

פיתוח מערכות אנרגיה מכוונות DE אזוריות
וצבאיות למרות מגבלות הפרעות הדדיות EMI
וסיכונים ביולוגיים

פרופ' יעקב גוון LIFE FELLOW IEEE

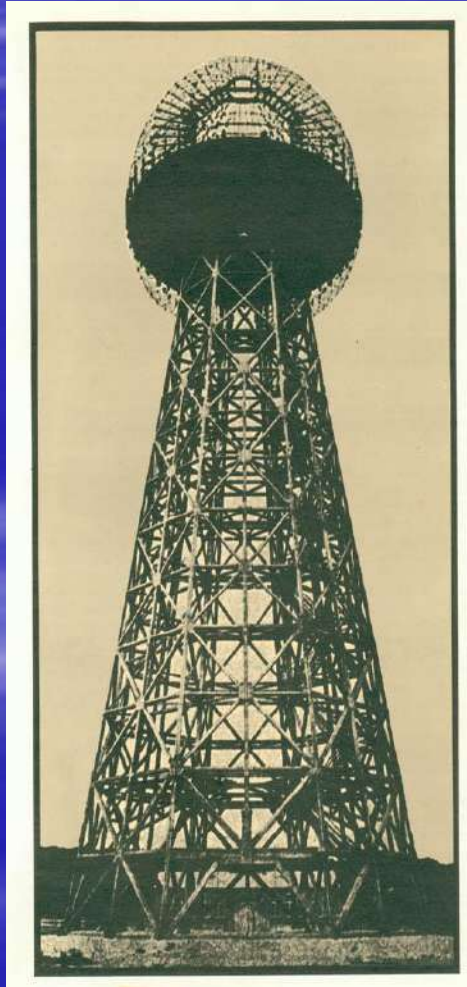
ראשי פרקים

- התפתחות מערכות תקשורת אלחוט ואנרגיה מכוונת DES
- העקרונות של מערכות DES
- השוואה בין מערכות תקשורת אלחוט ו DES
- פתוח של מערכות DES אזוריות באמצעות מיקרוגל ולייזר
- מגבלות תא"מ EMC במערכות DES
- סיכונים ביולוגים במערכות DES
- פתוח מערכות DES צבאיות במיוחד להגנה מרחפנים וטילים
- עתיד מערכות DES

התפתחויות מערכות תקשורת אלחוט DESI

- The development of wireless communication technology began with Marconi and Popov in the beginning of the 20th century. It was a great success. At the same time N. Tesla tried to use directed energy for wireless transmission of electricity but has failed because the technology was not yet ripe. Meanwhile, radio communication become one of the most important technology.
- The progress in Directed Energy Systems (DES) began only after about 70 years following the development of high power and frequency communication wireless systems, RADAR, LADAR, and the invention of efficient RECTENNA by W.C Brown in 1973
- Shall be described :Terrestrial DES up to a few Km, UAV and HAPS up to 25 km and satellites up to 40000 Km

Wardenclyffe Tower – Tesla Tower



Tesla purchased 0.8 square km in New York in 1900 and start build the tower

57m Tall

21m Diameter

Low frequency around 100KHz

First WPT Patent by Tesla 1897

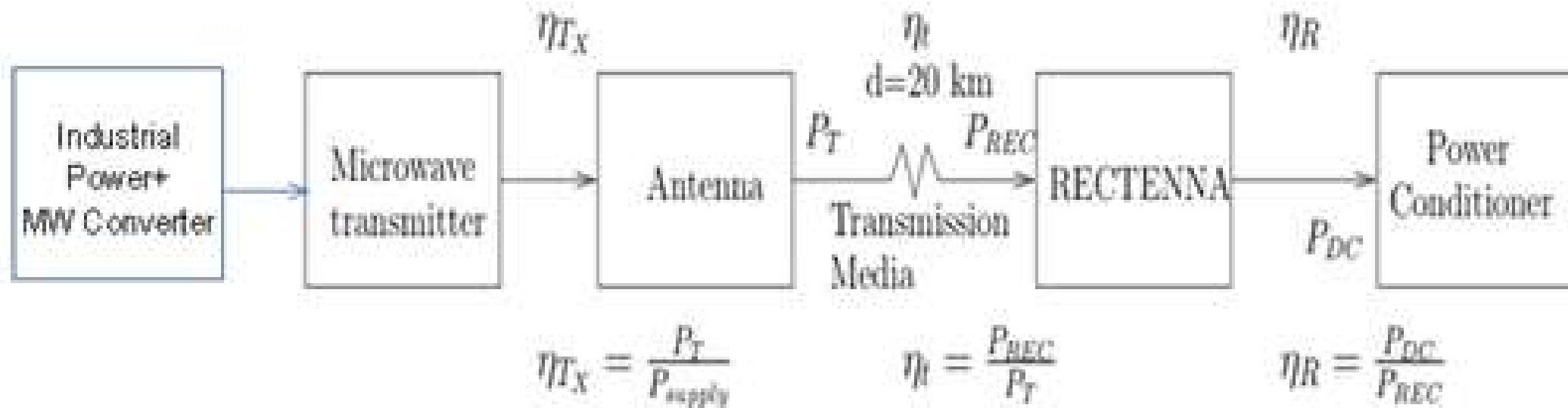
JPL WPT terrestrial Installation at 2.4 GHz $d=1.6\text{km}$ 30kW , 26m Rec. 82%



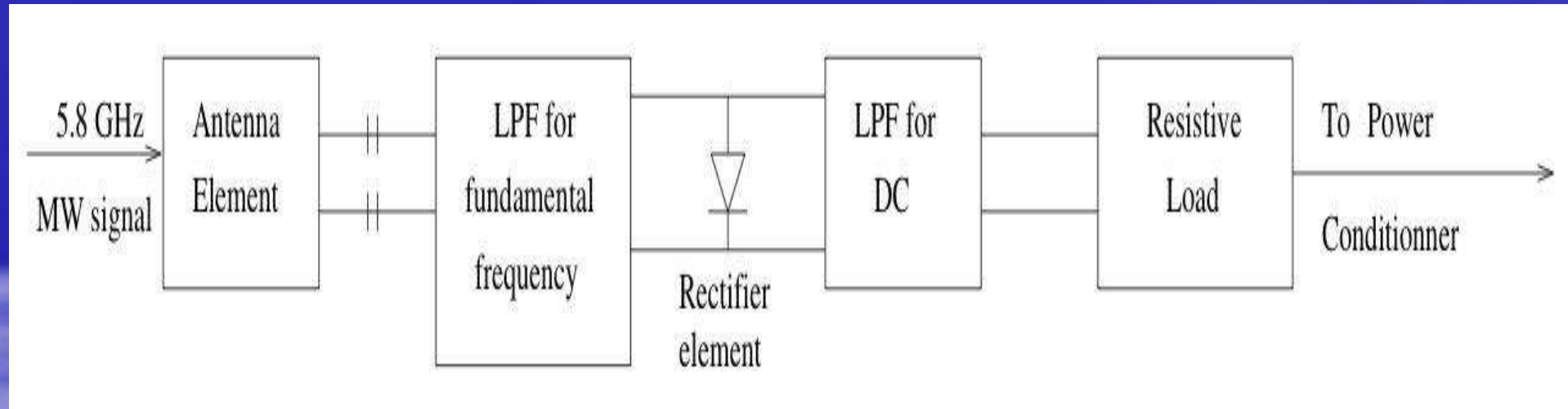
D=26m of the dish ant.
RECTENNA dimensions on the
tower 3.4x7.2m, 1975
P out from a klystron= 30kW Ef.
of RECTENNA 82.5%
French Reunion Island project:
 $d=700\text{m}$, $P=10\text{kW}$, $f= 2.45\text{ GHz}$
by ESA participation 1996

Project Hawaii $d=148\text{km}$ J.
Mankins NASA 2008 No line of
sight and no funding

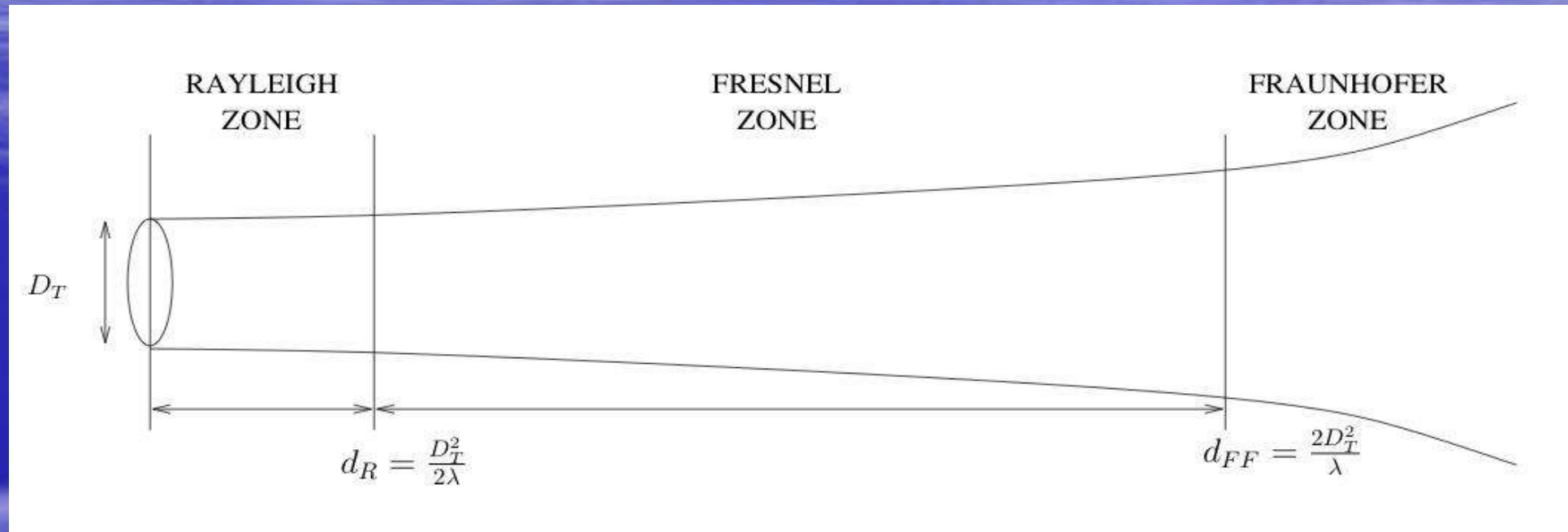
Block Diagram of a Typical Long Distance MW WPT System



Typical RECTENNA Element for a Long Distance DE System Pioneer W.C Brown



Effects of the MW beam transmitted by an aperture antenna of diameter D_T

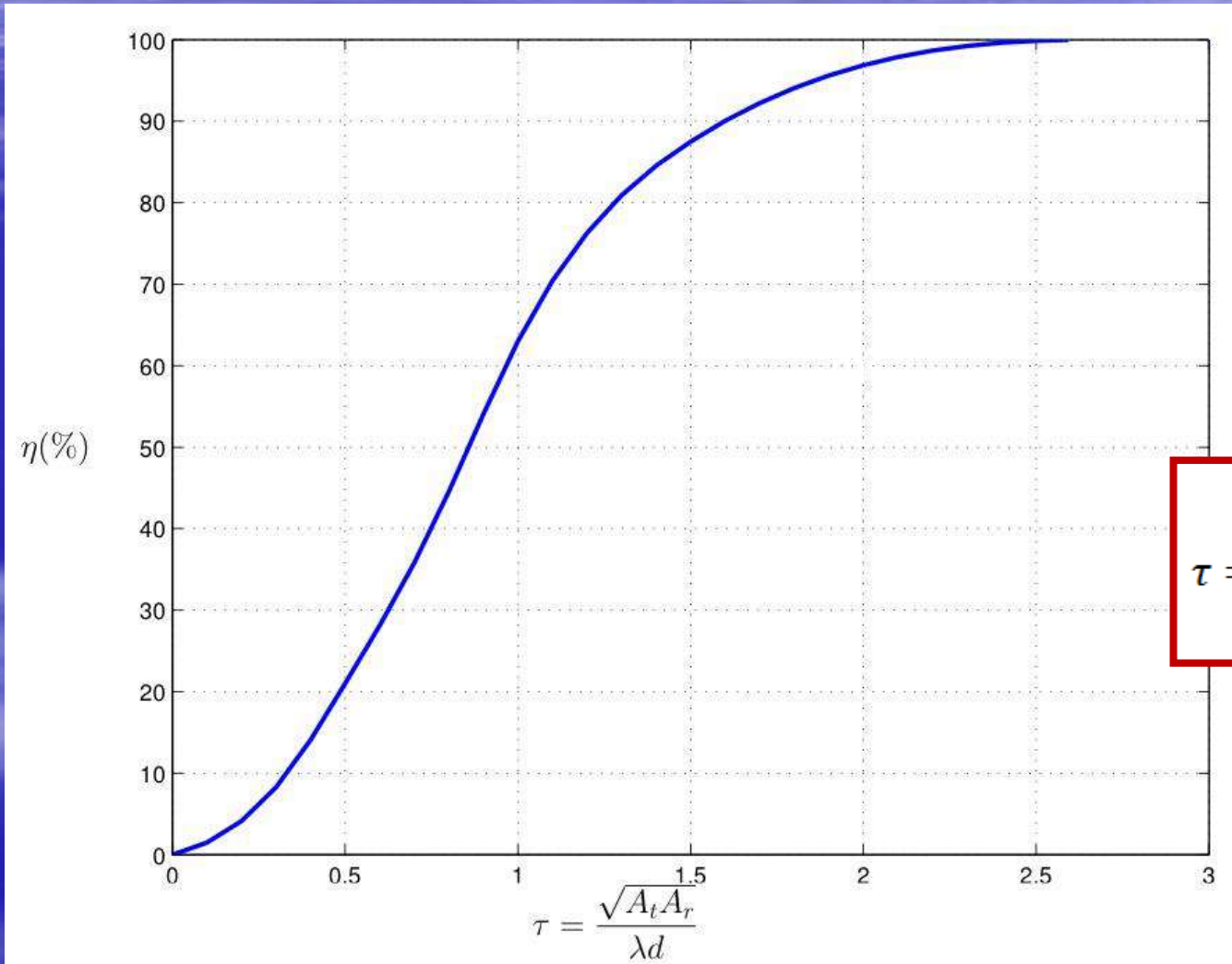


$$D_t \text{ (m)} = (d_r \text{ (m)} \times 0.6 / f \text{ (GHz)})^{0.5}$$

$$A_t \text{ (m}^2\text{)} \approx d_r \text{ (m)} / 2f \text{ (GHz)}$$

Dt (with HAPs $d_r=20000\text{m}$ and $F=5.8\text{GHz}$.
Therefore $D_t=45\text{m}$
For maximal power transfer efficiency

Empirical Power Transmission Efficiency as function of tau (Goubau and W.C.Brown)



$$\eta_{t,r} = 1 - e^{-\tau^2}$$

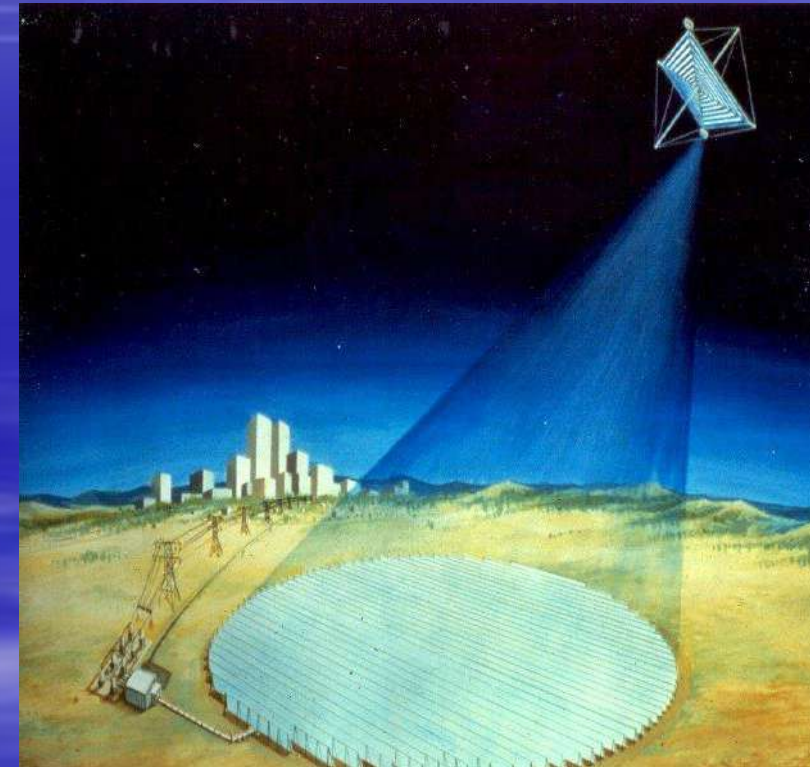
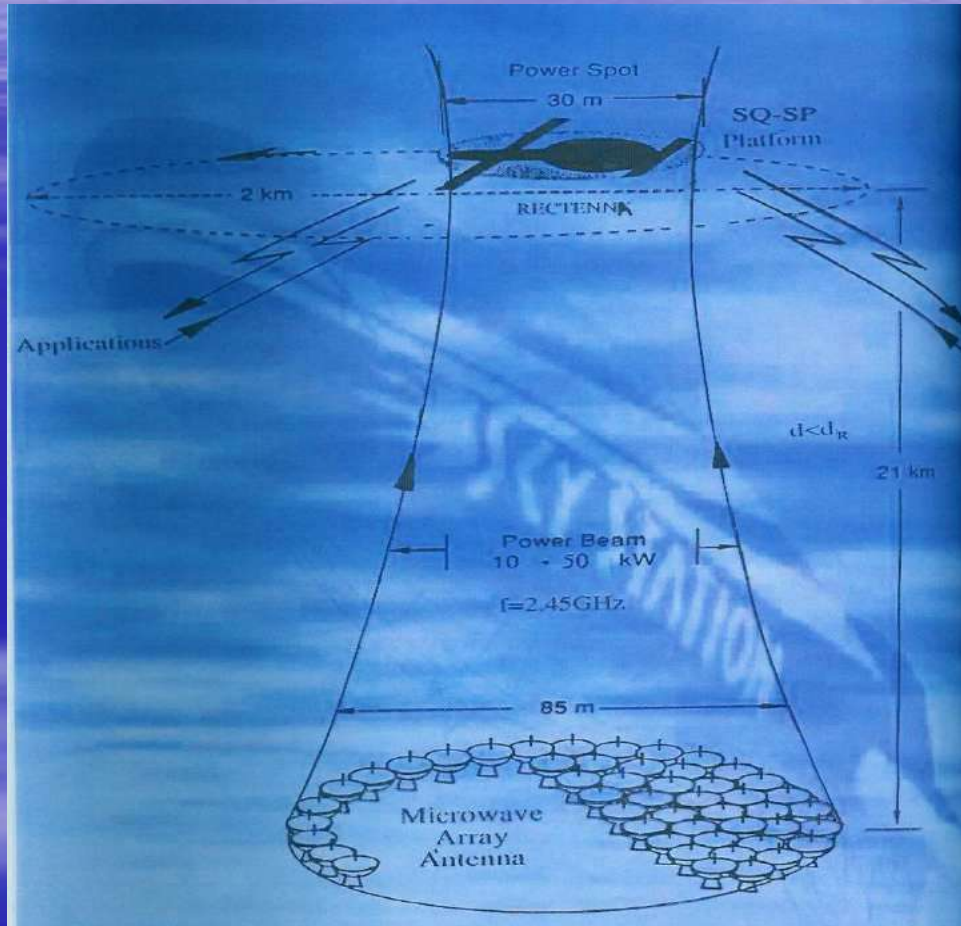
$$\tau = \frac{10f(\text{GHz})\sqrt{A_t A_r}}{3d}$$

$$\tau = \frac{2.5f(\text{GHz})D_{T(m)}D_{R(m)}}{d(m)}$$

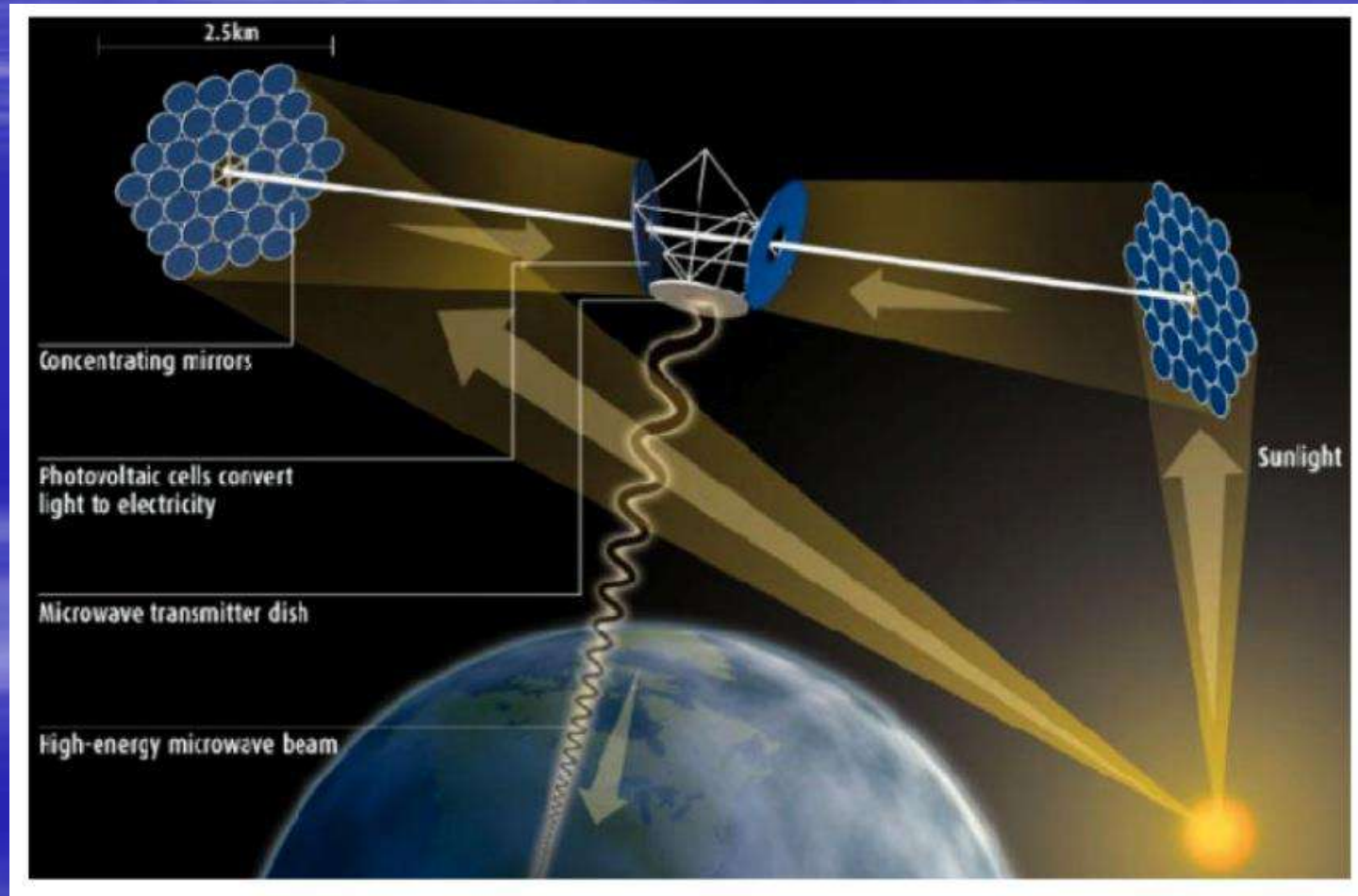
השוואות בין מערכות תקשורת אלחוט ומערכות DE להעברת אנרגיה

- במערכות תקשורת ההספק המגיע למקלט מאוד נמוך בגלל הפסדי הפיזור הגבוהים ולכן הפרמטר החשוב ביותר הוא יחס אות לרעש והפרעות. ב DES אנו מעוניינים כי רוב ההספק המשודר יגיע למקלט ולכן הפרמטר החשוב ביותר הוא נצילות ההעברה.
- במערכות התקשורת הפועלות לרוב בשדה הרחוק, חישובי הנתיב פשוטים אבל בכל זאת חשובים מגבלות EMC של ההפרעות ההדדיות והסיכונים הביולוגים, אבל מוגדרים ומוגבלים. לעומתם DES פועלות לרוב בגבולות השדה הקרוב באזור FRESNEL אפוא שבעיות ה-EMC וסיכונים ביולוגים הרבה יותר גדולים וקשים לחישוב במיוחד ב DES אזרחיות.
- במערכות התקשורת הפסקת שידור בלתי רצויות גורמות לאבדן מידע. לא כן ב DES שנתן להפסיק השידור לזמנים מסוימים הודות למערכת המצברים וכך להקטין הסיכונים הביולוגים באמצעות חיישנים ומערכות בקרה מתקדמות.

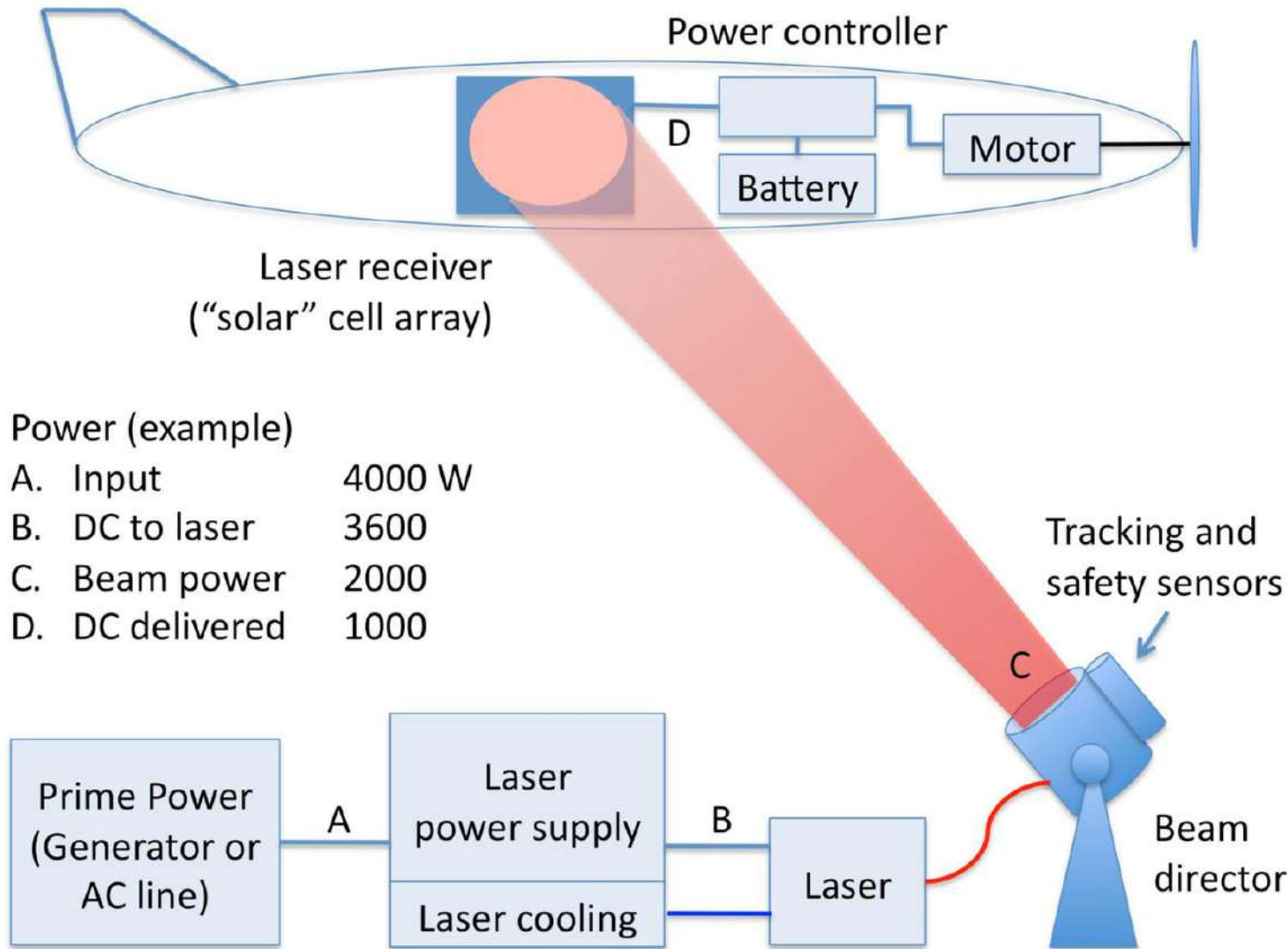
Artistic Pictures of WPT Systems for HAPS



An artistic picture of GEO SPS NASA, concept Pioneers: P. Glaser, J. Mankins, H. Matsumoto. NASA and Japanese Aerospace



IR WPT Using LASER to UAV



High power LASER manufactures and developers companies: LASER motive, ENTECH, UAH LASER WPT due to its small dimensions, weight and accuracy of the beam can deliver power to mobile aircrafts or troops. But limited to reduced operation due to atmospheric losses and scattering especially under dust, haze, fog, clouds or rain.

שיקולי תא"מ EMC(RFI) ב מערכות DES

- הפרעות הדדיות RFI חשובות עבור DES מיקרוגל גם מאונות הצד(SL)באמצעות חומרי בליעה בקצוות הרפלקטור) אבל פחות ממערכות רדיו באותן הספקים בגלל רוחב סרט נמוך מאוד, כיווניות האנטנות ושליטה ובקרה על הקרן והתלות בקו הראייה.
- ככל שעולים בתדר, קטנות אפשרויות ההפרעות ההדדיות בגלל מעוט המערכות הפועלות ורוחבי פס נמוכים, אבל גדלים הניחות וההפרעות של האטמוספירה.
- צמצום RFI חשוב בDES למטרות אזרחיות אבל בחלק מן הצבאיות מעוניינים במירב הפרעות כדי לשבש פעולת רחפנים למשל.
- במערכות לייזר DE כמעט ו לא קיימת תופעות RFI אבל חלק מן הזמן אינן יכולות לפעול באטמוספירה.
- מערכות לייזר אידיאליות לפעולה בחלל או בין לוויינים.

סיכונים ביולוגים במערכות אנרגיה מכוונת DE

- הסיכונים הביולוגים במערכות מיקרוגל יורדים עם התדר בגלל השפעת תופעת הכרום SE המגינה. אבל בהספק גבוה, יש לרכז כמה שאפשר את הקרן, ויש צורך במערכת הגנה מתוחכמת שיכולה לשלוט על ההספק המשודר.
- בתכנון המערכות יש להתחשב בתקנים כ- ANSI\IEEE IRPA\WHO
- גם במערכות לייזר עם הספקים גבוהים צריך לשלוט על ההספק וכבר בהספק נמוך כדאי למפעילי המערכת להשתמש במשקפי מגן.
- בלייזר בנגוד למיקרוגל גדלים הסיכונים עם עוברים מ IR לתדרים הגבוהים יותר של ה UV ו- X RAY היותר אנרגטיות ועם פוטנציאל לסרטן.
- לסיכום, בהספקים נמוכים להגנה מפני בלוני תבערה, סיכוני הקרינה נמוכים וניתן להתגבר עליהם. אבל להגנה מטילים והעברת אנרגיה מן השמש אפוא ש ההספקים מאוד גבוהים דרושה עוד הרבה עבודה.

Comparison between Gaussian and Rayleigh Tappers



Figure 2a. The three-dimensional field-intensity distributions on the rectenna for the Gaussian beam.

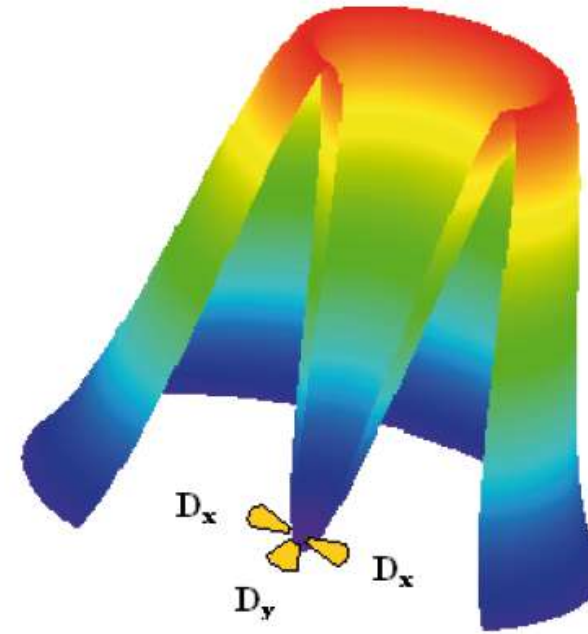


Figure 2b. The three-dimensional field-intensity distributions on the rectenna for the Rayleigh beam: D_x and D_y are the quadrupole sensors.

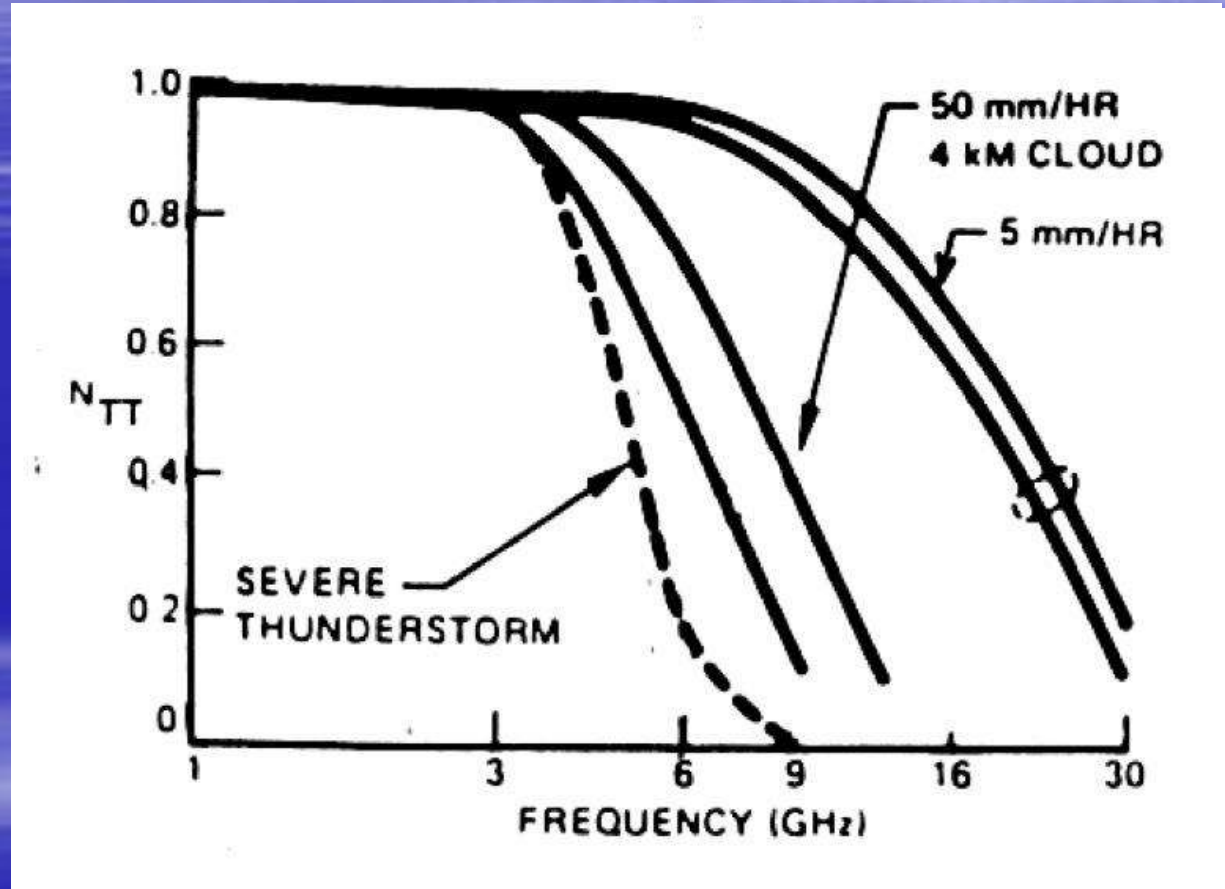
Eye and body protection for DEW Laser systems operators



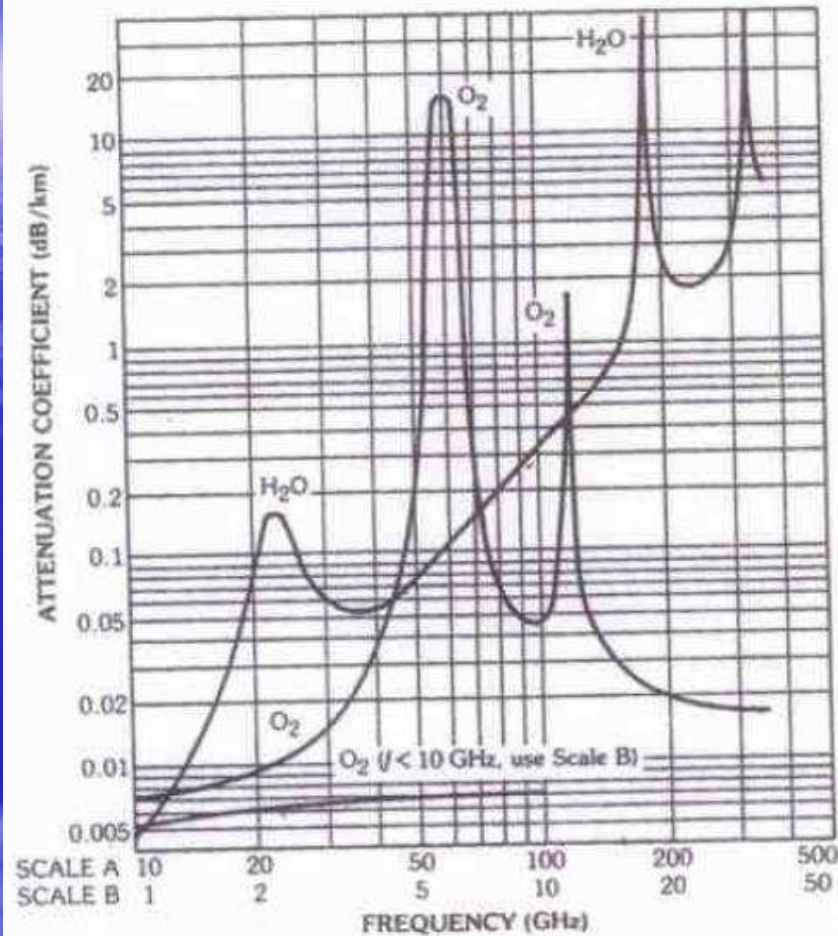
S.J. Freedber Jr, Breaking Defense, 8 July 2020. Air Force's THOR high-powered microwave is designed to target drones. Defense, 8 July 2020



Atmospheric humid and rainy weather losses as function of the frequency

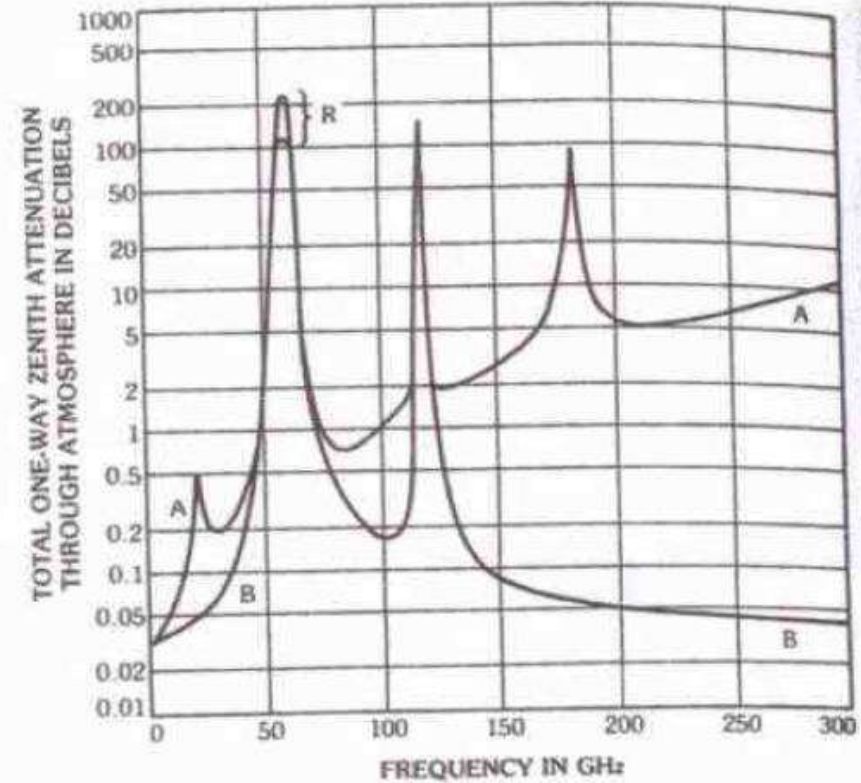


L_{atm} (db) for $f=5.8$ GHz and Rain path length of 4km and clouds;
weather at $T=(0^{\circ}\text{C})$ and Rain: 5mm/h (0.05), 10mm/h (0.16), 50mm/h (1.2),
100mm/h (2.8), and Severe thunderstorm (9)



Surface pressure: 1 atm (1013.6 mb)
 Surface temperature: 20°C
 Surface water vapor density: 7.5 g/m³

Fig. 30. Clear sky attenuation per unit length versus frequency. (From K. Miya, ed., *Satellite Communications Technology*. Tokyo: KDD Engineering and Consulting, Inc., 1982.)



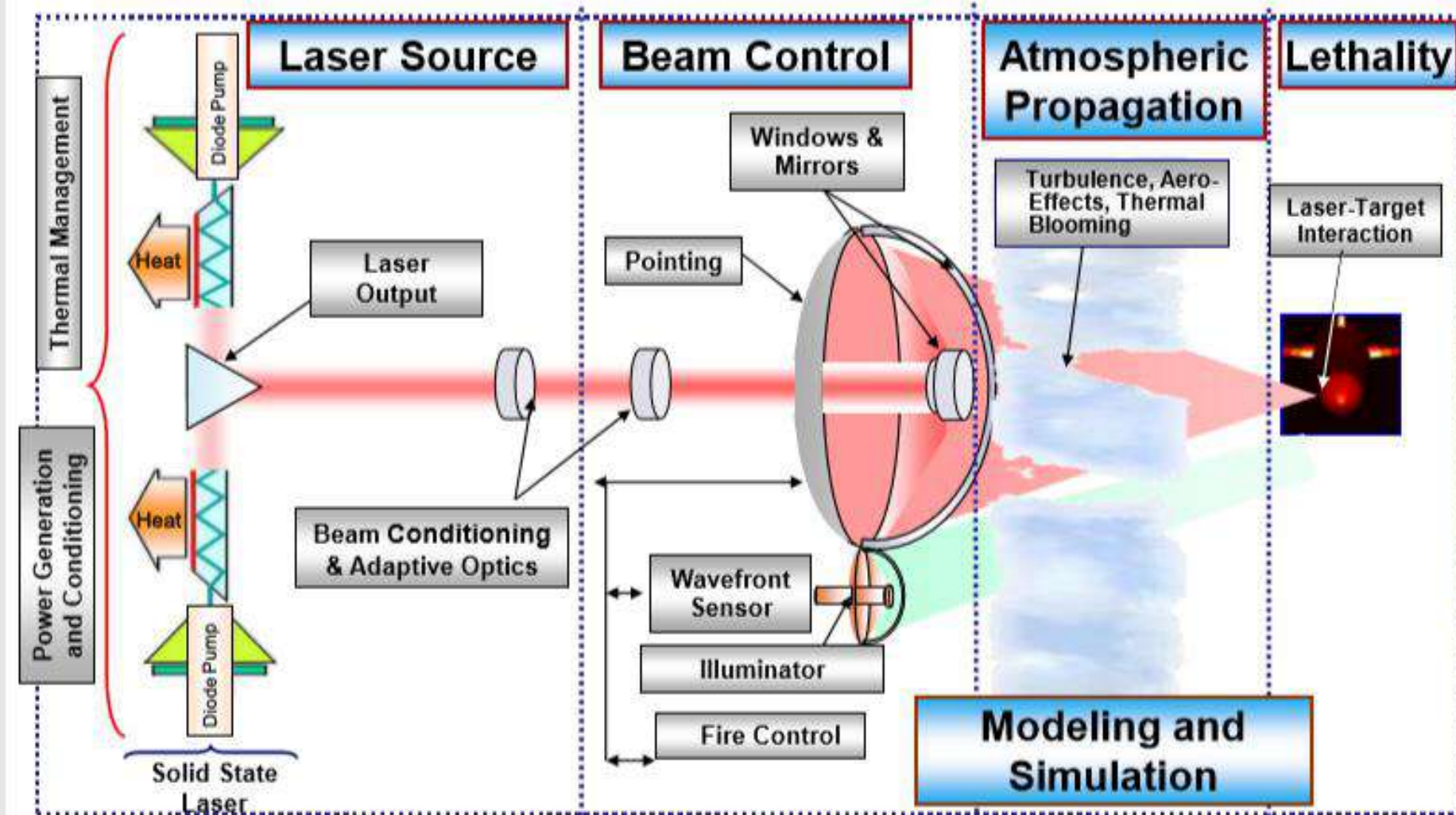
Surface water vapor density
 A: 7.5 g/m³
 B: 0 g/m³ (dry atmosphere)
 R is the range of variation due to fine structure

Fig. 31. Total clear sky loss versus frequency. (From K. Miya, ed., *Satellite Communications Technology*. Tokyo: KDD Engineering and Consulting, Inc., 1982.)

$L_{cs} = 10^{L_a/10}$, clear sky loss factor,
 $T_m \cong 1.12 T_{\text{surface}} - 50$, mean raindrop temperature along the path.



Laser Weapon System Overview



השוואות בין מערכות נשק DE בלייזר וקינטיות

תכונות	מערכות נשק DE בלייזר	מערכות נשק קינטיות
בשלות	(-) בשלבי תכנון, נדרש הרבה מחקר ופיתוח	(+) מערכת פועלת
מהירות פעולה	(++) מהירות האור	(-) מהירות הקול
זמן תגובה	(+) מאוד מהיר	(-) ארוך יותר
דיוק	(++) מאוד מדויק	(+) מדויק
מחיר היירוט	(++) נמוך מאוד	(-) גבוה מאוד
בטיחות	(+) די בטוחה	(++) בטוחה
טווח פעולה	(-) עדיין מצומצם, כיום מספר ק"מ בודדים	(+) כיפת ברזל- עד 70 ק"מ, חץ- מאות ק"מ
הפרעות אטמוספריות	(-) גדולות	(++) כמעט ולא קיימות
פעילות בכל מזג אוויר	(-) לא	(++) כן
שילוב פעילות שתי המערכות	(++)	(++)

שילוב מערכת כיפת ברזל ו-DES מלייזר להגנה מפני קסאמים ורחפנים



מערכת נשק לייזר שפותחה ע"י רפאל



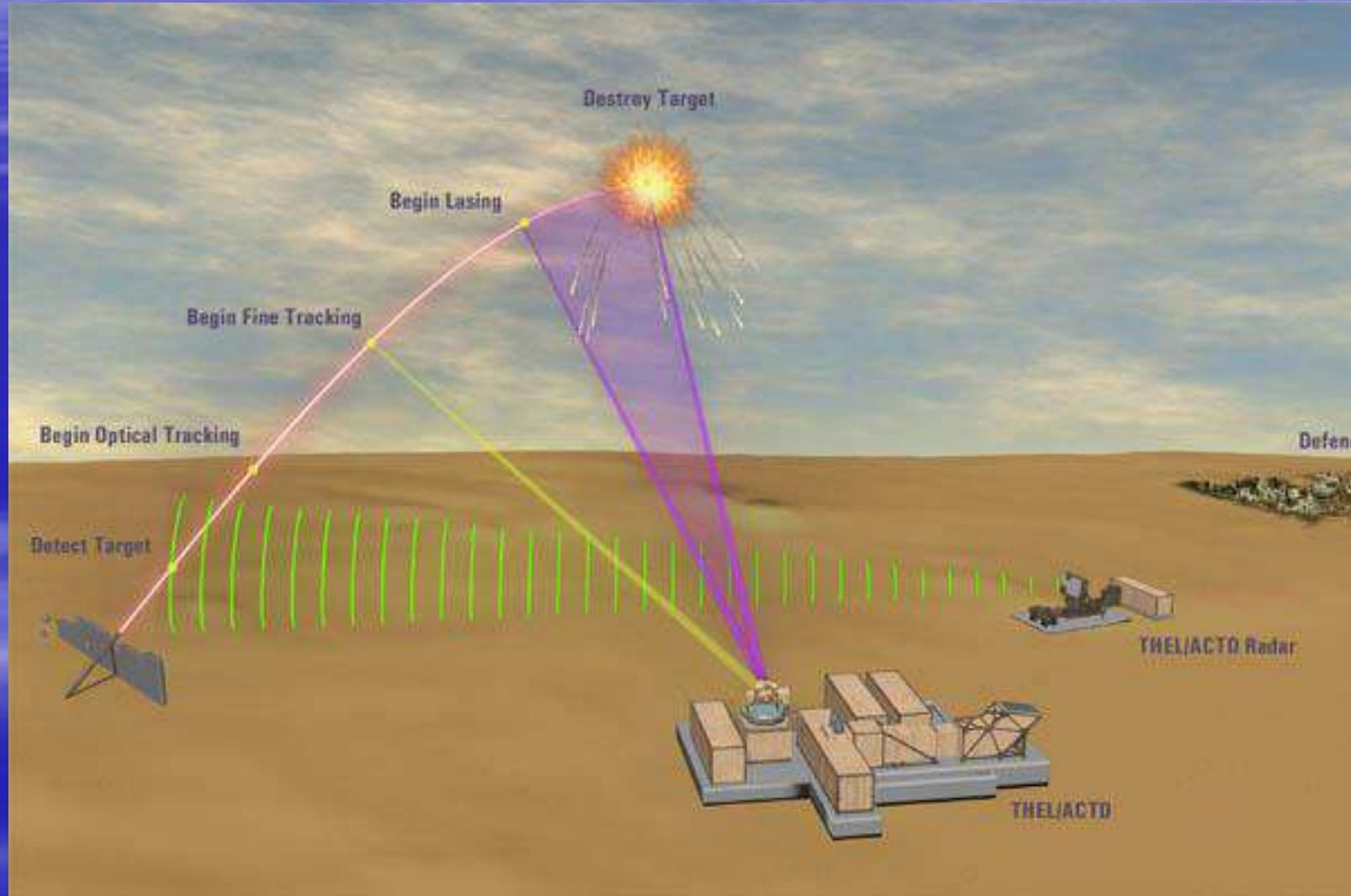


From the top left clockwise,
the U.S. Navy's Laser
Weapons Demonstrator
System, which was
deployed on the USS
Portland;
The U.S. Air Force's
Airborne Laser;
The U.S. Air Force's High
Energy Laser Weapons
System, which
was certified for use in
combat Sept. 14th, 2020;
The Turkish Army's ground
based ROKETSAN Laser
Weapon

A small unmanned aircraft is shot down with a high-energy Raytheon laser weapon Megan Crouse Mil & AE, 27 July 2021



שלבי הפעולה של מערכת עתידית DEW





Concept drawing of low-earth orbiting particle beam weapon in the future, courtesy of Los Alamos National Laboratory via Aerospace Projects Review (Trevikthick 2019).

מסקנות 1

- הפיתוח של מערכות אנרגיה מכוונת DES הצליח רק לאחר התקדמות מאוד גדולה ברמות ההספק בתדרים גבוהים ופתרון של מגבלות EMC/RFI וסיכונים ביולוגים של מערכות תקשורת אלחוט.
- הפיתוח של DES למטרות אזרחיות של העברת אנרגיה למרחוק נמצא רק בתחילת דרכו לנוכח המגבלות המיוחדים שנתרו לאור רמות ההספק הגבוהות בתחנות הקליטה שיכולות לגרום RFI למערכות קליטה אחרות והסיכונים הביולוגים שלחלקם הניכר נמצא פתרון.
- DES פועלות בתחומי המיקרוגל MW או הלייזר. מערכות ה-MW פחות פגיעות מתנאים אטמוספריים ובעלות נצילות הספק גבוהות, אבל יותר פגיעים מ-RFI ונדרשים ממדים פיסיים הרבה יותר גדולים של אנטנות השידור.

מסקנות 2

- גם בתחום הצבאי ל-DES תפקיד חשוב בעיקר להגנה מבלוני תבערה, רחפנים וטילים עוינים. עד לפני זמן קצר השתמשו בעיקר בלייזר לשרפת מטרות ובימים אלו מצאו יתרון גם ל-MW.
- ב-DES למטרות צבאיות להגנה מרחפנים וטילים בתחום המיקרוגל מעוניינים דווקא במירב RFI לשיבוש מערכות הקשר, הבקרה והניווט האלקטרוני.
- מערכות הלייזר יפעלו עם מערכת אלקטרו-אופטית לזיהוי בלוני התבערה, סימון מטרות ע"י לייזר בהספק מאוד נמוך ובקרת ירי.
- דרוש מאמץ לאומי רב ושיתוף פעולה בין החברות המובילות שלנו ושל בעלי הברית שלנו לפתוח ויצור DES בהספק גבוה, ובשילוב מערכות קינטיות קיימות כדי להגן ביעילות בתוספת המערכות הקינטיות הקיימות גם מפני מתקפות מרוכזות של טילים מדויקים.

מסקנות 3

- בעתיד יהיה שימוש ניכר במערכות DES אזוריות לייצור והעברת כמויות גדולות של אנרגיה ירוקה ושימושים אחרים.
- החלל מאפשר תנאים טובים למערכות DES כולל הצבאות כהמשך לפרויקט מלחמת הכוכבים של רייגן וישנה אפשרות בעתיד גם להשתמש בקרינה UV ובעלומות חלקיקים באנרגיה עצומה שאינם יכולים להתפשט באטמוספירה.
- האידאל שתיפסק הפעילות הצבאית התוקפנית המזיקה ב-DES ולהתרכז במערכות הגנה בלבד ובהעברת אנרגיה ירוקה ושימושים אזרחיים נוספים.

Selected References

- D.V. Giri, "High Power EM Radiators: Non Lethal Weapons and Other Applications", Harvard University Press, 2004
- J. Gavan, S. Tapuchi and D. Grace, "Concepts and Main Applications of High-Altitude-Platforms Radio Relays," *The Radio Science Bulletin*, N **330**, September 2009, pp.(20-31).
- J. Gavan, S. Tapuchi,. "Microwave Wireless- Power Transmission to High- Altitude Platform Systems", *Radio Science Bulletin*, N 334 September 2010: pp (25-42)
- H. Hogan, "New Laser Technologies Displacing Old." *Photonics Spectra*, pp (64-69) Jan. 2018.
- Jeff. Hecht, "High-Power Fiber Lasers." *Optics& Photonics News*, pp (31-37), Oct . 2018 .

Selected References 2

- Magneto dielectric Materials in Antenna Design,” IEEE Antennas & Propagation Magazine, Vol. 61, No. 1, February 2019, pp. 29-40.
- S.J. Freedberg J.R, " Army Ramp up Funding for Laser Shield Hypersonic Sword", Breaking Defense, 28.02.20
- A. Tsaliovich, “M. Haridim and J. Gavan, “A Critical Note on the Engineering Model of Radiating Antenna in Homogeneous Medium: Field Regions and Transition Zone Boundaries Transition Zone Boundaries”, IEEE EMC Magazine, vol. 10 Quarter 1, April 2021
- J. Keller, "Air Force set to build advanced directed-energy weapon that uses radio waves to defeat unmanned swarms", M&AE, Aug 17th, 2021.

Selected References 3

- יעקב גוון, אריה לביא, " אפשרויות הגנה מפני בלוני תבערה, חומרי נפץ ואיומים יותר חמורים באמצעות לייזר או מיקרוגל

New- TECH Microwave, Magazine, Nov 2018 pp. (54-59)

- יעקב גוון, אריה לביא, " מערכות לייזר ומיקרוגל להגנה מפני איומי בלוני תבערה ואחרים", חשמל ואנשים, SEEI גיליון 74 אוקטובר 2018 . pp(78-80)

- יעקב גוון, אריה לביא, אירית יובילר, ו' אנטולי צליוביץ. "מערכות לייזר למיגור איומי בלוני בעירה, רחפנים ואיומים חמורים יותר", (50-55) pp. חשמל ואנרגיה, אוקטובר 2019 , SEEI

- פרופסור יעקב גוון, פרופסור אריה לביא, ד"ר אירית יובילר, ו' ד"ר אנטולי צליוביץ. "אפשרויות הגנה מפני בלוני תבערה, חומרי נפץ ואיומים יותר חמורים באמצעות לייזר או מיקרוגל", New-Tech Military Magazine Sept\October 2019

Selected References 4

- . משה נצר, פרופסור יעקב גוון, אלי רכט, אבי כהן ואורן הר טל, "תאימות אלקטרו-מגנטית מגמות ופיתוחים". חשמל ואנרגיה, גיליון 86, ע"מ 36-38, מאי 2021, SEEI.
- פרופסור יעקב גוון. "הגנה יעילה מפני איומי בלוני תבערה, רחפנים וכל סוגי טילים". New Tech Military Magazine Q2. 2021, pp(38, 39);

Free Space Wireless Communication Equations FF

$$S_r = E \times H$$

$$P_r = S \times A$$

$$C \equiv P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

$$EIRP = P_T G_T$$

$$P_r = \frac{EIRP \cdot G_r}{L_P L_\alpha}$$

$$P_r[dBm] = EIRP_{[dBW]} - L_{[dB]} + G_{r[dBi]}$$

$$L_{[dB]} = L_\alpha + 32.44 + 20 \log R_{[Km]} + 20 \log f_{[MHz]}$$