

שמושים נוספים בקווי תמסורת

נכתב ע"י אבנר דרורי 4XIGE

התחלה

הצורך בתאום עכבות, לצורך העברת אותות והספקים, מקובל היום כאקסיומה ללא עוררין. כל אחד מאיתנו יודע ומיישם את תאום העכבות ע"י שימוש במקור ועומס בעלי עכבה זהה. בכל מקום שאין התאמה ביניהם יש צורך באמצעי תאום שונים כמו טיונרים, בלונים או אמצעי המרת עכבות אחרים. התווך, בין המקור לעומס, הוא קו התמסורת שצריך להיות בעכבת של המקור והעומס. קו התמסורת מאפשר לגשר בין מקור ועומס הנמצאים במרחקים שונים ללא הגבלת טווח, לפחות באופן תיאורטי.

הכול התחיל עם קווי טלגרף שהיו מורכבים משני חוטים בעלי בידוד אוויר ביניהם. קצב השידור הטלגרפי היה נמוך מאוד (במושגים של היום הוא שואף לאפס) והתקשורת עבדה כהלכה.

הבעיות התחילו למעשה רק עם המצאת הטלפון והצורך לגשר בין מכשירים הנמצאים רחוקים אחד מהשני. בניסיונות הראשונים התברר שאותות השמע, שהועברו היטב בטווחים קצרים, הגיעו לשלוחה הרחוקה כשהם מעוותים ומונחתים. בעיה אמיתית.

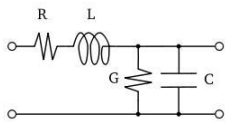
מסתבר שמה שהולך יפה בקווים קצרים לא הולך יפה בקווים ארוכים. עכשיו נשאלת השאלה: מה זה קצר ומה זה ארוך? מסתבר שהאורך הוא פונקציה של התדר, כלומר אורך הגל. הטבלה הבאה מפרטת אורכי גל של תדרי שמע:

הסיגנל	תדר (הרץ)	אורך גל (ק"מ)
שידור טלגרף	~30	10000
תדר שמע נמוך	300	1000
תדר שמע בינוני	3000	100
תדר שמע גבוה	5000	60

מהניסיון מסתבר שבמרחקים קצרים, הקטנים מעשירית אורך גל, לא מתעוררות בעיות. הבעיות מתחילות כאשר אורך הקו עולה על עשירית אורך גל והמרחק בין המכשירים בדרך כלל עולה על זה. הסבר מפורט, על התופעה, יינתן בהמשך המאמר.

במצוקתם, יישמה חברת הטלפונים האמריקאית את תורתו של גאון הפיסיקה של אותה תקופה, ג'יימס קלארק מקסוול. מסקנות התורה היו הצורך במעבר לשימוש בקווי תמסורת בעלי עכבה מבוקרת.

אם ישתמשו בקווי תמסורת לא תהיה להם הגבלה באורך הקווים ובתדרים שבשימוש. כל מה שעליהם להוסיף ולעשות זה לוודא שמכשירי הטלפון והעכבת של קו התמסורת יהיו בעלי אותו ערך.



עכשיו אנחנו יודעים שצריך קו תמסורת אבל איך עושים אותו? אם מנתחים את מבנה הקו, נראה שהוא מורכב ממספר אין סופי של חוליות המתוארות בצורה הבאה:

איור 1 – חוליה של קו תמסורת

L - מייצג את ההשראות העצמית, של החוטים. החוטים הם עגולים ואין לנו השפעה מרובה על ההשראות העצמית שלהם.

R - מייצג ההתנגדות העצמית של החוטים ואנו יכולים להקטין אותה ע"י הגדלת שטח החתך שלהם בתקווה שהיא תהיה זניחה.

C - מייצג את הקיבול, בין שני מוליכי הקו, וכאן דווקא יש אפשרות לשנות אותו ואת זה נראה בהמשך.

G – מייצג את הזליגה בין המוליכים. מכיוון שהבידוד החשמלי הוא מצוין, הרי שהזליגה נמוכה מאוד.

דבר ראשון הוא פיתוח נוסחה עבור ה- "עכבת האופיינית" של הקו ואת זה ניתן לעשות בעזרת משוואות מקסוול והתוצאה היא:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + \omega L}{G + \omega C}}$$

אנו חוזרים ופוגשים את אותם האלמנטים שראינו באיור 1 ובמצב הזה ישנה עדיין תלות בתדרים. בנוסחה רואים תלות בהתנגדות המוליכים ובזליגה ביניהם. אם הן בערכים משמעותיים, נראה שישנה גם תלות בתדר ($\omega = 2\pi f$). לעומת זה נראה שכאשר הקו אידיאלי, כלומר אם נניח שההתנגדות האומית (R), של הקו, באמת זניחה והזליגה בין המוליכים (G) אכן שואפת לאפס, התלות בתדר תצומצם ונקבל את הנוסחה הבאה:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

ראינו קודם שאין לנו, למעשה, שליטה על L אבל לעומת זאת יש לנו אפשרות לשלוט על הקיבול. אפשר לשנות את חומר הבידוד ובעקבותיו ישתנה המקדם הדיאלקטרי שלו ואפשר לשנות גם את המרחק בין המוליכים. שני שינויים אלה יקבעו למעשה את ערכו של Z_0 .

קווי תמסורת ואורכי גל

אם היינו מזינים קו תמסורת באורך אין סופי, בהספק כל שהוא, הרי שזה היה צריך לעבור לאורכו של הקו ללא הפסדים.

כל האמור בפסקה הקודמת נכון גם במקרה שנקטע את הקו ונכניס במקומו עומס בערך זהה ל- Z_0 . ההספק שנמסר לקו יגיע לעומס ויבלע בתוכו. אם נכניס עומס שונה מ- Z_0 חלק מההספק יחזור ונקבל את תופעת "הגלים העומדים" שנחזור אליה מאוחר יותר. מסתבר שלקווי התמסורת ישנן תכונות נוספות שאינן דווקא קשורות להעברת הספקים.

אם נחבר לקו עומס שונה מ- Z_0 ונמדוד את העכבת, בכניסה לקו, נקבל עכבת שונה לחלוטין מזו של Z_0 או של העומס החדש. אנו מבחינים בתופעה שקו התמסורת מהווה כעין שנאי (טרנספורמטור) לעכבות. ניתן לשנות עכבת, של עומס כלשהוא, בעזרת קו תמסורת הנמצא בין העומס ונקודת הבדיקה. השינוי תלוי בעכבת האופיינית של הקו ובאורכו החשמלי, כלומר אורך הגל שלו.

אורך גל, שנהוג לסמנו ב- λ (λ היא האות היוונית למבדא ומשמשת לסימון יחידת אורך גל) יהיה מהירות התפשטות האור מחולקת בתדר. נוסחת החישוב תראה כך:

$$\lambda_{(METERS)} = \frac{300}{f_{(MHz)}}$$

חישוב מהיר יראה לנו שלתדר 14.250 מ"ה יש אורך גל של 21.05 מטר. הסיפור פשוט מכיוון שהמקדם הדיאלקטרי (ϵ_r), של האוויר, שווה 1.

כאשר המבודד, של קו התמסורת, הוא בעל מקדם דיאלקטרי אחר, משתנה מהירות ההתפשטות. הנוסחה הבאה מתארת את השפעת המקדם הדיאלקטרי על מקדם ההתפשטות V_r .

$$V_r = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

אם ניקח חומרי בידוד שונים, בעלי מקדם דיאלקטרי שונה, נראה שמקדם ההתפשטות יהיה שונה בהתאם לטבלה הבאה המתייחסת למספר סוגי כבלים, של 50 אום, מאותו יצרן (Belden):

מקדם ההתפשטות	חומר הבידוד	דגם	סוג הכבל
0.86	FPE	7810A	RG-8
0.66	PE	8237	RG-8

PE הינו פוליאטילן ו-FPE הינו פוליאטילן מוקצף. ה-FEP מכיל כמות גדולה של אויר ולכן מקדם ההתפשטות הינו גבוה יותר.

רואים בברור שמהירות ההתפשטות תלויה בחומר הדיאלקטרי של הבידוד בין המוליכים. ניתן לראות שמהירות ההתפשטות, בקו תמסורת עם בידוד PE, הינה כשני שלישי בלבד ממהירות האור אולם ישנם חומרי בידוד בהם נגיע ל-0.8 ויותר.

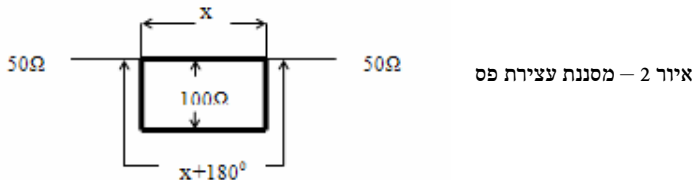
מקובל להשתמש במקדם התפשטות של 0.66. אם אורך גל בתדר 14.250 מ"ה באוויר החופשי הינו 21.05 מטר, הרי שאורכו בכבל RG-213 יהיה רק 13.89 מטר. השימוש באורכי גל, הנמדדים ביחידות אורך, הוא די מורכב במיוחד כאשר בכלי העזר והתוכנות משתמשים בממדים אחרים. אפשר היה לכאורה, להשתמש באחוזים כאשר אורך גל שווה 100%, ברדיאנים או במעלות. כאשר מדובר על חישובים, קיימת הסכמה להשתמש דווקא במעלות מה גם שחלק מהחישובים מתבצע בעזרת פונקציות גיאומטריות ופונקציות טריגונומטריות.

מכיוון שפונקציות טריגונומטריות משתמשות במעלות, הרי שאת אורך הקו / נמדוד במעלות או ברדיאנים. אי לכך, λ יהיה שווה גם ל-360 מעלות וגם ל- 2π רדיאנים. מכיוון שהשימוש ברדיאנים קצת מורכב, בהמשך אשתמש בערכי λ או במעלות, בהתאם לצורך.

קווי השהיה והזנת מופע

קו תמסורת יכול לשמש גם כמזיז-מופע. קו באורך חשמלי של λ יגרום להשהיה של 360 מעלות, $\lambda/2$ ל-180 מעלות ו- $\lambda/4$ ל-90 מעלות.

נוכל להשתמש בתכונה זו ליצירת מעגלים שונים ובדוגמה הבאה נראה יישום של מסננת. הקו העליון באורך כלשהו והתחתון אורך ממנו במחצית אורך גל (180 מעלות) מהתחתון. האות שיכנס לקו יתפצל לשניים כאשר האות דרך הקו התחתון יגיע בפיגור של 180 מעלות לנקודת המפגש שלהם. חבור שני האותות יעשה במופעים הפוכים זה לזה ולכן האות יתאפס. תופעה זו תקרה, כמובן, בתדר מסוים בלבד ולכן מערך זה יהווה מסננת חוסמת באותו התדר. יש צורך לפתור גם את בעיית התאום, נעשה זאת ע"י שימוש בקווים של 100 אום עבור הקווים המקבילים, חיבורם המקביל ייתן 50 אום המתאים לקוי ההזנה והתפוקה. ראה איור 2.

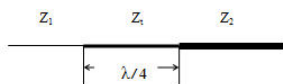


שנאי $\lambda/4$

בעזרת קו תמסורת באורך $\lambda/4$ ניתן לתאם גם בין שני קווי תמסורת בעלי עכבות שונות. זאת בתנאי שעכבתו היא השורש הריבועי של מכפלת עכבות שני הקווים. לשיטת תאום זו קוראים "טרנספורמטור $\lambda/4$ " (Transformer $\lambda/4$). ניתן לחשב את עכבת קטע התאום לפי הנוסחה:

$$Z_t = \sqrt{Z_1 * Z_2}$$

Z_t הינה העכבת של הקטע המגשר ו- $Z_1 + Z_2$ הן העכבות של שני הקטעים שיש לגשר ביניהם.



איור 3 – שימוש בשנאי $\lambda/4$

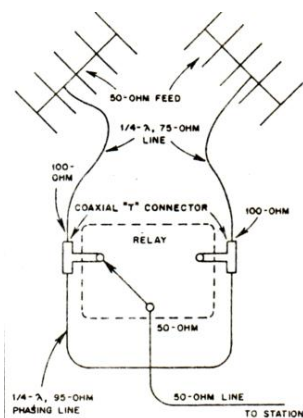
בטבלה הבאה מתוארים קווי תמסורת בעלי עכבות שונות והעכבת של הקטע המתאם אותם.

$Z_2 (\Omega)$	$Z_1 (\Omega)$	$Z_0 (\Omega)$	
100	70	50	א
75	61	50	ב
50	35	25	ג

ניקח לדוגמא את השימוש באפשרות א'. כדי להגדיל את השבח של האנטנה נוכל לחבר שתי אנטנות במקביל. נניח שעכבת הכניסה לאנטנה היא 50 אום, נזין אותה בקו תמסורת בן 70 אום ובאורך $\lambda/4$. בקצה השני של הקטע נמדוד עכשיו עכבת של 100 אום, חיבור שני הקטעים במקביל ייתן לנו ערך של 50 אום שאותו נוכל להזין בכבל בעל אותה עכבת.

דוגמא נוספת, לביצוע תאומי עכבות והזנת מופע, היא מערך אנטנות לקשר לוויני הדורש קיטוב סיבובי. ניתן להשיג שידור בקיטוב סיבובי ע"י חיבור שתי אנטנות יאגוי מצולבות כשאת מוזנת בהפרש מופע של 90 מעלות ראה איור 4 להלן.

את תאום העכבות נשיג בדרך המתוארת באיור 4 ואת הפרש המופע נשיג ע"י הארכת אחד מקווי ההזנה ב- $\lambda/4$. גם כאן משמש קטע של 75 אום באורך $\lambda/4$ לחיבור אל אנטנה. אל נקודת ה"T" השמאלית מחובר קו אחד (העליון) המשקף 100 אום וקו שני בעל עכבת של 100 אום, חיבורם במקביל ייתן לנו ערך של 50 אום שאותו נזין לפי המתואר באיור. האנטנה הימנית תוזן באמצעות קטע של קו בן 100 אום ובאורך $\lambda/4$ הנותן לנו את הפרש ה-90 מעלות הנדרש. העברת הבורר אל ה-"T" הימני תשנה את יחסי המופע וכוון הסיבוב ישתנה. אורכי קטעי $\lambda/4$, בתדרי VHF ו-UHF, הם קצרים מדי לצורכי בניית אנטנות וניתן להשתמש בקטעים באורך מכפלות אי-זוגיות של $\lambda/4$



איור 4 – הזנת צמד אנטנות לקשר לוויני

קווים מקוצרים ופתוחים של רבע אורך גל

ניגש עתה לבדיקה מה קורה לאורכי כבלים שונים.

הגילוי הראשון הוא שהתופעות חוזרות על עצמן כאשר אורך הקו משתנה במחצית אורך-גל שנהוג לסמנו ב- $\lambda/2$. תופעה שתתרחש במרחק X , מנקודת הבדיקה, תחזור על עצמה במרחק של מכפלות $\lambda/2$.

נתחיל בבדיקת מקרים קיצוניים. נבדוק מה קורה כאשר משנים אורכו של קו תמסורת כאשר פעם הוא מקוצר בקצה הרחוק ופעם הוא פתוח.

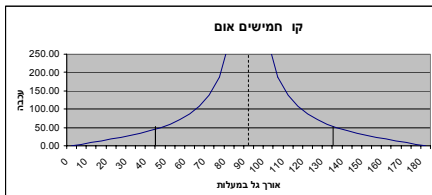
ראשית נראה מה קורה לקו תמסורת פתוח בעל אורך משתנה כאשר X_{in} הינה העכבה הנמדדת בכניסה לקו פתוח בעל עכבה של Z_0 ובאורך l .

$$Z_{in} = \frac{Z_0}{\tan \Gamma}$$

לפונקציית טנגנס ישנה תכונה של שינוי איטי בהתחלה ושינוי מהיר מאוד כאשר מתקרבים ל- 90° , כלומר ל- $\lambda/4$. בהתחלה הוא קטן מאוד ולכן העכבת בכניסה תהיה גבוהה. ערכו של Z_{in} יתחיל להתקרב ל- Z_0 רק ב- 45° , כלומר שמינית אורך גל. ערכו, של הטנגנס, ימשיך לעלות כאשר לקראת רבע אורך גל (החל מ- 85°) הערך יעלה בצורה חדה עד אין סוף, זאת אומרת שבכניסה נראה קצר.

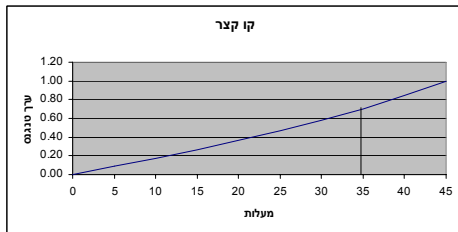
קו תמסורת מקוצר יתנהג בדיוק הפוך. הוא יתנהג לפי הנוסחה $Z_{in} = Z_0 \tan l$. במרחק קצר הוא יראה כקצר ובמרחק של רבע אורך גל הוא יראה כנתק. האיור הבא ממחיש לנו את התנהגות הקו המקוצר. מכיוון שבהתחלה ערך הטנגנס קטן מאוד, העכבת בכניסה תהיה גבוהה. ב- 35° , עשירית אורך גל, ערכו הוא 0.7. ערך זה עדיין קטן ואפשר להתעלם מהשינויים הנגרמים בעכבת הקו. תופעה זו נכונה גם בקווים פתוחים שתוארו מקודם. כול עוד אורך הקו קטן מעשירית אורך הגל, העכבת תראה כאין-סופית ללא תלות בעכבת האופיינית של הקו.

תופעה זו מאפשרת לנו להשתמש בחיווט חופשי כול עוד נמצאים בתוך המארז של הצידוד.



איור 5 - שינויי עכבת של קו מקוצר

אם נרחיב את הקטע של התחלת התרשים נראה את התופעה הבאה:



איור 6 - שינויי עכבת של קו קצר מאוד

יישומי קווי קצר/נתק

ניתן לנצל את תכונת קו התמסורת לשנות עכבות גם למטרות אחרות מאשר העברת הספקים. ראינו שקו תמסורת באורך $\lambda/4$ מסוגל להפוך נתק לקצר ולהיפך. אם נחבר קטע כזה, באחת מנקודות הקו, נקבל מסננת בתדר המתאים לאורכו החשמלי של הכבל. לתדר של 145 מ"ה, בקו של RG-8, יידרש קטע באורך 34 ס"מ, לתדר 28.5 מ"ה יידרש קטע באורך 1.73 מטר. קטע פתוח יהווה, כאמור, מסננת עוצרת (שווה ערך למעגל תהודה טורי המחובר במקביל לקו). ראה דוגמה באיור 7.



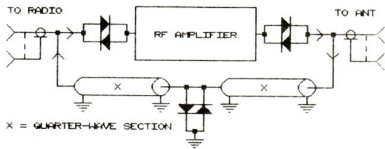
איור 7 - שימוש בקטע קו-תמסורת כמסננת.

מעגלי מיתוג

ניתן לנצל את תכונות קטעי ה- $\lambda/4$ ליצירת מעגלי מיתוג לתחום תדרים צר כגון תחום ה-תג"מ או ה-תא"ג, דוגמא אופיינית ניתנת באיור 8. מגבר הספק נמצא בדרך בין מקמ"ש ואנטנה. אנחנו מעוניינים שהאות מה-מקמ"ש יעבור דרך המגבר ואילו האות מהאנטנה ידלג עליו ויעבור ישירות מהאנטנה ל-מקמ"ש.

נתחיל במסלול הקליטה, הדיודות זקוקות למתח של כ-0.7 וולט על מנת להיכנס להולכה והאות מהאנטנה יהיה נמוך בהרבה מערך זה. ניתן להגיד שבמצב קליטה הדיודות מהוות נתק והאות יעבור דרך הכבל העוקף.

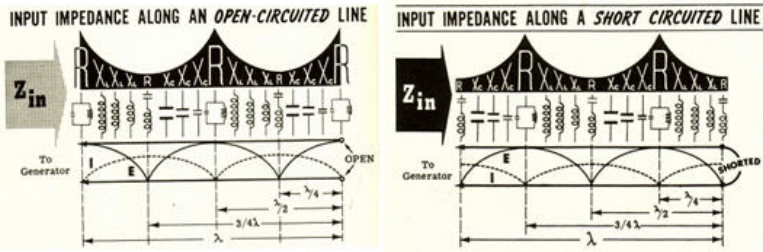
במצב שידור כל הדיודות נפרצות ועוברות למצב הולכה, אפשר להגיד שהדיודות מהוות עכשיו קצר. במצב זה כניסת המגבר מחוברת ישירות ל-מקמ"ש ויציאתו ישירות לאנטנה. שני הקטעים של $\lambda/4$, המהווים את המעקף, יתקצרו דרך הדיודות לאדמה וקצר זה יועבר כנתק אל כניסת ויציאת המגבר. באופן מעשי קטעים אלה לא יהיו קיימים בזמן השידור ורק המגבר יהיה בין ה-מקמ"ש והאנטנה.



איור 8 - מיתוג מגברים

שינויי עכבה לאורך הקו

עד עכשיו ראינו כיצד מתנהגים קווים באורך של מכפלות אי-זוגיות של $\lambda/4$. עכשיו נראה מה קורה בין נקודות ה- $\lambda/4$ והדוגמה לכך באיור הבא.



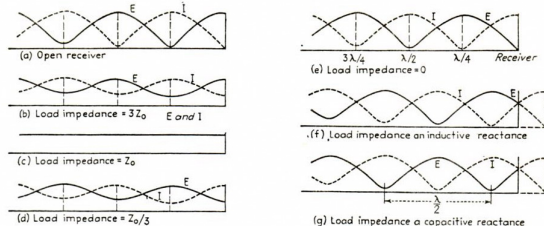
איור 9 - הפיכות קצר נתק ומה שביניהם.

תופעות אלה, של הפיכות קצר/נתק, תחזרנה על עצמן כאשר נאריך את הקו בקטעים המהווים מכפלות אי-זוגיות של $\lambda/4$. בקטעים שבין נקודות $\lambda/4$ נקבל ערכים שונים כמודגם באיור 9, העכבת תהיה פעם השראתית ופעם קיבולית. תופעות אלה קיימות גם כאשר אורך הקו קבוע ואנחנו מבצעים את הבדיקות לאורכו. במרחק $\lambda/4$ מהקצה נגלה את מה שגילינו בקו של $\lambda/4$ וככה הלאה.

למרות שמדובר על נתקים וקצרים בלבד, רואים באיור 9 שבקטעי הביניים שבין נקודות ה- $\lambda/4$ נקבל ערכים שונים של קיבול והשראות. במכפלות של $\lambda/4$ נקבל לכאורה נתקים וקצרים אבל למעשה, בתנאים אידיאליים ללא הפסדים, מקבלים כעין מעגלי תהודה טוריים (קצר) או מקביליים (נתק).

גלים עומדים

כאשר הקו יועמס בעכבת שונה מקצר, נתק או עכבת אופיינית נגלה שהעכבת בקצה השני משתנה בהתאם לאורך הקו או לנקודת הבדיקה מקצהו. דוגמאות לכך ניתן לראות באיור 10.



איור 10 - התנהגות לאורך קו לא מתואם

הספק, המתקדם לאורך קו שאינו מתואם, יראה בדרכו עכבות שונות שתגרומונה ליחסי מתח/זרם שונים לאורך הקו. תהיינה נקודות בעלות עכבת גבוהה שעליהן יופיע מתח גבוה וזרם נמוך ותהיינה נקודות, הרחוקות מהקודמות ב- $\lambda/4$, בעלות עכבת נמוכה שהמתח עליהן יהיה נמוך והזרם גבוה.

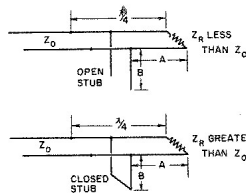
התופעה מודגמת באיור 10 ומתארת את שנוי המתח/זרם הדומים לגל העומד במקומו. "גל עומד" זה קיים רק כאשר הקו אינו מתואם. כאשר הוא מתואם העכבת קבועה לכל אורכו ויחס המתח/זרם קבוע. מכאן רואים שהגלים-העומדים מצביעים על אי תאום הקו והיחס שיא לשפל, הנקרא "יחס גלים עומדים" (Standing Wave Ratio או בקיצור SWR), המראה את מידת אי התאום.

תאום עכבות בשיטת Single & Double Stub

ראינו מקודם את התופעה שקו, פתוח או סגור, נראה כעומס קיבולי או השראתי בהתאם לאורכו. אפשר לנצל את התופעה הזאת כדי לבצע תאום בקו לא מתואם שישנם עליו גלים עומדים.

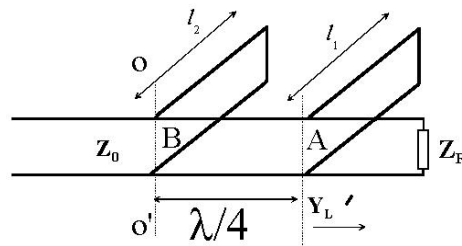
אם נוכל לאתר נקודה, לאורכו של קו תמסורת לא מתואם, בעלת ערך השראתי או קיבולי מסוים, הרי שנוכל לחבר לאותה נקודה קו באורך שיתן את הערך הנגדי (קיבול כנגד השראות ולהיפך) וע"י כך נביא לתיאום הקו. הבעיה היא בביצוע, כמעט בלתי אפשרי לאתר את אותה נקודה.

האמת שישנן נקודות אותן אפשר לזהות בקלות ולבצע בהן תאום. באיור 11 אפשר לראות כיצד ניתן לבצע תאום של אנטנות. קביעת אורכי הקטעים אינה פשוטה וקשה להיכנס לפרטיה במסגרת מאמר זה אבל אפשר למצוא אותה בספרות הטכנית המודפסת או המופיעה באינטרנט.



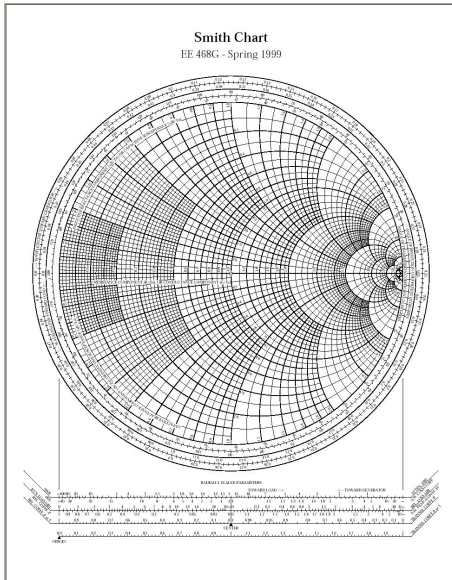
איור 11 - שימוש ב-Single Stub

מסתבר שאם נתקין לאורך קו תמסורת שני קווים כאלה, במרחק של $\lambda/4$ ביניהם, נוכל לבצע את התאום ביתר קלות. לא שהחשובים הם פשוטים אבל כאשר משתמשים בפתרון הזה בגלי מיקרו, תדרי מכ"מ, ביצוע התאום פשוט כמו השגת תאום במתאם אנטנות. דוגמה ל-Double Stub באיור 12.



איור 12 - שימוש ב-Double Stub

חישובי עכבות



איור 13 - SMITH CHART

חישוב העכבות, לאורך הקו, די מסובך אפילו עם עומסים אומיים טהורים. הוא הולך ומסתבך יותר כאשר העומס הינו בעל מרכיבים נוספים של השראות או קיבול. לעזרתנו באות תוכנות מחשב העוזרות להתגבר על בעיית החישוב. על מנת להקל על החישובים, בתקופה הטרומ מחשבת, פותח בשנת 1939, על-ידי פיליפ סמית, תרשים שבעזרתו ניתן לבצע אותם. התרשים נקרא Smith-Chart ודוגמתו ניתנת באיור 13.

במרכז המעגל נמצא הערך של העכבת האופיינית, כל מקום אחר מציין עכבת בערך שונה. היקף המעגל מכויל במעלות של אורך גל, 180 מעלות השוות ערך ל- $\lambda/2$.

ננעץ קצה של מחוגה במרכז וקצה שני בנקודה המתאימה לעכבת העומס, נסובב את הקצה השני במספר מעלות, המתאים לאורך הקו, ונגיע לנקודה המייצגת את העכבת באותה נקודה.

השימוש בתרשים סמית מאפשר את ביצוע החישובים המורכבים כגון חישוב ה-Stubים שראינו מקודם אבל הוא אינו פשוט ומחייב לימוד החורג ממסגרת מאמר זה. יחד עם זאת, כדאי לדעת שהוא קיים ונמצא בשימוש עד היום.

סיום

מאמר זה מכסה חלק קטן מהשימושים החריגים של קווי תמסורת בעלי עכבה מבוקרת ומי שרוצה להרחיב את ידיעותיו בנושא, האינטרנט והעולם פתוחים בפניו.

בנוסף לכך, כדאי לזכור שהמאמר מתייחס לשימושי תדר גבוה בלבד. ההתייחסות להתנהגות, כאשר מדובר על פולסים בעלי רוחב צר המופיעים בקצב גבוה מאוד, היא כבר סיפור אחר ועל כך בהמשך.

* * * * *