



<b>Citation</b>	Tuba Ayhan, Marian Verhelst and Wim Dehaene (2014) <b>Impact of multipath fading on a precise 60 GHz indoor locationing system</b> Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2014 22nd, pp. 1841 - 1844..
<b>Archived version</b>	Author manuscript: the content is identical to the content of the published paper, but without the final typesetting by the publisher
<b>Published version</b>	<a href="http://dx.doi.org/10.1109/SIU.2014.6830611">http://dx.doi.org/10.1109/SIU.2014.6830611</a>
<b>Journal homepage</b>	<a href="http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp">http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp</a>
<b>Author contact</b>	<a href="mailto:tuba.ayhan@esat.kuleuven.be">tuba.ayhan@esat.kuleuven.be</a> + 32 (0)16 321097

*(article begins on next page)*



# ÇOK YOLLU SÖNÜMLEMENİN YÜKSEK KESİNLİKLİ BİR 60 GHz İÇ ORTAM KONUMLAMA SİSTEMİNE ETKİSİ

## IMPACT OF MULTIPATH FADING ON A PRECISE 60 GHz INDOOR LOCATIONING SYSTEM

Tuba Ayhan, Marian Verhelst, Wim Dehaene

Elektrik Mühendisliği Bölümü

Leuven Üniversitesi, Belçika

{tuba.ayhan,marian.verhelst,wim.dehaene}@esat.kuleuven.be

**Özetçe** —Bu çalışma, yüksek keskinlikli bir varış zamanı (ToA) kestirim algoritmasının çok yollu sönmleme altındaki başarımını test etmektedir. 60 GHz bandında kullanılmak üzere tasarlanmış bu algoritma, 60 GHz etrafındaki 6 GHz genişliğinde lisansız olarak kullanıma sunulan geniş bantı kullanmaktadır. Konumlama için gereken pilot işaret oluşturulurken, alıcı ve verici tümleşik devrelerin gerçekleştirme koşulları da göz önüne alınmış; gerçekleştirme kriterleri pilot ve algoritma üzerinde birincil derecede önemsenmiştir. Önerilen algoritma, çok yollu sönmlemenin dikkate alınmadığı, haberleşme kanalının sadece beyaz gürültü ile bozulduğu senaryoda milimetre düzeyinde kestirim keskinliği vermiştir. Tümleşik devre üzerinde gerçeklemeye uygun bu kestirim algoritması, 2.5 ns'lik 6 GHz bant genişliğine sahip pilot işaret ile IEEE 802.15.3c kanal modelleri kullanılarak test edilmiştir. Çok yollu sönmleme altındaki başarımı ise, 2 milimetre ile 1 santimetre arasında değişmektedir.

**Anahtar Kelimeler**—60 GHz, Konumlama, İç ortam, Çok yollu sönmleme

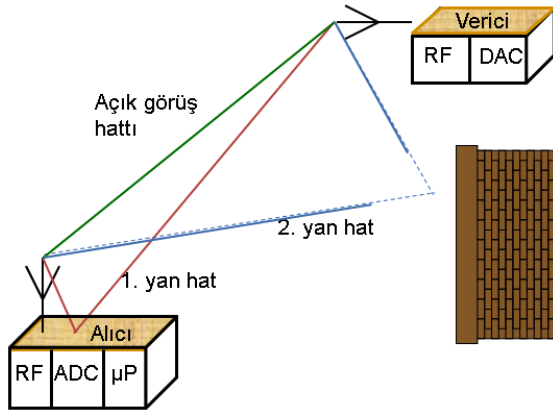
**Abstract**—In this work, performance of a precise time of arrival (ToA) estimation algorithm under multipath fading is tested. The algorithm, which is enhanced to be used for applications using 60 GHz band, is effectively using the advantage of unlicensed 6 GHz bandwidth available at 60 GHz band. A pilot signal is used for estimation. Implementation complications of transmitter and receiver circuits are taken into consideration as well as international regulations on 60 GHz band while forming this signal. Therefore, implementation details are primary concern on choosing pilot signal and ToA estimation algorithm parameters. ToA estimation algorithm under test provides millimeter level estimation precision under additive white Gaussian noise channel. When a pilot signal of 2.5 ns duration and 6 GHz bandwidth is used, estimation precision of the same algorithm varies from 2 millimeter to 1 centimeter, under the indoor environment provided by IEEE 802.15.3c channel models.

**Keywords**—60 GHz, Positioning, Indoors, Multipath Fading

### I. GİRİŞ

Ev ve üretim bandı otomasyonu, sensor ağlarının konumlaması, envanter takibi ve uzun köprü, tünel benzeri hassas teknoloji gerektiren yapı inşaatları gibi gelişme içinde olan alanlarda yüksek keskinlikli konumlama tekniklerinin kullanımı büyük ilerlemeler sağlayacaktır. Öte yandan gelişmekte olan WPAN ağlar da hızlı ve yüksek keskinlikli konumlama ve iletişime olanak sağlamıştır [1]. Alıcı ve vericinin sistem tarafından tanımlı olduğu RF tabanlı konumlama sistemlerinde, konum bilgisi RF işaretin geliş zamanına, açısına veya kuvvetine bağlı olarak kestirilebilir. Bu üç yöntemin birbirine göre üstünlükleri bulunmakla birlikte, geniş bantlı işaret kullanımına en uygun olan zamana bağlı yöntemdir [2]. Bu konumlama çalışması için geniş bantlı işaretin tercih edilme sebebi, işaretin taşıdığı konum bilgisinin, işaretin bant genişliği ile artması, bu nedenle geniş bantlı pilot işaretin kestirim keskinliğini arttırmasıdır [3]. Lisansız olarak kullanıma sunulan 60 GHz bandı, yüksek keskinlikli konumlama sistemleri için uygundur. Uluslararası frekans aralıkları düzenlemelerine göre, 60 GHz bandında 7 GHz'i bulan bant genişliklerinde lisanssız, ücretsiz kullanım mümkündür [4]. Bu bant, lisans durumu sebebiyle geniş bant iletişime açıktır. Ancak, oksijen emilimi bu bandın uzak mesafe iletişim için doğrudan kullanılmasını engeller [5]. Alıcı ile verici arasındaki mesafenin birkaç on metreyi geçmediği iç mekân konumlama sistemlerinde kullanılabilir bir banttır. İşaretin uzun mesafelere yayılması, güvenli kablosuz iletişim olanağını da beraberinde getirmektedir. Ayrıca IEEE 802.15.3c grubu, 2009'da yüksek hızlı WPAN (Wireless Personal Area Network) standartlarını yayınlamıştır [1]. Böylelikle, bandın iletişim için kullanımında da gelişmeler beklenmektedir.

Gelişmeye açık olmasına rağmen, bandın iç mekân konumlama ve kısa mesafe iletişim amacıyla kullanımında karşılaşılan iki temel sorun vardır. Bunlardan ilki, geniş bantlı iletişim için kullanılması gereken alıcı ve verici tümleşik devrelerinde, gerek yüksek taşıyıcı frekansının gerekse yüksek bant genişliğinin tasarımı güçleştirmesidir.



Şekil 1: Açık görüş hattı ve yan yolları da gösteren konumlama sistemi

Bölüm 2’de açıklanan güçlükler de gözetilerek nasıl bir konumlama işareti oluşturulabileceği Bölüm 3’te verilmiştir. Bu pilot işareti kullanarak yüksek kesinlikli bir mesafe kestirimi gerçekleştiren algoritma [6] Bölüm 4’te kısaca anlatılmış ve Bölüm 5’te de bahsedilen işaret ve algoritmanın çok yollu sönümlenme (CYS) altında iç mekan konum belirleme başarımı test edilmiştir. Son olarak bildiri Bölüm 6’da sonuçlandırılmıştır.

## II. RF TABANLI YÜKSEK FREKANS İÇ MEKAN KONUMLAMA SİSTEMLERİNDE KARŞILAŞILAN GÜÇLÜKLER

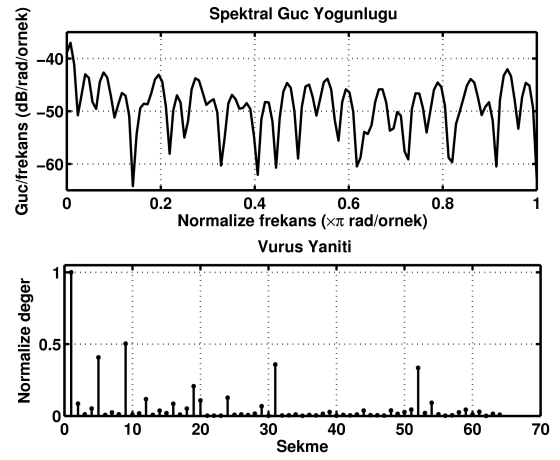
Şekil 1’de örnek bir sistem gösterilmiştir. Bu sistemde verici devre güç kuvvetlendiricisi ve anteni içeren RF kısım ile pilot işareti üreten DAÇ (dijital analog çevirici)’den; alıcı devre ise RF, ADC (analog dijital çevirici) ve örneklenmiş işareti işleyecek olan mikroişlemciden oluşur.

### A. Tümlleşik devreler

60 GHz bandında çalışan geniş bantlı alıcı ve verici tümlleşik devrelerinde, ilk etapta üç önemli tasarım güçlüğü ile karşılaşılır. Birincisi, verici tümlleşik devresinin RF kısmında bulunan güç kuvvetlendiricisinin tasarımı, ikincisi alıcı ve vericideki işaret üretimini sağlayan dijital devrenin çok geniş bantlı işaret için tasarımı ve üçüncüsü de RF ve dijital kısımların aynı devre üzerinde tümlleştirilmesidir.

Günümüzde en yüksek kazancı sağlayan kuvvetlendiriciler 17 dBm lineer çıkış kazancı sağlamaktadır [7]. 60 GHz bandındaki oksijen emilimini düşündüğümüzde, yönlendirilmiş (directed) antenler kullanılsa bile, birkaç on metre içinde vericiden gönderilen işaret büyük oranda zayıflayacak, işaretin SNR (işaret gürültü oranı) değeri sıfırın altına düşecektir. Bilindiği gibi, güç kuvvetlendiricisi tasarımında hem lineerliğin hem de verimin yüksek tutulması çok güçtür; çok geniş bantlı bir güç kuvvetlendiricisi tasarlanmak istendiğinde lineerliği koruyabilmek için verimden ödün vermek gerekir.

İşaretin dijital olarak işlendiği durumlarda, işaretin Nyquist frekansıyla örneklenmesi gerekir. Yüksek bant genişlikleri için, yüksek hızlı ve yüksek bant genişliğine sahip ADC’ler kullanılması gerekmektedir. Yüksek hızlı ve çok enerji harcayan ADC’ler kullanılmıyorsa, Nyquist altı örnekleme teknikleri



Şekil 2: Örnek kanal modeli - iç ortam, kütüphane

kullanılabilir. Bu teknikler, tümlleşik devre üzerinden birden fazla örnekleme veya RF kanalı kullanarak devre üzerindeki çeviricilerin daha düşük hızlarda çalışmasına olanak tanır [8]. Ancak, bu yöntemler devre karmaşıklığını arttırdığı için, devrenin tükettiği toplam gücü yüksek oranda düşüremezler. Geniş bantlı ve örnekleme hızı ayarlanabilir analog digital çevirici ise literatürde bulunmaktadır [9].

### B. Çok yollu sönümlenme

İç ortam konumlama en önemli sorunlardan biri çok yollu sönümlenmedir. 802.15 çalışma grubu 60 GHz bandında çeşitli iç ortam modelleri yayınlamıştır [1]. Bu modeller yaşam, ofis, kütüphane ve laboratuvar ortamlarının 57 - 60 GHz arasındaki kanal parametrelerini vermektedir. Bu kanal parametreleri ile oluşturulan ve açık görüş hattına (AGH) sahip bir kanalın spektral güç yoğunluğu Şekil 2 ile verilmiştir.

## III. İŞARETİN BELİRLENMESİ

Bir önceki bölümde bahsedilen sorunlar gözetilerek, konumlama kesinliğini de maksimize edecek şekilde bir mesafe kestirim algoritması ve pilot işareti oluşturulmuştur. Alıcı devresini Nyquist altı örnekleme tekniklerine uygun hale getirmektense, algoritmayı ve pilot işareti Nyquist frekansının altında bir frekansla örnekleme yapıldığında içindeki konum bilgisini kaybetmeyecek şekilde seçmek, bu konumlama uygulaması için daha uygundur [10]. Bu sebeple konumlama algoritması çok tonlu periyodik bir işaretin fazını kullanmaktadır. Bu çok tonlu periyodik işaretin parametreleri teorik olarak en yüksek kesinliği elde etmeye yarayacak şekilde alıcı ve vericilerin tümlleşik devrelerindeki sorunlar gözetilerek belirlenmiştir.

### A. Teorik kısıtlar

Bir kestirimin kesinliği, kestirimin standart sapması tarafından belirlenir. Kesinliğin yüksek olabilmesi için, işaretin içindeki ilgili değere ait bilginin de yüksek olması gerekir. Fisher bilgisi bir işaret içindeki bilginin ne kadar olduğunu gösteren bir ölçüdür. Cramer-Rao alt sınırı ise kestirim hatasındaki standart sapmanın belli bir değerden daha küçük olamayacağını, bu

değerin de işaretin sahip olduğu Fisher bilgisi ile ters orantılı olduğunu söyler. Bir RF işaretin sahip olduğu bilgi, işaretin süresi, efektif bant genişliği, taşıyıcı frekansı ile artar; işareti bozan etmenlerinin kuvveti ile azalır. İşareti bozan tek etmenin toplamalı beyaz Gauss gürültüsü (BGG) olduğu kabul edilirse, geniş bantlı bir işaret kullanılarak kestirilen TOA üzerindeki standart sapma  $\sigma$ , [3]'te verildiği gibi,

$$\sigma \geq \sqrt{\frac{3}{4\pi^2 T \text{SNR}((f_c + \frac{B}{2})^3 - (f_c - \frac{B}{2})^3)}} \quad (1)$$

dir.  $f_c$  taşıyıcı frekans, SNR işaret gürültü oranı,  $T$  işaretin süresini temsil etmektedir. İşaretin efektif bant genişliği ise, işaretin spektrumunda alçak ve yüksek kesim frekanslarının arasını ne oranda doldurduğu ile ilgilidir. CR alt sınırı, ToA kestirimi için öne sürülmüş tek alt sınır değildir. Daha kapsamlı ve gerçek kestiricilerle daha uyumlu çalışmalar göstermektedir ki, kestirimin kesinliği üç SNR bölgesinde incelenebilir. Bu bölgeler, gürültü işareten çok daha yüksek olduğu için kestirimin yapılamadığı yüksek gürültü bölgesi, kestirimin kesinliğinin CR alt sınırına uyduğu çalışma bölgesi ve ikisi arasındaki geçiş bölgesidir [11]. Bu bölgeleri tanımlamak için çeşitli numerik yaklaşımlar bulunsa da, kestirimin kesinliğinin CR alt sınırına uyduğu bölgede çalışılacaktır. Bu sayede, işaretin parametreleri (1) ile verilen analitik eşitsizliğin ışığında, gerçekleştirme koşulları da gözetilerek seçilebilir.

### B. Gerçekleme kısıtları

İşaret bandının seçiminde uluslararası standart enstitülerinin sınırlamaları dikkate alınmalıdır. Uluslararası bant dağılım tablolarına göre, 57 GHz-63GHz bandı vericinin çıkış gücü en fazla 40 dbm ve 27 dbm/Hz olacak şekilde lisanssız kullanıma açıktır [4]. Ancak bu kadar yüksek frekanslarda çalışan güç kuvvetlendiricileri günümüzde halen bu sınırın çok altındadır. Öte yandan, tepe gücünün işaretin ortalama gücüne oranı (peak to average power ratio) düşük olan bir konumlama işareti belirlenmelidir. Böylece kuvvetlendiricinin işareti mümkün olduğunca az bozması sağlanacaktır. Bu banda alternatif olabilecek 5 GHz ve 2.4 GHz bantlarında kullanılabilir bant genişliği sırasıyla 300 MHz ve 100 MHz' dir. (1) eşitsizliğine göre bu bantlarda ulaşılabilecek kestirim kesinliği, 60 GHz bandına oranla 53 ve 194'te bire kadar azalır. Yol kaybı ve vericinin düşük çıkış gücü sebepleriyle 60 GHz bandında alıcıya ulaşan işaretin SNR değeri 20 dB'nin altında olacaktır. İşaretin süresi ( $T$ ) uzatılarak, işaret içindeki ortalama gürültünün işaret karşısında zayıflatılması sağlanabilir. 1 eşitsizliğinde SNR ile  $T$  aynı kuvvete sahiptir, bu nedenle birinin açığı diğeri artırılarak kapatılabilir. Çok yollu sönümlemenin olmadığı bir ortamda işaretin süresi konumlaması yapılan objenin hızı ve ihtiyaç duyulan konum güncelleme hızına bağlıdır. Çok yollu sönümleme altında ise, işaret süresi kanalın tipine bağlıdır. Bu çalışmada kullanılan kanal modelleri göz önüne alındığında, simülasyon sonuçlarına dayanarak işaretin süresi 100  $\mu\text{s}$ 'yi geçmeyecek şekilde öngörülmektedir.

Tablo I'de, (1) eşitsizliğinde açıkça görülen taşıyıcı frekans, efektif bant genişliği, işaret gücü (SNR) süresi ve içerdiği ton sayısı, gerçekleştirme kısıtları ve teorik kısıtlamalar göz önüne alınarak belirlenmiştir.

Parametre	Değer	Kısıt
$f_c$	60 GHz	CR alt sınırı
B (bant genişliği)	6 GHz	Uluslararası Düzenlemeler
P (çıkış gücü)	15 dBm	60 GHz tümleşik devre
N (işaretin içerdiği ton sayısı)	16	6.4 dB Tepe/ortalama güç oranı
T (işaretin süresi)	< 100 $\mu\text{s}$	Çok yollu sönümleme karşı direnç

Tablo I: Kullanılan pilot işaretin parametreleri

## IV. MESAFE KESTİRİMİ

Alıcı ile verici arasındaki mesafenin RF işaretin alıcıya ulaştığı andaki gecikmesinin kestirimi ile hesaplandığı ToA kestirimi kullanıldı. Vericiden gönderilen işaret  $x(t)$  olmak üzere, çok yollu sönümleme göz ardı edildiğinde, alıcıya  $\tau$  kadar gecikmeyle ulaşan işaret

$$r(t) = x(t - \tau) + v(t) \quad (2)$$

dir. Kanalda işaretin bozulmasına sebep olan tek etmenin  $v(t)$  ile verilen toplamalı BGG olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda alıcı ile verici arasındaki mesafe,

$$d = c \times \tau \quad (3)$$

denkleminde  $c$  yerine manyetik dalganın ortamdaki hızı konularak hesaplanır. Konumlama için kullanılan pilot işaret,

$$x(t) = \sum_{n=1}^{N=16} A(n) \exp(j2\pi f_n t + \rho_0(n)) \quad (4)$$

frekansları  $f_n$  ile verilen genlikleri,  $A(n)$ , ve ilk fazları,  $\rho_0(n)$ , bilinen 16 tondan oluşmaktadır. Bu durumda alıcıdaki işaret

$$r(t) = \sum_{n=1}^{N=16} (n) \exp(j2\pi f_n t + \rho_0(n) - \rho(n)) + v(t) \quad (5)$$

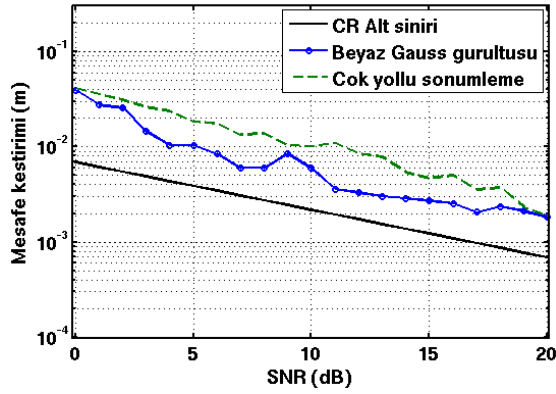
olur. Tonların genlikleri ( $n$ ),  $A(n)$ 'den farklıdır çünkü kanal tonların genliklerinde sönümlenmeye sebep olacaktır. Pilot işaretin her bir tonunun fazındaki değişim, tonun frekansı ile orantılıdır. Fazdaki değişim

$$\rho(n) = 2\pi f_n \tau \quad (6)$$

olur. Örneklenen işaretin Fourier dönüşümü yapılarak elde edilen faz değişimleri, tonların frekanslarına karşılık çizildiğinde bir doğru oluşturur, bu doğrunun eğimi  $2\pi$ 'ye bölünerek  $\tau$  bulunur. Algoritmanın detayları [6]'de verilmiştir. Çok yollu sönümleme altında ise, alıcıya ulaşan işaret

$$r(t) = \sum_{m=0}^{M-1} C(m)x(t - \tau(m)) + v(t) \quad (7)$$

şeklinde değişecektir.  $M$  alıcıya ulaşan hat sayısı,  $C(m)$  hattın genliği ve  $\tau(m)$  hattın alıcıya ulaşma süresidir. AGH mevcut kanallarda  $\tau(0) < \tau(m)$ ,  $M > m > 0$  olmak üzere  $C(0) > C(m)$ ,  $M > m > 0$  eşitsizlikleri sağlanır. Başka bir deyişle, gücü en yüksek olan hat alıcıya ilk ulaşan hatır. Çalışmanın devamında AGH'nin var olduğu kabul edilmiştir. Kestirilmek istenen büyüklük  $\tau(0)$ , yani AGH'nin uzunluğudur.



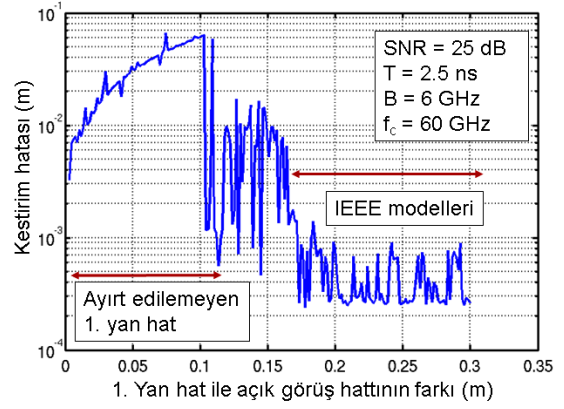
Şekil 3: Çok yollu sönümleme ve eklemeli beyaz Gauss gürültüsü altında benzetim sonuçları,  $T = 10\mu s$

## V. ÇOK YOLLU SÖNÜMLEME ALTINDA BENZETİM

Konumlama için Bölüm 2’de özellikleri belirlenen işaret kullanılmıştır. İEEE çalışma grubunun [1] yayınladığı laboratuvar kanal modelli kullanılarak Bölüm 3’te verilen algoritmanın kestirim başarımı test edilmiştir. Öncelikle verilen kanal modeline uygun 100 adet kanal üretilmiştir. Pilot işaret, simülasyon ortamında kanaldan geçirilmiş ve üzerine BGG eklenmiştir. Şekil 3’de görülen her SNR noktası için, farklı gürültü vektörleri her kanal için beş yüzer defa simüle edilmiş, toplamda 50000 uzaklık kestiriminin standart sapması ‘Çok yollu sönümleme’ eğrisinde verilmiştir. Sadece BGG ile bozulan kanalda elde edilen başarımlar da aynı şekil üzerinde ‘Beyaz Gauss gürültüsü’ eğrisi ile gösterilmiştir. Şekildeki CR alt sınırı ise 60 GHz taşıyıcı frekansında, 6 GHz bant genişliğine sahip 2.5 ns uzunluğundaki işaret kullanılarak elde edilebilecek en iyi ToA kestirim kesinliğini göstermektedir.

Çok yollu sönümleme altında sadece kestirim kesinliği değil, mutlak kestirim hatasının ortalaması olarak tanımlanan kestirim doğruluğu da tartışılmalıdır. Kestirimin doğruluğu çok yollu sönümleme altında 1.2 cm, sadece 0 ortalamalı beyaz gürültü eklendiğinde ise beklendiği gibi 0 cm’dir. Kullanılan pilot işaret ve simülasyon koşulları için kestirimin kesinliği, kestirim doğruluğuna baskın çıktığı için kestirim doğruluğuna Şekil 3’de yer verilmemiştir.

Algoritmanın başarımı, ikinci yol ile direkt yol arasındaki farkla doğrudan ilişkilidir. Bunu gösterebilmek için ikinci bir simülasyon düzeneği tasarlanmıştır. Bu düzeneğe, İEEE tarafından yayınlanan kanal modelleri değiştirilerek, birincil yan hat ile açık görüş hattının uzunlukları arasındaki fark kademeli olarak azaltılmıştır. Bu azaltma sırasında, birincil yan hattın gücü de olması gerektiği gibi artırılmıştır. Böylece gerçek ölçümlere dayanan İEEE modellerinden daha yoğun kanallar elde edilmiştir. Bu kanalların başarımlarına etkisinin simülasyonu SNR = 25 dB olacak BGG eklenerek yapılmıştır. Kullanılan SNR için teorik olarak elde edilebilecek en iyi kestirim kesinliği 0.1 mm’dir. Şekil 4 göstermektedir ki, alıcıya ulaşan ilk iki hattın birbirine çok yakın (<17 cm) olması halinde, kullanılan algoritma bu iki hattı birbirinden ayıramaktadır.



Şekil 4: 1. yan hattın başarımına etkisi

## VI. SONUÇLAR

Bu çalışmada 60 GHz’de çalışan tümleşik devrelerle gerçekleştirilecek bir iç ortam konumlama sisteminin kestirim kesinliği tartışılmıştır. 6 GHz bant genişliğinde, çok tonlu periyodik bir pilot işaret kullanan algoritmanın kesinliği 20 dB SNR’da 0.2 cm civarındadır. Beklenen teorik kestirim kesinliği ile ulaşılan kesinlik arasında sadece BGG eklenen simülasyonlarda ortalama 7 dB, CYS altında ortalama 12 dB fark vardır. Pilot işaretin bant genişliği, taşıyıcı frekansı ve vericinin çıkış gücü gerçekleştirme için gerekli olan tümleşik devrelere ve uluslararası düzenlemelere uygun olarak düzenlenmiş, işaretin süresi çok yollu sönümleme simülasyonlarına dayanılarak belirlenmiştir. Bu parametrenin de analitik olarak belirlenebilmesi için kanal modeli ile işaret süresi arasındaki ilişkinin kestirim performansına etkisi incelenmelidir.

### KAYNAKÇA

- [1] IEEE802.15.3 working group, “Standard 802.15.3,” Tech. Rep., IEEE, 2009.
- [2] *Ultra-wideband Positioning Systems*, Cambridge, 2008.
- [3] A. Quazi, “An overview on the time delay estimate in active and passive systems for target localization,” *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 29, no. 3, pp. 527 – 533, jun 1981.
- [4] “FCC first report and order: In the matter of revision of part 15 of the commission’s rules regarding ultra-wideband transmission systems, 2002, FCC 02–15,” Tech. Rep.
- [5] P. F. M. Smulders, “60 ghz radio: prospects and future directions,” in *Proceedings Symposium IEEE Benelux Chapter on Communications and Vehicular Technology*, 2003.
- [6] T. Ayhan, Redant T., M. Verhelst, and Dehaene, “Towards a fast and hardware efficient sub-mm precision ranging system,” in *Proceedings of IEEE Workshop on Signal Processing Systems (SiPS)*, 2012.
- [7] Dixian Zhao and P. Reynaert, “A 60-ghz dual-mode class ab power amplifier in 40-nm cmos,” *Solid-State Circuits, IEEE Journal of*, vol. 48, no. 10, pp. 2323–2337, 2013.
- [8] M. Mishali and Y.C. Eldar, “Sub-nyquist sampling,” *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 28, no. 6, pp. 98–124, 2011.
- [9] T. Redant, J. Daniels, M.S.J. Steyaert, and W. Dehaene, “Multiple event time-to-digital conversion-based pulse digitization for a 250 mhz pulse radio ranging application,” *Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 11, pp. 2614 –2622, nov. 2011.
- [10] T. Ayhan, W. Dehaene, and M. Verhelst, “A method for using sub-nyquist sampling for ultra low-power positioning systems,” in *Signal Processing Systems (SiPS), 2013 IEEE Workshop on*, 2013.
- [11] Z. Sahinoglu, S. Gezici, and I. Guvenc, *Ultra-Wideband Positioning Systems*, Cambridge Univ. Press, 2008.