

RENKLİ GAUSS GÜRÜLTÜLÜ SEYREK SUALTI AKUSTİK KANALLARIN KESTİRİMİ

SPARSE UNDERWATER ACOUSTIC CHANNEL ESTIMATION IN COLORED GAUSSIAN NOISE

Mustafa Erdoğan¹, Habib Şenol¹, Erdal Panayırıcı¹, Murat Uysal²

¹ Mühendislik Fakültesi, Kadir Has Üniversitesi, İstanbul, 34083
{mustafa.erdogan, hsenol, eepanay}@khas.edu.tr

² Mühendislik Fakültesi, Özyeğin Üniversitesi, İstanbul, 34794
murat.uysal@ozyegin.edu.tr

ÖZETÇE

İşbirlikli sualtı kablosuz iletişim sistemleri konusu son yıllarda büyük önem kazanmıştır. Özellikle sualtı akustik kanalların seyrek (sparse) olma özelliği taşıması ve sisteme giren toplamsal gürültünün renkli Gauss gürültüsü olması sualtı kanallarının kestirimini çok zorlaştırmaktadır ve kuramsal açıdan ilginç kılmaktadır. Bu çalışmada kaynaktan hedef alıcıya iletimin röle aracılığıyla yapıldığı bir dik frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency division multiplexing (OFDM))-tabanlı sisteme uyumlu eşleme (matching pursuit (MP)) algoritması kullanılarak kanal kestirim problemi çözülmüş ve elde edilen sonuçlarda yüksek hata başarımları elde edilmiştir.

ABSTRACT

Cooperative underwater acoustic communication systems come into prominence in recent years. Since underwater channels are sparse and additive noise entering the system is colored Gaussian noise. Therefore it is very difficult to estimate the underwater channels and theoretically makes it interesting. In this study, the transmission from source to the target recipient is realized by means of a relay system. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM)-based channel estimation problem is solved by using the matching pursuit (MP) algorithm and we obtained excellent error performance.

1. GİRİŞ

Sualtı kablosuz iletişimi son yıllarda giderek artan bir ilgi çekmektedir. Yüksek hız ve güvenilirlikte kablosuz bağlantı, açık deniz petrol arama/sondaj, sualtı hayatı ile ilgili veri toplama, denizaltı arkeolojisi, sismik gözlemler, çevre koruma, liman ve sınır güvenliği gibi bir çok sualtı uygulaması için kritik bir öneme sahiptir. Sualtı kablosuz iletişim radyo, optik, yada ses (akustik) dalgaları ile gerçekleştirilebilir. Mevcut yöntemler arasında sualtı propagasyon ortamına en uygun olan ve pratik sistemlerde tercih edilen akustik iletişim olup araştırma faaliyetleri bu konuda yoğunlaşmıştır.

Sualtı akustik kanallarında karşılaşılan temel bozucu etkenlerden biri sönümlemedir. Sualtı kanallarında sönümleme frekans-seçici özellik gösteriyor olup, gecikme yayılımı 50-100 ms'ye kadar çıkabilir. Sönümlemeden kaynak simgelerarası girişim (intersymbol interference (ISI)) ile mücadele etmenin en etkin yöntemlerinden birisi dik frekans bölmeli çoğullama (orthogonal frequency

division multiplexing (OFDM)) kullanmaktır. OFDM günümüzde birçok kablosuz iletişim standartında kullanılıyor olup sualtı akustik sistemlerine de başarıyla uygulanmıştır [1, 2].

Sönümleme ortamında uzamsal çeşitleme kazancı sağlamak için, yerüstü radyo frekansı kablosuz iletişimi kapsamında önerilen uzay-zaman kodlaması ve çok-girişli çok çıkışlı (multi-input multi-output (MIMO)) iletişim teknikleri de sualtı iletişimine uygulanabilir [3, 4]. Bu teknikler gerek iletim hızında gerekse hata başarımlarında önemli kazanımlar getirirler. Ancak çoklu alıcı/verici birimi kullanımı kimi sualtı uygulamalarında yer ve güç kısıtlamaları nedeniyle mümkün olmayabilir. Ayrıca yol kaybı sualtı akustik iletişimde başarımları ciddi şekilde sınırlayan diğer bir etken olup, noktadan noktaya klasik iletişim teknikleri yerine alternatif çözümler gerektirir. Bu bilgilerin ışığı altında, röle destekli işbirlikli çeşitleme (cooperative diversity) [5] hem kapsama alanını genişletmek, hem de sönümleme etkilerini ortadan kaldırmak için sualtı akustik iletişimine uygun bir çözüm olarak çıkmaktadır.

Literatürde OFDM-tabanlı işbirlikli sualtı akustik iletişimi ile ilgili artan sayıda çalışmalar mevcuttur [6, 7]. Bu çalışmaların birçoğundaki temel varsayım kanal bilgisinin alıcı tarafta mükemmel olarak bilindiği varsayımdır. Pratikte ise eşzamanlı (coherent) sezme sistemlerinde sönümleme kanal katsayılarının eğitim evresinde çok doğru bir şekilde kestirilmesi ve bunların alıcı tarafta sezme metriğinde kullanılması gerekir. Sualtı kanallarının kestiriminde özellikle dikkat edilmesi gereken bir nokta kanalın uzun gecikme yayımlı seyrek yapısıdır. Bu durum işbirlikli sistemlerde kaskat kanal yapısı nedeniyle kanal kestirimini daha da güçleştirir. Seyreltik kanallarda, enerji belirli bölgelerde yoğunlaştığı için dürtü yanıtında çok fazla sıfır yer alır. Klasik kanal kestirim yöntemleri bu seyrek yapıyı gözönünde bulundurmadıkları ve gecikme yayılımı tarafından belirlenen tüm kanal boyunca kestirim yapmaya çalışmaları nedeniyle sualtı kanallarında kullanılmalrı etkin bir çözüm olamaz. Sualtı uygulamaları için bu kanalların seyrek yapısını gözönünde tutarak enerjinin yoğunlaştığı noktaların tesbitinin yapılması ve kestirilecek katsayı sayısının azaltılması uygun olur.

Notasyon : Bu makalede aşağıdaki notasyonlar kullanılacaktır :

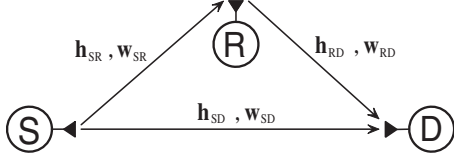
- $(\cdot)^T$ matris devriği'ni göstermektedir.
- $(\cdot)^\dagger$ matris eşlenik devriği'ni göstermektedir.
- $tr(\cdot)$ bir kare matrisin ana köşegeni üzerindeki elemanları toplamını (trace) göstermektedir.
- \odot Hadamard çarpımını göstermektedir.
- $\|\cdot\|$ bir vektörün normunu göstermektedir.

Bu çalışma 110E092 nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.

978-1-4673-0056-8/12/\$26.00 ©2012 IEEE

2. SİSTEM MODELİ

Bu çalışmada, Şekil 1’de görüldüğü gibi kaynaktan hedef alıcıya iletimin röle aracılığı ile yapıldığı bir OFDM-tabanlı sistem gözönüne alınmaktadır. Kullanıcı terminaller tek yönlü (half-duplex) çalışmakta olup, bir kullanıcının aynı anda işaret gönderip alması mümkün değildir. Çalışmamızda dikgen işbirlikli protokolu [8, 9] esas alınacaktır. Bu protokolun ilk evresinde (tümegönderim



Şekil 1: Tek röleli işbirlikli iletişim sisteminin şematik gösterimi

evresi) kaynak terminal, işaretleri hem röleye hem hedef alıcıya gönderir. İkinci evrede (aktarım evresi) ise kaynak iletime devam ederken röle de bir önceki zaman aralığında aldığı ve işlediği işaretleri hedef alıcıya gönderir. Çalışmamızda kuvvetlendirir-ve-aktar (amplify-and-forward (AF)) röleleme yöntemi kullanılacaktır. AF röleleme yönteminde röle aldığı işareti röle çıkış gücünü belirli bir düzeyde tutacak şekilde kuvvetlendirme katsayısı ile çarpar ve sezme işlemini gerçekleştirmeden hedef alıcıya gönderir. Şekil 2’de sualtı akustik kanal üzerinden iletişim yapan bir OFDM sisteminin blok şeması verilmiştir. OFDM çok taşıyıcılı bir iletişim sistemi olup yüksek hızlı veri dizisinin paralel olarak alt-taşıyıcılar üzerinden iletimi temeline dayanır. Eğer alt-taşıyıcıların bant genişliği kanalın durağan bant genişliğine (channel coherence bandwidth) göre yeterince küçükse, her alt-taşıyıcının etkilendiği sönümlenme, frekans-seçici olmayan (frequency-flat) biçimde gerçekleşir. Bu da kanaldan kaynaklanan bozulmaların alıcı tarafından kolayca düzeltilmesini sağlar. Kanalın çok yollu özelliğinden dolayı ortaya çıkan ISI’yı ortadan kaldırmak ve alt-taşıyıcı frekansların dikliğini koruyarak fiziksel kanaldan iletimini sağlamak için, OFDM sistemlerinde öncelikle bilgi simgelerinin ters Fourier Dönüşümü (inverse fast fourier transform (IFFT))’si alınarak zaman domaininde işaret örnekleri elde edilir ve bir önek (cyclic prefix (CP)) eklenir. Alıcı tarafda ise CP çıkartılır ve OFDM simgesinin geriye kalan kısmına Fourier Dönüşümü (fast fourier transform (FFT)) uygulanarak tekrar frekans domainine geçilir. Verici tarafında, IFFT ve CP’nin kullanılması nedeniyle frekans seçici kanal, düz-sönümlü alt-kanallara dönüştürülmüş olur. Vericiden alıcıya iletilen, sayısal modülasyonlu (PSK, QAM vb.) bilgi simgeleri, K uzunluğunda bloklara bölünerek N alt-taşıyıcılı Şekil 2’deki OFDM sisteminde IFFT girişine uygulanır. Şekil 2’de iletilen veri vektörü \mathbf{d} ile gösterilsin. $S \rightarrow D$, $S \rightarrow R$ ve $R \rightarrow D$ kanalları da daha önce belirtildiği üzere sonlu yanıtı süzgeç şeklinde olup \mathbf{h}_{SD} , \mathbf{h}_{SR} ve \mathbf{h}_{RD} ile tanımlansın. Kanal kademe (tap) sayıları $\tilde{L}_{SD} + 1$, $\tilde{L}_{SR} + 1$, $\tilde{L}_{RD} + 1$ ile, kanal uzunlukları ise $L_{SD} + 1$, $L_{SR} + 1$, $L_{RD} + 1$ ile verilsin. (Seyreltik kanal yapısı nedeniyle $\tilde{L}_{SD} \gg L_{SD}$, $\tilde{L}_{SR} \gg L_{SR}$, $\tilde{L}_{RD} \gg L_{RD}$ olarak seçilmelidir). Kaynak terminalde, gönderilen işaret vektörü \mathbf{d} IFFT bloğundan geçirilir. Röle terminalinin aldığı işareti FFT’den geçirdikten sonra aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{Y}_R = \text{diag}(\mathbf{H}_{SR})\mathbf{d} + \mathbf{W}_{SR} \quad (1)$$

(1) denkleminde $\mathbf{H}_{SR} = \mathbf{F}\mathbf{h}_{SR}$, $S \rightarrow R$ arasındaki kanalın $N \times 1$ boyutlu frekans cevabı vektörünü ve \mathbf{F} de FFT matrisini göstermektedir. FFT matrisinin m . satır n . sütun elemanı $[\mathbf{F}]_{m,n} = e^{-j2\pi(m-1)(n-1)/N}$, $\forall m, n = 1, 2, \dots, N$ olarak tanımlıdır. Öteyandan $\mathbf{W}_{SR} = \mathbf{F}\mathbf{w}_{SR}$ vektörü $\Sigma_{\mathbf{W}_{SR}} = \mathbf{F}\Sigma_{\mathbf{w}_{SR}}\mathbf{F}^T$ kovaryans matrisine sahip sıfır ortalamalı frekans düzlemi toplamsal kompleks

Gauss gürültü vektörünü göstermektedir.

Röle çıkış gücünü belirli bir seviyede tutacak şekilde kuvvetlendirme katsayısı ile çarpar ve işareti hedef alıcıya gönderir. Alıcı tarafta röleden (aktarım evresinde) ve kaynaktan (tüme gönderim evresinde) alınan işaretler aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\mathbf{Y}_{D,1} = \text{diag}(\mathbf{H}_{SD})\mathbf{d} + \mathbf{W}_{SD} \quad (2)$$

ve

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}_{D,2} &= \text{diag}(\mathbf{H}_{RD}) \frac{\mathbf{Y}_R}{\sqrt{E[||\mathbf{Y}_R||^2]/N}} + \mathbf{W}_{RD} \\ &= \frac{1}{\sqrt{E[||\mathbf{Y}_R||^2]/N}} \text{diag}(\mathbf{H}_{RD}) \text{diag}(\mathbf{H}_{SR})\mathbf{d} \\ &+ \frac{1}{\sqrt{E[||\mathbf{Y}_R||^2]/N}} \text{diag}(\mathbf{H}_{RD})\mathbf{W}_{SR} + \mathbf{W}_{RD}. \end{aligned} \quad (3)$$

Burada $E[||\mathbf{Y}_R||^2] = \text{tr}[\Sigma_{\mathbf{d}} \odot \Sigma_{\mathbf{H}_{SR}} + \Sigma_{\mathbf{W}_{SR}}]$ olarak verilmekte olup $\Sigma_{\mathbf{d}}$ ve $\Sigma_{\mathbf{H}_{SR}}$ sırasıyla \mathbf{d} ve \mathbf{H}_{SR} vektörlerinin kovaryanslarını göstermektedir. (2) ve (3) denklemlerinde $\mathbf{W}_{SD} = \mathbf{F}\mathbf{w}_{SD}$ ve $\mathbf{W}_{RD} = \mathbf{F}\mathbf{w}_{RD}$ vektörleri $S \rightarrow D$ ve $R \rightarrow D$ arasındaki frekans düzlemi toplamsal kompleks Gauss gürültü vektörlerini göstermektedir.

3. SUALTI KANALLARIN KESTİRİMİ

Bölüm 2’de (2) ve (3) nolu denklemlerde \mathbf{d} data vektörünün, alıcıda sezim işleminin gerçekleştirilmesi için \mathbf{H}_{SD} ve $\mathbf{H} = \mathbf{H}_{RD} \mathbf{H}_{SR}$ kanalların kestirilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada sadece kaynak ile alıcı arasındaki OFDM-tabanlı seyrek iletişim kanalı \mathbf{H}_{SD} ’nin kestirimi üzerinde yoğunlaşmaktadır. Kanalın seyrek özelliği ve toplamsal renkli Gauss gürültüsü de gözönüne alınarak, uyumlu eşleme (matching pursuit (MP)) algoritması kullanılarak kanal kestirimi gerçekleştirilmektedir.

Şekil 2’de gösterilen bir OFDM sisteminde, frekans düzleminde tanımlı bilgi taşıyan N uzunluğunda simge dizileri

$$\mathbf{d} = [d(0), d(1), \dots, d(N-1)]^T \quad (4)$$

ile gösterilen bloklara ayrılır. Her bloğun IFFT’si alınır ve buna belli uzunlukta bir önek eklenerek aşağıdaki gibi bir zaman domeni sinyal vektörü elde edilir:

$$\mathbf{s} = [s(0), s(1), \dots, s(N+L-1)]^T. \quad (5)$$

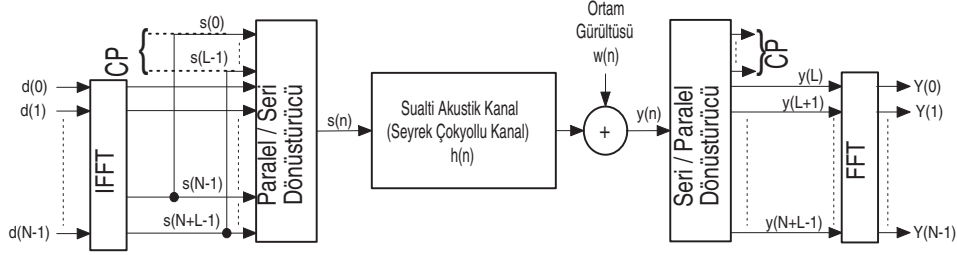
Daha sonra paralel/seri dönüştürücü ile \mathbf{s} vektörü kanal üzerinden seri olarak iletilir. Sualtı akustik kanalın seyrek yapıdaki çok yollu ayrık dürtü yanıtı $\mathbf{h}_{SD} = [\mathbf{h}_{SD}(0), \mathbf{h}_{SD}(1), \dots, \mathbf{h}_{SD}(L-1)]^T$ ile gösterilsin. \mathbf{h}_{SD} Rician dağılımlı seyrek kanal olarak ele alınacaktır. n . ayrık zamanda alınan sinyal, $y_D(n)$ alınan sinyal

$$y_D(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h_{SD}(l)s(n-l) + w_{SD}(n), \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

biçiminde yazılabilir. Burada $w_{SD}(n)$ ortamın oluşturduğu toplamsal renkli Gauss gürültüsü olup özilişkili fonksiyonu aşağıdaki yaklaşık ilişki ile verilir:

$$\rho_w(n-n') = \sigma_w^2 e^{-2\pi|n-n'|f_o T_s}. \quad (7)$$

(7)’de σ_w^2 gürültü varyansı, T_s örnekleme periyodunu göstermektedir ve $f_o T_s$ de model renkli gürültü özilişkili model parametresi olarak seçilmektedir. Alıcı tarafta, analog/sayısal dönüştürme işleminden sonra elde edilen sinyal vektöründen önce önek



Şekil 2: Sualtı OFDM sistemi blok diagramı

bölümü çıkarılır. Geriye kalan $N \times 1$ lik vektöre FFT uygulanır. FFT çıkışı aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} Y_{D,1}(0) \\ Y_{D,2}(1) \\ \vdots \\ Y_{D,N}(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d(0) & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & d(1) & & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & 0 \\ \cdot & & & \cdot & \\ 0 & \cdot & \cdot & 0 & d(N-1) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} H_{SD}(0) \\ H_{SD}(1) \\ \vdots \\ H_{SD}(N-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_{SD}(0) \\ W_{SD}(1) \\ \vdots \\ W_{SD}(N-1) \end{bmatrix} \quad (8)$$

(8) ilişkisi matrisel biçimde şu şekilde yazılabilir:

$$\mathbf{Y}_D = \mathbf{D}\mathbf{H}_{SD} + \mathbf{W}_{SD}. \quad (9)$$

Burada \mathbf{D} matrisi ana köşegeni \mathbf{d} data vektöründen oluşan bir köşegen matrisini göstermektedir. \mathbf{H}_{SD} vektörünün elemanları, alt taşıyıcı frekanslarında kanalın frekans yanıtının aldığı değerlerdir. Bu nedenle $\mathbf{H}_{SD} = [H_{SD}(0), H_{SD}(1), \dots, H_{SD}(N-1)]^T$ olmak üzere $\mathbf{H}_{SD} = \mathbf{F}\mathbf{h}_{SD}$ şeklinde yazılabilir. Bu denklem (9)'da yerine konulursa alınan sinyal modeli

$$\mathbf{Y}_D = \mathbf{D}\mathbf{F}\mathbf{h}_{SD} + \mathbf{W}_{SD} \quad (10)$$

biçimine dönüşür. Gözönüne alınan eşzamanlı iletişim sistemlerinde sönümlenme kanal katsayılarının eğitim evresinde çok doğru bir şekilde kestirilmesi ve bunların alıcı tarafta sezme metriğinde kullanılması gerekir. Pilot destekli kanal kestirimi için (8) denklemi gözlem modelinin pilot yerlerine karşılık düşen (10)'a benzer modeli aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\mathbf{Y}_D^{(p)} = \mathbf{D}^{(p)}\mathbf{F}^{(p)}\mathbf{h}_{SD}^{(p)} + \mathbf{W}_{SD}^{(p)}, \quad (11)$$

burada $\mathbf{F}^{(p)}$, \mathbf{F} matrisinin pilot yerlerine karşılık gelen satırlarında üretilen $N_p \times N$ boyutunda bir alt matrisi ve $N^{(p)}$ de pilot sayısını göstermektedir. Diğer taraftan $\mathbf{W}_{SD}^{(p)} = \mathbf{F}^{(p)}\mathbf{w}_{SD}$ olarak tanımlı olup \mathbf{W}_{SD} vektörünün pilot yerlerine karşılık gelen elemanlarından oluşan, $\Sigma_{\mathbf{W}_{SD}^{(p)}} = \mathbf{F}^{(p)}\Sigma_{\mathbf{w}_{SD}}\mathbf{F}^{(p)\dagger}$ kovaryans matrisine sahip sıfır ortalamalı kompleks toplamsal Gauss vektörüdür. $\mathbf{D}^{(p)}$ matrisi ana köşegeni pilot sembollerden oluşan bir köşegen matrisidir. Ortamın toplamsal gürültüsünün frekans domeni ifadesi $\mathbf{W}_{SD}^{(p)}$ renkli gürültü olduğundan gürültü beyazlaştırma işlemi yapılmalıdır. Bunun için $\Sigma_{\mathbf{W}_{SD}^{(p)}}$ 'nin SVD açılımının

$$\Sigma_{\mathbf{W}_{SD}^{(p)}} = \mathbf{F}^{(p)}\Sigma_{\mathbf{w}_{SD}}\mathbf{F}^{(p)\dagger} = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{U}^\dagger \quad (12)$$

olduğu düşünülürse

$$\mathbf{W}_{SD}^{(p)} = \mathbf{U}\mathbf{A}^{1/2}\tilde{\mathbf{W}}_{SD} \quad (13)$$

olacaktır ve $\tilde{\mathbf{W}} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{I}_{N^{(p)}})$ beyaz gürültüsüne sahip olmak üzere aşağıdaki gibi bir alternatif gözlem modeli elde edilir:

$$\tilde{\mathbf{Y}}_D = \mathbf{A}\mathbf{h}_{SD} + \tilde{\mathbf{W}}_{SD}. \quad (14)$$

Burada $\tilde{\mathbf{Y}}_D = \mathbf{A}^{-1/2}\mathbf{U}^\dagger\mathbf{Y}_D^{(p)}$ ve $\mathbf{A} = \mathbf{A}^{-1/2}\mathbf{U}^\dagger\mathbf{D}^{(p)}\mathbf{F}^{(p)}$ dir. Sualtı kanalların kestiriminde özellikle kanalın uzun gecikme yayımlı seyrek yapısı gözönüne alınmalıdır. Çalışmanın bu kısmında kanalın seyreklik özelliğini kullanan MP [10] algoritmasının sualtı akustik kanallarının kestirime nasıl uygulanabileceği araştırılmıştır.

Gözlem modeli ile MP algoritmasını açıklamak için (14)'deki gözlem vektörünü ele alalım. MP algoritmasının temeli, $\mathbf{r}_0 = \tilde{\mathbf{Y}}_{D,1}$ sinyal vektörü ile $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \dots, \mathbf{a}_N]$ matrisinin sütunlarından \mathbf{a}_{k_1} ile gösterilen en 'uyumlu' olan satırı bulmaya dayanmaktadır. Bu yaklaşımda, \mathbf{r}_0 vektörünün bu sütun vektörü yönüne doğru izdüşümü bulunarak elde edilen izdüşüm vektörü \mathbf{r}_0 'dan çıkarılır. Bu çıkarımdan elde edilen artık vektör \mathbf{r}_1 ile gösterilsin. Daha sonra \mathbf{A} matrisinin sütunları içinde \mathbf{r}_1 ile uyumlu en iyi \mathbf{a}_2 vektörü ve bir önceki adıma benzer şekilde yeni bir artık \mathbf{r}_2 vektörü oluşturulur. Bu iterasyon adımlarına belli bir sonlandırma kriteri sağlanıncaya kadar ve \mathbf{A} matrisinin sütunlarındaki en iyi eşleme sıralı olarak gerçekleştirilene kadar devam edilir.

Matematiksel olarak algoritmanın i . iterasyon adımı aşağıdaki gibi açıklanabilir. Öncelikle bir \mathbf{a}_j vektörü üzerindeki izdüşüm matrisi şöyle tanımlansın :

$$\mathbf{P}_{a_j} = \frac{\mathbf{a}_j\mathbf{a}_j^\dagger}{\|\mathbf{a}_j\|^2} \quad (15)$$

Bu durumda \mathbf{A} matrisinin sütun vektörleri arasında, \mathbf{r}_{i-1} artık vektörü ile en uyumlu olanı seçilir. Burada uyumluluk ölçüsü

$$k_i = \arg \max_j \frac{|\mathbf{a}_j^\dagger \mathbf{r}_{i-1}|^2}{\|\mathbf{a}_j\|^2}, \quad j = 1, 2, \dots, N$$

ve $j \notin \{k_1, k_2, \dots, k_{i-1}\}$ (16)

biçiminde tanımlanır. Bu durumda i . sırada baskın çok yollu kanal katsayısı

$$\hat{h}_i = \frac{\mathbf{a}_{k_i}^\dagger \mathbf{r}_{i-1}}{\|\mathbf{a}_{k_i}\|^2} \quad (17)$$

olarak kestirilir. Yeni artık vektör ise

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{i-1} - \hat{h}_i\mathbf{a}_{k_i}, \quad (18)$$

ilişkisinden hesaplanır. İterasyona istenen sayıda kanal katsayısı kestirilene kadar ya da seçilmiş artık vektörlerin genlikleri yeterli kadar küçük oluncaya kadar devam edilir. Kanal kestiriminin ardından doğrusal en küçük karesel hata kanal denkleştiricisi kullanılarak veri simgeleri en büyük olabilirlik karar kriterine göre belirlenir.

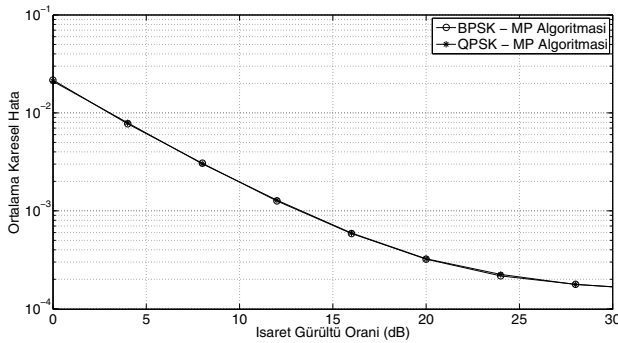
4. BİLGİSAYAR BENZETİMİ

Bu bölümde, incelenen kanal kestirim algoritması ile sistemin başarımını değerlendiren bilgisayar benzetim sonuçları sunulmaktadır. Bilgisayar benzetimleri, Tablo 1’de yer alan sistem parametreleri dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3’de MP algoritması kullanılarak ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase-shift keying (BPSK)) ve dik faz kaydırmalı anahtarlama (quadrature phase-shift keying (QPSK)) sinyallerini kullanan sistemde yapılan kanal kestirimi için ortalama kestirim hatasının sinyal-gürültü oranına göre değişimi verilmiştir. Buradan, MP algoritmasına dayanan kanal kestiriminin, durağımsı (quasi-static) kanallarda son derece iyi başarımlar gösterdiği görülmektedir. Şekil 3’de elde edilen ortalama karesel hata başarımlarında BPSK ve QPSK için yaklaşık eşit çıktığı sonucuna ulaşılmıştır. Bunun temel nedeni, bilgisayar benzetimlerinde kullanılan BPSK ve QPSK sinyallerinin sabit modüllü olmalarıdır.

Şekil 4 ise, simge hata olasılığının (symbol error rate (SER)) sinyal-gürültü oranına göre değişimini gösteren başarımlar eğrileri verilmiştir. Bu eğriler, kanalın alıcıda tam olarak bilindiği durumda hesaplanan SER başarımları ile, kanalın alıcıda bilinmemesi durumunda MP algoritması kullanarak elde edilen SER başarımlarını göstermektedir. Şekil 4’den de görüleceği gibi, SER başarımlarının hem BPSK ve hem de QPSK sinyalleri kullanılması durumunda yaklaşık eşit çıktığı sonucuna varılmıştır. Şu anda çalışmalarımız bu sonuçların işbirlikli sistem ve zamanla değişen kanallara uygulanması yönünde devam etmektedir.

Tablo 1: Bilgisayar benzetimlerinde kullanılan sistem parametreleri

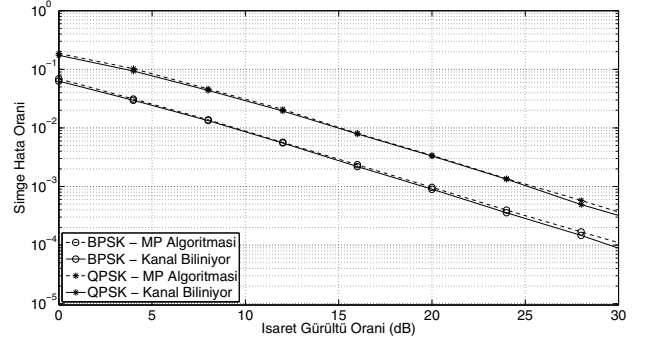
Altkanal Sayısı (N)	256
Aktif altkanal sayısı (K)	232
Band Genişliği (BW)	3 KHz
Örnekleme frekansı (f_s)	BW
Kanal yol gecikme vektörü (τ)	$[0 \ 21 \ 34 \ 52] \times T_s$
Kanal yol güçleri (Ω)	$[0.25 \ 0.5 \ 0.15 \ 0.1]$
Rician Kanal Çarpanı (K)	2 dB
$f_o T_s$	0.05
Pilot aralığı (Δ)	4



Şekil 3: MP kanal kestirimi için ortalama karesel hata

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada işbirlikli çeşitlenimin sualtı akustik iletişimine uygulanması durumunda ortaya çıkan kanal kestirim problemi incelenmektedir. Daha açıkçası kaynaktan hedef alıcıya iletimin röle arayıcılığı ile yapıldığı bir OFDM-tabanlı sistemde sualtı kanal kestirim problemi gözönüne alınmaktadır. Sualtı kanallarının seyrek bir modele sahip olması ve sisteme giren toplamal gürültünün renkli Gauss gürültüsü olması sualtı kanalları kestirim problemini zorlaştırmaktadır. Kanalın seyrek olması nedeniyle kestirim için MP algoritması uygulanmaktadır ve renkli Gauss gürültüsünü beyazlaştırmak gerekmektedir. MP algoritması kul-



Şekil 4: Kanal kestirimi altında simge hata başarımları ve kanal mükemmel biliniyor varsayımı altındaki başarımların karşılaştırılması

lanılarak ortalama hata ve simge hata olasılığı başarımları elde edilmiştir. Bilgisayar benzetim sonuçları MP algoritmasının kanal kestiriminde çok iyi bir başarımlar gösterdiğini ortaya koymuştur.

6. KAYNAKÇA

- [1] W. K. Lam and R. F. Ormondroyd, "A coherent COFDM modulation system for a time-varying frequency-selective underwater acoustic channel," *Seventh International Conference on Electronic Engineering in Oceanography*, pp. 198–203, June 1997.
- [2] Y. V. Zakharov and V. P. Kodanov, "Multipath-doppler diversity of OFDM signals in an underwater acoustic channel," *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. 2941–2944, June 2000.
- [3] H. C. Song, P. Roux, W. S. Hodgkiss, W. A. Kuperman, T. Akal, and M. Stevenson, "Multiple-input multiple-output coherent time reversal communications in a shallow-water acoustic channel," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 170–178, January 2006.
- [4] S. Roy, T. M. Duman, V. K. McDonald, and J. G. Proakis, "High-rate communication for underwater acoustic channels using multiple transmitters and space-time coding: Receiver structures and experimental results," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 32, no. 3, pp. 663–688, July 2007.
- [5] M. Uysal (Ed.), "Cooperative communications for improved wireless network transmission: Frameworks for virtual antenna array applications," *IGI Global*, July 2009.
- [6] M. Stojanovic, "Capacity of a relay acoustic link," *IEEE Oceans '07*, October 2007.
- [7] M. Vajapeyam, S. Vedantam, U. Mitra, J. C. Preisig, and M. Stojanovic, "Distributed space-time cooperative schemes for underwater acoustic communications," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 33, no. 9, pp. 489–501, October 2008.
- [8] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, December 2004.
- [9] V. Tarokh, P. Mitran, and H. Ochiari, "Variable rate two phase collaborative communication protocols for wireless networks," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 9, pp. 4299–4313, September 2006.
- [10] S. F. Cotter and B. D. Rao, "Sparse channel estimation via matching pursuit with application to equalization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 3, pp. 374–377, March 2002.