

Gecikme Toleranslı Ağlarda İşbirlikli Ağ Kodlama Network Coded Cooperation in Delay Tolerant Networks

Onur Çalık, Tuana Enseşgin, Burhan Öztaner, Selahattin Gökceli,
Semiha Tedik Başaran, Güneş Karabulut Kurt

Telsiz Haberleşme Araştırma Laboratuvarı,
Elektrik-Elektronik Fakültesi,
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye
{calikonu, enseşgin, oztaner, gokcelis, tedik, gkurt}@itu.edu.tr

Özet

Esnek tasarımı sayesinde çeşitli ağ dizilerinde kullanılan, sağlamlık ve izgesel verimlilik arasındaki dengeyi sağlayan ağ kodlama (network coding, NC) tekniği, uygulama alanını genişletmektedir. Bu yazıda, yazılım tabanlı radyo düğümleri kullanılarak NC'nin gecikme toleranslı ağlarda (delay tolerant network, DTN) uygulanması araştırılmıştır. Burada uygulanan ağ kodlu işbirlikli haberleşme (network-coded cooperation, NCC) sistemi ile çöz ve ilet (decode and forward, DF) işbirlikli haberleşme sistemi hata performansları açısından karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar NCC sisteminin, DF haberleşme sistemiyle aralarında karşılaştırılabilir bir hata oranı sağlaması ve aynı zamanda hedef ağda izgesel ve enerji verimliliğini artırması nedeniyle DTN için güvenilir bir seçenek olduğunu göstermiştir.

Abstract

Implementation of network coding is expanding to a diverse set of networks due to the flexible design provided through its use, enabling a tradeoff between robustness and spectral efficiency. In this paper, we investigate the application of network coding in delay tolerant networks (DTN) through the use of software defined radio (SDR) nodes. We compare the error performance of the implemented NCC system with a decode and forward (DF) cooperation scheme. Our results demonstrate that the NCC is a reliable option for DTNs, providing comparable error rates with DF and at the same time improving spectral and energy efficiency of the target network.

1. Giriş

Karasal protokollerin yeterli olmadığı bazı haberleşme çevreleri için, veri kaybını engellemek amacıyla bazı önlemler alınması gerekmektedir. Örneğin; gezegenler arası haberleşme ağları, özel amaçla kullanılan geçici ağlar veya telsiz sensör ağları klasik ağlardan farklı protokollere ihtiyaç duyarlar. Farklı ağların birbiriyle haberleşmesini sağlamak için aralıklı bağlantılara neden olan gecikmeler gözlemlenmiştir ve bu gecikmeler uygun önlemlerle dikkatlice ele alınmalıdır. Bu tip ağlar da Gecikme Toleranslı Ağlar (Delay Tolerant Network, DTN) olarak adlandırılmıştır.

DTN'de güvenilir veri iletimi kullanılmasına rağmen, bu ağlarda kazanılan izgesel verimlilik oldukça düşük olabilir. Bu

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 113E294 numaralı proje ile desteklenmektedir.

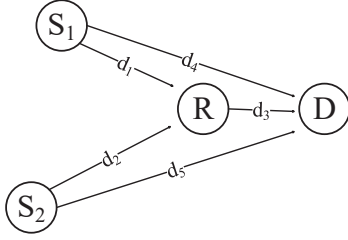
nedenle, verinin iletimi sırasında oluşan bu iletim zamanını azaltmak ve izgesel verimliliği arttırmak için DTN'nin üzerine yenilikçi bir teknik uygulanmalıdır. Nispeten yeni bir model olan ağ kodlama (network coding, NC) klasik DTN yaklaşımlarına kıyasla veri paketlerinin iletimini daha az gecikmelerle sağlar. NC, yönlendirme tekniğine alternatif olarak görülmektedir. NC'de verinin kaynak düğümden hedef düğüme iletilmesinde bir ya da daha fazla sayıda röle (relay), ara düğüm olarak kullanılır. Ara düğümler bilgi paketlerini akıllıca birleştiren ve bu sayede iletim gürbüzlüğünü arttıran düğümlerdir.

NC'nin DTN'de kullanılması kılavuzsuz iletim ortamlarında NC'nin tüm yararlarını sağlayamayabilir, ancak geçerli bir mekânsal çeşitliliğe bağlı olarak performans artışı elde edilebilir [1]. Bu temel amaçla röle bağlantılarının yanında direkt kaynak-hedef bağlantılarının da göz önüne alındığı ve performansı arttırmak için işbirlikli haberleşme tekniklerinin kullanıldığı Ağ Kodlamalı İşbirlikli Haberleşme (network-coded cooperation, NCC) sistemleri üzerine yoğunlaşmıştır. İşbirlikli haberleşme, kullanıcıların verilerini alıcıya göndermelerine, aynı anteni ve bant genişliğini diğer kullanıcılarla paylaşmasına izin vererek iletimin yapılmasına yardımcı olur [2]. Buna ek olarak, NCC sistemleri röle düğümlerin kodlama işlemini yapmalarına da izin verir.

Bu çalışmada DTN'in özel bir versiyonu olan oldukça büyük iletim gecikmeleri içeren derin uzay ağları (deep space networks, DSN) sistemleri ele alınmıştır. DSN senaryosu için yazılım tabanlı radyo (software defined radio, SDR) düğümleri kullanılarak bir NCC sistemi tasarlanmıştır. SDR düğümlerinin arasında deterministik gecikme bileşenleri bulunurken, OFDM tekniği iletim için kullanılmıştır. Uygulanan NCC sistemin performansı, göreceli olarak kötü hata performansını göze alarak düşünülen DSN senaryosunun izgesel verimliliğinin kayda değer bir şekilde iyileştiğinin ortaya konduğu geleneksel DF tekniği ile karşılaştırılmıştır.

2. Gecikme Toleranslı Ağlar

DTN'de, uzak mesafeler arası haberleşme ve iletilmek istenen verilerin bozulabileceği ortamlarda yapılan haberleşmelerde hızdan çok iletilmek istenen verinin tamamen eksiksiz aktarılması daha önemlidir [3]. DTN depola ve ilet (store and forward, SF) yöntemiyle çalışır [4]. Bu da noktadan noktaya veri aktarımı kontrol mekanizması nedeniyle iletim gecikmesine sebep olur. Bu işlemin amacı da bütün paketleri kayıpsız bir şekilde toplamaktır. Örneğin yollamak istediğimiz bir e-mail internet bağlantısının bir süre için kesilmesi dolayısıyla gönder-



Şekil 1. Ağ Topolojisi. S_1 ve S_2 kaynak düğümleri, R ve D sırasıyla röle ve hedef düğümleri belirtmektedir. Her bağlantının üzerinde de iletim gecikmeleri gösterilmektedir.

ilemediğinde, bu e-mail depoda tutulur. E-mail'in tamamı yol-
lanamadığı için bize e-mailin gönderilemediğine dair bir geri-
bildirim gelir. İnternet bağlantısı geri geldiğinde ise depolanan
e-mail iletmeye başlanır ve e-mailin tamamı alıcıya başarılı bir
şekilde ulaşır [5].

DTN tasarımı Yığın Protokolü (bundle protocol, BP) [6] ve Licklider İletim Protokolü [7] gibi klasik tasarımlar bulunmaktadır. DTN uzay ağlarında ve karasal ağlarda kullanılır ve gezegenler arası internet (IPN) iskeletini oluşturup DSN'in desteklenmesini sağlar. Bu tip ağlara IPN adı verilir [8]. DTN'de genellikle iki farklı protokol katmanı birbirine bağlayan BP kullanılır. Örneğin gezegenler arası iletişimi sağlamak için kullanılan internet protokollerinin karasal internet protokolleriyle arasındaki bağlantının sağlanması bu BP'ler sayesinde olur. Kaynak düğümlerden gelen veriler önce bir orta düğüme toplanır. Bu düğüme yığın düğümü (bundle node) adı verilir. Verilerin yığın düğümünde toplanmasını sağlayan elemanlar olan yığın düğümü elemanları (bundle protocol agents), SF'nin gereği olarak kaynak düğümden verinin tamamının yığın düğümüne aktarıldığını bildirmeden yığın düğümdeki verilerin bir sonraki düğüme iletilmesine izin vermez [9].

3. Sistem Modeli

DTN için önerilen NCC sistem modelinde S_1 ve S_2 kaynak düğümlerini, R röle düğümünü, D ise hedef düğümü temsil etmektedir. Bu sistemde NC kullanıldığı için kaynaklardan iletilen veri hedef düğüme iki yolla iletilir. S_1 ve S_2 kaynaklarından gönderilen verilerin direkt olarak hedef düğüme iletiminin yanı sıra, yine bu kaynaklardan gönderilen veriler röle düğüme uğrayarak buradan hedef düğüme iletilir. Şekil 1'de gösterildiği gibi kaynak düğümlerden direkt iletimle hedef düğüme gönderilen veriler d_4 ve d_5 gibi yüksek gecikme süreli olarak iletilir. Röle düğüme uğrayarak hedef düğüme ulaşan veriler de $d_1 + d_3$ veya $d_2 + d_3$ gecikme sürelerinde iletilir. Bu sistemde gecikme süreleri $d_1 \leq d_2 \leq d_3 \leq d_4 \leq d_5$ olarak kabul edilmiştir. Şekil 2'de T_s iletim süresini belirterek, T_p röle düğüme gelen verilerin işlenmesi sırasında geçen süreyi belirtmektedir. Ayrıca röle düğümde işlenen verinin hedef düğüme gelme süresi olan d_3 ' de röle düğüme S_2 kaynağından gelen verinin gecikme süresi olan d_2 , röle düğümden hedef düğüme gönderilen verinin gecikme süresi olan d_3 , röle düğüme gelen verilerin işlenmesi sırasında geçen süre olan T_p ve $2T_s$ 'lik sürenin toplamına eşittir. Bu eşitlikte d_1 yerine d_2 'nin kullanılmasının nedeni $d_1 \leq d_2$ olmasıdır.

İletim bağlantılarının gecikmelerine bağlı olarak S_1 'den R 'ye (eş zamanlı olarak D 'ye) iletilen ardışık semboller $s_{1,1}[n]$

and $s_{1,2}[n]$ olarak gösterilirken buradaki alt taşıyıcı indeksi n olarak tanımlanmıştır. Alt taşıyıcıların sayısı N 'ye eşittir. S_2 'den R 'ye de (ve D 'ye) $s_2[n]$ tek sembolü iletilir.

S_1 ve S_2 'den röle düğüme gelen OFDM sembolleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$Y_{S_1 R}^i[n] = \sqrt{\rho} H_{S_1 R}^i[n] s_{1,i}[n] + W_{S_1 R}^i[n], \quad i = 1, 2, \quad (1)$$

$$Y_{S_2 R}[n] = \sqrt{\rho} H_{S_2 R}[n] s_2[n] + W_{S_2 R}[n], \quad n = 1, \dots, N \quad (2)$$

burada ρ iletim gücünü tanımlamaktadır. $W_{S_1 R}^i$ ve $W_{S_2 R}$ sırasıyla S_1 - R ve S_2 - R 'ye eklenmiş beyaz Gauss gürültüsü (additive white Gaussian noise, AWGN) olarak tanımlanmıştır. $H_{S_1 R}^i[n]$ ve $H_{S_2 R}[n]$ ise S_1 - R and S_2 - R arasındaki bağlantıların kanal kazancıdır. DF şemasına göre röle düğüm çözümü yapar ve $s_{1,1}[n]$, $s_{1,2}[n]$ ve $s_2[n]$ kaynak işaretlerini tek tek gönderir. Bu yüzden röle düğümde harcanan süre için $3T_s$ gerekir. Röle düğüm hedef düğüme $s_R[n] = s_{1,1}[n] \oplus s_{1,2}[n] \oplus s_2[n]$ işaretini gönderir. Hedef düğümde elde edilen sinyal ise aşağıdaki gibidir:

$$Y_{RD}[n] = \sqrt{\rho} H_{RD}[n] s_R[n] + W_{RD}[n], \quad (3)$$

burada $H_{RD}[n]$ ve $W_{RD}[n]$ sırasıyla R - D arasındaki bağlantıların kanal kazancı ve R - D 'nin AWGN elemanını belirtmektedir. Hedef düğüme kaynak düğümden gelen işaretler aşağıdaki gibidir:

$$Y_{S_1 D}^i[n] = \sqrt{\rho} H_{S_1 D}^i[n] s_{1,i}[n] + W_{S_1 D}^i[n], \quad (4)$$

$$Y_{S_2 D}[n] = \sqrt{\rho} H_{S_2 D}[n] s_2[n] + W_{S_2 D}[n], \quad (5)$$

burada ise $W_{S_1 D}^i$ ve $W_{S_2 D}$, sırasıyla S_1 - D and S_2 - D arasındaki AWGN'yi tanımlamaktadır. Tüm AWGN elemanları için $N(0, 1)$ geçerlidir. İşaret-gürültü oranı ise $E_b/N_0 = \rho$ şeklinde tanımlanmıştır. Sistemin toplam iletim matrisi:

$$\mathbf{Z} = \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} \right)^T \quad (6)$$

$\mathbf{Z}$ matrisinin ilk üç satırı S_1 , S_2 and D arasındaki direkt bağlantıları göstermektedir. D 'deki algılama en büyük olabilirlik kuralına göre yapılmaktadır [10].

DF şemasında, röle düğüm $s_{1,1}[n]$, $s_{1,2}[n]$, and $s_2[n]$ işaretlerini 3 ardışık zaman sırasında iletir. Bu yüzden DF iletimi için toplam 6 T_s süre gerekmesine karşın NCC ile iletimde toplam 4 T_s süre yeterlidir. Buradan da toplam iletim zamanının NCC kullanılarak % 33.33 azaldığı görülmektedir. Bu yüzden NCC kullanımı ile hem enerji hem de band genişliği kullanımında daha büyük verim elde edilebilir.

4. Test Kurulumu

4.1. Donanım ve Yazılım Elemanları

Testin gerçekleştirilmesi esnasında Şekil 3'te görüldüğü gibi 2 kaynak ve 1 hedef düğümü için NI USRP 2921 radyoları kullanılırken, röle düğüm için NI PXIe-1082 adlı cihaz kullanılmıştır. NI USRP 2921 2.4-2.5 ve 4.9-5.9 GHz arasında çalışan bir SDR'dır. NI PXIe-1082'nin içindeki röle düğüm olarak kullanılan NI PXIe-5644R ise 65 MHz ile 6 GHz arasında çalışmaktadır. Sistem parametreleri Çizelge 1'deki gibidir.

DTN'de ve OFDM sistemlerde zaman senkronizasyonu sorunu en önemli problemlerden biridir [11], bunun için

gürültülü bir ortam yaratabilmek için röle ve hedef düğümün alıcısının VI'ında MT Add AWGN VI'ı kullanılmıştır. Ortalaması sıfır olan kompleks AWGN üreten bu VI bu AWGN'yi kompleks anabanta ekler. Bu VI kompleks dalga, sembol başına örnek sayısı, sembol başına bit sayısı ve işaret gürültü oranı, E_b/N_0 (signal to noise ratio, SNR) parametrelerini giriş olarak alabilmektedir. Giren dalganın gücünün hesaplanmasından sonra diğer parametrelerle beraber istenen E_b/N_0 oranına göre AWGN hesaplanır. Yapılan deneylerde ise E_b/N_0 oranı 15 dB ve 30 dB olacak şekilde 2 farklı seviyede AWGN değerleri kullanılmıştır.

Röle düğüm olarak NI PXIe-5644R VST kullanılan deneyde, VST, işaret üretimi ve alımında görevli RFSG VI ve RFSA VI'nın kullanılmasını sağlar. RFSA VI işlemlerin başlatılıp bitirilmesini ve parametreleri kontrol eder. CFO VI ise alınan verideki bozucu etkileri ortadan kaldırarak taşıyıcı frekans dengelemesini sağlar. Daha sonra FFT VI ile birlikte FFT gerçekleştirilir. Sıfır dolgulama alt taşıyıcıları da veriden çıkarıldıktan sonra referans ve bilgi içeren alt taşıyıcılar ayrılır. Çeşitli VI'lar ile kanal bozulmaları da en aza indirildikten sonra röle düğümün alıcı kısmının VI'ı tamamlanmıştır. Ağ Kodlama VI'ı kullanılarak kaynaklardan gelen verilere NC uygulanmıştır. Röle düğümün iletim kısmının iç yapısı ise kaynak düğümdekilerle aynı olmak üzere bunlara ek olarak RFSG VI iletim parametrelerinin konfigürasyonu ve süreçteki işlemler için de kullanılır. Daha sonra sıfır dolgulama ve IFFT'nin uygulanmasıyla referans sembolleriyle birleştirilmiş olan ağ kodlamalı veri sayesinde OFDM yapısı oluşmuştur. Dfgüsel ön ekin de eklenmesiyle röle düğümün VI' ı bitirilmiştir.

Hedef düğümdeki VI için ise röle düğümdeki alıcı kısmına benzer şekilde RFSA VI yerine USRP VI kullanılmıştır. CFO kestiriliş döngüsel ön ekle beraber çıkarıldıktan sonra FFT uygulanır. Sıfır dolgulamanın da çıkarılması ile kalan referans sembollerindeki veri de çözümlendikten sonra ağ kodlu bilgiyi elde etmek için kanal kestirimi ve eşitlemesi yapılır. Son olarak maksimum olabilirlik kestirimi yapıldıktan sonra ağ çözümleme kodlanmış veriye uygulanarak veri elde edilmiş olur.

5. Test Sonuçları

LabVIEW programı kullanılarak hem direkt hem de DF ve NCC bağlantıların bit hata oranı (Bit Error Rate, BER) değerleri hesaplanmıştır. Farklı ortamlarda sistemin nasıl çalıştığını görmek amacıyla da AWGN değiştirilerek 15 dB ve 30 dB'lik E_b/N_0 , SNR, uygulanmıştır. Testler sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. Bu çizelgedeki değerlere bakıldığında açık olarak görülmektedir ki düşük E_b/N_0 sinyal-gürültü oranında direkt bağlantının BER değeri yüksektir, yani iletim performansı düşük gürültüye oranla daha kötüdür. Örneğin S_1 düğümünün direkt bağlantısında E_b/N_0 15 dB'den 30 dB'ye çıkarıldığında BER değeri direkt bağlantıda 0.333'ten 0.264'e düşer. Aynı durum S_2 düğümü ve NCC bağlantılar için de geçerlidir. Direkt bağlantının DF ve NCC bağlantılara göre daha yüksek bir BER değerinin olduğu görülmektedir. Örneğin S_2 düğümünün $E_b/N_0=15$ dB olduğu direkt bağlantısında BER 0.277 iken NCC'de bu değer 0.012'dir. Buna paralel olarak, aynı E_b/N_0 değerinde direkt bağlantının BER değeri 0.277 iken DF bağlantının değeri 0.015'tir. Gürültü düşürüldüğünde DF bağlantılar NCC bağlantılara göre daha iyi bir performans göstermektedir. DF bağlantılarda E_b/N_0 oranı S_1 düğümü için 15 dB'den 30 dB'ye çıkarıldığı zaman BER değeri 0.016'dan 0.001'e düşerken S_2 düğümü için 0.015'ten 0'a düşmüştür. Ancak NCC için bu duruma bakılırsa değerlerin ya çok az değiştiği ya da hiç değişmediği görülmektedir. Örneğin NCC bağlan-

Çizelge 2. Farklı E_b/N_0 seviyelerinde BER değerleri.

	E_b/N_0	S_1	S_2
Direkt Bağlantı	15 dB	0.333	0.277
DF Bağlantı		0.016	0.015
NCC Bağlantı		0.014	0.012
Direkt Bağlantı	30 dB	0.264	0.21
DF Bağlantı		0.001	0
NCC Bağlantı		0.01	0.008

tılı S_1 düğümü için BER değeri E_b/N_0 oranı 15 dB'de iken 0.014'teyken 30 dB için 0.01, S_2 düğümü için de iki gürültü seviyesinde de 0.012 olarak ölçülmüştür. Bu ölçümlere göre NCC bağlantılar yüksek gürültüde DF bağlantılara göre daha iyi bir performans göstermektedir. 15 dB'de S_2 düğümü için DF bağlantının BER değeri 0.015 iken NCC bağlantının BER değeri 0.012'dir.

Bu çizelgeden çıkarılan diğer bir sonuç ise direkt bağlantıların BER başarımıyla ilgilidir. Kanalin anlık olarak değişmesinden dolayı direkt bağlantıların BER sonuçları DF ve NCC sistemlerinde farklıdır. Gerçekleme çalışmalarında, benzetim ortamındaki test sayısı kadar test yapmanın mümkün olmaması nedeniyle ortalama değerler benzer olarak elde edilmiştir.

6. Sonuçlar

Bütün bu ölçümlere dayanarak DF bağlantının ve NCC bağlantının direkt bağlantıya oranla çok daha verimli oldukları açıkça söylenebilir. Her ne kadar düşük gürültüde DF bağlantının NCC'ye göre daha iyi performans gösterdiği gözükse de, yüksek gürültüde NCC daha iyi bir performans gösterir. Ayrıca NCC iletim süresi oldukça düşüktür. Bu yüzden hem düşük E_b/N_0 oranlı ortamlarda hem de gecikmelere karşı dayanıklılığı ile en önemli sistemlerdendir. Aynı zamanda DF metodu kullanıldığında 6 sembolle iletilen bilgi NCC metoduyla 4 sembolle iletilmektedir. Bütün bu performanslar birleştirildiğinde NCC metodunun DF metoduna kıyasla enerji ve spektrum verimliliğinin % 33 daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca görülmüştür ki enerji tüketimi açısından NCC metodu DF metoduna göre çok daha verimlidir.

7. Kaynaklar

- [1] Laneman, J.N. ve Tse, D.N.C. ve Wornell, G. W., "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior", *IEEE Trans. Inf. Theory*, sf: 3062-3080, 2004.
- [2] Erkip, E. ve Sendonaris, A. ve Stefanov, A. ve Aazhang, B., "Cooperative communication in wireless systems", *DI-MACS ser. discret. m.*, cilt no. 50, sf: 303-320, 2004.
- [3] Wood, L., "Assessing and improving an approach to delay-tolerant networking", arXiv preprint arXiv:1204.3264, 2012.
- [4] Fall, K., "A delay-tolerant network architecture for challenged internets", Proc. ACM conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications, 2003, sf: 27-34.
- [5] Warthman, F., "Delay-and Disruption-Tolerant Networks (DTNs)", *A Tutorial. V. 0, Interplanetary Internet Special Interest Group*, 2012.

- [6] Rumpold, A., "Transmission Protocols for Delay-Tolerant Networks", *Network*, cilt no. 137, 2011.
- [7] Ntareme, H. ve Zennaro, M. ve Pehrson, B., "Delay tolerant network on smartphones: applications for communication challenged areas", *The Amazon Expedition Proceedings of the 3rd Extreme Conference on Communication*, 2011, sf: 14.
- [8] Mukherjee, J. ve Ramamurthy, B., "Communication Technologies and Architectures for Space Network and Interplanetary Internet", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, cilt no. 15, sf: 881-897, 2013.
- [9] Zhang, Q. ve Jin, Z. ve Zhang, Z. ve Shu, Y., "Network coding for applications in the delay tolerant network (DTN)", *Proc. International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks (MSN)*, 2009, sf: 376-380.
- [10] Di Renzo, M. ve Iezzi, M. ve Graziosi, F., "On Diversity Order and Coding Gain of Multisource Multirelay Cooperative Wireless Networks With Binary Network Coding", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, cilt no. 62, sf: 1138-1157, 2013.
- [11] Choi, B.J. ve Shen, X., "Distributed clock synchronization in delay tolerant networks", *Proc. IEEE ICC*, 2010, sf: 1-6.