

# Sürekli Faz Modülasyonlu Kaynak/Kanal Kodlamalı Sistemlerin Sönümlenmeli Ortamlarda Hata Başarımı

Niyazi Odabaşoğlu\*, Osman Nuri Uçan\*, Onur Osman\*\*

\*İstanbul Üniversitesi  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü  
34850 Avcılar, İstanbul  
[niyazio@istanbul.edu.tr](mailto:niyazio@istanbul.edu.tr), [uosman@istanbul.edu.tr](mailto:uosman@istanbul.edu.tr)

\*\*İstanbul Ticaret Üniversitesi  
Ragıp Gümüşpala Cad. No:84  
34378 Eminönü, İstanbul  
[osman@iticu.edu.tr](mailto:osman@iticu.edu.tr)

**Özet-** Bu çalışmada sürekli fazlı kaynak/kanal kodlamalı sistemler(SFM/KKK) tanıtılmış sönümlenmeli ortamlarda hata başarımı incelenmiştir. Örnek olarak  $h=1/2$  8'li SFM/KKK sistemi tasarlanmış ve bu sistemin sönümlenme parametresi  $K$  ve işaret/gürültü oranı  $E_b/N_0$ 'ın değişik değerleri için hata başarım eğrileri bilgisayar simülasyonu yardımıyla elde edilmiş ve hata başarım üstünlüğü ortaya koyulmuştur.

## 1. Giriş

Kaynak/Kanal Kodlamalı modülasyon (K/KK), Ungerboeck'in kodlayıcısını baz alan tek bir kafes kod içerisinde hem kuantalama hemde kodlamayı aynı anda gerçekleyen bir haberleşme tekniğidir. Bu yöntemde, kaynak ve kanal kodlayıcıları için eşit bit/sembol oranları seçilir. Böylece kanaldaki işaret dizileri arasındaki karesel uzaklık ile kuantalamadaki karesel hata ortak kafesteki her dal (geçiş) için orantılı olur.

Sürekli faz modülasyonu sabit zarf, iyi band ve güç verimliliği özellikleri nedeniyle uydu sistemleri ve gezgin radyo gibi band ve güç sınırlı ortamlar için oldukça uygun bir modülasyon türüdür. Bu çalışmada, literatürde bulunan kaynak/kanal kodlamalı modülasyona alternatif olarak, modüle edilecek kodları PSK yada diğer belleksiz modülasyon işaretlerine eşlemek yerine sürekli faz modülasyonunun özel bir biçimi olan sürekli fazlı frekans kaydırmalı anahtarlama (CPFSK) işaretlerine eşlenmiştir. Böylece sistem işaretler arasında sürekli fazlı bir yapıya sahip olacağından sürekli fazın bütün avantajlarına da sahip olacaktır. Ayrıca kodlama, kuantalama ve modülasyon tek bir ortak kafeste birleştirilmiştir. Kodçüzücü ise alınan gürültülü işaretleri bu kafese göre çözecektir. Dolayısıyla sistemin hata başarımı oldukça iyi sonuçlar verirken band ve güç verimliliği de sağlanmıştır.

## 2. Kaynak/Kanal Kodlamalı Sistemler

Kaynak/Kanal kodlamalı sistemler (K/KK)'de giriş sinyalinin kuantalanması ve kodlanıp modüle edilmesi tek bir ortak kafes kullanımıyla mümkün olmaktadır [1],[2],[3]. Kuanta seviyesi sayısı  $N=2^{R+CEF}$  olarak seçilir. Toplamda  $N_1=2^{R+CEF}$  alt küme vardır.  $N$ ,  $N_1$ 'e düzgün bölünebilecek şekilde seçilir. Böylece her alt küme tam olarak  $N_2=N/N_1=2^{R-r}$  kod kelimeye sahiptir. Burada  $R \geq 1$ , kodlama hızı (bit/simge),  $r$  ve  $CEF$ ,  $1 \leq r \leq R$  ve  $CEF \geq 0$  koşullarını sağlayan pozitif tamsayılardır.  $CEF$  (Kod genişleme faktörü), kuanta seviyesi sayısının nominal  $2^R$  bit/sembol değerinden  $2^{CEF}$  katı genişletilmesini sağlayan çarpandır ve kodlayıcı tasarımına göre değişir. Örneğin  $CEF=1$  seçilirse ( $2/3$  oranlı kodlayıcı için) kuantalamalı kodlayıcı basitçe kodların arasındaki  $N=2^{R+1}$  kuanta seviyesinden birini  $2^{R+1}$  noktalı kafes kodlamalı modülasyon sembollerinden birine eşler. Bu şekilde kafes yapıdaki her kuanta seviyesine aynı yapıyı kullanan bir modülasyon sembolüne tekabül eder. Birleşik kafes yapının dallarındaki hem kuantalama seviyeleri  $q_{k,l}$  ( $k$ . Kuantalama altkümesi,  $Q_k$ 'nin  $l$ . Seviyesi), hemde işaret kümesi  $S_j$  Ungerboeck kuralına [4] göre yerleştirilmiştir. ( $k=0,1,\dots,N_1$ ;  $j=0,1,\dots,N-1$ )

### 3. Sürekli Faz Modülasyonu

Eğik fazlı sürekli faz modülasyonun bilgi taşıyan faz terimi Rimoldi [5] tarafından

$$\Phi(t, \alpha) = 4\pi h \sum_{i=0}^{\infty} \alpha_i q(t - iT) \quad (1)$$

şeklinde gösterilmiştir. Burada  $h$  modülasyon indisidir ve  $K$  ve  $P$  ortak bölenleri olmayan iki tamsayı olmak üzere  $K/P$ 'ye eşittir.  $M$  düzeyli bir CPM için  $\alpha_i$  bağımsız bilgi simgeleridir ve  $(0,1,2,\dots,M-1)$ 'dir.  $T$ , modülasyon aralığını göstermektedir.

$q(t)$  faz yanıtı olarak adlandırılır ve  $L$  darbe uzunluğunu göstermek üzere

$$q(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1/2 & t \geq LT \end{cases} \quad (2)$$

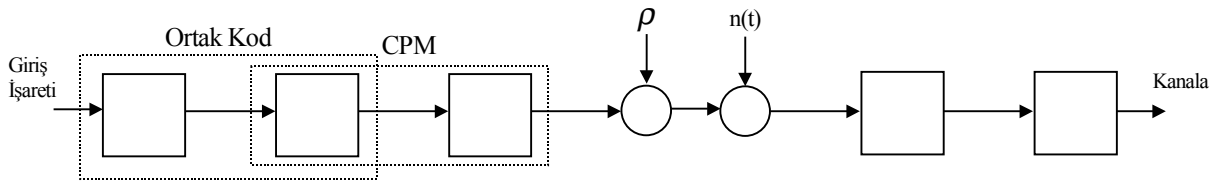
ile ifade edilir.  $g(t)$ ,  $LT$  boyunca ani frekans darbe yanıtı işlevidir. Sürekli faz modülasyonu  $L=1$  için tam yanıtı CPM,  $L>1$  için kısmi yanıtı CPM olarak adlandırılır. Sonuçta iletilen işaret;

$$s(t, \alpha) = (2E_s / T)^{1/2} \text{Cos}(2\pi f_c t + \Phi(t, \alpha) + \Phi_0) \quad (3)$$

olarak verilir. Burada  $E_s$  simge enerjisini,  $f_c$  taşıyıcı frekansını ve  $\Phi_0$  başlangıç fazını göstermektedir.

### 4. Sürekli Faz Modülasyonlu Kaynak/Kanal Kodlamalı Sistemler

SFM/KKK genel blok diyagramı şekil 1'de görüldüğü gibidir. ( $\rho$  sönümleme değişkeni  $n(t)$  ise beyaz Gauss gürültüsüdür) Görüldüğü gibi sistemin verici kısmı katlamalı kodlayıcı (CE), sürekli faz kodlayıcısı (CPE) ve belleksiz eşleyici (MM)'den oluşmaktadır. SFM/KKK yapısında CE kodlayıcı hem kuantalama hem de kodlama yapmaktadır. CPE ise sürekli faz kodlayıcısıdır ve belleği sayesinde CPM'in faz sürekliliğini sağlar. Katlamalı kodlayıcı ve sürekli faz kodlayıcısını tek bir kafeste birleştirmek için CE ve CPE cebrik olarak uyumlu olmak zorundadır. Yani CPE'nin giriş sayısı CE'nin çıkış sayısına eşit olmalıdır.  $L$  CPE'nin bellek elemanı sayısı olmak üzere  $k/n$  oranlı bir CE için  $n/n(L+1)$  oranlı bir CPE yapısı kullanılmalıdır.

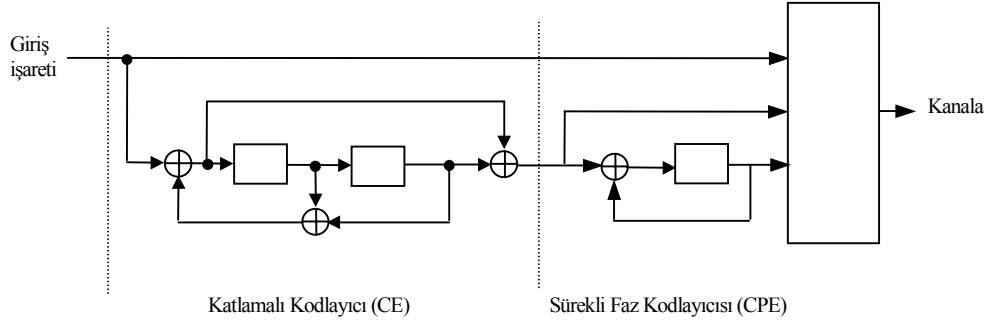


Şekil 1. SFM-K/KK Sistem Modeli

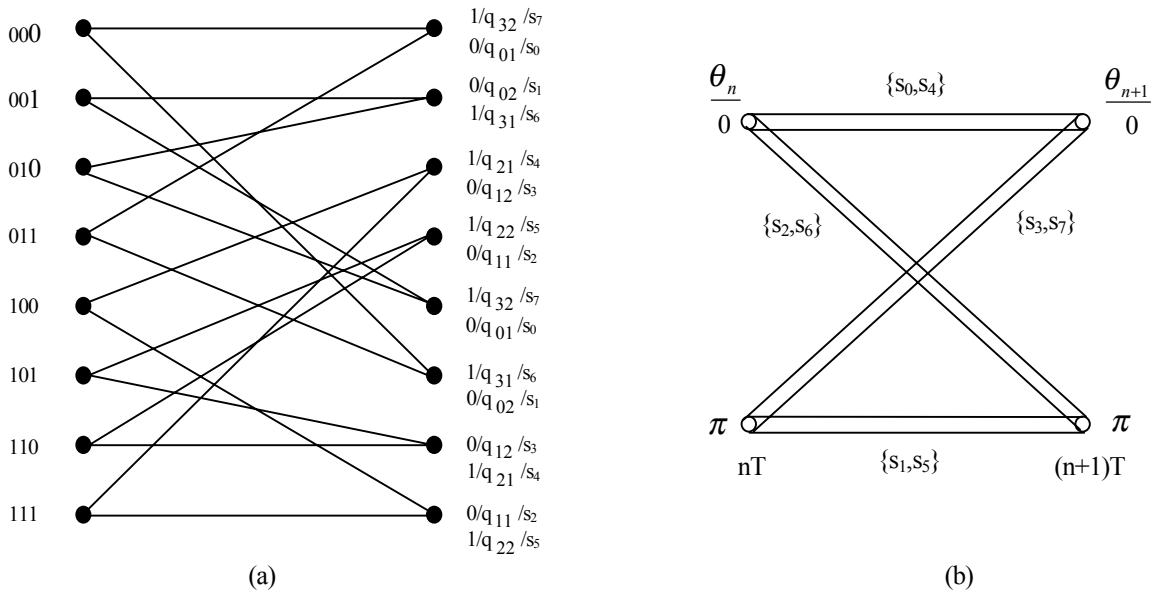
Her modülasyon aralığında  $m_{CE}$  bellekli CE'ye gelen analog işaret önce kuantalanarak sayısallaştırılır ve kodlanır. CE'nin çıkışındaki  $n$  bit CPE'ye giriş olarak uygulanır. CPE'nin çıkışındaki  $n(L+1)$  çıkış biti MM tarafından sürekli fazlı işaretlere eşlenerek kanala verilir. Böylece tek bir SFM/KKK kafes yapısı ile hem kuantalama, hem kodlama ve hem de sürekli fazlı modülasyon gerçekleştirilmiş olur. Ayrıca sistemin karmaşıklığı azaltılmış ve tek adımlı çözüm sağlanmış olur. Alıcı tarafında ise alınan gürültülü işaretler önce demodüle edilir daha sonra kodçözme işlemi yapılarak bilgi bitleri elde edilir.

### h=1/2, 8'li SFM/KKK Sistemi

h=1/2 8'li SFM/KKK sistemi 1/2 oranlı ve iki bellek elemanlı bir CE kodlayıcı, bir bellek elemanlı CPE kodlayıcı ve belleksiz eşleyiciden oluşmaktadır. Ortak kod 3 bellek elemanlı ve 1/3 oranlıdır. Kodlayıcı yapısı ve bu kodlayıcıya ait kafes diyagramı sırasıyla şekil 2.15 ve şekil 2.16'da görülmektedir. Kafes yapının dallarında birebir eşlenmiş kuanta seviyeleri ve işaret seti gösterilmektedir. Her durumdan sonrakine tek geçiş bulunmaktadır, bu geçişlerde kuantalama seviyeleri  $q_{kl} \in Q_k, k = 0,1,2,3; l = 1,2$  olarak seçilmiştir



Şekil 2. h=1/2, 8'li SFM/KKK sistemi için SFM/KKK kodlayıcı yapısı



Şekil 3. (a) h=1/2, 8'li SFM/KKK sistemi için SFM/KKK kafes diyagramı, (b) işaret kümesi ve faz bilgileri

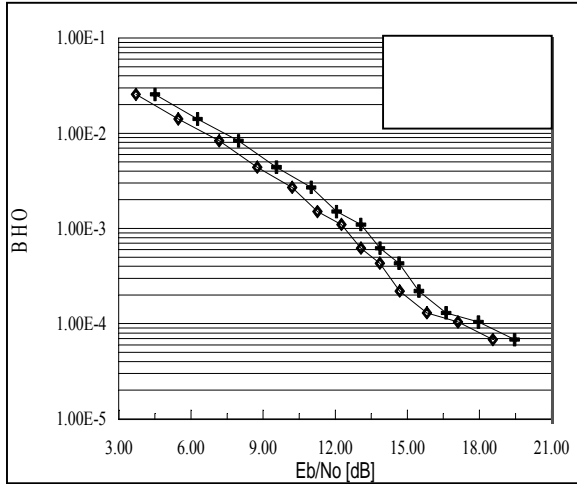
$\theta_n$	$\beta_n$	Q	$s_i$	$\theta_{n+1}$
0	0	q <sub>01</sub>	S <sub>0</sub>	0
	2	q <sub>02</sub>	S <sub>2</sub>	$\pi$
	4	q <sub>11</sub>	S <sub>4</sub>	0
	6	q <sub>12</sub>	S <sub>6</sub>	$\pi$
$\pi$	1	q <sub>21</sub>	S <sub>1</sub>	$\pi$
	3	q <sub>22</sub>	S <sub>3</sub>	0
	5	q <sub>31</sub>	S <sub>5</sub>	$\pi$
	7	q <sub>32</sub>	S <sub>7</sub>	0

Tablo 1. h=1/2, 8'li SFM/KKK sistemi için işaret eşlemeleri ve faz değerleri

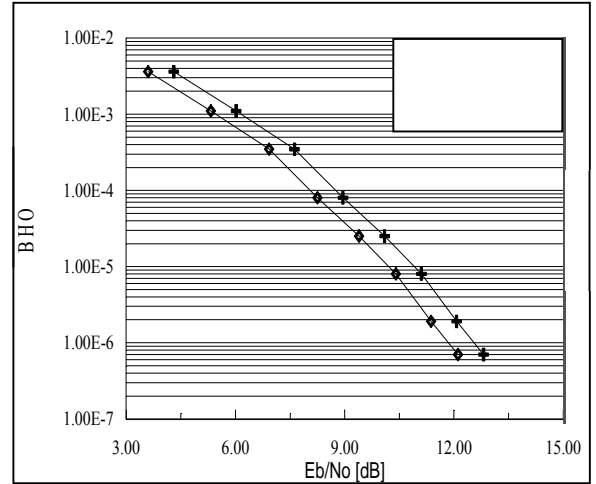
## 5. Simülasyon Sonuçları

Kanal, belirli olasılık yoğunluk işlevine sahip rastgele değişken üretme teknikleri kullanılarak, Rayleigh (K=0), Rician (K=10) ve AWGN (K=sonsuz) olarak modellenmiştir. Birbirinden bağımsız olarak üretilen sönümlenme değişkenleri ( $\rho_n$ ), gönderilen simgeler ( $z_n$ ) ile çarpılmış ve toplamsal beyaz Gauss gürültüsü ( $\eta_n$ ) eklenerek, alıcıya gelen işaret elde edilmiştir. Gürültünün gönderilen işarete karışması, vektör uzayında herbir işaret boyutu için toplamsal olarak gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, CPFSK işaretlerin vektörel uzayda gösterilimi için MATLAB paket programı üzerinde bir program geliştirilmiştir ( $M$ 'li CPFSK işaretler vektör uzayında  $M$  boyutta ifade edilebilmektedir). Gürültünün varyansı değiştirilerek sağlanan herbir işaret/gürültü oranı için sistem girişine yeterli sayıda istatistiksel bağımsız, düzgün dağılımlı bilgi bitleri girilerek, alıcı kısmında bu bitlerin kaç tanesinin hatalı çözüldüğü belirlenmiştir. Bu işlem de yeterli sayıda tekrarlanarak, o işaret/gürültü oranı için hata olasılıkları belirlenmiştir.

h=1/2, 8'li SFM/KKK sistemi için elde edilen hata başarımları eğrileri şekil 4. (a)'da Rayleigh (K=0), şekil 4. (b)'de Rician (K=10) ve şekil 4. (c)'de AWGN kanallar için optimum ve Lloyd-max kuantalama için verilmiştir.

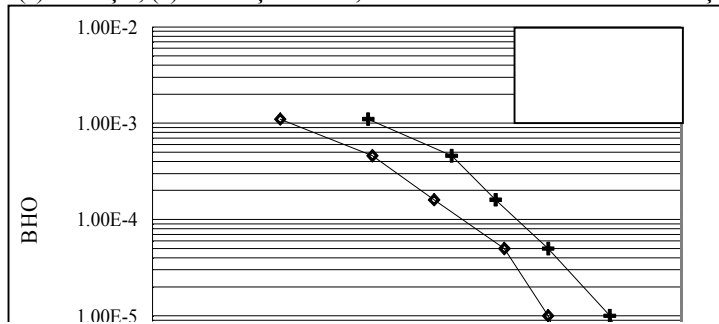


(a)



(b)

Şekil 4. (a) K=0 için, (b) K=10 için h=1/2, 8'li SFM/KKK sisteminin hata başarımları eğrileri



(c)

Şekil 4. (c)  $K=\infty$  için  $h=1/2$ , 8'li SFM/KKK sisteminin hata başarımları eğrileri

SFM/KKK sistemlerin hata başarımları kafes kodlamalı kuantalama'nın klasik belleksiz modülasyon türleri ile uygulandığı durumlar (PSK, QAM vb.) ile karşılaştırıldığında bütün sönümlenmeli ortamlarda ( $K=0$ ,  $K=10$  ve  $K=\infty$ ) ve bütün işaret/gürültü oranlarında daha iyi sonuçlar vermektedir. Özellikle aşırı sönümleme durumu olan Rayleigh ortamlarda kodlama kazancı daha da artmaktadır.  $h=1/2$ , 8'li SFM/KKK sisteminin simülasyon sonuçları aynı kodun kullanıldığı 8-PSK TCQ/TCM sisteminin hata başarımları ile karşılaştırılırsa:  $K=0$  için 5.4 dB,  $K=10$  için 4.7 dB,  $K=\infty$  için ise yaklaşık 4.3 dB'dir.

## 6. Sonuç

Bu çalışmada Kaynak/Kanal kodlamalı sistemler (K/KK), sabit zarf, iyi band ve güç verimliliği özellikleri nedeniyle sürekli faz modülasyonunun özel bir biçimi olan sürekli fazlı frekans kaydırmalı anahtarlama (CPFSK) ile eşlenip sürekli faz modülasyonlu kaynak kanal kodlamalı sistemler (SFM/KKK) geliştirilmiş ve bu sistemlerin hata başarımları incelenmiştir. CPFSK modülasyonu PSK modülasyonu ile faz açıları bakımından benzerlik göstermesine rağmen faz sürekliliğine sahip olması açısından avantajlara sahiptir.

Ayrıca kodlama, kuantalama ve modülasyon tek bir ortak kafeste birleştirilmiştir. Kodçözücüde ise alınan gürültülü işaretler bu kafese göre çözülmüştür. Dolayısıyla sistemin hata başarımları oldukça iyi sonuçlar verirken band ve güç verimliliği de sağlanmıştır.

SFM/KKK sistemlere örnek olması açısından  $h=1/2$  8'li SFM/KKK sistemi tasarlanmış ve bilgisayar simülasyonu ile bu sistemin sönümlenmeli kanallarda hata başarımları eğrileri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Kaynak/Kanal kodlamalı sistemlerin PSK, QAM gibi belleksiz ve faz sürekliliği olmayan modülasyon türlerine eşlenmesi yerine sürekli faz modülasyonu ile tek bir ortak kafeste birleştirilerek CPFSK işaretlerine eşlenmesiyle önemli ölçüde band ve güç verimliliği sağlandığı gösterilmiştir.

## Kaynaklar

- [1] Marcellin M.W., Fischer T.R., "Trellis coded quantization of memoryless and Gauss-Markov source" *IEEE Transaction on Communications*, Vol:38 No:1, pp. 82-93,1990.
- [2] Wang M., Fischer T.R., "Joint trellis coded quantization/modulation" *IEEE Transaction on Communications*, Vol:39 No:2, pp. 172-176, 1991.
- [3] Uysal M., Ucan O.N., "Combined trellis coded quantization /modulation over fading mobile channel" *Proceedings of the ACTS Mobile Communication Summit*, pp. 906-911, Aalborg, Denmark, 1997.
- [4] Ungerboeck G., "Channel coding with multilevel/phase signals", *IEEE Transaction on Information Theory*, Vol:28 No:1, pp. 55-67,1982.
- [5] B.E. Rimoldi, "A decomposition approach to CPM" *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol:34,pp. 260-270, March.1988.