

WIMAX (IEEE 802.16e) Sistemlerinde Uyarlanırlı Antenler

A. Şafak, M. S. Özdem ve S. Karaali

Başkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Bağlıca Kampüsü, Eskişehir Yolu 20. Km, 06530, Ankara
e-posta: asafak@baskent.edu.tr

Özet—Rayleigh sönümlü kanallarda 2-6 GHz frekans aralığında, 125 km/saat’a kadar olan hızlarda hareket eden kullanıcılara yüksek hızda veri iletişimi sağlayan WIMAX (IEEE 802.16e) sistemlerinin baz istasyonlarında uyarlanırlı antenler kullanarak sistemin kapasitesini ve başarımını arttırmak mümkündür. Gezgin kullanıcılar ile baz istasyonu arasındaki senkronizasyonun sağlanabilmesi, gerekli zaman ve frekans ayarlarının yapılabilmesi için baz istasyonundaki uyarlanırlı anten sistemi tarafından sinyalin geliş yönünün (DOA) ve zamanının (TOA) duyarlı şekilde saptanması büyük önem taşımaktadır. Bu tebliğde WIMAX sistemlerinde sinyallerin geliş yönünü bulmak için Spectral, Root MUSIC ve Unitary ESPRIT, geliş zamanını bulmak için Spectral, Root MUSIC ve TLS-ESPRIT algoritmaları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlarla sinyallerin geliş yönünü ve zamanını hesaplamada ESPRIT algoritmasının MUSIC algoritmasından daha duyarlı olduğu saptanmıştır. Ayrıca, yapılan benzetim çalışmalarıyla gezgin kullanıcı hızının, çalışma frekansının, OFDM sembol süresinin, kodlamanın ve kiplemenin WIMAX sisteminin başarımı üzerindeki etkileri incelenmiş ve uygun sistem parametreleri seçilmiştir.

Endeks Terimleri—WIMAX, uyarlanırlı antenler, DOA, TOA

I. GİRİŞ

WIMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) teknolojisinin IEEE 802.16e standardı 125 km/h ‘a kadar olan gezgin kullanıcı hızlarında 2-6 GHz frekans aralığında yüksek hızda veri iletişimine olanak tanımaktadır [1-2]. WIMAX sistemlerinin baz istasyonlarında adaptif antenler kullanarak girişimi bastırmak, SINR oranını yükseltmek ve düşük bir maliyetle yüksek sistem kapasitesine ulaşmak mümkündür [3-4]. WIMAX (802.16e) sisteminin başarımı diksel frekans bölmeli çoklama (OFDM) yönteminin kullanılması nedeniyle alıcı ve verici arasındaki senkronizasyona bağlıdır. Senkronizasyonun sağlanamaması simgelerarası (ISI) ve taşıyıcılararası karışmaya (ICI) neden olur. Senkronizasyonun kurulması aşamasında gezgin kullanıcı ve baz istasyon arasındaki zaman ve frekans ayarlarının yapılması yüksek duyarlılık gerektirmektedir. Benzer şekilde, gezgin kullanıcı iletim için gerekli güç seviyesini bilmediğinden düşük güç seviyesi ile iletme başlar ve baz istasyonundan yanıt bekler. Eğer baz istasyonu gezgin kullanıcıya belirli süre içinde yanıt vermezse çağrı kaybolur ve gezgin kullanıcı yeniden ve daha yüksek güç seviyesi ile baz istasyonu ile bağlantı kurmaya çalışır. Bu durum girişim seviyesinin artmasına neden olur. Bu nedenle ağ sistemine girmeye çalışan yeni gezgin kullanıcı ile baz istasyonu arasındaki senkronizasyonun sağlanabilmesi ve

diğer gerekli zaman ve frekans ayarlarının yapılabilmesi için baz istasyonundaki uyarlanırlı anten sistemi tarafından sinyalin geliş yönünün (DOA) ve zamanının (TOA) duyarlı şekilde saptanması gerekmektedir [5-6]. Bu tebliğde sinyallerin geliş yönünü bulmak için Spectral, Root MUSIC ve Unitary ESPRIT, sinyallerin geliş zamanını saptamak için Spectral, Root MUSIC ve TLS-ESPRIT algoritmaları kullanılmıştır. Ayrıca, kipleme, kodlama, OFDM sembol süresi, araç hızı ve çalışma frekansının WIMAX sisteminin başarımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar baz istasyonlarında uyarlanırlı antenler kullanan WIMAX (IEEE 802.16e) sistemlerinin başarımı, kapasitesini incelemede ve en uygun tasarım parametrelerinin saptanmasında kullanılmıştır.

II. SINYAL GELİŞ YÖNÜNÜN SAPTANMASI

A. Spectral MUSIC Algoritması

M tane anten elemanının doğrusal ve eşit aralıklı olarak yerleştirildiği bir anten dizisine N tane sinyalin ulaştığı varsayalım. Dizi çıkışında alınan toplam sinyal [7-8]

$$u(t) = \sum_{i=0}^{N-1} a(\phi_i) s_i(t) + n(t) \quad (1)$$

$$u(t) = \begin{bmatrix} a(\phi_0) & a(\phi_1) & \dots & a(\phi_{N-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_0(t) \\ s_1(t) \\ \vdots \\ s_{N-1}(t) \end{bmatrix} + n(t) \quad (2)$$
$$= As(t) + n(t)$$

Burada $s(t)$ gelen sinyalleri içeren vektör, $n(t)$ her anten elemanına gelen gürültü bileşenlerini içeren vektör ve $a(\phi_i)$ de ϕ_i açısıyla gelen i . sinyale ait dizi izleme vektörü gösterilmektedir.

$$s(t) = [s(\phi_0) \ s(\phi_1) \ s(\phi_2) \ \dots \ s(\phi_{N-1})]^T \quad (3)$$

Spectral MUSIC algoritmasının güç spektrumu,

$$P_{MUSIC}(\phi) = \frac{a^H(\phi) a(\phi)}{a^H(\phi) V_n V_n^H a(\phi)} \quad (4)$$

Burada V_n gürültü altuzayının özvektörlerini gösterir. Algoritma $a^H(\phi) V_n$ yi en küçük yapan ϕ değerlerini arar.

Paydanın sıfıra yaklaştığı noktalarda sivri tepeler oluşur. Bu tepeler sinyallerin geliş açılarını verir.

B. Root MUSIC Algoritması

$$a(\phi) = [1 \ e^{-j\phi} \ e^{-2j\phi} \ \dots \ e^{-j(m-1)\phi}]^T \quad (5)$$

$$\mathbf{a}(z) = [1 \quad z^{-1} \quad z^{-2} \quad \dots \quad z^{-(M-1)}]^T, \quad z = e^{j\phi} \quad (6)$$

$$\mathbf{V}_n = (\mathbf{q}_N \quad \mathbf{q}_{N+1} \quad \mathbf{q}_{N+2} \quad \dots \quad \mathbf{q}_{M-1}) \quad (7)$$

$\mathbf{P}(z) = \mathbf{a}^T(z^{-1}) \mathbf{V}_n \mathbf{V}_n^H \mathbf{a}(z)$ polinomunun köklerine bakılır.

C. Unitary ESPRIT Algoritması

Faz için referans N elemanlı düzgün doğrusal anten dizisinin (ULA) merkezi olarak alındığında dizi yayılma vektörü [7-8]

$$\mathbf{a}_N(\mu) = \left[e^{-j\left(\frac{N-1}{2}\right)\mu}, \dots, e^{-j\mu}, 1, e^{j\mu}, \dots, e^{j\left(\frac{N-1}{2}\right)\mu} \right]^T \quad (8)$$

Burada N anten eleman sayısı, $\mu = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta_x u$, λ gelen sinyalin dalga boyu, Δ_x antenler arası açıklık ve u dizi eksenine göre yönü gösterir. $\mathbf{a}_N(\mu)$ 'nin simetri özelliğinden dolayı

$$\Pi_N \mathbf{a}_N(\mu) = \mathbf{a}_N^*(\mu) \quad (9)$$

$$\Pi_N = \begin{bmatrix} & & & 1 \\ & & \ddots & \\ & 1 & & \\ 1 & & & \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N \times N} \quad (10)$$

$$\mathbf{Q}_{2K} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I_K & jI_K \\ \Pi_K & -j\Pi_K \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{Q}_{2K+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} I_K & 0 & jI_K \\ 0^T & \sqrt{2} & 0^T \\ \Pi_K & 0 & -j\Pi_K \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{d}_N(\mu) = \mathbf{Q}_N^H \mathbf{a}_N(\mu) \quad (13)$$

Burada $\mathbf{Q}_N^H$ saçılma birim matrisidir ve $\mathbf{a}_N(\mu)$ 'yu $(N \times 1)$ 'lik gerçek değerli matrise çevirir.

$$e^{j\mu} J_1 \mathbf{a}_N(\mu) = J_2 \mathbf{a}_N(\mu) \quad (14)$$

$$J_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N-1 \times N} \quad (15)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{N-1 \times N}$$

$\mathbf{Q}_{N-1}^H J_2 \mathbf{Q}_N$ 'nin gerçek ve sanal kısımlarını $(N-1) \times N$ 'lik gerçek değerli K_1 ve K_2 matrisleri ile gösterelim.

$$K_1 = \text{Re}\{\mathbf{Q}_{N-1}^H J_2 \mathbf{Q}_N\} \quad \text{ve} \quad K_2 = \text{Im}\{\mathbf{Q}_{N-1}^H J_2 \mathbf{Q}_N\} \quad (16)$$

E_S gelen sinyalin ilinti matrisinin en büyük öz değerine karşılık gelen öz vektörlerden oluşan matris ise,

$$(K_1 E_S) \Psi = (K_2 E_S) \quad (17)$$

denkliği Ψ için çözülebilir. Ψ matrisinin öz değerleri DOA tahminleri için gerekli bilgiyi içermektedir.

III. SİNYAL GELİŞ ZAMANININ SAPTANMASI

A. Total Least Squares (TLS) – ESPRIT Algoritması

Sinyalin aşağıdaki özelliğe sahip olduğunu varsayalım [7-8]

$$s_0(n+1) = \alpha e^{j2\pi f(n+1)} = s_0(n) e^{j2\pi f} \quad (18)$$

$$x(n) = \sum_{p=1}^P \alpha_p v(f_p) e^{j2\pi n f_p} + w(n) \quad (19)$$

$$= V \phi^n \alpha + w(n) = s(n) + w(n)$$

$$V = [v(f_1) \quad v(f_2) \quad \dots \quad v(f_P)] \quad (20)$$

$$\Phi = \text{diag}\{\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_P\} = \begin{bmatrix} e^{j2\pi f_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{j2\pi f_2} & \dots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & e^{j2\pi f_P} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\phi_p = e^{j2\pi f_p}, \quad p = 1, 2, \dots, P \quad (22)$$

Karmaşık üstellerin toplamından oluşan sinyal için

$$s(n) = [s_{M-1}(n) \quad s(n+M-1)]^T = [s(n) \quad s_{M-1}(n+1)]^T \quad (23)$$

$s_{M-1}(n)$, $s(n)$ 'nin $(M-1)$ uzunluğundaki alt penceresidir.

$$s_{M-1}(n) = V_{M-1} \Phi^n \alpha \quad (24)$$

Benzer şekilde $V_{M-1}(f)$, $V(f)$ 'in $M-1$ uzunluğundaki alt penceresidir.

$$V_{M-1} = [V_{M-1}(f_1) \quad V_{M-1}(f_2) \quad \dots \quad V_{M-1}(f_P)] \quad (25)$$

$$V_1 = V_{M-1} \Phi^n \quad V_2 = V_{M-1} \Phi^{n+1} \quad (26)$$

$$V_1 = U_1 T, \quad V_2 = U_2 T, \quad U_2 = U_1 \Psi \quad (27)$$

Burada U_1 ve U_2 alt uzayları Ψ rotasyon matrisini gösterir.

$$\Psi = (U_1^H U_1)^{-1} U_1^H U_2 \quad (28)$$

$$V_2 = U_2 T = U_1 \Psi T \quad \text{ve} \quad V_2 = V_1 \Phi = U_1 T \Phi \quad (29)$$

İki alt uzay rotasyonu arasındaki ilişkiden

$$\Psi T = T \Phi \quad \text{ve} \quad \Psi = T \Phi T^{-1} \quad (30)$$

Φ 'nin köşegen elemanları ϕ_p 'ler Ψ 'nin özdeğerleridir.

$$\text{Frekans tahmini için } \hat{f}_p = \frac{\angle \phi_p}{2\pi} \quad (31)$$

Burada $\angle \phi_p$, ϕ_p 'nin fazını gösterir.

LS (least squares) prensibi için

$$\Psi_{ls} = (U_1^H U_1)^{-1} U_1^H U_2 \quad (32)$$

$$U_2 + E_2 = U_1 \Psi \quad (33)$$

Burada E_2 , V_2 ve U_2 altuzayları arasındaki hatayı gösterir. Burada hata sadece U_2 'ye bağlı olarak bulunur. U_1 i içermez. Bu probleme çözüm TLS ESPRIT algoritması tarafından bulunmuştur.

$$U_2 + E_2 = (U_1 + E_1) \Psi \quad (34)$$

E_1 , U_1 ve V_1 arasındaki hatayı gösterir.

$$[U_1 \quad U_2] = \tilde{L} \tilde{\Sigma} \tilde{U}^H \quad (35)$$

$$\tilde{U} = \begin{bmatrix} \tilde{U}_{11} & \tilde{U}_{12} \\ \tilde{U}_{21} & \tilde{U}_{22} \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\Psi_{TLS} = -\tilde{U}_{12}\tilde{U}_{22}^{-1} \quad (37)$$

III. WIMAX SİSTEMLERİNİN BENZETİMİ

Benzetim hesaplamalarında paket uzunluğu 100 bit, OFDM koruma aralığı sembol süresi T_s 'nin 1/8'i olarak hesaplanmıştır, çalışma frekansı 3500 ve 5800 MHz, gezgin kullanıcı hızı 30, 60 ve 120 km/saat olarak alınmıştır. MUSIC ve ESPRIT algoritmaları ile yapılan çalışmalarda örnek sayısı $N=100$, $SNR=20$ dB ve algoritma durum sayısı 10 olarak alınmıştır. Hesaplamalar sekiz ve onaltı elemanlı doğrusal eşit aralıklı anten dizileri için yapılmıştır. Anten elemanları arasındaki açıklık, dalgaboyunun yarısı kadar alınmıştır. Sinyallerin geliş açılarının bulunması ile ilgili çalışmalarda anten elemanlarına sinyallerin 85° , 90° ve 95° derecelerden geldiği varsayılmıştır. Sinyallerin geliş zamanlarının saptanması ile ilgili çalışmalarda sinyallerin anten elemanlarına varış süresi olarak 5, 10 ve 14 ns alınmıştır.

Şekil 1'de sekiz elemanlı, Şekil 2'de onaltı elemanlı eşit aralıklı anten dizisi için a)Unitary ESPRIT b) Root MUSIC c) Spectral MUSIC algoritması ile 85° , 90° ve 95° dereceden gelen sinyallerin geliş yönünün bulunması görülmektedir. Şekil 1 ve 2 incelendiğinde Unitary ESPRIT algoritmasının Root ve Spectral MUSIC algoritmasından daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğu görülmektedir. Şekil 1 ve 2 karşılaştırıldığında anten dizilerinde kullanılan eleman sayısının artmasının kullanılan algoritmaların çözünürlüğünü önemli ölçüde arttırdığı açıkça görülmektedir. Eleman sayısı arttıkça kullanılan algoritmaların çözünürlüğü artmakta ve sinyallerin geliş açıları daha az hata ile hesaplanabilmektedir. Benzer şekilde SNR oranının ve alınan örnek sayısının artmasıyla da algoritmaların çözünürlüğünün arttığı gözlenmiştir.

Şekil 3'te sekiz elemanlı, Şekil 4'de onaltı elemanlı doğrusal eşit aralıklı anten dizisi için a)TLS-ESPRIT b) Root MUSIC c) Spectral MUSIC algoritması ile 5, 10 ve 14 ns ile gelen sinyallerin geliş zamanlarının saptanması görülmektedir. Şekil 2 ve 4 incelendiğinde TLS-ESPRIT algoritmasının Root MUSIC ve Spectral MUSIC algoritmasından daha duyarlı olduğu görülmektedir. Şekil 3 ve 4 karşılaştırıldığında anten eleman sayısının artmasıyla algoritmaların duyarlılığı artmaktadır ve bu sayede sinyallerin geliş zamanları daha az hata ile hesaplanabilmektedir. Benzer şekilde, SNR oranının ve örnek sayısının artmasıyla algoritmaların duyarlılığının arttığı gözlenmiştir.

Şekil 5'de WIMAX sistemlerinde 60 km/saat gezgin kullanıcı hızı ve 5800 MHz çalışma frekansı için Rayleigh sönümlü kanalda BER üzerinde OFDM sembol süresi T_s 'nin etkisi görülmektedir. Hesaplamalar T_s 'nin 64, 128, 256 ve 512 μs değerleri için yapılmıştır. OFDM sembol süresi T_s arttıkça sistemin başarımı bozulmaktadır. Şekil 6'da WIMAX sistemlerinde 60 km/saat gezgin kullanıcı hızı ile 5800 MHz de Rayleigh sönümlü kanalda BER üzerinde modülasyon ve kodlamanın etkileri görülmektedir. 1/2 oranlı ardışık Reed-

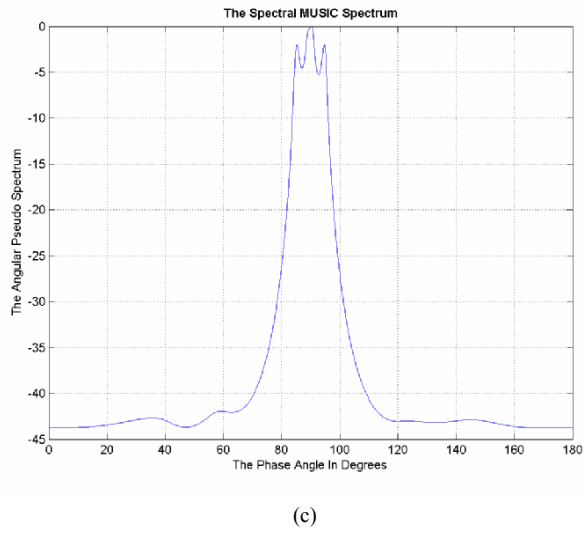
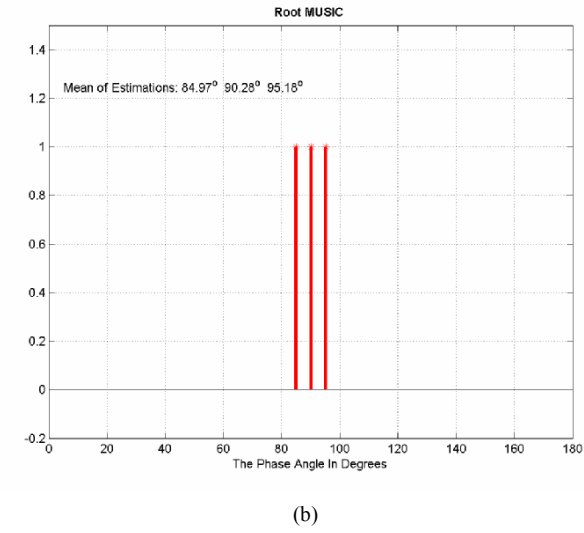
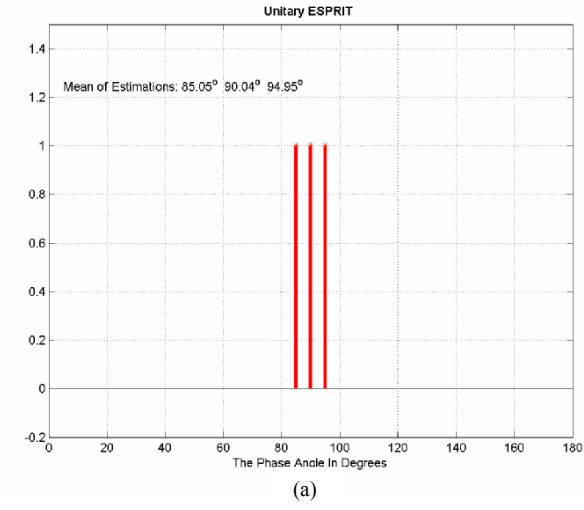
Solomon (RS-CC) ve evrişimli kodlamalı QPSK modülasyonu en iyi başarımı 3/4 RS-CC kodlamalı 64 QAM modülasyonu en kötü başarımı vermektedir. Şekil 7'de OFDM sembol süresi $T_s=128 \mu s$ için, Şekil 8'de $T_s=256 \mu s$ için QPSK 1/2 ve 5800 MHz taşıyıcı frekansı için Rayleigh sönümlü kanalda gezgin kullanıcı hızının BER üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hesaplamalarda gezgin kullanıcı hızı olarak 30, 60 ve 120 km/saat alınmıştır. Gezgin kullanıcı hızının artmasıyla sistemin başarımının bozulduğu gözlenmiştir. Şekil 5-8'de elde edilen sonuçlar [9]'da verilen sonuçlarla uyumaktadır.

IV. SONUÇLAR

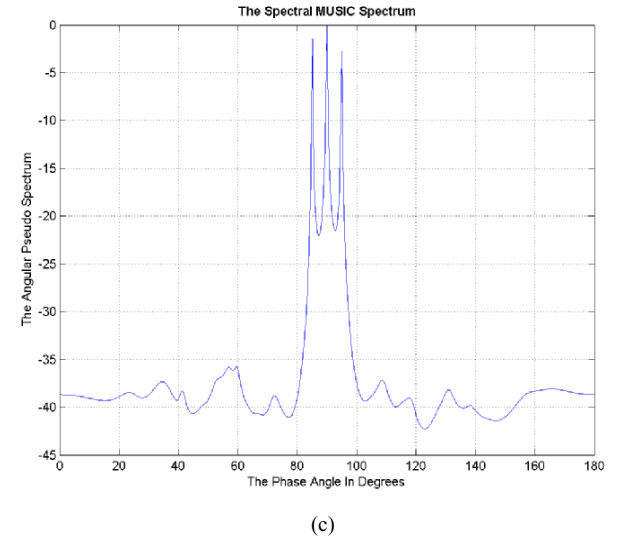
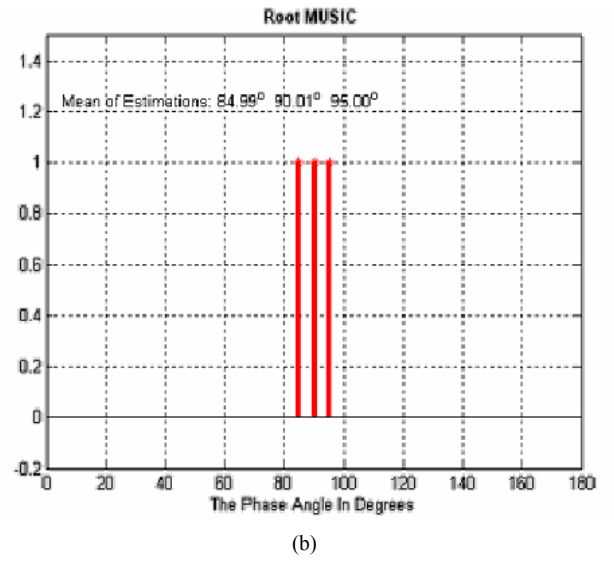
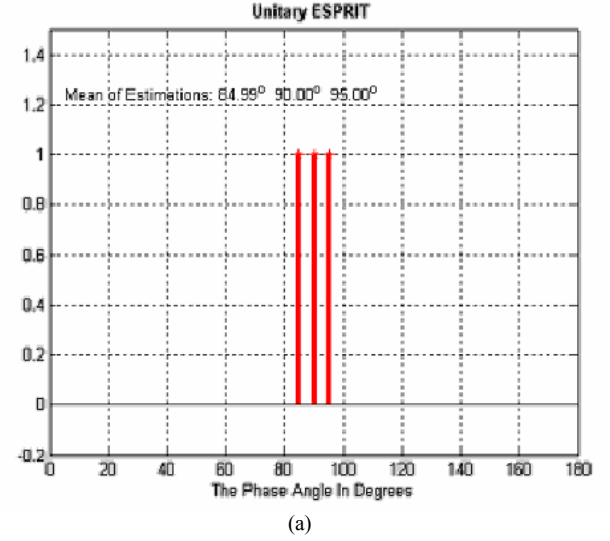
WIMAX (IEEE 802.16e) sistemlerinde gezgin kullanıcılar ile baz istasyonu arasındaki senkronizasyonun sağlanabilmesi, gerekli zaman ve frekans ayarlarının yapılabilmesi için baz istasyonundaki uyarlanabilir anten sistemi tarafından sinyalin geliş yönünün (DOA) ve zamanının (TOA) duyarlı şekilde saptanması büyük önem taşımaktadır. Bu tebliğde sinyallerin geliş yönünü bulmak için Spectral, Root MUSIC ve Unitary-ESPRIT, sinyallerin geliş zamanını bulmak için spectral, root MUSIC ve TLS-ESPRIT algoritmaları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar sinyallerin geliş yönünü ve zamanını saptamada ESPRIT algoritmasının Root ve Spectral MUSIC algoritmalarından daha yüksek çözünürlüğe sahip olduğunu göstermektedir. Anten eleman sayısının, sinyal gürültü oranının, alınan örnek sayısının artmasıyla algoritmaların çözünürlüğünün arttığı gözlenmiştir. Elde edilen benzetim sonuçları gezgin kullanıcı hızının, çalışma frekansının, OFDM sembol süresinin, kod hızının artmasıyla WIMAX sisteminin bit hata oranının arttığının, dolayısıyla sistem kapasitesinin ve başarımının düştüğü gözlenmiştir. Benzetim sonuçları 1/2 oranlı RS-CC kodlamalı QPSK modülasyonu en iyi başarımı, 3/4 RS-CC kodlamalı 64 QAM modülasyonu en kötü başarımı verdiği göstermektedir.

REFERANSLAR

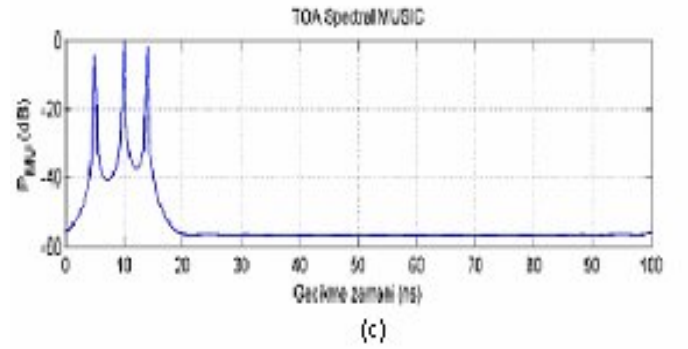
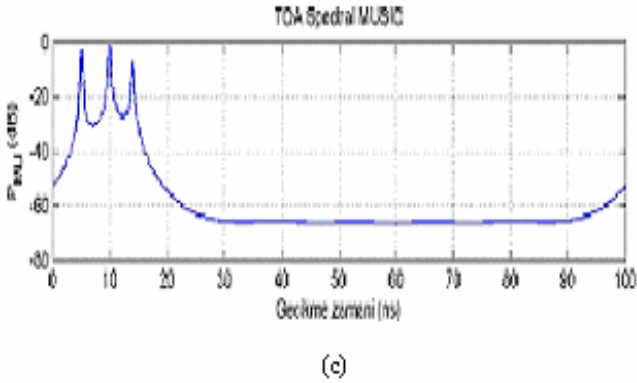
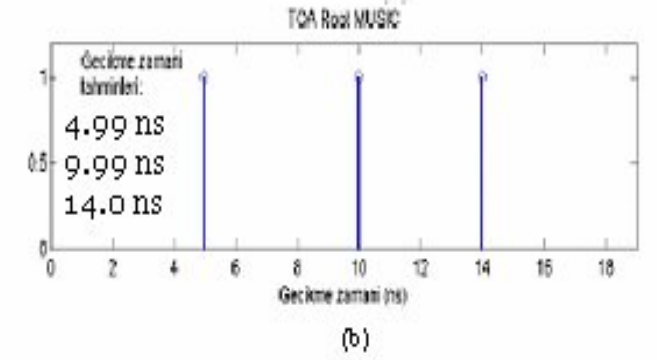
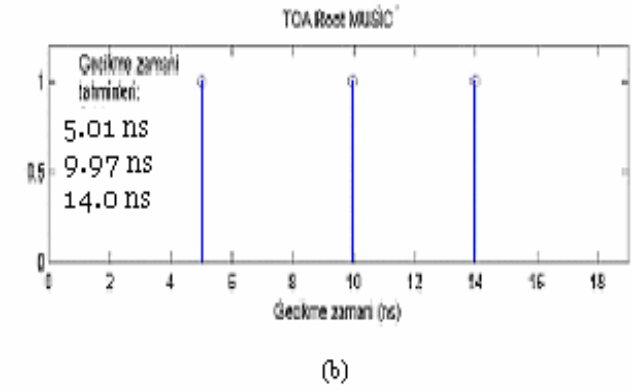
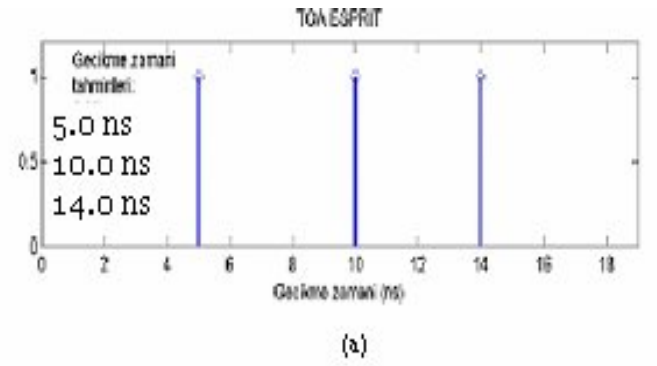
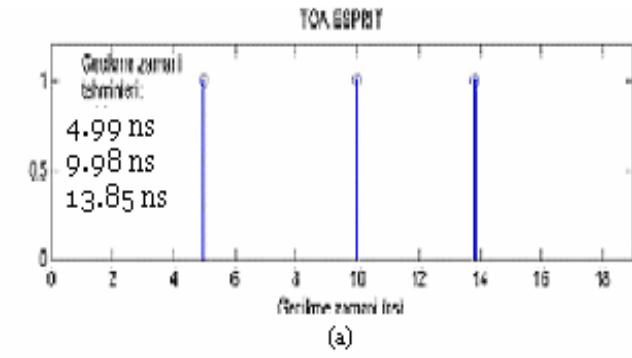
- [1] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks, "Part 16: Air Interference for Fixed Broadband Wireless Access Systems, IEEE Std 802.16™-2004", 1 Oct. 2004.
- [2] H. Yaghoobi, "Scalable OFDMA Physical Layer in IEEE 802.16 Wireless MAN", Intel Communications Group, Intel Corporation 2004.
- [3] A. Şafak, B. Uslu ve S. Bahadır, "İltili, Çoklu Girişimcili ve Gürültülü Ortamlarda, En İyi Birleştirme Sistemlerinin Karmaşık Wishart Matrisleri ile Başarım Analizi", II. İletişim Teknolojileri Ulusal Sempozyumu kitapçığı, ITUSEM 2005, 17-19 Kasım 2005, Çukurova Üniversitesi.
- [4] T. D. Pham and K. G. Balmain, "Multipath Performance of Adaptive Antennas with Multiple Interferers and Correlated Fading", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol.48, no.2, pp.342-352, March 1999.
- [5] I. Guvenc and Z. Sahinoglu, "TOA Estimation for IR-UWB Systems with Different Transceiver Types", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 4, April 2006.
- [6] C. Falsi, D. Dardari, L. Mucchi and M. Z. Win, "Time of Arrival Estimation for UWB Localizers in Realistic Environments", *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol. 2006, pg. 1-13, 2006.
- [7] J. C. Liberti, Jr. and T.S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications*, Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1999.
- [8] L. C. Godara, *Smart Antennas*, Florida: CRC Press, 2004
- [9] M. Shakeel Baig, "Signal Processing Requirements for WiMax (802.16e) Base Station", M.Sc thesis, Chalmers University of Tech., 2005.



Şekil 1. Sekiz elemanlı doğrusal anten dizisi için a) Unitary ESPRIT b) Root MUSIC c) Spectral MUSIC algoritması ile 85° , 90° ve 95° dereceden gelen sinyallerin geliş yönünün bulunması.

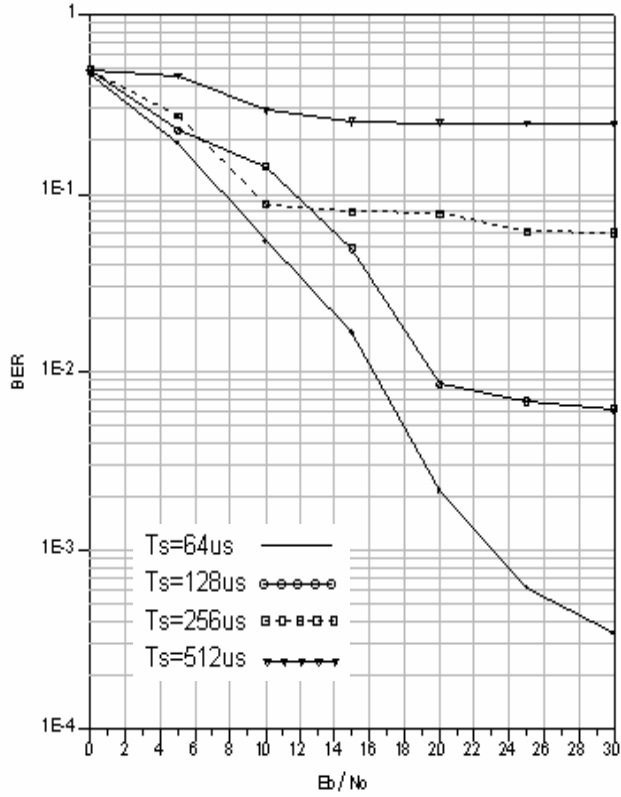


Şekil 2. Onaltı elemanlı doğrusal anten dizisi için a) Unitary ESPRIT b) Root MUSIC c) Spectral MUSIC algoritması ile 85° , 90° ve 95° dereceden gelen sinyallerin geliş yönünün bulunması.

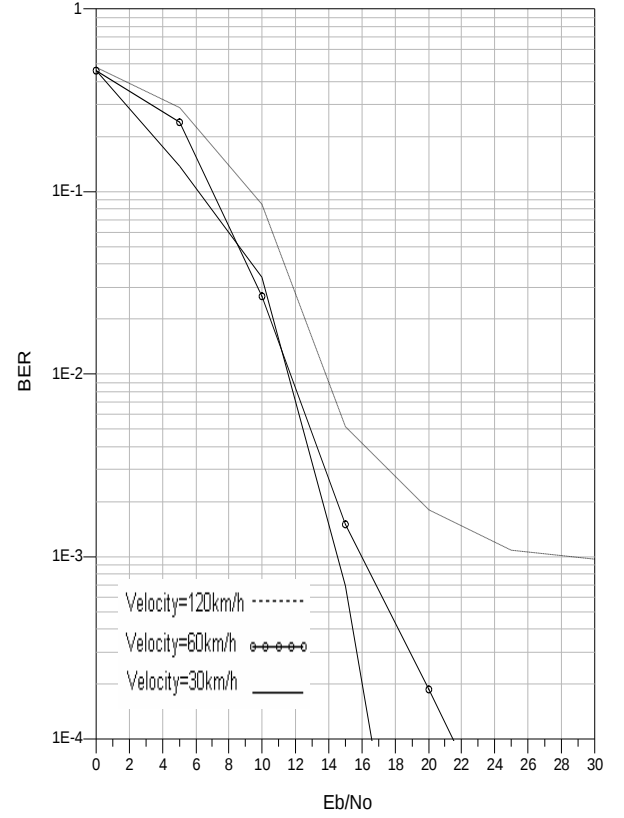


Şekil 3. Sekiz elemanlı doğrusal eşit aralıklı anten dizisi için a) TLS ESPRIT b) Root MUSIC c) Spectral MUSIC algoritması ile 5, 10 ve 14 ns ile gelen sinyallerin geliş zamanlarının bulunması.

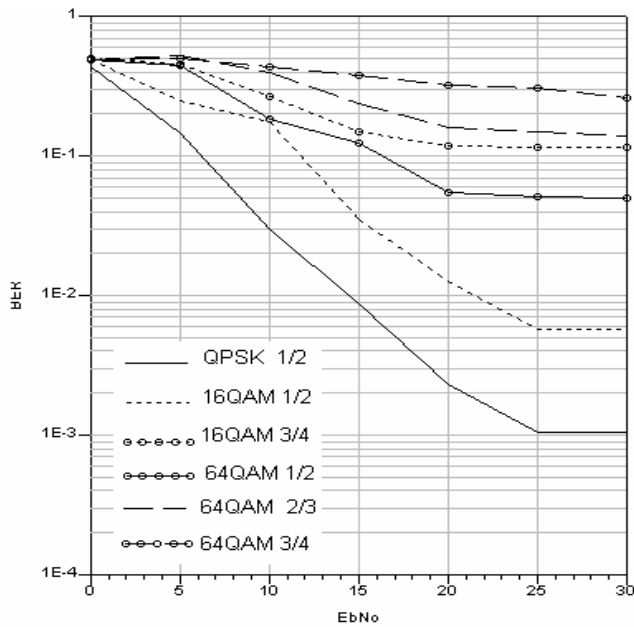
Şekil 4. Onaltı elemanlı doğrusal eşit aralıklı anten dizisi için a) TLS ESPRIT b) Root MUSIC c) Spectral MUSIC algoritması ile 5, 10 ve 14 ns ile gelen sinyallerin geliş zamanlarının bulunması.



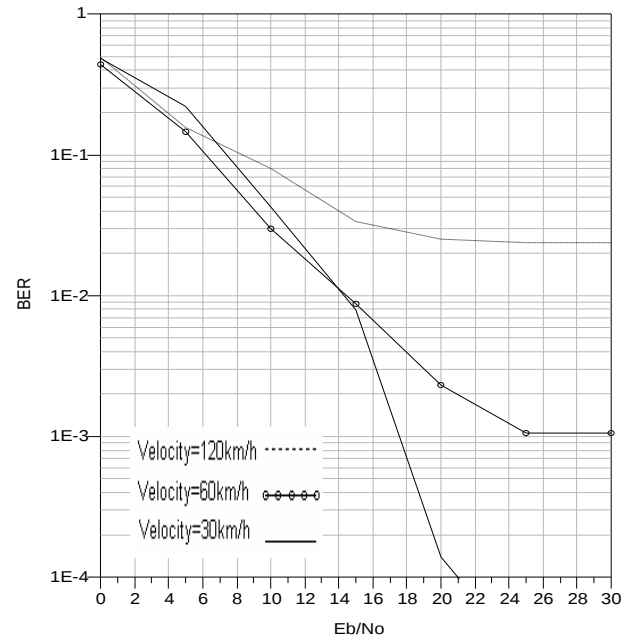
Şekil 5. WIMAX sistemlerinde 60 km/saat gezgin kullanıcı hızı ve 5800 MHz için Rayleigh sönümlü kanalda BER üzerinde OFDM sembol süresi T_s 'nin etkisi.



Şekil 7. WIMAX sistemlerinde $T_s=128 \mu s$, QPSK 1/2 ve 5800 MHz için Rayleigh sönümlü kanalda gezgin kullanıcı hızının BER üzerinde etkisi.



Şekil 6. WIMAX sistemlerinde 60 km/saat gezgin kullanıcı hızı ve 5800 MHz için Rayleigh sönümlü kanalda BER üzerinde modülasyon ve kodlamanın etkisi.



Şekil 8. WIMAX sistemlerinde $T_s=256 \mu s$, QPSK 1/2 ve 5800 MHz için Rayleigh sönümlü kanalda gezgin kullanıcı hızının BER üzerinde etkisi.