

תקשורת ארוכת טווח בתדרי הת"ג

מאת: פרופ' יוסף פנחסי 4Z1VC

לפני עידן הלוויינים, תקשורת אלחוטית לטווחים של מאות ואלפי קילומטרים התבצעה בתחום התדר הגבוה (HF) המוגדר בין 3MHz ל-30MHz. בתחום תדרים זה, היונוספירה משמשת כ"מראה" המחזירה גלי רדיו המגיעים אליה ("גלי רקיע") לפני כדור הארץ ובכך מאפשרת תקשורת אל מעבר לאופק. כיום, השימוש בתחום התדר הזה לתקשורת ארוכת טווח אינו נפוץ, למעט תחנות רדיו המשדרות לכלל העולם לטווחים ארוכים או לתקשורת בין חובבי רדיו. בשנת 1955 הופעל לראשונה מכ"מ הרואה מעבר לאופק (Over-the-horizon radar) שפותח במעבדות חיל הים האמריקאי (NRL). המכ"מ שפעל בתחום ה-HF נועד לגלות שיגור טילים במרחקים של למעלה מ-1,000Km. מאמר זה יסביר את עקרונות השימוש בגלי רקיע המוחזרים מהאטמוספירה. המאמר מבוסס על הספר "תקשורת אלחוטית בגלי רדיו" שיצא לאחרונה לאור¹.

האטמוספירה היא מעטה של אוויר המורכב מתערובת של גזים ומקיף את כדור הארץ עד לגובה של עשרות קילומטרים. האטמוספירה מחולקת לשכבות. השכבה הנמוכה ביותר היא הטרופוספירה והיא מכילה כ-75% מהמסה הכוללת של האטמוספירה. היא מתחילה מפני כדור הארץ וגובהה נע בין 8Km בקטבים ל-18Km בקו המשווה. מעליה נמצאת שכבת הסטרטוספירה עד לגובה של כ-50 קילומטרים והיא מכילה בין היתר את שכבת האוזון. השכבה הבאה היא המזוספירה עד לגובה של כ-80Km ומעליה שכבת התרמוספירה עד לגובה של כ-650Km. את החלק העליון של התרמוספירה, הנמצא מגובה של 500 ק"מ ומעלה, מכנים אקסוספירה ובה צפיפות האוויר נמוכה מאד. בחלק משכבת התרמוספירה נבלעת רוב קרינת השמש בעלת אורך גל הקצר מאולטרה סגול, דבר הגורם להפיכת חלק ממולקולות הגז ליונים. לאזור זה קוראים לכן יונוספירה, ונתייחס אליה מאוחר יותר. שכבות האטמוספירה מובאות בטבלה 1.

¹ יוסף פנחסי: "תקשורת אלחוטית בגלי רדיו", הוצאת אלפא (2012)

טבלה 1 : שכבות האטמוספירה של כדור הארץ.

70,000Km	Outer space				Magnetosphere
10,000Km				Plasmasphere	
800Km	Atmosphere	Exosphere	Ionosphere		
500Km		Thermosphere			
80Km		Mesosphere			
50Km		Stratosphere			
8-18Km		Troposphere			

הגזים העיקריים המרכיבים את האטמוספירה של כדור הארץ הם בריכוזים של 78.084% חנקן N_2 (Nitrogen), 20.948% חמצן O_2 (Oxygen), 0.934% ארגון Ar (Argon) ו-0.0314% פחמן דו-חמצני CO_2 (Carbon dioxide). באטמוספירה לחה מיתוספים אדי מים H_2O בריכוז שבין 1% ל-4%. כמו כן מופיעים חלקיקי אבק ואובך וחומרים מזהמים אחרים. בתחומי התדר הנמוכים, השפעת השכבות הנמוכות של האטמוספירה על התפשטות הגלים כמעט שאינה מורגשת, והיא שקופה לגל האלקטרומגנטי המשודר דרכה. אולם כאשר התדר הוא בתחום הגלים המילימטרים, מובחנת בליעה של המולקולות המרכיבות את האטמוספירה (בעיקר חמצן O_2 ומים H_2O).

השכבות העליונות של האטמוספירה חשופות לקרינה המגיעה מהשמש. מרכיבים ספקטראליים בקרינה זו בתחום האולטרא סגול וה- X-ray גורמים ליינון של מולקולות האוויר וליצירת שכבת פלסמה הנקראת יונוספירה (Ionosphere). הקצב הגבוה של היוניזציה מתרחש בגובה של כ-180Km אולם בשל הצפיפות הגבוהה של מולקולות האוויר בגובה זה, זמן החיים של היונים הוא קצר ומתבצע תהליך של התמזגות (Recombination) עם האלקטרונים החופשיים. ככל שעולים בגובה, צפיפות האוויר קטנה כך שקצב ההתמזגות איטי יותר. עיקר תהליך היינון מתרחש במהלך היום, ועם שקיעת השמש מתבצע תהליך של התמזגות של היונים עם האלקטרונים וצפיפותם יורדת במהלך הלילה. שכבת הפלסמה גורמת בתנאים מסוימים להחזרה של קרינה אלקטרומגנטית המגיעה אליה מפני כדור הארץ, בעיקר בתחומי התדירות הגבוהה (תי"ג), תחום ה- HF. התופעה מאפשרת תקשורת רדיו לטווחים ארוכים מאד, אפילו לצידו האחר של כדור הארץ.

גם את היונוספירה מחלקים לשכבות, כאשר מבחינים בהבדל בין היום ובין הלילה כמתואר בטבלה 2. שכבת D היא השכבה הפנימית ביותר, וגובהה בין 50Km ל-80Km בחלק העליון של המזוספירה. בשכבה זו מיוננות בעיקר מולקולות גז תחמוצת החנקן NO^+ , אולם קצב התמזגות האלקטרונים עם היונים הוא כה גבוה, כך שהיוניזציה מעטה (צפיפות אלקטרונים של 10^8-10^{10})

למטר מעוקב). שכבה זו גורמת בעיקר לניחות של גלי רדיו במיוחד בתדרים של מתחת ל-10MHz. מקסימום הבליעה מתרחשת בצהריים, ומתבטא בכך שתחנות רדיו המשדרות בשעות היום בגלים בינוניים (MF) לא נקלטות בטווחים מרוחקים. לעת ערב, שכבת D כמעט ונעלמת ועימה הניחות בתדרי רדיו אלה. ההפסדים בשכבה הזו מגדירים את התדר המינימאלי (Lowest Usable Frequency – LUF) לקיום תקשורת בגלי רקיע.

השכבות הבאות מצויות בתרמוספירה. בשכבת E, המתקיימת בגובה שבין 90Km ל-120Km, מיוננות מולקולות החמצן O_2^+ וצפיפות האלקטרונים המרבית, 10^{11} למטר מעוקב, מתקבלת באמצע היום בגובה של כ-100Km. שכבת E מחזירה גלים אלקטרומגנטיים בתדרים שמתחת ל-10MHz הפוגעים בה בזווית. בעת שקיעת החמה, ההחזר המתקבל מהחלק העליון של שכבת E מאפשר תקשורת ארוכת טווח, כאשר בלילה היא נעלמת במהירות. לעיתים מופיעים בשכבה זו אזורים דקים של יוניזציה מוגברת הנמשכת דקות ספורות עד מספר שעות. תופעה זו, הנקראת Sporadic E-layer (או יצירת שכבת E_s), מתרחשת בחודשי הקיץ ומאפשרת באופן חריג קליטתן של תחנות מרוחקות מאד באיכות טובה.

צפיפות הפלסמה הגבוהה ביותר היא בשכבת F בגובה של 140Km ועד יותר מ-500Km והיא האחראית להחזר גלי רקיע בתחום תדרי ה-HF. כאן היונים הם בעיקר של אטומי חמצן O^+ . במשך היום, שכבה זו מתפצלת לשניים, שכבה F_1 בגובה של 140-200Km עם צפיפות אלקטרונים של כ- $3 \cdot 10^{11}$ למטר מעוקב ומעליה שכבה F_2 עם צפיפות אלקטרונים של כ- $2 \cdot 10^{12}$ למטר מעוקב. בלילה השכבות מתמזגות לשכבת F אחת, אשר צפיפות האלקטרונים המקסימאלית, $8 \cdot 10^{10}$ למטר מעוקב, מתקבלת בגובה השכבה F_2 של כ-250-350Km. כצפוי, בעונת הקיץ, צפיפות היונים בשכבה F_2 היא גבוהה ביותר, אולם שינויים בקצב הפיכת מולקולות החמצן לאטומים גורמים לעיתים להפחתה בתהליך היוניזציה גם בעונה זו.

תהליכי היוניזציה בשכבות היונספירה מושפעות מהמתרחש בשמש. אחד הביטויים לכך הם כתמים שחורים (Sun spots) המופיעים על פני השמש בעת פעילות מגנטית מוגברת, המפחיתה באופן מקומי את הטמפרטורה על פני השמש ל- $3,000-4,500^\circ K$ (כאשר סביבת הכתמים היא בטמפרטורה של כ- $5,780^\circ K$). גודל כתמי השמש עשוי להגיע לקוטר של 80,000Km. תצפיות הראו שהם מופיעים מהר יותר מאשר הם נעלמים במחזוריות (Solar cycle) של כל 10.7 שנים.

ריבוי הכתמים דווקא מגדיל את בהיקות השמש (Total Solar Irradiance), בשל האזור הבהיר הקיים סביב הכתמים. איזור זה המכונה Plage, מקרין קרינת אולטרא-סגול וקרינת X בעוצמה מוגברת, דבר המגדיל את היוניזציה של השכבות העליונות של האטמוספירה. פעילות השמש מאופיינת באמצעות מדידת שטף ההספק ליחידת תדר (Spectral irradiance) של הקרינה האלקטרומגנטית הנפלטת בתדר של 2,800MHz (אורך גל של 10.7cm) ביחידות של Solar flux

$SFU = 10^{-22} W / (m^2 Hz)$. בעת פעילות מוגברת של השמש (Solar maximum) ניכרים שינויים בשדה המגנטי של כדור הארץ ("סערות מגנטיות") להן השפעה על תקשורת הרדיו.

טבלה 2: שכבות היונוספירה ביום ובלילה כולל מספר האלקטרונים המקסימאלי למטר מעוקב.

				DAY	NIGHT
800Km	Atmosphere	Exosphere	Ionosphere		
500Km		Thermosphere		F2 ($O^+, N^+ 2 \cdot 10^{12}$)	F ($O^+ 8 \cdot 10^{10}$)
210Km					
200Km				F1 ($O^+ 3 \cdot 10^{11}$)	
140Km					
120Km		E ($O_2^+ 1.5 \cdot 10^{11}$)		E ($O_2^+ 1.5 \cdot 10^9$)	
90Km					
80Km		Mesosphere		D ($NO^+ 6 \cdot 10^{10}$)	
60Km					
50Km		Stratosphere			
8-18Km	Troposphere				

ניתן להראות שהמקדם הדיאלקטרי היחסי של הפלסמה כפונקציה של התדר נתון על ידי:

$$\epsilon_r(f) = 1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2$$

בביטוי זה מופיעה תדירות הפלסמה $f_p = \sqrt{N_e e^2 / (\epsilon_0 m_e)} / (2\pi)$, כאשר N_e הוא מספר האלקטרונים ליחידת נפח. בהצבת הקבועים הפיזיקאליים (מטען האלקטרון $e \cong 1.6 \cdot 10^{-19} C$, מסת האלקטרון $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31} Kg$, והמקדם הדיאלקטרי של הריק $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{12} F/m$) מתקבל שתדר הפלסמה ב-[Hz] הוא $f_p = 8.977 \sqrt{N_e}$ (צפיפות האלקטרונים הנפחית נתונה כאן ב- $[m^{-3}]$). בשכבה F של היונוספירה מספר האלקטרונים למטר מעוקב ביום היא $2 \cdot 10^{11}$ (בגובה של 120Km) ויורדת לכדי $8 \cdot 10^{10}$ בלילה (בגובה של 450Km). כתוצאה מכך, תדר הפלסמה נע בין 4MHz בשעות היום לכ- 2.5MHz בשעות הלילה. מקדם ההתפשטות בפלסמה נתון על ידי:

$$k(f) = \frac{2\pi f}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_r(f)} = \frac{2\pi}{c} \cdot \sqrt{f^2 - f_p^2}$$

ניתן לזהות את תדר הפלסמה f_p כתדר קיטעון (Cut-off), אשר מתחתיו מקדם ההתפשטות הופך למדומה, הגל האלקטרומגנטי אינו מתקדם אלא דועך (Evanescent) בתוך הפלסמה. על מנת שהגל יתפשט בפלסמה נדרש שהתדר שלו יהיה $f > f_p$. במקרה כזה מהירות המופע (Phase velocity) של הגל תהיה:

$$v_{phase} = \frac{2\pi f}{k(f)} = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2}}$$

מהירות החבורה (Group velocity) מחושבת מתוך הנגזרת:

$$v_{group} = \left[\frac{1}{2\pi} \frac{dk(f)}{df} \right]^{-1} = c \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2}$$

כאשר גל אלקטרומגנטי מגיע מהשכבות הנמוכות של האטמוספירה שאינן מיוננות ופוגע בשכבה ביונוספירה, מתקיימות החזרה (חזרה לאטמוספירה) ושבירה (לתוך היונוספירה). מקדם השבירה של האטמוספירה הבלתי מיוננת שווה בקירוב ל-1 ואילו זה של הפלסמה קטן יותר. מתוך חוק Snell אפשר למצוא את זווית הפגיעה הקריטית θ_{min} אשר מעליה מוחזר הגל האלקטרומגנטי לאטמוספירה החזרה גמורה (Total internal reflection) (ללא שבירה לתוך היונוספירה), כמתואר באיור 1:

$$\sin(\theta_{min}) = \sqrt{\epsilon_r(f)} = \sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f}\right)^2}$$

על מנת שתתקיים החזרה גמורה, נדרש שזווית הפגיעה θ_i בשכבת היונוספירה תהיה גדולה מהזווית הקריטית, כלומר $\theta_i > \theta_{min}$. מתנאי זה ניתן לכתוב את תחום התדרים בהם תתקבל החזרה גמורה עבור זווית פגיעה θ_i נתונה:

$$f_p < f < \frac{f_p}{\cos(\theta_i)}$$

מעיון בתוצאה האחרונה, ניכר שככל שזווית הפגיעה θ_i תהיה גדולה יותר, כך החזרה מהיונוספירה תתאפשר בתדרים גבוהים יותר.

התדר הקריטי מוגדר כתדר הגבוה ביותר של גל המשודר בכיוון אנכי ($\theta_i = 0$) ועדיין מוחזר מהיונוספירה. זהו למעשה תדר הפלסמה $f_p = 8.977 \sqrt{N_{eMAX}}$ של השכבה בעלת ריכוז היונים המקסימאלי.

זווית הפגיעה המקסימאלית θ_{max} היא של קרן שיצאה משיקה לפני כדור הארץ (ראה איור 7.11). ניתן לחשב אותה אם ידוע גובה שכבת היונוספירה $h_{Ionosphere}$ מעל פני הים:

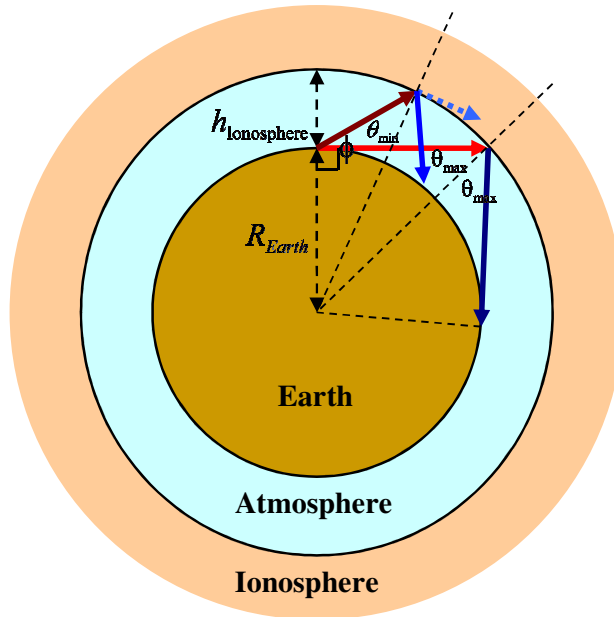
$$\sin(\theta_{max}) = \frac{R_{Earth}}{R_{Earth} + h_{Ionosphere}}$$

כאשר רדיוס כדור הארץ הוא $R_{Earth} \cong 6,378 \text{ Km}$. הדבר מאפשר לקבוע את התדר המקסימאלי (Maximum Usable Frequency) לקיום התנאי להחזרה גמורה מהיונוספירה:

$$MUF = \frac{f_p}{\cos(\theta_{max})} = \frac{f_p}{\sqrt{1 - \sin^2(\theta_{max})}} = \frac{f_p}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_{Earth}}{R_{Earth} + h_{Ionosphere}} \right)^2}}$$

מעל לתדר זה, לא תימצא קרן אשר תגיע מפני כדור הארץ לשכבת היונוספירה וגם תוחזר ממנה החזרה מלאה. התדר המינימאלי (Lowest Usable Frequency) הוא התדר הנמוך ביותר של הגל המצליח לעבור את שכבת D, להגיע לשכבות היונוספירה הגבוהות ועדיין להיות מוחזר מהן בעוצמה אשר ניתנת לקליטה על פני כדור הארץ. בתקשורת ארוכת טווח העושה שימוש בגלי רקיע המוחזרים מהיונוספירה, נהוג לשדר בתדר הגבוה מה-LUF, ואשר ערכו הוא כ- 80% מערך ה-MUF. מצאנו למעשה את תחום זוויות הפגיעה θ_i של גל רקיע המשודר ליונוספירה בתחום התדרים $f_p < f < f_{MUF}$ ומוחזר אל פני כדור הארץ:

$$\sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2} < \sin(\theta_i) < \frac{R_{Earth}}{R_{Earth} + h_{Ionosphere}}$$



איור 1: החזרים של גלי רקיע מהיונוספירה: זוויות פגיעה קריטית θ_{\min} ומרבית θ_{\max} .

ניגש עתה לחישובי טווחי התקשורת האפשריים באמצעות גלי רקיע בתחום תדרים זה. המרחק המקסימאלי בין שתי הנקודות על קשת פני כדור הארץ ביניהן תתקיים תקשורת, נקבע על ידי קרן המשודרת במקביל לפני כדור הארץ, לכוון האופק (קרן אנכית לרדיוס כדור הארץ הפוגעת ביונוספירה בזווית θ_{\max}). הוא תוצאה של הגיאומטריה בלבד:

$$d_{\max} = (\pi - 2\theta_{\max}) \cdot R_{\text{Earth}} = \left[\pi - 2 \cdot \underbrace{\arcsin\left(\frac{R_{\text{Earth}}}{R_{\text{Earth}} + h_{\text{ionosphere}}}\right)}_{\theta_{\max}} \right] \cdot R_{\text{Earth}}$$

הגרפים באיור 2.a מתארים את תדר ה-MUF והטווחים בהם מתקיימת תקשורת בגלי רקיע המוחזרים משכבות היונוספירה השונות.

המרחק המינימאלי נקבע על ידי זווית הפגיעה הקריטית θ_{\min} להחזרה גמורה. נשתמש תחילה במשפט הסינוסים לחישוב הזווית ϕ בין הקרן המשודרת לבין רדיוס כדור הארץ (ראה איור 2.a):

$$\frac{R_{Earth}}{\sin(\theta_{min})} = \frac{R_{Earth} + h_{Ionosphere}}{\sin(\phi)} \rightarrow \sin(\phi) = \frac{R_{Earth} + h_{Ionosphere}}{R_{Earth}} \cdot \sin(\theta_{min}) = \frac{\sin(\theta_{min})}{\sin(\theta_{max})}$$

המרחק המינימאלי בין שתי הנקודות על קשת פני כדור הארץ ביניהן תתקיים תקשורת נקבע על ידי הזווית הקריטית להחזרה מלאה, ולכן הוא גם פונקציה של תדר השידור:

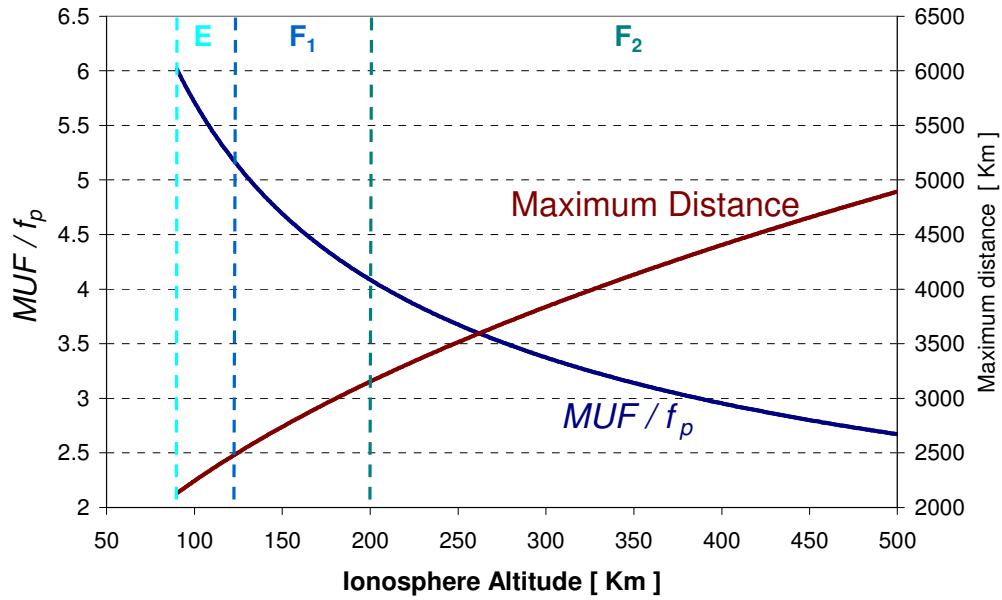
$$d_{min} = 2(\pi - \theta_{min} - \phi) \cdot R_{Earth} = 2 \cdot \left\{ \pi - \theta_{min} - \underbrace{\arcsin \left[\frac{\sin(\theta_{min})}{\sin(\theta_{max})} \right]}_{\phi} \right\} \cdot R_{Earth}$$

$$= 2 \cdot \left[\underbrace{\pi - \arcsin \left[\sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2} \right]}_{\theta_{min}} - \underbrace{\arcsin \left[\left(1 + \frac{h_{Ionosphere}}{R_{Earth}} \right) \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{f_p}{f} \right)^2} \right]}_{\phi} \right] \cdot R_{Earth}$$

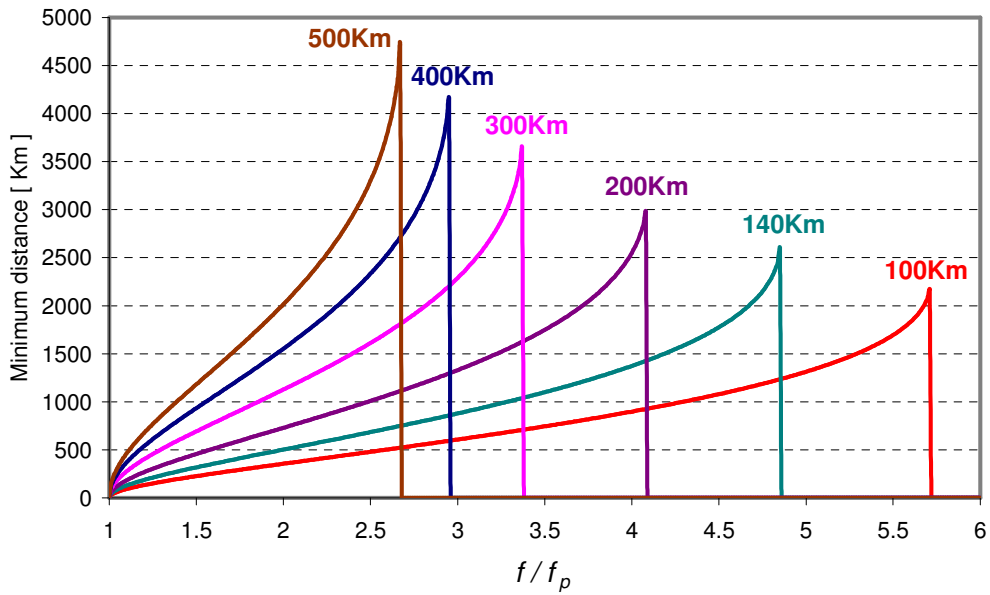
הטווחים המינימאליים אליהם מגיעות הקרניים על פני כדור הארץ נתונים באיור 2.b עבור החזרים מהיונוספרה בגבהים שונים. טבלה 3 מסכמת את ההחזרה מהשכבות השונות.

טבלה 3: החזרה משכבות היונוספרה השונות.

Time	Layer	Altitude	Electron density	Plasma frequency	Maximum Usable Frequency	Minimum distance	Maximum distance
		$h_{Ionosphere}$	N_e	f_p	MUF	d_{min}	d_{max}
Day	E	100Km	$1 \cdot 10^{11}$	2.84MHz	16.2MHz	470Km@7MHz	2244Km
Day	F1	120Km	$2 \cdot 10^{11}$	4.02MHz	21.0MHz	350Km@7MHz 910Km@14MHz	2455Km
Day	F2	350Km	$2.5 \cdot 10^{11}$	4.49MHz	14.1MHz		4133Km
Night	E	100Km	$1.5 \cdot 10^9$	348KHz	1.99MHz	1415Km@1.8MHz	2244Km
Night	F	450Km	$8 \cdot 10^{10}$	2.54MHz	7.11MHz	883Km@3.5KHz	4657Km



(a)



(b)

איור 2: החזרים של גלי רקיע מהיונוספרה: (a) התדר והטווח המקסימאליים כפונקציה של גובה שכבת היונוספרה, (b) הטווחים המינימאליים כפונקציה של התדר.



פרופסור יוסף פנחסי

פרופ' יוסף פנחסי (52) הוא דקן הפקולטה להנדסה באוניברסיטת אריאל בשומרון. תחום התמחותו הוא בנושאים של עירור קרינה אלקטרומגנטית ושימושיה לתקשורת אלחוטית, חישה מרחוק והדמיה. מחקריו עוסקים בפיתוח תיאוריות במרחב התדר לניתוח אינטראקציות רחבות סרט ומפולגות בין שדה אלקטרומגנטי ותווך, כפי שהן מתבטאות במקורות קרינה רבי עוצמה, לייזרים ומייזרים ובהתפשטות קרינה בחומרים דיאלקטריים, במוליכי גלים, בקווי תמסורת ובאטמוספירה. במסגרת זו, הוא בוחן את השפעות התווך על הביצועים של מערכות תקשורת ומכ"ם אלחוטיות הפועלות בתחום תדרים רחב, כולל גלים מילימטרים ותת-מילימטרים (Tera-Hertz) ופיתח טכניקות פאסיביות ואקטיביות לגילוי מרחוק של עצמים מוסתרים.

פרופ' יוסי פנחסי כתב את הספרים "היסודות הפיזיקליים של התקשורת האלקטרונית" "תקשורת ספרתית ומודמים" ו"תקשורת אלחוטית בגלי רדיו", בהם מוצגים היסודות התיאורטיים וההיבטים הפיזיקליים הקשורים בעיבוד והעברה של אותות במערכות תקשורת, כמו גם טכניקות שידור וקליטה בערוץ תקשורת אלחוטי, תוך דיון מעמיק במנגנוני רעש מאזני תקשורת במתארים שונים ומגבלות תחום דינמי בערוץ כזה.