינו כל התוספות לשידור הלא רצויות הנקלטות ע"י המקלט. הרעש מקשה על המקלט לזהות את האות המשודר ובעקבות זאת נדרש השימוש בשיטות לזיהוי ותיקון שגיאות. הרעש נובע ממקורות טבעיים המפיקים קרינה הנמצאים באזור הקליטה של האנטנה, ומהרכיבים של מערכת הקליטה עצמה.
- נהוג למדל את הרעש המזיק לשידור כרעש לבן בעל צפיפות הספק ספקטרלית  $N_0$ , כך שהספק הרעש הנקלט עבור אות בעל רוחב סרט  $B$  הינו:  

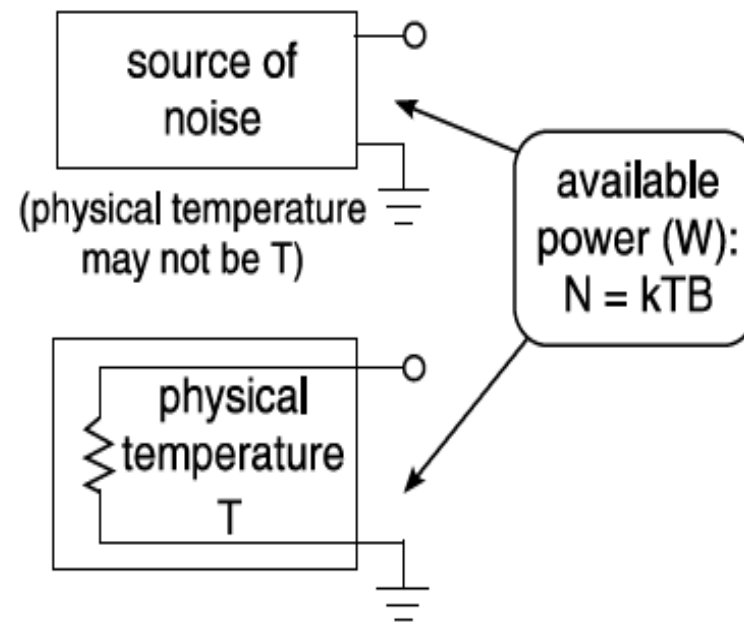
$$N = N_0 \cdot B [W]$$
- טמפרטורת רעש של רכיב מוגדרת כטמפרטורה של נגד המייצר הספק רעש כמו הרכיב, ונתונה על ידי:

$$T = \frac{N_0}{k} [K]$$



## רעש – טמפרטורה אפקטיבית

- טמפרטורה אפקטיבית מוגדרת להיות טמפרטורת הרעש של נגד שממוקם בכניסה למערכת חסרת רעש, הגורם לרעש במוצא המערכת, השווה לרעש שהיה במוצא המערכת אילו לא היה נגד והמערכת מפיקה רעש כרגיל.





## רעש – טמפרטורה של רכיבים

- עבור אלמנט הנחתה המכיל רק רכיבים פאסיביים בטמפרטורה  $T_{ATT}$ . אם  $L_{ATT}$  הינו ההנחתה (אחד חלקי ההגבר), טמפרטורת הרעש האפקטיבית בכניסה אליו הינה:

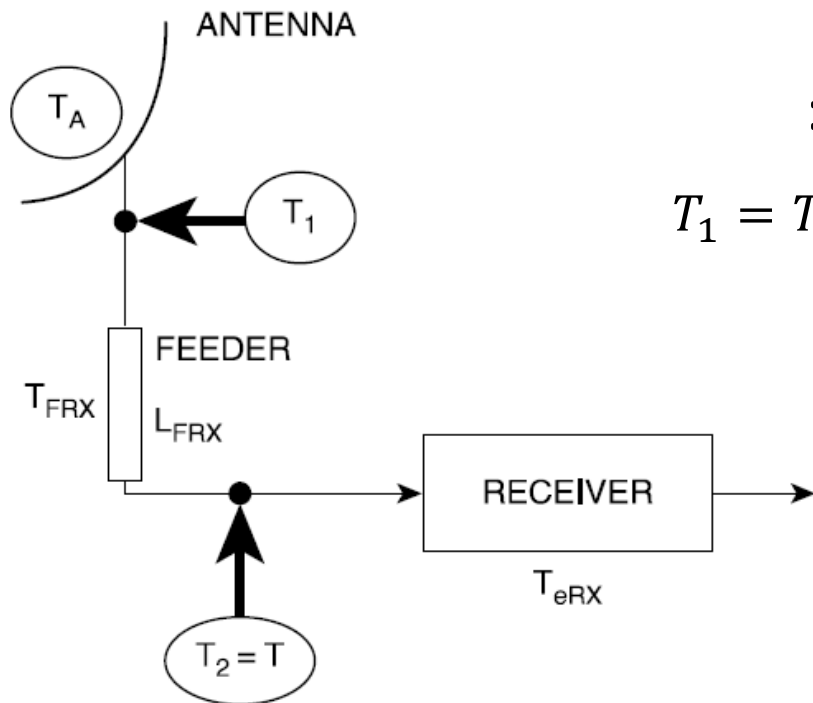
$$T_{eATT} = (L_{ATT} - 1)T_{ATT}$$

- אנטנה קולטת רעש מגופים בעלי קרינה שנמצאים בטווח הקליטה של האנטנה. טמפרטורת הרעש האפקטיבית שלה היא:

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \int \int T_b(\theta, \phi) G(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi$$

# רעש – טמפרטורת רעש של מערכת

- מערכת קליטה בעלת אנטנה המחוברת למקלט באמצעות ערוץ בעל הנחתה  $L_{FRX}$  וטמפרטורת רעש  $T_{FRX}$ . טמפרטורת הרעש האפקטיבית בכניסה למקלט הינה  $T_{eRX}$ , ו-  $T_A$  הינה טמפרטורת הרעש הנקלטת באנטנה.



- ניתן לבטא את הטמפרטורה האפקטיבית בנקודות  $T_1, T_2$  ע"י:

$$T_1 = T_A + (L_{FRX} - 1)T_{FRX} + T_{eRX} \cdot L_{FRX}$$

$$T_2 = \frac{T_1}{L_{FRX}}$$

# ביצועי ה Link

- נהוג לאפיין את טיב ציוד הקליטה ע"י  $G/T$  (figure of merit). הוא משתנה כתלות בזווית ביחס לקרקע, מפני שטמפרטורת הרעש תלויה בזווית האנטנה.
- יחס אות לרעש  $\frac{C}{N_0}$ , מאפיין את טיב הקשר. כאשר  $C = P_{RX}$  הינו הספק האות שהגיע למקלט, ו-  $N_0$  הינה צפיפות הספק הרעש הספקטרלית. הוא נתון על ידי:

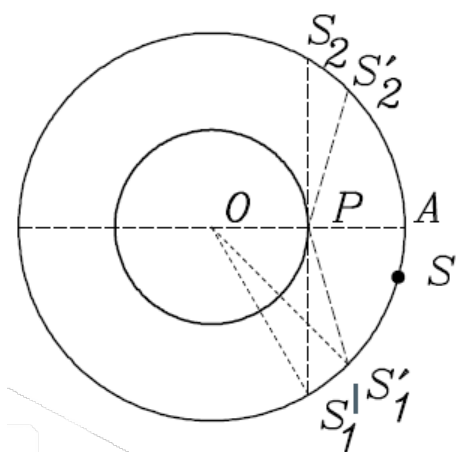
$$\frac{C}{N_0} [dBHz] = EIRP - L + \frac{G}{T} - 10 \log_{10}(k_B) [dBHz]$$

- נהוג להתייחס לאנרגיה לביט בעזרת חלוקה של  $\frac{C}{N_0}$  בקצב שידור הביטים  $R_b$ :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{R_b} \cdot \frac{C}{N_0}$$

## זמן נראות

- לתחנת הקרקע יש קו ראייה אל הלווין רק בחלק ממסלולו סביב כדור הארץ. הזמן שבו ניתן לראות את הלווין מתחנת הקרקע נקרא זמן הנראות של הלווין.



$$\Delta t_v = \frac{2\alpha}{2\pi} \cdot T_0$$

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}}$$

כאשר  $T_0$  הוא זמן ההקפה סביב כדור הארץ, ו-  $\alpha = \angle S_1'OA$  זווית הראייה של הלווין ביחס למרכז כדור הארץ. השידור מתחיל מהזוויות  $\angle S_1PS_1'$  שהיא הזוויות מעל האופק.

# תקני תקשורת

- הדרישה התעשייתית לתקשורת לוויינית והתפתחות האפליקציות הדורשות קצב העברת נתונים גבוה, מניעים את ספקי התקשורת הלוויינית לאפשר העברה של יותר ביטים לשנייה עבור יחידת ספקטרום. קידוד אדפטיבי שמשלב שיטות מודולציה חדשות מאפשר שימוש יעיל יותר בתדרים הגבוהים (Ka) שהם מהותית פגיעים יותר להפרעות ועיוותים.
- במערכות תקשורת, האותות הנקלטים עשויים להגיע מעוותים ומונחתים. בצורה זו, קשה למקלט לחלץ את המידע שהגיע כפי ששודר בפועל, ועשויות להיווצר שגיאות בסיביות שפוענחו במקלט. אפשר לשפר את ביצועי השגיאה בעזרת שיפור יחס האות לרעש וקודים לתיקון שגיאות.

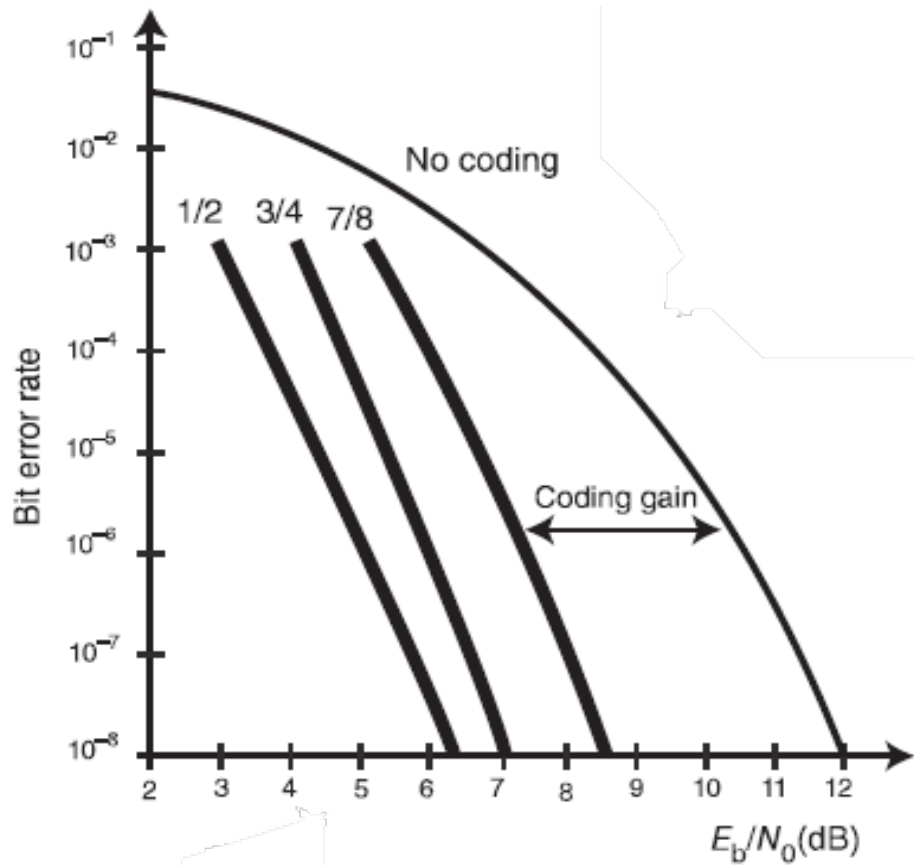
# תקני תקשורת – תיקון שגיאות

- שיפור יחס האות לרעש  $E_b/N_0$  יקטין את כמות השגיאות במקלט.
- מדד לכמות השגיאות הינו BER שמבטא את אחוז הסיביות השגויות מסך כל השידור.
- מערכות לניהול שגיאות (FEC) בצד המקלט מסוגלות לזהות ולתקן שגיאות בשידור עד כדי מספר מוגדר מראש של טעויות. בקודים אלו מוסיפים ביטים למילים המשודרות, וכך עבור יחס אות לרעש זהה, ניתן לתקן מספר גדול יותר של שגיאות.
- קצב הקוד- היחס בין מספר הביטים המכילים מידע של האפליקציה למספר הביטים הכולל.



## תקני תקשורת – שבח הקוד

- עבור כל יחס אות לרעש ( $E_b/N_0$ ) וקוד לתיקון שגיאות בעל  $BER$  המתאים להם, ניתן להגדיר את שבח הקוד ( $coding\ gain$ ) בכמות ה- $dB$  שצריך להוסיף ליחס האות לרעש על מנת לקבל  $BER$  זהה ללא הקוד לתיקון שגיאות.



- ככל שהיתירות של הביטים בקוד גדלה ניתן להגיע ל- $BER$  זהה בעזרת יחס אות לרעש נמוך יותר.
- כשמשמשים בקוד, שיפוע העקום נהיה תלול יותר.
- נרצה שיפוע תלול, ומהירות קידוד ופיענוח גבוהה.



## תקני תקשורת – מודולציות

- על מנת לשלוח מידע דיגיטלי (ביטים) נדרשים לשלוח ביטים אלו בעזרת הרכבה של הביטים על צורות גל. ישנם אפשרויות רבות לצורות גל אלו, והן נקראות מודולציות.

- הקשר בין קצב שידור ויחס אות לרעש של הביטים והסימבולים:

$$R_b = k \cdot R_s$$

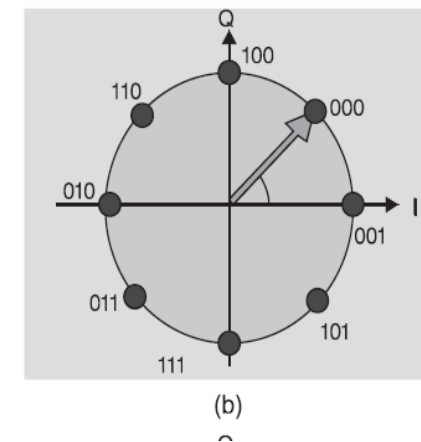
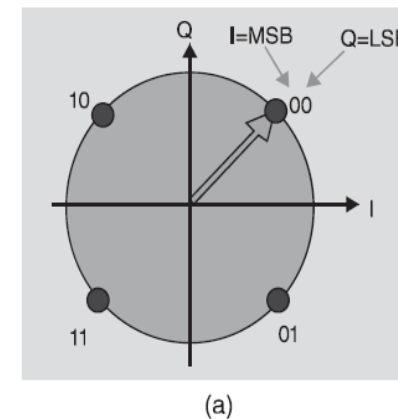
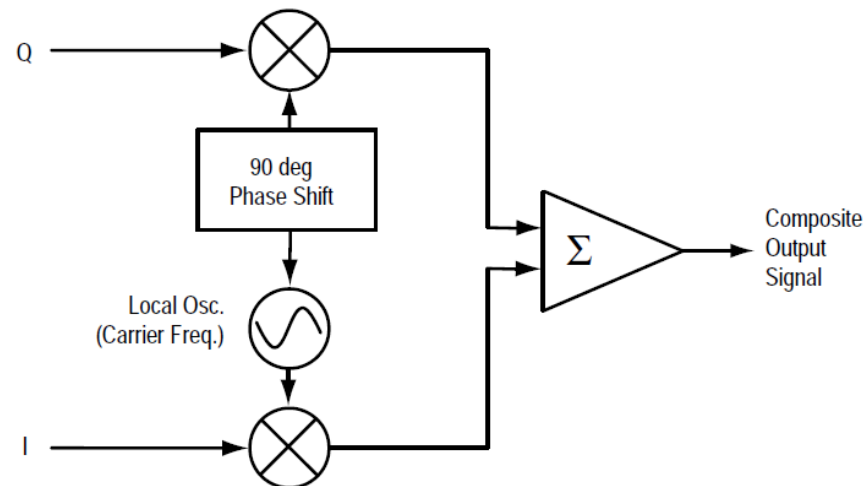
$$\frac{E_s}{N_0} = k \cdot \frac{E_b}{N_0} = \frac{k}{R_b} \cdot \frac{C}{N_0}$$

- כאשר  $k$  מספר הביטים בסימבול.



# תקני תקשורת - PSK

- במודולציות נפוצות PSK (phase shift keying), האות המשודר הינו סכום של שני אותות אורתוגונליים  $I, Q$  בעלי הפרש פאזה של  $90^\circ$  ביניהם. האותות  $I, Q$  הינם רכיבים בלתי תלויים ויוצרים ביחד את האות המעורב.
- ניתן להציג את האות המשודר במודולציה בעזרת גרף עם צירים  $I, Q$  כך שכל ציר מייצג את אמפליטודת האות המתאים.





# תקני תקשורת – רוחב ספקטרום השידור

- רוחב הסרט נמדד ע"י תחום התדרים אותו מכסה האות המשודר. ספקטרום השידור יכול לחרוג לתדרים קרובים ולהפריע לשידורים אחרים. על מנת למנוע זאת, משתמשים במסנן תדרי הקוטם את התדרים הלא רצויים.
- ככל שרוחב האונה הראשית בספקטרום יקטן כך נוכל לנצל יותר את הספקטרום.
- אונות הצד עלולות להתערבב באותות אחרים ולגרום וליצור בהם הפרעות במידה והדעיכה שלהם לא מספיק מהירה.

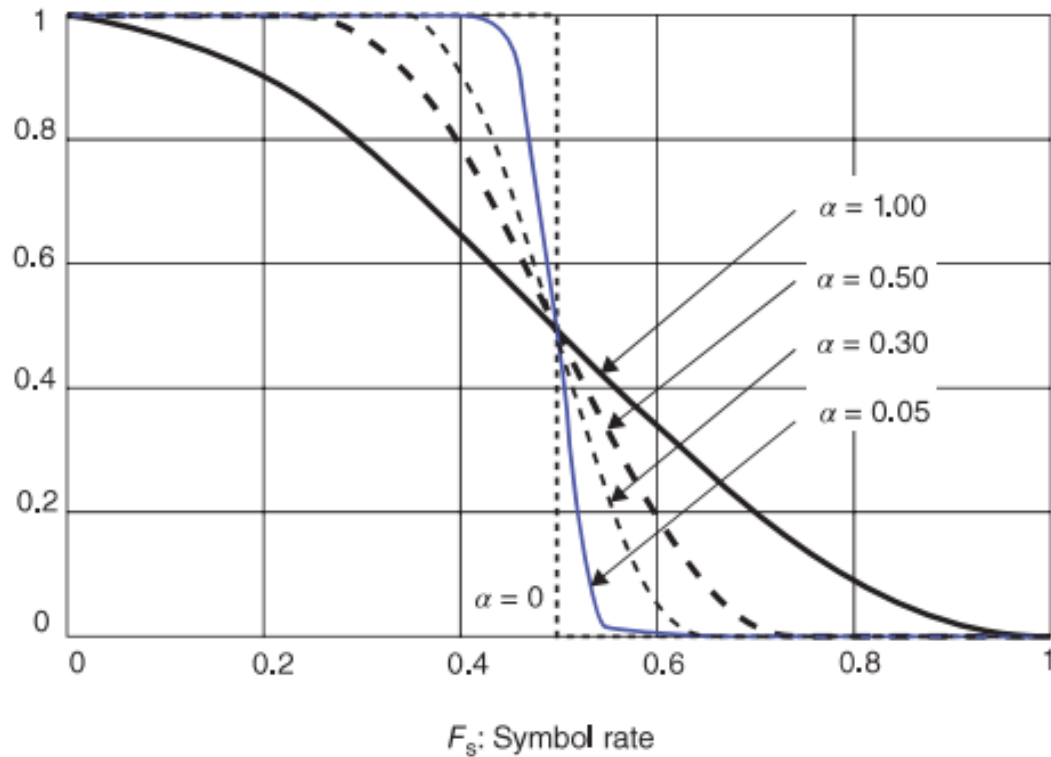


# תקני תקשורת – רוחב ספקטרום השידור

- מסנן raised cosine - מסנן זה מוגדר ע"י הפרמטר  $\alpha$  שנקרא roll-off factor ובתחום  $[0,1]$ , ו-  $T_s = \frac{1}{F_s}$  שהינו זמן השידור של הסימבול.

- ניתן לקבל ביטוי עבור רוחב הסרט של אות לאחר מעברו במסנן raised cosine:

$$Bandwidth = R_s \cdot (1 + \alpha)$$



# תקני תקשורת – DVB-S2

- התקן מתמקד בביצועי שידור אמינים תוך כדי שמירה על גמישות וסיבוכיות קליטה נמוכים. התקן משתמש בקידודים LDPC ו-BCH ובשיטות מודולציה מתקדמות כגון VCM\ACM.
- התקן (1–307 302) מאפשר מספר של קונפיגורציות שידור המכונות מודקודים (MODCODS). כל מודקוד מגדיר מודולציה וקוד לתיקון שגיאות.
- (VCM (Variable coding modulation) - מאפשר להגדיר עבור כל משתמש MODCOD המבטא מהי שיטת הקידוד והמודולציה שנבחרה.
- (ACM (Adaptive coding modulation) - מאפשר שינוי של הקידוד והמודולציה עבור כל משתמש בצורה דינאמית בזמן בהתאם לתנאי השידור הרגעיים עבורו.

# תקני תקשורת – DVB-S2

- התקן תומך בארבעה סוגים של מודולציה: QPSK, 8-PSK, 16-APSK, 32-APSK.
- יעילות ספקטרלית (spectral efficiency) הינו היחס בין ביטי המידע לכמות הכוללת של הביטים המשודרים.
- PER מוגדר להיות היחס בין מספר ה- packet שלא התקבלו כראוי מסך כל ה-packets.
- התקן מציין עבור כל מודקוד מהו היחס אות לרעש המינימלי, שעבורו שגיאת ה-PER תהיה קטנה או שווה ל- $PER = 10^{-7}$ .

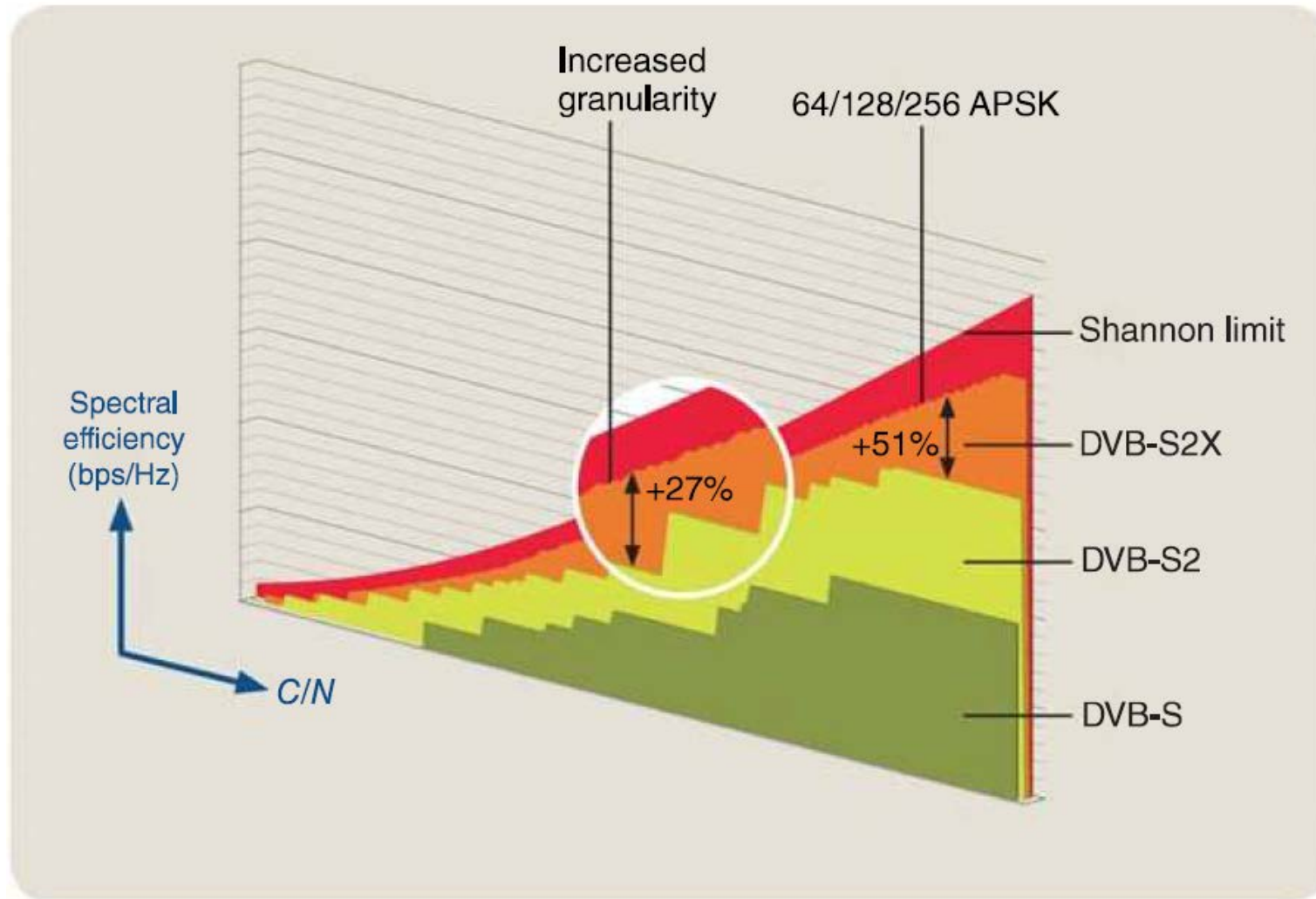
Mode	Spectral efficiency	Ideal Es/No (dB)
QPSK 1/4	0.490243	-2.35
QPSK 1/3	0.656448	-1.24
QPSK 2/5	0.789412	-0.3
QPSK 1/2	0.988858	1



# תקני תקשורת – DVB-S2X

- עם הדרישה לקצב העברת נתונים גבוה יותר הוצע התקן DVB-S2X (2-307 302) כשיפור לתקן DVB-S2.
- תקן זה מציע יותר MODCODs אפשריים המכילים מודולציות בסדרים גבוהים (-64/128/256 APSK), יעילות ספקטרלית טובה יותר המתאפשרת בזכות טכניקות פילטרים מתקדמות וכוח חישוב גדול.
- הוספת MODCODs מאפשרת התאמה אופטימלית של השידור לתנאי הקליטה וכך לספק קצב תקשורת מקסימלי עבור יחס אות לרעש נתון.
- עבור DVB-S2X עברו לדרישה חדשה  $FER=10^{-5}$ . FER מתאר את כמות הבלוקים שהגיעו עם שגיאה ביחס לסך כל הבלוקים. דרישה זו למעשה זהה לדרישה ב DVB-S2.

# DVB-S2X – תקני תקשורת



DVB-S2X compared to DVB-S2 (64/128/256 APSK & increased granularity)



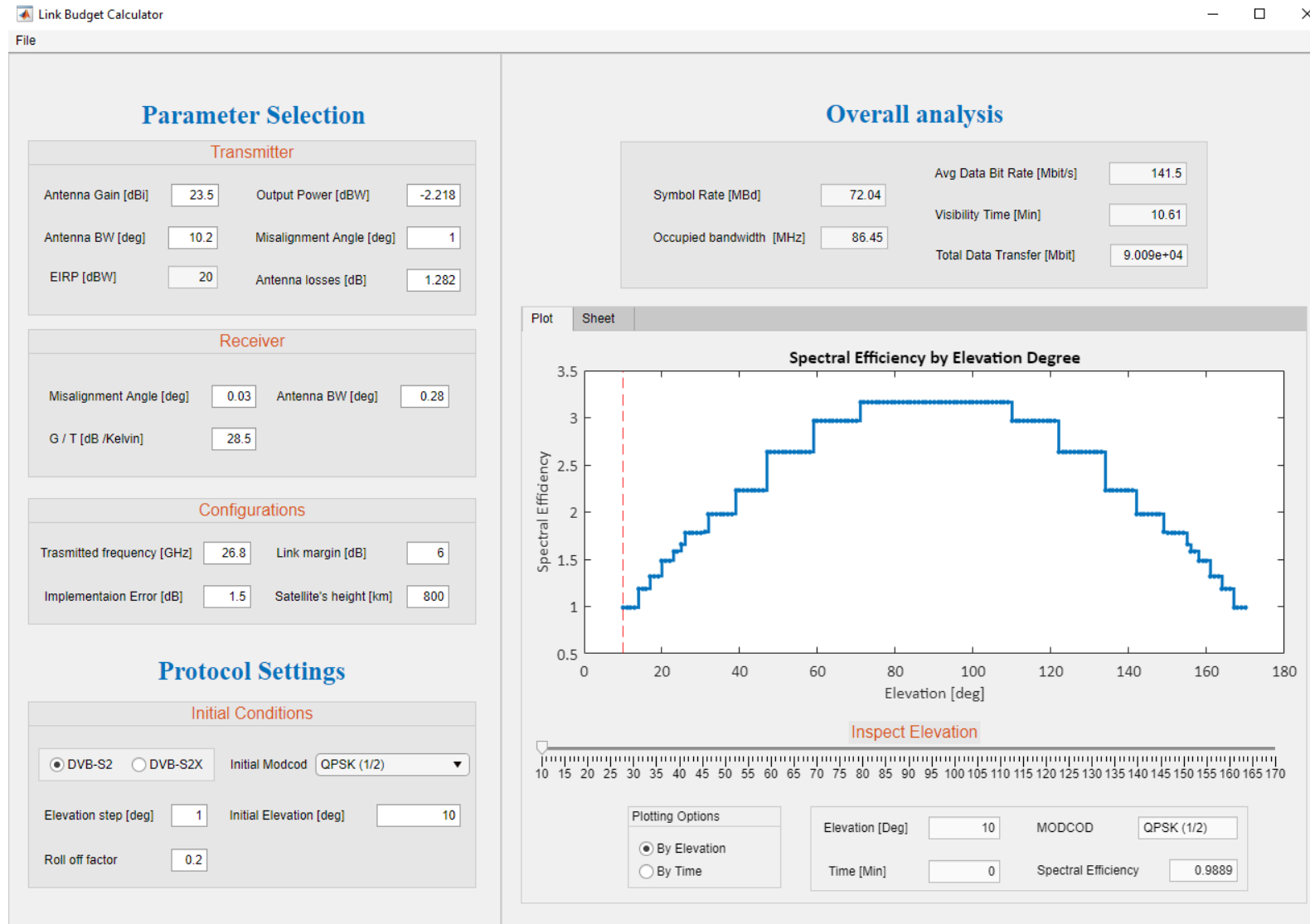
# חישוב ה – Link Budget עבור הממשק הגראפי

- חישוב EIRP של המשדר,  $G/T$  של המקלט נתון בחישוב שלנו.
- חישוב הפסדים כתלות בזוויות הלווין במסלול (הפסדי טווח חופשי ואטמוספריים).
- חישוב קצב סימבולים מקסימלי עבור modcod וזווית התחלתיים נתונים.
- מציאת modcod אופטימלי עבור כל זוויות במסלול. מקסום ה- spectral efficiency, תוך כדי עמידה בדרישת יחס אות לרעש של כל modcod.
- תרגום בין זוויות במסלול לזמנים שבהם הלווין יגיע אליהן.





# ממשק גרפי





# חישוב ה – Link Budget עבור הממשק הגרפי

## • נתוני המשדר בלויין:

- $-G_{max} = 23.5 [dBi]$  השבח המקסימלי של המשדר.
- $-P_{TX} = 10 \log_{10}(0.6) [dBW]$  ההספק המשודר בפועל.
- $-\theta_{3dB} = 10.2 [deg]$  רוחב האלומה של אנטנת שופר של המשדר.
- $-\theta_T = 1 [deg]$  זווית חוסר היישור המקסימלית של אנטנת המשדר.
- $-L_{FTX} = 1.2815 [dB]$  הפסדים בין המשדר לאנטנה.

## • נתונים נוספים:

- $-eight = 800 [KM]$  גובהה הלויין היחס לפני כדור הארץ.
- $-freq = 26.8 [GHz]$  תדירות השידור.
- $-im\_error = 1.5 [dB]$  הפסדי מימוש.
- $Link\ margin - margin = 6 [dB]$  מרווח ביטחון עבור יחס האות לרעש.
- $Roll\ off\ factor - roll\ off = 0.2$

## • נתוני המקלט של תחנת הקרקע:

- $-\theta_{3dB} = 0.28 [deg]$  רוחב האלומה של האנטנה הפרבולית של המקלט.
- $-\theta_R = 0.03 [deg]$  זווית חוסר היישור המקסימלית של אנטנת המקלט.
- $\frac{G}{T} = 28.5 \left[ \frac{dB}{K} \right]$  figure of merit של המקלט.

# חישוב ה – Link Budget עבור הממשק הגרפי

• חישוב EIRP של המשדר:

$$EIRP [dBW] = G_T + P_{TX} - L_{FTX} [dBW] = 23.5 - 2.2185 - 1.2815$$

$$= 20 [dBW]$$

• הפסדי היישור:

$$L_T = 12 \cdot \left( \frac{\theta_T}{\theta_{3dB}} \right)^2 = 12 \cdot \left( \frac{1}{10.2} \right)^2 = 0.1153 [dB] \bullet$$

$$L_R = 12 \cdot \left( \frac{0.03}{0.28} \right)^2 = 0.1378 [dB] \bullet$$



# חישוב ה – Link Budget עבור הממשק הגרפי

• חישוב הפסדי תווך חופשי:

$$Z = \frac{1}{\tan(90 - 80)} = 5.6713$$

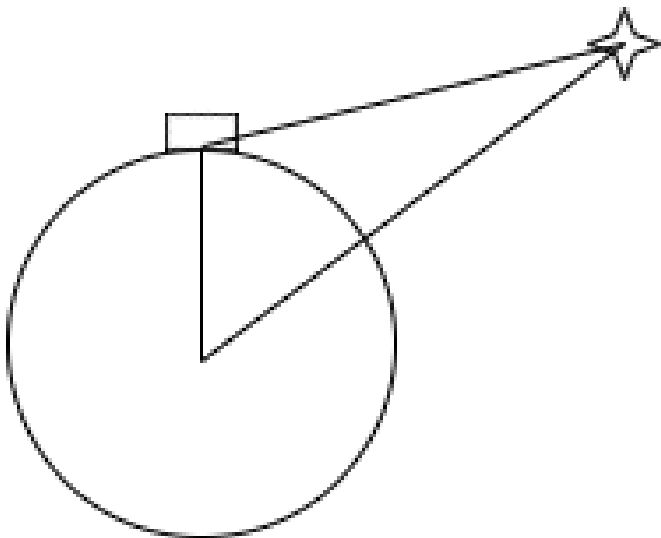
$$H = \frac{\text{earthRad}}{a} = 0.8884 \quad \bullet$$

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{1+Z^2-H^2}-Z}{1+H}\right) = 0.0196 \text{ [rad]} \quad \bullet$$

$$R = \sqrt{\text{earthRad}^2 + a^2 - 2 \cdot \text{earthRad} \cdot a \cdot \cos(\alpha)} = 810.9372 \text{ [KM]} \quad \bullet$$

$$\lambda = \frac{c}{\text{freq[Hz]}} = 1.186 \cdot 10^{-5} \text{ [KM]} \quad \bullet$$

$$L_{fs} = \left(\frac{4\pi R}{\lambda}\right)^2 = 8.2989 \cdot 10^{17} \quad \bullet$$



# חישוב ה – Link Budget עבור הממשק הגרפי

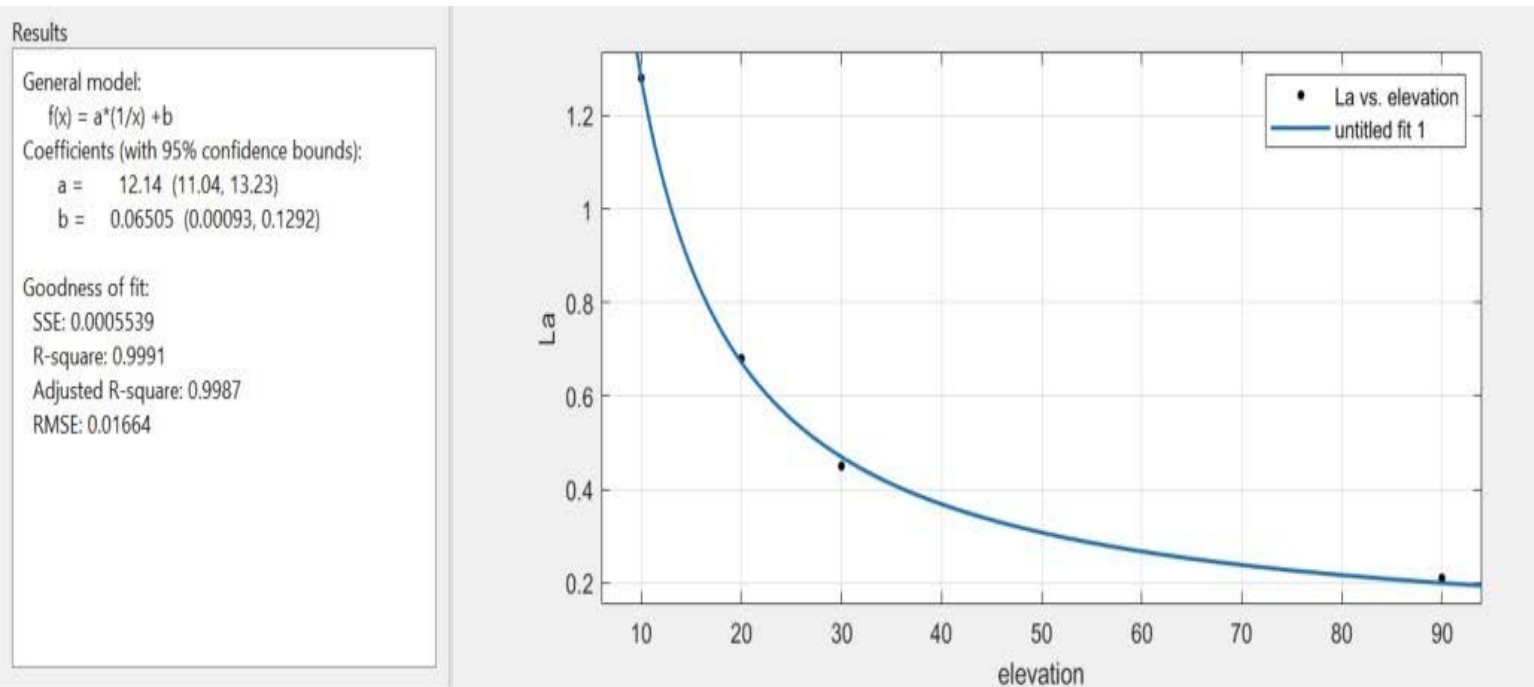
• חישוב הפסדים אטמוספריים

$$L_A \cong \frac{12.14}{elevation} + 0.06505$$

$$elevation = 80^\circ$$

$$L_A = 0.2168 [dB]$$

Elevation Angle [deg]	10	20	30	90
$L_A [dB]$	1.28	0.68	0.45	<b>0.21</b>



# חישוב ה – Link Budget עבור הממשק הגרפי

• סיכום הפסדים: נקבל כי עבור הזווית  $elevation = 80^\circ$  מתקיים:

$$L = L_{FS} + L_A + L_T + L_R = 179.1902 + 0.2168 + 0.1153 + 0.1378 = 179.6601 [dB]$$

• חישוב ה-Link Budget:

$$\frac{C}{N_0} = EIRP - L + \frac{G}{T} - 10 \log_{10}(k) = 20 - 179.6601 + 28.5 + 228.5992 = 97.439 [dBHz]$$

# חישוב ה – Link Budget

- חישוב קצב מקסימלי עבור modcod התחלתי QPSK1/2 וזוויות התחלתית 10 מעלות

$$\frac{C}{N_0} (elevation = 10^\circ) = 87.0759 [dBHz]$$

$$R_b = \frac{C}{N_0} - \frac{E_b}{N_0} - margin - im\_error = 81.5862 [dBHz]$$

$$R_s = \frac{R_b}{k} = \frac{144.09}{2} = 72.0435 [MBd]$$

$$Bandwidth = R_s \cdot (1 + \alpha) = 86.4522 [MHz]$$

# חישוב ה – Link Budget עבור הממשק הגרפי

- מציאת modcod אופטימלי לזוויות קבועה (לדוגמא 80 מעלות)

$$\text{given } \frac{E_s}{N_0} = \frac{C}{N_0} - R_s [dBHz] = 97.439 [dBHz] - 10 \log_{10}(72.0435 \cdot 10^6) [dBHz] = 18.8631 [dB]$$

- נבדוק למשל את ה 32-APSK 9/10 modcod

$$\text{required } \frac{E_s}{N_0} = \frac{E_s}{N_0} + im\_error + margin = 16.05 + 1.5 + 6 = 23.55 [dB]$$

$$\text{required } \frac{E_s}{N_0} = 23.55 > 18.8631 = \text{given } \frac{E_s}{N_0}$$

לכן ה-modcod לא עומד בדרישת יחס האות לרעש, כלומר לא ניתן להשתמש בו בזווית שנבחרה (80°).



# חישוב ה – Link Budget עבור הממשק הגרפי

- מחפשים את ה modcod עם ה spectral efficiency הכי גבוה שעדיין מקיים

$$required \frac{E_s}{N_0} < given \frac{E_s}{N_0}$$

- מקבלים כי ה modcod האופטימלי הוא 16-APSK 4/5

$$R_{b,inf} = R_s \cdot spectral - efficiency = 72.0435 \cdot 3.165623 = 228.0626 \left[ \frac{Mbit}{s} \right]$$

- חוזרים על החישוב עבור כל זוויות במסלול.



שאלות?