

גלי רקיע - התפשטות גלים בתדר גבוה

נכתב ע"י אבנר דרורי 4X1GE

כמו שקורה בוודאי להרבה מאיתנו, חשבתי שאני מכיר את נושא התפשטות הגלים. רק באחת מההרצאות שהתקיימו בעבר במסגרת האגודה, גיליתי שהידע שלי מזערי ויש צורך לעשות מעשה כדי לשפר את המצב. התחלתי להתעמק בנושא והתוצאה הייתה סדרת מאמרים ב-"הגל" שהתחילה בסוף שנת 1987. מאז לא חלו שינויים בפזיקה של החלל אבל חלו הרבה שינויים במידע שאנחנו יכולים לקבל מהאינטרנט. אני מקווה שסדרת מאמרים זאת תדרכן את הקוראים לעיין במקורות הידע ולהכין למה יש, או אין, תקשורת ביום מסוים.

אגב – אם חששתם שהתנאים דועכים והמצב יהיה רק גרוע יותר, אל ייאוש. כבר בפרקים הראשונים תראו שאנחנו בשפל בין שני מחזורי כתמי שמש והמצב יחמיר אבל בעקבות השפל תבוא עליה וכולנו נצפה לה בתקווה.

מבוא להתפשטות גלים

מכשיר קשר אינו מספיק לצורך תקשורת אלחוטית, נדרש גם "מתווך" דרכו מתפשטים גלי הרדיו. רוב התעסוקה, בתקשורת האלחוטית, נעשית בציוד הקשר עצמו כאשר יש נטייה להימנע מלהיכנס למסתורי הנושא הנקרא "התפשטות גלים". התפשטות הגלים הינו נושא הדומה למזג האוויר, "כולם מדברים עליו אבל אף אחד לא עושה שום דבר". נכון, הרבה אי אפשר לעשות אבל לעומת זאת ניתן ללמוד את תכונות התפשטות הגלים ולנצלן לצרכים הנדרשים.

בהמשך נראה גם דמיון נוסף למזג האוויר בתכונות אחרות, במיוחד לגבי הקשר למחזוריות עונות השנה ומחזור כתמי השמש. נלמד שקיים גם דמיון נוסף, אפשר לבצע תחזיות ארוכות טווח ותחזיות קצרות טווח אולם, בדומה למזג האוויר, אי אפשר לבצע תחזיות לפרקי זמן בינוניים.

בפרקים הבאים תינתן סקירה על הנושאים הבאים ועל נושאים נוספים הקשורים להתפשטות הגלים.

- תקשורת, טווחים ארוכים, המבוצעת בעזרת "גלי רקיע".
- השפעת היוניזציה ביונוספירה על התפשטות הגלים.
- השפעת קרינת השמש על רמת היוניזציה.
- השפעת מספר כתמי השמש על רמת היוניזציה.
- קיום מחזור סולרי (כתמי שמש) בן 11 שנים.
- קיום שכבות יונוספריות (D, E, F).
- קיום תדרים קריטיים (Critical Frequencies).
- האפשרות לקיים תקשורת ארוכת טווח בתדרים גבוהים מהתדרים הקריטיים.
- יתרונות השידור בזווית קרינה נמוכות.
- תופעת התדר המרבי הניתן לשימוש (MUF – Maximum useable frequency)
- התופעה ששכבה D סופגת פחות ככל שהתדר עולה.
- התופעה ששכבה D נעלמת בשעות הלילה.

נושא התפשטות הגלים נמצא במחקר מעמיק ב-50 השנים האחרונות ונצבר בו ידע רב. יחד עם זאת, מספר הנעלמים עדיין גדול והתורה היא, במידה רבה, בחזקת אמנות ולא רק מדע טהור. ממש כמו במזג אויר.

הפרקים הבאים מהווים סקירה קצרה יחסית. מי שמעוניין להרחיב את ידיעותיו בנושא יוכל לעיין בתקופונים השונים ובמיוחד בספרים הבאים :-

1. The short-wave propagation handbook – principles, theory, prediction –
By George Jacobs W3ASK and Theodore Cohen N4XX.
2. The radio amateurs' handbook – ARRL.
3. ARRL antenna book.

חלק גדול, מהמתואר בפרקים הבאים, נלקח מהספרים הנ"ל ומפורסם כאן באדיבותם של המחברים.

פרק א' - כתמי השמש, ספירתם ומחזוריהם

רקע היסטורי

נושא זה נבחר ראשון להצגה. הנושא נבחר לאו דווקא בגלל חשיבותו להבנת התפשטות הגלים. הוא נבחר מכיוון שהוא מוזכר הרבה בהקשר לכך מבלי שמובנו ידוע היטב לרוב אלה שמדברים עליו. עיון בפרק זה אמור להביא לשיפור המצב, לפחות מבחינה זו.

כתמי השמש ידועים כבר מספר אלפי שנים. ניתן לראותם בעין בלתי מזוינת בזמן אובך וערפל. ישנן עדויות שתופעות אלה נצפו בסין כבר לפני 2000 שנה.

בשנת 1600 התחיל גלילאו בתצפיותיו בעזרת טלסקופ. עדיין ישנם רשומים בכתב ידו, משנת 1612, המתארים את הכתמים שגילה. התערבות הכנסייה הנוצרית השביתה את המחקרים בנושא זה לתקופה ארוכה.

במאה ה-18 התחיל מעקב מסודר, אחרי כתמי השמש, באירופה. הובחן שהכתמים הם בגודל שונה, בודדים או בקבוצות ובעלי משך קיום שונה. כתמי השמש נעים, על פניה, ממזרח למערב במחזוריות של 27 ימים בהם השמש סבה על צירה.

ספירת כתמי השמש

זמן קצר לאחר מכן התחילה פעילות ממוסדת במחקר כתמי השמש, ע"י מצפה הכוכבים של ציריך שקיים תצפיות ומעקבים משנת 1849. מנהל מצפה הכוכבים, רודולף וולף (Rudolf Wolf), הציג שיטה כיצד לקבוע ערך מספרי לרמת כתמי השמש. עד היום מכנים את המספר כ-"Wolf Number" ומסמנים אותו ב-R (לפי שמו הפרטי). מספר R נקבע לפי הנוסחה:-

$$R = K (10g+F)$$

R = מספר "וולף" של כתמי השמש.

g = מספר הקבוצות בהם מרוכזים הכתמים.

F = מספר כתמי השמש, בין אם בודדים או נמצאים בקבוצות.

K = גורם, התלוי בצופה, הלוקח בחשבון את איכות הטלסקופ שלו, תנאי הצפייה וימימותו של הצופה.

וולף קבע, בצורה אינטואיטיבית, שישנה חשיבות רבה יותר לקבוצות ולכן נתן להם שקלול גבוה יותר (10) מאשר למספר הכתמים. אי לכך, ניתן לראות מהנוסחה ש-"מספר וולף" הינו אינדקס של פעילות השמש ולא מספר הכתמים.

מצפה הכוכבים של ציריך ביצע מדידות, בצוהרי כל יום, משנת 1849 עד 1981. מספרי ה-R שנמדדו היו מפורסמים כ-"מספר כתמי השמש של ציריך". מאז 1981 הועברה האחריות, לנושא זה, למרכז בינלאומי הנמצא בבריסל והמתבסס על ממצאי מצפה הכוכבים של לוצרן בשוויץ.

ה-R היומי משתנה בערכו בתחום רחב למדי. כדי לפשט את השימוש, במספרים אלה, נהוג להשתמש בממוצע חודשי המסומן ב-Rm.

גם הממוצעים החודשיים משתנים מדי חודש במידה שאינה מאפשרת לקבוע מגמות ברורות. לצורך זה נקבע מספר נוסף המכונה "ממוצע שנתי מוחלק", R_s , שבעזרתו נקבעת המגמה של שנוי פעילות השמש

$R_s = 12 \text{ Month running smoothed sunspot number.}$

עבור חודש נדון מסוים יש לקחת בחשבון את ששת החודשים שלפניו וששת החודשים שאחריו. אי לכך, קביעת המגמה של R_s יכולה להתבצע רק אחרי 6 חודשים מהמועד שדנים בו. הנוסחה לחישוב, עבור חודש R_m7 תהיה:-

$$R_s = \frac{0.5R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + \dots + R_{m13}}{12}$$

12

קשה לטעון כי הצורך לחכות 6 חדשים, כדי לדעת מה המגמה היום, עוזר הרבה. אי לכך הערך הזה משמש יותר לרישומים היסטוריים מאשר לשימוש יום יומי.

לפני עידן האינטרנט, מספרי הממוצעים החודשיים והממוצע השנתי המוחלק היו מפורסמים, מדי חודש, במדורים המתאימים בירחונים המקצועיים. ראוי להזכיר במיוחד את הירחון CQ שמדור התפשטות הגלים שבו נערך ע"י ג'ורג' גייקובס W3ASK שהיה מוכר לנו גם מביקורו בארץ.

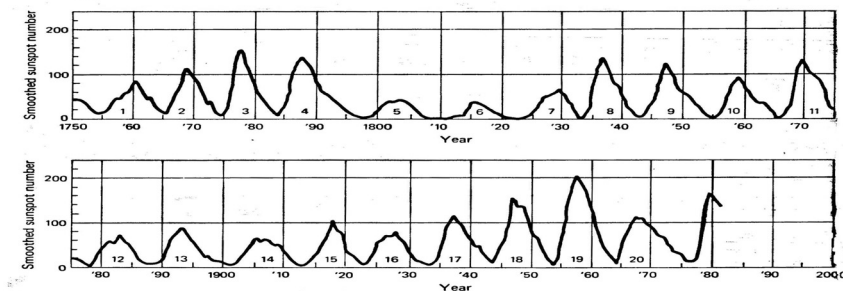
היום ניתן לקבל את מספרי כתמי השמש, בזמן אמת, באתרי אינטרנט רבים.

מחזורי כתמי השמש

התגלית, של מחזוריות כתמי השמש, נזקפת לזכותו של הגרמני הנדריך שוובה (Schwabe) שהיה רוקח במקצועו ואסטרונום בתחביבו. ספירה מייגעת יום-יומית, של כתמי השמש, במשך שנים ארוכות הביאה למסקנותיו שפורסמו בשנת 1843.

תצפיות רב שנתיים, בהם נמדדו מספר הכתמים, הראו שקיימת מחזוריות בהופעתם. ספירת המחזוריים החלה בשנת 1755, שהיא השנה הראשונה לתצפיות מסודרות.

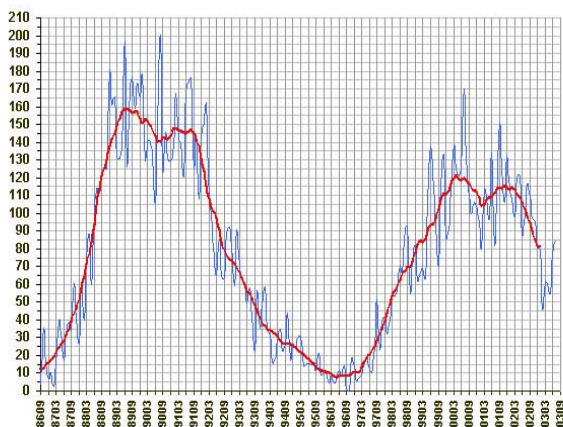
מחזור 21 הסתיים בתחילת 1987 והיום (שנת 2006) אנחנו כבר בסיומו של מחזור 23. איור א' 1 מתאר את המחזוריים, של כתמי השמש, מאז שהתחילה מדידתם ועד 1980 (מחזור 21).



איור א' 1 – מחזורי כתמי השמש

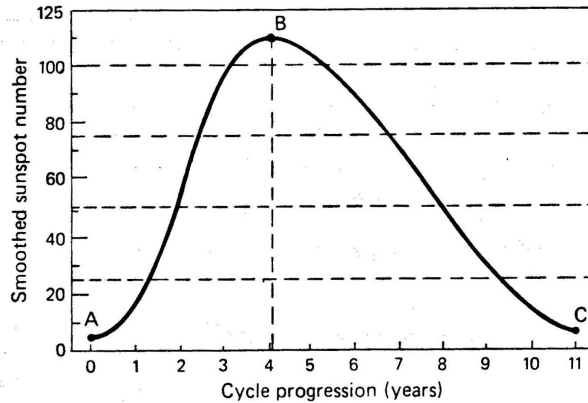
איור א' 2 מתאר את 2 המחזוריים האחרונים, מחזור 22 והמחזור הנוכחי 23. ניתן לראות את המספרים החודשיים R_m ואת התרשים המוחלק R_s של כתמי השמש.

Solar Cycles 22-23



איור א' 2 – מחזורי כתמי השמש

מחזורי כתמי השמש דומים ומאופיינים בעליה מהירה ודעיכה איטית (ראה איור א' 3) אבל שונים בפרמטרים המאפיינים כל אחד מהם.



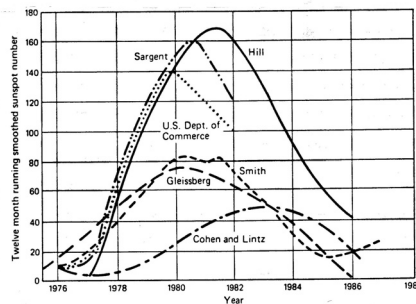
איור א' 3 – מחזור אופייני של מספר כתמי השמש

להלן מספרים מאפיינים, של מחזורי כתמי השמש, המהווים ממוצעים של מספר המחזורים שנמדדו עד גמר מחזור 19 :-

המשתנה	תחום הערכים	ממוצע
R מזערי	בין אפס ל-11	.5
זמן העלייה	בין 2.6 ל-6.9 שנים	4.1 שנים
R מרבי	בין 49 ל-201	109
זמן דעיכה		6.7 שנים
זמן ממוצע ביו ערכים מזעריים סמוכים		כ-10.8 שנים
זמן בין ערכים מרביים סמוכים	בין 13 ל-17.1 שנים	כ-10.9 שנים

מקובל, בדרך כלל, שאורך מחזור ממוצע הינו בן 11 שנים.

כפי שראינו לעיל, המחזורים שונים בצורתם במידה שאינה מאפשרת כמעט לחזות התנהגות, של מחזור עתידי, בהתאם למחזורי העבר. למרות זאת, עדיין נעשים ניסיונות לחיזוי ובאיור א' 4 ניתן לראות את מגוון התוצאות של חיזויים שנעשו ע"י גורמים שונים.



איור א' 4 – ניסיונות לחיזוי מחזור 21 של כתמי השמש

יתכן וישנה משמעות, לצורך בחזוי, לצרכי תיכון רשתות תקשורת מסחריות וצבאיות אבל זה עדיין לא מדע מדויק. לחיזוי אין משמעות רבה לתקשורת חובבי הרדיו.

השפעת כתמי השמש

עד עתה דיברנו על כתמי השמש אולם לא הזכרנו מה הקשר ביניהם ובין התפשטות גלי הרדיו.

גלי הרדיו, כפי שיוסבר במפורט מאוחר יותר, מתפשטים כתוצאה מההחזרות מהיונוספירה. פרוש המילה "יונוספירה" (Ionosphere) הוא "מרחב (Sphere) המכיל יונים (Ions)". מידת היינון (Ionization) של היונוספירה, המשפיעה על כשר ההחזרה שלה, נקבעת ע"י אנרגיה המגיעה מהשמש. ליתר דיוק, מהאזורים המכונים "כתמי השמש" שעל פניה. אנרגיה זו "משודרת" הן כאנרגיה אלקטרומגנטית והן כחלקיקים אטומיים. האחרונים יוזכרו, בנוסף, בשלב מאוחר יותר.

האנרגיה האלקטרומגנטית משודרת בתחום תדרים רחב מאד. ישנה קרינה אולטרה-סגולית (UV), קרינת קרני X (X Ray) קרינת רדיו וכמובן הקרינה המאירה לנו את היום.

הקרינות, המשפיעות על היוניזציה, מופקות מאזורי "כתמי השמש". באזורים אלה קיימת פעילות סולרית המורידה את טמפרטורת פני השמש, באותם האזורים, ולכן הם נראים כהים יותר, ממש כמו כתמים.

הקשר בין השפעת השמש על היונוספירה הובחן בצורה בולטת בשנת 1927. בשנה זו ארע לקוי חמה מלא ובאותה עת ירדו תנאי ההתפשטות במידה רבה. מאז משמש כל לקוי חמה מלא כנושא מחקרי ההתפשטות גלים. מאותה תקופה ואילך נמשך המחקר בהשפעת השמש ובקשר בין כתמי השמש ומחזוריהן על מחזוריות תנאי התקשורת.

הפעילות הסולרית, בכתמי השמש, יוצרת גם תופעות הפוגעות בתנאי התפשטות הגלים. פעילויות אלה, הקשורות ל-"זהר הצפוני" עלולות לגרום להאפלה (Blackout) ומניעת אפשרות תקשורת לתקופות קצרות. גם על כך ידובר מאוחר יותר.

שטף סולרי

ספירת הכתמים, כאמור, דורשת זמן אסוף ארוך ואינה נותנת תוצאה מידית. תוצאות מידיות ניתן לקבל ע"י מדידה ישירה של האנרגיה האלקטרומגנטית המופקת מאזורי הכתמים.

מלחמת העולם השנייה הביאה לנו את המכ"ם בתחום המיקרוגל. מחקרים בנושא העלו שהשמש מקרינה אנרגיה, בתחום המיקרוגל, ברמה מספיק גבוהה המאפשרת קליטה ומדידה במקלטי מכ"ם רגילים. תוך כדי המחקרים גילו שאנרגיה בתדרים מסוימים, המגיעה מהשמש, נמצאת ביחס ישר לרמת היוניזציה של שכבת F, זו השכבה האחראית לתקשורת ארוכת הטווח. מדי יום ביומו, בשעה 1700Z, מצפה הכוכבים של אוטבה (קנדה) מודד את עוצמת הקרינה, בתדר של 2.695 ג"ה, המגיעה מהשמש. תדר זה הינו המתאים ביותר להיות הקשר בין הקרינה האלקטרומגנטית ובין היוניזציה של שכבת F. תוצאות המדידה נקראות "שטף סולרי" (SF-Solar Flux). קיים קשר ליניארי בין השטף הסולרי SF ובין מספר כתמי השמש R. הקשר מקוויים לפי הנוסחה:

$$SF = 73.4 + 0.62 R$$

מדידה זו פשוטה יותר לבצוע מאשר ספירת כתמי השמש ומאחר ואינה תלויה במיומנות המבצע (ראה K לעיל), היא גם אמינה ועקבית.

מספרי השטף הסולרי משודרים ע"י תחנת WWV, קולוראדו-ארה"ב, בדקה ה-18 שלאחר כל שעה. נתונים אלה יכולים לשמש לחיזוי התקשורת ליום הקרוב.

(המשך יבוא)

גלי רקיע - התפשטות גלים בתדר גבוה

נכתב ע"י אבנר דרורי 4X1GE

(המשך מחוברת קודמת)

פרק ב' - היונוספרה

מבוא

בחלקה העליון של האטמוספירה, האופפת את כדור הארץ, קיימות מספר שכבות בעלות מטענים חשמליים. שכבות אלה מסוגלות לכופף את גלי הרדיו ולהחזירם ארצה במרחקים גדולים. המרחב, המכיל את השכבות, נקרא "יונוספרה". הפרוש המילולי, של המילה, הוא "מרחב המכיל יונים".

התכונות החשמליות, של שכבות אלה, משתנות בתחום רחב מאד והסיבה לכך הם השנויים בעירור החשמלי של אותן השכבות.

היונוספרה נוצרת כתוצאה מהאנרגיה האולטרה-סגולית (UV), המוקרנת מהשמש ושעוצמתה משתנית, הן בזמן והן במקום הגיאוגרפי.

עוצמת הקרינה האולטרה-סגולית משתנה מדי שעה, עונה והמקום הגיאוגרפי כולות במצב היחסי בין השמש וכדור הארץ. יחד עם זאת יש גם שנויים משנה לשנה, במחזורים של בערך 11 שנים, בתכונות היונוספרה להחזרת גלי רדיו. שנויים אלה קשורים למחזור כתמי השמש הידועים.

כתמי השמש הם סימן לסערות המקרינות כמויות גדולות של אנרגיה אולטרה-סגולית. כאשר מספר הכתמים גבוה, זה סימן שהקרינה גבוהה, מטעני היונוספרה עולים ותנאי התקשורת משתפרים. כאשר מספר הכתמים יורד תנאי התקשורת נעשים גרועים יותר.

מאחר וליונוספרה יש השפעה מכרעת על תכונות התפשטות הגלים בתחום ה-ת"ג, מן הראוי ללמוד את מבניה, תכונותיה והתנהגותה.

תגליות ראשונות

בשנת 1901 הצליח מרקוני לשדר אותות רדיו למרחק של 3000 ק"מ. הצלחה זו הייתה תמוהה לנוכח הדעה, ששררה אז, כי גלי הרדיו מתפשטים בקו ישר בלבד.

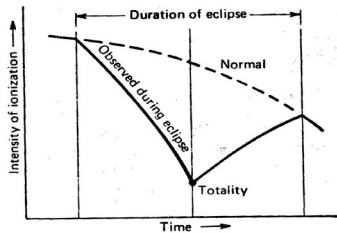
בשנת 1902, שנה לאחר הצלחתו של מרקוני, הציגו שני מדענים תיאוריה לפיה מוקפת האטמוספירה בשכבה מוליכה חשמלית המחזירה את גלי הרדיו. מדענים אלה, שבצעו עבודותיהם בנפרד, היו הוויסייד (Heaviside) האנגלי וקנלי (Kennely) האמריקאי. שניהם שיערו ששכבה זו נוצרת בגלל קרינת השמש אבל עברו 20 שנה נוספו עד שהשערה זו הוכחה באופן ניסיוני.

בשנת 1924 מדרד המדען האנגלי אפלטון (Appelton) החזרות משכבה הנמצאת בגובה של כ-150 ק"מ מעל פני כדור הארץ. שנה לאחר מכן, ב-1925, הוכיחו זאת המדענים האמריקאים טובה ובריט (Tuve & Brit) ע"י ניסיונות מבוקרים. הם שידרו אותות רדיו כלפי מעלה ומדדו את הזמן עד קליטת ההד מהיונוספרה.

הם חזרו על הניסיונות בתחום רחב של תדרים וגילו שקיים תדר קריטי שמעליו אין החזרות.

בצוע נסויי טובה-בריט, במקומות שונים בעולם ובמשך תקופות ארוכות, הביאו לגלוי שהתדר הקריטי משתנה בהתאם לשעות היום, עונות השנה והמקום הגיאוגרפי. עובדות אלה היו הוכחה שלשמש יש השפעה על עצמת היונוספרה.

הוכחה נוספת לכך היה לקוי החמה המלא שאירע בשנת 1927. התדר הקריטי ירד בהתאם להתקדמות הלקוי כמתואר באיור ב' 1.



איור ב' 1 - בזמן לקוי חמה, הירח מונע מקרינת השמש להגיע לכדור הארץ וכתוצאה מכך יורדת רמת היוניזציה

המדידות והתצפיות הוכיחו, ללא עוררין, את התלות, של תכונות התפשטות הגלים, בקרינת השמש.

לפני עידן האינטרנט, מספרי הממוצעים החודשיים והממוצע השנתי המוחלק היו מתפרסמים, מדי חודש, במדורים המתאימים בירחונים המקצועיים. ראוי להזכיר במיוחד את הירחון CQ שמדור התפשטות הגלים שבו נערך ע"י ג'ורג' ג'ייקובס W3ASK שהיה מוכר לנו גם מביקורו בארץ.

היום ניתן לקבל את מספר כתמי השמש, בזמן אמת, באתרי אינטרנט רבים.

היווצרות היונוספירה

השכבה העליונה, של האטמוספירה, מורכבת בעיקר מגזים של חמצן וחנקן. כמו כל חומר, גם גזים אלה מורכבים מאטומים בעלי גרעין המוקף ע"י אלקטרונים.

במצב רגיל האטום אדיש מבחינה חשמלית. כאשר האטום נמצא בשדה אלקטרומגנטי חזק, כגון קרינה אולטרה-סגולית, חלק מהאלקטרונים עשויים להתנתק ממנו. במצב זה מתערער שווי המשקל החשמלי ונוצרת שכבת גז בעלת תכונות של מוליכות חשמלית. האטומים, במצבם החדש, נקראים "יונים" (Ions) והפעולה נקראת "יוניזציה" (IONIZATION) במצב זה השכבות תהינה "מיוננות" או "בעלות רמת יון גבוהה"..

עם ירידת רמת הקרינה האולטרה-סגולית, האלקטרונים מצטרפים בחזרה לאטומים ונוצרת פעולה הנקראת "רקומבינציה" (Recombination). פעולה זו מתרחשת בעיקר בשעות הלילה בהם לא קיימת הקרינה האולטרה-סגולית מהשמש. הרקומבינציה מורידה את רמת היינון, של היונוספירה, ואת כושר ההולכה החשמלית שלה.

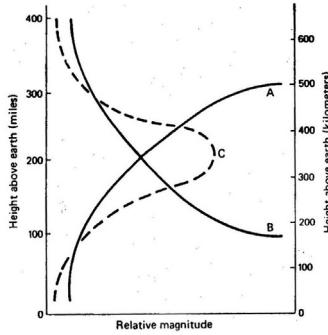
למרות שהיוניזציה מושפעת בעיקר מהקרינה האולטרה-סגולית, קיימים גם גורמים נוספים הגורמים לה. גם קרני ה-X, חלקיקי יסוד אטומיים ואפילו מטאורים עשויים לגרום לינון היונוספירה.

מבנה היונוספירה

הקרינה האולטרה-סגולית פוגשת, בדרכה מהשמש, את השכבות העליונות של האטמוספירה המורכבות מגזים קלושים. מכיוון שהגזים קלושים גם רמת היוניזציה תהיה נמוכה יחסית.

ככל שהאנרגיה חודרת לאטמוספירה היא פוגשת גזים צפופים יותר ונוצרת יוניזציה גבוהה יותר. יותר אנרגיה נמסרת ליונים והקרינה עצמה נחלשת. מכיוון שהיא נחלשת, הרי שהיוניזציה, של השכבות הנמוכות, תהיה גם היא נמוכה יותר. המחשה לכך באיור ב' 2.

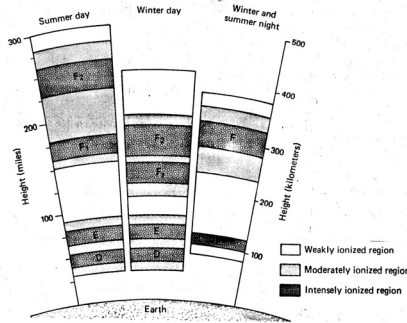
הקרינה האולטרה-סגולית מורכבת מתחום רחב של תדרים והאטמוספירה מורכבת מגזים שונים הנמצאים בגבהים שונים. הגזים השונים רגישים לינון בהתאם לתדרים אופייניים, כל גז "מתעורר" בתדר אחר. אי לכך נוכל לצפות שהיוניזציה תתקיים בשכבות שונות בהתאם לגזים המרכיבים אותן.



- איור ב' 2 - התהוות היוניזציה כתוצאה מהקרינה
 A - עצמת הקרינה האולטרה-סגולית כפונקציה של הגובה
 B - הצפיפות המולקולארית יורדת ככל שעולים בגובה
 C - עוצמת היוניזציה המשתנה בגבהים השונים

למרות שמדובר על "שכבות", לא תמיד הן נפרדות לחלוטין אחת מהשנייה. כל שכבה עשויה להיות חופפת לשנייה או מרוחקת ממנה. רצף השכבות יוצר תחום שבתוכו ישנן מספר שכבות בעלות רמת יינון גבוהה. שכבות אילו מכונות F2, F1, E, D.

סימון השכבות הוצע ע"י אפלטון בזמן שגילה את שכבות קנלי-הוויסיד בשנת 1924. השכבה הראשונה שהתגלתה הייתה שכבה E שזכתה לכינויה בהתאם לאות המקובלת לסימון הווקטור של השדה החשמלי (Electrical - E). השכבה שהתגלתה מעליה סומנה ב-F וזאת שמתחתיה סומנה ב-D. תיאור השכבות באיור ב' 3.



איור ב' 3 - שניים יומיים ועונתיים בשכבות היונוספרה.

השם "יונוספרה", שניתן למכלול השכבות שהתגלו, הוצע ע"י רוברט ווטסון-ווט (Watson Watt) שהיה עוזרו של אפלטון וזכה להוקרה אישית בעיקר בגלל תרומתו לפתוח המכ"ם. הצעתו התקבלה והשם "יונוספרה" מקובל היום כהגדרה מדעית של אותו מרחב.

שכבת "D"

שכבת D הינה הנמוכה, בין שכבות היונוספרה, ונמצאת בגובה של 50 עד 90 ק"מ. שכבה זו היא בעלת זמן רקומבינציה קצר ולכן היא תהיה קיימת רק בזמן שהשמש זורחת, כלומר בשעות היום בלבד. עצמתה גבוהה בשעות הצהריים והיא נעלמת לחלוטין בשעות הלילה.

שכבה D אינה מחזירה גלי רדיו הגבוהים מ-300 ק"ה לכן אינה מעניינת אותנו מבחינת השימוש בה לצורך תקשורת ת"ג. התדרים המעניינים אותנו חודרים דרכה אולם, לצערנו, הם גם נבלעים על ידה.

הבליעה חזקה יותר כאשר שכבה זו מיוננת יותר. כאשר ישנן סערות מגנטיות מידת היינון עולה והבליעה גוברת. לעיתים הבליעה גוברת ומגיעה לרמה המונעת לחלוטין מעבר גלי רדיו דרכה וקיום קשרים בתחומי ה-ת"ג.

הניחות עצמו יחסי הפוך לתדר, ככל שהתדר נמוך יותר הניחות גבוה יותר. היחס הפוך לריבוע התדר. המשמעות - שתדרי תחום ה-14 מ"ה יונחתו פי ארבע מאלה של ה-28 מ"ה. תדרי ה-7 וה-3.5 מ"ה עלולים להיות מונחתים במידה שלא תאפשר להשתמש בהם בשעות היום.

שכבה "E"

שכבה E משתרעת, בשעות היום, בגובה בין 90 ל-125 ק"מ כאשר גבולה התחתון חופף את הגבול העליון של שכבה D. למרות גובהה של השכבה, המשתנה מעונה לעונה, עצמתה נשארת קבועה יחסית במשך כל שעות היום.

עוצמת שכבה E עוקבת למעשה אחר מצב השמש. היוניזציה המירבית קיימת בשעות הצהריים והרקומבינציה, המתחילה עם השקיעה, גורמת להיעלמותה בשעות הלילה.

שכבות "F"

שכבות F הן החשובות ביותר בכל מה שקשור לתקשורת הרדיו לטווחים ארוכים. בשעות היום מבחינים בשתי שכבות F, אחת מהן היא F1, הקרובה יותר לשכבה E והמשתרעת בין 150 ו-250 ק"מ. השכבה השנייה היא F2, גובהה משתנה בהתאם לעונות השנה. בעונת החורף היא משתרעת עד 300 ק"מ ובעונת הקיץ עד 500 ק"מ.

למרות ש-F1 מיוננת יותר משכבת E, היא מתנהגת בדומה לה. עוצמתה חזקה בצהריים והיא נעלמת בשעות החשיכה.

בשונה משאר השכבות, שכבת F2 קיימת בכל שעות היממה בגבהים שבין 250 ל-420 ק"מ. שכבה זאת נמצאת בגבהים בהם הגזים קלושים והרקומבינציה נמשכת זמן רב. הודות לעובדה זו אנו יכולים לקיים קשרים בכל שעות היממה.

עוצמתה, של שכבת F2, נמצאת בשנויים מתמידים. השינויים, הנעשים מדי שעה, בהתאם לעונות השנה, מיקום גיאוגרפי ומחזוריות כתמי השמש מתרחשים בצורה מורכבת ומסובכת.

תופעות אקראיות

בנוסף לשכבות D, E ו-F ישנן שכבות המופיעות באופן אקראי. שכבות אלה, שצורתן לרוב דומה לענן, מופיעות בגובה 100 ק"מ המתאים לגובה של שכבת E. זאת הסיבה ששכבות אלה מכונות "E אקראי" (Sporadic E).

שכבת "E אקראי" מופיעה לרוב בשעות היום של הקיץ אבל נצפו גם תופעות כאלה בשעות הלילה ובחורף. שכבות אלה הן שכבות דקות, כ-1 ק"מ עוביין, והן מרחפות כעננים בעלי קוטר של כ-170-80 ק"מ. הן מופיעות לפתע ונעלמות לאחר מספר שעות.

ינון שכבות אלה אינו בהכרח תוצאה מקרינה. משערים ששכבות אלה נוצרות בגלל חיכוך בין שכבות אטמוספיריות הנעות, בגובה רב, בכיוונים שונים. זאת הסיבה, כנראה, ששכבות אלה נעות במהירות של מאות קמ"ש. כיוון, בחצי הכדור צפוני, הוא מערבה.

שכבה זו מעניינת את חובבי הרדיו מאחר והתדר הקריטי שלה עשוי להגיע למספר עשרות מ"ה. השכבה מאפשרת, בזמן הופעתה, קיום קשרים ארוכי טווח, בתדרים גבוהים מאד.

(המשך יבוא)

* * * * *

גלי רקיע - התפשטות גלים בתדר גבוה

נכתב ע"י אבנר דרורי 4XIGE

(המשך מחוברת קודמת)

פרק ג' - שנויי ינוספרה צפויים

מבוא

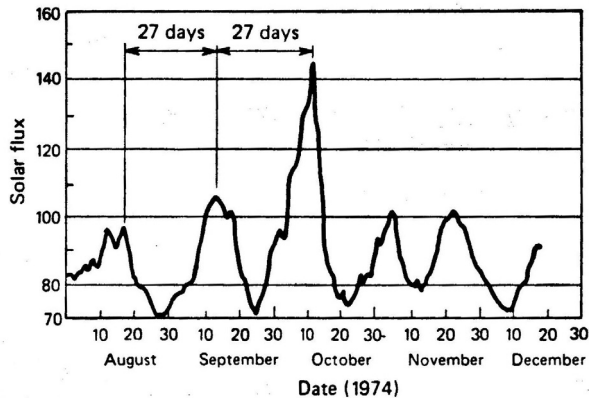
מכיוון שקיום היונספרה תלוי בקרינת השמש, הרי ששנויים במצב היחסי של השמש, כלפי כדור הארץ, ושנויים בקרינה עצמה ישפיעו על מבנה היונספרה.

ניתן לחלק את השנויים, הצפויים פחות או יותר, לקבוצות הבאות:-

- שינויי מופע השמש
- שנויי יום לילה
- שנויי עונות השנה
- שנויי מקום גיאוגרפי
- שינויים מחזוריים

שינויי מופע השמש

כתמי השמש נעים, על פניה, ממזרח למערב במחזוריות של 27 ימים בהם השמש סבה על צירה. עצמת הקרינה מושפעת, כמובן, מכתמי השמש הפונים ארצה. דוגמה להשפעת סיבוב השמש, על קרינת כתמי השמש, מתוארת באיור ג' 1



איור ג' 1 - השפעות סיבוב השמש על צירה

שנויי יום-לילה

שנויי יום-לילה בשכבות היונספרה השונות, הקיימים למעשה ברציפות במשך כל שעות היממה, נגרמים כתוצאה מסיבוב כדור הארץ על צירו. סבוב זה אחראי לא רק לאור השמש הנראה לעין, הוא אחראי גם על הקרינה האולטרה-סגולית. בצהרי היום הקרינה חזקה וגורמת להופעת השכבות השונות של היונספרה. בשעות הלילה היא נחלשת ונשארת רק שכבת ינוספרה אחת דקה.

שכבות E, D ו-F1 כפי שהוזכר כבר, קיימות רק בשעות היום. הן שומרות על תבנית קבועה המתאימה לזווית השמש. עצמת השכבות נמוכה בבוקר, עצמתן המירבית בשעות הצהריים והן דועכות לקראת הערב. השכבות קיימות עדיין גם בשעות הלילה אולם עצמתן חלשה ומבחינה מעשית ניתן להתעלם מקיומן.

שכבת F2 היא המיוננת מכולן ולכן התדר הקריטי, המסוגל לחזור ממנה, הינו הגבוה ביותר. היינון של שכבת F2, המאופיין ע"י עלית התדר הקריטי, עולה באופן תלול עם הזריחה. בשונה משאר השכבות, היינון

המרבי הינו מספר שעות לאחר שהשמש מגיעה לנקודה הגבוהה בשמיים (זניט). לאחר מכן היוניזציה דועכת לאיטה תוך שמירת רמה מסוימת גם בשעות הלילה. בגלל קלישות הגזים, ממנה היא מורכבת, הרקומבינציה איטית ואינה מצליחה לבטל את היינון לחלוטין.

זאת הסיבה ששכבת F2 היא המעניינת ביותר את חובבי הרדיו מאחר והיא הבסיס, לתקשורת ארוכת הטווח, במשך כל שעות היממה.

שנויי עונות השנה

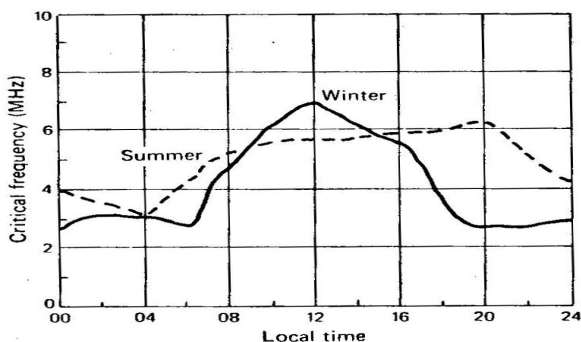
מאחר ומצבה של כל נקודה, על פני כדור הארץ, כלפי השמש משתנה בהתאם לעונות השנה, כך גם שנויי היונוספירה.

שכבת E תלויה לחלוטין בגובה השמש ומצבה היחסי. עצמתה גבוהה בצוהרי היום ובעונת הקיץ, בהם השמש גבוהה מעל האופק. במשך עונות השנה, למעט החורף, שכבת F1 מתנהגת בדומה לשכבת E, כלומר תלויה בגובה השמש. בחורף שכבת F1 מתלכדת עם F2 וקשה להפריד ביניהן, למעט באזור קו המשווה שם קיימת הפרדה כל שהיא (יש לזכור שבאזור קו המשווה ישנם תנאים קבועים של קיץ).

ההתנהגות העונתית, של שכבת F2, משונה במקצת. בשעות היום של החורף עוצמת היוניזציה חזקה והתדר הקריטי גבוה. הרקומבינציה, האיטית, נמשכת במשך שעות הלילה הארוכות והתדר הקריטי יורד לערכים נמוכים מאד.

בקיץ מתחממות השכבות העליונות של האטמוספירה, הגזים נעשים קלושים יותר והיוניזציה אינה מגיעה לערכים גבוהים כמו בחורף. מסיבה זו התדר הקריטי המרבי יהיה נמוך יותר בקיץ מאשר בחורף. מאחר והגזים קלושים יותר, הרקומבינציה, בשעות הלילה נמשכת זמן רב יותר והיינון ישמר ברמה גבוה יותר מאשר בחורף. יש לזכור שהלילה קצר יותר בקיץ ולכן לרקומבינציה אין שהות לפעול לביטול היוניזציה.

זאת הסיבה שבקיץ התדר הקריטי לא יגיע לרמות של החורף. לעומת זאת תשמר רמה גבוהה, יחסית, במשך כל שעות היממה. המחשה לכך באיור ג' 2.



איור ג' 2 - שנויים עונתיים אופייניים של שכבת F2.

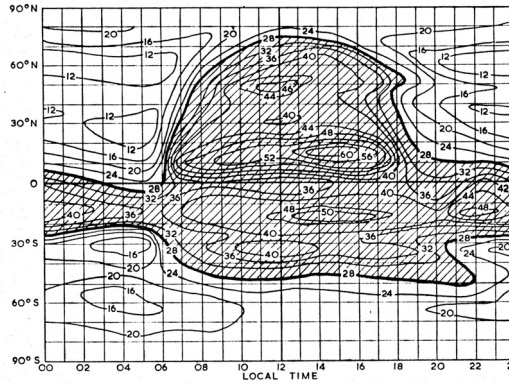
שכבת D, התורמת להפסדים, תהיה חזקה בקיץ יותר מאשר בחורף. אי לכך יהיה ניתן לצפות שבחורף יהיו תנאים טובים יותר בתדרים הנמוכים, 7 מ"ה ומטה.

כאשר מדובר על שנויים עונתיים יש לזכור שלכדור הארץ ישנה גם אינרציה טרמית. פרוש הדבר שעונות השנה אינן בדיוק אלה שבין היום הקצר והיום הארוך. באופן מעשי ישנה תזווה של חודש נוסף כדי שהעונה תהיה בעוצמתה.

שנויי מקום גיאוגרפיים

רמת היינון של היונוספירה תלויה בזווית בה פוגעות הקרניים האולטרה-סגוליות בכדור הארץ. הקרינה תהיה חזקה יותר באזור קו המשווה וחלשה יותר בקטבים. אי לכך התדרים הקריטיים, של שכבות E ו-F1, יהיו גבוהים יותר באזור קו המשווה.

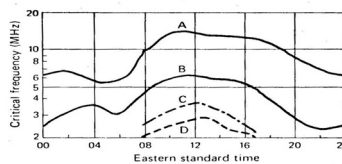
התנהגות שכבה F2 מורכבת יותר, יתכן בגלל מרכיבים נוספים של היוניזציה כגון קרני-X, קרינת חלקיקים קוסמיים ומטאורים. ישנן עובדות המראות כי שכבת F2 מושפעת במידה מסוימת גם מהשדה המגנטי של כדור הארץ. למרות מורכבותה, גם התדרים הקריטיים של שכבה זו גבוהים יותר באזור המשווני. דוגמה לכך ניתנת באיור ג' 3. האיור מתאר מפה המתארת את ה-MUF שניתן להשגה מהחזרות F2 לדילוג של 4000 ק"מ. בזמן נתון. ברור שהתרשים מתאים לתאריך מסוים בלבד (במקרה זה נובמבר 1947) אבל בעיקרון הוא דומה למה שקורה כל שנה. שימו לב ל-MUF הגבוה והיציב באזור קו המשווה כאשר בצהריים הוא מתרחב לקווי רוחב גבוהים יותר. ניתן לראות שבאזורים הפעילים אפשר להגיע גם ל-MUF של 60 מ"ה.



איור ג' 3 – שינויי מקום גיאוגרפיים

שנויים מחזוריים

אילו שינויי היונוספירה היו יומיים ועונתיים בלבד, יכולנו לצפות לשנויים שיחזרו על עצמם מדי שנה. למרבה המבוכה נכנס לתמונה גם מחזור כתמי השמש הנמשך, כאמור, כ-11 שנים. באיור ג' 4 אנו רואים את השפעת מספר כתמי השמש, על שכבות E ו-F2, בזמנים של מספר כתמים מזערי ומרבי. באיור רואים שנויים יומיים, של תדרים קריטיים, עבור שכבות E (קו מקוטע) ו-F2 (קו רציף) כפי שנמדדו בווינגטון בירת ארה"ב. הקווים C, A נמדדו בשנת שיא של כתמי שמש (200 כתמים בדצמבר 1957) ואילו הקווים B, D נמדדו בשנת שפל (11 כתמים בדצמבר 1964).



איור ג' 4 - שנויים יומיים בתדרים הקריטיים

שכבת F2 היא המושפעת ביותר מהשנויים המחזוריים. התדר הקריטי, בשיא המחזור, הינו כפול מזה שבשפל המחזור. גם בשכבות E ו-F1 ישנו שנוי בולט אבל לא בולט כמו ב-F2.

(המשך יבוא)

* * * * *

גלי רקיע - התפשטות גלים בתדר גבוה

נכתב ע"י אבנר דרורי 4X1GE

(המשך מחוברת קודמת)

פרק ד - דילוגים וזוויות קרינה

מבוא

תחום רחב של תדרים, המשודר בצורה אנכית, יחזור משכבות היונוספירה. התדר הגבוה ביותר, שיוחזר משכבה מסוימת, יקרא "התדר הקריטי" (Critical Frequency) של אותה שכבה.

בפרקים הקודמים הוזכר התדר הקריטי כקנה מידה ליינון שכבה מסוימת. התדרים הקריטיים אינם ישימים, לתקשורת ארוכת טווח, באם הם משודרים בצורה אנכית. לעומת זאת, נוכל להשיג טווחים ארוכים באם נשדר באופן שהגלים יפגעו אלכסונית ביונוספירה ויוחזרו ממנה. בצורה זו נוכל להשתמש גם בתדרים הגבוהים מהתדר הקריטי.

זווית השידור הרצויה והתדר המרבי לשימוש תלויים במספר רב של גורמים. אחדים מהם הם גובה השכבה המחזירה, מידת היוניזציה והמרחק בין התחנות. כמו כן יש קשר ישיר בין התדר הקריטי, במקום בו נכנסים הגלים ליונוספירה, ובין התדר המרבי עבור הנתיב הנדרש.

פרק זה ידון במערכת הקשרים, בין הגורמים השונים, ויציע דרך כיצד לבחור את התדר המתאים לבצוע קשר בין שתי תחנות נתונות.

קשרים טריגונומטריים

ישנה נוסחה טריגונומטרית פשוטה הקושרת את התדר הקריטי, גובה שכבת היונוספירה, זווית הקרינה המיטבית ותדר התקשורת המתאים.

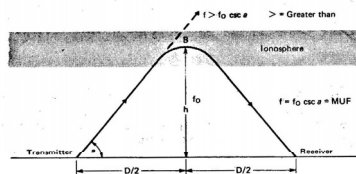
$$f = \frac{f_a}{\sin a} = f_a \csc a$$

כאשר: f = תדר מרבי לתקשורת

f_a = תדר קריטי

a = זווית השידור המיטבית

משוואה זו ניתנת להמחשה באיור ד' 1.



NOTES:
 $h = 200$ miles (height of reflection at B)
 $D = 1000$ miles (path length from transmitter to receiver)
 $f_0 = 5$ MHz (critical frequency measured at vertical incidence)

Then:
 $MUF = 13.3$ MHz
 Radiation angle (a) = 22 degrees
 Illustration not drawn to scale.

Illustrative example of MUF calculations.

איור ד' 1 - דוגמה מוחשית לקשר הטריגונומטרי בין הגורמים השונים.

מעיון באיור נוכל לראות את הקשרים גם לפי הנוסחה הבאה :-

$$f = f_a \sqrt{\frac{D^2}{4h^2} + 1}$$

h הינו גובה השכבה המחזירה ו- D הוא המרחק בין שתי נקודות המקיימות קשר ביניהן.

אם נדע את h ו- D נוכל לחשב את התדר המרבי בו נוכל לקיים קשר בין שתי הנקודות. תדר זה יהיה "התדר הגבוה ביותר הניתן לשימוש" והוא מכונה MUF (קצור של Maximum Usable Frequency). תדרים מעל ה-MUF יחדרו לתוך היונוספירה. ניתן להשתמש בתדרים נמוכים יותר אולם יעיל יותר להשתמש בתדרים הקרובים לתדר זה (רמז - זכרו את הפסדי שכבת D).

כבר כאן ניתן לראות שהערך של ה-MUF אינו קבוע, יש צורך לחשב אותו בהתאם לטווח בין התחנות. אי לכך אפשר להגיד שהוא תלוי לא רק בתדר הקריטי, הוא תלוי גם במרחק או בזווית בה נרצה להשתמש.

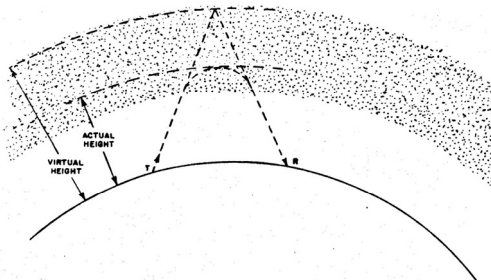
קל לראות, מהנוסחה הטריגונומטרית, שככל שהזווית יורדת ה-MUF עולה. לכאורה בזווית הקרובה לאפס (סינוס הזווית שואף אף היא לאפס וכל מספר מחולק באפס הוא גדול מאד) ה-MUF יוכל להגיע למאות מ"ה. אם נחזור ונעיין באיור ד' 1 נראה שהנוסחה מתארת שני מישורים מקבילים, למעשה המציאות מתוארת טוב יותר באיור ד' 2. היונוספירה היא כיפתית ואם נשדר בזווית נמוכה נגיע אליה בזווית מספיק גבוהה כדי לחדור אותה. אם נשתמש בתדרים נמוכים, שעדיין יוחזרו ממנה, רוב מהלך הקרן יהיה בתוך שכבת ה-D הבולעת כל מה שעובר דרכה. המסקנה מכך היא שבהתייחסות, לזוויות נמוכות, הכוונה לזוויות מעל ל-3 מעלות (סינוס של 3 מעלות הוא 0.0523, המכפיל את התדר הקריטי פי 19).

היות וה-MUF קשור ישירות בתדר הקריטי, הרי שהוא קשור גם בשנויים היומיים, השנתיים ומחזור כתמי השמש.

יש לשים לב שלהספק השידור אין כל השפעה על ה-MUF. האנרגיה או מוחזרת או חודרת את היונוספירה. אי לכך עשויה להישאל השאלה: למה ישנן תחנות שדור מסחריות, בתחום ה-HF המשדרות הספק של עשרות, מאות ואלפי קילוואטים? כדאי לדעת שישנן צורות התפשטות נוספות שאינן מבוססות על אופני התפשטות הגלים המקובלים. צורה אחת היא צורת "התפזורת" (Scatter) ואחרת היא צורה הבאה לידי ביטוי כאשר מדובר על הספקים של מאות קילוואטים.

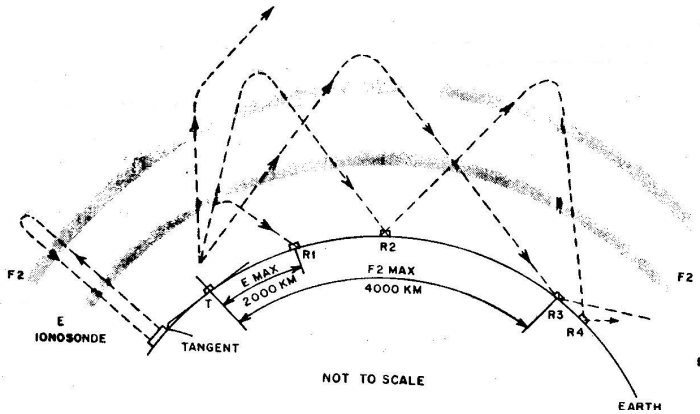
זוויות וטווחים

את השפעת זווית השידור ניתן לראות באיור ד' 3. לפני שמתחילים בהסבר כדאי להתייחס למושג נוסף שהוא "גובה וירטואלי" (Virtual Height) או "גבה ערטילאי". שכבת היונוספירה אינה דקה וההחזרות אינן כמו החזרת קרני האור ממראה. השכבות עבות וגלי הרדיו חודרים לתוכן לפני שהן מוחזרות ארצה, ממש כפי שמתואר באיור. הגובה הוירטואלי יהיה הגובה התיאורטי ממנו מוחזרת, כביכול, הקרן בזווית ולא בקשת. דוגמה מוחשית באיור ד' 2.



איור ד' 2 - גובה וירטואלי

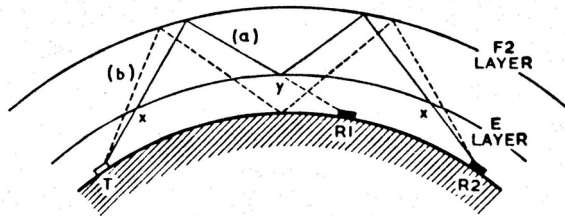
בצד שמאל, של איור ד' 3, אנחנו רואים שידור אנכי. התדר המרבי שיוחזר יהיה התדר הקריטי. הגובה ממנו יוחזר יהיה הגובה הווירטואלי ולא גובה השכבה. דבר זה נכון גם בהחזרות שאינן ניצבות.



איור ד' 3 - זוויות ודילוגים

ימינה מזה נראה החזרה משכבת E. המרחק המרבי, בדילוג אחד, הינו כ-2000 ק"מ. ימינה נראה אפשרות להגיע לטווחים ארוכים יותר ע"י החזרה מ-F2. הטווח המרבי, בדילוג אחד, יכול להגיע עד 4000 ק"מ. כמובן שניתן להגיע, לטווח זה, ע"י שני דילוגים אבל אז יתארך המסלול ונאבד חלק מהאנרגיה בדרך. מרחקים מעל 4000 ק"מ יושגו בשני דילוגים ויותר.

יהיו מקרים בהם הקרן תוחזר לנקודה הרחוקה בהרבה מהמקום הצפוי. תופעה זו מתרחשת כאשר הקרן החוזרת נתקלת בשכבה הנמוכה ממנה וחוזרת, אל השכבה הגבוהה, מבלי שתגיע כלל לארץ. ראה איור ד' 4.



איור ד' 4 - דילוגים מורכבים

איור ד' 3 אינו בקנה-מידה ולכן הזוויות אינן נכונות. הטבלה הבאה מפרטת תחומי זוויות ותדרי MUF, המתאימים להם, עבור קשר בין אנגליה והחוף המזרחי של ארה"ב.

MUF	זווית מזערית	MUF	זווית מרבית	התחום
RC*5.76	10	RC*1.7	35	7 מ"ה
RC*9.57	6	RC*3.42	17	14 מ"ה
RC*14.34	6	RC*4.81	12	21 מ"ה
RC*19.11	6	RC*6.34	9	28 מ"ה

טבלה זו ממחישה היטב את העובדה שניתן להשתמש גם בתדרים הגבוהים מהתדר הקריטי (RC).

זווית השידור נקבעת ע"י זווית הקרינה האנכית של האנטנה. לעיתים קורה שחברך, הגר על ירך, מקבל תוצאות טובות יותר, מאשר אתה, כאשר לכאורה כל התנאים זהים. במקרים אלה יש לבדוק את ההבדל באנטנות, במיוחד בזווית הקרינה שלהן.

הפסדים יונוספריים

עד עתה התייחסנו ליונוספרה כשכבה מחזירה והזכרנו גם הפסדים אפשריים. היונוספרה, לצערנו, אינה מחזירה בלבד, היא בולעת גם חלק מהאנרגיה. בליעה זו אחראית להורדת עוצמת השידורים העוברים דרכה.

אנרגיית השידורים מנוצלת, למעשה, לינון השכבה התחתונה של היונוספרה. הניחות יחסי למידת היינון של השכבה התחתונה (D) והפוך לתדר. ככל שהתדר נמוך יותר, הניחות גדול יותר כאשר יחס הניחות הפוך לרובע יחס התדרים. דוגמה: ב-28 מ"ה הניחות יהיה רק רבע מהניחות ב-14 מ"ה.

כאשר התנאים מאפשרים וקיימת בחירה בין תחומי תדר, ניתן להשיג קשרים באיכות שווה, לתדרים נמוכים וגבוהים, כאשר בתדרים הגבוהים ניתן להשיג זאת בהספק נמוך יותר. זאת הסיבה למגמה לעבוד בתדרים הקרובים, ככל האפשר, לתדר ה-MUF.

הספיגה הגדולה ביותר תהיה בשכבת D הקרובה לפני הקרקע. מהכרת תכונות שכבה זו ניתן לצפות שהניחות יהיה גבוה יחסית בשעות היום, בתקופת הקיץ וכאשר מספר כתמי השמש גבוה. ההפסד יודגש יותר באזור המשווני של כדור הארץ.

את השפעת מספר כתמי השמש, על הניחות, נראה בטבלה הבאה. הנתונים, שהתקבלו ממדידות שנעשו במשך שלושת המחזורים הקודמים, מתארים את היחס באחוזים של ההפסדים בנקודות השפל של המחזור לעומת ההפסדים שהיו בנקודות השיא.

תחום התדר	יום	לילה
20 מ"ה	25%	25%
10 מ"ה	50%	35%
5 מ"ה	75%	50%

נתונים אלה מסבירים את התופעה שהתקשורת בתדרים הנמוכים (תחומי ה-80, 40 ו-160 מטר) טובה יותר כאשר מחזור כתמי השמש נמצא בשפל.

התדר הנמוך ביותר הניתן לשימוש

תדר זה, המכונה LUF (קצור של Lowest Usable Frequency) הינו התדר הנמוך ביותר שעדיין ניתן לקיים בו קשר בנתיב מסוים ובזמן מוגדר. תדר זה מוגדר כתדר בו האות הנקלט שווה לרמה המאפשרת עדיין גלוי ושימוש בו.

ה-LUF יהיה יחסי להספק השידור, הגבר וכיווניות האנטנה, אורך נתיב הקשר ומידת ההפסדים ביונוספרה.

הרמה המינימאלית, של האות הניתן עדיין לקליטה, מושפעת מהרעש הנקלט במקלט וסוג האפנון שמשמשים בו. לקליטת מורס, המשודר ידנית, מספיק יחס אות לרעש של 1:3. לקליטת SSB נדרש יחס של 1:7 ולשידורי AM נדרש יחס של 1:15.

לעומת ה-MUF, המושפע רק מהיונוספרה, ה-LUF מושפע גם מגורמים שיש לנו שליטה מיידית עליהם. ניתן לשנות את סוג השידור (לעבור מ-SSB ל-CW) או להעלות את הספק השידור. מקובל להניח שהגדלת ההספק פי עשר תוריד את ה-LUF ב-2 מ"ה.

מהאמור לעיל, לגבי הפסדי היונוספרה, רואים כי ה-MUF יהיה גבוה יותר בשיא מחזור כתמי השמש ונמוך בשפל המחזור.

כפי שכבר הוזכר, ה-MUF יעלה בשעות היום ובעקבותיו גם ה-LUF. המרחק ביניהם ייתן לנו את התחום המוגבל בו נוכל לשדר ולקלוט. כדאי לדעת שישנם זמנים בהם ה-MUF עלול להיות נמוך מ-14 מ"ה וה-LUF גבוה מ-7 מ"ה. התחום היחיד שיהיה ניתן להשתמש בו עדיין יהיה זה של ה-10 מ"ה. קורה לעיתים שתדר ה-LUF זהה או גבוה מה-MUF. כאשר זה קורה מתרחש מה שנקרא "אפילת תקשורת" ואין אפשרות לקיים קשרים אלחוטיים באותה עת.

מושגים נוספים

כאן הזמן והמקום להזכיר מושגים נוספים הקשורים להתפשטות הגלים.

תדר אופטימאלי לתקשורת, "FOT" (קצור של Frequency of Optimum Traffic), הינו התדר שייתן לנו קשר ודאי במשך 90% מימי החודש. ניתן לחשב אותו ע"י הכפלת החציון (Median) של ה-MUF, במשך החודש, ב-0.85. זאת בתנאי שתדר זה יהיה גבוה מתדר ה-LUF באותו מועד.

התדר הגבוה האפשרי, HPF (קיצור של Highest Possible Frequency), יהיה זה שיוכל לספק לנו קשר ארוך טווח ב-10% מימי החודש. ניתן לחשבו ע"י הכפלת החציון החודשי, של ה-MUF, ב-1.15.

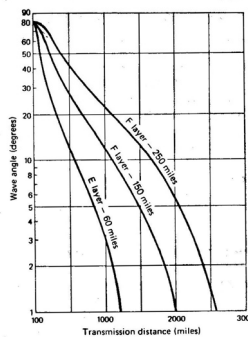
דוגמה :-

נניח שהחציון המחושב של ה-MUF הינו 20 מ"ה. אם נרצה להשיג קשר ודאי במשך 90% מימי החודש נוכל להשתמש בתדרים עד : $17 = 20 * 0.85$ מ"ה.

אם נרצה להשיג טווחים ונהיה מוכנים להסתפק רק ב-10 ימי תקשורת, נוכל להשתמש בתדרים עד : $23 = 1.15 * 20$ מ"ה.

זוויות שדור אופטימאליות

ראינו כבר שלזוויות השידור, של האנטנה, יש השפעה על הטווח. נוכל לראות זאת יפה באיור ד' 5. מהאיור רואים שניתן להשיג דילוג אחד, משכבת E, למרחק מרבי של כ-2000 ק"מ. דילוג משכבות F, המשתנות בגובהן, יושג למרחקים בין 3200 ל-4200 ק"מ. שידורים למרחקים גדולים מכך דורשים מספר דילוגים.



איור ד' 5 - תרשים השואה בין זוויות קרינה ומרחקים

האיור מתאר את הקשר בין זוויות הקרינה האופטימאליות, המרחק בין התחנות וגובהי שכבות E ו-F. מהאיור ניתן לחשב את זווית השידור (והקליטה) עבור טווח נתון. למרחקים ארוכים יש להשתמש בזוויות נמוכות ככל האפשר.

זווית השידור מותנית, במידה רבה, בגובה החשמלי של האנטנה. ככל שהאנטנה גבוהה יותר זווית הקרינה נמוכה יותר. זו הסיבה לשאיפה להתקין את האנטנות גבוה ככל האפשר.

(המשך יבוא)

* * * * *

גלי רקיע - התפשטות גלים בתדר גבוה

HF Wave Propagation

נכתב ע"י אבנר דרורי 4X1GE

(המשך מחוברת קודמת)

פרק ה' - הפרעות יונוספריות

מבוא

השנויים הרגילים והצפויים, של היונוספרה, מסובכים דיים על מנת להביך חובב רדיו מצוי. בנוסף לכך מתרחשות מדי פעם תופעות לא שגרתיות המקשות על השידור והקליטה ולפעמים מונעות את התקשורת לחלוטין. התופעות הלא שגרתיות נקראות "הפרעות יונוספריות" (Ionospheric Disturbance).

באופן כללי ההפרעות מתבטאות בהחלשת האותות הנקלטים, בצורה איטית או מהירה, עד למידה בה לא ניתן להבחין בקיומם. לעיתים גם הרעש האטמוספרי יורד במידה העלולה להביא למחשבה שהמקלט מקולקל.

ניתן להבחין בין שתי סוגי הפרעות עיקריות השונות באופיין זו מזו. אחת מכונה "סערה יונוספרית" (Ionospheric Storm) והשנייה "הפרעה יונוספרית פתאומית" (Sudden Ionospheric Disturbance) או, בקיצור, SID.

ה-SID ידועה גם בשם "תופעת דלנג'ר" (על שמו של Dr. John H. Delenger האמריקאי שהיה מחלוצי המחקר על התפשטות הגלים ושאיבחן והגדיר תופעה זו). הפרעה נוספת נקראת "האפלה קוטבית" (Polar blackout) והיא מעין שילוב של "סערה יונוספרית" ו-SID.

מקורן של שלושת סוגי ההפרעות הוא, סביר להניח, ב-"להבות סולריות" (Solar Flares) הידועים גם בשם "זיקוקים סולריים" המתרחשות על פני השמש.

סערות יונוספריות מתפתחות לאיטן או מתרחשות לפתע. הן נמשכות יום-יומיים או לפעמים עד שבוע שלם. ה-SID לעומת זאת, מתרחש לפתע ונמשך כ-20 דקות עד שעה שעתיים. נדיר שימשך יותר מכך.

המשותף לשני סוגי ההפרעות, המזיקות לתקשורת, היא בליעה חזקה של אנרגיה וירידה חזקה בכוחר ההחזרה של היונוספרה.

"להבות סולריות"

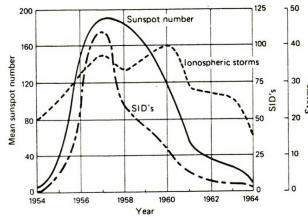
מניחים שתופעה זאת נגרמת כתוצאה משנויים פתאומיים בשדה המגנטי הקיים בסביבת או בתוך כתמי השמש הגדולים. הלהבות מתרחשות באופן פתאומי ומתבטאות בהתפרצויות חריפות שבעקבותיהן נפלטים, מפני השמש, כמויות אדירות של קרינה אולטרה-סגולית, קרני ה-X וקרני קוסמית הנעים במהירות האור וחלקיקים טעוני אנרגיה (אלקטרונים ופרוטונים) הנעים במהירויות נמוכות יותר. כמו כן נפלטת גם אנרגיה בתחום האלקטרומגנטי עד 300 מ"ה.

הקרנה האולטרה-סגולית, קרני ה-X והקרנה הקוסמית, הנעים במהירות האור, מגיעים אלינו 8 דקות לאחר התרחשות הלהבות וגומות לדעיכה מיידית בתקשורת. זאת למעשה תופעת ה-SID.

החלקיקים, בעלי המטען החשמלי, נעים במהירות נמוכה יותר ומגיעים אלינו לאחר 18 עד 36 שעות. גם הם משבשים את התקשורת בתופעה המכונה "סערה יונוספרית".

ה-"האפלה הקוטבית" יכולה להתרחש כתוצאה מכל אחת מהקרינות הנפלטות מהלהבות הסולריות.

מאחר והלהבות הסולריות קשורות לכתמי השמש הגדולים, הן מתרחשנה לעתים קרובות בשיא פעילות כתמי השמש ולעתים רחוקות כאשר מספר כתמי השמש נמוך. המחשה לכך ניתן לראות באיור ה' 1 המתאר את ההפרעות שאירעו במשך מחזור 1954-1964.



Relationship among mean sunspot numbers during Cycle 19 (1954–1964), the annual number of SID's and the annual number of ionospheric storms observed over the North Atlantic path during Cycle 19.

איור ה' 1 - תכיפות ההפרעות היונוספריות

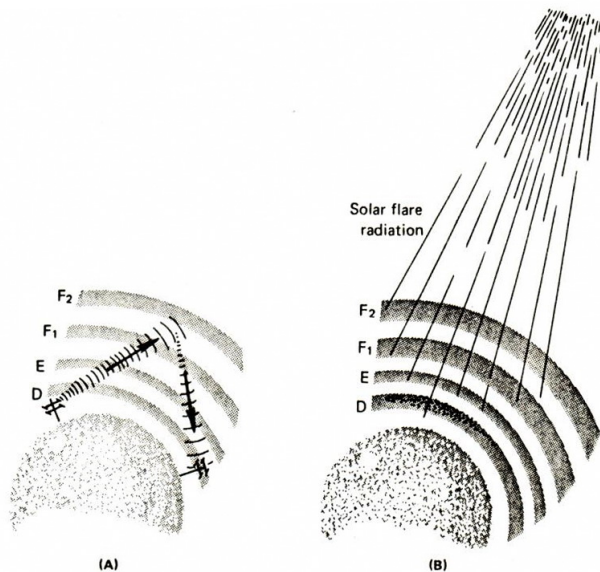
הפרעות יונוספריות פתאומיות (SID)

ההפרעה תלויה בעצמת הלהבות והזווית היחסית בין השמש והארץ. אי לכך השפעתה יכולה להיות מאפס עד האפלה מוחלטת.

כאשר הלהבות מתרחשות בקו ישר אל כדור הארץ, הקרינה מגיעה אליו אחר מספר דקות וחודרות את שכבות היונוספירה, ראה איור ה' 2. הקרינה חודרת עד שכבת D ומגבירה את כשר הבליעה שלה. למרות ששכבה D משפיעה בעיקר על התחום הנמוך של ה-ת"ג, ההפרעה יכולה לגרום גם להשפעות בתחום הגבוה.

התקשורת דועכת באופן פתאומי ומתאוששת לאיטה, במשך דקות או שעות, עד שהיא חוזרת למצבה הנורמאלי.

איור ה' 2 מראה, מימין, את המצב הרגיל ומצד שמאל את השפעת הלהבות הסולריות.



Under normal conditions, the daylight ionospheric layers can be represented as shown at (A). The radiation from an intense solar flare produces unusual ionization of the lower layers, particularly in the D layer (B), and the result is a sudden ionospheric disturbance.

איור ה' 2 - השפעת הלהבות הסולריות

מאחר וההשפעה של שכבת D היא בעיקר בתדרים הנמוכים, כדאי לנסות לקיים קשר בתדרים הגבוהים יותר (תחומי 10-15 מטר). בנוסף לכך יש לזכור כי הקרינה הגיעה לחציו המואר של כדור הארץ, החצי השני אינו מופרע. כדאי לנסות לקיים קשר, במקרים אלה, דרך האזורים השרויים בחשכת הלילה, אפילו אם הטווחים רחוקים יותר.

האזור המושפע ביותר יהיה אזור קו המשווה, באזור זה קרינת השמש ניצבת לינוספרה וההשפעות תורגנה יותר מאשר בקווי הרוחב הגבוהים יותר.

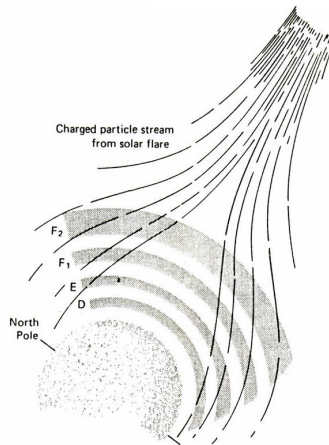
כאשר ה-SID בעוצמה המונעת תקשורת יש להיעזר בסבלנות, להמתין כשעה ולהתחיל בניסיונות תקשורת בתדרים הגבוהים.

למזלנו ישנן להבות סולריות המקרינות לחלל מבלי שתהיה לכך השפעה על כדור הארץ. לעומת זאת קיימות תופעות של "נקודות חמות" המתרחשות דווקא בשפל מחזור כתמי השמש. תופעה זו דומה ל-SID אולם חלשה ממנה. בגלל הדמיון הן נקראות SID מסוג M.

סערות יונוספריות

הלהבות הסולריות מלוות לעתים קרובות בסערות יונוספריות המתרחשות 18 עד 36 שעות לאחר התפרצותן. הסערות נגרמות ע"י חלקיקים טעונים הנעים במהירות איטית של 1500 ק"מ לשנייה. הסערה היונוספרית מתרחשת לאחר שתופעת ה-SID, שקדמה לה, כבר נעלמה והתנאים חזרו לקדמותם. סערות אלה משפיעות, על התפשטות הגלים, בצורה שונה לחלוטין מאשר ה-SID.

החלקיקים הטעונים, המתקרבים לארץ, מוסטים ע"י השדה המגנטי של הארץ הגורם להם לנוע לכוון הקטבים המגנטיים שלה. המחשה לכך ניתנת באיור ה' 3.



The charged particle stream from a solar flare tends to divert to the polar regions due to the earth's magnetic field. The velocity of these particles passing through the ionospheric layers, particularly the higher layers, disturbs these layers and produces an ionospheric "storm."

איור ה' 3 - זרימת חלקיקים לכוון הארץ

הסחיפה של החלקיקים משפיעה בעיקר על שכבות היונוספרה הגבוהות. ההשפעה יכולה להיות בצורות שונות כגון העלמות שכבת F, שנוי מהיר ברמת היוניזציה שלה או פיצולה למספר שכבות. התופעה הראשונה תגרום להפסקת הקשר בתדרים גבוהים, שאר התופעות תגרומנה לדעיכה באותות ולתופעת הדהוד (ECHOES).

בזמן סערה יונוספרית ה-MUF עלול לרדת ל-50% מערכו הרגיל. למרות שההשפעה תהיה בעיקר על שכבת F, עלולה להיות השפעה גם על שכבת E. במקרים קיצוניים של צרוף יונוספרה חלשה וספיגה חזקה, תהיה האפלת תקשורת בין אזורים שונים על פני כדור הארץ. התופעה תורגש במיוחד במסלולי תקשורת העוברים דרך אזורים הקטבים אליהם מופנה ריכוז החלקיקים הטעונים.

הסערות המגנטיות קיימות הן בשעות היום והן בשעות הלילה. השפעתן מתחילה, בו זמנית, באזור הקטבים וככל שהיא מחמירה היא מתקדמת לאזור קו המשווה.

בשיא מחזור כתמי השמש, הפרעות אלה נמשכות כ-100 שעות במשך חודש. בשפל המחזור מספר השעות הוא כחצי מזה.

האמצעי להתגבר על הפרעה זו הינו, כמובן, לנסות ולעבוד בתדרים נמוכים. אפשר לנסות לחפש גם נתיבי תקשורת המתרחקים מאזור הקטבים. כדאי להשתמש במסלולים העוברים דרך אזור קו המשווה המושפע פחות מתופעה זו.

השימוש במסלולי לילה לא יעזור. הקרינה מגיעה במשך זמן ארוך יחסית וההפרעה עלולה לפגוע בכל שעות היממה. התופעה תחיל להעלם בהדרגה כאשר ההחלמה תמשך יום עד שלושה ולעיתים אף יותר מכך.

האפלה פולארית

סוג הפרעה זה נגרם, כאמור, ע"י הקרינה המרוכזת אל הקטבים כתוצאה מהשדה הגיאומגנטי של כדור הארץ. הקרינה החזקה מגיעה עד לשכבות הנמוכות של היונוספירה וגורמת להם לבלוע את אנרגית גלי הרדיו המגיעים אליהן.

גם ה-SID עלול להגיע לאזור הקטבים. במקרה זה תהיה ההאפלה הקוטבית קצרה מזו שבהשפעת סערה מגנטית רגילה.

עצמת השדה החשמלי, הנוצרת בזמן סערה באזור הקטבים, משפיעה על הגזים הנמצאים בשכבות העליונות של האטמוספירה וגורמת להם להאיר בצבעים שונים. האזורים הקוטביים, של כדור הארץ, יהיו מוארים כשלטי ניאון אדירים במה שמוכר לנו בשם "הזהר הצפוני" (Aurora Polaris) או "הזהר הדרומי" (Aurora Australis). כאשר התופעה בשיאה לא ניתן לבצע תקשורת ת"ג דרך אזור הקטבים.

זו הסיבה שהשם Aurora הפך להיות שם נרדף להפרעות לתקשורת אלחוטית.

טבלת הפרעות יונוספריות

הטבלה הבאה משווה את שני סוגי ההפרעות העיקריות ומסבירה כיצד להתמודד איתן.

#	התופעה	SID	סערה יונוספרית
1	התפתחות	מהירה	איטית
2	משך	מספר דקות עד מספר שעות	מספר שעות עד מספר ימים
3	האזור המושפע ביותר	אזור תאורת היום	אזורי הקוטב ואזורי הביניים, יום ולילה
4	האזור המושפע פחות	אזור האפלת לילה	האזור המשווני והאזורים הקרובים
5	תחומי התדר המושפעים ביותר	20-160 מטר	10-40 מטר
6	תחומי התדר המושפעים פחות	10-15 מטר	80-160 מטר
7	שיאים עונתיים	בכל העונות	אביב ותחילת הסתיו
8	מחזור כתמי שמש	בשיא המחזור	מפעילות בינונית ומעלה
9	כיצד לפעול	לבחור נתיבי חושך ותדרים גבוהים	נתיבי אזור קו המשווה ותדרים נמוכים בנתיבי הצפוני

(המשך יבוא)

גלי רקיע - התפשטות גלים בתדר גבוה

HF Wave Propagation

נכתב ע"י אבנר דרורי 4X1GE

(המשך מחוברת קודמת)

פרק ו' - אופני התפשטות ייחודיים

מבוא

לאחר שהכרנו את מבנה היונוספירה ושכבותיה נוכל להכיר גם אופני התפשטות ייחודיים המתבססים על תכונותיה. חלק מהתופעות הנו קבוע וחלקו האחר אקראי. להלן פרוט האופנים כאשר הסבר מפורט ינתן בהמשך פרק זה:-

- הקו האפור (Gray Line)

- הנתיב הארוך (Long Path)

- E אקראי (Sporadic E)

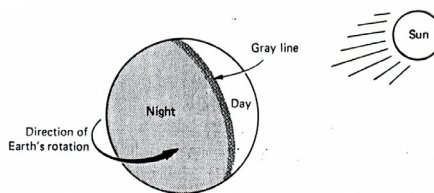
- זירוי לאחור (Back Scatter)

הקו האפור

"הקו האפור", או "אזור הדמדומים", הנו הרצועה המקיפה את כדור הארץ ונמצאת בגבול היום והלילה. קו זה נמצא באזורי הזריחה והשקיעה והאסטרונומים מכנים אותו בשם "טרמינאטור" (Terminator).

התפשטות הגלים, לאורך הקו האפור, הינה יעילה ביותר. הסיבה העיקרית לכך היא היעדרות שכבת "D" הבולעת את גלי הרדיו. שכבה זו נעלמת לקראת הערב וטרם נוצרת בשעות הבקר. יעילות הקו האפור גדולה עד כדי כך שהיא מאפשרת להשיג קשר יעיל ורציף בין כל הנקודות שעל קו זה. היעילות כה גבוהה עד שניתן להשתמש באנטנות פשוטות, דיפולים ו-V הפוכה, כדי להשיג קשרים לאורך הקו. אנטנה כיוונית עשויה, כמובן, לשפר את התוצאות.

הקו האפור נמשך כשעתיים במשך יממה, חצי שעה לפני ואחרי הזריחה ואותו דבר בשעת השקיעה. שני מועדים אלה נוחים לקיום קשר מאחר ובדרך כלל הן שעות שאינן מיועדות לעבודה או לשינה. המחשה לכך ניתן לראות באיור ו' 1.



איור ו' 1 - הקו האפור

על מנת להבין כיצד משתנה הקו האפור, במשך עונות השנה, עלינו להתייחס בחופשיות רבה עם התורה הקופרניקית ולעוות מקצת חלק מחוקי האסטרונומיה.

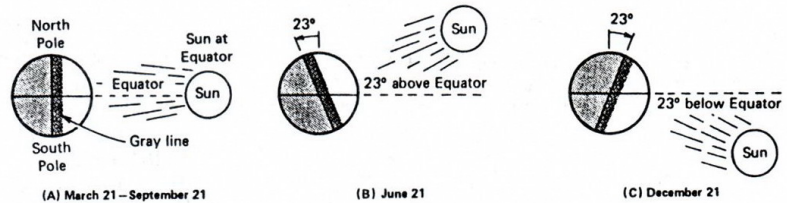
הבא נדמיין לעצמנו ש:-

- כדור הארץ הינו מרכז היקום.

- השמש נעה במסלול מחזורי-מעגלי סביב כדור הארץ.

- הציר, העובר את כדור הארץ ומחבר את שני הקטבים, ניצב לקו המשווה.

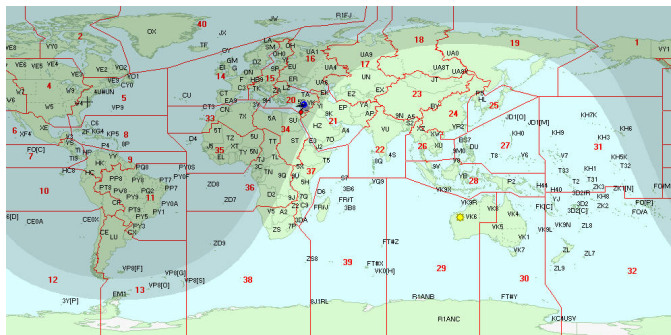
מאיור ו' 2 נראה כי השמש נעה במחזור שנתי לאורך מסלול המשתרע מקו רוחב 23 מעלות צפון (חוג הסרטן) עד קו רוחב 23 מעלות דרום (חוג הגדי) וחוצה פעמיים בשנה את קו המשווה. חציית קו המשווה מתרחשת בערך ב-21 למרץ ו-21 לספטמבר בהם משכי היום והלילה שווים. ימים אלה נקראים, ע"י האסטרונומים, בשם Equinox.



איור ו' 2 - התנועה היחסית בין כדור הארץ והשמש

במאה הקודמת, לפני עידן האינטרנט, היו מחשבים את הקו האפור היומי בעזרת גלובוס ומחונן שאותו היו צריכים להכין מקרטון. מי שעדיין מעוניין לבצע זאת בדרך הישנה, כדאי שיעיין במהדורות ישנות של ה-ARRL Handbook.

כול מה שנחנף היום זה להשתמש בתוכנות לחובבי רדיו או להיכנס ל-Google ולהקיש HF gray line. בחרתי להציג את התמונה הבאה המתארת קטע של האזורים, הנמצאים בקו האפור, שנוכל להתקשר אליהם בזריחה של הראשון בינואר מדי שנה.



איור ו' 3 - תמונה חלקית של הקו האפור

התמונה הנ"ל הועתקה מתוכנת DX Atlas המאפשרת לקבל תצוגות שונות המתארות את האזורים המושפעים. באותה תוכנה אפשר לחפש את הקו האפור בכל יום בשנה.

חלק גדול מהקו האפור, העובר את ישראל, נמצא באזורים שוממים, מעל אוקיינוסים או מעל מדינות שאינן ששות לקיים אתנו קשר. למרות זאת כדאי להכיר את תכונותיו המאפשרים לנו קשר עם מערב ארה"ב בשעות הזריחה של ה-21 ליוני ושעות השקיעה של ה-21 למרץ.

יתכן ונעזרתם כבר בתופעה זו אפילו אם לא ידעתם על קיומה. ההתפשטות, לאורל הקו האפור, יכולה להיות בכוון אחד או בכוון ההפוך. לעיתים קרובות היא נעשית בשני הכוונים והקשר נשמע עם "הדהודים". אם זה קרה לכם, הרי הצלחתם לנצל את התופעה.

לסיכום - תופעה זו מתבססת על היעדרות שכבת ה-"D" ולכן תשפיע במיוחד בתחום התדרים הנמוכים (40 עד 160 מטר). מכיוון ובתחומים אלה לא מקובל להשתמש באנטנות כיוונית, כל מה שעלינו לעשות זה לעלות על הגלים המתאימים, בשעות הדמדומים, ולנסות את מזלנו.

הנתיב הארוך

ניתן לחבר כל שתי נקודות, על פני כדור הארץ, באמצעות שני נתיבים, קצר וארוך. יוצאות מהכלל הן הנקודות הנמצאות בדיקוק בקצה השני של כדור הארץ והנתיבים ביניהם שווים באורכם. נקודות אלה נקראות בשם "אנטיפוד" והמרחק ביניהן יהיה 20,000 ק"מ. בין שאר הנקודות אפשר להגיע בנתיב קצר, הקטן מ-20,000 ק"מ, או בנתיב ארוך, הגדול מ-20,000 ק"מ. כווני הנתיבים יהיו כמובן הפוכים ב-180 מעלות וסכום אורכיהם יהיה תמיד 40,000 ק"מ.

אם נניח שהנתיב הקצר לניו-יורק הנו באורך 10,000 ק"מ ובזווית 315 מעלות, הרי שהנתיב הארוך יהיה בן 30,000 ק"מ ובזווית של 135 מעלות.

סביר להניח שכדאי לקיים תקשורת בנתיב הקצר. למרות שזה הכלל, קיימים תנאים בהם אפשר לקיים קשר בנתיב הארוך בזמן שלא ניתן לקיימו בנתיב הקצר.

יהיו מקרים בהם שכבת ה-F תהיה פעילה עדיין בשעות הלילה ותבטיח קיום קשר. באותה עת שכבת ה-D תהיה פעילה ותגרום לניחות בנתיבים העוברים באור השמש ובאזורים הנמצאים בהשפעת הזרח הצפוני (או הדרומי). במקרים אלה הניחות, הנגרם בגלל מספר הדילוגים הגבוה, יהיה קטן מהניחות הנגרם בהשפעת שכבת ה-D והקשר יושג דווקא בנתיב הארוך.

מכיוון שתופעה זו מתבססת על תכונות שכבת ה-D, הרי שהשפעתה מודגשת יותר על תדרים מ-14 מ"ה ומטה.

לעיתים תנאי ההתפשטות זהים בשני הנתיבים, תופעה המודגשת במיוחד לאורך הקו האפור. במקרה זה האותות יגיעו בהפרש זמן שיגרום ל-"הדהודים" ועיוותים. אם אנחנו מצוידים באנטנה כיוונית, נוכל לזהות את הנתיב המבטיח אות חזק יותר ולהשתמש בו. יהיו מקרים בהם התנאים יכולים להשתנות, במידה קיצונית, וקשר שהתחיל בנתיב אחד יסתיים בנתיב השני.

ישנה תופעה נוספת העוזרת לקיום קשר בנתיב הארוך. תקשורת ארוכת טווח מבוססת על דילוגים. דילוגים אלה יכולים להיות על פני אזורי יבשה או על פני אזורים ימיים. מאחר וההחזרות טובות יותר מעל פני שטחים בעלי מוליכות גבוהה, כגון אוקיינוסים, הרי שהתקשורת תהיה טובה יותר בעזרת דילוגים מעליהם. חשוב שדווקא הדילוגים הראשונים יהיו מעל אוקיינוסים. תופעה זו אינה תלויה בשעות היום או הלילה וניתן להשתמש בה גם בתחומי התדר הגבוהים. הדילוגים הראשונים, מהחוף המערבי של ארה"ב, יהיו יעילים יותר אם יעשו מעל האוקיינוס השקט ולא על יבשת ארה"ב עצמה. דבר זה נכון גם לגבי התקשורת לאוסטרליה. גם כאן ישנן תופעות הקשורות לעצמת שכבות ה-F וה-D ולקיום הקו האפור. שלוב תופעות אלה עלול לגרום לתנאי התפשטות שווים, בשני הכוונים, או להפיכתם במשך הקשר. הבנת התופעה ושימוש באנטנות כיוונית עשויים לעזור להתגבר על הבעיה.

לסיכום - לא תמיד הדרך הקצרה היא הדרך הטובה. כדאי להכיר גם את תופעת הנתיב הארוך ולנצלה כאשר ניתן לעשות זאת.

E אקראית

קורה לפעמים שבתחתית שכבת ה-E נוצרים כעין עננים בעלי רמת ינון גבוהה. עננים אלה הם בקוטר של 70 עד 150 ק"מ והם נעים, בחצי הכדור הצפוני, בכיוון מערב. עננים אלה הם בעלי תכונת החזרה טובה בעיקר בתדרים הגבוהים, 21 עד 144 מ"ה.

התופעה הינה אקראית ומכיוון שהיא צמודה לשכבת ה-E, היא נקראת "E אקראית" ("Sporadic E") ונהוג לסמנה ב-Es.

הסיבה להופעת השכבה אינה ברורה. הקשר שלה, עם כתמי השמש, גם הוא אינו ברור. מתצפיות שנעשו נראה כי התופעה נמצאת ביחס הפוך למספר כתמי השמש. ישנן השערות כי עננים אלה נוצרים כתוצאה מחיכוך בין שכבות גזים הנעות בגבהים המתאימים. מכיוון ששטחו של הענן קטן יחסית ואינו נמצא במקום קבוע, השפעתו תהיה מקומית וזמנית בלבד. מכיוון שהסיכוי קטן שימצא ענן כזה מתאים לדילוג שני, הרי שההתפשטות באופן זה מתאימה לדילוג אחד בלבד. אם נזכור כי דילוג של תדרים גבוהים, 21 ו-28 מ"ה,

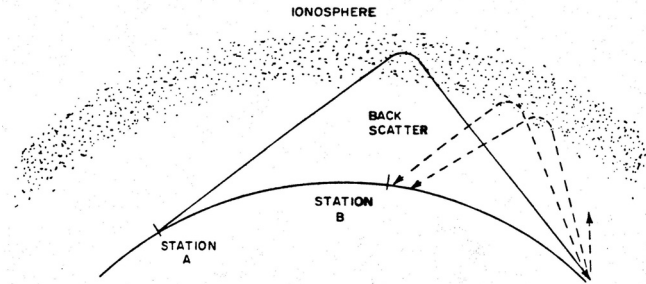
הנו בן אלפי ק"מ, הרי דילוג של שכבת E הנו בן 1000 ק"מ בלבד. אם משיגים קשרים, לטווח הקצר, בתדרים הגבוהים זה עשוי להיות סימן שהתופעה קיימת.

למרות האקראיות בתופעה, ישנה סבירות ש- E_s תופיע בקיץ בשעות הבוקר המאוחרות, בסביבות שעה 10:00, ושעות אחר הצהריים המאוחרות כאשר בשעות הלילה היא נעלמת. כאשר תופעה זאת מתרחשת בחורף, היא נכנסת גם לשעות החשכה.

80% מתופעות אלה מתרחשות בקיץ, בין מאי ואוגוסט, כאשר שיא הפעילות בחודש יוני. בחצי הכדור הדרומי מבחינים, בתופעה זו, בהתאם לעונות השנה שם.

תופעת ה- E_s הינה אופייני חשוב מאד בהתפשטות הגלים דווקא בתחום ה-תג"מ ונראה שאינה תופסת מקום חשוב במיוחד בתחום ה-ת"ג. כאשר היא מופיעה בתחום ה-ת"ג, זה סימן למפעילי ה-תג"מ להתחיל בצייד ה-DX.

זירוי לאחור (Back Scatter)



איור ו' 4 – זירוי לאחור

הגל המשודר, בתדרים השווים או הנמוכים מה-MUF, יפגעו אלכסונית ביונספירה ויוחזרו ממנה קדימה. חלק קטן מאד מהאנרגיה יפוזר גם בכיוונים אחרים ויוחזרו לכדור הארץ. גלים המשודרים בתדרים הגבוהים מה-MUF, יחדרו דרך היונספירה אולם גם כאן תהיה החזרה מסוימת המפוזרת בכוון כדור הארץ.

הסיבות לתופעה זו אינן ברורות דיין וההשערה שפני היונספירה אינם חלקים וישנן כעין "בליטות" הגורמות להחזרה לאחור.

לתופעה זו אין שימושים מיוחדים בתקשורת ה-ת"ג של חובבי הרדיו, חשוב להכיר אותה דווקא בגלל הבעיות שהיא עלולה לגרום. כפי שהזכרתי כבר, רק חלק קטן מאנרגיית השידור מתפזרת לכיוונים שונים. כאשר תחנת חובבים משדרת, ההספק המתפזר הוא אפסי והתופעה אינה מורגשת. התופעה מורגשת ביותר כאשר תחנת שדור מסחרית משדרת בעוצמה של מגה-וואטים במטרה ששידוריה יתפזרו בכל הכיוונים. התוצאה חיובית בשידורים המסחריים אולם כאשר האותות מוחזרים בעוצמה ומגיעים לאנטנה שלנו הם עלולים לגרום לתופעות של "Intermode" וכל מה שכרוך בכך.

לסיכום

תם - אבל לא נשלם. סדרת המאמרים הנוכחית הייתה רק קצה הקרחון של התורה כולה. מה שסופר ותואר לעיל הינו רק חלק קטן מתורה עמוקה יותר שכדאי ללמוד אותה כדי להבין את תורת התפשטות הגלים וניצולה להנאתנו.

* * * * *

גלי רקיע - התפשטות גלים בתדר גבוה

HF Wave Propagation

נכתב ע"י אבנר דרורי 4X1GE

(המשך מחוברת קודמת)

פרק ו' - אופני התפשטות ייחודיים

מבוא

לאחר שהכרנו את מבנה היונספרה ושכבותיה נוכל להכיר גם אופני התפשטות ייחודיים המתבססים על תכונותיה. חלק מהתופעות הנו קבוע וחלקו האחר אקראי. להלן פרוט האופנים כאשר הסבר מפורט יינתן בהמשך פרק זה:-

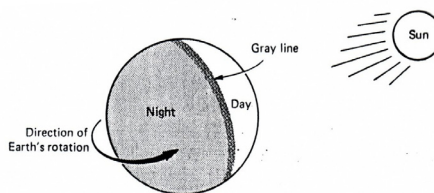
- הקו האפור (Gray Line)
- הנתיב הארוך (Long Path)
- E אקראי (Sporadic E)
- זירוי לאחור (Back Scatter)

הקו האפור

"הקו האפור", או "אזור הדמדומים", הנו הרצועה המקיפה את כדור הארץ ונמצאת בגבול היום והלילה. קו זה נמצא באזורי הזריחה והשקיעה והאסטרונמים מכנים אותו בשם "טרמינאטור" (Terminator).

התפשטות הגלים, לאורך הקו האפור, הינה יעילה ביותר. הסיבה העיקרית לכך היא היעדרות שכבת "D" הבולעת את גלי הרדיו. שכבה זו נעלמת לקראת הערב וטרם נוצרת בשעות הבקר. יעילות הקו האפור גדולה עד כדי כך שהיא מאפשרת להשיג קשר יעיל ורציף בין כל הנקודות שעל קו זה. היעילות כה גבוהה עד שניתן להשתמש באנטנות פשוטות, דיפולים ו-V הפוכה, כדי להשיג קשרים לאורך הקו. אנטנה כיוונית עשויה, כמובן, לשפר את התוצאות.

הקו האפור נמשך כשעתיים במשך יממה, חצי שעה לפני ואחרי הזריחה ואותו דבר בשעת השקיעה. שני מועדים אלה נוחים לקיום קשר מאחר ובדרך כלל הן שעות שאינן מיועדות לעבודה או לשינה. המחשה לכך ניתן לראות באיור ו' 1.



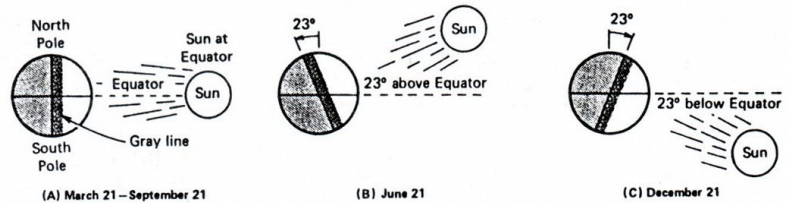
איור ו' 1 - הקו האפור

על מנת להבין כיצד משתנה הקו האפור, במשך עונות השנה, עלינו להתייחס בחופשיות רבה עם התורה הקופרניקית ולעוות מקצת חלק מחוקי האסטרונמיה.

הבא נדמיין לעצמנו ש:-

- כדור הארץ הינו מרכז היקום.
- השמש נעה במסלול מחזורי-מעגלי סביב כדור הארץ.
- הציר, העובר את כדור הארץ ומחבר את שני הקטבים, ניצב לקו המשווה.

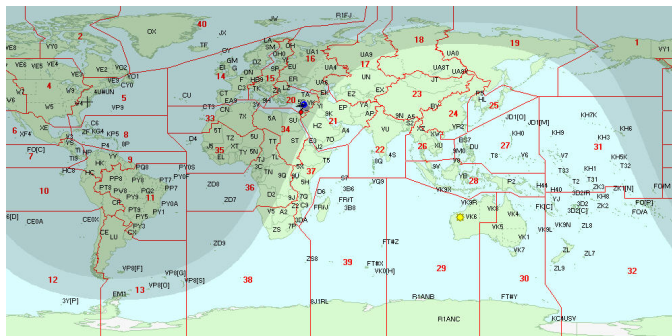
מאיור ו' 2 נראה כי השמש נעה במחזור שנתי לאורך מסלול המשתרע מקו רוחב 23 מעלות צפון (חוג הסרטן) עד קו רוחב 23 מעלות דרום (חוג הגדי) וחוצה פעמיים בשנה את קו המשווה. חציית קו המשווה מתרחשת בערך ב-21 למרץ ו-21 לספטמבר בהם משכי היום והלילה שווים. ימים אלה נקראים, ע"י האסטרונומים, בשם Equinox.



איור ו' 2 - התנועה היחסית בין כדור הארץ והשמש

במאה הקודמת, לפני עידן האינטרנט, היו מחשבים את הקו האפור היומי בעזרת גלובוס ומחונן שאותו היו צריכים להכין מקרטון. מי שעדיין מעוניין לבצע זאת בדרך הישנה, כדאי שיעיין במהדורות ישנות של ה-ARRL Handbook.

כול מה שנחנף היום זה להשתמש בתוכנות לחובבי רדיו או להיכנס ל-Google ולהקיש HF gray line. בחרתי להציג את התמונה הבאה המתארת קטע של האזורים, הנמצאים בקו האפור, שנוכל להתקשר אליהם בזריחה של הראשון בינואר מדי שנה.



איור ו' 3 - תמונה חלקית של הקו האפור

התמונה הנ"ל הועתקה מתוכנת DX Atlas המאפשרת לקבל תצוגות שונות המתארות את האזורים המושפעים. באותה תוכנה אפשר לחפש את הקו האפור בכל יום בשנה.

חלק גדול מהקו האפור, העובר את ישראל, נמצא באזורים שוממים, מעל אוקיינוסים או מעל מדינות שאינן ששות לקיים אתנו קשר. למרות זאת כדאי להכיר את תכונותיו המאפשרים לנו קשר עם מערב ארה"ב בשעות הזריחה של ה-21 ליוני ושעות השקיעה של ה-21 למרץ.

יתכן ונעזרתם כבר בתופעה זו אפילו אם לא ידעתם על קיומה. ההתפשטות, לאורל הקו האפור, יכולה להיות בכיוון אחד או בכיוון ההפוך. לעיתים קרובות היא נעשית בשני הכוונים והקשר נשמע עם "הדהודים". אם זה קרה לכם, הרי הצלחתם לנצל את התופעה.

לסיכום - תופעה זו מתבססת על היעדרות שכבת ה-"D" ולכן תשפיע במיוחד בתחום התדרים הנמוכים (40 עד 160 מטר). מכיוון ובתחומים אלה לא מקובל להשתמש באנטנות כיוונית, כל מה שעלינו לעשות זה לעלות על הגלים המתאימים, בשעות הדמדומים, ולנסות את מזלנו.

הנתיב הארוך

ניתן לחבר כל שתי נקודות, על פני כדור הארץ, באמצעות שני נתיבים, קצר וארוך. יוצאות מהכלל הן הנקודות הנמצאות בדיקו בקצה השני של כדור הארץ והנתיבים ביניהם שווים באורכם. נקודות אלה נקראות בשם "אנטיפוד" והמרחק ביניהן יהיה 20,000 ק"מ. בין שאר הנקודות אפשר להגיע בנתיב קצר, הקטן מ-20,000 ק"מ, או בנתיב ארוך, הגדול מ-20,000 ק"מ. כווני הנתיבים יהיו כמובן הפוכים ב-180 מעלות וסכום אורכיהם יהיה תמיד 40,000 ק"מ.

אם נניח שהנתיב הקצר לניו-יורק הנו באורך 10,000 ק"מ ובזווית 315 מעלות, הרי שהנתיב הארוך יהיה בן 30,000 ק"מ ובזווית של 135 מעלות.

סביר להניח שכדאי לקיים תקשורת בנתיב הקצר. למרות שזה הכלל, קיימים תנאים בהם אפשר לקיים קשר בנתיב הארוך בזמן שלא ניתן לקיימו בנתיב הקצר.

יהיו מקרים בהם שכבת ה-F תהיה פעילה עדיין בשעות הלילה ותבטיח קיום קשר. באותה עת שכבת ה-D תהיה פעילה ותגרום לניחות בנתיבים העוברים באור השמש ובאזורים הנמצאים בהשפעת הזרח הצפוני (או הדרומי). במקרים אלה הניחות, הנגרם בגלל מספר הדילוגים הגבוה, יהיה קטן מהניחות הנגרם בהשפעת שכבת ה-D והקשר יושג דווקא בנתיב הארוך.

מכיוון שתופעה זו מתבססת על תכונות שכבת ה-D, הרי שהשפעתה מודגשת יותר על תדרים מ-14 מ"ה ומטה.

לעיתים תנאי ההתפשטות זהים בשני הנתיבים, תופעה המודגשת במיוחד לאורך הקו האפור. במקרה זה האותות יגיעו בהפרש זמן שיגרום ל-"הדהודים" ועיוותים. אם אנחנו מצוידים באנטנה כיוונית, נוכל לזהות את הנתיב המבטיח אות חזק יותר ולהשתמש בו. יהיו מקרים בהם התנאים יכולים להשתנות, במידה קיצונית, וקשר שהתחיל בנתיב אחד יסתיים בנתיב השני.

ישנה תופעה נוספת העוזרת לקיום קשר בנתיב הארוך. תקשורת ארוכת טווח מבוססת על דילוגים. דילוגים אלה יכולים להיות על פני אזורי יבשה או על פני אזורים ימיים. מאחר וההחזרות טובות יותר מעל פני שטחים בעלי מוליכות גבוהה, כגון אוקיינוסים, הרי שהתקשורת תהיה טובה יותר בעזרת דילוגים מעליהם. חשוב שדווקא הדילוגים הראשונים יהיו מעל אוקיינוסים. תופעה זו אינה תלויה בשעות היום או הלילה וניתן להשתמש בה גם בתחומי התדר הגבוהים. הדילוגים הראשונים, מהחוף המערבי של ארה"ב, יהיו יעילים יותר אם יעשו מעל האוקיינוס השקט ולא על יבשת ארה"ב עצמה. דבר זה נכון גם לגבי התקשורת לאוסטרליה. גם כאן ישנן תופעות הקשורות לעצמת שכבות ה-F וה-D ולקיום הקו האפור. שלוב תופעות אלה עלול לגרום לתנאי התפשטות שווים, בשני הכוונים, או להפיכתם במשך הקשר. הבנת התופעה ושימוש באנטנות כיוונית עשויים לעזור להתגבר על הבעיה.

לסיכום - לא תמיד הדרך הקצרה היא הדרך הטובה. כדאי להכיר גם את תופעת הנתיב הארוך ולנצלה כאשר ניתן לעשות זאת.

E אקראית

קורה לפעמים שבתחתית שכבת ה-E נוצרים כעין עננים בעלי רמת ינון גבוהה. עננים אלה הם בקוטר של 70 עד 150 ק"מ והם נעים, בחצי הכדור הצפוני, בכיוון מערב. עננים אלה הם בעלי תכונת החזרה טובה בעיקר בתדרים הגבוהים, 21 עד 144 מ"ה.

התופעה הינה אקראית ומכיוון שהיא צמודה לשכבת ה-E, היא נקראת "E אקראית" ("Sporadic E") ונהוג לסמנה ב-Es.

הסיבה להופעת השכבה אינה ברורה. הקשר שלה, עם כתמי השמש, גם הוא אינו ברור. מתצפיות שנעשו נראה כי התופעה נמצאת ביחס הפוך למספר כתמי השמש. ישנן השערות כי עננים אלה נוצרים כתוצאה מחיכוך בין שכבות גזים הנעות בגבהים המתאימים. מכיוון ששטחו של הענן קטן יחסית ואינו נמצא במקום קבוע, השפעתו תהיה מקומית וזמנית בלבד. מכיוון שהסיכוי קטן שימצא ענן כזה מתאים לדילוג שני, הרי שההתפשטות באופן זה מתאימה לדילוג אחד בלבד. אם נזכור כי דילוג של תדרים גבוהים, 21 ו-28 מ"ה,

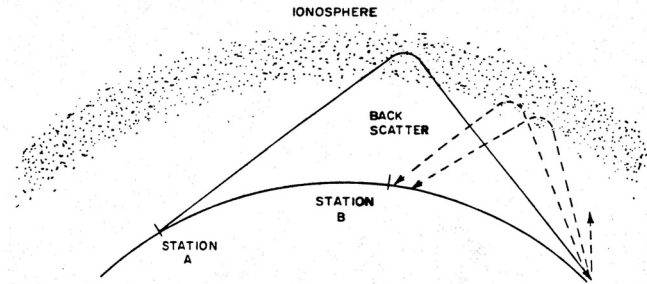
הנו בן אלפי ק"מ, הרי דילוג של שכבת E הנו בן 1000 ק"מ בלבד. אם משיגים קשרים, לטווח הקצר, בתדרים הגבוהים זה עשוי להיות סימן שהתופעה קיימת.

למרות האקראיות בתופעה, ישנה סבירות ש- E_s תופיע בקיץ בשעות הבוקר המאוחרות, בסביבות שעה 10:00, ושעות אחר הצהריים המאוחרות כאשר בשעות הלילה היא נעלמת. כאשר תופעה זאת מתרחשת בחורף, היא נכנסת גם לשעות החשכה.

80% מתופעות אלה מתרחשות בקיץ, בין מאי ואוגוסט, כאשר שיא הפעילות בחודש יוני. בחצי הכדור הדרומי מבחינים, בתופעה זו, בהתאם לעונות השנה שם.

תופעת ה- E_s הינה אופייני חשוב מאד בהתפשטות הגלים דווקא בתחום ה-תג"מ ונראה שאינה תופסת מקום חשוב במיוחד בתחום ה-ת"ג. כאשר היא מופיעה בתחום ה-ת"ג, זה סימן למפעילי ה-תג"מ להתחיל בצייד ה-DX.

זירוי לאחור (Back Scatter)



איור ו' 4 – זירוי לאחור

גל המשודר, בתדרים השווים או הנמוכים מה-MUF, יפגעו אלכסונית ביונספרה ויוחזרו ממנה קדימה. חלק קטן מאד מהאנרגיה יפוזר גם בכיוונים אחרים ויוחזר לכדור הארץ. גלים המשודרים בתדרים הגבוהים מה-MUF, יחדרו דרך היונספרה אולם גם כאן תהיה החזרה מסוימת המפוזרת בכוון כדור הארץ.

הסיבות לתופעה זו אינן ברורות דיין וההשערה שפני היונספרה אינם חלקים וישנן כעין "בליטות" הגורמות להחזרה לאחור.

לתופעה זו אין שימושים מיוחדים בתקשורת ה-ת"ג של חובבי הרדיו, חשוב להכיר אותה דווקא בגלל הבעיות שהיא עלולה לגרום. כפי שהזכרתי כבר, רק חלק קטן מאנרגיית השידור מתפזרת לכיוונים שונים. כאשר תחנת חובבים משדרת, ההספק המתפזר הוא אפסי והתופעה אינה מורגשת. התופעה מורגשת ביותר כאשר תחנת שדור מסחרית משדרת בעוצמה של מגה-וואטים במטרה ששידוריה יתפזרו בכל הכיוונים. התוצאה חיובית בשידורים המסחריים אולם כאשר האותות מוחזרים בעוצמה ומגיעים לאנטנה שלנו הם עלולים לגרום לתופעות של "Intermode" וכל מה שכרוך בכך.

לסיכום

תם אבל לא נשלם. סדרת המאמרים הנוכחית הייתה רק קצה הקרחון של התורה כולה. מה שסופר ותואר לעיל הינו רק חלק קטן מתורה עמוקה יותר שכדאי ללמוד אותה כדי להבין את תורת התפשטות הגלים וניצולה להנאתנו.

* * * * *