

DENEYSEL VERİ KULLANILARAK DÜŞÜK KARMAŞIKLIKLI ÇGB MESAFE KESTİRİCİLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF LOW COMPLEXITY UWB RANGE ESTIMATORS BASED ON EXPERIMENTAL DATA

Hamza Soğancı¹, Sinan Gezici¹, Ahmet Serdar Tan²

¹Bilkent Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara, Türkiye
{hsoganci, gezici}@ee.bilkent.edu.tr

²Türk Telekom Grup Ar-Ge, İTÜ Ayazağa Kampüsü, Arı 4, Maslak, 34469, İstanbul, Türkiye
ahmetserdar.tan@turktelekom.com.tr

ÖZETÇE

Bu bildiri de çok geniş bantlı (ÇGB) sistemlerde kullanılan düşük karmaşıklık ve zamana dayalı mesafe kestiricilerinin performansları deneysel veriler kullanılarak karşılaştırılmaktadır. Bu kestiriciler, karmaşıklıklarının düşük olması sebebiyle pratik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu kestiricilerin performansı, eşik değeri ve pencere boyutu gibi çeşitli parametrelerin seçimine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Yapılan deneylerde elde edilen veriler kullanılarak, bu parametrelerin çeşitli durumlar için en iyi değerleri belirlenmeye çalışılmıştır.

ABSTRACT

In this paper, performances of low complexity time based range estimators that are employed for ultra wide-band (UWB) systems are compared using experimental data. These estimators are widely used in practical applications due to their low complexity. However, performances of these estimators vary depending on the choice of certain parameters such as the threshold value and window size. The optimal values for these parameters are investigated for several situations using the data acquired in the experiments.

1. GİRİŞ

ÇGB sinyaller, dar bantlı ve geniş bantlı sinyallere kıyasla çok daha geniş bir frekans aralığı kullanmaktadır [1], [2]. Bu nedenle ÇGB sinyallerden, yüksek hızlı veri iletimi ve yüksek hassasiyetle konum belirleme gibi bazı uygulamalarda yaygın olarak yararlanılmaktadır [2]. Yüksek hassasiyetle konum belirleme kabiliyeti sayesinde ÇGB sistemler güvenlik uygulamalarında, akıllı ev sistemlerinde ve ticari üretim tesislerinde ürün takibinde kullanılabilirlerdir.

Yüksek hassasiyetle konum belirleyebilmek için öncelikle başarılı bir mesafe kestirimi yapılması büyük önem taşımaktadır. ÇGB sistemler sahip oldukları yüksek mutlak bant genişliği sayesinde çok kısa zamanlı sinyaller üretebilmektedir. Yüksek zaman çözünürlüğüne sahip bu sinyaller sayesinde, ÇGB sistemler kullanılarak hassas bir şekilde mesafe kestirimi gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca ÇGB sinyaller yüksek bağıl ('relative') bant genişliğine sahip oldukları için engellerin içinden geçebilme özelliğine sahiptir. Bu sayede referans noktası ve hedef noktasının birbirlerinin görüş çizgisinde (GÇ) olmadığı durumlarda da başarılı mesafe kestirimi gerçekleştirilebilmektedir [2].

Bu çalışma Türk Telekom tarafından 3015-02 anlaşması kapsamında desteklenmiştir.

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

Mesafe kestirimi için öncelikle mesafeye bağlı parametrelerin kestirilmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin en bilinenleri, alınan sinyal gücü (ASG), sinyal varış zamanı (SVZ) ve sinyal varış zamanı farkıdır (SVZF). Yukarıda bahsedildiği üzere, ÇGB sistemler yüksek zaman çözünürlüğüne sahip oldukları için bu sistemlerde genellikle zamana dayalı parametreler olan SVZ ve SVZF parametreleri tercih edilmektedir [3].

Zamana dayalı parametreler kullanan mesafe kestiricileri temelde iki ana gruba ayrılabilir. Birinci grup maksimum olabirlik temelli kestiricilerden oluşmaktadır. Alınan sinyalin yapısı tamamen bilindiğinde, örnek bir sinyal kullanılarak maksimum olabirlik kestirimi gerçekleştirilmek mümkün olabilir. Ancak pratik uygulamalarda, özellikle çok yollu ortamlarda alınan sinyalin yapısını tamamen bilmek mümkün değildir. Bu durumda da bütün yansımaların varış zamanlarını ve katsayılarını topluca kestirmek gerekmektedir ki bu işlemin karmaşıklığı gerçek hayat uygulamaları için çok yüksektir. İkinci grupta ise karmaşıklığı düşük, pratik kestiriciler bulunmaktadır [3].

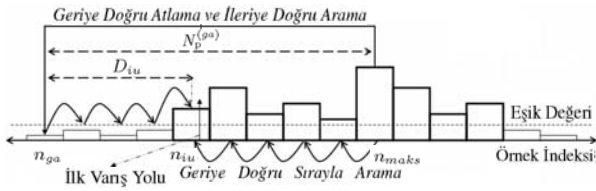
Bu bildiri de önce karmaşıklığı düşük pratik mesafe kestiricileri açıklanacaktır. Ardından bu kestiricilerin performansları, yapılan deneylerde elde edilen sonuçlar kullanılarak karşılaştırılacak ve bu kestiricilerin en iyi performans gösterebilmesi için gerekli parametre tercihleri önerilecektir. ÇGB sistemlerde kullanılan pratik mesafe kestiricilerinin performansı daha önceki çalışmalarda benzetimler yoluyla karşılaştırılmasına rağmen, gerçek veriler kullanılarak incelenmesi ve en iyi parametre değerlerinin araştırılması literatürde daha önce gerçekleştirilmemiştir.

2. DÜŞÜK KARMAŞIKLIKLI SVZ KESTİRİCİLERİ

Düşük karmaşıklık SVZ kestiricilerinin en basit olanı, alınan sinyalin en yüksek değerli örneğinin varış zamanına bakarak SVZ'yi kestirmeye çalışmaktadır [4]. Bu durumda referans noktasına ulaşan ilk sinyalin varış zamanı

$$\hat{\tau}_1 = T_{\text{orn}} k_{\text{maks}} + 0.5 T_{\text{orn}} \quad (1)$$

olarak kestirilmektedir. Burada örnekleme zamanı T_{orn} ile ifade edilmekte ve $k \in \{1, \dots, N_b\}$ olmak üzere alınan sinyal $z[k]$ 'nin en yüksek değerini veren örneğin indeksi k_{maks} ile gösterilmektedir. Denklemdeki $0.5 T_{\text{orn}}$ terimi, varış zamanının örnekleme aralığı içinde rastgele olmasından ötürü eklenmiştir. Özellikle çok yollu ortamlarda referans noktasına ulaşan ilk sinyal, en güçlü sinyal olmayabilir. Bu tür durumlarda kestirimin başarısını arttırmak için önerilen yine düşük karmaşıklık pek çok algoritma bulunmaktadır [5, 6, 7]. Bunlar içinde [7] de



Şekil 1: Geriye doğru atlama ve ileriye doğru arama (GAİA) ve geriye doğru sırayla arama (GSA) algoritmaları [2]. $N_p^{(ga)}$ geri arama penceresinin uzunluğunu, n_{maks} en güçlü örneğin indeksini, n_{iu} ilk ulaşan sinyal örneğinin indeksini, n_{ga} geri arama penceresi içerisindeki ilk örneğin indeksini ve D_{iu} geri arama penceresi içerisindeki ilk örnek ile ilk ulaşan sinyal örneği arasındaki gecikmeyi göstermektedir [8].

önerilen algoritma, alınan sinyal içinde en yüksek değere sahip N tane örnek içinden varış zamanı en erken olan örneğin varış zamanını, referans noktasına ulaşan ilk sinyalin varış zamanı olarak kabul etmektedir. *En yüksek N zirve sezimi* olarak bilinen bu algoritmada referans noktasına ulaşan ilk sinyalin varış zamanı

$$\hat{\tau}_1 = T_{orn} \min\{k_1, k_2, \dots, k_N\} + 0.5 T_{orn} \quad (2)$$

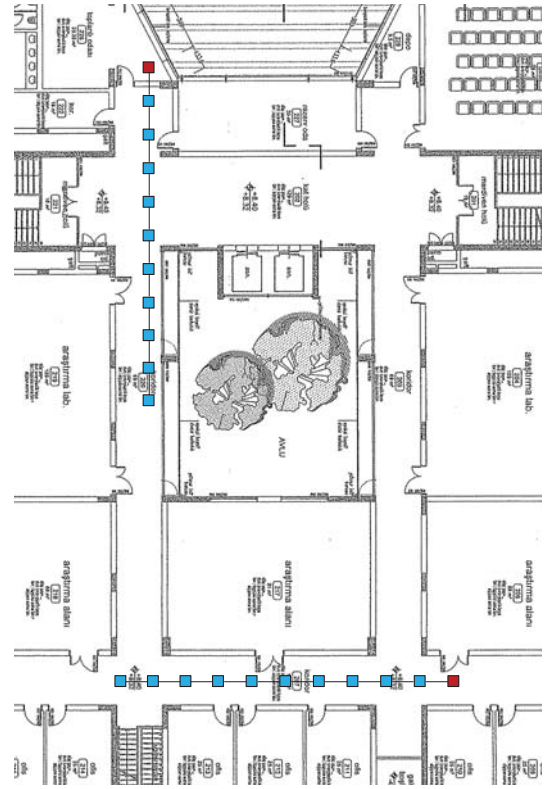
olarak kestirilmektedir. Burada k_i, i . en yüksek değerli örneğin zaman indeksini göstermektedir.

Düşük karmaşıklıkla kestiriciler içerisinde önemli bir grup da eşik değerine bağlı kestirim yapan kestiricilerdir. Bu kestiriciler alınan sinyalin örneklerini belirli eşik değerleriyle kıyaslayarak, referans noktasına ulaşan ilk sinyalin varış zamanını kestirmeye çalışırlar [9, 10, 11]. Şekil-1'de bu kestiricilerden en önemli iki tanesi, *geriye doğru atlama ve ileriye doğru arama* (GAİA) ve *geriye doğru sırayla arama* (GSA) algoritmaları açıklanmaktadır. GAİA algoritması alınan sinyal içinde en yüksek değerli örneği bulduktan sonra, bu örnekten geriye doğru belirli sıradaki bir örneğe atlar. Daha sonra bu ikinci örnekten ileriye doğru bütün örnekleri sırayla bir eşik değeri ile karşılaştırır ve bu eşik değerini geçen ilk örneğin zaman indeksini SVZ kestirimi için kullanır. Özellikle çok yollu ortamlarda, referans noktasına ulaşan ilk sinyal en yüksek değerli örnekten daha erken gelmektedir. GAİA algoritması da en yüksek değerli örnekten önceki örnekleri belirli bir eşik değeri ile karşılaştırarak, referans noktasına ulaşan ilk sinyal ile saf gürültüden oluşan örnekleri ayırt etmeye çalışır. GSA algoritması da GAİA algoritması gibi ilk önce alınan sinyal içindeki en yüksek değerli örneği tespit eder. Daha sonra bu örnekten geriye doğru bütün örnekleri sırayla bir eşik değeri ile karşılaştırır. Kendisi eşik değerini geçen ama arama yönünde kendisinden sonra eşik değerini geçmeyen bir örnek bulunan ilk örneğin zaman indeksini SVZ kestirimi için kullanır. Bu sayede, GAİA algoritmasında olduğu gibi GSA algoritması da referans noktasına ulaşan ilk sinyal ile saf gürültüden oluşan örnekleri ayırt etmeye çalışır.

3. ÖLÇÜM DÜZENİĞİ

Ölçümlerde Time-Domain firmasına ait iki adet PulsON400 model ticari ÇGB cihaz kullanılmaktadır. Bu cihazlar 3.1 GHz ve 5.3 GHz aralığını kapsayan bir çalışma bandına sahiptir. Cihazların örnekleme frekansı ise yaklaşık 16.4 GHz'dir.

Ölçümler, planı Şekil-2'de görülen Bilkent Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü binasının 2. katında gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde ÇGB cihazlardan bir tanesi referans noktası olarak sabitlenmiştir. Şekil-2'de referans cihazın konumu kırmızı nokta ile test cihazının farklı konumları da mavi noktalar ile gösterilmiştir. İlk olarak şekilde görülen 207 numaralı koridorda GÇ ölçümler gerçekleştirilmiştir. Burada 2-20 metre aralığındaki her 2 metre için 1000 ölçüm alınmıştır. İkinci olarak görüş çizgisi dışı (GÇD) ölçümler



Şekil 2: Ölçümlerin alındığı Bilkent Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü 2. katının planı.

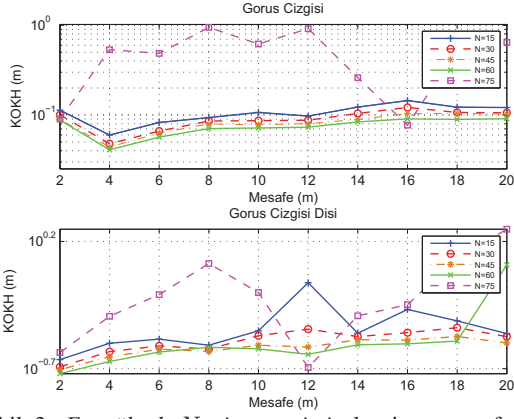
gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde referans cihaz 226 numaralı odaya yerleştirilirken, test cihazının konumu 220 numaralı koridorda farklı ölçümler için değiştirilmiştir. 226 numaralı odayı 220 numaralı koridordan ayıran duvarın kalınlığı 35 cm'dir. GÇ ölçümlerdeki gibi burada da 2-20 metre aralığındaki her 2 metre için 1000 ölçüm alınmıştır. Bütün ölçümlerde sembol başına düşen darbe sayısı 128 olarak seçilmiştir.

4. ÖLÇÜM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

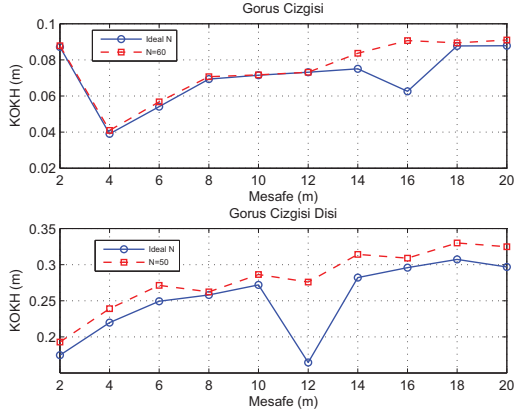
2. bölümde açıklanan dört temel algoritmadan ilki dışında kalan, *en yüksek N zirve sezimi*, GAİA ve GSA algoritmalarının performansları belirli parametrelere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. *En yüksek N zirve sezimi* algoritması için N değeri, GAİA algoritması için geriye doğru açılan pencerenin boyutu ve eşik değeri, GSA algoritması için ise eşik değeri birer tasarım parametresidir. Bu bölümde, özellikle bu üç algoritma için en iyi parametre değerleri deneylerde elde edilen veriler kullanılarak tespit edilmeye çalışılacaktır. Bu tespitten ardından bütün algoritmaların performansları her biri için en iyi parametre tercihleri kullanılarak karşılaştırılacaktır.

En yüksek N zirve sezimi algoritmasının performansı doğrudan N değerinin seçimine bağlıdır. N değerinin olması gerektiğinden düşük seçilmesi durumunda, özellikle çok yollu ortamlarda referans noktasına ulaşan ilk sinyal, seçilen N örnek arasında yer almayabilir. Bu durumda yapılan mesafe kestirimi, gerçek değerden daha yüksek bir değer alabilir. N değerinin olması gerektiğinden daha yüksek seçilmesi durumunda ise seçilen N örneğin içinde saf gürültü örnekleri bulunabilir. Bu durumda yapılan mesafe kestirimi, gerçek değerden daha yüksek veya daha düşük bir değer alabilir.

Şekil-3'te görüldüğü üzere GÇ olan durumda N değeri 60' a kadar artarken kestirim hatası giderek azalmakta, 60'tan sonra ise aşırı derecede artmaktadır. GÇD durumunda ise çoğunlukla



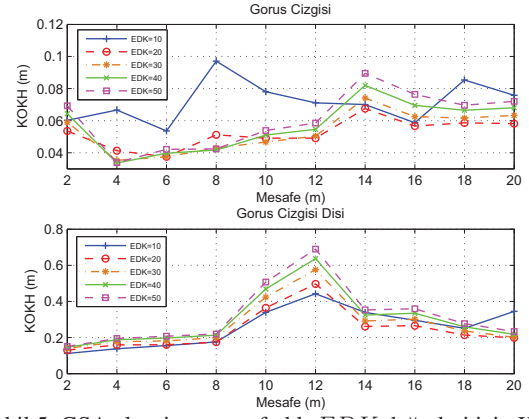
Şekil 3: En yüksek N zirve sezimi algoritmasının farklı N değerleri için kök ortalama karesel hata (KOKH) değerleri.



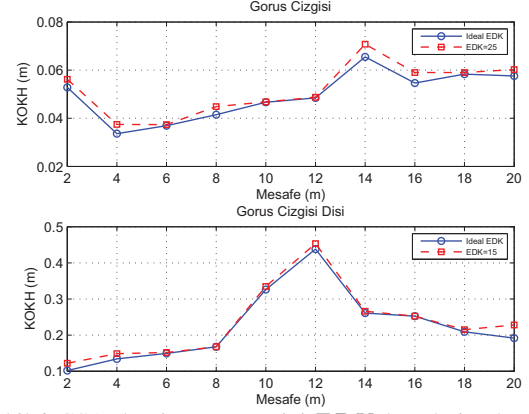
Şekil 4: En yüksek N zirve sezimi algoritmasının en iyi N değerleri ve bazı sabit değerler için KOKH değerleri.

$N = 45$ ve $N = 60$ değerlerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Tablo-1'de hem GÇ hem de GÇD durumları için her mesafede en düşük hatayı veren N değerleri gösterilmiştir. Bu değerler incelendiğinde en iyi N değerinin mesafeye bağlı düzenli ve büyük bir değişim göstermediği görülmektedir. Dolayısıyla pratikte bütün mesafeler için sabit bir N değeri kullanılabilir. Ayrıca GÇD durumunda en iyi N değerlerinin, GÇ durumuna göre daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Şekil-4'te her mesafe için en iyi N değerine karşılık gelen kestirim hataları gösterilmiştir. Ayrıca yine Şekil-4'te bütün mesafeler için N değeri GÇ durumu için 60, GÇD durumu için ise 50 olarak sabitlendiğinde oluşan kestirim hataları gösterilmiştir. Şekil-4'teki sonuçlar incelendiğinde seçilen bu değerlerin bütün mesafelerde en iyi N değerlerinin verdiği sonuçlara yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

2. bölümde açıklandığı üzere GSA algoritmasındaki tek değişken kullanılan eşik değeridir. Dolayısıyla algoritmanın performansı da doğrudan bu eşik değerinin seçimine bağlıdır. Eşik değerinin olması gerektiğinden düşük seçilmesi durumunda referans noktasına ulaşan ilk sinyalden daha önce alınan saf gürültü örneklerinden biri alınan ilk sinyal olarak seçilebilir. Bu durumda, yapılan mesafe kestirimi gerçek değerden daha düşük bir değer olabilir. Eşik değerinin olması gerektiğinden daha yüksek seçilmesi durumunda ise, çok yollu ortamdan kaynaklanan yüksek değerli örneklerden biri alınan ilk sinyal olarak seçilebilir. Bu durumda, yapılan mesafe kestirimi gerçek değerden daha yüksek bir değer olabilir. Ölçümlerde eşik değeri olarak sabit bir değer yerine, her ölçümde alınan sinyalin en yüksek değerli örneği belirli bir katsayı ile çarpılarak eşik değeri olarak kullanılmıştır. Bu durumda eşik değeri, $ED = z_{maks} EDK/10000$ olarak belirlenmiştir. Burada z_{maks} gelen sinyal $z[k]$ 'nin en yüksek değerli örneğini, EDK ise eşik değeri katsayısını göstermektedir.



Şekil 5: GSA algoritmasının farklı EDK değerleri için KOKH değerleri.



Şekil 6: GSA algoritmasının en iyi EDK değerleri ve bazı sabit değerler için KOKH değerleri.

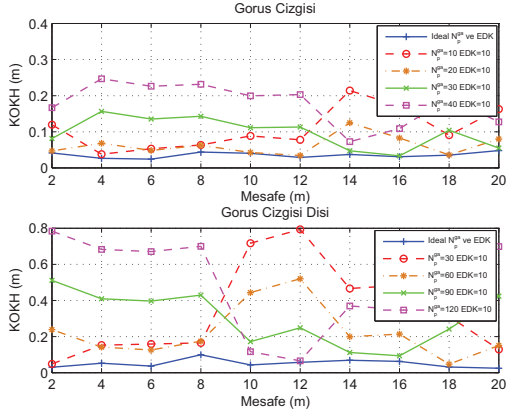
Şekil-5'te görüldüğü üzere GÇ olan durumda çoğunlukla $EDK = 20$ ve $EDK = 30$ değerlerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. GÇD durumunda ise çoğunlukla $EDK = 10$ ve $EDK = 20$ değerlerinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir. Tablo-1'de hem GÇ hem de GÇD durumları için her mesafede en düşük hatayı veren EDK değerleri gösterilmiştir. Tablo-1'de verilen sonuçlar incelendiğinde en iyi EDK değerinin mesafeye bağlı düzenli bir değişim göstermediği görülmektedir. Dolayısıyla pratikte bütün mesafeler için sabit bir EDK değeri kullanmak tercih edilebilir. Ayrıca GÇD durumunda en iyi EDK değerlerinin, GÇ durumuna göre daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Şekil-6'da her mesafe için en iyi EDK değerine karşılık gelen kestirim hataları gösterilmiştir. Ayrıca yine Şekil-6'da bütün mesafeler için EDK değeri GÇ durumu için 25, GÇD durumu için ise 15 olarak sabitlenmiştir. Şekil-6'daki sonuçlar incelendiğinde seçilen bu değerlerin bütün mesafelerde en iyi N değerlerinin verdiği sonuçlara yakın sonuçlar verdiği görülmektedir.

2. bölümde açıklandığı üzere GAİA algoritması, GSA ve en yüksek N zirve sezimi algoritmalarından farklı olarak iki parametreye bağlıdır. Dolayısıyla en iyi performansı elde edebilmek için her iki parametrenin en iyi değerleri birlikte bulunmalıdır. Eşik değeri, GSA algoritmasında olduğu gibi $ED = z_{maks} EDK/10000$ denklemleriyle hesaplanmıştır. Tablo-1'de verilen sonuçlar incelendiğinde en iyi EDK değerlerinin gerek GÇ gerekse GÇD durumunda düzenli bir değişim göstermediği gözlemlenmektedir. Bu durum GAİA algoritmasının performansının öncelikli olarak geri arama penceresinin boyutu N_p^{ga} 'ya bağlı olduğuna işaret etmektedir.

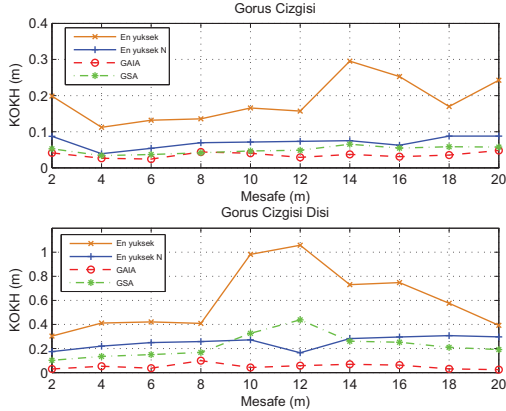
Şekil-7'de $EDK = 10$ olarak sabitlenmiştir. Şekilde görüldüğü üzere, seçilen N_p^{ga} değerinin Tablo-1'de verilen en iyi değerlere yakın olduğu mesafelerde kestirim hatası düşüken, diğer mesafelerde kestirim hatası artmaktadır. Bu

Tablo 1: *En yüksek N zirve sezimi*, GSA ve GAİA algoritmaları için en iyi parametre değerleri.

Mesafe (m)	<i>En yüksek N</i>		GSA		GAİA			
	N (GÇ)	N (GÇD)	EDK (GÇ)	EDK (GÇD)	$N_p^{(ga)}$ (GÇ)	EDK (GÇ)	$N_p^{(ga)}$ (GÇD)	EDK (GÇD)
2	72	67	15	6	24	57	34	1
4	65	64	40	8	14	99	46	15
6	67	66	23	13	15	1	47	4
8	63	56	42	15	16	51	45	77
10	61	64	26	13	19	43	108	3
12	60	105	18	11	18	10	116	2
14	68	66	17	18	34	38	80	2
16	133	63	15	15	29	11	82	44
18	66	62	23	17	19	1	64	14
20	64	47	18	23	27	4	44	2



Şekil 7: GAİA algoritmasının en iyi N_p^{ga} ve EDK değerleri ile bazı sabit değerler için KOKH değerleri.



Şekil 8: Bütün algoritmaların en iyi değerleri için kök ortalama kare hatası (KOKH) değerleri.

nedenle GAİA algoritması için bütün mesafelerde sabit N_p^{ga} değeri kullanmak doğru bir tercih olmayacaktır. Ayrıca Tablo 1'deki sonuçlardan, en iyi N_p^{ga} değerlerinin GÇ olan durumda, GÇD durumuna göre daha düşük olduğu görülmektedir.

Son olarak Şekil-8'de bütün algoritmaların en iyi değerleri için kestirim hataları gösterilmektedir. Beklenildiği üzere en yüksek değerli örneğin zaman indeksini, alınan ilk sinyalin geliş zamanı olarak kabul eden algoritma gerek GÇ gerekse GÇD durumunda bütün mesafelerde en kötü performansı göstermektedir. GÇ olan durumda bu algoritma dışında kalan bütün algoritmalar benzer performanslar göstermektedir. GÇD durumunda ise GAİA algoritması en iyi sonuçları vermektedir.

5. SONUÇLAR

Karmaşıklığı düşük ÇGB mesafe kestiricilerinin performansları, GÇ ve GÇD durumları için yapılan deneyler sonucu elde edilen veriler kullanılarak karşılaştırılmıştır.

Ayrıca elde edilen bu veriler ışığında söz konusu kestiriciler için en iyi parametre değerleri belirlenmiştir. Yapılan bu çalışmalar sonucunda GAİA algoritmasının gerek GÇ gerekse GÇD durumlarında en düşük kestirim hatası değerlerine ulaştığı görülmüştür. Ancak bu algoritma için sabit parametre değerleri kullanmanın performansı önemli oranda düşürdüğü görülmüştür. *En yüksek N zirve sezimi* ve GSA algoritmaları da GAİA'ya yakın performanslar sergilemekle beraber, sabit parametre kullanıldığında da performansları fazla bozulmamıştır. Dolayısıyla bu iki algoritma pratik uygulamalar için daha uygun görülmektedir.

6. KAYNAKÇA

- [1] H. Arslan, Z. N. Chen, and M.-G. Di Benedetto (editors), *Ultra Wideband Wireless Communication*. New York: Wiley-Interscience, 2006.
- [2] Z. Sahinoglu, S. Gezici, and I. Guvenc, *Ultra-Wideband Positioning Systems: Theoretical Limits, Ranging Algorithms, and Protocols*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2008.
- [3] H. Soganci, S. Gezici, and H.V. Poor, "Accurate positioning in ultra-wideband systems," *IEEE Wireless Communications*, vol. 18, no. 2, pp. 19–27, April 2011.
- [4] L. Stoica, A. Rabbachin, and I. Oppermann, "A low-complexity noncoherent IR-UWB transceiver architecture with TOA estimation," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 54, no. 4, pp. 1637–1646, June 2006.
- [5] D. Dardari, A. Conti, U. Ferner, A. Giorgetti, and M. Z. Win, "Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 404–426, Feb. 2009.
- [6] I. Guvenc and Z. Sahinoglu, "TOA estimation with different IR-UWB transceiver types," *IEEE Int. Conf. UWB (ICU)*, Zurich, pp. 426–431, Sept. 2005.
- [7] C. Falsi, D. Dardari, L. Mucchi, and M. Z. Win, "Time of arrival estimation for UWB localizers in realistic environments," *EURASIP J. Applied Sig. Proc.*, pp. 1–13, 2006.
- [8] I. Guvenc, S. Gezici, and Z. Sahinoglu, "Ultra-wideband range estimation: Theoretical limits and practical algorithms," *IEEE Int. Conf. Ultra-Wideband (ICUWB)*, Hannover, vol. 3, pp. 93–96, Sept. 2008.
- [9] I. Guvenc and Z. Sahinoglu, "Threshold-based TOA estimation for impulse radio UWB systems," *IEEE Int. Conf. UWB (ICU)*, Zurich, pp. 420–425, Sept. 2005.
- [10] R. A. Scholtz and J. Y. Lee, "Problems in modeling UWB channels," *IEEE Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers*, Monterey, vol. 1, pp. 706–711, Nov. 2002.
- [11] D. Dardari and M. Z. Win, "Threshold-based time-of-arrival estimators in UWB dense multipath channels," *IEEE Int. Conf. Communications (ICC)*, Istanbul, vol. 10, pp. 4723–4728, June 2006.