

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

מבוסס על סדרת מאמרים שהתפרסמה ב-QST בשנים 1973 – 1976
הסדרה רוכזה בספר: "Reflections" מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU בהוצאת ARRL ב-1990.

סדרת מאמרים זו היא הראשונה בסידרת "תוספות" של QST שדנו בהבטים שונים של פעולת קוים להעברת תדרי רדיו – כלומר, תיאורית קווי תמסורת. בחינה מעמיקה ולימוד של החומר, לאו דווקא קריאה אקראית, תתגמל את אלה המעוניינים בכך, בידע נוסף בנושא. מעט רקע באלגברה וקטורית, יסייע לקורא בהבנת החומר המוגש כאן, אף על פי שהדיון בנושא מבוסס על אלגברה בסיסית ומבוסס על שימוש ב-Smith Charts. בחלקים המאוחרים של הסדרה, משתמש המחבר, מ. וולטר מקסוול, בשיטות דיון רעננות יותר מאשר השיטות השיגרתיים של סתם הצגת קומבינציות וקטוריות של עומס קומפלקסי.

וולטר מקסוול קיבל את אות הקריאה W8HKK ב-1933. נסיונו המקצועי בתכנון אנטנות, כולל השתתפות בבניית חוות אנטנות לתחנות בקרה של ה-FCC בהוואי ובמישיגן מ-1940 עד 1944. לאחר שקיבל תואר ראשון במדעים מאוניברסיטת מישיגן, עבר לעבוד כמהנדס בחברת RCA מ-1949 והיה חבר בצוות המוביל של מחלקת אלקטרוניקת חלל של RCA. החל מ-1960 הוא היה ממונה על על מעבדת האנטנות ומטווח הניסויים של מרכז החלל של RCA בפרינסטון, ניו ג'רזי. יותר משלושים לווינים משתמשים באנטנות שתוכננו בלעדית ע"י המחבר, כולל ECHO I ולוויני חיזוי מזג אויר Tiros-ESSA. הוא השתתף בתיכנון המערכות של רבים נוספים. הוא סייע בתכנון ערוץ הקשר ברכב הירח של תוכנית אפולו (Moon Rover) אל כדה"א, ערך את מטווח האנטנות לניסויי ערוץ הקשר וערך את מרבית המדידות לקביעת עקומות הקרינה, השבח ותיאום העכבות. הוא תיכנן את מערך האנטנות של תחנת הקרקע לביצוע בדיקות החלליות בשלב טרום השיגור, בקייפ קנדי, לתוכניות Tiros ו-Relay והיה בעל אחריות כוללת למערכות ה-RF (אנטנות משדרים ומקלטים) של חמש מערכות תחנות קרקע ששימשו בפרויקט SCORE, ששידר את נאומו של הנשיא אייזנהאואר "ברכת כריסטמס מהחלל" בדצמבר 1958.

על אף שפעילותו המקצועית של וולטר מקסוול היתה קשורה לתקשורת חלל, כחובב רדיו הוא עם שתי רגלים על הקרקע. הוא מחזיק היום באות הקריאה W2DU אך מחזיק גם באות הקריאה המקורי W8KHK. בנוסף הוא נאמן של תחנת מועדון הרדיו K2BSA, תחנת הרדיו של המפקדה הלאומית של אירגון הצופים האמריקאי.

חלק 1 – יג"ע נמוך מדי יכול להרוג אותך

אם נשפוט על פי מה שאנו שומעים על האויר, כמעט כולם מבקשים שהיגמ"ע (ר"ת: יחס גל מתח עומד VSWR) יהיה אחד-לאחד. תשאל למה, והתשובה עשויה להיות: "אני לא יוצא בתדר הזה כי היגמ"ע הוא 2.5 ל-1. יותר מדי הספק חוזר ולא מספיק מגיע לאנטנה", או, "אם אוזן קו עם יג"ע כזה, ההספק החוזר הזורם לתוך המגבר שלי ישרוף אותו", ועוד "אני לא רוצה להקרין מהכבל". כל אחת מהתשובות הללו מראות אי הבנה של מכניקת ההחזרות, והן מאפיינות את מצב ההשכלה העכשווית בנושא. חשיבה הגיונית ויצירתית בקשר להרגלי תיכנון של אנטנות וקווי תמסורת חסרים כבר זמן רב, הוחלפו ע"י גישה לא מדעית ומדכאת מחשבה, כמו בימים לפני שקופרניקוס שינעו שהעולם לא מסתובב סביב הארץ. מצב זה נוצר כשקווי תמסורת חד-ציריים (כבלים קואקסיאליים) הוכנסו לשימוש חובבי הרדיו כשהם חוזרו הביתה אחרי מלחמת העולם השנייה וצבר תנופה כי מחווי יגמ"ע הפיעו על הבמה וקבל העמסה של מאגר רשת פאי החליף את צימוד הסליל המסתובב כבקרת צימוד היציאה. אנחנו במצב זה כי כל כך הרבה מידע מטעה פורסם ועדיין מפורסם בנוגע להתנהגות אנטנות שאינן בעלות תהודה עצמית, ביצועי קו תמסורת בנוכחות החזרות, עקב אי תיאום לאנטנה ובעיקר המשמעות והפרשנות של נתוני היגמ"ע.

מאמרים המכילים במפורש מידע מוטעה ומושגים מעוותים מצאו דרכם לרפוס, הפכו לאמונה, והמשיכו להתפשט בעילות של מכתבי שרשרת. אלה כוללים פנינים של הגיון אינטואיטיבי כגון: 1. לעולם נחזר תיאום מושלם בין קו ההזנה לאנטנה, 2. הערכת ביצועי אנטנה או יעילות הקרינה רק על בסיס היג"ע של קו ההזנה – עדיף נמוך ככל האפשר, 3. גיזום אנטנת דיפול לתהודה מדויקת בתדר (יחיד) העבודה ולהזין אותו בקו הזנה בעל אורך מדויק של חצאי אורך גל – ולא שום אורך אחר, 4. כיוון הגובה – אולי רק ע"י הנמכת הקצוות של Inverted V כדי להוריד את הרכיב ההתנגדותי ולהשוותו לעכבה האופיינית של הכבל, או 5. הפחתת אחוז ההספק המוחזר מ-100 כדי לקבוע את האחוז השימושי של ההספק ביציאת המשדר (אפילו פורסמו נומוגרפים לשיטה שגויה זו). כתוצאה מהמושגים המטעים הללו, קיבלנו התניה להירתע מאי תיאום ומהחזרות כמו ממגפה. אחד-לאחד לאורך כל הדרך! נשמע מוגזם? לא אם מקלטיו של הקורא מכוונים לאותם תחומי חובכים כמו של המחבר! במילים אחרות, ניתן לומר כי אנו סובלים מקיבעון יג"ע חריף. במקרים רבים, מנקודת המבט של הגדסה טובה, גורם לנו קיבעון זה לרכו את מאמצי תיאום העכבות שלנו בקצה הלא נכון של קו התמסורת.

האירוניה היא בכך שאנו צריכים להימצא במצב זה, כי חובבי רדיו הם בדרך כלל מעשיים ביישום שיקולים תיאורטיים. במקרה זה ציינתו לתיאוריה של התיאום המושלם לאורך כל הדרך, כי רבים מהמאמרים שהוזכרו לעיל, הטעו אותנו לחשוב כי כל ההספק מוחזר הולך לאיבוד, בלי לרמוז אף פעם כי, עם בקרה מתאימה, החזרות יכולות להפוך ליתרון בהשגת הגדלת רוחב הפס שכרגע אנחנו משליכים הצידה.

העובדה שכמות גדולה כל כך של מידע מוטעה תפסה דריסת רגל מפתיעה לנוכח האפשרות ללמוד את הגירסה הנכונה ב- Handbook של ARRL, בספר האנטנות של ARRL, וברשימת פרסומים ארוכה (שהושמטה כאן). לכן, אחת המטרות של מאמר זה, לזהות אחדים מן המושגים המוטעים הרבים, בקשר לעקרונות ההחזרה, בבהירות מספקת כדי לאתגר את הקורא לגבי עמדתו בנושא. כאשר נבין נכוחה את חוסר התיאום וההחזרות, נוכל להשיג שיפור בגמישות הפעלת האנטנה, בדומה למעבר לעבודה עם VFO אחרי שהיינו תקועים עם גביש. אחרי שנגלה כמה מעט אנחנו מרוויחים ע"י השגת יג"ע נמוך בקו התמסורת, נוכל להימנע מבזבז זמן רב על תיאומים מיותרים, שלעיתים כרוכים בטיפוס וביצוע פעולות מסוכנות על גג או מגדל, העלולות להסתיים בפציעה או אפילו מוות. הבה נהרוג את המושגים המוטעים בקשר ליג"ע – ולא את חובבי הרדיו!

קו פתוח מול קו הזנה חד-צירי (קואקס)

התיאוריה שמאחורי שידור הספק דרך קו תמסורת עם הפסדים מינימליים על ידי מניעת כל החזרות – סיום הקו בתיאום מושלם – נכונה במידה שווה, כמובן, גם לקו פתוח וגם לכבל קואקסיאלי. אבל, בימים של הקו הפתוח, לפני התפוצה הרחבה של השימוש בקואקס, זה היה מהול בשיקולים מעשיים. קו פתוח היה, ועודו, משמש עם יגמ"ע גבוה להשגת רוחב פס עצום עם נצילות גבוהה. זאת מכיוון שכל ההספק המוחזר מחוסר התיאום בין

האנטנה לקו התמסורת, אל המקור בכניסה, נשמר, לא מתבזבז ומוחזר לכיוון האנטנה על ידי מתאם האנטנה (*transmatch*) בכניסת הקו. אבל, למרות שההפסדים, בגלל ההחזרות והיג"ע הגבוה, אינם אפס מוחלט, תוספת ההפסד הזו היא זניחה בגלל הניחות הנמוך של הקו הפתוח. אם הקו יהיה חסר הפסדים (אפס ניחות) לא יגרם כל הפסד עקב ההחזרות.

הטעות בדרך החשיבה שלנו, כי תמיד יש לבטל לחלוטין גלים עומדים בקוים קואקסיאליים, נוצרה די בטבעיות, כי ההחזרה המותרת והיג"ע המקסימלי, נמוכים מאלה שבקו פתוח. כאשר משתמשים בקואקס להפעלה בתדר יחיד באמת, יש היגיון לתאם בין הקו והעומס עד לדרגה הגיונית מבחינה כלכלית. אבל אין זה הגיוני לתאם את העומס ברוב היישומים של החובבים, כי אנחנו מעוניינים בעיקר בפעילות על פני פס תדרים. אנחנו איננו מפעילי תחנות של תדר יחיד, אלא אם המושגים המוטעים שלנו בקשר לעלית היג"ע מונעים אותנו מלזוז מן התדר בו האנטנה תוהדת !

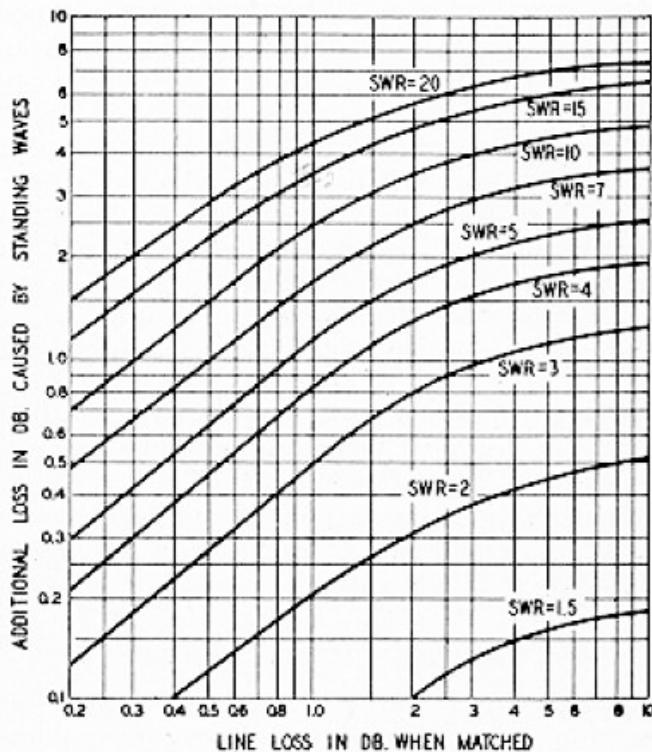
מחברי מאמרים רבים אחראים להנצחת ההשקפה המוטעית והבלתי מדעית שאנטנות מוזנות קואקס חייבות לפעול בתדר התהודה העצמית, על ידי הדגשת יתר נצחית של הצורך להיות מתואם אל הקו לאיזה שהוא ערך יג"ע נמוך, לשמירת נצילות השידור, ורמיזה כי הנצילות שווה ל-100 פחות ההספק המוחזר. השקפה זו הינה בלתי מדעית, כי היא מתעלמת מהגורם העיקרי במשוואה לקביעת הנצילות – הניחות בקו. הדבר שגוי גם בגלל שהנצילות אינה קשורה להספק המוחזר על ידי חיסור פשוט. הצבת מגבלה ליג"ע כשלעצמה למטרה זו היא חסרת משמעות, כי המידה של הספק חוזר שהולך לאיבוד אינה תלויה רק ביג"ע. מקדם הניחות לגבי קו ההזנה המסוים צריך גם הוא להיכנס לחישובים, כי מה שהולך לאיבוד מההספק המוחזר הוא רק אותה כמות המתבזבזת ומתפזרת עקב הניחות, השאר מוחזר לעומס. כתבי המאמרים הללו קיבעו בנו באופן כה שגוי את ההתייחסות להספק המוחזר עד כי אנו מתעלמים מהגישה הנכונה לנושא. הן ב-"Handbook" והן ב"ספר האנטנות" של ARRL, נאמר בבירור כי נצילות השידור היא פונקציה של שני משתנים – חוסר התיאום וניחות הקו. בעזרת ידיעה זו ובעזרת הגרף של פונקציה המופיע בספרי ARRL הללו, ומוצג להלן בציור מס' 1, יכול החובב לקבוע כמה נצילות אובדת עבור יג"ע נתון עם מקדם ניחות לכל קו הזנה מסוים. הוא יכול לקבוע לעצמו מה גבול היג"ע המעשי צריך להיות.

חוסר החשיבות של ערכי יג"ע נמוכים

במאמצינו להשיג ערכי יג"ע נמוכים בקו ההזנה של 1.1, 1.2, או אפילו 1.5 ל-1, עברנו הרבה מעבר לנקודת הפחתת ההחזרות הדרושה להעברת הספק יעילה, אפילו להפעלה בתדר יחיד, מאותה סיבה שאף אחד לא יתקין בביתו חוטי חשמל של 10 או 15 מ"מ, כאשר עובי מתאים הוא כ-2.5 - 1.5 מ"מ. התייחסות למשוואות הבסיסיות של קו תמסורת, הזמינות תמיד בספרי לימוד ומדריכים להנדסה (ראה ביביליוגרפיה) יאמתו את האנלוגיה הזו ובנוסף, יראו בבהירות שמחברים שסתם מתעקשים על יג"ע נמוך, או מוצאים כי יג"ע של 1.5 או 2 ל-1 הינו גבוה באופן מוגזם כשלו בהבנת הקשרים בין הספק מוחזר והספק מבוזבז. מנקודת המבט של תקשורת חובבי רדיו, ניתן להראות מתמטית ולאמת בקלות באופן מעשי, כי ההבדל בהספק המועבר בכל קואקס שהוא, עם יג"ע של 2 ל-1, אינו מורגש בהשוואה לתיאום אידיאלי של 1.0 ל-1, ללא קשר לאורך הקו ולניחות שלו. גם לכבלי קואקס מסוגים נפוצים, שאנו משתמשים בהם, יהיה הבדל זניח עם יג"ע של 3 או 4 או אפילו גבוה עד 5 ל-1. כאשר ניחות קו התמסורת הינו נמוך, האפשרות לעבוד עם ערכי יג"ע כאלה גבוהים מאפשרת הפעלה על פני טווח תדרים גדול מתדר התהודה של האנטנה עם הפסד נצילות זניח כפי שזה עתה הוסבר, בניגוד לתחושה הפופולרית ההפוכה.

חוסר החשיבות היחסי של יג"ע נמוך כאשר ניחות קו התמסורת הוא נמוך, מודגם בצורה חיה בשתי הדוגמאות הבאות של ישום אנטנות בחלליות. ראשית בלווין מזג האויר Tيروس-ESSA-Itos-APT שבו כל תיכנון מערך האנטנה-הרב-תדרית היה של מחבר מאמר זה, עכבת ההדקים של הדיפול בתדר משואת הטלמטריה (108 מה"ץ בדגמים מוקדמים) היתה 100-j150 אוהם, עבור יג"ע של 4.4, ההספק החוזר הוא 40 אחוז. התיאום נעשה בכניסת הקו, בו הוא הוון ע"י משרד הטלמטריה ב-30 מיליוואט. (אנחנו לא יכולים להרשות כאן הרבה הפסדי הספק!) הניחות של קו ההזנה ורשת התיאום היה 0.2 ד"ב, והניחות הנוסף עקב היג"ע בקו ההזנה היה 0.24 ד"ב (5.4 אחוזים), ס"ה הפסד ההספק הגיע ל-0.44 ד"ב (9.6 אחוזים). לפי ההשערה השכיחה והמוטעית שכל ההספק

החוזר הולך לאיבוד, רק 18.1 מיליוואט היו מגיעים לאנטנה, והנצילות בהתאם לאותה הנחה מוטעית, היתה רק 60 אחוזים. אבל נמדדו 27.1 מיליוואט. מתוך הפסד ההספק של 2.9 מיליוואט, רק 1.6 מיליוואט מתוכם נבעו מהיג"ע של 4:1. כך שהנצילות האמיתית היתה עשויה להיות 95.5 אחוזים אם היה תיאום אידיאלי בעומס, אבל ירידה ל-90.4 אחוזים איפשרה להשאיר יג"ע של 4.4 ל-1 בקו ההזנה. שנית, בלוויין ניווט של חיל הים (NAVSAT), המיועד לזיהוי מיקום מדויק של אוניות בים, עכבת הדקי האנטנה ב-150 מה"ץ היא 10.5 – j48 אוהם, עבור יגמ"ע של 9.8, ההספק המוחזר הוא בשיעור 66 אחוזים. גם כאן, עם תיאום עכבות בכניסה, הניחות של הקו השטוח הוא 0.25 ד"ב, ותוספת הניחות בגלל היג"ע היא 0.9 ד"ב, וההפסד הכולל הוא 1.15 ד"ב, בערך 1/6 של יחידת S. זוהי כמות הפסד חסרת משמעות במצב זה, אפילו בסביבת חלל בה ההספק נמצא בעדיפות ראשונה. מדוע אנחנו מתאמים בכניסה? עקב סיבות הדדיות קריטיות הקשורות בבעיות תכנון חשמליות, מכניות וטרמיות, אין זה מעשי לתאם בעומס. תיאום בכניסת הקו מספק פתרון פשוט בהרשותו הזזת רכיבי התיאום למיקום לא קריטי. חופש התיכונן איפשר חיטון עצום של מאמצים הנדסיים תוך התפשרות זניחה בנצילות ה-RF, למרות ערכי יג"ע שחובבי רדיו רבים היו חושבים עליהם כבלתי הגיוניים.



גורם אחר שתורם לאי-ההכנה הוא הבילבול בין שני תנאים שונים לשימוש בקו – האחד של מתח מתקדם קבוע, והשני של הספק כניסה קבוע (למשרעות יחסיות, ראה סימוכין 19 ציור 1.3 עמוד 6, וציור 3.6 עמוד 29). בעבודה נסיונית ומעבדתית צריכים לעתים לשמור את המתח המתקדם קבוע אם העומס משתנה. בדרך כלל יוצרים מקור מתח קבוע לשימוש זה על ידי הכנסת PAD של 15 עד 20 ד"ב, בין המחולל והקו כדי לספוג את ההספק המוחזר, המונע ממנו להגיע למחולל שם הוא יכול לשנות את צימוד הקו ולגרום למתח היציאה של המחולל להשתנות. בגלל הספיגה של ה-PAD, המחולל רואה תיאום כמעט מושלם לעומס בכל התנאים וכל ההספק המוחזר נבלע – אבל אלה הם תנאי מעבדה מבוקרים, הנדרשים ליצירת נתוני ניסוי תקינים.

באיור, גידול בהפסדי קו ההזנה בגין יג"ע בנקודת העומס. על מנת לקבוע את כל ההפסדים בד"ב בקו של יג"ע גדול מ-1 יש למצוא קודם כל את ההפסד של קו מסוים זה, אורכו והתדר, בהנחה שהוא מתואם בצורה מושלמת. מצא נקודה זו על הציר האופקי ועלה עד לעקומה של היג"ע למעשה. הערך המקביל על הציר האנכי ייתן את ההפסד הנוסף בד"ב, כתוצאה מהגלים העומדים.

המשך יבוא

מבט אחר על החזרות (המשך)

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

כאשר אנחנו החובבים יוצרים שינויים המשנים את העמסת הקו, וכתוצאה משתנה הצימוד בין המשדר לקו עם שובו של ההספק המוחזר, אנחנו יכולים לכוון מחדש את מעגלי התיאום במשדר ולהחזיר את ההספק הנמסר לקו (לא ההספק המתקדם) לערכו הקודם ללא קשר לערך ההספק המוחזר². אנחנו החובבים יכולים לכוון את הצימוד עבור שינויים בעומס – במעבדה הדבר איננו נוח. אנחנו החובבים משתמשים בקוים נמוכי ניחות לשמר את ההספק המוחזר – בתצורת המעבדה מכניסים ניחות כדי לפזר את ההספק המוחזר. הבלבול בין הבדלים אלה עזר להנציח את המושג המוטעה "הספק מוחזר אבוד".

כתוצאה משלל אי ההבנות הללו, חובבים רבים אפילו לא תמחו מעולם האם ניתן לקבל רווח כל שהוא, אם לא יתאמו את הצומת בין הקו לאנטנה. רבים אפילו מתנזרים היום משימוש בקו פתוח (לא ה- Old Timers), לחלוטין, ונמנע מהם התענוג לעבור לקצה השני של הגל רק עם כיוון פשוט של רשת התיאום במשדר, כי הפחד מהחזרות שנולד מיישום מוגזם של התיאוריה לקואקס זחלה למחשבה הנוגעת לכל צורה של חיבור לא מתואם. וכדי להוסיף על הביבלוב ישנם "סיפורי סבתא" שההספק המוחזר נספג במשדר וגורם לסליל מעגל המאגר ולשפופרת הסופית לחימום יתר ושאר מרעין בישין. אגדה זו התפתחה כתוצאה מבורות בקשר לתיאוריה האמיתית של מנגנון החזרות ונהייתה דרך קלה, אם כי מופרכת, להסביר מה שנראה כהתנהגות לא רגילה במשדר המזין קו בעל החזרות. מה שבאמת קורה במשדר, הוא פשוט שינוי בצימוד, שיוסבר בפרוטרוט בחלק הבא. אז נוכל להבין איך להפעיל, ללא כל סכנה להזיק למגבר, תוך הזנת קו עם יג"ע גבוה³.

הנדסת מערכת אנטנות חובבים

הנדסה היא התהליך של עשיית פשרות מעשיות במטרות התיכנון כאשר התיאוריות המנחות היבטים שונים של התיכנון נמצאות בסתירה ביניהן, ובלתי אפשרי להגיע לאופטימיזציה בכל המטרות. הנדסה טובה היא פשוט הכרת האפשרויות הנכונות לעשיית פשרות לשם השגת המטרות הנכונות, כמו בדוגמאות תיכנון אנטנת הלוינים שהוזכרו קודם. אנחנו החובבים, מבלים זמן רב בטיפוח וגיזום מערכות אנטנות. האם לא יהיה זה מועיל שנבלה קצת מהזמן הזה איך להנדס את התיכנון כדי להחליט על הפשרות בין הגורמים הנוגעים בדבר במקום לתת למלך יג"ע להכתיב את התיכנון?

ראשית, עלינו לשפר את הידע שלנו בקשר למנגנוני החזרות והתפשטות הגל בקו התמסורת, כדי להבין...

- 1) מדוע ההספק המוחזר לבדו הוא גורם חסר חשיבות בקביעת מידת הנצילות בה נמסר ההספק לאנטנה.
- 2) מהי ההשפעה של ניחות הקו (כדי לגלות מדוע הוא גורם המפתח שיאמר לנו מתי וכמה אנו צריכים להתייחס להספק המוחזר ומתי להתעלם ממנו)

² ההספק המתקדם, שווה להספק הנכנס פלוס ההספק המוחזר. ההספק המתקדם שווה להספק הנכנס רק כאשר יש לקו תיאום אידיאלי לעומס ואין הספק מוחזר.

³ יצרני משדרים היו יכולים בקלות לשים סוף לאגדה הזו על ידי הוספת שתיים או שלש פסקאות בחוברת ההוראות המסבירות את מגבלות המקסימום והמינימום של יכולות הצימוד של רשת ה-פאי ואיך אפשר להרחיב את טווח הפעולה ע"י הוספת קבל חיצוני, במקום ההכרזה חסרת המשמעות: "זהירות – לא לעבור יג"ע של 2:1" וכן הלאה.

3) מדוע כל ההספק הנמסר לקו, פחות ממה שמתבזבז על ניחות הקו, נספג בעומס, ללא כל קשר לחוסר התיאום בהדקי האנטנה.
4) מדוע הפסדי ההחזרה (הפסדי חוסר התיאום) מתבטלים בכניסת הקו ע"י הגבר ההחזרה (סימוכין 19, עמ' 36 וסימוכין 25, עמ' 33).
5) מדוע קריאת יג"ע נמוך כשלעצמה לא מבטיחה שההספק משודר באופן יעיל, יותר מאשר שקריאת יג"ע גבוה מבטיחה שההספק מבוזבז.
6) מדוע אין להטיל על היג"ע את האשמה בבעיות העמסת המשדר – מדוע האשם האמיתי הוא השינוי בעכבת הכניסה של הקו כתוצאה מהיג"ע, ומדוע יש לנו שליטה מלאה על העכבה מבלי להתמקד בהכרח ביג"ע.
7) החשיבות של חשיבה במושגים של רכיבי ההתנגדות וההגב של העכבה במקום היג"ע עצמו, ומדוע היג"ע עצמו הוא מעורפל, בעיקר מנקודת המבט של הבחירה והכוון של מעגלי הצימוד והתיאום.

שנית, אנחנו צריכים להיות ערים לכך, שבאורכים בינוניים של קואקס נמוך ניחות, כמו זה שאנו משתמשים בדרך כלל לקוי ההזנה, הפסד ההספק בגלל ההספק המוחזר, בפסי ה-HF, יכול להיות חסר משמעות, לא משנה כמה גבוה הוא היג"ע. אם היג"ע הוא 3, 4, או אפילו 5 ל-1 והניחות קטן מספיק כדי להתעלם מההספק המתבזבז עקב ההספק המוחזר, הקטנת היג"ע לא יפיק כל שיפור בהספק המוקרן כי כל ההספק הנמסר לקו כבר נספג לתוך העומס. נקודה זו חשובה במיוחד לאנטנות שוט המועמסות במרכזן, עקב הניחות הנמוך של קו התמסורת הקצר. שלישי, אנחנו צריכים להיות יותר בקיאים בהתנהגות הצפויה והידועה בכללותה של עכבת ההדקים של אנטנה שאיננה בתהודה, והשפעתה על היג"ע. ידע זה מספק את הבסיס המדעי להערכת קריאת מד היג"ע ולקביעה האם המערכת שלנו מתנהגת באופן נורמלי או לא, במקום לקבל באופן עיוור כי יג"ע נמוך הוא טוב, ויג"ע גבוה הוא רע. שתי הדוגמאות הבאות מדגישות את החשיבות של הנקודה הזאת בהראותן כמה מטעה יכולה להיות קריאת יג"ע נמוכה.

1) למערכת הארקה המורכבת ממאה רדיאלים, המתקנים כהלכה, יש התנגדות הפסדים זניחה (סימ' 20). תחנות שיורר AM רבות משתמשות ב-240 רדיאלים, בעוד שה-FCC דורש מינימום 120 רדיאלים. עם מערכת הארקה כזו, העכבה של אנטנה אנכית מקובלת, של רבע אורך גל, היא $36.5 + j22$ אוהם, ובערך 32 אוהם כאשר היא מקוצרת לתהודה. כאשר היא מוזנת עם קו של 50 אוהם, היג"ע בתהודה יהיה קרוב ל-1.6 ל-1, ועולה כצפוי משני הצדדים של התהודה. אבל, למערכת רדיאלים של 15 כבלים בלבד, תהיה התנגדות הפסדי אדמה של 16 אוהם עבור אותה אנטנה. אם אנחנו מסירים כמה רדיאלים ממערכת הארקה בת 100 הרדיאלים, התנגדות האדמה הגדלה מתווספת לעכבת הקרינה של האנטנה, ומגדילה את התנגדות מערכת האנטנה. עכבת הסיומת של קו התמסורת מתקרבת ל-50 אוהם והיג"ע קטן. כאשר מסירים די רדיאלים, תגיע התנגדות ההפסדים ל-18 אוהם, ההתנגדות השקולה שרואה הקו תהיה 50 אוהם לתיאום מושלם של אחד-לאחד! אבל ככל שהיג"ע ירד, כך גם ההספק המשודר, כי כעת ההספק מתחלק בין התנגדות הקרינה בת 32 אוהם והתנגדות ההפסדים של מערכת הרדיאלים בת 18 אוהם!

מערכת הארקה בעלת שניים או ארבעה רדיאלים יכולה להיות בעלת התנגדות הפסדים גבוהה של 30 עד 36 אוהם, כך שכעת היג"ע בתדר התהודה יהיה בסביבות 1.4 או 1.5 ל-1. אבל במקום לעלות מערך זה, כאשר התדר זז מנקודת התהודה, הפסדי הקרקע, יחזיקו את היג"ע בערכים נמוכים. היג"ע הנמוך יראה רק שהקו מתואם היטב, אבל לא נותן שום רמז לכך שכמחצית ההספק רק מחממת את האדמה.

2) חובבים אחדים המשתמשים בבלון אחד-לאחד מאמינים ש- "אחד-לאחד" משמעותו שהוא יספק תיאום אחד-לאחד בין קו ההזנה לאנטנה. זוהי טעות חמורה כי "אחד-לאחד" מתייחס רק ליחס העכבות בין הכניסה והיציאה של הבלון – ללא תלות מהי העכבה בהדקי היציאה, אותו ערך יראה בכניסה. למרות זאת, אותם חובבים משוכנעים שה-בלונים "מתאמים" כי לפעמים היג"ע יורד באופן דרמטי עם הכנסת הבלון. לעתים עם הבלון מתקבל יג"ע של 2:1 על כל פס ה-80-75 מטר, כאשר יג"ע מעל 5:1 אופייני לקצוות הגל.

היג"ע מחוץ לתהודה מוקטן כאן כי גרעין הפריט של הבלון נכנס לרוויה בניסיון לטפל בזרם של הרכיב הריאקטיבי, שכעת עובר את הערך המקסימלי של זרם הגרעין. לכן, שיא הזרם של הרכיב הריאקטיבי מנוע מלהופיע בכניסת הבלון. כל ההספק מעל ערך הרוויה אובד על חימום הבלון, בעוד היג"ע הנמוך מטעה את החובב.

היג"ע האמיתי לא ישתנה ע"י הבלון אחד-לאחד בעל גרעין המסוגל לעמוד בזרם בלי להיכנס לרוויה (אם אין לו הגב זליגה משמעותי)⁴. בכל אופן, מד היג"ע עשוי לא להראות את היג"ע האמיתי ללא הבלון אם זרמי האנטנה בצד החיצוני של הקואקס מגיעים למד היג"ע (סימ' 36).

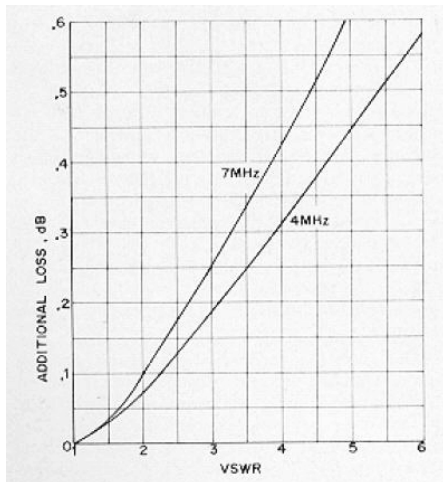
לכן חשוב לדעת בקירוב לאיזה יג"ע לצפות – אם הוא נמוך, קבע אם זה צריך להיות כך. אל תניח שיג"ע נמוך מראה על הצלחה, או מבטיח מערכת מעולה! היה חשדן במיוחד אם היג"ע נשאר נמוך או קבוע על פני טווח תדרים סביר, אלא אם נקטו צעדים מיוחדים להרחבת רוחב הפס במערכת השידור. ידע זה הינו יסודי ושיגרתי למהנדס תיכנון אנטנות, אבל מעט מדי מידע בתחום זה זמין לחובב, יחסית למידת התעסקותו באנטנות. בעוד ההתנהגות של עכבת הדקי הכניסה לאנטנה מוצגת בספר האנטנות של ARRL (סימ' 2 ציור 7-2), הקשר בין שינויי העכבה והיג"ע יתואר בפירוט בהמשך, כדי לאפשר לנו לחזות יג"ע נורמלי, בתחום גבולות סבירים, עבור אנטנה לא מתוהדת בסוף קו התמסורת.

רביעית, אנו צריכים לבחון מחדש את השימוש של קו פתוח כקו מכונן (Tuned line) (סימ' 3, חלק 3, עמ' 20 ; סימ' 10 ; סימ' 21, עמ' 23) כדי לגלות כי העקרונות המשמשים שם הם בדיוק מה שדיברנו עליו. זכור, עם קו מכונן, אנחנו מתעלמים מחוסר התיאום בצד האנטנה ומפצים על חוסר התיאום בעזרת מתאם בצד הכניסה, על פני כל טווח התדרים של הגל. היג"ע יכול להיות גבוה עד כדי 10, 15, או אפילו 20 ל-1, אבל ההספק המוחזר עקב חוסר התיאום, מוחזר חזרה לכיוון האנטנה ע"י המתאם. כוונון לזרם מקסימלי בקו, פשוט מכונן את המופע של הגל המוחזר כדי להחזיר אותו בחזרה במורד הקו אל העומס במופע עם הגל המתקדם, שמגיע שוב אל האנטנה. לכן הפסדי החזרה עקב חוסר התיאום מבוטלים על ידי שבח החזרה של המתאם.

רבים מאיתנו, החובבים, יודעים מניסיון רב שנים, שקו של 600 אוהם, העשוי משני חוטים, (מס' 12, כ-3 ממ"ר) במרווח של 15 ס"מ, אמור לעבוד כל פעם. יש לנו תמריץ נמוך ללמוד איך הם עובדים – מדוע הם מעבירים הספק ביעילות עם הספק חוזר ויג"ע כה גבוה, או שכיוון המופע של הגל המוחזר, לשם השבתו לכיוון האנטנה במופע עם ההספק המתקדם, היא רק דרך אחת להסתכל על ביטול ההגב כפי שדרוש להשגת זרם מקסימלי בקו ובאנטנה. מכאן אי ההבנה שלנו של הדמיון בין השימוש בקו פתוח לכבל קואקס עם עומס לא מתואם. העיקרון זהה בשניהם רק ברמה שונה. במילים אחרות, ליישומים רבים, קואקס יכול לשמש בתור קו מכונן בדיוק באותו אופן של קו פתוח.

מערכות החלל שתוארו קודם הן דוגמאות.

באיור משמאל מוצגת ההשפעה של היג"ע על הפסדי קו ההזנה בתדר של 4 ו 7 מה"צ. הציר האנכי נותן את ההפסדים הנוספים בד"ב לעומת 100 רגל של RG-58/U, מתואם בצורה מושלמת לארכי יג"ע על הציר האופקי לכן, קואקס המחובר ישירות לאנטנה יכול לפעול עם חוסר תיאום ניכר. במקרה זה, גבולות היג"ע, בזמן הפעלה מחוץ לתדר התהודה של המקרין נקבעות לחלוטין ע"י הפסד ההספק עקב הניחות. פריצת מתח וחימום על ידי זרם יתר לא מהווים בעיה בגבולות ההספק המותר עם RG-213, RG-8, RG11/U ודומיהם, או עם RG-58 או RG-59/U בהספקים יותר נמוכים, מכיוון שהמתח במקסימום יג"ע הוא רק פי שורש היג"ע מערך המתח בתיאום. עכבת הכניסה לקו כבר לא תהיה עוד 50 אוהם, אלא תהיה תלויה בגודל אי-ההתאמה ובאורך הכבל. אנחנו יכולים לקבוע האם למאגר היציאה (Output tank) יש טווח תיאום עכבות מספיק (במכשירים מסוימים גבוה באופן מפתיע ובמכשירים



⁴ להרבה בלונים יש הגב זליגה גבוה, ולכן אינם יכולים לספק יחס אמיתי של אחד-לאחד. הגב זה נכנס בין האנטנה לקו ההזנה ויכול לשפר או לקלקל את התיאום, בתלות בגודל ובסימן של הזליגה ובהגב בהדקי האנטנה.

אחרים – כלום) לאפשר הזנה ישירה של הקו (סימ' 4 חלק III), או האם התקן תיאום המותקן בדרך (Transmatch או כל סוג אחר של מתאם, סימ' 9-12 וגם 22) יידרש לצורך צימוד מתאים בין הקו למשדר. (השימוש המגבלות שהוזכרו, כל התיאום הדרוש יכול להיות מועבר אחורה לאזור ההפעלה במקום לאלץ את התיאום להתבצע בנקודת הזנת האנטנה – בלי לסבול שום הפסד משמעותי בהספק המשדר. השימוש בטכניקה זו, יתכן שבאה בהפתעה לרבים, אינה סותרת אף תיאוריה. היא למעשה התגלמות העקרונות היסודיים של תורת הרשתות הקרויה תיאום צמוד, (סימ' 17 עמ' 243; 19 עמ' 38; 35 עמ' 49) שהיא הבסיס לכל פעולת מתאמי האנטנות, או Transmatch עם כבל קואקסיאלי או עם קו פתוח.

בבלון ובמסנן יטופל בהמשך. הנקודה החשובה שאנו מדגישים היא זו, במסגרת, לאחר לימוד היתרונות המושגים עם תיאום בכניסת הקו, או תיאום צימוד, בשתי דוגמאות החלליות שתוארו קודם, יהיה מעניין להשוות את התוצאות של שימוש באותן טכניקות במצבים אופייניים על 40 ו-80 מטר. תחום השמונים מטר הוא הגל הרחב ביותר במושגים של אחוזים מהתדר המרכזי ולכן סובל מהעלייה הגדולה ביותר ביג"ע במהלך התזוזה לקצות הגל. דיפול החתוך לתהוד בתדר 3.75 מה"ץ יפיק יג"ע של 1:5 הן ב-3.5 מה"ץ והן ב-4.0 מה"ץ. כפי שניתן לראות בציור 2, בכבל RG-8/U לא מוקצף, באורך 30 מטר (100 רגל), יג"ע של 1:5 יוסיף רק הפסד של 0.46 ד"ב להפסד המתואם של 0.32 ד"ב ב-4.0 מה"ץ. כלומר, כמעט עד קצות התחום, פחות מ-1/12 של יחידת S אובדת בגלל היג"ע, מידה בלתי ניתנת להבחנה. הדבר נותן יתר תוקף לעיקרון ומוכיח כי הפעלה על כל מלוא הפס של ה-80 מטר היא מעשית עם דיפול מוזן קואקס. אפילו עם היג"ע הגבוה בקצות הגל, אי אפשר להבחין בהבדל בניחות ממה שהיינו מקבלים אם היג"ע היה 1:1 מושלם! ב-40 מטר, עם דיפול מכוון לתהודה ב-7.150 מה"ץ משהו פגום אם היג"ע עובר 1:2.5 בקצות הגל. מציור 2, ניתן לראות כי יג"ע זה מוסיף רק 0.18 ד"ב להפסד המתואם, שב-7.0 מה"ץ הוא 0.44 ד"ב ל-30 מטר של כבל RG-8/U.

עומס ללא החזרת לעומת תיאום מצומד

יתכן שעכשיו זה זמן טוב לקורא לחשוב על הסתירה בין התיאוריה של עומס עם תיאום מושלם ללא החזרות ותיאורית התיאום המצומד. ניתן לראות בבירור מהיבט של הנדסה טובה כי, כל עוד היג"ע אינו עובר ערכים שמעבר להם אי אפשר להתפשר על הספק נוסף תמורת שיפור גמישות ההפעלה, הנוחיות והגדלת רוחב הפס המסופקת על ידי תיאום מצומד בכניסת הקו היא ברורה.

אבל הדבר מציג אתגר אמיתי ללמוד יותר אודות עכבות מרוכבות, מכיוון שעכבת הכניסה של הקו כוללת כעת רכיב התנגדותי וגם רכיב הגבי, אשר שניהם משתנים עם שינוי אורך הכבל או התדר בנוכחות החזרות. לפיכך, אנחנו צריכים להבין את העכבה המרוכבת כדי לבחור ולכוון מעגל תיאום מצומד נכון לשם צימוד המשדר לקו, או לכוון את המשדר ישירות לקו אם יש טווח תיאום מספיק. באופן מעשי, כל הבעיות שניתקלים בהן תוך נסיון להשיג צימוד מתאים או העמסה לקו עם החזרות, ניתנות לזיהוי כאי הבנה של היחסים בין אורך הקו והמופע היחסי של ההספק המתקדם והמוחזר היוצרים את העכבה המרוכבת בכניסת הקו.

דיון מפורט של מנגנוני החזרות וההתפשטות בקו הזנה יוצגו בהמשך סידרת המאמרים. יכללו אמצעים חדשים להסבר השתנות העכבות לאורך הקו בהתייחסות ישירה לגל המתקדם ולגל החוזר, שייפשוטו את ההבנה של מה קורה ומה לא קורה כאשר אורך הקו משתנה ואיך לבחור את האורך הנכון לתנאים נתונים. כמו כן יוסברו, היחס בין ניחות הקו ליג"ע המותר תוך שימוש בטכניקות של צימוד מצומד, יחד עם פרטים כיצד להשיג צימוד מתאים והעמסת המשדר אל קו שבו עכבת הכניסה השתנתה עקב החזרות.

המשך יבוא

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 2 – ספירה לאחור לקראת המסע מהאגדה למציאות

חלק 1 של הסדרה שהופיע בגיליונות הקודמים, התפרסם ב-QST באפריל 1973. בחלק ההוא ראינו כי כאשר ניחות הקו נמוך, השגת יג"ע נמוך הינה, יחסית, חסרת חשיבות להעברת הספק יעילה. הוצגו ארבעה צעדים לסייע בהבנת ההפעלה של קווים עם החזרות, והוצג המושג של תיאום העכבה המרוכבת בכניסת הקו, הנקרא תיאום מצומד, בנוכחות החזרות. הפיסקאות הבאות מציגות לעיון כמה מהעקרונות הבסיסיים הקשורים בהעברת הספק יעילה דרך כל קו המסתיים בחוסר תיאום.

תיאום מצומד קיים לאורך כל המערכת כאשר ההתנגדות הפנימית של המקור מושווית לרכיב ההתנגדותי של העכבה בכניסת הקו (או להיפך) וכל רכיבי ההיגב השיווי במקור ובכניסת הקו אופסו. במצב זה המערכת נמצאת בתהודה. כל ההספק האפשרי מהמקור נכנס לקו והחזרות מכל סיומת חסרת תיאום בסוף הקו או אי רציפויות בקו מקוזזות על ידי החזרה משלימה, המושגת על ידי הצגת חוסר תיאום לא התנגדותי בנקודת התיאום המצומד. אי התיאום הלא-התנגדותי הזה הוא כזה, שאם ימוקם במעגל לבדו, יגרום לאותו גודל של החזרות, או יג"ע, כמו חוסר התיאום בסוף הקו. התוצאה היא החזרה מדוייקת ומוחלטת של הגל המוחזר בחזרה לכיוון העומס. אנדרה אפורד (Andre Afford) מציג הדגמה מרשימה של הרעיון הזה (סימ' 39, עמ' 10-15). למרות שהדבר נשמע מסובך, כל מערכת התנאים מתמלאת באופן אוטומטי פשוט על ידי כיוון נכון של מעגל בקרי ההעמסה (Tune, Loading). אין זה משנה אם משדר בעל טווח תיאום מספיק מזין ישירות את הקו, או רשת תיאום חיצונית מחוברת במקרים שדרושה תוספת טווח. אם מחולל המקור מוחלף עכשיו על ידי עכבה פסיבית השווה לעכבה הפנימית⁵ שלו, אפשר לנתק את הקו בכל נקודה. וכאשר מסתכלים לשני הכיוונים אפשר לראות את הצמוד של העכבה נראה בכיוון ההפוך – $R + jX$ נראה בכיוון אחד, $R - jX$ בכיוון השני.

בניגוד לאמונה הרווחת, החקוקה עמוק, אין זה נכון כי כאשר משדר מספק הספק לקו עם החזרות, רואה הגל המוחזר החוזר למקור את התנגדות המקור כעומס התנגדותי והולך לאיבוד בצורת חום. זה יכול לקרות תחת תנאים מיוחדים של שידור בצורת פולסים. למשל, אם המשדר מכובה לאחר שידור פולס בודד לתוך קו תוך שמירת ההתנגדות הפנימית על פני הקו, הדופק המוחזר אכן ייספג. אבל אם מחולל עם תיאום מצומד מספק בפועל הספק כאשר הגל המוחזר חוזר, הגל החוזר עובר החזרה מוחלטת בנקודת התיאום המצומד ונשמר במלואו, כי הוא לעולם לא רואה את ההתנגדות של המחולל כעומס סיומת התנגדותי. זאת מכיוון שהמתחים והזרמים של המקור ושל הגל המוחזר, חופפים, או מתחברים בנקודת התיאום, ממש כאילו ההספק המוחזר מסופק על ידי מחולל נפרד בטור למקור. ומכיוון שמתח המקור בדרך כלל גדול מהמתח המוחזר, סכום

⁵ כדי לספק את תנאי הצימוד כאשר המחולל הוא מגבר סוג B או C, העכבה המחליפה את המחולל צריכה להיעשות שווה לעכבה המיטבית של העומס שלו, העומס שלתוכו מספק המחולל את מירב ההספק למעגל התהודה המועמס. עבור מגבר סוג C הוא בקירוב פעמיים העכבה הפנימית שלו. הסיבה להבדל זה יכולה להיות מוערכת יותר, אם לוקחים בחשבון שלמחולל רשת קלאסי יש גבול נצילות מירבי של 50 אחוזים, מכיוון שהוא מספק את מירב ההספק האפשרי כאשר עכבת העומס שווה לעכבה הפנימית. אבל עכבת ז"ח הפנימית האפקטיבית של מגבר סוג C היא בערך מחצית מעכבת העומס האופטימלית שלו, כי פולסי הזרם המעוררים את המאגר המועמס שלו הם בעלי ערך שיא גבוה ונמשכים זמן קצר, בעוד המתח האנודי הרגעי בזמן זרימת הזרם הוא מאוד נמוך. כתוצאה מכך, מעט הספק מתבזבז במחולל ויותר נמסר לעומס, וכך מאפשר לו לפעול בנצילות של 75 אחוזים ויותר.

המתחים מפיק זרימת זרם בכיוון קדימה⁶. ההספק המוחזר מתחבר להספק מהמקור, ויוצרים שבח החזרה המפצה על הפסדי החזרה שסופגים עקב הסימטת הלא מתואמת.

הפסדי קו

כל ההספק המוחזר המגיע למקור, מוחזר לכיוון העומס, כחלק מהגל המתקדם. אובדן ההספק היחיד של הגל המוחזר הוא עקב הניחות, במהלך החזרה לכיוון המקור ובמהלך החזרה לעומס. ככל שהניחות גדול יותר, פחות הספק מגיע למקור ומתווסף להספק המתקדם. לכן, ככל שניחות הקו נמוך יותר, אפשר להרשות יג"ע גבוה יותר עבור הפסדים הנגרמים עקב היג"ע. בקו חסר הפסדים לא אובד כל הספק, עבור כל יג"ע גבוה ככל שיהיה, מכיוון שהכול מגיע בסופו של דבר לעומס. זאת גם הסיבה שקו פתוח מתפקד בעילות כקו מתואם עם כל חוסר תיאום סביר – הניחות שלו הוא כמעט חסר משמעות. הניחות (שהוא גבוה יותר בקואקס) מאלץ גבול תחתון לחוסר התיאום ואפשר שידרוש חישוב של קנס הניחות עבור יג"ע נתון. הן הניחות והן היג"ע חייבים להיות די גבוהים כדי לגרום לתוספת הפסד משמעותית מעל ומעבר הניחות של הקו המתואם⁷.

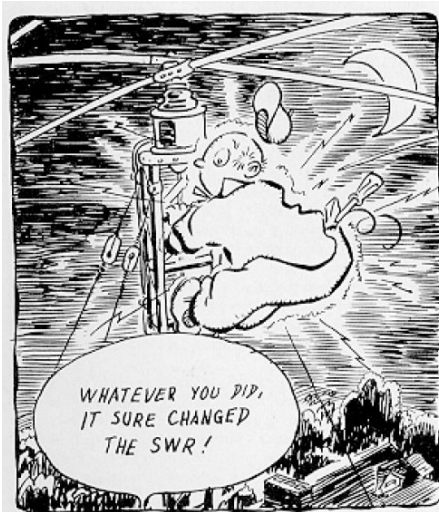
לקואקס יש יותר הפסדי ת"ר מאשר קו פתוח בת"ג בעיקר עקב העכבה הנמוכה שלו, הגורמת לזרימת זרם גבוה יותר, במתח נמוך יותר, עבור אותו הספק. התוצאה היא הפסדי I^2R גבוהים למוליך באותו גודל אפקטיבי. (בקווי מתח גבוה של רשת החשמל מקטינים את הפסדי I^2R על ידי הגדלת המתח והקטנת הזרם). תופעת הקרום מגדילה את ההפסדים עם עליית התדר עקב הקטנת הגודל האפקטיבי של המוליך, אבל רק ב-VHF ומעלה יתרמו ההפסדים הדיאלקטריים תרומה משמעותית לגורם הניחות. מכאן מובן מדוע RG-8 רחב פס) מאשר RG-58 עבור אותו קנס של ניחות. ועבור כל כבל, ככל שיהיה קצר יותר, פחות ניחות יתווסף עקב יג"ע נתון.

צעד חמישי בשיפור הבנתנו את בעיית ההספק המוחזר הוא להסתכל על המצב באופן אובייקטיבי, ולשאל את עצמנו, "האם נפילתי טרף ללימוד שגוי? האם אני יכול לזהות את המידע השגוי כאשר אני שומע שדנים בו? האם אני מכיר את העקרונות מספיק טוב כך שאוכל לשכנע אחרים בגרסה הנכונה, אם תבוא ההזדמנות?" בהמשך יבואו מספר הצהרות רלוונטיות קצרות היכולות לשמש כחומר למבחן עצמי. הן מדגישות ומסכמות מושגים רבים בקשר להחזרות שידוע כי יש לגביהן בלבול בקרב חובבי הרדיו. כל ההצהרות הללו הינן **אמת**. למען הקיצור, הן לא נועדו להוות הסבר מלא, אבל בהמשכים הבאים של סדרת המאמרים יופיע מספיק חומר כדי להגיע להבנה מלאה של כל נקודה, או שימצא באחד הסימוכין המופיעים בכיבילוגרפיה שצורפה לחלק 1. תמיכה לרובן ניתן למצוא בספר האנטנות של ARRL.

⁶ עם תיאום מצומד כל ההיגב מתבטל, ומשאיר את קוטביות המתח המוחזר, או, בחיזוק בדיוק באותה פאזה, או מפחית בהיפוך פאזה את מתח המקור. במקרה של הפחתה, ההסבר שבטקסט הינו מספיק, כי מקור של מתח קטן, לעולם לא יגרום להספק חוזר לזרום דרך מקור מתח גדול יותר. בין אם חיזוק או הפחתה, אם כיוון ההעמסה מותר את עכבת המקור נמוכה מעכבת הכניסה לקו, עדיין הגל החוזר מוחזר במלואו בחזרה אבל המחולל נמצא בת צימוד ולא מספק את מלוא ההספק האפשרי. אבל כל כיוון העמסה או שגיאת תיאום שמשאירה את עכבת הכניסה לקו נמוכה מעכבת המחולל יוצרת צימוד יתר, או העמסת יתר, וזה, לא ההספק המוחזר, הוא הגורם להתחממות המחולל וירידה בנצילות.

⁷ הוראות מדויקות (עם דוגמאות) לחישוב תוספת ההפסד עקב יג"ע עבור ערכי ניחות קו נתון ויג"ע נתונים, יוצגו בהמשך. אפשר למצוא את הנתונים בחלק 1, ציור 1 שהגיע מהפרקים אודות קווי תמסורת מתוך ספר האנטנות של ARRL ומההנדבוק של ARRL, או מסימוכין 33 עמ' 573 ברשימת הביבילוגרפיה.

- (1) הספק מוחזר איננו מייצג אובדן הספק מלבד הגדלת הניחות לעומת הניחות של קו מתואם. בקו חסר הפסדים לא אובד כל הספק עקב ההחזרה. רק כאשר הניחות של קו פתוח וגם היג"ע הם גבוהים יוצר הפסד הספק ניכר עקב ההחזרות. הפסד הספק מוחזר הוא בדרך כלל חסר משמעות ב-HF. עם זאת, ב-VHF הדבר נעשה משמעותי וב-UHF הוא בעל חשיבות רבה.
- (2) ההספק המוחזר אינו זורם חזרה לתוך המשדר ואינו גורם להתחממותו או נזקים שונים. נזק שנגרם לכאורה על ידי ההחזרה נגרם למעשה על ידי כיוון לקוי של צימוד היציאה ולא עקב היג"ע. חימום יתר של השפופרות הסופיות נגרם או על ידי צימוד יתר או על ידי העמסה ריאקטיבית (חוסר תיאום) או שניהם. חימום סליל המאגר וניצוצות נגרמים מעלית גורם הטיב (Q) הנגרמת על ידי תת צימוד. בעזרת מספר פעולות ניתן להגיע לצימוד יציאה מתאים (מאופיין על ידי שפל תהודה נורמלי בזרם האנודה ברמת העמסה נורמלית) לא משנה כמה גבוה הוא היג"ע. המשדר איננו "רואה" שום יג"ע – רק את העכבה כתוצאה מהיג"ע. העכבות ניתנות לתיאום ללא התייחסות ליג"ע. זאת היא אחת מנקודות הבילבול החשובות ביותר בנושא.
- (3) כל ניסיון להקטין יג"ע של 1:2 בכל כבל קואקס יהיה בזבוז מוחלט מנקודת המבט של הגדלת העברת הספק משמעותית (ראה ציור 1, חלק 1)
- (4) יג"ע נמוך איננו ערובה למערכת אנטנה מאיכות טובה או שהיא עובדת ביעילות. נהפוך הוא, יג"ע נמוך מהרגיל, המוצג על פני טווח תדרים רחב על ידי דיפול פשוטה או אנטנה אנכית מעל קרקע, מרמז אודות בעיה בצורת התנגדות הפסדים בלתי רצויה.
- (5) הרכיב המקריין של מערכת אנטנה לא חייב להיות בתדר תהודה עצמית לשם קבלת זרם תהודה מירבי, קו ההזנה לא חייב להיות בכל אורך מסוים, ואי תיאום משמעותי בנקודת החיבור בין האנטנה לקו לא תמנע מהמקריין לספוג את כל ההספק הממשי הזמין באותה נקודה. (סימ' 3, חלק 3, עמ' 10, 24).
- (6) אם רשת תיאום (transmatch) מבטלת את כל ההיגב המתפתח על ידי מקריין באורך לא תהודתי וקו הזנה באורך אקראי, שאיננו מתואם לאנטנה בנקודת החיבור, מערכת האנטנה נמצאת בתהודה, וכל ההספק הממשי בנקודת ההזנה יספג על ידי המקריין.
- (7) רוב המגדלים המקרינים המשמשים בתחנת שידור סטנדרטית בגל שידורי האת"ן (AM), מ-450 עד 1600 קה"ץ) הם בגובה שאיננו אורך תהודתי בתדר העבודה.
- (8) יג"ע בקו בין האנטנה ורשת התיאום נקבע דק ע"י תנאי התיאום בעומס, ואיננו משתנה או "מוקטן" על ידי התקן התיאום. יג"ע נמוך" המושג על ידי ההתקן מראה רק את חוסר התיאום הנותר בין עכבת הכניסה של התקן התיאום ועכבת הקו מהמשדר.
- (9) כיוון רשת התיאום לזרם מקסימלי בקו יוצר סיומת ראי מושלמת עבור הגל המוחזר, הגורמת לו להיות מוחזר חזרה במלואו בהגיעו לכניסה. מעגל הכוון מספק את ההיגב הדרוש לביטול ההיגב הנגדי והשווה בגודלו, הנוצר עקב הבדלי המשרעת והפאזה בין גל המקור והגל המוחזר, בנקודת הכניסה. דבר זה גורם לגל המוחזר להתחבר כמופע (In phase) לגל המקור וליצור את הגל המתקדם שהוא סכומם של הגל המקור והגל המוחזר.
- (10) החזרה חוזרת מוחלטת Total re-) reflection של ההספק החוזר בכניסת הקו היא הסיבה שהוא לא מתבזבז במשדר, ומדוע הוא נשמר ולא אובד.



The SWR on the line is determined only by the matching conditions at the load.

מבט אחר על החזרות (המשך)

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגם: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 2 – ספירה לאחור לקראת המסע מהאגדה למציאות (המשך)

- (1) עם "מתאם אנטנה" טוב או Transmatch וקו הזנה פתוח הבנוי היטב, דיפול מוזן במרכז באורך 39 מטר (130 רגל) לא יקרין באופן משמעותי יותר טוב (הערת המתרגם: עקומות הקרינה עשויות להיות שונות) מאשר דיפול באורך 24 מטר (80 רגל) המוזנת באותו הספק מהמסדר (סימ' 10 ; 21 ; 3, חלק 3, עמ' 20 ; 7 עמ' 50 ו-126).
- (2) דיפול החתוך לתהודה עצמית ב- 3.75 מה"ץ ומוזן ע"י קואקס RG-8/U או RG-11/U לא יקרין משמעותית יותר על 3.75 מה"ץ מאשר על 4.0 מה"ץ עם כל אורך של המזין עד 45 או 60 מטר.
- (3) עם הדיפול ל- 3.75 מה"ץ היג"ע יעלה לסביבת 5.0 ל- 1 הן ב- 3.5 מה"ץ והן ב- 4.0 מה"ץ, תוך ניצול הקואקס כקו הזנה מכוון, אבל עם הפסד זניח בהספק המוקרן על פני כל גל ה- 80 מטר.
- (4) תוך שימוש ב transmatch או ברשת-L בכניסת הקו, ניתן להשיג תיאום נאה בין המסדר לקו ההזנה מהקואקס המכוון על פני כל הגל עם כל אורך אקראי של הקואקס.
- (5) מנקודת המבט של הפסדי קו עקב יג"ע הנגרמים עקב שינויים באיכות תיאום העכבות בין הקו והאנטנה, לשינוי גובה הדיפול מעל האדמה והנמכת הקצוות של אנטנת דיפול אופקית ובכך ליצור inverted-V תהיה השפעה זניחה על כמות ההספק המגיעה אליה מהמסדר.
- (6) RG-8/U כקו מתואם ב- 4.0 מה"ץ, מחזיק 700 וואט גל רציף, בתחום הערכים המותרים, ביג"ע של 1 : 5. ביחס פעולה (duty cycle) של SSB זה נמוך בהרבה מהערכים המותרים ב- 2 קילו וואט PEP. באורך של 30 מטר, הניחות הכולל (ביג"ע = 5) הוא רק 0.8 ד"ב (0.46 ד"ב עקב היג"ע). דבר שהוא זניח במושגים של עוצמת קליטת אות.
- (7) אם אורך הקו הוא קריטי לשם קבלת תנאי תיאום מסויימים, אפשר לקבל אותה עכבת כניסה עם כל אורך של קו, קצר או ארוך, ע"י הוספת רשת L פשוטה המורכבת משני רכיבים בלבד : שני קבלים, שני סלילים או אחד מכל סוג, לפי השינוי בעכבה הנדרש ממנה. אמירה זו תקפה גם לקואקס מלופף בהתקנה ניידת (סימ' 19 עמ' 118-128 ; 24 ; 30, עמ' 48 ; 13).
- (8) יג"ע גבוה בקו שידור קואקסיאלי הנגרם ע"י חוסר תיאום חמור לא ייצר זרמי אנטנה בקו, ולא יגרם לקו להקרין (סימ' 32 ; 2, עמ' 101).
- (9) יג"ע גבוה בקו פתוח ב- ת"ג הנגרם ע"י חוסר תיאום חמור לא ייצר זרמי אנטנה בקו, ולא יגרם לקו להקרין, אם זרמי ההזנה מאוזנים בכל חוט, ואם המרווח קטן יחסית לאורך הגל בו פועלים (זה נכון גם בתג"מ אם נמנעים מכיפופים חדים). (סימ' 2, עמ' 101, 106).
- (10) גם קואקס וגם קו פתוח עלולים להקרין, אמנם לא ברמות משמעותיות, על ידי שידור מחדש של האנרגיה עקב מיקום לא סימטרי יחסית לאנטנה. האנרגיה המצומדת גורמת זרמי אנטנה הזורמים על הצד החיצוני של מוליך מעטפת הקואקס, או בצורת זרמים הזורמים באותו מופע בחוטי הקו הפתוח. אבל למצב זה אין כל קשר לגובה היג"ע בקו באף אחד מהמקרים (סימ' 2, עמ' 101, 106).
- (11) מד יג"ע לא חייב להיות מותקן בצומת החיבור בין קו ההזנה והאנטנה כדי לקבל מדידה יותר מדויקת. בגבולות הדייק העצמי של המכשיר, המודד ימדוד את היג"ע בכל מקום שיחובר לאורך הקו. היג"ע בכל מקום אחר בקו ניתן לחישוב ע"י חישוב פשוט הכולל רק את היג"ע בנקודת המדידה, ניחות הקו ליחידת אורך (יבוא בהמשך הסידרה), והמרחק מנקודת המדידה אל הנקודה בה דרוש היג"ע.
- (12) היג"ע בנקודת ההזנה לא ניתן לשינוי או לבקרה בכל צורה מעשית על ידי שינוי אורך הקו (סימ' 7, עמ' 51).
- (13) אם קריאת היג"ע משתנה כאשר מזיזים את הגשר מספר מטרים לאורך הקו בכיוון זה או אחר, זה מראה כי זרמי "אנטנה" זורמים במוליך החיצוני של הקואקס, או שציוד המדידה אינו אמין, או

- שניהם, אבל זה לא בגלל שהיג"ע משתנה עם שינוי אורך הקו. כותבים אחדים מתעקשים שמד היג"ע חייב להיות מותקן במרווחים של חצי אורך גל מהעומס כדי לקבל קריאה נכונה. דבר זה אינו נכון. כל הקריאות אינן תקפות אם הן משתנות משמעותית לאורך הקו, אפילו אם הן חוזרות על עצמן במרווחים של חצי אורך גל (סימ' 2, עמ' 101, 106 ו-132).
- 14) כל היגב המתוסף לעומס הנמצא כבר בתהודה (התנגדות) בכל ערך לצורך קיזוז להקטנת ההחזרות בקו המזין את העומס, יגדיל, לחילופין את ההחזרות ויקלקל את המצב. מסיבה זו, בניגוד למה שמלמדים אחדים מן הכותבים, היג"ע הנמוך ביותר בקו ההזנה מתרחש בתהודה עצמית של האלמנט המקריין שהוא מזין, ללא כל קשר לאורך הקו המזין. כל מדידה הסותרת זאת מצביעה שצירוד המדידה פגום, או טכניקת המדידה עצמה (או שני הדברים).
- 15) בסוגים אחדים של אנטנת דיפול, כגון חוט דק, מקופלת, מניפה, שרוול, מלכודת או קואקסיאלית, אף אחת לא תקריין יותר שדה אלקטרומגנטי מהאחרת, בתנאי שלכל אחת יש הפסדים אהמים וניחים והן מוזנות באותה כמות של הספק (סימ' 3, חלק 3).
- 16) אם קואקס בגודל של לפחות RG-8/U משמש בהתקנה ניידת (מ-80 עד 10 מטר), כל תיאום הדרוש להעמסת המשדר יכול להיעשות בכניסת הכבל ללא הפסד משמעותי בהשוואה לתיאום בהדקי האנטנה, תוך קבלת שיפור ברוחב טווח ההפעלה.
- 17) עם אנטנות שוט לקשר נייד באורך שווה עם העמסה אמצעית וללא סידורי תיאום בהדקי הכניסה, תושג יעילות שידור מירבית בדגמים בעלי ההתנגדות הנמוכה ביותר הנמדדת בהדקים (יג"ע בתהודה הגבוהה ביותר, דגם לדגם). מודלים בעלי היג"ע הנמוך מבזבזים אנרגיה בסליל ההעמסה, עקב ערכים נמוכים של מקדם הטיב (Q) של הסליל או עודף קיבול מפולג בסליל, או שניהם.

כמו שצוין לעיל, כל ההכרזות הללו הינן אמת. דוגמאות אלה מתרכזות סביב הפעלה על 80 מטר כי רוחב הפס ואורך הדיפול בגל זה מציינים את בעיות היג"ע הגדולות ביותר. מכל גלי החובבים, ה-80 מטר הוא בעל רוחב הפס הגדול ביותר, 13.3 אחוזים מהתדר המרכזי, בהשוואה ל-4.2 אחוזים על 40 מטר, 2.5 אחוזים על 20 מטר, 2.1 אחוזים על 15 מטר ו-5.9 על 10 מטר. עם אורך הגל הארוך ביותר (מלבד גל 160 מטר, כמובן), ה-80 מטר מציג את הבעיה הגדולה ביותר יחסית להתקנה הפיסית של מערכת הקרינה בנדל"ן הקיים. בנכסים מסויימים לא תתאפשר אנטנה באורך חצי אורך גל על ה-80 מטר. לכן הדוגמאות הנ"ל אמורות להיות בעלות עניין מיוחד לחברים החפצים לעבוד על ה-80 מטר אך נאלצים להשתמש באנטנה קצרה. מכיוון שבעיית רוחב הפס ואורך האנטנה הן למעשה אותה בעיה, לדוגמאות בקשר ל-80 מטר יש ערך מעשי מירבי. אבל ללא קשר באיזה גל בחרנו, העקרונות הינם זהים. הלקחים המומלצים מהניסיון המעשי ברמת ה-80 מטר, תקפים בגלי הת"ג הגבוהים יותר, בהם הפסדי הקו גדלים בעוד אחוז רוחבו של הפס קטן. המשמעות המתבקשת היא כי ערכי יג"ע מירבי נמוכים יושגו תוך שינוי תדר ממרכז התכנון אל קצות הגל.

אודות סדרת מאמרים זו

הרעיון המקורי בכתיבת מאמרים אלה נולד כאשר המחבר האזין והשתתף בדיונים בנוגע לחוסר תיאום והחזרות. במהרה התברר כי אם עשרים ושבע האמיתות שלעיל היו נמצאות במכתן נכון-לא נכון, חובבים רבים היו מסמנים אותן כ"לא נכון". דיונים אלה גילו גם כי ניסויים רבים נערכו בתחום זה שעבורם התוצאות נועדו מראש להיכשל, כי עורך הניסוי לא הבין את העקרונות. במקרים רבים, הניסוי לא היה ער הן לכישלון המוחלט של מאמציו ולכך שכישלון התוצאות הוא פועל יוצא ישיר מחוסר ההבנה שלו. ואז, הופעת מאמר מאת Drumeller (סימ' 14) הניעה את הרצון לעשות דבר מה מועיל בקשר לבעיה. למרות שהתוצאות של אותו ניסוי תאמו עם מה שהכותב לימד, ההקדמה של Drumeller רמזה כי בנושא חוסר התיאום, ידוע מעט מאוד. דבר זה אינו נכון, אלא אם הוא התייחס במפורש אלינו החובבים. הצירוד המוגבל הזמין לחובב הרדיו כדי לעשות מדידות מלאות ומדוייקות בתחום הת"ר, בהשוואה לז"י, ז"ח בתדר נמוך ותדרי שמע, מסביר את מגבלות ואיכות הניסיונות שלנו. אבל אין זה משחרר אותנו מהצורך לדעת קצת מהעקרונות הבסיסיים של קווי תמסורת – שהוא בעצם בסיס הידע לכל היסודות של כל מה שצריך, כך שנוכל לנתח נכונה ולהעריך באופן הגיוני את מגבלות נתוני המדידות שהשגנו. מאמצי הניסיונות שלנו יכולים להיות יותר מועילים אם אנחנו יכולים לדמיין את תמונת העולם האמיתית של המתחמים, הזרמים והשדות ויחסי הגומלין שלהם עם הקו. כך, תכנן המחבר בתחילה לערוך ולפרסם ביביליוגרפיה של סימוכין

מדויקים אודות הנושא, סימוכין שיהיו זמינים לחובכים. אבל באחת הפגישות החודשיות של Colts Neck, ידיד טוב ועמית, John Marsh, W3ZF המנוח, שכנע את המחבר שרשימת סימוכין בלבד תקבל רק תשומת לב קטנה. W3ZF המשיך להפיח התלהבות אמיתית לכתובת מאמר מקיף שיהיה לא רק השלמה ואיחוד של הסימוכין, אלא גם ידגיש את הבעיה ויעורר את העניין ללמוד את הנושא. הוא חש בחוזה כי גישה זו תהווה תרומה משתלמת יותר לחובכות הרדיו.

הצעתו של ג'והן התקבלה, וככל שהעבודה התקדמה הוברר כי סימוכין נוספים ממקורות הנדסה מקצועיים יהיו בעלי ערך במתן גישה ללימוד מעמיק יותר עבור החובכים היותר מתקדמים, ואספקת מקורות מהימנים לאימות הנקודות שהיו מעורפלות על ידי המחלוקת בין החובכים. במהלך העיון במספר רב של סימוכין לצורך הכנת כתב היד, התגלה היבט מעניין ובעל ערך: *ספר האנטנות של ARRL* כבר איחד את יתר הסימוכין, ועוד, מכיוון שבכרך זמין אחד, הוא מכיל חומר מספיק המוצג היטב, בכל נקודה חשובה לצורכי החובב בנוגע לאנטנות וקווי תמסורת, כולל העקרונות הבסיסיים! עבור החובב שאין לו גישה למקורות אחרים, אבל יכול לרכוש רק ספר אחד, זהו *ספר האנטנות של ARRL*! כל חובב המזין ת"ר לתוך אנטנה חייב להחזיק עותק - - ולקרוא בו! תתפלאו לדעת לכמה מהנדסי אנטנות מקצועיים יש עותק בספרייתם הפרטית.

מלבד *ספר האנטנות של ARRL*, הפרטים של התנהגות ההחזרות בקטע כבל נראה כדבר מעורפל בספרות החובכים, לכן ההתחלה של החלק הבא בסידרה זו יציג טיפול מפורט של פעילות הגומלין של השדות, הזרמים והמתחים בקו. אחריו תובא הצגה וקטורית חדשה תוך שימוש בתרשים סמיט (Smith chart)⁵. ההדגמה מדגישה את התמונה הפיסיקלית של התפתחות גלים עומדים, עכבת כניסה, ויתר הפעילות לאורך הקו, ומעצבת בסיס להוכחה חשבונית לנכונות ההסבר המוצג. הרעיון של שני מחוללים (סימ' 17, עמ' 133) משמש כבסיס לקביעת עכבת הכניסה לקו, כי רעיון זה מאפשר השוואה ישירה של תצוגת הוקטורים של הגל המתקדם והגל המוחזר בעזרת מעגל תמורה טורי פשוט. כך מוקטנת בעיית ההחזרה בקו לחישובי חוק אוהם פשוטים, ובד בבד משיגים הוכחה מובנית לתקפות השיטה. גישה זו קלה לתפיסה, קל לזכור אותה, ומוכרת ככלי רב עוצמה לסייע לחובב לנתח כל מצב של קו הזנה מנקודת המבט של תיאום המשרד ל**כניסת הקו** עבור כל מצב יג"ע. אני משתמש בחשבון פשוט, אבל הוא אינו קצר ודורש מעט לימוד – אין קיצורי דרך להבנת ההחזרות בקו תמסורת. לכל אלה שאינם בקיאים בשימוש בתרשימי סמיט הדבר קל ללימוד (סימ' 25, חלק 1). התרשים יתגלה ככלי בעל ערך. יש לו מערכי מעגלים נפרדים להתנגדות והגב. כדי לשרטט עכבה מרוכבת $R + jX$, כל מה שצריך הוא למצוא את הנקודה בה המעגל המתאים ל- R חותך את המעגל המתאים ל- jX . ידיעת תרשים סמיט תתגלה שימושית למטרות הבנה ותיכנון מעגלי תיאום. סימוכין מעניינים נוספים כוללים ברשימת הביבליוגרפיה.

המחבר מבקש להביע תודות לידידים רבים שהציעו הצעות ובקורות, במיוחד ל- Bob Allen, W8IO; ול- Mr. Phillip H. Ken MacLean, W2KKM, מפקח ההנדסה של המחבר במשך מספר שנים; ולעמיתו Mr. Phillip H. Smith, ex-1ANB, שהרשה באדיבותו להשתמש בתרשימי סמיט בהסברים שיבואו.

⁵ תרשימי סמיט (Smith chart) ניתן להשיג ברוב חנות הספרים האוניברסיטאיות (המתרגם: היום ניתן להוריד מהרשת). אפשר גם להזמין משלוח בדואר תמורת \$2.50 ל-50 מ:

Phillip H. Smith, Analog Instruments Co.,
P.O.Box 808,
New Providence, NJ 07974.

For 8 1/2 x clinch paper charts with normalized coordinates,
request Form 82-BSPR.

NOTE: Smith charts with 50-ohm coordinates
(Form 5301- 7569) are available at the same
price from General Radio Co., West Concord,
MA 01781.

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 3 – ללכת במעגלים כדי להגיע לעניין:
מנגנון ההחזרות הבסיסי

מנגנון ההחזרות הבסיסי

באופן כללי מובן כי גודל ההחזרה, הנגרמת מחוסר תיאום של סיומת הקו, נקבע על ידי דרגת חוסר התיאום, ומבוטא כיחס של המתח או הזרם המוחזרים ביחס לגודלו של הגל המתקדם. במילים אחרות: כמה מהספק הגל המתקדם אינו נספג על ידי העומס⁹. מקדם ההחזרה¹⁰ $\bar{\rho}$ (rho), נקבע באופן כמותי מתוך עכבות הקו והעומס על ידי הביטוי:

$$\bar{\rho} = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C} \quad \text{מש' 1}$$

כאשר Z_L היא העכבה המורכבת של העומס, $R + jX$, ו- Z_C היא העכבה האופיינית של קו התמסורת. ניתן לראות מיד כי $\rho = 0$ (אין החזרות) כאשר $Z_L = Z_C$ אבל, העומס חייב להיות התנגדותי לחלוטין ($R + j0$) לקבלת 0 החזרות, כי אנחנו דנים רק בקווי תמסורת חסרי הפסדים, או בעלי הפסדים נמוכים עם עכבה אופיינית בעלת אופי התנגדותי טהור. לעומת גודל ההחזרה, יתכן כי, מעניקים פחות תשומת לב למופע ההחזרה, אשר נקבע על ידי אופי אי-התיאום, ומבטא את הזוית ביחס למופע של הגל המתקדם. גודל היחס ρ , וערך המופע היחסי θ (Theta), ביחד, יוצרים את מקדם ההחזרה המרוכב:

$$\bar{\rho} = \rho \angle \theta$$

ביטוי זה מבטא כל מה שאנו צריכים לדעת על ההחזרה כדי להשתמש בה לצורך הבנת ההתפשטות בקו תמסורת וטכניקות תיאום. בהמשך יוסבר כיצד להשתמש במקדם ההחזרה.

נתק (עכבה אין-סופית), קצר (עכבה אפס) ועומס הגבי טהור, אינם יכולים לספוג שום הספק מהגל המתקדם וגורמים החזרה מוחלטת של גל המתח המתקדם וגל הזרם המתקדם. לכן, יהיה גודל מקדם ההחזרה ρ , בעומסים כאלה שווה ליחידה (1.0) למתח ולזרם. להלן יוצגו השלבים בהם נוצרת ההחזרה בקוים נמוכי ניות, הן בקוים קואקסיאליים והן בקוים פתוחים. הגל האלקטרומגנטי המתקדם, כאשר הוא יוצא מן המחולל בדרכו למורד הקו, רואה את העכבה האופיינית של הקו כעומס התנגדותי Z_C . מחצית האנרגיה מאוכסנת בשדה המגנטי עקב הזרם המתקדם והמחצית השנייה מאוכסנת בשדה החשמלי עקב המתח המתקדם. המתח והזרם נעים במופע זה עם זה עקב Z_C ההתנגדותי. כשהגל מגיע לקצה פתוח (נתק) השדה המגנטי קורס, כי הזרם נופל לאפס. השינוי בשדה המגנטי משרה שדה חשמלי, בעל אנרגיה השווה לזו של השדה המגנטי המקורי. השדה המגנטי הזה מסתכם באותו מופע לשדה החשמלי הקיים. כתוצאה מתקבלת

⁹הערת העורך: המחבר אינו מתייחס ליחס גלים עומדים שיכול להמדד על ידי מד יג"ע רגיל. לחילופין, ההתייחסות היא לגלים נעים. ההבדל יידון בהמשך הטקסט.

¹⁰הסימולים נקבעו לפי תקן 10.9, 1953 (American Standards Association) ASA Y10.9. לפני כניסת התקן לתוקף, נהגו להשתמש ב- Γ ו- κ למקדמי ההחזרה, בעוד ρ שימש בדרך כלל לסימון יחס הגלים העומדים. בעת עיון בספרות, הקורא צריך לשים לב לא לבלבל בין הסימולים ששימשו לפני כניסת התקן לאילור שאחרי אימוץ התקן.

עלייה מתאימה במתח בנקודת הקצה הפתוח לכפליים גל המתח המתקדם. (כאן מתפתח גל עומד, בגלל שעכשיו, יש זרם מזערי ומתח מירבי בהדקי הקו הפתוח, כאשר רגע קודם, המתח והזרם היו קבועים לאורך כל הקו). העלייה במתח יוצרת עכשיו גל מתח מוחזר הנע בכיוון הפוך, כאילו שוגר על ידי מחולל נפרד בנקודת הקצה הפתוח¹¹. מכיוון ששום אנרגיה איננה נספגת בעומס שהוא נתק (בקצה קו פתוח), הגל המוחזר יהיה באותו גודל כמו הגל המתקדם המקורי. כאשר השדה החשמלי מתחיל בתנועתו בכיוון חזרה הוא יוצר שדה מגנטי במופע הפוך למקורי. ושוב, האנרגיה מתחלקת שווה בשווה בין שני השדות. השדה המגנטי החדש גורם לזרם להיכנות שוב באותו גודל כמו מקודם, אבל בקוטביות הפוכה, כדי להיות משוגר לתוך הקו בתור גל הזרם המוחזר. (סימ' 17 עמ' 139, סימ' 19 עמ' 4, סימ' 35 עמ' 21 סימ' 43). המתח הכולל (או הזרם) בעומס בכל רגע הוא הסכום של המתח (או הזרם) של הגל המתקדם והגל המוחזר. מכיוון ששני הזרמים מסתכמים לאפס בנקודת העומס הפתוח, מובטחת יצירת גל זרם מוחזר בקוטביות הפוכה. גל המתח המוחזר במופע נוצר באופן דומה מכיוון שסכום שני המתחים בנקודת העומס הוא כפול מהמתח המתקדם. לכן, זווית המופע, θ , של מקדמי ההחזרה בעומס קו פתוח הן 0 מעלות עבור המתח ו-180 מעלות עבור הזרם.

כאשר עכבת העומס היא קצר יהיה תהליך יצירת הגל המוחזר דומה לזה של המקרה של קו פתוח, פרט לכך שתפקידי השדות החשמלי והמגנטי מתחלפים והקוטביות של רכיבי הגל המוחזר הפוכה. הדבר צפוי, כאשר נזכור שבעוד שהזרם מתאפס בקצה קו פתוח, המתח חייב להתאפס בקצה קו מקוצר. כדי שהמתח יתאפס צריכים גל המתח המתקדם וגל המתח המוחזר לבטל אחד את השני בנקודת העומס, והדבר מוודא שקוטביות הגל המוחזר היא הפוכה. הזרמים המתאימים מתחברים כדי להכפיל את הערך המתקדם, כמו שקורה למתח בקו פתוח. זווית המופע, θ , של מקדמי ההחזרה בעומס מקוצר הם לכן 180 מעלות עבור המתח ו-0 מעלות עבור הזרם. כאשר עכבת העומס היא קיבולית טהורה תהיה התוצאה שוות ערך לתוספת אורך של קו פתוח, ועומס השראותי טהור הינו שווה ערך לתוספת אורך של קו מקוצר.

כאשר עכבת העומס מכילה התנגדות, ההחזרה תיווצר באותו אופן כמו בקו פתוח או מקוצר, אבל באופן חלקי ולא מלא, כאשר כמות ההחזרה תלויה בכמות ההספק הנספג בהתנגדות. שוב נוצר השדה המוחזר עקב השינוי בשדות המגנטי והחשמלי בנקודת חוסר התיאום, הנגרמים עקב השינויים במתח וזרם כאשר הגל המתקדם נפגש בשינוי של תנאי העומס. לפיכך מקדם ההחזרה, ρ , תלוי בהפרש בין מתח הגל המתקדם בקו והמתח הנמדד על פני העומס.

כאשר העומס הוא התנגדות טהורה השווה לעכבה האופיינית של הקו Z_C , לא נוצרת כל החזרה מכיוון שכל ההספק המתקדם נספג בעומס ולא נוצר שום שינוי בגדלי המתח והזרם במעבר בין הקו לעומס. לפיכך לא נוצר שום שינוי בשדה החשמלי או בשדה המגנטי ולכן לא מושרה כל מתח או זרם ולא נוצר גל מוחזר.

כאשר הגל המוחזר מתפשט חזרה בקו בתור גל אלקטרומגנטי נע נפרד ומוגדר, הוא פוגש רק את אותו קו נטול הפסדים בעל עכבה Z_C^{12} כפי שראה הגל המתקדם בדרכו לעומס. לפיכך הגודל של המתח והזרם המוחזרים נשארים קבועים במהלך התקדמותו של הגל בכיוון הפוך, והם בעלי אותו ערך כפי שיצאו ממחולל ההחזרה. (באופן מעשי יש ירידה הדרגתית בגלל הניחות בקו. הדבר יטופל בהמשך). הם אינם מושפעים כלל מהגל העומד הנוצר כאשר הגל המוחזר והגל המתקדם חולפים אחד על פני השני. כך גם גלי המתח והזרם המתקדמים אינם מושפעים כלל וממשיכים בדרכם קדימה ללא השפעה עד הגיעם לעומס¹³.

כדומה, כמו בגל המתקדם, הן גל המתח המוחזר וגל הזרם המוחזר חוצים את האפס ביחד ומגיעים יחדיו לשיא רבע מחזור לאחר מכן, מכיוון שעכבת הקו Z_C היא התנגדותית. האם אין המתח המוחזר והזרם

¹¹ זכור כי פעולת מנוע-מחולל נובעת מתנועה הדדית בין שדה מגנטי ומוליך. כאן השדה משתנה אפילו שהמוליך איננו נע, כמו התהליך שמתרחש בשנאי.

¹² העכבה האופיינית Z_C של קו חסר הפסדים היא ללא רכיב הגבי. קו בעל ניחות נמוך הינו בעל רכיב הגבי כה קטן שניתן להזנחה.

¹³ אין לטעות בין המתח והזרם המתקדמים לבין המתח והזרם בקו. הם אינם זהים פרט למקרה בו התיאום מושלם ללא החזרות.

המוחזר יהיו גם הם באותו מופע אחד עם השני, כמו המתח והזרם המתקדמים? יתכן, אך אל נתעלם מהקוטביות – שיא המתח יכול להיות חיובי כאשר שיא הזרם הוא שלילי, במקרה זה נאמר כי הם בהפרש מופע של 180 מעלות. אך האם המופע באמת חשוב כאן? אכן כי כן – כנראה אין קשר חשוב יותר לעקרונות מכניקת הגלים בקוי תמסורת! על אף שהגל המתקדם והגל המוחזר נעים בכיוונים מנוגדים, הם קשורים בקשר אמין זה אל זה דרך המאפיינים של הקו והעומס. המתחים והזרמים בהתאמה מסתכמים כאופן ווקטורי בכל נקודה לאורך הקו כששני הגלים חולפים זה על פי זה. לפיכך, הקוטביות, או יחסי המופע בין המתח והזרם בשני זוגות הגלים, קובעים את האופי של הגל העומד הנוצר, העכבה בכניסת הקו, וכמה תופעות נוספות הנוצרות מהחיבור הווקטורי. היבטים רבים של תופעות בקוי תמסורת שנראים קשים להבנה, יכולים להיות מוסברים די בקלות אם נבין את יחסי הקוטביות המתפתחים. אם כך, איך נקבע את הקוטביות ואיך נבסס את הייחוס?

ניתוח תנועת הגל

נסתכל על גל יחיד הנע בקו דו חוטי. על ידי שימוש במוסכמות לגבי הזרם הזורם נוכל לבחור את אחד המוליכים כנקודת ייחוס לקוטביות המתח עבור כוון תנועה מסוים. נעשה את הבחירה הזו כך שתגרום לשיאי הזרם והמתח להיות באותה קוטביות. יחסי הקוטביות יכולים להתהפך פשוט על ידי בחירת החוט השני בתור הייחוס לקוטביות המתח או על ידי הפיכת הכוון של הגל הנע. השגת הקוטביות ההפוכה על ידי החלפת המוליכים הוא רעיון פשוט דיו, אך להרבה אנשים יש מידה של בלבול בהשגת ההיפוך על ידי הפיכת כוון ההתקדמות של הגל הנע.

כדי להקטין את מקדם הבלבול, מוצגים בציר 3 מספר תרשימים המראים טיפול גם בזרמי ז"י וגם בזרמי ז"ח.

שימוש במודד ז"י עם מחוג ממורכז עושה את ההסבר על הקוטביות קל יותר. מקובל להציג את תנועת המחוג ימינה עבור קוטביות חיובית ושמאלה עבור קוטביות שלילית. לאחר שהבהרנו את עניין הקוטביות אפשר להחליף את הסוללות על ידי מחולל ז"ח ועניין המופע נעשה ברור על ידי שימוש בצורת גל במקום המודד. התצורות ב-A ו-B שוות לאילו שב-C ו-D פרט להדקי המודד המחוברים בכוון הפוך. שים לב כי הכוון של הגל או זרימת האנרגיה ויחוס קוטביות המתח שנבחרו בתרשים A גורמים למתח הקו וכוון הזרם להיות באותה קוטביות. כעת נשים לב שעל ידי היפוך כוון הגל (כמו בתרשים B) או החלפת ייחוס המתח (כמו בתרשים C) התוצאה בשני המקרים היא קוטביות הפוכה של המתח והזרם כפי שצוין קודם.

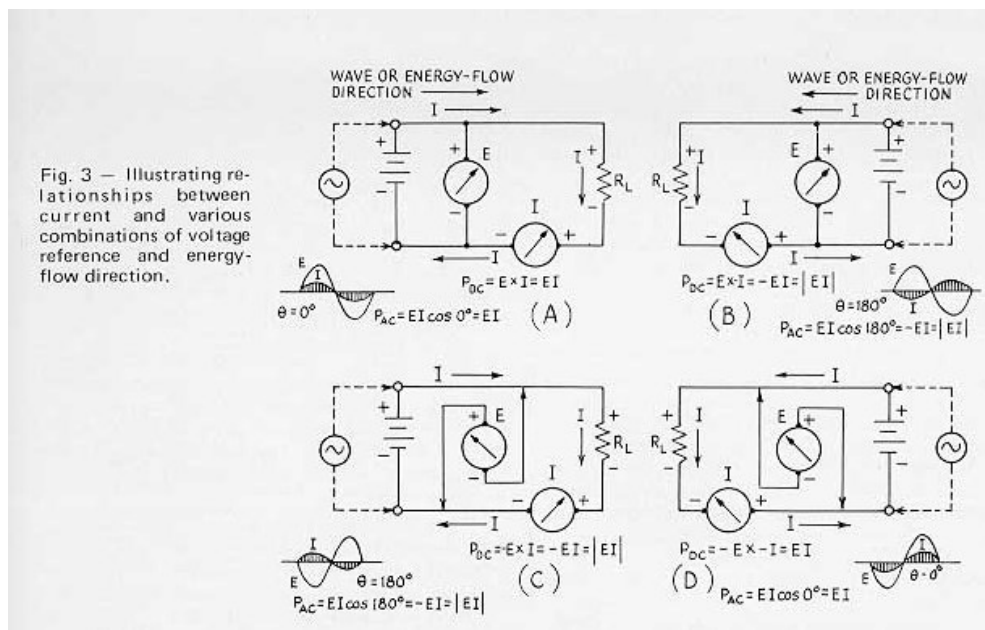
נשים לב כי היפוך הכוון וגם קוטביות ייחוס המתח (כמו ב-D) שוב גורמים שהמתח והזרם יהיו באותה קוטביות יחסית, אפילו שהם הפוכים מהמצב ב-A. בנקודה זו, יכול להועיל שנבחין כי שינוי כיוון תנועת הגל או זרימת האנרגיה היא פשוט שוות ערך להפיכת החיבורים של הדקי מד הזרם כי המקור החליף צד. זוהי נקודת מפתח להבנה של בעיית הפיכת הקוטביות, כי עבור נקודת ייחוס נתונה לקוטביות המתח, כוון זרימת הזרם חייב להתהפך כאשר כוון תנועת הגל מתהפכת.

על בסיס התנאים שהוצגו לעיל, אם מותקן עכשיו מחולל בכל אחד מקצותיו של קו דו-קוי יחיד, ובחורים נקודת ייחוס כך שהמתח והזרם יהיו באותה קוטביות עבור אחד המחוללים, כתוצאה נקבל היפוך מופע של 180 מעלות בין המתח והזרם של המחולל השני. זה המצב הקיים בקו תמסורת לא מתואם -- מחולל מקור בצד אחד ומחולל ההחזרות בקצה השני. אם נבחר את נקודת הייחוס הרגילה כך שהמתח והזרם המתקדים יהיו באותו מופע ($\theta=0$) יהיו חייבים המתח והזרם המוחזרים להיות ב-180 מעלות ביניהם (סימ' 35 עמ' 23).

בנקודה זו, עלינו להתמקד בטבעם של ההספקים בגל המתקדם ובגל המוחזר. כותבים אחדים טוענים בטעות כי יחס המופע בין המתח והזרם בגל המוחזר הוא 90 מעלות. אם זה היה נכון היה הגל המוחזר מכיל רק רכיב מתח-זרם הגבי, ולא הספק ממשי. העדות שלעיל סותרת טענה זו מכל וכל, כי ראינו שיחס המופע בין המתח והזרם בגל המוחזר הוא 180 מעלות ולא 90 ובוודאי נסכים כי אם הספק ממשי מוסע בתרשים A של ציור 3, הוא יהיה ממשי גם בתרשימים B ו-C, אפילו אם נהפוך את הדקי מד המתח. נסכים גם כי הספק

ממשי P, שווה ל- $EI \cos \theta$, כאשר $\cos \theta$ הוא מקדם ההספק. זה לא משנה אם זווית המופע היא 0 מעלות או 180 מעלות כי גם $\cos 0 = -1$ וגם $\cos 180 = -1$. הדבר מובן בפשטות מהדין בהבדלי הקוטביות שנדון למעלה. כאשר המרווח בין המוליכים מוגבל לשדה הקרוב, העקרונות הבסיסיים הקובעים את ההתפשטות בקו תמסורת הם אותם עקרונות הקובעים את היחסים בכל מעגל ז"ח רגיל, כולל קוי מתח גבוה ברשת החשמל (הערת המתרגם: המרחק בין שיקגו לפילדלפיה הוא בסדר גודל של רבע אורך גל ב- 60 הרץ).

מתוך עקרונות אלה אנו יודעים שהספק ממשי יזרום בכל ערך של θ חוץ מ- 90° ו- 270° בהם הקוסינוס הוא 0, ונותן מקדם הספק השווה ל- 0. בכל מקום בו המופע שונה מ- 0, 90, 180 או 270 מעלות, נמצא הן הספק ממשי והן הספק מדומה (וולט-אמפר ריאקטיבי). אבל ב-0 או ב-180 מעלות דק הספק ממשי יהיה קיים כי הערך המוחלט של מקדם ההספק יהיה שווה ל- 1.0 בשני המקרים. הדבר מוכיח כי ההספק המוחזר וההספק המתקדם, שניהם הם הספקים ממשים, ואין הספק מדומה (וולט-אמפר ריאקטיבי) קיים באף אחד מהם, כי הזרם והמתח בגל המוחזר נמצאים תמיד בהיפוך מופע של 180 מעלות וכי הזרם והמתח בגל המתקדם הם תמיד באותו מופע.



ציור 3

הסתירה הנוגעת להספק ממשי לעומת הספק מדומה, בגלים חוזרים נובעת בחלקה מהבלבול בין גלים נעים וגלים עומדים, עקב הכרות לא מספקת עם כל אחד מהם. כדי לבסס את ההכרות איתם, התרכזנו בתחילה בגלים הנעים קדימה וחזרה, כי מנקודת מבט פיזיקלית, גלים עומדים נגזרים מתוצאות פעולת הגומלין בין שני גלים נעים. ולכן, חיוני שיהיה די ידע מתאים הנוגע לגלים נעים לפני שיהיה ניתן להבין כהלכה את הווצרות הגלים העומדים ותופעות קשורות אחרות המתרחשות בקוי תמסורת שיתגלו ככל שנמשיך לדון בנושא.

כעת כאשר הארנו באופן סביר את הרקע הנוגע למרכיבים של הגלים העומדים, הבה נחקור את הפרטים של התפתחותם, ואז יהיה מתאים לחזור לסתירות שבהספקים למספר הערות קצרות כדי לסלק סופית מספר תמיהות.

(המשך יבוא)

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגם: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 3 – ללכת במעגלים כדי להגיע לעניין - המשך:

הבנת הגרפיקה הוקטורית והתפתחות גלים עומדים.

גלי המתח והזרם המוחזרים, שזה עתה שוגרו לדרכם בכיוון ההפוך לכיוון המחולל, מתחברים בהתאמה עם הגלים המתקדמים בכל נקודה בקו. הפרש המופע היחסי המשונה בהתמדה לאורך הקו, מבטל ומחזק לסירוגין את חלוקת המתח והזרם לאורך הקו. התוצאה היא יצירת הגלים העומדים המפורסמים ושינוי עכבת הדקי הכניסה מהערך ההתחלתי של Z_C .

תמונה פיסיקלית של היחס המורכב הזה, יכולה לשפר בהרבה את הבנת התופעה. לפיכך, ציור 4 מתאר בצורה גרפית את התקדמות יחסי המופע, עם שרטוט גרפי מדויק בקנה מידה של תרשימים וקטוריים של הגל המתקדם והגל המוחזר לשם השוואה ויזואלית כל 22.5 מעלות (1/16 אורך גל) בדיוק. ההתייחסות היא מנקודת הסיומת בכיוון חזרה אל המחולל. התרשימים הוקטוריים הללו, השזורים בצורה מעגלית סביב דיאגרמת סמיט, מציגים יחסי זווית-מופע סימטריים אחדים יחסית לאורך הקו אשר אינם די ברורים בייצוג הקודם⁹. (סימ' 2 עמ' 12; 17 עמ' 146; 18 עמ' 110). אמצעי עזר ויזואלי זה לא רק מספק מימד חדש בהצגת היווצרותם של גלים עומדים, אלא מדגיש בבהירות את התפתחותם של הרכיבים ההשראותיים והקיבוליים של העכבה המרוכבת ומשפר את ההבנה של פעולת היפוך העכבה בקו בן רבע אורך גל, חזרת העכבה בהיפוך המופע כל חצי אורך גל, והיחס ההפוך בין עכבה ומתירות (Admittance).

לשם הדגמה זו סיימנו את הקו בהתנגדות טהורה השווה לשלוש פעמים עכבת הקו Z_C כך נציג מעגל המייצג יג"ע של 3. אורך קו, L, הנמדד מ-0 מעלות, בנקודת הסיומת (או מישור ההחזרה) לכיוון המחולל, מיוצג ע"י תנועה בכיוון השעון סביב הדיאגרמה. וקטורי הזרם מוצגים בתוך מעגל היג"ע ומסומנים "4" עבור זרם מתקדם (בגודל 1.0), ו-1" עבור הזרם המוחזר (בגודל 0.5), ו-1 עבור הזרם הנוצר מסכומם. וקטורי המתח E מוצגים מחוץ למעגל בצורה הפוכה בדיוק. מספר המעלות המוצג ליד כל וקטור מציין את זווית הוקטור השקול. אורכי הוקטורים המוצגים מייצגים את המשרעת של גלי הזרם והמתח אותם הם מייצגים. על ידי קביעת אורך הוקטור המתקדם ל-1.0, יהיה הוקטור המוחזר שווה, לפי הגדרה, לגודלו של מקדם ההחזרה, ρ. אורך הוקטור המוחזר יהי לכן שווה ל-0.5 כי ρ=0.5 עבור יג"ע 3.0, מתוך הקשר:

$$\rho = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} \quad \text{מש' 2}$$

בעוד שאורכי הוקטורים עצמם אינם בקנה מידה כל שהוא, הם יחסיים זה לזה בשרטוט. שרטוטי הוקטורים הללו בכל מצב הזווית על הגרף, מכילים את המידע הנחוץ של המשרעת וזווית המופע כדי להגדיר הן את הגל העומד והן את העכבה בנקודות על קו התמסורת המיוצגת על ידי הנקודות בהן מעגל היג"ע נחתך על ידי הקו הרדיאלי במרווחים בני 22.5 מעלות.

המעגל בו היג"ע הוא 3.0, מבוסס על הסקאלות של התרשים וניתן לראות שגודלו הוא מחצית רדיוס הגרף. ההיקף החיצוני של הגרף מייצג החזרה מלאה, כלומר יג"ע אין סופי. לכן רדיוס מעגל ה-ρ הוא יחסי בגודלו למקדם ההחזרה ρ, וכך, עבור כל יג"ע או ρ, אנו יכולים לשרטט מעגל שהרדיוס שלו יחסי למקדם ההחזרה ρ.

⁹ ראה הערה 5 בחלק 2

והזרם הם באותו מופע פרט לזרם המוחזר הנמצא ב- 180° משאר הרכיבים, כפי שצריך להיות כאשר ערך העכבה בהדקי הסיומת הוא בין Z_c לבין נתק (קו פתוח).

כאשר ננוע בכיוון השעון ממישור ההחזרה לכיוון המחולל, כל וקטור מתקדם וכל וקטור חוזר יסתובב באותה כמות מעלות בהתאם לתווה לאורך הקו. אבל שים לב, מכיוון שזה חשוב מאוד: הוקטורים של הגל המתקדם (+) מסתובבים נגד כיוון השעון (מקדימי מופע), בעוד שהוקטורים של הגל המוחזר (-) מסתובבים בכיוון השעון (מפגרי מופע). למשל, ב- 45° מעלות מהסיומת וקטור המתח המתקדם נמצא ב- $+45^\circ$ מעלות, בעוד וקטור המתח החוזר נמצא ב- -45° מעלות. לכן, לכל תנועה בת מעלה אחת לאורך הקו, משתנה המופע היחסי, בין המתח המתקדם והמתח המוחזר, בשתי מעלות¹⁰. אפשר להבין זאת בקלות אם נשים לב שבנקודה בה אנו מסתכלים, הנמצאת במרחק נתון ממישור ההחזרה, הגל המוחזר נע דרך כפולה מאשר הגל המתקדם. כי, מנקודת התצפית הגל המתקדם נע רק עד למישור ההחזרה בעוד הגל המוחזר עשה גם את הדרך חזרה לנקודת התצפית.

כעת נתבונן מה קורה במרחק $L=90^\circ$, או $\lambda/4$ מהעומס. בנקודת העומס, כאשר $L=0^\circ$, המתח המתקדם והמוחזר נמצאים במופע זה עם זה, המתחים מתחברים ויוצרים חיוק, כפי שתואר קודם (בדוגמא הזו ל-1.5). אבל ב- 90° לכיוון המחולל שני וקטורי המתח, שנעו 90° מעלות בכוונים הפוכים, נמצאים עכשיו בהיפוך מופע של- 180° זה עם זה ומתחסרים (התוצאה שווה ל- 0.5). אם נתקדם ל- 180° , או $\lambda/2$ מהעומס, נראה שכל וקטור מתח נע 180° מעלות, אבל בכיוון הפוך. לכן, הוקטורים נעו הדידית 360° מעלות והם שוב במופע זה עם זה ויוצרים התחזקות¹¹. בנקודות בין $L=0^\circ$ ל- 90° וקטור המתח הנוצר, E, נראה קטן בהדרגה מהמקסימום של 1.5 עד למינימום של 0.5 ואז גדל חזרה למקסימום של 1.5 ב- $L=180^\circ$.

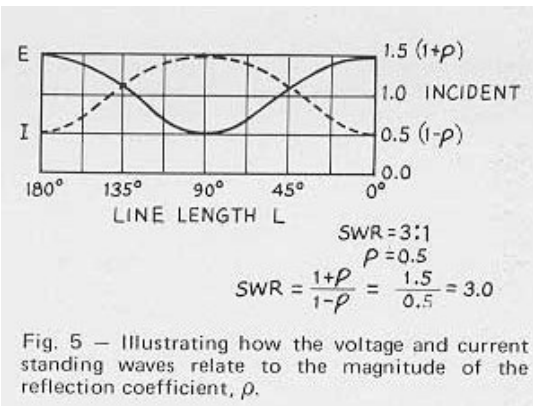


Fig. 5 – Illustrating how the voltage and current standing waves relate to the magnitude of the reflection coefficient, ρ .

בציור 5 שורטטו ערכי הגדלים הנוצרים בצורה המוכרת יותר של תרשים עם קואורדינטות ניצבות. הקיים החלקים המחברים את המצבים שצוירו יוצרים באמת את תבנית הגל העומד המוכרת. העקומות מקיימות את היחס

מש' 3

$$SWR = \frac{1 + \rho}{1 - \rho} = 3.0$$

בהצבת $\rho=0.5$ במשוואה.

עבור ארכי קו הגדולים מחצי אורך גל נמשיך לנוע סביב המעגל, תוך חזרה על הערכים שקיבלנו 180° מעלות קודם, ונקבל את האופי המחזורי של הגלים העומדים. בדיון הנוכחי אנו דנים רק בקיים חסרי הפסדים. גורמי תיקון עבור הניחות, המשנים את המעגל לספירלה, יוצגו מאוחר יותר. את הבסיס להיפוך מופע (היפוך קוטביות) האופייני של נקודת ה- 180° מעלות או קו באורך $\lambda/2$, ניתן לראות מגרף הוקטורים על ידי ציון העובדה שזוית וקטור המתח המסויימת בנקודת 180° המעלות היא ב- 180° מעלות מכיוון המופע במישור ההחזרה ($L=0^\circ$).

¹⁰ הזוית היחסית בין הגל המתקדם והמוחזר היא הזוית של מקדם ההחזרה, ביחס לגל המתקדם. ראה סקלת "זוית מקדם ההחזרה" ("Angle of Reflection Coefficient") סביב ההקף של איזור תרשים העכבה בדיאגרמת סמיט.

¹¹ בדיאגרמה, הקו המרוסק מראה את הוקטורים אחרי תנועה של 180° מעלות לאורך הקו.

החשיבות של הפרש המופע הקבוע של 180 מעלות בין המתח והזרם המוחזרים תצוץ כשנשווה עכשיו את המופע והגודל של וקטורי הזרם עם וקטורי המתח שניתחנו קודם. אנו רואים כי במישור ההחזרה ($L=0^0$), בו נמצאים גלי המתח המתקדם והמוחזר באותו מופע ומתחברים כדי לייצר שיא מתח, הזרמים המתאימים נמצאים בהיפוך מופע ויוצרים שפל בזרם, וב- $L=90^0$, כאשר המתחים בהיפוך מופע ויוצרים שפל, הזרמים יהיו באותו מופע וייצרו שיא בזרם. הדבר מסביר בצורה גרפית מדוע נקודות השיא והשפל של מתח הגל העומד נמצאים תמיד במרחק של 90 מעלות מהנקודות המתאימות של השיא והשפל בגל העומד של הזרם. תופעה זו נוצרת ישירות מהבדל המופע של 180 מעלות בין המתח והזרם המוחזרים, הכולט היטב בתצוגה הוקטורית.

אפשר לעשות השוואה חזותית, של המצבים הזויתיים והגדלים של וקטורי המתח והזרם הנוצרים בגרף הוקטורי (ציור 4) עם המצבים המתאימים בתרשים של ציור 5. השוואה זו תחזק את ההבנה של רעיון חשוב זה. הדבר חשוב כי ככל שנתקדם נראה שזהו הבסיס לתכונת "שנאי עכבות" של קו תמסורת, כולל קטעי קו באורך של רבע אורך גל וחצי אורך גל שאינם אלא מקרים פרטיים, בתנאים מסויימים, של המקרה הכללי.

כאשר בסעיף הבא נדון במושג העכבה ובהמשך נפתור בעיות תיאום, תצוץ במחשבותינו התמונה הרעיונית של התהליכים המתרחשים בקו ותהיה אז לעור בהבנת נקודות קשות, יותר מאשר רק באמצעות הסקה לוגית לבריה. חשוב במיוחד שתהיה תמונה ברורה של היווצרות גל מוחזר, כי הגל המוחזר צריך להיחשב כגל נע נפרד הזהה לגל המתקדם, אך שונה בכיוון התנועה, ובדרך כלל גם בגודלו. זוהי נקודה חשובה, כי היא עוזרת לנו להבין כי גלי המתח והזרם *המוחזרים* נעים בהיפוך מופע של 180 מעלות ביניהם, ולכן נושאים איתם הספק אמיתי תוך כדי תנועתם. הובלת הספק אמיתי על ידי הגל החוזר היא מרכיב חיוני בתהליך החיזוק והביטול של מתח וזרם לאורך הקו בבניית הגלים העומדים, כאילו הוא נוצר על ידי המון מחוללים זעירים בכל נקודה לאורך הקו. כן יתבהר בקטע שיבוא מדוע משתנית העכבה לאורך הקו בנוכחות החזרות רק בגלל שהספק אמיתי זורם בשני הכוונים (סימ' 2 עמ' 70, 35 עמ' 24, 42).

אנחנו מדגישים את הנקודה הזו כי, כפי שצוין לעיל, מספר כותבים הציגו נקודת השקפה מוטעית שגל חוזר אינו נושא הספק ממשי, בנימוק שהמתח והזרם המוחזרים נמצאים ב-90 מעלות ביניהם ולכן אין הם נושאים הספק. אם בין המתח והזרם המוחזרים היתה זווית של 90 מעלות הם באמת לא היו נושאים הספק, אבל טיעון זה הוא שגוי כי במציאות הם נעים עם הפרש של 180 מעלות ביניהם, כפי שהראינו קודם.

הערת המתרגם: אני משמיט כאן קטע בו המחבר מתנצח עם שני כותבי מאמרים ומראה כי הם מתבלבלים בין גל החוזר בו קיים הפרש מופע של 180 מעלות בין הזרם והמתח לבין הגל העומד בו קיים הפרש מופע של 90 מעלות בין הזרם והמתח. בהמשך, המחבר מנתח את טעותם בניחות חוסר תיאום עכבות ושיטת תיאום עכבות בעזרת עומס מצומד, שעקרון הפעולה שלו הוא ליצור החזרה מלאה עבור הגל החוזר לכיוון המחולל תוך קיום תיאום מלא עבור הגל המתקדם.

אי-הבנה של העיקרון הבסיסי החשוב הזה הוא עדיין נפוץ בקרב החובבים. זהו מושג בסיסי בפעולה של מסננים ברורי תדר פסיביים ובמנגנון של יצירת תיאום מצומד המורכב רק ממסנן מהסוג הנ"ל. במנגנון שמאחורי פעולה זו מעורבים התנגשויות גלים והחזרות אשר יתוארו בקרוב בפירוט, שוב, תוך שימוש בתרשים וקטורי כעזר חזותי.

מובן כי המרווח של 90 מעלות *במיקום* לאורך הקו הקיים בין השיאים (או השפלים) של המתח והזרם *הגלים העומדים* (שתוארו קודם ומוצגים בציור 5) יכול להתפרש בטעות כהפרש מופע בין המתח והזרם *המוחזרים*. הדמיון בין התנהגות *המתח והזרם בקו* ובין היחסים של זרם-מתח במעגל ז"ח רגיל יכול להסביר מדוע מתבלבלים בין *המתח והזרם בקו* לבין המתח והזרם *המוחזרים*. זאת בגלל, כשכאשר יש החזרות בקו, מכילים המתח והזרם *בקו* גם רכיבים הנמצאים ביניהם ב-90 מעלות מחוץ למופע ונושאים הספק *דיאקטיבי*, בנוסף לרכיבי המתח והזרם הנמצאים *במופע* ונושאים הספק נטו. כמוכך שהרכיבים הריאקטיביים הללו לא נושאים כל הספק ממשי. למרבית הצער, מספר אנשים הבקיאים במעגלים עם רכיבים מקובצים, אבל אינם מכירים מספיק מעגלים עם פרמטרים מפולגים כמו שיש בקוי תמסורת, טועים לפעמים בהניחם שההתנהגות החשמלית של שני סוגי המעגלים זהה, ואנו נדרשים להיות זהירים מעשיית השוואות לא מוצדקות שיכולות להביא למסקנות הרסניות מהסוג שאנו מנסים לתקן כאן.

טענה מטעה נוספת, אף כי לכאורה נראית נכונה, מכריזה כי ההספק המוחזר חייב להיות מדומה כי הוא איננו יכול לבצע עבודה. נוכיח כי טיעון זה הוא שגוי על ידי כך שנראה כיצד ההספק החוזר יכול לבצע עבודה. מדי זרם ומתח לת"ר יראו רק את $S_{\text{כנס}}$ הזרם הנוצר משילוב הזרם המתקדם והמוחזר (E ו-I בגרף הוקטורי), שמכפלתם, משוקללת על ידי הקוסינוס של זווית המופע ביניהם, מספקת רק את ההספק הנובע, כלומר את ההספק נטו הזורם לאורך הקו. אבל ישנם התקנים רבים בשימוש יום יומי המחלצים מהקו בצורה בררנית את הגל המתקדם או את הגל המוחזר (ללא תלות בגל העומד), וכך מאפשרים מדידה נפרדת וניתוח של הספק המשוך לגל הנע בכל כיוון שהוא. אחד ההתקנים הללו הוא מצמד כיווני (Directional coupler). התקן אחר הוא ה-circulator. זהו התקן כיווני בעל שלוש יציאות שבו ההספק המוחזר עקב חוסר תיאום ביציאה השניה מוסט כולו מכניסת ההזנה ומגיח ביציאה השלישית. הגל המוחזר אינו יכול לנוע חזרה אל קו ההזנה כדי להשתלב עם הגל המתקדם וליצור גל עומד, וכך אינו משנה את עכבת קו הכניסה בנקודת ההזנה של המקור. אבל, זרם הזורם דרך נגד המותקן ביציאת הגל המוחזר (היציאה השלישית) מייצר חום (I^2R) השווה לערך ההספק המוחזר עקב חוסר התיאום ביציאה השניה. ניתן לחבר מצמד כלאיים (hybrid coupler) בעל ארבע יציאות כדי להשיג את אותה הפעולה כמו הסירקולטור. התקני ת"ר כיווניים המוכרים היטב לחובבים הם מחווי יג"ע המודדים החזרות ומדי הספק כיווניים (סימ' 18 עמ' 38, 40, 42). המודד בכל אחד מהסוגים הנ"ל מופעל על ידי הספק ת"ר הנספג מתוך אחד הגלים הנעים בקו – או המתקדם או המוחזר, כפי שבחרים. אם הגל המוחזר היה הספק ריאקטיבי חסר וואטים, לא היה כל הספק זמין לשם הנעת המחווין במד היג"ע, או לייצר חום מהזרם הזורם בנגד שביציאה השלישית בסירקולטור. יתרה מזאת, אם ההספק יהיה חסר וואטים בהיותו מוחזר, היתה נוצרת סתירה של אחר מהחוקים הבסיסיים בפיסיקה: חוק שימור אנרגיה (סימ' 35, עמ' 25), שבבסיסו של חוק זה הוא שאם לא כל ההספק הנע בקו לכיוון העומס יכול להיספג או להתפזר בעומס, אותו חלק שאינו נספג בעומס חייב להופיע במקום כלשהו. הוא אינו יכול להיעלם או לחדול מלהתקיים על ידי קסם. ההספק המוחזר המופיע בתור חום בסירקולטור הוא הוכחה טיפוסית לקיומו.

להלן דרך אחרת לבטא את ההספק הנקי העובר בקו, המאפשרת לנו לפרק את ההספק לרכיב ההספק המתקדם והמוחזר. הביטוי מתקבל מנוסחאות ההספק, לדוגמא:

$$P = EI \quad \text{מש' 4}$$

או

$$P = \frac{E_{\max} \times E_{\min}}{Z_c} \quad \text{מש' 5}$$

בקוי ת"ר, ההספק הוא

$$\text{power} = P = E_{\max} \times I_{\min} \quad \text{מש' 6}$$

או

$$P = \frac{E_{\max} \times E_{\min}}{Z_c} \quad \text{מש' 7}$$

את E_{\max} (נוצר על ידי $E^+ + E^-$) נמצא כפי שנראה בצירוף 4, במקום שבמתח המתקדם והמוחזר נמצאים במופע ב- $L=180^\circ$ ו- $L=0$, ואת E_{\min} (נוצר על ידי $E^+ - E^-$) נמצא במקום בו הם נמצאים במופע הפוך של 180 מעלות ב- $L=90^\circ$, בהמשך נראה כי גם המתח שנוצר E וגם הזרם I הם לא ריאקטיביים בנקודות אלה בקו, בעוד שהם ריאקטיביים בכל מקום אחר לאורך הקו בין נקודות אלה. מכיוון שנקודות אלה הן לא ריאקטיביות, המכפלה שלהן חלקי העכבה האופיינית, Z_c מפיקה בדיוק את זרימת ההספק הנקי. נזכור ש- E^+ ו- E^- הם תמיד ממשיים (לא ריאקטיביים) ונחליף את הביטוי E_{\max} על ידי הביטוי $E^+ + E^-$ ואת E_{\min} על ידי $E^+ - E^-$, ונקבל:

$$P = \frac{E_{\max} x E_{\min}}{Z_c} = \frac{\left(|E^+| + |E^-| \right) x \left(|E^+| - |E^-| \right)}{Z_c}$$

מש' 8

הכפלת האיברים במונה נותנת את הרכיבים המתקדם והמוחזר המבוקשים:

$$P = \frac{|E^+|^2}{Z_c} - \frac{|E^-|^2}{Z_c} = \text{שטף ההספק נטו}$$

מש' 9

האיבר הראשון מבטא את ההספק הקשור עם הגל המתקדם והשני את ההספק המוחזר. ההפרדה הפשוטה של ההספק לשני רכיבים נפרדים, יכולה להיעשות בקו חסר הפסדים או בעל הפסדים נמוכים, כאשר Z_c הוא התנגדותי. אם לקו יש הפסדים ניכרים, תגרום פעולת הגומלין בין שני הגלים, לרכיב שלישי של הספק אבל בדרך כלל אנחנו יכולים להתעלם ממנו, כי הקוים שנמצאים בשימוש של חובבי רדיו הם מהסוג של הפסד נמוך. (ראה סימ' 18 עמ' 150 ו- 37 עמ' 129).

יכולת ההפרדה של ההספק המתקדם וההספק החוזר, יוצרת את הבסיס הפיסיקלי לפעולתם של מד החזרות (reflectometer) ומד הספק כיווני (directional wattmeter), (סימ' 38) שבו הרכיב המתקדם או המוחזר נדגם על ידי ניצול היפוך המופע בן 180 מעלות של רכיבי המתח והזרם המוחזרים בעוד רכיבי המתח והזרם המתקדמים נמצאים באותו מופע. בתהליך זה דגימה מן המתח על פני הקו מחוברת לדגימה של מתח הנגזר מן הזרם בקו. כאשר המשרעות של הדגימות מכוונות ליחס הנכון ביניהם (הנקבע על פי עכבת הקו Z_c), שני הרכיבים החוזרים מתבטלים, כך שהסכום המתקבל מייצג רק את הרכיבים המתקדמים. על ידי הפיכת המופע של דגימת הזרם ב- 180 מעלות, הרכיבים המתקדמים מתבטלים והסכום המתקבל מייצג רק את הרכיבים המוחזרים. מודד המחובר לחיווי סכומי המתחים יכול להיות מכיל בהספק, מכיוון שההספק יחסי לריבוע המתח. וכך, המשמעות היפה של מד מתח כיווני הוא בכך שהוא מראה את ההספק האמיתי בקו התמסורת כאשר הקו מסתיים בכל עכבת עומס שהיא. העומס יכול להיות מתואם או לא מתואם והוא יכול להיות ריאקטיבי או לא ריאקטיבי. המודד מתנהג כך כי ההספק המתקדם שווה תמיד לסכום של ההספק הנכנס לקו פלוס ההספק החוזר, כך הוא מראה את ההספק האמיתי שאכן מתקדם בקו. במצב של הספק חוזר, המודד מראה את אותו החלק מההספק המתקדם שלא נספג על ידי עומס, אבל יתווסף להספק הנכנס לכניסת הקו מהמשרד או בכל נקודה בקו שבה קיים תיאום מצומד (סימ' 18 עמ' 191). ההפרש בין ההספקים, המתקדם והמוחזר, הוא לכן, ההספק נטו העובר בקו, בכל נקודה בקו בה נחבר את מד ההספק. בקו חסר הפסדים, יראה ההספק נטו העובר בקו את ההספק הנכנס לקו ששווה בדיוק להספק אשר נבלע בעומס, וכולם זהים בכל נקודה בקו. בקו עם ניחות, המודד יראה את ההספק הנכנס אם הוא יחובר בהדקי כניסה ויראה את ההספק הנספג בעומס אם יחובר מיד לפני העומס. ההפרש בין קריאות אלה יחסי לניחות הקו. מסיבות מעשיות יתכנו כמובן שגיאות בתוצאות הממשיות במדידת יג"ע, למשל, עקב אי ליניאריות של דיודות ברמות הספק שונות (סימ' 40).

מלבד נקודת מבט שונה משהו של טבע ההספק המוחזר, העבודה של W6EL, לשעבר K6CYG, מקבילה במידה רבה לנושא המרכזי של סדרת המאמרים הזו, ומגיעה לאותן מסקנות (סימ' 44).

הסבר מפורט כיצד הנקודות שהובאו לעיל באות לידי ביטוי במכניקת הגלים של תיאום מצומד ניתן בחלק 4 של הסידרה שיופיע בגליונות הבאים.

תיקון טעות:

בחלק הראשון של פרק זה נפלה טעות. כמובן ש: $\cos 0=1$, ולא כפי שהופיע.

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגם: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 4 – מבט לתוך מראה מצומדת

בחלק 3 נידונו מספר מושגים בסיסיים הקשורים ליצירת החזרות, התפשטות גלים לאורך קו תמסורת והתפתחות גלים עומדים. לאחר מכן ראינו באופן מתמטי איך ניתן לפרק את ההספק נטו לרכיב מתקדם ורכיב מוחזר (בקו חסר הפסדים או עם הפסדים נמוכים), ולאחריו באופן הגיוני בא הסבר איך הפרדת ההספק ממומשת בהתקנים כיווניים, כגון מד הספק כיווני. תוך לימוד אודות פעולת מד הספק וכיצד לפרש את הקריאות, ראינו כי ההספק המתקדם לאורך הקו בין רשת התיאום והעומס, גדול יותר מההספק המסופק על ידי המקור, כאשר הקו מחובר לעומס לא מתואם. בחלק זה נחקר את המצב הזה בפרטים, כי הוא בעל חשיבות משמעותית לחובב וכי הוא קשור ישירות לגמישות ההפעלה של מערכת האנטנה. הערכת היסודות הקשורים במה שנראה כמצב חריג ישחרר את החובב מהדעה הרווחת שהוא מוגבל להפעלה בתנאים ללא חוסר תיאום או עם תיאום קטן בלבד בחיבור קו התמסורת לאנטנה.

ההסבר של פעולת מד ההספק הכיווני בחלק 3 צריך לסייע בהבנה מדוע ההספק המתקדם, המופיע בקו בין נקודת התיאום (כגון רשת התיאום בכניסת הקו) והעומס הבלתי מתואם, יכול להיות גדול יותר מזה שהמסדר יכול לספק. זהו מצב נורמלי שחייב להתקיים כדי שעומס לא מתואם יוכל לספוג את כל ההספק המסופק על ידי המקור²⁰, ובאותו זמן להחזיר אחוז מסוים מסך כל ההספק שהוא מקבל. כדי שזה יקרה צריך העומס לקבל יותר הספק מתקדם מאשר מה שמסופק על ידי המסדר. הבסיס להבנת רעיון די מתוחכם זה מונח במכניקת הגלים שעליהם מבוססים העקרונות של תיאום מצומד שהוצג בחלק 1 והוגדר בחלק 2. ההיבט הגלי של נושא זה הוצג בספרות (כפי שידוע למחבר) רק על ידי סלאטר (Slater, סימ' 35) ואלפורד (Alford, סימ' 39). יתכן כי החשיפה המוגבלת יכולה להיות מיוחסת לבלבול מסוים בשטח זה בין מהנדסים וחובבים כאחד. לדוגמה, הרבה מרשמים ב"ספרי מתכונים" ותרשימי הוראות להתקנת בד-תיאום (stub-matching) לשם תיאום קו לא מתואם יסבירו "איך" לעשות זאת, אבל יציעו רק מעט תובנה לכיוון הצגת תמונה של מכניקת הגלים שבאמצעותה תיאום זה ממומש. בכל זאת, תובנה זו מגיעה ללב ליבה של בעיית התיאום של מסדר אל הקו. הדבר יכול להבהיר כיצד הגל המוחזר מקבל החזרה לכיוון קדימה בנקודת התיאום. אם התיאום לא היה יוצר את האפקט הזה, הגל המוחזר היה נע חזרה לכיוון המחולל, וכך היה מקטין את כמות ההספק הנמסר על ידי המחולל (סימ' 19, עמ' 37).

מנגנון החזרות של תיאום בעזרת בד-תיאום (Stub-Matching)

הצגת מנגנון החזרות קשורה במושגים המתמטיים לתיאום מצומד של העכבה בכניסת הקו וזוית המופע של מקדם החזרה, שיבחנו בפרוטרוט באחד החלקים הבאים. (זוית המופע של מקדם החזרה הוצגה בקצרה בתחילת חלק 3, ובהערת שולים 15). כפי שצוין בעת הגדרת התיאום המצומד בחלק 2, התיאום מושג על ידי הכנסת אי-תיאום שאינו מפזר הספק בנקודת התיאום. כך נוצרת החזרה משלימה אשר מקוזת ומבטלת את הגל המוחזר מהעומס הלא מתואם. כבר צוין שתנאי תיאום מצומד יכולים להתקבל על ידי כיוון נכון של מעגלי התיאום של הדרגה הסופית במסדר (סימ' 4, חלק 3) או על ידי רשת תיאום קו אם משתמשים בכזו. מכיוון שתיאום בעזרת בדי-

ראה נקודה 3, חלק 1

20

תיאום (Stub-Matching), משתמש בעקרונות זהים אבל קל יותר להמחשה, נשתמש בטכניקה של שיטה זו להדגים את מכניקת הגלים. בתיאום בעזרת בדי-תיאום, בדי-תיאום (Stub) מספק את מה שנראה כמו סתירה – אי רציפות שאינה מפזרת הספק, כלומר חוסר תיאום. בעוד שאנחנו רגילים לחשוב על בדי-תיאום ככזה המספק תיאום ולא חוסר תיאום, נגלה כי התיאום המצומד נוצר עקב הביטול ההדדי של שני גלים מוחזרים המבטלים זה את זה על ידי שתי אי-התאמות משלימות. גל אחד הוא זה המוחזר מהעומס הלא מתואם, השני הוא הגל המוחזר החדש הנוצר על ידי אי התיאום מבדי-תיאום, השווה לגל המוחזר מהעומס בגודלו ובזווית המופע אך במופע הפוך. ההתאבכות הנוצרת בין שני הגלים המשלימים בנקודת חיבור בדי-תיאום גורמת לביטול זרימת האנרגיה, או איפוס לכיוון המחולל הנוצר מההפרש בין שני הגלים המוחזרים, ואנרגיה מירבית בכיוון העומס הנוצרת מסכום שני הגלים המוחזרים וגל המקור. תופעת הביטול הנוצר על ידי התאבכות הגלים מציגה למעשה מעגל פתוח²¹ חד כווני בפני גלים הנעים בכיוון המחולל, החוסם הן את הגל המוחזר מהעומס והן את הגל המוחזר מבדי-תיאום מכל תנועה נוספת בכיוון הפוך. גלים אלה מוחזרים במלואם לכיוון העומס, בהיותם במופע עם הגל המתקדם. לכן, נוצר כאן ביטול מלא של כל ההשפעה של אי הרציפות (כגון חיבור בדי-תיאום) וההחזרות של הגלים הנעים בכיוון לעומס.

מנגנון זה של התאבכות גלים המבצע את התיאום יהיה לנו יותר מובן ככל שנחקר את מקדמי החזרות של שני אי-התיאומים בעזרת דוגמאות המשתמשות בשיטות הוקטוריות (ציור 4, חלק 3). שם אנו מראים עומס של $3+j0$, שנותן יחס גלים עומדים של שלוש-לאחד לאורך כל הקו²². היגמ"ע (VSWR) של 3 מוצג על ידי הקו הכהה סביב מרכז הגרף, שהוא המיקום של העכבות לאורך קו התמסורת, עבור עומס של $3+j0$. מעגל זה חוצה את מעגל ההתנגדות המסומן ב-1.0 בשתי נקודות, A ו-D. לכן בשתי נקודות אלה שווה הרכיב ההתנגדתי של עכבת הקו ל-1.0 פעמים העכבה האופיינית של הקו Z_c , שהן הנקודות המתאימות לחיבור בדי-תיאום. נקודות A ו-D נחצות גם על ידי מעגל היגב. בנקודה A ההיגב הוא שלילי בגודל 1.15 פעמים Z_c , בנקודה D הוא חיובי, וגם כן בערך של 1.15 Z_c . התנאים להשגת ביטול הגל החוזר באמצעות התאבכות גלים הם הדרישות המוכרות של בדי-תיאום כדלקמן: (1) בדי-תיאום ימוקם בנקודה בה הרכיב ההתנגדתי של עכבת הקו שווה לעכבה האופיינית Z_c (כמו בנקודות A או D), ו- (2) היגב בדי-תיאום יהיה שווה בגודלו והפוך בסימנו להיגב (הנוצר מיחסי המופע בין הגל המתקדם והגל המוחזר בנקודת חיבור בדי-תיאום) כך שההיגב מתבטל לאפס (סימ' 2 עמ' 116 סימ' 19 עמ' 97). זה נשמע כמעט כמו ההגדרה לתיאום מצומד בעצמה, הלא כן? הנקודה הנכונה להכנסת בדי-תיאום בטור לקו הכי קרוב לעומס היא נקודה A או נקודה D. כל נקודה במרווח של חצי אורך גל מנקודות אלה בהמשך הקו יכולה להתאים גם כן כי העכבה חוזרת על עצמה כל חצי גל בדיאגרמה (וגם בקו עצמו). לשם בהירות, כדי לאפשר לנו לעסוק בעכבות, מציגות דוגמאות אלה בדי-תיאום טורים. (בעוד בדי-תיאום מקבילים או מיצדים נפוצים יותר בשימוש, הניתוח הקשור בבדי-תיאום מקבילי דורש טיפול במתירות, Admittance, במקום בעכבה, Impedance). כעת נראה כיצד מתווספות החזרות בנקודת התיאום כדי ליצור את אפקט התיאום. נראה גם מדוע מד הספק כיווני יראה אמיתית של

²¹ לחילופין זה יכול להיות מעגל מקוצר, תלוי התנאי הקו והעומס, כפי שיוסבר בהמשך.

²² אנחנו רגילים לחשוב על 50 אוהם כעכבת מערכת סטנדרטית עקב הדומיננטיות של רכיבי ת"ר וכבלים קואקסיאליים בעלי עכבה זו. אולם הרבה חישובים יכולים להיות פשוטים בהרבה על ידי שימוש בעכבות מנורמלות, כך שאנו מחלקים את ערכי כל העכבות בערך עכבת המערכת. נהוג להשתמש בערך העכבה האופיינית של קווי התמסורת כערך עכבת המערכת, Z_c . נירמול עכבה על ידי חלוקתה ב- Z_c , מסתכמת בשינוי הסקלה כך שיחידה אחת של עכבה היא Z_c אוהם ולא 1 אוהם. תרשים הוקטורים בדיאגרמת סמית בציר 4, משתמש המערכת מנורמלת כדי לנצל את היתרון של פשטות החישובים. כדי לקבל ערכים מנורמלים, פשוט חלק את כל ערכי העכבות בעכבת המערכת. למשל, במערכת של 50 אוהם, 150 אוהם יהפכו ל-3.0 אוהם. לדוגמה עכבה מנורמלת $Z=0.6 - 0.8$ שנמצאת ב- $L=450$ תהיה $Z=30 - j40$. בשרטוט של ציור 6, הוקטור המתקבל E- צריך להיות בעל ערך של $0 < \rho < 0.5$ ולא 0^0 . הכותרת של ציור 7 צריכה להסתיים במילים "...אורך בדי-תיאום שואף לאפס"

ההספק המתקדם בין נקודת התיאום והעומס, ושהוא גדול יותר מההספק המסופק על ידי המשדר, כאשר הקו מסתיים בעומס לא מתואם. קצת הלאה נראה גם איך עקרונות אלה מיושמים לרשתות תיאום מעשיות.

בנקודה A שהיא 30 מעלות מהעומס (כ- $L=30^\circ$), מקדם החזרת המתח עקב חוסר התיאום הוא - $\rho_E = 0.5 < -60^\circ$. המשמעות היא שהמופע של הגל המוחזר מפגר אחרי הגל המתקדם ב- 60 מעלות בנקודה A. עכבת הקו E/I בנקודה זו היא $1-j1.15$. ניתן לבצע תיאום על ידי הכנסת היגב בצורת בד-תיאום או על ידי השראות מקובצת (סליל) בערך של $0+j1.15$ בטור לקו בנקודה זו. כעת, אפקט ביטול ההיגב על ידי הכנסת בד-תיאום בעל היגב חיובי על ההיגב השווה אך השלילי של הקו, הוא מובן באופן כללי, אבל נשארו מספר נקודות לא ברורות בקשר להשפעה על רכיבי הגל: מה ממאפיני בד-התיאום גורם לו לבטל את החזרות מהעומס וגם, איך בד-התיאום גורם לעליית ההספק בין נקודת התיאום והעומס?

כדי לענות על שאלות אלה, הבה נמצא תחילה את מקדם החזרה שהיה נוצר על ידי בד-התיאום אם היינו מחברים אותו לקו המתואם באופן מושלם. בתנאים אלה אנחנו יכולים לנתח את החזרה הנוצרת על ידי בד-התיאום בהעדר כל הפרעה או חזרה אחרת בקו. אם נתמקם בצד העומס סמוך לבד-התיאום בנקודה בו הוא מחובר לקו, ונסתכל לתוך הקו בכיוון לעומס המתואם, נראה התנגדות טהורה השווה לעכבה האופיינית של הקו Z_c . אנחנו יודעים מהתאוריה של קווי תמסורת מתואמים כי אם נתק את המשך הקו בנקודה זו ונחבר במקומו את התנגדות העומס $R_L = Z_c$ ישירות אחרי בד-התיאום על פני קצות הקו הפתוח, אנחנו יכולים להסתכל על הקו מכיוון המחולל לכיוון נקודת החיבור של בד-התיאום ולראות את אותם תנאי החזרות שהיו לפני הסרת המשך הקו והחלפתו בהתנגדות. כך שהמעגל הטורי

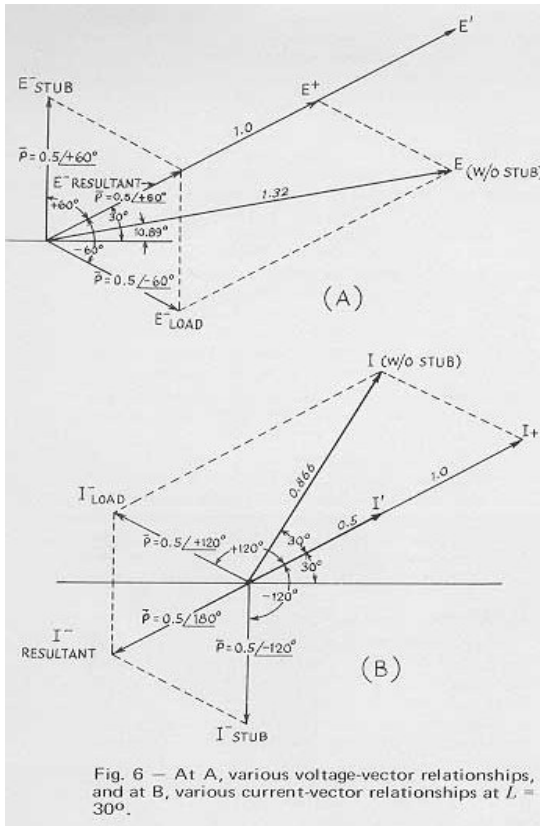


Fig. 6 - At A, various voltage-vector relationships, and at B, various current-vector relationships at $L = 30^\circ$.

הכולל את ההתנגדות R_L וכד- התיאום יוצרים ביחד עומס לא מתואם בגודל $1+j1.15$ אוהם המסיים את הקו. אותן החזרות בדיק ייווצרו במקרה זה ללא חשיבות באיזה מקום נכניס את בד-התיאום בקו מתואם. התרשים הוקטורי מראה את עכבה זו של $1+j1.15$ שבעבורה יהיה שווה מקדם החזרה ל- $\rho_E = 0.5 < +60^\circ$ שים לב כי אלו הם אותם גודל ומופע רק עם סימן מופע הפוך לאילו שמצאנו בנקודה A כתוצאה מעומס לא מתואם של $3+j0$.

וכך יוצר חוסר התיאום של בד- התיאום החזרה בגודל זהה (ואותו יגמ"ע) כמו שנוצר על ידי העומס הלא מתואם, אבל גל מתח הנוצר על ידי בד-התיאום מקדים את הגל המתקדם ב- 60 מעלות, בעוד שהגל הנוצר על ידי חוסר התיאום של העומס מפגר ב- 60 מעלות. אם בד- התיאום יחובר עכשיו בנקודת התיאום (המתאימה ל- $L = 30^\circ$)

בתרשים הוקטורי) כאשר עומס של $3+j0$ אוהם מסיים את הקו, ההחזרות מהעומס ומבד-התיאום יוצרו בו זמנית. כתוצאה מיחס המופע ההפוך שלהם, הגל המקדים הנוצר מההחזרה של בד- התיאום והגל המפגר הנוצר מההחזרה של העומס, יבטלו אחד את השני בנקודת התיאום. כך, מקדמי החזרת המתח של העומס ושל בד-התיאום מתחברים באופן וקטורי לאפס מעלות המתקדם בנקודת התיאום כפי שמראה ציור 6A. (בקשר למשרעת הנוצרת מהסיכום הטריגונומטרי נדון בהמשך, אבל הידיעה בקשר ליחסי הזווית הללו צריכה להתווסף להערכה אל מנגנון ביטול ההיגבים בקו על ידי בד-התיאום.)

כעת, כשאנחנו יודעים מה קורה עם גלי המתח, אנחנו רוצים לחקור גם את גלי הזרם כדי ללמוד על יחסי העכבה בנקודת התיאום. כפי שהוגדר מקודם, הזרם המוחזר הוא בהיפוך מופע של 180 מעלות עם המתח המוחזר, כך שמקדם ההחזרה של הזרם נמצא על התרשים הוקטורי ב- 180 מעלות או בהיפוך מוחלט לנקודת מקדם המתח המתאימה. כך אנו מוצאים את מקדם ההחזרה של הזרם בנקודה C עם $\rho_I = 0.5 < +120^\circ$ בדומה, מקדם ההחזרה של הזרם הנוצר מאי-התיאום של בד-התיאום בנקודה B הוא $\rho_I = 0.5 < -120^\circ$. שים לב כי גם מקדמי החזרת הזרם של העומס ושל בד-התיאום שווים בגודלם אך בעלי מופע בסימנים הפוכים. מקדמי החזרה של הזרם מסתכמים וקטורית ל- $\rho_I = 0.5 < 180^\circ$. גל הזרם המוחזר הנובע מסיכום שני גלי הזרם הוא בהיפוך מופע של 180 מעלות לגל הזרם המתקדם כפי שנראה בציור 6B. כך קיבלנו מתח המתקדם ומתח חוזר הנמצאים במופע, והזרם המתקדם והזרם החוזר באנטי פאזה – וכך הגל המגיע לנקודת התיאום מכווון המחולל רואה תיאום מושלם.

עובדות אלה מציגות מסר משמעותי. בפיסקה הפותחת של חלק 3 תוארה מכניקת הגלים בקו המסתיים במעגל פתוח. שם למדנו כי זווית מקדם ההחזרה של המתח היא 0 מעלות וזווית מקדם ההחזרה של הזרם היא 180 מעלות. בתנאים של קו פתוח, גל המתח המתקדם שאינו נספג בסיימת מוחזר ללא שינוי במופע, בעוד שגל הזרם שאינו נספג בסיימת מוחזר עם היפוך של 180 מעלות, היפוך מופע מוחלט. יחסי המופע של הגלים המוחזרים בנקודת התיאום שמצאנו קודם (על ידי המתח והזרם הנוצרים בנקודת התיאום ומאי התיאום של העומס) מציגים במדויק את אותם התנאים השולטים בקו המסתיים במעגל פתוח, ככל שהדבר נוגע לגלים החוזרים (אבל לא לגבי הגלים המתקדמים). לפיכך, האפקט של שני גלים מוחזרים המגיעים לנקודת התיאום הוא יצירת מעגל פתוח לגלים הנוצרים על ידי שני חוסר-התיאומים. וכך, גלים אלה מקבלים החזרה מוחלטת בנקודת התיאום ומקיימים יחסים של שינוי מופע כמו בקו פתוח כפי שתואר לעיל. גל המתח המוחזר לא עובר שינוי מופע במהלך ההחזרה. זכור כי כבר לפני ההחזרה הוא היה במופע עם הגל המתקדם. גל הזרם הנוצר הופך את המופע ב- 180 מעלות, ובגלל שהוא בהיפוך של 180 מעלות עם גל הזרם המתקדם רגע לפני ההחזרה, ההיפוך של 180 מעלות שעבר כעת מציב אותו באותו מופע עם הזרם המתקדם. כעת, כאשר שני הגלים המוחזרים בחזרה לכיוון העומס נמצאים במופע עם הגלים המתקדמים, נוצר סיכום של המתח והזרם בנקודת החיבור. מכאן המסקנה: *ההספק המוכל בגל המוחזר מסתכם לגל המתקדם.*

לפני שנמשיך הלאה, עלינו לזכור כי מסקנה זו מבוססת על ההנחה כי תנאי מעגל פתוח מתקיימים בנקודת התיאום עבור הגל המוחזר המתקדם לכיוון המחולל. ההנחה התבססה על הדמיון בין מקדמי ההחזרה שמצאנו בנקודת התיאום לפי התאבכות הגלים ואלו הידועים שקיימים בסיים קו פתוח. אפשר לאמת הנחה זו בדרך חילופית, המבוססת, לדוגמה על תיאורית השדה המגנטי במעגל פתוח מחלק 3.

נסתכל בתחילה על הערך השקול של כל הזרמים העוברים בנקודת התיאום ברגע בו שני הגלים המוחזרים יוצרים את התוצאה של $\theta = 180^\circ$, ברגע זה נוכל לראות נפילה פתאומית בזרם הקו הנובע I עקב ביטול הגלים כשהגל הנוצר מהגל המוחזר מכונן בדיוק במופע הפוך עם הגל המתקדם.

נפילה זו מוצגת באופן גרפי בציור 6B, במקום בו הזרם הנוצר המקורי I (כאילו שלא מחובר בד-תיאום) נופל פתאום לערך הנוגעי החדש הנוצר Γ מההשפעה של אי רציפות בד-תיאום. כעת, אם נזכר בקיצור בתיאורית השדה במעגל פתוח המוצגת בחלק 3 פסקה 2, אנו יודעים כי כאשר הזרם נופל, גם השדה המגנטי נופל. השינוי בשדה המגנטי יוצר שדה חשמלי השווה לירידה באנרגיה של השדה המגנטי. השדה החשמלי החדש מתווסף במופע לשדה החשמלי הקיים, ויוצר עליית מתח בנקודת התיאום. עליה זו במתח מתחילה כעת גל מתח הנע בכיוון ההפוך, שהוא כעת בעצם הכיוון של הגל המתקדם ולכן הוא מתווסף אליו. השדה החשמלי שגדל (כעת שדה חשמלי מתקדם מוגדל), בתנועתו לכיוון העומס, יוצר שדה מגנטי חדש השווה בגודלו אך בקוטביות הפוכה לזו של השדה המקורי. שדה מגנטי חדש זה גורם כעת לזרם להבנות מחדש לאותו גודל כמין הזרם המוחזר המקורי, אבל בקוטביות וכיוון הפוכים. כך שגל הזרם החדש גם הוא נע כעת באותו כיוון ובאותה קוטביות כמו הגל המתקדם, מתווסף אליו ומגדיל אותו כמו שגל המתח שהוחזר חזרה התווסף אל גל המתח המתקדם והגדיל אותו.

אם נבחן את תגובת שדה מתח-זרם דרך שרשרת האירועים הטבעית שלהם, ניתן לראות שהגענו לאותה מסקנה שהגענו אליה קודם, ובכך הצדקנו את ההנחה כי מקדמי החזרה המתקבלים בנקודת התיאום הגדירו מעגל פתוח עבור הגל המוחזר. בכך אומת הקיום של החזרתיות בנקודת התיאום, יחד עם התוצאה שגם המתח המוחזר וגם הזרם המוחזר וכמובן ההספק המוחזר הקשור איתם מתווספים למעשה לגל המתקדם. ולכן כאשר סיומת הקו איננה מתואמת וגורמת לקיום הספק חוזר בקו, הסכום של ההספק המתקדם וההספק המוחזר בחזרה (הנע רק בכיוון העומס) חייב להיות גדול מההספק הנמסר לקו על ידי המחולל לבדו. ומכיוון שהראנו איך בד-תיאום פועל לביטול החזרת מהעומס, ענינו בכך על השאלה המקורית הנוגעת למאפייני בד-תיאום.

עם יג"ע של 3:1 ו- $\rho = 0.5$, 100 וואטים המסופקים על ידי המשדר יפיקו 133.3 וואטים של הספק מתקדם ו-33.3 וואטים של הספק חוזר. בהזנחת הפסדים, 100 וואטים אכן יספגו בעומס. מציור 4, מוחזר הספק בשיעור $\rho^2 = 0.25$, או 25 אחוזים מההספק המתקדם, ו-75 האחוזים הנותרים נספגים בעומס ($1 - \rho^2 = 0.75$). ההספק המתקדם הוא $1/(1 - \rho^2)$ פעמים ההספק המסופק, כך ש- $1/0.75 = 1.333$, והרי 1.333 פעמים 100 וואטים הם 133.3 וואטים.

בדוגמה אופיינית מהחיים, עם קו שטוח בעל ניחות של 0.50 db (מקביל לכ-60 מטר RG-8/U ב-4 MHz, כ-30 מטר ב-14 MHz, או כ-30 מטר RG-59/U ב-4 MHz), אם העומס מתואם באופן מושלם לקו (יג"ע 1.0) 100 הוואטים המסופקים לקו יונחתו ל-89.13 וואטים במהלך המסע אל העומס. אבל עם עומס לא מתואם היוצר יג"ע 3:1 תוספת הניחות בדרך אל העומס היא 0.288 db. ההספק המתקדם בנקודת התיאום המצומד יהיה 124.78 וואט (133.3 וואט פחות 0.288 db), ו-111.21 וואטים (124.78 פחות 0.50 db) מגיעים אל העומס. 27.80 וואטים (25 אחוזים) יחזרו, וישאירו 83.41 וואטים לספיגה בעומס. מתוך 27.80 הוואטים המוחזרים יגיעו לכניסה 24.78 וואטים ויצטרפו ל-100 הוואטים ממקור ההספק לסך של 124.78 וואטים של הספק מתקדם. ההפרש של 5.72 וואטים בין ההספק הנספג בעומס במקרה המתואם ובין ההספק הנספג בעומס במקרה של חוסר תיאום עם יג"ע 3:1 (0.288 db) הוא חסר משמעות.

מידע על דרך החישוב של ערכים אלה יוצג בהמשך. ערכים אלה הם אופייניים לנתונים המתקבלים במדידות שגרתיות אמיתיות במעבדות מקצועיות. הם מספקים עדות נוספת שההספק המוחזר הוא אמיתי ולא מדומה. אם הוא היה מדומה, לא יותר מ-66.85 וואטים (75 אחוזים מ-89.13 וואטים) היו זמינים במקרה של עומס לא מתואם עם יג"ע 3:1. אבל 83.41 הוואטים הנספגים במציאות בעומס הם 93.58 אחוזים מההספק הנספג במצב של עומס מתואם. ההפסד של 6.42 אחוזים משתווה בהחלט לניחות הקו לבדו.

המשך יבוא.....

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 4 – מבט לתוך מראה מצומדת - המשך

(הערת המתרגם: בתהליך תרגום המאמר, התלבטתי לגבי תרגום המונח stub לעברית. חיפוש בספרות הקיימת העלה מספר מונחים עבריים: גדם, ענף, יתד ועוד. בחרתי להשתמש במונח בד-תיאום עקב דמיונו של ה-stub לענף (בד) קטום. לאחר פירסום החלק הראשון של חלק 4 נאמר לי כי המונח המקובל היום הוא יתד. למרות זאת, אני ממשיך להשתמש במונח בד-תיאום מטעמי המשכיות.)

רשתות תיאום ומכניקת ההחזרות

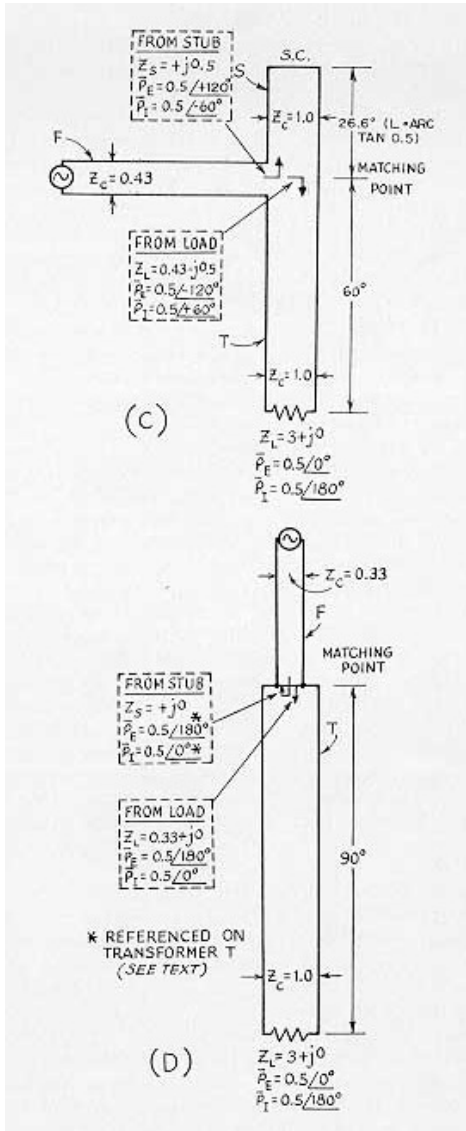
נרצה כעת להתעמק יותר בעקרונות התאבכות הגלים שהודגמו תוך שימוש בטכניקת בד-תיאום, כדי ללמוד איך העקרונות הללו ישימים הן לגבי שנאי תיאום טורי של רבע אורך גל והן "מתאם אנטנה" אופייני של חובבי רדיו (רשת תיאום קו) המוכר גם בתור Transmatch. במטרה להבהיר את הכלליות המהותית של עקרונות אלה עלינו לפתח כמה מושגים נוספים הנוגעים לתיאום בעזרת בד-תיאום וננוע בקו שונה של נימוקים. כפי שניתן לשער מן הדוגמה שהוצגה, העיקרון הבסיסי מאחורי תהליך ביטול החזרות הוא שכל גל מוחזר יכול, בנקודה בה ביטול ההחזרה מתבקש, על ידי התאבכות עם גל בעל גודל ומופע זהים אבל עם סימן הפוך (סימ. 35 עמ' 58). קו תמסורת באורך המתאים, שצד אחד שלו מתנהג כמו נתק והצד השני שלו מקוצר, הוא בעל התכונות הדרושות כדי לפתח גלים מבטלים במופע המתאים לגל אותו יש לבטל.

גלים מבטלים יכולים להתפתח על ידי שימוש בסידורים שונים של קוים, אבל כדי להדגים את העיקרון, נשתמש בסידור שהצגנו, וכפי שנראה בציור 7, סידור זה מציג תיפקוד התיאום בפועל. ציור 7A הוא הייצוג המקובל של בד-תיאום טורי אופייני (נשתמש בערכים מהדוגמה הקודמת של יג"ע 1: 3) ובו קטע F נקרא קו ההזנה, קטע S הוא בד-תיאום וקטע T הוא קטע שינוי-העכבות שיקרא להלן ה"שנאי". כעת נדון בהם ביתר פירוט. כדי שההסבר יהיה יותר מובן, ציור 7A שורטט מחדש כפי שנראה בציור 7B ובו בד-תיאום והשנאי משורטטים כקטע אחד רציף של קו ישר. קטע זה של קו ישר יקבל כעת חיים כליבו של המנגנון להפקת התאבכות גלים שנמצא בכל פעולה של בד-תיאום. זה מכיוון שאורכו הפיסי יכונן באופן שרירותי כך שהגלים המוחזרים בכל קצה יוחזרו במשרעת שווה, ובמופע שווה אך עם סימן הפוך.

ראינו קודם כי גל מתח מוחזר ללא שינוי מופע מנתק - מעגל פתוח (או מכל סיומת התנגדותית הגדולה מעומס מתואם) ומוחזר עם הפיכת מופע בת 180 מעלות מקצר (או מכל עומס התנגדתי הקטן מעומס מתואם). ההיפך הוא הנכון עבור גל הזרם. כך שמנקודת המבט של התנהגות ההחזרה, קצה אחד של הקו הישר יחשב כמו נתק והקצה השני כמו קצר. התכונות של העומס יקבעו איזה קצה יהיה הקצר ואיזה יהיה הנתק. בדוגמה שלנו שבציור 7B צד העומס יתנהג כמו מעגל פתוח ככל שהדבר נוגע להחזרות גלים והקצה השני (בד-תיאום) הוא הקצר. התהליך המתרחש בקטע קו ישר זה במהלך ההוצרות של יחסי ההתאבכות-מבטלת-הגלים היא כדלקמן. נניח כי גל מתח או זרם נכנס לקטע הקו בנקודת הכניסה של קו ההזנה. ההספק מתחלק, חלק אחד של הגל נע לכיוון קצה אחד של הקטע והגל השני נע בכיוון הפוך. אחרי שכל חלק מהגל עובר החזרה אחת כל אחד מהגלים המוחזרים יהיה בעל אותו מופע אבל בסימן הפוך, או קוטביות הפוכה, בחזרה אל נקודת הכניסה.

קוטביות המופע ההפוכה בין שני הגלים המוחזרים (המגיעים מכיוונים הפוכים) נוצרת כי ההחזרה בקצה אחד מלווה בהפיכת מופע בת 180 מעלות, בעוד שהחזרה מהקצה השני היא ללא הפיכת מופע. כמו שצוין לעיל, היפוך המופע בקצה אחד אבל לא בשני נגרם על ידי תנאי החזרה הפוכים בשני הקצוות של הקו, קצה אחד נתק והקצה השני קצר. שים לב בציור 7 שבכל אחד מהמקרים, המופעים של הגלים המוחזרים (גם המתח וגם הזרם) הפוכים בצדדים הנגדיים של קו ההזנה כשהם חוזרים מכיוון בד-תיאום ומכיוון העומס. נקודת הכניסה של הגל, במקום שבו מחובר קו ההזנה, היא נקודת התיאום, ומחלקת את קטע הקו הישר לשני חלקים משלימים: החלק של בד-תיאום, S והחלק של שנאי העכבות, T.

מבחינה חשמלית, כל חלק הוא המשלים של האחר, כי הגלים המוחזרים מהקצה של כל חלק החוזרים לנקודת התיאום הם בעלי גודל זהה ויחס מופע הפוך. בזה טמון הבסיס למונח אי-תיאומים משלימים שנוכר קודם, כי כל חלק מייצג אי-תיאום משלים לקו ההזנה.



בקרב נראה כי מושג אי-תיאום משלים זה הינו בעל חשיבות גדולה לתיאום באופן כללי, מכיוון שליחס המשלים יהיה תוקף ללא חשיבות באיזו נקודה לאורך קטע הקו של שנאי בד-התיאום תחובר כניסת קו ההזנה. אמת זו מנצחת כי הגל המבטל והגל המוחזר האמור להתבטל יהיו באותו גודל ומופע זהה אך בעל סימן הפוך בכל נקודה לאורך קטע הקו בין רבע אורך הגל בה נחבר את קו ההזנה. הדבר נכון בשני תנאים: (1) העכבה האופיינית Z_C של קו ההזנה F חייבת להיות זהה לרכיב ההתנגדותי של העכבה המומרת כפי שהיא מופיעה בקו השנאי בנקודת ההזנה, (2) אורך הקטע של בד-התיאום S צריך להיות מכוון כך שיווצר הגב שווה אך בקוטביות הפוכה להגב הקו המופיע בנקודת ההזנה. האורך ניתן לחישוב מתוך הביטוי

$$S_L = \arctan \frac{10}{\text{כאשר:}}$$

S_L הוא אורך בד-התיאום במעלות חשמליות jX הוא עכבת הקו (מתקבלת מהתרשים הגרפי) Z_C העכבה האופיינית של קטע בד-התיאום (כאן Z_C כי אנו משתמשים בעכבות מנורמלות. ראה הערה 22)

קטע קו השנאי T ממיר את העומס לערכים המשתנים לאורך הקו. לכן, לתיאום נכון, הערך Z_C של עכבת קו ההזנה F , תלוי במיקום של נקודת ההזנה וגם להפך. מושג זה לא מוערך בדרך כלל, ובוודאי איננו מובן בקלות מהתרשימים הרגילים של אורך בד-התיאום ומיקומו המופיעים בפירוטמים רבים.

בד-תיאום לעומת רשת תיאום

כעת אנחנו מתקרבים לרגע בו נראה כיצד מורחבים העקרונות של בד-תיאום לפעולתה של רשת תיאום קו. אם נביט הלאה לתוך מאפייני ההחזרה של מה שנחשב בדרך כלל כטכניקה שונה לתיאום, תופיעה לנו התגלות מדהימה של קו דמיון בין כל השיטות השונות, בד-תיאום, סיכת

שיער (hair-pin), שנאי $\lambda/4$, transmatch, רשת L , וכו', כולם באותה קטגוריה. ויש סיבה הגיונית לדמיון הזה. לכל השיטות הנ"ל יש דבר משותף: הטיפול בהחזרות! החזרות ותיאום מיושמים בשנאים המושגתים על החזרה מהדקי הקצה, שם יש שינוי בגודל העכבה. כפי שהראנו בחלק 3, כל שינוי פתאומי בגודל העכבה יופיע כאי רציפות בזרימה החלקה של הגל האלקטרומגנטי, ויגרור יצירת החזרה. השנאי מבצע את תפקיד תיאום עכבות הכניסה והיציאה על ידי בקרת הגודל והמופע של הגלים הנוצרים על ידי החזרות בגבולותיו, או מהדקי הקצה, כך שכל החזרות הנוצרות בכל אחד מהקצוות מתבטלות על ידי אלה המגיעות מהקצה השני (סימ' 35 עמ' 58).

(המשך בגליון הבא)

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 4 – מבט לתוך מראה מצומדת – המשך מגיליון 200

זוהי היתה הכוונה בביטוי "החזרות מבוקרות" בחלק 1, פיסקה שלישית. המסקנה ממה שנראה כחריג בכך שבד-התיאום יוצר אי-תיאום במקום תיאום, היא בכך שאנו מתאמים כדי למנוע החזרות, אך אי אפשר לתאם בלעדיהם כאשר קיימים הפרשים בערכי העכבות.

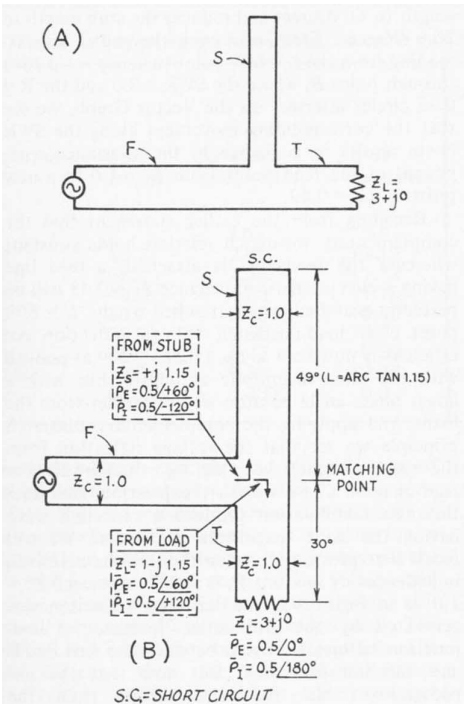


Fig. 7 – At A, the concept of stub matching with a series-connected stub. At B, the same matching arrangement redrawn. At C, a similar matching arrangement but with different stub and transformer line lengths. At D, a quarter-wave line-transformer section evolves as the stub length goes to zero.

ממשוואה 1 בחלק 3, אנו יודעים כי גודל החזרה מהעומס נקבעת על ידי היחס בין עכבת העומס Z_L ועכבת הקו Z_C של קו השנאי. וכך, על ידי קידום ההבנה של התפקיד שממלאות החזרות בתהליך תיאום העכבות, יהיה מעניין למצוא עוד שני היבטים נוספים מתוך התרשים הגרפי. ראשית, גודל החזרה, או היג"ע, קובע היכן לאורך קטע השנאי T יהיה הרכיב ההתנגדותי של העכבה E/I שווה לעכבה האפיינית של הקו Z_C . מיקום זה, כפי שזכור, הוא נקודת התיאום, וקובע את האורך של קטע השנאי T. בהתבוננות זו, זכור כי הקוטר של מעגל היג"ע יחסי לערכו של היג"ע (VSWR). על ידי תנועה לאורך המעגל $R=1.0$ אנו יכולים לראות שככל שקוטר מעגל היג"ע משתנה, נקודת המפגש בין המעגל של $R=1.0$ ומעגל היג"ע זהו בהתאם. קו מתווה רדיאלי המשוורט דרך נקודת המפגש ונמשך אל סקלת אורך הקו L, יראה לכן את המרחק הזויתי (T) מהעומס אל נקודת התיאום עבור יג"ע נתון. אנו מכירים הסתכלות זו בתור הדרך המקובלת לשימוש בריאגמט סמיט לקביעת מיקום בד-התיאום כאשר העכבה Z_C של קטע השנאי וקו ההזנה שווים. שנית, שימוש בקו מתווה רדיאלי באופן דומה כאשר אנו עוקבים אחר המעגל של $SWR=3.0$ במקומות שהוא חוצה את המעגלים של התנגדותיות אחרות, אנחנו רואים כי עבור יג"ע נתון, הרכיב ההתנגדותי של עכבת הקו E/I משתנה בהתאם למיקום לאורך קטע השנאי. שני הבטים אלה ביחד, מגלים גמישות המתאפשרת בגישה לתכנון תיאום שמקדם אותנו לעבר הצגת הדמיון הבסיסי של טכניקות התיאום השונות. גמישות זו כוללת את שלשת התנאים הבאים, שיוסברו בפירוט:

(1) אין מגבלה על העכבה האופיינית Z_C של קטע השנאי T הדרושה שתהיה שווה לזו של קו ההזנה F – היא יכולה לנוע בתחום בין עכבה נמוכה (קואקס) לגבוהה (קו פתוח).

(2) אפשר למצוא את האורך של קטע השנאי בעל עכבה אופיינית Z_C שימיר את הרכיב ההתנגדותי של העכבה לערך העכבה המתואמת של קו ההזנה F השונה מזו של עכבת קטע השנאי. בכל אופן, אורך קטע השנאי אינו מוגבל למרחק בין העומס לנקודה הראשונה בה הרכיב ההתנגדותי שווה לעכבת קו ההזנה Z_C . קטע השנאי יכול להשתרע מנקודת העומס עד לאחת משתי הנקודות בהן הרכיב ההתנגדותי משתווה לעכבה של קו ההזנה Z_C על פני מעגל היג"ע, או כל אורך חשמלי הנמשך מעבר לנקודות אלה בכפולה שלמה של חצי אורך גל. (נראה בהמשך כיצד השימוש ב-Transmatch או ברשת L מסייעת בהשגת האורך החשמלי, וכך מסיירים את כל המגבלות לגבי כל אורך מוגדר של קטע השנאי, כלומר, מהעומס לאורך כך הדרך עד לנקודת ההפעלה)

3) הפעולה של החלק שמשמש בתור בד-התיאום יכולה להתבצע על ידי כל הגב שאינו מפזר הספק, או כל רכיב מקובץ קבוע (סליל, קבל), או על ידי קטע קו נפרד בעל עכבה אופיינית בערך סביר והוא באורך מתאים כדי לייצג את ערך ההגב הדרוש. האורך החשמלי של בד-התיאום קשור תמיד ישירות לעכבה שלו. כעת נסתכל במונחים של מכניקת הגלים וההחזרות איך התיאום המושג בטכניקות השונות שמנינו קודם מתואר על ידי שלושת הפרמטרים הבאים: עכבת קטע השנאי, אורך קטע השנאי והאלמנטים של הגב בד-התיאום. בדוגמה הקודמת בה השתמשנו בטכניקת בד-תיאום היו ההחזרות המופיעות בכל קצה של קטע השנאי בעלות גודל שווה (0.5) או יג"ע של 1:3 עבור העומס בקצה אחד ובד-התיאום בקצה השני).

במלים אחרות, הגדלים של כל אחד מאי-התיאומים המשלימים היו זהים. לעת עתה נשמור על עכבה אופיינית $Z_C=1.0$ לכל קטע הקו שנאי – בד-תיאום, אך בהתבסס על תנאים 1 ו-2 הנ"ל, אנחנו יכולים לשנות את עכבת קו ההזנה ככל שהתנאים מתייבשים. נבדוק כעת איך משפיעה הגדלת אורך קטע השנאי וקיצור קטע בד-התיאום בהתאם למשוואה 10. לדוגמה, בהתייחס לציוור $7C$ ולתנאים הוקטוריים, הבה נרחיק את נקודת החיבור של קו ההזנה, מ- $L=30^\circ$ ל- $L=60^\circ$. הדבר מגדיל את אורך קטע השנאי ל- 60 מעלות ומקטין את אורך בד-התיאום ל- 26.6 מעלות. אם נסתכל על הקו הרדיאלי הנמשך מנקודת $L=60^\circ$ (היכן ש- $120^\circ=0$) דרך נקודה B , שבה נפגשים המעגלים $SWR=3.0$ ו- $R=0.43$ בתנאים הוקטוריים, נראה כי התנועה המתאימה לאורך מעגל היג"ע יוצרת שינוי ברכיב ההתנגדותי בנקודת ההזנה מ- $R=1.0$ ל- $R=0.43$.

אם נזכור מהצורה קודמת שקשר אי תיאום משלים נשמר קבוע ללא תלות היכן מחברים את קו ההזנה, קו הזנה בעל עכבה אופיינית $Z_C=0.43$ שיחובר בנקודה $L=60^\circ$ יקבל תיאום מושלם. מקדם החזרת המתח של חוסר תיאום העומס בנקודה B יהיה כעת $120^\circ < \rho < 0.5$ באותו גודל כמקודם, אך עם זווית מופע גדולה יותר מכיוון שכעת אנחנו רחוקים יותר מהעומס. על ידי הפעלת עיקרון אי-התיאום המשלים, אנו רואים כי החזרת המתח מאי התיאום של בד-התיאום נהיה $120^\circ < \rho < 0.5$, כמו שנראה בנקודה C . נשאלת השאלה, כיצד יוצר צירוף חדש זה גל ביטול בעל אותו גודל כמקודם? הבה נזכור כי, קודם, כאשר עכבת הקו של קטעים S ו- T היו $Z_C=1.0$ כמו שבציוור $7B$, ההחזרה המבטלת נוצרה רק על ידי בד-התיאום, כי לא היה קיים חוסר תיאום בצומת הקו בין קו ההזנה F והשנאי T . אבל עכשיו כשעכבת קו ההזנה שונה מעכבת קטע השנאי, יש לנו אי רציפות נוספת בנקודת החיבור, שגם היא יוצרת החזרה. קטע בד-התיאום הקצר (הטורי) יוצר כעת החזרה קטנה יותר מוז שהיתה כאשר כל קטעי הקו היו בעלי $Z_C=1.0$, גודל החזרה מבד-התיאום מוקטן על ידי מידת החזרה הנוצרת כעת עקב אי-התיאום בין קו ההזנה לקטע השנאי. וכך על ידי עקרון אי-התיאום המשלים, גל הביטול הנוצר נשאר עדיין בגודל ובמופע הנכונים לשם ביטול הגל המוחזר מהעומס הלא מתואם בנקודת ההזנה החדשה שבקטע השנאי. גל ביטול זה נוצר בעליל על ידי אי-הרציפויות המשולבות גם של עכבות הקו השונות בצומת וגם של בד-התיאום עם האורך המתוקן. בכך תאמנו קו הזנה עם $Z_C=0.43$ לעומס של $Z_L=3+j0$ דרך קטע שנאי עם $Z_C=1.0$.

בהמשך לאותו קו מחשבה אנחנו יכולים, באופן הפוך, לקצר את קטע השנאי ולשנות את קטע בד-התיאום בהתאם ליחס הטנגנס במשוואה 10 כדי לקבל תיאום עבור קו הזנה בעל עכבה גבוהה יותר. אנחנו רק צריכים למקם את כניסת קו ההזנה במקום שבו הרכיב ההתנגדותי של עכבת קטע השנאי T יוחלף לערכה של Z_C של עכבת קו ההזנה שבו אנו רוצים להשתמש ואז לכוון את אורך בד-התיאום לביטול הגב הקו. כפי שהוסבר לעיל, מעגל ההתנגדות הנחתך על ידי מעגל היג"ע עבור אורך נתון של קטע השנאי, מראה את הרכיב ההתנגדותי בנקודת ההזנה. זהו גם הערך Z_C של קו ההזנה שיתואם באופן מושלם כאשר יחובר בנקודת ההזנה. הנתונים המוצגים בטבלה 1, שנלקחו מהנקודות לאורך המעגל $SWR=3.0$ בגרף הוקטוריים, מראים מספר דוגמאות נבחרות של אורכי קטע השנאי, ומדגישים חלק מהמידע הנוגע לדבר לשם הבהרה. שים לב במיוחד שהרכיב ההתנגדותי קטן ככל שאורך קטע השנאי גדל. מעניין לגלות כי כאשר נקודת ההזנה זזה מעבר לנקודת $L=45^\circ$, זוויות θ של מקדמי ההחזרה של המתח והזרם עוברים דרך 90 מעלות מכיוונים הפוכים, בהתאמה. התוצאה היא יצירת הזזה יחסית של 180 מעלות. כך הזוויות של מקדמי ההחזרה מתחלפות, זווית מקדם המתח הנוצר θ נעשית 180 מעלות וזווית הזרם נעשית 0 מעלות. זאת אומרת כי סימנת ההחזרה האפקטיבית בנקודת התיאום משתנית מקו פתוח לקו מקוצר כאשר קו ההזנה מחובר במרחק גדול מ- 45 מעלות מנקודת E_{max} ב- $L=0^\circ$. בקטע השנאי.

נבחן כעת את השפעת הגדלה נוספת של אורך קטע השנאי, עד אשר הרכיב הריאקטיבי של העכבה יעלם מעצמו ללא צורך ביד-תיאום כדי לבטל אותו. התרשים הוקטורי מראה כי תנאי זה מתרחש ב- $L=90^\circ$. בנקודה זו גל המתח המוחזר מאי ההתאמה בעומס הוא בדיוק בהיפוך מופע של 180 מעלות עם הגל המקדם ולכן לא מתפתח כאן רכיב ריאקטיבי. הרכיב ההתנגדותי של עכבת הקו בנקודה זו הוא $0.33 \times Z_C$ על התרשים. (ראה ציור 7D) ויוצר תיאום מושלם. שום החזרה לא מופיעה בקו הזנה של 0.33 אהם. הכיצד ?

שוב, עקב החזרה המבטלת בקטע השנאי ! שים לב לאורך הנוכחי של קטע השנאי – 90 מעלות, או רבע אורך גל. קטע השנאי לבדו תופס כעת את כל האורך של קטע הקו, וקטע בד התיאום נעלם. רק על ידי הזזת נקודת ההזנה לאורך קו השנאי לנקודה בה נעלם הרכיב ההגבי, נהיה הרכיב ההתנגדותי שווה ל- $Z_C/SWR=1/3$, ואנו גולשים ברציפות מבר-התיאום לתוך צורת תיאום של קטע שנאי של רבע אורך גל (ראה טבלה 1). זכור, שהעכבה האופיינית של השנאי היא עדיין $Z_C=1.0$, שנהיה הממוצע הגיאומטרי בין עכבת הכניסה והיציאה $\sqrt{0.33 \times 3} = 1.0$.

Transformer length L°	Stub length S°	Resistance component R	Stub reactance jX	Angle of Reflection Coefficient			
				Voltage		Current	
				Load mismatch θ°	Stub & line mismatch θ°	Load mismatch θ°	Stub & line mismatch θ°
0	0	3.0	0.0	0	0	180	180
10	48.2	2.42	+1.12	-20	+20	+160	-160
22.5	52.9	1.38	+1.32	-45	+45	+135	-135
30	49.0	1.00	+1.15	-60	+60	+120	-120
45	38.7	0.60	+0.80	-90	+90	+90	-90
52	33.0	0.50	+0.65	-104	+104	+76	-76
60	26.6	0.43	+0.50	-120	+120	+60	-60
67.5	19.8	0.38	+0.36	-135	+135	+45	-45
90	0	0.333	0.0	180	180	0	0

מנקודת מבט מתוך הצד הפנימי של השנאי, רמת העכבה של הדקי הכניסה מוקטנת ביחס 1:3 (שנותן לנו התנהגות של החזרה מקצה מקוצר), כמו שעכבת היציאה (בעומס) מוגדלת ביחס של 3:1 (כמו התנהגות של נתק בהדקי היציאה). לפיכך זה ברור כי לקטע שנאי של רבע אורך גל, $\lambda/4$ יש עכבה אופיינית Z_C השווה לממוצע הגיאומטרי של העכבות בשני קצותיו ויש חוסר תיאום שווה בשני הקצוות היוצר החזרות שוות בשני הקצוות. החזרות אלה משני הקצוות מבטלות זו את זו בצומת כניסת קו ההזנה לקטע השנאי, כי גלים המוחזרים מאי-התיאום ביציאה מוחזרים לצומת הכניסה בהיפוך מופע של 180 מעלות בדיוק עם הגל המוחזר מחוסר התיאום בהדקי הכניסה. זה קורה בגלל שהגל המוחזר עקב חוסר התיאום בעומס נע 90 מעלות מנקודת הדקי הכניסה עד לחוסר התיאום בעומס, ועוד 90 מעלות בדרך חזרה לכניסה. לשם הבהרה נוספת למה שהתרחש כאן, ניוזכר כי קודם, כאשר קו ההזנה F והשנאי T היו בעלי עכבה Z_C שווה (ציור B7), הגל המוחזר המבטל נוצר במלואו על ידי אי התיאום של בד-התיאום. במקרה הנוכחי בו אורך בד-התיאום הוא אפס, הגל המוחזר המבטל נוצר במלואו על ידי אי התיאום של 3:1 בצומת בין קו ההזנה והשנאי. זוית מקדם החזרת המתח של הגל המוחזר עקב אי התיאום בצומת קו ההזנה היא $\theta=0^\circ$ יחסית לעכבת קו ההזנה Z_C כי העכבה האופיינית של השנאי גדולה פי שלשה. בכל אופן, אחרי ששני הגלים המוחזרים, מאי התיאום של צמתי הכניסה והעומס התחברו כדי לבטל זה את זה, ההחזרה מהדקי הכניסה אינה נעה עוד בכיוון המחולל, אלא מוחזרת לתוך השנאי לכיוון העומס באותו אופן כמו הגל המוחזר מבר התיאום שמקודם. אי לכך, בהתייחסות מתוך השנאי, זוית מקדם ההחזרה של ההחזרה מהצומת היא $\theta=180^\circ$, כפי שמוצג בטבלה 1. באחד הפרקים הבאים נראה מדוע שנאי טורי $\lambda/4$ הוא הופך עכבות לכל עומס מרוכב בהדקי העומס, ואינו מוגבל לעומס התנגדותי טהור.

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 5 – יג"ע נמוך מהסיבות המוטעות

בחלק 1 של הסידרה ניתנה הצהרה כי בין חובבי הרדיו נפוצים מושגים מוטעים בנוגע ליג"ע והחזרות, הן בכתב והן באויר. לכן, נשוב ונאמר, סידרה זו נכתבה עם מטרה עיקרית מול עיני המחבר – לזהות אחדים מן המושגים המוטעים ולספק את התשובות הנכונות בתקווה להבהיר מעט מהבלבול הנובע מן המושגים המוטעים. תחום אחד בולט של בלבול נוגע לטבעו של ההספק המוחזר וכיצד יש להתייחס אליו במעגל. בקיצור, האם זו *מציאות* או *דמיון* ולאן הוא הולך? טבעו של ההספק המוחזר נידון בפרק 3, שם הוצג מדוע ההספק המוחזר הוא הספק ממשי. בפרק 4 התעמקנו בשאלה לאן הולך ההספק המוחזר, תוך דיון בתפקידה של ההחזרה בתיאום מצומד. שם שימשה תצורת בד-התיאום כדי להדגים את פעולת הגל המשלימה את תפקיד התיאום וכיצד היא מפיקה את סך ההספק המתקדם מצירוף הספק המקור עם ההספק המוחזר. נזכור כי לימוד פעולת גלים זו הסירה את המסתורין כיצד עומס לא מתואם יכול ל*ספוג* את כל ההספק המסופק על ידי המקור.



למדנו זאת כאשר ראינו כיצד ההספק המוחזר מתוסף להספק המקור בנקודת התיאום המצומד כך שניתן להחסיר את ההספק המוחזר מן הסיכום, הגדול יותר, של ההספק המתקדם בנקודת התיאום וההפרש נטו הנמסר לעומס שווה להספק המקור.

כעת, כאשר ביססנו את הקשרים בין הספק המקור, ההספק המוחזר וההספק המתקדם במונחים של מכניקת הגלים של התיאום המצומד, יש לנו את הרקע הדרוש והכלים לזהות מעט מהשימוש המוטעה של היג"ע, ולהבהיר בפירוט רב יותר את הסיבות לאי-ההבנה שעדיין שולטת בנוגע למה שקורה להספק המוחזר מאנטנה שאיננה מתואמת לקו ההזנה

שלה. הבהרה נוספת של התפיסה המוטעית תחזק את ההתייחסות אל קו הזנה לא מתואם כהתקן פשוט לשינוי עכבות, בעיקר כשנראה בהמשך כיצד רשת תיאום מסוג Transmatch ומעגל רשת פאי (π -) נקודת מבט נוספת המתייחסת לדיון בפעולה המעשית של קו ההזנה תושג כאשר כמה מהמחשבות שהוצגו בחלקים 1 ו-2 יורחבו כאן.

אם למספר קוראים נדמה כי החשיבות של היג"ע צומצמה יתר על המידה או הורדה בדרגה בדיון שהוענק לו בחלק 1, לא זו היתה הכוונה. הכוונה היתה למקד את תשומת הלב בחשיבות הבנה נכונה של נושא ההחזרות

והיג"ע ובעומק כזה שנוכל להשיג שליטה מלאה עליהם בתכנון מערכת אנטנות. לכן, במקום לתת ליג"ע להפוך למלך המשתלט ומונע מאיתנו מרחב וגמישות, אנחנו יכולים להשתמש ביג"ע בשיקולי תכנון המערכת בדרכים רבות הקיימות באופן בלתי מוכר לנו.

כמה מאיתנו מקבלים ללא עוררין את צו המלך בגיזום דיפול ל-80 מטר, במאמצים רבים כדי לקבל את התיאום המקסימלי האפשרי לקו הזנה באורך חצי אורך גל בתדר ספציפי, אבל לא יכולים לפעול יותר מכמה קה"ץ מאותו תדר מבלי לפחד מהתוצאות הרות האסון של הפרת צו המלך. אבל כמה מודעים לכך שניתן להערים על המלך יג"ע ולהימנע מעונשו מבלי לגזום את הדיפול או את קו הזנה? וכמה מודעים לכך שניתן לבצע את התיאום בצד המשדר של קו הזנה בכל תדר בתחום 75-80 מטר ללא פגיעה משמעותית בהפסדי ההספק למרות היג"ע הקיים בקו הזנה? למרות שזה סותר את המילים שפורסמו במאמרים רבים במשך עשורים רבים, התגלות זו היא אמיתית, ומצביעה על הגמישות והחופש שקיימים באמת בתכנון מערכות אנטנה בכל גלי ה"ג, פשוט על ידי הבנה טובה יותר של היג"ע והחזרות.

סיבות תקפות ליג"ע נמוך

ישנן סיבות טובות ותקפות שנתעניין ביג"ע ובהחזרות, מנקודת מבטו של החובב ומנקודת מבט מסחרית – עם זה אין ויכוח. כמו שאנו יודעים היטב, סיבות אלה קשורות בעיקר עם פריצות מתח, כושר נשיאת ההספק, נצילות והפסדים של קו הזנה ועכבת הכניסה של הקו בהתייחס לצימוד יציאת המשדר. עבור חובבי רדיו, יכולת נשיאת ההספק ומתח פריצה אינם מהווים בעיה רצינית אלא אם אנחנו מנסים לדחוף את מלוא ההספק המותר דרך RG-58/U או RG-59/U ביג"ע גבוה. הפסדים ונצילות חשובים לנו, אך ברמה קטנה בהרבה מזו שבדרך כלל מעריכים, ומסיבה אחרת מזו שאנו ערים לה, כפי שנראה מיד.

הסיבה העיקרית שבגללה צריכים חובבי הרדיו להתעניין (אך לא להיות היסטריים) ברמת היג"ע היא בקשר לעכבת הכניסה לקו הזנה והצימוד למשדר. נדון בדבר בפרק מאוחר יותר, שם נראה איך לאלף את העכבה ולקיים צימוד בכל ערך יג"ע הגיוני, ובאותו דיון, אי-החשיבות היחסית של עבודה עם אנטנה תוהדת תיעשה ברורה גם היא. אבל יש חשיבות גדולה שנבהיר קודם אחדות מאי-ההבנות הנפוצות אודות יג"ע והספק מוחזר, מכיוון שהן גורמות להרבה חובבים לשאוף ליג"ע נמוך מהסיבות המוטעות, השגויות ולעתים קרובות חסרות תועלת. כנראה שאחת התפיסות המוטעות הנוגעות ליג"ע נפוצה בקרב קהילת החובבים היא הדעה השגויה שיש יחס אחד-לאחד בין הקטנת ההספק המוחזר והגדלת ההספק המשודר. במילים אחרות, כל הפחתה של וואט מההספק המוחזר היא תוספת של וואט להספק המשודר. זה לא כך, אבל המספר העצום של חובבים שהוטעו להאמין בהנחה הרופפת, הפסולה והלא מדעית הזו הוא בלתי נתפס.

מושג קשור נוסף, נפוץ, אך מוטעה אף הוא, שכאשר כבל קואקסיאלי מחובר לעומס לא מתואם, יהפוך הכבל הקואקסיאלי לחלק מהמקרין ויגרום לקרינה מקו הזנה בגלל הגלים העומדים (ראה הערה 18 בחלק 2). הדבר אינו נכון כי המתחים והזרמים בקו, והגלים העומדים הנובעים מהם, מתקיימים ומוגבלים בתווך הפנימי שבין המוליך הפנימי והסיכוך החיצוני של הקואקס. שום גלים עומדים לא מתפתחים על הצד החיצוני עקב חוסר תיאום. למרות זאת, קרינה מקו הזנה יכולה להיגרם על ידי גלים עומדים על הצד החיצוני של הקואקס הנגרמים עקב זרם אנטנה לא מאוזן אם אנטנת דיפול מאוזנת מוזנת על ידי קואקס ללא שימוש בכלון. קרינת קו הזנה זו, יכולה להיות בעלת חשיבות או לא, אבל הנושא מכוסה היטב על ידי McCoy (סימ' 45).

אי ההבנה כיצד מתקבלת התועלת מיג"ע נמוך, וכמה מעט תועלת מתקבלת, דוחפת רבים מאיתנו להשיג ערכי יג"ע נמוכים הרבה מתחת לרמה שמתחיה תוספת התועלת כבר לא משמעותית ביחס למאמצים המושקעים בהשגתם. בגלל סיבה זו, לעתים קרובות אנחנו קובעים ליג"ע גבולות נמוכים באופן בלתי מציאותי ללא צורך, המגבילים את רוחב פס ההפעלה, או טווח התדרים השימושיים בכל צד של תדר תהודת האנטנה, לטווח יותר מוגבל ממה שהכרחי. בתיקון אי הבנה כמו זו, כדאי בדרך כלל ללמוד כיצד נוצרה אי ההבנה מלכתחילה.

(המשך יבוא)

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגם: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 5 (המשך) – יג"ע נמוך מהסיבות המוטעות

גשרי "עכבות"

אחד ההיבטים של אי ההבנה נוצר במידה רבה על ידי פרשנות צרה ומוטעית של עקרונות התיאום הנמצאים בהוראות אחדות של מכשירים כגון גשר רעש (noise bridge) או antenna-scope לקביעת "עכבת" ההדקים של אנטנה. בניגוד למה שמוצהר באחדות מההוראות, מכשירים אלה אינם מודדים עכבות, הם יכולים למדוד רק התנגדות וגם זאת רק בהעדר נוכחות של הגב. (הצעה: חפש והשווה את ההגדרה של עכבה ושל התנגדות. הביטוי עכבה משמש לעתים בשגגה במקום שיש להשתמש בביטוי התנגדות. כמו כן מוזמן הקורא להסתכל בסימ. 46).

לפיכך, על ידי שימוש במכשירים אלו אנו מסוגלים למצוא רק את הרכיב ההתנגדתי של עכבת האנטנה ורק בתדר התהודה של האנטנה, מכיוון שזו התדירות היחידה בה העכבה חסרת רכיב ריאקטיבי, או $R + j0$.

בהמשך למגמה זו, ניתן דגש מוטעה לדרישה שמקריין האנטנה עצמו יהיה בתהודה וכך טופחה הטעות שהאנטנה צריכה להיות בתהודה כדי להקריין את כל ההספק המוזן לה²⁵. כך, רבים הוטעו להאמין שאנטנה לא תתפקד כהלכה בכל תדר אחר פרט לתדר התהודה. (ראה חלק 2 של הסידרה, הערות 5, 6, 7 וסימוכין 20, 21 ו-24). בנוסף, הדגש על הדרישה הנוספת שתוצאת מדידת הרכיב ההתנגדתי תהיה שווה לעכבת הקו Z_C גרמה לנו במקרים רבים להגזים במשימה על ידי הגבהת האנטנה מעל הקרקע בצעדים קטנים למען השגת תוצאת מדידה מדויקת בחיפוש אחר תיאום 1.0 מושלם²⁶. (ראה חלק 2 של הסידרה, עמ' 22, הערה 15). התאמת הגובה בהפרשים גדולים כדי לקבל שליטה על זווית הקרינה בכיוון אנכי היא מעשית, אבל שליטה על התנגדות הקרינה על ידי כיוון גובה האנטנה אינו נחוץ, אינו מציאותי ולא מעשי כי התועלת שאנו חושבים להשיג בפעולה זו הינה אשליה.

האמת אודות כך תתברר בהמשך כשנראה מדוע אין כל הצדקה שהיא להמשיך את מאמצי התיאום בעומס במטרה לשפר אי תיאום של 1:2 או פחות, רק כדי להסיר את הגלים העומדים, למעט משיקולים של שיפור הנצילות. יתר על כן, בגלל ההגב המופיע כאשר אנחנו עוזבים את תדר התהודה, התיאום המושלם הקדוש שאנו מפריזים בהערכתו ומשיגים אותו על ידי כיוון קפדני של גובה האנטנה, יושג רק בתדר אחד ללא כיוון מחדש של אורך המקריין ובכך להמשיך את מעגל הקסמים המרושע. בכל אופן, המנהג הנפוץ של פילוסופיה זו בהפעלת מערכת אנטנה קיבעה אותנו לחלוטין לחשוב במושגים של שימוש בקווי תמסורת באורך של $\lambda/2$ ללא החזרות, ולהשיג את עכבת הכניסה ההתנגדית המושלמת של 50 אהם ללא רכיב ריאקטיבי על ידי הפעלה רק בתדר התהודה. כך נהיינו כבולים למעשה, מללמוד את ההשפעה האמיתית של ההגב בעכבת האנטנה, ואיך הקו ממיר כל עכבת סיומת באופן ישיר וניתן לחיזוי ולחישוב.

בהיעשותינו כה מתוכננים, רבים מאיתנו שכחו כי ניתן להשיג את עכבת הכניסה בת 50 אהם ללא רכיב ריאקטיבי, הנכספת מתוך עכבת האנטנה המומרת בכניסת הקו על ידי רשת תיאום פשוטה בכניסת הקו בתחנה, בדרך כלל הרבה יותר פשוט ממה שניתן להשיג בקצה הקו המחובר לאנטנה. למעשה, בכמה משדרים ניתן לתאם את עכבת הכניסה לקו כפי שנראית על ידי המשדר לערכי יג"ע של 1:2 או גבוה יותר לתיאום אופטימלי על ידי מעגלי יציאת המשדר עצמו. אם למשדר אין מספיק טווח תיאום, רשת תיאום-קו נפרדת בין המשדר והקו מציעה סידור תיאום חכם יותר מאשר לשחק משחקים ליד האנטנה בחוץ. נראה מדוע ישנם

²⁵ גלנצר "מלים נוספות על אנטנות" CQ יולי 1957, עמ' 40. ראה עמ' 48 לסימוכין נוספים.

²⁶ ראה הערה 25

מצבים רבים בהם אותה הגישה לתיאום יכלה להלקח בחשבון אפילו אם חוסר התיאום יוצר יג"ע של אפילו 5: 1 או יותר, כאשר מתרחקים מתדר התהודה העצמי של המקרין (סימ. 24)

קיים עוד מושג מוטעה הנובע גם הוא מהתלות המיותרת והבלתי מוצדקת בקו הזנה באורך $\lambda/2$ כדי להעתיק את התנגדות התהודה של האנטנה אל המשדר. מדובר בהשפעה של הגב עכבת הכניסה של הקו על תהודת מעגלי התיאום כאשר קו עם החזרות מחובר ישירות לרשת פאי. נתייחס למעגל התיאום של המשדר אשר מועמס ומכיוון בתחילה לתהודה עם עומס התנגדותי, ואז העומס משתנה כך שהוא מכיל הגב. אם רכיבי המעגל מכילים טווח כוונון מספיק לפצות על ההגב המוחזר ולהחזיר את המעגל לתהודה ברמת העמסה ראויה, אזי הכל בסדר. רכיבי מעגל היציאה עדיין רואים עומס התנגדותי ראוי כמו בהתחלה. הטעות בנקודה זו נוצרה על ידי מספר כותבים שניכר כי אינם מבינים מעגלי התהודה, המכריזים שכיוון מחדש של מעגלי היציאה יוצר הגב המוציא את המעגל מכיוון, גורמים העמסה לא נכונה, מגדילים את זרמי המעגל וגורמים להתחממותו. זה לא נכון – פרטים נוספים בחלק הבא.

יג"ע נמוך מהסיבות המוטעות

ערכנו דיון בנושא "יג"ע נמוך מהסיבות המוטעות", בתור בעלי נסיון (לפעמים לא במתכונן) בשימוש באנטנה מתואמת באופן מושלם המופעלת רק בתדר התהודה העצמית של האלמנט המקרין. אבל סיבה מוטעית אחרת לרצות יג"ע נמוך, היא ההתייחסות ליג"ע קו הזנה בתור הקריטריון היחיד לאיכות ביצועי הקרינה של אנטנה על פני פס תדרים, אנו נלהבים עם קבלת יג"ע נמוך על פני כל הפס או מאוכזבים אם היג"ע עולה בקצוות. זוהי בהחלט התייחסות מוטעית ליג"ע, כי ישנם מקרים בהם מתקיימים יג"ע נמוך וגבוה בדיוק באופן הפוך לגבי ההבנה על יעילות האנטנה על פני פס התדרים, מסיבות שיובהרו בקרוב. כתוצאה מההתייחסות מוטעית זו ליג"ע, אנטנות טובות נפסלות לעתים קרובות מדי "כגרועות" בגלל שהיג"ע בקו ההזנה נע לערכים יחסית גבוהים, ואנטנות עלובות מתקבלות כ"טובות" כאשר היג"ע נשאר יחסית נמוך.

במרבית המקרים השימוש ביג"ע של קו ההזנה לבדו בתור חווי ליעילות האנטנה הוא חסר משמעות, כי היג"ע מצביע רק על רמת חוסר התיאום, לא על יעילות. בכל אופן, נראה כעת, כי שינוי יחסי ביג"ע, גבוה או נמוך מהערך הקודם הידוע כתקין, יכול להצביע על שינוי שאירע אי-שם במערכת. שינוי כזה, יכול להשפיע על יעילות ההקרנה. האנטנה האנכית הפופולרית, בעלת שניים או ארבעה רדיאלים (כמות לא מספיקה לקבלת יעילות נאותה), או צינור מים הקבור באדמה, הם מקרה אחד בו יג"ע נמוך לרוחב כל הגל מצביע על אנטנה בעלת יעילות קרינה עלובה ולא על אחת טובה. ובדומה, שיפור מערכת האדמה על ידי הוספת מספר מתאים של רדיאלים יכולה להעלות את יעילות הקרינה עד לקרוב ל-100%, אבל שיפור זה ביעילות הקרינה, ילווה בעליה ניכרת ביג"ע על פני אותו תחום תדרים לערכים גבוהים, שהם הערכים המצופים והנורמלים.

עם מערכת אדמה הולמת, היג"ע ניתן לחישוב על פני טווח התדרים, כי עכבת העומס של כל $R + jX$ מפיקה את אותו היג"ע עבור קו הזנה נתון ואנו יודעים מה צריכה להיות עכבת האנטנה בכל תדר בו אנו רוצים להשתמש (סימ. 47, 48, 49 ו-58 עמ' 1-3). אבל כאשר מערכת האדמה אינה מתאימה קיימת התנגדות הפסדי קרקע המתווספת לעכבת הקרינה של האנטנה ומשנה את היג"ע לערך נמוך, אך בלתי ניתן לחישוב. עדיין, מבלי להיות ערים לעובדות אלו, אנחנו נוטים להיות שמחים יותר לגלות יג"ע נמוך לא מבוסס, מאשר לקבוע האם יש לנו ערכי יג"ע האמורים להתקבל מתצורה מסוימת. זהו רעיון חשוב מאוד הדורש הבנה ברורה אם ברצוננו להימנע מפירוש מוטעה של נתוני היג"ע במאמצינו לקבל הספק שידור אופטימלי.

יעזור לנו בהבנת הרעיון אם תהיה לנו תמונה פיסיקלית ברורה כיצד מתפתחים הפסדי הקרקע. נראה כי עדיין יש לנו כאן מושג שגוי, הקשור לזרם והתנהגות השדה במערכת אנטנה של מוט מעל אדמה. רובנו יודעים כי טכניקות אדמה שגרתיות המשמשות להגנה מפני בריקים, כגון מוטות או צינורות מים התקועים עמוק באדמה מספקים מסלול זרם נמוך התנגדות מצוין לזרם הברקים. רבים אינם מודעים, בכל אופן, שטכניקות אדמה אלו אינן מתאימות כלל להולכת זרמי מערכת האנטנה שבהם שטף הזרם הוא בעל תבנית שונה לחלוטין.

המשך יבוא.....

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 5 – יג"ע נמוך מהסיבות המוטעות - המשך

קורן אנכי מעל אדמה

הבה ניקח אתגחתא למבט חטוף על התנהלות השדה והזרם של מערכת אנטנה אנכית, כדי לראות איזו מערכת אדמה דרושה כדי לספק את דרישות תכנית הזרמים. נתייחס לאנטנה אנכית המוזנת בבסיסה. הדק אחד של המחולל מחובר לבסיס המקרין האנכי וההדק השני של המחולל מחובר לאדמה, בדיוק מתחת למקרין האנכי. במשך מחצית המחזור בה זרם ההולכה במקרין האנטנה זורם כלפי מעלה, כל הזרם חוזר לאדמה דרך זרמי העתקה, העוקבים אחר קווי הכח של שדה הת"ג החשמלי דרך הקיבול בין המקרין והאדמה. ראה ציור 8. השדה החשמלי סביב האנטנה, המעורר את זרמי ההעתקה, ממלא את כל נפח המרחב המקיף את האנטנה בצורך חצי כדור פחוס. מחצית כדור זו חוצה את מישור האדמה ויוצרת מעגל דמיוני בעל רדיוס הגדול במעט מ- 0.4λ עבור מקרין בגובה פיסי של $\lambda/4$. (הרדיוס קטן ככל שגובה המקרין קטן). זרמי ההעתקה נכנסים לאדמה בכל מקום על פני השטח בתוך המעגל וזורמים חזרה באופן דיאלי לכוון הדק האדמה של המחולל. למרות שחלק מהזרם חודר קצת יותר עמוק, רוב הזרמים בתדרים מעל 3Mhz מוגבלת על ידי תופעת הקרום למספר ס"מ קטן עליונים של הקרקע.

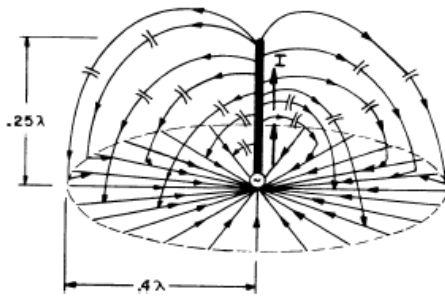


Fig. 8 - The hemisphere of current which flows as a result of capacitance of a $\lambda/4$ vertical radiator to the earth or a radial system. At frequencies above 3 MHz, rf currents flow primarily in the top few inches of soil, as explained in the text. Ground rods are of little value at these frequencies, and spikes or large nails are sufficient to secure the outside end of each radial wire. With a sufficient number of radials, annular wires inter-connecting the radials offer no improvement in antenna efficiency, as the current path is radial in nature.

כעת מערכת אדמה הכוללת רק צינור מים פשוט או מוט או שניים היא פשוט הדק – נקודת החיבור של הזנת האדמה של מערכת האנטנה. כך כל הזרמים החוזרים, מכל הכיוונים ומכל השטח הכלוא בעיגול, צריכים לזרום דרך האדמה בעלת המוליכות העלובה כדי להגיע אל הדק האדמה. מערכת אדמה זו מספקת לעיתים התנגדות ז"י "נמוכה מספיק" (שעשויה להספיק עבור הגנה מפני ברקים), אך מכניסה רכיב של התנגדות הפסדים במעגל האנטנה לת"ד. התנגדות הפסדים עולה לעיתים על התנגדות הקרינה של האנטנה עצמה! הוספת 2 עד 4 חוטים רדיאליים תספק מוליכות טובה לכוון הדק האדמה עבור הזרמים המגיעים

המגיעים מרדיאלים אלה, אך רק חלק זעיר מהזרם הכללי הנכנס לאדמה בתוך המעגל פוגש את הרדיאלים הללו. וכך, כך שאר הזרמים זורמים עדיין רק דרך הקרקע בעלת ההפסדים, וכתוצאה עדיין יש לנו התנגדות הפסדים גבוהה.

כעת, אם נפרוס מספר מספיק של רדיאלים (90 עד 100) המפוזרים בצורה אחידה ונמתחים החוצה למרחק 0.4λ כדי לקלוט את כל הזרמים, כל זרמי ההעתקה החוזרים ימצאו בכל מקום בתוך העיגול, נתיבים עם מוליכות גבוהה, שיוליכו את הזרמים דרך התנגדות הפסדים זניחה חזרה אל הדק האדמה של המחולל. ניתן להוכיח בזאת מתוך ציור 8. זרמים הנכנסים לאדמה בין הרדיאלים הצפופים יסיטו את מסלולם במהירות אל חוטי הרדיאלים, כך שיעברו רק מרחק קצר דרך האדמה בעלת ההפסדים עד שיגיעו למסלול בעל מוליכות טובה. כך, עם מספיק רדיאלים, נקבל מערכת אדמה כמעט מושלמת המוסיפה רק כמות זניחה של התנגדות הפסדים לעכבה האמיתית של האנטנה הנמדדת בין בסיס המקרין ובין הדק האדמה (סימ' 20, 50, 51 ו-57 עמ' 115-124). מכאן אנחנו יכולים לראות מדוע מערכת אדמה המתאימה להגנה מפני בריקים, על אף שכיחותה, אינה משביעת רצון כחלק ממערכת אנטנה (סימ' 57 עמ' 82).

איננו אומרים כי אין להשתמש באנטנת $\lambda/4$ ללא מערך אדמה מושלם, או כי ללא זאת לא ניתן לקבל תוצאות סבירות. אבל ההבדל בין שימוש ללא רדיאלים או עם מספר מועט (3 או 4), יחסית ל-100 רדיאלים יכול להיות מעל ל-3 ד"ב. ערך זה גבוה בהרבה מההפסד הנוצר עקב יג"ע של 4:1 או 5:1 בקו הזנה קואקסיאלי טיפוסי הנימצא בשימוש אצל חובבי הרדיו. הנקודה שבאנו להדגיש כאן היא שגודל התנגדות הקרקע היא בלתי ידועה ובלתי צפויה במערכת המשתמשת בפחות רדיאלים מאשר הכמות המתאימה. הדבר הופך את קריאת היג"ע המתקבלת לבלתי ניתנת לחיזוי ולכן חסרת ערך לשם הערכת הטיב המוחלט של המערכת, אלא אם יתאפשר באמצעי כל שהוא לקבוע מה יהיה השינוי ביג"ע אם נמתג את התנגדות ההפסדים שתוכנס או תוצא מהמערכת.

בהתקנה מעשית של חובבים, התנגדות האדמה תהיה נמוכה מספיק אם רק 40 עד 50 רדיאלים יהיו בשימוש עם מקרין של $\lambda/4$. השיפור הקטן בהספק המשודר עבור התקנה של 40-50 רדיאלים נוספים עם מקרין של $\lambda/4$ כנראה לא מצדיק את תוספת המאמץ והמחיר. עם זאת, אם שוקלים להתקין אנטנה אנכית קצרה, $\lambda/8$ או פחות עד $\lambda/4$, צריך לזכור כי התנגדויות ההדקים והקרינה יורדות ככל שהאנטנה קצרה יותר. עכבת האדמה מהווה כעת חלק יותר גדול מההתנגדות הכוללת, מה שמקטין את היעילות הכוללת של המערכת. לפיכך, יש לשמור על התנגדות אדמה קטנה ככל האפשר כדי לקבל את מלוא היכולת של האנטנה הקצרה (סימ' 51, 56, 57 עמ' 18-29). אין הבדל מעשי בין יכולת הקרינה של אנטנה $\lambda/4$ ומקרין קצר, אפילו פחות מ- $\lambda/8$, פרט להשפעת התנגדות האדמה וההפסדים על ההתנגדות הסליל המשמש לביטול ההגב הקיבולי בעכבת ההדקים של האנטנה המקוצרת. הספרות המקצועית גדושה בסימוכין המאשרים נקודה זו (סימ' 20, 24, 52 ו-53).

המשך יבוא.....

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגם: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 5 – יג"ע נמוך מהסיבות המוטעות - המשך

התנגדות הפסדים והיג"ע

בפיסקה זו נראה כיצד כל הפסדים התנגדתיים נוספים הנפרדים מעכבת העומס האמיתית של האנטנה משפיעים על היג"ע האמיתי של העומס. במילה "נפרדים" אנחנו מתכוונים לסוג ההפסדים כגון התנגדות הפסדי האדמה, מחברים "אכולים", חיבורים גרועים, נקודות הלחמה קרות וכו'. כל אלה תורמים להתנגדויות הפסדים שביכולתנו לשלוט עליהם ולהקטיןם. לא כך עם הרכיב ההתנגדתי של עכבת הדקי האנטנה, הכוללת את התנגדות הקרינה ואת ההתנגדות הטבעית של הפסדי המוליך של האלמנט המקריין. ברוב המקרים תהיה התנגדות הפסדי המוליך של אלמנט מקריין מעשי זניחה אם לא השתמשנו בחוט דק מדי באופן מוגזם.

ישנם מספר יחסים שימושיים בין עכבת העומס $R + jX$, עכבת הקו Z_C , והיג"ע. למשל, ידוע היטב כי אם עכבת העומס היא התנגדויות טהורה R ושווה לעכבת הקו Z_C , מקדם ההחזרה ρ הוא 0 ויחס הגלים העומדים הוא לכן אחד לאחד. אבל, מקדם ההחזרה אינו שווה לאפס והיג"ע משתנה ל- R/Z_C כאשר ההתנגדות גדולה מ- Z_C ול- Z_C/R כאשר ההתנגדות קטנה מ- Z_C . כמו כן, ידוע היטב כי מקדם ההחזרה ρ והיג"ע גדלים עם כל תוספת של רכיב הגבי לעכבת העומס המגדיל את החלק ההגבי של עכבת העומס, ללא תלות בערכו של הרכיב ההתנגדתי (ראה משוואה 1 בפרק 3). כפי שהוזכר לעיל, כל צירוף של $R + jX$ מפיק ערך מדויק של יג"ע, בהיותו סיומת לקו בעל עכבה נתונה Z_C . אנו יודעים גם כי ההגב X , המופיע בעכבה של הדקי אנטנה תורם לעלית היג"ע בתדירויות השונות מתדר התהודה של האנטנה יותר מאשר עלית ההתנגדות. וזאת עקב העליה המהירה יותר של ההגב עם השתנות התדר מאשר השתנות ההתנגדות עם שינוי התדר (סימ' 58 עמ' 1-3).

ישנו, בכל אופן, קשר מעניין שאינו מוכר בדרך כלל בין רכיבי ההתנגדות וההגב של עכבת העומס. קשר זה מטיל אור על האופן בו שני הרכיבים משפיעים על מקדם ההחזרה עקב חוסר התיאום ועל היג"ע, וכן מסביר כיצד ההתנגדות הבלתי ידועה של האדמה ושל הפסדים נוספים שהוזכרו לעיל, מפחיתים מהתועלת של מדידת היג"ע. כאשר מופיע הגב בעכבת העומס, המינימום האפשרי של ערך היג"ע מתקיים כאשר ההתנגדות R גדולה מ- Z_C . ערך ההתנגדות שיפיק את היג"ע הנמוך ביותר בשילוב עם ערך נתון של הגב בעומס נקרא "התנגדות מינימום יג"ע" והיא תלויה רק בהגב הקיים. ערך זה נתון על ידי הקשר:

$$r = \sqrt{x^2 + 1} \quad (\text{משוואה 11})$$

כאשר r היא "התנגדות מינימום יג"ע" ו- x הוא ההגב המופיע בעומס, כששניהם מנורמלים לעכבת המערכת Z_C . (ראה הערה 22 בפרק 4 בקשר לנירמול עכבות). ניתן לראות ממשוואה 11 שכאשר x הוא 0 יהיה $r=1$ והיג"ע יהיה 1:1, אבל מעניין לדעת כי היג"ע הנובע יהיה שווה תמיד בדיק לסכום החשבוני של התנגדות מינימום היג"ע וערך ההגב x . קשר זה יעזור לנו להבין כיצד התנגדות הפסדים בלתי רצויה שאינה קשורה לעכבת העומס של האנטנה, משפיעה על היג"ע. במקרה של מקריין אנכי מעל קרקע, הפסדים בלתי צפויים אלה משנים את היג"ע הניתן לחיזוי, המבוסס נתוני עכבת אנטנה זמינים (סימ' 57 עמ' 82) לאיזשהו ערך בלתי צפוי, בדרך כלל נמוך יותר. באופן כללי ניתן לבטא את הקשר הזה בהצהרה הבאה: כאשר הרכיב

ההתנגדותי של עכבת העומס האמיתי נמוך מהתנגדות מינימום היג"ע, כפי שנקבעת על ידי רכיב ההגב המופיע גם הוא בעכבת העומס, הוספת התנגדות שאינה נכללת בהתנגדות האמיתית של עכבת העומס, תקטין את ערך היג"ע מהערך של היג"ע האמיתי של העומס. דבר זה מתקיים עד אשר ההתנגדות הכוללת משתווה להתנגדות מינימום היג"ע. הגדלה נוספת של ההתנגדות תגרום ליג"ע לשוב ולעלות. אמירה זו ישימה במיוחד לאנטנות אנכיות בגובה $\lambda/4$ או פחות, בהדגמה כיצד התנגדות האדמה מקטינה את יעילות האנטנה בד בבד עם הקטנת היג"ע. זאת עקב כך שרכיב ההתנגדות האמיתית R , קטן בדרך כלל מהעכבה Z_c , של קווי הזנה רגילים, בעוד התנגדות מינימום היג"ע תמיד שווה או גדולה מ- Z_c . ההשפעה של הגב בעכבת האנטנה מעלה גורם נוסף בעל חשיבות בהבנת היחסים בין ערכי היג"ע וביצועי האנטנה. כמו שצויין קודם, הקצב בו עולה היג"ע כאשר תדר העבודה מתרחק מתדר התהודה של האנטנה הוא תוצאה של שינוי העכבה בהדקי האנטנה, שמצידם תלויים ב- Q של האנטנה. גורם אחד שיש לו השפעה בסיסית על ה- Q של אנטנה הוא גודל הקיבול בין החצאים הנגדיים של הדיפול. (למרות שהיא נקראית לפעמים מונופול, אנטנה אנכית מעל אדמה יכולה להחשב כדיפול בגלל החלק התחתון הוא תמונת ראי של החלק העליון עם קוטביות הפוכה.) הקיבול הזה של הדיפול נקבע על פי היחס של אור המקרין L , לקוטר שלו D .

היחס L/D (סימ' 1, 58 עמ' 1-3) הנמצא באנטנות החוטים הרגילות הפשוטות הוא מאוד גבוה וגורם לקיבול דיפול מאוד נמוך ו- Q מאוד גבוה, הגורם לשינוי מהיר בעכבה, החזרות ויג"ע גבוה עם שינויי התדר. זו הסיבה שאנטנות חוט נחשבות לאנטנות צרות סרט. למרות זאת, ניתן לבצע מספר צעדים מרחיבי סרט מסוימים להגדלת קיבול האנטנה ובכך להוריד את ה- Q ואת קצב שינוי היג"ע. צעד אחד, לדוגמה, הוא הקטנת היחס L/D על ידי שימוש בתצורת כלוב רב חוטים לכל אחד מחצאי הדיפול, או על ידי פריסת מניפת חוטים מנקודת ההזנה. עקומות היג"ע תקפות כאן בהשוואת רוחבי הסרט המושגים תוך התנסות עם תצורות שונות של המקרין. בכל אופן, יש להחזיק עתה כל התנגדות הפסדים נפרדת בערך קבוע כדי למנוע ממנה הכנסת משתנה בלתי ידוע לחישובים. אחרת, המשתנים הבלתי ידועים יכולים לגרום *שגיאות הבדליות* במדידות היג"ע המושגות בתצורות שונות, ובכך להפוך את תוצאות המדידה לבלתי תקפות. אבל אם לא ינקטו צעדים מעשיים להקטנת ה- Q , קצב שינוי היג"ע עם שינויי תדר לא יהיו שונים בין סוגי דיפול שונים בעלי ערכי Q שווי ערך בקירוב. (בין סוגים אלה נמצאת אנטנת *inverted-V*). אם מופיע הבדל דרמטי ללא שנקטו צעדים להרחבת רוחב הסרט, יש לפעול לאיתור סיבת ההבדל. סביר להניח כי מספר גורמים להופעת התנגדות הפסדים יסולקו, אם זהו המקרה.

הכותב ראה עקומות יג"ע שפורסמו, יחד עם תיאורים של אנטנות מאוד פשוטות, שבהן זה היה בלתי אפשרי שיהיה יג"ע כה נמוך, כפי שהוצג, על פני טווח התדירויות שהוצג. ה- Q של התצורה שהוצגה היה פשוט גבוה מדי. שני הסברים אפשריים לסוג זה של סתירה הם: (1) יתכן שמדידות היג"ע בוצעו על ידי מד יג"ע לא מדויק, או (2) כפי שנאמר לעיל, קיום בעיה בלתי מזוהה באיזה מקום במערכת האנטנה שגרמה להורדת ה- Q על ידי הפסדי התנגדות חיצוניים לאנטנה עצמה. וכך, פורסמו מאמרים אלה כי האנטנה שתוארה בהם היתה בעלת "תכונות יג"ע משופרות". כמה פעמים שמעת מישהו מהלל את "חוט השמים" שנתלה זה עתה וכמה נמוך היג"ע שלו על פני כל הגל? כעת זה צריך להיות ברור שאי אפשר להדגיש יותר מדי שהתנגדות הפסדים בלתי מזוהה ובלתי רצויה יכולה ליצור מדידת יג"ע נמוכה כאשר היא לא אמורה להיות נמוכה. בהמשך נחקור את הקשרים בין עכבת האנטנה והיג"ע לפרטים כך שנוכל לקבוע מהו היג"ע המתאים עבור תנאים נתונים.

הספק מוחזר ויג"ע

הבה נשוב לדין מדוע אנו סוגדים ליג"ע נמוך מהסיבות המוטעות והפסולות. כפי שנאמר לעיל, חוסר ההבנה של היבט זה של הספק המוחזר מבוססת בעיקרה על הדעה הרווחת, אך השגויה, שכל הקטנה של

היג"ע או של ההספק החוזר המתבצעת בקו המזין אנטנה, תגרם לעליה ישירה בהספק המשודר. ההגיון המוטעה ברעה זו, היא הנחה שמכיוון שההספק מוחזר מהעומס הוא איננו יכול להספג בעומס כדי להיות מוקרן, וההספק המוחזר הולך לאיבוד בכך שהוא נספג במשדר. הנחה זו שגויה בשני הקצות, אך האמת היא, עקב תכונות ההחזרה של מעגל התיאום של המשדר לקו, *כל ההספק שנכנס לקו נמסר לעומס* (מלבד מה שהולך לאיבוד בקו עצמו עקב הניחות). זוהי *האמת אפילו כאשר העומס אינו מתואם לעכבת הקו* (סימ' 55). ספיגה מלאה בעומס (וקו) לא מתואם של כל ההספק המסופק על ידי המשדר מושגת, כי ההספק המוחזר מהעומס הלא מתואם משתמר בקו ומוחזר לכיוון העומס על ידי ההחזרה החוזרת מצימוד הקן או מרשת התיאום, בהתאם לעקרונות שתוארו בפרק 4.

הבה נדון לרגע בקו חסר הפסדים ולאור מה שנאמר לעיל, ניקח כנתון שכל ההספק המסופק לקו נספג בעומס (כי שום הספק לא הולך לאיבוד בקו חסר הפסדים), להקטנה של ההספק המוחזר לא יכולה להיות כל השפעה על כמות ההספק המתקבל על ידי העומס. וכמובן, אין שאריות הספק שיתבזבזו במשדר. אם נמשיך תוכנה זו בקו אמיתי בעל ניחות, *כל הפסדי ההספק* חייבים להגרם על ידי הפסדים הבסיסיים של I^2R ו- E^2/R הנובעים מההתנגדות והניחות בקו. הפסדים אלה הם בלתי נמנעים, אפילו אם העומס מתואם באופן מושלם. *תוספת הפסדי ההספק* היחידה שעשויה להתרם על ידי היג"ע או ההחזרה נוצרת עקב אותו ניחות התנגדותי בו נתקל גל ההספק המוחזר כאשר הוא נע מהעומס אל הכניסה. מידת אובדן ההספק בדרך זו היא זעומה, מעשית, בתדרי הת"ג אם משתמשים בקו מאיכות טובה עם הפסדים נמוכים, כי, הגל המוחזר בדרכו חזרה אל הכניסה, סובל מאותו קצב הפסד עקב ניחות הקו (בד"ב) כמו שהגל המתקדם סובל בנועו קדימה אל העומס. וכמו שנאמר מקודם, כל ההספק החוזר ומגיע חזרה לכניסה נעשה כעת חלק מההספק המתקדם. דרך אחרת להסביר את הקשר בין היג"ע ואובדן הספק היא להזכר מפרקים 3 ו-4 שמכיוון שההספק המתקדם הוא הסכום של הספק המקור וההספק המתקדם, יהיה ההספק המתקדם גדול מהספק המקור אם היג"ע גדול מ-1.0. לכן, עבור הספק נתון מן המקור, הפסדים ההתנגדותיים גבוהים מעט החלק מהקו בו ההספק המתקדם גבוי מהספק המקור פשוט בגלל שהזרם והמתח *דממוצעים* גבוהים בחלק זה.

כך מתוך דיון זה אודות השימוש השגוי ביג"ע אנו לומדים שמנקודת המבט של יעילות, העניין שלנו ביג"ע נוגע רק להפסד עקב ניחות הקו. אם כך, אנחנו יכולים לשאת יג"ע גבוה יותר כאשר הניחות הוא נמוך, אבל כאשר הניחות הוא גבוה נצטרך להקטין את גבול היג"ע כדי לא להגדיל את הפסד ההספק עקב היג"ע. הקשר המדויק בין היג"ע להפסד ההספק הנגרם על ידי היג"ע עבור ערכים שונים של ניחות הקו מוצג בצורה גרפית בציור 1 בפרק 1, הלוקה מתוך ה-ARRL Handbook וה-Antenna Book. משרטוט זה ניתן לראות בקלות שמידת ההספק שבאמת אובדת נמצאת בניגוד גמור למידה שבטעות מניחים שאובדת בגלל המושג המוטעה של היג"ע, שבו חושבים כי הקטנת היג"ע או ההספק המוחזר תביא לירידה זהה במידת ההספק האובד במערכת.

קיימת מידה גדולה של אירוניה מאחורי אי הבנות אלה של החזרות הגורמות לשימוש או הפירוש המוטעה של היג"ע. האירוניה היא בכך שבדרך כלל מתעלמים מהסיבות הנכונות מדוע יש להתחשב ביג"ע, כפי שחזרנו קודם שוב ושוב, תוך שימוש מוטעה, בעוד העיקרון הבסיסי המקובל בדרך כלל לתמיכה בשימוש המוטעה אפילו לא קיים בשיטות הצימוד המשמשות בקרב החובבים להעביר הספק מהמשדר לאנטנה. חלק מהגיון עקום זה נולד מהבלבול הקיים בין חובבים ומהנדסים כאחד בפירוש המשמעות של "מחולל מתואם" – לאחדים זה מרמז שהוא מתואם *וק בכיוון אחד* לאחרים הוא במשמעות של תיאום *כשני הכיוונים*. בהפעל משדר, כאשר תיאום מצומד משמש בדרך כלל כדי לספק את ההספק המיטבי לעומס דרך קו, התיאום נעשה בכיוון אחד בלבד – קדימה.

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W8HKK / W2DU

תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 6 – יג"ע נמוך מהסיבות המוטעות (המשך)

חלק 5 של הסידרה הסתיים בהצהרה שבהפעלת משדר, כשמשמשים בדרך כלל בתיאום מצומד כדי להעביר הספק מיטבי לעומס דרך קו, התיאום הוא בכיוון אחד – קדימה. המחולל (המשדר) מתואם לקו, אבל, כשמסתכלים אחורה לתוך מעגלי הצימוד של המחולל במשך כל הזמנים בהם המחולל מספק הספק באופן פעיל לקו, הקו הינו בלתי מתואם לחלוטין. אפשר להדגים את היחס המצומד על ידי ביצוע מדידות עכבה בכל אחד מהכיוונים מכל נקודה בקו. מדידות אלה יראו עכבה של $R + jX$ כשמסתכלים בכיוון אחד ועכבה שווה אך בעלת סימן הפוך $R - jX$ בכיוון ההפוך. (ההגב השקול של אפס שמתקבל משתי עכבות אלה מוכיח שהמערכת תוהדת!) אבל מדידות אלה לא יכולות להתבצע בעת שהמחולל פעיל. יש לכבות אותו ולהחליפו בעכבה פסיבית השווה לעכבת העומס האופטימלית. במקרה כזה העכבה שכעת משמשת כסיומת לקו בצד המחולל של הקו תיראה כעומס המפזר הספק בעת מדידת העכבה בכיוון המחולל (ראה הערה 5, בחלק 2 של הסידרה)

העובדה שפיזור הספק מתרחש בעכבה המחליפה את עכבת המחולל במהלך מדידות אלה, אחראית במידה רבה למסקנה השגויה כי ההספק המוחזר לכיוון המחולל מתפזר גם כן באופן דומה בעכבת המחולל. למרות זאת, כאשר המחולל פעיל, העכבה הפנימית שלו, אינה נראית לעולם כעומס

להספק המוחזר מהעומס הלא מתואם בקצה הקו עקב פעולת הגומלין בין הגל המתקדם, הגל המוחזר מהעומס וגל הביטול, כפי שתואר בחלק 4. לפיכך, הקו הינו לא מתואם לחלוטין כשמסתכלים בכיוון המחולל.

מצד שני, כשעובדים במעבדה, המחולל בדרך כלל מתואם משני הצדדים. כאן המחולל מופרד מהקו על ידי פד התנגדותי, או מנחת, בעל ניחות העברה של 20db, והוא בעל אותה עכבה כמו יציאת המחולל ועכבת הקו Z_C . במקרה זה רואה המחולל תיאום מלא בכיוון פד התיאום של הקו, והקו רואה אף הוא תיאום במבט אחורה אל הפד. זה מפני שהפד מפזר הן את ההספק המתקדם והן את ההספק המוחזר כמו קו בעל הפסדים, כך שרק בערך $1/100$ מהספק המקור מגיע לעומס וכל הספק המוחזר מהעומס הבלתי מתואם מפוזר אף הוא ורק $1/100$ מערכו המקורי מוחזר למחולל. כתוצאה מזה, ההספק המוחזר המגיע לעומס הוא 40 db פחות, או $1/10,000$ מהערך המקורי במהלך חזרתו למחולל, כאשר העומס הינו מחזיר מושלם של קצר או נתק בהדקים, או פחות ממושלם עם סיומות מעשיות בעלות פיזור הספק. מידה זו של הספק מוחזר המגיעה למחולל הינה זניחה מנקודת המבט של תוספת להספק המקור ושינוי עכבת הכניסה לקו. כך, לכל תכלית מעשית, נראה הפד למחולל כקו ארוך אין סופי, או כקו בעל סיומת מושלמת $R = Z_C$, וכך, כדי לשמור על דרישות המדידה המעברית, הן העמסה קבועה של המחולל והן מתח מתקדם קבוע נשמרים אפילו אם העמסת הקו משתנית. (ראה פרק 1 של הסידרה וסימ' 19 עמ' 7 ו-48). כך, זה מובן שהבלבול בין שתי צורות התיאום יכול להיות אחראי להטעייתנו כך שנחשוב שההספק במקרה של המשדר מתפזר ואובד בחוזרו למקור.

הספק מוחזר לעומת הספק "אבוד"

תפיסה מוטעית זו של ההספק המוחזר היא נפוצה, וטופחה באויר במשך זמן ארוך, ונתמכה בכתובים במספר כה רב של מאמרים מודפסים שלא ניתן למנותם. שניים ממאמרים אלה, אחד מאת K8ZVF, והאחר, סקירה על מד יג"ע מאת W2AEF, רלוונטים לכך, כי הם כוללים אמירות מפורשות התומכות בתפיסה המוטעית, בעוד אמירות דומות במאמרים אחרים רק מרמזות על הטעות באופן משתמע.

הבה נעשה כעת ניתוח נוסף של מנגנון ההחזרה הקשור בתיאום המחולל, שבו נחשוף שני מרכיבים חשובים שהתעלמו מהם זמן רב. בעשותנו זאת, נראה לא רק מדוע הצהרות הנוגעות להספק האבוד שפורסמו בשני המאמרים שהוזכרו לעיל אינם נכונים, אלא נראה גם מדוע היה קל להתעלם ממרכיבים אלה בתחילת השימוש של החובבים בקוי תמסורת קואקסיאליים, שהביאו כה רבים לטעות ולבקש יג"ע נמוך מהסיבות הלא נכונות.

נקח קו תמסורת חסר הפסדים המתואם באופן מושלם לעומס. נניח גם כי יש תיאום בין המחולל או המשדר לעכבת האופיינית של הקו Z_C . בתנאים אלה אין כך הספק מוחזר ולכן אין כל הפסדי החזרה. המחולל מספק את מה שמוגדר כ- הספק מתואם מירבי זמין, והעומס סופג את כל ההספק המסופק. אם העומס בהדקים ישתנה כעת, ויצור חוסר תיאום בין עכבת הקו Z_C והעומס המחובר להדקים, פחות הספק יספג בעומס. מידת הירידה בהספק הנספג, הנגרמת מהשינוי בעכבת העומס, היא המידה של הפסד החזרה. בעת שההספק המוחזר מתקדם חזרה לכיוון המחולל הוא גורם לשינוי בעכבת הקו מ- Z_C ל- $Z = E/I$ לכל אורך הקו, כפי שצוין בחלק 3, וכפי שהודגם עבור יג"ע של 3.0 בציוור 4.0. כאשר ההספק המוחזר מגיע להדקי הכניסה של הקו, העכבה בכניסה לקו המוצגת כעת למחולל שונתה מ- Z_C לערך חדש הנקבע על ידי היחס הווקטורי E/I בהדקי הכניסה. עכבה חדשה זו בכניסת הקו היא בעלת אותה מידה של אי תיאום לעכבת הקו Z_C כמו של העומס

בסימטת היוצר את ההחזרה. וכך, הקו הינו לא מתואם למחולל באותה מידה, ובתנאים אלה הוא אוטומטית יספק פחות הספק לקו.

ההפחתה של ההספק הנמסר לקו היא בדיוק באותה כמות של ההספק המוחזר מהעומס. במילים אחרות, הפסדי ההחזרה בעומס יכולים להיות מופנים חזרה לאורך הקו אל המחולל. וכך, הפסד ההחזרה הינו בפשטות סוג של הפסד ללא אובדן הספק המייצג את ירידת ההספק הנמסר לעומס עקב הפחתת ההספק שמוסר המחולל לקו כתוצאה מאי תיאום העכבות הנגרם מלכתחילה מאי התיאום של העומס לקו. (הפסד החזרה זה המייצג רק את ירידת ההספק הנמסר לעומס יהווה עדות לכך שהעומס סופג את כל ההספק שהמחולל יכול לספק לקו). בהגיעו להדקי המחולל ותוך יצירת חוסר תיאום למחולל, מוחזר ההספק החוזר במלואו לכיוון העומס, ומוסיף להספק המתקדם בדיוק אותה מידה כמו ירידת ההספק הזמין המסופק על ידי המחולל. מכיוון שההספק המתקדם שווה לסבוב הספק המחולל וההספק המוחזר, ישאר ההספק המגיע לעומס כמו שהיה לפני שהמחולל יצר פחות הספק זמין. הפסד ההחזרה שווה לכן לירידה בהספק המחולל.

אם תיאום מצומד יותקן בנקודה כל שהיא לאורך הקו, אפילו בהדקי הכניסה, גל ההספק החוזר מנוע מלהמשיך בתנועתו מעבר לנקודת התיאום לכיוון המחולל כפי שהוסבר בחלק 4. וכך, עכבת הקו בין נקודת התיאום והמחולל לא תושפע עכשיו מהגל המוחזר ותשאר בערך של Z_C . בנוסף, המחולל לא רואה עוד אי-תיאום, וחוזר לספק לקו את ההספק הזמין-המירבי בתיאום. התיאום המצומד יספק בכך את ההחזרה השלילית, הקרויה בדרך כלל "שבח החזרה" השווה בדיוק ומבטלת את הפסד ההספק. אבל גם הוצג כי כל ההספק הנמסר על ידי המחולל נספג בעומס בכל אחד מהמקרים – עם או ללא שבח החזר – המחולל פשוט יוצר פחות הספק זמין לפני שבח החזר משחזר את תנאי התיאום בין המחולל והקו (סימ' 19 עמ' 37, חלק 2 פסקה 3, הערה 4, חלק 4 פסקה 2).

ובכן, נשאל כעת את השאלה, איך מצב זה מתייחס לתרשים של K8ZVF, בו ההספק החוזר מוצהר להיות "הספק אבוד", ולטבלת "ההספק השימושי" מהסקירה על מד יג"ע של נייט? ובכן זה כך: התרשים פשוט ממיר יג"ע חזרה להספק מוחזר ρ^2 , שהוא בעצם מה שמד היג"ע מודד והופך אותו לתצוגת יג"ע על ידי בניית הסקלה. כפי שהדבר נידון בפרק 3, ρ^2 הוא המדד להפסד ההחזרה או ההספק המוחזר, אשר, כפי שהוכרו לעיל, שווה לירידת ההספק הזמין מהמחולל, המחושב ישירות מאי התיאום בין עכבות הקו Z_C והעומס Z_L . ההספק המוחזר הוא ריבוע מקדם המתח או הזרם המוחזרים, ρ , משוואה 1 בפרק 3 (ראה גם ציור 4), אבל זכור בהמשך כי זהו ההספק הלא ממשי, כי בסופו של דבר כולו מגיע לעומס, כפי שהוסבר בחלקים 4 ו-5.

נתוני הטבלה במאמר סקירת מד היג"ע מציגים נכון את האחוזים של ההספק המוחזר ρ^2 לערכים מתאימים של יג"ע. אבל עמודת "ההספק השימושי" מכונה בכותרת שגויה ובכך היא מטעה, כי למעשה היא מונה את ערכי האחוזים של $(1-\rho^2)$, שהוא חלק ההספק המירבי האפשרי בתיאום שהמשרד באמת מספק, בתלות ברמת חוסר התיאום שהוא רואה. במילים אחרות, עמודה זו פשוט מציינת את כמות ההספק שהמשרד יספק לתוך אי התיאום, אם יתואם ראשית לקו בעל עכבה מתואמת Z_C , ואז, ימותג לעומס הלא מתואם ללא התועלת של כיוון או תיאום מחדש לעכבה החדשה של כניסת הקו. אבל אנחנו לא מפעילים בצורה זו – אנחנו מכוונים מחדש את המשרד, ובכך מתאימים את המשרד לעומס החדש וכתוצאה מכך מיישמים את שבח החזר $1/(1-\rho^2)$ אשר מבטל לחלוטין את הפסד החזר ρ^2 וההשפעה של אי התיאום של העומס. המשרד חוזר כעת לספק 100% מההספק הזמין בתיאום, יהיה היג"ע בקו אשר יהיה!

וכך, שני המרכיבים החסרים הם:

(1) הבנת המשמעות של הפסדי החזרה ושל שבח החזרה

(2) התגלית שהספק ההחזרה שב ומוחזר בהדקי המחולל, עם שבח החזר או בלעדיו.

כעת ברור כי המידע שהוצג על ידי K8ZVF ו-W2AEF לא מגדיר הספק "אבוד" כלל ועיקר, אלא רק הפסד החזרה - מידת ההספק שאיננה זמינה מהמשדר עד שצימוד מתואם יספק את שבח ההחזרה שיבטל את ההפסד ויאפשר למשדר לספק את ההספק המתואם המירבי-האפשרי. וכפי שהוזכר במספר הזדמנויות, התיאום המצומד מושג אוטומטית (לעתים ללא מודעות) על ידי כיוון נאות של מעגל הטאנק של המשדר אל עכבת הקו E/I, או (לעתים תוך מודעות) על ידי שימוש ברשת תיאום-קו אם מעגל הטאנק של המשדר חסר טווח מספיק להשיג את התיאום בעצמו. בהמשך הסידרה יוסבר כיצד הטאנק מוציא לפועל את התיאום המצומד, ההשפעה של תת-צימוד או צימוד-יתר והאפשרות של העמסה ריאקטיבית על הטאנק שיכול להגרם בהעדר תיאום מצומד.

המשך יבוא.....

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגם: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 6 – יג"ע נמוך מהסיבות המוטעות (המשך 1)

שבח החזר

נסתכל על ציור 9. ציור זה נועד להדגים את מושג שבח החזר וכדי להדגיש את ההשלכות של הטעות בהבנת המושג הפסד החזרה בתור "הספק אבוד" או הספק מפוזר. השפעת אי-הבנה זו אודות עקרונות קווי התמסורת היא הרסנית, כי היא הסיבה העיקרית לשיגעון "היג"ע הנמוך" הנפוץ. זוהי הסיבה מדוע כה רבים מאיתנו מאמינים בטעות ש"להשיג יג"ע נמוך" הוא הגורם החשוב ביותר הדרוש כדי "להביא את ההספק לאנטנה". אנחנו לא מצליחים להבין כי, בכל יג"ע שהוא, עם קו הזנה בעל הפסדים נמוכים, שבח החזר ביטל את ההשפעה של אי התיאום של העומס אם אפשר לכוון את המשדר ולהעמיס אותו היטב לקו, ואם כל ההספק האפשרי כבר נלקח על ידי האנטנה. ולכן, כפי שהוסבר כבר בפרק 5, לא היינו ערים לכך כי לא יגיע עוד הספק במידה משמעותית על ידי השגת יג"ע נמוך. לא היינו ערים גם לכך שניחות הקו הוא הקובע האם רמת היג"ע היא בעלת איזו השפעה מעשית על היעילות אם בכלל (ראה פרק 1).

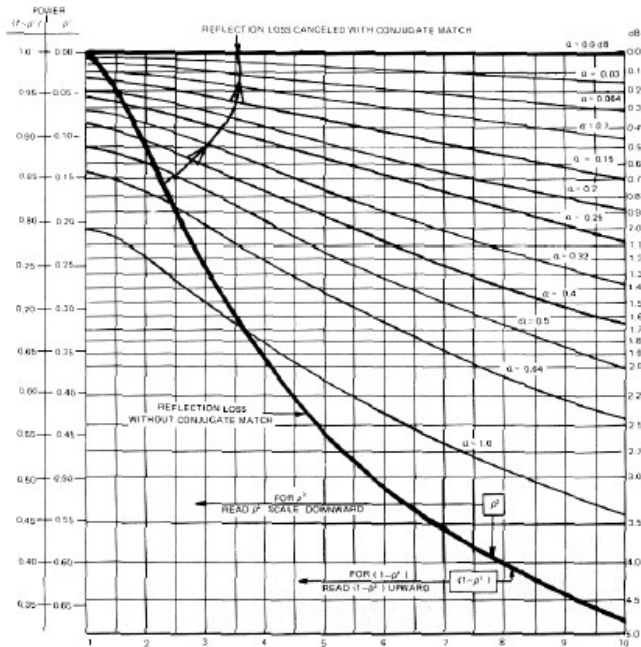


Fig. 9 - Reflection loss versus SWR and matched-line loss of rf transmission lines. Total attenuation in a line operating with SWR may be determined from the dB scale at the right of the chart. The calibration scales at the left are discussed in the text. The curves in the body of the chart represent the matched-line loss for a particular length of line at a particular frequency. For example, the following types and lengths of line would exhibit the a attenuation factors indicated. Each of these examples is for a frequency of 4 MHz: $a = 0.03$ dB - 100' of No. 12 open-wire line; $a = 0.064$ dB - 20' of RG-8/U; $a = 0.1$ dB - 100' of Amphenol Twin-Lead, No. 214-022; $a = 0.2$ dB - 62-1/2' of RG-8/U1; $a = 0.32$ dB - 50' of RG-59/U, 100' of RG-8/U, or 200' of RG-17/U; $a = 0.5$ dB - 87' of RG-59/U or 175' of RG-8/U; $a = 0.64$ dB - 100' of RG-59/U or 200' of RG-8/U; $a = 1.0$ dB - 119' of RG-58/U, 350' of RG-8/U, or 700' of RG-17/U. The curves are plots of the following expressions:

הקו העבה בציור 9 המסומן ב- ρ^2 ו- $(1-\rho^2)$ מבוסס על תנאים של קו חסר הפסדים. הוא גם העתק מדויק של תרשים "ההספק האבוד" של K8ZVF, ומראה בו זמנית את ההספק המוחזר ואת מה שמכונה "הספק

מועיל" במאמר שלו. הגרף מתאר את ההספק המוחזר, ρ^2 , מול היג"ע מלמעלה למטה וההספק הזמין מהמשדר מול אי התיאום שהוא רואה במונחים של יג"ע, $(1-\rho^2)$, המוצג מלמטה למעלה. כך, כשקוראים את הנתונים כלפי מעלה, העקום מייצג את ההספק הזמין כשהמשדר מכוון בתיאום מושלם ל- Z_C , אבל בעצם מסתכל לתוך אי תיאום לא מתוקן. ובכל זאת, כפי שהוסבר קודם, כאשר הפסד ההחזרה מבוטל על ידי שבח ההחזרה של התיאום המצומד המושג על ידי כוון מחדש של המשדר, גרף חדש, $\alpha=0.0\text{db}$, המייצג כעת את המצב המתואם, עוקב אחר הקו הישר העבה בראש הגרף. קו זה מציינ ש 100% מההספק נעשה זמין, ונלקח על ידי העומס ללא תלות בגודל היג"ע. לפתע מצאנו את ההספק ה"אבוד" !

כפי שצוין קודם, הספק יכול "ללכת לאיבוד" בקו תמסורת רק על ידי ניחות הקו. אם ניחות הקו הוא אפס, ההספק האובד הוא אפס, כפי שנראה לאורך העקומה $\alpha=0.0\text{db}$, בציור 9. ככל שהניחות יגדל, כן יגדל ההספק האובד, כפי שנראה מן העקומות המסומנות $\alpha=0.3\text{db}$ וכו'. מכיוון שאין כל התייחסות למקדם הניחות במאמרים הללו, יש לנו סיבה נוספת מדוע הביטויים "ההספק אבוד" ו"ההספק יעיל" במאמרים אלה הינם שגויים ומטעים.

באחד הפרקים הבאים של הסידרה, נעסוק בפירוט בהשלכות של הניחות, ונראה כיצד לבצע כמה מהחישובים המבוססים על המשוואות הנגזרות מציור 9 לפי W2DU. בכל אופן, עקומות ההפסד בציור 9 הינן במתכונת המתאימה להצגת היחסים הנכונים בין ההפסדים שבהם אנו נפגשים באמת בקווי תמסורת שונים באורכים שונים, ערכי ניחות ויג"ע שונים. העקומות מראות את ההפסד הכללי שפוגשים בקו עקב הניחות. העקומות מייצגות את התנאים בהם המשדר מתואם באופן צימודי בכניסה לקו, ולכן מראה שההשפעה של אי תיאום העומס מבוטלת במקרה זה. כל עקומה מתחילה משמאל איפה שהיג"ע הוא 1.0 וכך מראה את הניחות המעשי בו פוגשים בקו מסוים עם עומס מתואם באופן מושלם. רואים כי ערך ההפסד גדל לאורך כל עקומה באופן לוגריתמי עם עליית היג"ע עקב הגדלת אי התיאום בסיומת הקו.

INCIDENT, OR FORWARD POWER
(multiply by source power delivered)

POWER
REFLECTED

POWER
ABSORBED

POWER AT
CONJUGATE
MATCH POINT

POWER AT LOAD
(after line attenuation)

$$\frac{1}{1-\rho^2 e^{-4a}} \quad \frac{e^{-2a}}{1-\rho^2 e^{-4a}} \quad - \quad \frac{\rho^2 e^{-2a}}{1-\rho^2 e^{-4a}} \quad = \quad \frac{(1-\rho^2) e^{-2a}}{1-\rho^2 e^{-4a}} \quad (\text{Eq. 12})$$

with lossless

$$\text{line } (a = 0) \quad \frac{1}{1-\rho^2} \quad \frac{1}{1-\rho^2} \quad - \quad \frac{\rho^2}{1-\rho^2} \quad = \quad 1 \quad (\text{Eq. 13})$$

where ρ = magnitude of voltage-reflection coefficient (see Part 3, para. 1)

a = line attenuation in nepers ($= \frac{\text{dB}}{8.686}$)

e = 2.71828, the base of natural logarithms

$$\text{POWER ABSORBED} = \frac{(1-\rho^2) \text{ less one-way line attenuation}}{1-(\rho^2 \text{ less two-way line attenuation})} \times \text{source power}$$

כך, ההפרש בין ההפסד הקיים עם סיומת של יג"ע 1.0 בהשוואה להפסד עם כל יג"ע נתון אחר באותו קו נותן את תוספת ההפסד הקיים עבור אותו יג"ע. זו עדות גרפית נוספת לכך שכשניחות הקו נמוך, תוספת ההפסד עקב החזרות קטנה באופן מפתיע, אפילו כאשר היג"ע די

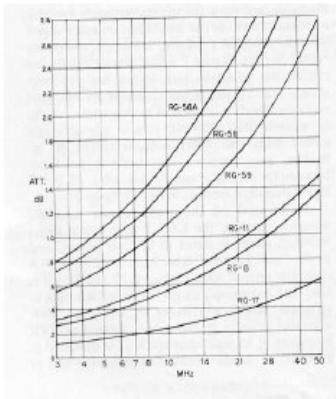


Fig. 10 - Attenuation in decibels per hundred feet for various coaxial cables.

הבט על האזור בו היג"ע הוא בין 1:1 ל- 2:1. האם אתה רואה הבדל מספיק בין רמות ההספק של קווים אלה כדי להצדיק יג"ע נמוך יותר כלשהו? האם אתה עדיין חושב שתצא יותר טוב אם תסחוט יג"ע של 1.8 עד 1.2? חזרה על מה שנאמר בחלק 1 תהיה כעת הולמת ומתאימה כדי להדגיש כיצד השימוש במושגים אלה יכול להרחיב את גמישות התכנון. מומלץ גם כי הקורא יבדוק את יעילות הערכים הן של דוגמת קו התמסורת של הלוויין ושל הדוגמה של הדיפול ל-80 ו-40 מטר. בדוגמא של NAVSAT, השוואה של ערך ה-66% של ההספק המוחזר עם הפסד מעשי של 1.15db בלבד תהיה תגלית מיוחדת.

ציור 10 מספק נתוני ניחות-קו נוספים המאפשרים לנו להרחיב את השימוש של העקומות בציור 9 לתדרים וקווים אחרים. ציור 10 יכול גם להיות תוספת יחד עם נתונים נוספים הזמינים ב- ARRL Handbook וה- Antenna Book.

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 6 – יג"ע נמוך מהסיבות המוטעות (המשך 2)

התנגדות הקרינה

בחלק 2 של סידרה זו, הצהרה 26 אמרה כי, למעשה, שום מידה משמעותית של הספק לא תחסך אם נשתמש במעגלי תיאום בין קו ההזנה והדקי האנטנה של מערכת אנטנה ניידת בתחומים מ-80 עד 10 מטר. והצהרה 27 ממשיכה באמירה שבהעדר מעגל תיאום כזה, יותר הספק יוקרן מאנטנה ניידת המועמסת במרכז, שיש לה יג"ע גבוה בקו ההזנה בתהודה, מאלה שיש להן יג"ע נמוך. הרעיונות הכרוכים בשתי הצהרות אלה, אינם מובנים בדרך כלל, כך שזה זמן מתאים להבהיר את שתי ההצהרות האלה, כי הרעיונות האלה מתאימים לקטגוריה של "יג"ע נמוך מהסיבה הלא נכונה".

ידוע היטב כי התנגדות הקרינה של אנטנה ניידת קצרה היא מאוד נמוכה. ובכל פסי החובבים בתחום הת"ג, התנגדות הקרינה היא הכי נמוכה בגל ה-80 מטר, כי האורך החשמלי של החלק המקרין הוא קצר ביותר בפס זה. בתלות באורך המדויק של האנטנה וגורמים אחרים, התנגדות הקרינה של אנטנה המועמסת במרכז היא בערך 1.0 אוהם בפס זה, כפי שמציג בלרוז (סימ' 60). רכיב ההגב הקיבולי של עכבת ההדקים של אנטנה קצרה זו, הנע בין 3000-j ל-3500-j אוהמים והוא אופייני לדגמי ה-80 מטר (כפי שהוצג על ידי בלרוז ואושר במדידות שנעשו על ידי כותב הסדרה), מבוטל על ידי הרכיב ההשראותי של סליל ההעמסה +j השווה לו.

למרות זאת, אין מספיק מודעות לכך שקיימות שתי התנגדויות אחרות שחשוב להתחשב בהן באנטנות מסוג זה. התנגדויות אלה, הפסדי הסליל והפסדי האדמה, מוספות להתנגדות הקרינה כדי להכליל ברכיב ההתנגדותי של העכבה המופיעה בהדקי האנטנה. וכך חובבים רבים טועים לחשוב שהתנגדות הקרינה בת 1.0 אוהם מייצגת את כל העכבה בהדקי האנטנה, וכן שדרוש לכן התקן תיאום באנטנה כדי לתאם מה שנראה כמו אי תיאום של 1:50 אם האנטנה מוזנת ישירות מקו הזנה של 50 אוהם. בפועל, התנגדות ההפסדים בסליל ההעמסה וכל התנגדות של הפסדי אדמה, שתיהן מתווספות להתנגדות הקרינה וגורמות להתנגדות ההדקים להיות גבוהה בהרבה ממה שמקובל לשער, אבל עדיין נמוכה מהעכבה Z_c של קוי הזנה מקובלים. לכן, ערך אי התיאום האמיתי נמוך בהרבה ממה שמעריכים בדרך כלל.

בעוד שישנם אחדים המכירים שהפסדי סליל ההעמסה מופיעים כחלק מעכבת ההדקים, מעטים ערים לכך שקיימים הפסדי התנגדות אדמה חוץ מבלרוז, רוב הכותבים שוכחים להזכיר או להתייחס לזה בניתוח המערכת שלהם. לדוגמה, המאמר של "שיפור הזנת הקואקס לאנטנה ניידת בתדירויות נמוכות" של סופורד שהתפרסם ב-QST בדצמבר 1951. ה-Mobile Handbook (בהוצאת Cowan), בעמוד 100 לא רק נכשל מלציין את התנגדות האדמה, אלא טועה לחשוב שהשילוב של התנגדות האדמה עם התנגדות הקרינה הוא התנגדות הקרינה לבדה (בהפחיתו את 6 האוהמים של ההתנגדויות של סליל ההעמסה ושל השוט מ-14 האוהמים של התנגדות ההדקים הנמדדת, ההפרש בין 8 האוהמים נלקח בפשטות כהתנגדות הקרינה, ללא איזכור כלשהו של התנגדות האדמה). כך, התנגדות האדמה, שלא ניתנת להזנחה, נכללת ללא ידיעה ובצורה שגויה כחלק מהגורם המקרין

בביטוי היעילות, ולא בתור הפסד. השמטה זו היתה יכולה להמנע אם היה נעשה ניתוח של העליה בהתנגדות הקרינה המתקבל למעשה על ידי הרמת סליל העמסה מהבסיס למרכז השוט, מכיון ש- 6 אוהם ועוד 1 אוהם של התנגדות הקרינה המופחתים מ 14 אוהם מותירים 7 אוהם, הדורשים הסבר מהיכן הגיעו אותם 7 אוהם. מעיון נוסף בטקסט של Cowan, נראה שההנחה כי מידה רבה יותר של קרינה מהסליל ממה שהמחבר מחשיב שאפשר לקבל היא הסיבה מדוע ניתן להתייחס לערך כה גבוה של התנגדות הקרינה כמתקבל על הדעת. אבל ככל שתהיה הסיבה, ניתנה לנו התנגדות קרינה גבוהה באופן לא מציאותי (8 אוהם) וערך נצילות ($57\% = 8/14$) שבאופן בסיסי אי אפשר לקבלו מאנטנה ניידת עם העמסה אמצעית, והערכים האמיתיים עורפלו. במלים אחרות, חלק גדול מההספק הנחשב כמוקדן בהנדבוק של Cowan למעשה בוזבו כחום באדמה. בלרוז מראה ניתוח נכון (סימ' 60), הנתמך על ידי מדידותיו של כותב המאמר.

נראה כעת מדוע יהיה בלתי מעשי אפילו להשיג אי תיאום במידה מספקת שתדרוש מעגל תיאום כלשהו בין קו ההזנה ובין אנטנה ניידת שגרתית המועמסת במרכז, ומכוונת היטב לתדר לכל מטרה של שימור כל מידה משמעותית של הספק, למרות שפע סידורי התיאום והכיוון המבוקרים מרחוק ומותקנים בתאי המטען.

התנגדויות ההפסדים של סליל העמסה נעות בתחום בין 8 אוהם עבור סלילים מסחריים זמינים טובים ועד כדי 31 אוהם שנמדדו בסלילים עלובים יותר, בתלות במקדם הטיב Q ובתדר התהודה העצמית של הסליל. בהתקנות של אנטנות מקובלות לפסים הנמוכים נתקלים בהתנגדויות אדמה הנעות בין 5 אוהם ל- 12 אוהם באדמה רטובה. אדמה ממוצעת תספק בסביבות 7 אוהם. התנגדות הפסדי האדמה בתצורה הניידת הינם קטנים מאלה שמוצאים באנטנת $\lambda/4$ בגודל מלא ללא רדיאלים, רדיוס המעגל ממנו חוזרים לאדמה מינימום זרמים קצר יותר מאנטנה הקצרה יותר ולכן הזרמים עוברים מרחק קצר יותר דרך האדמה עם ההפסדים. (ראה חלק 5 ציור 8). צורת שטף הזרם מוסברת גם היא על ידי בלרוז). כך, התנגדות ההדקים הכללית איננה בסביבות 1 אוהם ונמצאת בטווח בין מינימום 14 אוהם כשמשמשים בסליל עם Q גבוה עד כדי 44 או 45 אוהם כאשר הפסדי האדמה גבוהים ומשתמשים בסליל גרוע בו זמנית. מול קו הזנה של 50 אוהם, מקבלים כתוצאה מהתנגדויות אלה יג'ע של 1:3.5 (עם התנגדות הפסדים נמוכה יותר) ויורד עד 1:1.1 כאשר הפסדים גבוהים יותר.

כך, כמה מוזר שזה נראה, ככל שהיג'ע המינימלי שיתקבל בתהודה יהיה גבוה יותר, כך יוקרן יותר הספק (עבור אותו הספק הנמסר על ידי המשדר לקו ההזנה). למרות זאת, זה לא יראה כל כך מוזר כשניקח בחשבון כי רק החלק בין 1 אוהם מההתנגדות הכללית תורם לקרינה – והוא קבוע – נקבע על ידי אורך המקרין. כך על ידי הקטנת התנגדות הפסדים על ידי שימוש בסליל העמסה עם Q גבוה יותר פחות הספק יבוזבו על חום, וישאר יותר הספק לשידור. ולהיפך, אם נשתמש בסליל בעל Q נמוך כדי להשיג יג'ע יותר נמוך, פחות הספק יוקרן כי יותר הספק יבוזבו לחימום סליל העמסה²⁹. בכל זאת, כאשר משתמשים בסליל העמסה בעל ה-Q הגבוה יותר עם הפסדים הנמוכים יותר, למרות שהתנגדות הפסדים הנמוכה שלו גורמת עומס בעל יותר אי-תיאום ויג'ע יותר גבוה בקו ההזנה, העליה בהספק המוקרן יחסית להקטנה של ההתנגדות הכללית. הפסד הנוסף על ידי היג'ע הגבוה יותר ניתן להזנחה, כי ניחות הקו בקוי הזנה קצרים המשמשים בהפעלה

²⁹ חובבים רבים בוחרים בבלי דעת סלילי העמסה בעלי Q נמוך כי "הם מפקים יג'ע נמוך יותר מאשר סוגי סלילים אחרים" הם באמת יוצרים יג'ע נמוך יותר, עקב התנגדות ההפסדים הגבוהה יותר שלהם, כפי שהוסבר בטקסט.

ניידת נמוך באופן קיצוני. זכור, ניחות הקו הוא הגורם היחיד לאובדן הספק בקו הזנה, מבלי להתחשב בגודל היג"ע.

בציור 9 עקומת ההפסד $\alpha=0.064$ db מייצגת את ההפסד האופייני של קו הזנה נייד טיפוסי – 20 רגל של RG-8/U ב-4.0Mhz. העקומה מראה ניחות קו מתואם של 0.064db, פלוס הפסד נוסף של 0.056db ביג"ע של 3.5, הנותן הפסד כללי של 0.12db. כאשר תנאים אלה מלווים על ידי יחס של 1:14 בין התנגדות הקרינה להתנגדות ההדקים הכוללת והספק המשדר בן 100 וואט, ההפרש בהספק המוקרן בין המצב בו מתאמים את הקו בהדקי האנטנה והמצב בו משאירים יג"ע של 3.5:1 הוא פחות מ-0.1 וואט !

מעניין גם לציין שעם יחס התנגדות הפסדים נמוך יותר (0 ל-14), נצילות הקרינה היא 7.14%, או, 11.46db, מתחת להספק שהמשדר מספק (למעט הפסדי הקו). עם יחס התנגדויות של 1 ל-45 אוהם (עם סליל בעל הפסדים גדולים יותר ואדמה גרועה) נצילות הקרינה היא רק 2.22% או 16.53db מתחת להספק המשדר. כך יש לנו הפסד בן 5.07db בנצילות הקרינה בכך שהורדנו את היג"ע מ-3.5 ל-1.1.

כך, בניגוד להצהרות המופיעות במאמרים רבים שאנו מתעקשים להאמין אחרת מהן, לא ניתן להשיג כל שיפור משמעותי בפסי התדרים הנמוכים על ידי התקנת התיאום בין קו ההזנה להדקי האנטנה הניידת כאשר כבר משתמשים בסליל העמסה בעל הפסדים נמוכים. אפשר להתקין את התיאום בכניסת קו ההזנה, או על ידי מעגלי הטאנק ביציאת המשדר עצמו, או על ידי רשת תיאום נפרדת אם למעגלי הטאנק של המשדר חסר טווח כיוון מספיק, וקו ההזנה מחובר ישירות להדקי האנטנה. וכך, כפי שהודגש בפסקת הפתיחה של פרק 5, הנקודה החשובה כאן היא, שיש בתכנון המערכת שלנו אפשרות בחירה חופשית וגמישה. הבחירה האם התיאום הנדרש להעברת מירב ההספק מהמשדר לקו ההזנה ייושם בצד הכניסה של קו ההזנה או בצד העומס היא ברירה שיכולה להקבע בהתאם להעדפות האישיות של המפעיל. הדבר צריך להיות מבוסס על הנוחיות שלו ועל אפשרויות הגישה לכיוונים ולא עבור יג"ע נמוך שרירותית המוכתב על ידי סיבה שגויה עקב צו מלכותי של מלך שאינו מבין את הנושא! אבל בכל מקום בו התיאום מתבצע במהלך ההפעלה, האנטנה שתקרין את האות החזק ביותר היא זו של סליל העמסה המסוגל ליצר את היג"ע הגבוה יותר בתהודה, ללא כל תיאום בהדקי האנטנה, מהסיבות שהוסברו זה עתה.

לסיום, הנה הצעה שיכולה להיות לעזר בכיוון אנטנה ניידת. השימוש במתנד שפל סריגי (Grid Dip Oscillator) לקביעת תדר התהודה של הציורוף בין הסליל והמקרין, יכול ליצור שגיאות בסדרי גודל משמעותיים, במיוחד כאשר מנתקים את הקו לצורך המדידה, או כשמודדים בהדקי הכניסה של הקו. מד יג"ע המחובר ישירות לכניסה של קו ההזנה יכול לספק חיווי מדויק יותר של התהודה, בהנתן שהמכשיר הוא אמין וכויל במדויק לעכבת הקו (סימ' 59), כי יג"ע מינימלי לעומס נתון כפי שנידון כאן בסיומת הקו, יתקבל בתדר התהודה, ללא תלות באורך הקו (ראה חלק 2 הערה 24, והפיסקה הדנה ב"התנגדות יג"ע מזערית" בפרק 5)

המשך יבוא.....

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 6 – יג"ע נמוך מהסיבות המוטעות (המשך 3)

יג"ע נמוך מהסיבות הנכונות

לסיום הערותינו בנוגע ליג"ע נמוך מהסיבות המוטעות, יהיה מעניין לדעת כי בשידורי טלוויזיה, בהם משתמשים בקוי הזנה ארוכים אל האנטנה המותקנת בראש מגדל גבוה, יג"ע נמוך הוא חיוני. אולם, הדרישה כאן היא למנוע הופעת דמות כפולה מוזות במקלטי הצרכנים עקב החזרות בקו ההזנה. בדומה, יג"ע נמוך בקו ההזנה נחוץ במשרדי אף-אם סטריאו כדי למנוע "זיהום" הדדי צולב בין ערוצי איפנון השמע. לעומת זאת, ברדיו חובבים, אין לנו בעיות כמו לשידורי טלוויזיה או אף-אם.

לסיכום הדיון ביג"ע והחזרות כפי שהם נוגעים לפעילות חובבי רדיו, אנו רואים כי איננו זקוקים ליג"ע נמוך בקו ההזנה לאנטנה:

א. כדי למנוע מההספק המוחזר להתבזבז במשדר, כי במשדר מתואם כמות, שום הספק לא מתבזבז במשדר; יהיה היג"ע ככל שיהיה.

ב. למנוע קרינה מקו ההזנה ויצירת הפרעות לטלוויזיה (TVI) כי עומס לא מתואם בקצה הקו איננו יוצר קרינת קו-הזנה או הפרעות לטלוויזיה.

ג. כדי להשיג צימוד נאות למשדר, כי אנחנו יכולים לצמד או לתאם את העכבה בהדקי הכניסה של קו ההזנה, ללא תלות ביג"ע (הארה מפורטת אודות נקודה משמעותית זו מובטחת בהמשך)

ומבחינה מחודשת של ציורים 9 ו-10 ברור כי כדי למנוע הפסד נצילות משמעותי איננו זקוקים ליג"ע נמוך מ-1:2 בשום קו ואם היג"ע גבוה מ-1:2 נוכל להשתמש בקוי הזנה עם ניחות נמוך. נראה כי אין הרבה סיבות להזדקק ליג"ע נמוך בהפעלה של חובבי רדיו בגלי הת"ג. (סימ' חלק 1 ו-2 הערות 11 עד 17). הבה נראה כיצד אנו יכולים בקיצור לקבוע ליג"ע גבולות מעשיים בהתייחס לניחות.

1. כאשר מפעילים קרוב לתדר התהודה של דיפול, קווי הזנה של 50 אוהם או 75 אוהם יכולים להיות טובים באותה מידה. ההתנגדות בהדקי האנטנה תהיה איפה שהוא בין 50 ל-80 אוהם, בתלות בגובה מהאדמה, כך שחוסר התיאום הנוצר עם כל אחת מעכבות הקווים, יהיה קטן וזניח, למרות טענות הנגד המושמעות, על ידי אלה שעדיין נגועים ביג"ע-מאניה. כמובן שכדי להשיג מדידה מדויקת באמצעות יג"ע, צריכה עכבת מד היג"ע להיות תואמת לעכבה של הקו עבורו מתבצעת המדידה.

2. תיאום מצומד הממוקם במקום כלשהו לאורך הקו בין המשדר לעומס הבלתי מתואם מפצה כל אי תיאום בעומס, וכתוצאה מכך, התיאום המצומד מתקיים בכל מקום לאורך הקו (סימ' 17 עמ' 243). במלים אחרות, אם עומס לא מתואם $Z_c = R + jX$ המסיים את הקו מתואם על ידי תיאום מצומד במקום כלשהו לאורך הקו, החזרה הנוצרת על ידי אי התיאום המשלים בנקודת אי התיאום המצומד גורמת לעכבה הנראית מכיוון הסיומת להשתנות מ- Z_c ל- $Z_c = R - jX$ (ראה חלק 4).

3. ננצל כעת את רוחב הפס שנהיה כעת זמין לנו מתוך הידיעה כי לא קרה שום דבר פלאי או על טבעי בהורדת היג"ע" ל-1.0 כאשר משתמשים בקו קואקסיאלי להזנת דיפול במרכזו וההפעלה בדרך כלל

היא עבור פס חובבים מסוים אחד. אבל, כעת יש לנו חופש להפעיל בכל מקום בתוך כל הפס, בהניחנו ליג"ע לעלות לאיזה ערך שיצטרך לעלות, ככל שעכבת ההדקים של האנטנה משתנה עם התדר (אבל עדיין נשארת בתוך גבולות שאותם נגדיר מיד)²⁹. כדי למזער את העליה באי התיאום והיג"ע הנגרם עקב כך, כתוצאה מטיול על פני התדרים אל שני קצות הפס, יש לחתוך את הדיפול לתהודה קרוב למרכז הפס. על גל ה-80 מטר שבו אחוז השינוי בתדר הוא הגבוה ביותר, אי התיאום בקצות הפס, יהיה פחות חמור עם קו הזנה של 75 אוהם מאשר עם קו של 50 אוהם. מהכבלים בעלי המידה הקטנה, RG-59/U יהיה עדיף על RG-58/U, כי השילוב של יג"ע מקסימלי נמוך וניחות נמוך יותר של קו מתואם עם RG-59/U ייתן לנו טווח תדרים יותר גדול על פני הפס ככל שנתרחק מתדר התהודה של הדיפול או עבור קו ארוך יותר עבור אותה מידת ניחות. עבור כבלים בעלי קוטר גדול יותר, RG-8/U או RG-11/U יתנו בקירוב אותן תוצאות, כי אמנם הניחות בתיאום של RG-11/U הוא קצת יותר גבוה מאשר של RG-8/U אבל זה מתקזז עם היג"ע המקסימלי הנמוך יותר. בכל אופן, הניחות הנמוך יותר של הכבלים העבים, מאפשר טווח תדרים גדול יותר או לחילופין קווים ארוכים יותר עבור אותו מקדם הפסד מאשר הכבלים הקטנים יותר, ללא קשר ליכולת נשיאת ההספק שלהם.

4. הירידה המיזערית בהספק שבקושי ניתן לגלותה בתחנת הקליטה היא 1.0db. כך, כדי למצוא את היג"ע שיתן לנו ירידה בהספק המשוודר של 1.0db, נשתמש בתחילה בציור 10 למצוא את הניחות ל-100 רגל לסוג הנכון של קו התמסורת בתדר העבודה הרצוי. ואז ניישם את התיקון לקו ההזנה האמיתי. כעת נלך לציור 9 ונמצא את עקומת ההפסד α המתאימה לערך של ניחות קו-ההזנה. נתחיל במקום בו עקומת ההפסד חותכת את קו SWR=1.0, נלך בעקבות הקו ימינה עד לנקודה בה יש תוספת של 1.0db לניחות. נקרא את היג"ע בנקודה זו. זהו היג"ע שיפחית את ההספק המשוודר במידה ש"בקושי ניתנת להבחנה" בתחנה הקולטת, בהשוואה לאות שהיה נקלט אם הקו היה מתואם תיאום מושלם לעומס. נתונים מדויקים יותר יוצגו בהמשך, אבל הערכים שיוצגו כאן יכולים להוות כללי אצבע לערכי יג"ע שניתן לקבל בקצות הגל כאשר הדיפול נחתכה לתהודה במרכז הגל:

תדר	יג"ע מירבי
3.5 – 4.0 מה"ץ	5 או 6:1 (קו של 50 אוהם)
	4 עד 4.5:1 (קו של 75 אוהם)
7.0 – 7.3 מה"ץ	2.5:1
14.0 – 14.35 מה"ץ	2.0:1
21.0 – 21.45 מה"ץ	2.0:1
28.0 – 30.0 מה"ץ	3.0:1

השמת ערכים אלה לעקומות בציור 9 מראה בקלות כי נדרשים קווי הזנה ארוכים באופן משמעותי מהמוצע כדי לאבד די הספק נוסף כשכלל יורגש בתחנה הקולטת. במלים אחרות, לעתים רחוקות ניתקל באיבוד של 1.0db מלא נוסף של הספק, ולפיכך, לא ניאלץ להקריב כל "pile-up punch" תמורת הגדלת הגמישות בהפעלה על פני כל פס התדרים.

5. ביג"ע של 1:4 בערך, תוספת ההפסד עקב היג"ע שווה בדיוק לניחות קו המתואם באופן מושלם, כך, שלמעשה, מכפיל את ההפסד בפקטור של שניים. לדוגמא, הפרש הפסד ההספק בכ-60 מטר של RG-8/U או של כ-30 מטר RG-59/U עם יג"ע של 1:4 יהיה "בקושי מורגש" יחסית לזה שבקו ללא כל הפסדים כלל! מכיוון שבקווים אלה יהיה ניחות של 0.5db אפילו בתיאום מושלם.

6. אפשר לנטר את היג"ע בקו ההזנה כדי לוודא אם הוא נמצא בתוך הגבול המבוסס על ניחות הקו, על ידי חיבור מד יג"ע בין רשת התיאום להדקי קו ההזנה. אבל עלינו לזכור כי היג"ע בקו נשאר גם לאחר שרשת התיאום כוונה היטב לתיאום. התיאום בין המשדר לקו יכול להיות מנוטר על ידי מד

²⁹ היוצא מן הכלל הוא שאפשר להשיג הפעלה משביעת רצון על ה-15 מטר עם אנטנה ל-40 מטר.

יג"ע הממוקם בין המשרד לרשת התיאום. הרשת מכונת היטב כאשר ההספק המתקדם מירבי וההספק החוזר מרשת התיאום הוא אפס. אם קריאות ההספק המתקדם הן כמו אלה המושגות עם עומס דמה וההספק המוחזר הינו אפס בשני המקרים, עכבת הכניסה של רשת התיאום זהה לעכבה של עומס הדמיה. אם מד היג"ע מראה שמעט הספק עדיין מוחזר מרשת התיאום והמשרד עדיין מועמס היטב, השגת הפחתה נוספת של ההספק המוחזר הינה חסרת חשיבות. מידה זו של החזרה אינה מצביעה על יג"ע אלא על רמת אי התיאום בכניסת רשת התיאום. אם דחיית TVI לא מספקת נוצרת ברשת התיאום לקו, יש להשתמש במסנן TVI רגיל בין המשרד ורשת התיאום באותה מידה של יעילות שהייתה מושגת בקו שהיה מתואם לעומס.

מכיוון שהראינו כעת כי כל תיאום דרוש יכול להתבצע בכניסה לקו ההזנה, במקום בנקודת העומס, אין משמעות להגבלת יג"ע על רוחב הפס לשימוש חובבי הרדיו (כמו למשל ההגבלה השרירותית ל-1:2 הנמוך) אלא אם היא מבוססת על מידת הניחות של כבל תמסורת מסויים המותקן בקו ההזנה ומידת הניחות הכולל המותר. (המגבלה השרירותית של יג"ע מקסימלי של 1:2 נכנסה לתודעה עקב המגבלה של רוב משדרי החובבים המוגבלים ליג"ע של 1:2 הנובע מהעובדה שתוכנו כן, עקב שיקולים כלכליים ולא עבור גמישות הפעלתית. אבל, רשתות תיאום פשוטות כמו שמתוארות בביבליוגרפיה יכולות להרחיב את טווח העכבות האפשרי של המשרד ולהתאימו לעכבות עומס השונות בהרבה מהמגבלות שהוגדרו על ידי יג"ע של 1:2. ללא המגבלות של גודל ומחיר, היו רשתות אלה יכולות להבנות לתוך המשרד, ובכך להחזיר לנו את טווחי התיאום שהתרגלנו אליהם עם שיטת התיאום swinging-link הוותיקה. לפני שרשתות צימוד מסוג פאי החליפו את הצימוד בעזרת swinging-link לא היינו מודעים ליג"ע, כי התיאום המצומד בכניסת הקו כלל באופן בסיסי כיוון פשוט של מצב סליל הצימוד הדרוש להשגת מידת הצימוד הדרושה, וכיוון מחדש של קבל מעגל הטאנק באנודה לשם ביטול ההגב המוחזר. באמצעות שיטה זו, העמסנו לעתים קרובות את המשדרים שלנו לקווים עם יג"ע גבוה מבלי שכלל ידענו אודות היג"ע. אבל, עם כניסת מדי היג"ע ולאחר השיטת swinging-link פרשה, גילינו את היג"ע ולמדנו איך לטעות בהבנת המשמעות של קריאת היג"ע.)

לסיכום, אם הפסדי קו ההזנה נמצאים בתוך הגבולות המתקבלים על ידך, ברמת יג"ע נתונה, הנקבעת מעיון בציורים 9 ו-10, והמשרד יכול להיות מכוון היטב ל- load ו-1 tune (בין אם תוך שימוש ברשת תיאום ובין אם לאו), תפעלי! אל תדאג בקשר ליג"ע – כי כעת אתה משתמש ביג"ע אמיתי מהסיבה הנכונה!

למרות שתגובות הקוראים של סדרת מאמרים זו היו מצוינות, אחדים אמרו למחבר: "הסיפור מעניין, אבל לעולם לא תשכנע אותי שלא אצא יותר טוב עם יג"ע מושלם של 1:1". כעת, כל קורא שעדיין מקננים בו ספקות כלשהם לגבי כל מה שנאמר לגבי היג"ע, מתבקש לזכור כי מה שהוצג כאן לא היו ציטוטים או הצגת דעותיו של המחבר, אלא נובעים ישירות מספרות מדעית והנדסית מקצועית (ראה ביבליוגרפיה), ונוסחו במיוחד עבור חובבי רדיו תוך הקפדה יתרה לא לשנות את המשמעות. יתרה מזאת, בניגוד גמור למגוון הדעות השונות הנשמעות בקשר לנושא זה בשיחות ודיונים בין חובבי רדיו, אין הבדלי דעות כאלה בין אנשי המקצוע, כי בין המקצוענים (כולל עורכי ספרי לימוד), העקרונות הקשורים בנושא מובנים לחלוטין ומבוססים על האמת, עובדות מדעיות מוכחות, שאינן מהוות נושא למגוון דעות כפי שנמצא בפוליטיקה או בענייני דת.

נראה שרבים כבר שכחו כי סיפור זה נאמר ב-QST לחובבים, על ידי מומחים ידועי שם, לפחות פעמיים במהלך פרסום סדרה זו. אלו הם ג'ורג גרמר, WIDF מהנדס והעורך הטכני ברימוס של QST, וד"ר יארלי בירס, WOJF, לשעבר פרופסור לפיסיקה וראש המחלקה לפיסיקה של תקני רדיו, במכון התקנים האמריקאי. תרומותיהם המאירות, מופיעות כסימוכין 6, 16 ו-22 ועיון בהן שווה טיול לספריה. (המשך יבוא)

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגם: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 7 – המתאם שלי באמת מתאם את האנטנה שלי

לידתה של סידרה זו שיגרה הפגזה שכוונה אל המושגים המוטעים בקשר ליג"ע, תוך הפצת גלי הלהם הפוגעים בטירונים וותיקים כאחד. מאמיני הבדיות בקרבם נתפסים כאשר קווי ההזנה שלהם משתלשלים בסביבות 1:1.05 – בעוד משוגעי-היג"ע-הנמוך מסביבם צועקים: "תוריד את היג"ע" וממול צועק מקסוול: "אהרוג אותך אם תעשה את זה!". הם לא ידעו אם לשרוף מאחוריהם את גשרי הרעש (noise bridges) או לנעול את ה-VFO בתדר התהודה של האנטנה. נראה כי הטעות הגורמת לזעזוע הגדול ביותר נוגעת להפסדי החזרה ה-"ההספק המוחזר שהולך לאיבוד" תירוץ המוצע על ידי משוגעי-היג"ע-הנמוך כהגנה להתעקשותם על ערכי יג"ע נמוכים בקו ההזנה. תפיסה מוטעית זו חוסלה על ידי הסבר אודות מושג התיאום המצומד בדרך לא שגרתית – מנקודת המבט של החזרה ופעולת הגל בקו. מנקודת ראות זו (הכורכת את הפסד החזרה ושבת החזרה), רעיון התיאום המצומד מופיע כבסיס להבנת אגדת ההספק-המוחזר-האבוד. למרות זאת, תגובות לסדרה זו הראו כי ההפגזה ניפצה לקוראים רבים את המיתוס, ונראה כי אחדים נערכים לסיבוב התמודדות נוסף. לכן, ניקח כמטרה לפרק השביעי לחזור על עיקרון בסיסי של התיאום, ואז, נתבונן בהיבטים המפתים של רשתות תיאום-קו. בחלק זה נראה דרך מרתקת כיצד מתאמים משרדים לקו הזנה לא מתאם באמצעות רשת פי (ציור 12), או על ידי רשת חיצונית (ציור 11).

העיקרון שיעילות מרבית מושגת כאשר קו ההזנה מתואם באופן מושלם לאנטנה -- אין שום החזרה בקו ההזנה והיג"ע הוא 1:1 – ידוע היטב ומיותר לחזור עליו. ללא ספק, כל ספר טוב בנושא חוזר עליו. לכן חשוב להעריך את העובדה כי אף הצהרה בסדרה זו אינה סותרת עיקרון זה ואינה חולקת עליו בשום אופן. המושגים המוטעים שאנו מנסים להבהיר כאן, הנוגעים באובדן הספק מוחזר נובעים פשוט משימוש מוטעה של עיקרון התיאום המושלם ביישומים מעשיים.

באופן אירוני, ספרי הלימוד אחראים במידה מסוימת לשימוש המוטעה הזה. בהללם את מעלות התיאום המושלם, מחברים רבים כשלו מלהבהיר עד כמה (עד כמה מעט) מפסידים אם העומס אינו מתואם, כאשר מפצים על כך עם צימוד מתואם. המחברים הללו, מציגים בדרך כלל את המקרה של עומס מתואם אידיאלי במושגים של הפעלה בתדר יחיד, למעשה מתעלמים מהמקרה הייחודי של הפעלה מרובת תדרים של חובבי הרדיו. לנו יש פס תדרים, לא תדר יחיד מסוים – ואנו רוצים להשתמש ב-VFO שלנו בכל מקום בפס התדרים הזה. מכיוון שעכבת האנטנה משתנה כאשר אנחנו משנים את התדר, אנו צריכים להיות חופשיים מכל הגבלה עקב אי תיאום בין קו ההזנה לאנטנה אם אנחנו רוצים ליהנות מחופש הפעלה כזה. למרות שהרבה מאמרים הנדסיים דנים בהפסדים בתלות אי תיאום העומס, רק ספרי לימוד מעטים דנים במצבים של תיאום אנטנת רב-תדרים שבדרך כלל קיימים בה מעגלי תיאום מצומד. כתוצאה מכך, יישום נוקשה מדי של עיקרון תיאום העומס המושלם הפך באופן בלתי מודע להיות אבן בוחן לתריסרי הצהרות מוטעות שהופיעו בירחוני חובבים רבים, בתוספת לתפיסה המוקדמת השגויה של עקרונות ההעמסה בעזרת רשת-פי. התוצאה? תסמונת "ההספק המוחזר האבוד" ושיגעון היג"ע הנמוך. לכן, המטרה העיקרית של סדרת מאמרים זו היא לספק קיום מנחים לחובבים בקשר לאיכות ויעילות התיאום בהפעלה מרובת תדרים.

לדוגמא, שרטוט 9, בחלק 6, מציג את הפסד השידור ב dB לעומת היג"ע לערכים שונים של ניהוח הקו. הגרף מראה כי הנצילות המרבית אכן מתקבלת בתיאום מושלם. מצד שני, הוא נותן גם עדות דרמטית שכאשר משתמשים בקו הזנה נמוך הפסדים, המתואם תיאום צימודי, ההבדל בין תיאום מושלם לעומס לבין יג"ע גבוה באופן מתון, הוא חסר משמעות מעשית במושגים של הספק המועבר לאנטנה. במילים אחרות, על ידי שימוש בתיאום צימודי, האנטנה מקבלת את ההספק האפשרי מהמשדר אפילו כאשר הקו והאנטנה אינם מתואמים והאנטנה אינה בתהודה¹. התיאום המצומד מאפשר לנו להתפשר עם חוסר תיאום זה כי הפסד ההחזרה הנגרם מחוסר התיאום מפוצה על ידי הגבר ההחזרה המסופק על ידי התיאום המצומד. לפיכך, המשדר מצומד היטב לעכבת העומס הנדרשת וההספק המוחזר נשמר. ביסודם של המאפיינים המהותיים של התיאום הצימודי נמצאת תהודה מערכת, המקוזת את השפעה של אי התהודה של האנטנה.

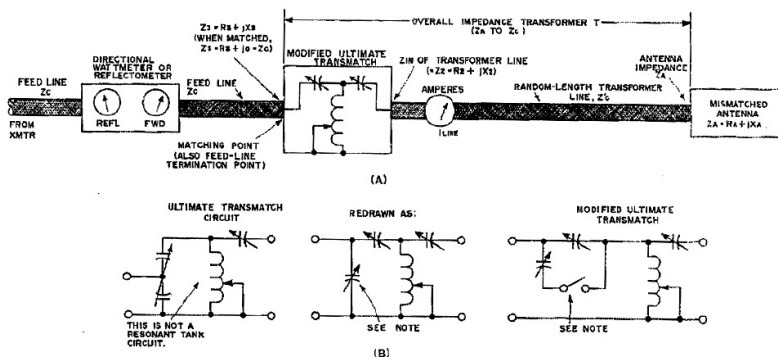


Fig. 11 - Conjugate matching with a Transmatch or other matching network external to the transmitter. The impedance of the feed line, Z_c , is usually 50 or 75 ohms in most amateur applications, but the impedance of the transformer line, Z_1 , may be any value, and may be of open-wire or coaxial type. The matching network as A is a modified Ultimate Transmatch (Ref. 41), as shown at B. NOTE: In the redrawn circuit at B (center) the shunt input capacitor is not needed to obtain a match, and the capacitor range may be increased by reconnecting as shown at the right.

למאמיני המיתוסים שעדיין לא שוכנעו בכוחות הקיזוז הפלאיים של התיאום הצימודי, אצטט את אווירט אודות התיאוריה על העברת הספק מרבית מתיאורית הרשת הקלאסית (סימ' 17 עמ' 49). הקשר לתיאום קו הזנה לאנטנה, מצוין בסוגריים: "הספק מרבי ייספג ברשת אחת (האנטנה) מרשת אחרת (קו ההזנה) המחוברת אליה על ידי שני הדקים, כאשר העכבה של הרשת הקולטת (העומס=האנטנה) משתנית, אם עכבות ההדקים של שתי הרשתות יהיו מצומדות זו לזו" (וכאן אווירט מציג את ההוכחה).

הביטויים במשוואות 12 ו-13 (בשרטוט 9, חלק 6) מתארים תיאוריה זו עבור המקרה בו קו ההזנה הוא הרשת הנותנת. ביטויים אלה מראים כי כאשר הרשתות מתואמות בצמוד, המשמעות היא שכאשר המשדר מכוון (tuned) לקו:

1. אין כל הפסד בהדקים המחוברים את שתי הרשתות,
2. אין כל הפסד ברשת שמספקת את ההספק, קו ההזנה, כאשר ניהוח הרשת הוא אפס,
3. אם ניהוח הרשת המספקת שונה מאפס, הפסדי העברה יהיו רק עקב הניהוח.

¹ זכור, אי תיאום עכבות אינו גורם לזרמים לזרום במעטפת היזונית של קו הזנה קואקסיאלי. (ראה חלק 5)

לדיון נוסף מופנה הקורא לחלק 2, חלק 4, ואמצע חלק 5 של סדרה זו.

פעולת הגל שבאמצעותה מושגים התיאום הצימודי והגבר ההחזרה מתוארים בחלק 4 תוך שימוש בבד-תיאום כצורת תיאום היוצרת את פעולת הגל. תצורת בד התיאום נבחרה כי היא הנוחה ביותר להדגים זאת. אבל מכיוון שצורת תיאום זו איננה מעשית לשימוש, כאשר נשקלת אפשרות לשינויי תדר ההפעלה, הבה נראה כיצד מיישמים תיאום מצומד על ידי שימוש בהתקנים הנוחים לכוונון כדי לבצע את התיאום בכל תדר רצוי. מכשירים כאלה הם Ultimate Transmatch (סימ' 41), רשת T, רשת L, רשת פיי וסוגי רשתות נוספים. נראה כי התקנים אלה יכולים לבצע את התיאום בכניסת קו ההזנה, וקו ההזנה יכול להיות ככל אורך שהוא, כמו כן נראה כיצד, במקרים מסוימים, תיאום בכניסת הקו יכול להתבצע על ידי מעגל הטאנק של המשדר עצמו.

תיאום בכניסת הקו

לפני שנמשיך הלאה הקורא יכול לשאול, "מדוע צריך לתאם בכניסה?" התשובה היא כי ללא תיאום בכניסת קו ההזנה יש לנו גמישות הפעלה מצומצמת מאוד. בהעדר רשת תיאום בכניסת הקו, אנחנו מוגבלים להפעלה בחלק צר מאוד מתחום התדרים (בעיקר ב-80 מטר) אלא אם ינקטו אמצעים יעילים להרחבת רוחב הפס של האנטנה עצמה. אנחנו מוגבלים כי, אם אנחנו זזים מתדר התהודה, העלייה הנוצרת באי תיאום העכבה בין האנטנה וקו ההזנה מועברת לכניסת הקו ומגדילה את אי התיאום בין המשדר לקו. כתוצאה, עכבת העומס של המשדר משתנה מעבר לגבולות הקבילים, המשדר אינו מועמס כראוי ויכול להינזק על ידי העמסת יתר או התפרקות הנגרמות מתת העמסה. תופעות אלה (בנוסף לאי מודעות אודות יכולות הביצוע הראויות לציון של תיאום הקו) אחראיות במידה רבה לשיגעון היג"ע הנמוך המסורתי. מצד שני, תיאום עכבות פשוט בכניסת קו ההזנה מספק שיפור מפתיע בגמישות ההפעלה מכיוון שרשת התיאום מפצה על שינויי העכבה בכניסת קו ההזנה ומספקת את עכבת העומס הנכונה למשדר בכל תדר שנבחר בכל רוחב פס התדרים. עכבת עומס נכונה מושגת פשוט על ידי כיוון רשת התיאום הממוקמת באופן נוח עבור המפעיל.

כך שהשאלה הבאה היא "מדוע לא לעשות אנטנה רחבת סרט ולמנוע את הצורך לתאם מחדש את רשת התיאום כשמשנים את התדר?" התשובה היא שאנחנו יכולים, אבל רק במידה מוגבלת. זה בגלל, למשל, שטכניקות להרחבת רוחב הפס שיאפשרו צימוד משדר חובבים ממוצע ישירות לקו ההזנה על פני כל פס ה-80 מטר (ללא כל כיוונים פרט לכוונון המשדר) אינם מעשיים בתנאי חובב ממוצע. זה כולל דיפול משותף-ציר (coaxial dipole הקרוי לפעמים "בזוקה כפולה") אשר, בניגוד לדעה הנפוצה, אינו מספק כל שיפור משמעותי ברוחב הפס על פני דיפול רגילה כאשר הוא מוזן על ידי קו הזנה רגיל של 50 אוהם. בעוד שהצהרה זו יכולה להראות מעט לא מתקבלת על הדעת, אנליזה מפתיעה בעניין שנכתבה על ידי המחבר הופיעה ב-Ham Radio באוגוסט 1976 (סימ' 62).

הסבר כיצד מעגל טאנק ביציאת המשדר או רשת תיאום חיצונית מיישמות תיאום מצומד מנקודת המבט של ההחזרות היא למעשה המשך של חלק 4. בכל אופן, כדי להלל הן את הזמינות והן את היתרונות של תיאום בכניסת הקו, נסטה לחלקים 5 ו-6 כדי להדגיש מספר סיבות שגויות לשימוש ב"יג"ע נמוך. סיבות אלה מראות כי, בשיגעון להשיג יג"ע נמוך בקו ההזנה, אנחנו נותנים דגש שגוי על תיאום בקצה הלא נכון של הקו. כפי שצוין לעיל, העיקרון של החזרת גלים שמצאנו בתיאום עם בד-תיאום תקפים גם לשיטות תיאום אחרות, כגון סדרה של שנאי רבע גל, רשתות T, L, פיי וכו'. מכיוון שנדרון באחדים מהרעיונות שהוצגו בפרוטרוט בחלק 4, יתכן שהקורא ירצה לשוב ולעיין בחלק זה.

המשך יבוא...

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
תרגם: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 7 – המתאם שלי באמת מתאם את האנטנה שלי (המשך)

תפקידו של שנאי רבע גל כמתווך

כמה מכם זוכרים את "תיאום Q של ג'ונסון"? וכמה מכם השתמשו בקטע של רבע אורך גל של קו בן 70 אוהם כדי לתאם עומס התנגדותי של 100 אוהם לקו הזנה של 50 אוהם? אלו שתי דוגמאות של שנאי רבע אורך גל טורי. בנוסף לדרישה לאורך חשמלי של 90 מעלות, תיאום עכבות מושג בשנאים אלה בגלל הקשר המיוחד בין העכבה האופיינית של הקו Z_C והעכבות שיש לתאם. כדי לבצע את התיאום, עכבת השנאי חייבת להיות כזו, כך שהיחס שלה לעכבת הכניסה Z_I צריך להיות הפוך לזה של היחס שלה לעכבת העומס Z_O . כלומר,

$$\frac{Z_I}{Z_C} = \frac{Z_C}{Z_O} \quad (\text{Eq. 14})$$

במלים אחרות, העכבה האופיינית הדרושה של השנאי היא הממוצע הגיאומטרי של שתי העכבות שצריך לתאם, המבוטא על ידי הביטוי הידוע

$$Z_C = \sqrt{Z_I \times Z_O} \quad (\text{Eq. 15})$$

גם העכבות וגם האורך של השנאי של רבע אורך הגל ממלאים תפקיד חשוב בהבהרת העקרונות המונחים ביסודם של כל צורות רשתות תיאום הקו. מכיוון שתפקידים אלה לא מובנים בדרך כלל, הבה נבחן אותם.

ראינו בחלק 4 כי להחזרות יש תפקיד חיוני בפעולת תיאום העכבות. ראינו כי התיאום המצומד מושג על ידי ביטול החזרות מהעומס הלא מתואם על ידי התאבכות גלים. ההתאבכות מושגת על ידי החזרה חדשה, נפרדת, הנוצרת בנקודת התיאום הרצויה. אי התיאום המסופק בנקודה הרצויה, תפור כדי לבטל את אי התיאום בעומס, כך שההחזרה החדשה תהיה בעלת אותה עוצמה אך עם מופע הפוך (בנקודת התיאום) כמו של הגל המוחזר עקב אי התיאום בעומס. ההחזרה הנוצרת על ידי אי-תיאום משלים זה קרויה החזרה משלימה או החזרה מבטלת. בתיאום עם בד תיאום, נוצרת החזרה על ידי בד-התיאום. במהלך חקירת החזרות משלימות הנוצרות על ידי בדי-תיאום, בדקנו את פעולת הגל באמצעותה שנאי רבע הגל המבצע את התיאום (חלק 4, טבלה 1 וציור 7D). תוך חקירת האפקטים של שימוש בבדי תיאום ואורכי שנאי שונים, לתיאום עומס התנגדותי לקווי הזנה שונים בעלי ערכי עכבה שונים, מצאנו כי שכאשר עכבת קו ההזנה שווה ל- Z_I (יחסית לעכבת השנאי Z , ועכבת העומס Z_O , במשוואות 14 ו-15), אורך השנאי יהיה 90 מעלות, ואורך בד התיאום ייעשה אפס. במקרה זה ההחזרה המשלימה נוצרת על ידי אי התיאום המופיע בצומת בין קו ההזנה והשנאי. אי תיאום זה נובע מהשינוי הפתאומי בעכבה (מ- Z_I ל- Z_C) בו פוגש הגל המתקדם תוך כדי התקדמותו מקו ההזנה (Z_I) אל השנאי (Z_C). אי תיאום זה הינו משלים בערכו לאי התיאום ההתנגדותי בעומס כי היחס בין העכבות של קו ההזנה והשנאי (Z_I/Z_C) שווה ליחס בין העכבות של השנאי והעומס (Z_C/Z_O). וכך, ההחזרות הנוצרות על ידי שני אי תיאומים אלה שוות בגודלן (כפי שדרוש להשגת ביטול מושלם), כי אי התיאומים שווים בערכם.

מכיוון שאי התיאומים בכניסה וביציאה מופרדים פיסית ב- 90 מעלות, הם גם משלימים מבחינת הזווית של החזרות המופיעות בנקודת התיאום (מה שגם כן דרוש לביטול). המרחק אותו צריך לנוע הגל המוחזר על ידי הכניסה הוא אפס. הגל המוחזר הנוצר במרחק 90 מעלות יוצר גל המגיע ב- 180 מעלות: 90 מעלות בדרך מהכניסה לעומס, פלוס 90 מעלות בדרך חזרה. וכך מגיע הגל המוחזר מהעומס לנקודת התיאום

בהפרש מופע של 180 מעלות יחסית לגל המוחזר בכניסה. כעת יש לנו שני גלים משלימים בנקודת הכניסה - שווים בגודל והפוכים במופע. כתוצאה מכך מבטלים שני הגלים זה את זה הדרית ויוצרים החזרה כללית של שני הגלים לתוך השנאי בכיוון קדימה, כפי שהוסבר בחלק 4. רכיבי המתח והזרם של שני גלי החזרה המשנית, נמצאים במופע עם רכיבי גל המקור. כך מתקיים תיאום מצומד בכניסת השנאי, כל ההספק המוחזר עקב אי התיאום של העומס המגיע לנקודת הכניסה של השנאי מוצא את דרכו לכיוון העומס ולא מופיע גל חוזר בקו ההזנה.

פעולת זו של שנאי רבע גל ראויה לעיון רציני. מדוע? כי היא מספקת שלב ביניים בהבנה כיצד ניתן להשיג תיאום בכניסת שנאי קו בכל אורך אקראי כשיש לו כל עכבה אפשרית בהדקי העומס, כגון עכבה מרוכבת $Z_a = R_a + jX_a$ של אנטנה לא מתואמת שאינה בתהודה. שנאי קו זה אינו אלא קו הזנה שכה רבים שואפים להפעילו ללא החזרות פשוט על ידי הגבלת העומס לאנטנה ותואמת.

רשתות תיאום כניסת הקו

הבה נבחן כעת רשתות תיאום קו חיצוניות (כמו ה-Ultimate Transmatch) מנקודת המבט של תיאום מצומד עם החזרות. על פי ציור 7D בחלק 4, נחליף את השנאי של 90 מעלות (T) בשילוב של רשת מתכווננת וקו באורך אקראי לחיבור עומס לא מתואם (אנטנה) לרשת. סידור זה מוצג בציור 11. הקו המחבר את הרשת לאנטנה יקרא עכשיו "קו השנאי". הקו המחבר את המשדר אל הרשת יקרא לכן "קו ההזנה". הצומת בין קו ההזנה לכניסת רשת התיאום תוגדר כנקודת התיאום.

בדרך שתוסבר בהמשך, קו השנאי (שיכול להיות בכל ערך Z_c) ממיר את העכבה המרוכבת של האנטנה $Z_3 = R_3 + jX_3$ ל- $Z_2 = R_2 + jX_2$ בכניסת קו השנאי. הרשת ממירה כעת את העכבה Z_2 ל- $Z_3 = R_3 + jX_3$ בנקודת התיאום, שכאשר הרשת מכווננת נכון Z_3 היא התנגדותית טהורה ושווה לעכבת קו ההזנה Z_c ($Z_3 = R_3 + j0 = Z_c$) כך שעכבת האנטנה Z_a מתואמת באופן צימודי לעכבת הקו Z_c , שהיא העכבה המתאימה עבור המשדר (סימ' 17, עמ' 243). ללא הרשת יהיה עומס המשדר שווה ל- Z_2 , אשר ידוע כי סוטה משמעותית מעבר לאפשרויות טווח התיאום של רוב המשדרים. בכל אופן, על ידי הוספת הרשת אנחנו משיגים את התיאום הצימודי על ידי כיוון פשוט של הרשת להמרת R_2 שתהיה שווה לעכבת הקו Z_c בנקודת התיאום, ולבטל כל רכיב ריאקטיבי X_2 לאפס בנקודת התיאום.

הבה נבחן כעת את המרת העכבה Z_2 ביתר עיון. השינויים בהתנגדות R_2 ובהגב X_2 של העכבה Z_2 תלויים בשלשה גורמים נפרדים: עכבת האנטנה Z_a , אורך קו השנאי והעכבה שלו Z_c . עיון בחלק 4 יראה כי עבור עכבות נתונות של אנטנה וקו השנאי, אפשר למצוא אורך קו שיתן $R_2 = Z_c$, אבל ייצור X_2 הדורש את ביטולו כדי להשיג תיאום (למשל, עם בד תיאום כפי שמוצג בציורים 7A-17B). ניתן למצוא אורך אחר שיגרום ל- X_2 להתאפס, אבל כעת R_2 לא יהיה שווה ל- Z_c (שוב אין תיאום). אין שום אורך שיתן $Z_2 = R_2 + j0 = Z_c$. מצב זה מתאר את המקרה המציאותי של מדרף חתול עכבר שאנו משחקים כאשר אנחנו מנסים להעמיס משדר על ידי שינוי אורכי הקווים. פתרון לא מציאותי לבעיה יהיה קו בעל אורך משתנה, יחד עם התקן שיפטר מההגב הבלתי רצוי. ובכן, איך אנחנו יכולים לפתור את הבעיה עם קו בעל אורך אקראי, קבוע? כי, כפי שגילינו כעת, רשת תיאום הקו היא שחקן המפתח. אנו יודעים מתיאורית קווי התמסורת הבסיסית כי קו תמסורת עשוי ממספר אין סופי של סלילים טוריים וקבלים מקבילים זעירים, כך שאין אנו צריכים להיות מופתעים שאנחנו יכולים לכוון את אורך הקו על ידי הוספת השראויות וקיבולים מקובצים. למעשה, על ידי בחירה נכונה וכיוון הגבים המסודרים בצורת L, T, או פיי אנחנו יכולים לדמות קו בעל האורך החשמלי הרצוי בלי לציין בכלל מהו האורך האמיתי.

כאשר רשת התיאום מכווננת לקבלת תיאום מצומד בין עכבות האנטנה וקו ההזנה, היא ממלאת שני תפקידים. ראשית, היא יוצרת אפקט של מתיחת האורך החשמלי של קו השנאי שיגיע לנקודת התיאום, בה ההתנגדות R_2 (בכניסת קו השנאי הפיסי) מומרת ל- $R_3 = Z_c$. שנית, היא מספקת הגב

$-X_3$ כדי לבטל את ההגב $+X_3$ של הקו המוארך המופיע בנקודת התיאום, באותו האופן שהיה עושה זאת בד תיאום המחובר באותה נקודה.

הכנסת הגב $-X_3$ בנקודת התיאום מבססת את התיאום המשלים אשר יוצר החזרה מבטלת בעלת אותה משרעת אבל עם מופע הפוך, יחסית לגל המוחזר המגיע לנקודת התיאום מהאנטנה הלא מתואמת. רשת התיאום מספקת לכן את האורך הכולל של השנאי הדרוש כדי להשיג הן את המרת הערך ההתנגדותי, והן את יחסי המופע המבטלים בין הגל המוחזר מהעומס וגל הביטול המוחזר. ובנוסף, הרשת מספקת גם את אי התיאום המשלים ($-X_3$) היוצר את הגל המבטל. כתוצאה, הרשת גם המירה חלום למציאות, ויצרה כמעשה כישוף קו בעל אורך משתנה ואמצעי לביטול ההגב הבלתי רצוי.

תצורה אידאלית לצפיה בפעולה תוך ביצוע הכיוונון של הרשת מורכבת ממד זרם ת"ג בקו השנאי כדי להציג את זרם הקו (אם משתמשים בקו מאוזן בעל שני חוטים צריך מודד בכל מוליך), ומד החזרות בעל שני מחוונים כדי להציג את ההספק המתקדם והמוחזר בקו ההזנה בו זמנית. חשוב לכייל בתחילה את מד ההחזרות כך שייראה הספק מוחזר אפס כאשר קו ההזנה מועמס בהתנגדות טהורה השווה לעכבת קו ההזנה. ביצוע הכיוונים יושלם כשנשיג זרם מירבי בקו שנאי בו זמנית עם הספק מתקדם מקסימלי ואפס הספק חוזר בקו ההזנה. כמובן שבגלל הגלים העומדים בקו השנאי, נקבל ערכי זרם קו שונים התלויים במקום לאורך הקו בו הוכנס מד הזרם. עם זאת, העניין היחיד שלנו הוא לראות את שינויי הזרם היחסי כדי לציין מתי מתקבלת תפוקה מירבית מהרשת במהלך תהליך הכיוונון. כך שאין חשיבות, לא לערך המוחלט של הזרם ולא למיקומה המדויק של הנקודה בה חובר מד הזרם.

החיוויים הבר-זמניים של זרם מירבי בקו השנאי ואפס הספק חוזר בקו ההזנה מציינים ארבעה גורמים משמעותיים להשוואת פעולת הגלים המעורבים בתיאום מצומד עם רשת תיאום קו ותיאום בעזרת שנאי רבע אורך גל כפי שתואר לעיל. ראשית, כיוון רשת נכון מפיך את התיאום המשלים בין סיומת קו ההזנה וכניסת הרשת אשר יוצרת החזרה מבטלת בנקודת התיאום. שנית, בנקודת התיאום ההחזרה המבטלת שווה במשרעת והפוכה במופע ביחס להחזרה עקב אי התיאום בעומס, כך שההחזרה המבטלת וההחזרה עקב אי התיאום בעומס מאפסות זו את זו בנקודת התיאום. כתוצאה מכך, עכבה התנגדותית טהורה השווה לעכבת קו ההזנה Z_c מופיעה בהדקי הכניסה של הרשת, בעוד שבתוך קו השנאי נשארות החזרות וגל עומד. ורביעית, התבוננות בעלית זרם קו השנאי לערכו המירבי בעוד ההספק המוחזר בקו ההזנה יורד לאפס מספקת עדות ראייה לכך שההספק המוחזר מאי התיאום של העומס באמת מוחזר על ידי אי התיאום המשלים בנקודת התיאום.

דרך אגב, רצוי שיהיה מד זרם מחובר קבוע בקו השנאי. אם רשת התיאום שלך כוללת יותר מיחידת L, אתה יכול בדרך כלל לתאם (אפס הספק חוזר בקו ההזנה) עם מספר שילובים שונים של ערכי רשת התיאום L ו-C. בכל אופן, הפסדי רשת מינימליים (המתקבלים עם זרם קו שנאי מירבי גבוה ביותר) חלים בדרך כלל כשמשתמשים ב-C מקסימלי וב-L מינימלי שבהם ניתן להשיג תיאום. מעקב אחר זרם קו השנאי תוך כדי תהליך הכיוונון מאפשר לך לבחור את שילוב L-C שיפיק את זרם קו הציאה המירבי ובו בזמן יבטיח כי לא יבחר שילוב L-C שיתן חיווי תיאום מדומה, תוך הפקת יציאה נמוכה ובמקום זאת יחמם את השראות רשת התיאום. כדי להבטיח חזרה מהירה לכיוונון וזמן אור מינימלי לצורך תיאום, יש לרשום את ערכי התיאום המיטבי של L ו-C כל פעם שהרשת מכווננת לתדר חדש. את כיוונון המשרד צריך לבצע בתחילה לתוך עומס דמי, ואז מתבצע תיאום הרשת לאנטנה תוך שימוש בהספק המינימלי בו ניתן לקבל חיווי משביע רצון ממד החזרות.

המשך יבוא...

מבט אחר על החזרות

מאת: מ. וולטר מקסוול, W2DU / W8HKK
 תרגום: יוסי שרון 4X1BQ

חלק 7 – המתאם שלי באמת מתאם את האנטנה שלי (המשך 2)

מעגל טאנק לתיאום קו

הבה נבחן כעת את המקרה בו מעגל הטאנק של המגבר הסופי של המשדר מבצע את תפקיד תיאום הקו. כדי להבדילו ממעגל תיאום חיצוני נכנה רשת זו בתור "רשת טאנק". בהשוואת ציורים 11 ו-12, אנו רואים כי, בדרך כלל, המרות העכבות מ- Z_4 ל- Z_3 הינן זהות בכל מקום בו נשתמש ברשת טאנק או רשת חיצונית. ההבדל העיקרי הוא בטווח ההמרות המבוצעות על ידי הרשתות. עם רשת חיצונית העכבה Z_2 מומרת לערך Z_3 , התואם את עכבת קו ההזנה Z_c . כאשר משתמשים ברשת טאנק, העכבה Z_2 מומרת ישירות לעכבת העומס Z_L של המחולל. הדרישה כעת שהמחולל (שפופרת או טרנסיסטור) יספק את ההספק האפשרי המירבי לעומס (מעגל הטאנק המועמס) מחייבת שהוא יראה עכבה שאנו קוראים עכבת עומס אופטימלית Z_L , (לא כמו ההתנגדות הפנימית Z_g). באופן מעשי Z_L היא בדרך כלל התנגדותית, כך ש- $Z_L = R_L + j0$. וכך המחולל מועמס היטב כשהוא רואה עכבה $Z_3 = R_L + j0$ (שהיא למעשה $Z_3 + j0$) המסתכלת לתוך מעגל הטאנק. המחולל יהיה בתת עומס כאשר R_3 גדול מ- R_L ובעומס יתר כאשר R_3 קטן מ- R_L ונקבל פיזור הספק גדול מאשר הנורמלי אם Z_3 מכיל הגב X_3 כלשהו.

כאשר משתמשים במעגל הטאנק לבדו כדי לבצע את התיאום, העכבה Z_3 נקבעת על ידי שני גורמים: ערך העכבה של Z_2 המעמיס את הרשת, ויחס השנאת העכבות של הרשת. יחס ההשנאה משתנה במידת מה (תוך שימוש בקבלי הכיוונון וההעמסה C1 ו-C2), ומספק טווח כיוונון ליכולת כיוונון תיאום העכבות. טווח תיאום זה מאפשר לעכבה Z_2 לקבל כל ערך שרשת התיאום יכולה להמיר לעכבה $Z_3 = R_L + j0$ על ידי כיוון בקרי הכיוונון וההעמסה.

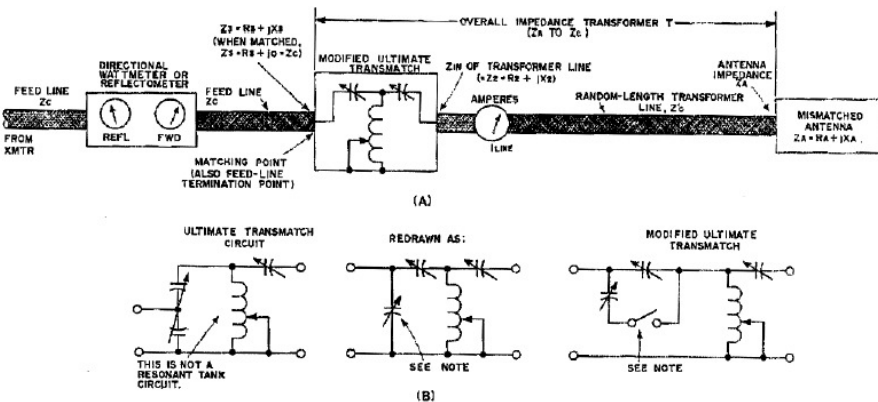


Fig. 11 - Conjugate matching with a Transmatch or other matching network external to the transmitter. The impedance of the feed line, Z_c , is usually 50 or 75 ohms in most amateur applications, but the impedance of the transformer line, Z'_c , may be any value, and may be of open-wire or coaxial type. The matching network as A is a modified Ultimate Transmatch (Ref. 41), as shown at B. NOTE: In the redrawn circuit at B (center) the shunt input capacitor is not needed to obtain a match, and the capacitor range may be increased by reconnecting as shown at the right.

כעת אנחנו יכולים לסכם את תנאי ההפעלה העיקריים הקשורים בהמרת עכבות האנטנה לעומס האופטימלי עבור המחולל.

מקרה 1

עכבת האנטנה $Z_a=R_a+j0$ (תהודה) מתואמת לקו השנאי, ומשתמשים רק ברשת הטאנק – ללא מתאם חיצוני: כאן עכבת האנטנה Z_a שווה לעכבת קו השנאי Z_c , היג'ע בקו הוא 1:1, והעכבה Z_2 שווה לעכבת הקו. אם עכבת קו השנאי Z_c היא בעלת הערך המקובל של 50 אום, רשת הטאנק מפיקה את העמסת המחולל המתאימה R_L+j0 עם אותו מצב הכיוון שהושג עם עומס דמי של 50 אום.

מקרה 2

האנטנה מופעלת קצת מחוץ לתהודה. העכבה שלה $Z_a=R_a+jX_a$ מציגה אי תיאום לקו השנאי כך שכדי להמיר את Z_a לעכבה Z_2 שהיא בתוך טווח התיאום של רשת הטאנק (עבור ההמרה ל- $Z_3=R_L+j0$). שוב, נשתמש ברשת הטאנק לכדה.

מקרה 3

האנטנה מופעלת מחוץ לתהודה, מעבר לטווח התיאום של רשת הטאנק. כאן נשתמש ברשת הטאנק בשיתוף עם רשת חיצונית. אי אפשר להשיג עכבה של $Z_3=R_L+j0$ עם רשת הטאנק לבדה, או שהמחולל יהיה מועמס בחסר, בהעמסת יתר או בעומס ריאקטיבי. מתקנים מצב זה על ידי הכנסת רשת חיצונית לתיאום הקו (כמו בציור 11), הממיר את העכבה Z_2 לעכבה Z_3 הנמצאת בתוך הטווח שאותו רשת הטאנק יכולה להמיר ל- R_L+j0 .

מקרה 1 אינו דורש הסבר, לכן נפנה לציור 12 ונבחן את הפעילות ברשת הטאנק כשהוא מבצע את תפקיד התיאום

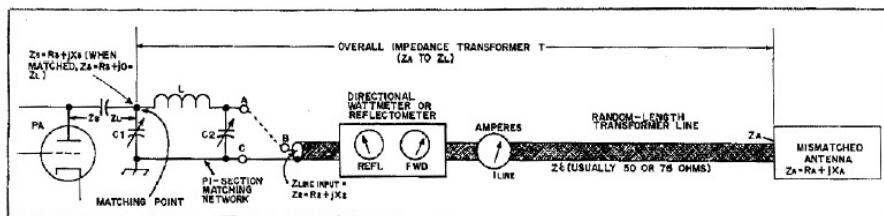


Fig. 12 - Conjugate matching with the transmitter final amplifier tank circuit. Z_L is defined as the optimum load impedance of the generator - the impedance into which the generator delivers maximum available power. This impedance must not be confused with the internal impedance of the generator. Z_g ; they are not the same.

של מקרה 2. כפי שצוין לעיל, כאשר המחולל שלנו הוא מהסוגים השכיחים המשתמשים במגבר מסוג AB, או C, עכבת העומס האופטימלית שלו, והעכבה הפנימית שלו Z_g אינן שוות. למרות שההסבר הינו מעבר להיקף כתבה זו, אפשר להראות כי Z_g משפיע רק במקרה של עומס קל, בעל עכבה גבוהה בכניסה למעגל הטאנק. כך שכניסת הרשת (נקודת התיאום) היא למעשה מעגל פתוח (נתק) עבור האנרגיה המתקדמת לכיוון המחולל.

כתוצאה מכך, גלים המוחזרים מאנטנה לא מתואמת (הגורמים לעכבה Z_2 לחרוג מ- Z_c) נכנסים לרשת בהדקי היציאה שלה ומוחזרים כמעט לחלוטין כשהם מגיעים לכניסה הפתוחה. כאשר הרשת מכוונת לתהודה, רכיבי המתח והזרם של הגל המוחזר מוחזרים במופע עם הרכיבים המתאימים של גל המקור הנובעים מהמחולל. וכך המחולל רואה מולו עומס התנגדותי $Z_3=R_3+j0$, וההספק המוחזר מתווסף להספק מהמחולל. זוהי הסיבה מדוע מד ההספק הכיווני (או הרפלקטומטר) מראה הספק מתקדם גבוה יותר מאשר ההספק המופק למעשה מהמחולל כאשר החזרות נוכחות בקו השנאי.

כיוון הקבל C_2 (קבל בקרת ההעמסה) לערך המספק העמסה אופטימלית של המחולל, מכוון את הרשת להמיר את R_2 ל- $R_3 = R_L$. כאשר R_2 משתנה, בעקבות שינוי בעכבת האנטנה Z_a , אפשר לשנות את C_2 כדי להתאים את יחס ההשנאה כדי להמיר את הערך החדש של R_2 ל- $R_3 = R_L$. קבל הכיוון C_1 , מכוון מחדש כדי להחזיר את הרשת לתהודה וקיבלנו שוב העמסה אופטימלית של המחולל. טווח ערכי R_2 שאפשר להמיר ל- $R_3 = R_L$ על ידי שינוי C_2 נקבע על ידי הפרמטרים של תכנון הרשת (סימ' 4 עמ' 63, 64).

בכל אופן, כאשר עכבת הכניסה לקו Z_2 המעמיסה את הרשת מכילה הגב X_2 , הגב זה מזיז את הטווח הזמין של הקיבול המסופק על ידי קבל בקרת ההעמסה, C_2 . הזזה זו נגרמת כי ההגב X_2 מופיע במקביל להגב קבל ההעמסה. לפיכך, עבור כיוון מתאים של קבל ההעמסה כאשר $X_2=0$, הגב קיבולי X_2 מגדיל את הקיבול השקול C_2 (הקטנת

ההעמסה). בעוד שהגב X_2 השראותי מקטין את C_2 (מגדיל את ההעמסה). כך, כדי להשיג העמסה ראויה בנוכחות הגב X_2 , המצב של קבל בקרת ההעמסה צריך לזוז מהמצב שנקבע עבור $X_2=0$ כדי לקזז את תוספת הגב הקו X_L . בהנתן ש- R_2 נמצא בתוך טווח הכיוון, אפשר להשיג העמסה מתאימה ככל שההגב X_2 לא עולה על הערך שאיתו יכול קבל בקרת ההעמסה להתמודד על מנת לספק את הערך של C_2 הדרוש כדי להמיר R_2 ל- $R_L = R_2$.

אם ההגב X_2 גדול מדי עבור קבל ההעמסה מכדי שיוכל לקזז את ההגב, יש לנו תנאים כפי שמתואר במקרה 3. בכל אופן, יש תרופה פשוטה למצב זה אם R_2 נמצא בתוך טווח התיאום של רשת הטאנק, אבל X_2 לא. כאן אנחנו יכולים פשוט להוסיף הגב לקיזוז בטור עם יציאת הת"ג (בין נקודות A ו- B בציר 12) המבטל את ההגב X_2 . מצד שני, אם הרכיב ההתנגדותי R_{2p} של העכבה המקבילה השקולה של Z_2 נמצא בתוך טווח התיאום, הגב הקיזוז צריך להתווסף במקביל על פני יציאת הת"ג (בין נקודות A ו- C). אפשר לקבוע באופן נסיוני האם הגב הקיזוז צריך להיות קיבולי או השראותי על ידי נסיון לחבר סוג אחד או השני ולראות אם ההעמסה משתפרת או מתקלקלת. הסוג הנכון והערך הדרוש של הגב הקיזוז נמצא כאשר אפשר לקבל העמסה נאותה תוך כיוון נוח של קבל בקרת ההעמסה. דיון מעולה של נושא זה על ידי גרמר מופיע בספרות (סימ' 4 חלק 3). כאשר משתמשים בטכניקת תיאום זו עם רשת הטאנק לבדה, כיוון אורך קו השנאי יכול להיות לעזר רב בהשגת ערכי העכבה Z_2 המועדפים ביותר עבור טווח התיאום של הרשת.

כאשר מפעילים בתנאים של מקרה 2, כיוון לתוך עומס דמי דורש תשומת לב מיוחדת, הדבר עלול להיות בעייתי כי העומס האמיתי יכול להיות שונה במידה רבה מהערך של עומס הדמי. אם רשת הטאנק מכוונת תחילה לתוך עומס הדמי ואז ממוגנת לעכבת הכניסה Z_2 של קו השנאי (ציר 12), רשת הטאנק צריכה להתכוון מחדש לעכבה החדשה Z_2 ! אם לא נכוון חזרה לעכבת ההפעלה האמיתית Z_2 אחרי כיוון לתוך עומס דמי נקבל עכבת עומס Z_3 שאינה מתאימה עבור המחולל – היא כבר איננה $Z_3=R_L+j0$ כי העמסת רשת הטאנק שונתה. ללא כיוון מחדש, המחולל יהיה מועמס בחסר, או בהעמסת יתר, או בעומס ריאקטיבי. בנוסף על האפשרות לגרום נזק למחולל אם הוא מופעל בתנאים של חוסר תיאום, גם תפסיד הספק ! בגלל חוסר התיאום, המחולל יספק פחות הספק בשיעור תפסיד ההחזרה הנובעים מאי התיאום של הקו, כפי שנראה בחלק 6 ציר 9, בעקומה המסומנת "Reflection Loss Without Conjugate Match" בציר היג"ע המתאים. לדוגמא, אם היג"ע בקו היה 3:1, מוצא המחולל יפול ב- 25% כי הוא רואה עומס לא מתאים. מצד שני, כיוון מחדש של הרשת לעכבת ההפעלה הממשית Z_2 יוצר תיאום מצומד המחזיר את עכבת העומס הנכונה למחולל R_L+j0 , והמחולל שב וחוזר להפיק את ההספק המירבי האפשרי (ראה חלק 6).

אבל אתה שואל: "איך אנו קובעים מתי מושגת העמסה נכונה, או ש- Z_2 נמצא בתוך טווח התיאום של הרשת?" התשובה היא פשוט על ידי השלמת פעולת כיוון והעמסה רגילים שבהם אתה יכול להשיג את אותן קריאות של זרם אנודי ושפל בזרם האנודי כמו עם עומס דמי. אבל, מצב בקרי הכיוון וההעמסה וההספק היחסי (מתח היציאה) יהיו בדרך כלל שונים מאלה שהושגו בכיוון עם עומס דמי, תלוי כמה שונה Z_2 מ-50 אוהם. אם אי אפשר להשיג זרם אנודה נורמלי (ושפל הזרם) עם מצב כל שהוא של קבל ההעמסה, Z_2 הינו מחוץ לטווח התיאום ויש לנו תנאים המוגדרים במקרה 3. אם אי אפשר להשיג העמסה מתאימה על ידי שימוש בטכניקות של תוספת הגב טורי או מקבילי כפי שתואר לעיל, אזי דרושה רשת יתור מורכבת. אף על פי כן, המחבר רוצה להדגיש כי אפשר להמיר כל ערך של $Z_2=R_2+jX_2$ לערך מתאים להעמסת מעגל הטאנק על ידי בחירת תצורת רשת מתאימה (סימ' 19, עמ' 115, 60).

הטווח של העכבות Z_2 שרשת הטאנק תמיר לערך השווה לעכבת המחולל $Z_L=R_L+j0$ מעלה נקודה מעניינת הנוגעת לתהליך הכיוון של הרשת החיצונית. התירגולת המקובלת היא לכוון את רשת הטאנק עם עומס דמי, לחבר את הרשת החיצונית והאנטנה ולכוון לאפס הספק מוחזר בקו הזונה (לא בקו השנאי). יש לבצע את התירגולת הזו אם מותקן מסנן בקו הזונה. למרות זאת, בהעדר מסנן, צריך לכוון את הרשת החיצונית רק עבור עכבת כניסה Z_3 שתביא אותה לתוך טווח התיאום של רשת הטאנק. אפשר לחסוך זמן כאשר משנים תדירות במהלך תחרות! אם גם רשת הטאנק וגם הרשת החיצונית מכוונות לתיאום אופטימלי באמצע תחום התדרים בו מתכוונים לנוע, רק רשת הטאנק תזדקק לכיוון מחדש בשינוי תדר, בהינתן שהתזווה בתדר נשארת בתחום בו הרשת החיצונית מפיקה עכבת עומס אותה רשת הטאנק יכולה להמיר ל- R_L+j0 .

הערת המתרגם: ניתן למצוא את רשימת הסימוכין שהוזכרו, במאמר המלא הנמצא באתר האגודה.