

דו"ח סיכום פרויקט: ב'

Study of Space to Earth Communication Link

חקר ביצועים של תקשורת לוויין-
קרקע בתחום KA

מבצעים:

Orel Ben Reuven
Tomer Fait

אוראל בן ראובן
תומר פייט

מנחה:

Alexander Hodisan

אלכסנדר הודיסן

סמסטר רישום: אביב תש"פ
תאריך הגשה: אפריל, 2021

תוכן עניינים

1	מבוא	1
2	לוויינים	2
2	סוגי מסלולי לוויינים	2.1
2	לוויני CUBEATS	2.2
3	אנטנות	3
3	עקום קרינה	3.1
4	הספק משודר	3.2
4	הספק נקלט	3.3
5	הפסדים נוספים	4
6	הפסדים אטמוספיריים	4.1
7	הפסדי יישור	4.2
7	הפסדי פולריזציה	4.3
7	סיכום הפסדים	4.4
9	רעש	5
9	מאפייני הרעש	5.1
9	טמפרטורת רעש	5.1.1
9	טמפרטורה אפקטיבית - T_e	5.1.2
9	סיפרת רעש	5.1.3
10	טמפרטורת רעש אפקטיבית בכניסה לאלמנט הנחתה	5.1.4
10	טמפרטורת רעש של אנטנה	5.1.5
10	טמפרטורת רעש בתקשורת לוויינים	5.2
10	תנאי שמיים בהירים עבור תחנת הקרקע	5.2.1
11	תנאי גשם	5.2.2
11	טמפרטורת רעש של מערכת	5.2.3
12	ביצועי ה-LINK	6
12	FIGURE OF MERIT	6.1
12	יחס אות לצפיפות רעש C/N_0	6.2
12	יחס אנרגיה לביט לצפיפות רעש E_b/N_0	6.3
12	תקני תקשורת	7
12	מבוא	7.1
12	קודים לתיקון שגיאות	7.2
13	קצב הקוד	7.2.1
13	שבח הקוד - Coding Gain	7.2.2
13	תיאוריית Shannon-Hartley	7.2.3
14	מאפיינים רצויים במערכת לתיקון שגיאות	7.2.4
14	קידוד LDPC	7.2.5
14	מודלציות	7.3
16	רוחב ספקטרום השידור	7.4
17	תקן DVB-S2	7.5
18	תקן DVB-S2X	7.6

19VISIBILITY TIME זמן נראות של לווין	8
20 LINK BUDGET חישוב	9
20	נתונים	9.1
21	חישוב LINK BUDGET	9.2
23	חישוב קצב מקסימלי עבור MODCOD התחלתי	9.3
23	מציאת MODCOD אופטימלי עבור זווית קבועה	9.4
25	תכנון קונפיגורצית השידור לאורך מסלול הלווין	9.5
27 ממשקים גרפיים	10
27	מחשבון לחישוב זמן הנראות של הלווין	10.1
28	מחשבון למציאת ה-MODCODS האופטימליים	10.2
31 רשימת מקורות	11

רשימת איורים

4	איור 1: עקום הקרינה לדוגמא של אנטנה
5	איור 2: המחשה להפסד free space loss
6	איור 3: המחשה של אנטנה משדרת ואנטנה קולטת בעלות שבח G_T ו- G_R בהתאמה
6	איור 4: הנחתה הנובעת מגזים באטמוספירה
7	איור 5: המחשה של זוויות חוסר יישור בין אנטנה משדרת ואנטנה קולטת
9	איור 6: המחשה של טמפרטורה אפקטיבית של מערכת
10	איור 7: טמפרטורת הרעש מהשמיים $TSKY$ כתלות בזווית של האנטנה מהקרקע
11	איור 8: מערכת קליטה בעלת אנטנה המחוברת למקלט באמצעות ערוץ עם הנחתה
13	איור 9: BER כפונקציה של יחס האות לרעש
15	איור 10: המחשה של מודולציה של האותות I, Q
16	איור 11: דוגמא לייצוג מודולציות במישור I, Q
19	איור 12: המחשה של תחום הנראות של לוויין
22	איור 13: ביצוע curve fitting לערכים מטבלה 4
26	איור 14: יעילות ספקטרלית של שידור מהלוויין
27	איור 15: צילום מסך של הממשק הגרפי לחישוב זמן הנראות של הלוויין
28	איור 16: צילום מסך של הממשק בתצורתו ההתחלית
30	איור 17: גרף היעילות הספקטרלית כפונקציה של הזמן מתחילת השידור
30	איור 18: תצוגה של טבלת הנתונים עבור ה-modcodes האופטימליים, והצגת התפריט

רשימת טבלאות

11	טבלה 1: קירוב לטמפרטורת הרעש מהאדמה כתלות בזווית.
17	טבלה 2: רשימת ה-modcods הנתמכים בתקן DVB-S2.
18	טבלה 3: רשימת ה-modcods הנתמכים בתקן DVB-S2X.
22	טבלה 4: הפסדים אטמוספריים המחולצים מאיור 6.
24	טבלה 5: רשימת E_s/N_0 הנדרשים עבור כל אחד מה-modcods בתקן DVB-S2 עבור הזווית 80° .

1 מבוא

מאז העשור השני של המאה ה-21, עם ההוזלה של תחום הלווייניות, 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 Modcodes. 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-modcodes האופטימליים מבחינת ביטוי המידע המשודרים לאורך מסלול הלוויין.

2 לוויינים [1]

2.1 סוגי מסלולי לוויינים

ישנם שלושה סוגי לוויינים הנמצאים בגבהים שונים, בעלי מסלול הקפה שונה ובעלי מטרות שונות.

לוויינים הנמצאים במסלול גיאוסנכרוני (GEO - Geosynchronous Equatorial Orbit) סובבים את כדור הארץ במשך 24 שעות בגובה 35,786 קילומטר מעל קו המשווה ולכן מופיעים כ"ניחים" מעל כדור הארץ. טווח השידור של לוויין מסוג זה נרחב, וכתוצאה מכך ניתן לספק כיסוי גלובלי עם כמות מועטה של לוויינים. בנוסף, לתחנת הקרקע יש קשר תמידי עם הלוויין, ולכן אין צורך ברשתות תקשורת מורכבות. חיסרון עיקרי בסוג זה הינו גובהו הרב של הלוויין הגורם להשהיה גבוהה בתקשורת ולקליטה חלשה בקרקע. רוב לווייני התקשורת הם GEO, ונותנים שירות קבוע כתחנת ממסר לקליטה ושידור של אותות ונתונים, כגון שיחות טלפון בינלאומיות או שידורי טלוויזיה. לדוגמה, שידורי yes הטלוויזיה בלוויין, מועברים בלווייני התקשורת עמוס 2 ועמוס 3 מתוצרת התעשייה האווירית לישראל.

לוויינים הנמצאים במסלול בינוני (MEO – Medium Earth Orbit) סובבים את כדור הארץ בגובה 2,000 ק"מ ועד 36,000 ק"מ. זמן ההקפה של הלוויינים בתחום זה הוא בין שעתיים ל-24 שעות. בתחום ה-MEO נמצאות מערכות הניווט הלווייניות כגון ה-GPS. יתרון מרכזי של לוויינים אלו יחסית ל-GEO הינו קירבתם לכדור הארץ המאפשרת תקשורת יותר מהירה, יציבה ואמינה. אך, על מנת לאפשר תקשורת רציפה עם תחנת הקרקע נדרשת העברת מידע בין לוויינים ומעקב של תחנת הקרקע אחר מיקום הלוויינים.

לוויינים הנמצאים במסלול לווייני נמוך (LEO – Low Earth Orbit) הם למעשה מרבית הלוויינים המקיפים את כדור הארץ, מגובה של 300 קילומטר ועד לגובה של 2,000 ק"מ. לוויינים הנמצאים במסלול LEO מקיפים את כדור הארץ כל 90–120 דקות. תקשורת מול לווייני LEO דורשת שימוש באנטנות שמשנות את כיווןן באופן שוטף כך שהן תמיד יהיו מכוונות אל הלוויין. (חלופה אחרת היא קיום תקשורת רק בפרקי זמן מצומצמים, כאשר הלוויין נמצא בדיוק מול אנטנה קבועה). קרבתם של הלוויינים לקרקע מאפשרת תקשורת זולה במהירות גבוהה ובאמינות גבוהה. אך, הכיסוי של לוויינים אלו מצומצם, ולכן על מנת לספק כיסוי גלובלי נדרשים יותר מ-32 לוויינים.

2.2 לווייני CubeSats [2]

לווייני 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 לשדר אותם ב"טרמפ" ביחד עם לוויינים גדולים. לווייני CubeSat הינם בעלי שימוש נרחב במגוון תחומים: השכלה, הדגמת טכנולוגיות, מדע, תקשורת, איסוף מידע, צבא ובעצם כל תחומי החלל.

3 אנטנות [3]

3.1 עקום קרינה

הגדרת IEEE [4]: עקום הקרינה (Radiation Pattern) הינו פונקציה מתמטית או ציור גרפי המתאר את תכונות הקרינה של אנטנה כתלות בקואורדינטות מרחביות. ברוב המקרים עקום הקרינה נקבע עבור השדה הרחוק ומיוצג ע"י הקואורדינטות הכיווניות θ, ϕ . תכונות הקרינה יכולות להיות צפיפות הספק, עוצמת הקרינה, עוצמת השדה, כיוויות, פאזה או פולריזציה.

אנטנה איזוטרופית – הסוג הפשוט ביותר של אנטנה. פולטת הספק בעוצמה שווה לכל הכיוונים במרחב.

כיווניות האנטנה הינה פונקציה המתאימה לעקום הקרינה של האנטנה $D(\theta, \phi)$. כאשר θ, ϕ הינן הזוויות המרחביות ביחס לאנך לאנטנה. ערך הפונקציה בנקודה מסוימת הינו היחס בין עוצמת ההספק של האנטנה בנקודה, חלקי ההספק של האנטנה האיזוטרופית (באותו הרדיוס).

שבח האנטנה (Gain) – האנטנה לא קורנת למרחב את כל ההספק המוזן לתוכה. לכן מגדירים את שבח האנטנה שהינו היחס בין עוצמת הקרינה למה שניתן להשיג מאנטנה איזוטרופית באותו הספק שהוזן לאנטנה. לשם בכך, מגדירים פונקציה השווה לפונקציית הכיווניות כפול קבוע נצילות התלוי באבודים שיתוארו בהמשך.

$$G(\theta, \phi) = \eta_{eff} \cdot D(\theta, \phi) \quad (3.1)$$

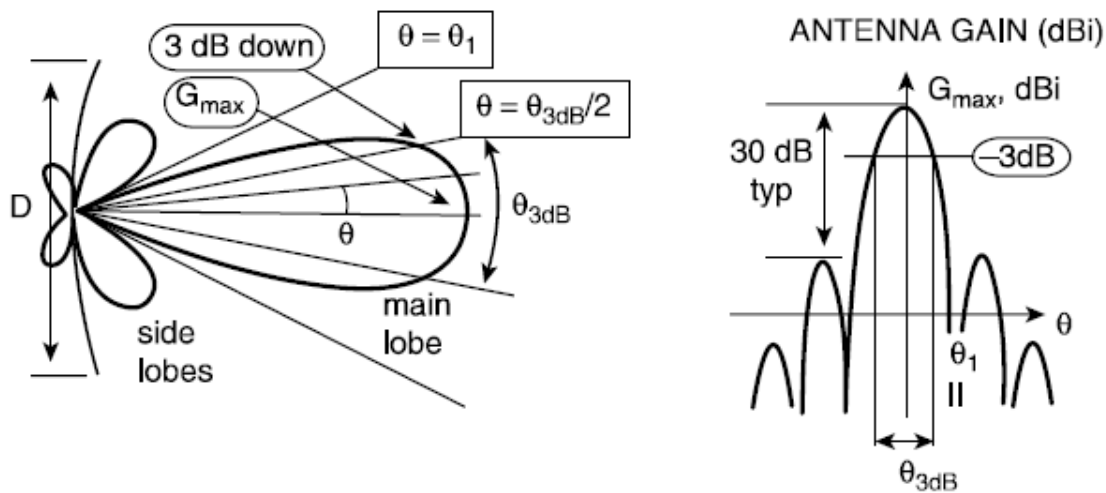
כאשר נצילות האנטנה (η_{eff}) נובעת ממספר גורמים וביניהם הפסדים אהמים, זליגת קרינה והפסדי פאזה. השבח הינו מקסימלי בכיוון שבו עקום הקרינה מקבל את ערכו המקסימלי.

$$G_{max} = \max(|G(\theta, \phi)|) \quad (3.2)$$

רוחב אלומה ($HPBW, \theta_{3dB}$) מוגדר להיות המרחק (בזוויות) בין נקודת המקסימום של פונקציית הכיווניות לנקודה בה ערכה של הפונקציה יורד למחצית מערך השיא. עבור כל אחת מהזוויות ϕ ו- θ , ניתן למצוא קשר בקירוב זוויות קטנות בין שבח האנטנה לרוחב האלומה. הקשר בה"כ עבור הזווית θ :

$$G(\theta)_{dBi} = G_{max,dBi} - 12 \cdot \left(\frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2 \quad (3.3)$$

באיור 1, ניתן לראות עקום קרינה של אנטנה לדוגמא. באיור מוצגת הנקודה G_{max} המתקבלת במקסימום עקום הקרינה, ובנוסף מוצג רוחב האלומה שהינו רוחב התחום בו עקום הקרינה יורד לערך $-3dB$.



איור 1: באיור מוצג עקום הקרינה לדוגמא של אנטנה, בקואורדינטות פולריות (משמאל) ובקואורדינטות קרטזיות (מימין).

3.2 הספק משודר

נסמן את ההספק המשודר של אנטנה איזוטרופית (כלומר פילוג הספק אחיד לכל הכיוונים) ב- P_T , צפיפות ההספק תהיה $\frac{P_T}{4\pi}$, כאשר 4π הינה הזווית המרחבית הכוללת את כל היקף הספירה.

כתוצאה מהפסדים בין המשדר לאנטנה שיסומנו ב- L_{FTX} (חסר יחידות), על מנת לשדר הספק P_T נדרש לשדר בפועל הספק P_{TX} כך ש-

$$\begin{aligned} P_{TX}[W] &= P_T[W] \cdot L_{FTX} \\ P_{TX}[dBW] &= P_T[dBW] + L_{FTX}[dB] \end{aligned} \quad (3.4)$$

בדומה לכך, ההספק הנקלט באנטנה יסומן P_R , וההספק שנדרש לקלוט בפועל מקיים:

$$\begin{aligned} P_{RX}[W] &= P_R[W] \cdot L_{FRX} \\ P_{RX}[dBW] &= P_R[dBW] + L_{FRX}[dB] \end{aligned} \quad (3.5)$$

הספק השידור (והקליטה) תלוי בעקום הקרינה של האנטנה ומושפע משבח האנטנה כפי שהוגדר ב-(2.1). בכיוון שבו שבח האנטנה הינו G_T , הספק השידור ליחידת זווית מרחבית הינו:

$$\frac{G_T \cdot P_T}{4\pi} \left[\frac{W}{steradian} \right] \quad (3.6)$$

הגודל במונה נקרא *effective isotropic radiated power (EIRP)*, וניתן לבטא אותו בצורה הבאה:

$$\begin{aligned} EIRP[W] &= G_T \cdot P_T = \frac{G_T \cdot P_{TX}}{L_{FTX}} [W] \\ EIRP[dBW] &= G_T + P_{TX} - L_{FTX} [dBW] \end{aligned} \quad (3.7)$$

3.3 הספק נקלט

הספק הנקלט במישור בעל שטח A הנמצא במרחק R מאנטנה משדרת שווה ל-

$$P_R = \frac{G_T \cdot P_T}{4\pi} \cdot \frac{A}{R^2} = \Phi \cdot A [W] \quad (3.8)$$

כאשר Φ נקרא *power flux density* והינו צפיפות ההספק ליחידת שטח.

שטח אפקטיבי של אנטנה מוגדר לפי הקשר הבא:

$$A_{eff} = \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot G_R \quad (3.9)$$

כאשר G_R הינו שבח האנטנה הקולטת.

נציב את הביטוי לשטח האפקטיבי בביטוי להספק הנקלט ב-(2.8) ונקבל את הקשר הבא:

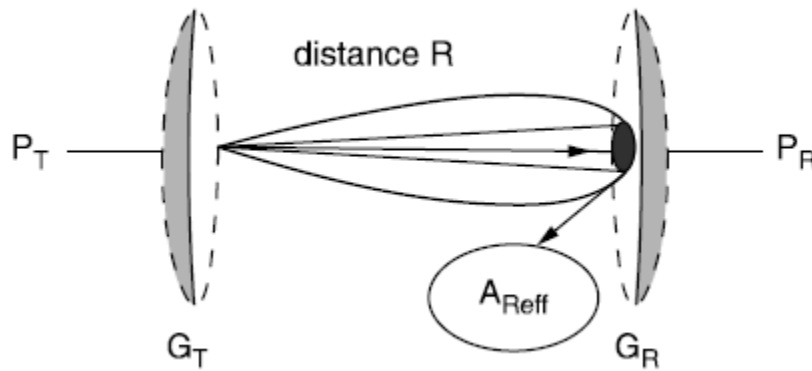
$$P_R = \frac{G_T \cdot P_T}{4\pi} \cdot \frac{A_{eff}}{R^2} = P_R = \frac{G_T \cdot P_T}{4\pi} \cdot \frac{\lambda^2}{4\pi} \cdot \frac{G_R}{R^2} = G_T \cdot P_T \cdot \frac{1}{L_{FS}} \cdot G_R [W] \quad (3.10)$$

כאשר-

$$L_{FS} = \left(\frac{4\pi \cdot R}{\lambda} \right)^2 \quad (3.11)$$

הינו הפסד *free space loss*, ומבטא את היחס בין ההספק המשודר והנקלט בין אנטנות איזוטרופיות.

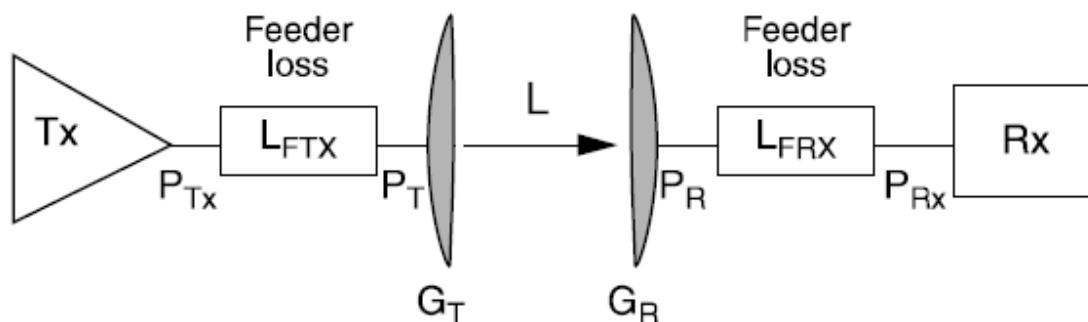
באיור 2 מוצגות אנטנה משדרת, אנטנה קולטת וההספק המועבר ביניהן. ניתן לראות כי רק חלק מההספק המשודר נקלט באנטנה הקולטת וכתוצאה מכך מתקבל הפסד *free space loss*.



איור 2: המחשה להפסד *free space loss* בין אנטנה משדרת ואנטנה קולטת.

4 הפסדים נוספים

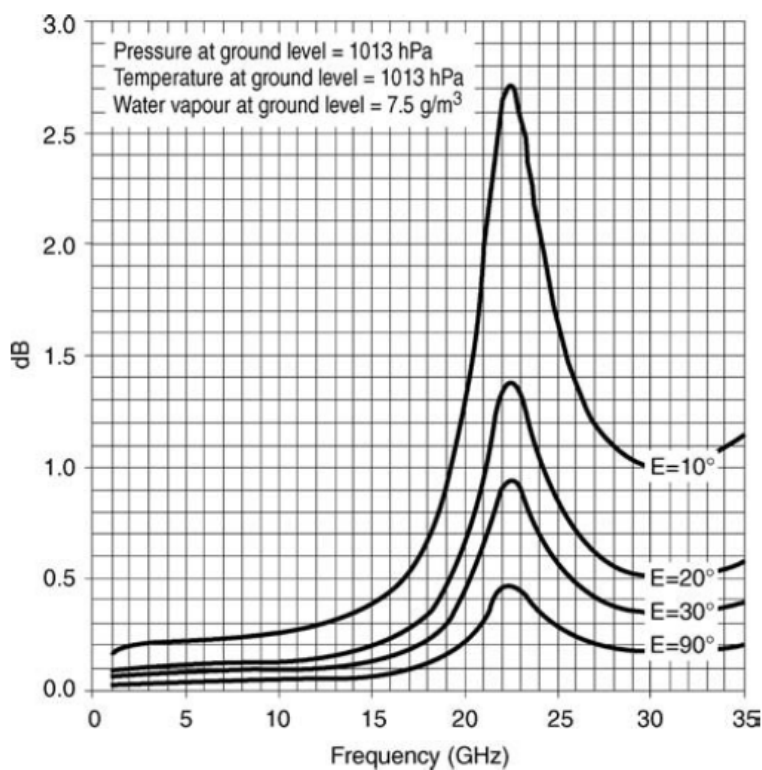
עד כה דנו במאפייני האנטנות ובהפסדים בצידוד השידור והקליטה. כעת נעבור לדון בהפסדים נוספים הנוצרים בין האנטנות. באיור 3, ניתן לראות את האנטנה המשדרת והאנטנה הקולטת עם השבח המתאים להן (G_T ו- G_R בהתאמה), בנוסף, מוצגים ההפסדים בין האנטנות וצידוד השידור והקליטה (L_{FTX} ו- L_{FRX} בהתאמה) וההספק בפועל המשודר והנקלט (P_{TX} ו- P_{RX}). ב- L מסומנים ההפסדים הנוספים שבהם נעסוק כעת.



איור 3: המחשה של אנטנה משדרת ואנטנה קולטת בעלות שבח G_T ו- G_R בהתאמה, הפסדים בין האנטנות וציוד השידור הקליטה המסומנים ע"י L_{FTX} ו- L_{FRX} בהתאמה, וההספק בפועל המשודר והנקלט (P_{RX} ו- P_{TX}).

4.1 הפסדים אטמוספיריים

גלים אלקטרומגנטיים עוברים הנחתה באטמוספירה כתוצאה מאינטראקציה עם גזים, עננים, גשם, שלג וקרח. סך כל ההפסדים האלו מתוארים ע"י הגודל L_A . הנחתות אטמוספריות תלויות בתנאי מזג האוויר. מעריכים הנחתות אלו בעזרת תחזיות מזג אוויר, כך שהסיכוי לתנאי שידור גרועים יותר מההספק שנקבע יהיה קטן. באיור 4 מתוארת ההנחתה הנובעת מגזים באטמוספירה כפונקציה של תדירות השידור והזווית.



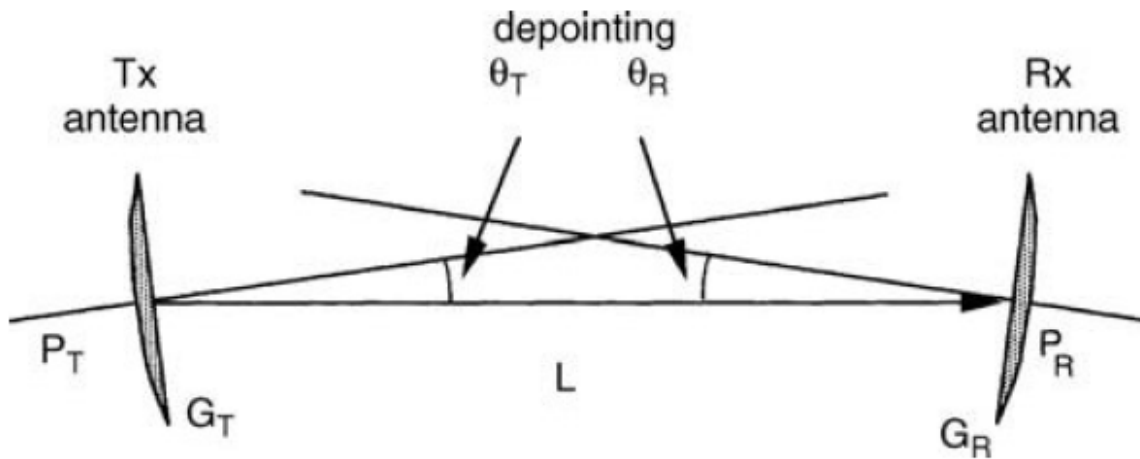
איור 4: הנחתה הנובעת מגזים באטמוספירה כפונקציה של תדירות השידור והזווית, עבור אטמוספירה סטנדרטית בעלת ריכוז מים באוויר באזור האדמה של $7.5 \frac{g}{m^3}$.

4.2 הפסדי יישור

אנטנות השידור והקליטה אינן מכוונות אחת כלפי השנייה בצורה מושלמת. כתוצאה מכך השבב בפועל של כל אחת מהאנטנות יהיה קטן מהשבב המקסימלי האפשרי שלהן, הנחתה זו נקראת הפסד יישור. הפסד זה תלוי בזוויות הסטייה של האנטנות ביחס לישר המחבר את האנטנות. הפסד זה נתון ע"י:

$$\begin{aligned} L_T &= 12 \cdot \left(\frac{\theta_T}{\theta_{3dB}} \right)^2 \\ L_R &= 12 \cdot \left(\frac{\theta_R}{\theta_{3dB}} \right)^2 \end{aligned} \quad (4.1)$$

כאשר L_T ו- L_R הינם ההפסדים באנטנה המשדרת והאנטנה הקולטת בהתאמה. θ_T ו- θ_R הינן זוויות החוסר יישור של האנטנה המשדרת והאנטנה הקולטת. θ_{3dB} הינו רוחב האלומה של כל אחת מהאנטנות. באיור 5 מוצגות אנטנת שידור ואנטנת קליטה, הישר המחבר בין שתי האנטנות וחוסר היישור.



איור 5: המחשה של זוויות חוסר יישור בין אנטנה משדרת ואנטנה קולטת.

4.3 הפסדי פולריזציה

לאטמוספירה יש הנחתות ושינוי פאזה שונה עבור קיטובים שונים ולכן הגלים משנים את קיטובם במעבר דרך האטמוספירה ובתוצאה מכך נגרם אי תיאום של הקיטוב במקלט. בנוסף, יכולות להיווצר אי תאימויות בפולריזציה במשדר והמקלט. הפסדים אלו נסמן ב- L_{POL} .

4.4 סיכום הפסדים

ההספק המגיע לכניסה של המקלט מורכב מ:

$$P_{RX} = EIRP \cdot \frac{1}{L} \cdot G [W] \quad (4.2)$$

כאשר:

$$EIRP = \frac{P_{TX} \cdot G_{T,MAX}}{L_{FTX}} [W] \quad (4.3)$$

$EIRP$ מאפיין את ציוד השידור, ו- L_{FTX} הינם הפסדים בין במשדר והאנטנה.

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_{FS} \cdot L_A \cdot L_T \cdot L_R} \quad (4.4)$$

$\frac{1}{L}$ הינם הפסדים בתווך. L_{FS} נובע מהנחתות תווך חופשי, L_A נוצר מהנחתות באטמוספירה, L_T, L_R נגרמים מחוסר תיאום בין הזוויות של האנטנות, L_{POL} נובע מהפסדי פולריזציה.

$$G = \frac{G_{R,MAX}}{L_{FRX} \cdot L_{POL}} \quad (4.5)$$

G מאפיין את שבח ציוד הקליטה. L_{FRX} הינם ההפסדים בין האנטנה והמקלט.

ניתן לבטא את הקשר בין ההספק המושקע בשידור להספק הנקלט ע"י שימוש במשוואות (3.2-3.4). קשר זה נקרא נוסחת פריץ והוא נתון ע"י:

$$\begin{aligned} \frac{P_{RX}[W]}{P_{TX}[W]} &= \frac{G_{T,MAX} \cdot G_{R,MAX}}{L \cdot L_{FTX} \cdot L_{FRX}} \\ P_{RX}[dBW] - P_{TX}[dBW] &= (G_{T,MAX}[dB] + G_{R,MAX}[dB]) - (L[dB] + L_{FTX}[dB] + L_{FRX}[dB]) \end{aligned} \quad (4.6)$$

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

$$\frac{P_{RX}[W]}{P_{TX}[W]} = \eta_{cdt} \eta_{cdr} (1 - |\Gamma_r|^2) (1 - |\Gamma_t|^2) \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 D_{gt}(\theta_t, \phi_t) D_{gr}(\theta_r, \phi_r) |\hat{\rho}_w \cdot \hat{\rho}_a^*|^2 \quad (4.7)$$

כאשר:

- η_{cdt}, η_{cdr} – הפסדים אוהמים ודיאלקטריים באנטנת המקלט והמשדר בהתאמה.
- $(1 - |\Gamma_r|^2), (1 - |\Gamma_t|^2)$ – 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.

5 רעש [3]

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.

5.1 מאפייני הרעש

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:

$$N = N_0 \cdot B [W] \quad (5.1)$$

מקורות רעש אמיתיים לא בהכרח מיוצגים ע"י צפיפות ספקטרלית קבועה, אבל זהו קרוב נוח לאותות חסומי סרט.

5.1.1 טמפרטורת רעש

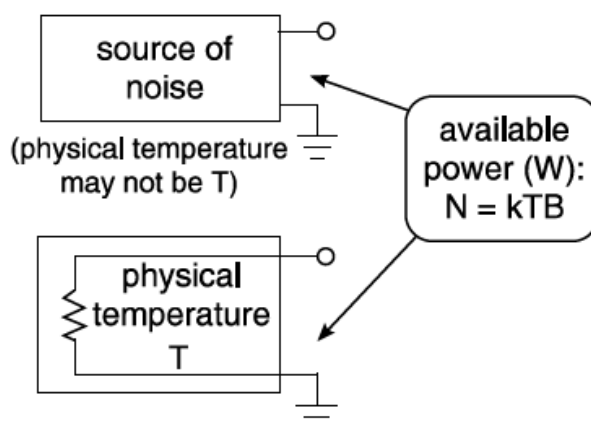
טמפרטורת הרעש של רכיב מוגדרת ע"י:

$$T = \frac{N_0}{k} [K] \quad (5.2)$$

כאשר k הינו קבוע בולצמן, T מייצג את הטמפרטורה של נגד המייצר הספק רעש כמו הרכיב.

5.1.2 טמפרטורה אפקטיבית - T_e

טמפרטורת אפקטיבית מוגדרת להיות טמפרטורת הרעש של נגד שממוקם בכניסה למערכת חסרת רעש, הגורם לרעש במוצא המערכת N , השווה לרעש שהיה במוצא המערכת אילו לא היה נגד והמערכת מפיקה רעש כרגיל. באיור 6 מוצגת מערכת המפיקה רעש N , ומערכת המפיקה רעש זהה אבל הרעש בה נובע רק מנגד בכניסה.



איור 6: המחשה של טמפרטורה אפקטיבית של מערכת

5.1.3 סיפרת רעש

סיפרת הרעש מוגדרת להיות היחס בין סך כל הספק הרעש במוצא הרכיב, להספק הרעש במוצא הרכיב אילו המערכת הייתה ללא רעש, כאשר בשני המקרים בכניסה למערכת נמצא מקור רעש בעל טמפרטורה $T_0 = 290[K]$. לדוגמא- מערכת בעלת הגבר G , עם טמפרטורת רעש אפקטיבית T_e , המקבלת אות כניסה ברוחב סרט B עם טמפרטורת רעש T_0 . סיפרת הרעש נתונה ע"י:

$$F = \frac{G \cdot k \cdot (T_e + T_0) \cdot B}{G \cdot k \cdot T_0 \cdot B} = 1 + \frac{T_e}{T_0} \quad (5.3)$$

5.1.4 טמפרטורת רעש אפקטיבית בכניסה לאלמנט הנחתה

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

$$T_{eATT} = (L_{ATT} - 1)T_{ATT} \quad (5.4)$$

5.1.5 טמפרטורת רעש של אנטנה

אנטנה קולטת רעש מגופים בעלי קרינה שנמצאים בטווח הקליטה של האנטנה. נסמן ב- $T_A(k)$ את טמפרטורת הרעש של האנטנה, $G(\theta, \phi)$ את שבח האנטנה, $T_b(\theta, \phi)$ – בהיקות הטמפרטורה של גופים קורנים. יתקבל הקשר הבא:

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \int \int T_b(\theta, \phi) G(\theta, \phi) \sin(\theta) d\theta d\phi \quad (5.5)$$

5.2 טמפרטורת רעש בתקשורת לוויינים

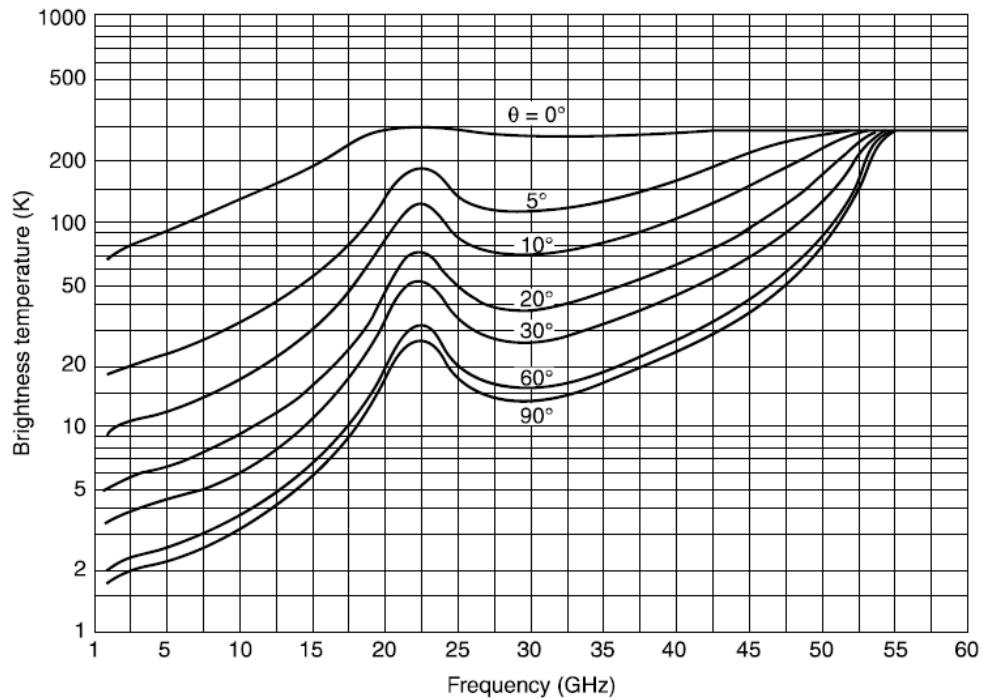
באנטנות המכוונות לתחנת הקרקע של לוויינים הרעש מגיע מהקרקע ומהחלל החיצון ותלוי במסלול הלוויין. באנטנה בתחנת הקרקע הרעש מגיע מהשמיים והקרקע שבסביבה.

5.2.1 תנאי שמיים בהירים עבור תחנת הקרקע

בתנאים אלו הגורמים העיקריים הינם הנחתה של האטמוספירה והחזרות מהאדמה. טמפרטורת הרעש מושפעת מהזווית של האנטנה כלפי השמיים, מתדר השידור ומהזווית ביחס לקרקע. טמפרטורת הרעש נתונה ע"י:

$$T_A = T_{SKY} + T_{GROUND} \quad (5.6)$$

בפועל, רק החלק משמיים שנמצא על הציר שעליו לאנטנה יש השבח המקסימלי (antenna boresight) תורם לאינטגרל מנוסחה (4.5) ולכן טמפרטורת הרעש מהשמיים T_{SKY} יכולה להיות מיוצגת ע"פ הזווית של האנטנה מהאדמה. קשר זה ניתן לראות באיור 7.



איור 7: טמפרטורת הרעש מהשמיים T_{SKY} כתלות בזווית של האנטנה מהקרקע.

T_{GROUND} נובע מקרינה מהאדמה או מקרינה המוחזרת מהאדמה. קרינה זו נקלטת ב-side lobes של עקום הקרינה של האנטנה. התרומה של כל side lobe לטמפרטורת הרעש נתונה ע"י:

$$T_i = G_i \cdot \frac{\Omega_i}{4\pi} \cdot T_G \quad (5.7)$$

כאשר G_i הינו השבח הממוצע המתאים ל-side lobe, Ω_i הינה הזווית המרחבית ל-side lobe, T_G הינה טמפרטורת הרעש מהאדמה. קירוב לגודל T_G עבור כל side lobe נתון בטבלה 1.

טבלה 1: קירוב לטמפרטורת הרעש מהאדמה כתלות בזווית.

Temperature	Elevation Angle (E)
$T_A = 290K$	$E < -10^\circ$
$T_A = 150K$	$-10^\circ < E < 0^\circ$
$T_A = 50K$	$0^\circ < E < 10^\circ$
$T_A = 10K$	$10^\circ < E < 90^\circ$

סך התרומות של כל ה-side lobe יוצרים את T_{GROUND} .

5.2.2 תנאי גשם

טמפרטורת הרעש של אנטנה גדלה בנוכחות עננים וגשם לפי הקשר הבא:

$$T_A = \frac{T_{SKY}}{A_{RAIN}} + T_m \left(1 - \frac{1}{A_{RAIN}}\right) + T_{GROUND} \quad (5.8)$$

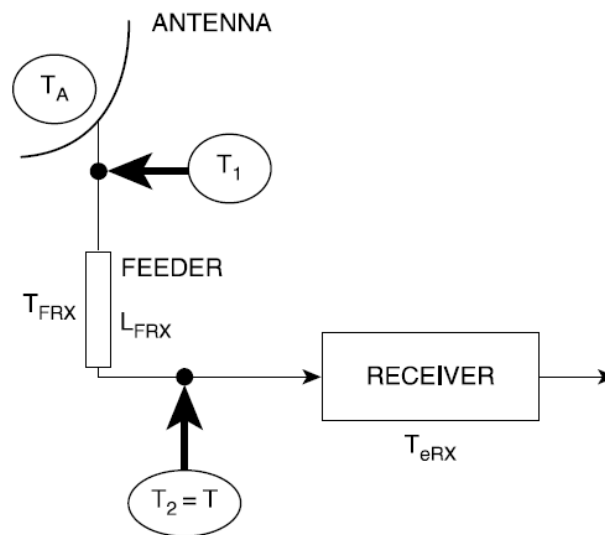
כאשר:

A_{rain} - הנחתה הנובעת מהגשם.

T_m - הטמפרטורה הממוצעת של הגשם\עננים.

5.2.3 טמפרטורת רעש של מערכת

באיור 8 מתוארת 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.



איור 8: מערכת קליטה בעלת אנטנה המחוברת למקלט באמצעות ערוץ עם הנחתה.

ע"י שימוש בנוסחה (5.4) ניתן לבטא את הטמפרטורה האפקטיבית בנקודות T_1, T_2 ע"י:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_A + (L_{FRX} - 1)T_F + T_{eRX} \cdot L_{FRX} \\ T_2 &= \frac{T_1}{L_{FRX}} \end{aligned} \quad (5.9)$$

לסיכום, ניתן למצוא את טמפרטורת הרעש בכניסה למקלט ע"י שקלול הרעש מכל מקורות הרעש. מקורות רעש אלו הינם מקורות הרעש שנקלטים באנטנה, הרעש שנוצר בערוץ והרעש של המקלט. מתוך טמפרטורת הרעש המתקבלת בכניסה למקלט ניתן לחשב את צפיפות ההספק הספקטרלית של הרעש במקלט לפי הקשר המוצג בנוסחה (5.2):

$$N_0 = k \cdot T \left[\frac{W}{Hz} \right] \quad (5.10)$$

6 ביצועי ה-Link [3]

6.1 Figure of Merit

נהוג לאפיין את טיב ציוד הקליטה ע"י G/T (figure of merit). כאשר G הינו שבח האנטנה כפי שהוגדר במשוואה (3.5), ו- T הינה טמפרטורת הרעש בכניסה למקלט המוצגת במשוואה (4.10). גודל זה (G/T) משתנה כתלות בזווית ביחס לקרקע, מפני שטמפרטורת הרעש תלויה בזווית האנטנה.

6.2 יחס אות לצפיפות רעש C/N_0

דרך נפוצה להעריך את ביצועי הקשר הינו על פי הממד C/N_0 . כאשר $C = P_{RX}$ הינו הספק האות שהגיע למקלט כפי שמוצג במשוואה (4.2), ו- N_0 הינה צפיפות הספק הרעש הספקטרלית כפי שהוגדרה במשוואה (4.10). ניתן לבטא את הגודל C/N_0 כפונקציה של G/T (Figure of Merit), $EIRP$ (משוואה 3.3) ו- L (משוואה 4.4) בצורה הבאה:

$$\begin{aligned} \frac{C}{N_0} [Hz] &= EIRP \cdot \frac{1}{L} \cdot \frac{G}{T} \cdot \frac{1}{k} [Hz] \\ \frac{C}{N_0} [dBHz] &= EIRP - L + \frac{G}{T} - 10 \log_{10}(k) [dBHz] \end{aligned} \quad (6.1)$$

6.3 יחס אנרגיה לביט לצפיפות רעש E_b/N_0

במערכות תקשורת, האנרגיה לביט (E_b) יותר שימושית מאשר הספק האות הנקלט (C). לשם כך, מוגדר קצב שידור הביטים ע"י R_b והינו כמה ביטים מועברים בשנייה. הקשר בין האנרגיה לביט והספק האות הנקלט נתון ע"י:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{R_b} \cdot \frac{C}{N_0} \quad (6.2)$$

7 תקני תקשורת [5]

7.1 מבוא

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.

7.2 קודים לתיקון שגיאות

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. שיפור יחס האות לרעש E_b/N_0 (כפי שהוגדר

במשוואה 5.2) יקטין את כמות השגיאות במקלט. מדד לכמות השגיאות הינו BER שמבטא את אחוז הסיביות השגויות מסך כל השידור. דרך נוספת להקטנת כמות השגיאות ניתן להשתמש בקודים לתיקון שגיאות (FEC).

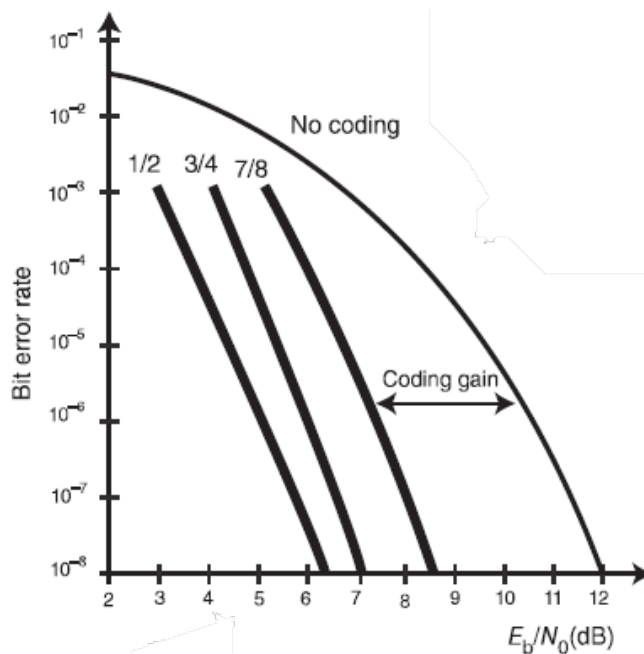
מערכות לניהול שגיאות בצד המקלט מסוגלות לזהות ולתקן שגיאות בשידור עד כדי מספר מוגדר מראש של טעויות. מערכות אלו משתמשות בקודים לתיקון שגיאות. בקודים אלו מוסיפים ביטים למילים המשודרות, וכך עבור יחס אות לרעש זהה, ניתן לתקן מספר גדול יותר של שגיאות.

7.2.1 קצב הקוד

נגדיר את קצב הקוד להיות היחס בין מספר הביטים המכילים מידע של האפליקציה למספר הביטים הכולל. כלומר, אם מתוך 8 ביטים, רק 7 מהם מכילים מידע של האפליקציה, קצב הקוד הינו $7/8$.

7.2.2 שבה הקוד – Coding Gain

עבור כל יחס אות לרעש (E_b/N_0) וקוד לתיקון שגיאות בעל BER המתאים להם, ניתן להגדיר את שבה הקוד (coding gain) ככמות ה-dB שצריך להוסיף ליחס האות לרעש על מנת לקבל BER זהה ללא הקוד לתיקון שגיאות. באיור 9 ניתן לראות התנהגות כללית של BER כפונקציה של יחס האות לרעש, גם כאשר יש שימוש בקודים לתיקון שגיאות וגם כאשר אין שימוש בקודים לתיקון שגיאות. ניתן לראות באיור את ה-coding gain כמרחק (ב-dB) בין יחסי האות לרעש עבור BER נתון כאשר יש שימוש בקוד לתיקון שגיאות, וכאשר אין שימוש בקוד כזה. ניתן לראות כי ככל שהיתירות של הביטים בקוד גדלה (כלומר יש יותר ביטים השייכים לקוד) ניתן להגיע ל-BER זהה בעזרת יחס אות לרעש נמוך יותר. בנוסף, כאשר משתמשים בקוד, שיפוע העקום (BER כפונקציה של יחס האות לרעש) נהיה תלול יותר, וכתוצאה מכך אפילו שיפור קטן של יחס האות לרעש יכול לשפר משמעותית את מספר הטעויות (BER).



איור 9: התנהגות כללית המתארת את BER כפונקציה של יחס האות לרעש כאשר יש שימוש בקודים לתיקון שגיאות, וכאשר אין שימוש בקודים לתיקון שגיאות.

7.2.3 תיאוריית Shannon–Hartley

קודים לתיקון שגיאות מקטינים את BER במחיר של האטת קצב שליחת המידע כתוצאה מהוספת ביטי יתירות. תיאורטית, קיימים קודים לתיקון שגיאות המסוגלים להגיע לשגיאה אפס, תוך כדי שמירה על קצב העברת מידע הגדול מאפס. תיאוריית Shannon–Hartley נותנת חסם על הקצב המקסימלי בו קוד לתיקון שגיאות כזה (שגיאה אפס) יכול לפעול.

התיאוריה מציינת מהו קצב העברת הנתונים המקסימלי בערוץ תקשורת חסום סרט בנוכחות רעש, ללא שגיאות.

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (7.1)$$

כאשר:

- C – הקיבולת המקסימלית של הערוץ (ביטים לשנייה).
- B – רוחב הסרט של הערוץ (Hz).
- $\frac{S}{N}$ – יחס אות לרעש של הערוץ.

7.2.4 מאפיינים רצויים במערכת לתיקון שגיאות

ניזכר בגרף המתאר את BER כפונקציה של יחס האות לרעש כפי שמצוין באיור 11. מאפיין רצוי במערכת לתיקון שגיאות הינו ששיפוע הגרף מתחיל להיות תלול עבור יחס אות לרעש נמוך ככל האפשר, ומפסיק להיות תלול רק עבור BER נמוך. בצורה זו, ניתן להגיע לBER נמוך גם עבור ערכי יחס אות לרעש נמוכים. בנוסף, רצוי כי קידוד ופענוח ההודעות יהיה מהיר וידרוש כוח חישוב נמוך ככל הניתן. מעבר לכך, נרצה כי יהיה ניתן בקלות לשנות את קצב הקוד (6.2.1) ואת כמות הביטים המקודדים בו זמנית.

7.2.5 קידוד LDPC

קוד LDPC הינו קוד בלוקים לינארי בעל מטריצת בדיקת זוגיות שהיא דלילה. בקידוד בלוקים מחלקים את ההודעה לבלוקים בגודל K , עבור כל בלוק מוסיפים h ביטי קידוד, כך שגודל כל בלוק הינו n . המפענח מקבל בלוק באורך n ואחראי לפענח ממנו את K הביטים של המידע. קצב השידור של הקוד מגיע לביצועים של 1dB מקצב השידור המקסימלי (חסם Shannon). בנוסף, אפשר לשלוט בקצב הקוד בצורה טובה (על מנת להתאים אותו לאפליקציות שונות בעלי הפסדים שונים), והוא גמיש להרבה סוגי מודולציות. החיסרון של קידוד זה הינו הפענוח האיטי של הקוד (20-30 איטרציות), ושהקוד אינו גמיש לשינויים בגודל הבלוק (נדרשים לחשב מחדש את מטריצת הזוגיות).

7.3 מודולציות

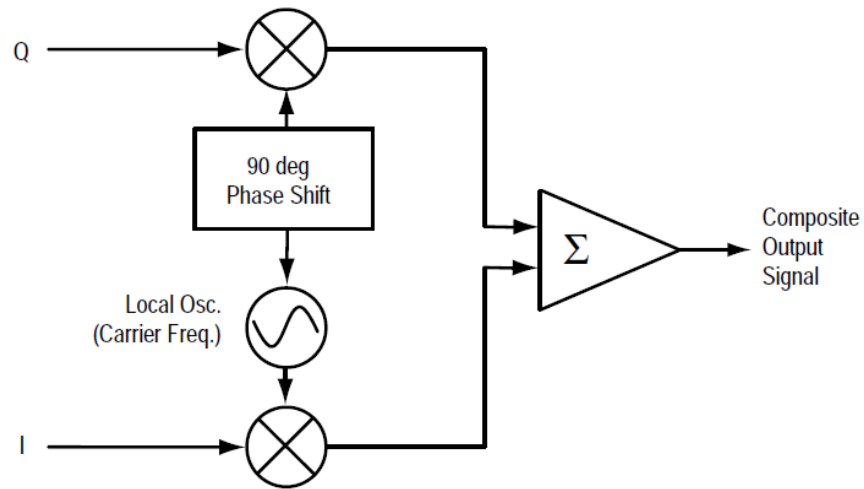
על מנת לשלוח מידע דיגיטלי (ביטים) נדרשים לשלוח ביטים אלו בעזרת הרכבה של הביטים על צורות גל. ישנם אפשרויות רבות לצורות גל אלו, והן נקראות מודולציות. נקרא לצורת אות יחידה המסמלת ביטים סימבול, ונסמן את קצב שליחת הסימבולים ב- R_s . אם סימבול נושא k ביטים, נקבל את הקשר:

$$R_b = k \cdot R_s \quad (7.2)$$

מאפיין עיקרי של מודולציות הינו כמות הביטים הנשלחים עבור סימבול יחיד (k). באופן כללי ככל שכמות הביטים בסימבול גדולה יותר, כמות השגיאות עבור יחס אות לרעש נתון גדלה. אבל, עבור קצב שליחת נתונים קבוע, ניתן לשלוח פחות סימבולים ליחידת זמן, כלומר כל סימבול תופס פחות תדרים ולכן ניתן לנצל את הספקטרום טוב יותר. נגדיר את הספק הסימבול ב- E_s . נשתמש במשוואה (6.2) ונגיע לקשר הבא:

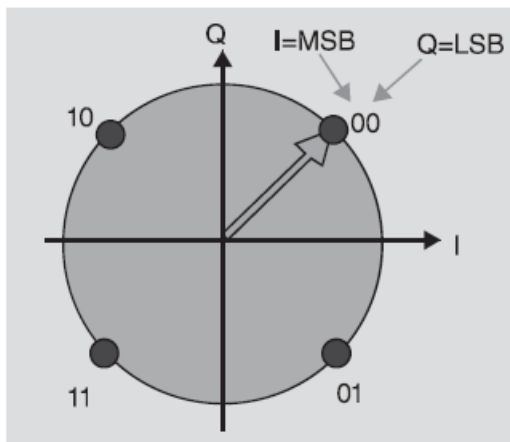
$$\frac{E_s}{N_0} = k \cdot \frac{E_b}{N_0} = \frac{k}{R_b} \cdot \frac{C}{N_0} \quad (7.3)$$

במודולציות נפוצות PSK (phase shift keying), האות המשודר הינו סכום של שני אותות אורתוגונליים I, Q בעלי הפרש פאזה של 90° ביניהם. האותות I, Q הינם רכיבים בלתי תלויים ויוצרים ביחד את האות המעורב. באיור 10 מוצגת המודולציה של האותות I, Q בעלי הפרש פאזה של 90° ליצירת האות הכולל.

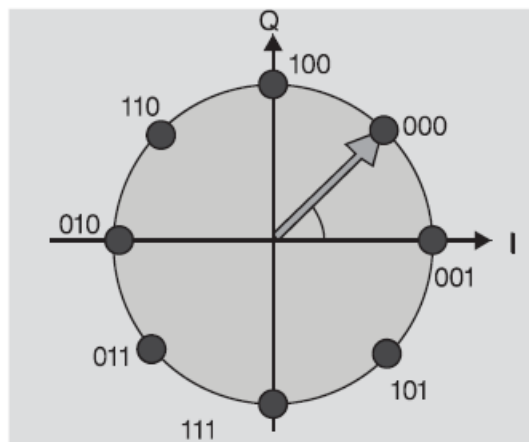


איור 10: המחשה של מודולציה של האותות I, Q בעלי הפרש פאזה של 90° ביניהם ליצירת האות הכולל

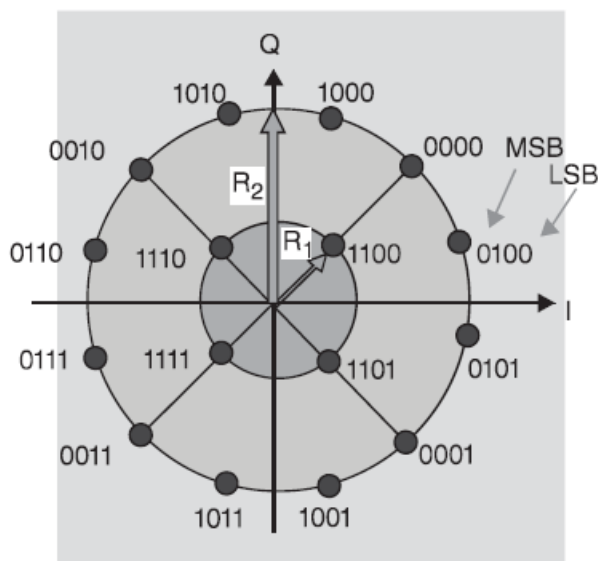
ניתן להציג את האות המשודר במודולציה בעזרת גרף עם צירים I, Q כך שכל ציר מייצג את אמפליטודת האות המתאים. באיור 11, ניתן לראות דוגמא עבור מספר מודולציות המיוצגות במישור I, Q . באיור כל נקודה מייצגת סימבול אפשרי של האות שניתן לשלוח ומהם הביטים המרכיבים את הסימבול. ניתן לשים לב כי בכל שיש יותר ביטים בסימבול (יותר סימבולים), המרחק בין הסימבולים קטן והסיכוי לשגיאה גדל.



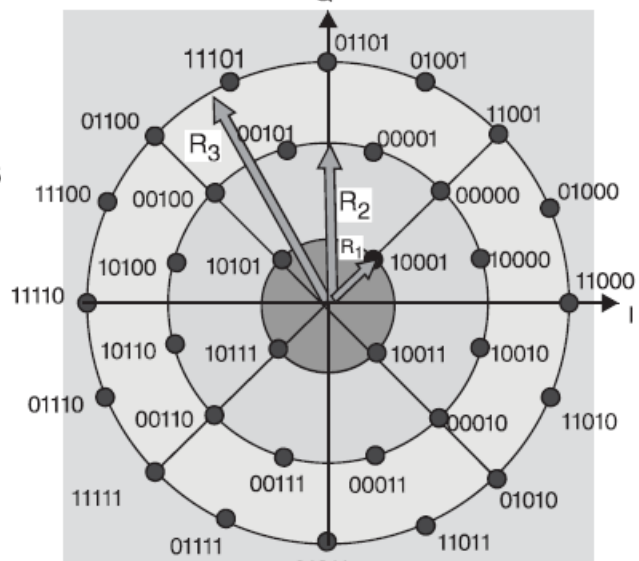
(a)



(b)



(c)



(d)

איור 11: דוגמא לייצוג מודולציות במישור I, Q . המודולציות הינם: (a) 2-PSK, (b) 3-PSK, (c) 16-APSK, (d) 32-APSK

7.4 רוחב ספקטרום השידור

רוחב הסרט נמדד ע"י תחום התדרים אותו מכסה האות המשודר. גלי השידור יכולים לחרוג לתדרים קרובים ולהפריע לשידורים אחרים. על מנת למנוע זאת, משתמשים במסנן תדרי הקוטם את התדרים הלא רצויים. נציין על שני מדדים בבחינת טיב השידור:

- רוחב האונה הראשית של האות לאחר שעבר מודולציה. רוחב האונה הראשית משפיע על רוחב הסרט הנדרש לשידור האות. ככל שרוחב האונה הראשית יקטן כך נוכל לנצל יותר את הספקטרום.
- גובה אונות הצד. אונות הצד עלולות להתערבב באותות אחרים ולגרום וליצור בהם הפרעות במידה והדעיכה שלהם לא מספיק מהירה.

מסנן נפוץ למניעת חריגת התדרים לשידורים סמוכים הינו הקוסינוס המורם (raised cosine). מסנן זה מוגדר ע"י הפרמטר α שנקרא roll-off factor ובתחום $[0,1]$, ו- T_s שהינו זמן השידור של הסימבול. המסנן מוגדר בצורה הבאה:

$$H(f) = \begin{cases} 1, & |f| \leq \frac{1-\alpha}{2 \cdot T_s} \\ \frac{1}{2} \left[\alpha + \cos \left(\frac{\pi \cdot T_s}{\alpha} \left[|f| - \frac{1-\alpha}{2 \cdot T_s} \right] \right) \right], & \frac{1-\alpha}{2 \cdot T_s} < |f| \leq \frac{1+\alpha}{2 \cdot T_s} \\ 0, & |f| > \frac{1+\alpha}{2 \cdot T_s} \end{cases} \quad (7.4)$$

ניתן לקבל ביטוי עבור רוחב הסרט של אות לאחר מעברו במסנן raised cosine כתלות בקצב הסימבול (R_s) ו-roll-off factor:

$$Bandwidth = R_s \cdot (1 + \alpha) \quad (7.5)$$

7.5 תקן DVB-S2 [6]

תקן DVB-S2 הינו תקן תקשורת הנועד למטרות שידור. התקן מתמקד בביצועי שידור טובים תוך כדי שמירה על גמישות וסיבוכיות קליטה נמוכים. התקן משתמש בקידודים LDPC ו- BCH ובשיטות מודולציה מתקדמות כגון VCM\ACM המאפשרות התאמה של הקידוד והמודולציה לכל משתמש בהתאם לאיכות השידור וצרכי המשתמש.

התקן תומך בארבעה סוגים של מודולציה: QPSK, 8-PSK, 16-APSK, 32-APSK. לרוב, משתמשים ב-QPSK ו-PSK-8 למטרות שידור, מפני שמודולציות אלו יכולות להתמודד עם משדרים לא לינאריים בתחום הרוויה, ומאפשרות טווח שגיאה יחסית גדול.

עבור אפליקציות הדורשות קצב שידור גבוה, משתמשים בליווינים התומכים במודולציות ASPK-16/32. מודולציות אלו דורשות יחס אות לרעש יותר גבוה ועיוות מקדים לאות (predistortion) על מנת למזער את השפעת חוסר הלינאריות של המשדרים. מודולציות אלו מספקות קצב שידור גבוה ויעילות ספקטרלית טובה, אך מצד שני צורכות הספק גדול (על מנת לשמור על יחס אות לרעש מתאים להגנה מעיוותים). יעילות ספקטרלית (spectral efficiency) הינו קצב שליחת המידע ברוחב סרט נתון. בניגוד למודולציות הלינאריות, ASPK-16/32 ממקמים את הסימבולים על מעגלים וכך הם נמנעים מעיוותים הנגרמים ע"י מסננים לא לינאריים.

התקן מאפשר מספר של קונפיגורציות שידור המכונות מודקודים (MODCODS). כל מודקוד מגדיר מודולציה וקוד לתיקון שגיאות. התקן מצוין עבור כל מודקוד מהו היחס אות לרעש המינימלי, שעבורו שגיאת ה-PER תהיה קטנה או שווה ל- 10^{-7} . $PER = 10^{-7}$. PER מוגדר להיות היחס בין מספר ה-packet שלא התקבלו כראוי מסך כל ה-packets. בטבלה 2 מסוכמים המודקודים הנתמכים בתקן DVB-S2, עבור כל מודקוד מצוין מהי היעילות הספקטרלית המתאימה לו ומהו יחס האות לרעש (E_s/N_0) המינימלי הנדרש על מנת לעמוד בדרישת ה-PER.

טבלה 2: רשימת ה-modcods הנתמכים בתקן DVB-S2. עבור כל modcod מצוינות היעילות הספקטרלית ויחס האות לרעש המינימלי הדרוש על מנת לעמוד בדרישת ה-PER.

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
QPSK 3/5	1.188304	2.23
QPSK 2/3	1.322253	3.1
QPSK 3/4	1.487473	4.03

QPSK 4/5	1.587196	4.68
QPSK 5/6	1.654663	5.18
QPSK 8/9	1.766451	6.2
QPSK 9/10	1.788612	6.42
8PSK 3/5	1.779991	5.5
8PSK 2/3	1.980636	6.62
8PSK 3/4	2.228124	7.91
8PSK 5/6	2.478562	9.35
8PSK 8/9	2.646012	10.69
8PSK 9/10	2.679207	10.98
16APSK 2/3	2.637201	8.97
16APSK 3/4	2.966728	10.21
16APSK 4/5	3.165623	11.03
16APSK 5/6	3.300184	11.61
16APSK 8/9	3.523143	12.89
16APSK 9/10	3.567342	13.13
32APSK 3/4	3.703295	12.73
32APSK 4/5	3.951571	13.64
32APSK 5/6	4.11954	14.28
32APSK 8/9	4.397854	15.69
32APSK 9/10	4.453027	16.05

כפי שצוין, התקן תומך בתקשורת גמישה בהתאם לצרכי המשתמש (Multiplexing).

VCM (Variable coding modulation) שימושי כאשר משתמשים שונים לא צריכים רמה דומה של הגנה מפני שגיאות ובעלי תנאי שידור שונים. VCM מאפשר להגדיר עבור כל משתמש MODCOD המבטא מהי שיטת הקידוד והמודולציה שנבחרה.

כאשר קיים שידור חוזר מהצרכן לספקן, התקן מאפשר גמישות גבוהה יותר מ-VCM שמאופיינת ע"י ACM (Adaptive coding modulation). ACM מאפשר שינוי של הקידוד והמודולציה עבור כל משתמש בצורה דינאמית בזמן בהתאם לתנאי השידור הרגועים עבורו.

7.6 תקן DVB-S2X [7]

עם הדרישה לקצב העברת נתונים גבוה יותר הוצע התקן DVB-S2X 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. בטבלה 3 מסוכמים המודקודים הנתמכים בתקן DVB-S2X, עבור כל מודקוד מצוין מהי היעילות הספקטרלית המתאימה לו ומהו יחס האות לרעש (E_s/N_0) המינימלי הנדרש על מנת לעמוד בדרישה $FER = 10^{-5}$. FER (FEC Error Rate) מתאר את כמות הבלוקים שהגיעו עם שגיאה ביחס לסך כל הבלוקים.

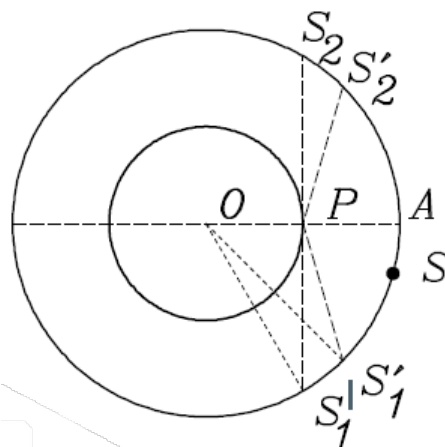
טבלה 3: רשימת ה-modcods הנתמכים בתקן DVB-S2X. עבור כל modcod מצוינות היעילות הספקטרלית ויחס האות לרעש המינימלי הדרוש על מנת לעמוד בדרישת ה-FER.

Mode	Spectral efficiency	Ideal Es/No (dB)
QPSK 2/9	0.434841	-2.85
QPSK 13/45	0.567805	-2.03

QPSK 9/20	0.889135	0.22
QPSK 11/20	1.088581	1.45
8PSK 23/36	1.896173	6.12
8PSK 25/36	2.062148	7.02
8PSK 13/18	2.145136	7.49
16APSK 26/45	2.281645	7.51
16APSK 3/5	2.370043	7.80
16APSK 28/45	2.458441	8.10
16APSK 23/36	2.524739	8.38
16APSK 25/36	2.745734	9.27
16APSK 13/18	2.856231	9.71
16APSK 7/9	3.077225	10.65
16APSK 77/90	3.386618	11.99
32APSK 32/45	3.510192	11.75
32APSK 11/15	3.620536	12.17
32APSK 7/9	3.841226	13.05
64APSK 11/15	4.338659	14.81
64APSK 7/9	4.603122	15.47
64APSK 4/5	4.735354	15.87
64APSK 5/6	4.936639	16.55
128APSK 3/4	5.163248	17.73
128APSK 7/9	5.355556	18.53
256APSK 32/45	5.593162	18.59
256APSK 3/4	5.900855	19.57

8 זמן נראות של לוויין [8] Visibility Time

לתחנת הקרקע יש קו ראייה אל הלוויין רק בחלק ממסלולו סביב כדור הארץ. הזמן שבו ניתן לראות את הלוויין מתחנת הקרקע נקרא זמן הנראות של הלוויין. אם נסמן את תחנת הקרקע ב-P ואת הלוויין ב-S ניתן להגדיר את תחום הנראות כתחום שבו הלוויין מעל האופק. באיור 12 מתואר הלוויין S ותחנת הקרקע P. התחום שבו הלוויין מעל האופק הינו התחום שבין הנקודות S_1 ו- S_2 . ניתן להגדיר תחום ראייה מצומצם יותר, המוגדר בין הנקודות S_1' ו- S_2' .



איור 12: המחשה של תחום הנראות של לוויין. הלוויין מסומן ב-S, תחנת הקרקע ב-P, ותחום הנראות הינו בין הנקודות S_1 ל- S_2 .

ניתן לחשב את זמן הנראות של הלווין ע"י הכפלת זמן ההקפה הכולל של הלווין בשבר המתאר את החלק היחסי של תחום הנראות של הלווין מסך כל סיבובו:

$$\Delta t_v = \frac{2\alpha}{2\pi} \cdot T_0 \quad (8.1)$$

כאשר:

- $T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}}$ – הינו זמן ההקפה של כדור הארץ.
- a – הינו רדיוס סיבוב הלווין $(R + h)$
- G – הינו קבוע הגרביטציה.
- M – מסת כדור הארץ.
- $\alpha = \angle S_1'OA$ – הינה הזווית המקסימלית שנמצאת בתחום הראייה ביחס למרכז כדור הארץ.

על מנת לחשב את הזווית α משתמשים בקשר הבא:

$$\alpha = 2 \cdot \arctan \left(\frac{\sqrt{1 + Z^2 - H^2} - Z}{1 + H} \right) \quad (8.2)$$

כאשר:

- $H = \frac{R}{a}$
- $Z = \frac{1}{\tan \zeta}$
- $\zeta = \angle S_1'PA$ – הזווית המקסימלית שנמצאת בתחום הראייה ביחס לתחנת הקרקע.

9 חישוב Link Budget לדוגמא

בפרק זה נציג כיצד להשתמש ברקע התיאורטי שהוצג על מנת לחשב את ה- Link Budget. לאחר מכן, נמצא מהם modcods האידיאליים בכל זווית של התקנים שהוצגו ונראה מימוש Matlab המבצע זאת. תחילה נציג את הנתונים לדוגמא עבור המשדר והמקלט, נחשב את יחס לאות הרעש C/N_0 שמתקבל במקלט, נמצא את קצב השידור המקסימלי עבור Modcod התחלתי נבחר, נמצא את המודקודים האופטימליים לכל זווית, ולבסוף נבצע המרה מזווית לזמן.

9.1 נתונים

הנתונים לדוגמא [9] הינם עבור מכלול מערכת השידור של לוויין CubeSat במסלול LEO, ומכלול הקליטה של תחנת הקרקע.

נתוני המשדר בלוויין:

- $G_{max} = 23.5 [dBi]$ – 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.

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.

נתונים נוספים:

- $height = 800 [KM]$ – גובה הלווין 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.
- $Roll\ off\ factor - roll\ off = 0.2$

9.2 חישוב Link Budget

נחיל מחישוב $EIRP$ של המשדר, כפי שהוצג בנוסחה (3.7):

$$EIRP [dBW] = G_T + P_{TX} - L_{FTX} [dBW] = 23.5 - 2.2185 - 1.2815 = 20 [dBW]$$

נחשב את הפסדי היישור, לפי נוסחה (3.1):

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

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

חישוב הפסדי תווך חופשי:

נרצה לחשב את הפסדי התווך החופשי כפי שמוצג בנוסחה (3.11) כפונקציה של הזווית ביחס לאופק, שנסמנה $elevation$ ונקבע אותה ל- 80° בשביל המשך החישוב לדוגמא. נשתמש בקבועים הבאים:

- $earthRad = 6371 [km]$ – רדיוס כדור הארץ.
- $c = 299792458 \cdot 10^{-3} \left[\frac{km}{s} \right]$ – מהירות האור.
- $a = earthRad + height [km]$ – מרחק הלווין ממרכז כדור הארץ.

על מנת לחשב את המרחק בין תחנת הקרקע ללוויין, נחשב את הזווית בין תחנת הקרקע ללוויין ביחס למרכז כדור הארץ כפי שהוצג בנוסחה (7.2):

$$H = \frac{earthRad}{a} = 0.8884$$

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

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

כעת, נשתמש בנוסחת הקוסינוסים על מנת לחשב את המרחק בין תחנת הקרקע ללוויין (R):

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

נמצא את אורך הגל המתאים לשידור הנבחר:

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

כעת, נשתמש בנוסחה (3.11) ונקבל:

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

$$L_{fs} = 179.1902 [dB]$$

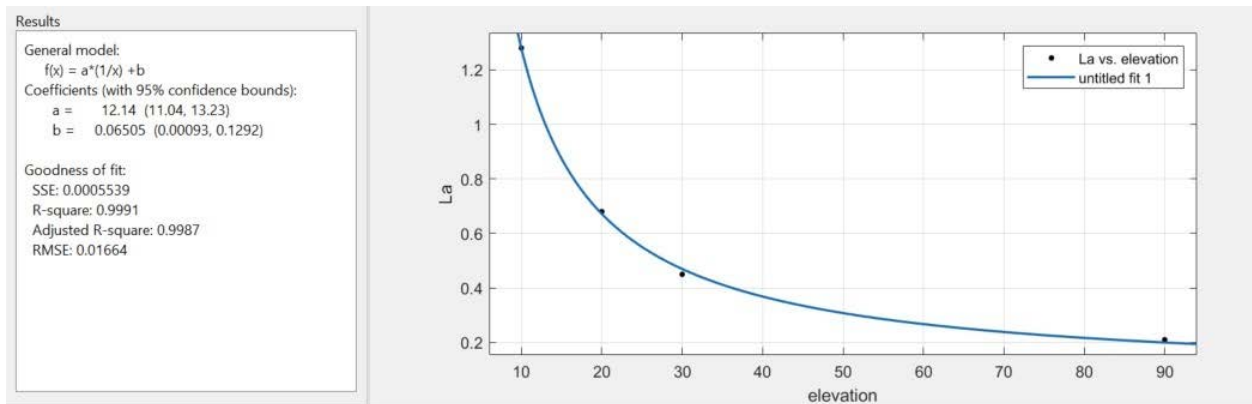
חישוב הפסדים אטמוספריים:

לחישוב ההפסדים האטמוספריים, נשתמש בגרף המופיע באיור 6. נחלץ את ההפסדים עבור התדר הנבחר לשידור, ונקבל את הערכים הבאים:

טבלה 4: הפסדים אטמוספריים המחולצים מאיור 6, עבור תדר שידור של 26.8[GHz].

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

על מנת לקבל קירוב של ההפסד L_A עבור שאר הזוויות, ביצענו Curve Fitting ב-Matlab על מנת להעריך את הנתונים החסרים. ההתאמה שהתקבלה מוצגת בגרף שבאיור הבא:



איור 13: ביצוע curve fitting לערכים מטבלה 4.

והקשר שהתקבל הינו:

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

עבור הזווית $elevation = 80^\circ$ שנבחרה עבור הדוגמא נקבל: $L_A = 0.2168 [dB]$.

סיכום הפסדים: נשתמש בנוסחה (4.4) ונקבל כי עבור הזווית $elevation = 80^\circ$ מתקיים:

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

לחישוב ה- Link Budget, נשתמש בנוסחה (6.1) לחישוב יחס האות לרעש במקלט:

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

9.3 חישוב קצב מקסימלי עבור modcod התחלתי

תנאי השידור הגרועים ביותר מתקבלים כאשר הלווין נמצא במרחק הכי רחוק מתחנת הקרקע. נבחר קונפיגורציה שידור התחלתית עבור הנקודה בה הלווין מתחיל לשדר. לצורך הדוגמא, נבחר את נקודת התחלת השידור של הלווין בזווית של 10° מעל האופק, ואת ה-modcod ההתחלתי להיות QPSK(1/2) (מתוך הרשימה של התקן DVB-S2 בטבלה 2).

לצורך מציאת יחס אות לרעש במקלט, בנקודה שבה הלווין מתחיל לשדר, נחזור על התהליך שמתואר בפרק (8.2). ונקבל:

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

נחשב את הערך $\frac{E_b}{N_0}$ המתאים ל-modcod הנבחר, בעזרת הערכים $\frac{E_s}{N_0}$ ו-spectral efficiency המחולצים מטבלה 2. נשתמש בנוסחה (7.3) ונקבל:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{E_s}{N_0} - 10 \log_{10}(k) = 1 - 10 \log_{10}(2) = -2.0103 [dB]$$

כעת, נשתמש בנוסחה (6.2) למציאת קצב השידור בביטים. נרצה להתחשב בשגיאת המימוש ובמרווח הביטחון (מהנתונים לדוגמא), ולכן נחסר אותם מיחס האות לרעש שהתקבל:

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

$$R_b = 144.09 \left[\frac{Mbit}{s} \right]$$

למציאת קצב שידור הסימבולים, נחלץ מטבלה 2 את מספר הביטים לסימבול עבור ה-modcod הנבחר. נשתמש בנוסחה (7.2) ונקבל:

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

מתוצאה זו ומפרמטר ה-roll-off הנתון, ניתן להשתמש בנוסחה (7.5) ולקבל:

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

בהינתן קצב שידור הסימבולים R_s , ניתן לחשב את קצב שידור ביטי המידע $R_{b,inf}$ (עבור ה-modcod הנבחר), ע"י שימוש ב-spectral efficiency בצורה הבאה:

$$R_{b,inf} = R_s \cdot spectral_efficiency = 72.0435 \cdot 0.988858 = 71.24079 \left[\frac{Mbit}{s} \right]$$

מכאן ואילך, נקבע את קצב שידור הסימבולים R_s ואת רוחב הסרט כפי שנמצאו, ונבחר את ה-modcods האופטימליים עבור כל זווית של הלווין, על מנת למקסם את קצב שידור ביטי המידע $R_{b,inf}$.

9.4 מציאת Modcod אופטימלי עבור זווית קבועה

נציג כעת כיצד למצוא מהו ה-modcod האופטימלי עבור זווית קבועה של הלווין. בעזרת שיטה זו, ניתן לבצע איטרציה כל הזוויות הנחשקות ולמצוא מהו ה-modcod האופטימלי עבור כל זווית.

נמצא את ה-modcod האופטימלי עבור הזווית $elevation = 80^\circ$ (עבורה חישבנו את יחס האות לרעש). נמצא את הערך E_s/N_0 עבור זווית זו, בעזרת יחס האות לרעש שמצאנו בפרק (8.2) וקצב שידור הסימבולים שמצאנו בפרק (8.3). נשתמש בנוסחאות (6.2 ו-7.2) ונקבל:

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

כעת, נדגים עבור modcod מסוים (32-APSK 9/10) כיצד ניתן לדעת האם הוא מתאים ליחס האות לרעש של הזווית שנבחרה.

תחילה, נחשב את $\frac{E_s}{N_0}$ הכולל את שגיאת המימוש ואת מרווח הביטחון המתאים ל-modcod הנבחר לפי טבלה 2. עבור הדוגמא, נקבל:

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

קיבלנו כי:

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

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

נחזור על חישוב זה עבור כל אחד מה-modcods השייכים לתקן שבדוגמא (DVB-S2), עבור הזווית שנבחרה, ונקבל:

טבלה 5: רשימת E_s/N_0 הנדרשים עבור כל אחד מה-modcods בתקן DVB-S2 עבור הזווית 80° .

Mode	Spectral efficiency	Required E_s/N_0 [dB]
QPSK 1/4	0.490243	5.15
QPSK 1/3	0.656448	6.26
QPSK 2/5	0.789412	7.2
QPSK 1/2	0.988858	8.5
QPSK 3/5	1.188304	9.73
QPSK 2/3	1.322253	10.6
QPSK 3/4	1.487473	11.53
QPSK 4/5	1.587196	12.18
QPSK 5/6	1.654663	12.68
QPSK 8/9	1.766451	13.7
QPSK 9/10	1.788612	13.92
8PSK 3/5	1.779991	13
8PSK 2/3	1.980636	14.12
8PSK 3/4	2.228124	15.41
8PSK 5/6	2.478562	16.85
8PSK 8/9	2.646012	18.19
8PSK 9/10	2.679207	18.48
16APSK 2/3	2.637201	16.47
16APSK 3/4	2.966728	17.71
16APSK 4/5	3.165623	18.53
16APSK 5/6	3.300184	19.11
16APSK 8/9	3.523143	20.39

16APSK 9/10	3.567342	20.68
32APSK 3/4	3.703295	20.23
32APSK 4/5	3.951571	21.14
32APSK 5/6	4.11954	21.78
32APSK 8/9	4.397854	23.19
32APSK 9/10	4.453027	23.55

מתוך הטבלה, ניתן לראות כי ה-*modcod* בעל היעילות הספקטרלית הגבוהה ביותר, עבורו $\frac{E_s}{N_0}$ הדרוש קטן מ- $\frac{E_s}{N_0}$ המצוי, הינו 16APSK (4/5). כלומר זהו ה-*modcod* העומד בדרישות השגיאה בעל היעילות הספקטרלית הגבוהה ביותר עבור הזווית 80° . עבור *modcod* זה, קצב שידור ביטי המידע הינו:

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

9.5 תכנון קונפיגורצית השידור לאורך מסלול הלווין

בפרק הקודם, הצגנו כיצד למצוא את ה-*modcod* האופטימלי עבור זווית מסוימת. על מנת לתכנן את השידור לאורך מסלול הלווין, נמצא את ה-*modcod* המתאים לזוויות בתחום השידור (בדוגמא $10^\circ - 170^\circ$) כאשר נבחר צעד דיסקרטי לחישוב (בדוגמא זו הצעד הינו מעלה אחת). כדי למצוא את ה-*modcod* האופטימלי עבור כל זווית (בדוגמא – מעלה) נשתמש בחישוב דומה למוצג בפרק (8.4).

נרצה להציג את קונפיגורצית השידור כתלות בזמן מתחילת השידור. לצורך כך, נצטרך לחשב עבור כל זווית המתאימה ל-*modcod*, מהו הזמן מתחילת השידור שהלווין יגיע אליה. נדגים כיצד לבצע את המעבר מזווית לזמן לדוגמא עבור הזווית 80° :

תחילה, נחשב את זמן ההקפה של הלווין סביב כדור הארץ כפי שמוצג בפרק 7 (עבור הנתונים לדוגמא):

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{GM}} = 2\pi \sqrt{\frac{(6371 + 800)^3}{6.67408 \cdot 10^{-20} \cdot 5.972 \cdot 10^{24}}} = 6.0436 \cdot 10^3 [sec] = 100.7262 [minutes]$$

כעת, נחשב את הזווית של הלווין ביחס למרכז כדור הארץ כפי שמופיע בנוסחה (8.2), כאשר הזווית $\zeta = 80^\circ$ הינה הזווית הנתונה:

$$H = \frac{earthRad}{a} = 0.8884$$

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

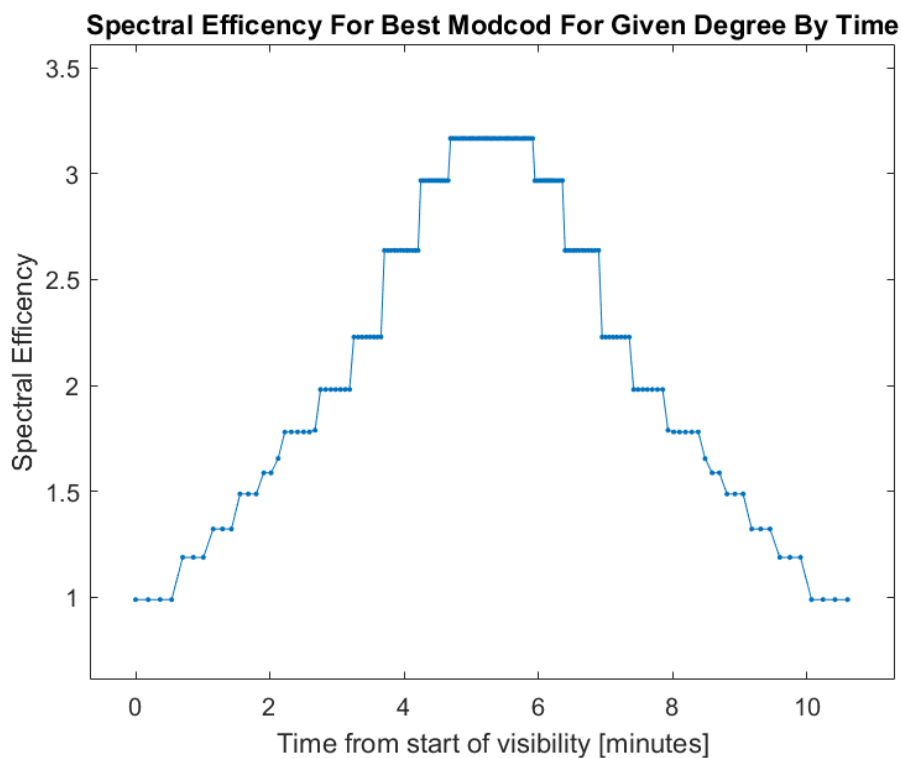
$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{\sqrt{1 + Z^2 - H^2} - Z}{1 + H}\right) = 0.0196 [rad]$$

ולכן, הזמן שייקח ללווין להגיע לזווית 80° מתחילת השידור (10°), יתקבל ע"י:

$$t = \frac{\alpha - \alpha_0}{2\pi} \cdot T_0 = 4.9906 [minutes]$$

כאשר α_0 הינה הזווית היחס למרכז כדור הארץ, המתאימה לזווית שבה הלווין מתחיל לשדר.

ניתן לחזור על חישוב זה עבור כל אחת מהזוויות שבתחום, וכך לקבל טבלה המכילה עבור כל זווית של הלוויין מהו הזמן מתחילת השידור, מהו ה-*modcod* המתאים לזמן זה, ומהי היעילות הספקטרלית המתאימה. באיור 14 מוצגת בגרף היעילות הספקטרלית כפונקציה של זמן השידור של הלוויין:

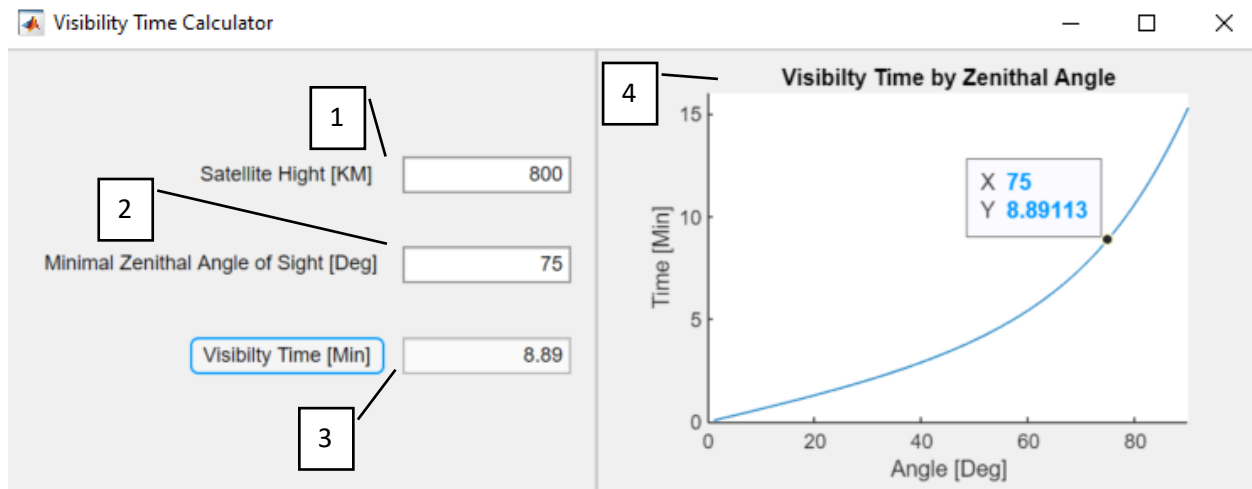


איור 14: יעילות ספקטרלית של שידור מהלוויין כפונקציה של הזמן החל מתחילת השידור עד לסיום השידור. כל נקודה בגרף מייצגת זווית עבודה חושב ה-*modcod* האופטימלי. היעילות הספקטרלית גדלה כאשר ה-*modcod* משתנה.

10 ממשקים גראפיים

10.1 מחשבון לחישוב זמן הנראות של הלוויין

לצורך חישוב זמן הנראות של הלוויין כפי שהוצג בפרק 8, הכנו ממשק Matlab המחשב זאת בצורה אוטומטית. באיור 15 מוצג צילום מסך (snippet) של הממשק.



איור 15: צילום מסך של הממשק הגראפי לחישוב זמן הנראות של הלוויין.

להלן הסבר על מרכיבי הממשק:

1. קלט: גובה הלוויין מעל פני כדור הארץ.
2. קלט: הזווית הזניטלית (ζ - כפי שמוגדרת במשוואה 8.2) ממנה הלוויין מתחיל את השידור.
3. פלט: זמן הנראות של הלוויין.
4. פלט: גרף המתאר את זמן הנראות של הלוויין כפונקציה של הזווית ζ , עבור גובה הלוויין הנתון בקלט 1. על הגרף מסומנת הזווית שנבחרה בקלט 2, וזמן הנראות המתאים לה.

10.2 מחשבון למציאת ה-modcodes האופטימליים

לצורך מציאת ה-modcodes האופטימליים כפי שהוצג בפרק 8, הכנו ממשק Matlab המקבל כקלט את נתוני האנטנות ונתוני השידור, וכפלט מציג את ה-modcodes האופטימליים השייכים לכל זווית שידור, מהו הזמן המתאים לכל זווית, מאפיינים נוספים של השידור. באיור 16 מוצג צילום מסך (snippet) של הממשק.

Link Budget Calculator

Parameter Selection

Transmitter

- Antenna Gain [dBi]: 23.5
- Output Power [dBW]: -2.218
- Antenna BW [deg]: 10.2
- Misalignment Angle [deg]: 1
- EIRP [dBW]: 20
- Antenna losses [dB]: 1.282

Receiver

- Misalignment Angle [deg]: 0.03
- Antenna BW [deg]: 0.28
- G / T [dB / Kelvin]: 28.5

Configurations

- Transmitted frequency [GHz]: 26.8
- Link margin [dB]: 6
- Implementation Error [dB]: 1.5
- Satellite's height [km]: 800

Protocol Settings

Initial Conditions

- Modulation: ☒ DVB-S2 ☐ DVB-S2X
- Initial Modcod: QPSK (1/2)
- Elevation step [deg]: 1
- Initial Elevation [deg]: 10
- Roll off factor: 0.2

Overall analysis

- Symbol Rate [MBd]: 72.04
- Occupied bandwidth [MHz]: 86.45
- Avg Data Bit Rate [Mbit/s]: 141.5
- Visibility Time [Min]: 10.61
- Total Data Transfer [Mbit]: 9.009e+04

Plot

Spectral Efficiency by Elevation Degree

The graph shows Spectral Efficiency (bits/s/Hz/deg) on the Y-axis (0.5 to 3.5) versus Elevation [deg] on the X-axis (0 to 180). The efficiency starts at approximately 1.0 at 0 degrees, rises to a peak of about 3.2 between 70 and 110 degrees, and then falls back to approximately 1.0 at 180 degrees. A red dashed vertical line is at 10 degrees.

Inspect Elevation

Plotting Options:

- ☒ By Elevation
- ☐ By Time

Elevation [Deg]: 10

Time [Min]: 0

MODCOD: QPSK (1/2)

Spectral Efficiency: 0.9889

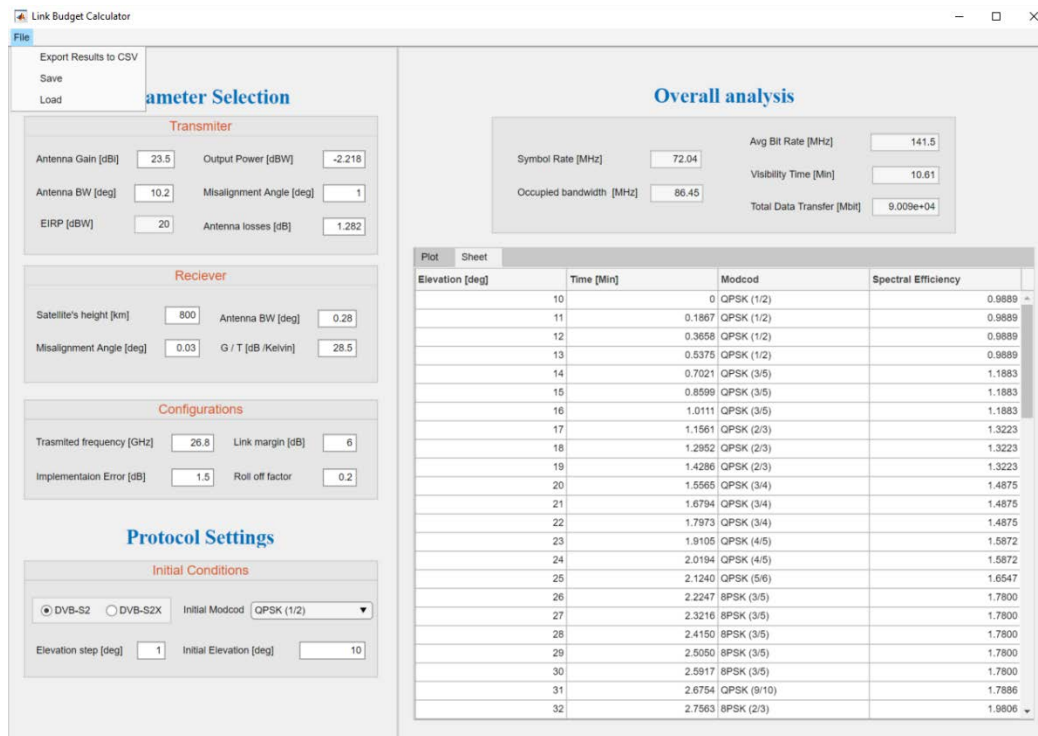
איור 16: צילום מסך של הממשק בתצורתו ההתחלית.

בצד השמאלי של הממשק מופיעים רכיבי הקלט. בחלק השמאלי העליון נמצאים רכיבי הקלט של רכיבי השידור והקליטה. בחלק השמאלי התחתון מופיעים הגדרות תקן השידור. בצד הימני של הממשק מופיעים רכיבי הפלט של הממשק. בחלק הימני העליון מופיעות תוצאות מספריות על אופן השידור. בחלק הימני התחתון מופיע ניתוח של בחירת ה-modcodes כתלות במיקום הלוויין.

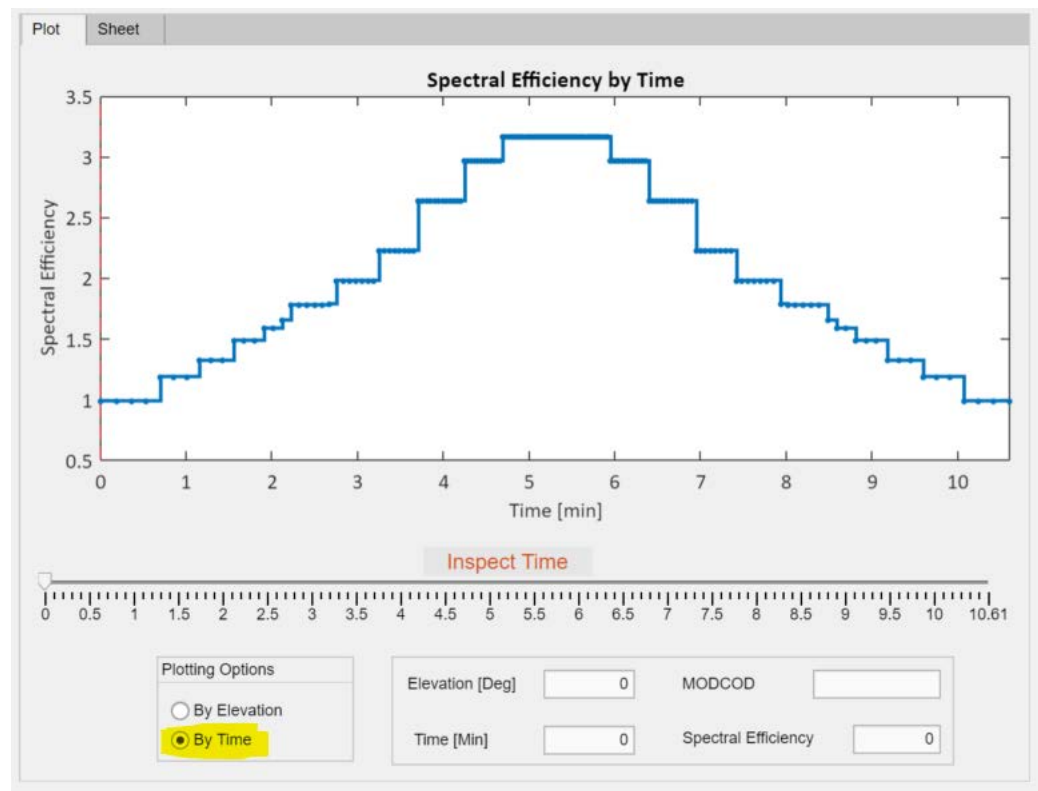
להלן הסבר על מרכיבי הממשק:

- קלט: שבח של אנטנת השידור.
- קלט: רוחב האלומה של אנטנת השידור.

3. פלט: EIRP – אפיון ציוד השידור, מחושב בעזרת הפרמטרים 1-6.
 4. קלט: הספק המוצא של המגבר.
 5. קלט: זווית חוסר היישור של אנטנת המשדר.
 6. קלט: הפסדים בערוץ השידור.
 7. קלט: זווית חוסר היישור של אנטנת המקלט.
 8. קלט: G/T – figure of merit (של המקלט).
 9. קלט: רוחב האלומה של אנטנת הקליטה.
 10. קלט: תדר השידור.
 11. קלט: שגיאת מימוש, נגרעת מיחס האות לרעש.
 12. קלט: link margin – יתירות רצויה ביחס אות לרעש.
 13. קלט: גובה הלווין מעל פני כדור הארץ.
 14. קלט: בחירת תקן השידור.
 15. קלט: צעד מעלה – צעד זווית מינימלי להחלפת Modcod.
 16. קלט: פרמטר roll-off factor.
 17. קלט: בחירת ה-modcod ההתחלתי.
 18. קלט: הזווית של הלווין מעל האופק ביחס לתחנת הקרקע ממנה מתחיל השידור.
 19. פלט: קצב שידור הסימבולים.
 20. פלט: רוחב סרט השידור.
 21. פלט: קצב שידור ביטי המידע בממוצע.
 22. פלט: זמן נראות הלווין.
 23. פלט: כמות ביטי המידע שהועברו לאורך השידור.
 24. קלט: כפתור למעבר בין תצוגה גראפית לטבלת תוצאות (טבלה מוצגת באיור 18).
 25. פלט: גרף המתאר את היעילות הספקטרלית כפונקציה של זמן או מעלה.
 26. קלט: סמן לבחינת נקודות בגרף. בחירה של ערך בסמן מציגה את המיקום של הבחירה בגרף, ואת הנתונים עבור הבחירה בפלטים 29-32.
 27. קלט: הצגת הגרף כפונקציה של זווית הלווין מעל האופק.
 28. קלט: הצגת הגרף כפונקציה של הזמן מתחילת השידור.
 29. פלט: הזווית של הלווין מעל האופק של הנקודה שנבחרה בסמן (26).
 30. פלט: הזמן מתחילת השידור של הנקודה שנבחרה בסמן (26).
 31. פלט: modcod – קונפיגורציה של השידור של הנקודה שנבחרה בסמן (26).
 32. פלט: היעילות הספקטרלית של השידור בנקודה שנבחרה בסמן (26).
 33. קלט: תפריט המאפשר טעינה ושמירה של הפרמטרים, ויצוא התוצאות ל-csv (פירוט באיור 17)
- באיור 17 מוצג התפריט הנפתח כאשר לוחצים על הכפתור File. בתפריט שלוש אפשרויות:
- Export results to csv – יצוא הנתונים מהטבלה (24 – sheet) לקובץ csv.
 - Save – שמירת קובץ המכיל את כל הפרמטרים שהוכנסו למחשבון לטעינה עתידית.
 - Load – טעינת הפרמטרים למחשבון שנשמרו בעבר בעזרת האפשרות של Save.



איור 17: תצוגה של טבלת הנתונים עבור ה-modcods האופטימליים, והצגת התפריט.



איור 18: גרף היעילות הספקטרלית כפונקציה של הזמן מתחילת השידור.

- [1] AtlantaRf, "Sattelites-LEO-MEO-GEO ", [http://www.atlantarf.com./](http://www.atlantarf.com/)
- [2] P. D. S. Wu, "CubeSats: Tiny Satellite – A Big World," Shanghai 201203, China .
- [3] M. B. Z. S.e. Gerard Maral, Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology 5th Edition, Chapter 5 .
- [4] AtlantaRf, "Antenna Overview", <http://www.atlantarf.com./>
- [5] M. B. Z S.e. Gerard Maral, Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology 5th Edition, Chapter 2 .
- [6] ETSI, "EN 302 307-1 - DVB-S2," V1.4.1, 2014-11.
- [7] ETSI, "EN 302 307-2 - DVB-S2X," V1.2.1, 2020-05.
- [8] Satellites - Orbits and Missions, Michel Capderou, Springer 2005
- [9] K. S. SERVICES, "KA-BAND AND THE FUTURE OF BIG DATA FROM SPACE_KSAT", https://www.ksat.no/globalassets/ksat/documents/ksat_white_paper.pdf.