

Kanal Modellerinin ve Seçime Bağlı Veri Hızlarının IEEE 802.15.4a Sistem Başarımına Etkileri

Effects of Channel Models and Optional Data Rates on the IEEE 802.15.4a System Performance

Çağlar Fındıklı,¹ Serhat Erkuçük²

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi,
Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul

cfindikli@itu.edu.tr

²Kadir Has Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Mühendisliği Bölümü, 34083, Cibali, İstanbul

serkucuk@khas.edu.tr

Özetçe

Kablosuz kişisel alan ağları standardı IEEE 802.15.4a aşırı geniş bantlı dürtü radyolarını (ultra wideband impulse radio – UWB-IR) kullanarak doğru yer ve uzaklık tespitinin yanısıra düşük hızlı veri aktarımı (yaklaşık 1 Mb/s) da yapar. Düşük veri hızına ek olarak standartta ayrıca 27 Mb/s'ye kadar desteklenebilen seçime bağlı veri hızları tanımlanmıştır. Bu bildiride IEEE 802.15.4a sistem başarımı seçime bağlı veri hızları ve kanal modellerinin etkileri dikkate alınarak incelenmiştir. Bu çalışmada dikkate alınan kanal modellerinde sistem başarımı değişik sayıda Rake parmakları için değerlendirilmiş, kanal kodlamasının hata düzeltme gücü değişik veri hızlarında sınanmıştır. Bu çalışmanın sonuçları IEEE 802.15.4a standardının gerçekleştirimi için önemlidir.

Abstract

The wireless personal area network standard IEEE 802.15.4a uses ultra wideband impulse radios (UWB-IRs) for precise ranging and location, and as well as for communications at low data rates (about 1 Mb/s). In addition to low data rates, there are optional data rates defined in the standard that can support up to 27 Mb/s. In this paper, the IEEE 802.15.4a system performance is studied for optional data rates in addition to considering the effect of channel models at the mandatory data rate. For the considered channel models, system performances are evaluated for different numbers of Rake fingers, and the error correction capability of channel encoding is tested at various data rates. The results of this study are important for the implementation of the IEEE 802.15.4a standard.

1. Giriş

Dürtü radyo tabanlı aşırı geniş bantlı iletişim teknolojisi (ultra wideband impulse radio – UWB-IR) [1], IEEE 802.15.4a standardının gerektirdiği doğru yer tespiti ve iz sürme gibi uygulamalar için tercih edilen bir çözümdür [2]. Bunun temel nedeni alıcıya ulaşan darbelerin zaman çözünürlüğünün çok yüksek olmasıdır. Yer ve uzaklık tespiti uygulamalarının yanısıra bu radyolar standartta belirtildiği üzere az güç harcayan ve düşük hızlı

(yaklaşık 1 Mb/s) veri iletimi yapan sistemler için de kullanılır. Gerçekleştirimi yapılacak aygıtlarda zorunlu olarak desteklenmesi gereken düşük veri hızının yanısıra, daha yüksek veri hızları da desteklenebilir. Bu hızların gerçekleştirimi standartta da belirtildiği üzere seçime bağlıdır. Seçime bağlı yüksek veri hızları elde edebilmek için işaret iletim biçiminde bazı değişiklikler yapmak gerekmektedir. Bu değişiklikler simgeler arası girişime neden olacağı için sistem başarımında azalma olacaktır.

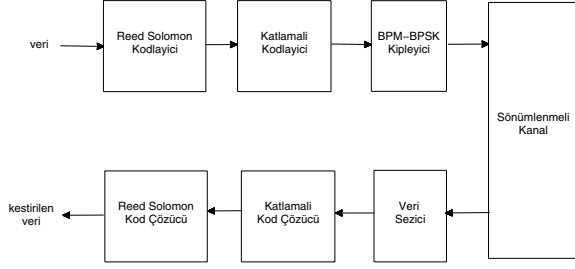
UWB-IR sistem başarımı literatürde geniş olarak incelenmiştir (bkz. [3]'ün kaynakçasındaki çalışmalara). Bu çalışmalarda yaklaşık bir nanosaniye süreli darbeler darbe konum kiplemesi (pulse position modulation – PPM) veya ikili faz kaydırmalı kipleme (binary phase shift keying – BPSK) ile iletilmiştir. IEEE 802.15.4a standardındaki UWB-IR işaret iletim biçimi ise daha farklıdır. Darbeler yerine patlamalı darbeler (bursts), tek başlarına kullanılan PPM ve BPSK kiplemeleri yerine de birleşik bir kipleme olan patlamalı darbe konum kiplemesi (burst position modulation – BPM) – BPSK (BPM-BSPK) kullanılır. Bunun sonucunda UWB-IR sistem başarımı daha farklı olacaktır. Ancak, bu iletim biçimini kullanan sistemlerin başarımı yeterince incelenmemiştir. Bu alanda yapılan çalışmaların bazıları özetle şöyledir: [4]'te kanal kodlamasının bit ve paket hata oranı analizi yapılmıştır. [5]'te dar bantlı girişimlerin sistem başarımına etkileri incelenmiştir. [6]'da çoklu erişim ortamları için iki yeni alıcı yapısı önerilmiştir. Bu çalışmaların ortak özelliği kanal modellerinin sistem başarımına etkisini detaylı bir şekilde incelememiş ve seçime bağlı veri hızlarını dikkate almamış olmalarıdır.

Bu bildiride IEEE 802.15.4a sistem başarımı kanal modellerinin ve seçime bağlı veri hızlarının etkileri dikkate alınarak incelenmiştir. Buna göre, doğrudan görüş hattı olan (line of sight – LOS) ve olmayan (NLOS) bina içi, açık hava ve endüstriyel ortamlarda yapılan ölçümler sonucu elde edilen kanal modellerinde [7], sistem başarımı zorunlu veri hızı için değerlendirilmiştir. Ayrıca zorunlu veri hızına (0.851 Mb/s) ek olarak, koruma bandı süresi azaltılarak elde edilen seçime bağlı yüksek veri hızlarında (6.81 ve 27.24 Mb/s) oluşan simgeler arası girişimin sistem başarımına etkisi ve kanal kodlamasının hata

düzeltilme kapasitesi incelenmiştir. İlgili modeller ve benzetim değerlendirme gözlemleri bildirinin diğer bölümlerinde detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Buna göre, 2. bölümde işaret modeli, kanal modelleri ve seçime bağlı veri hızları tanıtılacaktır. 3. bölümde sistem başarımı için benzetim değerlendirmeleri sunulacaktır. Son olarak 4. bölümde bu çalışmanın sonuçları özetlenecektir.

2. Sistem Modeli

IEEE 802.15.4a standardı [2] fiziksel katmanı Şekil 1’de görüldüğü gibidir. Buna göre veriler dışsal kodlama olarak Reed



Şekil 1: Fiziksel katman blok diyagramı.

Solomon kodlayıcı ile (RS(63,55)), içsel kodlama olarak da 1/2 oranlı katlamalı kodlayıcı ile kodlanmıştır. Kodlanmış veriler BPM-BPSK kiplemesi ile iletilmiştir. Sönümlenmeli kanaldan geçen işaret de kip ve kod çözme işlemlerinden geçerek verinin keştilmesinde kullanılmıştır. Şimdiki üç altbölümde sırasıyla BPM-BPSK kiplemesi işaret modeli, sönümlenmeli kanal modelleri ve seçime bağlı veri hızları sunulacaktır.

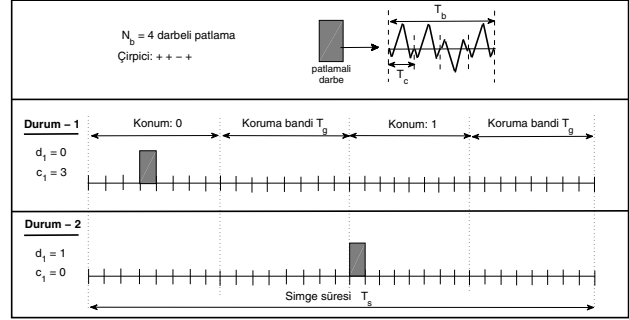
2.1. BPM-BPSK Kiplemesi İşaret Modeli

Yoğun çokyollu bir ortamda, güvenilir bir iletişim için veri iletimi patlamalı darbelerle sağlanmıştır. Patlamalı darbeler herbiri çip zamanı T_c süresinde olan N_b ardışık darbe ile iletilir. Bu durumda patlamalı darbe süresi $T_b = N_b T_c$ 'dir. Bir simge süresindeki çip sayısı N_c 'dir. Bu durumda simge süresi $T_s = N_c T_c$ 'dir. Simge içi ve simgeler arası girişimi önlemek için simge süresi patlamalı darbe süresinden oldukça büyük olmalıdır ($T_s \gg T_b$). Çoklu erişime uygun, konum ve faz bilgisi taşıyan k . kullanıcının l . simgesi aşağıdaki işaret modeliyle iletilir:

$$w_{l,tr}^{(k)}(t) = \sqrt{P^{(k)}} \sum_{j=0}^{N_b-1} a_l^{(k)} s_j^{(k)} p_{tr} \left(t - lT_s - jT_c - d_l^{(k)} \delta_p - c_l^{(k)} T_b \right). \quad (1)$$

Burada $w_{l,tr}^{(k)}(t)$, k . kullanıcının N_b ardışık darbeden oluşan l . simgesinin dalga şekli, $p_{tr}(t)$, T_p darbe genişliğiyle gönderilen darbe şekli ($T_p \leq T_c$), $P^{(k)}$, k . kullanıcının iletim gücü, ve $s_j^{(k)} \in \{\pm 1\}$, spektrum düzleştirmek ve uyumlu alıcıda girişim bastırmak için kullanılan çarpma (scrambling) dizisidir. $d_l^{(k)} \in \{\pm 1\}$ yalnızca uyumlu alıcı tarafından çözülebilen kullanıcı faz bilgisidir. Diğer taraftan δ_p 'nin konum kaydırma parametresi olduğu durumda, $d_l^{(k)} \in \{0, 1\}$ hem uyumlu hem

de uyumsuz alıcılar tarafından algılanabilen kullanıcı konum bilgisidir. Buna göre bu birleşik kipleme BPM-BPSK olarak adlandırılır. Çoklu erişim sağlayabilmek için patlamalı darbe konumunu rasgeleleştiren, kullanıcıya özel $c_l^{(k)}$ zaman-hoplama kodları kullanılır. c_{max} 'in maksimum zaman-hoplama kaydırma değeri, T_d 'nin de maksimum kanal gecikme yayılması olduğu durumlarda, $c_{max} T_b + T_d \leq \delta_p$ koşulu simgeler arası girişimi önlemek için sağlanmalıdır. Dolayısıyla koruma bandı süresi $T_g \geq T_d$ olmalıdır. Şekil 2’de BPM-BPSK kiplemesi iletim yapısı



Şekil 2: BPM-BPSK kiplemesi iletim yapısı.

$N_b = 4$, $T_s = 32T_b$, $\delta_p = 16T_b$, $T_g = 8T_b$ ve $c_{max} = 7$ için iki ayrı durumda örneklendirilmiştir. Her iki durum için de $a_l = 1$ varsayılmıştır.

N_u sayıda aktif kullanıcı olduğu durumda, alıcıdaki işaret

$$r(t) = \sum_{k=1}^{N_u} \tilde{w}_{l,rec}^{(k)}(t - \tau_k) + n(t) \quad (2)$$

şeklinde gösterilir. Burada $\tilde{w}_{l,rec}^{(k)}(t) = w_{l,rec}^{(k)}(t) \otimes h^{(k)}(t)$, k . kullanıcının l . simgesinin $h^{(k)}(t)$ kanalından geçmiş dalga şeklindedir, τ_k eşzamanlı kullanıcılar arasındaki zaman farkıdır, ve $n(t)$ çift taraflı güç spektral yoğunluğu $N_0/2$ olan toplamsal beyaz Gauss gürültüsüdür (TBGG).

Kanal dürtü yanıtı

$$h(t) = \sum_{i=0}^{L-1} h_i \delta(t - \tilde{\tau}_i) \quad (3)$$

şeklinde ve yol kaybı etkisinden kurtulmak için $\sum_{i=0}^{L-1} h_i^2 = 1$ koşulu varsayılmıştır. Burada h_i , i . çokyollu kanal katsayısı, $\tilde{\tau}_i$, i . çokyollu bileşen gecikmesi, L çokyollu bileşen sayısı ve $\delta(\cdot)$ Dirac delta işlevidir. Kanal modelleri bir sonraki altbölümde daha detaylı açıklanacaktır.

Bu çalışmada yalnızca bir aktif kullanıcı ve uyumlu alıcılar dikkate alınmıştır. Bu durumda uyumlu alıcı, referans işareti gecikmelerini kullanan Rake alıcılarıdır. Rake alıcısının i . parmağına denk gelen m . BPM konumu için ilinti çıkışı

$$\begin{aligned} D_{i,m}^{(1)} &= \int_{-\infty}^{\infty} r(t) v_m(t - \tilde{\tau}_i) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \left(\tilde{w}_{l,rec}^{(1)}(t) + n(t) \right) v_m(t - \tilde{\tau}_i) dt \end{aligned} \quad (4)$$

şeklinde. Burada $i \in \{0, \dots, L_0 - 1\}$, L_0 Rake parmak sayısı, ve $m \in \{0, 1\}$ 'dir. Referans işaret

$$v_m(t) = \sum_{j=0}^{N_b-1} a_i^{(1)} s_j^{(1)} p_{rec} \left(t - lT_s - jT_c - m\delta_p - c_i^{(1)} T_b \right) \quad (5)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada $p_{rec}(t)$, alıcı anten çıkışındaki darbe şeklindedir. Kanal parametrelerinin kestirildiği varsamıyla, kısmi Rake alıcısı çıktısı

$$D_m^{(1)} = \sum_{i=0}^{L_0-1} h_i D_{i,m}^{(1)} \quad (6)$$

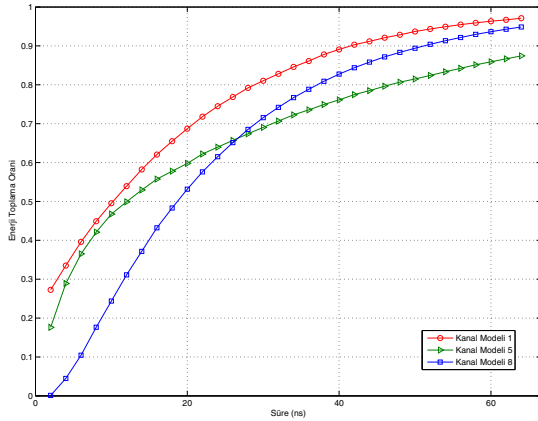
şeklinde karar değişkenlerini oluşturur. $\{D_m^{(1)}\}$ hem konum hem de faz bilgisi taşıdığı için veri sezimi mutlak değer $|\cdot|$ ve işaret $\text{sign}\{\cdot\}$ işlemleri kullanılarak

$$\begin{aligned} \max \left\{ |D_m^{(1)}| \right\} &= D_{\hat{d}_l}^{(1)} \Rightarrow \hat{d}_l \\ \text{sign} \left\{ D_{\hat{d}_l}^{(1)} \right\} &\Rightarrow \hat{a}_l \end{aligned} \quad (7)$$

şeklinde gerçekleştirilir.

2.2. Kanal Modelleri

UWB-IR sistemleri için değişik ortamlarda yapılan ölçümler sonucu çeşitli kanal modelleri belirlenmiştir [7]. Bu kanal modelleri (KM) görüş hattına (LOS ve NLOS) ve iletim ortamına (bina içi, ofis, açık hava, endüstriyel, vs.) göre sınıflandırılmıştır. Bu çalışmada doğrudan görüş hatlı KM-1 (bina içi) ve KM-5 (açık hava), ve doğrudan görüş hattı olmayan KM-8 (endüstriyel) kanal modelleri kullanılmıştır. Bu kanal modellerinin ortalama enerji toplama oranları Şekil 3'teki gibidir. Buna göre KM-1'de



Şekil 3: IEEE 802.15.4a kanal modelleri enerji toplama oranları.

kanal yayılma gecikmesi kısa süreli, kanal katsayıları da az sayıda olduğu için enerji en çabuk toplanmaktadır. Diğer taraftan KM-5 kanal gerçeklemlerinde çokyollu ışınların genelde ayrı iki grup halinde ulaştıkları gözlenmiştir. Buna göre, şekilde de görüldüğü üzere KM-5'teki enerji toplama oranı KM-8'e göre önce daha fazla, bir süre sonra da daha azdır. Bu kanal modellerindeki sistem başarımları sonraki bölümde incelenecektir.

2.3. Seçime Bağlı Veri Hızları

Altbölüm 2.1'de sunulan genel işaret modeli için standartta verilen ve zorunlu olarak desteklenmesi gereken veri hızı 0.851 Mb/s'dir. Zorunlu veri hızı şu şekilde hesaplanabilir. Veri hızlarından bağımsız olan çip süresi $T_c = 2$ ns'dir. $N_c = 512$ için simge süresi 1024 ns, bu durumda veri hızı da 1.96 Mb/s olacaktır (2 bit/simge). Çift katmanlı gönderme yönünde hata düzeltimi (GYHD) sonucu veri hızı 1.96 Mb/s'den 0.851 Mb/s'ye düşecektir. Tablo 1'de zorunlu ve seçime bağlı veri hızlarının parametreleri gösterilmiştir. Buna göre seçime bağlı veri hızları

Tablo 1: IEEE 802.15.4a tarafından desteklenen veri hızları.

	Zorunlu veri hızı	Seçime bağlı veri hızı-1	Seçime bağlı veri hızı-2
Veri hızı	0.851 Mb/s	6.81 Mb/s	27.24 Mb/s
Çip/simge (N_c)	512	64	32
Çip/patl. darbe (N_b)	16	2	1
Katl. kod. (1/2)	Var	Var	Yok
RS(63,55) kod.	Var	Var	Var

da aynı şekilde hesaplanabilir. Tablodakilere ek olarak standartta ayrıca seçime bağlı düşük veri hızı (0.11 Mb/s) da tanımlanmıştır. Tablodaki parametrelerden de görüldüğü üzere, veri hızını arttırmak için simgedeki çip sayısı azaltılmıştır. Bunun sonucunda koruma bandı süresi azalacağı için simge içi ve simgeler arası girişim artacak ve sistem başarımı etkilenecektir. Ayrıca en yüksek veri hızını (27.24 Mb/s) elde ederken katlamalı kodlama kullanılmamıştır. Bunun sonucunda kanal kodlamasının hata düzeltme kapasitesinin sınırlı olması beklenmektedir.

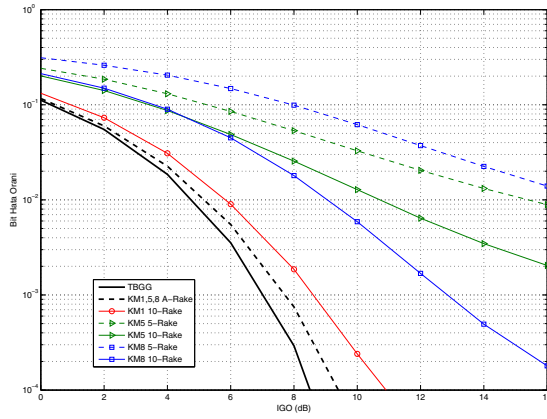
3. Benzetim Değerlendirmeleri

Bu bölümde, ilk olarak zorunlu veri hızında kanal modellerinin ve değişik sayıda Rake parmaklarının sistem başarımına etkileri incelenmiştir. Daha sonra, aynı kanal modelinde ve aynı Rake alıcısına sahip sistemlerde seçime bağlı veri hızlarının ve kanal kodlamasının sistem başarımına etkileri incelenmiştir. Sistem başarımları için bilgisayar benzetimi yaklaşımıyla değişik işaret gürlü oranlarında (İGO) bit hata oranları hesaplanmıştır.

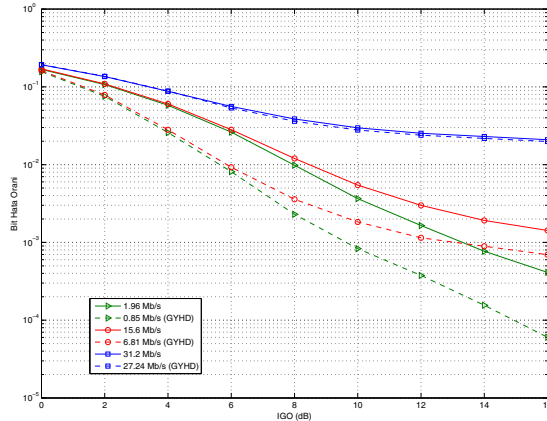
Şekil 4'te zorunlu veri hızında KM-1, KM-5 ve KM-8 kanal modelleri ile değişik sayıda Rake parmakları için sistem başarımları gösterilmiştir. Bu sistemler için Şekil 1'deki veri sezici çıktısı değerlendirilmiştir, dolayısıyla GYHD kullanılmamıştır. Şekilde görüldüğü üzere sönümlenmesi ve kanal yayılma gecikmesi olmayan TBGG kanalındaki başarımlar, Rake alıcısının tüm parmakları (A-Rake) kullanıldığı durumda sönümlenmeli kanallardaki başarımdan daha iyidir. Bu durum kanal gecikmelerinin ($\tilde{\tau}_i$), patlamalı darbelerde darbeler arası girişime neden olmasıyla açıklanabilir. KM-5 ve KM-8 kanal modellerindeki başarımlar karşılaştırıldığında, 5 parmaklı Rake (5-Rake) kullanılması durumunda KM-5'teki başarımın KM-8'deki başarımından daha iyi olduğu, 10-Rake kullanılması durumunda da tersi gözlenmektedir. Bu gözlem, Şekil 3'te sunulan kanalların enerji toplama oranları ile tutarlıdır. En son olarak KM-1'de kullanılan 10-Rake ile A-Rake başarımına yakın bir başarımlar elde edildiği söylenebilir. Bu da KM-1'de çokyollu bileşenlerin az sayıda olmasıyla açıklanabilir.

Şekil 5'te KM-1 kanal modelinde 5-Rake kullanıldığı durumda değişik veri hızlarının sistem başarımına etkisi gösterilmiştir. Bu veri hızları hem kodlama öncesi, hem de

Tablo 1’de verilen GYHD sonrası elde edilen veri hızlarıdır. Kodlamasız durumda zorunlu veri hızında (1.96 Mb/s), kanal yayılma gecikmesi simgeler arası girişime neden olmadığından ($T_g = 256$ ns) en iyi başarımlar elde edilir. Kodlamasız durumda veri hızları artırıldığında koruma bandı süreleri $T_g = \{16, 32\}$ ns olacaktır. Bu durumda simge içi ve simgeler arası girişim nedeniyle başarımlar azalmıştır. GYHD kullanılması durumunda ise 6.81 Mb/s’deki başarımlar yaklaşık 4 dB iyileştirilmiş, 27.24 Mb/s’deki başarımlar ise veri hızından ödün verilmediği (katlamalı kod kullanılmadığı) için oldukça az iyileştirilmiştir. Şekil 6’da ise KM-8 kanal modelinde 10-Rake kullanıldığı durumda değişik veri hızlarının sistem başarımına etkisi gösterilmiştir. 10 parmak kullanıldığında kodlamasız durumda bit hata oranı azaldığı için GYHD sonrası kazanımlar daha da artmıştır.



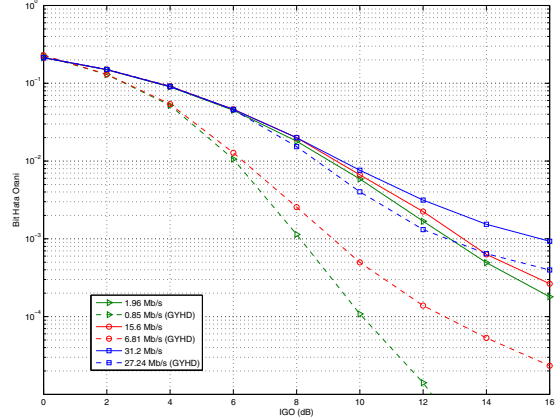
Şekil 4: Zorunlu veri hızında KM-1, KM-5 ve KM-8 kanal modelleri ve değişik sayıda Rake parmakları için sistem başarımları.



Şekil 5: KM-1 kanal modelinde 5-Rake kullanıldığı durumda değişik veri hızlarının sistem başarımına etkisi.

4. Sonuç

Bu bildiriye IEEE 802.15.4a sistem başarımı kanal modellerinin ve seçime bağlı veri hızlarının etkileri dikkate alınarak incelenmiştir. Doğrudan görüş hattı olan KM-1 ve KM-



Şekil 6: KM-8 kanal modelinde 10-Rake kullanıldığı durumda değişik veri hızlarının sistem başarımına etkisi.

5 ile doğrudan görüş hattı olmayan KM-8 kanal modellerinde sistem başarımları değişik sayıda Rake parmakları için değerlendirilmiştir. Buna göre, aynı koşullarda KM-1’deki sistem başarımı KM-5 ve KM-8’e göre her zaman daha iyidir, KM-5 ve KM-8’deki başarımlar ise Rake parmak sayısına göre değişir. İncelenen yüksek veri hızlarında çift katmanlı kodlama simgeler arası girişimin sistem başarımına etkisini azaltmıştır, ancak tek başına kullanılan Reed Solomon kodlaması yetersiz kalmıştır. Bu çalışmanın sonuçları IEEE 802.15.4a standardının gerçekleştirimi için önemlidir.

5. Kaynakça

- [1] M. Z. Win and R. A. Scholtz, “Ultra-wide bandwidth time-hopping spread-spectrum impulse radio for wireless multiple-access communications,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, pp. 679–691, Apr. 2000.
- [2] IEEE Std 802.15.4a-2007, “Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs),” 2007.
- [3] M. Ghavami, L. B. Michael, and R. Kohno, *Ultra Wideband Signals and Systems in Communication Engineering*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 2007.
- [4] Z. Ahmadian and L. Lampe, “Performance analysis of the IEEE 802.15.4a UWB System,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, pp. 1474–1485, May 2009.
- [5] M. Di Renzo, F. Tempesta, L. A. Annoni, F. Santucci, F. Graziosi, R. Minutolo, and M. Montanari, “Performance evaluation of IR-UWB D-Rake receivers over IEEE 802.15.4a multipath fading channels with narrow-band interference,” *IEEE Proc. ICUBW ’09*, pp. 71–76, Sep. 2009.
- [6] T. Erseghe and S. Tomasin, “UWB WPAN receiver optimization in the presence of multiuser interference,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, pp. 2369–2379, Aug. 2009.
- [7] A. F. Molisch et. al., “A comprehensive standardized model for ultrawideband propagation channels,” *IEEE Trans. Antennas and Prop.*, vol. 54, pp. 3151–3166, Nov. 2006.