

# Sayısal imlerin jonksiyon kabloları üzerinden iletimi ve tekrarlayıcı tasarımı

önder YETİŞ  
Sermet SÜMER

## ÖZET

Bu yazıda, özellikle kablo üzerinden sayısal haberleşme ortamına çıkan sorunlar incelenmekte ve bu sorunların çözümünde en önemli rolü oynayan tekrarlayıcılar (repeaterler) ele alınmakta ve dengeleyiciler ayrıntılarıyla incelenmektedir.

Birinci bölümde, sayısal bilgi iletiminde kullanılan hat türleri tanıtılmakta ve bu hatların zayıflamalarının frekansla değişim bağıntıları elde edilmektedir. Ayrıca, sayısal iletimde ortaya çıkan bozucu etkenler incelenmektedir, ikinci bölümde tekrarlayıcıların çalışma ilkeleri ve temel görevleri belirtilmekte ve bir tekrarlayıcı örneği verilmektedir. Ayrıca, "saat çıkarma" işlemi ayrıntılarıyla incelenmektedir. Son olarak, üçüncü bölümde dengeleyiciler incelenmekte ve elde edilen verilere dayanarak optimum bir dengeleyicinin tasarımının nasıl yapılabileceği gösterilmektedir.

## SUMMARY

*In this article, the problems arising in digital communication over cables are investigated. The repeaters playing the most important role in the solution on these problems are handled and the equalizers are analyzed in details.*

*In the first section, the types of lines used in digital data transmission are introduced and the frequency dependence of attenuation in these lines are obtained. In addition, the disturbances arising in digital transmission are investigated. In the second section, the operation principles and the basic functions of the repeaters are stated and a repeater model is given. In addition, the synchronization is analyzed in details. Finally, in the third section, equalizers are investigated and the design of an optimum equalizer is shown.*

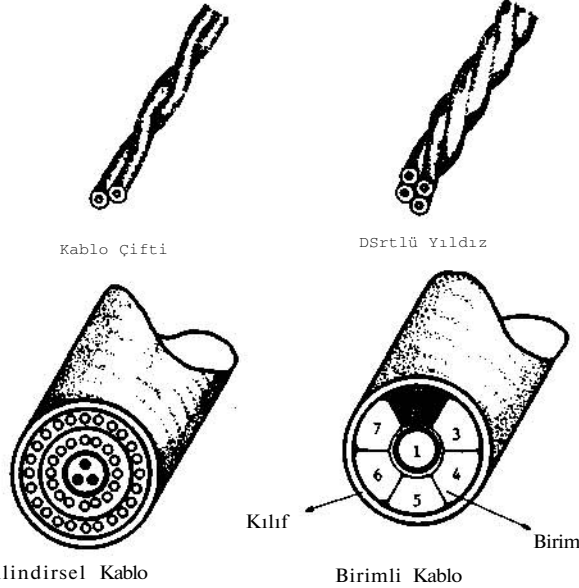
## I. İLETİM ORTAMI (8)

Sayısal haberleşme sistemlerinin uygulamasında iletim ortamı olarak en çok yeraltı kabloları ve radyo-link düzenleri kullanılmaktadır. Haberleşme trafiği fazla yoğun olan ve birden çok otomatik telefon santralını içeren şehir merkezlerinde telefon santrallarını birbirine bağlayan jonksiyon kablolarının kapasitelerini arttırmak amacıyla, zaman paylaşımli sayısal haberleşme sistemleri kullanılmaktadır, jonksiyon kabloları genellikle çok sayıda kağıt ya da plastik yalıtımlı çiftleri içeren, ağır, döşenmeleri zor, masraflı ve temel olarak alçak frekanslı imleri iletmek üzere üretilmiş yeraltı kablolarıdır. Bu kablolar özellikle ses frekansı imlerinin iletimi için yapıldıklarından, yüksek frekanslarda şiddetli gürültü ve konuşmanın çapraz karışması (diyafoni) olayı ortaya çıkar. Bu sorunlar darbe kodlu bindirim (Pulse Code Modulation; PCM) biçimindeki sayısal haberleşme tekniğiyle çözümlenmiş ve günümüzde oldukça geliştirilerek jonksiyon kabloları üzerinden yapılan haberleşmede yaygın bir uygulama alanı bulmuştur. Darbe kodlu bindirimin kablolarda uygulanması sayısal haberleşme teknikleri için de bir dönüm noktası olmuştur. Bugün geliştirilen türlü yüksek kapasiteli sayısal haberleşme sistemleri için iletim ortamı olarak koaksiyal kablolar, mikrodalga radyo kanalları, dalga kılavuzları ve optik yollar kullanılmaktadır.

Haberleşme alanında kullanılan kabloların geçmişi 85 yıl önceye dayanmaktadır. Kablonun iki temel özelliği (elemanı) iyi bir iletken ve iyi bir yalıtkan olup, bunlar için bakır ve özel kağıtlar uygun bulunmuştur, iletken teller bükülü çiftler ya da dörtlü gruplar halinde düzenlenmektedir. Çiftler arasındaki uzaklık ayarlanarak konuşmanın çapraz karışma miktarı denetim altına alınır.

Onder Yetiş, TÜBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsü  
Sermet Sümer, TÜBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsü

bilir. Bükülü çiftler ya da dörtlü gruplar kablo içinde iki farklı biçimde yerleştirilirler (Şekil 1). Bir kablo türünde çiftler aynı eksenli silindirik bölümler içine dizilirler; ötekinde ise çiftler önce belirli sayıda çift içeren birimler halinde toplanır, sonra bu birimler birleştirilerek kabloyu oluştururlar. Bugün her iki tür de kullanılmakta, ancak birimlerden oluşan çiftli kablolar tercih edilmektedir.



Şekil 1. Haberleşme alanında kullanılan kablo türleri

Kabloyu dış etkenlerden korumak için koruyucu olarak genellikle kurşun bir zırh kullanılmaktadır. Kabloların bu biçimde üretimi ve üretiminde kullanılan malzemeler günümüze kadar gelmiştir. 1950 yıllarında plastik yalıtkan (polietilen) ortaya atılmıştır. Maliyeti düşürmek için atılan adımlar sonucu bakır iletken yerini alüminyuma, kurşun zırh ise yerini plastik koruyucuya bırakmıştır. Fakat kurşun zırh su geçirgenliği açısından plastik koruyucuya göre daha üstün olduğundan, tümüyle terkedilememektedir. Günümüzün modern terminal aygıtlarının duyarlılıkları yüksek olup daha yüksek hat kayıplarına izin verilebilmekte, dolayısıyla kablo iletkenlerinin boyutları ise küçültülebilmektedir. Dörtlü kablo çiftlerinde birim kesite düşen iletken sayısı, bükülü çiftlerden oluşan kablodakine göre % 40 daha fazladır. Buna karşılık, bükülü çiftli kablolarda ekleme işlemi daha kolaydır.

Basit bir iletim hattı, birim uzunluk boyunca direnci  $R$ , endüktansı  $L$ , geçirgenliği  $G$  ve kapasitesi  $C$  olan bir iletken çifti ile gösterilebilir. Hattın başlangıçtan herhangi bir  $x$  uzaklığında bulunan noktasında iletkenlerden akan akım " $i$ " ve iletkenler arası gerilim " $v$ " ise;

$$\frac{\partial v}{\partial x} = -[Ri + L(3i/3t)]$$

$$\frac{\partial i}{\partial x} = -[Gv + C(\partial v/\partial t)]$$

bağıntıları geçerlidir. Ve  $i^{\wedge *}$  ve  $le^{\wedge 0*}$  biçiminde gösterilebilen sinüzoidal sürekli durumdaki gerilim ve akım için bu denklemlerin çözümü,

$$V = Ae^{-P^*x} + Be^{P^*x}$$

$$I = (1/Z_0) (Ae^{-P^*x} - Be^{P^*x})$$

olup, burada

$$P = [(R + j\omega L)(G + j\omega C)]^{1/2} = a + j\beta$$

$$Z_0 = [(R + j\omega L)/(G + j\omega C)]^{1/2}$$

$\rho$  : yayılım değişmezi

$a$  : birim uzunluktaki zayıflama değişmezi

$j\beta$  : birim uzunluktaki faz değişmezi

$Z_0$  : hattın karakteristik empedansı

dir. Negatif işaretli Uslu terim kaynaktan yüke doğru ilerleyen dalgayı, pozitif işaretli iisli terim ise yansıyan dalgayı belirlemektedir.  $A$  ve  $B$  katsayılarının değerleri, hattın iki ucundaki sınır koşulları ile bulunabilir.

iletim hatları kuramına (teorisine) göre, iletken empedansı frekansa bağımlı karmaşık bir büyüklüktür. Bu empedans, iletkenin çapı oldukça büyük varsayıp sonsuz kalınlıkta düzlem biçiminde ele alınabildiğinde basitçe formüle edilebilmektedir.

iletkenin birim alanı için  $Z_s$  yüzey empedansı aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$Z_s = (1/\delta \sigma) (1 + j) = (\omega \mu / 2 \sigma)^{1/2} (1 + j)$$

$a$  : iletken malzemenin iletkenliği

$j\omega$  : iletken malzemenin geçirgenliği

$$\delta = (2/\omega \mu \sigma)^{1/2}$$

$\delta$  : Deri derinliği

Görüldüğü üzere, yüzey empedansı gerçel (reel) ve sanal (imajiner) terimlerden oluşur ve frekansın karekökü ile orantılıdır. Her iki terimin mutlak değeri, 8 kalınlığındaki iletkenin doğru akım direncine eşittir.  $Z_s$ 'in gerçel kısmı olan  $R_s/V^2$  "yüzey direnci" denir. Belirli iletkenler için deri derinliği ve yüzey direnci değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

Yukarıdaki tablodan görüldüğü gibi,  $\delta$  deri derinliği birkaç kilohertz'in üstündeki frekanslarda çok küçük olmaktadır. Çoğu durumlarda  $\delta$  iletken çapından çok daha küçük olduğundan, iletkenin düzlemsel varsayılacağı kanıtlanmış olmaktadır. Başka bir varsayım ise, ilet-

kenin etrafındaki magnetik alan büyüklüğünün eşbiçimli olduğudur ki, özellikle koaksiyal hatlarda bu varsayım doğrudur.

Hattın dielektrik kayıpları küçük olduğundan çoğunlukla ihmal edilebilirse de, iletken kayıpları oldukça önemlidirler. Deri derinliğinin iletken çapından çok küçük olduğu varsayılır», yüksek frekans direnci 5 kalınlığındaki silindirik iletkenin doğru akım direncine eşit olup,

$$Z_{c1} = (Z_s/\pi d)$$

ve iletkenin gerçek doğru akım direnci ise;

$$R_{dc} = (4/7\pi d^2)$$

dır. Yüksek frekans empedansı, iletkenin doğru akım direncinin  $S_j$  düzeltme çarpanı ile çarpımıyla elde edilebilir:

$$Z_{c1} = R_{dc} + j\omega L_{dc}$$

Burada,

$$S_j = (d/A_6)(1+j)$$

dir. Bu durumda, iki iletkenin oluşan hat toplam iletken empedansı

$$Z_c = (Z_{s1}/\pi d_1) + (Z_{s2}/\pi d_2)$$

biçiminde yazılabilir. Bu eşitlik daha önceki yayımlarda değiştirilmiştir ve karakteristik empedans eşitliklerinde kullanılır ve ayrıca  $L$  çok büyük,  $G$  ise çok küçük varsayılır»;

$$Z_0 = Z_{00} + (A_v/\pi w)(1 - \hat{I})$$

$$P = K_v \cdot ? + j(K_v/2\omega J + NCJ)$$

olur. Burada,

$$Z_{00} = (L/C)^{1/2} \quad A = [B/(2LC)^{1/2}]$$

$$N = (LC)^{1/2} \quad K = (B/2)(C/L)^{1/2}$$

$$B = (1/\pi d_1) (M_1/2a!)^{1/2} + (1/\pi d_2) (M_2/2a!)^{1/2}$$

olarak tanımlanmıştır.

Bulunan bu kuramsal eşitlikler uygulamada kullanılan hatlarda ölçülen karakteristik değerlere oldukça yaklaşan sonuçlar vermektedir. Elde edilen kuramsal sonuçlar şöyle açıklanabilir:

a) Hattın zayıflaması frekansın karekökü ile doğru, iletken boyutları ile ters orantılıdır.

b) İletim hattının karakteristik empedansının gerçel olduğu ve frekansa bağımsız kaldığı varsayımı doğrudur. Alçak frekanslarda karakteristik empedans büyük ve kapasitif reaktans özelliği gösterir.

c) Yaydım hızı da frekansa bağımlıdır ve gönderilen darbelerin bozulmalarına neden olur. Zayıflama terimi ile birlikte, faz karakteristikindeki  $KN/TJ$  bileşeni minimum-faz fonksiyonu oluşturur. Bundan dolayı iletim hattı, kayıpsız doğrusal-fazlı (değişmez-gecikme) devre ile kayıplı, minimum-fazlı devrenin seri bağlanmasıyla eşdeğer sayılabilir. Uygulamada kullanılan kuvvetlendirici, süzgeç ve dengeleyici gibi devrelerin karakteristikleri genellikle minimum-faz bağlantısını da sağladıklarından, hat zayıflamasındaki değişim bu türden devre düzenleriyle yok edilmek istendiğinde, hattın faz karakteristikliği de aynı zamanda düzeltilmiş olur ve sistemin toplam karakteri minimum-fazlı bir fonksiyona denk olur.

Günümüzde kullanılan plastik yalıtkan malzemenin dielektrik kayıpları oldukça küçük olduğundan kablunun iletkenliği  $G$  ihmal edilebilirse de, yüksek frekanslarda ve özellikle kağıt yalıtkanlı çiftli kablolarda bu kayıp önem kazanır. İletkenliğin frekansa bağlı olarak değiştiği gözününe alındığında iletim hattının toplam zayıflama ifadesi

$$\alpha(f) = \alpha_0 + \alpha_1 \sqrt{f} + \alpha_2 f$$

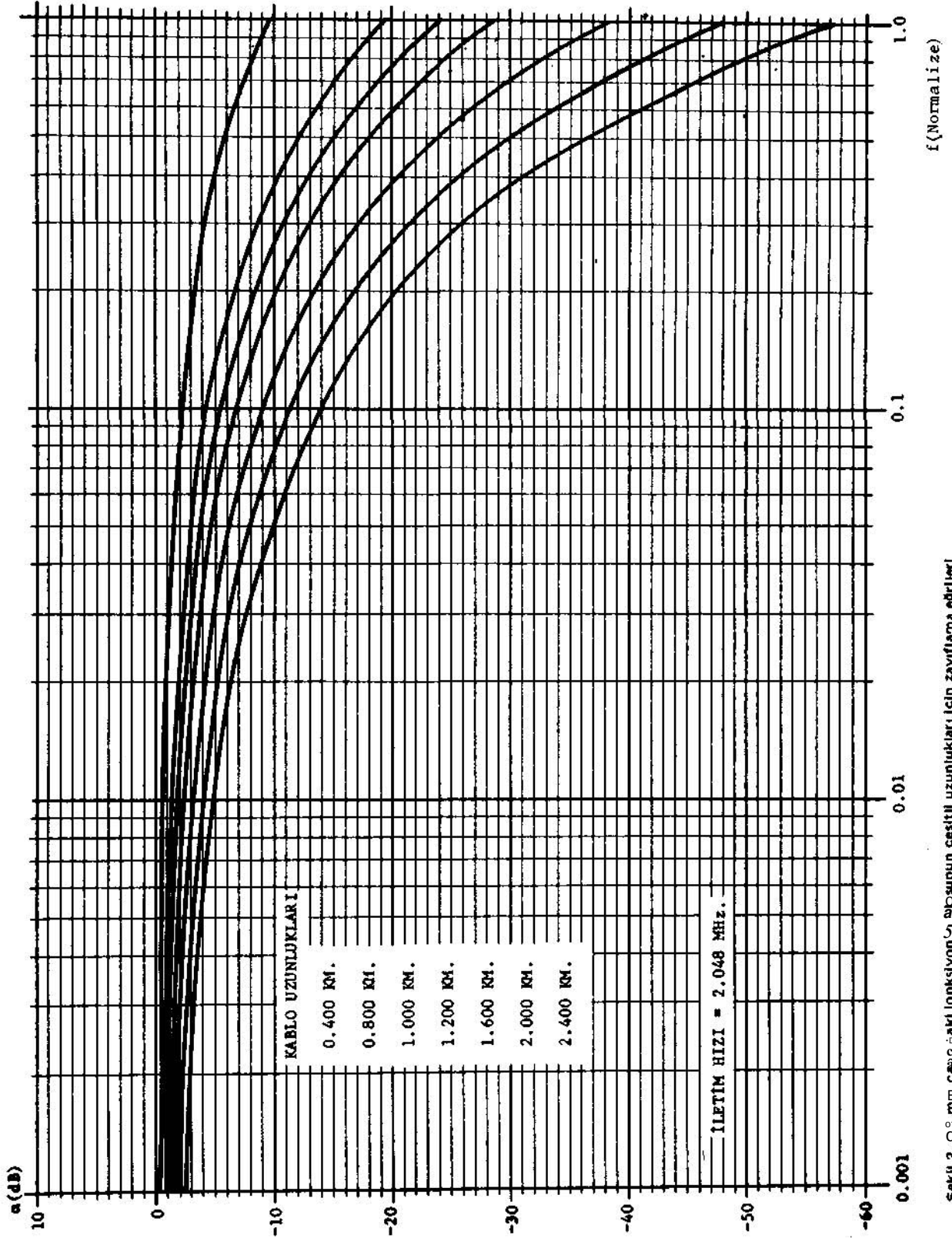
biçimini alır. Bu eşitlik, uygulamada kullanılan kabloların zayıflamalarının kuramsal olarak hesaplanmasında gerçeğe çok daha yakın sonuçlar verir.

Türkiye'deki santraller arasında kullanılmakta olan 0.9 mm çapında 400 m uzunluğunda 400 çift içeren kağıt yalıtıcı ve plastik korumalı bir jonksiyon kablosunun çeşitli uzunlukları için zayıflama eğrileri Şekil 2'de görülmektedir.

Sıcaklık değişimleri çiftli kablolarda özellikle iletken direncinin değişmesine neden olurlar. Böylece zayıflama eşitliğinde  $\sqrt{W}$  ya da  $V < 7$  biçiminde terimler ortaya çıkar. Sıcaklık değişimlerinin etkileri kablo uzunluğunun değişiminin etkilerine özdeş varsayılabilir için her iki çeşit değişmeyi yok etmek için aynı dengeleme yöntemleri kullanılabilir.

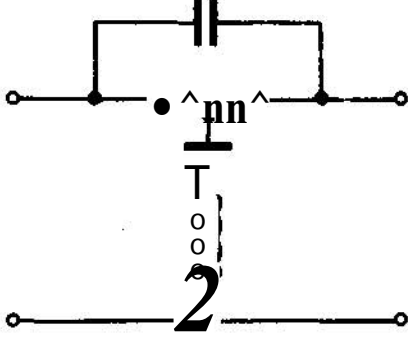
Bir iletim hattından sayısal imler iletilmek istendiğinde, fazın frekansla değişiminin etkisi ortaya çıkar. Hattın zayıflama ya da faz karakteristikliğinin doğrusallıktan ayrılması sonucu darbelerde bozulma olur ve hatalar oluşur, öte yandan, grup gecikmesi faz değişiminin frekansa göre türevi olarak tanımlanmıştır:

$$T_g = d/3dco$$



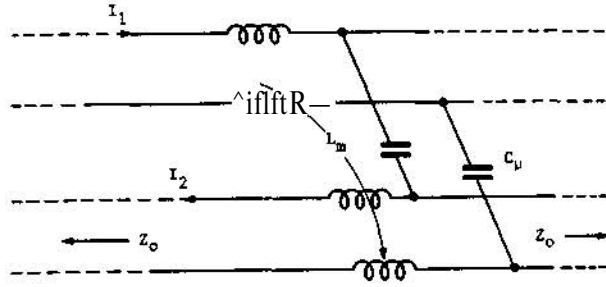
Sekil 2. 0.8 mm çapındaki iyoniyonlu alüminun çeşitli uzunlukları için zayıflama eğrileri

Gecikmenin oldukça etken olduğu, yüksek hızdaki sayısal imlerin iletimi için gerçekleştirilen sistemlerde iletim ortamı ile birlikte sistemin öteki öğelerine ilişkin gecikmelerin dengelenmesi gerekir ve bu nedenle, gecikme dengeleyicileri kullanılır. Bir gecikme dengeleyicisi bir veya daha fazla dereceli tüm bandı geçiren süzgeçler ile gerçekleştirilebilir. Şekil 3'de birinci dereceden bir gecikme dengeleyicisi gösterilmiştir.



Şekil 3. Basit bir gecikme dengeleyicisi

İletim hatlarında en önemli hata kaynaklarından biri de kablo çiftleri arasındaki dengesizliğin sonucu ortaya çıkan konuşmanın çapraz karışımıdır. Kuramsal olarak, herhangi bir kablo uzunluğunda çiftler arasındaki bağlaşma (kuplaj) yol boyunca birbirini dengeler. Uygulamada ise bu dengeleme gerçekleştirilemediğinden, bir kablo parçasındaki herhangi iki çift arasında elektrostatik bağlaşmanın dengesizliğini belirleyen  $C^{\wedge}$  bağlaşma kapasitesi ve magnetik bağlaşmanın dengesizliğini belirleyen bir  $L_m$  ortak endüktansı tanımlanabilir (Şekil 4).

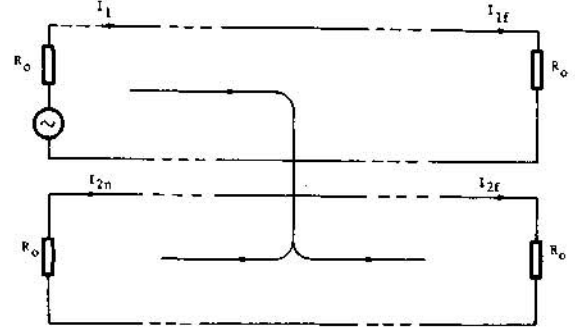


Şekil 4. Birim uzunluktaki dengeli kablo çiftinde bağlaşma

Şekil 5'de görüldüğü gibi birinci kablodan akan  $I_1$  akımı, ikinci kablunun her iki ucunda  $I_2$ 'lerle gösterilen akımları oluşturacaktır. Burada iki tür çapraz karışım sözkonusudur.

- Uzak-uç çapraz karışım: (Telediyafoni)
- Yakın-uç çapraz karışım: (Paradiyafoni)

Uzak-uç çapraz karışım; kablunun uzak ucundaki  $I_{2f}$  akımının  $I_1$  akımına oranı, yakın-uç çapraz karışım ise; yakın uçtaki  $I_{2n}$  akımının  $I_1$  akımına oranı olarak tanımlanır.



Şekil 5. Uzun bir kabloda çapraz karışım

$$\text{Yakın-son çapraz karışım oranı } N = I_{2n}/I_1$$

$$\text{Uzak çapraz karışım } F = I_{2f}/I_1$$

$$\text{Uzak-son çapraz karışım oranı } F' = I_{2f}/I_{1f}$$

Her iki durumda da birim uzunluk için çapraz karışım:

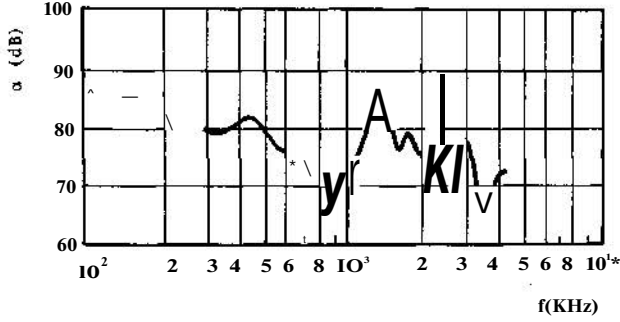
$$X = (I_2/I_1) = (j\omega C_p Z_0/8) \pm i(\omega L_m/Z_0)$$

olur. Bu eşitlikten anlaşılacağı gibi, çapraz karışım frekans ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Uzak-uç çapraz karışım, gelen imin gelen çapraz karışım oranı olduğundan ve her iki imde yol boyunca aynı kayba uğradığından, "çapraz karışım/im" oranı frekans ile doğrusal olarak artar (6 dB/oktav). Yakın-uç çapraz karışım ise, hat kayıpları yok olmadığından ve zayıflama frekansın kare kökü ile orantılı olduğundan, yakın-uç "çapraz karışım/im" oranı frekansın kendi ile değil, fakat  $f^{3/4}$  ile orantılı olarak değişir. (4.5 dB/oktav).

Sayısal haberleşme kanalı olarak yararlanılan iletim hatlarının temel özellikleri şunlardır:

- 1) Zayıflama özelliği: iletim hatlarının kaybı frekansın kare köküyle ve uzaklıkla orantılı artar.
- 2) Alçak frekans kesimi: Uygulamada, genellikle doğru akım biçiminde yer alan hat beslemeleri im yolu üzerinden yapılır. Bu nedenle, imin değişken imler bakımından hat tekrarlayıcılarının giriş ve çıkışındaki transformatörler veya kondansatörler ile yalıtılmış olması gerekir. Bu ise değişken imlerin alçak frekanslarda kesime uğramalarına neden olur ki, hat kodlarının seçimi için sınırlayıcı bir etkidir.
- 3) Çapraz karışım: Bir kablunun içindeki çiftler arasındaki bağlaşmanın sonucu olarak çapraz karışım ortaya çıkar ve bu bir gürültü kaynağı oluşturur. (Şekil 6)
- 4) Impuls gürültüsü: Bazı iletim sistemlerinde verici terminal impuls gürültüsünün yoğun olduğu ortamda bulunabilir. Telefon santrallerindeki iletim terminaleri

buna örnektir. Bu tür gürültü nedeniyle, terminale yakın tekrarlayıcıların hat uzunluklarının önemli ölçüde azaltılması gerekebilir.



Şekil 6. Yakın-Son Çapraz Karışım zayıflamasının frekansla değişimi

- 5) Yankı: Bir iletim sisteminin verici ucunda, hattaki süreksizlikler nedeniyle yansımalar oluşur. Gönderilen imin yansyanlar içinde "bozulması" söz konusudur.
- 6) Isıl gürültü: İletim hatlarında, gönderilen sayısal bilginin hatalı olarak alınmasına neden olan bir diğer etken de, beyaz gürültü olarak tanımlanabilen ısıl gürültüdür.

## II. TEKRARLAYICININ ÇALIŞMA İLKELERİ

Sayısal haberleşme sistemlerinde sayısal im,-iletim ortamından geçtiğinde kanalın özelliklerinden dolayı zayıflar, bozulur ve gürültüden etkilenir. Sayısal haberleşmenin en önemli gereklerinden biri, bilgiyi taşıyan darbe dizisini bozucu etkileri bilinen kanaldan geçtikten sonra yeniden oluşturmaktır. Bu işlem "tekrarlayıcı" (repetör) adı verilen devre düzenleri ile gerçekleştirilir, iletim ortamının daha önce açıklanan çeşitli özellikleri göz önüne

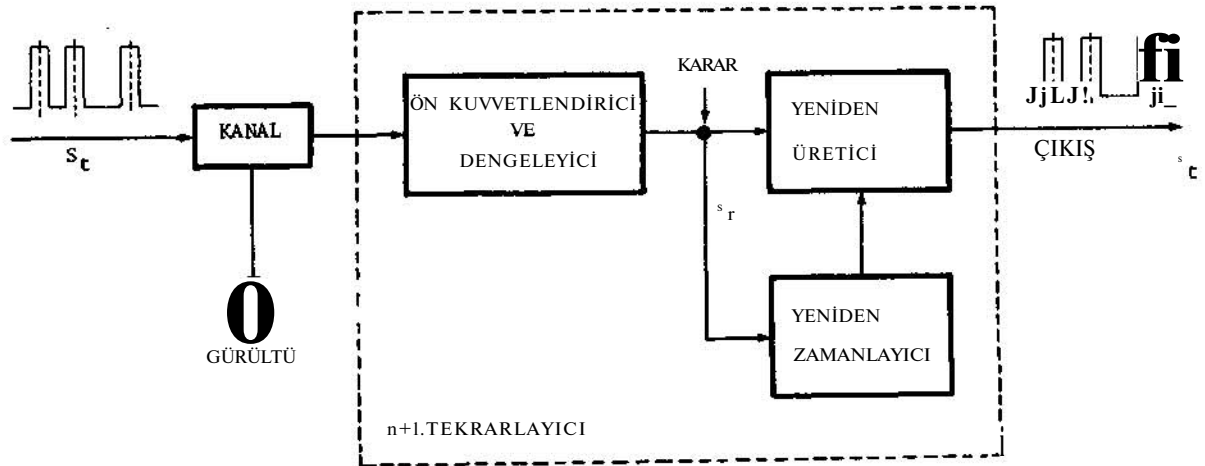
alındığında, tekrarlayıcıların aşağıdaki üç temel görevinin varlığı anlaşılır. Bunlar:

- 1) Yeniden biçimlendirme (RESHAPING)
- 2) Yeniden zamanlama (RETİMING)
- 3) Yeniden üretme (REGENERATION)

Buna göre, bir tekrarlayıcının çalışma modeli Şekil 7'deki gibi gösterilebilir.

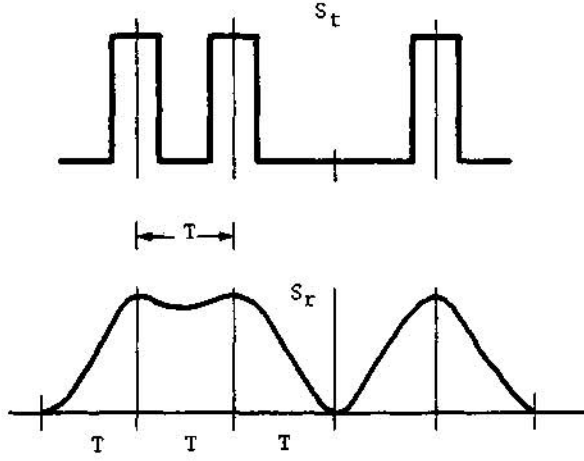
Önkuvvetlendirici ve dengeleyici adı verilen ilk tekrarlayıcı öbeğinin temel görevi, kanaldan geçtikten sonra bozulmuş olan ve zayıflayan sayısal imi biçimlendirmek ve genliğini darbelerin var ya da yok olduğuna karar verilebilecek düzeye çıkarmaktır, önkuvvetlendirici ve dengeleyici devresinin çıkışındaki  $S_r$  imi, Şekil 8'den de görüldüğü gibi, biçim bakımından bir önceki tekrarlayıcıdan gönderilen  $S_t$  iminden oldukça farklıdır. Kuramsal olarak önkuvvetlendirici devresinde gerekli kazanç verilip, kanalın frekansa bağlı kayıp karakteristiği tam olarak dengelenebilirse de, uygulamada bu yol tutulmaz. Bunun nedeni, sinüzoidal biçimli darbeler için bile çok doğru karar veren karar devrelerinin gerçekleştirilebilmesidir. Ayrıca bu tür bir im için gereken önkuvvetlendirici band genişliği daha az olacağından, karar devresinin girişindeki gürültü düzeyi düşük olur. Böylece, dengeleme yapılması soruna iki tür yaklaşım getirir. Bir yandan  $S_t(t)$  imi, darbelerin girişimi izin verebildiğince, yayvanlaştırılarak gürültü düzeyi azaltılır. Öte yandan,  $S_t(t)$  imi karar işleminin daha kolay gerçekleştirilebilmesi için iyice düzeltilir, ancak bu durumda gürültü düzeyi de artar.

Kuvvetlendirilen ve yeniden biçimlendirilen  $S_r(t)$  işareti yeniden üretici ve yeniden zamanlayıcı devrelerinin yardımıyla bir darbe dizisine dönüştürülür. Yeniden üretici devresi, ilke olarak basit bir eşik detektörüdür. Bu devre, girişim ile birlikte gelen im belirli bir eşik aştığında



Şekil 7. Bir tekrarlayıcının çalışma modeli

yeniden üretici darbenin var olduğuna, bu eşiğin altında ise yok olduğuna karar verir ve çıkışında 1 ve 0'lerden oluşan tam bir sayısal im elde edilir. Bu sayısal im bir çıkış katına kumanda ederek bir sonraki iletim kanalına yeterli genlikte hat iminin gönderilmesini sağlar.



Şekli 8. Bir tekrarlayıcıya ilişkin darbe şekilleri  
st: Kanala gönderilen im  
sr: Dengelenmiş ve kuvvetlenmiş im

Gerçek bir sayısal iletim sistemi, genlik bakımından olduğu kadar zaman açısından da düzenlenmiş olmalıdır. Tekrarlayıcı girişindeki imin geçiş zamanları sonlu olduğundan, eşik detektörün karar noktaları arasındaki zaman dilimleri gürültünün etkisiyle modüle olurlar. Bu olaya "zamanlama düzensizliği" ya da "kayması" (JITTER) adı verilir ve- tekrarlayıcıların tasarımında çok önemli bir etken olarak ortaya çıkar. Bu nedenle, tekrarlayıcılarda zamanlama iminin de kullanılması gerekmektedir. Zamanlama imi temel ime eşit ya da onun askatı frekanslı bir sinüzoidal im olarak ayrı bir iletim kanalından gönderilebilir. Bununla birlikte, uygulamada genellikle kendikendine zamanlama üreten sistemler kullanılır. Burada zamanlama imi, gelen bilgi dizisinden çıkartılarak elde edilir. Yeniden zamanlayıcı devresinin üç temel görevi sözkonusudur. Bunlar;

- 1) im-girişim oranının en iyi olduğu, darbe dizisinin tepe noktasında örnekleme yaparak im elde etmek,
- 2) Darbeler arasındaki uygun zaman aralığını sağlamak ve alıcı uçta im bozulmalarını en aza indirmek için zamanlama kaymasını azaltmak,
- 3) Darbe dizisinde istenen darbe genişliğini gerçekleştirerek için gereken zamanlama imini çıkarmak.

İm-girişim oranı oldukça yüksek ve zamanlama kayması oldukça küçük tutulacak biçimde, hem genlik ve hem de zaman açısından uygun karar verildiğinde tekrarlayıcının çıkışında elde edilecek yeniden üretilmiş darbe dizisi te-

mel imin bir tekrarı olur. Bu devrelere TEKRARLAYICI adı verilmesinin gerçek nedeni de budur.

## II. 1. SAAT ÇIKARMA (4)

Darbe tekrarlayıcılarında gönderilen imin içinden saat imini çıkarma işlemi için çok çeşitli yöntemler geliştirilmiştir de, bu yöntemler uygulamada en elverişli 3 devre türüne ilişkindir. Bunlar, uygulamada çoğunluğuna göre aşağıdaki biçimde sıralanabilirler:

1. LC tank devreleri ile gerçekleştirilen devreler
2. Kristal süzgeçler
3. Faz kilitlemeli sistemler

Kristal süzgeçlerde, kristalin zayıf faz kararlılığı ve kristal şönt kapasitesinin denkleştirilmesindeki güçlüklerden dolayı kristal tank devrelerinin gerçekleştirilmesi oldukça zordur. Otomatik faz kilitlemeli sistemler ise, ideal saat çıkartıcı olmalarına karşın, karmaşıklığı fazla olan bir devre düzeni, büyük bir hacim ve daha fazla güç gerektirirler. Jonksiyon kabloları, üzerindeki kısa tekrarlayıcı zincirleri için yüklü Q değeri 100 olan LC tank devreleri kabul edilebilir, faz oynamasını (Jitter) en az maliyet ve küçük bir hacim içerisinde gerçekleştirebilirler. Bu nedenle, LC türü saat çıkartıcılar geniş bir uygulama alanı bulmuşlardır.

Gönderilen imin içinden saat imini çıkartmak için LC tank devreleri kullanılan tekrarlayıcılarda zamanlama kayması ve zamanlama hatasının çeşitli nedenleri vardır. Bunlar aşağıdaki gibi özetlenebilir:

a) Isıl gürültü, zaman ve ısı ile değişim: Tekrarlayıcı larda ısı gürültü önemli bir zamanlama kaymasına neden olmaz. Zamanlama kanalının gürültüsüz durumunda, darbeler düşük hata olasılığı ile tekrar elde edilebiliyor», ısı gürültünün hata olasılığı üzerindeki etkisi ihmal edilebilir. Zaten Q'su 100 civarında tutulan devrenin oldukça dar olan bandı nedeniyle, gürültünün sadece bir bölümünün geçeceği ortadadır.

Uygulamada, 50-100 arası bir Q ile tekrarlayıcı basına en fazla 10°'lik bir dalga biçimi kayması kabul edilir ve bu da kolayca gerçekleştirilebilir. Zamanlama devresinin etkin Q'su küçük seçildiğinde -40 ile 60°C arasında ve 20 yıl süre içerisinde saatin fazı ± 30''ye kadar kayabilir. 10°'lik bir kayma zaten beklendiğine göre geriye ±20'''lik bir faz kayması kalır.  $Q_{min} = 75$ ,  $Q_{max} = 100$  olduğunda, rezonans frekansındaki istenen kararlılık;

$$\pm \tan 20^\circ > 2 Q (At/f) = 200 (Af/f)_{\omega = 100}$$

$$(At/f) = \pm 0,0018 \mid_{\omega = 100}$$

ya da izin verilebilen toplam eleman değişimi % 0,36Mır.

LC tank devrelerindeki L ve C elemanları zamanla değerlerini değiştirirler. Bu değişim miktarı % 0,3'den küçüktür. Genellikle, endüktans ve kapasitenin her ikisinin birden değerlerini aynı yönde ve en büyük değerinde değiştirmeleri olasılığı azdır. En kötü durumda bu değişiklik

$$10^\circ + \tan^{-1} [200 + 0,25 \times 10^{-2}] = 36,56^\circ$$

kadardır. Bu durum her ne kadar gerçekleştirilebilirse de, sonuç olarak öge kararlılıkları çok büyük önem kazanır. (3).

b) Ayarsızlık: Zamanlama devresinin gelen dizideki darbelerin arasındaki boşluklardan etkilenmemesi ve elde edilen saatin fazının darbe dizisi ile uygun biçimde değişebilmesi için zamanlama devresinin etkin GL'su oldukça büyük olmalıdır. Ancak ayar devrelerinin etkin Q'su ne kadar büyük olursa, bunların akord edilmeleri o derece zor olur ve izin verilen akordlama hataları çok küçülür. Uygulamada darbeler arasındaki maksimum boşluk sayısının yaklaşık 15 ile sınırlandırılması gerekir. Bunun için hatta fazla sıfır gönderen kodlar yerine özel kodlama teknikleri kullanılır, örneğin, AMI yerine HDB3 kodunun kullanılması gibi. Eğer devrede ayarsızlık varsa, daha açıkçası akord frekansı darbe tekrar frekansından farklı ise, belirli bir hata oranı elde edebilmek için darbeler arasındaki karışımın çok az olması gerekir.

c) Sınırlı darbe genişliği ve darbe biçimi etkileri: Eğer ayarlı devreyi harekete geçiren darbeler ince darbe ve % 50 çalışma süreli ("duty cycle") dikdörtgen darbeler değilse, ayarlı devrenin çıkışındaki işaretin sıfır geçişleri gerçek konumuna göre kayar. Bu kaymalar darbe yoğunluğuna, ayarlı devrenin Q'suna ve darbelerin biçimine bağlıdır. Darbelerin geniş olması ayarlama olanağı sağlar, buna karşılık dar darbeler zamanlama devresinin çıkışındaki imin sıfır geçişlerindeki faz kaymalarını azaltır. Bu da darbelerin ayarlı devreye gönderilmeden önce daraltılmalarının yaradacağı gösterir.

d) Doğrusal olmayan genlik-faz dönüşümü: Ayarlı devreden önce ya da sonra gelen doğrusal olmayan devreler, zamanlama imindeki sıfır geçişlerini kaydırır.

e) Simgelerin çapraz karışımı: Darbe tekrarıyıcılarında zamanlama kanalını etkileyen çapraz karışım, saat iminin sıfır geçişlerinde kaymalara neden olur.

## II.2. TEKRARLAYICI KULLANMANIN NEDENLERİ

Zaman paylaşımli sayısal haberleşme sistemlerinde bilgi iletim ortamı olarak genellikle yeraltı telefon kabloları kullanılmaktadır. Sistem çıkışındaki sayısal im, hat boyunca iletildiği sırada bozulmaya uğrar. Bu bozulmanın nedenleri;

### a) Hattaki zayıflama

- Darbe dizisinin güç spektrumundaki frekans bozulması
- Kablo içersindeki öteki PCM işaretlerinin iletimden ileri gelen çapraz karışım gürültüsünün eklenmesi.

İletim ortamının uzunluğunun artması durumunda hatta verilmiş olan darbelerin belirli bir uzaklıktan sonra yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı kaybedilmesi durumu ortaya çıkar. Bu sorunu çözmek için iletim ortamı üzerine belirli aralıklarla, darbeleri tanıyıp yeniden ortaya çıkaran tekrarlayıcı adı verilen devreler kullanılır.

Tekrarlayıcı, gelen bozulmuş işareti, zamanlama bozulmasını ve sayısal hata en az olacak biçimde yenileyerek iletilmesini sağlar. Tekrarlayıcı, im darbelerinin var ya da yok olduğunu denetlemeden önce giriş imini bu iş için hazırlar. Bu hazırlık şu iki ana ilke çerçevesi içerisinde yapılır:

- Bir zayıflama dengeleyicisi ile frekans bozulmasını ortadan kaldırmak,
- Çapraz karışmadan ileri gelen gürültüyü imin özelliklerine zarar vermeyecek biçimde en aza indirmek.

Zayıflamayı dengeleyen işlemi, gelen bozulmuş darbeleri biçimlendirerek yeniden üretilebilmeleri için uygun duruma getirir. Bu aşamada darbelerin biçiminin mutlaka dikdörtgen yapıda olmaları gerekmez.

Çapraz karışım gürültüsünü, imin özelliklerine zarar vermeyecek biçimde en aza indirmek için imin güç spektrumunda yarım bit hızı frekansının üstü zayıflatılır. Örneğin, ardışık darbelerin evrilmesi ile elde edilen AMI kodunda, tümüyle darbelerden oluşan bir imin içindeki en yüksek temel frekans yarım bit hızına eşittir. Bir başka deyişle, tüm kodlanmış bilgi bu frekansa kadar olan bandta gizlidir. Bu nedenle dengeleme işlemi yalnızca bu frekansa kadar gerekir ve spektrumda bu frekansın üstündeki gürültü bileşenleri süzülerek zayıflatılır. Bu zayıflatma işlemi, iletim kuramında yuvarlatma çarpanı (ROLL-OFF FACTOR) olarak tanımlanan  $\alpha$ 'nın, dengeleme optimum olacak biçimde seçilmesiyle gerçekleştirilir.

Son olarak iletim ortamı boyunca zayıflamaya uğramış olan im, kuvvetlendirilerek yeniden üretme işlemi için gerekli genlik düzeyine getirilir. (2).

## UI. DENGELEYİCİLER

Sayısal haberleşme sistemlerinde bilgi taşıyıcı olarak kullanılan darbelerin frekans bandı oldukça geniştir. Öte yandan sayısal bilgi iletiminin gerçekleştirildiği iletim ortamında, iletilen imin genlik ve fazının da frekans ile değiştiği bilinmektedir. Çok geniş bandı olan sayısal im-



lerin iletim ortamından en az gürültü ve bozulma ile iletilmesi için, iletim ortamının frekans ve fâz karakteristiklerinin düzeltilmesi gerekir. Bu düzeltme işlemi tekrarlayıcılarda dengeleyici (EQUALIZER) ve kuvvetlendirici adı verilen devreler ile gerçekleştirilir. Bu dengeleyici devre kablo girişinde, daha açıkçası sistem çıkışında ya da kablo sonunda, daha açıkçası sistem girişinde kullanılabilir.

Uygulamada iki tür dengeleyici söz konusu olmaktadır:

1. Değişmez Dengeleyici (FIXED EQUALIZER)
2. Ayarlanabilen Dengeleyici (VARIABLE EQUALIZER)

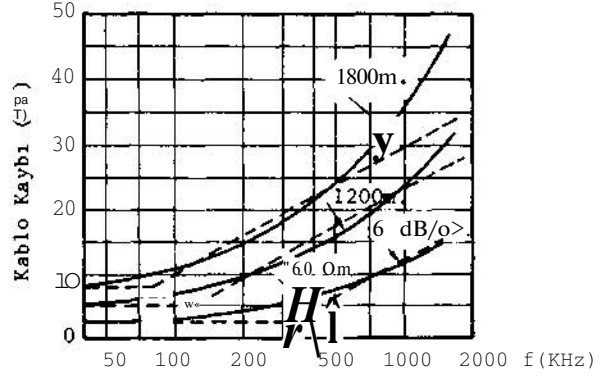
iletim ortamının zayıflama karakteristiğinin belirli olduğu ve dış etkenlerle (sıcaklık, nem, vb.) pek fazla değişmediği durumlarda dengeleme işlemi değişmez dengeleyiciler yardımıyla gerçekleştirilir, örneğin, belli bir boydaki yeraltı kablusunda durum böyledir. Ortak sıcaklığındaki değişimler, ısıl atalet nedeniyle yeraltına uzun zaman sonunda erişebildiğinden, ortalama sıcaklık değişiminden dolayı oluşan karakteristik farkları mevsimlik düzeltmelerle karşılanabilir.

Zayıflama karakteristikleri iletim ortamının boyuna, sıcaklığına ya da atmosferik etkenlere bağlı olarak değişebileceğinden, genlik ve faz karakteristiğini düzeltecek olan dengeleyici devresinin değişken olması ve kendi kendine ayarlanabilmesi gerekir. Bu tür görevi gerçekleştiren devrelere "değişken" ya da "ayarlanabilir dengeleyiciler" adı verilmektedir. Değişken dengeleyici elde etmenin bir başka yolu da önceden hazırlanmış birden fazla değişmez dengeleyiciyi belirli bir sırada devreye sokup çıkarmak ya da bir değişmez dengeleyicide dışarıya prizler çıkartmaktır. Bazı durumlarda değişmez dengeleyicilerle ayarlanabilir dengeleyiciler ardı ardına bağlanarak geniş bir bölge içinde dengeleme yapılabilir.

Yeraltı kablolarında gerek boy ve gerekse sıcaklık değişimleri sonucu, ana zayıflama-frekans eğrisine benzer ve onunla orantılı eğri aileleri oluşur. Şekil 9'da belirli bir kablunun çeşitli kablo boyları için zayıflama-frekans karakteristikleri gösterilmiştir. Uygulamada bu tür eğri ailesine iki çeşit devre ile yaklaşılabilir.

1. Bode Dengeleyicisi
2. Kendi Kendine Ayarlanabilir Dengeleyici

Bode dengeleyicileri, bir tek değişken öge (direnç) ile birbirleriyle orantılı karakteristikler verebildiklerinden, hem az malzeme gerektirmeleri ve hem de kumanda kolaylığı nedeniyle en çok kullanılan ayarlanabilir dengeleyici türü olmuştur, önceleri, özellikle sıcaklık değişimlerinin oluşturduğu genlik değişimlerinde bu değişken direnç bir termistör olarak seçilmiştir.



Şekil 9. Belli bir kablunun çeşitli boyları için zayıflama-frekans karakteristikleri

Bugün sayısal sistemlerin bir çoğunda, yarı iletken ögeler kullanılarak gerçekleştirilen kendi kendine ayarlanabilen dengeleyiciler uygulama alanı bulmuştur. Bu tür bir devrede kuvvetlendirici çıkışından alınarak yapılan geri beslemeyle devrenin karakteristiği değiştirilmekte ve dolayısıyla toplam kazanç ayarlanabilmekte ve kablo karakteristiğinin tersi biçiminde bir karakteristik elde edilebilmektedir.

iletim ortamının zayıflama-frekans karakteristiğinin dengelenmesi için başka bir yaklaşım ise, farklı hat uzunluklarına kendi kendine ayarlanabilir bir yapay hat devresi ekleyerek her durumda sisteme en uzun hat boyunun karakteristiğini vermek ve bu devrenin peşine bir değişmez dengeleyici yerleştirerek dengelemeyi gerçekleştirmektir. Bu tür değişken yapay hat devrelerine otomatik hat oluşturma devreleri (AUTOMATIC LINE BUILD-OUT) (ALBO) adı verilmektedir.

Bir dengeleyici-kuvvetlendirici devrenin tasarımında temel düşünce darbelerin doğru olarak belirlendikleri en yüksek düzeyde bir çapraz karışım durumu için kablunun dengelenebilmesidir. Dengeleme işleminin ne denli iyi yapılması gerektiği bir optimizasyon sorunu olup, uygulamada uzun kablolarda genellikle çapraz karışım ve simgeler arası karışım ölçütü gözönüne alınır.

Gerçekte, tekrarlayıcının hatasız olarak çalışmasında etken olan başka önemli bir konu da karar işleminin iyiliğidir. Zamanlama darbeleri ve eşik düzeyleri ne kadar doğru olarak gerçekleştirilebilirse, darbelerin biçimlendirilmesinde de o kadar rahat hareket edilebilir.

Bir sayısal haberleşme sisteminde yeraltı kablосundan iletilen bir iki-kutuplu darbe dizinin Laplace dönüşümü: (3)

$$P(s) = (1/S) [1 - \exp(-St_0/2)] \sum_{n=0}^{\infty} X^n \exp(-nsT_0)$$

biçimindedir. Burada  $T_0$  darbe tekrarlama periyodunu,

$a_n = 1, 0, -1$  ve  $\sum_{n=0}^k a_n \exp(-ns) = 1$  bağıntısı da çift kutupluluk koşulunu gösterir.

Böyle bir çift kutuplu darbe dizisi kablodan iletilip, kablo ile birlikte toplam geçiş karakteristiği  $G(s)$  olan dengeleyici-kuvvetlendiriciden geçirildiğinde

$$R(s) = (G(s)/S) [1 - \exp(-ST_0/2)] \sum_{n=0}^{\infty} a_n \exp(-ns) = L[r(t)]$$

biçiminde bir im elde edilir. Darbenin var ya da yok olduğuna bu imin bir referans gerilim ile periyodik olarak karşılaştırılması sonucu karar verilir, Kablo üzerinde oluşan yakın çapraz karışım da gözönüne alınıp, çapraz karışım ile birlikte dengeleyici-kuvvetlendirici geçiş karakteristiği  $H(s)$  olarak belirtildiğinde, karar noktasındaki çapraz karışım imi:

$$N(s) = (H(s) / S) [1 - \exp(-ST_0/2)] \sum_{n=0}^{\infty} b_n \exp(-nST_0) = L[r(t)]$$

eşitliğiyle verilebilir. Burada  $b_n$  karışım genliğini,  $1/T_0$  ise karışım frekansını belirler. Kablo geçiş karakteristiği  $C(s)$ , dengeleyici-kuvvetlendirici geçiş karakteristiği  $A(s)$  ve çapraz karışımın ileri gelen terim yaklaşık olarak ks ile gösterilirse,

$$G(s) = C(s) A(s)$$

$$H(s) = ks A(s)$$

$$H(s) = ks (G(s) / C(s))$$

$$N(s) = k (G(s) / C(s)) [1 - \exp(-ST_0/2)] \sum_{n=0}^{\infty} b_n \exp(-nST_0)$$

yazılabilir. Burada,  $r(t)$  kablo sonundaki darbe dizisi iminin zaman domenindeki değişimini ve  $n(t)$  ise aynı noktadaki gürültü düzeyinin zaman domenindeki değişimini göstermektedir. Dengeleyici-kuvvetlendirici geçiş karakteristiği  $A(s)$  o biçimde seçilmelidir ki darbenin var ya da yok olduğuna karar verilen anlarda, daha açıkçası örnekleme zamanlarında im-gürültü oranı en büyük olsun. Başka bir deyişle, hata olasılığı örnekleme zamanlarında en küçük olmalıdır. Hata olasılığı ise ancak göz şekillerinin oluşturulması ile belirlenebilir.

Simgeler arası karışımın (INTERSYMBOL INTERFERENCE) incelenmesi için darbe dizisi üç zaman dilimine ayrılır. Alınan imdeki bir darbe yalnız kendinden önce gelen darbenden değil, aynı zamanda sonra gelen darbenden de etkilenir. Gönderilen darbe dizisi iki kutuplu olarak hatta verildiğinden  $r(t)$  imi için 3 ayrı durum söz konusudur:

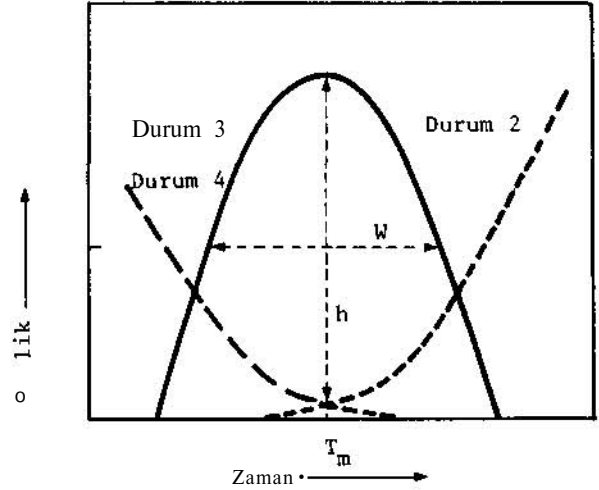
$$I: a_{j-1} = 1 \quad a_k = 0 \quad k \neq j-1$$

$$II: a_{j+1} = 1 \quad a_k = 0 \quad k \neq j+1$$

$$III: a_{j-1} = -1 \quad a_j = 1 \quad a_{j+1} = -1$$

$$a_k = 0 \quad k \neq j-1, j, j+1$$

I. durum  $(j-1)$ . zaman dilimindeki bir darbenin  $j$ . zaman dilimine karşımını gösterir. II. durum ise  $(j+1)$ . zaman dilimindeki bir darbenin  $j$ . zaman dilimine karşımını gösterir. Bu üç durum içinde en fazla darbeler arası karışımına neden olabilecek durum III. dekidir.  $A(s)$  değişmez seçilerek  $R(s) = L[r(t)]$  hesaplanıp, bunun zamana göre değişimi çizilirse "Göz Şekilleri" elde edilir (Şekil 10).



Şekil 10. Göz şekilleri

Göz şeklinde  $h$  ile gösterilen göz açıklığı,  $T_m$  örnekleme zamanında en büyük değerine erişir.  $W$  ise göz genişliği olup, genellikle  $h/2$  yüksekliğinde ölçülür ( $E_t$  genliği). Durum I ile Durum II'nin üstünde kalan ve Durum III ile çevrelenen alan karar verme alanıdır.

Darbeler arası karışım I ile gösterilirse,

$$I = (1/2) (E_m - h)$$

olur.  $h = (C_m / 2)$  olduğunda göz kapanır ve bu durumda darbeler arası karışım,

$$I = h/2 = E_m/4$$

değerini alır. Deneysel olarak, göz şekli gelişigüzel bir darbe dizisinin kablodan geçirildikten sonra osiloskop üzerinde izlenmesiyle elde edilir.

Haberleşmede kullanılan kabloların karakteristiği yaklaşık olarak iki kutuplu bir geçiş işlevi (transfer fonksiyonu) ile gösterilebilir.

**B<sub>u</sub> işlev:**

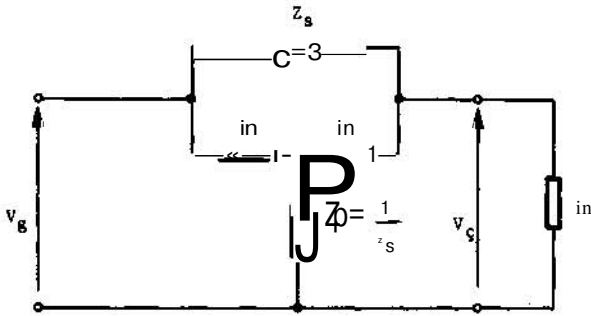
$$C(s) = C_0 / K s^{1/w_1} + 1 [(s/w_2) + 1]$$

biçimindedir. PTT tarafından kullanılan 0.63 mm'lik kablolar içinde C°

biçimindedir. PTT tarafından kullanılan 0.63 mm'lik kablolar içinde C<sub>0</sub>, w<sub>1</sub> ve w<sub>2</sub> değerleri kablo uzunluğuna göre TABLO 3.1'de verilmiştir.

TABLO 3.1

Uygulamada değişmez dengeleyici olarak iki kutuplu kablo geçiş işlevinin tersini gören Köprülü T türü devre düzenleri kullanılır. Normalize edilmiş bir Köprülü T devresi Şekil 11'de gösterilmiştir. (1)



Şekil 11. Normalize edilmiş bir köprülü-T devresi

Normalize edilmiş Köprülü T devresinde, seri kolu köprülü y<sup>en</sup> 2-üçlü ögenin Z<sub>s</sub> empedansı ile paralel kolu oluşturan 2-üçlü ögenin Z<sub>p</sub> empedansları birbirinin tersi olarak seçilmişse, bu 4-üçlünün bütün frekanslarda görüntü empedansı gerçel olup, 1 ohm'a eşittir. Devrenin görüntü empedansının istenen bir değere getirilmesi için tüm empedansların bu değerle çarpılması gerekir. Bu işlem devrenin geçiş karakteristiğini değiştirmez.

Devrenin giriş ve çıkış gerilimleri oranı geçiş işlevi:

$$K = (V_g / V_c) = 1 + Z_s$$

zayıflama olarak zayıflaması;

$$N = 20 \log_{10} |1 + Z_s|$$

bağıntısıyla bellidir.

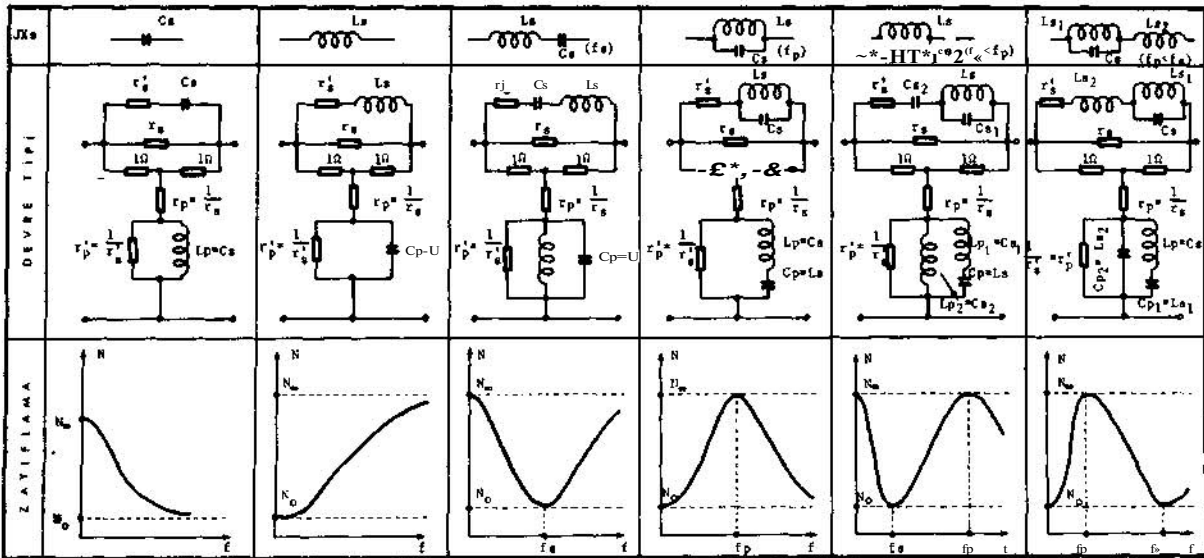
Uygulamada kullanılan Köprülü T türü dengeleyicilerde Z<sub>s</sub> empedansının değişken bir reaktans ile değişmez iki dirençten oluşturulması genellikle çoğu kez dengeleme işlemlerinin gerçekleştirilmesinde yeterli olur.

Çeşitli Köprülü T türü dengeleyici devre örnekleri ve zayıflama eğrileri Şekil 12'de gösterilmiştir.

Bu tür devrelerde gerilim oranı geçiş işlevi ve zayıflama için aşağıdaki eşitlikler verilebilir:

$$K = [(r_s r'_s + r_s + r'_s) + j(r_s - 1)X_s] / [(r_s + r'_s) + jX_s]$$

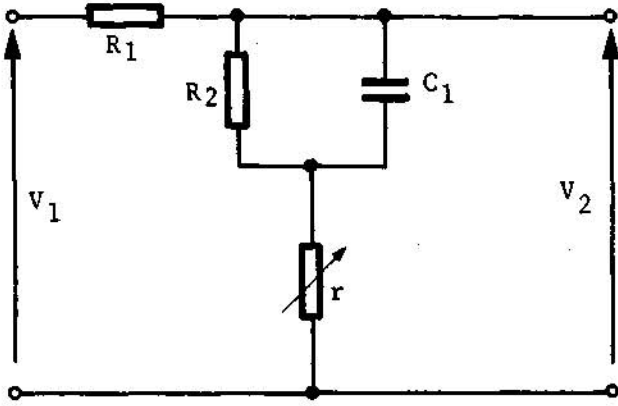
$$N = 10 \log_{10} [(r_s r'_s + r_s + r'_s)^2 + (r_s - 1)^2 X_s^2] / [(r_s + r'_s)^2 + X_s^2]$$



Şekil 12. Muhtelif tip JXs seri kol reaktansları için devre şekli ve zayıflama değişimi

Belirli bir zayıflama karakteristiğinin dengelenmesi için Şekil 12'de gösterilen Köprülü-T türü devrelerden biri seçilerek, öge değerleri yukarıdaki eşitlikler yardımıyla hesaplanır.

Ayarlanabilir dengeleyici gerçekleştirilmenin bir yolu, kablunun frekans karakteristiğine değişken kutuplarla yaklaşma biçiminde olur. Bilindiği üzere, bir kablunun zayıflama-frekans karakteristikleri çeşitli kablo boyları için hesaplandığında bir eğri ailesi elde edilmektedir. Bu eğri ailesine farklı frekanslardaki basit gerçel kutuplarla yaklaşmak olanağı vardır. Basit kutbun yeri ve kablunun alçak frekans kaybı kablunun uzunluğunun işlevi olarak değişir. Buradan hemen anlaşılacağı gibi bu karakteristiklerin dengelenmesi için ayarlanabilen basit bir sıfır ile ayarlanabilen bir alçak frekans kazancını verebilen bir devreyi gerçekleştirmek yeterlidir. Bu nedenle, ayarlanabilen dengeleyici devresi Şekil 13'deki gibi seçilebilir.



Şekil 13. Ayarlanabilir dengeleyici devresi

Bu devrenin gerilimler oranı geçiş işlevi,

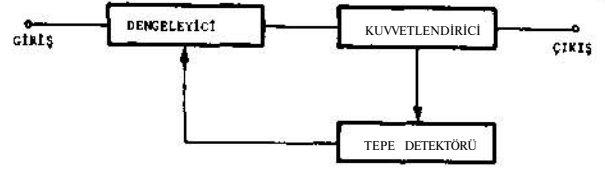
$$T(s) = V_2/V_1 = \frac{r}{R_1 + r} [s + (R_2 + r)AC, R_2 r]$$

biçimindedir.

Devrenin geçiş işlevinden görüldüğü üzere, böyle bir dengeleyici devresinin yalnızca R<sub>2</sub> ve C öğelerinin belirlediği değişmez bir kutbu vardır, öte yandan, devrenin geçiş işlevinin sıfırı ve alçak frekans kaybı da r değişken direncine bağlı olarak ayarlanabilir.

Bu özellikteki ayarlanabilir bir dengeleyicinin çıkışına yerleştirilen kuvvetlendiriciden sonra alınan örnek im, bir tepe detektöründe (PEAK DETECTOR) doğrultulur. Bununla bir yarı iletken ögenin iç direnci değiştirilerek hem geçiş işlevindeki sıfırın yeri kaydırılır, hem de alçak frekans kaybı dengelenmiş olur.

Bir dengeleyici-kuvvetlendiricinin öbek çizimi Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. Bir dengeleyici-kuvvetlendiricinin öbek çizimi

Tepe detektörü düşük frekans bandlı bir kuvvetlendirici olup, dengeleyici çıkışından örnekler alarak bir yarı iletken devre ögesinin ya da uygulamada sıkça rastlandığı gibi, bir dengeleyici devresi içerisindeki iki değişken kayıplı diyodun küçük im AA empedansını denetleyerek, dengelenmiş darbenin tepe noktasının hep aynı düzeyde kalmasını sağlar.

Otomatik hat dengelenmesi, sistemin aşağıdaki özelliklerine dayanarak gerçekleştirilebilmektedir:

- 1) Bir önceki tekrarlayıcıda üretilmiş darbeye saklı erk (enerji) değişmezdir.
- 2) Doğrusal tekrarlayıcı kuvvetlendiricisinin kazanç ve faz karakteristiği bellidir.

Bu bilginin ışığı altında Nyquist frekansında kablo kaybının yaklaşık ölçüsünün dengelenmiş imin tepe genliğine eşit olduğu gösterilebilir. Gelen imin bu özelliği otomatik dengeleyicinin ayarında kullanılabilir.

Bir otomatik dengeleyici ve kuvvetlendiricinin açık devre çizimi Şekil-15'te gösterildiği gibidir.

Burada C<sub>2</sub> kondansatörü doğru akımın kuvvetlendirici girişine sızmasını önler, C<sub>3</sub> kondansatörü ise D1 ve D2 diyotlarını köprüler. Her iki kondansatör de bütün frekanslarda kısa devre varsayılabilir.

Otomatik dengeleyicinin eşdeğer devresi Şekil 16'daki gibi olup, bu devrenin gerilimler oranı geçiş işlevi,

$$V_2(s)/V_1(s) = \frac{s[r(l)/(R_T + r(l))]}{[s + ((r(l) + R_4)/r(l)R_4C_1)] / [s + (1/R_4C_1)]}$$

biçimindedir. Geçiş işlevinin

$$s = -1/R_4C_1, \text{ 'de değişmez bir kutbu,}$$

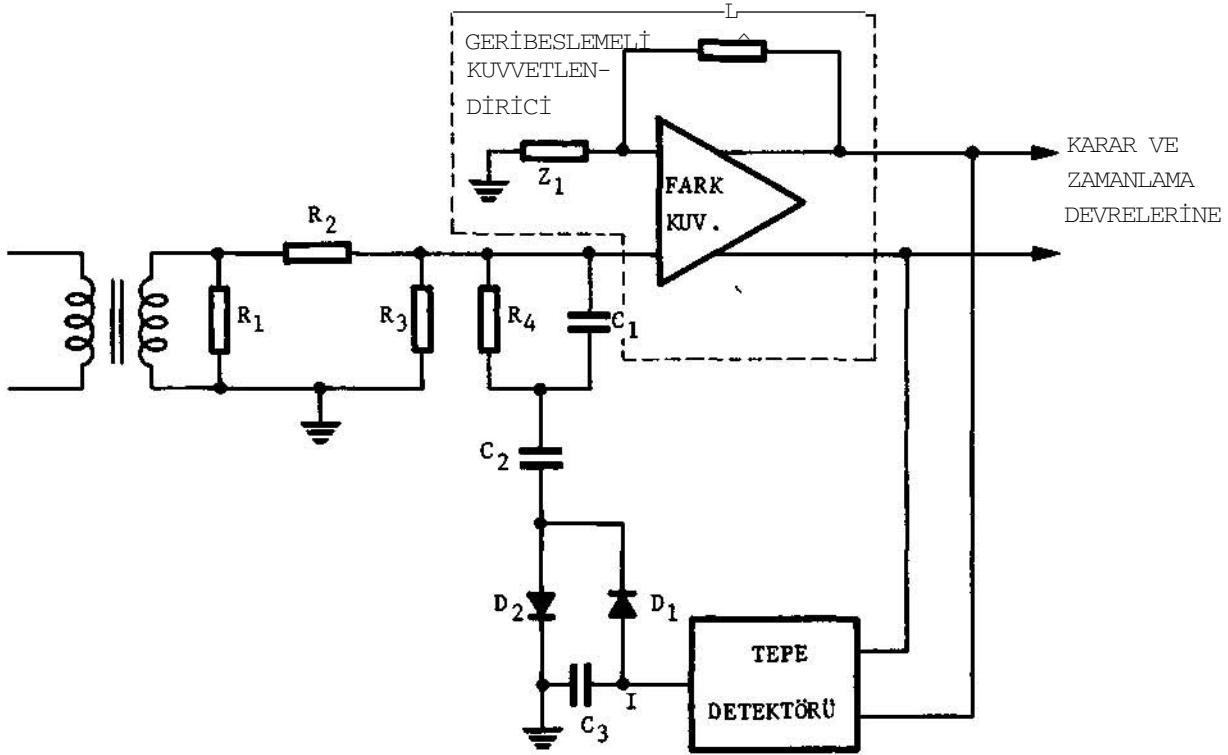
$$S = -[(r(l) + R_4)/r(l)R_4C_1]$$

de değişken bir sıfırı ve

$$[R_4 + r(l)]/[R_T + r(0)]$$

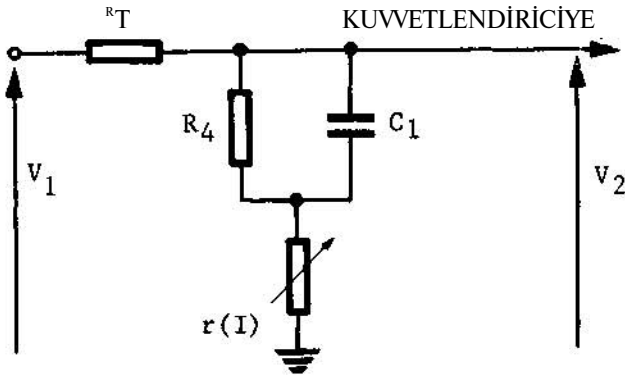
orantısıyla verilen değişken bir kayıp işlevi vardır. (6)

Geri beslemeli kuvvetlendiricideki değişmez sıfır



Şekil 15. Bir otomatik dengeleyici ve kuvvetlendiricinin açık devre şeması

$s = -1/R_4 C$ , noktasına yerleştirilerek otomatik dengeleyicideki değişmez kutup yok edilir. Aynı kablo içinde çalışan öteki sistemler nedeniyle oluşan yakın-uç çapraz karışımı azaltmak amacıyla, kuvvetlendiriciye yüksek frekanslarda düşme gösteren bir karakteristik kazandırılır.



Şekil 16. Otomatik dengeleyicinin eşdeğer devresi

Değişken dengeleyici-kuvvetlendirici oluşturmanın bir başka yolu da, hat uzunlukları değiştiğinde sisteme değişken bir yapay hat ekleyerek sonuçta sürekli maksimum hat uzunluğunun elde edilmesidir. Bu tür devrelere Otomatik HatOluşturma (AUTOMATIC LINE BUILD-OUT: ALBO) devreleri adı verilir.

Dengeleyici bölümü ALBO devresi ile gerçekleştirilen bir

hat tekrarlayıcısının öbek çizim Şekil-17'de verilmiştir.

ALBO devreleri geri beslemeli olarak kullanılarak, tekrarlayıcılar arasındaki uzaklıklar değiştiğinde A noktasında hep aynı biçimde bir imin elde edilebilmesini sağlarlar. Dengeleme kuvvetlendiricisi her zaman aynı zayıflama ile gelen imi biçimlendirerek A noktasında karar verilebilir duruma getirir.

Uygulamada değişken dengeleyici olarak kullanılan bir devre türü de BODE Dengeleyicilerdir. Bode dengeleyicisinin gerçekleştirilmesi aşağıdaki kuramdan kaynaklanmaktadır. (1)

Kuram: iki pasif dört uçlu bir seri Z empedansı üzerinden kaskat bağlanıp Z empedansı değişken z empedansı y la şöntlendiğinde, birinci dört uçlunun girişindeki ve ikinci dört uçlunun çıkışındaki gerilimler oranı:

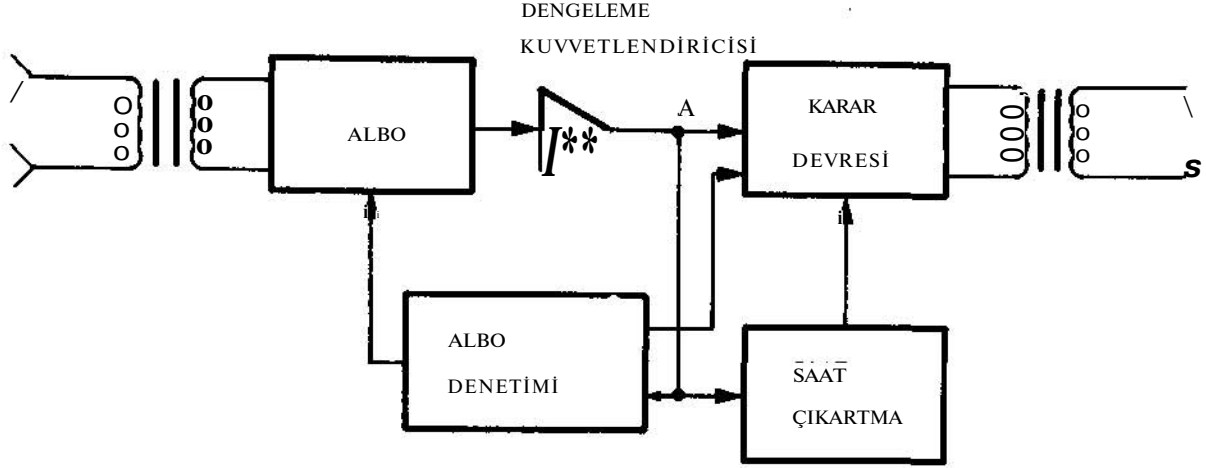
Z'nin herhangi bir değeri için K

$Z = 0$  iken (kısa devre durumu)  $K <$

$Z = \infty$  iken (açık devre durumu)  $K_a$  ise,

$$K = [K_k(Z + K_a)z] / [z + Z]$$

$$K = \sqrt{K_a K_k} [(z\sqrt{K_a/K_k}) + (Z\sqrt{K_k/K_a})] / [z + Z]$$



Şekli 17. Dengeleyici bölümlü ALBO devresi ile gerçekleştirilen bir hat tekrarlayıcısının öbek çizimi

olur. Eğer dört uçlular ve Z empedansı z'nin özel bir  $z_0$  değeri için  $Z = z_0 \sqrt{K_a/K_k}$  bağıntısını sağlayacak biçimde seçilirse,

$$K = \sqrt{K_a} \left[ \frac{1 + (Z/Z_0) + (z/z_0)}{(Z/Z_0) + (z/z_0)} \right]$$

olur. Bu eşitlikte  $z = z_0$  için ortalama dönüşüm oranı,

$$K_0 = \sqrt{K_a \cdot K_k} \text{ dan ortalama zayıflama } (N_0 = 20 \log_{10} K_0 \text{ 'dır.}$$

$z = 0$  ya da  $z = \infty$  durumunda maksimum dönüşüm oranı ise

$$K_2 = (Z/z_0) = \sqrt{K_a/K_k} \text{ oluP> buna ilişkin maksimum za-}$$

yıflama  $N_2 = 20 \log_{10} K_2$  Ve  $(z/z_0) = m$  alınarak, K aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$K = K_0 \left[ \frac{1 + mK_2}{m + K_2} \right]$$

Bu oranın dB cinsinden eşdeğeri ise:

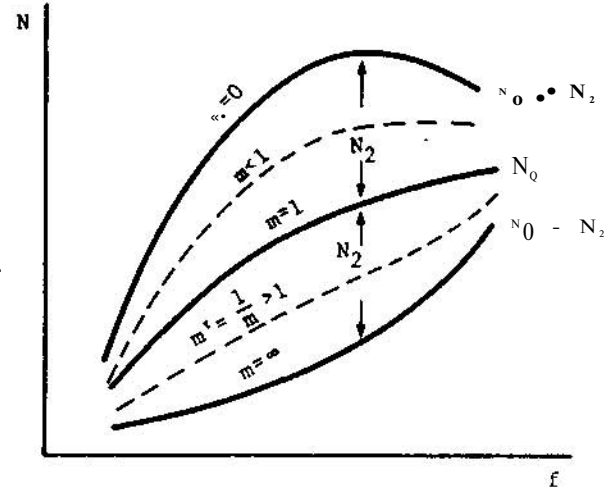
$$N_h = N_0 + 20 \log_{10} \left[ \frac{1 + mK_2}{m + K_2} \right]$$

olur. Bu eşitlik, logaritmik kısmi seriye açıldığında  $N_2$ 'nin küçük değerleri için büyük bir yaklaşıklıkla;

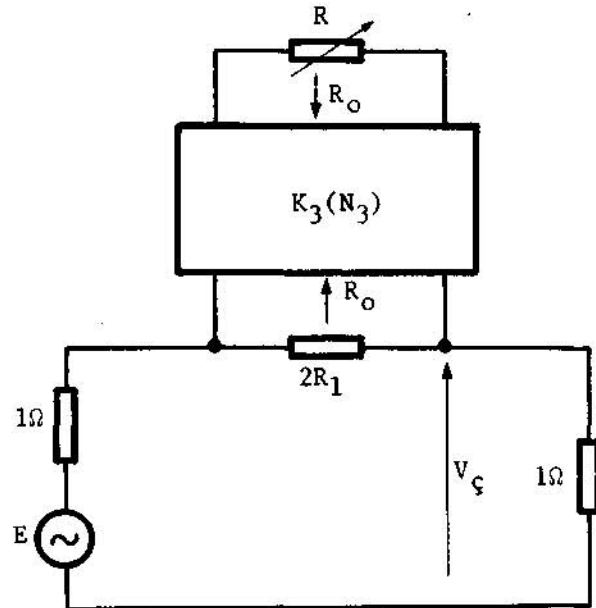
$$N_y = N_0 + N_2 \left[ \frac{m-1}{m+1} \right]$$

biçiminde kısaltılabilir. Buradan görüleceği gibi m'nin ters değerleri için (m ve 1/m için)  $N_0$ 'a göre simetrik eğri çiftleri elde edilmektedir. Bu durumda m parametresi 0 ile  $\infty$  arasında değişirken,  $N_0 + N_2$  ve  $N_0 - N_2$  sınır eğrileri arasında kalan ve  $N_0$  ortalama zayıflamasına göre Şekil 18'deki simetrik eğri ailesini oluşturmaktadır.

Bir Bode dengeleyicisi Şekil 19'da gösterilen devre ile gerçekleştirilebilir.



Şekil 18. Bode dengeleyicisinde zayıflama eğrileri

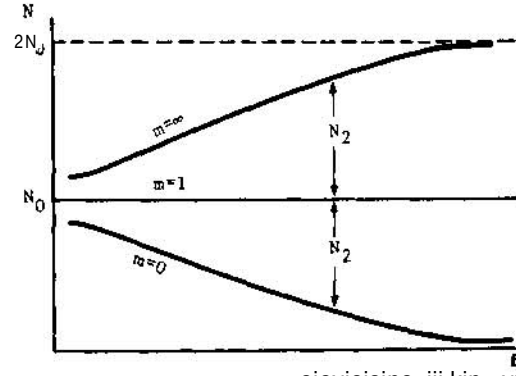


Şekil 19. Bode dengeleyicisi

İç empedansı 1 ohm olan bir kaynak 1 ohm'luk bir yüke  $2R_j$  direnci ve onu şöntleyen bir dört uçlu üzerinden bağlandığında, devrede bir araya girme kaybı oluşur. Bu kaybın yaklaşık olarak

$$N_y = N_0 + N_2 \left[ \frac{(m-1)}{(m+1)} \right]$$

biçiminde ifade edilebileceği gösterilebilir. Burada,  $N_0$  frekanstan bağımsız değişmez ortalama zayıflama,  $N_2$  ise frekansla değişen parçasıdır. Toplam zayıflama eğrileri 0 ve  $2N_0$  sınırları arasında kalan ve  $N_0$  yatay doğrusuna göre simetrik kalan bir aile oluşturur. (Şekil 20).



Şekil 20 Şekil 19'daki Bode Dengeliyeicisine ilişkin zayıflama eğrileri

## KAYNAKLAR

- ALATAŞ, C; "Köprülü T ve BODE Egalizörleri", Elektrik Mühendisliği Dergisi, Cilt 14, Sayı 168, Aralık 1970.
- CRAVIS, H., CRATER, T.V.; "Engineering of T1 Carrier System Repeated Lines", Bell System Technical Journal, Cilt 42, Mart 1963.
- MAYO, J.S.; "A Bipolar Repeater for Pulse Code Modulation Signals", Bell System Technical Journal, Cilt 41, Ocak 1962.
- AARON, M.R.; "PCM Transmission in the Exchange Plant", Bell System Technical Journal, Ocak 1962.
- YETİŞ, ö., ALPER, A.T.; "32 Kanallı PCM Sisteminde Kullanılan Kağıt izoleli Telefon Kablolarının Yüksek Frekans Karakteristikleri", TÜBİTAK Marmara Araştırma Enstitüsü, Elektronik Ünitesi, Ünite içi Rapor No., UI-74/03, Şubat 1975.
- TARBOX, R.A.; "An Automatic Equalizer for Digital Repeated Lines", Proceedings of the IEEE, Mart 1969.
- OHTSUKİ Mikio, FUDEMOTO Isao, YOSHIBA-YASHI Tsutomu; "A New High-Speed PCM Repeater Utilizing Hybrid Integrated Circuit Technology", FUJITSU Scientific and Technical Journal, Aralık 1971.
- BYLANSKI, P., INGRAM D.G.W.; "Digital Transmission Systems", IEE Telecommunications Series 4, 1979.