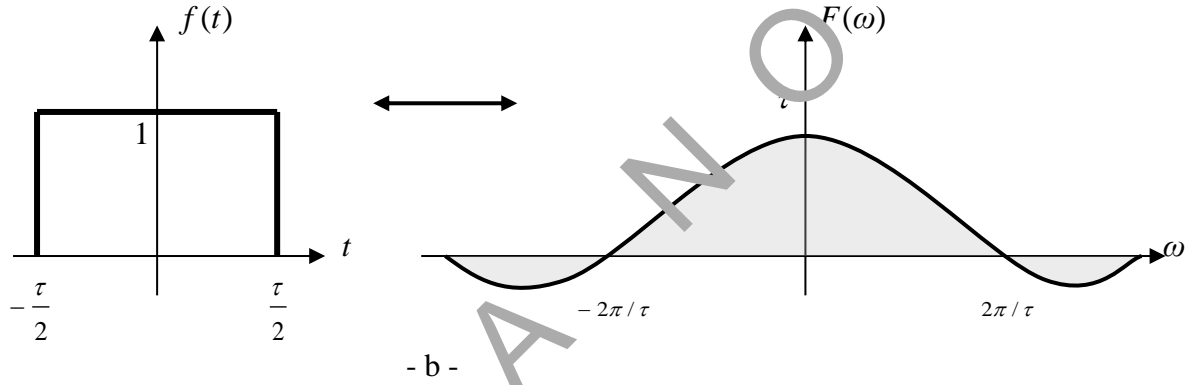
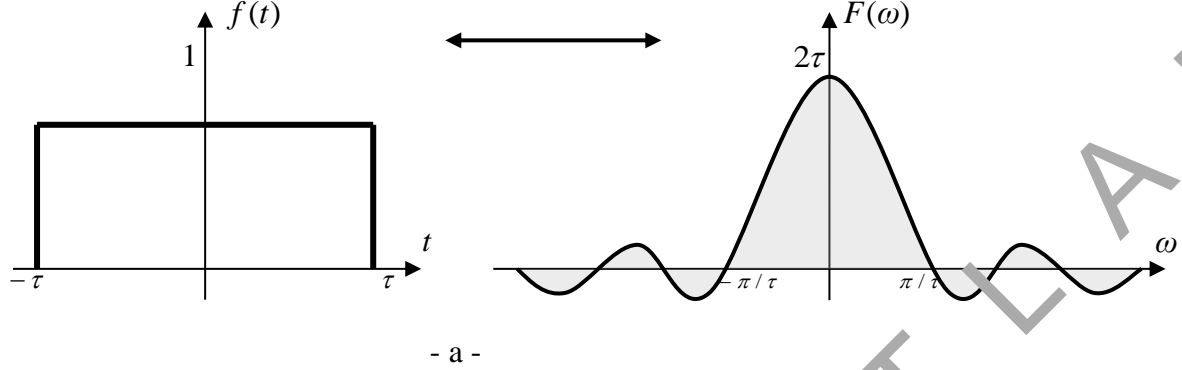


DARBE TIPLİ SAYISAL İŞARETLER

Darbe tipli işaretler sayısal işaretlerin temellerini oluştururlar. Bu nedenle sayısal işaretlerin anlaşılmasında önemli rol oynamaktadırlar.

Örnek



Şekil 1 Fourier transformasyonu ölçekleme özelliği

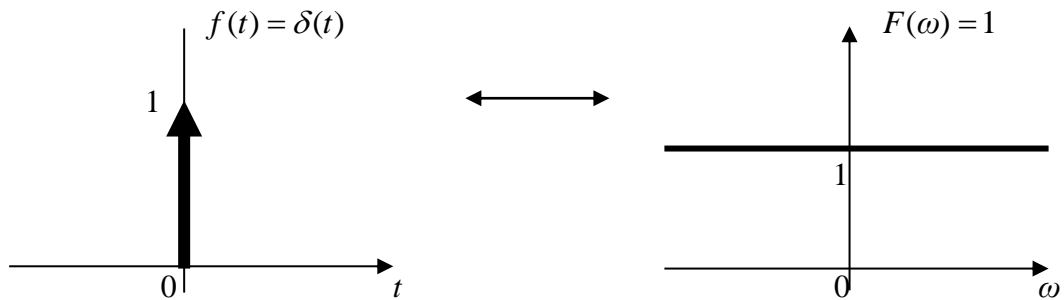
Örnek

$f(t) = \delta(t)$ işaretinin spektrumunu (Fourier transformasyonunu) analiz edin.

Çözüm

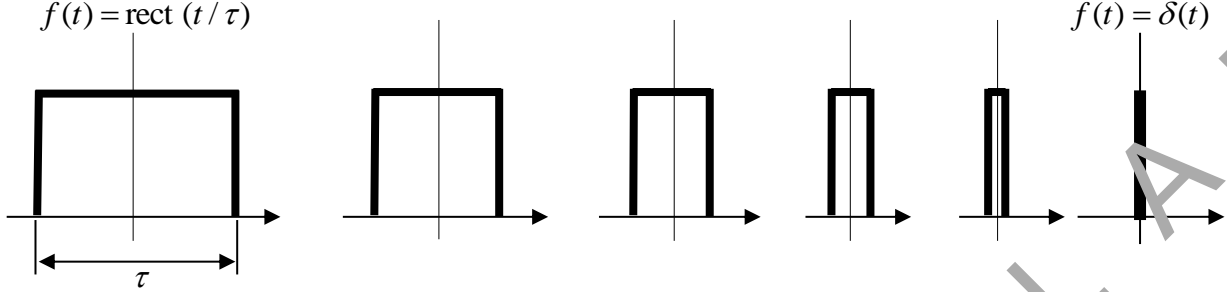
$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) e^{-j\omega t} dt = \delta(0) e^{-j\omega 0} = 1$$



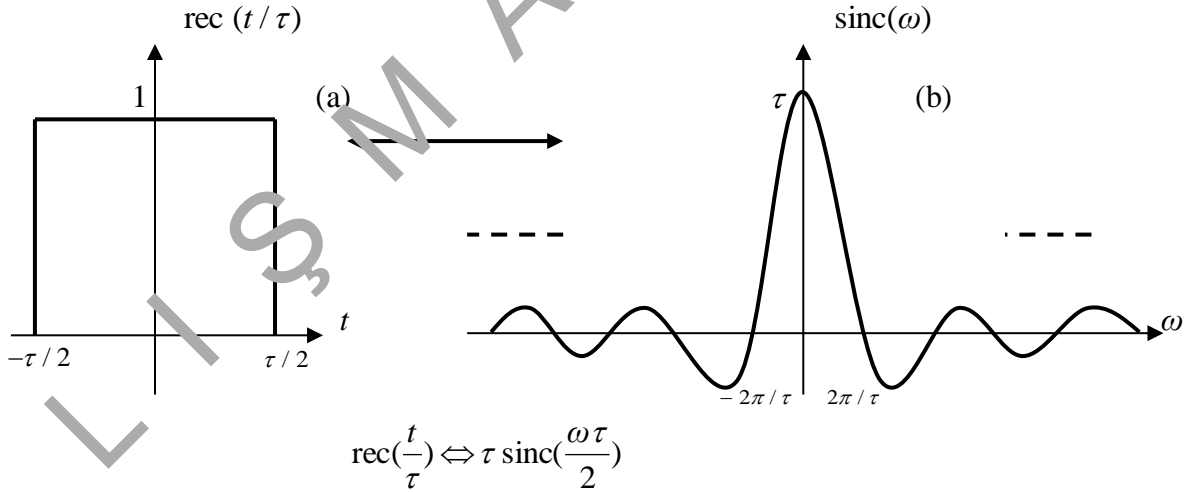
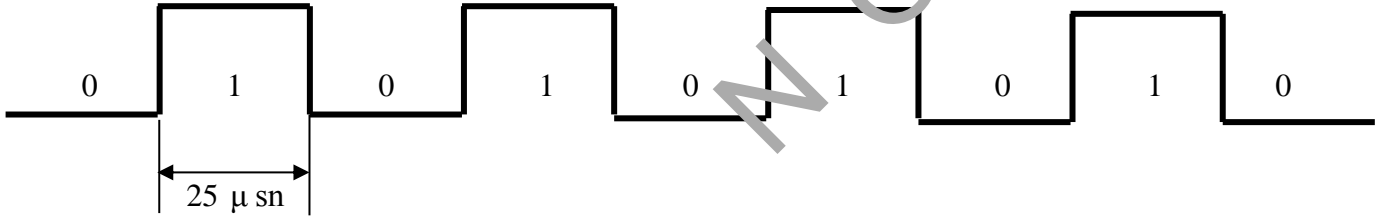
Not – 1 : Zaman domenindeki dar işaretin frekans domenindeki band genişliği yüksek olur.

Not – 2 : Eğer zaman domenindeki işaret gibi impuls veya delta dirac fonksiyonu olursa şekilden görüldüğü gibi band genişliği sonsuz olur. İmpuls fonksiyonu aslında belirli bir τ genişliği olan normal bir dörtgen veya kare dalgadır.



Şekil 3 Belirli bir genişlikten sıfır genişlikteki impuls fonksiyonuna giden kare dalga

Not – 3 : Sayısal haberleşme sistemlerinde sayısal bilgi iletiminde sayısal işaret olarak belirli genişliğe sahip periodik özellikli dörtgen dalga kullanılmaktadır.

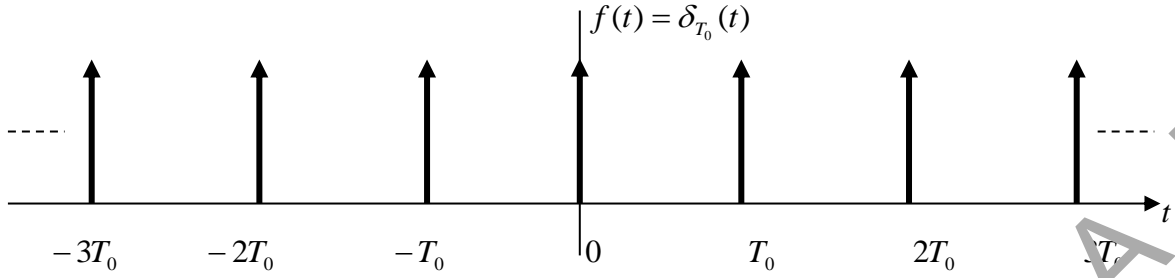


Şekil 4 Dörtgen dalga ve frekans spektrumu

Solda verilen τ genişliğindeki dörtgen dalganın band genişliğinin sağ taraftan $f = 1/\tau$ Hz olarak sonlu bir değer/band olduğunu görmekteyiz.

$$\omega = \frac{2\pi}{\tau} \leftrightarrow 2\pi f = \frac{2\pi}{\tau} \rightarrow f = \frac{1}{\tau} \text{ Hz}$$

Not – 4 : Sayısal haberleşme sistemlerinde sayısal bilgi iletiminde ideal anlamda sıfır genişlikteki özel dörtgen dalga olan impuls fonksiyonu veya impuls dizisi kullanılması istenir. Ancak impuls işaretinin sıfır genişlikte olması, dolayısıyla sonsuz band genişliği istemesinden dolayı kullanılamamaktadır.



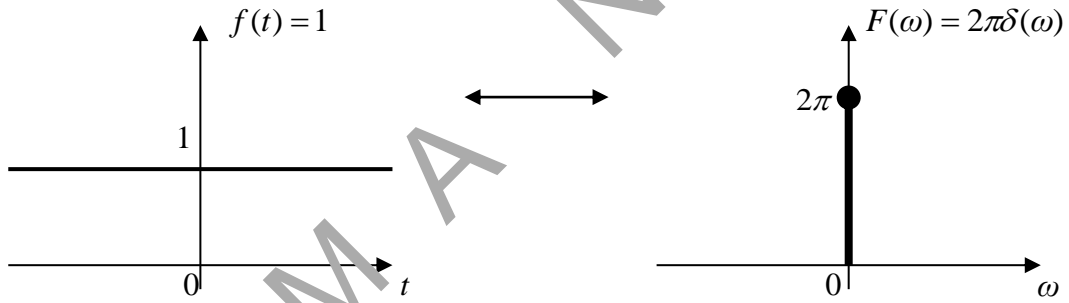
Şekil 5 Birim impuls fonksiyonu

Örnek

$f(t) = 1$ işaretinin Fourier transformasyonunu bulunuz.

Çözüm

$$1 \Leftrightarrow 2\pi \delta(\omega)$$



Şekil 6 $f(t) = 1$ Fourier transformasyonu

Not : Zaman domenindeki geniş işaretin frekans domenindeki band genişliği düşük olur.

HABERLEŞMEDE İŞARETLER

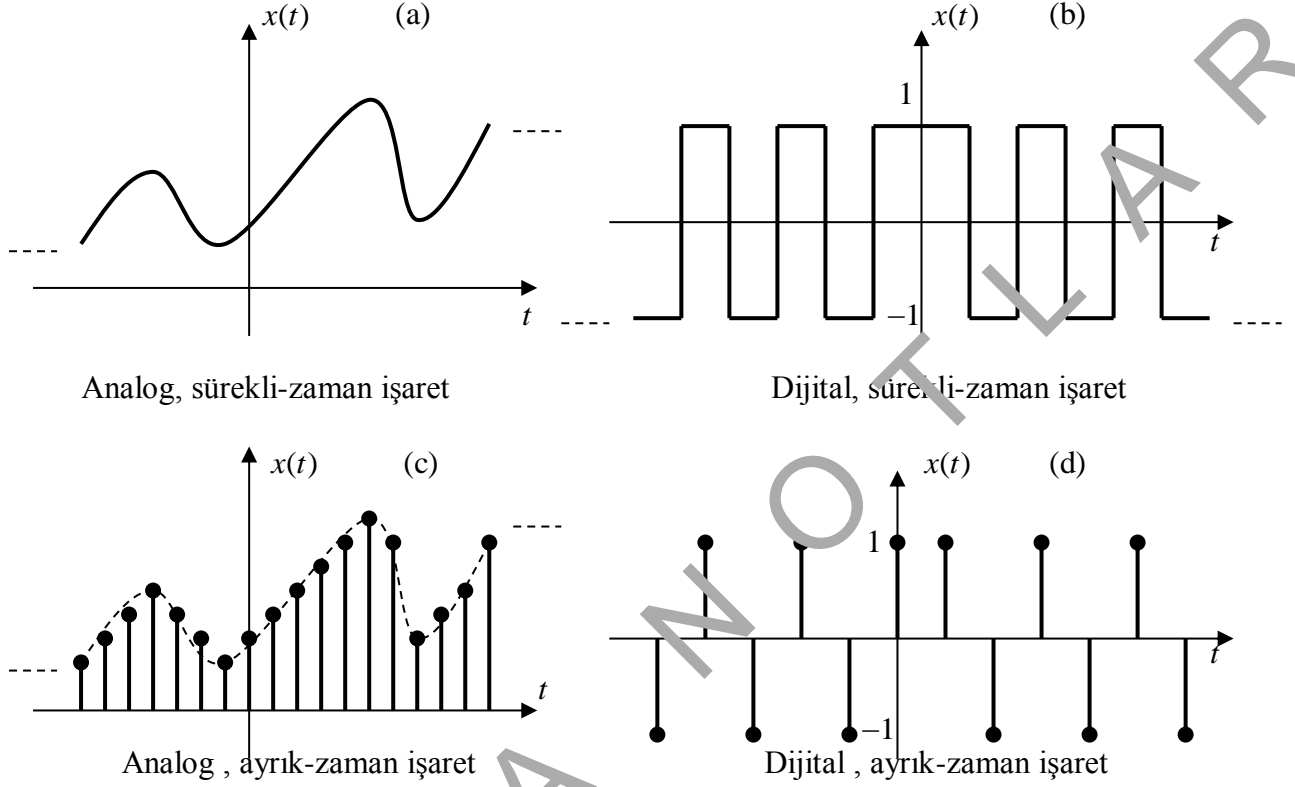
Günümüz haberleşme teknolojileri hem sistem hem de kullandıkları işaretler açısından sayısal özellik gösterirler. Aşağıdaki şekilde çeşitli haberleşme teknolojilerinin neredeyse tümünde hakim olan işaret türünün sayısal yani dijital işaretler olduğunu görmekteyiz.



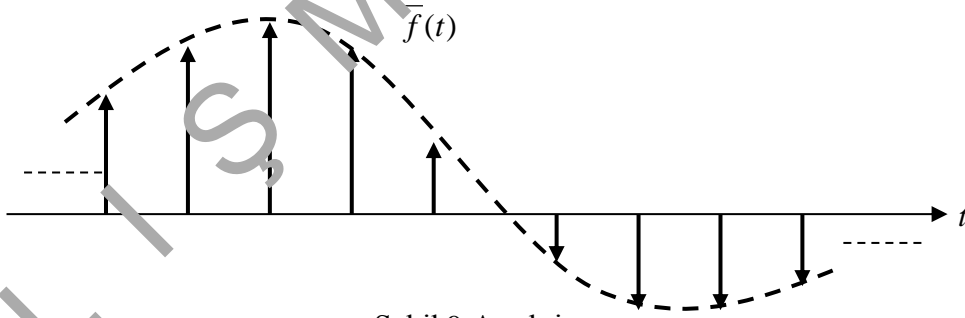
Şekil 7 Sayısal haberleşme

SAYISAL (dijital) İŞARETLER

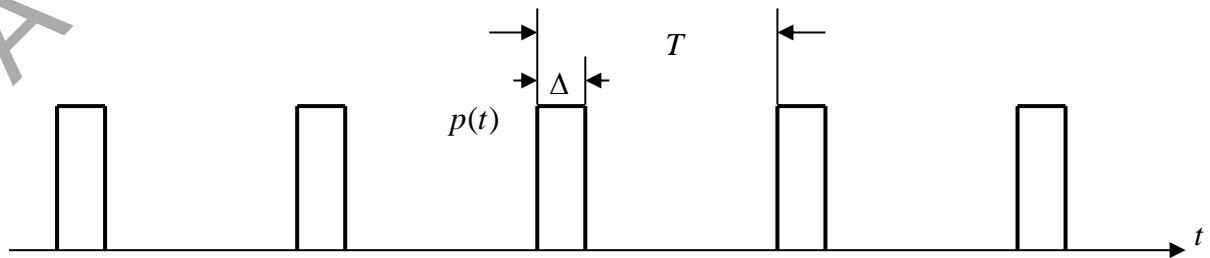
Sayısal haberleşmenin temelini işaret veya veri olarak sayısal yani dijital işaretler oluşturmaktadır. Dijital işaretler ayırık veya standart darbe özellikli işaretler olarak düşünülebilir. Aşağıda bu doğrultuda bazı dijital işaret örnekleri verilmiştir.



Şekil 8 Analog – Dijital işaretler



Şekil 9 Ayırık işaret



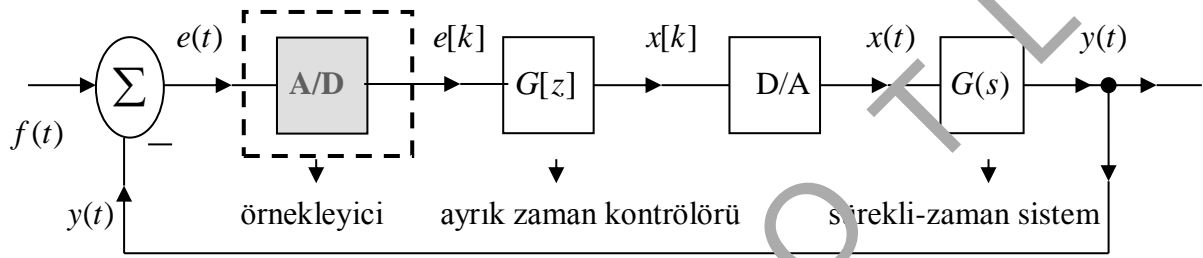
Şekil 10 Sayısal işaret : Darbe dizisi

SAYISAL HABERLEŞME

Sayısal haberleşmenin temelini sayısal yani dijital işaretler oluşturmaktadır. Dijital işaretler sürekli formdaki analog işaretlerin örneklenmesinden elde edilir. Örnekleme (sampling) sürekli bir işaretin belirli kurallar çerçevesinde ayırık işarete dönüştürülmesi işlemi olup, sayısal işaretin elde edilmesinin ilk adımını oluşturma açısından önemlidir.

ÖRNEKLEMESİ GİRİŞ

Haberleşme mühendisliği ve sistemleri, sürekli ve ayırık zaman sistemlerinin kombinasyonundan oluşan hibrid görünümündedirler. Aşağıda böyle bir sistemi görebiliriz.



Şekil 11 Hibrid sistem ve örnekleyici

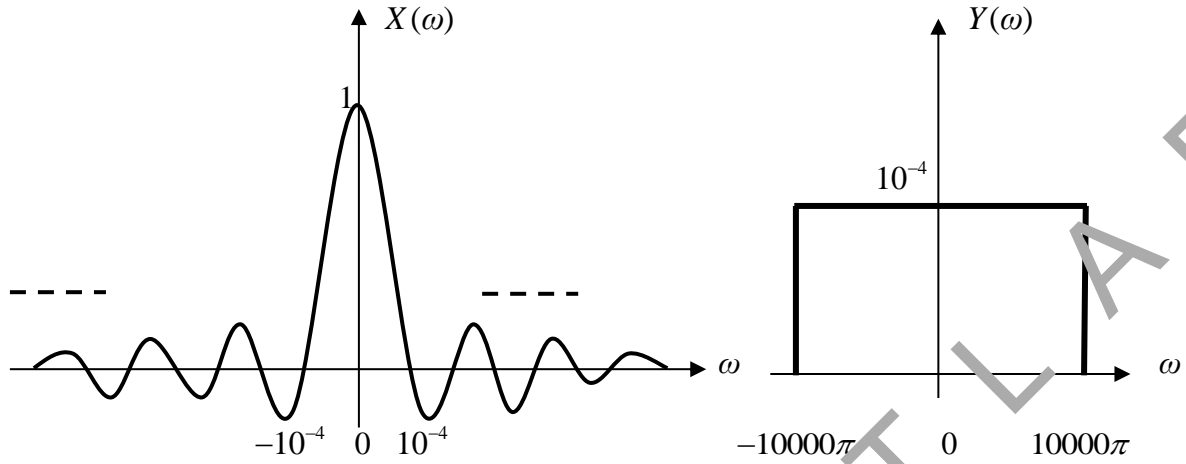
Blok diagramı verilen, ve bu şemada kesik çizgi ile belirtilen ve gri renkle tonlanan bölümü içeren işaretler, işaret işleme teknikleri ve sistemleri göz önüne alınacaktır. Blok şemada örnekleyici (sampler) olarak vurgulanan bu kısım, bu bölümde detaylarıyla ele alınacaktır.

ÖRNEKLEME (sampling)

Örneklenecek $f(t)$ işaret band sınırlı olmak zorundadır (B Hz). Bu işareti örnekleyecek $p(t)$ işaretinin frekansı (f_s) örneklenecek işaretin frekansının en az iki katı kadar olması gerekir ($f_s \geq 2B$). Bu kurala **Nyquist Örnekleme Kuralı** denilmektedir. Bu kural sağlandığı süreçte sağlıklı bir örneklemeden söz edilebilir. Sağlıklı bir örnekleme Nyquist kuralını kapsamakla beraber daha da önemli bir noktayı işaret etmektedir. Buna göre sağlıklı örnekleme veya Nyquist kuralı uygulandığı süreçte örneklenen $f(t)$ işareti örneklerinden tekrar elde edilebilecektir. Bu orijinal işaretin var olması, kaybedilmemesi açısından da önemlidir.

Örnek

Hangi işaret örneklenebilir.



Şekil 12 Analog işaretler

Çözüm

Şekillere bakıldığında $x(t)$ ve $y(t)$ işaretlerinin frekans spektrumları verilmiştir. Eğer işaretler band sınırlı iseler örneklenebilirler. Buna göre $X(\omega)$ spektrumundan görüldüğü gibi bu işaret sonsuz banda sahip olduğundan bu işaret yani $x(t)$ işareti örneklenemez. Öte yandan benzer biçimde ikinci işaret olan $Y(\omega)$ işaretinin spektrumuna bakıldığında bu işaret band sınırlı olduğundan (5000 Hz) bu işaret örneklenebilir. Hatta bu işaret örneklenirse iki katı olan saniyede en az 10000 örnek alınması gerekmektedir.

Örnek

$x(t) = \text{sinc}(5000\pi t)$ İşaret örneklenebilir mi?

Çözüm

Eğer işaret band sınırlıysa örneklenebileceğinden ilk iş olarak verilen işaretin band genişliğini

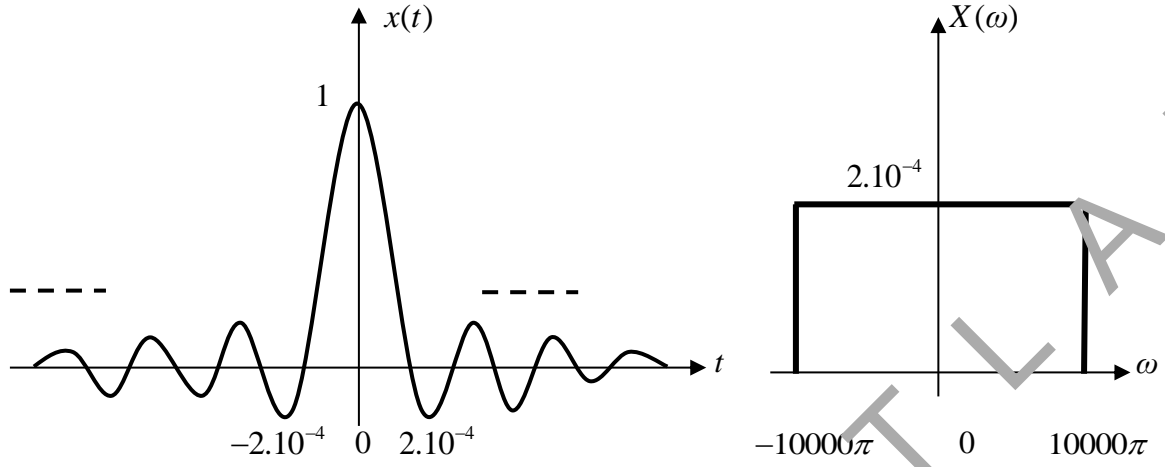
$\tau \text{sinc}(\frac{t}{\tau}) \leftrightarrow 2\pi \text{rect}(\frac{\omega}{\tau})$ yaklaşımından hesaplayabiliriz.

$$\text{sinc}(5000\pi t) = \tau \text{sinc}(\frac{t}{\tau}) \rightarrow \frac{\tau}{2} = 5000\pi \rightarrow \tau = 10000\pi \text{ sn}$$

$$\text{sinc}(5000\pi t) \leftrightarrow \frac{2\pi}{\tau} \text{rect}(\frac{\omega}{\tau}) = \frac{2\pi}{10000\pi} \text{rect}(\frac{\omega}{10000\pi}) = 2 \cdot 10^{-4} \text{rect}(\frac{\omega}{10000\pi})$$

$$\text{sinc}(5000\pi t) \leftrightarrow 2 \cdot 10^{-4} \text{rect}(\frac{\omega}{10000\pi}) \rightarrow 2\pi f_x = 5000\pi = f_x = 2500 \text{ Hz} = 2.5 \text{ KHz}$$

Buna göre işaretin frekansı $f_x = 2500 \text{ Hz} = 2.5 \text{ KHz}$ olarak band sınırlı olduğundan verilen $x(t)$ işareti örneklenebilir. Bu koşullarda eğer $f_s \geq 2B$ kuralına göre örneklenecekse saniyede en az 5000 örnek alınması gerekir.



Şekil 13 Kanal zaman – frekans değişimi : $\text{sinc}(5000\pi t) \leftrightarrow 2.10^{-4} \text{rect}(\frac{\omega}{10000\pi})$

Örnek

$f(t) = \sin 1000\pi t$ işaretini örnekleyecek örnekleme işaretinin frekansı ne olmalıdır.

Çözüm

$$f(t) = \sin 1000\pi t = \sin 2\pi(500)t \rightarrow B = 500 \text{ Hz}$$

Örneklenecek işaretin frekansı olduğundan bunu örnekleyecek örnekleme işaretinin frekansı en az iki katı olması gerektiğinden ($f_s \geq 2B$),

$$f_s \geq 2 \times 500 = 1000 \text{ Hz}$$

Buna göre $f(t)$ işaretinden saniyeden az 1000 örnek alınırsa, işaret sağlıklı örneklenmiş olacaktır. Ancak bu taktirde işaret örneklerinden tekrar elde edilecektir. Diğer bir deyişle en az 1000 örnekten tekrar orijinal $f(t)$ işareti elde edilebilecektir.

Örnek

$f(t) = \cos 450\pi t$ işareti, $p(t) = \cos 800\pi t$ işareti ile örneklenebilir mi?

Çözüm

Örnekleme ile kast edilen sağlıklı örneklemedir. Yani öyle bir oran belirlenmelidir ki örneklenecek işareten alınacak örnek sayısından işlemler sonunda tekrar orijinal işaret elde edilmelidir. Bunun için yine temel $f_s \geq 2B$ kuralı sağlanmalıdır. Dolayısıyla ilk olarak her iki işaretin frekansı belirlenmelidir.

$$f(t) = \sin 450\pi t = \sin 2\pi(225)t \rightarrow B = 225 \text{ Hz}$$

$$p(t) = \sin 800\pi t = \sin 2\pi(400)t \rightarrow f_s = 400 \text{ Hz}$$

Buna göre $f_s \geq 2B$ kuralı $400 \neq 2 \times 225$ sağlanmadığından sağlıklı bir örneklemeden söz edilemez. Eğer bu şekilde örnekleme yapılırsa, işaret örneklerinden tekrar elde edilemeyerek kaybedilecektir.

Örnek

$x(t) = \sin 40\pi t + \cos 180\pi t + \sin 100\pi t$ işaretini sağlıklı örnekleyecek örnekleme işaretinin frekansı en az kaç Hz dir.

Çözüm

Öncelikle verilen $x(t)$ işaretinin band sınırlı olup olmadığına bakılır.

$$x(t) = \sin 40\pi t + \cos 180\pi t + \sin 100\pi t = \sin 2\pi(20)t + \cos 2\pi(90)t + \sin 2\pi(50)t$$

$$\begin{array}{ccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ f_1 = 20 \text{ Hz} & f_2 = 90 \text{ Hz} & f_3 = 50 \text{ Hz} \end{array}$$

Verilere bakıldığında $x(t)$ işaretinin band genişliği,

$$\text{Band Genişliği} = f_{\max} - f_{\min} = f_2 - f_1 = 90 - 20 = 70 \text{ Hz}$$

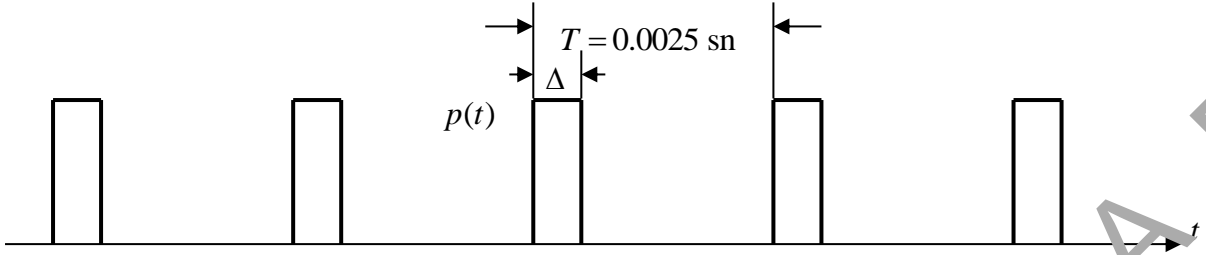
Buna göre $x(t)$ işaretin band genişliği 70 Hz olarak band sınırlı olduğundan dolayı işaret örneklenebilir. Peki bu işareti örnekleyecek örnekleme işaretinin frekansı ne olmalıdır. Bunun için verilen $x(t)$ işaretinin içerdiği en yüksek frekans dikkate alınır. Buna göre örneklenecek işarettaki en yüksek frekans bileşeni olarak $f_2 = 90 \text{ Hz}$ değeri dikkate alınacaktır. Nyquist kuralını ($f_s \geq 2B$) göz önüne alan sağlıklı bir örnekleme için örnekleme işaretinin frekansı bu frekansın en az iki katı olmalıdır ($f_s \geq 2f_2$).

$$f_s \geq 2f_2 \rightarrow f_s \geq 2 \times 90 \rightarrow f_s \geq 180 \text{ Hz}$$

Buna göre örnekleme frekansı en az 180 Hz alındığı sürece $x(t)$ işareti sağlıklı örneklenebilir.

Örnek

Aşağıda verilen $p(t)$ darbe dizisiyle sağlıklı örneklenebilen bir $x(t)$ işaretinin band genişliği veya frekansı maksimum kaç Hz dir.



Şekil 14 Darbe dizisi : örnekleme fonksiyonu

Çözüm

Darbe işaretinin örnekleme periodu $T = 0.0025$ sn olduğundan buradan örnekleme frekansı,

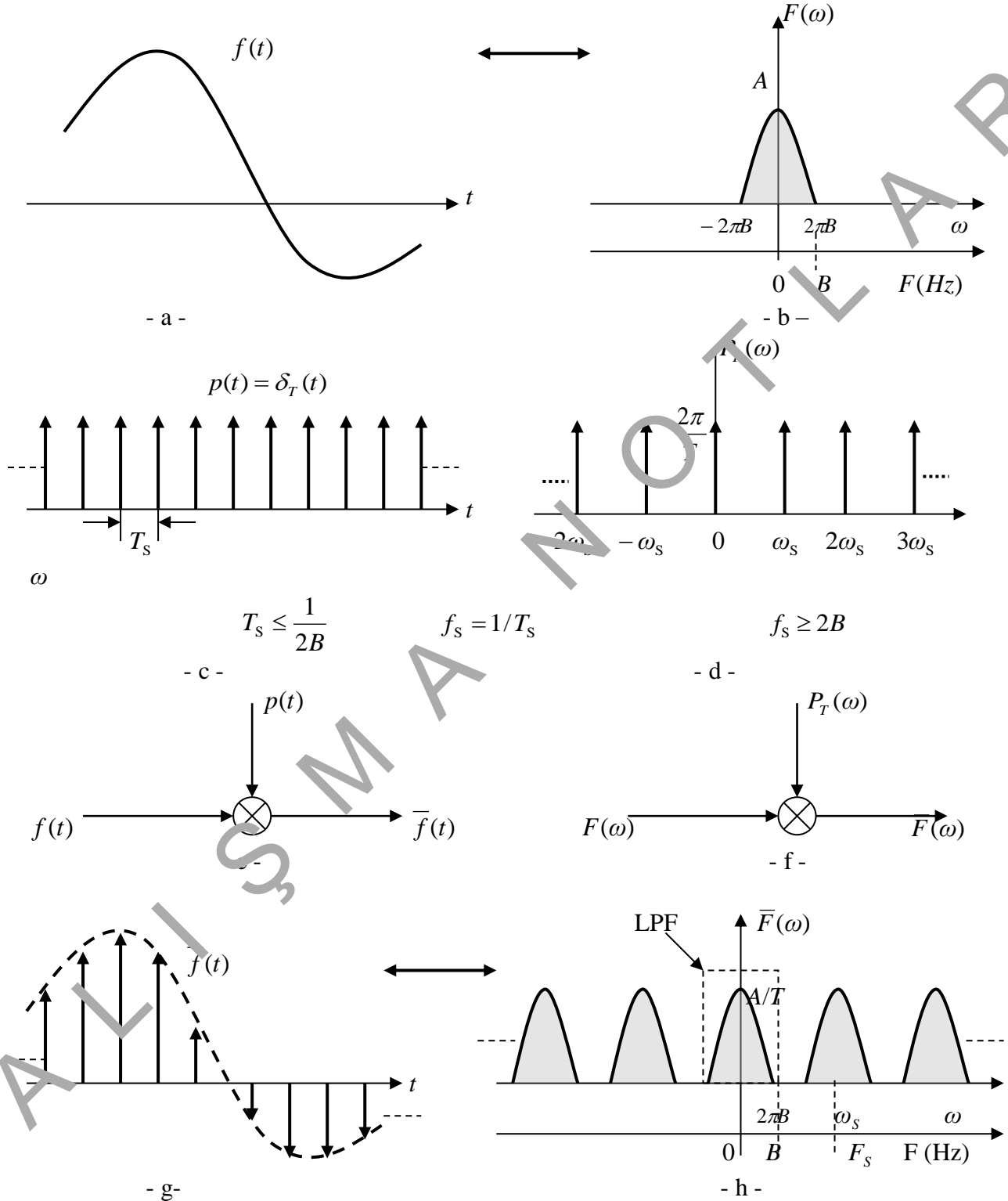
$$f_s = 1/T = 1/0.0025 = 400 \text{ Hz}$$

Buna göre bu örnekleme frekansı ile sağlıklı örneklenebilecek band sınırlı olduğu düşünülen bir $x(t)$ işaretinin maksimum frekansı $f_s \geq 2B$ Nyquist kuralı gereği $B = 200$ Hz olmalıdır.

$$f = 400 \rightarrow B_{\max} = 200 \text{ Hz}$$

İDEAL ÖRNEKLEME

İdeal örneklemede örnekleme fonksiyonu olarak sıfır genişlikli impuls dizisi kullanılmaktadır (Şekil (c).)

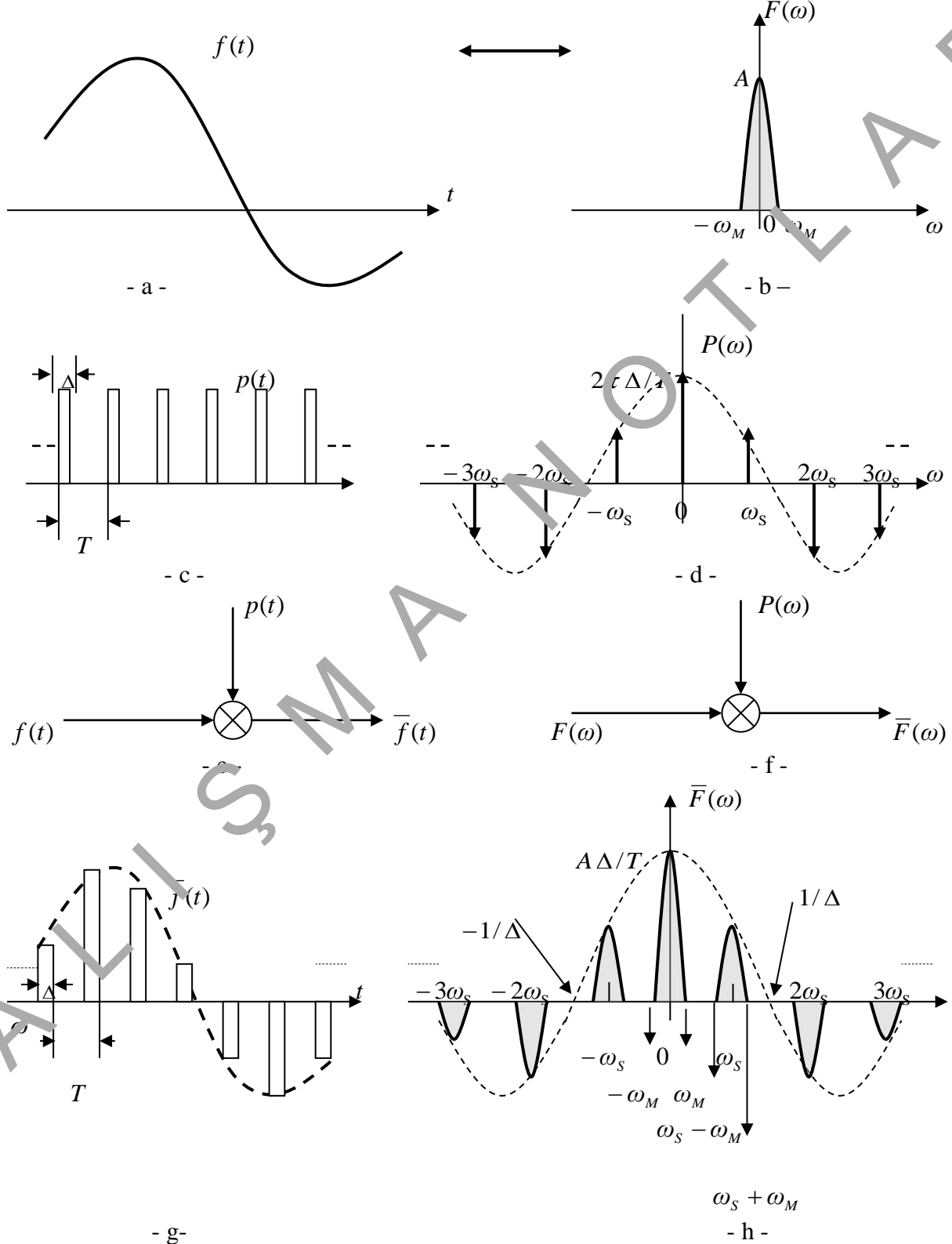


Şekil 15 İdeal örnekleme ve Fourier spektrumu

Not : Şekil (h) de görülen kesikli alçak geçiren filtre (AGF) örneklenen $f(t)$ işaretini örneklerinden tekrar elde etmek için kullanılır.

PRATİK ÖRNEKLEME

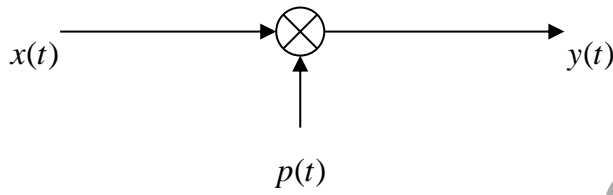
Pratik örnekleme, *doğal örnekleme* (natural sampling) olarak da bilinir. İdeal örneklemedeki kullanımı pratik olmayan sıfır genişlikli impuls dizisi yerine, örnekleme fonksiyonu olarak belli bir genişlikteki darbelerden oluşan darbe dizisi (pulse train) kullanılmasına pratik veya doğal örnekleme denilmektedir. Aşağıda doğal örnekleme şeması verilmiştir.



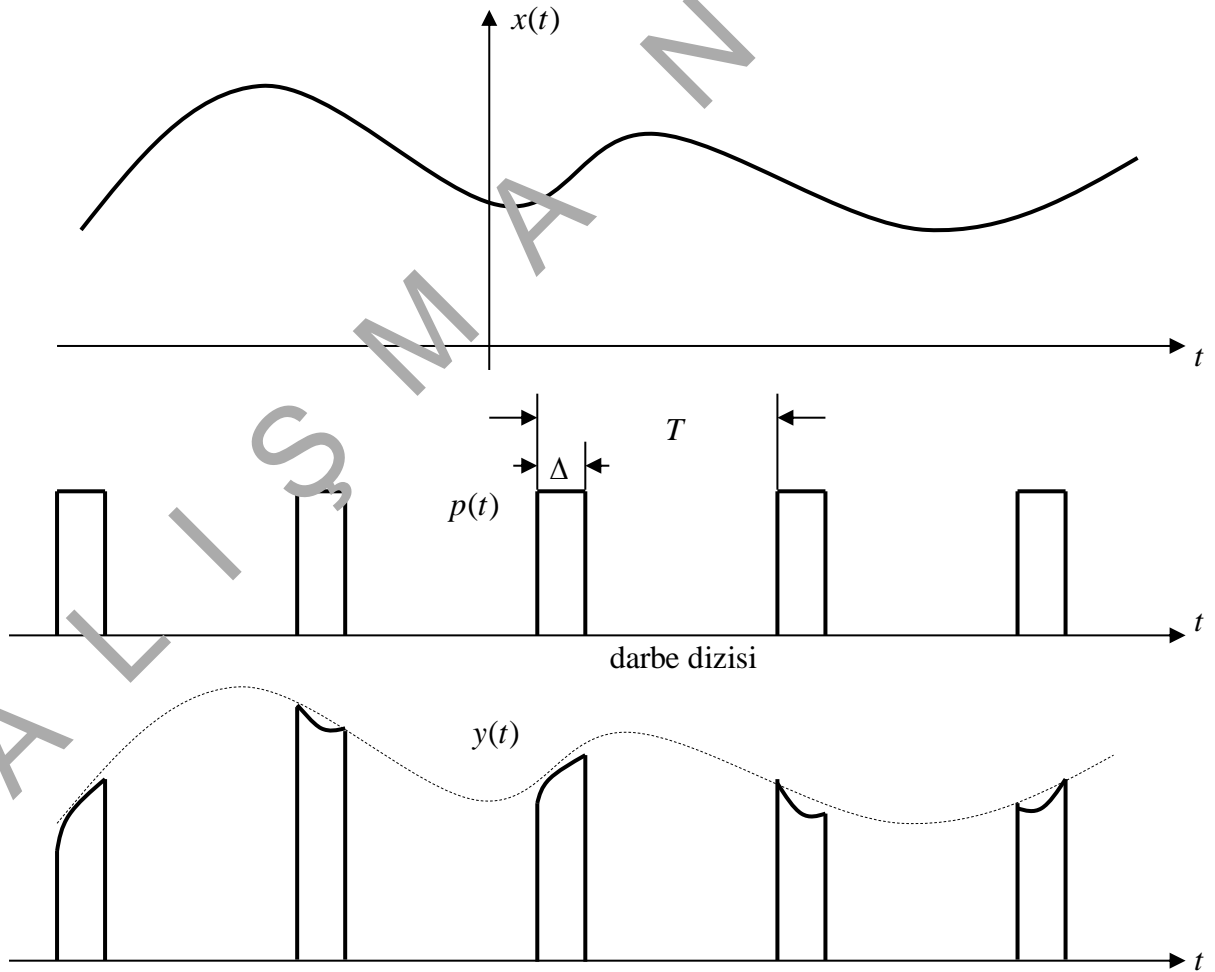
Şekil 16 Darbe genlik modülasyonu : Doğal örnekleme ve Fourier spektrumu

DARBE GENLİK MODÜLASYONU

Darbe tipli işaretlerin haberleşme sistemlerin önemli yeri vardır. Daha önce darbe tipli işaretlerin impuls ve standart darbe olarak izahları yapılmıştı. Daha sonra da hatırlayacağımız gibi darbe dizilerinin gerek Fourier serisi gerekse Fourier transformasyonu ile spektrum davranışları anlatılmıştı. Bu bölümden itibaren özellikle darbe dizisi ile modülasyon ele alınarak, bu anlamda gerek analog gerekse dijital işaret işlemede ve haberleşmede oldukça önemli yeri olan darbe genlik modülasyonu ele alınarak, analizi yapılacaktır. Analiz, darbe genlik modülasyonlu işaretlerin spektrum davranışları ve band sınırlı kanallardan iletimi gibi özellikler göz önüne alınarak izahı verilmeye çalışılacaktır. Bu anlamda aşağıda verilen klasik genlik modülasyon şemasını kullanarak, darbe genlik modülasyonu (pulse amplitude modulation) açıklanmaya çalışılacaktır.



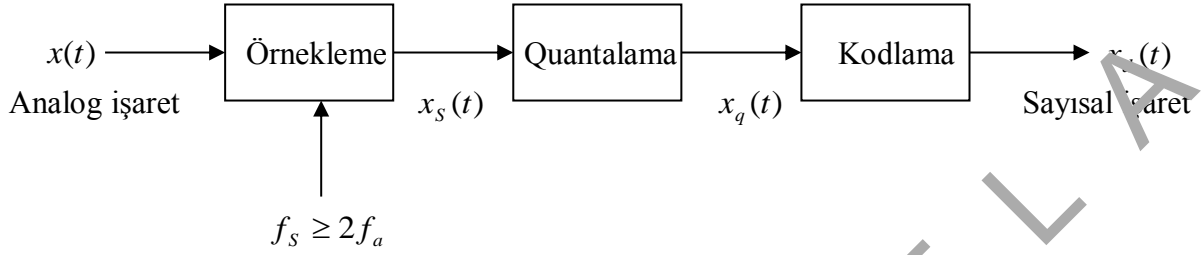
Şekil 17 $y(t) = x(t) \cdot p(t)$ Modülasyon blok şeması



Şekil 18 $y(t) = x(t) \cdot p(t)$ Darbe genlik modülasyonu

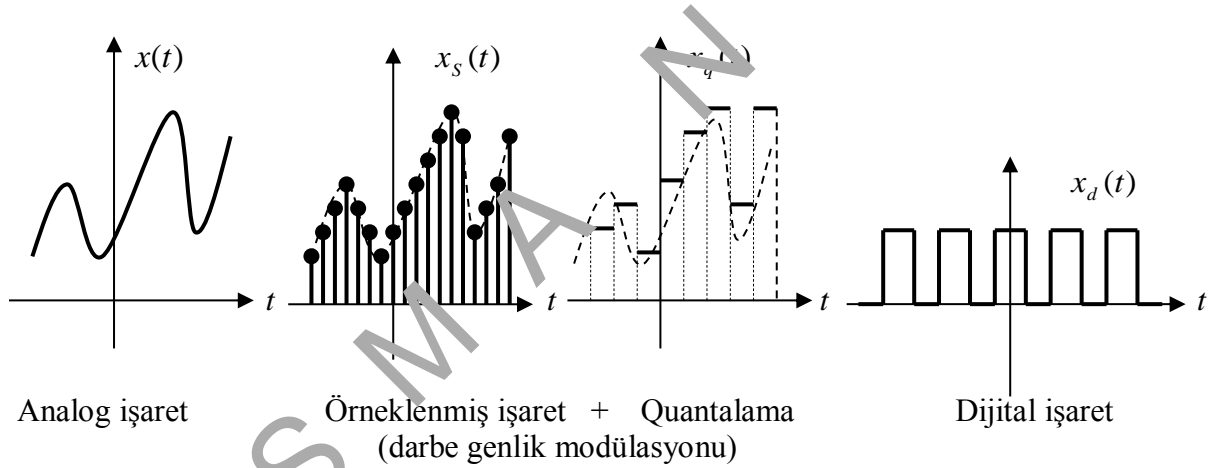
Sayısal İşaretlerin Elde Edilmesi

Sayısal veya dijital işaretler doğal işaretler olmayıp, sürekli-zaman işaretlerden elde edilmektedirler. Bu nedenle dijital işaret sürekli $x(t)$ işaretinin (analog işaret) örnekleme, quantalama ve kodlama safhalarından geçirilerek $x_d(t)$ formunda elde edilen işarettir. Bu safhaları içeren blok diagram aşağıda verilmiştir.



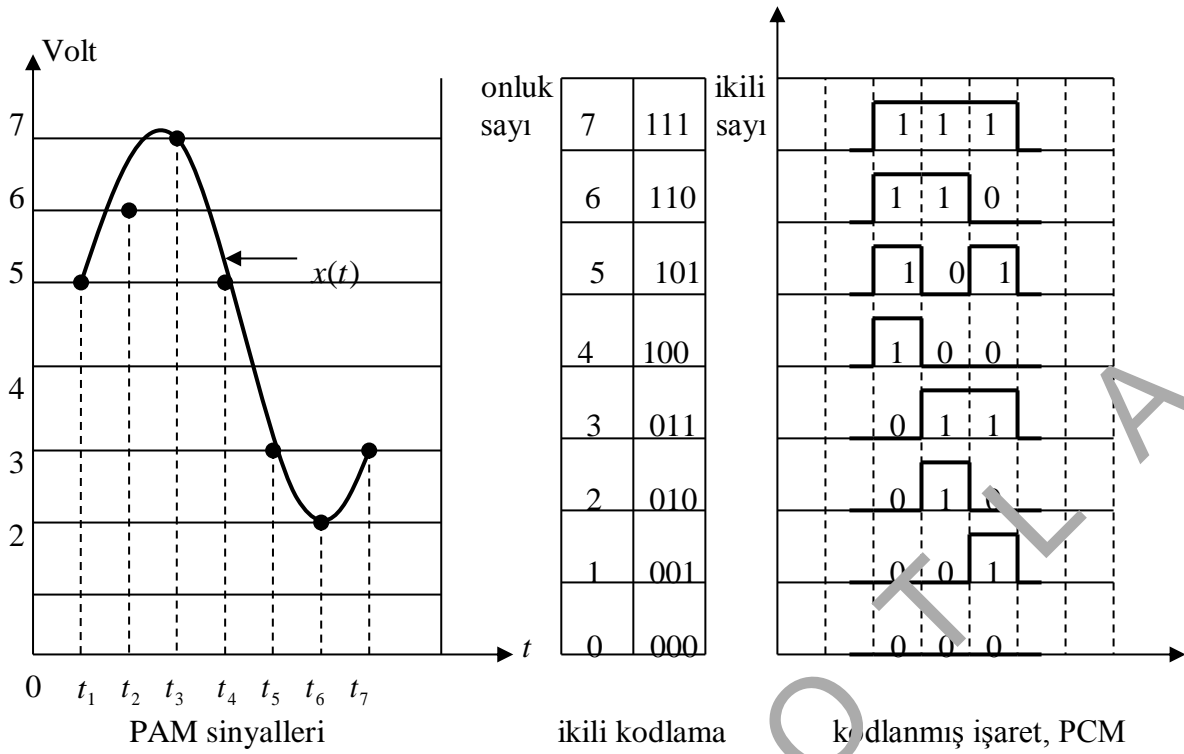
Şekil 19 Dijital işaretin elde edilmesi

Dijital işaretin elde edilmesini gösteren yukarıdaki blok diagramdaki $x(t)$, $x_s(t)$, $x_q(t)$ ve $x_d(t)$ aşamalarını işaretler üzerinde göz önüne alalım.



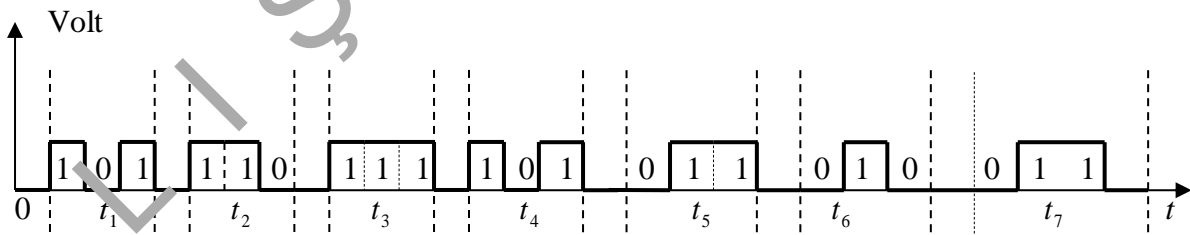
Şekil 20 Analog –dijital işaret dönüşümü

Görüldüğü gibi $x(t)$ analog işareti $f_s \geq 2f_a$ kuralına göre örneklenerek önce $x_s(t)$ ayrık işaretini, bu işaret de belli bir genişlikteki sıfır-seviyeli tutucudan geçirilerek , genlik darbe modülasyon (pulse amplitude modulation, PAM) işareti elde edilir. Elde edilen PAM işareti belli seviyelere göre quantalanarak $x_q(t)$ işaretini oluşturmaktadır. Oluşan $x_q(t)$ işareti darbe kod modülasyonundan (pulse code modulation, PCM) geçirilerek beklenen $x_d(t)$ dijital işareti elde edilir. Quantalanmış PAM sinyallerinin PCM den geçirilmesi demek, PAM işaretinin eşit genlikteki darbelerle kodlanması demektir. Bu şekilde kodlanmış işaret $x_d(t)$ dijital işarettir. Aşağıda bir $x(t)$ analog işaretinin $x_d(t)$ dijital işarete dönüşümü safhalarıyla gösterilmiştir.



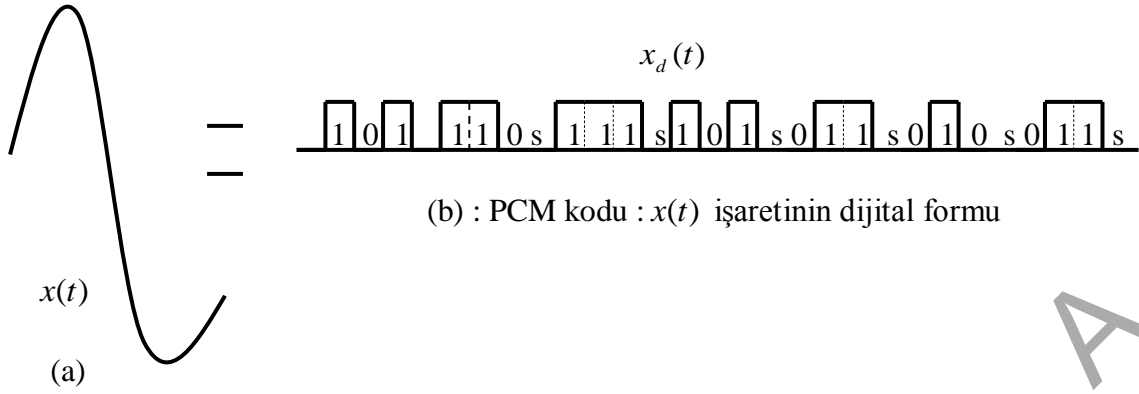
Şekil 21 Analog işaretin 3-bitli ikili sayı ile kodlanması

Görüldüğü gibi $x(t)$ işareti PAM işareti haline getirildikten sonra toplam 8 seviyede (voltaj seviyesi) quantalanmıştır. Bu her bir değer 0-7 arasında bir değere yuvarlatılmıştır. Bu yuvarlatılmış değerler quantalanmış değerler olarak anılmaktadır. Böylece PAM dizisini gösteren her bir quantalanmış onluk (uzundaki (0-7) toplam 8 değer ikili (binary) kod ile kodlanmıştır. Toplam 8 quantalanmış değer mevcut olduğundan 3 bitlik bir ikili sistem kullanılmıştır. Toplam quantalanmış 16 değer olsaydı 4 bitlik, tam olmayan 56 değer quantalanmış olsaydı bu kez de 6 bitlik ikili kodlama sistemi kullanılıyor olacaktı. Bunların ışığında 8 quanta seviyesine göre 3 bit olarak kodlanmış $x(t)$ işaretinin dijital formu aşağıdaki gibi olacaktır.



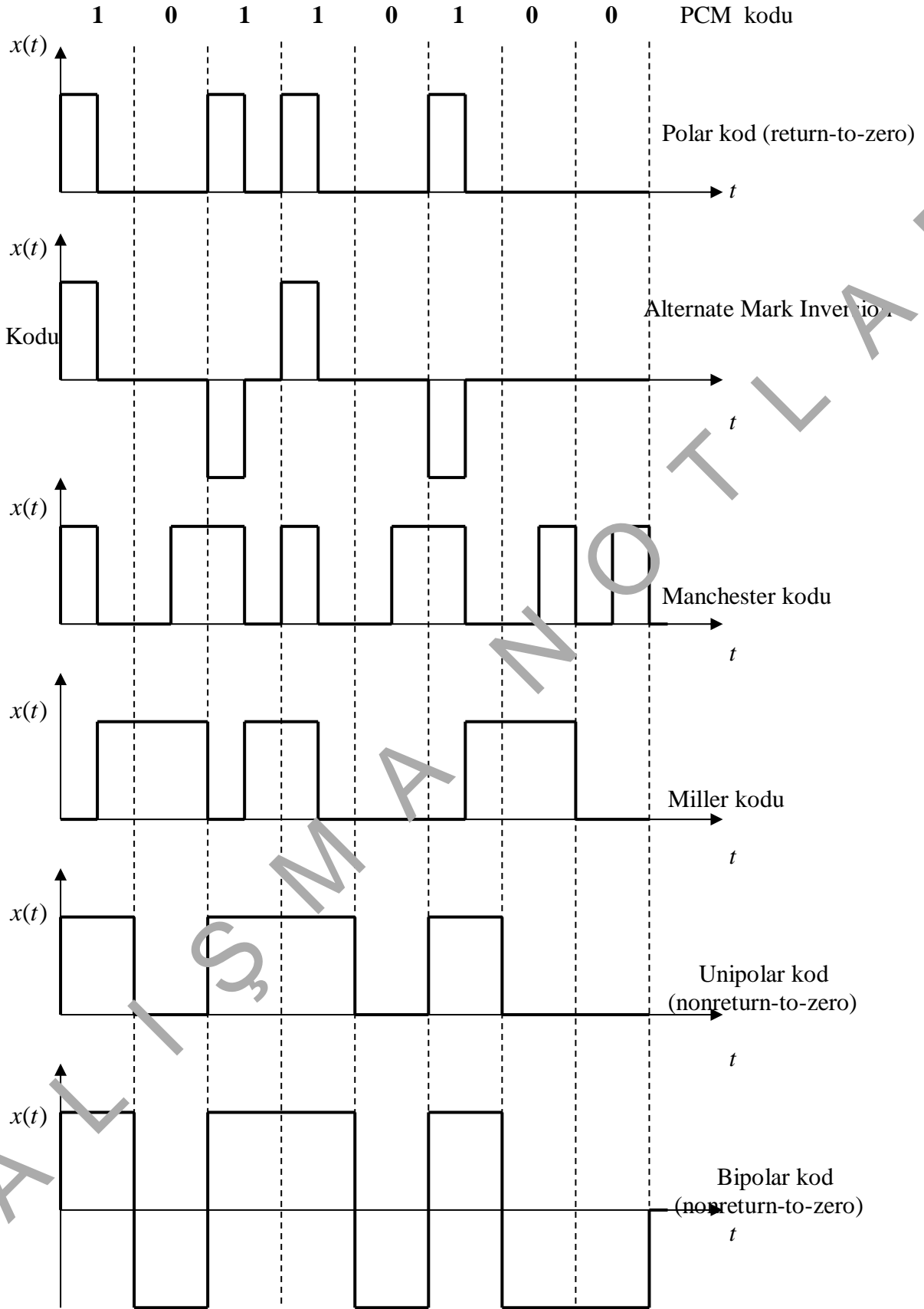
Şekil 22 Dijital işaret : darbe kod modülasyonu (PCM) dizisi

Bakıldığında dijital işaret olarak $x(t)$ analog işaretinin PCM ile kodlanmış dijital formunu görmekteyiz. Darbe katarı olarak da bilinen bu şekildeki PCM kodlu dijital işaret kullanımı özellikle haberleşme mühendisliğinde önemli bir yöntemdir. Şekilde 3-bitlik her bir paket arasındaki boşluk, haberleşmede gönderici ve alıcı arasındaki senkronizasyonu sağlamak üzere “0” veya “1” şeklinde 1-bitlik başlatma veya sonlandırma bitidir. Buna göre $x(t)$ analog (sürekli-zaman) işaretinin örnekleme – PAM-PCM yöntemleriyle elde edilen dijital formu aşağıdaki gibi olacaktır.



Şekil 23 (a) : $x(t)$ analog işaret , (b) : Dijital işaret

Şekil (b) deki her bir aralık “0” veya “1” şeklinde bite karşılık gelmektedir. Dijital işaret de görülen “s” de böyle “0” veya “1” bitidir. Bu bit haberleşmede veri iletiminde veri paketleri arasındaki başlangıç veya bitiş biti gibi senkronizasyon biti olarak değerlendirilmektedir. Aşağıda binary (ikili) formdaki PCM kodunun alternatifi olan bazı dijital kodlar ele alınmıştır.



Şekil 24 PCM kodlama teknikleri

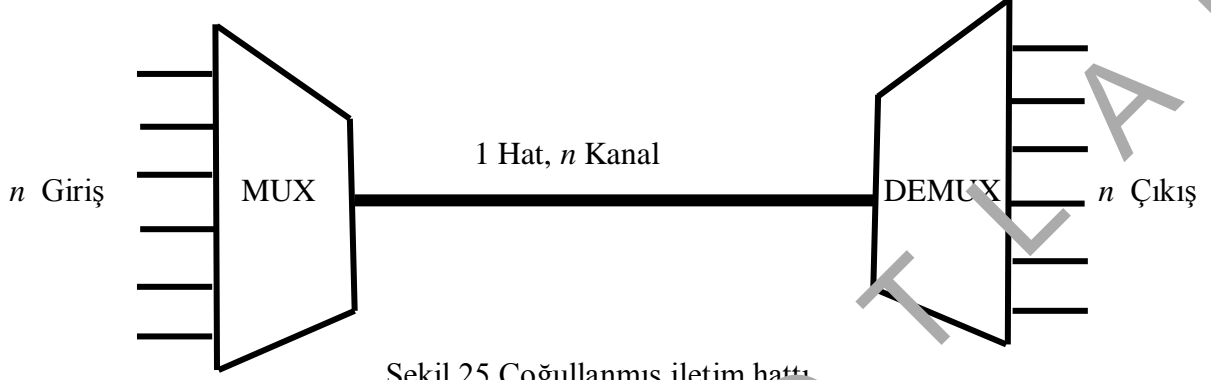
Her bir teknikte “10110100” şeklindeki ikili PCM kodunun karşılığı olan dijital işaretler gösterilmiştir. Buna göre beşinci sıradaki “unipolar kodlama” bizim yukarıda 3-bitlik yaptığımız kodlamanın karşılığı olarak gözlemlenmektedir. Mevcut kodlarda dijital işaretler genlikleri göz önüne alındığında ya (1,0) olarak yani tek değerlikli unipolar veya (-1,1) biçiminde bipolar yani çift değerlikli olarak kodlanmışlardır.

Dijital İşaretlerinin Avantajları

- 1.Dijital (sayısal) formattaki işaret saklanabilir ve muhafaza edilebilir. Saklı tutulabildiğinden değiştirilme ve güncellenmesi gibi işlemler mümkündür.
2. Dijital işaret formundaki bilginin sıkıştırılma işlemi kolaydır. Bu şekilde aynı hattan daha fazla bilgi (paket, kanal) gönderilebilir.
3. Dijital işaretler gürültüden daha az etkilenirler, dolayısıyla veri kaybı riski azdır.
4. Dijital işaretler çeşitli kodlayıcı ve kod çözücü (şifreleme-deşifreleme) işlemlerine daha uygundur.
5. Dijital işaretler daha güvenlidir. Çeşitli kodlamalara (şifrelemeye) olan uygunluğu güvenliğini artırır. Bu yolla internet tabanlı bilgi değişimi veya alışverişler daha güvenlidir.
6. Farklı tipteki dijital işaretler veya veriler (audio - video :ses-görüntü) çoğullama yoluyla birleştirilebilir.
7. Sağlanacak dijital platform üzerinde farklı kullanıcılar aynı hat ile birleştirilebilir (video konferans).
8. Dijital işaretleri sağlayacak elektronik devre elemanları ucuzdur.
9. Dijital işaretler yaygın olan fiber optik hatlarla iletilebilir.

ÇOĞULLAMA (MULTIPLEXING)

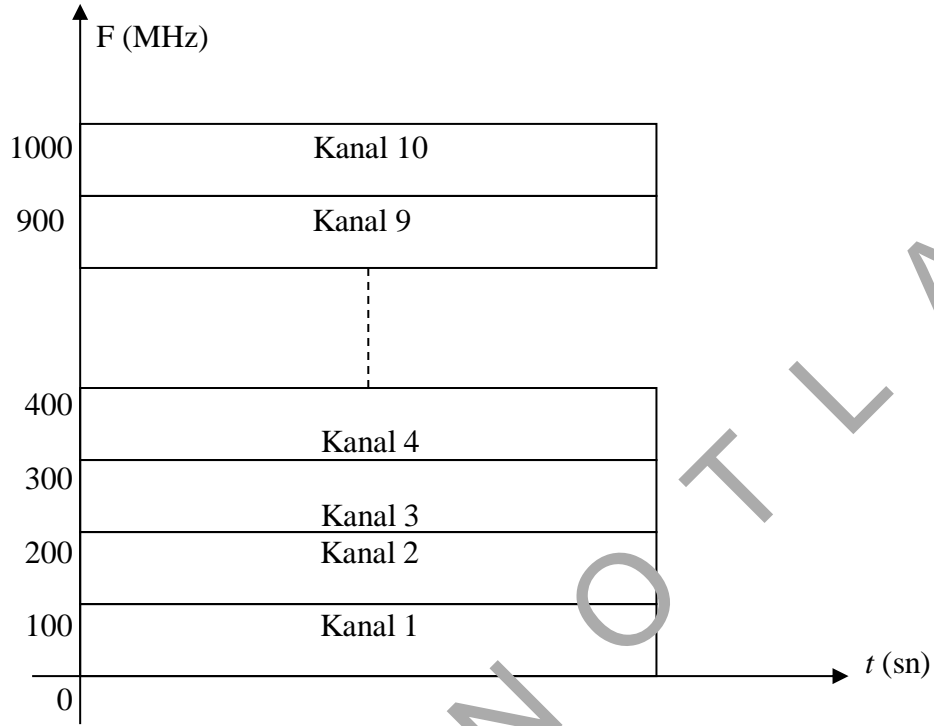
Mevcut iletim ortamının kapasitesinden yararlanarak hem daha fazla veri transferini sağlamak hem de haberleşme açısından aynı anda birden fazla haberleşmeyi mümkün kılmak için çoğullama tekniklerine ihtiyaç duyulur. Çoğullama yardımıyla aynı iletim hattından aynı anda daha fazla bilgi, farklı yapıdaki çok sayıdaki bilgi, aynı anda birden fazla görüşmenin yapılabileceği çok kanallı bir haberleşme ortamı sağlanmaktadır. Bunun için multiplexer ve demultiplexer diye anılan elemanlardan yararlanır.



Bu yaklaşımla aynı anda tek bir hattan çok sayıda kanal oluşturularak çok kanallı haberleşme imkanı elde edilir. Bu yapıdaki çoğullanmış haberleşme teknikleri Frekans Bölmeli Çoğullama (Frequency Division Multiplexing, FDM) ve Zaman Bölmeli Çoğullama (Time Division Multiplexing) olarak ikiye ayrılmaktadır.

Frekans Bölmeli Çoğullama (Frequency-Division Multiplexing, FDM)

FDM olarak bilinen frekans bölmeli çoğullama (frequency division multiplexing, FDM) haberleşme sistemlerinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Aynı kanalın birden fazla eşit büyüklükteki alt kanala bölünerek aynı anda birden fazla kanalla haberleşmenin yapıldığı bir sistemdir. Daha çok analog özellikte olan FDM tekniği bildiğimiz radyo frekans tahsislerinin tipik bir uygulamasıdır. Örneğin dinlemekte olduğumuz FM (frequency modulation) radyo kanallarının her birinin farklı kanalda yayın yapma özelliği FDM lerden gelmektedir. Mevcut bir kanalın toplam bant genişliği eşit kanal büyüklüğündeki (eşit bant genişliği) daha küçük alt kanallara (bandlara) bölünerek aynı anda birden fazla kanaldan yayın yapılması mümkün olmaktadır. Veri haberleşmesinde de bu şekilde oluşturulan alt kanallardan aynı anda veri gönderimi ve alımı sağlanabilmektedir. Bu bölümde FDM tekniğinin işaretleri frekans domeninde düşünerek, spektrumlarını ve spektrum dağılımlarının (frekans dağılımı, tahsisi) Fourier transformasyonu ile üretilmelerini ve değerlendirmelerini incelemeye çalışacağız. Bunun öncesinde bir FDM in basit yapısını göz önüne alalım.

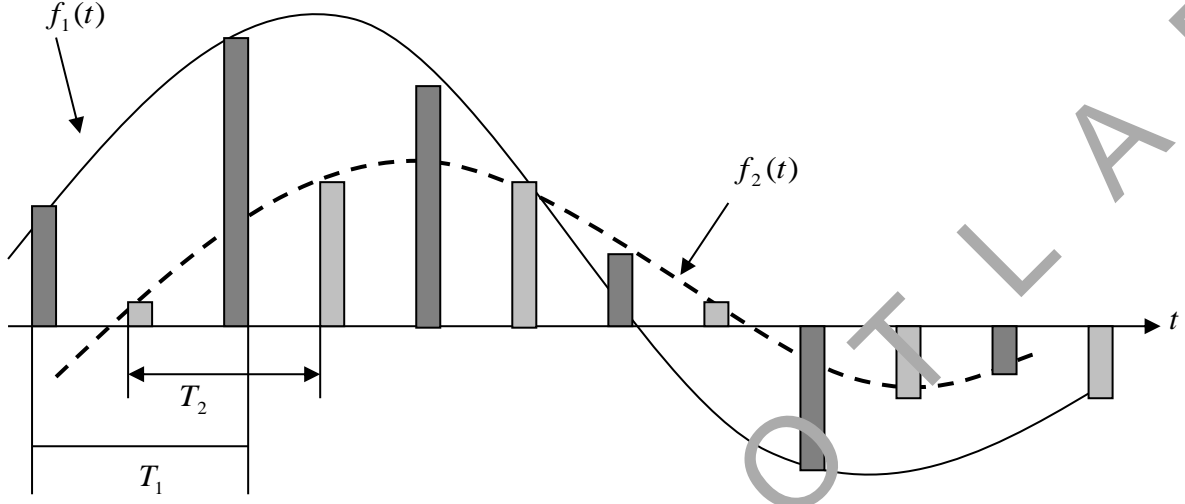


Şekil 26 Frekans Bölmeli Çoğultama (FDM)

Şekilden görüldüğü gibi zaman ekseni sabit kalmak üzere frekans ekseni (düşey) 10 eşit band aralığına bölünmüştür. Böylelikle toplam frekans büyüklüğü yani band genişliği tek bir kanal yerine daha küçük eşit 10 alt banda (kanala) bölünmüştür. Aynı anda 10 kanaldanda bilgi göndermek yani haberleşmek mümkündür. Radyo yayını açısından bakarsak toplam 1000 MHz'lik band genişliği her biri 100 MHz'lik eşit band genişliğine bölünerek toplam 10 alt kanal oluşturulmuştur. Bu şekilde oluşturulan çoklu kanal yapısıyla **aynı anda** (aynı zamanda olması önemlidir) farklı kanallardan yayın yapılma imkanı sağlanmış olmaktadır. Örneğin 0-100 MHz arasında kanal 1, 200-300 MHz arasında Kanal 3 ve 900-1000 MHz arasında ise Kanal 10 yayın yapabilecektir. Şimdi şematize edilen FDM tekniğinin spektrum özelliğini Fourier transformasyonu yardımıyla analiz edebiliriz. Şekil (a), (b) ve (c) de Frekans bölmeli çoğullayıcının genel yapısı verilmiştir.

Örnekleme Teorisi ve Çok Kanallı Haberleşme Sistemleri

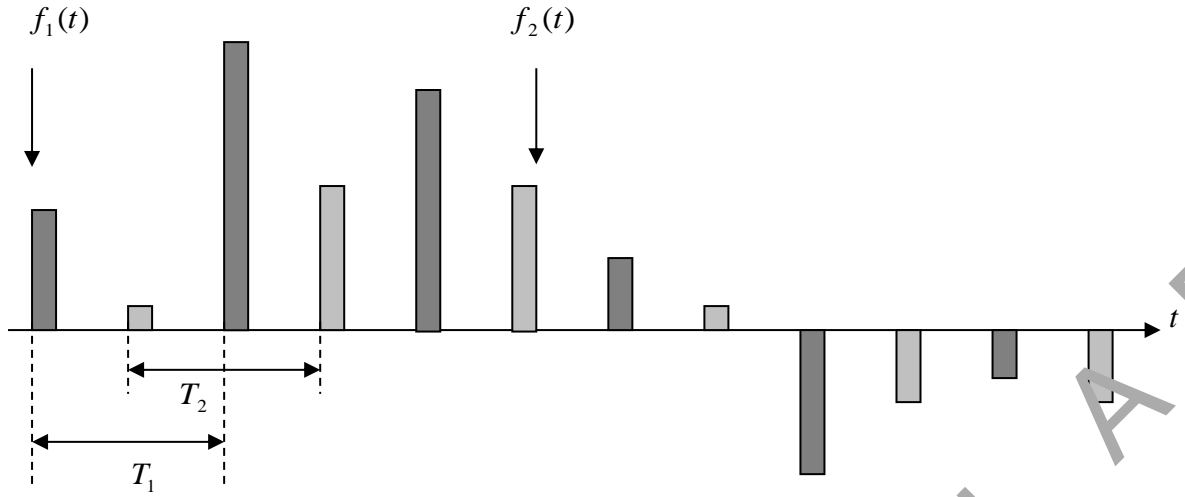
PAM dizisinin elde edilmesini sağlayan farklı işaretlere ait örnekleri göstermek amacıyla iki işaretin göz önüne alındığı aşağıdaki şekil verilmiştir.



Şekil 27 Zaman bölünmeli örnekleme

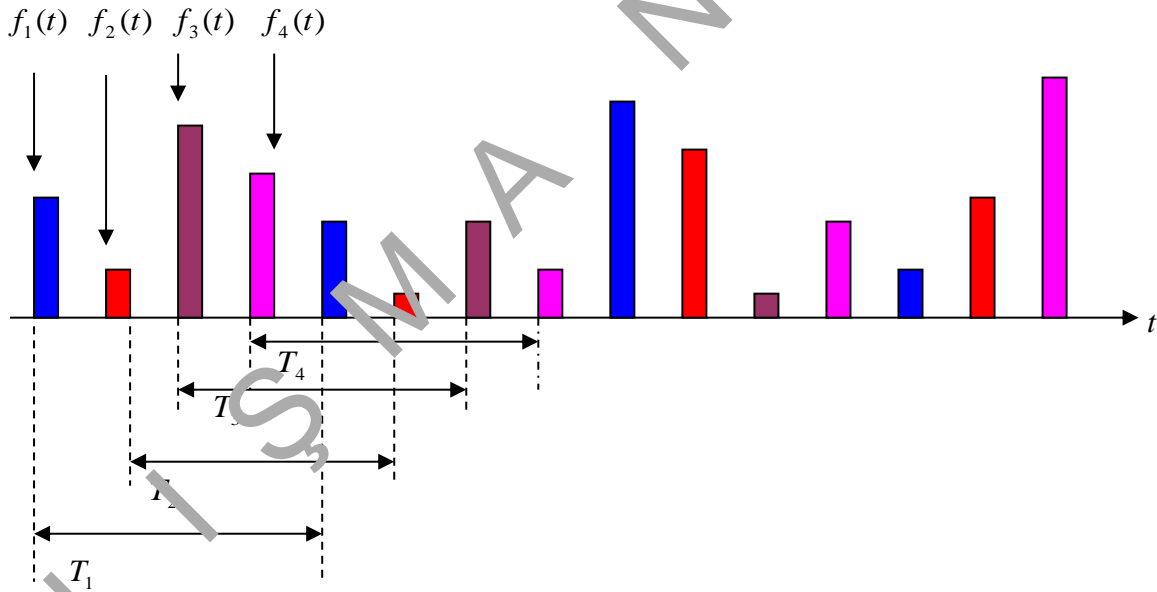
Verilen şekil incelendiği zaman iki işareten oluşan bir zaman bölünmeli örnekleyici görülmektedir. Birinci $f_1(t)$ işareti dörtgen örnekleyici ile T_1 örnekleme perioduna göre, ikinci $f_2(t)$ işareti ise T_2 örnekleme periyodu ile örneklenmektedir. Bu şekilde sonsuz spektrumda farklı iki işarete ait örnekler aralarındaki zaman korunarak spektruma dizilebilmekteler. Pratik açıdan her bir şeklin farklı örnekleyicilerle ayrı ayrı örneklendiği düşünülecektir. Aynı şekilde gösterilmeler yalnızca basitlik açısındanadır.

Her bir işaret “pulse amplitude modulation, PAM (darbe genlikli modülasyon)” ardından veya quantalama ve darbe kod modülasyonlarının (PCM) yapıldığı varsayılarak dijital işaretlere dönüştürüldükten sonra, iletim hattına verilmeye hazır hale getirilirler. Darbe modülasyonlu işaretler, iletim hattının zaman olarak bir bölümünü kullanacakları için darbe modülasyonlu işaretler ve de tipik örneği birden fazla sayıdaki darbe genlik modülasyonlu (PAM) işaretlerin farklı kanal zamanlarıyla TDM tekniğiyle iletilmeleri mümkün olmaktadır. Bu nedenle örnekler uygun yapıda oluşturulduktan sonra, her biri aynı kanaldan TDM ile farklı zamanlarda gönderilebilir. Aşağıdaki şekilde bir TDM kullanılarak iki farklı işarete ait darbe dizilerinin aynı iletim ortamından zaman dönüşümlü (T_1, T_2) iletimleri gösterilmiştir.



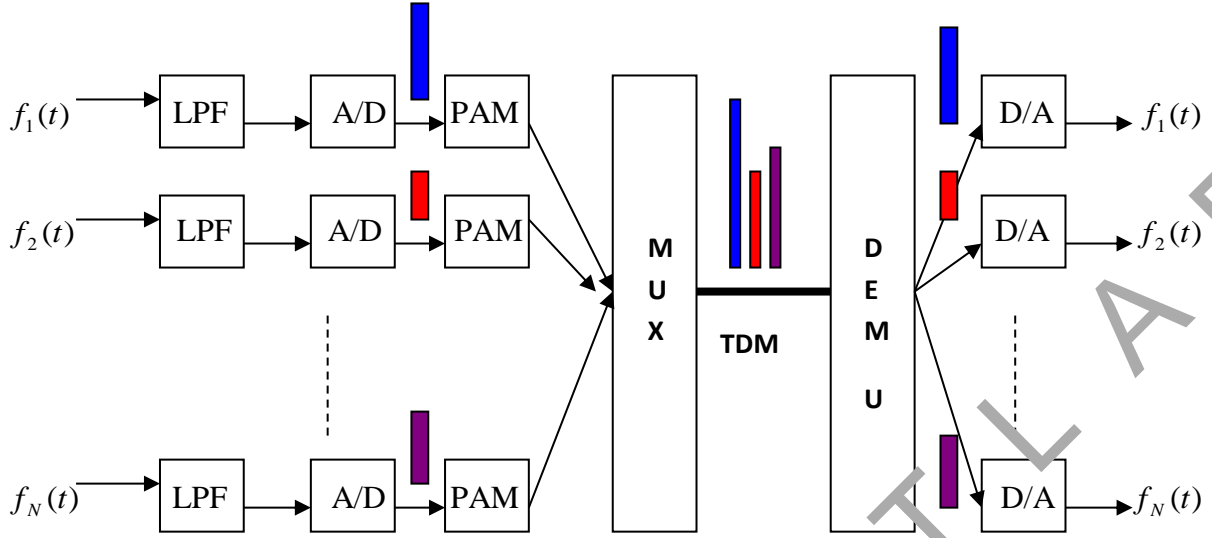
Şekil 28 Zaman bölmeli erişimle (TDM) aynı iletim ortamına iki işaret örneklerinin alınması

Bu yapıda istenirse iki değil daha fazla sayıda işaret aynı şekilde uygun örnekleme frekansları (periodları) kullanılarak TDM ile gönderilebilir. Buna uygun olarak 4 işarete ait bir TDM görünümü aşağıda verilmiştir.



Şekil 29 Zaman bölmeli erişimle (TDM) aynı iletim ortamına dört işaret örneklerinin alınması

Görüldüğü gibi uygun $T_1 - T_4$ örnekleme periodları (frekansları) seçilerek birden fazla işaretin örneklenmiş PAM veya PCM darbe dizileri aynı iletim ortamından $T_1 - T_4$ örnekleme zamanlarına bağlı olarak zaman dönüşümlü bir TDM ile gönderilebilir. Bu yaklaşımla ayarlanması koşuluyla istenirse çok daha fazla işaret örneklenmek suretiyle TDM anahtarlama ile aynı hat üzerinden gönderilebilir. Tüm bu avantajlar örnekleme teorisiyle sağlanmaktadır. Aşağıda örnekleme-TDM haberleşme üzerine kurulu çok kanallı haberleşmenin genel yapısı verilmiştir.



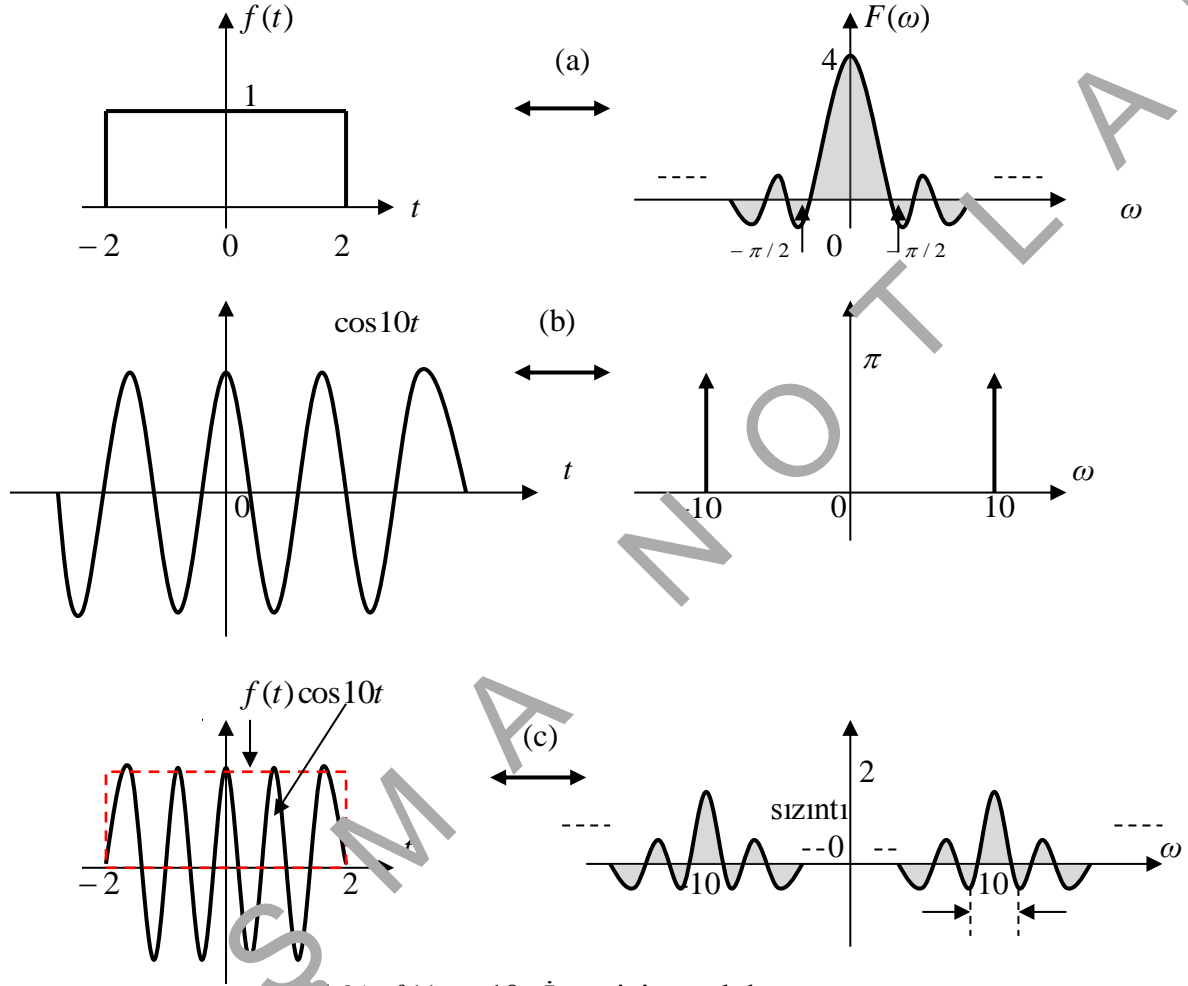
Şekil 30 TDM Çok kanallı iletişim

Görüldüğü gibi $f_1(t), f_2(t), \dots, f_N(t)$ işaretleri başlangıçta örtüşme problemlerini önlemek üzere önfiltreleme olarak birer alçak geçiren filtreden (LPF, low pass filter) geçirildikten sonra A/D (analog/dijital) konvertör yardımıyla örneklenerek oluşturulan PAM veya PCM dizileri bir çoğullayıcı (MUX) ile TDM esasına uygun olarak iletim hattına alınırlar. Bilgi karşı tarafa vardıktan sonra bu kez ters yönde yani çoktan-bire bir çoğullayıcı (DEM U) ile ilgili kullanıcı adreslerine, dijital/analog konvertörlerden geçirilerek gönderilen işaretler olarak teslim edilirler. Günümüz modern sayısal haberleşme sistemlerinin önemli özelliği olan çok kanallı haberleşme, görüldüğü gibi örnekleme tekniğinin avantajlarından yararlanılarak geliştirilmiştir.

SAYISAL MODÜLASYONLAR

Sayısal modülasyonlar ya analog işaretlerle, ya da PCM örneğinde olduğu gibi direkt sayısal işaretlerden elde edilebilmektedirler.

Darbe Modülasyonu

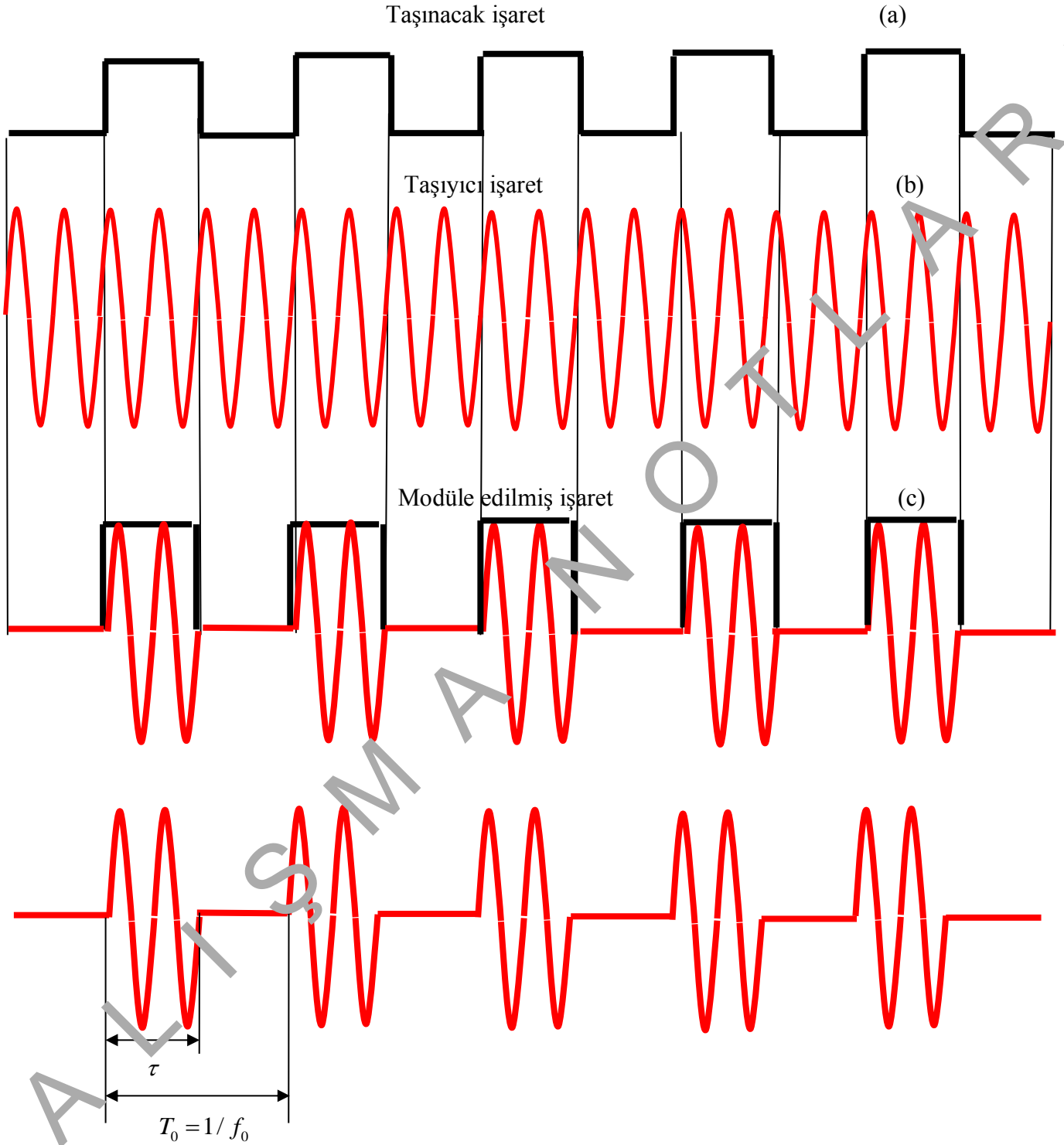


Şekil 31 $f(t)\cos 10t$ İşaretinin modülasyonu

$$f(t) = \text{rec}\left(\frac{t}{4}\right) \rightarrow F\left\{\text{rec}\left(\frac{t}{4}\right)\right\} = 4 \text{sinc}(2\omega) = F(\omega)$$

$$F\{f(t)\cos 10t\} = \frac{1}{2}[F(\omega - \omega_0) + F(\omega + \omega_0)] \\ = \frac{1}{2}[F(\omega - 10) + F(\omega + 10)]$$

Darbe Modülasyonu



Şekil 32 Darbe modülasyonlu dalga : (Genlik kaydırmalı sayısal modülasyon (ASK))

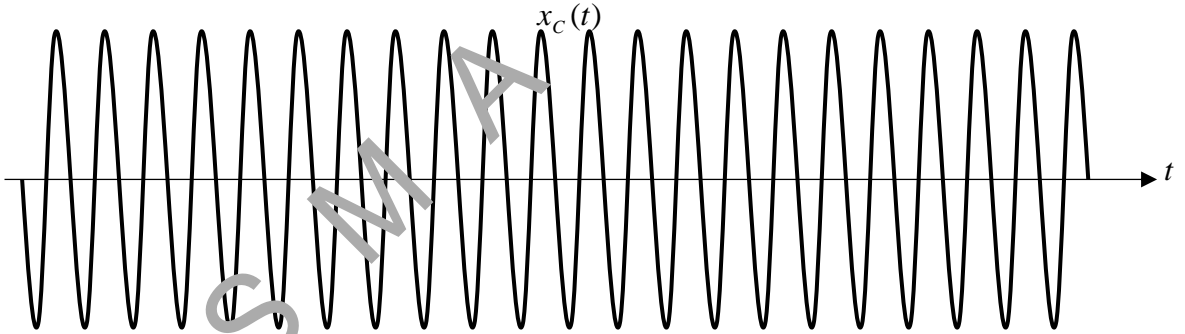
DİJİTAL MODÜLASYONLAR

Dijital veya sayısal modülasyonlar sayısal bilginin analog taşıyıcılar kullanılarak iletimini hedef alır. Analog bir taşıyıcının klasik olarak genlik, frekans ve faz parametreleri dikkate alındığında sayısal bilgi analog bir işaretin bu üç temel parametresinden birinin esas alınmasıyla iletilir. Buna göre analog işaretin genlik, frekans veya fazı sayısal bilgidaki “0” ve “1” leri temsil edecek şekilde değiştirilirse buna dijital modülasyon denilmektedir. Diğer bir deyişle yüksek frekanslı taşıyıcı analog işaretin üç parametresinden herhangi biri sayısal bilgiyi temsil edecek şekilde değişime uğradığında ilgili sayısal modülasyon oluşmaktadır. Veya klasik modülasyon tanımını da yapabiliriz ; sayısal bilginin analog taşıyıcıya bindirilmesi işlemine de modülasyon, daha doğru ifadeyle sayısal modülasyon diyebiliriz.

Sayısal modülasyon için sıfır veya bir sayısal bilgisini göstermek üzere iki değer arasında değişen iki genlik, iki frekans veya iki faz kullanılır. Genlik için tek bir taşıyıcının genliği sıfır veya bir yapılırken, frekans modülasyonunda sıfır ve bir değerlerini göstermek üzere iki frekans (iki farklı frekanstaki işaret) kullanılır. Dijital faz modülasyonu içinde sıfır ve biri göstermek üzere 180 derece fazlı iki faz kullanılır.

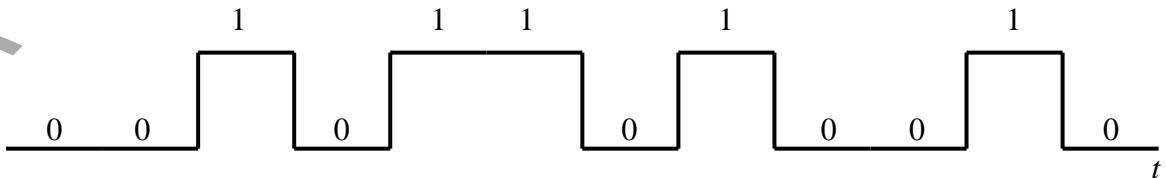
GENLİK KAYDIRMALI ANAHTARLAMA MODÜLASYONU (Amplitude – Shift Keying, ASK)

Taşınan işareti sayısal, taşıyıcısı analog işaretlerden oluşan modülasyon türleridir. Bu modülasyon türlerinde taşıyıcı durumundaki analog işaretin temel genlik, frekans ve faz parametrelerinden herhangi biri sayısal işarete göre module edilmektedir.



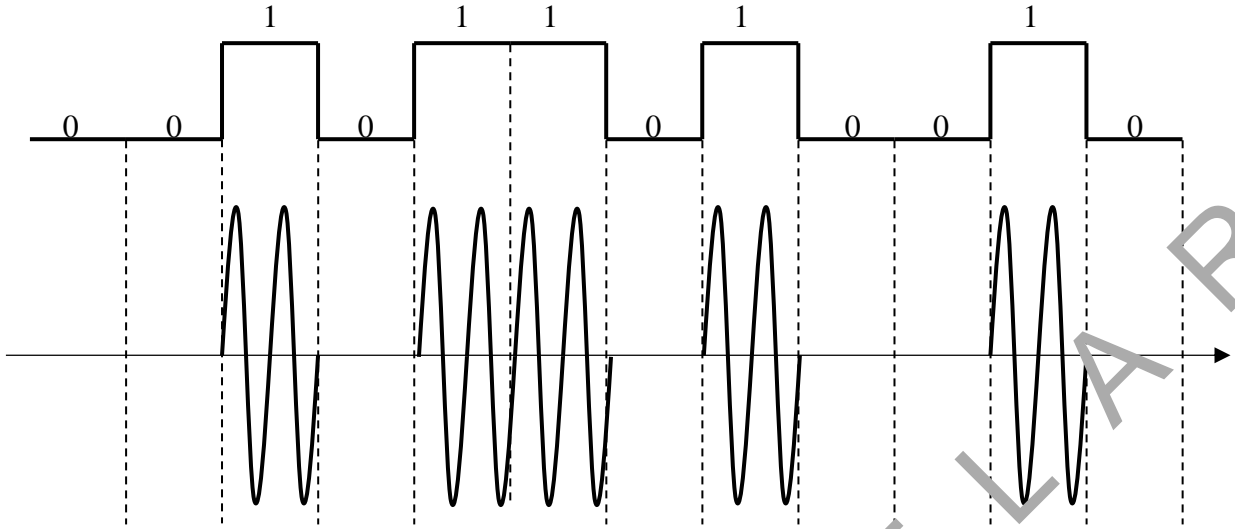
Şekil 33 Analog taşıyıcı işaret

Yukarıda verilen analog özellikli taşıyıcı işaret aşağıda gösterilen “001011010010” içeriğindeki sayısal $m(t)$ işaret ile module edilecektir.



Şekil 34 $m(t)$: Module edici işaret (mesaj işareti)

Böyle bir durumda genlik modülasyonlu darbe aşağıdaki gibi oluşacaktır.



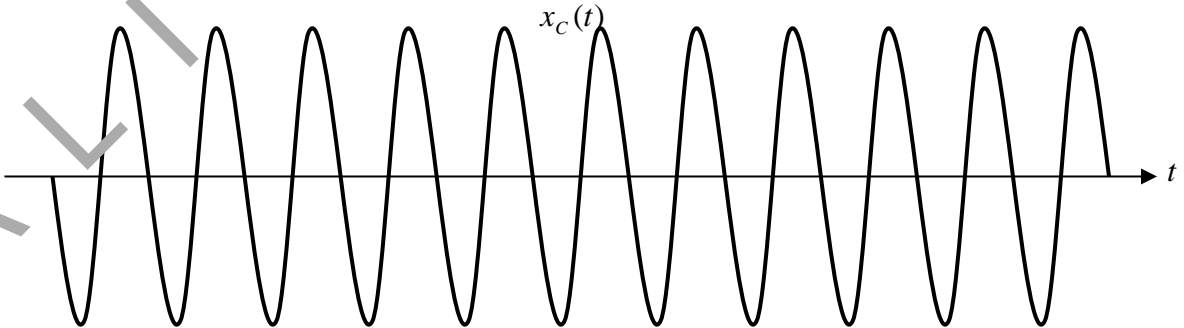
Şekil 35 Darbe modülasyonlu dalga

$$y(t) = m(t)x_c(t) = \begin{cases} A \sin \omega_0 t, & 0 < t \leq T \\ 0 & \text{Diğer} \end{cases}$$

Görüldüğü gibi tek bir işaretin genliğinin, iletilecek sayısal veriye uygun olarak sıfır ve bir yapılarak oluşturulan modülasyon söz konusudur. Kullanılan analog taşıyıcının frekansı (ω_0) ve fazı sabit iken yalnızca sayısal bilgiye göre genliği iki seviye (0,1) arasında değişmektedir.

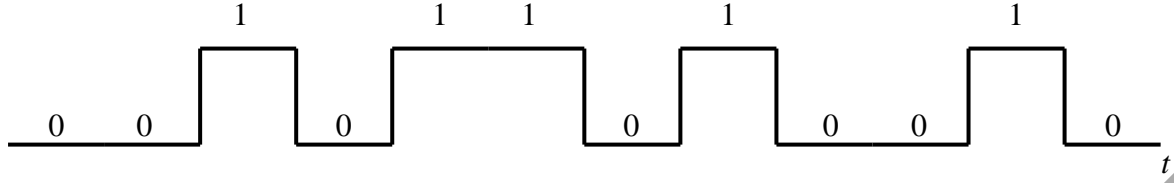
FREKANS KAYDIRMALI ANAHTARLAMA MODÜLASYONU (Frequency – Shift Keying, FSK)

Sayısal frekans modülasyonlu işaretle ilgili olarak analog $x_c(t)$ taşıyıcı işareti aşağıdaki gibi göz önüne alınmıştır.



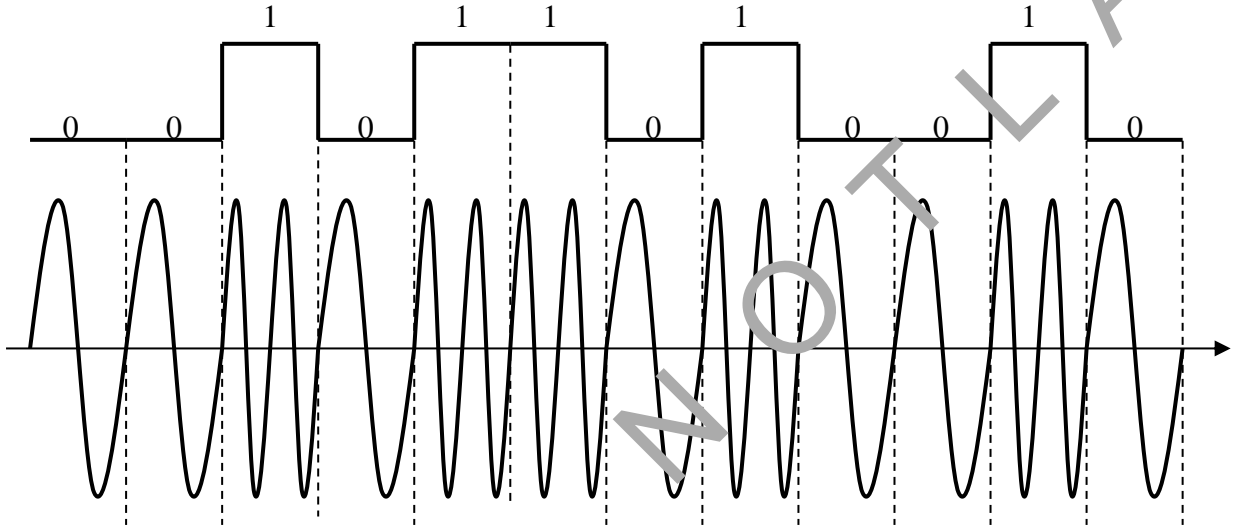
Şekil 36 Taşıyıcı işaret : frekansı modüle edilecek işaret

Bu işareti modüle edecek “001011010010” içerikteki sayısal $m(t)$ işareti aşağıdaki gibi göz önüne alınmıştır.

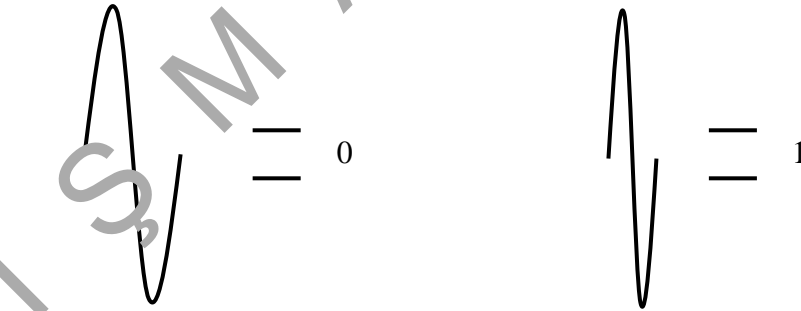


Şekil 37 $m(t)$: Modüle edici işaret (mesaj işareti)

Böyle bir durumda sayısal frekans modülasyonlu dalga aşağıdaki gibi oluşacaktır.



Şekil 38 Frekans modülasyonlu dalga



Şekil 39 Bilginin iki farklı frekanstaki bileşenle gösterimi

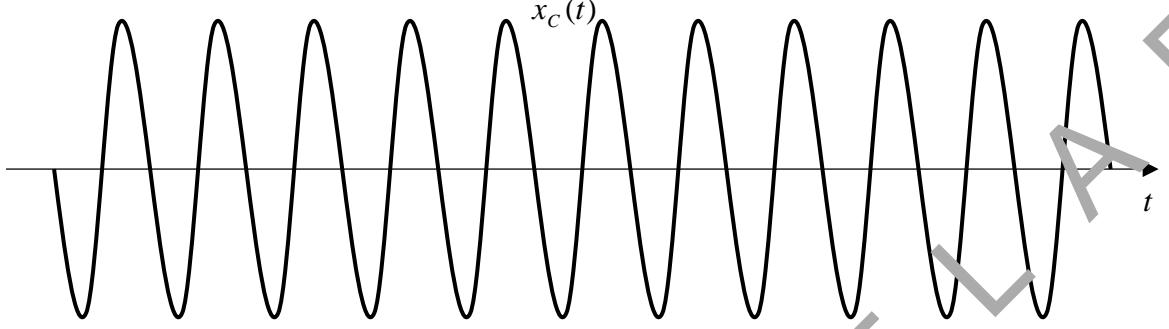
$$y_1(t) = m(t)x_c(t) = \begin{cases} A \sin \omega_0 t, & 0 < t \leq T \\ 0 & \text{Diğer} \end{cases}$$

$$y_2(t) = m(t)x_c(t) = \begin{cases} A \sin \omega_1 t, & 0 < t \leq T \\ 0 & \text{Diğer} \end{cases}$$

Görüldüğü gibi dijital modülasyonda ω_1 ve ω_2 gibi iki farklı frekansa sahip işaretten yararlanılarak modülasyon yapılmaktadır. Frekanslardan biri iletilecek sayısal verideki sıfırı, diğeri ise bir bilgisini göstermektedir.

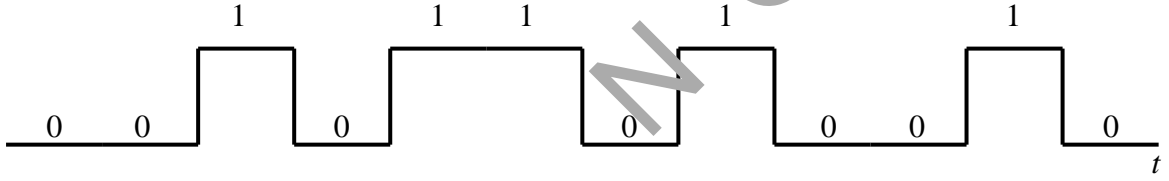
FAZ KAYDIRMALI ANAHTARLAMA MODÜLASYONU
(Phase – Shift Keying, PSK)

Taşıyıcı durumundaki analog $x_c(t)$ işaret aşağıda verilmiştir.



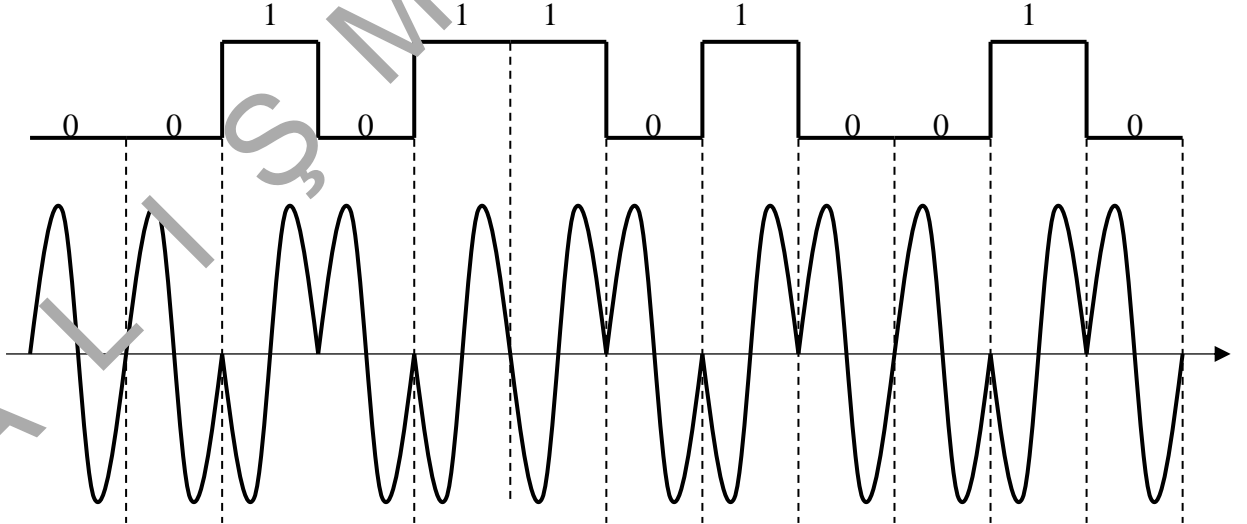
Şekil 40 Taşıyıcı işaret : fazı modüle edilecek işaret

Sayısal .çerikli $m(t)$ modüle edici mesaj işareti “001011010010” formunda aşağıdaki gibidir.

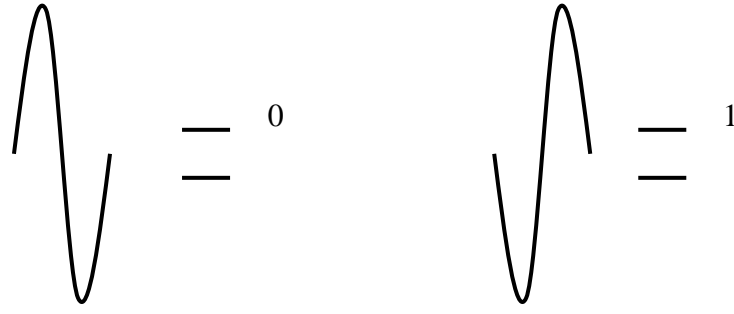


Şekil 41 $m(t)$: Modüle edici işaret (mesaj işareti)

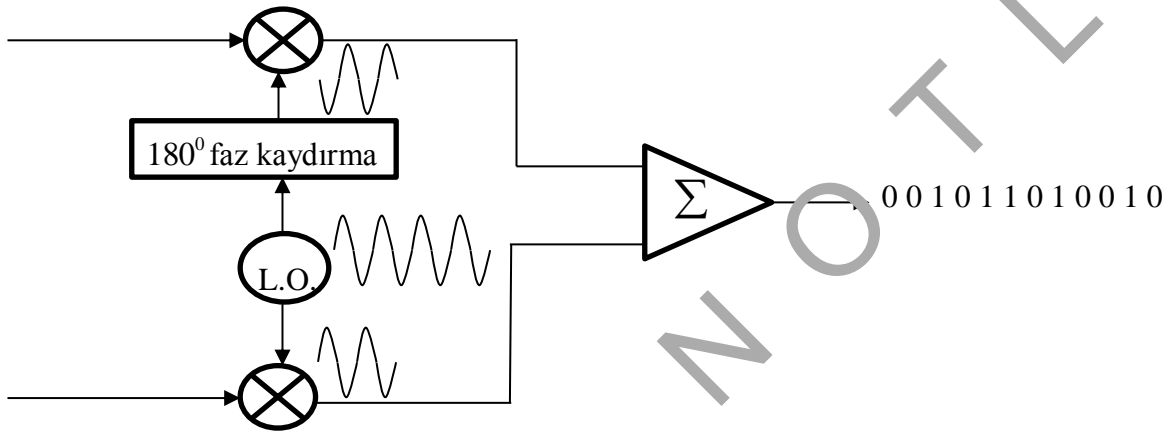
Faz modülasyonu sayısal darbeye aşağıdaki gibi oluşacaktır.



Şekil 42 Faz modülasyonu dalga



Şekil 43 Bilginin 180° faz farklı iki bileşenle gösterimi



L.O. : Lokak Osilatör (frekans üretici)

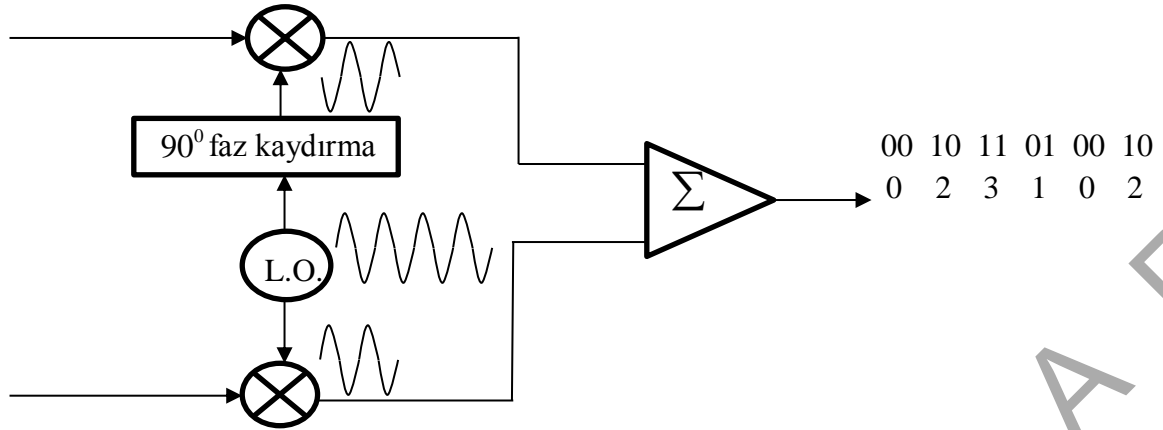
Şekil 44 Faz kaydırmalı sayısal modülasyon

$$y_1(t) = m(t)x_c(t) = \begin{cases} A \sin \omega_0 t, & 0 < t \leq T \\ 0 & \text{Diğer} \end{cases}$$

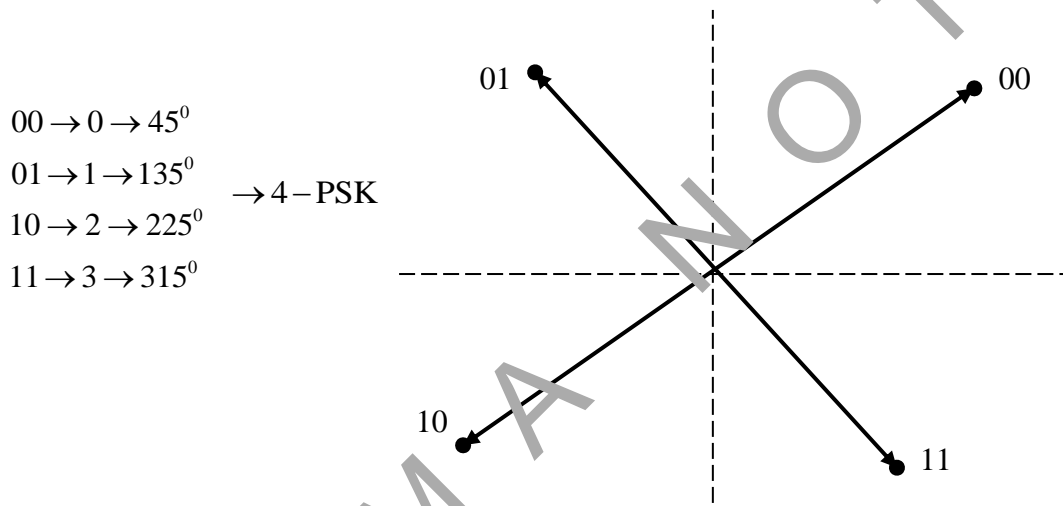
$$y_2(t) = m(t)x_c(t) = \begin{cases} A \sin(\omega_0 t - \pi), & 0 < t \leq T \\ 0 & \text{Diğer} \end{cases}$$

Görüldüğü gibi tek bir taşıyıcı işaretin farklı iki fazı göz önüne alınarak yapılan modülasyon tipidir. Genel manada “ Faz Anahtarlama Modülasyonu (Phase Shift – Keying, PSK) olarak bilinen bu yaklaşım, eğer aynı anda yalnızca bir biti iletmeye uygun 180° faz farkıyla oluşturulursa yapılan sayısal modülasyona “ ikili faz anahtarlama modülasyonu (Binary Phase Shift Keying (BPSK) “ denilmektedir.

olarak göz önüne alındığında toplam dört durumun (0,1,2,3) olduğunu görürüz. Buna göre eğer faz kaydırmalı devre 90^0 kaydırma üzerine geliştirilirse, iki taşıyıcı işaret oluşturulabilir. İki taşıyıcı işaret 90^0 faz farkıyla işlenirse, her bir taşıyıcı iki bit seviyesini göstereceğinden her biri iki bitlik toplamda sistemde dört farklı faz seviyesi söz konusu olur. Sonuçta sistemden iletilecek veriler tek tek bit yerine aynı anda iki bit gönderimini sağlayacaktır.



Şekil 45 Faz kaydırmalı sayısal modülasyon



Şekil 46 90° Faz kaydırmalı PSK

QUADRATUR GENLİK MODÜLASYONU (Quadrature Amplitude Modulation , QAM)

Bu dijital modülasyon, faz modülasyonu (PSK) ve genlik modülasyonunun (ASK) kombinasyonundan oluşan dijital modülasyon biçimidir. Amaç her iki teknikten yararlanarak aynı anda daha fazla sayısal veri iletimini sağlamaktır. Klasik PSK düşünüldüğünde genlik modülasyonu tek veya bir kabul edildiğinde ASK etkisi görülmemektedir. Oysa ki değişken seviyeli iki genlik seviyesi dikkate alındığında her bir faz için gerilim seviyesi kadar da veri söz konusu olacağından, aynı anda PSK ile taşınan verinin iki katı veri iletimi mümkün olacaktır. Eğer 2 – PSK ve iki genlik seviyesi söz konusu olursa aynı anda iletilecek veri sayısı iki katına çıkacaktır (2-QAM). Eğer 4 – PSK ve iki genlik seviyeli ASK kullanılırsa toplam 8 kombinasyon olacağından aynı anda 3 bit gönderilebilir (8-QAM). Benzer biçimde Eğer 8 – PSK ve iki seviyeli ASK kullanılırsa 16 kombinasyondan dolayı aynı anda 4 bit iletimi mümkün olacaktır.

4 – QAM → 1 Genlik 4 Faz → 2 bit

8 – QAM → 2 Genlik 4 Faz → 3 bit

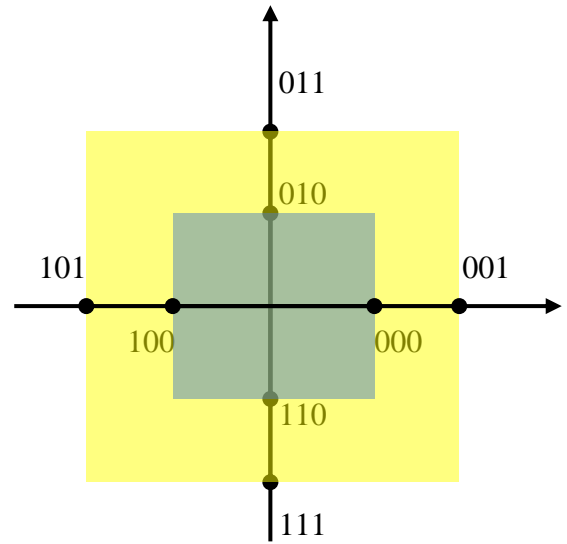
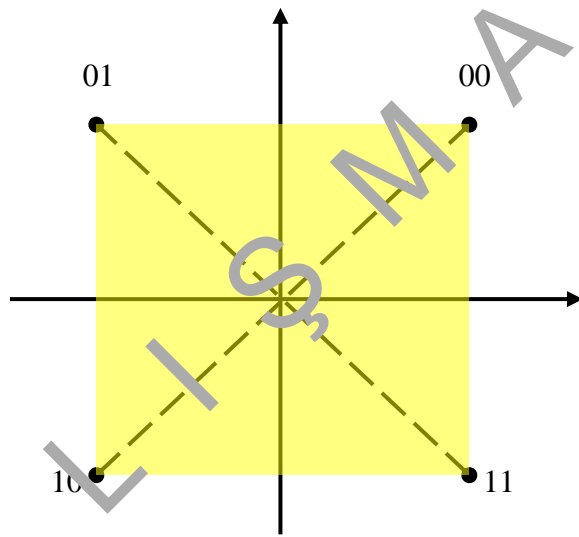
16 – QAM → 2 Genlik 8 Faz → 4 bit

32 – QAM → 4 Genlik 8 Faz → 5 bit

64 – QAM → 6 bit

128 – QAM → 7 bit

Aşağıda aynı anda iki ve 3 bit iletimini sağlayan 4 – QAM ve 8 – QAM diyagramları verilmiştir.



Şekil 47 4 – QAM ve 8 – QAM