

ארתור ס. קלארק - ממציא התקשורת הלווינית

פרופ' עלי לוי, מכללת אפקה להנדסה, תל אביב ElyL@afeka.ac.il

ארתור ס. קלארק Arthur C. Clarke, סופר מדע בדיוני וממציא מחונן, פירסם בשנת 1945 מאמר קצר ובו תיאר כיצד לווין גיאוסטציונרי (המוצב באופן קבוע בגובה 36,000 קילומטר) מהווה תחנת ממסר לגלי רדיו ומכסה כרבע מפני כדור הארץ. הרעיון המהפכני קרם עור וגידים החל משנות השישים של המאה העשרים וכיום מוצבים מאות לווינים פעילים המהווים אחת מתשתיות התקשורת המתקדמות בעולם. נסקור כאן את קורות חייו של הסופר והממציא ארתור ס. קלארק, נתאר את הרעיון הגיאוסטציונרי ונרחיב בהצגת ערוץ התקשורת בין הלווין לבין תחנת הקרקע.



הביוגרפיה של ארתור ס. קלארק

סר ארתור צ'ארלס קלארק נולד בתאריך 16 בדצמבר 1917 בסומרסט Somerset אנגליה ונפטר בתאריך 19 במרץ 2008 בסרי לנקה. את עיקר פרסומו רכש כסופר מדע בדיוני פורה במיוחד שהעלה על הכתב כמות עצומה של רעיונות מקוריים. בין היתר חזה את רשת האינטרנט העולמית ואת המחשב האישי. בשנת 1945 פירסם מאמר מדעי קצר המתאר רשת תקשורת כלל עולמית המבוססת על ממסרים קבועים במסלול גיאוסטציונרי.

קלארק זכור כילד שהירבה לקרוא ספרי מדע בדיוני וחוברות קומיקס. במלחמת העולם השנייה התגייס לחיל האוויר המלכותי ועסק במערכות המכ"ם שהגנו על בריטניה. לאחר המלחמה למד פיזיקה ומתמטיקה בקינגס קולג' בלונדון. היה חבר באגודה הבריטית הבין-פלנטרית ואף עמד בראשה. מבין שלל רעיונותיו, הרעיון של רשת לוויני תקשורת קבועים בשמים זכה להתממש החל משנות ה-60 של המאה העשרים ועד היום. משנת 1937 ועד שנת 2001 פעל כסופר מדע בדיוני (ראו את רשימת כתביו במראי המקום). בתחילה פירסם סיפורים קצרים במגזינים ולאחר מכן פרסם ספרים מלאים מפרי עטו. ספרו המפורסם ביותר הוא "אודיסאה בחלל" שגם הופק כסרט "2001 אודיסאה בחלל" על ידי הבמאי **סטנלי קיובריק** וזכה להצלחה רבה וגם לפרס האוסקר על אפקטים חזותיים מיוחדים. ספרו "מפגש עם ראמה" משנת 1973 זכה לשני פרסי המדע הבדיוני החשובים ביותר – פרס הוגו ופרס נבולה. הוא זכה בפרסים רבים נוספים וביניהם פרס היינלין היוקרתי.

בשנת 1953 התחתן עם מרילין מייפילד אך הנישואים החזיקו מעמד פחות משנה. בשנת 1956 עבר לגור בצייילון (כיום סרי לנקה) והחזיק באזרחות כפולה – של סרי לנקה ושל בריטניה. בתחילת שנות ה-2000 התפרסמו עליו כתבות שקשרו אותו לפדופיליה אך הוא נוקה מכל חשד ואף זכה לתואר אבירות בריטית. בגיל מבוגר חלה בתסמונת פוסט-פוליו והיה מרותק לכיסא גלגלים. ארתור ס. קלארק נפטר בגיל 90 בקולומבו, סרי לנקה ונקבר לצלילי הסימפוניה "כה אמר זרתוסטרא" של ריכארד שטראוס שהיתה מוסיקת הפתיחה של הסרט "2001 אודיסיאה בחלל".



ארטור ס. קלארק 1917 – 2008

הלווין הגיאו-סטציונרי

נתאר גוף כלשהו הנמצא במסלול תנועה סביב כדור הארץ. על הגוף פועלים שני כוחות מנוגדים – כוח המשיכה לכיוון מרכז כדור הארץ וכוח צנטריפוגלי לכיוון המנוגד. אם שני הכוחות שווים בדיוק, הגוף יימצא במנוחה. נסמן את השוויון בין שני הכוחות כדלקמן:

$$(1) \quad m v^2 / R = G M m / R^2$$

כאשר

m מסת הגוף

v מהירות קווית

R מרחק בין מרכז כדור הארץ לבין מרכז הגוף

G קבוע הגרביטציה העולמי $6.67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 / \text{kg}^2$

M מסת כדור הארץ $5.98 \times 10^{24} \text{ kg}$

GM ידוע כקבוע הגרביטציה של ניוטון $3.99 \times 10^{14} \text{ m}^3 / \text{sec}^2$

נזכור כי המהירות הקווית v קשורה למהירות הזוויתית ω על ידי $v = \omega R$ וכי $\omega = 2\pi/T$ היכן ש-
 T הוא זמן מחזור סיבוב כדור הארץ כלומר 24 שעות. למשוואה (1) יש פתרון יחיד עבור R והוא
 $R = 42,300 \text{ km}$ (כנגזר מהחוק השלישי "ההרמוני" של קפלר). היות ורדיוס כדור הארץ הוא
 $r = 6370 \text{ km}$ הרי יוצא שמרחק הגוף מפני כדור הארץ הוא $h = R - r = 36,000 \text{ km}$.
 זהו הרעיון המרכזי של הלוויין הגיאוסטציונרי - אם נצליח להביא לוויין למרחק 36,000
 קילומטר מפני כדור הארץ, הוא ייכנס למסלול קבוע של עמידה במקום אחד. זמן המחזור שלו
 יהיה זהה לזמן המחזור של סיבוב כדור הארץ, כלומר 24 שעות והמהירות הקווית שלו תהיה
 3070 m/sec . ארתור ס. קלארק הגה את הרעיון שבמסלול הגיאוסטציונרי יוצבו מספר לוויינים
 שימשו כממסרי רדיו ויהוו רשת תקשורת אולטימטיבית המכסה את כל כדור הארץ ללא
 הסתרות וללא הפרעות. הוא גם חישב ומצא כי שלושה לוויינים שיוצבו מעל קו המשווה במרווחים
 שווים, יכסו את מרבית שטח כדור הארץ (פרט לאזורי הקטבים). איור 1 מציג את העמוד הראשון
 של המאמר שפירסם קלארק באוקטובר 1945 בעיתון Wireless World. ניתן לראות באיור
 הראשון את זמן המחזור ואת המהירות הקווית של הלוויין בתלות במרחק ממרכז כדור הארץ
 ואכן התוצאה זהה בדיוק לחישוב שהובא לעיל. איור 2 מציג את העמוד השני של המאמר וניתן
 לראות תרשים של כיסוי כדור הארץ על ידי רשת תקשורת רב תכליתית ועוד תרשים המוכיח כי
 שלושה לוויינים, אם יוצבו למשל בקווי אורך 30E, 150E, 90W יכסו את מרבית שטח כדור
 הארץ. כמו כן קלארק חישב את מאזן הערוץ והגיע לתוצאה שהלוויין צריך לשדר 1.2 kW
 באמצעות אנטנת צלחת עם שבח $G = 80$. קלארק תיאר כיצד רקטה תוכל להביא את הלוויין
 למסלול וכיצד הלוויין יפעל באמצעות מקור אנרגיה גרעינית זעיר.

EXTRA-TERRESTRIAL RELAYS

Can Rocket Stations Give World-wide Radio Coverage?

By ARTHUR C. CLARKE

ALTHOUGH it is possible, by a suitable choice of frequencies and routes, to provide telephony circuits between any two points or regions of the earth for a large part of the time, long-distance communication is greatly hampered by the peculiarities of the ionosphere, and there are even occasions when it may be impossible. A true broadcast service, giving constant field strength at all times over the whole globe would be invaluable, not to say indispensable, in a world society.

Unsatisfactory though the telephony and telegraph position is, that of television is far worse, since ionospheric transmission cannot be employed at all. The service area of a television station, even on a very good site, is only about a hundred miles across. To cover a small country such as Great Britain would require a network of transmitters, connected by coaxial lines, waveguides or VHF relay links. A recent theoretical study¹ has shown that such a system would require repeaters at intervals of fifty miles or less. A system of this kind could provide television coverage, at a very considerable cost, over the whole of a small country. It would be out of the question to provide a large continent with such a service, and only the main centres of population could be included in the network.

The problem is equally serious when an attempt is made to link television services in different parts of the globe. A relay chain several thousand miles long would cost millions, and transoceanic services would still be impossible. Similar considerations apply to the provision of wide-band frequency modulation and other services, such as high-speed facsimile which are by their nature restricted to the ultra-high-frequencies.

Many may consider the solution proposed in this discussion too far-fetched to be taken very seriously. Such an attitude is unreasonable, as everything envisaged here is a

logical extension of developments in the last ten years—in particular the perfection of the long-range rocket of which V2 was the prototype. While this article was being written, it was announced that the Germans were considering a similar project, which they believed possible within fifty to a hundred years.

Before proceeding further, it is necessary to discuss briefly certain fundamental laws of rocket propulsion and "astronautics." A rocket which achieved a sufficiently great speed in flight outside the earth's atmosphere would never return. This "orbital" velocity is 8 km per sec. (5 miles per sec), and a rocket which attained it would become an artificial satellite, circling the world for ever with no expenditure of power—a second moon, in fact.

the atmosphere and left to broadcast scientific information back to the earth. A little later, manned rockets will be able to make similar flights with sufficient excess power to break the orbit and return to earth.

There are an infinite number of possible stable orbits, circular and elliptical, in which a rocket would remain if the initial conditions were correct. The velocity of 8 km/sec. applies only to the closest possible orbit, one just outside the atmosphere, and the period of revolution would be about 90 minutes. As the radius of the orbit increases the velocity decreases, since gravity is diminishing and less centrifugal force is needed to balance it. Fig. 1 shows this graphically. The moon, of course, is a particular case and would lie on the curves of Fig. 1 if they were produced. The proposed German space-stations

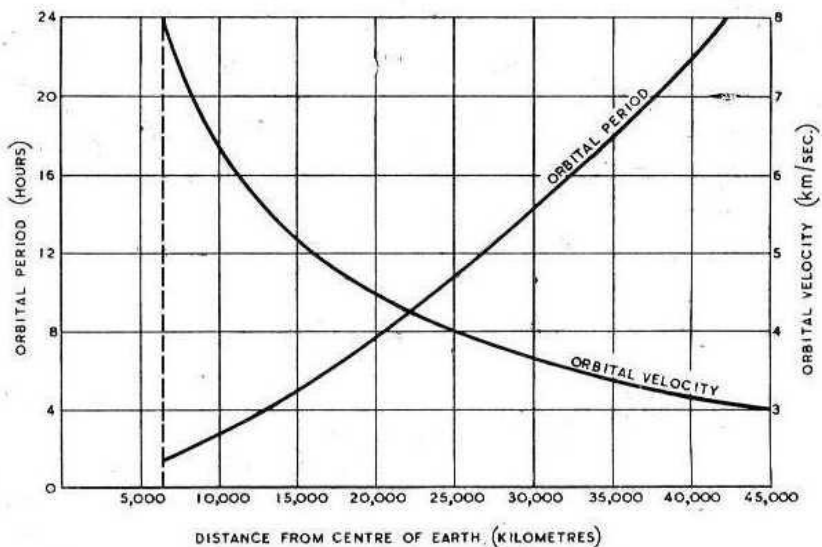


Fig. 1. Variation of orbital period and velocity with distance from the centre of the earth.

The German transatlantic rocket A10 would have reached more than half this velocity.

It will be possible in a few more years to build radio controlled rockets which can be steered into such orbits beyond the limits of

would have a period of about four and a half hours.

It will be observed that one orbit, with a radius of 42,000 km, has a period of exactly 24 hours. A body in such an orbit, if its plane coincided with that of the

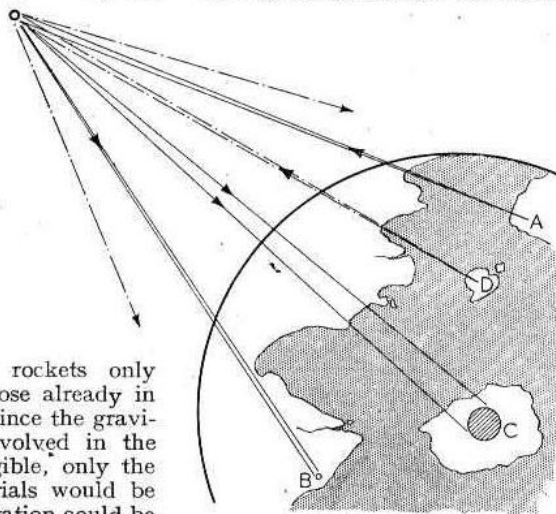
Extra-terrestrial Relays—

earth's equator, would revolve with the earth and would thus be stationary above the same spot on the planet. It would remain fixed in the sky of a whole hemisphere and unlike all other heavenly bodies would neither rise nor set. A body in a smaller orbit would revolve more quickly than the earth and so would rise in the west, as indeed happens with the inner moon of Mars.

Using material ferried up by rockets, it would be possible to construct a "space-station" in such an orbit. The station could be provided with living quarters, laboratories and everything needed for the comfort of its crew, who would be relieved and provisioned by a regular rocket service. This project might be undertaken for purely scientific reasons as it would contribute enormously to our knowledge of astronomy, physics and meteorology. A good deal of literature has already been written on the subject.²

Although such an undertaking may seem fantastic, it requires

Fig. 2. Typical extra-terrestrial relay services. Transmission from A being relayed to point B and area C; transmission from D being relayed to whole hemisphere.



for its fulfilment rockets only twice as fast as those already in the design stage. Since the gravitational stresses involved in the structure are negligible, only the very lightest materials would be necessary and the station could be as large as required.

Let us now suppose that such a station were built in this orbit. It could be provided with receiving and transmitting equipment (the problem of power will be discussed later) and could act as a repeater to relay transmissions between any two points on the hemisphere beneath, using any frequency which will penetrate the ionosphere. If directive arrays were used, the power require-

ments would be very small, as direct line of sight transmission would be used. There is the further important point that arrays on the earth, once set up, could remain fixed indefinitely.

Moreover, a transmission received from any point on the hemisphere could be broadcast to the whole of the visible face of

necessary evidence by exploring for echoes from the moon. In the meantime we have visual evidence that frequencies at the optical end of the spectrum pass through with little absorption except at certain frequencies at which resonance effects occur. Medium high frequencies go through the E layer twice to be reflected from the F

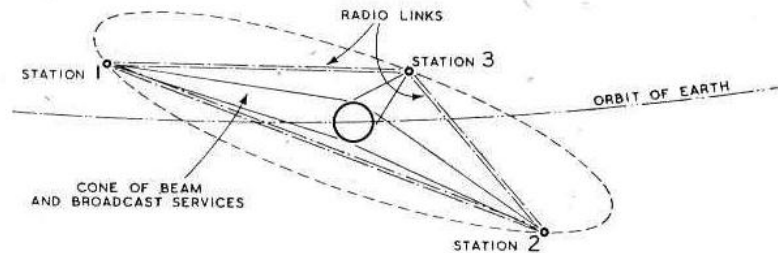


Fig. 3. Three satellite stations would ensure complete coverage of the globe.

the globe, and thus the requirements of all possible services would be met (Fig. 2).

It may be argued that we have as yet no direct evidence of radio waves passing between the surface

layer and echoes have been received from meteors in or above the F layer. It seems fairly certain that frequencies from, say, 50 Mc/s to 100,000 Mc/s could be used without undue absorption in the atmosphere or the ionosphere.

A single station could only provide coverage to half the globe, and for a world service three would be required, though more could be readily utilised. Fig. 3 shows the simplest arrangement. The stations would be arranged approximately equidistantly around the earth, and the following longitudes appear to be suitable:—

- 30 E—Africa and Europe.
- 150 E—China and Oceania.
- 90 W—The Americas.

The stations in the chain would be linked by radio or optical beams, and thus any conceivable beam or broadcast service could be provided.

The technical problems involved in the design of such stations are extremely interesting,³ but only a few can be gone into here. Batteries of parabolic reflectors would be provided, of apertures depending on the frequencies employed. Assuming the use of 3,000 Mc/s waves, mirrors about a metre across would beam almost all the power on to the earth. Larger reflectors could be used to illuminate single countries or regions for the more restricted services, with con-

of the earth and outer space; all we can say with certainty is that the shorter wavelengths are not reflected back to the earth. Direct evidence of field strength above the earth's atmosphere could be obtained by V2 rocket technique, and it is to be hoped that someone will do something about this soon as there must be quite a surplus stock somewhere! Alternatively, given sufficient transmitting power, we might obtain the

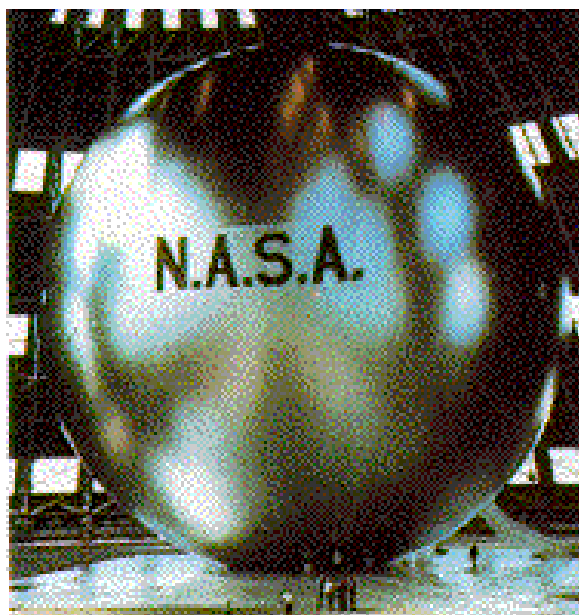
איור 2 העמוד השני במאמר המקורי של ארתור ס. קלארק משנת 1945

התממשות החזון של ארתור ס. קלארק החלה בשנת 1957 עם שיגורו של הלוויין הראשון בעולם, הלא הוא **ספוטניק 1** (איור 3).



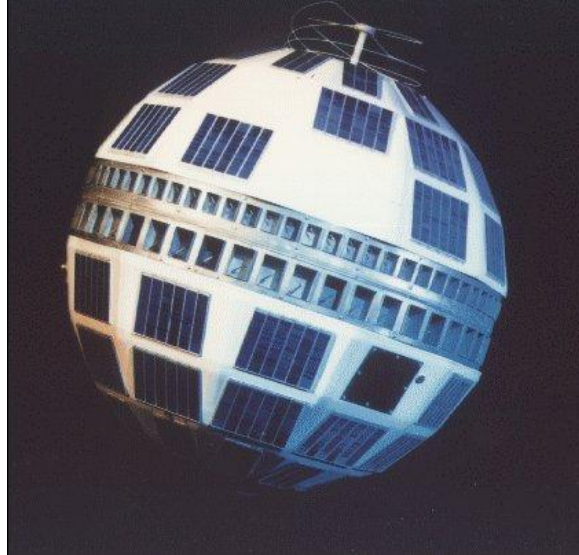
איור 3 ספוטניק 1

אחד הלוויינים הראשונים היה הלוויין האמריקאי **ECHO** (איור 4) ששוגר בשנת 1960 ולמעשה נבנה כבלון ענק עם ציפוי מתכתי ותוכנן לשמש כמחזיר פסיבי במסלול הגיאוסטציונרי שתואר לעיל.



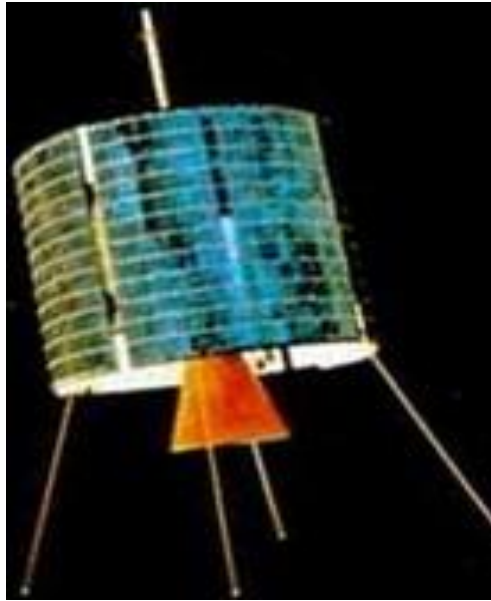
איור 4 ECHO 1

לוויין התקשורת האקטיבי הראשון (קולט אותות מתחנת קרקע, מעבד אותם ומשיב אותות חזרה אל מנויים בכדור הארץ) היה **TELSTAR 1** (איור 5) ששוגר בשנת 1962 והדגים שידורי טלוויזיה, טלפוניה ופקס. אחריו שוגרו לוויינים נוספים ועולם טכנולוגי שלם זכה לפריחה רבתי. התדרים שהוקצו ללוויינים אלה הם: 4/6 GHz, 11/14 GHz, ולאחרונה גם 20/30 GHz. קלארק הציע במאמרו להשתמש בתדר 3 GHz שנראה לו מעשי באותה עת.



איור 5 TELSTAR 1

בשנת 1964 הוקם ארגון **INTELSAT** שפעל רבות כדי להפוך את הרשת הגיאו-סטציונרית לרשת תקשורת פעילה ורבת משתמשים. במסגרת זו שוגרו לוויינים רבים אשר הראשון בהם מודגם באיור 6. הלוויינים הגיאו-סטציונרים מכסים שטח עצום ללא הסתרות ומסוגלים לספק שירותי תקשורת למנויים מבודדים ללא צורך בהקמת תשתית קרקעית. הם גדולים ויקרים מאד ודורשים תיקוני מסלול לעיתים קרובות, כך שאורך החיים שלהם מוגבל עד 8-12 שנים ואז הם סוטים ממקומם ומוחלפים על ידי לוויינים חדשים. בעיקרון נקבע תקן עולמי של מרווח זוויתי של 2 מעלות בין הלוויינים, כך שמספר הלוויינים הפעילים בכל זמן נתון אמור להיות 180 בלבד (לפי ויקיפדיה, ברבעון השני של שנת 2015 משייטים שם 194 לוויינים). עם השנים התפתחו מאד לווייני מסלול נמוך (LEO) ומסלול בינוני (MEO), כמו גם מסלולים אליפטיים במרחקים משתנים מכדור הארץ. לוויינים במסלול נמוך ובינוני מתאימים לניווט, חישה מרחוק ותקשורת מול טרמינלים ניידים. הם זולים בהרבה ואין צורך בתיקוני מסלול עדינים במיוחד. הלוויינים הגיאו-סטציונרים עדיין מהווים תשתית חשובה לשידורים רחבי סרט המגיעים בו זמנית אל מספר רב של מנויים ובפרט טלוויזיה, כפי שחזה קלארק כבר בשנת 1945. חידושים טכנולוגיים רבים, כגון אנטנה מרובת אלומות המכוונת את התקשורת באופן דינאמי אל אזורים שונים, שימוש חוזר בתדרים ותקשורת בין לוויינים, מצביעים על כך שלווייני המסלול הגיאו-סטציונרי עדיין מושכים תשומת לב רבה ומושקעים בהם משאבים ניכרים. הלוויין המתקדם ביותר בסדרת **INTELSAT** המיועד לשיגור בשנת 2016 מוצג באיור 7.



איור 6 INTELSAT 1



איור 7 INTELSAT 29e

משוואת התקשורת בערוץ הגיאו-סטציונרי

משוואת התקשורת הלוויינית היא מקרה פרטי של משוואת התקשורת על שם הרלד פריס

$$(2) \quad P_r / P_t = G_t G_r \lambda^2 / (4\pi)^2 R^2$$

כאשר

P_r	הספק נקלט
P_t	הספק משודר
G_t	שבח אנטנה משדרת
G_r	שבח אנטנה קולטת
λ	אורך גל
R	מרחק בין המקלט והמשדר

נזכיר כי שבח אנטנה G מתקבל על ידי

$$(3) \quad G = 4\pi A_{eff} \eta / \lambda^2$$

כאשר

A_{eff}	השטח האפקטיבי של האנטנה
η	נצילות האנטנה (בצלחות היא בדרך כלל 0.7)

בתקשורת לוויינים מקובל לנסח את המשוואה בצורה שונה במקצת. הגורם המרכזי שאותו מעוניינים להשיג הוא C/N Carrier to Noise Ratio שמשמעותו דומה במידה רבה ליחס אות לרעש S/N . הרעש התרמי במקלט הוא כידוע

$$(4) \quad N = kTBF$$

כאשר

k	קבוע בולצמן $1.38 \times 10^{-23} [W/^\circ K/Hz]$
T	טמפרטורת רעש של המקלט במעלות קלווין
B	רוחב הסרט במקלט
F	ספרת הרעש

בתקשורת לוויינים (ובמיוחד במסלול גיאו-סטציונרי) נרצה לבודד את C/N כלומר לקבל את היחס בין הספק הקליטה לבין הרעש התרמי. כפי שנראה להלן, יחס זה קשור ישירות לרמת השגיאות הצפויה בערוץ. נרשום אפוא את משוואת הערוץ באופן הבא

$$(5) \quad C/N = (P_t G_t) \frac{\lambda^2}{(4\pi)^2 R^2 L} (G_r / T) \frac{1}{kBF}$$

Pt Gt	EIRP = Effective Isotropic Radiated Power
$\lambda^2 / (4\pi)^2 R^2$	Free Space Path Loss
L	Atmospheric Loss
Gr/T	Gain (receive) over Temperature

אנו רואים אפוא חלוקה קומפקטית של משוואת הערוץ לשלושה מרכיבים :

$$\begin{array}{rcl}
 \text{מרכיב השידור} & \text{EIRP} = \text{Pt Gt} & \\
 \text{הפסדי המעבר בתווך} & \lambda^2 / (4\pi R)^2 L & \\
 \text{מרכיב הקליטה} & (\text{Gr/T}) / \text{kBF} &
 \end{array}$$

בנקודה זו עלינו לעבור לסקלה לוגריתמית של דציבלים, המוגדרת לפי

$$(6) \quad A \text{ (dB)} = 10 \log_{10} A$$

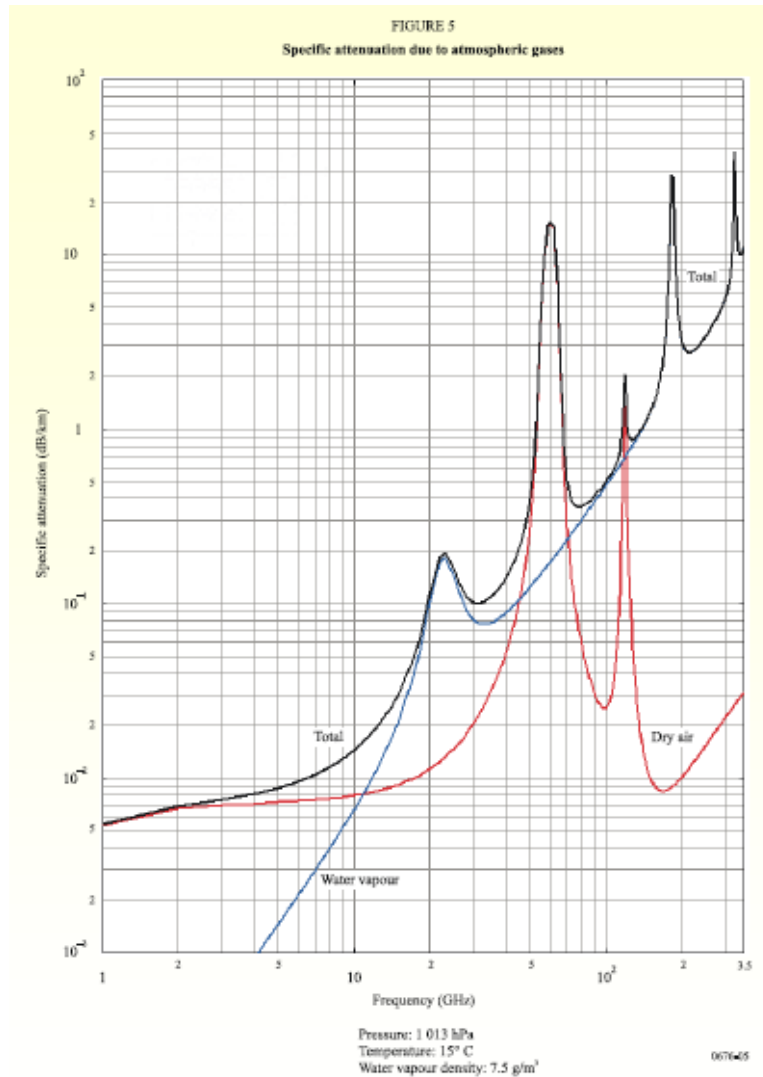
המאפשרת לעבור מכפל וחילוק לחיבור וחיסור

$$(7) \quad C/N \text{ (dB)} = \text{EIRP (dBW)} + \text{Path Loss (dB)} + (\text{Gr/T}) \text{ (dB)} - \text{kBF (dB)}$$

כאשר מדובר בהספקים, ניתן להתייחס להספק המשודר ביחס להספק נומינלי של 1 Watt ואז לבטא את ההספק ביחידות dBW

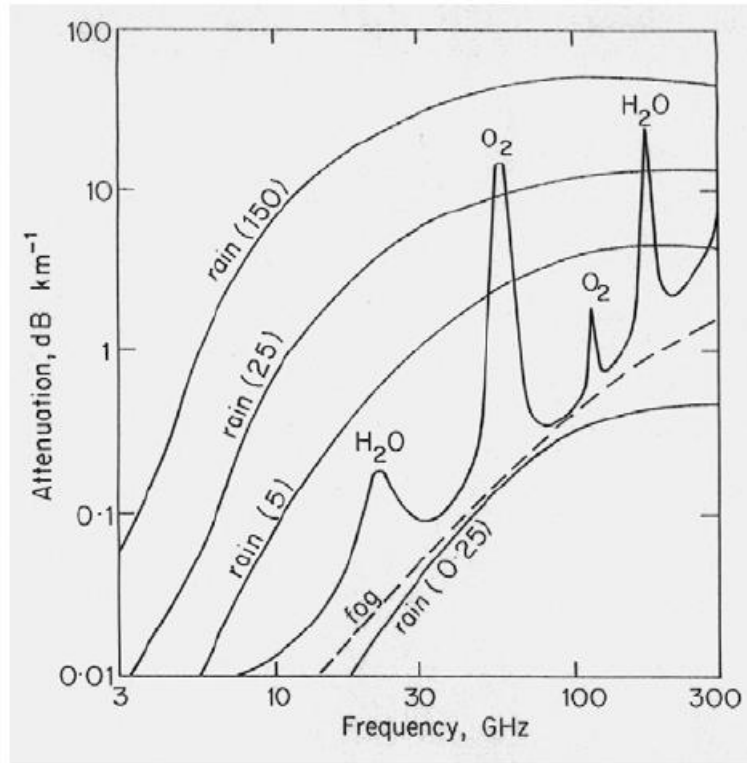
$$(8) \quad \text{Pt (dBW)} = 10 \log_{10} (\text{Pt in Watts} / 1 \text{ Watt})$$

ההפסד האטמוספרי אינו נתון קבוע אלא הוא פונקציה של התדר, של הגובה מעל פני הקרקע ושל מזג האוויר. הקורא המתעניין יוכל למצוא בספרות המקצועית (ראו רשימת ספרי עיון במראי המקום) מאות דפי נתונים וגרפים רלבנטיים, אך ביריעה זו נביא רק טיפה מן היס. איור 8 מציג גרף קלאסי של בליעה אטמוספרית במזג אוויר בהיר (עם ובלי אדי מים). רואים שיש תדרים שבהם הבליעה חזקה במיוחד עקב נוכחות מולקולות מסוימות (22 GHz, 60 GHz, 110 GHz) וביניהם יש תדרים שבהם הבליעה פחות חזקה (נקראים "חלונות אטמוספריים") כגון 35 GHz, 94 GHz. למשל בתדר 10 GHz הבליעה הכוללת הטיפוסית היא 0.02 dB/km ולאורך מעבר מלא באטמוספירה בין תחנת הקרקע לבין הלווין (נניח שהאטמוספירה היא באורך כולל של 12 km) הבליעה תהיה נמוכה מ-0.3 dB. לעומת זאת, בתדר 22 GHz שאינו מומלץ כמובן לתקשורת לוויינים, מגיעה הבליעה עקב נוכחות מולקולות מים באוויר עד 0.15 dB/km.



איור 8 בליעה באטמוספירה בתלות בתדר, עבור אוויר יבש ואוויר עם אדי מים, הבליעה ניתנת ביחידות dB/km

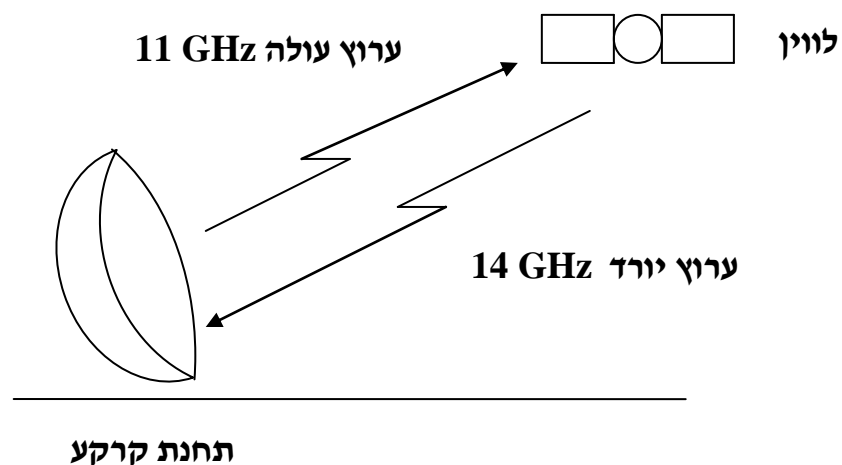
נתונים טיפוסיים עבור הבליעה בגשם ובערפל מובאים באיור 9. רואים שהבליעה כתוצאה מגשם אינה פונקציה חדה של התדר, אך בתדר 30 GHz למשל, הבליעה עלולה להגיע עד כדי 1 dB/km בגשם לא חזק במיוחד של 5 מילימטר לשעה, כלומר עלולה בהחלט לחסום את התקשורת הלוויינית.



איור 9 בליעה באטמוספירה בתלות בתדר עבור גשם וערפל

על פי רוב התקשורת הלוויינית הפועלת בתדרי המיקרוגלים אינה עובדת כראוי בתנאי מזג אוויר קשים. מקובל לנקוב בזמינות ערוץ שנתית על פי מצבי מזג אוויר קיצוניים. למשל ערוץ בזמינות 99% יפסיק לפעול 1% ממשך השנה שהם 86 שעות ואילו ערוץ בזמינות 99.99% יחדל מלפעול רק כשעה במהלך שנה שלמה.

נמחיש את משוואת הערוץ הלווייני בעזרת דוגמה מייצגת - ערוץ תקשורת עולה UPLINK בתדר 11 GHz וערוץ תקשורת יורד DOWNLINK בתדר 14 GHz כמתואר באיור 10.



איור 10 ערוץ עולה וערוץ יורד שבהם הלוויין משמש כממסר-משיב

נתוני הערוץ העולה הם כדלקמן:

משדר

הספק שידור 100 W
אנטנת צלחת בקוטר 2.4 m

תויד

מרחק נומינלי בין התחנה הקרקעית והלווין $R = 36,000$ km
 $(\lambda/4\pi R)^2 = -204.4$ dB

הפסד אטמוספרי $L = 1$ dB

מקלט

אנטנת צלחת בקוטר 1.2 m
טמפרטורת מערכת 400°K
רוחב סרט 100 MHz
ספרת רעש 2 dB

הצבת שבח האנטנות

$$G_t = 4\pi (\pi r^2) \eta / \lambda^2 = 46.7 \text{ dBi}$$

$$\text{EIRP} = 46.7 + 20 = 66.7 \text{ dBW}$$

$$G_r = 4\pi (\pi r^2) \eta / \lambda^2 = 40.7 \text{ dBi}$$

$$G_r/T = 40.7 - 26 = 14.7 \text{ dB}/^\circ\text{K}$$

תוצאה

$$C/N = \text{EIRP} - \text{Loss} + G/T - \text{kBF} = 22.6 \text{ dB}$$

נתוני הערוץ היורד הם כדלקמן:

משדר

הספק שידור 50 W
אנטנת צלחת בקוטר 1.2 m

תויד

מרחק נומינלי בין התחנה הקרקעית והלווין $R = 36,000$ km
 $(\lambda/4\pi R)^2 = -206.5$ dB

הפסד אטמוספרי $L = 2$ dB

מקלט

אנטנת צלחת בקוטר 2.4 m
טמפרטורת מערכת 200°K
רוחב סרט 100 MHz
ספרת רעש 2 dB

הצבת שבח האנטנות

$$G_t = 4\pi (\pi r^2) \eta / \lambda^2 = 40.7 \text{ dBi}$$

$$\text{EIRP} = 40.7 + 17 = 57.7 \text{ dBW}$$

$$G_r = 4\pi (\pi r^2) \eta / \lambda^2 = 46.7 \text{ dBi}$$

$$G_r/T = 46.7 - 23 = 23.7 \text{ dB}/^\circ\text{K}$$

תוצאה

$$C/N = \text{EIRP} - \text{Loss} + G/T - \text{kBF} = 19.5 \text{ dB}$$

הקורא חד העין שם אולי ליבו לכך שקלארק הציע שבח אנטנה של $G = 80 = 19$ dBi באנטנת הלווין ואילו בדוגמה שלנו השבח גבוה בהרבה. האם יש כאן טעות? התשובה היא לא, אבל.

קיים קשר פיזיקלי חד משמעי בין השבח לבין רוחב האלומה. במקרה של אנטנות צלחת מקובל להניח

$$(9) \quad \Theta = 70 \lambda / d$$

כאשר

Θ רוחב אלומת הקרינה במעלות
 d ממד האנטנה (בצלחת הקוטר)

מהצבת משוואה (9) במשוואה (3) נוכל לבטא את הקשר בין שבח האנטנה לבין רוחבי האלומה באזימוט ובהגבהה

$$(10) \quad G = 32000 / \Theta_{az} \Theta_{el}$$

ארתור ס. קלארק רצה שהלוויין יכסה עם האלומה הראשית שלו את כדור הארץ בדיוק. עבור מרחק של 36,000 ק"מ זווית הפתיחה של האלומה, כך שעיקבת הקרינה (spot) תתאים לקוטר כדור הארץ, היא כ-18 מעלות (גם באזימוט וגם בהגבהה). אם ניקח מרווח נוסף ונאיר את כדור הארץ בזווית 20 מעלות, נוכל לשרת גם מטוסים החורגים מקוטר כדור הארץ. אם נציב 20 מעלות במשוואה (10) נקבל שבח אנטנה $G = 80$ בדיוק כפי שהציע קלארק. מצד שני, חלק מלוויני התקשורת מתוכננים לשרת מנויים בשטח קטן יותר, כגון אגן הים התיכון. על כן בדוגמה המספרית בחרנו שבח גבוה בהרבה אבל כיסוי זוויתי מוקטן.

אין אנו מתפלאים במיוחד מדוע $(C/N)_{uplink} > (C/N)_{downlink}$ מצב זה נובע מן העובדה שהלוויין מסוגל לשדר בהספק נמוך יותר מאשר תחנת הקרקע וטמפרטורת המקלט הקרקעי נמוכה יותר מטמפרטורת המקלט הלווייני. באופן עקבי תדר הערוץ היורד נבחר להיות גבוה במקצת מתדר הערוץ העולה. היות שהתקשורת היא ספרתית, קיים קשר בין C/N בערוץ העולה ובערוץ היורד המתבטא על ידי יחס C/N הכולל

$$(11) \quad 1/(C/N)_{total} = 1/(C/N)_{downlink} + 1/(C/N)_{uplink}$$

כך שבדוגמה המספרית, יחס C/N הכולל הוא כ-20 dB. האם ערך זה מתאים לדרישות? עבור כל שיטת אפנון ספרתי יחס האות לרעש קובע את רמת השגיאות. נניח שיטת אפנון ספרתית המקובלת בלוויינות מסוג QPSK (או 4PSK). יעילות האפנון נרשמת בדרך כלל על פי הפרמטר E_b/N_0 שהוא אנרגיה פר ביט בודד פר צפיפות הרעש התרמי. הקשר בין הפרמטר E_b/N_0 לבין C/N נתון על ידי

$$(12) \quad C/N = E_b/N_0 \times B/R$$

כאשר

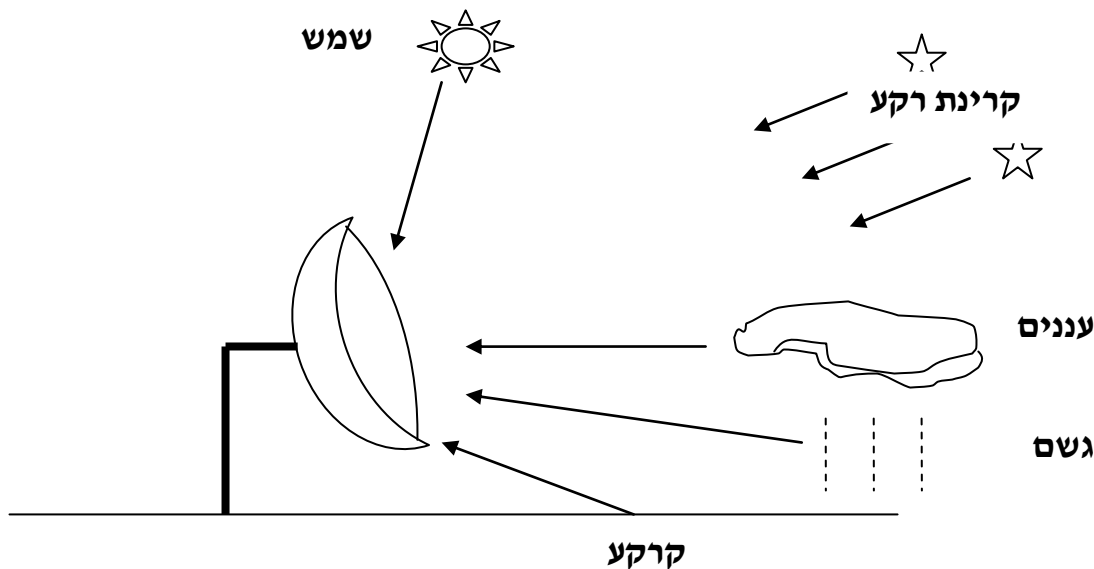
B (Hz) רוחב הסרט
 R (bps) קצב המידע
 B/R יעילות ספקטרלית של האפנון

למשל באפנון QPSK שלגביו ידוע כי $R/B = 2$ אם נבחר קצב שגיאות של 10^{-5} נקבל כי הערך הדרוש הוא $E_b/N_0 = 10$ dB כלומר לפי משוואה (12) $C/N = 13$ dB.

בהינתן אפוא שהערך הנדרש הוא $C/N = 13$ dB והערך המתקבל ממשוואת הערוץ הוא $C/N = 20$ dB, ניתן בידנו "עודף" של 7 dB במאזן הערוץ. עודף זה יתבזבז על נקלה על ידי הפסד מסוים בהכוונת האלומה של האנטנות Pattern Loss, בהפסד עקב אי התאמה בקיטובי האנטנות או עקב השתנות קיטוב הגלים בתווך Polarization Loss, בקליטת שידורים לא רצויה מערוצים שכנים Interferences וכמובן מגשם קל הניתך על הקרקע באיזור התחנה הקרקעית. סיכומו של דבר, עודף ערוץ Link Margin של 5-10 dB הוא בהחלט מוצדק ומעשי כך שנתוני הדוגמה שלעיל, וביחוד הספקי השידור, גודל האנטנות ורוחב הסרט הם ריאליים.

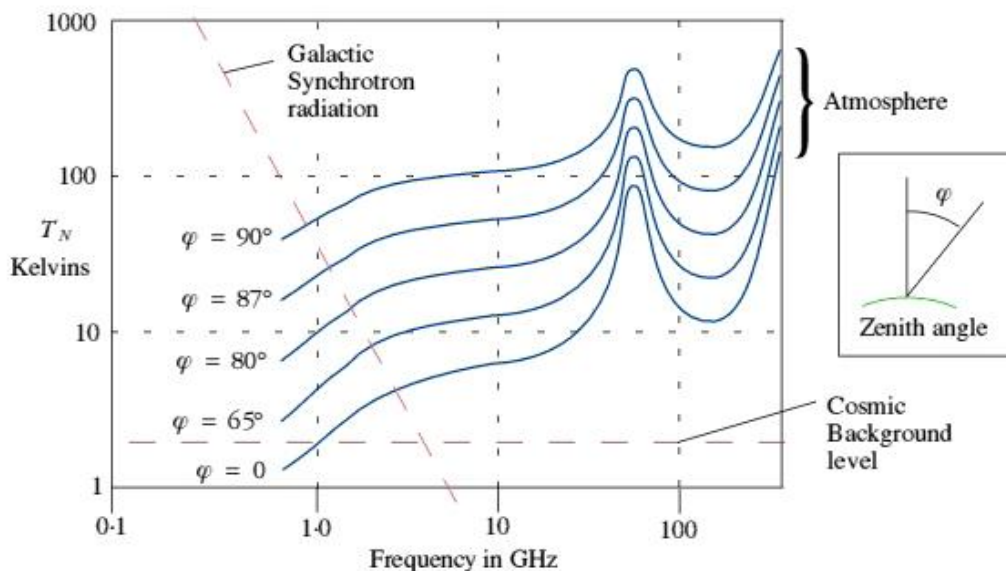
נושא אחרון הוא "טמפרטורת המערכת" הנקובה בתוך G/T ולכך נקדיש את המשך סקירת הערוץ. כל גוף פיזיקלי הנמצא בטמפרטורה כלשהי מעל טמפרטורת האפס המוחלט ($0^\circ K$) פולט קרינה אלקטרומגנטית אשר ניתנת לביטוי על ידי "טמפרטורת רעש" אפקטיבית או טמפרטורת הבהירות (Brightness) T_b . כאשר אנטנת רדיו מכוונת אל גוף פיזי כלשהו, הרעש הטבעי שהגוף פולט נכנס לתוך האנטנה דרך האונה הראשית או דרך אונות הצד כמודגם באיור 11. לעיתים קרובות משתמשים במונח "טמפרטורת השמים" כדי לתאר כניסת רעש הנובע מן הסביבה הרחוקה של האנטנה. טמפרטורת הבהירות של עצמים רחוקים המשוקפת לתוך האנטנה מקבלת ערכים טיפוסיים שבין $4^\circ K$ עד $300^\circ K$ בתלות בזווית ההטייה של האנטנה ביחס לאופק ובתנאי מזג האוויר.

במקרה נדיר במיוחד שבו האנטנה מכוונת בדיוק מול השמש, טמפרטורת השמים שלה עשויה להגיע לאלפי מעלות. גם ארתור ס. קלארק חזה אפשרות כזאת ואף חישב את ההסתברות שלווניים "יסונוורו" על ידי השמש. נציין גם את התרומה של טמפרטורת הרקע הקוסמית ($4^\circ K$) שמקורה במפץ הגדול והמגיעה באופן אחיד מכל כיוון במרחב.



איור 11 טמפרטורות הסביבה הנכנסות לתוך האנטנה

איור 12 מציג את טמפרטורת השמים הנובעת מאפקטים של כדור הארץ ושל האטמוספירה בתלות בתדר ובזווית הראייה של האנטנה. ניתן לראות כי בתדר 10 GHz אנטנה המסתכלת לכיוון האופק "רואה" טמפרטורת שמים של 100°K ואילו אנטנה המסתכלת לכיוון 30 מעלות מעל האופק (מצב סביר בתקשורת לוויינים גיאוסטציונרית) רואה טמפרטורת שמים של 20°K.



איור 12 טמפרטורת השמים בתלות בתדר ובזווית ההסתכלות

נסמן את טמפרטורת האנטנה הנובעת מטמפרטורת השמים בסימון T_A . טמפרטורה זו מציינת את החלק היחסי של הופעת האובייקט בעל טמפרטורת בהירות $T_B(\theta, \phi)$ בתוך עקום הקרינה המרחבי של האנטנה $G(\theta, \phi)$

$$(13) \quad T_A = \frac{\iint T_B(\theta, \phi) G(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi}{\iint G(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi}$$

גם האנטנה עצמה מהווה מקור רעש הנובע מן הטמפרטורה הפיזית שלה T_P . נסמן את טמפרטורת הרעש העצמי של האנטנה בסימון T_{AP} הנתונה על ידי

$$(14) \quad T_{AP} = [(1/e_A) - 1] T_P$$

הפרמטר e_A מבטא את היעילות התרמית של האנטנה וערכיו הטיפוסיים הם בין 0.8 עד 0.9. ממשוואה (14) רואים שהשפעת הטמפרטורה הפיזית של האנטנה היא קטנה יחסית כאשר e_A קרוב ל-1.

הטמפרטורה האפקטיבית בהדקי האנטנה היא אפוא $T_A + T_{AP}$. טמפרטורה זו עוברת לתוך המקלט דרך קו תמסורת ו/או רכיבים נוספים המייצרים נוחות כלשהו. נסמן את היעילות של העברת הספק הרעש מן האנטנה אל המקלט באות l_a המבוטאת בערך מוחלט (קטן מ-1). נעיר כי היעילות של העברת ההספק קשורה למונח המוכר יותר של הפסד L_a ביחידות dB על ידי הקשרים

$$(15) \quad L_a \text{ [dB]} = -10 \log_{10} (l_a)$$

$$- L_a/10$$

$$(16) \quad l_a = 10^{-L_a/10}$$

למשל $L_a = 0.5 \text{ dB}$ מתאים לערך $l_a = 0.9$

$L_a = 1 \text{ dB}$ מתאים לערך $l_a = 0.8$

$L_a = 3 \text{ dB}$ מתאים לערך $l_a = 0.5$

איור 13 מדגים את המעבר של טמפרטורת האנטנה לתוך המקלט. בהדקי האנטנה הטמפרטורה היא $T_A + T_{AP}$ ובהדקי המקלט הטמפרטורה היא T_a

$$(17) \quad T_a = T_A l_a + T_{AP} l_a + T_o (1 - l_a)$$

כאשר

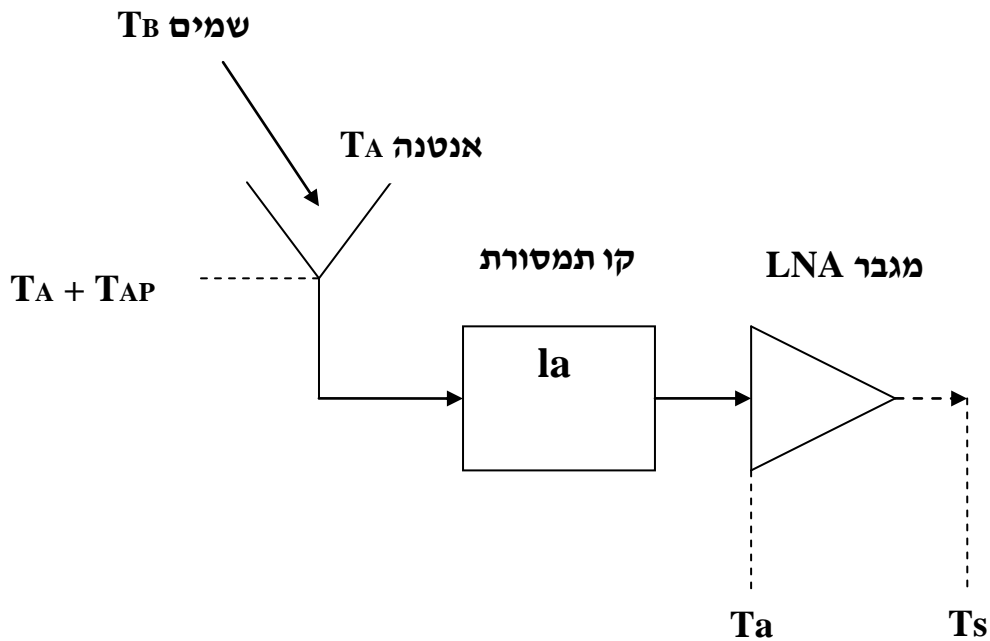
T_a	טמפרטורת אנטנה בהדקי המקלט
T_A	טמפרטורת אנטנה הנובעת מטמפרטורת שמים
T_{AP}	טמפרטורת אנטנה הנובעת מטמפרטורה פיזית
$T_o = 290^\circ\text{K}$	טמפרטורת ייחוס
l_a	יעילות העברת הספק הרעש עד המגבר

לבסוף, טמפרטורת האנטנה מתווספת לטמפרטורת הרעש של המקלט T_r וביחד הן מהוות את טמפרטורת המערכת T_{sys}

$$(18) \quad T_{sys} = T_a + T_r$$

כאשר

$$(19) \quad T_r = (\text{Noise Figure} - 1) T_o$$



איור 13 טמפרטורת הרעש באנטנה ובמקלט

דוגמאות מספריות

נמצא את טמפרטורת המערכת של תחנת קרקע כאשר טמפרטורת השמים היא $T_A = 20^\circ\text{K}$. האנטנה נמצאת בטמפרטורת סביבה $T_p = 290^\circ\text{K}$ והיעילות התרמית שלה $ea = 0.8$ לכן $T_{AP} = 73^\circ\text{K}$. נניח $la = 0.8$ ונקבל בהדקי המקלט $T_a = 132^\circ\text{K}$. בהנחה שהמקלט עצמו מוסיף רעש מועט $T_r = 75^\circ\text{K}$ (שקול לספרת רעש $NF = 1.25 = 1 \text{ dB}$), הרי טמפרטורת הרעש המערכתית בתחנת הקרקע תהיה 207°K .

נמצא את טמפרטורת המערכת של המקלט הלוויני. כאשר הלוויין מכוון לכדור הארץ טמפרטורת השמים שלו היא $T_A = 300^\circ\text{K}$ (טמפרטורת כדור הארץ). האנטנה עשויה להימצא בטמפרטורת סביבה מכסימלית $T_p = 400^\circ\text{K}$ והיעילות התרמית שלה $ea = 0.9$ לכן $T_{AP} = 44^\circ\text{K}$. נניח גם כן $la = 0.8$ ונקבל בהדקי המקלט $T_a = 333^\circ\text{K}$. בהנחה שהמקלט עצמו מוסיף רעש $T_r = 116^\circ\text{K}$ (שקול לספרת רעש $NF = 1.4 = 1.5 \text{ dB}$), הרי טמפרטורת הרעש המערכתית בלוויין תהיה 449°K .

סיכום

ארתור ס. קלארק פעל בשני עולמות מקבילים - הן כסופר פורה של מדע בדיוני שהגה רעיונות מדעיים וחברתיים מקוריים - והן כמדען "אמיתי" שהמציא את רעיון לוויני התקשורת הקבועים מעל קו המשווה, המכסים את כדור הארץ כתחנות ממסר אולטימטיביות. בשני העולמות קידם את האנושות וזכה לתהילה רבה.

Novels

- Against the Fall of Night (1948, 1953)
- The Sands of Mars (1951)
- [Childhood's End \(1953\)](#)
- [The City and the Stars \(1956\)](#)
- The Deep Range (1957)
- [A Fall of Moondust \(1961\)](#)
- Glide Path (1963)
- [2001: A Space Odyssey \(film with Stanley Kubrick\) \(1968\)](#)
- [Rendezvous with Rama \(1972\)](#)
- [Imperial Earth \(1976\)](#)
- [The Fountains of Paradise \(1979\)](#)
- 2010: Odyssey Two (1982)
- [The Songs of Distant Earth \(1986\)](#)
- 2061: Odyssey Three (1987)
- The Hammer of God (1993)
- 3001: The Final Odyssey (1997)
- A Time Odyssey (2003, 2005, 2007) a series of three novels

Short Story Collections

- Expedition to Earth (1953)
- Reach for Tomorrow (1956)
- [Tales from the White Hart \(1957\)](#)
- The Other Side of the Sky (1958)
- [Tales of Ten Worlds \(1962\)](#)
- [The Wind from the Sun \(1972\)](#)
- The Best Of Arthur C. Clarke 1937-1955 (1982)
- The Sentinel (1983)
- Tales From Planet Earth (2001)
- The Collected Stories of Arthur C. Clarke (2001)

Non-Fiction

- Interplanetary Flight: an introduction to astronautics (1950)
- [The Exploration of Space \(1951\)](#)
- The Exploration of the Moon, with R. A. Smith (1954)
- The Coast of Coral (1955)
- Voice Across the Sea (1958)
- Profiles of the Future: An Inquiry into the Limits of the Possible (1962)
- Voices from the Sky: Previews of the Coming Space Age (1965)
- The Promise of Space (1968)
- The View From Serendip (1977)

- Astounding Days: A Science Fictional Autobiography (1989)
- How the World Was One: Beyond the Global Village (1992)
- Greetings, Carbon-Based Biped: Collected Essays, 1934–1998 (1999)

ספרי עיון על תקשורת לווינים

- [1] B.R. Elbert, **The Satellite Communication Applications Handbook**, Artech, 2003.
- [2] D. Roddy, **Satellite Communications**, McGraw Hill, 2006.
- [3] T. Pratt and C.W. Bostian, **Satellite Communications**, Wiley, 2006.
- [4] A.K. Maini and V. Agrawal, **Satellite Technology, Principles and Applications**, Wiley, 2007.
- [5] L.J. Ippolito, **Satellite Communication Engineering**, Wiley, 2008.
- [6] B.R. Elbert, **Introduction to Satellite Communication**, Artech, 2008.
- [7] R. Dybdal, **Communication Satellite Antennas**, McGraw Hill, 2009.
- [8] G. Maral and M. Bousquet, **Satellite Communication Systems**, Wiley, 2010.
- [9] T. Radford, **SatCom Guide for the Technically Challenged**, Radford, 2010.
- [10] L. Parks and J. Schwach, **Down to Earth, Satellite Technologies, Industries and Cultures**, Rutgers University Press, 2012.
- [11] T. M. Brown, **Satellite Communication Payload and System**, Wiley, 2012.
- [12] M.O. Kolawole, **Satellite Communications Engineering**, CRC Press, 2013.
- [13] Z. Sun, **Satellite Networking – Principles and Protocols**, Wiley, 2014.
- [14] M. Richharia, **Mobile Satellite Communications – Principles and Trends**, Wiley, 2014.
- [15] R. Cochetti, **Mobile Satellite Communications**, Wiley, 2014.
- [16] D. Minoli, **Innovations in Satellite Communications**, Wiley, 2015.
- [17] P. Berthon, M. Diaz, T. Gayroud and C. Baudoin, **Satellite and Terrestrial Hybrid Networks**, Wiley, 2016.