

# BumbleBee Radar ile Bina İçi İnsan Hareketlerinin Tanınması

## Indoor Human Activity Recognition Using BumbleBee Radar

Bahri Çağlıyan<sup>1</sup>, Cesur Karabacak<sup>1,2</sup>, Sevgi Zübeyde Gürbüz<sup>1,3</sup>

1. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara
2. Meteksan Savunma Sanayii A.Ş., Ankara
3. TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü, Ankara  
{bcagliyan,szgurbuz}@etu.edu.tr, cesurkarabacak@gmail.com

**Özetçe**— İnsan sezimi ve hareketi sınıflandırması arama kurtarma, akıllı ortamlar ve güvenlik gibi uygulamalar için birçok avantaj sunmaktadır. Kızılötesi, akustik, titreşim/sismik ve görsel sensörler uzun zamandır insan tanıma ve algılama sistemlerinde kullanılmaktadır. Radar ise insan algılama uygulamalarında daha uzun mesafelerde algılama yapabilmesi, daha kapsamlı olması ve bütün hava koşullarında çalışabilmesinden dolayı avantajlar sunmaktadır. Ancak radar sistemleri genellikle çok maliyetli ve fiziksel olarak büyüktür. BumbleBee radarı, çoğu radarlardan farklı olarak, düşük güç tüketimli, kartvizit boyutunda bir darbe Doppler radarıdır. Ayrıca, bir bina içi kablosuz algılayıcı ağına entegre olabilecek bir radardır. Bu çalışmada BumbleBee ölçümlerinden insanın mikro-Doppler imzası hesaplanarak, radarın insan hareketi tanıma için kullanımı incelenmektedir. Yürüme koşma ve emekleme gibi insan hareketlerinin düşük güç tüketimli ve ucuz radarlar ile toplanan verilerinin farkı tartışılacaktır.

**Anahtar Kelimeler** — *mikro-Doppler; radar; insan sezimi*

**Abstract**— Human detection offers many advantages in applications of search and rescue, smart environments, and security. Infrared, acoustic, vibration/seismic and visual sensors have been often used in human detection and recognition systems. Radar offers unique advantages for sensing humans, such as remote operation during virtually all weather conditions, increased range, and better coverage. However, radar systems are typically very expensive and physically large. The BumbleBee radar, in contrast to most radars, is a low power pulse Doppler radar that is about the size of a business card. Moreover, it is a radar that can be integrated into indoor wireless sensor networks. In this work, the application of BumbleBee radar to human activity recognition by computing the human micro-Doppler signature is examined. Humans are complex targets that are capable of many motions. Every part of the human causes different reflection and every motion of the human has its unique micro-doppler signatures. The differences in micro-Doppler data of activities such as walking, running, and crawling that is gathered from low-cost, low-power radar is discussed.

**Keywords** — *micro-doppler; radar; human sensing*

### I. GİRİŞ

İnsan sezimi ve hareket sınıflandırması arama kurtarma, akıllı ortamlar ve güvenlik gibi uygulamalarında birçok avantaj sunmaktadır. Kızılötesi, akustik, titreşim/sismik ve görsel algılayıcılar uzun zamandır insan tanıma ve algılama sistemlerinde kullanılmaktadır. Fakat bu algılayıcıların aksine, radarlar insan algılama uygulamalarında daha uzun

mesafelerde algılama yapabilmesi, daha kapsamlı olması ve bütün hava koşullarında çalışabilmesinden dolayı daha büyük avantajlar sunarlar. Fakat yüksek güç gereksinimleri, yüksek maliyetleri ve büyük sistemler olmalarından dolayı şimdiye kadar bina içi uygulamalarında veya kablosuz algılayıcı ağlarında kullanılmamışlardır.

Son zamanlarda ticari kullanıma hazır düşük maliyetli radarların geliştirilmesi radar ile insan hareketlerinin ayrımı uygulamalarının önünü açmıştır. Bu tür radarlardan birisi olan düşük güç tüketimli, düşük maliyetli BumbleBee radarları [1] 2008 yılında Samraksh Company tarafından geliştirilmiştir [2]. BumbleBee radar maksimum menzili 10 metre, 2.6 cm/s ile 2.6 m/s arası radyal hızlara duyarlı ve 5.8 GHz merkezi frekans ile çalışan bir evre uyumlu darbe Doppler radarıdır. İnsanın birçok fiziksel hareketinin Doppler frekansı BumbleBee radarın çalışma aralığındadır.

BumbleBee radarlar şimdiye kadar birkaç çalışmada kullanılmıştır. John Hopkins Üniversitesi'nden araştırmacılar BumbleBee radarı genişletilmiş Kalman filtresi ile radyal hız takip etme çalışmalarında kullanmışlardır [3]. Bu çalışmalar Michigan Teknoloji Üniversitesi'nde genişletilmiş Kalman filtresinin doğrusal olmayan yörüngeler için daha iyi çalıştığını bulan araştırmacılar tarafından uygulanmıştır [4].

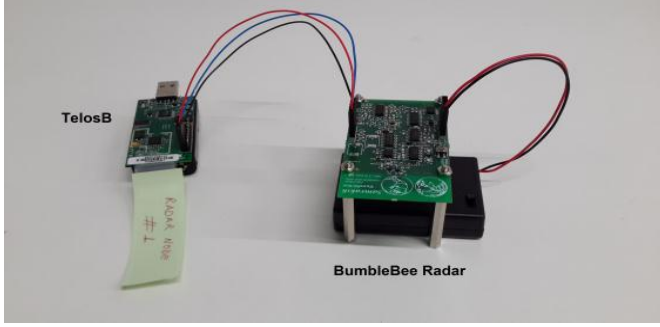
BumbleBee radarlar radyal hız bilgisinin yanı sıra daha fazla hedef bilgisi içeren ham veriyi sağlama özelliğine sahiptirler. Ohio State Üniversitesi'nden araştırmacılar BumbleBee radarlar ile elde ettikleri ham veriyi kullanarak insan ve köpek gibi hedefler için mikro-Doppler imzası çıkarmışlardır [5]. Mikro-Doppler otomotiv radar ağlarıyla yaya güvenliğinin sağlanması gibi uygulamalar başta olmak üzere birçok çalışmada hedef tanımlama için kullanılmıştır [6,7]. 2010 yılında Van Dorp ve Groen mikro-Doppler analizi yöntemiyle Frequency-Modulated Continuous-Wave (FMCW) radar ağlarını kullanarak insan kolunun salınımı üzerine temel bir sınıflandırma çalışması yapmışlardır [8].

Bu çalışmanın amacı ekonomik ve düşük güç tüketimli radar sistemleri ile insan algılama, sağlık tesislerinde yaşlı hastaların bina içi gözetlemesinin yapılması, yürüme, koşma ve emekleme gibi temel insan hareketlerinin ayrımının yapılmasıdır. Bu çalışma kapsamında BumbleBee radar sistemi kullanılarak temel insan hareketlerinin mikro-Doppler analizi ile her bir hareket için bir mikro-Doppler imzası çıkarılacaktır. Bu temel insan hareketlerinin mikro-Doppler imzaları karşılaştırılarak farklılıklarını ortaya koyan bir çalışma sunulacaktır.

## II. BUMBLEBEE RADAR

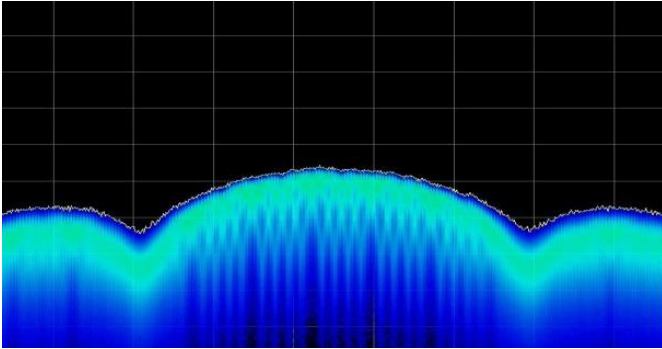
### A. Teknik Özellikler

BumbleBee radar (Şekil-1) 4 adet pil ile çalışan, eşevreli kablosuz algılayıcı ağları uygulamaları için üretilmiş bir darbe Doppler radardır. Bu radar algılayıcı ağları kurulduğunda düğümler arası haberleşmeyi sağlayan Telosb ve ana radar kartından oluşmaktadır. BumbleBee radarlar kablosuz sensör ağlarında kullanılmak üzere tasarlanmış TinyOs 2.x işletim sistemi ile çalışmaktadır. 5.8 GHz merkezi frekansı ile çalışan BumbleBee radar 60°'lik yayılım açısı olan bir dâhili antene sahiptir. BumbleBee radar hızı 2.6 cm/s ile 2.6 m/s arası olan hedefleri algılayabilecek biçimde tasarlanmıştır. Bu radar In-Phase(I) ve Quadrature-Phase(Q) olmak üzere iki adet çıktıya sahiptir.



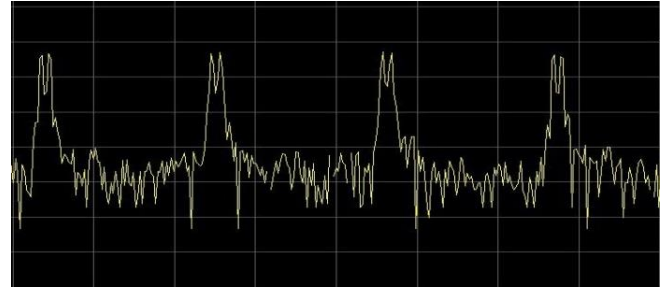
Şekil 1 BumbleBee Radar ve Telosb

BumbleBee radarın üreticisi radarın çalıştığı merkez frekansı dışında radar karakteristiklerini belirleyen bant genişliği, PRF (Pulse Repetition Frequency) ve PRI (Pulse Repetition Interval) gibi parametreleri kullanıcıya sağlamamaktadır. Bu nedenle radarın karakteristik özelliklerini öğrenmek amacıyla BumbleBee radardan gönderilen sinyaller ağ analizörü aracılığıyla analiz edilmiştir. BumbleBee radardan gönderilen sinyal 700 MHz ile 18 GHz arasında çalışabilen bir antenle dinlenerek network analizöre verilmiştir. Daha sonra bu sinyalin frekans alanındaki görüntüsü (Şekil 2) çıkarılarak bant genişliği yaklaşık 240 MHz olarak belirlenmiştir.



Şekil 2 BumbleBee Radardan yayılan sinyalin frekans alanındaki görüntüsü

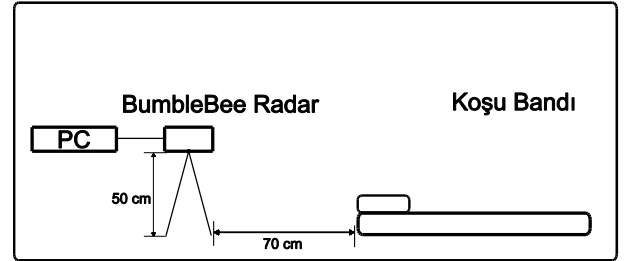
Radardan alınan sinyalin zaman alanındaki çıktısı (Şekil 3) ve darbe istatistik modülü çıktısı incelenerek BumbleBee radarın PRF değeri yaklaşık olarak 2 MHz olarak belirlenmiştir.



Şekil 3 BumbleBee Radar dan yayılan sinyalin zaman alanındaki çıktısı

### B. Veri Setinin Toplanması

Bu bildiriye incelenen verilerin toplama işlemi TOBB ETÜ Uzaktan Algılama Laboratuvarı'nda bina içi bir ortamda yapıldı. Yürüme, koşma ve emekleme olmak üzere 3 farklı insan hareketi için veriler alınarak MATLAB aracılığıyla sinyal işleme çalışmaları yapıldı. Veriler toplanırken BumbleBee radarların üreticisi Samkrash Company tarafından kullanıcıya verilen RadarDataCollect programı kullanıldı. Deneylerde, yürüme bandı üzerinde hareket eden hedefin yürüme, koşma ve emekleme verileri kaydedildi. Deney yapılırken hedefin hızı yürürken 2 km/saat, koşarken 5 km/saat ve emeklerken 1 km/saat olarak ayarlanmıştır. Veriler toplanırken hedef koşu bandı üzerindeyken radar yaklaşık 70 cm ilerisinde ve yerden 50 cm yükseklikte olacak biçimde konumlandırıldı. Deney yaklaşık 100 m<sup>2</sup>'lik bir laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4 Deney Düzenliği

Veri toplama sırasında BumbleBee radar Telosb yardımıyla bilgisayara COM portu ile bağlanarak iletişim sağlanmıştır. Ham veri (raw data) bilgisayara bir mesaj paketi halinde alınmaktadır. Bu mesaj paketi Header, Handler ID, Counter, In-Phase datası, Quadrature datası ve son olarak CheckSum başlıklarından oluşmaktadır. Radardan bilgisayara yaklaşık olarak saniyede 185 adet mesaj paketi iletilmektedir. Bu bilgi kullanılarak radar ile kaç saniye I ve Q verileri çekildiği hesaplanabilmektedir. Bilgisayara iletilen mesaj paketinden I ve Q verileri çekilerek  $C = I + jQ$  formülü yardımıyla karmaşık sinyal oluşturulur.

Tablo 1. BumbleBee Radardan Alınan Mesaj Paketi

Header	Type	Counter	Node ID	I	Q
00 FF FF FF FF 1A 00	EF	1B B3	01	0A DD	0B 07

Radardan alınan ham verideki I ve Q verileri orijinal hızlı-zaman örnekleri değildir. Aksine bu veriler her bir uzaklık aralığında (range bin) yavaş-zaman sıkıştırılmış darbe-doppler bilgisini içermektedir. Bu sebeple BumbleBee radarlardan alınan bu bilgilerden radyal hız ve doppler bilgisi çıkarılabilirken, hedef-uzaklık bilgisi çıkarılamamaktadır.

### III. MİKRO-DOPPLER ANALİZİ

Radar ile tespit edilen bir cismin dönen veya titreşen küçük hareketli parçaları (helikopter pervanesi, motor titreşimi, rüzgâr türbinleri vb.) geri yansıyan radar sinyalinde frekans kiplemesine neden olmaktadır. Hedefin radara göre radyal hareketinden kaynaklanan Doppler frekans kaymasına ek olarak yan bantlar oluşturan bu etkiye “Mikro-Doppler Etkisi” denir [9]. Hareket eden her hedefin kendine özgü bir mikro-Doppler imzası vardır ve bu imzalar hedefin türünü ve yaptığı hareketi tanımlamamıza olanak sağlar. Bir insan radarın etki alanında hareket ettiğinde vücudunun farklı parçaları (gövde, kollar, bacaklar, dizler) karakteristik doppler imzaları oluşturur.

Hareket eden bir insandan geri yansıyan sinyaller radar ile gözlenerek Doppler frekans bilgileri elde edilebilir. İnsanın mikro-Doppler imzası incelendiğinde gövdenin yanı sıra el, kol ve bacaklarında salınımlarından dolayı kaynaklanan saçılmalar görülmektedir. İnsanın farklı hareketleri için farklı olarak ortaya çıkan saçılmalar bir örüntü oluşturur. Kullanılan radarın özelliklerine göre ortaya çıkan bu örüntü ile özneliklerin belirlenmesi sayesinde hedefin radyal hızı ve yaptığı hareket hakkında bilgi çıkarılabilir [10].

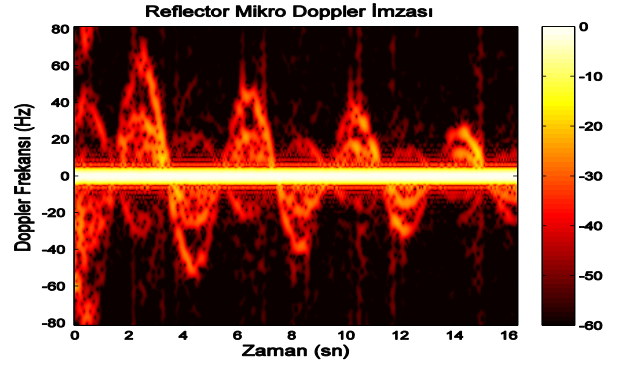
Hedefin hareketi için dönen sinyalin ham verisi BumbleBee radardan alındıktan sonra karmaşık sinyale hesaplanır. Daha sonra karmaşık sinyal üzerinde Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) uygulanarak her bir hareket için bir mikro-Doppler imzası çıkarılır. Kısa zamanda Fourier dönüşümü aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$X(m, w) = \sum_{-\infty}^{\infty} x[n]w[n - m] e^{-j\omega t} \quad (1)$$

Kısa zamanda fourier dönüşümünün karesi olarak tanımlanmış spektrogram her hareketin mikro-Doppler imzasının zaman-frekans gösterimini vermektedir.

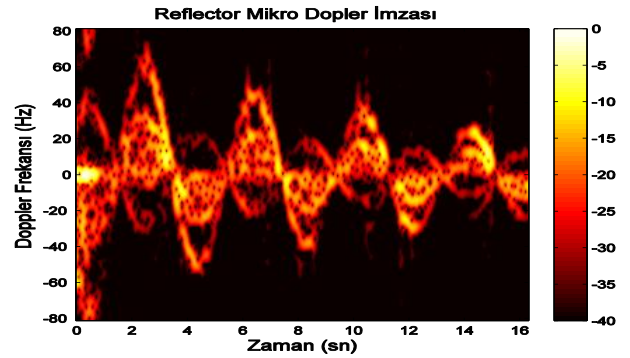
$$spektrogram(m, w) = |X(m, w)|^2 \quad (2)$$

İnsan üzerinde veri alınmadan önce radarı test etmek amacıyla laboratuvar ortamında bir köşeli yansıtıcı (corner reflector) tavana bağlandıktan sonra yüksek bir mesafeden serbest bırakılarak yansıtıcının radar karşısında harmonik salınımlar yapması sağlanmıştır. Köşeli yansıtıcı hareketi sırasında hızı yavaşlayarak radar karşısında ileri ve geri hareket etmiştir. Bu hareket sırasında BumbleBee radar ile veriler toplanmış ve bu verilerin mikro-Doppler analizi yapılarak spektrogramı çıkarılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5 Parazitli Spektrogram

Spektrogram elde edildikten sonra -5 Hz ile +5 Hz arasında sabit parazit yansımalar olduğu görülmüştür. Spektrogramlardaki paraziti yok etmek amacıyla kesim frekansı 5 Hz olan yüksek geçiren bir filtre tasarlanarak karmaşık sinyale uygulanmıştır. Filtrelenen sinyale daha sonra KZFD uygulanarak parazitsiz spektrogram (Şekil 6) elde edilmiştir.



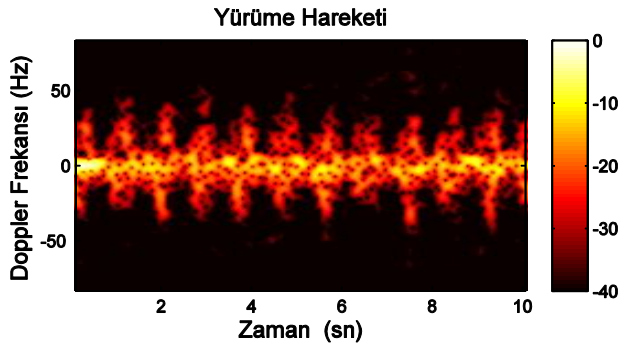
Şekil 6 Parazitten Arındırılmış Spektrogram

### IV. SONUÇLAR VE YORUMLAR

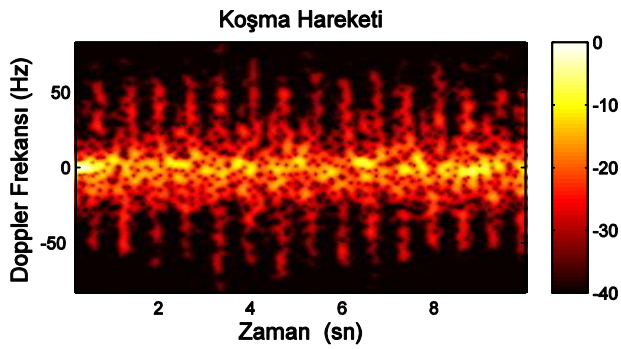
Deney düzeneği Şekil 4'deki gibi ayarlandıktan sonra yürüme, koşma ve emekleme hareketleri için 10 saniyelik veriler alınarak bu verilerin mikro-Doppler analizi yapılmıştır. Spektrogramların yatay eksenı zamanı, dikey eksenı doppler frekansını, renk kodları ise dönen sinyalin gücünü temsil etmektedir. Radar ile insan algılama problemlerinde insan vücudundaki her bir parçanın radar kesit alanı bir geometrik şekille modellenmektedir. İnsan vücudunda en büyük radar kesit alanı silindirik olarak modellenen gövdeye aittir. Bu nedenle gövdeden dönen sinyal diğer vücut parçalarından dönen sinyallere nazaran daha güçlüdür ve spektrogramlarda sarı renkli olarak görülmektedir. Hareket esnasında salınım yapan kol ve bacaklardan dönen sinyaller ise sarı renkli gövde çizgisinin etrafında kiplenmeler oluşturmaktadır.

Yürüme, koşma ve emekleme verileri için çıkarılan spektrogramlar sırasıyla Şekil-7, Şekil-8 ve Şekil-9 da sunulmuştur. Spektrogramlar incelendiğinde üç hareket için de oluşan mikro-Doppler imzalarının farklılıkları görülmektedir. Üç hareket de koşu bandı üzerinde yapıldığından gövdenin

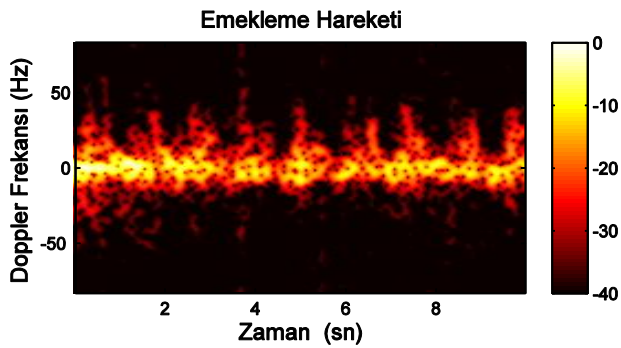
radyal hızı sıfır olarak görünmektedir. Yürüme ve koşma deneyleri sırasında kol ve bacakların periyodik hareketi sonucu spektrogramlarda periyodik salınımlar oluşmuştur. Yürürken ve koşarken kolların geriye doğru da hareket etmesinden dolayı negatif hızlarda da bileşenler oluşmaktadır. Koşma hareketi esnasında kol ve bacaklar daha fazla salınım yaptığından koşma hareketinin spektrogramında kol ve bacakların radyal hızlarının daha yüksekte olduğu görülmektedir. Koşma hareketi sırasında kol ve bacaklar yürümeye kıyasla daha çok ileri ve geri hareket etmektedir. Bu sebeple koşma hareketinin Spektrogramı nda daha çok salınım gözlenmektedir. Emekleme hareketinde hedef 1 km/saat hızla hareket ettiği için periyodik salınımlar diğer hareketlere kıyasla daha az görülmektedir. Bu hareket sırasında kollar geriye doğru salınım yapmadığından spektrogramda sadece pozitif salınımların olduğu görülmektedir.



Şekil 7 Yürüme Hareketi Spektrogramı



Şekil 8 Koşma Hareketi Spektrogramı



Şekil 9 Emekleme Hareketi Spektrogramı

## V. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu bildiri de düşük güç tüketimli, ekonomik BumbleBee radar sistemleri ile bina içi insan hareketlerini incelemek için bir yöntem sunulmuştur. Farklı insan hareketleri için radar verileri toplanarak bu verilerin mikro-Doppler analizi yapılmıştır. Oluşturulan spektrogramlar ile birlikte bu hareketlerin farkları tartışılmıştır.

Gelecek çalışmalarda birden çok BumbleBee radar kullanılarak bir kablosuz radar algılayıcı ağı oluşturulacaktır. Bu radar algılayıcı ağı ile birçok insan hareketi için örüntü bilgisi oluşturulup sınıflandırma çalışmalarında kullanılacaktır.

## KAYNAKÇA

- [1] "Samraksh Company website for the BumbleBee Radar." [Online]. Available: <https://samraksh.com/products/sensors/bumblebee-radar>. [Accessed: 14-Jan-2014].
- [2] "The Buzz about Bumblebee," MEMSIC Sensing Solutions Blog, January 2010. [Online]. Available: <http://blog.memsic.com/2010/01/the-buzz-about-bumblebee.htm>. [Accessed: 22-Jan-2014].
- [3] J. H. Lim, A. Terzis, and I.-J. Wang, "Tracking a non-cooperative mobile target using low-power pulsed Doppler radars," in *2010 IEEE 35th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, 2010, pp. 913–920.
- [4] M. Blaser, "Tracking a non-cooperative target using a Doppler radar wireless sensor network," Master's report, Michigan Technological University, 2011.
- [5] V. R. Kizhakkal, "PULSED RADAR TARGET RECOGNITION BASED ON MICRO-DOPPLER SIGNATURES USING WAVELET ANALYSIS," Master's report, The Ohio State University, 2013.
- [6] Y. Kim and H. Ling, "Human Activity Classification Based on Micro-Doppler Signatures Using a Support Vector Machine," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 5, pp. 1328–1337, 2009.
- [7] S. Heuel and H. Rohling, "Pedestrian classification in automotive radar systems," in *Radar Symposium (IRS), 2012 13th International*, 2012, pp. 39–44.
- [8] P. van Dorp and F. C. A. Groen, "Human motion estimation with multiple frequency modulated continuous wave radars," *IET Radar Sonar Navig.*, vol. 4, no. 3, pp. 348–361, 2010.
- [9] V. C. Chen, F. Li, S.-S. Ho, and H. Wechsler, "Analysis of micro-Doppler signatures," *Radar Sonar Navig. IEE Proc.*, vol. 150, no. 4, pp. 271–6, Aug. 2003.
- [10] A. H. Ozcan, S. Baykut, D. S. A. Sahinkaya, and I. K. Yalcin, "Micro-doppler effect analysis of single bird and bird flock for linear FMCW radar," in *Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2012 20th*, 2012, pp. 1–4.