

IEEE 802.15.4a Tabanlı Kablosuz Sensör Ağlarında Birincil Kullanıcı Algılaması Primary User Detection in IEEE 802.15.4a Based Wireless Sensor Networks

Yağmur Sabucu, Serhat Erköçük
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Kadir Has Üniversitesi, İstanbul
Email: {yagmur.sabucu, serkucuk}@khas.edu.tr

Özetçe — Dürtü radyo tabanlı ultra geniş bantlı iletişim teknolojisi (ultra wideband impulse radio, UWB-IR), IEEE 802.15.4a standardında da yer alan doğru yer tespiti ve iz sürme gibi uygulamalarda kullanılan bir teknolojidir. Bu bildiriye, birincil kullanıcıya girişim yaratmadan ikincil kullanıcılara kullanılm olanağı sağlayabilmek için bu teknolojinin kablosuz sensör ağlarında (WSNs) iki farklı IEEE 802.15.4a tabanlı kipleme ile, (i) darbe konum kiplemesi (BPPM) ve (ii) birleşik bir kipleme olan ikili faz kaymalı darbe konum kiplemesi (BPPM/BPSK), birincil kullanıcı algılama performansı incelenmiştir. Bu çalışmada iki değişik kiplemenin yanı sıra, sensörlerin algıladığı bilgiyi füzyon merkezine iletmesini etkileyen sensörlerin yanlış alarm (P_f) ve algılayamama (P_{md}) performansları ile sensör-füzyon merkezi arasındaki kanalın işaret gürültü oranı (İGO) etkisi incelenmiş ve WSN'nin gerçekleşmesi için çeşitli tavsiyelerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler— birincil kullanıcı algılaması; ultra geniş bantlı sistemler; kablosuz sensör ağları

Abstract— Ultra wideband impulse radio (UWB-IR) technology has been defined in the IEEE 802.15.4a standard for location and ranging applications. In this paper, UWB-IR sensors are considered in wireless sensor networks (WSNs) with two different IEEE 802.15.4a based signalling; (i) binary pulse position modulation (BPPM) and (ii) combined BPPM/binary phase shift keying (BPPM/BPSK) modulation, for the detection of primary users. In addition to the modulation effects, the effects of each sensor's false alarm and misdetection performances and the effect of signal-to-noise ratio (SNR) of the sensor-fusion center link have been investigated. For practical implementation of the WSN, some suggestions have been provided.

Keywords— primary user detection; ultra wideband (UWB) systems; wireless sensor networks (WSNs).

I. GİRİŞ

Ultra geniş bantlı (UWB) iletişim teknolojisi, düşük enerji gereksinimi, karmaşıklığın ve maliyetin az olması nedeniyle kablosuz sensör ağlarında (WSN) tercih sebebi olmuştur. WSN'lerde enerjinin etkin kullanımı ve pil ömrünün uzun sürmesi önemlidir. Bu yüzden WSN'lerin düşük işaret gürültü oranında (İGO) çalışması gerekir. Düşük İGO'da yapılan iyileştirme çalışmaları önem arz eder, ancak güvensiz iletişim kanalları performansta büyük düşüğe neden olabilir [2]. UWB tabanlı WSN'lerde güç kullanımını azaltmak için evreyumsuz

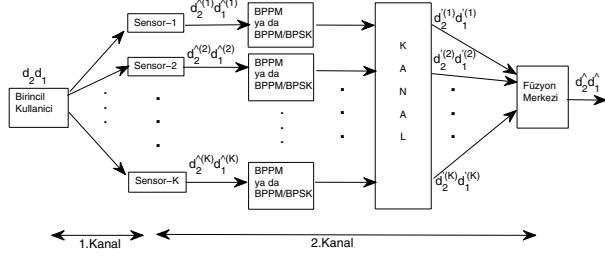
alıcılar dikkate alınmış ve çoklu erişimli kanallarda dağılımlı algılama senaryosu Rayleigh ve Rician sönümlenmeli kanallarda incelenmiştir [3].

Kanal etkisine ek olarak WSN'lerde füzyon merkezi ve karar mekanizmaları da önemli bir yere sahiptir [4]. Bu çalışmalardan [5]'te paralel füzyon WSN'lerde Nakagami-m sönümlenmeli kanalı için fırsatçı güç atama stratejisi sunulmaktadır. Karar mekanizmalarıyla ilgili olarak, Liu ve Sayeed [6]'da dik çoklu erişim kanallarında olası bütün gözlemlerin kümesinin sayısını gerektiren çeşit tabanlı (type-based) bir çoklu erişim yöntemi sunmuşlardır. [7]'de ise UWB tabanlı WSN'lerde dağılımlı algılama yöntemi frekans seçimli kanallarda incelenmiş, bu yöntemin enerji gereksinimi, band genişliği ve veri iletim hızına olan etkileri üzerine çalışılmıştır.

WSN'lerde algılama çalışmaları genelde tek bir kullanıcının algılanması üzerinedir [2]-[7]. Ancak frekans bölmeli çift yönlü sistemlerde (örneğin, yer-uydu ve uydu-yer linkleri) herbir frekans bandının dolu veya boş olmasına göre 2-bitlik bilgi taşınır [8]. Buna göre ikincil kullanıcının iletişime başlayabilmesi için birincil kullanıcının her iki bandının da boş olması gerekir. Bu çalışmada, diğer çalışmalardan farklı olarak birincil kullanıcının yer-uydu ve uydu-yer linklerinin doluluk bilgisi IEEE 802.15.4a tabanlı WSN'lerde iletilecektir. Buna göre herbir sensörden alınan iki bitlik bilgi IEEE 802.15.4a standardında yer alan evreyumsuz darbe konum kiplemesi (BPPM) veya evreyumlu ikili faz kaymalı darbe konum kiplemesi (BPPM/BPSK) ile iletilecektir. Füzyon merkezinde çoğunluk kuralı uygulanmıştır. Buna göre birincil kullanıcı algılama performansına etki edecek olan sensörlerin yanlış alarm (P_f) ve algılayamama (P_{md}) performansları, kiplemeler, sensör sayıları ve İGO'nun etkisi doğrudan görüşü olan IEEE 802.15.4a KM-1 kanal modelinde incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları IEEE 802.15.4a tabanlı WSN'lerde birincil kullanıcı algılamasının gerçekleşmesi açısından önemlidir.

II. SİSTEM MODELİ

Birincil kullanıcının UWB WSN ile algılanmasında kullanılan sistem, Şekil 1'de görüldüğü gibi birincil kullanıcı-sensör ve sensör-füzyon merkezi olmak üzere iki kanaldan oluşmaktadır. İlk kanalda birincil kullanıcının yer-uydu (up-link) ve uydu-yer (downlink) kanallarında sinyalin olup olmama durumu, sensörler tarafından bağımsız olarak değerlendirilir. Sensörler algıladıkları enerjiji belirli bir eşik



Şekil 1. Birincil kullanıcının algılanmasında kullanılan UWB tabanlı WSN

değeri ile karşılaştırarak birincil kullanıcı sinyalinin durumuna karar verirler. Buna göre birincil kullanıcının $d_2d_1 \in \{00, 01, 10, 11\}$ bilgisi ('0' kanal boş, '1' kanal dolu) k . sensör tarafından $\hat{d}_2^{(k)}\hat{d}_1^{(k)}$ olarak belirlenir. İkinci linkte ise sensörler bu kararları BPPM veya BPPM/BPSK kullanarak IEEE 802.15.4a kanalları üzerinden füzyon merkezine yollarlar. Füzyon merkezinde gelen bilgiler çoğunluk kuralına göre işlenir ve birincil kullanıcının durumu hakkında $\hat{d}_2\hat{d}_1 \in \{00, 01, 10, 11\}$ şeklinde karar verilir. Bu sistem aşağıdaki üç alt bölümde detaylandırılmıştır.

A. Birincil Kullanıcı-Sensör Kanalı Yapısı

Birincil kullanıcının yer-uydu ve uydu-yer bilgisi sırasıyla d_1 ve d_2 ile gösterilsin. Buna göre linklerin doluluk-boşluk bilgisi $d_2d_1 \in \{00, 01, 10, 11\}$ şeklinde olabilir. [8]'deki çalışmada tek bir sensör için $d_2d_1 = 00$ (sistem pasif) ve $d_2d_1 \neq 00$ (sistem aktif) durumları incelenmişti. Bu çalışmada ise her bir sensörün, sistemin aktif veya pasif olmasına karar vermesinin ötesinde, algılanan 2-bitlik bilginin IEEE 802.15.4a kanalları üzerinden füzyon merkezine gönderilmesi incelenmektedir. Bu durumda birincil kullanıcının iki linkinin de k . sensör tarafından boş algılanma olasılıkları $(j)_{10} = (x_2x_1)_2$ durumları için

$$P_j = \Pr[\hat{d}_2^{(k)}\hat{d}_1^{(k)} = 00 \mid d_2d_1 = x_2x_1] \quad (1)$$

ile gösterilsin. Burada $j \in \{0, 1, 2, 3\}$ ve $\hat{d}_2^{(k)}\hat{d}_1^{(k)}$ ise sensörün birincil kullanıcı hakkında verdiği kararı göstermektedir. [8]'deki gibi tek bir sensörün karar vereceği durumda yanlış alarm (false alarm) ve doğru algılama (detection) olasılıkları şu şekilde gösterilir:

$$P_f = 1 - P_0 \quad (2)$$

$$P_d = \sum_{j=1}^3 \frac{\Pr[d_2d_1 = x_2x_1]}{1 - \Pr[d_2d_1 = 00]} (1 - P_j) \quad (3)$$

Denklem (2) ve (3)'ün detayları [8]'de bulunabilir.

B. Sensör-Füzyon Merkezi Kanalı Yapısı

Herbir sensör verdiği $\hat{d}_2^{(k)}\hat{d}_1^{(k)}$ kararını IEEE 802.15.4a standardı kiplemelerinden BPPM veya BPPM/BPSK kullanarak füzyon merkezine gönderir.

1) *İkili Darbe Konum Kiplemesi (BPPM)*: Klasik ikili darbe konum kiplemesinde, sensörde verilen karar her iki bandın da (uzay-yer ve yer-uzay) pasif olduğu durumu '0', diğer durumları '1' kabul eder. Buna göre '0' bilgisini sembol süresinin (T_s) ilk yarısında, '1' bilgisini ise ikinci yarısında konumlandırarak gönderir. Bu çalışmada ise sensör kararı

alınırken bir bandın aktif diğerinin pasif olma durumları da hesaba katılarak, sensörün karar verdiği bilgi bir bit yerine iki bit olarak $2T_s$ sembol süresinde yollar:

$$r^{(k)}(t) = w^{(k)}(t) * h^{(k)}(t) + n^{(k)}(t) \quad (4)$$

Burada $n^{(k)}(t)$ beyaz Gauss gürültüsü, $w^{(k)}(t)$ ise k . sensörün $\hat{d}_m^{(k)}$ bilgisini taşıyan semboldür ve

$$w^{(k)}(t) = p\left(t - \hat{d}_m^{(k)}\frac{T_s}{2}\right) \quad (5)$$

şeklinde gösterilir. $p(t)$ darbe sinyalidir. $h^{(k)}(t)$ ise IEEE 802.15.4a kanallarını temsil eder ve şu şekilde gösterilebilir:

$$h^{(k)}(t) = \sum_{i=0}^{L-1} h_i \delta(t - \tau_i) \quad (6)$$

Burada h_i , i . çok yollu kanal katsayısı, τ_i , i . çok yollu bileşen gecikmesi, L , çok yollu bileşen sayısı ve $\delta(\cdot)$, Dirac delta işlevidir. BPPM, evreyuysuz bir modülasyon olduğundan en iyi karar yöntemi enerji algılanmasıdır. Bu çalışmada, sinyalin enerjisini toplamak için belirlenen entegrasyon süresi $T_i < (T_s/2)$ 'dir. Bu durumda ilk konum için $[0, T_i]$, ikinci konum için $[T_s/2, (T_s/2 + T_i)]$ aralığında toplanan enerji değerleri şu şekilde hesaplanır:

$$R_{m,l}^{(k)} = \int_{l\frac{T_s}{2}}^{l\frac{T_s}{2} + T_i} |r^{(k)}(t)|^2 dt, \quad l = \{0, 1\} \quad (7)$$

Bu değerler karşılaştırılarak $\hat{d}_m^{(k)}$, $m \in \{1, 2\}$ için karar verilir:

$$\hat{d}_m^{(k)} = \begin{cases} 0 & ; R_{m,0}^{(k)} > R_{m,1}^{(k)} \\ 1 & ; \text{diğer} \end{cases} \quad (8)$$

2) *İkili Faz Kaymalı Darbe Konum Kiplemesi (BPPM/BPSK)*: Bu kipleme BPPM ve BPSK kiplemelerinin birleşiminden oluşur. Bu kiplemde sensörde karar verilen iki bitlik bilginin bir biti BPPM ile konumlandırılırken, diğeri BPSK ile kutup bilgisi taşır. Sembol aşağıdaki gibi oluşturulur:

$$w^{(k)}(t) = \hat{d}_s^{(k)} p\left(t - \hat{d}_2^{(k)}\frac{T_s}{2}\right) \quad (9)$$

Burada $\hat{d}_s^{(k)}, \hat{d}_1^{(k)} \in \{0, 1\}$ kullanılarak elde edilen $\{\pm 1\}$ şeklindeki faz bilgisidir. Alıcındaki işaret $r^{(k)}(t) = w^{(k)}(t) * h^{(k)}(t) + n^{(k)}(t)$ şeklindedir. Kanal katsayıları önceden kestirildiği durumda evreyuysuz Rake alıcıları kullanılır. Buna göre referans işareti $v_m(t) = p\left(t - m\frac{T_s}{2}\right)$, $m \in \{0, 1\}$ kullanıldığı durumda

$$R_{i,m}^{(k)} = \int_{-\infty}^{\infty} r(t)v_m(t - \tau_i)dt, \quad i \in \{0, \dots, L_r - 1\} \quad (10)$$

hesaplanır. Burada L_r Rake parmak sayısıdır. Rake alıcı çıktısı

$$R_m^{(k)} = \sum_{i=0}^{L_r-1} h_i^{(k)} R_{i,m}^{(k)} \quad (11)$$

şeklinde oluşturulur. $\{R_m^{(k)}\}$ hem konum hem de faz bilgisi taşıdığı için

$$\begin{aligned} \max \{|R_m^{(k)}|\} &= R_{d_2'}^{(k)} \rightarrow d_2' \\ \text{sign}\{R_{d_2'}^{(k)}\} &\rightarrow d_1' \end{aligned} \quad (12)$$

ile $d_2^{(k)}$ $d_1^{(k)}$ bilgisine karar verilir. Burada verilen kararlar, ilk kanaldaki yanlış alarm ve algılayamama olasılık hesaplarına benzer şekilde $m = \{1, 2\}$ olduğu iki farklı durum için hata olasılığı hesabı yapılır:

$$P_{e,m} = \Pr[d_m' \neq \hat{d}_m^{(k)} \mid \hat{d}_m^{(k)} = x_m], \quad x_m \in \{0, 1\} \quad (13)$$

İkinci kanaldan gelen bilgi doğrultusunda, k . sensörde oluşabilecek dört farklı $j \in \{0, 1, 2, 3\}$ durumu için füzyon merkezinde pasif kararı alınması olasılığı şu şekilde gösterilebilir:

$$P_{e,j} = \prod_{m=1}^2 (P_{e,m})^{x_m^{(k)}} (1 - P_{e,m})^{(1-x_m^{(k)})} \quad (14)$$

C. Füzyon Merkezi

Sensörlerden gelen bilgiler toplanır ve çoğunluk kuralı ile karar verilir. Sistemde tek bir sensör olduğu durumda çoğunluk kuralına gerek yoktur. Çoklu sistemlerde ise her bir sensör verdiği kararı ortogonal kanaldan füzyon merkezine iletir.

1) *Tek Sensör Kararı:* Sistemde tek bir sensör aktif olduğu durumda füzyon merkezi $\{d_2^{(k)}, d_1^{(k)}\}$ bilgisine göre karar verir. Buna göre yanlış alarm, $P_{f,T}^{(k)}$, ve algılayamama, $P_{md,T}^{(k)}$, olasılıkları II.A ve II.B bölümlerinden yararlanılarak şu şekilde elde edilebilir:

$$P_{f,T}^{(k)} = \sum_{j=0}^3 P_{f,j} (1 - P_{e,j}) \quad (15)$$

$$P_{md,T}^{(k)} = \sum_{j=0}^3 P_{md,j} (P_{e,j}) \quad (16)$$

Burada (2) ve (3)'teki denklemlere benzer şekilde $P_{f,j}$, her iki linkin de pasif olduğu durum için sensörlerin dört farklı j durumuna karar verme olasılıkları, $P_{md,j}$ ise her iki linkten en az birinin aktif olduğu durum için dört farklı j durumuna karar verme olasılıklarını ifade eder.

2) *Çoklu Sensör Kararı:* Bütün sensörlerden ayrı ayrı gelen bilgiler, yapı olarak çok basit olması nedeniyle tercih edilen çoğunluk kuralı ile değerlendirilerek birincil kullanıcı hakkındaki son karar verilir:

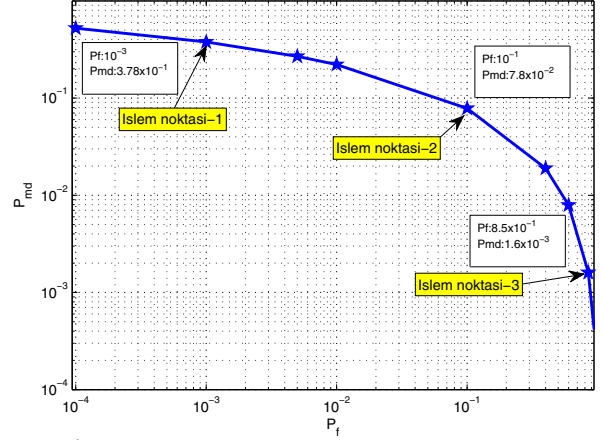
$$D_m = \sum_{k=1}^K \{d_m^{(k)}\}, \quad m = \{1, 2\} \quad (17)$$

$$\hat{d}_m = \begin{cases} 0 & \text{eğer } (D_m/K) < 0.5 \\ 1 & \text{eğer } (D_m/K) \geq 0.5 \end{cases} \quad (18)$$

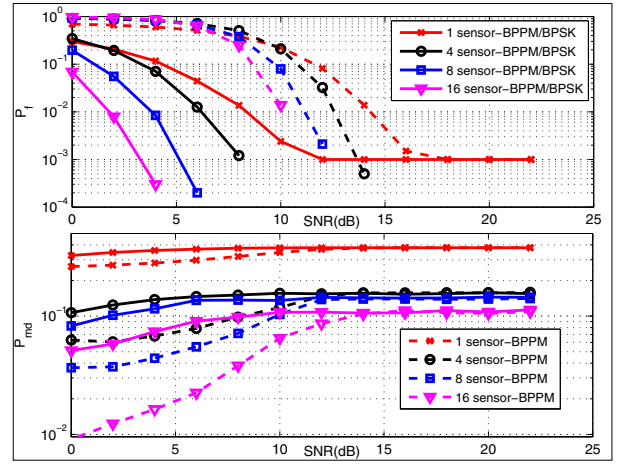
Füzyon merkezinde verilen bu son kararlar bütün sistemin yanlış alarm \hat{P}_f ve algılayamama olasılığı \hat{P}_{md} hesaplanır:

$$\hat{P}_f = \Pr[\hat{d}_2 \hat{d}_1 \neq 00 \mid d_2 d_1 = 00] \quad (19)$$

$$\hat{P}_{md} = \Pr[\hat{d}_2 \hat{d}_1 = 00 \mid d_2 d_1 \neq 00] \quad (20)$$



Şekil 2. İlk kanalın P_f ve P_{md} olasılıklarına göre işlem noktaları

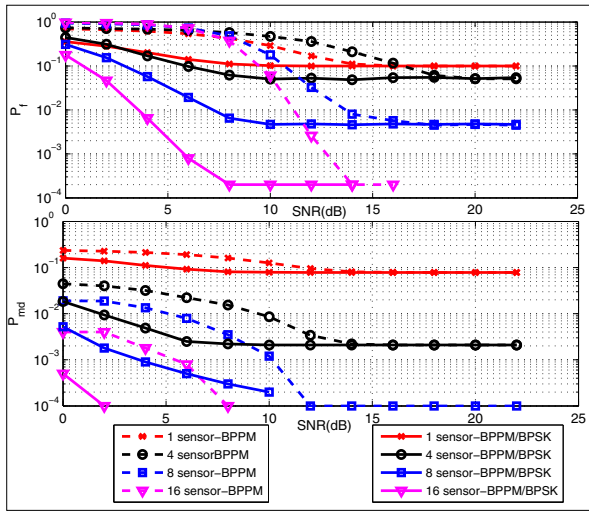


Şekil 3. Tüm sistemin işlem noktası-1 için performans sonuçları

III. BENZETİM SONUÇLARI

İlk kanaldan alınan P_f ve P_{md} bilgilerinin etkisini gösterebilmek amacıyla üç farklı durum için Şekil 2'deki gibi üç farklı işlem noktası seçilmiştir. Bu noktalar belirli $P_f = \alpha$ değerleri için Neyman-Pearson (NP) test ile [8]'deki çalışmadan yararlanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada her iki linkin de ($d_2 d_1$), İGO'sunun 5dB olduğu varsayılarak hesaplanmış, sadece P_f ve P_{md} olasılıkları değil, II. bölümde anlatıldığı gibi sensörlerdeki bütün durum olasılıkları elde edilmiştir. İşlem noktalarının II. bölüm'deki gibi elde edilen $P_{f,j}$ değerleri sırasıyla $\{0.9990, 0.00047, 0.00051, 0.00002\}$, $\{0.9, 0.0492, 0.0495, 0.0013\}$, $\{0.15, 0.3452, 0.3502, 0.1546\}$, $P_{md,j}$ değerleri ise $\{0.3784, 0.1899, 0.2814, 0.1503\}$; $\{0.0784, 0.1680, 0.4056, 0.3480\}$, $\{0.0016, 0.0964, 0.4509, 0.4511\}$ 'dir. İkinci kanalda IEEE 802.15.4a Kanal Modeli-1 (KM1) kullanılmıştır. Sonuçlar, iki farklı modülasyon kullanılması durumunda 1, 4, 8 ve 16 sensör sayıları için elde edilmiştir.

İşlem noktası 1 için elde edilen benzetim sonuçları Şekil 3'teki gibidir. Bu durumda ilk linkten gelen P_f çok düşük olmasına rağmen P_{md} yüksek değerdedir. Bu durumda şekilde de görüldüğü gibi tek sensörde birincil kullanıcıda girişim oluşma ihtimali yüksektir. Çoklu sensör kullanımında ise her



Şekil 4. Tüm sistemin işlem noktası-2 için performans sonuçları

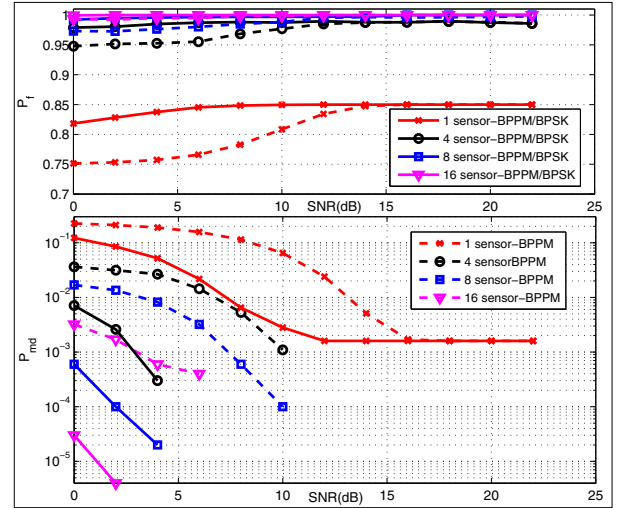
iki modülasyon için de performansta hem tüm sistemin yanlış alarm olasılığı (\hat{P}_f) hem de tüm sistemin algılayamama olasılığı (\hat{P}_{md}) için iyileşme görülmektedir. Sensör sayısı arttıkça bu iyileşme de artmaktadır. Düşük İGO'da BPPM, \hat{P}_f açısından değerlendirildiğinde BPPM/BPSK'e göre daha kötü performans göstermesine rağmen, \hat{P}_{md} açısından bakıldığında BPPM/BPSK'den çok daha iyi performans sağlar. Bu durumda düşük İGO'da birincil kullanıcıyı koruyan bir sistem için BPPM kullanılması daha uygundur.

P_f değerinin 0.1, P_{md} değerinin 0.078 olduğu 2. işlem noktasında Şekil 4'te görüldüğü gibi, düşük İGO'da hem \hat{P}_f hem de \hat{P}_{md} için BPPM/BPSK daha iyi performans sağlar. Bu durumda hem kanal daha verimli kullanılabilir, hem de girişim ihtimali azalacağından birincil kullanıcının erişimi daha güvenli hale gelir.

Son olarak, P_f değerinin 0.85 gibi çok yüksek bir değere sahip olduğu 3. işlem noktası için benzetim sonuçları Şekil 5'te verilmiştir. Bu durumda \hat{P}_f açısından bakıldığında BPPM kullanıldığında performans daha iyidir, fakat çoklu sensör durumunda tek sensöre göre performans kötüleşir. Bu da kanalın boş olması durumunda ikincil kullanıcı erişimini imkansız hale getirir. Öte yandan \hat{P}_{md} açısından bakıldığında BPPM/BPSK kullanıldığında performans daha iyidir ve sensör sayısı arttıkça performans iyileşmektedir. Bu da sistemi birincil kullanıcıyı koruyan bir sistem haline getirir.

IV. SONUÇ

Bu bildiriye UWB-IR teknolojisi tabanlı WSN'lerde BPPM ve BPPM/BPSK kiplenmeleri ile IEEE 802.15.4a kanalında ilk linkten gelen olasılık bilgilerine göre üç farklı bölgede birincil kullanıcı algılama performansları incelenmiş ve her iki kiplenmenin de farklı durumlarda avantaj sağlayabileceği gözlemlenmiştir. İlk linkin P_{md} güvenilirliği düşük ise; birincil kullanıcının güvenli erişimi için düşük İGO'da BPPM kullanıldığında ve sensör sayısı arttıkça daha iyi performans sağlanır. İlk linkin hem P_f hem de P_{md} açısından orta düzeyde güvenilirliğe sahip olduğu durumlarda ise sensör sayısı arttıkça BPPM/BPSK hem bandın daha verimli kullanımını sağlar, hem



Şekil 5. Tüm sistemin işlem noktası-3 için performans sonuçları

de birincil kullanıcı için daha güvenilir olacaktır. Son olarak ilk linkin P_{md} güvenilirliği yüksek olduğu durumda BPPM/BPSK çok daha iyi performans sağlar. Ancak birincil kullanıcıyı koruyan bu yapı, sensör sayısı arttıkça ikincil sistemlerin yanlış alarm ve dolayısıyla bandı verimli kullanma olasılıklarını düşürecektir. Bu çalışmada sunulan sonuçlar UWB tabanlı WSN'lerin birincil kullanıcı algılamasının gerçekleşmesi açısından önemlidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma 7th European Community Framework Programme – Marie Curie International Reintegration Grant tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] K. Witrals et al., "Noncoherent ultra wideband systems," *IEEE Signal Proc. Mag.*, vol. 26, pp. 48-66, July 2009.
- [2] B. Liu and B. Chen, "Channel-optimized quantizers for decentralized detection in sensor networks," *IEEE Trans. Info. Theory*, vol. 52, pp. 3349, July 2006.
- [3] F. Li, J. S. Evans, and S. Dey, "Decision fusion over noncoherent fading multiaccess channels," *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 59, pp. 4367-4380, Sept. 2011.
- [4] R. Jiang and B. Chen, "Fusion of censored decisions in WSNs," *IEEE Trans Wireless Commun.*, vol. 4, pp. 2668-2673, Nov. 2005.
- [5] A. Mechodniya, et. al., "Distributed detection in UWB sensor networks under non-orthogonal Nakagami-m fading," *IEEE Proc. VTC-Fall*, pp. 1-5, 2011.
- [6] K. Lin and A. M. Sayeed, "Type-based decentralized detection in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 55, pp. 1899-1910, May 2007.
- [7] K. Bai and C. Tepedelenlioglu, "Distributed detection in UWB wireless sensor networks," *IEEE Trans. Signal Proc.*, vol. 58, pp. 804-813, Feb. 2010.
- [8] S. Erkküçük, L. Lampe, and R. Schober, "Joint detection of primary systems using UWB impulse radios," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, pp. 419-424, Feb. 2011.