

# İnsan Mikro-Dopplerlerinden Çıkarılan Özniteliklerin Karşılıklı Bilgisi

## Mutual Information of Features Extracted from Human Micro-Doppler

Bürkan Tekeli<sup>1</sup>, Sevgi Zübeyde Gürbüz<sup>1,2</sup>, Melda Yüksel<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara, Türkiye

[ttekeli@etu.edu.tr](mailto:ttekeli@etu.edu.tr), [szgurbuz@etu.edu.tr](mailto:szgurbuz@etu.edu.tr), [yuksel@etu.edu.tr](mailto:yuksel@etu.edu.tr)

**Özetçe**—İnsanın eşsiz iki ayaklı hareketinin, insanın sadece başka hedeflerden ayırt edilmesine değil, aynı zamanda yürüme ve koşma gibi farklı eylemlerin de birbirinden ayırt edilmesini sağlayan frekans alanında özgün bir mikro-Doppler izi ürettiği gösterilmiştir. Sınıflandırma uygulamalarına yönelik literatürde çok sayıda farklı öznitelik önerilmiştir. Ancak önerilen özniteliklerin arasında hangilerin daha etkili olduğu veya iyi sınıflandırma başarımı için kaç tane özneliğin çıkarılması gerektiği bilinmemektedir. Bu çalışmada insan mikro-Dopplerlerinden çıkarılan öznitelikler karşılıklı bilgi miktarı yöntemine göre karşılaştırılmaktadır. İnsanların kollarını sallayıp sallamadığına dair sınıflandırma problemi örnek alınarak özniteliklerin önem sırası bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler** — insan sınıflandırma, mikro-Doppler, öznitelik çıkarımı, bilgi kuramı

**Abstract**—The unique, bi-pedal motion of humans has been shown to generate a characteristic micro-Doppler signature in the time-frequency domain that can be used to discriminate humans from not just other targets, but also between different activities, such as walking and running. In the literature, many different features have been proposed for classification applications. However, it is not known which features have a greater impact on classification performance, or indeed how many features should be used to achieve good classification. In this work, the mutual information of features extracted from human micro-Doppler signatures is computed. Taking the problem of classifying human arm-swing as an example, the features extracted are ordered in terms of importance.

**Keywords** — human classification, micro-Doppler, feature extraction, information theory

### I. GİRİŞ

Bir hedefin mikro-hareket dinamikleri – örneğin, hedefin bir parçasının titreşimi veya dönmesi – öteleme hareketinden kaynaklanan Doppler kaymasına ek olarak mikro-Doppler olarak isimlendirilen [1-3] frekans kiplemesini

oluşturmaktadır. Mesela bir aracın tekerleklerinin dönmesi, bir tankın paletlerinin dönmesi veya bir helikopterin pervanesinin dönmesi radarda mikro-Doppler etkisine sebep olmaktadır [4-7]. İnsan vücudunun (yani kolların, bacakların, ellerin ve ayakların) karmaşık, zamanla değişen hareketlerinden kaynaklanan insan mikro-Doppler imzası, hayvanları da içeren diğer hedef tiplerinden görsel olarak kolayca ayrılabilen eşsiz bir imzadır [8-9]. Bu imza insanın gerçekleştirdiği hareketle yakından ilgilidir. Ancak, yürüyen, koşan, emekleyen ve zıplayan bir insanın mikro-Doppler imzası, insan vücudunun getirdiği fiziksel kısıtlamalardan dolayı, yine de bazı ortak özelliklerine sahiptir. Bütün insan hareketlerini kapsayan birleşik bir çerçeve olmamasına rağmen, yürüme için kinematik modeller [10-11] önerilmiş, onaylanmış [12-13] ve insan algılamayı [14-15], takibi [16] ve sınıflandırılmasını da [17-18] içeren çeşitli uygulamalarda kullanılmıştır.

Mikro-Doppler'e dayanan hedef sınıflandırma, genellikle alınan radar sinyalinin birleşik zaman-frekans analizinden hedefi tanımak için kullanılacak özniteliklerin çıkarılmasıyla uygulanır. Örneğin, Kim ve Ling [19] hedef yanıtının spektogramından çıkarılan 6 değişik özneliğe dayanan 7 farklı insan etkinliğini (koşma, yürüme, kollar hareketli olarak yürüme, emekleme, boks yapma, boks yaparak yürüme ve otururken kımıldama hareketleri) sınıflandırmak için yapay sinir ağlarının kullanılmasını önermişlerdir. Bu çalışmada insan spektogramından çıkarılan 6 farklı öznitelik (1) gövdenin Doppler frekansı, (2) Doppler sinyalin toplam bant aralığı, (3) toplam Dopplerin frekansta ötelemesi, (4) mikro-Doppler bileşenler olmadığı durumdaki spektogramın bant aralığı, (5) Doppler sinyal gücünün birimlenmiş standart sapması, ve (6) ayak ve kol hareketlerinin dönemidir.

Sınıflandırma uygulamalarına yönelik literatürde çok sayıda farklı öznitelik önerilmiştir [19-24]. Ancak önerilen özniteliklerin arasında hangilerinin daha etkili olduğu veya iyi

Bu çalışma kısmi olarak EU FP7 Project No. PIRG-GA-2010-268276 (COGSENSE) tarafından desteklenmektedir.

sınıflandırma başarımı için kaç tane özniteliğin çıkarılması gerektiği bilinmemektedir. Özniteliklerin önem sırasını bulmak için bilgi kuramı daha önce görüntü işleme örneklerinde başarıyla kullanılmıştır [25].

Bu çalışmada benzer bir bilgi kuramsal yaklaşımla insan mikro-Dopplerlerinden çıkarılan öznitelikler karşılıklı bilgi miktarı yöntemine göre karşılaştırılmaktadır. Önce ikinci bölümde radar verilerini oluşturmak için kullanılan insan modeli ve radar yanıt hesabı açıklanmıştır. Sonra, kullanılan özniteliklerinin spektrogramdan nasıl çıkartıldığı belirtilmiştir. Üçüncü bölümde karşılıklı bilgi hesabın ayrıntıları verilmiştir. Son bölümde, örnek olarak insanların kollarını sallayıp sallamadığına dair sınıflandırma problemi için özniteliklerin önem sırası bulunmuştur.

## II. İNSAN MİKRO-DOPPLERİ

### A. İnsan Modeli ve Monostatik Radar Yanıtı

İnsan, farklı hızlarda ve farklı gezinelerde (trajectory) hareket eden vücut parçalarının hareketlerinden dolayı karmaşık bir hedeftir. Bu makalede, Boulic [10] tarafından geliştirilen kinematik yürüme modeli, insan vücudunun 12 çubukla simge temsili canlandırılarak kullanılmıştır. Her vücut parçasının (kafa, üst ve alt kollar, vücut, kalça, alt bacaklar ve ayaklar) noktasal hedef temsilinden elde edilen cevapların üstdüğümleri olarak alınan bütün sinyal ifade edilebilir [13].

Genel olarak eşit zaman aralıklarında chirp sinyali ileten darbeleri (pulse) Doppler radar için noktasal hedeften alınan sinyal, iletilen sinyalin zaman gecikmeli ve frekans kaymalı versiyonudur. Bundan dolayı insan vücudunu içeren tüm 12 noktadan alınan bütün sinyal

$$s_h(n, t) = \sum_{i=1}^K a_{t,i} \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - t_{d,i}}{\tau}\right) e^{j[-2\pi f_c t_{d,i} + \pi \gamma (\hat{t} - t_{d,i})^2]}, \quad (1)$$

şeklinindedir. Zaman  $t$ , darbe (pulse) yinleme aralığına (pulse repetition interval, PRI),  $T$ , dayanarak  $t = T(n-1) + \hat{t}$  şeklinde ifade edilir. Darbe sayısı  $n$ , her PRI'nin başlangıcı için gerekli zaman  $\hat{t}$ , radar mesafe denklemi verildiğinde  $a_{t,i}$  genlik,  $\tau$  darbe genişliği,  $c$  ışık hızı,  $\gamma$  chirp sinyali,  $f_c$  iletilen sinyalin merkez frekansı,  $t_d$  hedefle anten arasındaki gidiş-geliş zamanı ve  $R$  hedef mesafesi olduğu zaman  $t_d = 2R/c$  olarak tanımlanır. Bunlarla beraber  $a_{t,i}$  ve  $t_{d,i}$  genlik ve her vücut parçasının cevabının zaman gecikmesi olarak ifade edilir.

Genlik  $a_{t,i}$  aşağıdaki radar menzil denklemi gibi hesaplanır:

$$a_{t,i} = \frac{G\lambda\sqrt{P_t\sigma_i\sigma_n}}{(4\pi)^{1.5}R_i^2\sqrt{L_s}\sqrt{L_a}\sqrt{T_{sys}}}, \quad (2)$$

geometri ve hedef mesafesiyle  $R_i$  değişen çeşitli faktörler içerir. Ancak, basitlik için tüm parametreler bir sabit olarak modellenirler (radar kesiti hariç). Modellenme vücut parçalarının yaklaşık şekline göre yapılır (baş için küre, kalan diğer parçalar için silindir).

Yavaş-zaman (slow-time), hızlı-zaman (fast-time) veri matrisi olarak kaydedilen insan hedefinden geri dönen sinyale, hedefin bulunduğu menzil kümesi (range bin) bir tepe noktası (peak) meydana getirecek şekilde darbe sıkıştırması uygulanır. Tepe noktasının bulunduğu menzil kümesinden yavaş-zaman boyunca bir dilim alınarak, insandan gelen radar yanıtı

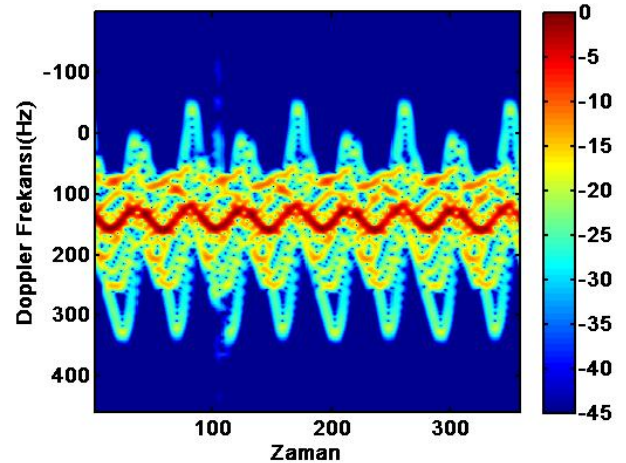
$$x_p[n] = \sum_{i=1}^{12} a_{t,i} \tau e^{-j\frac{4\pi f_c}{c} R_{d,i}} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada  $R_{d,i}$ , antenden her vücut parçasına olan uzaklık, yürüme için verilen Boulic model ile her vücut parçasının zamanla değişen pozisyonu kullanılarak hesaplanabilir.

### B. İnsan Spektrogramı ve Öznitelik Çıkarımı

Denklem (3)'teki ifadenin, örtüşen kısa-zaman Fourier dönüşümünü (STFT'sini) alarak insan spektrogramı elde edilebilir. Şekil 1'de insanın radara doğru görünüş açısı 80 derece iken yürümesi durumu için örnek bir insan spektrogramı gösterilmektedir.

Öznitelikler Şekil-1'deki spektrogram gibi spektrogramlar kullanılarak çıkarılmıştır. İlk çıkarılan öznitelik gövdenin Doppler frekansıdır ve bu frekansta spektrogramda genliği en yüksek olan frekanstır. Tüm zaman boyunca ortalaması alınarak hesap edilmiştir. İkinci çıkarılan öznitelik mikro-Doppler bileşenler olmadığı durumdaki spektrogramın bant aralığıdır ve zaman boyunca gövde doppler frekanslarının en büyük ve en küçük olduğu frekans aralığıdır.



Şekil 1. Örnek İnsan Spektrogramı

### III. RADAR VERİ İŞLEMENE BİLGİ KURAMSAL YAKLAŞIM

Karşılıklı bilgi miktarı iki rastgele değişkenin birbirleri hakkında ne kadar bilgi içerdiğini belirten bir bağıntıdır. Bu iki rastgele değişken birbirleriyle ne kadar ilintilirse karşılıklı bilgi miktarları da o kadar yüksek olur. Bağımsız iki rastgele değişkenin karşılıklı bilgi miktarı ise sıfırdır. Biz bu makaledeki çalışmamızda sınıflandırma için çıkarılan özniteliklerin, sınıflandırma yapılacak elemanlar ile aralarındaki bilgi miktarına bakıp öznitelikleri sıraya koymayı öneriyoruz. Öznitelik boyutu arttıkça sınıflandırma işlemi uzun ve zor bir hale gelmektedir. Önerilen yöntemle sınıflandırma için sınıflandırma başarımına etkisi az olan öznitelikleri devre dışı bırakacak ve sınıflandırma basitleştirilecektir.

$X_1$  birinci özniteliği,  $X_2$  ikinci özniteliği,  $Y$  de insan kolunun sallanıp sallanmadığını gösteren rastgele değişkenler olsun. Bu durumda  $(X_1, X_2)$  ve  $Y$  arasındaki karşılıklı bilgi miktarı  $I(X_1, X_2; Y)$  ile ifade edilmektedir.  $I(X_1, X_2; Y)$  iki türlü yazılabilir [26].

$$I(X_1, X_2; Y) = I(X_1; Y) + I(X_2; Y|X_1) \quad (4)$$

$$I(X_1, X_2; Y) = I(X_2; Y) + I(X_1; Y|X_2) \quad (5)$$

Denklem (4)'te ilk terim  $X_1$  ile  $Y$  nin arasındaki karşılıklı bilgiyi vermekte, ikinci terim ise  $X_1$  bilindiğinde,  $X_2$  ile  $Y$  arasındaki karşılıklı bilgiyi vermektir. Denklem (5)'te de (4)'teki gibi ilk terim  $X_2$  ile  $Y$  arasındaki karşılıklı bilgi miktarını, ikinci terim  $X_2$ 'ye koşullu olarak  $X_1$  ve  $Y$  arasındaki karşılıklı bilgi miktarını göstermektedir. Herhangi iki ayrık rastgele değişken  $X$  ve  $Y$  için karşılıklı bilgi miktarı, birleşik olasılık kütle fonksiyonu (OKF)  $p(x, y)$  ve marjinal olasılık kütle fonksiyonları  $p(x)$  ve  $p(y)$  kullanılarak

$$I(X; Y) = \sum_x \sum_y p(x, y) * \log_2 \left( \frac{p(x, y)}{p(x) * p(y)} \right) \quad (6)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

Biz de bu çalışmada  $X_1$  ve  $X_2$  özniteliklerinden sadece birisini seçebilmek için  $I(X_1; Y)$  ve  $I(X_2; Y)$  terimlerini karşılaştırılıyor, daha büyük karşılıklı bilgi miktarı veren özniteliği seçiyoruz. Ancak bu yöntem sadece iki öznitelik arasında değil, çok sayıda öznitelik arasında en çok bilgi içeren özniteliği hesaplamak için kullanılabilir. Genel durum için karşılıklı zincir kuralı uygulanmalıdır [26]:

$$I(X_1, X_2, \dots, X_n; Y) = \sum_{i=1}^n I(X_i; Y|X_{i-1}, \dots, X_1) \quad (3)$$

### IV. KOL SALLAMA VE SALLAMAMA ÖRNEĞİ

Benzetimlerimizde insan kollarını sallarken ve sallamıyorken olmak üzere iki hareket durumu gerçekleştirilmiştir. Her durum 4 farklı insan parametresini ve görünüş açısı 0-90 derece arasında değişen ve hedef hızı 0.1-2.2 arasında değişen toplamda 8008 adet benzetimi içermektedir. Bu benzetimlerden iki ayrı öznitelik

çıkartılmıştır. Her durum için öznitelikler karşılıklı bilgi miktarı kullanılarak sıraya konulmuştur.

Bu çalışmada çıkarılan öznitelikler 1)  $X_1$  : gövdenin mikro-doppler frekansı ve 2)  $X_2$  : mikro-Doppler bileşenler olmadığı durumdaki spektogramın bant aralığı olarak seçilmiştir. Bir özniteliğin kolun sallanması değişkeni ile karşılıklı bilgi miktarını hesaplamak için özniteliğin histogramı çıkarılmıştır. Histogram özniteliğin aldığı değerlerin 100 eşit bölümde incelenmesiyle oluşturulmuştur.  $Y$ , kolların sallanması durumunda 0, kolların sallanmaması durumunda 1 değerini alıyor olsun,  $p(y = 0) = p(y = 1) = 1/2$ 'dir. Bu durumda birinci özniteliğin kollar salınırken koşullu OKF'si  $p(x_1|y = 0)$ , ikinci özniteliğin kollar salınırken koşullu OKF'si  $p(x_2|y = 0)$ 'dir. Birinci özniteliğin kollar sallanmıyorken koşullu OKF'si  $p(x_1|y = 1)$ , ikinci özniteliğin kollar salınırken koşullu OKF'si  $p(x_2|y = 1)$ 'dir. Histogramdan elde edilen OKF'ler Şekil 1 ve 2'de görülebilir.

Verilen koşullu OKF'ler kullanılarak

$$p(x_1, y = 0) = p(x_1|y = 0) * p(y = 0) \quad (7)$$

ve

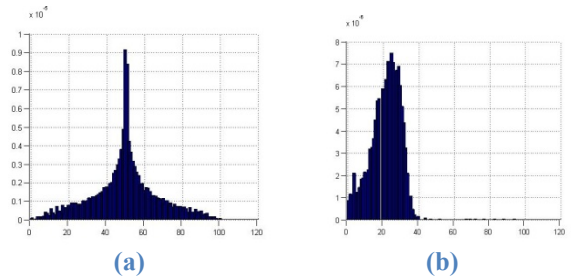
$$p(x_1, y = 1) = p(x_1|y = 1) * p(y = 1) \quad (8)$$

hesaplanır. Yani  $X_1$  ve  $Y$  rastgele değişkenlerinin birleşik OKF'si bulunmuş olur. Ayrıca

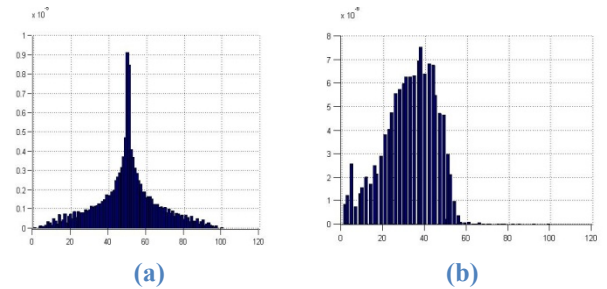
$$p(x_1) = \sum_{y=0}^1 p(x_1, y) \quad (9)$$

hesabıyla  $X_1$  rastgele değişkeninin marjinal OKF'si hesaplanır. Bu aşamadan sonra (6) hesaplanabilir. Aynı hesaplar ikinci öznitelik için de yapılabilir.

Bu öznitelikler Kim ve Ling tarafından önerilmiş ve başarıyla kullanılmıştır [27]. Kim ve Ling'in yaptığı



Şekil 1: a) Kollar sallanırken 1. özniteliğin PMF'i ( $p(x_1|y = 0)$ ), b) Kollar sallanırken 2. özniteliğin PMF'i ( $p(x_2|y = 0)$ )



Şekil 2: a) Kollar sallanmıyorken 1 nolu özniteliğin PMF'i ( $p(x_1|y = 1)$ ), b) Kollar sallanmıyorken 2 nolu özniteliğin PMF'i ( $p(x_2|y = 1)$ )

çalışmada öznitelikler arasında yapılan sıralamada sınıflandırma başarımı baz alınarak öznitelik sıralaması yapılmıştır. Bu çalışmada, karşılıklı bilgi miktarı kullanılarak sınıflandırma sonucuna erişilmeden önce özniteliklerin önem sırası bulunmaktadır. Böylece öznitelik seçimini, özniteliklerin hepsi denenerek ve sonuçlarına bakılarak değil, önceden bilgi miktarları hesaplanarak yapabilmekteyiz.

İnsanın kolları sallanırken ve sallanmıyorken ki durumda birinci öznitelik ve ikinci öznitelik için hesaplanan karşılıklı bilgi Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de her iki hareket durumu içinde verilen sonuçlar, bize insan parametreleri ile ikinci özniteliğin, birinci öznitelikten daha fazla ilintili olduğunu ve ikinci özniteliğin birinci özniteliğe göre daha fazla bilgi miktarı içerdiğini göstermektedir. Bundan dolayı da ikinci özniteliğin birinci öznitelikten daha önemli olduğu sonucu çıkarılabilir.

Bu sonuç fiziksel olarak da mantıklıdır, çünkü kol hareketleri gövde salınımı üzerinde etkin bir faktördür. Kol salınımı arttıkça ikinci öznitelik olan gövde Doppler bant genişliği artmaktadır. Buna karşın birinci öznitelik olan ortalama gövde Doppler frekansı hedefin ortalama hızıyla ilintili olduğundan kol hareketleri tarafından az etkilenmektedir.

**Tablo 1:  $I(X_i; Y)$  Karşılıklı Bilgi Miktarı**

	$I(X_i; Y)$ Karşılıklı Bilgi Miktarı
1 Nolu Öznitelik( $X_1$ )	$1.5097 \times 10^{-4}$
2 Nolu Öznitelik( $X_2$ )	$30 \times 10^{-4}$

## V. SONUÇLAR

Karşılıklı bilgi miktarı hesaplanarak radar sınıflandırma algoritmalarında kullanılan özniteliklerin önem sırası bulunmuştur. Gelecek çalışmalarımızda multistatik radar ağların çok açışal verilerinden elde edilen özniteliklerin karşılıklı bilgi miktarını hesaplamayı planlamaktayız. Öznitelik seçimlerimizi insan sınıflandırma başarımını arttırmak için kullanmayı hedeflemekteyiz.

## KAYNAKÇA

- [1] V.C. Chen, F. Li, S.-S. Ho, and H. Wechsler, "Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study," *IEEE Trans. Aerospace and Electronics Systems*, Vol. 42, No. 1, 2006, pp. 2-21.
- [2] V.C. Chen, *The Micro-Doppler Effect in Radar*, Artech House, 2010.
- [3] T. Thayaparan, S. Abrol, and E. Riseborough, "Micro-Doppler radar signatures for intelligent target recognition," Defense R&D Canada, DRDC Technical Memorandum 2004-170, Sept. 2004.
- [4] Y. Li, L. Du, H. Liu, "Moving vehicle classification based on Micro-Doppler signature," in *Proc. IEEE International Conf. on Signal Processing, Communications, and Computing (ISCPCC)*, Sept. 2011.
- [5] T. Thayaparan, S. Abrol, E. Riseborough, L. Stankovic, D. Lamothe, and G. Duff, "Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data," *IET Radar Sonar Navig.*, Vol. 1, No. 4, 2007, pp. 289-299.

- [6] A. Chilliers, and W. Nel, "Helicopter parameter extraction using joint time-frequency and tomographic techniques," in *Proc. IEEE International Conference on Radar*, Adelaide, 2008.
- [7] H.Sisan, Z. Yong-feng, Z. Hong-zhong, and Z. Jian, "Analysis of rotating structures for stepped frequency radar," in *Proc. IEEE International Conference on Radar*, Adelaide, 2008.
- [8] D. Tahmoush, and J. Silvius, "Remote detection of humans and animals," in *Proc. IEEE Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop*, 2009.
- [9] M. Otero, "Application of a continuous wave radar for human gait recognition", in *Proc. of SPIE*, Vol. 5809, pp. 538-548, 2005.
- [10] R. Boulic, M.N. Thalmann, and D. Thalmann, "A global walking model with real-time kinematic personification," *Visual Computing*, Vol. 6, 1990, pp. 344-358.
- [11] Z. Zonghua, and N.F. Troje, "3D periodic human motion reconstruction from 2D motion sequences" in *Computer Vision and Pattern Recognition Workshop*, 2004, pp. 1400-1421.
- [12] Geisheimer, J.L., Grenaker, E.F., and Marshall, W.S., "A high-resolution Doppler model of human gait", in *Proc. of SPIE*, Vol. 4744, 2002
- [13] Van Dorp, P., and Groen, F.C.A., "Human walking estimation with radar", *IEE Proc. on Radar, Sonar and Nav.*, 150(5):356-365, 2003.
- [14] S.Z. Gurbuz, W.L. Melvin, and D.B. Williams, "A Nonlinear-Phase Model-Based Human Detector for Radar," *IEEE Trans. Aerosp. and Electronic Systems*, Vol. 47, Iss. 4, 2011, pp. 2502-2513.
- [15] S.Z. Gurbuz, W.L. Melvin, and D.B. Williams, "Kinematic Model-Based Human Detectors for Multi-Channel Radar," *IEEE Trans. Aerosp. and Electronic Systems*, Vol. 48, Iss. 2, 2012, pp. 1306-1318.
- [16] M.B. Guldogan, F. Gustafsson, U. Orguner, S. Bjorklund, H. Petersson, and A. Nezirovic, "Human gait parameter estimation based on micro-Doppler signatures using particle filters," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP)*, May 2011.
- [17] I. Bilik and J. Tabrikian, "Radar target classification using Doppler signatures of human locomotion models," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 43, no. 4, pp. 1510-1522, Oct 2007.
- [18] S.Z. Gürbüz, W.L. Melvin, D.B. Williams. "Detection and Identification of Human Targets in Radar," *SPIE Defense and Security Symposium*, April 9-13, 2007.
- [19] Y. Kim and H. Ling, "Human activity classification based on micro-Doppler signatures using an artificial neural network," in *Proc. Int. Symposium of the Antennas and Propagation Society*, 2008.
- [20] S. Bjorklund, H. Petersson, A. Nezirovic, M.B. Guldogan, and F. Gustafsson, "Millimeter-wave radar micro-Doppler signatures of human motion," in *Proc. Int. Radar Symposium (IRS)*, Sep. 2011.
- [21] C. Hornsteiner and J. Detlefsen, "Extraction of features related to human gait using a continuous-wave radar," in *Proc. German Microwave Radar Conference*, 2008.
- [22] H. Binke, Z. Hang, D. Hao, "Human gait recognition using micro-Doppler features," in *Proc. of 5<sup>th</sup> Global Symposium on Millimeter Waves*, 27-30 May, 2012.
- [23] F.H.C. Tivive, A. Bouzerdoum, and M.G. Amin, "A human gait classification method based on radar Doppler spectrograms," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, Article ID 389716, 2010.
- [24] J. Li, S.L. Phung, F.H.C. Tivive, and A. Bouzerdoum, "Automatic classification of human motions using Doppler radar," in *Proc. IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 2012.
- [25] B. Guo and M. Nixon, "Gait feature subset selection by mutual information," in *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Syst., Humans*, Vol. 39, No. 1, pp.36-46, 2009.
- [26] Thomas M. Cover, Joy A. Thomas, "Elements of information Theory," Wiley, Second Edition.
- [27] Y. Kim and H. Ling, "Human activity classification based on micro-Doppler signatures using a support vector machine," *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 47, No. 5, 2009, pp. 1328-1337.