

UME'DE YAPAY KABLO VE KABLO TEST CİHAZLARININ KALİBRASYONU

Y. Gülmez, G. Gülmez, M. Saygılı

ÖZET

Türkiye 'de haberleşme kablosu alanında üretim yapan 20'ye yakın firma bulunmaktadır. Kabloların yüksek kalitede üretilmeleri için yalıtkan ve iletken kısımlarının ölçülmesi gerekmektedir. Bu amaçla kablo test cihazları kullanılmaktadır. Bu kablo test cihazlarının kalibrasyonu şimdiye kadar yurt dışından sağlanmaktaydı. Kablo firmalarının bu ihtiyacını UME'de karşılamak amacıyla gerekli olan cihazlar ısmarlanmıştır.

Haberleşme kablosu üreten firmaların kalibrasyon gereksinimleri iki grup altında toplanabilir.

Birincisi; kablo test cihazlarının günlük kalibrasyonunu yapmakta kullanılan yapay kablo standardının kalibrasyonudur. Yapay kablo standardı, 1 km uzunluğunda simetrik iki adet dördü haberleşme kablosunun özelliklerini taşıyacak şekilde içinde ayırık olarak 64 adet kapasitör ve 8 adet direnç bulunan bir standarttır. Bu standardın dengesizlik kapasitanslarının kalibrasyonu dijital dengesizlik kapasitansları ölçüm köprüsü ile gerçekleştirilebileceği gibi her bir kapasitörü kapasitans ölçen bir cihazla ölçülüp dengesizlik kapasitansları hesaplanabilir. Direnç kalibrasyonu ise dört terminalli direnç ölçen bir multimetre ile gerçekleştirilir.

İkincisi ise kablo test cihazlarının kalibrasyonudur. Bu cihazların kalibrasyonunda yapay kablo standardı, zayıflama standardı, çeşitli kapasitans ve direnç standartları kullanılmaktadır. Kalibrasyonda kullanılan bu standartların kalibrasyonu da UME'de gerçekleştirilebilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yapay kablo standardı, kapasitans, direnç, zayıflama.

KABLO TEORİSİ

Telefon hatlarında kullanılan kabloların kalitesi gönderilen sesin kalitesini de belirler. Bu yüzden her ülkenin PTT'si telefon hatlarında kullanılacak olan kabloların kalitesi hakkında normlar hazırlamış ve bu normlara üretici firmaların uymasını istemiştir. Düzenli olarak kablo üretici firmalara müfettişler göndererek, telefon kablolarının aynı kalitede üretilmesini sağlamaya çalışmaktadırlar. Türk PTT'si de uluslararası VDE472 ve VDE816 normlarını uygulamaktadır.

Kablo kalitesini ölçmek için kabloyu test eden cihazlar üretilmiştir. Bu cihazları kullanılan frekans bölgelerine göre ikiye ayırabiliriz:

- Düşük frekansta kullanılan kablonun özelliklerini ölçen cihazlar.
- Yüksek frekansta kullanılan kablonun özelliklerini ölçen cihazlar.

Bu cihazların amacı, telefon kablolarının zayıflatma değerini ve "cross-talk"unu ölçmektir. Konunun daha iyi anlaşılması için teorik bilgiden önce gerekli tanımlamaların verilmesi faydalı olacaktır.

Yapay kablo (artificial cable): 1000 m. uzunluğundaki kablonun 1 kHz'deki direnç ve kapasitans değerleri dikkate alınarak oluşturulmuş standard.

Tel direnci (single core resistance): Her iletkenin sahip olduğu direnç; R_A, R_B, R_C, R_D .

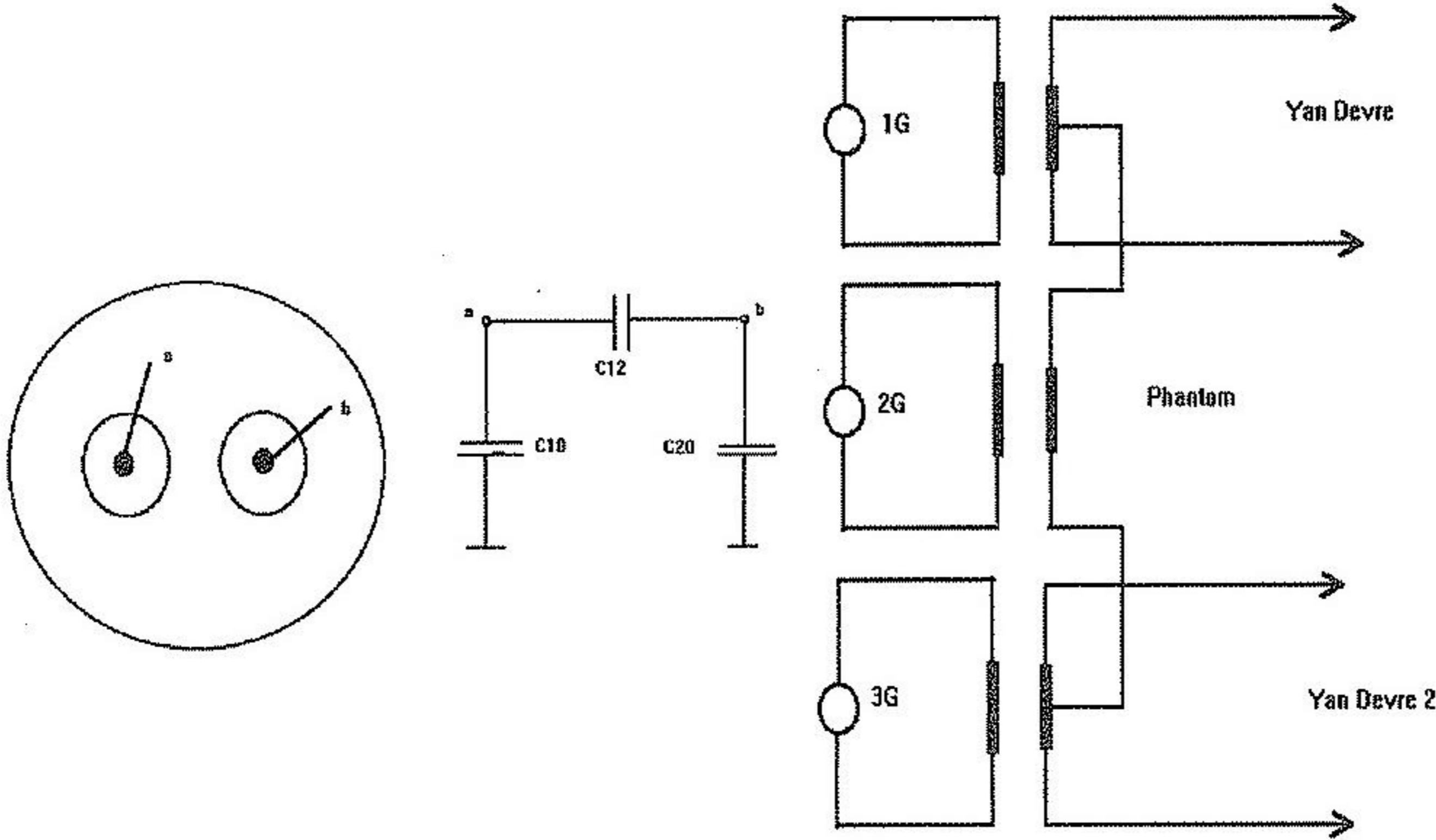
Hat direnci (loop resistance): Kullanılan bir hattın direnci; $R_A + R_B$.

Direnç farkı: Bir hattaki tel dirençleri arasındaki farktır; $R_A - R_B$. Önemli bir parametredir. İdealde R_A 'nın R_B 'ye eşit olması gerekir.

İkili (pair): Birbiri üzerine bükülmüş iki kablodan oluşan hat. (Şekil 1)

Dörtlü (quad): Dört kablonun birbiri üzerine bükülmesi ile elde edilen kablo seti.

Phantom devresi: Dörtlü hattın başlangıç ve bitiş uçlarına transformatörler bağlanarak üçüncü bir hat üretilir. Şekil 2'de sadece başlangıç phantom devresi gösterilmiştir. [1]



Şekil 1: İkili ve eşdeğer kapasitans devresi

Şekil 2: Dörtlü phantom devresi

Günümüzde kablo üreticileri, kabloları ikili veya dörtlü gruplar şeklinde üretmektedir. Yalıtkan malzeme olarak kağıt, PVC veya PE kullanılmaktadır. Kablonun yalıtkan kısmının dielektrik sabitinin ve kayıp faktörünün düşük olması istenir. Böylelikle kablolar arası kapasitansın mümkün olduğu kadar küçük olması sağlanmış olur.

İkili kabloda C_{12} kablolar arası kapasitör, C_{10} ve C_{20} kablo ve toprak arasındaki kapasitörlerdir. ($C_{10} - C_{20}$) toprak kapasitörleri arasındaki dengesizlik kapasitansı (unbalance to ground, earth coupling) ve C_B ise kablodan bakılınca görülen kapasitansdır, (mutual capacitance). C_B değeri şu şekilde hesaplanabilir:

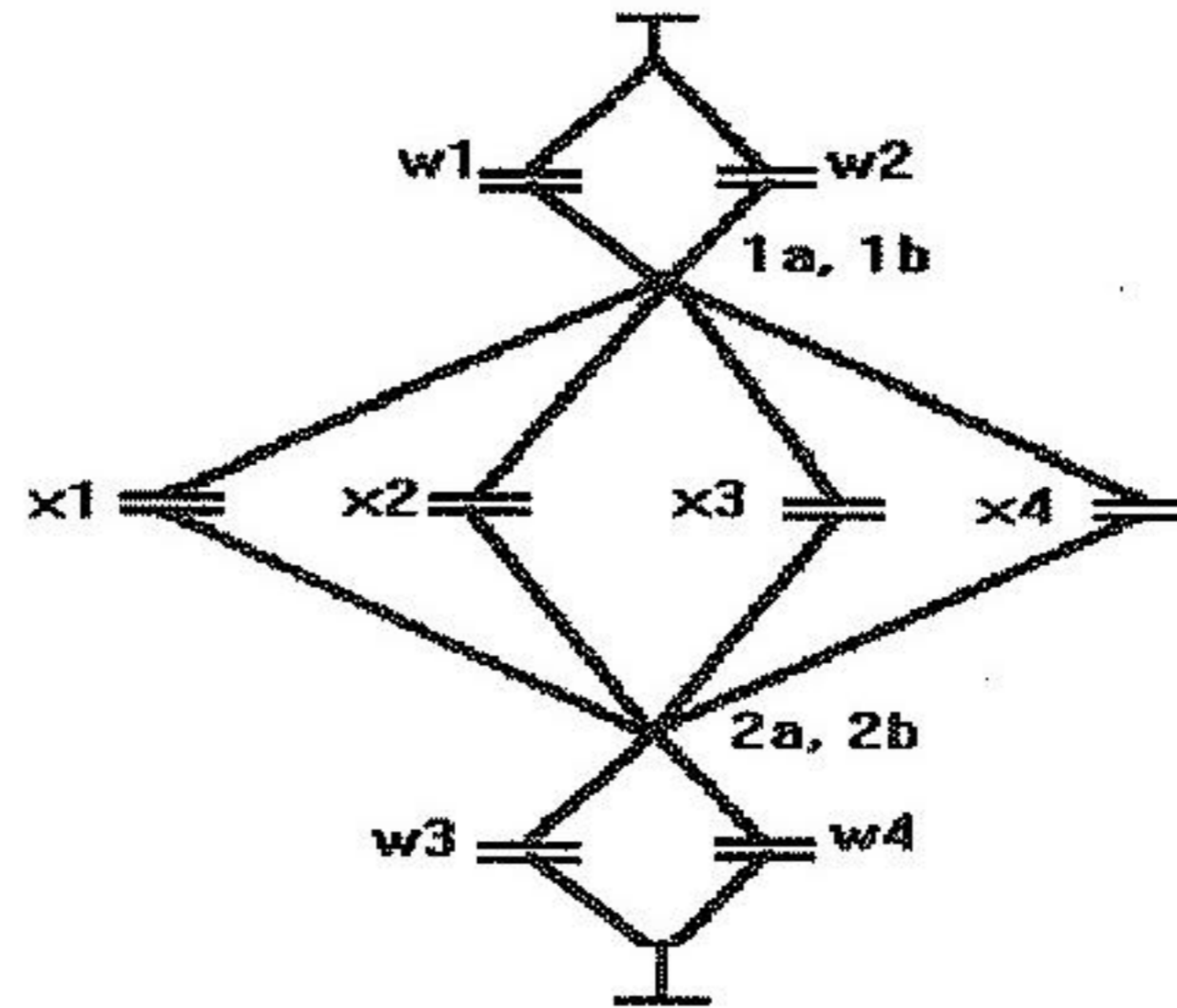
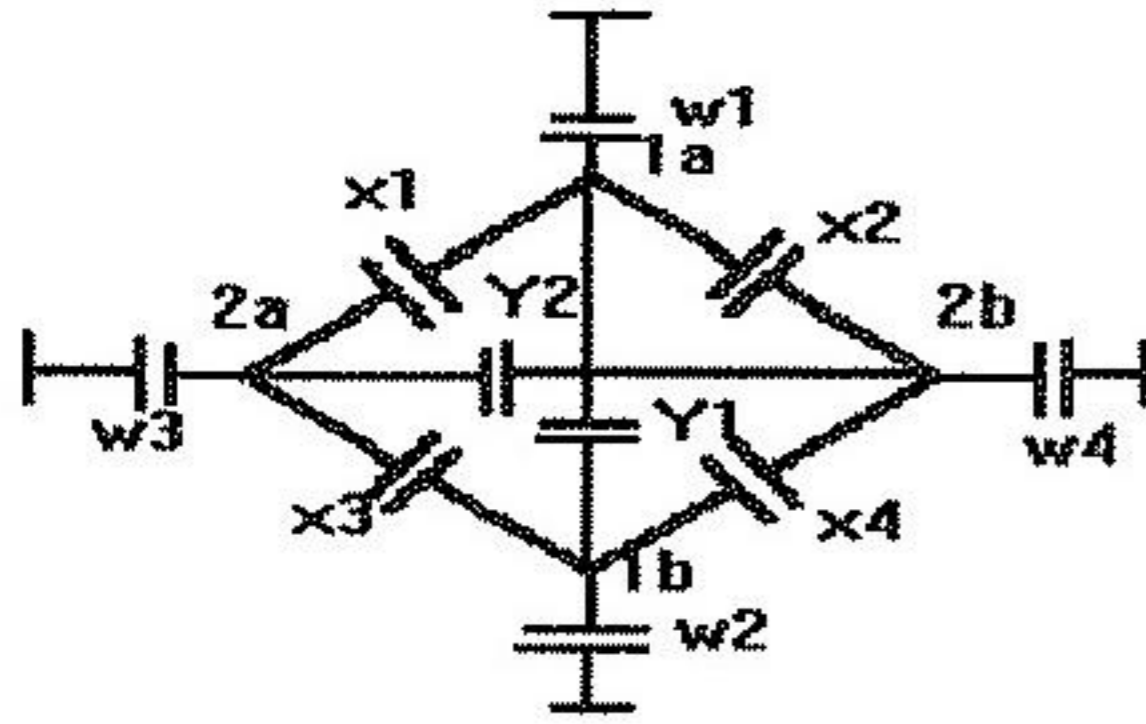
$$C_B = C_{12} + C_{10} \cdot C_{20} / (C_{10} + C_{20}) \quad (1)$$

Dörtlü kablo ikiliye göre daha küçük karşılıklı kapasitans değerine sahiptir. 4 çeşit dörtlü vardır. Bunlar:

- 1- Phantom hattı kullanmadan oluşturulan dörtlü hatlar.
- 2- Phantom devresi kullanmadan oluşturulan dörtlü hatlar.
- 3- Phantom devresi ve özel devreler kullanılarak oluşturulan hatlar.
- 4- Demiryolu haberleşmesinde kullanılan phantom devreleri ile oluşturulmuş hatlar.

Türkiye’de phantom hattı kullanılmadan oluşturulan dörtlü hatlar üretilmektedir. Şekil 3’te bir adet dörtlünün kapasitans devresi gösterilmiştir. Birinci dörtlüyü ele alırsa 1 ve 2 yan devreleri phantom devresi aracılığı ile paralel bağlanmıştır. 1_A ile 1_B arası ve 2_A ile 2_B arası transformatör ile kısa devredir.

Dörtlüye göre phantomlu dörtlünün hat direnci, yan devreler paralel bağlandığı için yarı yarıya düşmüştür. Hattın direnci; öz direnç, sıcaklık, frekans değerleri arttıkça artar. Yüksek frekanslara çıkıldıkça deri etkisi artacağından, akımın geçtiği tel kesiti düştüğünden direnç artar dolayısıyla hattın zayıflaması artar. Hat direnci sıcaklıkla da büyük ölçüde değişir. Bu yüzden hesaplamalarda sıcaklık etkisi dikkate alınmalıdır. Örneğin telin sıcaklığı ± 10 °C değiştiğinde hat direncinin değeri 4 % değişmiş olur. Yüksek dereceli simetrik hatlarda hat direnci yanında, direnç farkı da dikkate alınmalıdır. Dörtlüde ve phantomlu dörtlüde direnç farkı şöyle hesaplanabilir:



Şekil 3: Dörtlünün kapasitans eşdeğeri

Şekil 4: Phantomlu dörtlünün kapasitif eşdeğeri

$$\text{Yan devre direnç farkı} = R_A - R_B \quad (2)$$

$$\text{Dörtlü phantomda direnç farkı} = (R_A \cdot R_B) / (R_A + R_B)_{YAN1} - (R_A \cdot R_B) / (R_A + R_B)_{YAN2} \quad (3)$$

$$\text{Dörtlüde direnç farkı} = 1/4 \cdot [(R_A + R_B)_{YAN1} - (R_A + R_B)_{YAN2}] \quad (4)$$

Direnç farkı küçük olursa “crosstalk” un etkisi de o oranda azaltılmış olur. Direnç farkı büyük olursa kabloların üzerindeki iletkenlerin gerilim seviyeleri farklı olacağından “crosstalk” etkisi de artacaktır. Dörtlüdeki karşılıklı kapasitans C_B ; iletkenin cinsine ve dielektrik malzemeye bağlıdır. C_B ; iletkenler arası mesafe azaldıkça, iletkenlerin yüzeyi arttıkça, dielektrik sabiti arttıkça, nem arttıkça, kağıt yalıtkan için sıcaklık arttıkça, PE yalıtkanı için ise sıcaklık azaldığı oranda artar. C_B ’nin düşük olması istenir. C_B değeri şöyle hesaplanabilir.

$$C_{B \text{ YAN DEVRE1}} = Y_1 + (X_1 \cdot X_3)/(X_1 + X_3) + (X_2 \cdot X_4)/(X_2 + X_4) + (W_1 \cdot W_2)/(W_1 + W_2) \quad (5)$$

$$C_{B \text{ YAN DEVRE2}} = Y_2 + (X_1 \cdot X_3)/(X_1 + X_3) + (X_2 \cdot X_4)/(X_2 + X_4) + (W_3 \cdot W_4)/(W_3 + W_4) \quad (6)$$

$$C_{B \text{ phantom}} = (1 + X_2 + X_3 + X_4) + (W_1 + W_2) \cdot (W_3 + W_4)/(W_1 + W_2 + W_3 + W_4) \quad (7)$$

Kablo yapımında kullanılan izolasyonun kalınlığının bütün kablolarda aynı ve simetrik olduğu durumda: “ $X_1 = X_2 = X_3 = X_4 = X$; $Y_1 = Y_2 = Y$; $W_1 = W_2 = W_3 = W_4 = W$ ” kabul edilir. Bu değerler yukarıdaki üç denklemde yerine konularak basitleştirilebilir:

$$C_{B \text{ YAN DEVRE 1,2}} = X + Y + W/2 \quad (8) \quad C_{B \text{ PHANTOM}} = 4X + W \quad (9)$$

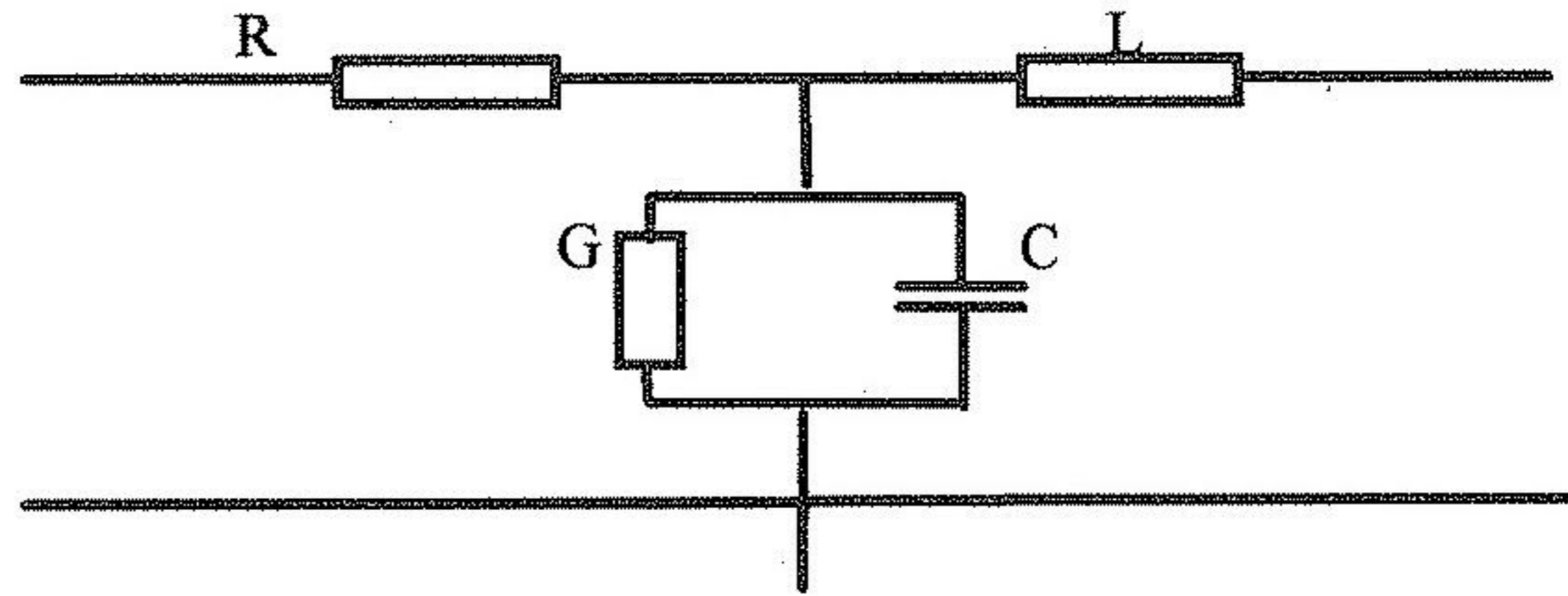
“ $X, Y, W = 5, 1, 10$ ” oranında olduğu varsayımı ile kablo tipleri karşılaştırılabilir:

$$C_{B \text{ PHANTOM}}/C_{B \text{ YAN DEVRELER 1,2}} = 2,7 \quad (10) \quad C_{B \text{ PHANTOM}}/C_{B \text{ YAN DEVRE 1}} = 1,6 \quad (11)$$

Buradan görüldüğü gibi phantomlu dörtlünün, dörtlüye göre hat direnci yarı yarıya düşük olmasına rağmen, karşılıklı kapasitans etkisi 2.7 kat büyüktür. Phantomlu dörtlünün ikiliye göre karşılıklı kapasitans değeri ise 1.6 kat daha büyüktür. Bu yüzden günümüzde kablo üreten fabrikalar ikili ve dörtlü gruplar şeklinde kablo demetleri üretmektedir. Phantomlu dörtlü üretmemektedirler. Bu durumda yapay kabloda geleneksel olarak ölçülen phantomla ilgili dengesizlik kapasitans değerlerinin fabrikalar için bir önemi kalmamıştır.

HATLARIN YÜKSEK FREKANS EŞDEĞERİ

Her hat R direncine, L indüktansına, G kondüktansına ve C kapasitansına sahiptir. Belli bir kablo çeşidi için 1 km’lik hattın R, L, C, G değerleri bilinir. Şekil 5’te bir hattın yüksek frekans eşdeğer devresi gösterilmiştir.



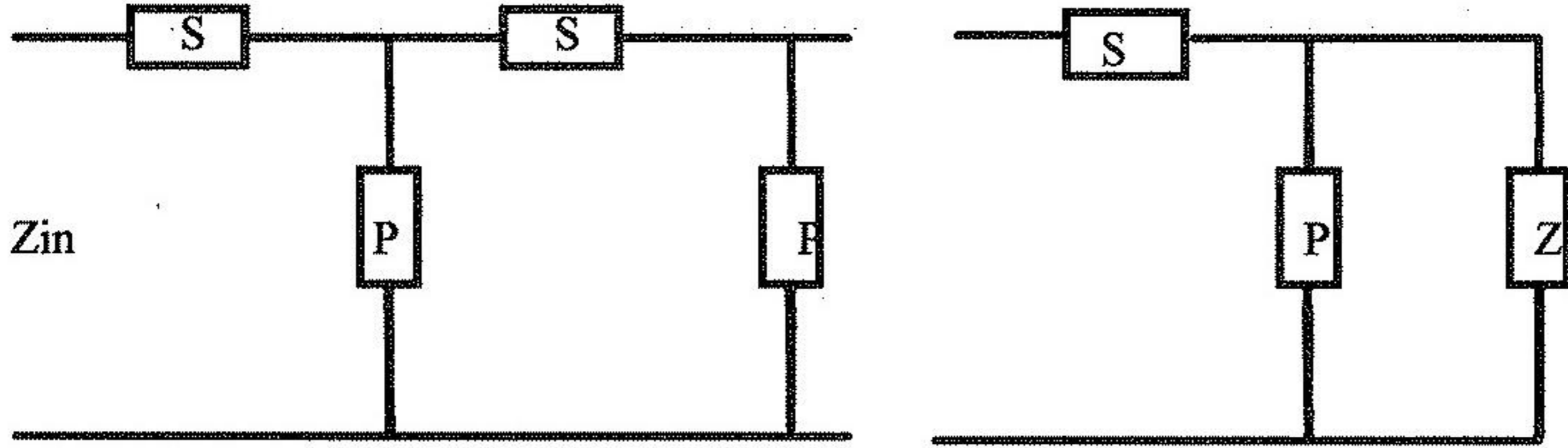
Şekil 5: Hattın yüksek frekans eşdeğer devresi

$$\text{Seri empedansı } S = (R + j\omega L) \quad (12) \quad \text{Paralel empedansı } P = 1/(G + j\omega C) \quad (13)$$

Hat boyunca seri ve paralel empedanslar birbirini takip ederler (Şekil 6). Maksimum güç aktarılabilmesi için hattın giriş direncinin hattın karakteristik empedansına eşit olması gerekir.

$$Z_{IN} = Z_0 = S + Z_0.P / (Z_0 + P) \quad (14) \quad Z_0^2 - S.Z_0 - S.P = 0 \quad (15)$$

$$Z_0 = ((R_0 + j\omega L) / (G + j\omega C))^{1/2} = (S.P)^{1/2} \quad (16)$$



Şekil 6: Sonsuz uzunluktaki hattın seri ve paralel empedanslar ile modellenmesi

Propogasyon sabiti de hesaplanabilir.

$$U_2 = U_1 e^{-\alpha l} + U_1 e^{-j\beta l} = U_1 e^{-\gamma l} \quad (17) \quad U_1 / U_2 = (1 + S / ((P + Z_0).P.Z_0)) = 1 + S/Z_0 +$$

$$S/P = 1 + S/\sqrt{S.P} + S/P \quad (18)$$

$$U_1/U_2 = 1 + \sqrt{S/P} + (\sqrt{S/P})^2 \quad (19)$$

$U_1/U_2 = e^{-\gamma l}$ ifadesi yukarıdaki formülde yerine konur ve formül seriye açılır.

$$\gamma = \sqrt{S/P} = ((R + j\omega L).(G + j\omega C))^{1/2} \quad (20)$$

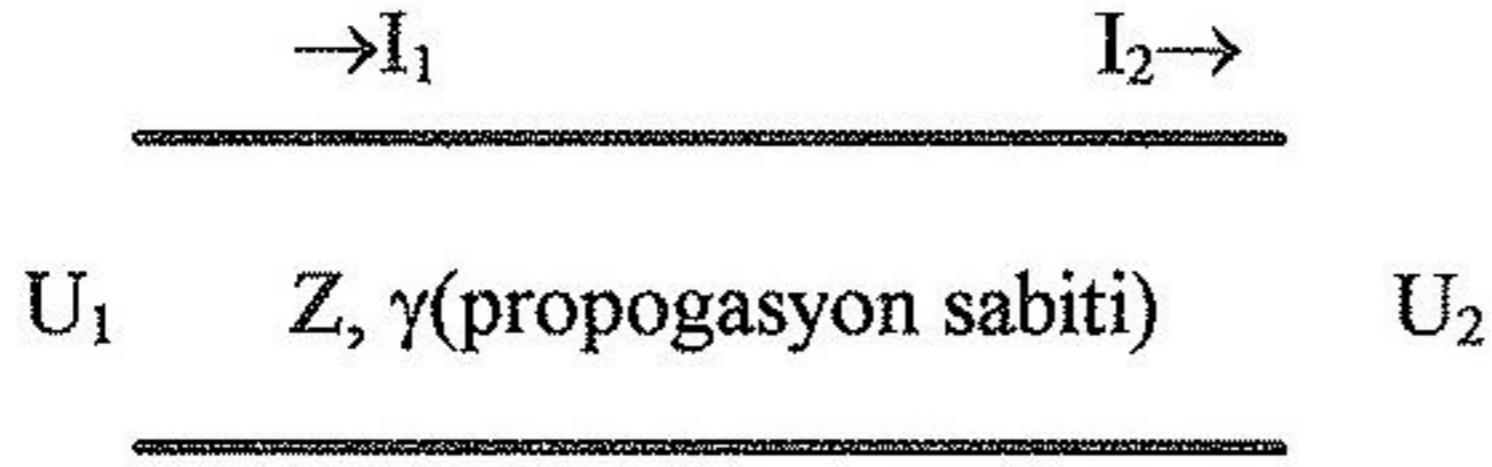
Burada “ α ” zayıflama katsayısı, “ β ” faz sabiti, “ l ” hattın uzunluğu ve “ γ ” propogasyon sabitidir. Periyodik dalga fonksiyonu için; hattın dalga boyunun x_1 ve x_2 noktaları arasındaki mesafeye eşit olduğu durumdaki zayıflama ve faz kayması şu şekilde ifade edilebilir:

$$U(x,t) = |U| . e^{-\alpha l} e^{j(\omega t - \beta l)} \quad (21)$$

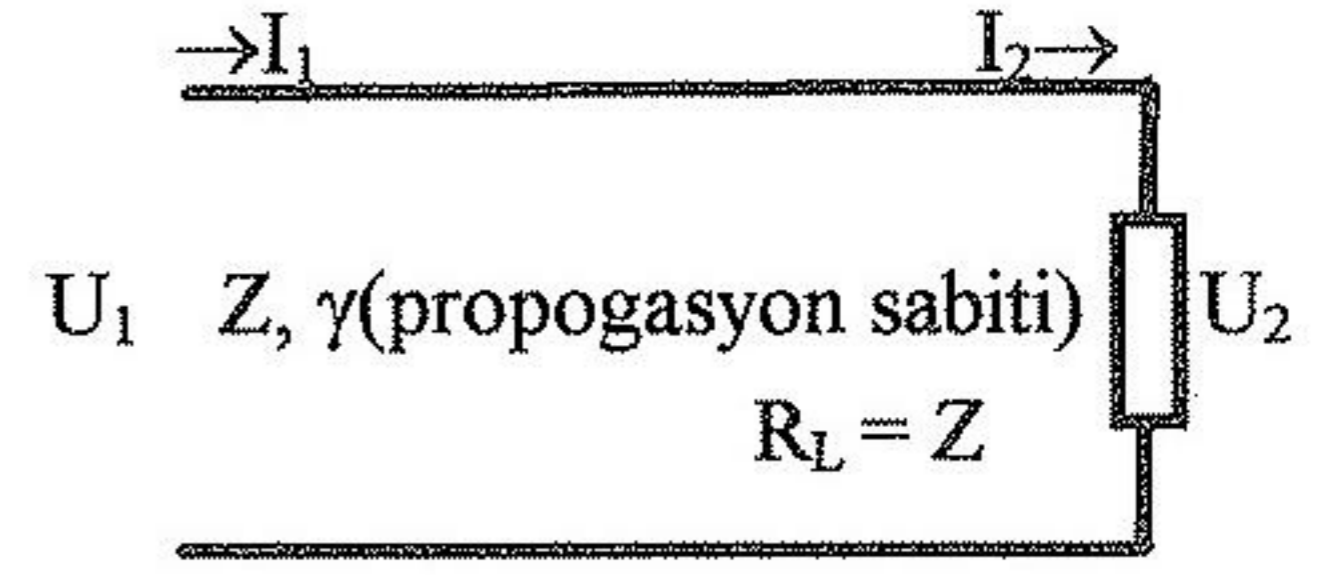
$$U(x_1)/U(x_2) = (|U| . e^{-\alpha x_1} e^{-\beta x_1}) / (|U| . e^{-\alpha x_2} e^{-\beta x_2}) = e^{\alpha(x_2 - x_1)} . e^{\beta(x_2 - x_1)} \quad (22)$$

$$\beta(x_2 - x_1) = \beta . \lambda = 2 . \pi \rightarrow \beta = 2 . \pi / \lambda \quad (23) \quad \text{Zayıflama, } a = \alpha(x_2 - x_1). \quad (24)$$

Transmisyon teorisinden bilindiği gibi hattın yük direnci karakteristik empedansla eşit olursa veya hat sonsuz sayılabilecek uzunlukta olursa, ancak bu durumlarda yansıma olmaz. Doğru zayıflama katsayısını ölçebilmek için hatta hiçbir yansımanın olmaması gerekmektedir. Hatların yüksek frekansta karakteristik empedansları, zayıflamaları ve çeşitli “crosstalk” değerleri ölçülür. Şekil 7’den yararlanarak hattın karakteristik empedansı bulunabilir.



Şekil 7: Z karakteristik empedanslı hat.



Şekil 8: Z karakteristik empedansına eşit empedansla sonlandırılmış hat.

$$U_1 = U_2 \cosh \gamma + I_2 \cdot Z \cdot \sinh \gamma \quad (25)$$

$$I_2 = 0 \Rightarrow U_1 / I_1 = Z \cdot \coth \gamma = R_0 \quad (27)$$

$$Z_0^2 = R_0 \cdot R_k \Rightarrow Z_0 = (R_0 \cdot R_k)^{1/2} \quad (29)$$

$$I_1 = (U_2 / Z) \cdot \sinh \gamma + I_2 \cdot \cosh \gamma \quad (26)$$

$$U_2 = 0 \Rightarrow U_1 / I_1 = Z \cdot \tanh \gamma = R_k \quad (28)$$

$$R_0 / R_k = (\tanh \gamma)^2 \quad (30)$$

Buradan propogasyon sabiti “ γ ” bulunabilir. Her hattın başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki zayıflama diğer yüksek frekans parametreleri gibi çeşitli frekanslarda ölçülür. Zayıflama parametresi baz alınarak kablunun çalışabileceği en yüksek frekans bulunmaya çalışılır. Bunun için hat, şekil 8’deki gibi karakteristik empedansa eşit bir empedansla sonlandırılmalıdır.

$$U_1 = U_2 \cdot \cosh \gamma + I_2 \cdot Z \cdot \sinh \gamma \quad (31)$$

$$U_1 = U_2 \cdot \cosh \gamma + U_2 \cdot \sinh \gamma \quad (33)$$

$$U_1 / U_2 = |U_1| / |U_2| \cdot e^{-j(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (35)$$

$|U_1| / |U_2| = e^a$. Aynı ifadeler $|I_1| / |I_2| = e^a$ olarak akımlar için de çıkarılabilir.

$$a = \ln |U_1| / |U_2| \text{ Neper (Np)} \quad (36)$$

$$\text{Yük direnci: } R_1 = Z_0 = U_2 / I_2 \quad (32)$$

$$U_1 / U_2 = \cosh \gamma + \sinh \gamma = e^\gamma = e^{-\alpha} \cdot e^{j\beta} \quad (34)$$

$$a = \log |P_1| / |P_2| \text{ dB} \quad (37)$$

1 dB = 0.1151 Np şeklinde bulunabilir. Zayıflama çeşitli normlarda “Np” ya da “dB” olarak verilmektedir. Crosstalk, bir hattın yanındaki hattı elektriksel olarak etkilemesidir. Şekil 9’da karakteristik empedansları farklı iki hat arasındaki crosstalk incelenmiştir. Birinci hattın girişinin ikinci hattın girişini etkilemesine Next (Near-end -crosstalk), birinci hattın girişinin ikinci hattın çıkışını etkilemesine Fext (Far-end-crosstalk) ve birinci hattın çıkışının ikinci hattın çıkışını etkilemesine Elfext denir. Bunlar yüksek frekans kablolarında oluşan crosstalk çeşitleridir. İki haberleşme hattı arasında kapasitif, resistif veya manyetik kapling oluşması crosstalk’a neden olur. Kapasitif kapling elektrik alan simetrisinin bozulmasına neden olur. Manyetik kaplingin etkisi kapasitif kaplinge göre çok daha küçüktür. Resistif kapling kablolarındaki direnç farkından dolayı ortaya çıkar. Direnç farkı, phantom kullanılmış ise yan devrenin phantoma göre crosstalk ölçümünde önemli bir parametredir. Normlara göre crosstalk değerleri 70 dB’den büyük olmalıdır. Crosstalk ölçümünde güç ölçümleri baz alınır.

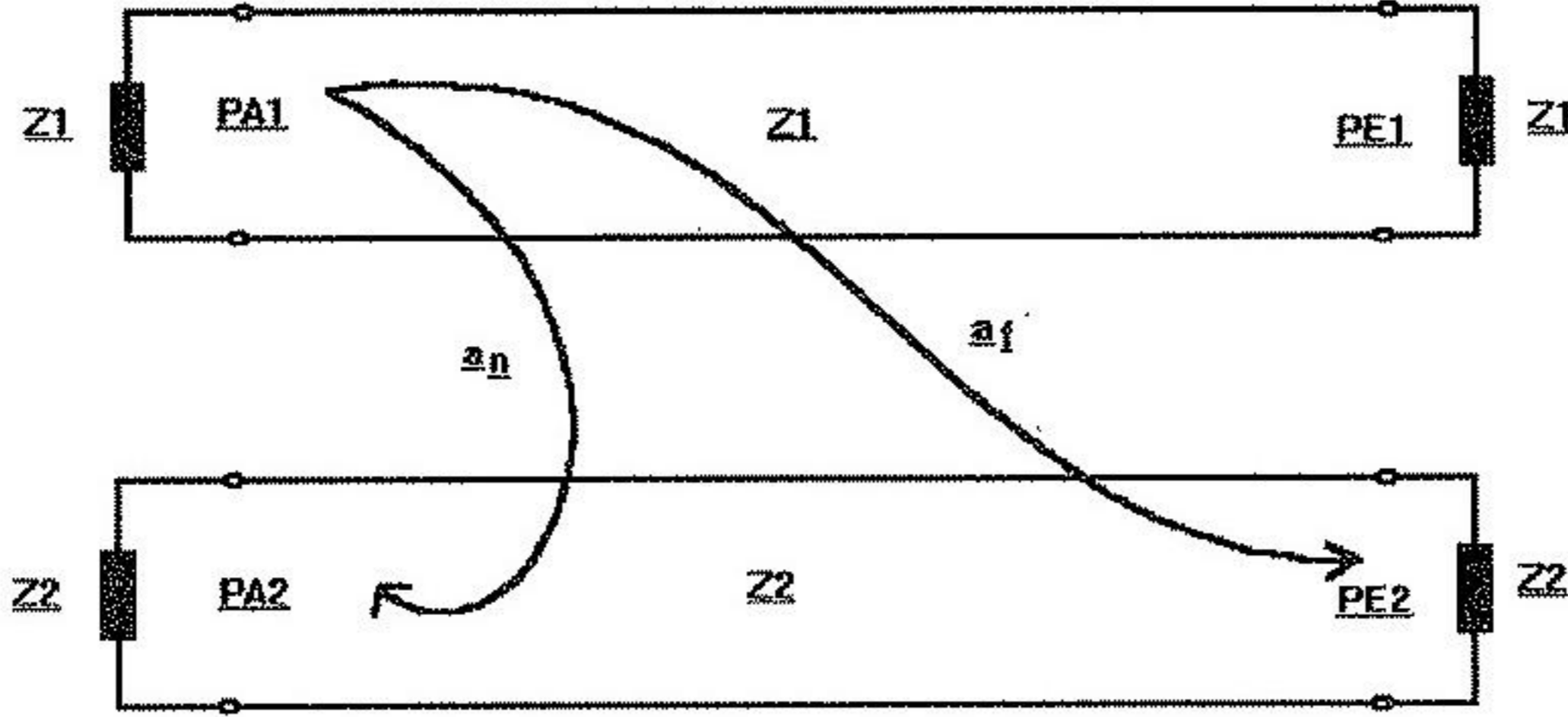
$$\text{Next } P_{A1} / P_{A2} = 10^{a_n} \rightarrow a_n = 10 \log P_{A1} / P_{A2} \text{ dB} \quad (38)$$

$$\text{Fext } P_{A1} / P_{E2} = 10^{a_f} \rightarrow a_f = 10 \log P_{A1} / P_{E2} \text{ dB} \quad (39)$$

$$\text{Elfext } P_{E1} / P_{E2} = 10^{a_f - a} \rightarrow a_f - a = 10 \log P_{E1} / P_{E2} \text{ dB} \quad (40)$$

$$(P_{E1} / P_{E2} = (P_{A1} / P_{E2}) \cdot (P_{E1} / P_{A2}))$$

Next ve Fext değerleri ölçülerek, Elfext değeri hesaplanarak bulunur. Bu yüzden yüksek frekans cihazları kontrolünde Fext ve Next değerleri ölçümü önemlidir.



Şekil 9: Karakteristik empedansları farklı iki hat arasındaki crosstalk

Ekransız dörtlü hatlar 550 kHz'e kadar çalışabilir. Daha yüksek frekanslarda hat kayıpları artar. Koaksiyel kablolar ise düşük frekanslarda 60 kHz'e dek crosstalk etkisi büyük olduğu için 0-60 kHz frekans aralığında kullanılmazlar. Data kabloları 600 MHz'e kadar kullanılmaktadır. Karakteristik empedansın etkisi 100 kHz'den başlamaktadır. 100 kHz, 300 kHz, 550 kHz, 1024 kHz, 5 MHz, 10 MHz, 50 MHz, 100 MHz, 300 MHz, 600 MHz'lerde hattın yüksek frekansdaki ölçümleri yapılabilmektedir. MEA firması 600 MHz'e kadar çalışan sistemler yapmışlardır. Fakat Türkiye'deki fabrikalardan 10 MHz'in üstünde çalışan sistemler için bir talep gelmemiştir.

UME'DE YAPAY KABLO STANDARDI KALİBRASYONU

Yapay kablo standardı, 1 km uzunluğunda simetrik iki adet dörtlü haberleşme kablosunun özelliklerini taşıyacak şekilde içinde ayrı olarak 64 adet kapasitör ve 8 adet direnç bulunan bir standarttır. Yapımında mika kapasitörler ve manganin dirençler kullanılmış olduğu için standardın uzun zaman kararlılığı oldukça iyidir. Bu standardın dengesizlik kapasitanslarının kalibrasyonu dijital dengesizlik kapasitansları ölçüm köprüsü ile gerçekleştirilebileceği gibi her bir kapasitörü kapasitans ölçen bir cihazla ölçülüp dengesizlik kapasitansları hesaplanabilir. UME daha hassas ölçüm sonucu veren fakat daha uzun zaman süren ikinci metod kullanılmaktadır. Şekil 3'te bir dörtlü üzerindeki X, W ve Y ayrı kapasitansları ve yanındaki dörtlü üzerindeki X, W ve Y yarı kapasitansları kullanılarak; yapay kablo standardının dengesizlik kapasitansları (k_1, k_2, \dots, k_{12}), toprak dengesizlik kapasitansları (e_1, e_2 ve e_3), ekran dengesizlik kapasitansları (ea_1, ea_2 ve ea_3), karşılıklı kapasitansları (C_1, C_2 ve C_3) hesaplanmaktadır.[2] Bu ölçümler 1 kHz frekansında gerçekleştirilmektedir. Direnç kalibrasyonu ise yapay kablo standardının dirençleri 50 ohm'dan düşük olduğu için dört terminalli olarak gerçekleştirilmektedir.

KABLO TEST CİHAZLARI VE KALİBRASYONU

Kablo test cihazlarının kalibrasyonunda yapay kablo standardı, zayıflama standardı, dekad kapasitans standardı ve dekad direnç standardı kullanılmaktadır. Kalibrasyonda kullanılan bu standartların kalibrasyonu da UME'de gerçekleştirilebilmektedir.

Kablo test cihazlarının ölçümleri düşük frekanslarda 20, 70, 128, 800 veya 1000 Hz frekanslarında yapılmaktadır. VDE 472 normuna göre çeşitli frekanslarda ölçüm belirsizlikleri tanımlanmıştır. Kalibrasyonu yapılan kablo test cihazının bu belirsizlik sınırları içinde kalması gerekir. Kablo test cihazlarının kısa devre testi, süreklilik testi, frekans testi, kapasitans ve dengesizlik kapasitans testleri ve hat direnci testleri yapılır. Kablo test cihazı yüksek frekansda da test yapabiliyorsa bu testler 100 kHz ve 10 MHz frekansları arasında ve kablunun karakteristik empedans, zayıflama, çeşitli crosstalk testlerini kapsamaktadır.

İLERİYE DÖNÜK AMAÇLAR

Yapay kablo standardı kalibrasyonu UME'de gerçekleşmekte ve kablo test cihazları kalibrasyonun UME'de gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir.

REFERANSLAR

- [1] A. Wirk, G Thlio "Niederfrequenz und Mittelfrequenz Messtechnik," Stuttgart, page 200, 1956
- [2] E. Haak, "Einführung in die Leitungstechnik," Goslar, page 90, 1953