

Geribeslemeli Haberleşme Sistemlerinde Bilişsel Radyo Modelinin Matematiksel Analizi

*¹ Metin Çiçek ve ²Nursel Akçam

*¹ Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

Özet

Bilişsel Radyo (BR), mevcut spektrumun daha verimli kullanılabilmesi için spektrum ortamının sürekli olarak sezilmesiyle, boş ya da yoğunluğu az olan kanalların belirlenmesi ve uygun kanalların ikincil kullanıcılara tahsisini öngörmektedir. Otomatik Tekrar İsteği (Automatic Repeat Request-ARQ) geribeslemeli sistemlerinin matematiksel olarak performansları, başarımları ve hizmet kesinti olasılıkları ile belirlenmektedir.

Bu çalışmada, geribeslemeli haberleşme sistemi dahilinde ikincil kullanıcı olarak çalışacak BR'nin, birincil sistemin ileri ve geribesleme haberleşme sinyalleşme bilgilerini yorumlayarak, kendisine iletim kaynağı oluşturması ve bu kaynağı kullanmasını amaçlayan bir model oluşturulmuştur. Bu model dahilinde birincil ve ikincil haberleşme yapılarının başarımları ve hizmet kesinti olasılıklarına ilişkin performanslar matematiksel olarak incelenmiştir.

Key words: Bilişsel Radyo, geribeslemeli haberleşme sistemleri

1. Giriş

Son yıllarda özellikle kablosuz teknolojilerdeki gelişmeler ve bu alandaki uygulamaların artmasıyla spektrum ihtiyacı giderek önem kazanmıştır. Söz konusu spektrum kullanımındaki artışın devamı, klasik spektrum yönetimi politikalarının dışında yeni teknik ve çözüm önerilerini ortaya çıkarmıştır. Bu önerilerden bir tanesi; mevcut spektrumun dinamik olarak sezilmesiyle, birincil kullanıcıların iletişiminde herhangi bir kalite kaybı oluşturmadan belirlenen boş veya düşük güçlü frekans bantlarından faydalanmayı (ikincil kullanıcıların kullanımına açmayı) amaçlayan BR kavramıdır. Bu yönüyle BR statik spektrum yönetiminin dışında; konuma, zamana, kanal yapısına, kullanıcı sayısına göre koşulları göz önünde bulundurarak, yeni dinamik spektrum kaynaklarının yaratılması bakımından spektrumdaki tıkanıklığa karşı ümit vadeden bir haberleşme sistemidir. Dinamik Spektrum Erişimi (DSE) yöntemiyle doğru yerde ve doğru zamanda ikincil kullanıcının (yasal olarak hizmet almamış durumda olan) birincil kullanıcı (yasal olarak belirli bir spektrumu kullanma hakkı bulunan) tarafından kullanılmayan spektrum boşluğuna erişim sağlaması, spektrum kullanımını önemli ölçüde geliştirilebilecektir. BR kavramı ifade edilen problemlere çözüm bulmak amacıyla ilk olarak 1999 yılında Mitola ve Maguire tarafından ortaya atılmıştır [1].

*Corresponding author: Address: Information and Communications Technologies Authority, Ankara TURKEY. E-mail address: mcicek@btk.gov.tr, Phone: +903122947200

BR tekniği ile, spektrum boşlukları fırsatçı biçimde kullanılarak, spektral verimlilik artırılabilir. Spektrumun sezilmesi, yönetilmesi ve paylaşılması ile ikincil kullanıcılar spektrum boşluklarının varlıklarını saptar ve birincil kullanıcılar üzerinde girişim oluşturmadığı sürece söz konusu boşlukları fırsatçı biçimde kullanır. Bu koşulu sağlama adına bazı yöntemler ortaya atılmıştır. Bunlardan bir tanesi de, birçok haberleşme sisteminde hata kontrol tekniği olarak kullanılan ARQ sinyallerinin değerlendirilmesidir.

Haberleşmede vericiden iletilen verilerin, alıcıda en az şekilde gürültüye ve girişime maruz kalması ve dolayısıyla en az hata ile alınması istenir. Bu hedefin karşılanmasına yönelik olarak kullanılan en yaygın hata kontrol tekniği ARQ'dur. Alıcıda hata ya doğrudan düzeltilir ya da hatanın sezilmesinden sonra vericinin tekrar hata tespit edilen veri paketini göndermesi istenerek, söz konusu hata düzeltilir. Vericinin söz konusu paketi tekrar iletmemesinin istenmesi ARQ olarak adlandırılır [2].

BR'lerin birincil kullanıcıların kaynaklarından yararlanması sürecinde, birincil kullanıcıların kaynağa erişiminde herhangi bir engel teşkil etmemelidir. Bu kapsamda literatürde yer alan ve de günümüzde kullanım alanlarını gördüğümüz "detect-and-avoid" modellerinde, ikincil kullanıcı sürekli olarak spektrum boşluklarını tarar ve belirlediği bu boşluklarda iletimini gerçekleştirir. Ancak birincil kullanıcı üzerinde girişim oluşturmaktan sakınmalıdır [3]. Bu modellerde genellikle yanlış sezme işlemleri ile birincil kullanıcı ile çakışmalar olabilmektedir. Bununla birlikte, literatürde mevcut kablosuz sistemlerde ve yeni sistemlerde güç ve bant genişliğini sınırlamak ve belirli düzenleyici çerçeve belirlemek üzere "girişim sıcaklığı" modeli önerilmiştir [4,5]. Bu modele alternatif olarak işbirlikçi spektrum paylaşım modeli önerilmiş olup, bu modelde ikincil kullanıcı birincil kullanıcı performansında herhangi bir azaltıcı etki göstermeksizin, kullanıcıların bir arada haberleşmesi radyo ortamında bulunulması sağlanmaktadır [6,7].

Literatürde ARQ temelli birincil sistemin ACK/NAK (Acknowledgement/Not-acknowledgement) geribesleme sinyalleri kullanılmasını amaçlayan muhtelif modeller önerilmiştir [8-13]. Birincil sistemin ARQ kontrol sinyallerinin dinlenmesiyle, BR dolaylı olarak kanalın durumu ve birincil sistem üzerine oluşturduğu girişim hakkında bilgi edinebilme imkanına sahip olmakta ve böylece spektruma erişimini elde etmek için hareketini belirleyebilmektedir.

Tannious and A. Nosratinia [12]'de sönümlü şartlarda kablosuz düğümlerdeki birincil ve ikincil çiftlerinin bir arada bulunabilmesi için değişik protokoller önermektedirler. Birincil ARQ iletim yapısı birincil kullanıcı üzerindeki etkiyi minimize ederken, ikincil kullanıcı için önemli hızlar sağlamak amacıyla kullanılmıştır. Li ve diğerleri [14] çalışmalarında birincil ve ikincil kullanıcıların beraber bulunduğu ortamda ikincil kullanıcılar için işbirlikçi-erişime dayalı bir spektrum paylaşım modeli önermişlerdir.

Michelusi ve diğerleri [15], 1. tip Hibrit ARQ yöntemini kullanan birincil kullanıcılar ile spektruma erişmek isteyen bilişsel ikincil kullanıcılar için bir yöntem önermişlerdir. Bu yöntemde birincil ARQ protokolüne, ikincil kullanıcı alıcısında kullanılan girişim engelleme ile

baskı oluşturmaktadır.

Hibrit ARQ (HARQ) geribeslemenin kullanılması suretiyle spektrum paylaşım şebekelerinin başarımları ve kesinti olasılığı performansları belirlenir [16]. Bilişsel radyonun birincil kullanıcının efektif paket hızını izlediği ve sadece bu hızın belirli bir eşik üstünde olması durumunda iletim yaptığı, basit ve kapsayıcı bir strateji mevcuttur [17]. Birincil kullanıcının korunması sağlanırken ikincil kullanıcı için üstün bir performans sağlayan model çift yönlü ve interaktif bir kablosuz haberleşme sistemi dikkate alınarak simüle edilebilir [18].

Bu çalışmada, ARQ geribeslemeli bir BR yapısı tanımlanarak, ARQ sisteminin performansına ilişkin performans ölçüsü olan başarımları ve kesinti olasılığı değerleri matematiksel olarak tartışılmıştır. Bu bağlamda, geribeslemeli haberleşme sistemi ile bu sistemde tek iletimlik ARQ formülizasyonu elde edilmiştir. İki iletimlik bir ARQ sistemi için birincil ve ikincil kullanıcıların performansına dair matematiksel analiz yapılarak sonuçlar değerlendirilmiştir.

2. Geribeslemeli Haberleşme Sistemi

BR sisteminde birincil kullanıcılar, haberleşme kaynağı olan spektrumdan lisanslı olarak ve girişimden uzak biçimde yararlanırlar. İkincil kullanıcılar birincil kullanıcıların yeterince kullanmadığı kaynakları değerlendirmek suretiyle iletişim imkanı oluştururlar. Bu imkanın oluşturulması için birincil kullanıcının davranışları ile ilgili kesin bilgilere erişebilmeli, akabinde doğru ve yeterli kaynak sağlayacak analizler yapılabilir. Bu kapsamda birincil kullanıcının ARQ sinyalleri bilgi olarak ikincil kullanıcılar tarafından kullanılabilir. Söz konusu analiz yapılmadan önce tek iletimlik bir ARQ sisteminin temel parametreleri matematiksel olarak belirlenmelidir.

ARQ yapıları barındıran sistemlerin performansı, kesinti (hizmet dışı kalma) ve beklenen başarımları değerleriyle ölçülür [12]. Kesinti, kanal boyunca gönderilen bilginin, belirlenen R hız oranından düşük olduğu durumda gerçekleşen olaydır. j alıcısında elde edilen sinyal;

$$y_j = \sqrt{SNR} h_{i,j} X_i + n_j \quad (1)$$

şeklinde gösterilir. Burada;

SNR : Sinyal Gürültü Oranı,

X_i , i vericisinden iletilen paketi,

n_j , AWGN (Additive White Gaussian Noise) gürültüsünü,

$h_{i,j}$, i vericisi ile j alıcısı arasındaki yolun kanal kazancını temsil eder. S , işaret gücünü, N_0 gürültü gücünü, B bantgenişliğini ve C , kanal kapasitesini göstermek üzere, Kodlama teoreminden hatırlanacağı üzere,

$$C = B \cdot \log\left(1 + \frac{S}{N_0}\right) \quad (2)$$

ve kanal kapasite formülü olan

$$C \geq R \quad (3)$$

dikkate alındığında, tek iletimlik bir haberleşmede kesinti olma olasılığı

$$P_o = P \left\{ \log \left(1 + |h_{i,j}|^2 SNR \right) < R \right\} \quad (4)$$

başarım değeri ise,

$$C = R(1 - P_o) \quad (5)$$

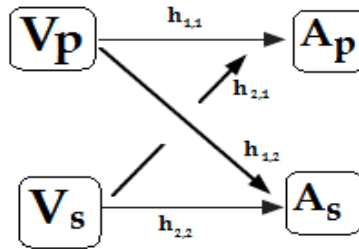
olarak verilir.

3. BR'de İki İletimlik ARQ Sistemin Performans Analizi

Tek ARQ geribesleme sinyali BR açısından kaynağın etkin kullanılmasına yönelik yeterli bilgi taşımayabilir. Ancak bir tekrar iletim imkanının olması, ikincil kullanıcılar için birincil kaynak kullanımı ve davranışları hakkında daha fazla bilgi sağlar [12].

3.1. Sistem Modeli

BR'de ARQ yapısının bulunduran model Şekil 1'de gösterilmekte olup, bu şebekede "V_p" birincil verici, "A_p" alıcı olarak düşünülmüştür. Bununla birlikte "V_s" ve "A_s" ikincil kullanıcı çiftlerini temsil eder. İkincil kullanıcı çiftinin, birincil kullanıcı çiftine tahsis edilmiş olan aynı frekans bandında ve aynı zaman aralığında haberleştiği kabul edilmiştir. Bu modelde alıcıların kanal durum bilgisinden (Channel State Information, CSI) mahrum kaldığı kabul edilmiştir. Kanal kazancı olarak gösterilen $h_{i,j}$ de i ve j sırasıyla verici ve alıcıyı temsil etmektedir. 1 indeksi birincil verici alıcıyı, 2 indeksi ise benzer biçimde ikincil kullanıcı çiftlerini ifade etmektedir. $h_{i,j}$ 'nin karesinin büyüklüğü, eksponansiyel dağılımı gösteren efektif kanal kazancını ifade etmektedir.



Şekil 1. BR'de ARQ modeli

İkincil kullanıcı çiftinin, birincil çiftin kullandığı kod kitabını bildiği kabul edilmiştir. Birincil düğümler, ikincil düğümlerin varlığından habersizdir. Birincil ve ikincil vericiler sırasıyla P_p ve P_s güçlerinde yayın yapmaktadır. Söz konusu modelde aynı zamanda (frekansta) hem paket iletimi, hem de paket alımı yapılamamaktadır. Birincil kullanıcı sabit bir P_p güç değerinde ve R_p sabit bir hızda yayın yapmaktadır.

3.2. Sistemin algoritması ve analizi

İkincil vericinin, birincil alıcıdan iletilen ACK/NAK sinyalleri dışında herhangi bir sinyal almadığı kabul edilmektedir. Sistem modelin haberleşmesi ise şöyledir. Birinci zaman aralığında, T_p birincil verici bir paket göndermektedir ve bu paketi hem birincil hem de ikincil alıcılar alır. Eğer birincil alıcı A_p bu paketi başarılı şekilde çözerse, ACK sinyali iletir. ACK sinyalinin duyulmasıyla A_s aldığı pakete ilişkin herhangi bir işlem yapmaz ve T_p yeni bir veri paketi göndermeye hazırdır. Eğer birincil alıcı ilk paketi çözmede başarılı olamazsa NAK sinyali yayınlanır. Bunun ikincil alıcı A_s tarafından duyulmasıyla, A_s buffer'ına sakladığı birincil sinyali çözmeye çalışır. Eğer başarılı olursa, V_s ye başarılı sinyali gönderir.

İkinci zaman aralığında birincil alıcının NAK sinyali alması durumunda V_p veri paketini tekrar iletir. Eğer ikincil başarı sinyali üretilirse, V_s kendi bilişsel mesajını eşzamanlı olarak üretir. İkincil alıcı, birincil veriyi zaten bildiğinden kendi alınan sinyalinden birincil girişimi ayırabilecektir. Birincil alıcı birinci ve ikinci zaman aralıklarında alınan kod kelimelerini birleştirir.

Her iki alıcı da kendi mesajlarını çözmeye çalışırlar. Her iki alıcı da başarısızlık durumunda kesintiye uğrar. Böylece birincil kullanıcı iki defaya kadar iletim yapabilirken, birincil kullanıcı bu senaryoda sadece bir iletim yapabilmektedir. İkincil iletim, aşağıda analiz edildiği gibi; tekrar iletim periyodu boyunca birincil kullanıcı üzerinde girişim üretir.

Eğer iki iletim sonrasında toplanan bilgi R_p hızından düşükse, birincil bağlantıda kesinti olur. İkincil kullanıcının iletim yapmadığı ve birincil kullanıcının ardarda iki iletim sonunda birincil kullanıcının kesinti olma olasılığı O_n olmak üzere;

$$P\{O_n\} = P\left\{2 \log\left(1 + |h_{1,1}|^2 P_p\right) < R_p\right\} \quad (6)$$

ve O_f , birincil kullanıcının başlangıç iletiminin başarısızlığını ifade etmek üzere, bu olayın olasılığı,

$$P\{O_f\} = P\left\{\log\left(1 + |h_{1,1}|^2 P_p\right) < R_p\right\} \quad (7)$$

olarak ifade edilir. Birinci denemede veya ikinci denemede alınan pakete göre beklenen başarıım,

$$C_n = R_p P\{\bar{O}_f\} + \frac{R_p}{2} P\{\bar{O}_n | O_f\} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C_n &= R_p (1 - P\{\bar{O}_f\}) + \frac{R_p}{2} P\{\bar{O}_n | O_f\} \\ &= R_p (1 - P\{O_f\}) + \frac{R_p}{2} \times P\{\log(1 + |h_{1,1}|^2 P_p) < R_p \leq 2 \log(1 + |h_{1,1}|^2 P_p)\} \end{aligned} \quad (9)$$

olur. O_p ve O_s , birincil ve ikincil alıcıların kesintiye uğrama olasılığı olsun. S ikincil alıcının birincil iletimi başarılı şekilde çözmesi, U ikincil bağlantının aktif olması durumunu ifade etsin. Bu durumda U , $O_f \cap S$ olarak ifade edilebilir.

$$P\{U\} = P\{\log(1 + |h_{1,1}|^2 P_p) < R_p \times P\{\log(1 + |h_{1,2}|^2 P_p) \geq R_p\} \quad (10)$$

Toplam olasılık kanununu kullanarak, birincil kullanıcının kesintiye uğrama olasılığı,

$$P\{O_p\} = P\{O_p | U\} P\{U\} + P\{O_p | \bar{U}\} P\{\bar{U}\} \quad (11)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlik (11)'in sağ tarafının ilk terimini analiz edilirse;

$$\begin{aligned} P\{O_p | U\} P\{U\} &= P\{O_p | O_f, S\} P\{O_f, S\} = P\{O_p\} P\{O_f | O_p\} P\{S | O_p\} \\ &= P\{O_p\} P\{S | O_p\} = P\{O_p | S\} P\{S\} \\ &= P\left\{\log(1 + |h_{1,1}|^2 P_p) + \log\left(1 + \frac{|h_{1,1}|^2 P_p}{1 + |h_{2,1}|^2 P_s}\right) < R_p\right\} \times P\{\log(1 + |h_{1,2}|^2 P_p) \geq R_p\} \end{aligned} \quad (12)$$

ifadesi elde edilir. Şimdi eşitlik (11)'in sağ tarafının ikinci terimini analiz edelim.

$$\begin{aligned} P\{O_p | \bar{U}\} P\{\bar{U}\} &= P\{O_p | \bar{U}\} = P\{O_p, (\overline{O_f, S})\} = P\{O_p, (\overline{O_f} \cup \bar{S})\} = P\{O_p, \bar{S}\} \\ &= P\{O_p | \bar{S}\} P\{\bar{S}\} = P\{O_n\} P\{\bar{S}\} \\ &= P\{2 \log(1 + |h_{1,1}|^2 P_p) < R_p\} \times P\{\log(1 + |h_{1,2}|^2 P_p) < R_p\} \end{aligned} \quad (13)$$

Protokolümüz kapsamında, başarılı bir ikincil iletim için, birincil bir NAK sinyali, A_s tarafından birincil paketin başarıyla çözülmesi ve R_s hızını destekleyecek $h_{2,2}$ nin yeterliliği gerekmektedir. Bu sebeple,

$$P\{O_s\} = 1 - (P\{U\} \cdot P\{\log(1 + |h_{2,2}|^2 P_s) \geq R_s\}) \quad (14)$$

kesinti olasılığının hesaplanmasının ardından, başarımlı performansı elde edilebilir. Birincil bağlantı için,

$$\begin{aligned} C_p &= R_p P\{\bar{O}_f\} + \frac{R_p}{2} P\{\bar{O}_p | O_f\} \\ &= R_p P\{\bar{O}_f\} + \frac{R_p}{2} (P\{\bar{O}_p | O_f, S\} P\{S\} + P\{\bar{O}_p | O_f, \bar{S}\} P\{\bar{S}\}) \\ &= R_p (1 - P\{O_f\}) + \frac{R_p}{2} (P\{\log(1 + |h_{1,1}|^2 P_p) < R_p \leq \log(1 + |h_{1,1}|^2 P_p) \\ &+ \log\left(1 + \frac{|h_{1,1}|^2 P_p}{1 + |h_{2,1}|^2 P_s}\right) P\{\log(1 + |h_{1,2}|^2 P_p) \geq R_p\} + \frac{R_p}{2} (P\{\log(1 + |h_{1,1}|^2 P_p) < R_p \leq \\ &2 \log(1 + |h_{1,1}|^2 P_p)\}) \times P\{\log(1 + |h_{1,2}|^2 P_p) < R_p\} \end{aligned} \quad (15)$$

olarak elde edilir. Bilişsel iletimden dolayı birincil alıcının maruz kaldığı başarımlı kaybı, eşitlik (9) ve eşitlik (15) arasındaki farktır.

İkincil bağlantının başarımlı ise eşitlik (16)'da görüldüğü gibi basittir.

$$C_s = R_s (1 - P\{O_s\}) \quad (16)$$

4. Sonuç

Bu çalışmada, literatürde yer verilen ilgili çalışmalardan da yararlanmak suretiyle, iki iletimlik bir ARQ sisteminde ikincil kullanıcı için oluşacak iletim kaynağının kullanılmasına dair değerlendirme yapılmıştır. Birincil kullanıcının iki ARQ iletimi için sahip olduğu başarımlı ve hizmet kesinti olasılığı ile ikincil kullanıcının, bu iki iletimden sonra sahip olacağı başarımlı değeri ve hizmet kesinti olasılığı matematiksel olarak formüle edilmiştir.

Kaynakça

- [1] Mitola J. ve Maguire Gerald Q, 1999, Cognitive radio: Making Software Radios More Personal, IEEE Personal Communications, vol:6, issue:4, ss: 13-18
- [2] Çölkesen R., Örencik B., Bilgisayar Haberleşmesi ve Ağ Teknolojileri, Papatya Yayıncılık, 2000, İstanbul
- [3] J. Mitola, “Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio,” Ph.D. dissertation, KTH, Stockholm, Sweden, Dec. 2000.
- [4] S. Haykin, “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,” IEEE J. Sel Areas Commun., vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb.2005.
- [5] Y. Xing, C. N. Mathur, M. A. Haleem, R. Chandramouli, and K. P. Subbalakshmi, “Dynamic spectrum access with QoS and interference temperature constraints,” IEEE Trans. Mobile Comput., vol. 6, no. 4, pp. 423–433, Apr. 2007.
- [6] Y. Han, A. Pandharipande, and S. H. Ting, “Cooperative decode-and-forward relaying for secondary spectrum access,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 8, no. 10, pp. 4945–4950, Oct. 2009.
- [7] Q. Li, S. H. Ting, A. Pandharipande, and Y. Han, “Cognitive spectrum sharing with two-way relaying systems,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 60, no. 3, pp. 1233–1240, Mar. 2011.
- [8] S. Firouzabadi, M. Levorato, D. O’Neill, and A. Goldsmith, “Learning interference strategies in cognitive ARQ networks,” in Proc. 2010 IEEE Globecom Conf.
- [9] N. Michelusi, O. Simeone, M. Levorato, P. Popovski, and M. Zorzi, “Optimal cognitive transmission exploiting redundancy in the primary ARQ process,” in Proc. 2011 IEEE Inf. Theory Applications Workshop.
- [10] S.-M. Cheng, W. C. Ao, and K.-C. Chen, “Efficiency of a cognitive radio link with opportunistic interference mitigation,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 10, no. 6, pp. 1715–1720, June 2011.
- [11] R. Tannious and A. Nosratinia, “Coexistence through ARQ retransmissions in fading cognitive radio channels,” in Proc. 2010 IEEE ISIT, pp. 2078–2082.
- [12] R. Tannious and A. Nosratinia, “Cognitive radio protocols based on exploiting hybrid ARQ retransmission,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 9, no. 9, pp. 2833–2841, 2010.
- [13] J. C. F. Li, W. Zhang, A. Nosratinia, and J. Yuan, “Opportunistic spectrum sharing based on exploiting ARQ retransmission in cognitive radio networks,” in Proc. 2010 IEEE Globecom Conf.
- [14] Q. Li, S. H. Ting, A. Pandharipande, M. Motani, “Cooperate-and-Access Spectrum Sharing with ARQ-Based Primary Systems”, IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 60, NO. 10, OCTOBER 2012

[15] N.Michelusi, P. Popovski, O. Simeone, M. Levorato, M. Zorzi, "Cognitive Access Policies under a Primary ARQ Process via Forward-Backward Interference Cancellation", IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 31, NO. 11, NOVEMBER 2013

[16] B. Makki, A. Graell, T. Eriksson, "HARQ Feedback in Spectrum Sharing Networks", IEEE COMMUNICATIONS LETTERS, VOL. 16, NO. 9, SEPTEMBER 2012.

[17] K. Eswaran, M. Gastpar, and K. Ramchandran, "Cognitive Radio Through Primary Control Feedback", IEEE JOURNAL ON SELECTED AREAS IN COMMUNICATIONS, VOL. 29, NO. 2, FEBRUARY 2011.

[18] F.E. Lopiccirella, Z. Ding, X. Liu, "Improved spectrum access control of cognitive radios based on primary ARQ signals" IET Communications, August 2011.