

# Yazılım Tabanlı Radyolarda Karşılıklı Kanal Özelliğinin İncelenmesi

## Verification of Channel Reciprocity Implementation in Software Defined Radios

Merve Uslu\*, Halim Bahadır Tuğrel\*, Güneş Karabulut Kurt\*, Berna Özbek†

\*Telsiz Haberleşme Araştırma Laboratuvarı (THAL)

İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

† Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye

{uslumer, tugrel, gkurt}@itu.edu.tr, bernaozbek@iyte.edu.tr

**Özetçe** —Kablosuz haberleşme sistemlerinde, kanal kestirimi çok önemli bir yer tutmaktadır. Bu çalışmada A ve B, iki haberleşme düğümü olduğu varsayıldığında, A düğümünden B düğümüne olan kanal için elde edilen kanal katsayıları ile, B düğümünden A düğümüne olan kanal için elde edilen kanal katsayılarının benzerliği incelenmiştir. Karşılıklı kanal özelliğinden dolayı bu kanalların birbirine benzer çıkmaları beklenmektedir. Bu çalışmada, laboratuvar ortamında yazılım tabanlı radyo kiti kullanılarak karşılıklı kanal özelliği test ortamında test edilmiş, bu iki kanal katsayılarının genlik ve faz ortalama değerleri karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler**—Karşılıklı Kanal Özelliği, Kanal Kestirimi, OFDM, USRP ve LabVIEW

**Abstract**—Channel estimation is one of the vital processes in wireless communication systems. Assuming that A and B are two communication nodes, coefficients of the channel from A node to B node, must be very similar to the coefficients of the channel from B node to A node, due to channel reciprocity. In this paper, channel reciprocity property is tested by using software defined radio kits in laboratory environment. Average amplitude and phase values of these two channel coefficients are compared. The result of these comparisons is that the average amplitude and phase values are close.

**Keywords**—Channel reciprocity, channel estimation, OFDM, USRP and LabVIEW

### I. GİRİŞ

Karşılıklı kanal özelliği, elektromanyetik dalganın tersinir olmasından dolayı ortaya çıkan bir gerçektir. Elektromanyetik dalga, her iki yönde de yansıma, kırınım, dağılım gibi aynı fiziksel bozulmalara maruz kalır. Eğer bir elektromanyetik dalga, belirli bir yol üzerinden A noktasından B noktasına ulaşıyorsa, B noktasından A noktasına da elektromanyetik dalga aynı yol üzerinden yayılır. Bu aynı ulaşım yolu, iki durum için de aynı yol zayıflatmasını, gecikmesini ve faz kaymasını beraberinde getirecektir. Bir kablosuz haberleşme

sisteminde ise, bu durum A'dan B'ye giden kanal ile B'den A'ya giden kanalın aynı olmasını ifade edecektir. Bu nedenle, aynı frekans bandının kullanıldığı hücrel bir haberleşme sisteminde yukarı yönlü bağlantı kanalı ile aşağı yönlü bağlantı kanalı teorik olarak aynıdır. RF ön yüz kusurları karşılıklı kanal durumunu olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Bu kusurların en önemlisi, projede kullanılan her bir donanımın RF katmanında bulunan lokal osilatörlerin ayrı olması ve ortak bir lokal osilatör ile beslenmemesidir. Osilatörlerdeki bu farklılıklar çok az da olsa frekans kaymalarına yol açar. Bu kaymalar da alıcılarda faz kaymalarına yol açar. Ayrıca, alıcı katmanda düşük gürültülü kuvvetlendiricilerinin (low noise amplifier, LNA) yanında sinyal gücünü arttırmak için güç kuvvetlendiricileri (power amplifier, PA) de kullanılabilir. Bu kuvvetlendiricilerin gürültü faktörü (noise figure, NF) eğer fazla olursa sinyal kalitesi düşer. Üst katmanlarda oluşturulan güvenlik sistemlerinden ziyade, fiziksel katmandaki güvenlik sistemlerinde, kanalın özellikleri çok önemli yer tutar. Kanalın karşılıklı olma özelliğinin yardımıyla güvenlik anahtarı üretimi, fiziksel katman güvenlik yönteminin can alıcı noktasıdır.

Literatürde kanalın karşılıklı olma özelliğinin incelendiği birçok araştırma vardır. Bu çalışmalarda verici ile alıcı arasında karşılıklı kanal olduğu varsayılmıştır. Kanalın bu karşılıklı özelliği sayesinde verici ve alıcı, kanalı fiziksel katman güvenlik anahtar üretimi için ilişkili, verimli bir kaynak olarak görecektir. Bunun sebebi, kaynakların ilişkili olması dışında, kablosuz kanal olması sebebiyle kaynağın herhangi bir yerde bulunabilir olması ve kanalın zamansal ve mekânsal etki ile hızlıca değişmesinden, gizli dinleyiciler için kaynak çözümünün zor olmasıdır. Teorik ve pratik açıdan bu konu [1]–[3] çalışmalarında incelenmiştir. [4]–[6] çalışmalarında ise, kanalın zamanda çok kısa bir an için sabit kaldığını ve bu sürede kanalın karşılıklı olma özelliği altında faz farkı kullanılarak anahtar üretme işlemleri incelenmiştir. [7] çalışmasında, kanalın karşılıklı olduğu varsayımı, kimlik doğrulama için kullanılırken kanal durum bilgisine (Channel State Information, CSI) dayalı anahtar üretme çalışmaları yapılmıştır. Yazılım tabanlı radyo (Software Defined Radio, SDR) altyapısına sahip USRP (Universal Software Radio Peripheral) ve GNU radio kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir.

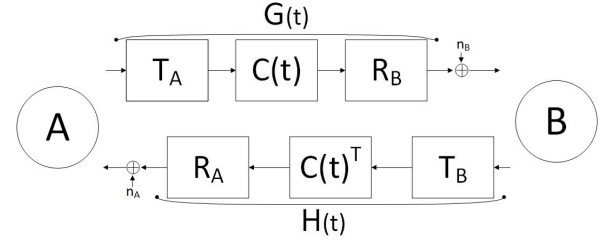
Bu çalışma 114E626 nolu TÜBİTAK projesi tarafından desteklenmektedir.

[8] çalışmasında ise eş zamanlı çift yönlü zaman bölme (Time Division Duplexing, TDD) sistemlerde karşılıklı kanal başarısı analiz edilmiş ve ölçüm sonuçları bu başarıyı onaylamıştır. [9] çalışmasında, kanalın karşılıklı olmasının sistem yükünü azaltma yönünde bir avantaja sahip olduğu belirtilmiştir ve böylece daha pratik sistemler tasarlanmasına olanak sağlanmıştır. [10] çalışmasında, TDD-LTE (Uzun Süreli Evrim) sistemlerinde verimli karşılıklı kanal kullanıldığında, kanal durum bilgisi geri bildirim yükü azaltılmış, analiz ve simülasyon sonuçları ise daha iyi bir sistem performansı elde edildiğini göstermiştir. [11] çalışmasında ise 4x4 çoklu giriş çoklu çıkış (Multiple Input Multiple Output, MIMO) sistemleri için performans kapasitesi gözlenmiştir. Ters eş zamanlı çift yönlü frekans bölme (FDD) sistem kanalından, karşılıklı kanal yaklaşımı ile elde edilen kanal durum bilgisi ile sistemin performansında iyileşmeler olduğu görülmüştür. [12] çalışmasında da implante cihazlar için kullanılan elektrik veya manyetik alanların iletimi temelli veri iletişim sistemleri için başlıca problem olabilecek kanal simetrikliği incelenmiş ve sonuçlar göstermiştir ki, sinyal transfer karakteristikleri aynı olduğu ve böylece kanalın karşılıklı özelliğinin geçerli olduğu görülmüştür. [13] çalışmasında bazı ideal olmayan durumlar ve RF önyüz eksikliklerinin etkisi olsa bile, kanalın karşılıklı olma durumu MIMO sisteme uygulanmış ve sonuçlar karşılıklı kanalın verimliliğini ispat etmiş, [14], [15] çalışmalarında ise, MIMO tabanlı sistemde karşılıklı kanal varsayımı ve RF önyüz eksikliği etkisi aynı şekilde incelenmiştir. Sonuç olarak, RF önyüz kusurları, karşılıklı kanal varsayımını olumsuz yönde etkileyebileceği gözlemlenmiştir. [16] çalışmasında da, TDD-MIMO sistemde IQ dengesizliğinin karşılıklı kanal durumuna etkisi incelenmiş ve çeşitli algoritmalar ile bu dengesizliği telafi etmeye çalışılmıştır. [17] çalışmasında ise, kanalın karşılıklı olma durumu değil, 802.11g kablosuz sistemin kanal karakterizasyonu LabVIEW programı ve National Instruments Universal Software Radio Peripheral (NI-USRP) yazılım tabanlı radyoları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmamızda, NI-USRP yazılım tabanlı radyo kitleriyle verici-alıcı düzeneği hazırlanarak, yapılan testler sonucu kanal kestirimi ile çift taraflı kanal katsayıları bulunmuştur. Elde edilen kanal katsayılarının faz ve genlik özellikleri çıkartılarak karşılıklı kanal özelliği incelenmiştir.

## II. KARŞILIKLI KANAL ÖZELLİĞİ

Elektromanyetik dalganın karşılıklı olma teoremine göre karşılıklı kanal modeli, M. Guillaud, D. Slock ve R. Knopp'un [18] çalışmasında verilmiştir. Burada, A ve B düğümleri, sırasıyla anten sayıları  $M$  ve  $N$  olarak düşünülmektedir. Sistem, temelband işlemi sırasında üç lineer filtrenin ardışık olarak dizilmesi ve toplamsal beyaz Gauss gürültüsü ile modellenmiştir. Bu model Şekil 1'de gösterilmektedir. Diagramın üst kısmı, A'dan B'ye iletişimi temsil ederken, alt kısım ise B'den A'ya olan iletişimi temsil etmektedir.  $T_A$ ,  $M$  girişli  $M$  çıkışlı A düğümünün verici devresindeki filtreleme operasyonuna,  $C(t)$  ise elektromanyetik kanalın dürtü yanıtlarını içeren (her bir verici-alıcı anten çifti için)  $N \times M$  boyutlu bir matrise karşılık gelmektedir.  $R_B$  ise B düğümünün alıcı devresindeki filtreleme operasyonunun  $N \times N$  boyutlu bir matris şeklindeki ifadesidir. Simetrik bir biçimde,  $T_B$  ve  $R_A$  sırasıyla B düğümünün verici devresindeki, A düğümünün alıcı devresindeki filtreleme operasyonunu göstermektedir.

Basitlik açısından  $n_A$ ,  $n_B$  gürültüleri, üç filtrenin



Şekil 1: Karşılıklı Kanal Modeli

kaskadının arkasından eklenmiştir, yani alıcı devre ile elektromanyetik kanal arasında görülmektedir. Devre karakteristikleri zamana ( $t$ ) bağlı değildir, çünkü bu karakteristiklerin değişimi, kanalın varyasyonundan çok daha yavaştır. Her iki yönde iletimin, kanalın uyum (evreyum) zamanından daha kısa süreli bir zaman diliminde meydana geldiği varsayıldığında, elektromanyetik kanalın karşılıklı olma teoremi, iki yönde de her anten çifti için dürtü yanıtının aynı olduğunu garantiler, bu yüzden  $C(t, \tau)$  filtresi iki yönde de aynıdır (anten dizisine bağlı olarak transpozese alınması gerekebilir).

Burada  $*$  konvolüsyon işlemi,  $\tau$  gecikmeyi belirtmek üzere; A düğümünden B düğümüne olan gürültüsüz kanal için birleşik dürtü yanıtı

$$G(t, \tau) = R_B(\tau) * C(t, \tau) * T_A(\tau), \quad (1)$$

olarak elde edilir.  $C^T$ ,  $C$  matrisinin transpozunu ifade etmek üzere, B düğümünden A düğümüne gürültüsüz kanalın birleşik dürtü yanıtı ise,

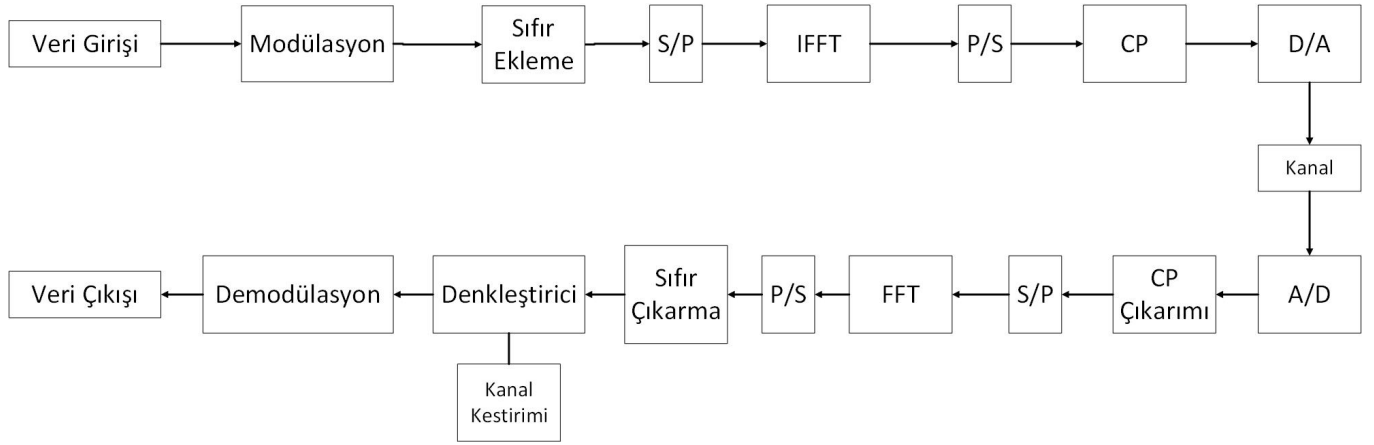
$$H(t, \tau) = R_A(\tau) * C(t, \tau)^T * T_B(\tau) \quad (2)$$

şeklinde. Birleşik dürtü yanıtları zamanla değişmez olduğu düşünüldüğünde kanal vektörlerine ulaşılabilir. B düğümü için  $G(t, \tau)$  bilgisi klasik kanal kestirimi ile kolayca elde edilebilir, aynı şekilde A düğümü de  $H(t, \tau)$  dürtü yanıtını tahmin edebilir.

## III. SİSTEM MODELİ

Çalışmamızda, verici ile alıcı arasında tek giriş tek çıkışlı (Single Input Single Output, SISO) dik frekans bölme (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) iletişimi söz konusudur. SISO, vericide ve alıcıda tek antene sahip bir sistemdir. OFDM, çok sayıda modüle edilmiş alt taşıyıcı kullanarak veri iletiminin paralel olarak yapıldığı bir tekniktir. Ardarda gelen OFDM çerçeveleri arasına periyodik ön ekin (Cyclic Prefix, CP), kanal gecikmesinden (delay spread) büyük olacak şekilde seçilerek ilave edilmesi ile kanalın etkisiyle pakette oluşan simgeler arası girişimi (Intersymbol Interference, ISI) yok edebilme özelliğine sahiptir. OFDM sistemlerinin, frekans seçici sönmüleme ya da band girişimine karşı dirençli olması önemli bir tercih edilme sebebidir [19].

OFDM sistemi temel blok diagramı Şekil 2'teki gibidir. Vericide, kullanıcı verileri, seçilen bir modülasyon çeşidi uygulanarak IQ sembol haritası elde edilir. Pilot (referans) semboller eklenerek, sıfır ekleme (zero padding) işlemi uygulanır. Ardından S/P bloğu ile seriden paralele dönüştürme işlemi



Şekil 2: OFDM Sistemi Temel Blok Diyagramı.

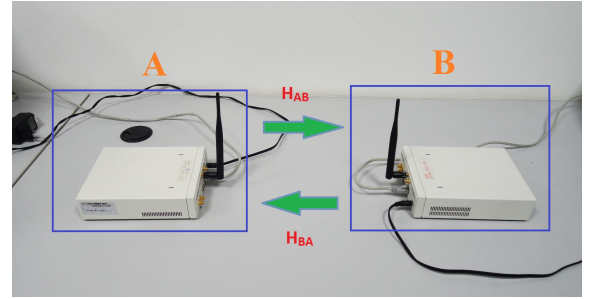
yapılarak ters hızlı Fourier dönüşümü (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) işlemi gerçekleştirilir. P/S bloğu ile paralel-seri dönüşümü yapıldıktan sonra CP bloğu ile kanalın etkisine karşı dayanıklı olması için ön ek eklenir. Son olarak, seri dijital veriler dijital-analog dönüştürücü işlemi için D/A bloğundan geçer.

Alıcıda ise gelen analog veri öncelikle dijital veriye dönüştürülür. Ardından ön ek silme işlemi, senkronizasyon kayması engellendikten sonra gerçekleştirilir. S/P bloğu ile seriden paralele dönüştürme işleminin ardından dijital veri FFT işlemine sokulur. FFT bloğunun çıkışına, denkleştirme ve kanal kestirimi uygulanır. Pilot sembollerden yararlanarak kanal kestirimi için en küçük kareler yöntemi kullanılır. Alttaşıyıcı veriler için kanal kestirimi, pilot sembollerin kanal kestirimi yardımıyla tek boyutlu lineer interpolasyon algoritması yardımıyla yapılır. Bu algoritmalar sayesinde kanal durum bilgileri elde edilir. Dengeleme süreci, kestirilen kanal katsayıları kullanılarak iletilen veriyi elde etmek için uygulanır. Ardından seçilen modülasyon çeşidine göre demodülasyon yapılarak, IQ sembol ayrıştırması gerçekleştirilir.

#### IV. TEST ORTAMI VE SONUÇLARI

Test ortamında yazılım tabanlı radyo olarak NI-2921 USRP kitleri kullanılmıştır. Ölçümler, İTÜ Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, Telsiz Haberleşme Araştırma Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Yazılım tabanlı radyo kitleri LabVIEW yazılımı ile programlanmıştır. USRP birimleri genel amaçlı bir yazılım tabanlı radyo kitidir. İçerisinde RF katmanı, analog-dijital çevirici (Analog to Digital Converter, ADC), dijital-analog çevirici (Digital to Analog Converter, DAC) ve alanda programlanabilir kapı dizileri (Field Programmable Gate Arrays, FPGA) kartı bulunur. USRP, yazılım tabanlı radyo uygulamaları için çok uygun olan esnek, açık kaynak tasarımlı ve yüksek hızlı donanımlardır [20]. LabVIEW programı cihaza özel kütüphanelerin mevcut olduğu, birçok alanda kullanılan grafiksel programlama dili arabirimidir [21].

Laboratuvarda testler için biri verici biri alıcı durumunda olan Şekil 3'te görüldüğü gibi iki USRP aralarında 35 cm uzaklık olacak şekilde kullanılmıştır. İletim band genişliği 2.4 GHz-2.5 GHz aralığında olan NI USRP-2921 modelinin, taşıyıcı frekansı 2.45 GHz seçilmiştir. Testlerde dört bölmeli



Şekil 3: Ölçüm Düzenliği

faz kaydırmalı anahtarlama (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK) modülasyon çeşidi seçilmiştir ve sistem parametreleri Tablo I'de gösterilmiştir.

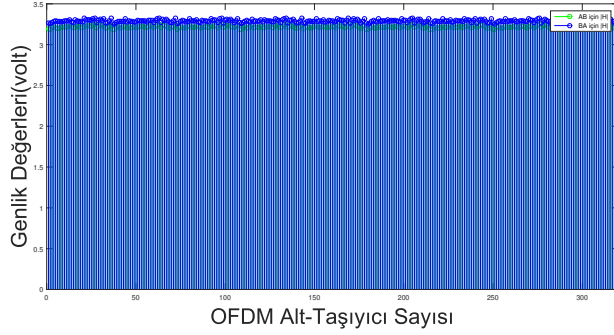
Tablo I: Sistem Parametre Değerleri.

Taşıyıcı Frekans	2.45 GHz
İletim Kazancı	20 dB
Alıcı Kazancı	30 dB
I/Q Veri Oranı	1 MS/sec
Bir Çerçeve'deki Bit Sayısı	640
Bilgi Alttaşıyıcı Sayısı	320
Referans Alttaşıyıcı Sayısı	40
Zero Padding Uzunluğu	120
FFT Uzunluğu	480
Ön Ek Uzunluğu	120
Çerçeve'deki Toplam Alt Taşıyıcı Sayısı	600

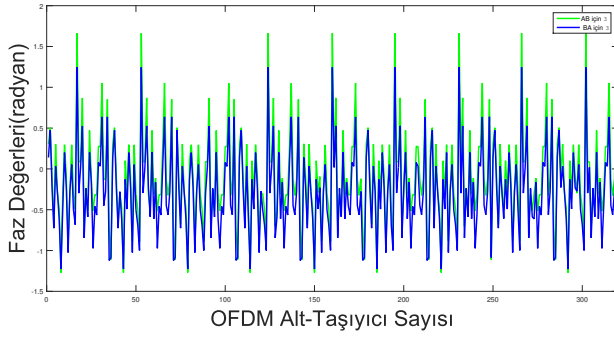
Vericide her 8 bilgi sembolü için 1 referans sembol kullanılmıştır. Toplamda 320 adet bilgi sembolü için 40 adet referans sembol kullanılmıştır. Her bir çerçeveden,  $1 \times 320$  boyutlu kanal katsayısı vektörü ( $\mathbf{h}_{AB}$  ve  $\mathbf{h}_{BA}$ ) elde edilmektedir. Alıcıda ön ek ile hesaplanmış olan taşıyıcı frekans kayması (Carrier Frequency Offset, CFO) değerleri sayesinde frekandaki kayma düzeltilmiş ve kestirilen kanal katsayıları ile denkleştirme işlemi yapılmıştır. A USRP biriminden, B USRP birimine toplamda 320000 kanal katsayısı,  $i \in \{1, 2, \dots, 1000\}$  olmak üzere  $\mathbf{h}_{AB,i}$  şeklinde kanal katsayısı vektörü elde edilmiştir. B USRP biriminden, A USRP birimine de aynı işlem gerçekleştirilerek  $\mathbf{h}_{BA,i}$  kanal katsayısı vektörü elde

edilmiştir.

Testler sonucunda elde edilen  $\mathbf{h}_{AB,i}$  ve  $\mathbf{h}_{BA,i}$  kanal katsayı vektörünün ortalama genlik ve faz bilgileri gözlenmiştir. A USRP biriminden B USRP birimine olan kanal AB, B USRP biriminden A USRP birimine olan kanal BA şeklinde gösterilmek üzere Şekil 4 ve Şekil 5’de kanal katsayısı vektörleri için genlik ve faz ortalama değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4:  $\mathbf{h}_{AB}$  ve  $\mathbf{h}_{BA}$  kanal katsayı vektörlerinin ortalama genlik değerleri



Şekil 5:  $\mathbf{h}_{AB}$  ve  $\mathbf{h}_{BA}$  kanal katsayı vektörlerinin ortalama faz değerleri

## V. ÇIKARIMLAR

Bu çalışmada yazılım tabanlı radyo kitleri yardımıyla, karşılıklı kanal özelliği test edilmiş,  $\mathbf{h}_{AB}$  ve  $\mathbf{h}_{BA}$  için genlik ve faz ortalamaları küçük farklılıklar dışında birbirine benzer çıkmıştır. Bu farklılıkların sebebi kullanılan USRP kitlerindeki RF önyüz kusurlarından kaynaklanmaktadır. Böylece kanalın karşılıklı olma teoremi, SISO-OFDM tabanlı sistemde yazılım tabanlı radyolarda gerçekleşmiş ve olumlu sonuçlar alınmıştır. Gelecekteki çalışmalarda, çıkartılan faz ve genlik değerleri aracılığıyla fiziksel katman güvenlik anahtarı üretme işlemi gerçekleştirilmesi ve MIMO sistemler için de araştırılması hedeflenmektedir.

## KAYNAKÇA

[1] R. Wilson, D. Tse, and R. Scholtz, “Channel identification: Secret sharing using reciprocity in ultrawideband channels,” *IEEE Transactions on*

*Information Forensics and Security*, vol. 2, no. 3, pp. 364–375, Sept 2007.

[2] J. Wallace, C. Chen, and M. Jensen, “Key generation exploiting MIMO channel evolution: Algorithms and theoretical limits,” in *3rd European Conference on Antennas and Propagation*, March 2009, pp. 1499–1503.

[3] J. Wallace and R. Sharma, “Automatic secret keys from reciprocal MIMO wireless channels: Measurement and analysis,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 5, no. 3, pp. 381–392, Sept 2010.

[4] J. Hershey, A. Hassan, and R. Yarlagadda, “Unconventional cryptographic keying variable management,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 43, no. 1, pp. 3–6, Jan 1995.

[5] A. A. Hassan, W. E. Stark, J. E. Hershey, and S. Chennakeshu, “Cryptographic key agreement for mobile radio,” *Digital Signal Processing*, vol. 6, no. 4, pp. 207–212, 1996.

[6] H. Koorapaty, A. Hassan, and S. Chennakeshu, “Secure information transmission for mobile radio,” *IEEE Communications Letters*, vol. 4, no. 2, pp. 52–55, Feb 2000.

[7] Z. Li, W. Xu, R. Miller, and W. Trappe, “Securing wireless systems via lower layer enforcements,” in *Proceedings of the 5th ACM workshop on Wireless security*. ACM, 2006, pp. 33–42.

[8] Z. Shi, Q. Wang, J. Jin, D. Jiang, and G. Liu, “Achievability of the channel reciprocity and its benefit in TDD system,” in *CHINACOM*, Aug 2010, pp. 1–4.

[9] Y. Han, J. Ni, and G. Du, “The potential approaches to achieve channel reciprocity in FDD system with frequency correction algorithms,” in *CHINACOM*, Aug 2010, pp. 1–5.

[10] J. Ran and L. Li, “An adaptive method utilizing channel reciprocity in TDD-LTE system,” in *IET International Conference on Communication Technology and Application*, Oct 2011, pp. 896–900.

[11] N. Promsuvana and P. Uthansakul, “Feasibility of adaptive 4x4 MIMO system using channel reciprocity in FDD mode,” in *14th Asia-Pacific Conference on Communications*, Oct 2008, pp. 1–5.

[12] M. Sun, Q. Liu, W. Liang, B. Wessel, P. Roche, M. Mickle, and R. Sciabassi, “Application of the reciprocity theorem to volume conduction based data communication systems between implantable devices and computers,” in *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, vol. 4, Sept 2003, pp. 3352–3355 Vol.4.

[13] Q. Gao, F. Qin, and S. Sun, “Utilization of channel reciprocity in advanced MIMO system,” in *CHINACOM*, Aug 2010, pp. 1–5.

[14] A. Dias, D. Bateman, and K. Gosse, “Impact of RF front-end impairments and mobility on channel reciprocity for closed-loop multiple antenna techniques,” in *PIMRC*, vol. 2, Sept 2004, pp. 1434–1438 Vol.2.

[15] J.-C. Guey and L. Larsson, “Modeling and evaluation of MIMO systems exploiting channel reciprocity in TDD mode,” in *VTC*, vol. 6, Sept 2004, pp. 4265–4269 Vol. 6.

[16] Z.-J. Liu, D.-C. Sun, J.-L. Wang, and K.-C. Yi, “Impact and compensation of I/Q imbalance on channel reciprocity of time-division-duplexing multiple-input multiple-output systems,” *IET Communications*, vol. 7, no. 7, pp. 663–672, May 2013.

[17] N. Shahin, N. LaSorte, S. Rajab, and H. Refai, “802.11g channel characterization utilizing LABVIEW and NI-USRP,” in *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, May 2013, pp. 753–756.

[18] M. Guillaud, D. Slock, and R. Knopp, “A practical method for wireless channel reciprocity exploitation through relative calibration,” in *Eighth International Symposium on Signal Processing and Its Applications*, vol. 1, August 2005, pp. 403–406.

[19] R. Prasad, *OFDM for wireless communications systems*. Artech House, 2004.

[20] A. C. Heren, F. N. Kılıçlı, and M. T. Özşahin, “Yazılım tanımlı radyo ve uygulamaları.”

[21] *LabVIEW System Design Software*. [Online]. Available: <http://www.ni.com/labview/>