

Dr. Sadık YILDIZ

sadikyildiz06@gmail.com

**Gazi Üniversitesi
Elektrik Elektronik Mühendisliği
(Teknoloji Fakültesi)**

2025– ANKARA

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Sezilmesi

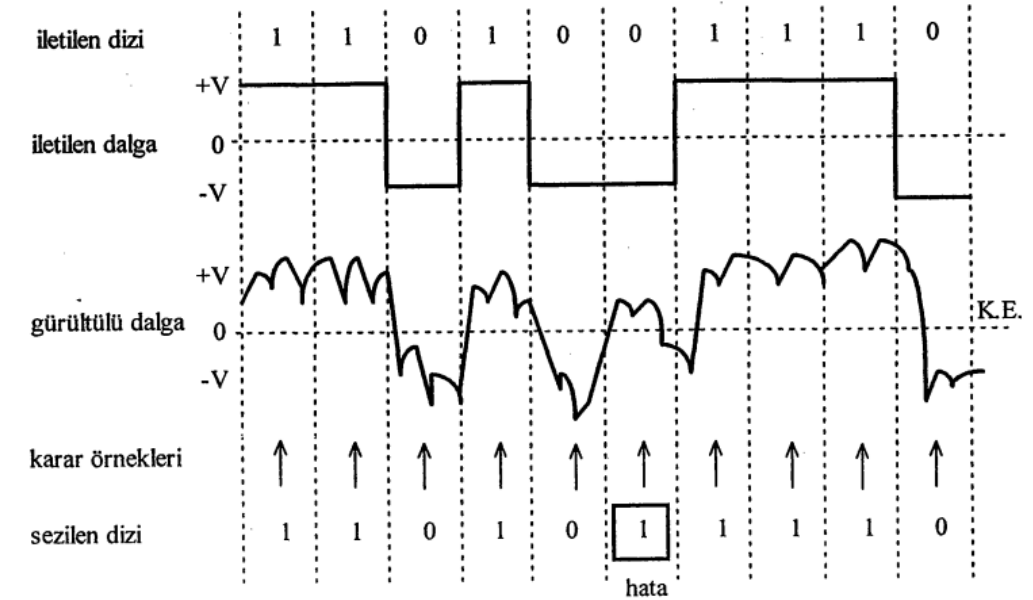
- Verici tarafından iletilmiş olan bilginin alıcıda tekrar oluşturulması işlemi sezme veya algılama olarak adlandırılmaktadır. Sayısal işaretlerin sezilmesi işlemi iki aşamada ele alınabilmektedir:
 1. Her sembol zaman dilimi için alınan darbenin tek bir rakamsal değere indirgenmesi.
 2. Bu değer bir referans değer(ler)i ile karşılaştırılarak hangi sembolün iletildiğine karar verilmesi.
- Haberleşme kanalının bozucu etkileri nedeniyle alıcıda alınan işaret, iletilen işareten farklı olmaktadır.
- Bu nedenle sezme aşamasında, her sembol zaman dilimi için alınan işaretin tek bir rakamsal değere indirgenmesi sayesinde bozucu etkilerden olabildiğince az etkilenilmesi hedeflenmektedir.
- Alınan işaret her sembol için tek bir rakamsal değere indirgendikten sonra, bu değer referans değer veya değerler ile karşılaştırılması sayesinde hangi sembolün iletilmiş olduğuna karar verilmektedir. Bu işlem yapılırken alıcıda olabildiğince az hata yapılması amaçlanmaktadır.
- Haberleşme sistemlerinde rastlanan gürültünün modellenmesi için Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonu iyi bir yaklaşım sunmaktadır.
- Ayrıca, Gauss dağılımı matematiksel olarak modellenabilir ve çözülebilir olduğundan sayısal haberleşme sistemlerinin hata olasılıkları hesabında haberleşme sistemindeki gürültü modellenirken genelde toplanır Gauss gürültüsü kullanılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Sezilmesi

- **4.3.1. Merkez-Noktası Sezicisi**
- Alıcıda her *sembol zaman dilimi* için alınan darbenin *tek bir rakamsal değere indirgenmesi* işlemi işaretin *sembol zaman-dilimi içerisinde* örneklenmesiyle gerçekleştirilebilmektedir.
- *Kanal etkilerinden olabildiğince az etkilenilmesi için*, sembol-zaman dilimi içerisinde tek bir örnek alınacaksa *en iyi örnekleme anı* sembol zaman-diliminin *orta noktası* olmaktadır.
- *Sembol zaman-dilimlerinin orta noktalarında gerçekleştirilen örnekleme* sonucunda her sembol için işaretin tek bir rakamsal değere indirgendiği alıcı yapısı, **merkez-noktası sezici** olarak adlandırılmaktadır.
- Merkez-noktası sezicinin çalışma mantığı Şekil 4.15'de örnek bir bilgi dizisi üzerinde gösterilmektedir.



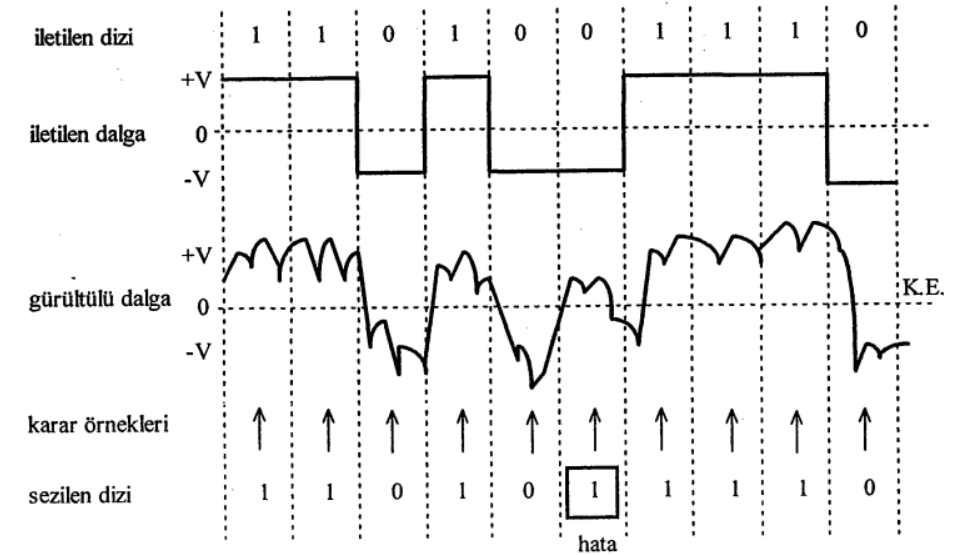
Şekil 4.15. Merkez-noktası sezicinin çalışma mantığı.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

- **4.3.1. Merkez-Noktası Sezicisi**
- Haberleşme kanalında mevcut olan *gürültü nedeniyle alıcıda, vericiden* iletilmiş olan darbelerden farklı bir işaret alınmaktadır.
- **Alıcıda**, her bir zaman diliminde alınan örnek değeri, *karşılaştırmacı* vasıtasıyla bir *referans değer (karar eşiği)* ile karşılaştırılmakta ve bu karşılaştırma sonucuna göre alınan sembole karar verilmektedir.
- Şekil 4.15'de görüldüğü gibi, haberleşme kanalındaki gürültü nedeniyle alıcıda alınan işaret örneği karar eşiğinin diğer tarafına geçtiğinde bir sembollük (ikili iletim için bir bitlik) hata yapılmaktadır.



Şekil 4.15. Merkez-noktası sezicinin çalışma mantığı.

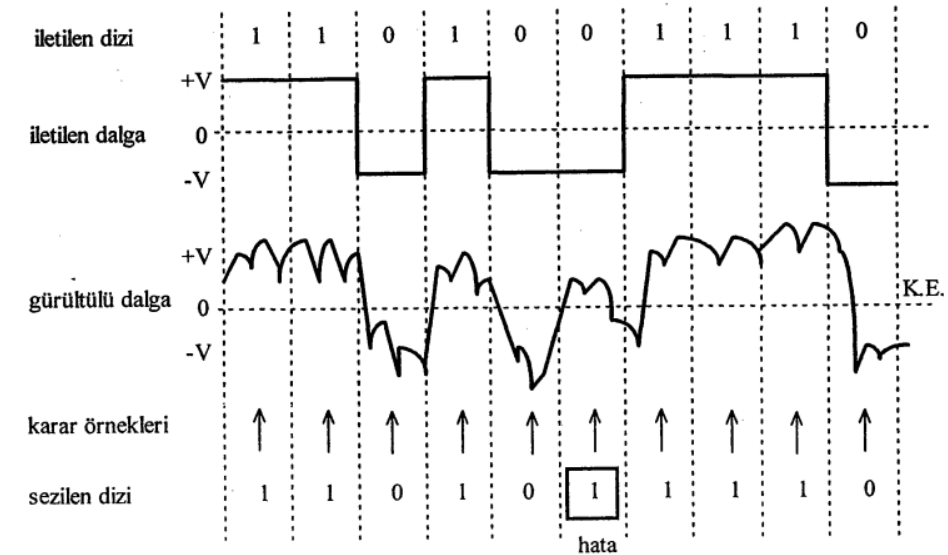
SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.1. Merkez-Noktası Sezicisi

- Yapılan hata miktarı temel olarak *iletim yapılan genlik seviyesi*, *karar eğişinin değeri* ve *kullanılan darbe biçimine* bağlı olmaktadır.
- Bu nedenle tipik olarak iletim için kullanılan *güç miktarı* ile iletim için gerekli *bant genişliği* ve *hata oranı* arasında bir ilişki bulunmaktadır.
- Çoğu zaman haberleşme kanalında mevcut olan gürültü oranına bir etki yapılması mümkün olmadığından *hata miktarının düşürülmesi* istendiğinde *iletim gücü* veya *bant genişliğinden* ödün verilmesi gerekmektedir.



Şekil 4.15. Merkez-noktası sezicinin çalışma mantığı.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

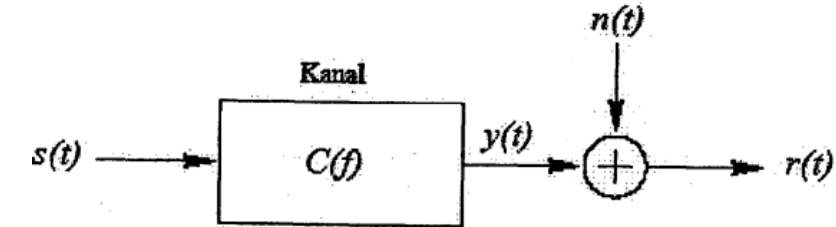
4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

➤ Bir haberleşme kanalı tipik olarak Şekil 4.16'daki gibi modellenenmektedir.

➤ Bu modelde,

- $s(t)$: Verici tarafından iletilen işareti,
- $C(f)$: Kanalin frekans yanıtını,
- $y(t)$: İletilen işarete kanalın etkisi yansıtıldıktan sonra elde edilen işareti,
- $n(t)$: Haberleşme ortamındaki gürültüyü,
- $r(t)$: Alıcıda alınan işareti göstermektedir.



➤ Haberleşme kanalındaki gürültü çoğunlukla toplanır Gauss dağılımlı beyaz gürültü (AWGN) olarak kabul edilmektedir.

➤ Haberleşme kanalının işarete herhangi bir bozucu etkiye sahip olmadığı varsayılarak $y(t) = s(t)$ olarak kabul edilmektedir.

➤ Bu durumda alıcıda alınan işarete, $r(t) = s(t) + n(t)$ şeklinde, sadece haberleşme ortamındaki gürültü etkisi dikkate alınmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

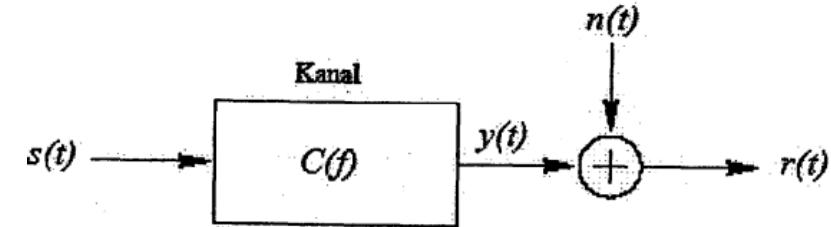
4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

➤ Bir haberleşme kanalı tipik olarak Şekil 4.16'daki gibi modellenenmektedir.

➤ Bu modelde,

- $s(t)$: Verici tarafından iletilen işareti,
- $C(f)$: Kanalin frekans yanıtını,
- $y(t)$: İletilen işarete kanalın etkisi yansıtıldıktan sonra elde edilen işareti,
- $n(t)$: Haberleşme ortamındaki gürültüyü,
- $r(t)$: Alıcıda alınan işareti göstermektedir.



➤ Haberleşme kanalındaki gürültü çoğunlukla toplanır Gauss dağılımlı beyaz gürültü (AWGN) olarak kabul edilmektedir.

➤ Haberleşme kanalının işarete herhangi bir bozucu etkiye sahip olmadığı varsayılarak $y(t) = s(t)$ olarak kabul edilmektedir.

➤ Bu durumda alıcıda alınan işarete, $r(t) = s(t) + n(t)$ şeklinde, sadece haberleşme ortamındaki gürültü etkisi dikkate alınmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

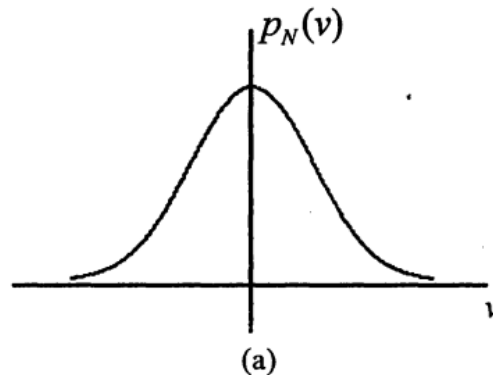
4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Etkin değeri σ olan sıfır ortalamalı Gauss gürültünün olasılık yoğunluk fonksiyonu şu şekilde ifade edilmektedir.

$$P_N(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-v^2/2\sigma^2}$$

- Şekil 4.17(a)'da Gauss gürültüsünün olasılık yoğunluk fonksiyonu gösterilmektedir. Sıfır ortalama nedeniyle, gürültünün etkin değeri standart sapmaya eşit olmaktadır.



SAYISAL HABERLEŞME

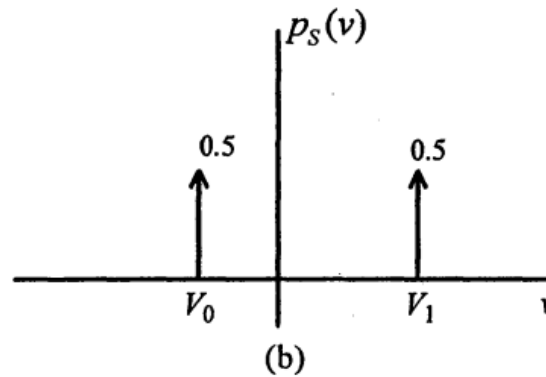
4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Gürültünün, iletme etkisini inceleyebilmek için öncelikle ikili (0 ve 1) iletim durumu ele alınabilmektedir.
- Genel bir ifade için 0 bilgi bitinin V_0 ve 1 bilgi bitinin V_1 seviyelerinden iletildiği kabul edilebilmektedir.
- Her iki bilgi bitinin üretilme ve iletilme olasılığı eşit kabul edildiğinde, her iki gerilim seviyesinden iletim yapılma olasılığı eşit olmaktadır: $P(V_0) = P(V_1) = 0.5$.
- Bu durumda iletilen işaretin olasılık yoğunluk fonksiyonu, Şekil 4.17(b)'de gösterildiği gibi, V_0 ve V_1 gerilim değerlerinde tanımlı, 0.5 genliğinde dürtüler şeklinde oluşmaktadır.
- Dolayısıyla ikili iletim için iletilen işaretin olasılık yoğunluk fonksiyonu şu şekilde ifade edilir.

$$P_S(v) = 0.5\delta(v - V_0) + 0.5\delta(v - V_1)$$



SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

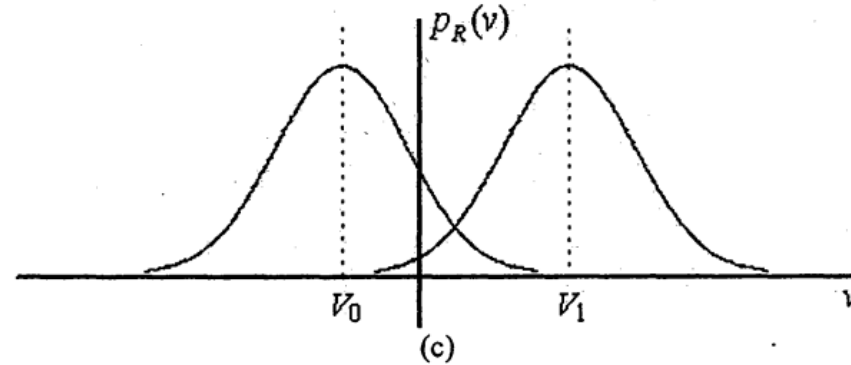
4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Haberleşme kanalında sadece toplanır beyaz Gauss gürültüsünün etkisi dikkate alındığında alıcıda alınan işaret, iletilmiş olan ikili işaret ile Gauss gürültüsünün toplamına eşit olmaktadır:

$$r(t) = s(t) + n(t).$$

- Doğal olarak iletilen işaret ile gürültü işareti birbirinden bağımsızdır.
- Bağımsız işaretler (veya raslantı değişkenleri) toplandığı taktirde oluşan işaretin olasılık yoğunluk fonksiyonu, her iki işaretin olasılık yoğunluk fonksiyonlarının **konvolüsyonuna** eşit olmaktadır.
- Bu nedenle alıcıda alınan işaretin olasılık yoğunluk fonksiyonu Şekil 4.17(c)'de gösterildiği gibi oluşmaktadır.



Şekil 4.17. Haberleşme sisteminde işaret olasılık yoğunluk fonksiyonları.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Alıcıda alınan işaretin olasılık yoğunluk fonksiyonu şu şekilde ifade edilir.

$$P_R(v) = P_S(v) * P_N(v) = 0.5 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-V_0)^2}{2\sigma^2}} + 0.5 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-V_1)^2}{2\sigma^2}}$$

- Koşullu olasılık kullanılarak 0 bilgi sembolü iletildiğinde alıcıda gözlenen olasılık yoğunluk fonksiyonu $P_R(v|V_0)$
- 1 bilgi sembolü iletildiğinde ise alıcıda gözlenen olasılık yoğunluk fonksiyonu $P_R(v|V_1)$ şeklinde gösterilebilmektedir.
- Bu durumda alıcıda elde edilen işaretin koşullu olasılık yoğunluk fonksiyonları şu şekilde ifade edilir.

$$P_R(v|V_0) = 0.5 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-V_0)^2}{2\sigma^2}}$$

$$P_R(v|V_1) = 0.5 \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-V_1)^2}{2\sigma^2}}$$

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Alıcıda alınan işaret seviyesi, iletilen seviyeden farklı olabilir ve bu durum olasılık yoğunluk fonksiyonundan görülebilir.
- Alıcı, alınan seviyeye göre hangi sembolün iletildiğini belirlemek için **karar eşiği** kullanır.
- **Karar Eşiği ve Hata Oluşumu:**
 - Alıcı, algılanan değeri karar eşiğiyle karşılaştırarak sembolü belirler.
 - Gürültü nedeniyle işaret seviyesi yanlış tarafta kalırsa, sembol hatası oluşur.
 - **0 biti** gönderildiğinde ve alınan işaret karar eşiğinin sağında kalırsa, **1 biti** olarak yanlış algılanır.
 - **1 biti** gönderildiğinde ve alınan işaret karar eşiğinin solunda kalırsa, **0 biti** olarak yanlış algılanır.
- **Toplam Hata Olasılığı:**
 - Hata olasılığı, **$P(h/V_0)$** (0 biti gönderildiğinde hata) ve **$P(h/V_1)$** (1 biti gönderildiğinde hata) ile gösterilir.
 - **Toplam hata olasılığı**, toplam olasılık teoremi ile hesaplanır

$$P(h) = P(h|V_0)P(V_0) + P(h|V_1)P(V_1)$$

Burada;

$P(h|V_0)$: 0 biti gönderildiğinde hata meydana gelme olasılığı

$P(h|V_1)$: 1 biti gönderildiğinde hata meydana gelme olasılığı

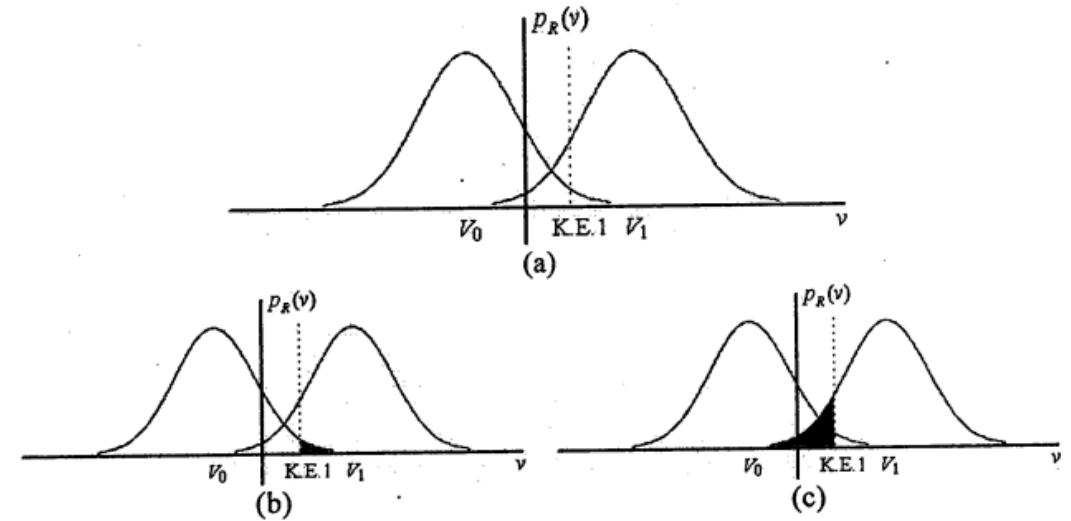
Haberleşme sisteminin başarımını artırmak için **toplam hata olasılığının** en düşük seviyede tutulması gerekmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Sezilmesi

- **4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı**
- Haberleşme sisteminin başarımını artırmak için **toplam hata olasılığının** en düşük seviyede tutulması gerekmektedir.
- $P(V_0) = 0.5$ için 0 biti gönderildiğindeki hata olasılığı, Şekil 4.18(b)'de gösterilen alana eşit olmaktadır.
- $P(V_1)=0.5$ için hata olasılığı Şekil 4.18(c)'de gösterilen alana eşit olmaktadır.
- Bu durumda toplam hata olasılığı, gerekli ölçekleme yapılmış olduğundan, Şekil 4.18(b) ve Şekil 4.18(c)'de gösterilen iki alanın toplamına eşit olmaktadır.



Şekil 4.18. Örnek bir karar eşiği ve hata olasılıkları.

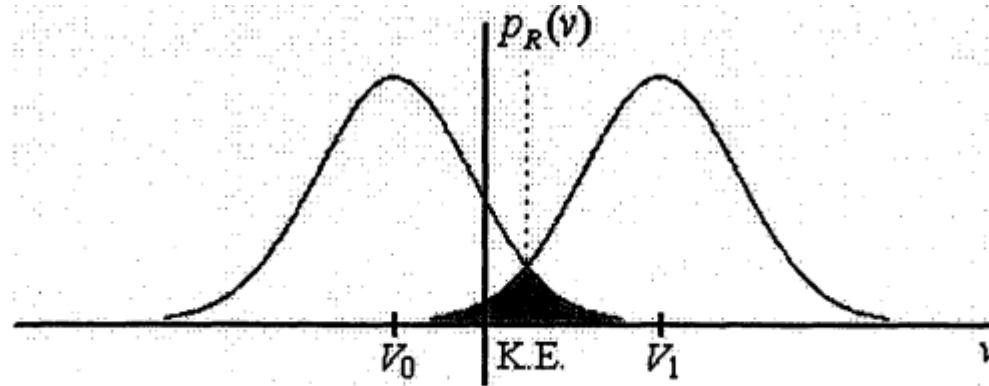
SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Toplam hata olasılığının en düşük olduğu karar eşiği, sağ ve sol olasılık yoğunluk fonksiyonu eğrilerinin kesiştiği nokta olmaktadır.
- Sağ ve sol olasılık yoğunluk fonksiyonu eğrilerinin kesiştiği nokta karar eşiği olarak alındığında her iki alanın toplamı en düşük değerini almaktadır.



Şekil 4.19. En iyi karar eşiği ve hata olasılıkları.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

- **4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı**
- Her iki sembol, eşit olasılıklı olarak kabul edildiğinde, sağ ve sol olasılık yoğunluk fonksiyonu eğrileri simetrik olmakta ve iki eğri tam orta noktada kesişmektedir.
- Bu nedenle, eşit olasılıklı semboller için en iyi karar eşiği iletim yapılan seviyelerin orta noktası olarak bulunmaktadır

$$K.E. = \frac{V_0 + V_1}{2}$$

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Alternatif olarak kesişim noktasında her iki eğrinin aynı değere sahip olması gerektiği özelliği kullanıldığında

$$P(h|V_0)P(V_0) = P(h|V_1)P(V_1)$$

$$P(V_0) \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-V_0)^2}{2\sigma^2}} = P(V_1) \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-V_1)^2}{2\sigma^2}}$$

$$P(V_0) = P(V_1) = 0.5 \text{ için}$$

$$e^{-\frac{(v-V_0)^2}{2\sigma^2}} = e^{-\frac{(v-V_1)^2}{2\sigma^2}}$$

$$(K.E. - V_0)^2 = (K.E. - V_1)^2 \rightarrow V_0 = V_1$$

$$K.E. = \frac{V_0 + V_1}{2}$$

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Alternatif olarak kesişim noktasında her iki eğrinin aynı değere sahip olması gerektiği kullanıldığında

$$P(h|V_0) = \int_{K.E.}^{\infty} P_R(v|V_0)dv = \int_{(V_0+V_1)/2}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-V_0)^2}{2\sigma^2}} dv$$

$$P(h|V_1) = \int_{-\infty}^{K.E.} P_R(v|V_1)dv = \int_{-\infty}^{(V_0+V_1)/2} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-V_1)^2}{2\sigma^2}} dv$$

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Alternatif olarak kesişim noktasında her iki eğrinin aynı değere sahip olması gerektiği kullanıldığında

$$P(h|V_0) = \int_{K.E.}^{\infty} P_R(v|V_0)dv = \int_{(V_0+V_1)/2}^{\infty} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-V_0)^2}{2\sigma^2}} dv$$

$$P(h|V_1) = \int_{-\infty}^{K.E.} P_R(v|V_1)dv = \int_{-\infty}^{(V_0+V_1)/2} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(v-V_1)^2}{2\sigma^2}} dv$$

- Hata olasılıklarını veren bu denlemlerdeki integrallerin doğrudan analitik çözümü yapılmaktadır.
- Bu nedenle hata hesabı için sıfır ortalama ($\mu = 0$) ve birim standart sapma ($\sigma = 1$) parametrelerine sahip standart Gauss eğrisinin altındaki alanı veren, değerleri matematiksel tablolarda mevcut olan $\Phi(z)$ veya $Q(z)$ fonksiyonları kullanılır

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-x^2/2} dx = 1 - Q(z)$$

$$Q(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_z^{-\infty} e^{-x^2/2} dx$$

$$\Phi(z) = 1 - Q(z)$$

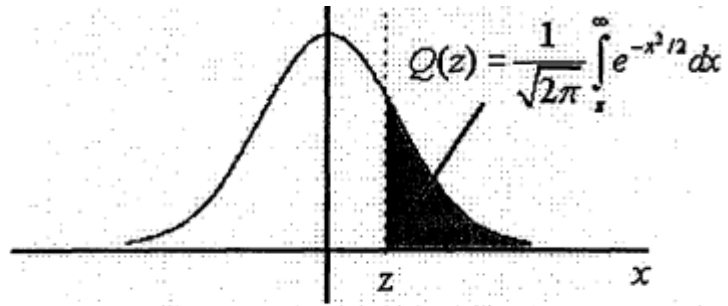
$$Q(z) = 1 - \Phi(z)$$

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı



Şekil 4.20. $Q(z)$ fonksiyonu.

$Q(z)$										
z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2168	0.2148
0.8	0.2169	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010
3.1	0.0010	0.0009	0.0009	0.0009	0.0008	0.0008	0.0008	0.0008	0.0007	0.0007
3.2	0.0007	0.0007	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005
3.3	0.0005	0.0005	0.0005	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0004	0.0003
3.4	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0002

Tablo 4.2. $Q(z)$ fonksiyonunun bazı değerleri.

SAYISAL HABERLEŞME

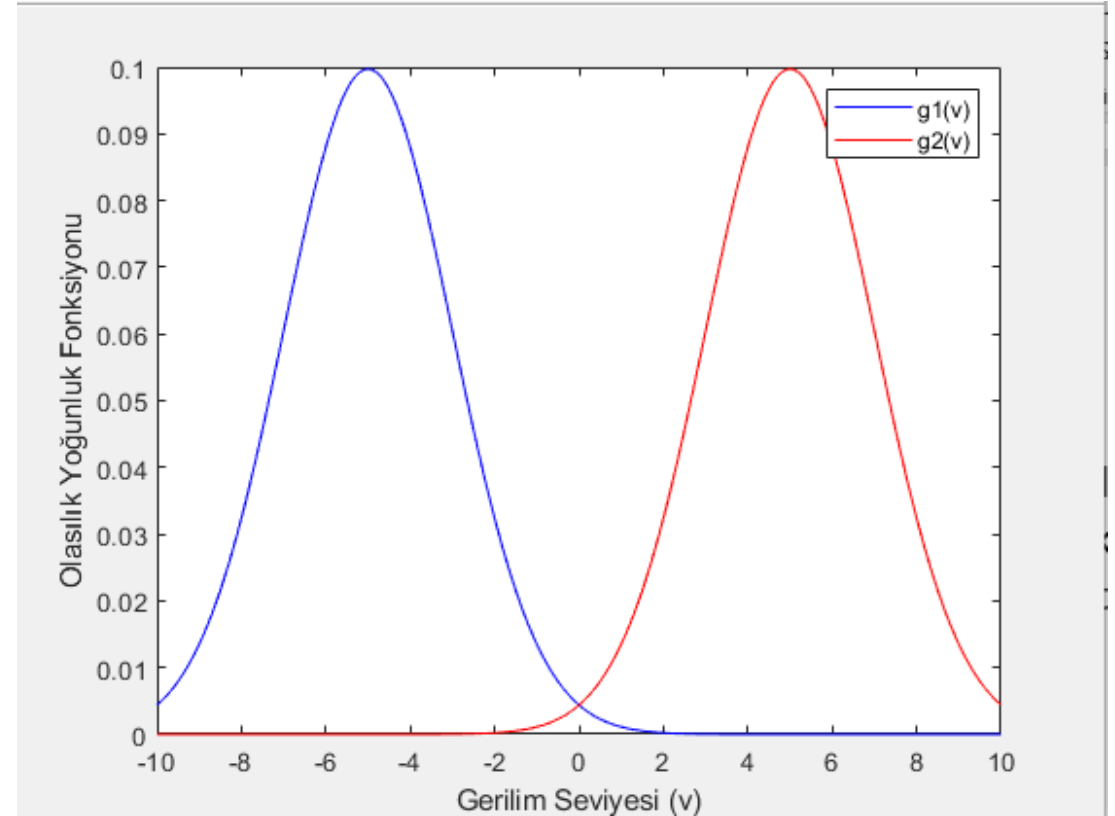
4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.2. İkili İşaretlemede Sezme Hata Olasılığı

- **Örnek 4.14:** Sayısal bir tabanbant iletim sisteminde -5V, +5V seviyelerinden kutuplu iletim yapılmaktadır. Haberleşme ortamında 2V etkin değere sahip Gauss gürültüsü bulunmaktadır. Alıcıda alınan işaretin olasılık yoğunluk fonksiyonunu çizerek en iyi karar eşiğini ve bu eşik kullanıldığı taktirde oluşan hata olasılığını bulunuz.

```
1 - P0 = 0.5; P1 = 0.5; % Eşit olasılıklı semboller
2 - V0 = -5; V1 = 5; % İletim seviyeleri
3 - sigma = 2; % Gürültünün standart sapması
4 - v = -10:0.1:10; % Gerilim seviyeleri
5
6 - % Gauss olasılık yoğunluk fonksiyonları
7 - g1 = P0 * (1 / (sigma * sqrt(2 * pi))) * exp(-(v - V0).^2 / (2 * sigma^2));
8 - g2 = P1 * (1 / (sigma * sqrt(2 * pi))) * exp(-(v - V1).^2 / (2 * sigma^2));
9
10 - % Grafik çizdirme
11 - plot(v, g1, 'b'); hold on;
12 - plot(v, g2, 'r');
13 - xlabel('Gerilim Seviyesi (v)');
14 - ylabel('Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu');
15 - legend('g1(v)', 'g2(v)');
16
17 - % İki eğrinin kesişim noktasını belirleme
18 - fark = abs(g1 - g2);
19 - kesme_deger = min(fark);
20 - kesme_an = find(fark == kesme_deger, 1); % İlk bulunan değeri al
21 - KE = v(kesme_an); % Karar eşiği
22
23 - % Hata olasılıklarının hesaplanması
24 - Ph0 = 0.5 * erfc(abs(V0 - KE) / (sqrt(2) * sigma)); % 0 biti gönderildiğinde hata
25 - Ph1 = 0.5 * erfc(abs(V1 - KE) / (sqrt(2) * sigma)); % 1 biti gönderildiğinde hata
26 - Ph = P0 * Ph0 + P1 * Ph1; % Toplam hata olasılığı
27 - disp(['Karar Eşiği (KE): ', num2str(KE)]);
28 - disp(['Toplam Hata Olasılığı (Ph): ', num2str(Ph)]);
```



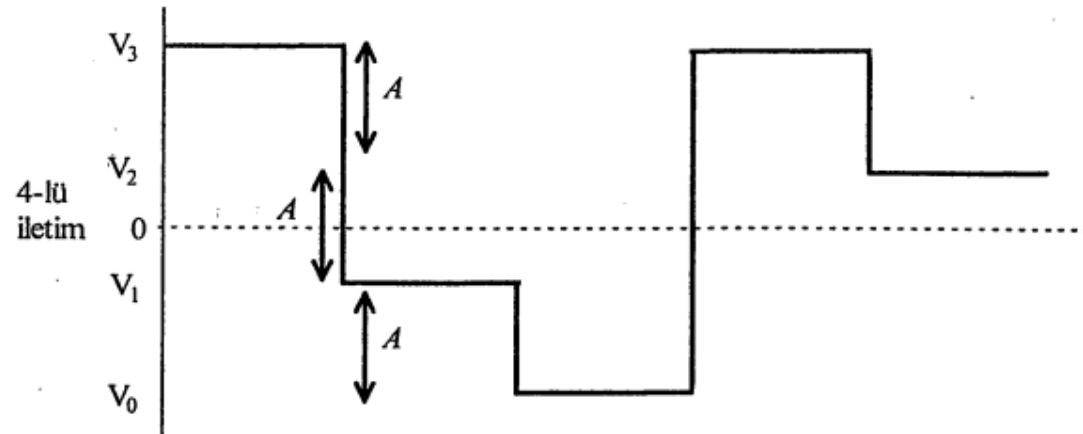
SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

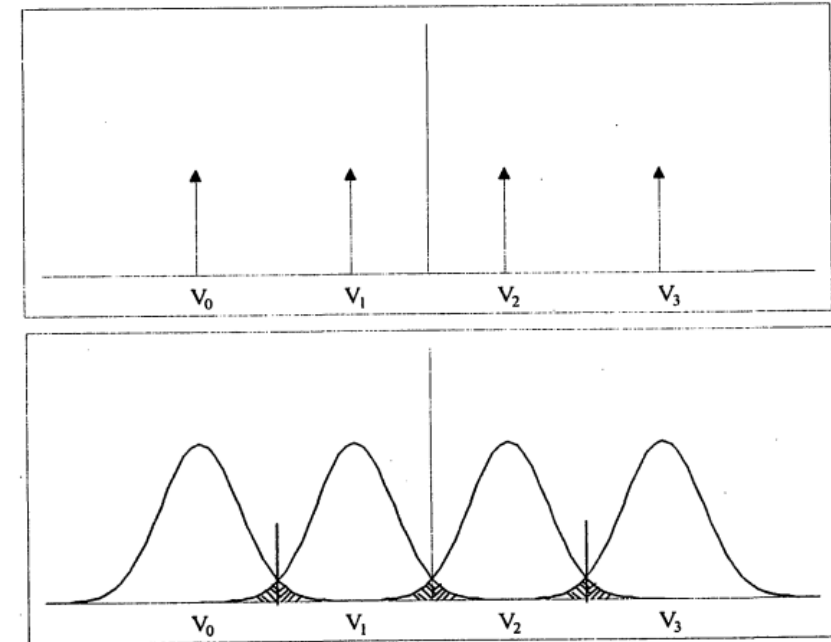
4.3. Tabanbant İşaretlerinin Sezilmesi

➤ 4.3.3. Çok-seviyeli İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Şekil 4.23'de gösterilen örnek dörtlü (4-lü) işaretleşme için, iletilen işaretin ve gürültüye maruz kalmış işaretin olasılık yoğunluk fonksiyonları Şekil 4.24'te gösterilmektedir.



Şekil 4.23. Darbe seviyeleri arasındaki mesafe A ile gösterilen 4-lü iletim.



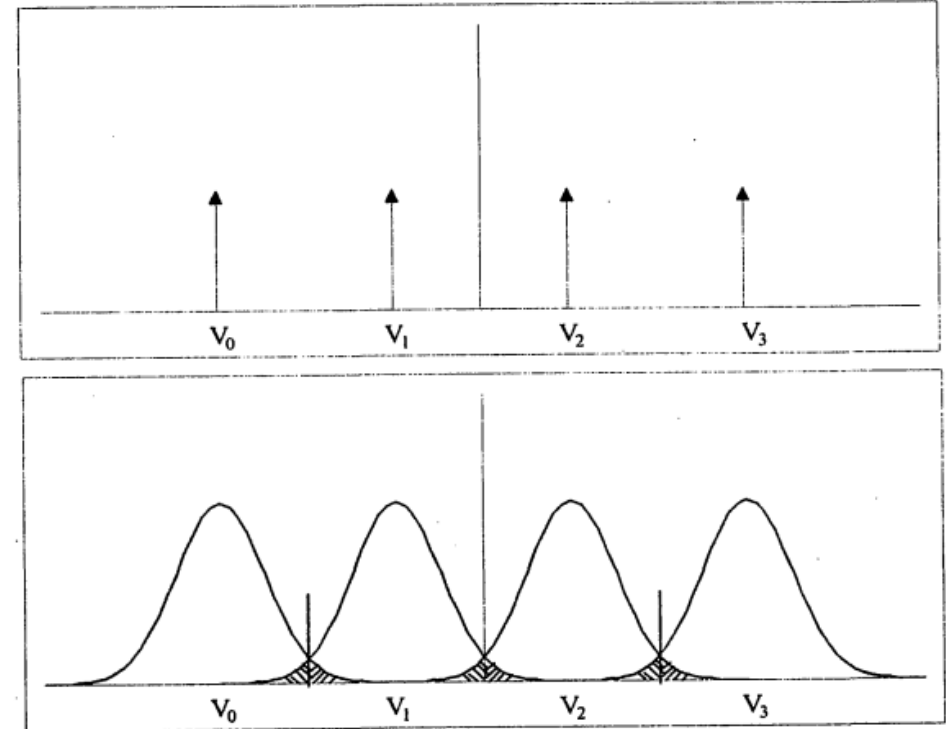
Şekil 4.24. 4-lü iletim için iletilen işaret (üstte) ve gürültüye maruz kalmış alınan işaret (altta) olasılık yoğunluk fonksiyonları.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Sezilmesi

- **4.3.3. Çok-seviyeli İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı**
- Görüldüğü gibi çok-seviyeli iletimde içte kalan sembol seviyeleri için (en dıştaki 2 seviye hariç) her iki taraftan (sağ ve sol taraflardan) hata olasılığı oluşmaktadır.
- İletim seviyeleri arasındaki mesafe A ile gösterildiğinde, içeride kalan seviyeler için hata olasılığı ikili işaretleşmede tek taraf için gösterilen hata olasılığının *iki katına eşit* olmaktadır.
- Bunun nedeni *gürültünün*, aradaki işaret seviyelerinde bulunan değerler için işaretin *hem üst seviyeye çıkmasına hem de alt seviyeye inmesine* yol açabilmesidir.



Şekil 4.24. 4-lü iletim için iletilen işaret (üstte) ve gürültüye maruz kalmış alınan işaret (altta) olasılık yoğunluk fonksiyonları.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Sezilmesi

➤ 4.3.3. Çok-seviyeli İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Çok-seviyeli M -li işaretleşmede, içte kalan $M-2$ adet seviye için her bir seviyenin hata olasılığı ikili işaretleşmedeki bir seviyenin hata olasılığının iki katına eşit olmaktadır ve şu şekilde bulunmaktadır.

$$P(h)_{M-li} | \text{içerideki seviyeler} = 2P(h)_{ikili}$$

- En dışta kalan seviyeler için ise tek taraflı hata olasılığı gerçekleştiğinden, M -li işaretleşmede en dışta kalan 2 adet seviye için her bir seviyenin hata olasılığı ikili işaretleşmedeki bir seviyenin hata olasılığına eşit olmaktadır ve şu şekilde bulunmaktadır

$$P(h)_{M-li} | \text{dıştaki seviyeler} = P(h)_{ikili}$$

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.3. Çok-seviyeli İşaretleşmede Sezme Hata Olasılığı

- Eşit olasılıklı semboller kabul edildiğinde, 2 adet dış ve M-2 adet iç seviyenin her biri 1/M olasılıkla gözükeneğinden, çok-seviyeli iletim için toplam hata olasılığı şu şekilde bulunur

$$P(h)_{M-li} = \frac{M-2}{M} 2P(h)_{ikili} + \frac{2}{M} P(h)_{ikili} = \frac{2(M-1)}{M} P(h)_{ikili}$$

- İkili işaretleşmede elde edilen hata olasılığı sonuçları kullanılarak M seviyeli iletim için hata olasılığı, Q(z) fonksiyonu cinsinden şu şekilde ifade edilir.

$$P(h)_{M-li} = \frac{2(M-1)}{M} Q\left(\frac{A}{2\sigma}\right)$$

- Hata olasılığı hesabından görüldüğü gibi, *çok-seviyeli haberleşme*, ikili haberleşmeye göre *daha düşük bant genişliği* kullanmakla beraber *daha fazla güç harcamakta* ve aynı zamanda *hata olasılığı da daha yüksek* olmaktadır.
- Dikkat edilecek olursa, yapılan hata olasılığı hesaplamalarında işaretleşmenin sembol oranı dikkate alınmamıştır.
- Esasında daha hızlı işaretleşme (yüksek sembol oranı) belirli bir hata olasılığı için daha yüksek işaret gücü gerektirmektedir.
- Bu nedenle seviyeler arası mesafe sabit tutulduğu taktirde, çok-seviyeli işaretleşmenin sembol oranı ikili iletime oranla daha düşük olduğundan, hata olasılığındaki artış hesaplamalarda elde edilen kadar yüksek olmamaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Sezilmesi

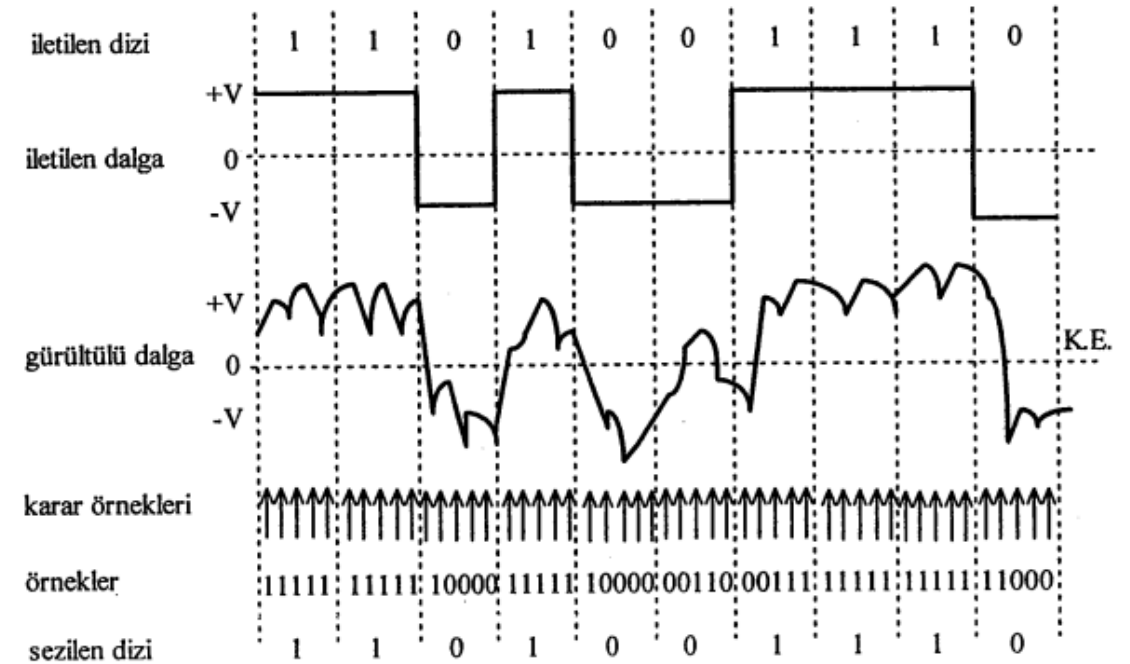
- **4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı**
- *Merkez-noktası sezici*, alıcıdaki gürültüye maruz kalmış işarettten bir tek örnek alıp o örnek değerine göre *hangi sembolün iletilmiş olduğuna karar vermektedir*.
- Pratikte gürültüden daha az etkilenmek için, tek bir örnek değeri yerine birden fazla örnek değerine göre karar verilebilmektedir.
- Sembol zaman aralığı (T_s) içerisinde birden fazla örnek alınarak iletilen sembole karar verilmesi genelde daha doğru sonuç sağlamaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

- **4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı**
- Bu nedenle, en basit anlamda Şekil 4.25'de görüldüğü gibi, her sembol zaman aralığı içerisinde işareten *birden fazla örnek alınarak* çoğunluğa göre bir karar verilebilmektedir (*çoğunluk oylaması*).
- Bu durumda birden fazla örnek değeri incelenerek bir karar verildiği için *merkez-noktası seziciye göre gürültüden etkilenme daha az olmaktadır*.
- Dolayısıyla *toplam hata olasılığı merkez noktası seziciye oranla düşmektedir*.



Şekil 4.25. Sembol zaman aralığında işareten birden fazla örnek değeri alınarak gerçekleştirilen sezme işlemi (çoğunluk oylaması).

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı

- Klasik çoğunluk oylamasında her örnek değerinin eşit ağırlığı (oy hakkı) bulunmaktadır.
- Fakat esasında karar eşiğine yakın bir örnek değerinin güvenilirliği karar eşiğine uzak bir örneğin güvenilirliğinden azdır, çünkü karar eşiğinin yakınındaki örneğin gürültüden etkilenecek eşiğin diğer tarafına geçmiş olma olasılığı daha fazladır.
- Bu nedenle daha iyi bir alıcı sistemi için örnek değerinin karar eşiğine yakın veya uzak olması dikkate alınabilmektedir.
- Örneğin kutuplu işaretleşme için, her sembol aralığında toplam n adet örnek alındığında çoğunluk oylaması yerine alınan n adet örneğin değeri toplanabilmektedir.
- Toplama işlemi sonucunda karar eşiğine yakın (düşük genlikli) değerlerin etkisi karar eşiğine uzak (yüksek genlikli) değerlerden daha az olmaktadır.
- Her sembol zaman dilimi için örnek değerlerin toplamı, uygun bir eşikle karşılaştırılarak alıcıda karar verilebilmektedir.
- Bu sayede sembol zaman dilimi içerisinde yapılan örnekleme anlarında karar eşiğine yakın örnek değerleri ile karar eşiğine uzak örnek değerlerinin karar eşiğine olan mesafesine göre ağırlıklı etkisi alınmaktadır.

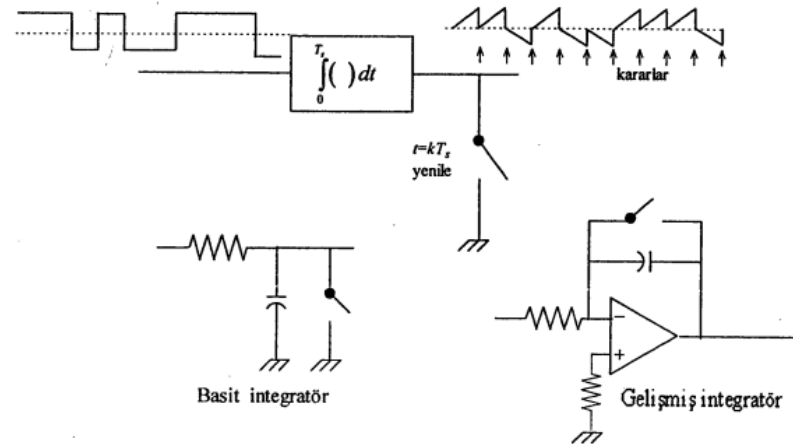
SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı

- Doğal olarak sembol zaman diliminde alınan örnek sayısı arttıkça, gürültüden etkilenme azalmaktadır.
- Bu fikir geliştirilerek, her sembol zaman aralığında sonsuz sayıda örnek alınarak örnek değerlerinin toplandığı düşünülecek olursa ($n \rightarrow \infty$), bu işlem, alınan işaretin sembol zaman dilimi boyunca integralinin alınarak tek bir rakamsal değerin elde edilmesine karşılık gelmektedir.
- Şekil 4.26'da gösterilen bu alıcı yapısı **integral al-ve-dök** alıcı olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 4.26. Dikdörtgensel darbeler için integral al-ve-dök sezicinin çalışması ve bazı örnek integratör devreleri.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı

- İntegral al-ve-dök sezici, sadece gürültü etkisi dikkate alındığında merkez-noktası sezmeye göre hata olasılığında önemli bir iyileştirme sağlamaktadır.
- İntegral al-ve-dök sezici tabanbant dikdörtgensel işaretleşme için en iyi sezici yapısını oluşturmakta ve AWGN kanalı için en düşük hata olasılığını vermektedir.
- En basit anlamda bir alçak-geçiren filtre (AGF) kullanılarak yaklaşık bir integral alıcısının yapılması mümkün olmaktadır.

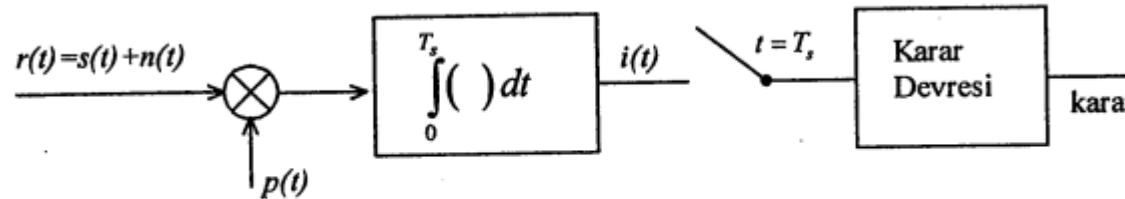
SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Sezilmesi

➤ 4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı

- *Dikdörtgensel darbe yerine farklı bir darbe biçimi kullanıldığı taktirde* (örneğin Manchester kodlaması gibi), işaret değerlerinin toplamına göre bir karar verilemeyeceğinden, *sadece bir integral alıcı demodülasyon için yeterli olmayabilmektedir.*
- Bu durumda Şekil 4.27'de gösterilen korelasyon (ilinti) alıcı yapısı kullanılarak alıcıda doğru sezinleme yapılabilmektedir.
- Korelasyon alıcısı, alınan işareti iletim için kullanılan darbeye aynı biçimdeki bir işaret ile çarparak bu çarpımın bir integratöre sokulmasıyla korelasyon işlemini gerçekleştirmektedir.



Şekil 4.27. Korelasyon (ilinti) sezicisi.

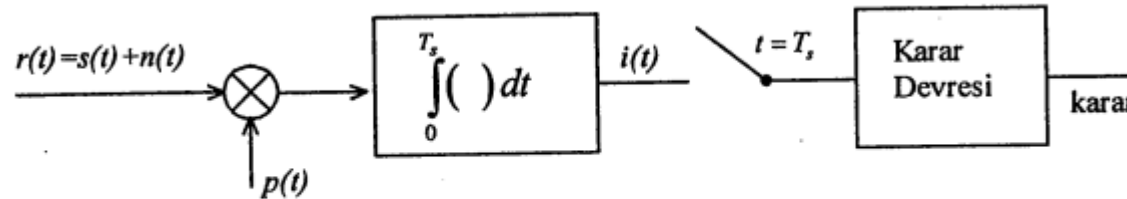
SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Sezilmesi

➤ 4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı

- Korelasyon işlemi, **alınan işaret** ile **darbe biçimi $p(t)$** arasındaki **benzerliği** hesapladığı için bu benzerlik hesabına göre alıcı, $p(t)$ 'nin iletilip iletilmediğine karar verebilmektedir.
- Alıcıda alınan işaretle, **darbe biçimi $p(t)$** mevcut olduğunda, integral alıcısı **sembol zaman diliminin** sonunda **yüksek bir çıkış vermekte**, aksi taktirde integral alıcının çıkışı düşük olduğundan $p(t)$ **darbesinin** iletilmediği anlaşılmaktadır.
- Karar devresi kullanılarak, **sembol zaman diliminin** sonundaki çıkış değerinin, **uygun bir karar eşiğinden** yüksek olup olmadığına bağlı olarak **iletilen işaretle $p(t)$ 'nin** mevcut olup olmadığına karar verilebilmektedir.



Şekil 4.27. Korelasyon (ilinti) sezicisi.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı

- Korelasyon alıcısının çalışma mantığı integral al-ve-dök alıcısına dayanmaktadır.
- Fakat, darbe biçimi ile alınan ilinti işlemi sayesinde korelasyon alıcısı her türlü darbe biçimi ile kullanılabilir.
- Sonuçta ilinti sezicisinin çalışması temel olarak integral alıcıya dayandığından, *ilinti alıcısı integral al-ve-dök alıcısı* olarak da adlandırılabilir.
- *Integral al-ve-dök alıcı* yapısında mutlaka integral alıcıdaki kapasitörün boşaltılması (dökme olayı) ile örnekleme işleminin eşzamanlaması sağlanmalıdır.
- Ayrıca doğru bir karşılaştırma için yerel referans işareti olarak adlandırılabilir $p(t)$ işareti ile *alınan işaretin sembol zaman dilimleri* karşılıklı gelecek şekilde ayarlanmalı
- Başka bir deyişle işaretler *aynı evrede* olmalıdır.
- Bu nedenle korelasyon alıcısı *evre-uyumlu bir alıcı* olarak adlandırılmaktadır.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı

- Şekil 4.27'de gösterilen korelasyon sezicisinin integral alıcı çıkışındaki işaret şu şekilde oluşmaktadır.

$$i(t) = \int_0^{T_s} f(t)p(t)dt$$

- İntegral alıcısının çıkış değerleri $t = T_s$, *sembol-zaman dilimi **anlarında*** örneklendiğinden karar için esasında $i(nT_s)$ değerleri kullanılmaktadır.
- Uygulamada iletim için birden fazla darbe biçimi kullanıldığında, her darbe için ayrı bir ilinti alıcısı kullanılabilir.
- Bu durumda tipik olarak demodülatör yapısında birden fazla ilinti alıcı kolu kullanılarak iletilen sembollerin sezme işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

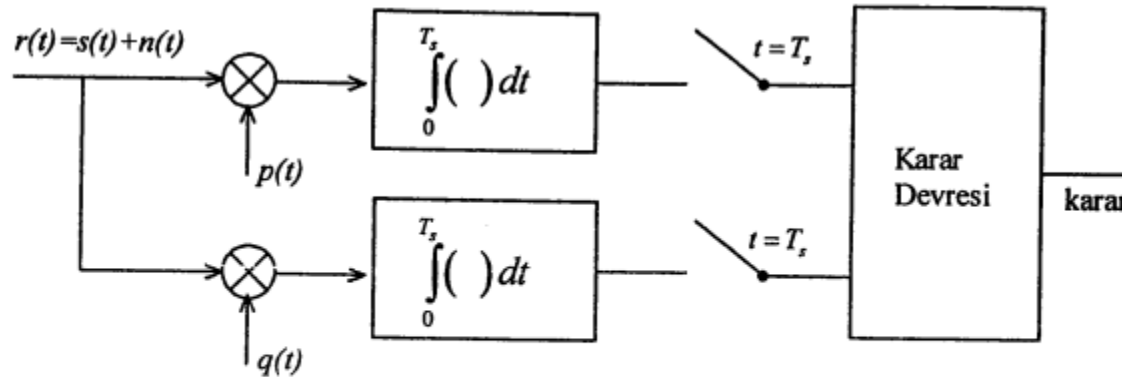
SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı

- Örneğin, 0 ve 1 sembollerinin iletimi için birbirinden farklı $p(t)$ ve $q(t)$ darbe biçimleri kullanıldığında, Şekil 4.28'de gösterildiği gibi demodülatörde paralel iki kolda, her bir darbe biçimi için ayrı olarak ilinti işlemi gerçekleştiren iki adet ilinti alıcısı kullanılabilmektedir.



Şekil 4.28. İletim için birden fazla farklı darbe biçiminin kullanıldığı sistemler için uygun korelasyon (ilinti) alıcı yapısı.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

➤ 4.3.4. AWGN Kanalı için En İyi Alıcı Yapısı

- Bu durumda ilk kolda, alınan işaretin $p(t)$ ile ilintisi alınmakta; ikinci kolda ise, alınan işaretin $q(t)$ ile ilintisi alınmaktadır.
- Verici tarafından $p(t)$ darbesi iletildiğinde, ilk ilinti kolu yüksek ve ikinci ilinti kolu düşük bir çıkış vermektedir.
- Verici tarafından $q(t)$ darbesi iletildiğinde ise, ilk ilinti kolu düşük ve ikinci ilinti kolu yüksek bir çıkış vermektedir.
- Bu nedenle alıcı kolların çıkışları, bu doğrultuda çalışan uygun bir karşılaştırma veya mantık devresi ile birleştirildiğinde karar işlemi gerçekleştirilebilmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

- **Örnek 4.17:** Matlab kullanarak kutuplu NRZ (non-return zero) işaretleşmenin AWGN haberleşme kanalı için hata olasılığını işaret-gürültü oranına bağlı olarak çizdiriniz.

Açıklama:

İletim seviyeleri arasındaki mesafe A olan kutuplu işaretleşme için haberleşme kanalında σ etkin değerli AWGN kabul edildiğinde toplam hata olasılığı

$P(h) = Q\left(\frac{A}{2\sigma}\right)$ olarak elde edilmektedir. İletim için $A/2$ ve $-A/2$ seviyeleri

kullanıldığından işaret gücü $S = (A/2)^2$ olarak bulunmaktadır. Etkin değeri σ olan gürültü için de gürültü gücü $N = \sigma^2$ olmaktadır. Bu nedenle kutuplu işaretleşme için işaret-gürültü oranı

$$\text{SNR}_{\text{kutuplu-NRZ}} = \frac{S}{N} = \left(\frac{A}{2\sigma}\right)^2 \quad (4.56)$$

olarak bulunmaktadır. Bu durumda kutuplu NRZ işaretleşme için toplam hata olasılığı

$$P(h) = Q\left(\sqrt{\frac{S}{N}}\right) = \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\sqrt{\frac{S}{2N}}\right) \quad (4.57)$$

şeklinde işaret-gürültü oranına bağlı olarak ifade edilebilmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

- **Örnek 4.17:** Matlab kullanarak kutuplu NRZ (non-return zero) işaretleşmenin AWGN haberleşme kanalı için hata olasılığını işaret-gürültü oranına bağlı olarak çizdiriniz.

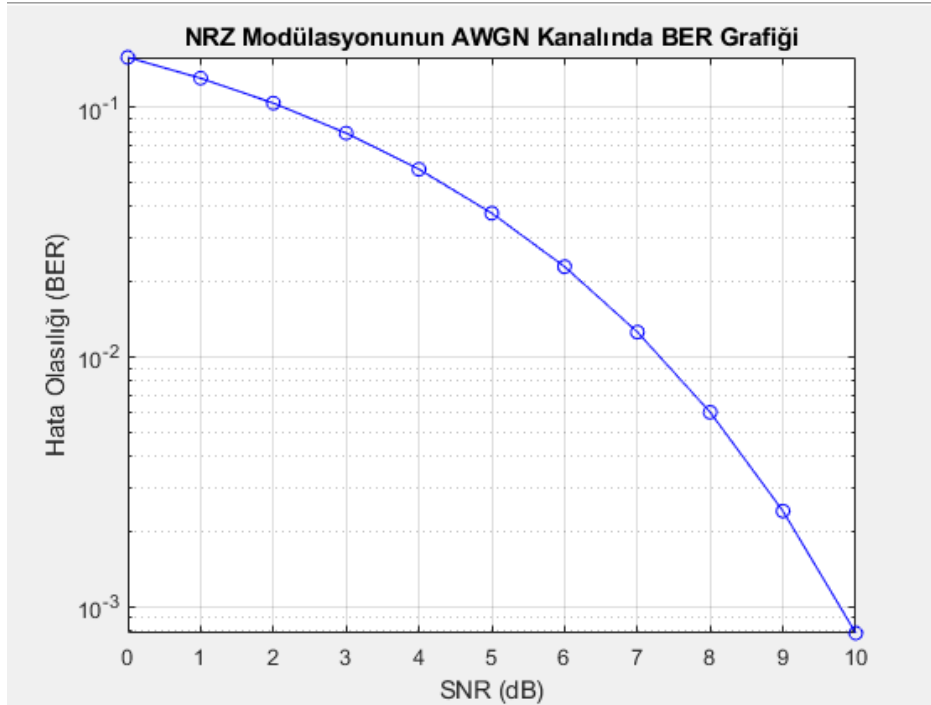
```
1 - snr_dB = 0:1:10; % SNR değerlerini dB cinsinden belirle
2 - Ph = zeros(1, length(snr_dB)); % Hata olasılığı için boş vektör tanımla
3
4 - for i = 1:length(snr_dB)
5 -     snr = 10.^(snr_dB(i)/10); % dB'den doğrusal SNR'ye çevir
6 -     Ph(i) = 0.5 * erfc(sqrt(snr / 2)); % Hata olasılığını hesapla
7 - end
8
9 - semilogy(snr_dB, Ph, 'b-o'); % Yarı logaritmik grafik çizdir
10 - xlabel('SNR (dB)');
11 - ylabel('Hata Olasılığı (BER)');
12 - title('NRZ Modülasyonunun AWGN Kanalında BER Grafiği');
13 - grid on;
```

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

- **Örnek 4.17:** Matlab kullanarak kutuplu NRZ (non-return zero) işaretleşmenin AWGN haberleşme kanalı için hata olasılığını işaret-gürültü oranına bağlı olarak çizdiriniz.



SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

- **Örnek 4.18:** Kutuplu işaretleşme için bilgisayar benzetimi kullanarak AWGN haberleşme kanalında elde edilen hata olasılığını işaret-gürültü oranına bağlı olarak çizdiriniz.
- **Açıklama:** Haberleşme sistemlerinin çalışmasını taklit eden bilgisayar benzetimleri (Monte Carlo benzetimleri olarak da adlandırılmaktadır) özellikle sistemin teorik analizinin zor olduğu haberleşme sistemlerinin hata olasılığının kestiriminde kullanılmaktadır. Bu benzetimlerde tipik olarak rasgele bir bilgi işareti oluşturularak sistemin çalışması bilgisayar ortamında taklit edilmektedir.

SAYISAL HABERLEŞME

4. Sayısal Taban Bant İletimi

4.3. Tabanbant İşaretlerinin Seszilmesi

- **Örnek 4.18:** Kutuplu işaretleşme için bilgisayar benzetimi kullanarak AWGN haberleşme kanalında elde edilen hata olasılığını işaret-gürültü oranına bağlı olarak çizdiriniz.

```

1  % SNR değerlerini tanımla
2  snr_dB = 0:2:20; % 0 dB ile 20 dB arasında 2'şer artımlı değerler
3  N = 10^5; % Sembol sayısı
4  x = randi([0 1], N, 1); % 0 ve 1 arasında rastgele değerler üret
5  xk = 2*x - 1; % Kutuplu bilgi işareti (+1, -1)
6  S = 1; % Sinyal gücü
7  Pmc = zeros(1, length(snr_dB)); % Benzetim hata olasılığı vektörü
8  Ph = zeros(1, length(snr_dB)); % Teorik hata olasılığı vektörü
9
10 for i = 1:length(snr_dB)
11     snr = 10.^(snr_dB(i)/10); % dB'den doğrusal SNR'ye çevir
12     sigma = S / sqrt(snr); % Gürültü gücü
13     n = sigma * randn(size(xk)); % Rasgele Gauss gürültüsü
14     y = xk + n; % Alıcıda alınan işaret
15     yd = double(y > 0); % Sezme işlemi, karar eşiği=0
16     [num, ratio] = biterr(x, yd); % Hata oranının bulunması
17     Pmc(i) = num/N; % Benzetim hata olasılığı
18     Ph(i) = 0.5 * erfc(sqrt(snr / 2)); % Teorik hata olasılığı
19 end
20
21 % Grafik çizdirme
22 semilogy(snr_dB, Pmc, 'ko'); % Benzetim sonuçlarını çizdir
23 hold on;
24 semilogy(snr_dB, Ph, 'b-'); % Teorik sonuçları çizdir
25 xlabel('SNR (dB)');
26 ylabel('Hata Olasılığı (BER)');
27 title('Kutuplu NRZ İşaretleşmenin AWGN Kanalındaki BER Grafiği');
28 grid on;
29 legend('Benzetim Sonuçları', 'Teorik Sonuçlar');
30 hold off;

```

