

UYDU AĞLARI YÖNLENDİRME PROTOKOLLERİ: PROBLEMLER VE SUNULAN BAZI ÇÖZÜMLER

Suzan Bayhan ve Fatih Alagöz

Boğaziçi Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
Uydu Araştırmaları Laboratuvarı (SATLAB)

bayhan@boun.edu.tr, alagoz@boun.edu.tr

ÖZET

Uydu ağları geniş kapsama alanları, çokla gönderim, tüme gönderim, sürekli hizmet sağlama özellikleri ve özellikle afet sonrası iletişimdeki önemlerinden dolayı yaygınlığı artan yeni nesil iletişim teknolojilerindedir. Bu çalışmada, öncelikle uydu ağlarının temel özellikleri hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra uydu mimarileri, dinamik bir topolojiye sahip olan uydu ağlarındaki yönlendirme mekanizmaları, karşılaşılan problemler ve önerilen çözümlerden bahsedilecektir.

Anahtar Kelimeler: Uydu ağları, yönlendirme protokolleri, çok-katmanlı mimari.

ABSTRACT

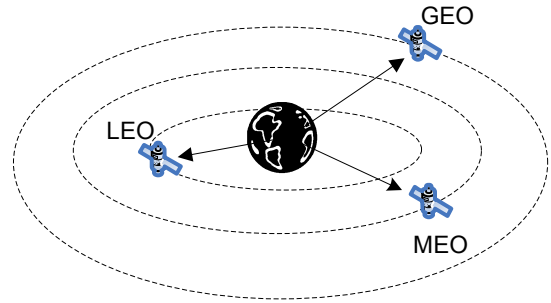
Satellite networks have become popular due to their wide coverage, multicast and broadcast capability, ubiquitous service concept and especially for their importance in post-disaster communications. In this study, first we will provide general information on satellite networks, then satellite network architectures, routing issues in these networks due to dynamic behavior of satellites, and some proposed solutions will be discussed.

Keywords: Satellite networks, routing protocols, multi-layered architecture.

1. GİRİŞ

Uyduların iletişimde kullanılma fikri ilk olarak İngiliz bilimkurgu yazarı Arthur C. Clarke tarafından ifade edilmiştir. Clarke 1945'te *Wireless World* Dergisi'nde [1] yazdığı bir makalede Dünya'dan 35786 km uzaklıktaki bir yörüngede uyduların konumlandırılabilirliği ve sinyallerin bu uydular üzerinden iletebileceğini belirtmiştir. Bu fikir pek çok araştırmacı ve bilim insanının ufkunu açarak günümüz uydu teknolojilerinin geliştirilmesi için bir başlangıç oluşturmuştur. Günümüzde uydular aracılığı ile sesli iletişim, faks, meteoroloji araştırmaları, uzaktan algılama ve internet erişimi gibi çok çeşitli hizmetler sağlanmaktadır. Uydu ağları, karasal sistemlerden bağımsız olabildiklerinden, özellikle hiç bir alt yapının kalmadığı deprem gibi doğal afetler sonrasında daha büyük bir öneme sahiptir. Ayrıca, karasal hatlar gibi kurulum zorlukları ile karşılaşmadığından, özellikle ağ altyapısının zayıf olduğu Hindistan, Çin ve Brezilya gibi "gelişmekte olan" ülkelerde uydu kullanım oranı yüksektir.

Bu çalışmanın ilk kısmında uydu ağları hakkında genel bilgiler verilecektir. Bölüm 3'te çok katmanlı uydu mimarilerinden bahsedilirken, Bölüm 4'te uydular için tasarlanmış



Şekil 1: Alçak Yörünge (LEO), Orta Yörünge (MEO) ve Yerdurağan Yörünge (GEO) Uyduları

yönlendirme mekanizmalarından ve karşılaşılan problemlerden bahsedilecektir. Ayrıca bu bölümde, daha önce yapılan çalışmaların kısa bir özeti sunulacaktır. 5. Bölümde ise, son olarak genel bir değerlendirme yapılacaktır.

2. UYDU AĞLARI

Uydular, yörüngelerinin şekillerine, ağırlıklarına, sağladıkları hizmetlere ve benzeri pek çok kritere göre sınıflandırılabilir. Yaygın olarak kullanılan bir sınıflandırma türü ise yeryüzünden olan yüksekliklerine göredir; yeryüzüne en yakın olan Alçak Yörünge Uyduları (Low Earth Orbit - LEO), Orta Yörünge Uyduları (Medium Earth Orbit - MEO) ve Yerdurağan Yörünge Uyduları (Geostationary Earth Orbit - GEO). LEO ve MEO uydularına aynı zamanda Yerdurağan Olmayan Uydular (Non-Geostationary, NGE0) da denilmektedir. Uyduların özellikleri Tablo 1'de özetlenmiş ve yörüngeler Şekil 1'de gösterilmiştir.

2.1. Alçak Yörünge Uyduları (Low Earth Orbit - LEO)

Yeryüzünden 200-3000 km yükseklikte konumlanmışlardır. Kapsama alanları dardır, o nedenle evrensel hizmet sağlanabilmesi için çok sayıda LEO uydu kullanılmalıdır. (Iridium 66, Teledesic 288 uydu içerir). Atmosfer etkilerine maruz kaldıklarından ömürleri kısadır. Yörüngede kalabilmek için Newton Hareket yasalarına göre oldukça hızlı hareket ederler. Bu nedenle kapsama alanları 10-15 dakika içinde değişir. Hareketliliklerinden dolayı sıklıkla eldeğiştirme yaşanabilir.

Tablo 1: LEO, MEO ve GEO uyduların özelliklerinin karşılaştırılması

Özellikler	LEO	MEO	GEO
Yükseklik (km)	200-3000	5000-13000	36000
Kapsama Alanı(km)	Dar	Orta	Geniş
Gecikme (ms)	10-20	80-100	270
Yol kaybı	Az	Orta	Çok
Hareketlilik	Çok	Orta	Sabit
Ağ karmaşıklığı	Karmaşık	Orta	Az

2.2. Orta Yörünge Uyduları (Medium Earth Orbit- MEO)

5000-13000 km yükseklikte bulunan uydulardır.

2.3. Yerdurağan Yörünge Uyduları (Geostationary Earth Orbit-GEO)

Yeryüzünden yaklaşık 36000 km yükseklikte Ekvator düzleminde olan uydulardır. Dönme periyotları Dünya'nın dönüş periyoduna eşittir ve dolayısı ile yeryüzündeki bir gözlemciye göre durağan olduklarından bu isim verilmiştir.

Kapsama alanları neredeyse tüm dünyanın %40ı olmak üzere oldukça geniştir. Yere göre sabit olmaları nedeni ile çeşitli hizmetler için oldukça elverişlidir. Kutup bölgeleri GEO uydular tarafından kapsamaz, ancak bu kısımda nüfus yok denecek kadar az olduğu düşünüldüğünde çok da büyük bir dezavantaj değildir. Ayrıca, sadece 3 GEO uydusu ile evrensel hizmet sağlanabildiğinden sistem karmaşıklığı az ve dolayısı ile ağın yönetimi kolaydır. Ancak 36000 km gibi bir yükseklik söz konusu olduğundan, sinyaller yüksek gecikme ve yol kaybına uğrarlar. Yüksek gecikme değerleri, gecikmeye duyarlı uygulamalar için GEO uyduları elverişsiz kılar. Gecikme değeri Formül 1 ile hesaplanır ve bu değer, formülden de anlaşıldığı gibi h ile gösterilen uydunun yerden yüksekliğinin ışık hızına (c) bölümü ile bulunur.

$$Gecikme = \frac{h}{c} \quad (1)$$

Ayrıca uydular, işlem kapasitelerine göre araç-üstünde işlem yapabilen (on-board processing, OBP) ve yapamayan uydular olmak üzere ikiye ayrılırlar. Eski nesil uyduların araç-üstü işleme özellikleri bulunmamaktadır ve gökyüzündeki tekrarlayıcılar olarak görev yaparlar. Bu uydular "kırık boru" (bent-pipe) olarak adlandırılırlar. Bu tip uydular, kullanıcı hattından (uplink) gelen sinyali yükseltirler, aşağı hat frekansına module ederler ve bu hat üzerinden gönderirler. Yeni nesil uydular ise, daha karmaşık yapıdadır ve frekanslar arasında geçiş, uzayda yönlendirme yapabilme ve sinyalin yeniden üretimi gibi daha pek çok fonksiyona sahiptir. Uzayda yönlendirme yapabilme yetenekleri ile "gökyüzündeki ağ" fikrini oluşturmuşlardır.

3. ÇOK KATMANLI MİMARİ

Şu an hizmet sağlayan uydu sistemlerinin hepsi sadece bir çeşit uydudan oluşmaktadır, mesela Iridium Satellite LLC'ye ait olan Iridium sisteminde 66 tane LEO uydu bulunmaktadır. Bir MEO uydu sistemi olan ICO sisteminde ise 10 tane MEO uydu bulunmaktadır. Çok katmanlı bir sistem, farklı yörüngelerden (LEO, MEO, GEO gibi) uydulardan oluşur. Ayrıca stratosferde 17-22 km yükseklikte bulunan Yüksek Platform (High Altitude Platform, HAP) adı verilen hava araçları da böyle bir mimaride yer alabilir. Özellikle konserler, festivaller veya acil durumlar gibi geçici trafik ihtiyaçlarının olduğu alanlarda HAP'ların kullanılması oldukça elverişlidir. Çok katmanlı mimarilerin yola çıkış noktası, her uydu çeşidinin belli bir uygulama tipi için daha uygun olmasıdır. O nedenle, bir uydu ağında farklı sınıftan uydular kullanılarak gelen uygulamanın türüne göre o uydu katmanı üzerinden hizmet sağlanabilir. Şekil 3'de iki katmanlı bir uydu ağı görülmektedir. Bu fikir ilk kez 2000 yılında Lee ve Kang tarafından belirtilmiştir [2]. Lee ve arkadaşlarının "Uydu üzerinde Uydu" adını verdikleri bu mimaride, üst katmanda MEO uydular, alt katmanda LEO uydular olmak üzere iki katman bulunmaktadır. Katmanlar arasında ve aynı katmandaki uydular arasında iletişim hatları bulunmaktadır. Farklı yörüngeler arasındaki hatta *Yörüngeler Arası Bağ* (Inter-orbital Link, IOL), aynı yörüngedeki uydular arasındaki hatta ise *Uydular Arası Bağ* (Inter-satellite Link, ISL) denilmektedir. Uydular "düzlem" adı verilen aynı yükseklikte farklı yörüngelerde yerleştirilmişlerdir. Uydular arası bağ da *düzlem içi* ve *düzlemler arası* olmak üzere iki çeşittir ve bu uzunluklar Formül 2 ve 3 ile hesaplanabilir. Aynı düzlemde bulunan iki uydu arasındaki uzaklık d_{ISL} sabittir. Ancak düzlemler arasındaki bağ uzunlukları D_{ISL} zamanla uyduların buldukları enlemlere (θ) göre değişir. Örneğin kutuplara doğru gidildikçe uzaklık azalırken, ekvator da büyük değerine ulaşır. Formüllerde bulunan R ve h , sırası ile Dünya'nın yarıçapı ve uydunun yerden olan yüksekliğidir. Ayrıca, N sistemdeki toplam uydu sayısını ifade ederken n toplam düzlem sayısını gösterir. Örneğin Iridium uydu sisteminde toplam $N=66$ uydu $n=6$ düzlemde bulunmaktadır.

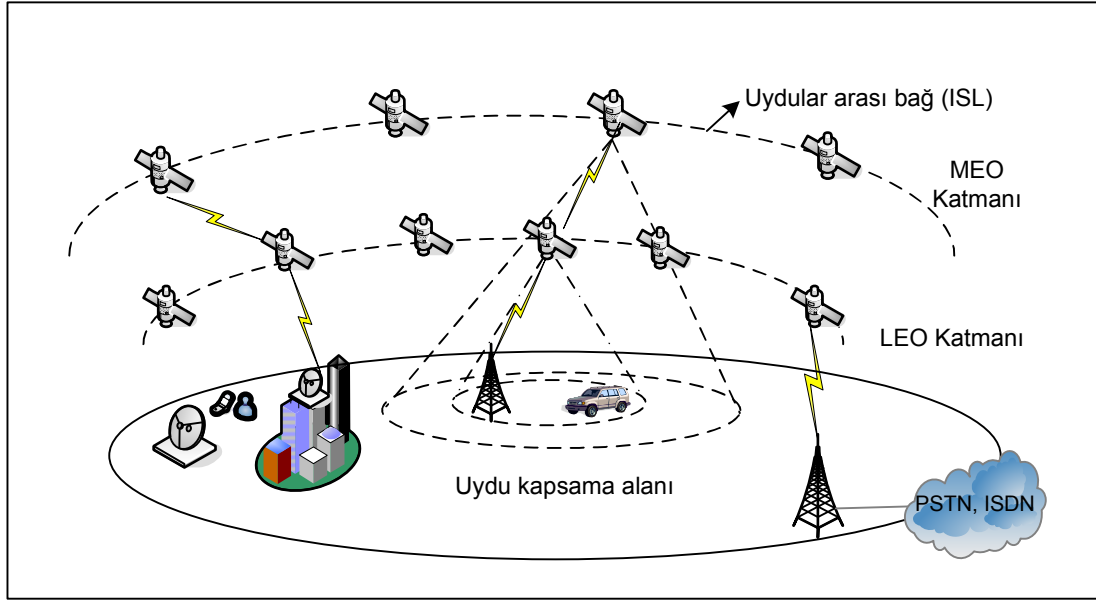
$$d_{ISL} = \sqrt{2}(R+h)\sqrt{1 - \cos\left(\frac{360}{N/n}\right)} \quad (2)$$

$$D_{ISL} = \sqrt{2}(R+h)\sqrt{1 - \cos\left(\frac{360}{N/n}\right)} \times \cos(\theta) \quad (3)$$

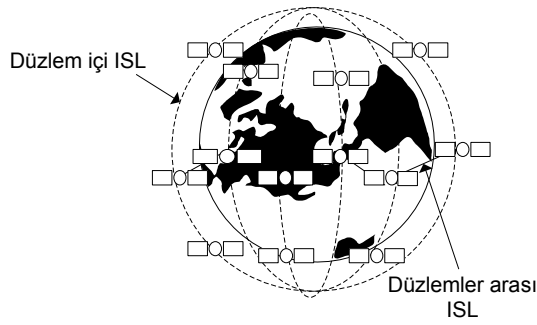
Lee ve Kang'ın çalışmasında yapılan benzetimler ile iki katmanlı bir sistemin evrensel kapsama sağlamak için kaç tane LEO ve MEO uyduya ihtiyaç duyacağı tespit edilmiş ve çok katmanlı mimarinin uygulama başarımı açısından daha başarılı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Bu konuda diğer çalışmalara [4], [5] ve [6]'dan ulaşılabılır.

4. YÖNLENDİRME PROTOKOLLERİ

NGEO uydu sistemleri yere göre hareketli olduklarından ağ topolojisi dinamik bir yapıya sahiptir. Uyduların konumları sürekli değişmekte ve dolayısı ile hizmet sağladıkları alan da değişmektedir. Dünya üzerindeki trafiğin düzgün bir şekilde



Şekil 3: Çok katmanlı uydu sistemine bir örnek



Şekil 2: Uydular arasındaki bağlar: düzlem içi bağlar ve düzlemler arası bağlar

dağılmamış olması bazı uydular üzerindeki yükün fazla olmasına neden olurken, trafiğin daha az yoğun olduğu alanlarda uyduların kullanımı oldukça düşüktür. Bu nedenle bazı uydu bağlarında sıkışma yaşanabilir. Bu da başarımın belirgin şekilde düşmesine neden olur. Sıkışmayı önlemek için bağlar üzerinde yük dağılımının yapılması gerekmektedir. Ancak, karasal ağlar için tasarlanmış yönlendirme mekanizmaları yüksek gecikme ve yüksek bantgenişliği özellikleri olan uydu ağları için elverişli değildir. Ağın dinamikliğini göz önünde bulunduran, Dünya üzerindeki yük dağılımını dikkate alan, ağın durumuna göre çalışma mekanizmasını uyarlayabilecek kısacası "uydu dostu" yönlendirme protokollerinin geliştirilmesi gerekmektedir [3].

Sıkışıklığın önlenmesi, bulunması ve yük dağılımı konuları [7, 8, 9, 10] nolu kaynaklarda tartışılmış ve çeşitli çözümler sunulmuştur. [7]'de gerçek zamanlı trafik bilgisine göre trafik sıkışıklığını önleyecek bir mekanizma önerilmiştir. Açık Yük Dengeleme olarak adlandırılan ELB mekanizmasında (Explicit Load Balancing), uydular kuyruk uzunluklarını devamlı kontrol ederek kuyruk durumunu belirlerler. Kuyruk boş, neredeyse

meşgul ve meşgul olmak üzere üç durumda olabilir. Eğer Q_r ile gösterilen kuyruk doluluk oranı daha önceden belirlenen α eşik değerinden düşük ise durum boş, iki eşik değeri arasında ise neredeyse meşgul, son olarak ikinci eşik olan β değerinden büyük ise meşgul olarak hafızada saklanır. Uyduların durum değişiklikleri komşu uydulara Durum Bildirimi (Self-State Advertisement) paketleri ile bildirilir. Böylece komşu uydular, komşularının durumlarını sakladıkları Komşu Durum Listelerini (Neighbors Status Lists, NSL) güncellerler. Meşgul bir uydu ve komşuları arasındaki bağın fiyatı artırılır ve bu sayede gelen trafik daha ucuz olan yani daha az dolu olan diğer yollardan gönderilir. Dolayısı ile, meşgul durumda olan uydunun durumu bir süre sonra boş duruma geçecektir. Bu mekanizmadaki temel mantık, bir uydunun paket kaybına ve aşırı gecikmeye yol açacak sıkışıklık oluşmasına izin vermeden bir önlem almaktır. Çok katmanlı uydu ağlarında yönlendirme tablolarının güncellenmesi, genellikle daha çok bilgiye sahip olan ve "sistemin gözü" adı verilen üst katman tarafından yapılır. Örneğin, [6]'da Uydu Gruplandırma ve Yönlendirme Protokolü (Satellite Grouping and Routing Protocol, SGRP) LEO ve MEO katmanlarından oluşan iki katmanlı bir uydu sistemi için tasarlanmış protokoldür. Bu protokolda, MEO uydular, kapsamı alanlarına giren LEO uydulardan biri komşularına olan uzaklıkları olmak üzere çeşitli bilgiler olarak yönlendirme tablosunun hazırlanmasını sağlar. Oluşturulan tablolar daha sonra MEOlar tarafından, yine kapsamı alanlarındaki LEO uydulara dağıtılır.

Daha önce de belirtildiği gibi, N GEO sistemler uyduların hareketliliklerinden dolayı dinamik bir topolojiye sahiptir. Ancak bu hareketlilik, rastgele bir hareketlilik değildir. Uydular, beklenmedik bir problem olmadığı sürece daha önceden belirlenen bir yörüngede hareket eder. Uydu "uydu takvimi" adı da verilen bir planı izler. Bu periyodik hareket, uyduların konumunun belirlenmesi ve çeşitli güncellemelerinin yapılması açısından büyük kolaylık sağlar. Yer istasyonları ya da Ağ

Konrol Merkezleri tarafından bu bilgiler uydulara aktarılabilir. Çalışmaların pek çoğunda, uydunun periyodu belirli zaman aralıklarına bölünür ve her zaman aralığı başında yönlendirme tablolarının güncellenmesi sağlanır. Böylece problem, küçük zaman aralıklarında uydu durum kontrolünün yapılması olan daha küçük alt problemlere bölünür. “Sanal düğüm” (Virtual Node, VN) adı verilen bir yaklaşım ile [13], uyduların pozisyonları uzayda sabit olarak kabul edilir. Ancak belirli bir süre sonra o noktaya başka bir uydu gelir. Her zaman aralığı başında uyduların yerleri değiştiğinden kapsama alanları güncellenir, ve yönlendirme tabloları yeniden belirlenir. Her uydu kendine komşu olan uydularla arasındaki bağın gecikmesini belirler. Bir bağın gecikmesi yayılım gecikmesi (t_y) ve bekleme gecikmesi (t_q) olmak üzere iki değerden oluşur.

Bir düğümde oluşacak tahmini bekleme gecikmesi, o uydunun komşu uydulara olan bağlarındaki kuyruktaki eleman sayısına göre tahmin edilebilir. Bu değer Formül 4 ile hesaplanır. L_{av} ortalama paket uzunluğunu, C bağın kapasitesini, ve $N_q(t)$ t anında sıradaki paket sayısını gösterir. İki uydu arasındaki bağın toplam gecikmesi ise $t_{link}(L)$ Formül (5) ile hesaplanır.

$$t_q(\mathbf{L}) = N_q(t) \times \frac{L_{av}}{C} \quad (4)$$

$$t_{link}(\mathbf{L}) = t_y(L) + t_q(L) \quad (5)$$

Bundan on sene öncesine kadar kısıtlı sayıda uygulama mümkünken gelişen teknoloji ile pek çok uygulama (çokluortam uygulamaları vs.) hayal olmaktan çıktı. Her uygulama doğası gereği (e-mail sisteminde saniyelik gecikmeler tolere edilebilirken, telefon görüşmelerinde aynı değerlerin iletişimi imkansız kılması gibi) farklı duyarlılıklara sahiptir. Kullanıcılara kabul edilebilir kalitede hizmet sağlanabilmesi açısından bu uygulamaların bir şekilde sınıflandırılması gerekmektedir. Üçüncü Nesil Ortaklık Projesi’ne (3GPP) göre uygulamalar gecikme, gecikmedeki değişim ve paket kaybına olan duyarlılıklarına göre dört gruba ayrılırlar. Bu gruplar, *diyalog (conversational)*, *kesintisiz iletim (streaming)*, *etkileşimli (interactive)* ve *arkaplan (background)* trafiğidir. Diyalog sınıfındaki uygulamalar, internet protokolü üzerinden ses aktarımı (VoIP) uygulamaları gibi uçtan uca gecikmeye ve gecikmedeki değişime oldukça duyarlıdır. Arkaplan trafiği ise gecikmeye duyarlılığı az iken paket kaybına daha duyarlıdır. Uygulamaların farklı gereksinimlerinden dolayı, bu farklılıkları göz önünde bulunduracak yönlendirme protokolleri istenilen servis kalitesinin sağlanması için büyük bir öneme sahiptir. [12]’te trafik sınıfları, uygulamaların tolere edebileceği maksimum gecikme değerlerine göre yapılmıştır. Gecikmeye duyarlı trafik diğer trafik çeşitlerine göre (mesela daha fazla bant genişliği ayrılarak) daha önceliklidir. Kaynak [11]’de tanımlanan “Servis Kalitesi için Uyarlamalı Yönlendirme Protokolü” (Adaptive Routing Protocol for Quality-of-Service, ARPQ) çalışmamızda araç-üstü işleme yapabilen bir uydu sisteminde, uydu işlemcisi paketleri işlerken “önce gelen önce servis alır” mekanizmasını değil de gerçek-zamanlı uygulama sınıfında olan ses paketlerine öncelik vermektedir. Ses paketlerinin tamamen ayrıcalıklı işlenmesi, yani ses paketlerinin her zaman sistemde arkaplan paketlerinden önce işlenmesi katı bir zamanlama mekanizması iken ses paketlerine görece olarak daha ayrıcalıklı hizmet sağlamak her iki trafik gereksinimlerine cevap vermek açısından daha etkilidir. Bu çalışmanın

ayrıntılına ve benzetim çalışması sonuçlarına [11] nolu kaynaktan ulaşılabilir.

Tasarlanan sistemlerin modellenmesi ve çeşitli başarımların analizlerinin yapılabilmesi için benzetim araçlarına ihtiyaç vardır. Benzetim çalışmaları, bu alanda yapılan araştırmalarda çoğunlukla OPNET [14] ve NS-2 [15] simülatörleri üzerinde yapılmaktadır. Açık kaynak kodlu olan Network Simulator (NS) GNU GPLv2 lisanslıdır ve bilimsel araştırma, geliştirme çalışmaları için kullanılabilir. Şu an NS-3 versiyonu üzerinde çalışmalar devam etmektedir. OPNET ise açık kaynak kodlu olmamakla birlikte, araştırmacıların rahatlıkla kullanabileceği pekçok ticari (Cisco, HP, IBM, Intel gibi) ağ aygıt modellerinin tanımlandığı, Proto-C adı da verilen C benzeri bir programlama dili ile modellemelerin yapılabilmesi benzetim aracıdır.

5. Sonuç

Bu çalışmada, öncelikle uydu ağları hakkında genel bilgiler verilmiş ve uydu ağlarındaki yönlendirme protokolleri hakkında yapılan çalışmalar incelenmiştir. Çalışmalara bakıldığında uydu ağlarının dinamik yapısından kaynaklı uydu dostu yönlendirme protokollerinin tasarlanması ve geliştirilmesi gerektiği görülmüştür.

6. Teşekkür

Bu makale Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) K120250 nolu “Yeni Nesil Uydu Ağları ve Uygulamaları Projesi” kapsamında yazılmıştır.

7. Kaynaklar

- [1] <http://www.lsi.usp.br/rbianchi/clarke>.
- [2] Lee J, Kang S. Satellite over Satellite (SOS) network: a novel architecture for satellite network. Proc. IEEE INFOCOM, March 2000; 1:315–321.
- [3] Henderson TR. Networking over next-generation satellite systems, Ph.D. dissertation, University of California at Berkeley, Fall 1991.
- [4] Dash D, Durrresi A, Jain R. Routing of VoIP traffic in multi-layered satellite networks. Proc. of Performance and Control of Next-Generation Communications Networks, Orlando, Florida, September 2003; 5344:65-75.
- [5] Chen C, Ekici E, Akyildiz IF. Satellite grouping and routing protocol for LEO/MEO satellite IP networks. Proc. of WoWMoM 2002, Atlanta, Georgia, September 2002; 109-116.
- [6] Ekici E, Akyildiz IF, Bender MD. Datagram routing protocol for LEO satellite networks. Proc. of INFOCOM, Tel Aviv, Israel, March 2000; 500-508.
- [7] Taleb T, Kato N, Nemoto Y. IP traffic load distribution in N GEO broadband satellite networks. Springer Lecture Notes in Computer Science(LNCS) 3733, October 2005; 113-123.
- [8] Nanba S, Konishi S, Nomoto S. Optimum traffic distribution algorithm for multiple-satellite systems under power constraints. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, April 2004; 22(3): 492-500.

- [9] Küçükateş R, Ersoy C. High performance routing in a LEO satellite network. Proc. of Eighth IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC) 2003, Antalya, Turkey; 1403-1408.
- [10] Jianjun B, Xicheng L, Zexin L, We P. Compact explicit multi-path routing for LEO satellite networks. Proc.of IEEE Wksp. High Perf. Switching and Routing, Hong Kong, P.R. China, May 2005.
- [11] Bayhan S, Gür G, Alagöz F. Adaptive Routing Protocol for QoS in Two-Layered Satellite IP Networks. Proc. of Second Workshop in Satellite and Space Communications (IWSSC), Madrid, Spain, September 2006.
- [12] McMahon G, Septiawan R, Sugden S. A multiservice traffic allocation model for LEO satellite communication networks. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, April 2004; 22(3):501-507.
- [13] Mauger R, Rosenberg C. QoS quarantees for multimedia services on a TDMA-based satellite network. IEEE Communications Magazine, July 1997; 35(7):56-65.
- [14] OPNET Technologies Inc. Bethesda, MD, U.S.A., <http://www.opnet.com>.
- [15] NS Network Simulator, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.