

1. Sayısal Haberleşme

İletişim ağlarındaki gelişme en ekonomik bir şekilde varolan sistemler ile uyuşur ve gelecekte kurulacak sistemlere esnek bir yapıda gerçekleştirilmelidir. Haberleşme ve bilgisayar teknolojilerinin gitgide bağımlı bir uruma gelmesi sayısal haberleşmeye yönelişi kaçınılmaz kılmaktadır. Sayısal haberleşmenin yaygınlaşmasının teknik, ekonomik ve işletimsel çeşitli nedenleri vardır:

- Sayısal iletişim teknikleri kurulu kanalların kapasitelerini arttırmada son derecede ekonomiktir. Özellikle jonksiyonlu telefon kabloları darbe kod modülasyonu kullanıldığında analog ilettime kıyasla çok daha fazla ses işareti taşıyabilmektedir. Bu da yeni kablo döşenmesi yolların kazılması gibi sorunları ortadan kaldırmaktadır.

- Sayısal işaretlerin yeniden üretilmelerinin kolay olması, uzun ve gürültülü haberleşme kanallarından iletimde, analog işaretlere göre avantaj sağlamaktadır. Analog sinyaller sayısal darbelerle oranla arzu edilmeyen genlik, frekans ve faz değişimlerine daha yatkındırlar. Bunun nedeni de sayısal iletimde bu parametreleri analog iletimde olduğu kadar tam ve kesin olarak değerlendirmenin gerekli olmamasıdır. Sayısal iletimde alınan darbeler bir örnekleme aralığında değerlendirilir ve darbenin belli bir eşiğin üstünde mi yoksa altında mı olduğu belirlenir.

- Sayısal işaretlerin çoğullanması daha basit ve daha ucuz olarak gerçekleştirilebilmektedir. Anahtarlama işlemleri çoğullama için yeterli olmaktadır.

- Sayısal darbeler kolaylıkla saklanabilir, ancak analog sinyalleri saklamak kolay değildir. Ayrıca sayısal bir sistemin hızı, değişik ortamlara uyum gösterecek ya da değişik tür donanımlara arabirim üzerinden bağlanabilecek şekilde kolayca değiştirilebilir.

- Diğer yandan veri iletişiminin gitgide önem kazanması ve verilerin yapıları gereği ayrık ya da ayrıklaştırılarak depolanmış olmaları bu türden sayısal trafik gereksinimini doğurmuştur. Bilgisayarlar sayısal yapıda bilgi depolayabilmekte ve birbirleriyle sayısal tekniklerle haberleşebilmektedirler.

- Her ne kadar sayısal sistemler büyük bant genişlikleri gerektiriyorlarsa da bu bant genişliği yüksek radyo frekanslarını (1 – 50 Ghz) dalga kılavuzlu ve fiber optik kanalları yararlı kılmaktadır. Bu bantları kullanabilmek için sayısal haberleşme tekniklerinden yararlanmak bazı durumlarda zorunlu olmaktadır.

- Sayısal haberleşme sistemlerinin başarısı hata olasılıkları ile belirlenebilir. Analog iletişim sistemleri genellikle özel ve karmaşık kıstaslar gerektirir. Sayısal sistemlerde gerekli iletişim hızını dolayısıyla bant genişliğini azaltmak için sayısal işaret işleme teknikleri kullanılabilir. Ayrıca, güvenilirlik amacıyla hata bulma ve düzeltme yöntemlerinden yararlanılabilir.

Bunların yanında sayısal iletimin bazı dezavantajlarını da şöyle sıralayabiliriz:

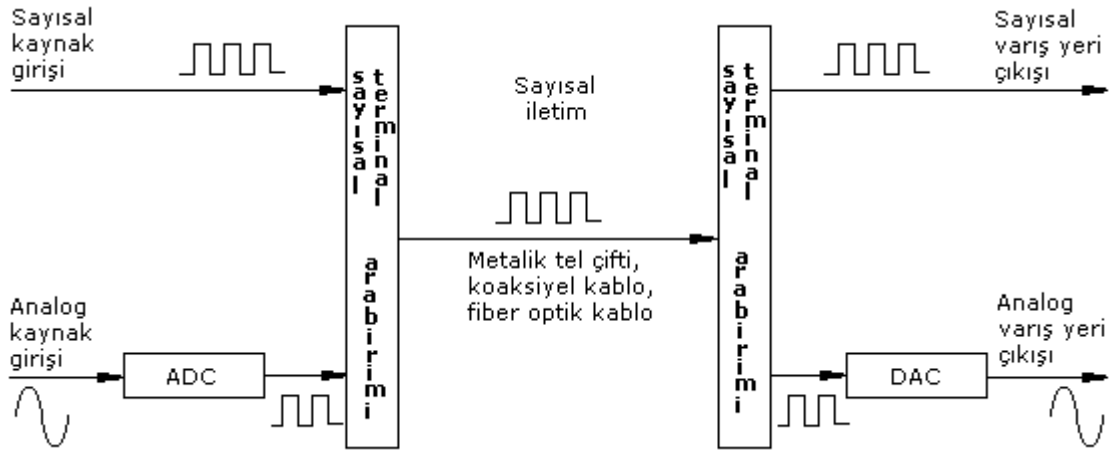
- Sayısal olarak kodlanmış analog sinyallerin iletimi, analog sinyalleri oldukları gibi iletmeye oranla daha fazla bant genişliği gerektirir.

- Analog sinyaller iletimden önce sayısal kodlara , alıcıda ise tekrar analog biçime dönüştürülmelidir.

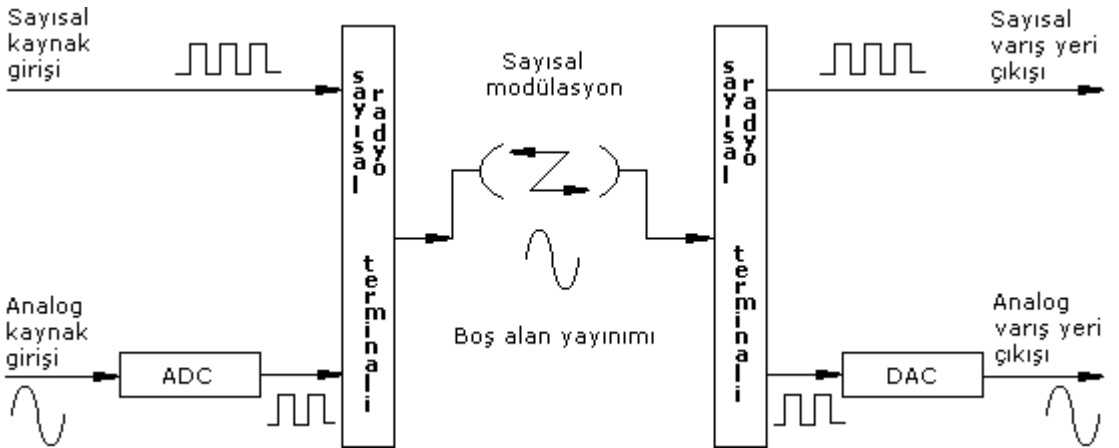
- Sayısal iletim verici ile alıcının saat darbeleri arasında duyarlı senkronizasyon gerektirir.
- Sayısal iletim sistemleri günümüzde kullanılmakta olan analog sistem donanımı ile uyumlu değildir.

1.1. Tanım

Sayısal iletişim terimi aralarında sayısal iletim ve sayısal radyonun da bulunduğu geniş bir iletişim teknikleri alanının kapsar. Sayısal iletim bir iletişim sisteminde iki nokta arasında sayısal darbelerin iletilmesidir. Sayısal radyo ise bir iletişim sisteminde iki nokta arasında sayısal modülasyonlu analog taşıyıcıların iletilmesidir. Sayısal iletim sistemleri verici ve alıcı arasında metalik tel çifti, koaksiyel kablo ya da fiber optik kablo gibi fiziksel bir malzeme gerektirirler. Sayısal radyo sistemlerinde, iletim ortamı boşa alan ya da yeryüzü atmosferidir.



Şekil 1-1 Sayısal İletişim Sistemleri



Şekil 1-2 Sayısal Radyo

Sayısal bir iletim sisteminde, başlangıçtaki kaynak bilgi sayısal biçimde ya da analog biçimde olabilir. Eğer kaynak bilgi analog biçimde ise, iletimde önce sayısal darbeler; alma ucunda ise tekrar analog biçime dönüştürülmelidir. Sayısal bir radyo sisteminde, modüle edici giriş sinyali ve demodüle edilmiş çıkış sinyali sayısal darbelerdir. Sayısal darbeler, sayısal bir iletim sisteminden, ana bilgisayar gibi sayısal bir kaynaktan ya da analog bir sinyalin ikili kodlanmasından kaynaklanabilir.

1.2. Bilgi Kapasitesi

Bir iletişim sisteminin bilgi kapasitesi belli bir zaman birimi içinde sistemde taşınabilecek bağımsız sembollerin sayısını gösterir. En temel sembol *bit*' tir. Bu nedenle bir sistemin kapasitesini *bps* olarak ifade etmek kolaylık sağlayan bir yöntemdir.

1928 yılında R. Hartley tarafından bulunan ve *Hartley Yasası* olarak bilinen ilişkiye göre, bilgi kapasitesinin sistem bant genişliği ve iletim süresi ile doğru orantılıdır.

$$C \propto B \times T$$

1948 C. E. Shannon, Bilgi Kapasitesinin Shannon Sınırı olarak bilinen ve bir iletişim kanalının bilgi kapasitesi ile bant genişliği ve sinyal gürültü oranı arasında bağıntıyı aşağıdaki şekilde vermiştir.

$$C = B \log_2 (1 + S/N)$$

1.3. Sayısal İletim

Sayısal iletim bir iletişim sisteminde iki nokta arasında sayısal darbelerin iletilmesidir. Sayısal iletim sistemleri verici ve alıcı arasında metalik tel çifti, koaksiyel kablo ya da fiber optik kablo gibi fiziksel bir malzeme gerektirirler.

Sayısal bir iletim sisteminde, başlangıçtaki kaynak bilgi sayısal biçimde ya da analog biçimde olabilir. Eğer kaynak bilgi analog biçimde ise, iletimde önce sayısal darbelere; alma ucunda ise tekrar analog biçime dönüştürülmelidir.

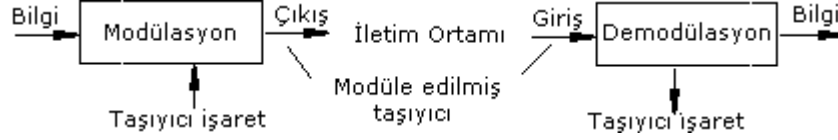
1.4. Sayısal Radyo

Sayısal radyo bir iletişim sisteminde iki nokta arasında sayısal modülasyonlu analog taşıyıcıların iletilmesidir. Sayısal radyo sistemlerinde, iletim ortamı boşa alan ya da yeryüzü atmosferidir.

Sayısal bir radyo sisteminde, modüle edici giriş sinyali ve demodüle edilmiş çıkış sinyali sayısal darbelerdir. Sayısal darbeler, sayısal bir iletim sisteminden, ana bilgisayar gibi sayısal bir kaynaktan ya da analog bir sinyalin ikili kodlanmasından kaynaklanabilir.

2. Darbe Modülasyonu

Taşıyıcı işaret ve bilgi işaretine göre haberleşme sistemleri sınıflandırılarak birbirinden ayrılabilir. Telefon , ses ,TV sinyalleri, Bilgisayar verileri bilgi işaretine örnektir. Darbe modülasyonu genel olarak belirli bir darbe katarının genlik, süre veya diğer parametrelerinin bilgi (mesaj) işaretinin bir fonksiyonu olarak değiştirilmesi sonucu elde edilir.



Şekil 1-3 Modülasyon - Demodülasyon

Taşıyıcı İşarete Göre Haberleşme Sistemleri;

1. Sürekli Dalga Modülasyonu Sistemi : Taşıyıcı dalga belli bir frekansta tek bir sinüzoidal işaretten ibarettir. Sinyal her anında süreklilik gösterir. Zamanın her anında genlik değeri bulunur.
2. Darbe Modülasyonu Sistemi : Taşıyıcı dalga periyodik bir darbe katarıdır. Diğerinin aksine zamanın belirli anlarında genlik değeri var ve belirli anlarında genlik değeri yoktur. Yani ayırık zamanlı bir yapıya sahiptir.

Bilgi İşaretine Göre Haberleşme Sistemleri;

1. Analog Modülasyon : Sürekli bir bilgi işaretinin modülasyonu ile elde edilen modülasyon türüdür.
2. Sayısal (Dijital) Modülasyon : Ayırık bir bilgi işaretinin modülasyonu sonucu elde edilen modülasyon türüdür.

Bu konunun kapsamı darbe modülasyonu türlerinin incelenmesinden oluşmaktadır. Taşıyıcının ayırık yapıda olması nedeniyle ayırık bilgi işaretleriyle ilgilenilmesi doğaldır. Diğer yandan yapısı gereği sürekli olan bilgi işaretleri de ayırıklaştırılarak darbe modülasyonu yardımıyla iletilebilirler. Ayırıklaştırma, sürekli işaretten belli aralıklarla örnekler alınarak gerçekleştirilir. Ancak ayırık işaretten sürekli işaretin yeniden ve doğru olarak elde edilebilmesi için örnekleme işlemi sırasında bazı koşulların sağlanması gerekir. Bu koşullar örnekleme teoremi ile belirlenir.

Sonuç olarak bilgisayar çıkışları gibi yapıları gereği ayırık işaretlere doğrudan; ses, müzik, Tv, tıbbi bilgi işaretleri gibi sürekli yapıdaki işaretlere ise örnekleme işleminin ardından darbe modülasyonu sistemleri uygulanabilir.

Darbe Modülasyon Türleri;

1. Darbe Genlik Modülasyonu (Pulse Amplitude Modulation _ PAM)

Bilgi işaretinin genlik değişimine bağlı olarak taşıyıcı işaretin (darbenin) genliği değiştirilir.

2. Darbe Zamanı Modülasyonu (Pulse Time Modulation _ PTM)

2.1. Darbe Süresi Modülasyonu (Pulse Duration Modulation – PDM)

Bilgi işaretinin genlik değişimine bağlı olarak taşıyıcı işaretin (darbenin) süresi (genişliği) değiştirilir.

2.2. Darbe Yeri Modülasyonu (Pulse Position Modulation - PPM)

Bilgi işaretinin genlik değişimine bağlı olarak taşıyıcı işaretin (darbenin) yeri (konumu) değiştirilir.

3. Darbe Kod Modülasyonu (Pulse Code Modulation _ PPM)

Bilgi işaretinin genlik değişimine bağlı olarak taşıyıcı işaret sonlu sayıda kuanta düzeyine kuantalanıp kuanta değerleri ikili kodlara dönüştürülür.

2.1. Darbe Modülasyonunun Üstünlükleri

- Darbe modülasyonunda iletilen güç yalnız kısa darbeler içinde yoğunlaşmıştır. Sürekli dalga modülasyonundaki gibi sürekli olarak dağılmamıştır. Bu da sistem tasarımı için önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Örneğin, yüksek güçlü mikrodalga tüpleri ve lazerler darbe biçiminde çalışmaya elverişli elemanlardır.

- Darbeler arasındaki boşluklar diğer mesajlara ait örneklerle doldurularak tek bir haberleşme sistemi üzerinden birden fazla mesaj işaretinin iletilmesi sağlanabilir. Bu işleme zaman bölmeli çoğullama – TDM adı verilir.

- İşlemler ayrık türden işaretlerle yapıldığı için son yıllarda entegre devre teknolojisindeki gelişmeler, sayısal iletişim devrelerinin gerçekleşmesini kolaylaştırmıştır.

- Sayısal işaret işleme tekniklerindeki ilerlemeler sayısal işaretlerin daha yaygın kullanılmasına neden olmuştur.

- Bazı darbe modülasyonlu sistemler gürültü ve diğer bozucu işaretler açısından sürekli dalga haberleşmesinden daha güvenilir bulunmaktadır.

Sürekli dalga modülasyonu ile darbe modülasyonu arasındaki önemli fark, modüle edilmemiş darbe katarının çok önemli miktarda alçak frekans bileşenleri hatta doğru akım bileşeni içermesidir. Bu nedenle, modüle edilmiş dalgaların belirli bir frekans bandına sahip kanallardan iletilebilmesi için bir modülasyon işlemine ihtiyaç duyulur. Bu yüksek frekanslarda bir sürekli dalga modülasyonu örneğin FM kullanılabilir. Bir kablo üzerinden yapılan iletimde ise daha farklı modülasyon yöntemleri kullanılır.

Darbe modülasyonu gerçekleştirilirken ilk önemli adım verilen bir mesaj işaretini ayrık örneklerden oluşan değerlere dönüştürme işlemidir.

2.2. Örnekleme Teoremi

Shannon veya Nyquist teoremi olarak bilinen örnekleme teoremi ideal örnekleme için şöyle verilebilir:

f_m frekansı ile bant sınırlı bir $m(t)$ işaretinden, eşit T_s zaman aralıkları ile alınan $m(nT_s)$ örnek değerleri kullanılarak işaretin tek ve bozulmasız olarak elde edilmesi için gerek ve yeter koşul;

$$f_s = 1 / T_s = \geq 2 f_m$$

olmasıdır.

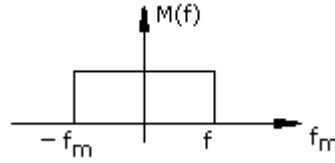
f_s : Örnekleme frekansı (Hz)

T_s : Örnekleme Periyodu (s)

f_m : Bilgi işaretinin içerdiği en yüksek frekans (Hz)

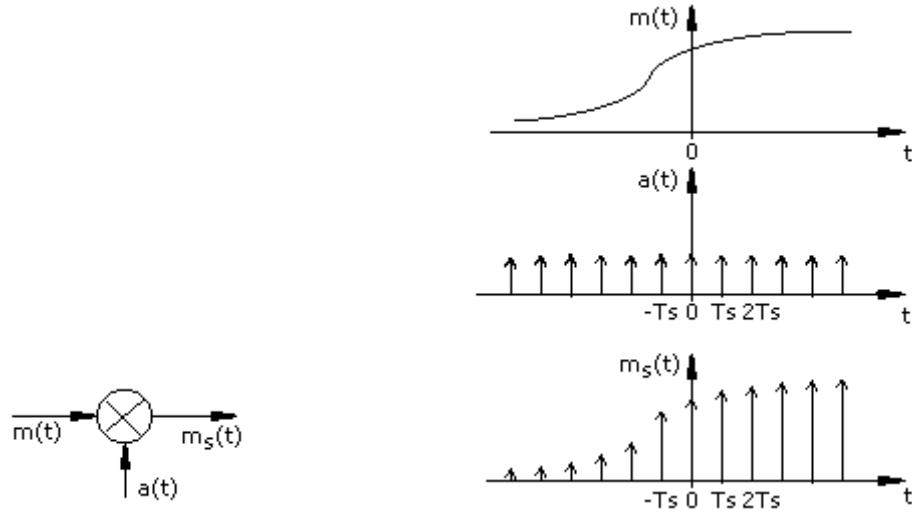
2.3. Darbe Genlik Modülasyonu (PAM)

Herhangi fiziksel bir kaynağa ilişkin en büyük frekansı f_m olan analog bir $m(t)$ işareti frekans domeninde simgesel olarak aşağıdaki gibi gösterilebilir.



Şekil 1-4 Bilgi işareti f domeni gösterimi

Bant sınırlı bu işaret aşağıdaki ideal örnekleme blok diyagramında gösterildiği biçimde bir impuls dizisiyle örnekleyelim



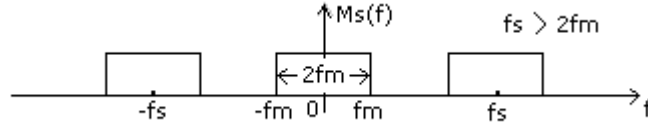
Şekil 1-5 İdeal Örnekleme

$$a(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_s) \quad m_s(t) = m(t) \cdot a(t)$$

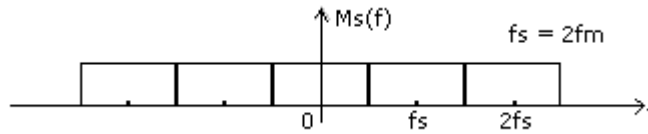
$$M_s(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \frac{1}{T_s} \cdot M(f - kT_s)$$

Sonuç olarak $m_s(t)$ örneklenmiş işaretin spektrumu $M_s(f)$ 'nin f_s aralıklarla yinelenen, genliği $1 / T_s$ katsayısı ile çarpılmış sonsuz bir dizisidir.

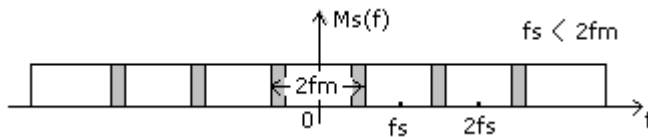
İmpuls dizisiyle örneklenmiş işaretin genlik spektrumu farklı örnekleme frekansları için aşağıda çizilmiştir.



Şekil 1-6 Aşırı örnekleme



Şekil 1-7 Kritik örnekleme



Şekil 1-8 Az örnekleme

Genlik spektrumlarından görüldüğü gibi $m(t)$ işaretinin bant genişliğinin iki katına eşit veya daha büyük örnekleme frekansları için görüntüler birbirleriyle katlanmaktadır. Örnekleme frekansı işaret bant genişliğinin iki katından küçük seçildiğinde görüntüler üst üste gelmekte ve birbirlerini bozmaktadırlar. Bu olay spektral katlanma (spectral folding, aliasing) olarak adlandırılır ve ses bilgisinin anlaşılabilirliğinin, görüntünün yapısının bozulmasına neden olur. Katlanmaya engel olacak minimum örnekleme frekansı anabant işaretin bant genişliğinin iki katıdır:

$$f_s = 2 f_m$$

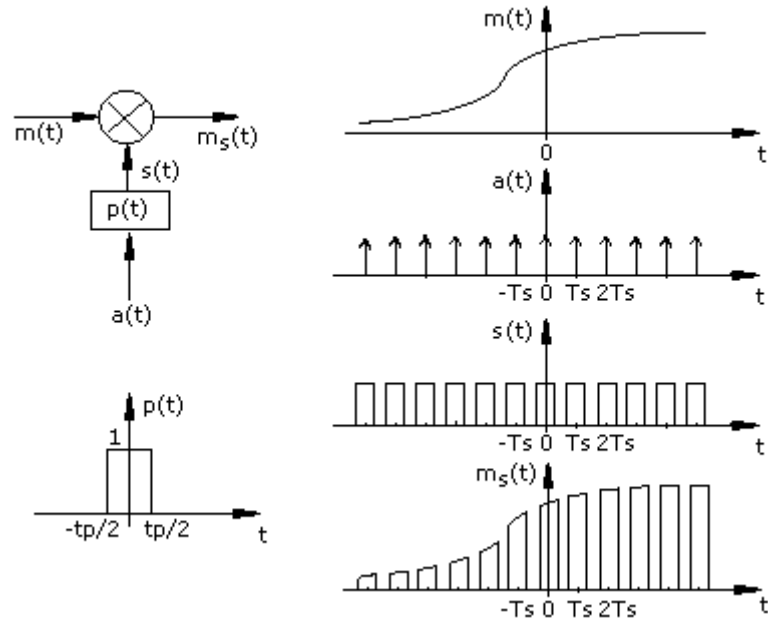
Bu frekans Nyquist örnekleme frekansı olarak adlandırılır.

Pratikte örnekleme kuşkusuz sonlu genlikli ve sonlu süreli darbeler yardımı ile olacaktır. Bu işlem $m(t)$ işaretinin doğal biçimini T_s birim aralıkları T_p süresi boyunca örnekleyerek gerçekleştirilir ve doğal darbe örnekleme adı alır.

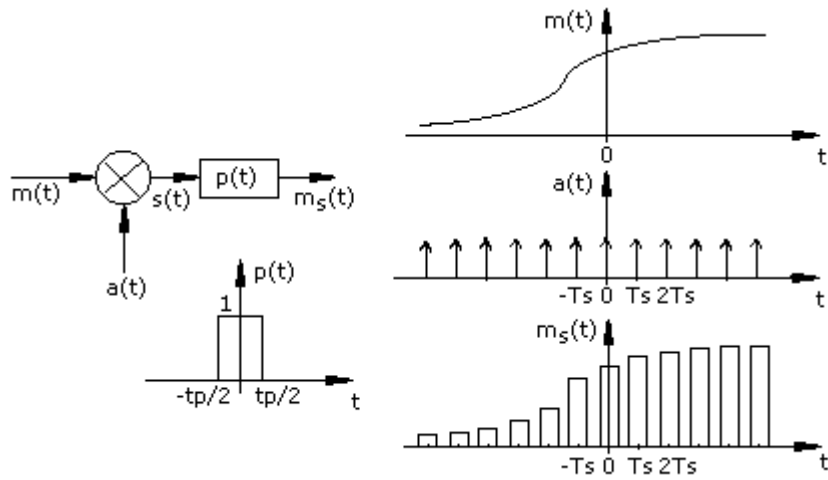
Yukarıda anlatılan örnekleme işlemleri sonucunda genlik değerleri verilen bir sürekli işarete bağlı olarak değişen darbe dizileri elde edildi. Elde edilen bu diziler darbe genlik modülasyonu olarak elde edilir. (PAM)

Bir sinyalin modülasyonunda kullanılan örnekleme frekansı Nyquist örnekleme frekansından bir miktar fazla tutulmalıdır. Bunun amacı örneklenmiş sinyalin maksimum frekans parçası ile minimum frekans parçası arasında bir bant oluşturmaktır. Bu banda

koruma bandı adı verilir. Buna telefon iletimini örnek verebiliriz: Ses sinyalleri 3.7 KHz'lik bir LPF'den geçirildiği halde 4 KHz kabul edilerek yani $f = 8$ KHz ile örneklenmektedir.

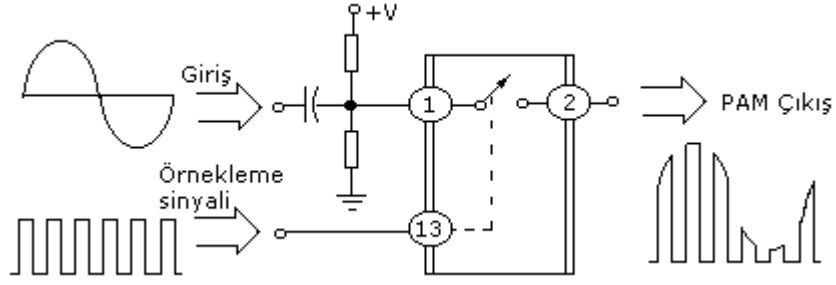


Şekil 1-9 Doğal örnekleme

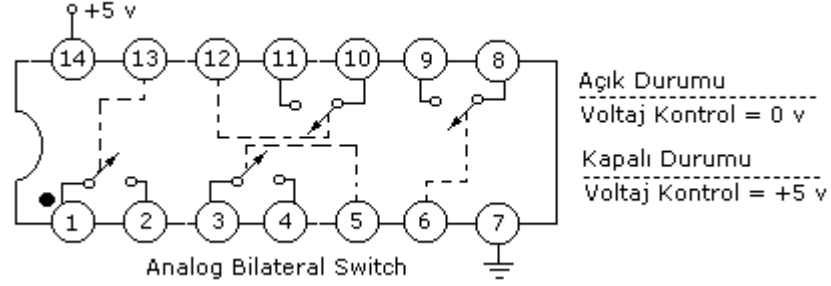


Şekil 1-10 Düz tepeli örnekleme – Örnekle ve tut devresi

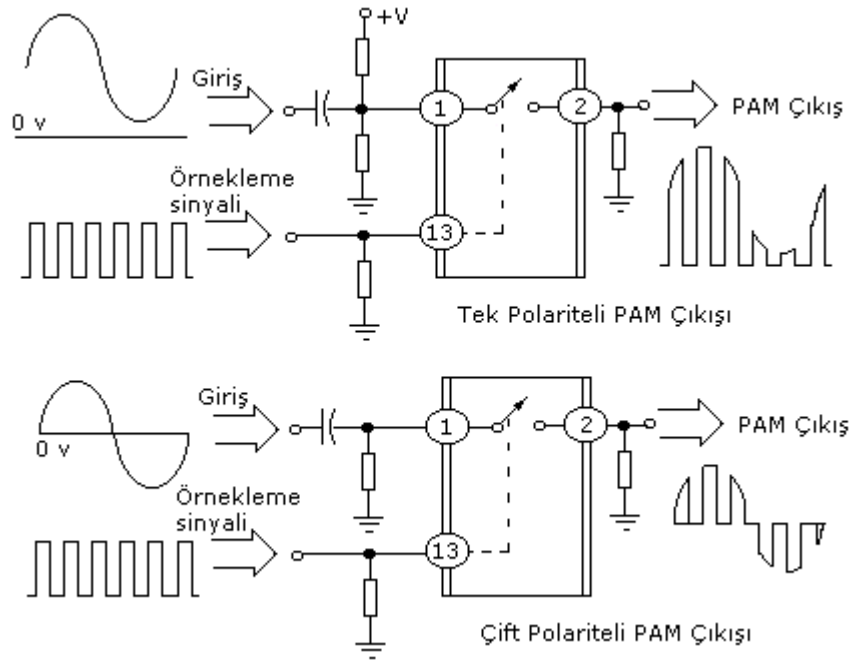
Pratik devreler için PAM'ın nasıl uygulanabileceği aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Örnekleme 4016 CMOS entegre kullanılarak gerçekleştirilebilir.



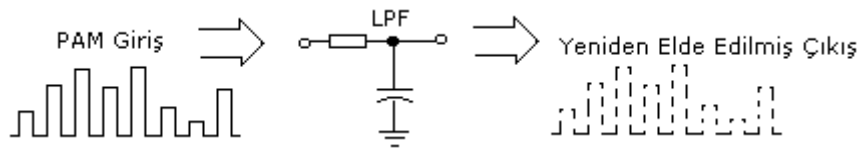
Şekil 1-11 4016 CMOS entegresi ile PAM'ın elde edilmesi



Şekil 1-12 4016 CMOS entegresi



Şekil 1-13 Tek polariteli PAM ve Çift Polariteli PAM



Şekil 1-14 PAM Demodülasyon

Bir PAM sinyalin tekrar elde edilmesinde alçak geçiren filtre (LPF) kullanılır. Tasarlanacak filtrenin kesim frekansı (cutoff) koruma bandının üzerinde bir frekans olmalıdır.

Darbe genlik modülasyonlu sinyal farklı yüksek frekanslı bir taşıma sinyali ile modüle edilip iletilebilir. Fakat PAM sinyali gürültüye karşı hassas olduğu için sayısal haberleşmede direkt olarak kullanılan bir yöntem değildir. PAM, PSK, QAM ve PACM ile bir ara modülasyon biçimi olarak kullanılır. Tek başına nadiren kullanılır.

PAM dalga dizisinin bant genişliği ;

$B_{PAM} = 2 \cdot f_m \cdot n$ (Hz) olarak verilebilir.

n , burada örneklenen sinyallerin sayısıdır. Bu durumda darbeler arasındaki ölü süre darbe genişliğine eşit ise örnekleme süresi ;

$$\tau = 1 / 2 n 2 f_m = 1 / 4 n f_m \quad (s) \text{ olur.}$$

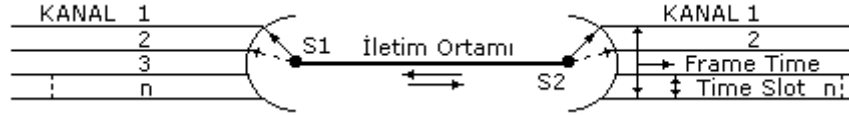
T_s süresi içinde örneklenmesi gereken bilgi kanalı sayısı arttıkça darbe genişliği τ 'nın küçüldüğü ve Bant genişliğinin arttığı görülmektedir. Tekillemenin gerçekleştirilmesi için alma anahtarı, gönderme anahtarı ile eşzamanlı olarak dönmelidir. Senkronizasyon için kullanılan yaygın bir yöntem kanallardan birini feda etmek ve bu kanal yerine bilinen bir gerilim düzeyi göndermektir. Diğer yöntemler olarak vericiden periyodik senkronizasyon darbeleri gönderilmesi ve alıcıya gelen PAM-TDM dalgalarından saat bilgisi elde edilmesi sayılabilir.

2.4. Zaman Bölmeli Çoğullama

Çoğullama bilginin (ses ya da veri) aynı iletim ortamında birden çok kaynaktan birden çok varış yerine iletilmesidir. İletimler aynı ortamda gerçekleşir, ancak mutlaka aynı zamanda gerçekleşmesi gerekmez. İletim ortamı metalik tel çifti, koaksiyel kablo, mikrodalga radyo, uydu radyo ya da fiber optik kablo olabilir. Bilgi kanallarının bir kanal üzerinden çoğullanması frekans bölmeli çoğullama (FDM) ve zaman bölmeli çoğullama (TDM) olarak iki ayrı yapıyı içerir. FDM genellikle sürekli dalga modülasyonu ile, TDM de ayrık yapısından dolayı darbe modülasyonu ile kullanılır.

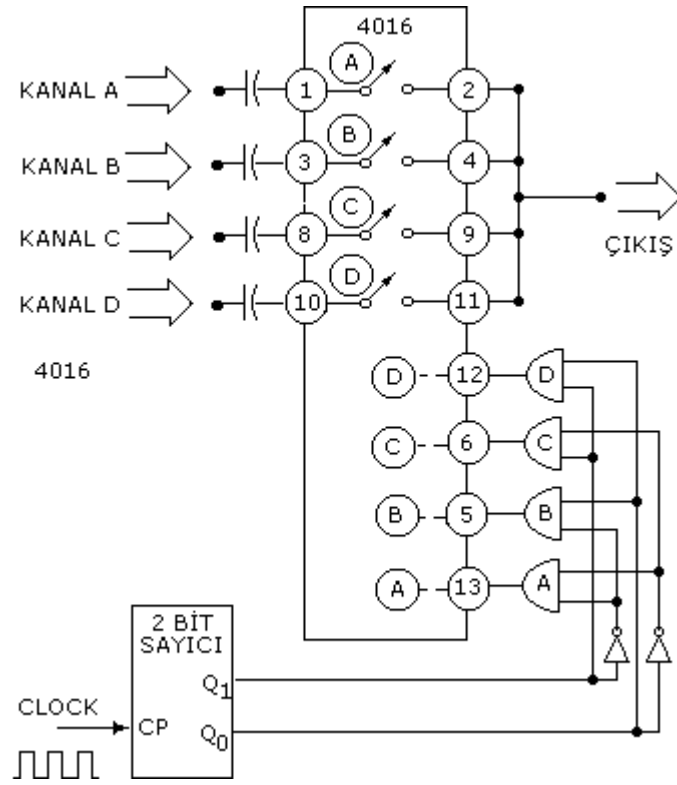
TDM'de birden çok kaynaktan gelene bilgi aynı ortamda, ancak değişik zamanlarda iletilir. Değişik kaynaktan iletilimler zaman domeninde geçmeli hale dönüştürülür. TDM sistemlerde en yaygın kullanılan modülasyon türü PCM'dir. PCM – TDM sistemlerde birden çok ses bantı kanalı örneklenir, PCM kodlarına dönüştürülür, sonra metalik kablo çiftine zaman bölmeli çoğullanır.

300 – 3400 Hz bant genişliğine sahip bir telefon konuşma kanalını örneklemek için en az 6800 Hz örnekleme frekansı alınmalıdır. Ancak pratikte bu değer 8000 Hz (CCITT tavsiyesine uygun) olarak kabul edilir. Örnekleme süresince iletilmek istenen her kanala bir zaman aralığı tahsis edilir. Bu da TDM tekniği ile sağlanır. TDM tekniği döner seçici (rotary) sisteme benzetebiliriz.

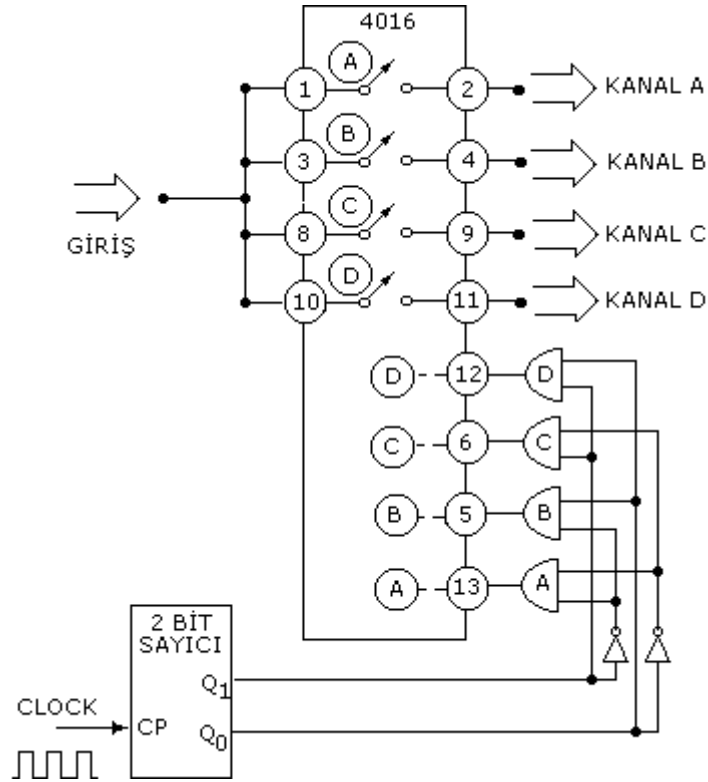


Şekil 1-15 Zaman Bölmeli Çoğullama

S1 ve S2 kolların kanaları tarama süresi aynı olmalıdır. Eğer $f_s = 8 \text{ KHz}$ alınırsa tarayıcı kolların dönme hızı 8KHz devir/s olacaktır. S2 kolu S1 ile eş zamanlı olarak tarama yapmalıdır. Aksi halde kanal işaretleri birbirine karışacaktır. Tarayıcı kolların kanaldan kanala geçme süresine kanal zaman aralığı (time slot) veya kanal adresi denir. Tarayıcıların tüm aboneleri tarayarak yeniden başa dönmesi için geçen süreye çerçeve süresi (frame time) adı Verilir. Çerçeve süresince her kanal bir zaman aralığı tahsis edilir.

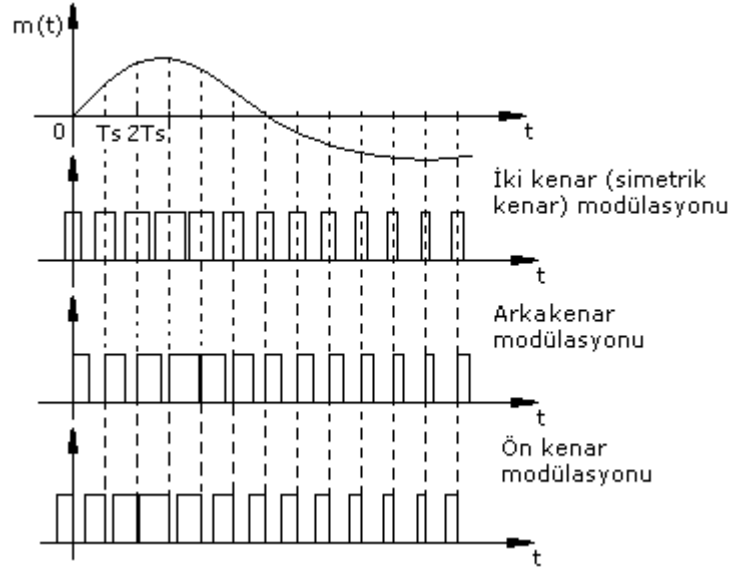


Şekil 1-16 4016 ile çoğullama



Şekil 1-17 4016 ile tekilleme

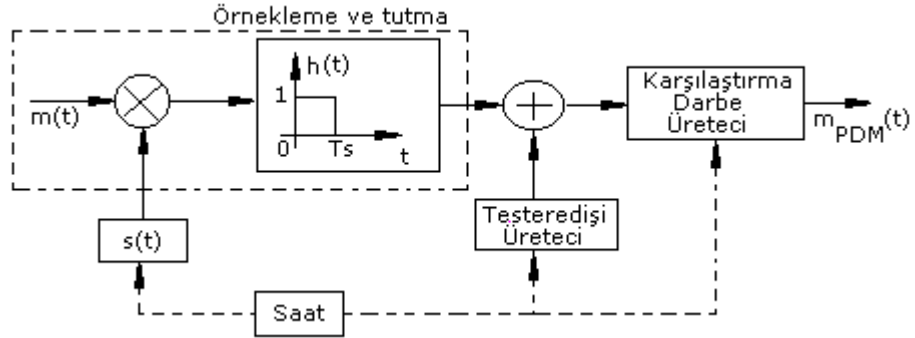
2.5. Darbe Süresi (Genişlik) Modülasyonu (PDM)



Şekil 1-18 PDM Dalga biçimleri

Darbe süresi modülasyonu taşıyıcı darbe katarındaki her darbenin genişliğinin bilgi işareti ile orantılı değiştirilmesi sonucu elde edilir. Bu modülasyon üç farklı türde gerçekleştirilebilir. Bunlar, iki kenar modülasyonu, ön kenar modülasyonu ve arka kenar modülasyonudur.

PDM işareti yaklaşık olarak sürekli dalga modülasyonunun bir türü olan açılı modülasyonuna benzemektedir. Bu nedenle zaman ve frekans domenindeki ifadelerini analitik olarak ifade etmek mümkün değildir.

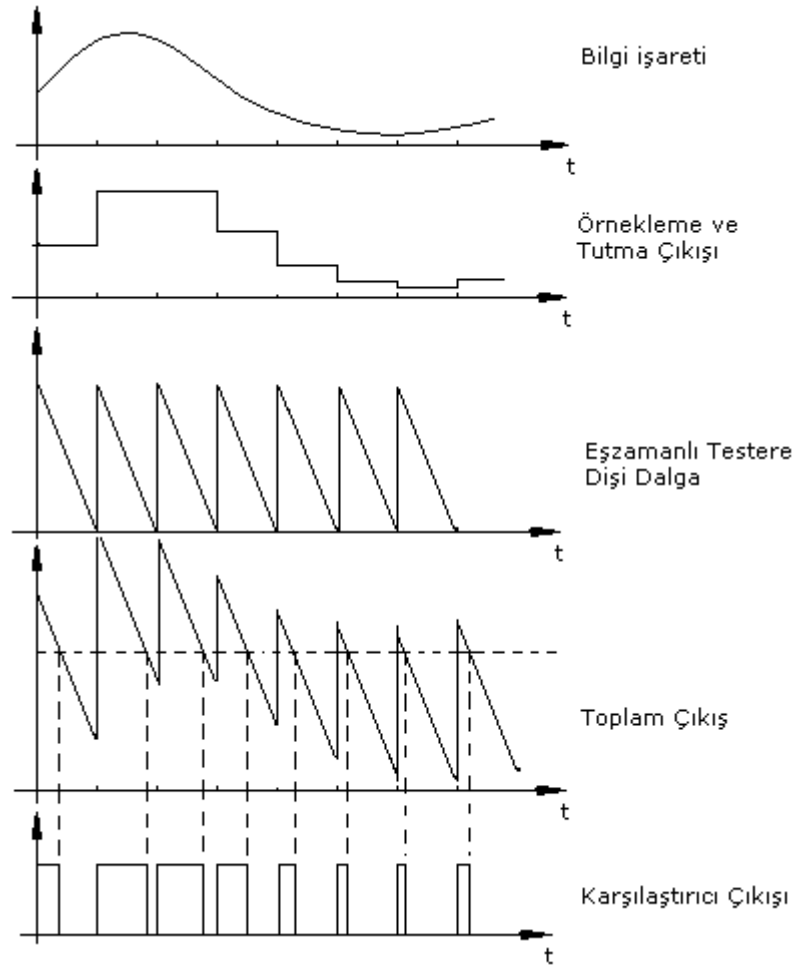


Şekil 1-19 PDM işaretinin üretilmesine ait blok diyagram

PDM dalgasını üretmek için yaygın bir yöntem yukarıda verilmiştir. Burada kullanılan testere dişi üretcin tepeden tepeye genişliği $m(t)$ bilgi işaretinin maksimum genişliğinden biraz büyük seçilir. Bu testere gerilimi genlikten zamana olan dönüşümünün temelini oluşturmaktadır. Karşılaştırıcı ise yüksek kazançlı ve iki durumlu bir kuvvetlendiricidir. Eğer giriş işareti referans seviyesinden büyükse bir durumda, referans seviyesinden küçükse diğer bir durumda olur.

PDM dalgasından $m(t)$ bilgi işaretini tekrar elde edebilmek için iki farklı yöntem vardır.

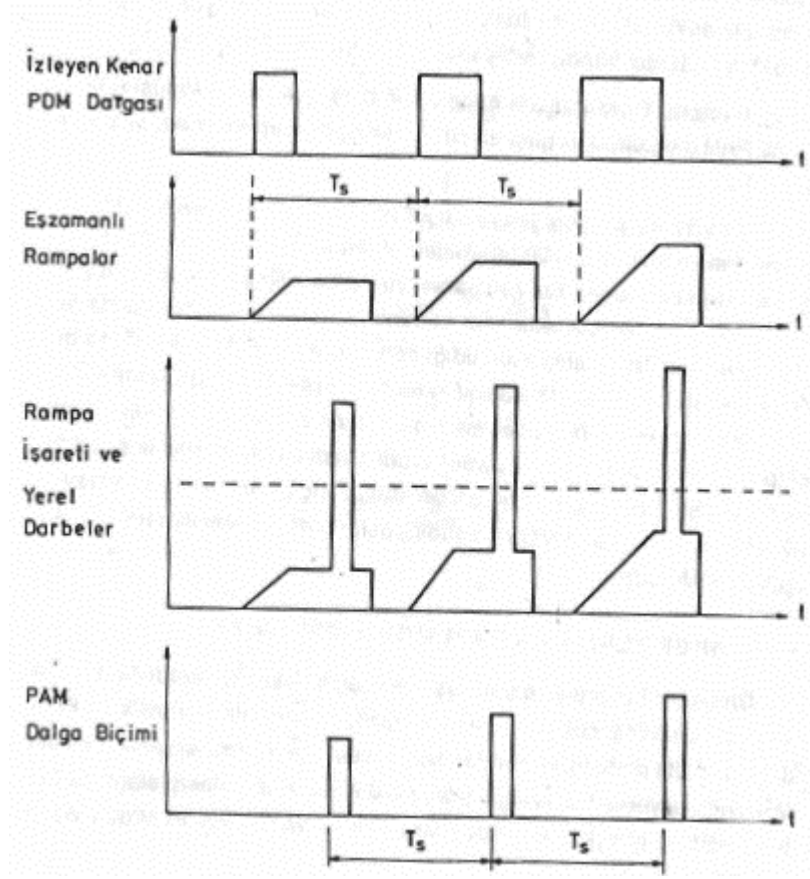
PDM dalgası bant genişliği w olan bir alçak geçiren filtreden geçirilir. Ancak bu yöntemin önemli bir sakıncası demodülasyon sonucu elde edilen $m(t)$ işaretinin distorsiyonlu olmasıdır. Bunun nedeni $M_{PDM}(f)$ 'in spektrumunda yan bantların kuyruklarının temel banda kadar uzanmasıdır.



Şekil 1-20 PDM işaretinin üretilmesi

Diğer yöntemde PDM dalgası önce PAM dalga biçimine dönüştürülür. Sonra PAM dalgası alçak geçiren bir filtreden geçirilerek $m(t)$ bilgi işareti elde edilir. PDM darbelerinin ön kenarı ile bir linear rampa işareti üretilmektedir. Bu rampanın yükselişi diğer darbenin düşen kenarında son bulmaktadır. Bu nedenle rampanın yüksekliği darbe süresiyle orantılıdır, rampanın aldığı son değer belirli bir süre daha bu değerde tutulur. Daha sonra, bu rampalar demodülatörde üretilen bir darbeler dizisine eklenir. Bu eklenen darbelerin genlikleri ve süreleri sabit olup zamanlaması darbeler birbiri üzerine tam olarak oturacak biçimde ayarlanmıştır.

Sonuçta elde edilen dalga biçimi bir kıyıcı devresine uygulanarak belirli bir eşğin üstündeki bölümü iletebilir. Bu da bir PAM dalgasıdır.



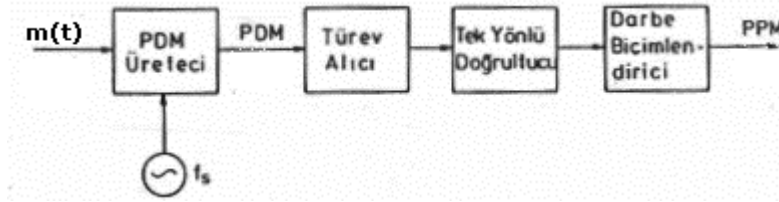
Şekil 1-21 PDM'in PAM'a dönüştürülmesi

2.6. Darbe Yeri (Konum) Modülasyonu (PPM)

Darbe yeri modülasyonu ve PDM birbirine çok yakın iki modülasyon türüdür. Genellikle PPM dalgası PDM işleminden sonra ilave işlemle üretilir. PPM bilgi iletimi yönünden PDM'den daha üstündür.

Önce PDM dalgası daha önce açıklanan bir yöntemle üretilir. Daha sonra bu dalganın türevi alınarak peş peşe pozitif ve negatif impuls dizileri elde edilir. Pozitif impulslar PDM darbelerinin arak kenarını göstermektedir. İki impuls arasındaki süre, PDM dalgasının darbe genişliğine eşittir.

Bu durumda darbelerin başlangıç anları eski impulsar ile belirlene bir darbe dizisi üretilirse elde edilen darbe dizisinde her darbenin referans noktasına göre yeri örnek

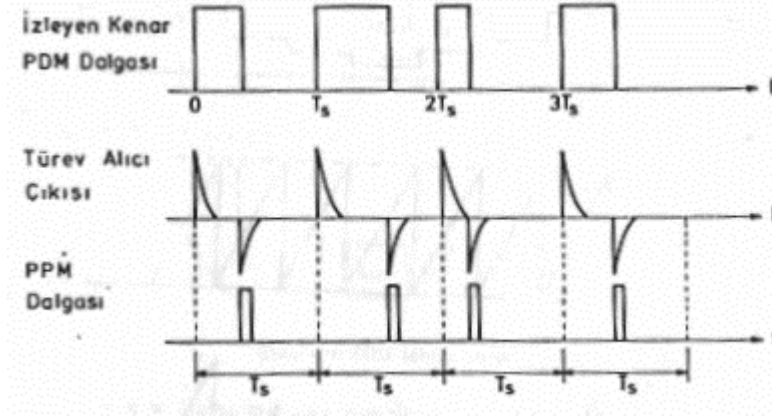


değerlerin büyüklüğü ile orantılıdır.

Şekil 1-22 PPM dalganın üretilmesi

PPM'de $m(t)$ bilgi işaretine ait bilgi T_s periyodu içinde darbelerin konumlarında saklıdır. Bu nedenle, genlik modülasyonunda taşıyıcı bileşenin boşuna güç taşımaya benzer biçimde PAM ve PDM dalgalarındaki güçte boşuna harcanan güçtür. Dolayısıyla PPM'in düşük güçlerde çalışabilmesi PDM'e göre en belirgin özelliğini ve üstünlüğünü oluşturmaktadır.

PPM doğrusal olmayan bir modülasyon olması nedeniyle PPM işaretin frekans spektrumu son derece zordur. PPM dalgası PDM dalgasına dönüştürülerek demodüle edilir.



Şekil 1-23 PPM dalganın üretilmesine ait dalga şekilleri

PDM veya PPM için bant genişliği şu ifadeden yaklaşık olarak bulunur:

$$B = 1/(2.t_r)$$

t_r : yükselme zamanı

3. Darbe Kod Modülasyonu

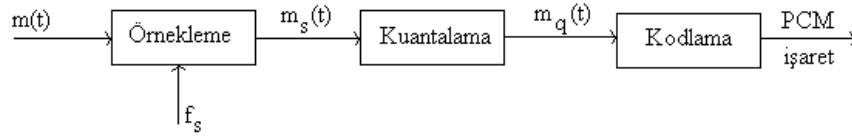
3.1. Giriş

Bir önceki bölümde PAM, PDM ve PPM modülasyonlarıyla darbenin sırasıyla genliğinin, genişliğinin ve bir periyot içindeki pozisyonunun sürekli olarak tüm işaret değerleri için değişimine izin verilmektedir. Bu aşamadan sonra bir iyileştirme de zamanda ayrık duruma getirilmiş (örneklenmiş) işaretin genliğinin de belirli sayıda ayrık seviyelere ayrılarak kuantalanmasıdır. M seviye sayısını gösterirse PAM sistemleri de kullanılan bu yöntem "M-li PAM" adı verilmektedir.

Örneklenmiş sürekli genlikli işareti belirli seviyelere kuantalamakla kalmayıp her bir örnek anında her seviye için bir ikili kod kullanılır. Bu türden modülasyon darbe kod modülasyonu (Pulse Code Modulation – PCM) olarak adlandırılır. PCM analog kaynak işaretinin sayısal dönüştürülmesinde kullanılan bir yöntemdir. Bu da üç temel fonksiyonla gerçekleştirilir:

- Analog kaynak sinyalini örnekleme
- Örneklenmiş sinyali kuantalama
- Kuantalanmış örnekleri sayısal işarete dönüştürme

Bu üç temel fonksiyonu blok şema üzerinde basit olarak açıklayabiliriz.



Şekil 1-24 PCM sistemi blok diyagramı

Analog giriş işareti önce LPF'den geçerek frekans bandı sınırlanır. (3.4 KHz altı) Sonra örnekleme işlemiyle PAM sinyalleri oluşturulur. PAM sinyalleri kuantize edilerek kodlayıcıda sayısal işaretlere dönüştürülür. Sayısal işaretler uygun transmisyon yolu ile gönderilir. Alıcı tarafında sayısal işaretler kod çözücüde çözülür ve tekrar orijinal analog sinyale dönüştürülür.

Örnekleme işlemi daha önce ayrıntılı olarak incelendiğinde burada ayrıca ele alınmayacaktır.

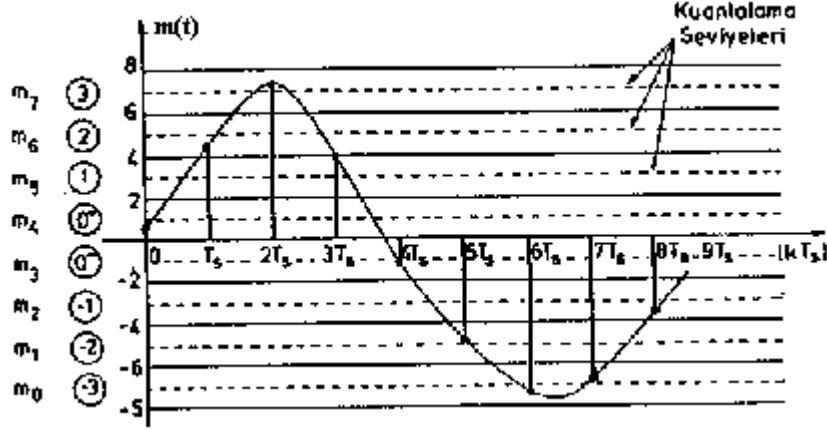
3.2. Kuantalama İşlemi

Darbe genlik modülasyonunda örneklenmiş değerler belirli kuantalama seviyelerine yuvarlatılmadan iletilmektedir. Ancak, bu işlem işaretin gürültüye olan duyarlılığı açısından bir yarar sağlamayacaktır. Bunun yerine işaret genliğinin belirli kuantalama seviyelerine yuvarlamak ve her kuantalama seviyesine uygun bir kod kelimesi karşı düşürmek daha uygun olmaktadır. Bu yuvarlama orijinal işareten geri dönüşsüz ama sınırlı bir değişime karşılık gelmektedir. Yani yapılan yuvarlamanın geri alınması mümkün değildir.

$m(t)$ işaretinin maksimum ve minimum genlikleri A_{max} ve $A_{min} = -A_{max}$ arasında değişiyorsa ve bu aralıkta değişen genlik değerleri $Q=2^n$ adet eşit kuantalama seviyesine bölünmek isteniyorsa kuantalama aralığı veya adımı

$$a = 2A_{\max}/2^n$$

olarak tanımlanmaktadır. Kuantalama işleminde örnek değerlerin bulunduğu dilim belirlenir. Örneğin, -8 ve +8 volt arasında değişen bir $m(t)$ işaretini ele alalım. Bu aralık 8 kuantal seviyesine ayrılırsa kuantalama aralığı $a = 16/8 = 2$ birim olacaktır.



Şekil 1-25 Kuantalama ve Kodlama

Şekil 1-25 de gösterildiği gibi her örnek değer 8 seviyeden birisine yuvarlatılır. Bu örnek için kuantal seviyeleri $\pm 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3$ olmaktadır. Her örnekleme anında elde edilen değer en yakın kuantal seviyesine kuantalanır. Tablo 1-1'de çeşitli işaret genliklerine karşı düşen kuantal seviyeleri ve kod kelimeleri görülmektedir.

Tablo 1-1

<u>Giriş işareti genliği</u>	<u>Kuantal seviyesi</u>	<u>Kod kelimesi</u>
2.768	+ 1	001
2.051	+ 1	001
6.767	+ 3	011
- 0.025	- 0	100

Kuantalama dilim sayısı arttıkça kuantalama gürültüsü de azalacaktır. Buna karşılık bir örneği belirlemek için kullanılması gereken bit sayısı da artacaktır.

Burada belirtilen PCM kavramlarını genel olarak topluca şu şekilde belirtebiliriz:

a = Kuantalama aralığı

N_q = Kuantalama gürültüsü

A_{\max} = Kuantalamaya tabi tutulacak max. genlik değeri

A_{\min} = Kuantalamaya tabi tutulacak min. genlik değeri

n = PCM koddaki bit sayısı

Q = Kuantalama basamak (dilim) sayısı

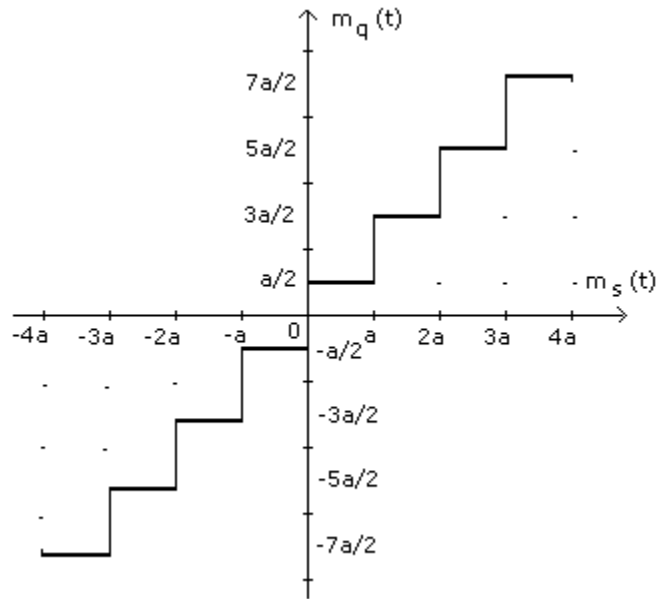
3.2.1. Düzgün (Doğrusal) Kuantalama

Düzgün kuantalama denilince akla kuantalama aralığı “a” değerinin tüm genlik değerleri için sabit olduğu bir kuantalama gelmektedir. Bu kuantalama türü genlik değişimlerinin eşit olasılıkta bulunduğu kaynak sinyal durumlarında kullanılmaktadır. Her ne kadar PCM’in endüstriyel anlamda geniş şekilde kullanıldığı ses iletiminde (telefon) genlik değişimleri eşit olasılıklarda oluşmasa da kuantalamanın genel mantığının anlaşılabilmesi ve düzgün olmayan kuantalamaya taban teşkil edecek bir konu olması dolayısıyla bu konu burada anlatılacaktır.

Düzgün kuantalama için kuantalama operatörü adı verilen bir grafikten yararlanır.

Şekil 1-26'da gösterilen türden kuantalamaya düzgün kuantalama adı verilir. 8 seviyeli düzgün bir kuantalayıcıya ilişkin giriş-çıkış eğrisi Şekil 1-26'da gösterilmiştir.

3,- 2,- 1,- 0,+ 0,+ 1,+ 2,+ 3 deki 8 kuantalama seviyesi sırasıyla $m_0, m_1, m_2, \dots, m_7$ olarak simgelenmektedir. Bu simgeler ikili kod kelimeler kullanılarak kodlandırılır. Bu kodlama işleminde, üretilecek kod kelime uzunluklarının en kısa uzunlukta olması arzu edilir, örneğin, verilen örnekte 8 kuantalama seviyesi için $8 = 2^3$ olduğundan, ikili kodlamada kelime uzunluğu $n = 3$ olacaktır.

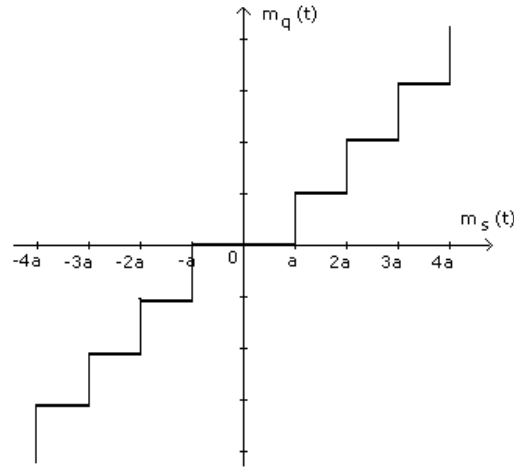


Şekil 1-26 Düzgün kuantalama eğrisi

Darbe dizisi biçiminde oluşacak PCM dalgaları doğrudan kablolar üzerinden veya analog modülasyon yöntemleri kullanılarak iletilir. Alıcı tarafta PCM işareti demodüle etmek için yapılması gereken işlem oldukça basittir. Dalganın biçimine veya genliğine bakılmaksızın sadece bir dalganın varlığının veya yokluğunun belirlenmesi yeterli olmaktadır. İkili işaret dizisi elde edildikten sonra, kod çözülerek kuantalanmış örnek değerler bulunabilir.

İşaret gürültü oranı işaret genliği küçüldükçe azalmaktadır.(Bir sonraki konuya bakınız)Eğer işaret en küçük dilimden daha küçük ise, ($A < a/2$), gürültü işareten daha büyük olur. Bu durum, özellikle kanal boş olduğu zaman çok rahatsız edicidir. Bu boş kanal gürültüsünü önlemek için, kuantalama eğrisi aşağıdaki şekildeki gibi ortası yatay olacak

şekilde yeniden ayarlanır. Bu yeni kuantalamada, $m_s(t)$ "a" adımından küçükse daima sıfır çıkışı elde edilir.

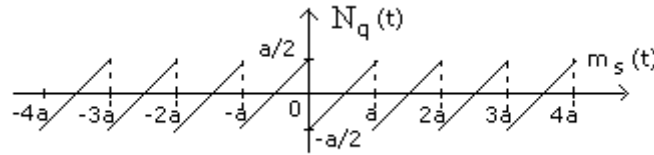


Şekil 1-27 Boş kanal gürültüsünü önleyici düzgün kuantalama eğrisi.

3.2.2. Kuantalama Hataları

Kuantalanmış örnek değerlerden, kuantalanmamış örnek değerlerin elde edilmesi mümkün değildir. Yani, tersine bir işlem olmayan kuantalama sonucunu bir bilgi kaybolmaktadır. Yapılan bu hata şu şekilde ifade edilebilir:

$$N_q(t) = m_s(t) - m_q(t)$$



Şekil 1-28 Kuantalama Hatasının Değişimi

Grafikten de görüleceği üzere kuantalama hatası bir kuantalama aralığında $-a/2$ ile $+a/2$ değerleri arasında değişmektedir. Gerçek değerden yapılan maksimum yuvarlama veya kuantalama hatası $|N_{q(max)}| = a/2$ kadar olmaktadır. $m_s(t)$ 'nin $-7a/2, -3a/2, 5a/2$ gibi değerleri için kuantalama hatası sıfırdır. Zira gerçek örnek değeri ile kuantalanmış örnek değeri arasında fark yoktur.

A_{max} geriliğine göre ayarlanmış n bitlik bir kuantalayıcı genliği A olan bir sinüzoidal işarete uygulanırsa, işaretin gürültüye oranı (S/N) şöyle hesaplanabilir:

$$\left(\frac{S}{N}\right) = \frac{A^2/2}{a^2/12} = \frac{A^2}{2} \frac{12}{a^2} = \frac{A^2}{2} \frac{12}{\left(\frac{2A_{max}}{2^n}\right)^2} = \frac{3}{2} 2^{2n} \left(\frac{A}{A_{max}}\right)^2$$

veya dB cinsinden;

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 10 \log_{10}\left(\frac{S}{N}\right)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 1.76 + 6.02 n + 20 \log_{10}\left(\frac{A}{A_{max}}\right)$$

olur.

Dikkat : Yukarıdaki formüllerdeki A daha önce bahsedilen $A_{max} - A_{min}$ değerini değil, Herhangi bir genliği ifade etmektedir. Kuantalayıcıya uygulanan örneklenmiş işaretin simetrik değişimi olduğu kabul edilmiştir. ($A_{max} = -A_{min}$)

Örnek : 1 volt genlikli bir sinüs biçimli gerilimi en az 30 dB (S/N) oranı elde edecek şekilde kuantalanmak istenmektedir. Bunun için, kaç voltluk kuantalama dilimleri ve kaç bitlik kodlayıcı kullanmamız gerekmektedir?

$A = A_{max} = 1$ volt alınarak,

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 10 \log_{10}\left(\frac{S}{N}\right)$$

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{dB} = 1.76 + 6.02 n + 20 \log_{10}\left(\frac{A}{A_{max}}\right)$$

formülü

$$1.76 + 6.02 n + 20 \log_{10}(1/1) = 30 \quad \text{olarak yazılabilir. Buradan n çözümlenerek}$$

$$n = (30 - 1.76) / 6.02 = 4.691$$

bulunur. O halde, $n > 4.691$ olacağından en yakın tam sayı olarak $n = 5$ elde edilir. Dilim sayısı Q,

$$Q = 2^n = 2^5 = 32$$

ve adım aralığı a,

$$a = \frac{2 A_{max}}{Q} = \frac{2}{32} = \frac{1}{16}$$

bulunur.

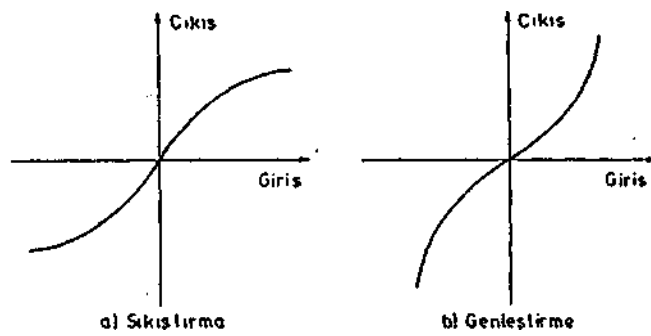
3.2.3. Düzgün Olmayan Kuantalama

Ses işaretlerinin istatistikleri incelendiğinde küçük genliklere daha sık rastlandığını görmekteyiz. Oysa, yukarıda küçük işaretlerde kuantalama gürültüsünün rahatsız edici boyutlarda olacağını göstermiş bulunmaktayız.

Bu gürültüyü azaltmak için başvurulacak ilk yöntem, adım büyüklüğünün azaltılması veya dilim sayısının artırılmasıdır. Ancak, bu durumda her bir örneği göstermek için kullanılması gereken bit sayısı artacağından bu yöntem her zaman uygun ve ekonomik

değildir. Diğer taraftan, çok seyrek olarak ortaya çıkan yüksek genlikli işaretler için gereksiz yere bir miktar dilim ayrılmış olacaktır. Eğer en büyük genliği küçük tutarsak, bu defa da kırılmalar meydana gelecektir.

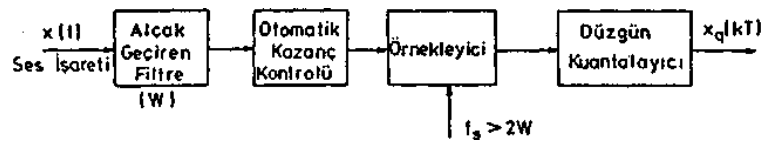
Örneğin, dinamiği 36 dB olan bir ses işaretini ele alırsak, en küçük işaretle 36 dB işaret-gürültü oranı elde etmek için $n = 12$ bitlik kelime uzunluğunda bir PCM kullanmak gerekecektir. Böyle bir kuantalayıcıda en küçük işaret için 36 dB işaret gürültü oranı sağlanırken, en büyük işaret için gereksiz yere 72 dB'lik bir işaret-gürültü oranı elde edilecektir. Bununla beraber, büyük işaretler için büyük adım, küçük işaretler için de küçük adım kullanılarak işaret gürültü oranının aynı olması sağlanabilir. Bunu gerçekleştirmek için, haberleşme sistemlerinde bir sıkıştırma (Compressing) yapılmaktadır. Aşağıdaki şekilde bu sıkıştırma ve genişleme (expanding) işlemlerinin lineer olmayan karakteristikleri görülmektedir.



Şekil 1-29 Sıkıştırma ve genişleme eğrileri.

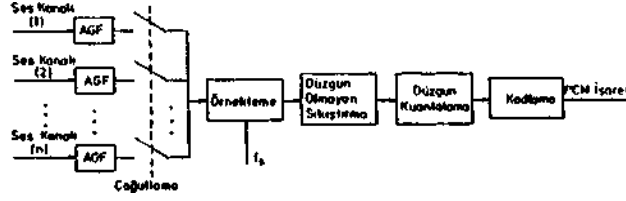
A/D çeviricide bir sıkıştırma yapılmışsa, D/A çeviricide bir genişleme yapılmalıdır.

Bazı sistemlerde sıkıştırma işlemi doğrudan analog ses işareti üzerinde yapılır. Aşağıdaki şekilde gösterilen sistemde, otomatik kazanç ayarı kontrolüyle işaret seviyesi yaklaşık olarak kodlayıcının genlik seviyesine yakın tutulmaktadır. Bunun sonucu, kuanta seviyelerinin büyük çoğunluğunun kullanılması sağlanarak, belirli bir kuantalama seviyesi sayısında sistemin en iyi biçimde çalışması gerçekleştirilir.



Şekil 1-29 Analog ses işaretinde sıkıştırma (işaret seviyesinin değiştirilmesi)

Ancak, haberleşme sisteminde birden fazla kanal varsa ve bu işaretler çoğullanıp tek bir kuantalayıcı ve kodlayıcıya uygulanıyorsa, sıkıştırma işlemi her kanal için ayrı ayrı yapılacak yerde kuantalayıcı ve kodlayıcı girişinde yapılması sistem tasarımı açısından daha verimlidir. Bu tür sisteme ait blok diyagram aşağıda verilmiştir.



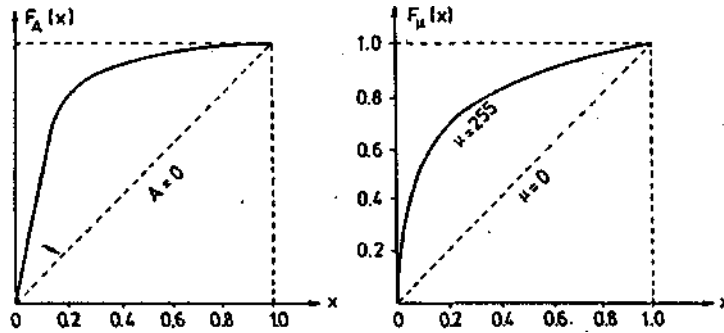
Şekil 1-30 Çok kanallı sistemde işaret seviyesi değişimi.

Yukarıda belirtilen türden lineer olmayan sıkıştırma ve genişletme devrelerinde genellikle logaritmik gerilim-akım karakteristiği olan diyotlar veya birkaç diyot ile birbirinden ayrılmış değişik ağırlıklı zayıflatıcıların örneklenmiş işaretin genliğine bağlı olarak devreye girip çıkmasından yararlanır. Ancak, diyot karakteristikleri ile elde edilen bu sıkıştırma ve açma eğrileri birbirine tam olarak uymadıklarından çok doğru kuantalayıcı ve kodlayıcılarda kullanışlı olmazlar.

CCITT tarafından sayısal ses iletimi için önerilen başlıca iki tür sıkıştırma eğrisi vardır. Bu eğrilerin biçimi sesin istatistiksel özelliklerine bakılarak en uygun bir biçimde belirlenmiştir. Eğriler sıfırdan geçmekte ve sıfır civarındaki eğimi uçlardaki eğimden fazladır. Bu iki eğimin oranı sıkıştırma oranı olarak adlandırılır. Bu oran arttıkça işaretin dinamiği artmaktadır.

Standartlaştırılmış iki tip sıkıştırma eğrisi şunlardır:

- (1) Amerika ve Japonya'da kullanılan μ tipi eğri
- (2) Avrupa'da kullanılan A tipi eğri



Şekil 1- 31 A tipi ve μ tipi eğriler

μ tipi sıkıştırma eğrisi denklemi,

$$F_{\mu}(x) = \text{Sgn}(x) \frac{\ln(1 + \mu |x|)}{\ln(1 + \mu)}$$

Bu ifadeye, sıkıştırma oranı olarak $\mu = 255$ alınır. 7 bit kelime uzunluğundaki kuantalamada kuantalama gürültü seviyesi -77 dB olur. Oysa, düzensiz kuantalamada aynı kelime uzunluğu için kuantalama gürültü seviyesi -53 dB olmaktadır. Yani, 24 dB'lik bir

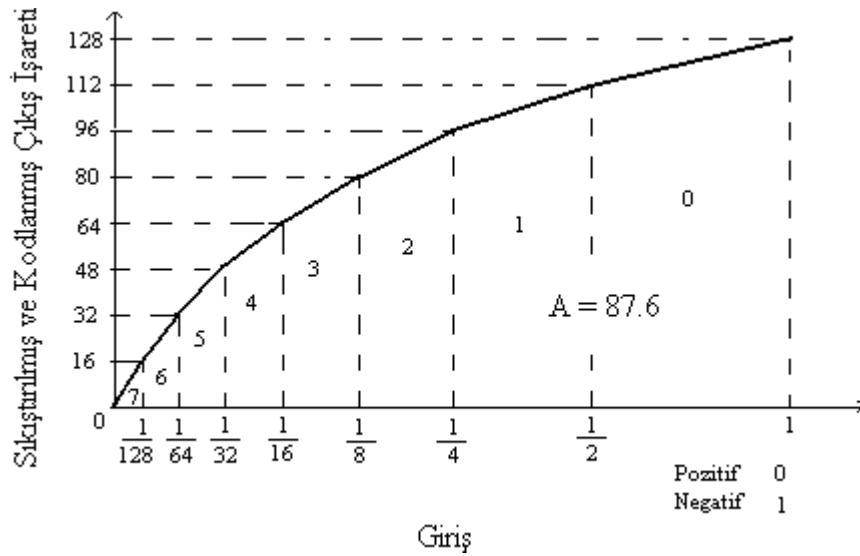
iyileştirme söz konusudur.

A tipi sıkıştırma. eğrisi denklemi ;

$$F_A(x) = \begin{cases} \text{Sgn}(x) \left(\frac{A|x|}{1+\ln A} \right) & ; 0 \leq x \leq 1/A \\ \text{Sgn}(x) \left(\frac{1+\ln A |x|}{1+\ln A} \right) & ; 1/A \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Sesin doğallığını koruyabilmesi için, küçük genliklerde eğrinin doğrusal olması ve büyük genliklerde ise, logaritmik olması gerekmektedir. A tipi eğri tanım gereği bu koşulu sağlamaktadır, μ tipi eğride eğer giriş $1 / \mu$ 'den küçükse, yaklaşık olarak doğrusal kabul edilir.

Yukarıda belirtilen fonksiyonlara göre işareti sıkıştırılmış olarak kuantalamak ve kodlamak son derece zordur. Çünkü, çok sayıda dilim alınması gerekir. Bu nedenle, sürekli eğrileri doğrudan ele almak yerine bunlar parça parça doğrusal duruma getirilir. Her bölümün eşit aralıklı olarak dilimlenmesi, sonucu kodlama işlemi kolaylıkla yapılabilir. Bu işleme parçalı sıkıştırma-genleştirme (segmented companding) adı verilir.



Şekil 1-32 A tipi parçalı sıkıştırma eğrisinin gösterilimi.

A eğrisi negatif ve pozitif yönlü işaretler için simetriktir. Şekilde gösterildiği gibi, giriş işareti önce sekiz parçaya ayrılmıştır. Giriş işaretinin maksimum genliği 1 alınrsa, bu parçalar Tablo 1-2 'deki gibi belirlenir.

Tablo 1-2

Parça No	İşaret Genliği	Dilim Aralığı	Dilim Sayısı
0	$1 - 1/2$	$64a$	16
1	$1/2 - 1/4$	$32a$	16

2	1/4 – 1/8	16a	16
3	1/8 – 1/16	8a	16
4	1/16 – 1/32	4a	16
5	1/32 – 1/64	2a	16
6	1/64 – 1/128	a	16
7	1/128 – 0	a	16

Bu tablodaki sekiz parçadan her biri de eşit aralıklı 16 dilime ayrılmaktadır. Ancak, en alt parçada (7. parça) dilim aralığı a iken, bir üst parçada yine a, 5. parçada 2a, 4. parçada 4a ve giderek en üst parçada (0. parça) 64a olmaktadır. O halde, (0,1) aralığındaki giriş gerilimi 4096 eşit aralığı ayrılmıştır. Buna göre, 6. ve 7. parçalardaki her dilim 2 aralıktan oluşmaktadır. 5. ve 4. parçalardaki her dilim ise, sırasıyla 4 ve 8 aralıktan meydana gelmektedir. Burada amaç, giriş genliğinin herhangi bir değeri için belirli sınırlar içinde kalan bir kuantalama hatası elde etmektir.

A yasasına göre yapılan kuantalamada giriş genliği 4096 dilime bölünmüştür. Giriş işaretinin içine düştüğü bölgeye göre kuantalama yapılmaktadır. Kuantalamada bir örnek işaretin değerini belirlemek için 3 tür bilgiye gerek vardır.

- Örnek işaretin pozitif veya negatif oluşunu belirlemek için bir işaret bitine ihtiyaç vardır. İşaret pozitif ise "0" ve negatif ise "1" kullanılabilir.
- Örneklenmiş işaretin parça numarasını belirlemek için 3 bite ihtiyaç vardır. Böylece, (0,1,2,3,...,6,7) parçaları (000, 001, 011..., 111) ikili işaretle gösterilebilir.
- Parça içinde işaretin kaçınıcı dilime karşı düştüğünün belirlenmesi için de 4 bit kullanılır. Böylece, (0,1,2,...,15) genlik seviyeleri (0000, 00011111) kodlarıyla gösterilebilir.

Örnek : 00100011 koduyla gösterilen 7 bitlik bu işaretin, pozitif, 2. parçada ve 3. dilimde olduğu anlaşılmaktadır. İşaretin genlik aralığı

$$0.125 + 3(0.125/16) = 0,1484375 \text{ ve}$$

$0.125 + 4(0.125/16) = 0,15625$ olarak bulunur. Bu iki değer arasındaki tüm genlikler 00100011 koduyla kodlanır.

3.3. Kodlama İşlemi

Örneklenmiş analog işareti kuantaladıktan sonra sayısal (digital) işarete dönüştürmek için kodlanması gerekmektedir. Genellikle bir analog işareti sayısal işarete dönüştürmek için analog / sayısal dönüştürücüler (ADC) kullanılır. Bu dönüştürme işlemi sonucunda kodlanmış işaret elde edilmektedir.

Ancak ilerde görüleceği gibi bu kodlama düzgün (uniform) bir kuantalama sonucu elde edilen genliklerin kodlanması olup düzgün olmayan kuantalama sonucu bulunan örneklerin kodlanması için ikinci bir kodlama işlemine ihtiyaç olacaktır.

Uygulamada kullanılan ADC tiplerini üç gruba ayırmak mümkündür.

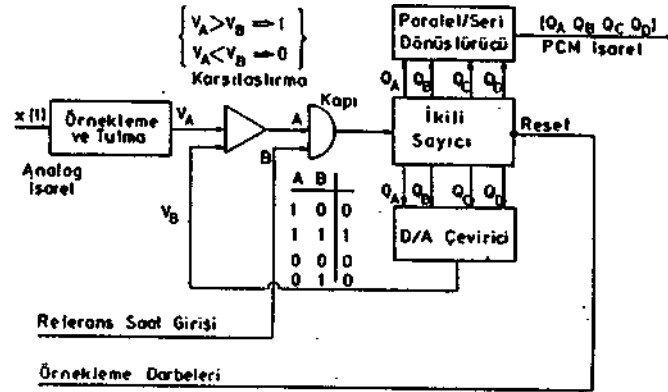
1. Basamaklı dönüştürücü,
2. Ardışıl yaklaşımlı dönüştürücü,
3. Paralel dönüştürücü.

Değişik tekniklerde çalışan bu A/D dönüştürücüleri, tüm devreler biçiminde piyasada bulmak mümkündür. Bu tip entegre devrelerde genellikle, örnekleme, kuantalama ve kodlama birlikte gerçekleştirilir.

3.3.1. Basamaklı Dönüştürücü

Bu dönüştürücü tipinde, giriş işareti, V_A , örnekleme süresi (T_s) içinde D/A dönüştürücü çıkışında V_B gerilimiyle karşılaştırılır. Eğer $V_A > V_B$ ise, karşılaştırıcı çıkışı yüksek seviyede (mantık 1) ve kapı açıktır. Bu durumda, gelen saat darbeleri sayıcıya ulaşır ve sayma devam eder. D/A çıkışındaki gerilim her basamak geldiğinde bir basamak yükselir. Bir süre sonra V_B gerilimi V_A giriş işaret gerilimini geçecektir. Tam bu anda karşılaştırıcı çıkışı sıfıra düşer ve kapı kapanır. Artık sayma işlemi durmuştur. Bu andaki Q çıkışları giriş gerilimine karşı düşen kodu verecektir.

Örnekleme süresi dolduğunda, sayıcı sıfırlanır ve ikinci örnek için de aynı işlemler tekrarlanır. 4 bitlik bir A/D dönüştürücü Şekil 1-33'de gösterilmiştir. Bu dönüştürücü sadece pozitif gerilimler için kullanılabilir. Her iki yöndeki gerilimleri de dönüştürmek istenirse, Şekil 1-34 deki bir +/- sezici ve doğrultucu kullanmak gerekir.

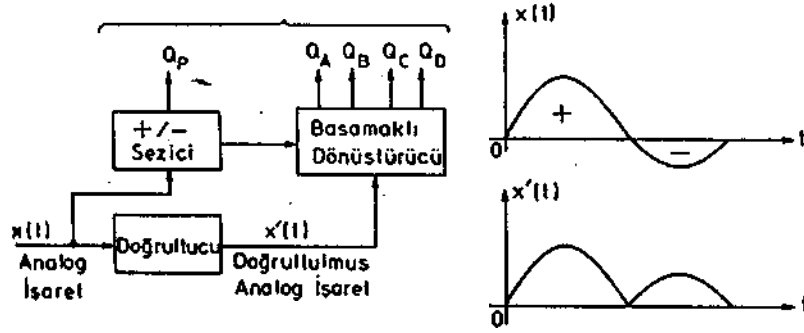


Şekil 1-33 Bitlik basamaklı A/D dönüştürücü.

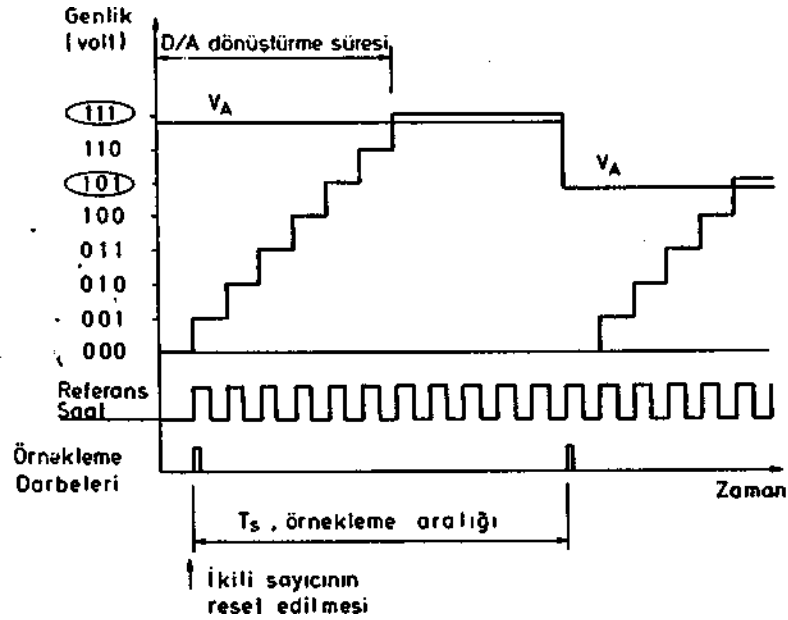
Bu tip dönüştürücülerde bir örnek için dönüştürme süresi n-bitlik kodlayıcı için şöyle hesaplanır.

$$t \text{ (kodlama)} = \frac{2^n}{f_{\text{saat}}}$$

Bu dönüştürücü oldukça yavaş çalışır. Çalışma ilkesi Şekil 1-35'de gösterilmiştir.

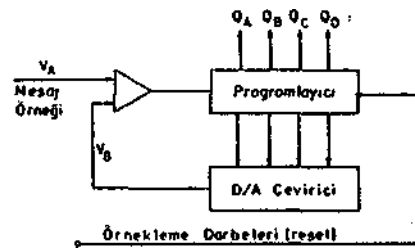


Şekil 1-34 Analog işaretin doğrultularak kodlanması.



Şekil 1-35 Basamaklı dönüştürücünün çalışması.

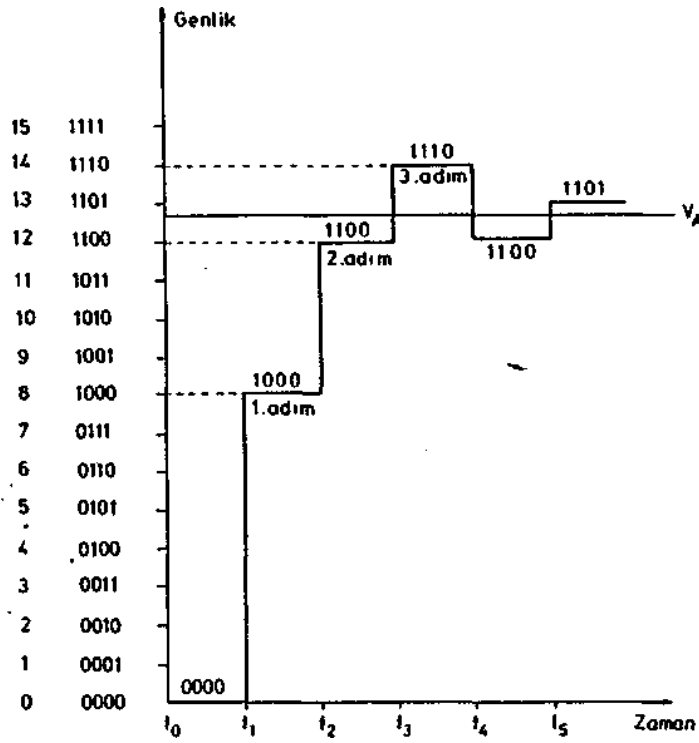
3.3.2. Ardışıl Yaklaşımlı Dönüştürücü



Şekil 1-36 Ardışıl yaklaşımli dönüştürücü

Şekil 1-36'da gösterilen bu dönüştürücüde basamaklı dönüştürüciye benzer çalışmaktadır. Ancak kodlama süresi çok daha kısadır. Şekil 1-37'de gösterilen kodlama süresi $2^n / f_{\text{saat}}$ yerine n / f_{saat} olarak gerçekleşir. Burada sayıcı yerine bir programlayıcı kullanılmaktadır. Programlayıcı, karşılaştırıcı devresi çıkışına bakarak çıkış kodunu artırır

veya azaltır.



Şekil 1-37 Ardışıl Yaklaşımlı dönüştürücünün çalışma prensibi.

Bu yöntem düzgün olmayan kuantalamaya uygulanabilir. Bu amaçla değiştirme adımları logaritmik seçilerek V_A 'nın hangi parçada olduğu belirlenir. Parça belirlendikten sonra, ait olduğu dilimi bulmak için analog ağırlık verme devreleri kullanılır.

Şekil 1-37'de görüldüğü gibi, başlangıçta programlayıcı çıkışını 0000 ve giriş geriliminin 1101 koduna karşı düşen 13. diliminde olduğunu varsayalım. $V_A > V_B$ olduğundan karşılaştırıcı çıkışı 1'dir. O halde, 1. bit $Q_A = 1$ olur. İkinci denemede V_B 8. dilime yükseltilir. $V_A > V_B$ olmaya devam ettiğinden çıkış yine 1 olur. Yani ikinci bit $Q_B = 1$ yapılır. Üçüncü denemede ise, üçüncü bit de 1 olacak şekilde V_B 15. dilime (1110 seviyesine) yükseltilir. Ancak $V_B > V_A$ olduğundan karşılaştırıcı çıkışı 0 olmaktadır. Bu durumda son değiştirilen basamak eski değerine getirilir ($Q_C = 0$) ve bir sonraki basamak $Q_D = 1$ yapılır. Böylece dört adımda sonuç (1101) bulunmuş olur.

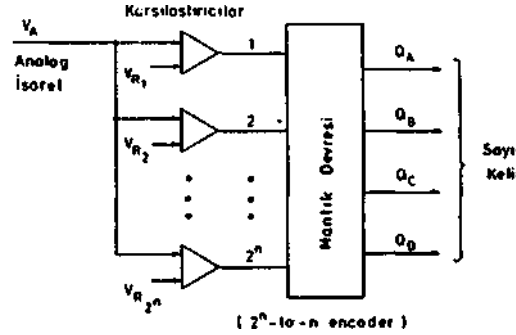
3.3.3. Paralel Dönüştürücüler

Bu dönüştürücüler oldukça karmaşık ve pahalı olmalarına karşılık çok hızlı çalışabilirler. Bütün dönüştürme işlemi tek adımda yapıldığından bunlara flaş dönüştürücüler adı verilir.

Şekil 1-38'de görülen paralel dönüştürücünün çalışma prensibi çok basittir. Her kuantal dilimi için ayrı bir karşılaştırıcı kullanılarak giriş geriliminin hangi dilimde olduğu kestirilir. Geriye kalan işlem, bu 2^n adet çıkışı bir mantık devresiyle (2^n to n encoder) n basamaklı bir koda çevirmektir. Bu çevirme, hızlı kapı devreleriyle kolaylıkla yapılabilir.

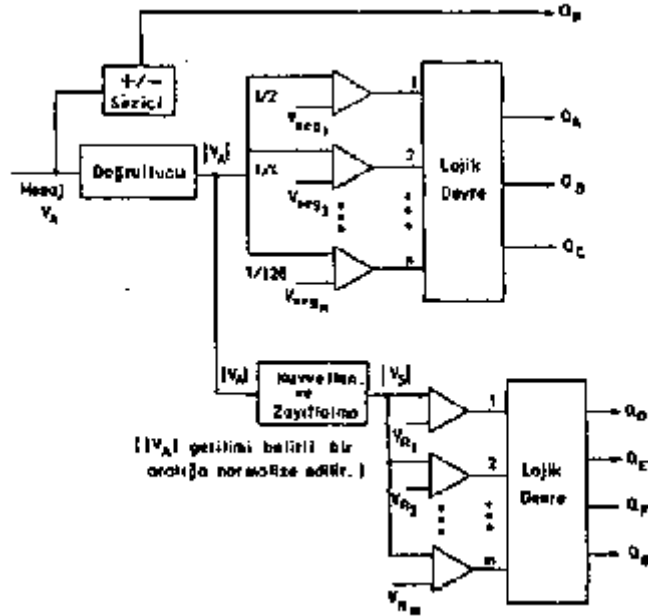
Şekil 1-38'deki her karşılaştırıcının ucuna ilgili basamak gerilimi uygulanmaktadır. Eğer doğrusal kuantalama yapılacaksa, bu gerilimler tek bir referanstan eşit direnç bölücülere

kullanarak elde edilebilir. Bu direnç oranları değiştirilerek istenilen sıkıştırma eğrisini elde etmek mümkündür.



Şekil 1-38 Paralel dönüştürücü

A tipi veya n tipi parçalı sıkıştırma işlemi, Şekil 1-39'da gösterildiği gibi, iki paralel dönüştürücü ve bir ağırlaştırma devresiyle gerçekleştirilir.



Şekil 1-39 Parçalı sıkıştırırmalı paralel dönüştürücü

Q_P işaret bitini; Q_A, Q_B, Q_C parça numarasını; Q_D, Q_E, Q_F, Q_G işaretinin ait olduğu dilimi göstermektedir.

3.4. PCM Sistemleri

Günümüzde sayısal iletişimin prensibi olan TDM tekniği kullanılarak tasarlanan PCM sistemleri gerek ekonomik ve gerekse kalite yüksekliği açısından getirdiği üstünlüklerden dolayı günümüzde FDM sistemleri tercih edilmektedir.

PCM sistemlerinde bugün Avrupa'da kullanılan 30 kanal bir arada temel birim olarak kabul edilir. Buna birinci mertebeden PCM adı da verilir. Bu temel birimden hareketle daha yüksek mertebeden olan (2'nci, 3'ncü, 4'ncü mertebeden) PCM sistemleri elde edilir. Mesela dört adet 30 kanal bir arada 2'nci mertebeden 120 kanallı yine dört adet 120 kanal bir arada

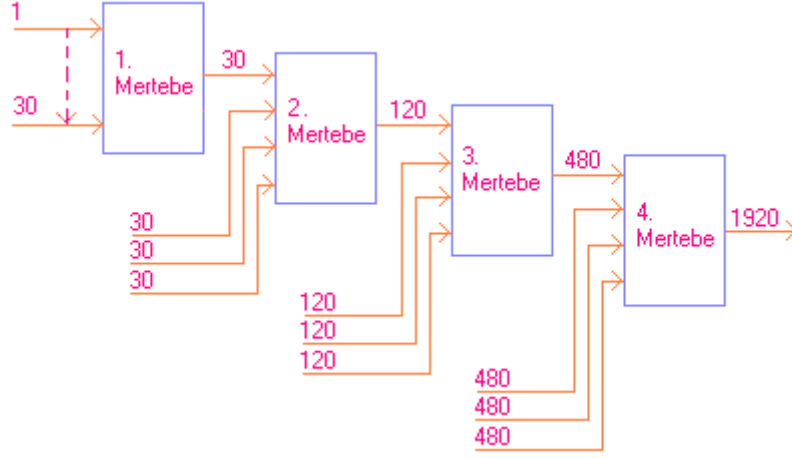
3'ncü mertebeden 480 kanallı ve benzer şekilde dört adet 480 kanal bir arada 4'ncü mertebeden 1920 kanal kapasitede PCM elde edilir.

PCM hiyerarşik tablosu aşağıda verilmiştir. Birinci mertebeden PCM formatının bit hızı 2048 kbit/saniyedir. İkinci mertebeden PCM formatının bit hızının $4 * 2048$ kbit/sn. olması gerekirken bunun 8448 kb/sn olduğuna dikkat ediniz. PCM formatı yükselince gerekenden fazla bit kullanılmaktadır. Mesala ikinci mertebede fazladan kullanılan 256 kb/sn hız çoklu çerçeve (frame multipliyng), doğrultma (Justification), bit doldurma (bit stuffing) gibi bilgilere ayrılmıştır. Diğer mertebeden PCM sistemlerinde de benzer durum vardır. Şemada ayrıca kapasitesine uygun olarak iletim ortamları ve CCITT tavsiyesine uygun olarak kullanması istenilen hat kodlamaları da verilmiştir. Hat kodlamaları ayrı olarak incelenecektir.

Örnelemeye tabi tutulan analog işaret hala PAM formatındadır. Eğer PAM işareti gerekli kodlama ve kuantalama işlemine tabi tutulursa PCM formatı elde edilir. PCM denmesi buradan ileri gelmektedir.

3.5. Sayısal İletişim Hiyerarşisi

Hat Kodu	HDB3	HDB3	HDB3	CMI
Bit Hızı(Mb/Sn)	2048 / 2	8448 / 8	34368 / 34	139264 / 140



Kanal Sayısı	30	120 (4x30)	480 (4x120)	1920 (4x480)
İletişim Yolu	İkili PCM Kablosu	PCM Kablosu Koaksiyel Kablo 12 Ghz R/L Dalga Kılavuzu Fiber Optik	PCM Kablosu Koaksiyel Kablo R/L Dalga Kılavuzu Fiber Optik	Koaksiyel Kablo R/L Dalga Kılavuzu Fiber Optik

Burada verilen ikili PCM kablosu olarak çiftli bir jonksiyon kablosunu alabiliriz. Bu şu anlama gelir. İkili bir jonksiyon kablo üzerinden 30 telefon ses kanalını iletme imkanı vardır. Santraller arasındaki jonksiyon tıkanıklığına önemli ölçüde çare bulunmuştur. Bu ise gerek ekonomik ve gerek kalite açısından önemli olmaktadır. Bu PCM sistemlerin en büyük avantajlarından biridir.

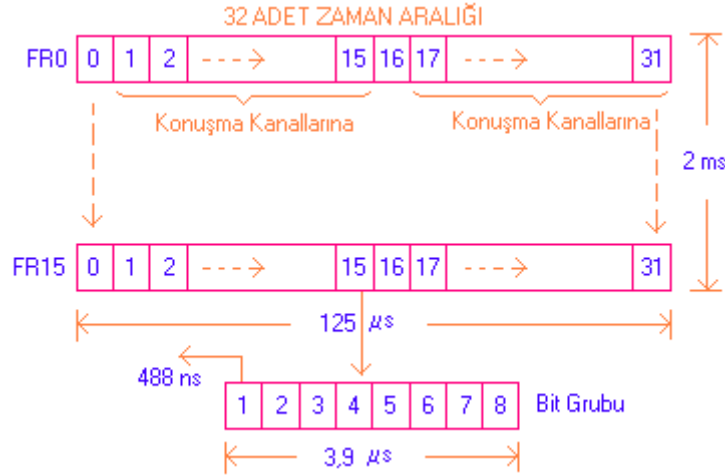
CCITT'nın G782 tavsiyesine uygun olarak birinci merteye 30 PCM kanalı, A tipi kodlama ve kuantalama eğrisine göre 8000 Hz ile örnekleme tabii tutulur. Yani 125 ms de bir her kanaldan örnekleme darbeleri alınır. Bu süreye çerçeve süresi (frame time) adı verilir. Çerçeve süresince tahsis edilen 30 zaman aralığı (time slot) yada kanal adresi kanal bilgilerin nakline, geriye kalan iki zaman aralığı da işaretleşme ve eş zamanlama bilgilerin nakline ayrılmıştır. Şu halde 32 zaman dilimi mevcut olup, her dilimin süresi de 3.9 msn (125/32) olacaktır.

Bir çerçeve süresi 32 zaman dilimine ve her zaman dilimi de 8 bit ihtiva ettiğine göre toplam bit sayısı

$$N = 8000 \cdot 32 \cdot 8 = 2048 \text{ Mb/sn olacaktır.}$$

Birinci merteye 30 kanallı PCM formatının çoklu çerçeve (frame multipling) yapısı şöyledir. Saniyede 8000 çerçeve taraması yapıldığına göre her 2 msn de bir 0 ile 15 arasında numaralandırılmış 16 çerçeveden oluşur. Her çerçeve süresi 3.9 mikro-sn olan (125/32) 32

zaman dilimine sahiptir. Her zaman dilimi de 8 bit (3.9/8-488 nsn) içerir. Zaman dilimleri 0 ila 31 arasında numaralandırılır.



Her çerçevenin 1 den 15 ve 17 den 31'e kadar olan zaman aralıkları konuşma kanallarına tahsis edilmiştir. Çift rakamlı çerçevelerde (FR0, FR2, FR4.....FR14) bulunan 0.cı zaman diliminde çerçeve sıralama işaretine ve yine tek rakamlı 0.cı zaman dilimi denetleme işaretine tahsis edilmiştir.

Buna ilaveten FRO çerçevenin 16.ncı zaman aralığı çoklu çerçeve sıralama işaretine tahsis edilmiştir. Diğer çerçevelerde (FR1, FR2, FR3.....FR15) 16.ncı zaman aralığı (time slot) ise kanallara ait çağırma bilgilerine ayrılmıştır. CCITT tavsiyesine göre zaman aralıklarına tahsis edilen bit dağılımı da belirlenmiştir. Mesela FRO çerçevede 16.ncı zaman aralığındaki toplam 8 bit dağılımı şöyledir. İlk 4 bit karşılıklı olarak çalışan iki PCM sistemin çoklu çerçeve sıralama (multi frame alignment signal) işaretini eş zamanlama bitlerini taşımaktadır. Bu bitler (0000) kodunu ihtiva ederler. Beşinci ve sekizinci bit normal halde (1) isteğe göre (0) yapılabilir. Yine 7.nci bit ise normal halde (0) ve isteğe göre (1) dir.

Buna ilaveten karşı terminalden gelen sayısal PCM formatında eş zamanlama kodunun (0000) doğru olarak alınıp alınmadığını yine karşı terminale bildiren eş zamanlama uyarı bilgisini taşıyan 6.ncı bit, eş zamanlama kodu doğru olarak alınıyorsa (0000) bu bit (0) , aksi halde (1) değerini alarak alarm verecektir. Buna çoklu çerçeve sıralama alarmı da denir.

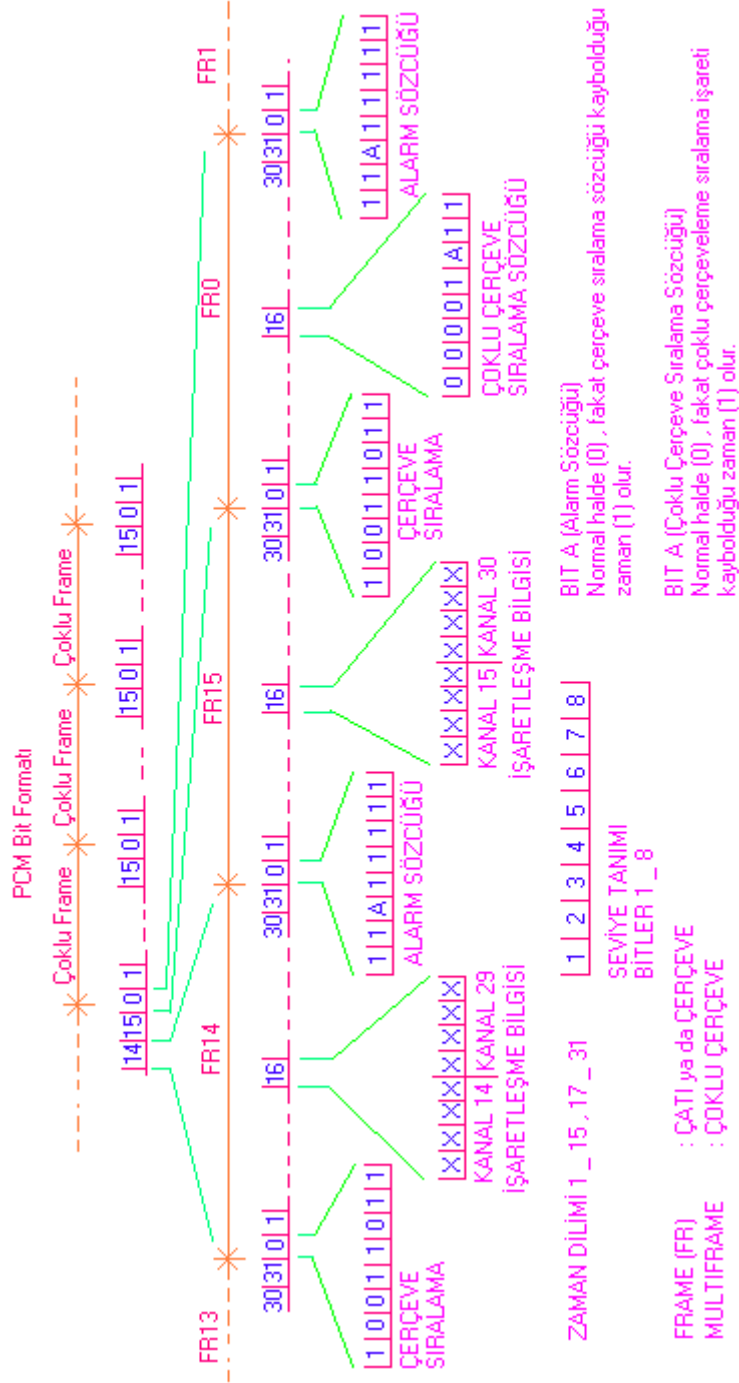
Eş Zamanlama Kodu

1	2	3	4	5	6	7	8
0	0	0	0	1	A	1	1

bit noları

30 kanallı PCM formatında CCITT tavsiyesine göre zaman aralıklarına tahsis edilen bir dağılımın durumu yukarıdaki tabloda belirlenmiştir. Burada anlaşılacağı gibi tek çerçevelerde (FR1, FR3,.....FR15) 0.ncı zaman aralığı (11A11111) denetleme bitlerine ayrılmıştır. A sözcüğü karşılıklı çalışan 2 PCM sisteminde karşı terminalden gelen çerçeve sıralama işaretini doğru olarak alınıp alınmadığını karşı terminale iletir. Normal halde bu bit (0) dir. Aksi halde (1) olur. Bu uyarı sistemine uzak alarında denilmektedir.

Yine çift rakamlı çerçevelerin (FR0, FR2, FR4,.....FR14) 0.ncı zaman aralığında çerçeve sıralama işareti (frame alignment word) gönderilir. Bunun bit durumu (100110011) olarak verilmiştir. Birinci bit normal halde (1), isteğe göre (0) yapılabilir.



3.6. İşaretleşme

Ülkemiz telekomünikasyon şebekesinde kullanılan R2 işaretleşme sistemine göre adres bilgileri (rakamlar) bant içinde 2 değişik frekansın karışımıyla, hat bilgileri de (aboneyi bağlamak, kötü aramaları kilitlemek v.b) analog sistemlerde bant dışı 3825 Hz ve sayısal PCM formatında ise belli ayrı bir kanaldan gönderilen ve alınan a, b, c, d bitleriyle (M ve E işaretleşmesi) olmaktadır.

Sayısal iletişimde 2 türlü işaretleşme vardır.

1. Ortak kanallı seri işaretleşme
2. Ortak kanallı hat işaretleşmesi

İlk yöntemde gönderilen ve gönderilecek adres bilgileri (rakam impulsları), hat bilgileri ve uyarı (zil çalıyor, meşgul, hat dolu v.b) bilgileri ihtiva eden belli bir data formatı geçici olarak kaydediliyor. Daha sonra 16.ncı zaman aralığında yada başka bir boş zaman aralığında bir kanalın bit hızı 64 kb/sn hızında data olarak gönderilir. İşaretleşme kapasiteleri artığı zaman işaretleşme bilgileri için ayrı bir PCM hattı kullanmak daha faydalıdır.

İkinci yöntemde hat bilgileri olan çevirme ve uyarı işaretleri 2 ses frekanslı bileşenleri halinde, ilgili kanalın kendi zaman aralığında gönderilir.

Ve yine hat bilgileri olan gidiş (M) ve dönüş (E) işaretleri ise FRO hariç diğer çerçevelerin 16.cı zaman aralığında iletilmektedir. Bu zaman aralığında ilk dört bit (a, b, c, d) diğer bir kanala hizmet ederler.

Buna göre FRO çerçevesi hariç diğer çerçevelerde 16.ncı zaman aralığı iki kanala ait (aynı çerçevede bir tek ve bir çift rakamlı kanal) işaretleşme bilgi iletimine tahsis edilmiştir.

FR1 çerçevede 1 ve 16

FR2 çerçevede 2 ve 17

.

.

.

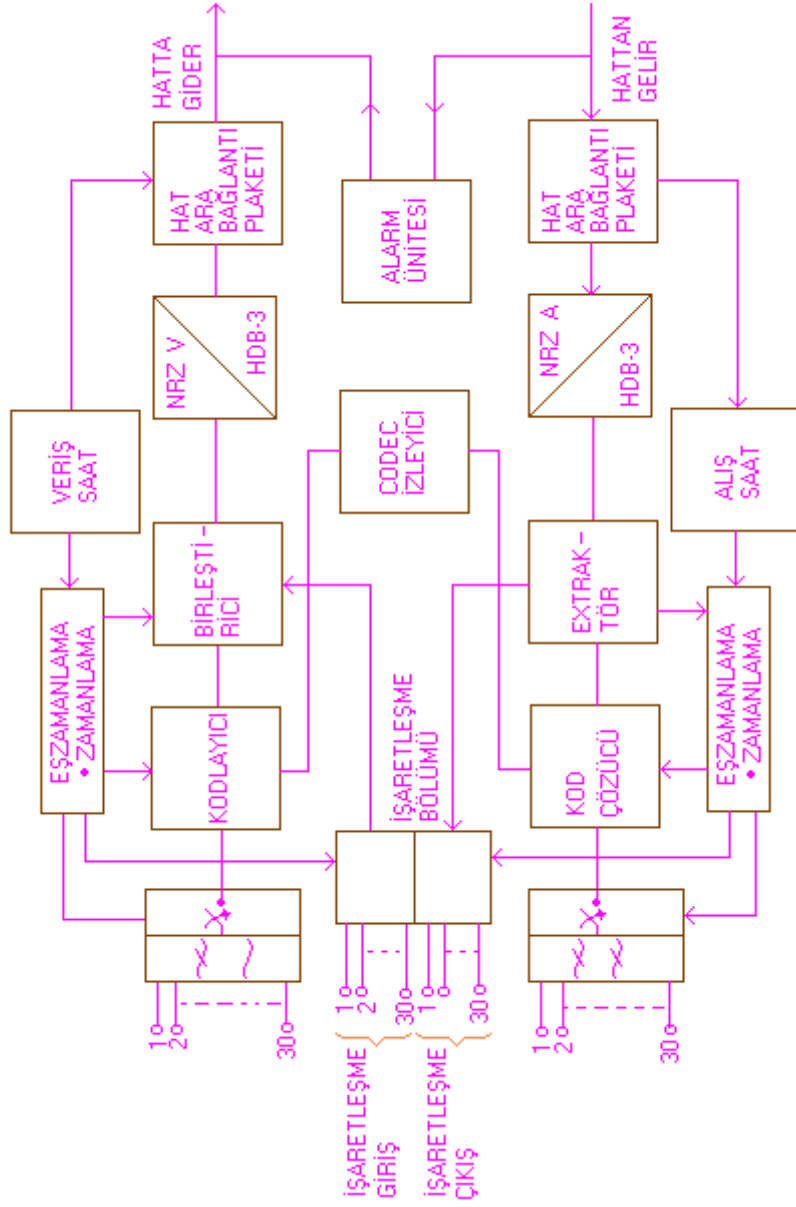
FR15 çerçevede 15 ve 30 .ncu kanal işaretlerine ayrılmıştır.

Her kanala ait işaretleşme bilgisinin data formatı 2000 bit/saniyedir. Her kanala ait işaretleşme bitlerine a, b, c ve d dersek, bunlar her çerçevede bir her kanal başına tekrarlanacağından 500 bit/sn olacaktır. Eğer b, c ve d bitleri kullanılmazsa bunlar b = 1, c = 0 ve d = 1 yapılır. Pratik sistemlerde bir zaman aralığı tamamen ortaklaşa olarak işaretleşmeye tahsis edilir. 30 kanallı PCM formatında bir kanalın taşıdığı bilgiye ait data 64 kbit/sn olduğunu göz önüne alırsa 30 PCM kanalına ait işaretleşme bilgileri tek bir zaman aralığında (16.ncı zaman aralığı) göndermek mümkündür.

$$2000 \text{ bit/sn} * 30 = 60 \text{ kbit/sn}$$

Bu tür işaretleşmeye ortak kanallı seri işaretleşme adı verilir.

PCM SİSTEMLERİ BLOK DİYAGRAMI



4. Hat Kodlaması

Hat kodlamasının amacı PCM dalga biçimini iletim hattına uygulamadan önce tek kutuplu sıfır dönüşsüz ikili (binary) darbe dizisi (NRZ), çift kutuplu darbe dizisine dönüştürülür. Sayısal PCM doğrudan ikili darbe katarı olarak gönderilebilir. Ancak bunun bazı mahsurları vardır.

1) Özellikle uzun (1) ve (0)'lardan oluşan bir PCM darbe dizisi geldiğinde, yeterince zamanlama bilgisine sahip olamayacağı için kaymaya (jitter) çok duyarlıdır.

2) Bir DC bileşen vardır. Bu bileşen kondansatör ve transformatör bağlantılı hatlarda, tek yan bant modülasyonlu sistemlerde ve hat boyunca yerleştirilen tekrarlayıcıların (repeater) bulunduğu hatlarda kolayca iletilemez.

3) PCM formatlı kodlamada hat hataları çalışma esnasında devamlı olarak izlenemez. Bu nedenle hat kodlaması ile haber taşımayan artık bitler eklenerek (bit stuffing) bu kusurlar giderilmeye çalışılır.

- Hat kodlamasından sonra kodlanmış işareti hattan en az bozulmaya uğrayabilecek şekilde iletilemek için;
 - a) Kodlanmış işaretle DA bileşeni bulunmamalıdır.
 - b) Spektrumda AF bileşenler mümkün olduğu kadar yeterince zayıflatılmış olmalıdır.
 - c) Kodlama sonunda mümkün olduğu kadar sık tepe genliğine ulaşan darbeler elde edilmelidir. Bu işaret düzeyini ölçmeye ve tekrarlayıcılardaki (regenerater) OKA devrelerinin iyi çalışmasını sağlayacaktır.
 - d) Simge hızı olabildiğince küçük olmalıdır.
 - e) Kodlama verimi çok iyi olmalıdır.
- Alıcıda kodlamanın kolay ve en az hatayla çözümlenebilmesi için;
 - a) Hattan gelebilecek hatalı işaretler sistem çalışırken devamlı olarak gözlemlenmelidir.
 - b) Kod açma sırasında hatalar çoğalmamalıdır.
 - c) Kodlama yeterince zamanlama bilgisini (eş zamanlama) taşımalıdır. Yeterince sık olarak konum değişikliği ve sıfır geçişi olmalıdır.
 - d) Kodlama kaynaktan gelen işareten bağımsız olmalıdır.
 - e) İlk işareti elde etmek için kod tek bir biçimde çözümlenmelidir.
 - f) Kodlama ve kod açma rahatça uygulanabilecek kadar basit olmalıdır.

Hat kodlama türlerine geçmeden kodlamaya ışık tutacak bazı prensipler üzerinde durmakta fayda vardır.

1. Artıklık (Redundancy)

Hat kodlamasında istenen özellikleri sağlamak için kaynakta kodlanmış PCM formatına bir miktar artıklık eklenir.

Bunun için 2 yol vardır.

- a) Darbe sıklığını artırmak
- b) Genlik düzeylerinin sıklığını artırmak

Artıklık genel olarak kodlanmış işaretin bilgi taşıma kapasitesi ile gelen işaretin taşıma kapasitesi arasındaki farkın bağıl değeri olarak ifade edilir.

$$r = (C_c - C_m) / C_m \cdot 100 (\%)$$

Eğer sadece bit hızı artırılarak artıklık sağlanmışsa ve simgeler eşit aralık ise

$$r = (S_c - S_m) / S_m \cdot 100 (\%)$$

buradan

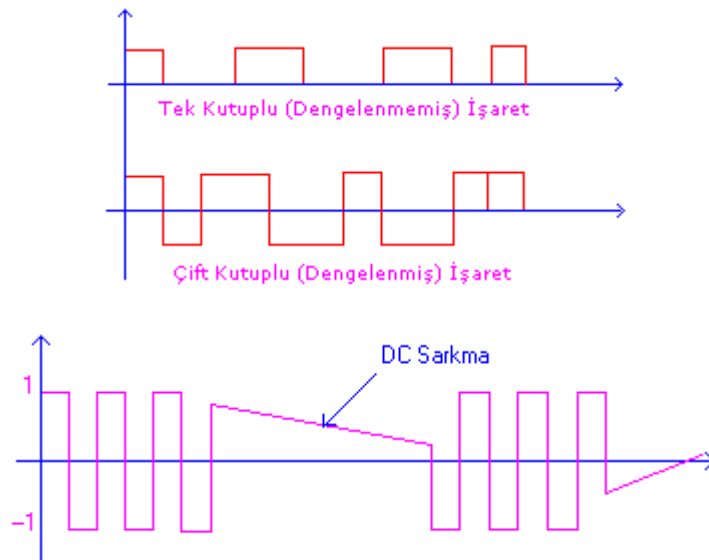
$$r = S_m / S_c \quad \text{elde edilir.}$$

Eğer artıklık düzey sayısı artırılarak elde edilmiş ikili kaynak kodlamasında (1) ve (0)'lar eşit aralıklı geliyor ve hat kodlaması L düzeyinde ise artıklık

$$r = (S_c \cdot \log_2 L - S_m) / S_m \cdot 100 (\%) \text{ olarak ifade edilir.}$$

2. DA sarkması (DC wander)

Başlangıçta ifade edildiği gibi PCM binary darbe dizisi (NRZ) ortalama değeri sıfırdan farklı ise DA bileşenini geçirmeyen bir sisteme uygulandığında bir bozulma söz konusudur. Özellikle uzun (1) ve (0) katarları geldiğinde önemli boyutlara ulaşan bu bozulmaya DA sarkması denir. Bu sarkma arkadan gelen darbe katarlarını da kaydırarak bunların yanlış olarak algılanma olasılığını artıracaktır.



Burada ortalama değer kayması Akan Sayısal Toplam (Running Digital Sum =RDS) olarak adlandırılır ve k'nıncı zaman aralığında RDS değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$RDS(k) = RDS(0) + \sum_{n=1}^k C_n \quad (C_n = 1, -1)$$

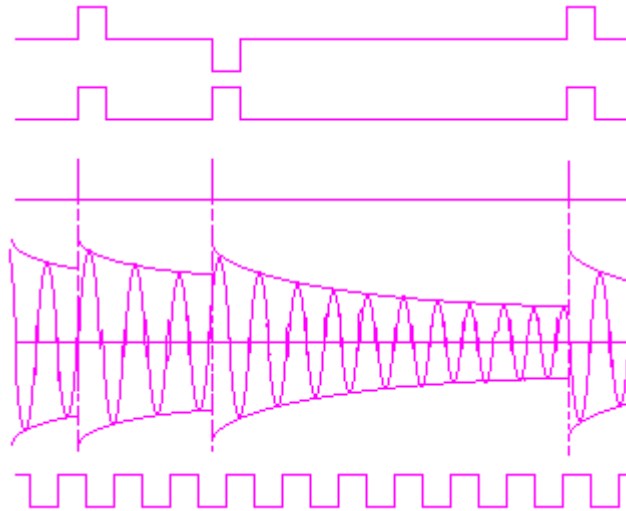
Bu toplamı en büyük ve en küçük değerleri arasındaki farka da Sayısal Toplam Değişim (Digital Sub Variation = DSV) denir.

$$DSV = RDS_{max} - RDS_{min}$$

Bu bozulma art arda gönderilebilecek (1) ve (0) sayısını sınırlar.

3. Eş zamanlama bileşeni

Alıcıda kodun çözülmesi için zamanlama bilgisi yeterince taşınması gerekir. Uzun (0)'lardan oluşmuş PCM formatında zamanlama bilgisini tam olarak almak ve kara verme anlarının en uygun şekilde belirlenmesi, başlangıç ve sonlarının kestirilmesi yetersiz kalacağından hat kodlamasıyla bu istenenleri pekala yapmak olasıdır. Bunu yapmak için gerekli zamanlama bilgisi de normal olarak gelen darbe dizisinde bir konumdan diğerine geçiş anlarında elde edilir. Dolayısıyla geçişlerin olmadığı en uzun süre zamanlama bakımından bir ölçü olarak alınabilir.



Gelen darbe dizisinden zamanlama bilgisini en kolay şekilde alma yolu yukarıdaki gibidir. Burada Q değeri yüksek ve gelen zamanlama bilgisine (saat frekansı) akortlu bir rezonans devre kullanılır. Bu bir L-C tank devresidir. Rezonans devreyi uyarmak için işaretler doğrultulur. Elde edilen darbe dizisinin yüksek anlarında üretilen çok kısa süreli darbelerle rezonans devre uyarılırsa sönümlü bir sinüs dalgası elde edilir. Sinüs dalgasının genliği ikinci darbeye ait yükseliş anında çok kısa süreli darbe gelinceye kadar belli bir değerin altına düşmeden kuvvetlendirilip ve belli bir seviyede kırılırsa kare dalgalar elde edilir. Modern devrelerde rezonans devreleri yerine PLL (Phase Locked Loop), faz kilitleme devreleri kullanılmaktadır.

HAT KODLARI

Sayısal PCM formatı hata uygulamadan önce başlıca aşağıdaki uygun hat kodlamalarından biri ile kodlamaya tabi kılınır.

- a) Çift yönlü hat kodlaması (Bipolar)
 - 1) İkizleştirilmiş ikili kodlama (Twinned Binary Code)
 - 2) Darbe Yönünü Eviren Kodlama (Alternate Mark Division)
- b) Çift fazlı hat kodlaması (Biphase, Manchester)
- c) Kodlu yön değiştirme (Coded Mark Inversion ,CMI)
- d) İlintili kodlama (Correlative Coading ,CC)
- e) İkili N Sıfır Değişirme (Binary N Zero Substitution)
- f) Yoğun İkili Kodlama (High Density Bipolar, HDB)
- g) Alfabetik Kodlamalar
 - 1) Çift Seçmeli üçlü Kodlama (Pair Selected Ternary)
 - 2) nBmT kodlama
 - 3) MSnm kodlama

Kaynaktan gelen PCM formatı genellikle tek yönlü değişen ikili bir kodlama olup (0)'lar için sıfır volt (1)'ler için +5 volt yada +3 volt gibi hep aynı işaretlidir. Böyle bir işareti herhangi bir değişime uğratmadan direkt olarak hata verebiliriz. Ancak eşit sayıda (0) ve (1)'ler varsa hattan gönderilecek +5 volt seviyede işaret için gönderilecek güç $P = 5.5/2 = 12.5 \text{ W}$ olacağı açıktır. Aslında aynı işaretinin ortalaması sıfır olacak şekilde (+ ve - darbelerin sayısı eşit) hata uygularsak $P = 2,5.2,5/2 = 6,25 \text{ W}$ olur. Çünkü ilk durumda gücün yarısı DA bileşene ait olup hiçbir işaret taşımamaktadır. Bu nedenle ve daha evvel bahsedilen sebeplerden dolayı tek yönlü PCM formatı etkin olarak pek kullanılmaz. Bunun yerine (+) ve (-) yönde ve eşit genlikte değişen darbe dizileri elde edilir. Buda hat kodlamalarıyla sağlanır.

1. İkizleştirilmiş İkili Kodlama

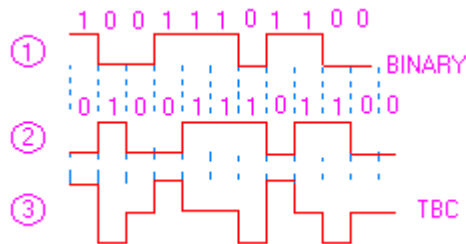
(Twinned Binary Coding)

Bu kodlama giriş imin sayısal türev alma prensibine göre yapılır. Eğer ;

Giriş yükseliyor ise çıkış +1

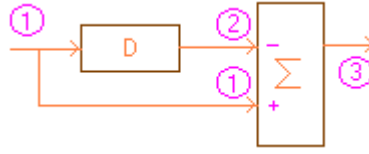
Giriş düşüyor ise çıkış -1

Giriş değişmiyor ise çıkış 0



(1) ve (0)'lardan oluşmuş tek kutuplu PCM darbe dizisi bir giriş darbesi pozitif diğeri negatif olan eşit genlikli iki darbe dizisine dönüştürülmektedir. Burada artık DA bileşeni

yoktur ve ortalama değeri sıfırdır. Sayısal toplam değişim (DSV) sadece 1 birimdir. Bu kodlamada simge hızı kaynaktan gelen simge hızı ile aynıdır. Ancak 2 seviye yerine 3 seviye vardır. (+1, 0, -1)



Şekilde anlaşıldığı gibi 1 deki darbe iki simge arası kadar bir geciktirme devresi sağlayan (Delay Circuit) bir D birim geciktirilir. Daha sonra 1 deki darbe dizisi ile 2 de geciktirilmiş darbe dizisi beraber bir çıkarma devresine tatbik edilir.

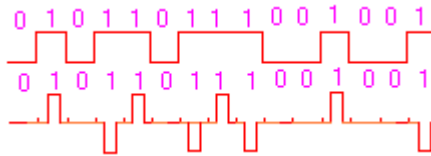
Bu kodlamada zamanlama bilgisi işareti doğrultarak kolayca elde edilebilir. Bu kodlamanın en önemli kusuru hatanın devam etmesidir. Eğer bir bit yanlış olarak algılanırsa , bu yanlışlık ikinci bir yanlışlığa kadar devam edecektir.

2) Darbe yönünü eviren kodlama (Alternate Mark Inversion , AMI)

Bu kodlamada PCM darbe dizisi

1. Giriş 0 ise çıkış 0
2. Giriş 1 ise çıkış +1 (eğer bir önceki 1 artı ise -1)
3. Giriş 1 ise çıkış -1 (eğer bir önceki 1 eksi ise +1)

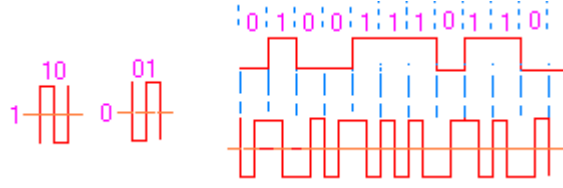
Bu suretle çıkışta -1,0,+1 olabilecek üçlü bir kod elde edilir. Bu kodlamanın değişik ve daha yaygın olan bir uygulamasında gönderilen darbelerin süresi giriş darbe süresinin yarısı kadar yapılır. Bu yolla zamanlama bilgisini elde etmede kolaylık sağlanır.



AMI'de kod açma işlemi bir doğrultucu ile kolayca yapılabilir. Zamanlama bilgisi kolay elde edilir. Ancak art arda gelebilecek 0 dizilerinde zamanlama elde etmede zorluk çıkabilir. Bu kodlamanın sağladığı en önemli kazançlardan bir tanesi de hatanın devamlı olarak izlenmesidir. Eğer bir hata yoksa peş peşe gelen iki darbenin mutlaka zıt yönde olması gerekir. Eğer bu kurala uymayan bir darbe varsa bir hata olarak algılanır. Bu hatalı darbeler sayılarak hat durumu ve hata olasılığı devamlı olarak gözlenebilir.

3. Çift fazlı hat kodlaması (Biphase or Manchester Coding)

Bu kodlamada darbe frekansı artırılır .Bu kodlamada çıkış 2 seviyelidir. Gelen PCM formatlı darbe katarında ki (1) ler ve (0) lar birbirine zıt fazda olan ve sifıra göre simetrik bir periyotluk kare ile kodlanır. Yani (1) ler 10 ve (0) lar 01 yapılmaktadır.



Bu kodlama band genişliğinin önemli olmadığı kısa şebekelerde (Local Area Network) tercih edilir.

Kodlamanın faydalı yönleri

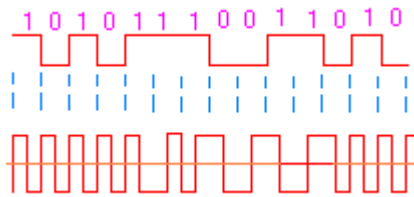
- Kodlamada DA bileşeni sıfırdır. Çünkü kodlama simetriktir.
- Kaynaktan bağımsız olarak bir kod üretilmektedir.
- Her (1) ve (0) biti için en az bir bit geçişi sıfır olduğundan zamanlama bilgisi de fazladır.
- Hata olasılığı 3 seviyeli İkizleştirilmiş İki Yönlü Kodlamadan daha iyidir.

Kodlamanın kötü yanları

- Sürekli hata izlenmesi için kolay bir yol yoktur.
- Frekans-bant genişliği 2 katına çıkar.
- Veri hızı bu nedenle düşük olmak zorundadır.
- Bir faz kaymasında tüm (0) lar 1 olarak ve (1) ler 0 olarak alınacaktır.

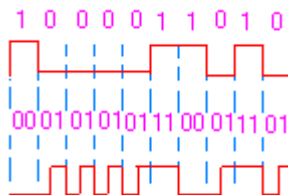
4. Diferansiyel Kodlama (Differential Coding)

Yukarda da anlatıldığı gibi Çift Fazlı Kodlamada herhangi bir faz kaymasında tüm birler (0) ve sıfırlar (1) olarak alınacaktır. Çünkü (1) ve (0) ların kodlaması 180° faz farklıdır. Bu istenmeyen bir durumdur. Bunu önlemek amacıyla Diferansiyel Kodlamaya başvurulur.



Eğer bir konumdan diğerine geçiş varsa (1) kodu yoksa (0) kodu kullanılır. Bu durumda bir zamanlama hatası olmaz. Fakat hata olasılığı iki misline çıkmıştır. Çünkü bir bit yanlış olarak algılanırsa arkasından gelen bitte yanlış olarak algılanacaktır.

5. Kodlu Yön Değiştirme (Code Mark Inversion , CMI)



Bu kodlama genellikle 50 Mbit/sn üzerindeki PCM darbe katarını hat kodlamalarında tercih edilir. Burada gelen PCM darbe katarındaki tüm sıfırlar 01 şeklinde simetrik bir kare dalga ile , (1) ler ise bir öncekinin tersine 11 yada 00 olarak kodlanır. CMI kodlamada hata oranı Manchester kodlamasının tersine hata olasılığı 2 kat daha fazladır.

6. İniltili kodlama (Correlative Encoding , CE)

Bu çok düzeyli bir kodlamadır. 2, 3 düzeyli kodlamalar yerine daha fazla düzeyli kodlamalar kullanılarak frekans bant genişliği azaltılmaya çalışılır. Ancak buna karşılık hata olasılığı artar. Çok düzeyli bir kodlamada bilgi iletme hızı R ise

$$R = \log_2(L) \cdot (1/T) \text{ olarak hesaplanır.}$$

$$T = \text{Simge arasındaki zaman aralığı}$$

$$L = \text{Düzey sayısı}$$

$$1/T = \text{Simge hızı (bant)}$$

Eğer giriş işareti ikili bir işaret ise bit hızı (b/sn) simge hızına (baud) eşittir. Ancak genelde bu doğru değildir. Bilgi gönderme hızı az olduğundan çok düzeyli kodlamalar bant genişliğinin sınırlı olduğu yerlerde kullanılır.

7. İkili N-Sıfır Değişirme (Binary N Zero Substitution , BNZS)

Çift Yönlü kodlamada en önemli kötü taraf devamlı (0) dizisi geldiğinde zamanlama bilgisinin alınamayışı ve bu nedenle eş zamanlamanın bozulmasıdır. Bunu önlemek için gelen binary PCM darbe katarında N tane sıfır peş peşe geldiğinde bunu özel bir dizi ile değiştirmektir. Bu gaye ile özel dizi darbe katarına eklenir. Bu özel dizinin geldiği dizideki darbelerin yerine bakılarak ayırt edilir. Kural olarak normal bir dizide hiçbir zaman 2 tane aynı yönde darbe art arda gelmemesi istenir. Özel diziz gönderilmek istendiğinde bu kuralı ihlal eden bir darbe eklenir. Alıcıda kural dışı bir darbe algılanırsa bu ya bir hatadır yada özel dizidir, ayırt edilir. Bu gaye ile diziyeye bakılır. Eğer gelen özel dizi ise bu N tane sıfır olarak değiştirilir. Değilse bir hata var demektir. Şimdi peş peşe 3 tane sıfırın geldiğini farz edelim. Eğer 3 sıfır art arda gelirse bu kodlamaya B3ZS kodlaması denir. B3ZS kodlamada ard arda en fazla iki tane sıfıra izin verilir.

Aşağıdaki kurala göre özel dizi eklenir.

Eğer son değiştirmeden beri gelen darbe sayısı

TEK ise → Özel Kod 00V

ÇİFT ise → Özel Kod B0V

yapılır.

Bu nasıl yapılır? PCM formatı önce AMI (Alternate Mark Division) kodlamadan geçer. Daha sonra art arda gelen 3 tane sıfırdan önceki darbelerin tek mi yada çift mi olduğuna bakılarak yine aşağıdaki gibi ekleme yapılır.

AMI kodlamalı en son değiştirmeden beri gelen darbe sayısı	Bir önceki darbe	
	-	+
Tek	00-	00+
Çift	+0+	-0-

Kodlama sonunda DA bileşenin sıfır kalması için özel kodun daha evvelki darbeye ve en son değiştirmeden beri gelen darbelerin sayısına göre ayarlanır. Burada kurala uyan darbeye B ve kural dışı darbeye V özel kodu eklenir. Görüldüğü gibi bir önceki darbeden sonra gelen (1) ler sayısı tek ise bir darbeli , çift ise 2 darbeli kod seşilmekte bu suretle toplam darbe sayısının ortalaması sıfırdır. Yani DA bileşeni sıfırdır.

Bununla beraber daha fazla sıfıra izin veren kodlamada yapılabilir. Örnek olarak B6ZS kodlaması ard arda gelen 6 tane sıfır kodlamasında kullanılır.

6 sıfırdan önce gelen darbe (-) ise → 0-+0+-

6 sıfırdan önce gelen darbe (+) ise → 0+-0-+

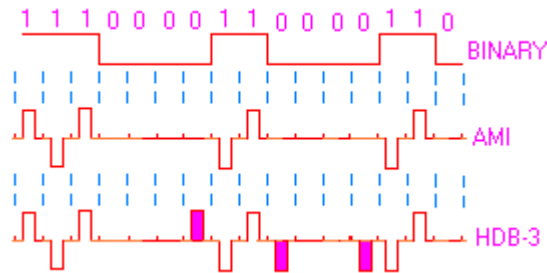
BNZS kodlaması HDB kodlamaya çok benzer. Eğer HDB kodlamasına bakılırsa aynı örnek üzerinde tatbik etmek kolaydır. Bu nedenle burada örnek verilmeye gerek duyulmamıştır.

8. Yoğun İkili kodlama (High Density Bipolar)

HDB kodlama BNZS kodlamasının bir çeşididir. Bu kodlamada art arda gelen 4 sıfır için yapılır. Kodlamada en çok 3 tane sıfırın art arda gelmesine müsaade edilir. Bu nedenle buna HDB-3 kodlama denir. Kural şoyledir :

<u>En son değiştirmeden beri gelen darbe sayısı</u>	<u>Özel Kod</u>
Tek ise	→ 000V
Çift ise	→ B00V

En son değiştirmeden beri gelen darbe sayısı	Bir önceki darbe	
	-	+
Tek	000-	000+
Çift	+00+	-00-



HDB-3 kodlama ilk merteye olan 30 kanallı PCM kodlamasında kullanılması CCITT tarafından tavsiye edilir.

- 5. Delta Modülasyonu**
- 6. Temel Bant Sayısal Bilgi İletimi**
- 7. Temel Bant Bilgi İletiminde Bit / Hata Oranı**
- 8. Sayısal Modülasyon Sistemleri**