



Coverages stabilization of an inclined orbit communication satellite with two axis biases

İbrahim Öz*

Turksat Satellite Communication and Cable TV A.S. Cevizlidere Cad. No: 31, 06460, Çankaya, Ankara, Türkiye

Highlights:

- The new method proposed to stabilize the moving communication satellite coverages due to inclination
- Satellite antennas can be retargeted to initial boresight position by applying the roll and pitch biases
- The operator may provide new services via stabilized coverage of communication satellites

Keywords:

- Inclined communication satellite,
- Coverage movement,
- Roll and pitch bias,
- Boresight targeting,
- Coverage, footprint stabilization

Article Info:

Research Article

Received: 30.06.2021

Accepted: 27.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.960480

Correspondence:

Author: İbrahim Öz

e-mail: ioz@turksat.com.tr

phone: +90 312 925 2017

Graphical/Tabular Abstract

Coverage motion and roll and pitch biases of the FBESat1 satellite are shown in Figure A.

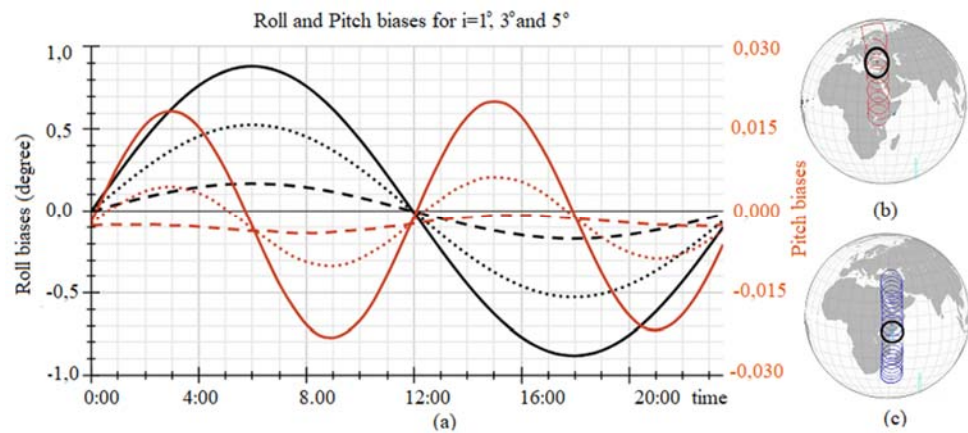


Figure A. a) The value of inclined satellite roll and pitch biases to stabilize the coverages. Solid line for $i=5^\circ$, dashed line for $i=3^\circ$, fine dashed line for $i=1^\circ$ b) Turkey coverage movement on the earth and stabilized position (bold circle) c) Equator coverage movement on the earth and stabilized position (bold circle)

Purpose:

This study aims to propose a new method to stabilize the coverage movement of a communication satellite to provide a stable signal by eliminating signal degradation due to coverage movement. The method proposed with the developed algorithm calculates the roll and pitch biases of a satellite and re-point the antenna to achieve the goal. The biases on a satellite attitude re-point satellite antenna to target boresight.

Theory and Methods:

The three-axis stabilized communication satellite's antenna moved boresight due to inclination can be retargeted to initial position by applying roll and pitch biases to a satellite body. Satellite roll and pitch biases can be implemented by onboard reaction wheels or thrusters the developed method calculates necessary roll and pitch bias' angles as a function of satellite orbital data, and inclination angle and re-points and stabilizes coverage movement due to inclination.

Results:

FBESat1 satellite's coverage movement and roll and pitch biases were evaluated for 1° , 3° , and 5° inclination values as shown in Figure A. FBESat1's coverage was stabilized by applying roll and pitch biases. Stabilized coverages are almost the same as zero inclination satellite coverages.

Conclusion:

In this work, coverage oscillation due to inclined satellite operation was stabilized successfully by applying roll and pitch angle biases to the satellite and pointing the coverage to a fully controlled geo communication coverage region. Consequently, a tracking ground station can receive and transmit stable signals without EIRP and G/T fluctuation due to coverage movement. The satellite operators can resolve the coverage movement issues of an inclined satellite with the proposed method. This stabilized coverage may provide new types of services to the customers.



Salınlı yörünge haberleşme uydularında 2 eksen düzeltmeli kapsama alanı stabilizasyonu

İbrahim Öz*^{ID}

Türksat Uydu Haberleşme ve Kablo TV A.Ş. Cevzlidere Cad. No: 31, 06460, Çankaya, Ankara, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Eğim nedeniyle hareketli iletişim uydularının kapsama alanını stabilize etmeyi öneren yeni yöntem
- Uydu antenleri, yuvarlanma ve eğim önyargıları uygulanarak ilk boresight konumuna yeniden hedeflenebilir
- Operatör, iletişim uydularının sabitlenmiş kapsama alanı aracılığıyla yeni hizmetler sağlayabilir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 30.06.2021

Kabul: 27.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.960480

Anahtar Kelimeler:

Salınlı yörünge haberleşme uyduları, kapsama alanı hareketi, yuvarlanma ve yunuslama açısı döndürme, yayın bölgesi hedefleme, kapsama alanı sabitleme

ÖZ

Uydu operatörleri haberleşme uydularının yörüngedeki işletme ömrünü uzatmak için eğim açısı kontrolünü serbest bırakmakta ancak bu durum beraberinde bazı sorunlar meydana getirmektedir. Bu sorunlardan birisi kapsama alanı salınlı ile hedef yayın bölgesi üzerindeki sinyal gücünün belirli zaman aralıklarında zayıflaması ve yayının kesilmesidir. Kapsama alanındaki bu salınlının etkisi yok edilirse veya makul seviyeye indirilirse sinyal gücü zayıflama ve yayın kesilme problemi giderilmiş olacaktır. Bu çalışmada önerilen yöntem ile uydu gövdesi yuvarlanma ve yunuslama açılarına uygulanan dönme açıları ile kapsama alanı tekrar hedef yayın noktasına sabitlenmektedir. Uydu gövdesine uygulanan dönme hareketi tepki tekerleri veya itki sistemi ile gerçekleştirilmekte ve hesaplanan açı değerleri zamanı gelince işletilmek üzere uyduya günlük veya haftalık olarak önceden yüklenmektedir. Böylece haberleşme uydusu kapsama alanı salınlımından kaynaklı yayın kesilmesi sorunu çözülmektedir. Bu çalışmada önerilen metot ile elde edilen değerler diğer sistemlerin değerleri ile uyumlu sonuçlar üretmektedir. Uydu operatörleri salınlı yörüngede işlettikleri uyduların yuvarlanma ve yunuslama açılarına uygulayacakları dönme ile kapsama alanını sabitleyerek sinyal değişimini en aza indirilebilir, uydu üzerinden sağlanan servislerde kesintisizliği artırılabilir ve yeni duruma göre müşterilerine ilave servisler sunma imkanı elde edebilir.

Coverages stabilization of an inclined orbit communication satellite with two axis biases

HIGHLIGHTS

- The new method proposed to stabilize the moving communication satellite coverages due to inclination
- Satellite antennas can be retargeted to initial boresight position by applying the roll and pitch biases
- The operator may provide new services via stabilized coverage of communication satellites

Article Info

Research Article

Received: 30.06.2021

Accepted: 27.01.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.960480

Keywords:

Inclined communication satellite, coverage movement, roll and pitch bias, boresight targeting, coverage footprint stabilization

ABSTRACT

The satellite operators extend the maneuver life of a communication satellite by utilizing inclined orbit operations; however, some problems appear due to an inclined operation. One of the problems of inclined operation is signal degradation, even service interruption over a part of coverage at a particular time interval. This inclined operation causes a communication satellite to oscillate in the north-south direction with increasing amplitude. The effect of coverage oscillation needs to be removed or mitigated to provide an uninterrupted communication channel. This work proposes to apply roll and pitch biases to an inclined satellite for the re-pointing of a boresight. The proposed method solves the signal degradation problem due to coverage oscillation of inclined operation. A coverage beam's stability performance of an inclined communication satellite provides almost a fully controlled communication satellite's coverage's stability performance by applying the proposed method. The reliability of the proposed method was verified with other systems. The verifications indicate that the results are close to each other. The satellite operators can stabilize the coverage movement and mitigate signal degradation using satellite roll and pitch biases and provide uninterrupted communication channels, have the possibility to offer new services to their customers.

1. Giriş (Introduction)

Haberleşme uyduları sabit duruyor gibi görünmekle birlikte, ayrıntılı bakıldığında, dünyanın düzgün olmayan çekim kuvveti, ayın ve güneşin çekim etkisi, güneş ışınlarının basıncı gibi dış kuvvetlerin etkisine maruz kalmaktadır. Bu kuvvetler uydunun yörüngesinde kısa dönemli ve uzun dönemli bozulmalara sebep olmakta ve uydunun yerleştirildiği yörüngeden başka yönlere doğru hareket etmektedir. Uydunun operatörleri bu bozucu etkileri düzeltmek için uydulara manevra yaptırmakta ve planlanan yörünge üzerinde uydunun sabit kalmasını sağlamaktadır. Bu manevralardan kuzey-güney manevrası eğim açısını, doğu-batı manevrası ise yörünge boylamındaki sapmayı düzeltmektedir [1]. Manevra operasyonları sırasında uydunun üzerinde bulunan ve uydunun ömrünü belirleyen birincil faktör olan yakıt kullanılmaktadır [2, 3]. Uydunun operatörleri manevra ömrü sonuna yaklaşan haberleşme uydularından daha uzun süre faydalanabilmek için bu uyduların salınımlı yörüngede işletmektedirler. Bu yörüngede işletilen uydunun kuzey-güney manevraları yapılmamakta sadece doğu-batı manevrası yapılmaktadır. Salınımlı yörünge de işletilen bir haberleşme uydusunun kuzey-güney manevrasının iptal edilmesi ile tam kontrollü haberleşme uydusuna göre 20-25 kat daha az yakıt tüketmektedir. Bu sayede yakıt bütçesi dikkati alındığında normal işletme koşullarında uydunun kalan 3-6 aylık ömrünün, 5 yıla kadar uzaması mümkün hale gelmektedir. Bu yöntem ile uydunun operatörleri az bir yakıt ile uyduyu uzun süre işletmekte, noktadan noktaya veri iletimi, kısa süreli canlı yayın geçişi gibi özel servisler sağlamakta veya yörünge haklarını korumaktadır [2]. Bir haberleşme uydusunun yörüngesi ile ekvator düzlemi arasındaki açı Şekil 1'de görüldüğü gibi eğim açısı olarak tanımlanmaktadır. Salınımlı yörüngede işletilmekte olan uydunun ekvator düzlemi ile olan açısı başlangıç zamanına bağlı olarak yıllık $0,756^\circ$ ile $0,952^\circ$ arasında artmakta ve doğal salınım olarak 15° ye kadar ulaşmaktadır [3].

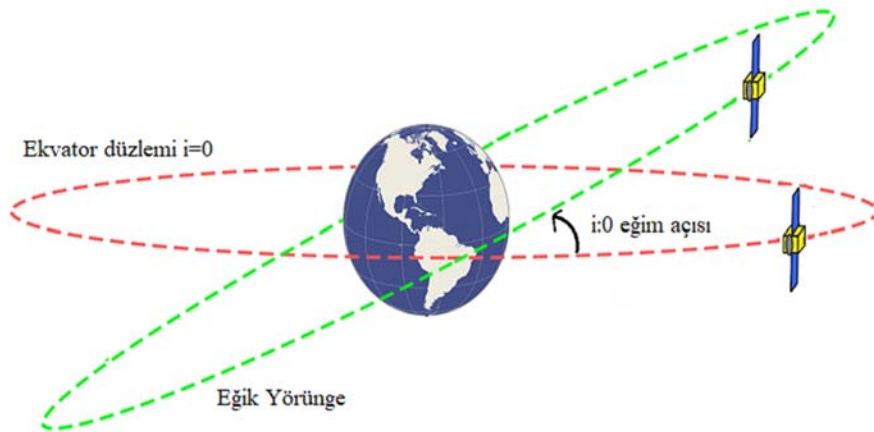
Salınımlı yörüngede işletilen haberleşme uydusunun artan eğim açısı iki temel soruna sebep olmaktadır. Bunlardan biri uydunun sabit antenlerle takip edilememekte yayın iletimi için uydunun takip özelliği olan ve göreceli olarak daha pahalı antenlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bir diğer sorun ise uydunun hareketi ile uydunun yayınlarının izlenebildiği bölge olan kapsama alanları hareket etmektedir. Kapsama alanı içerisinde servis bölgesinde bulunan bir alışı ve/veya veri anteni uydunun takip etme özelliği olmasına rağmen belirli zaman aralıklarında iletişim kesintisi meydana gelmektedir. Bunun nedeni kapsama alanı içerisindeki yüksek güç bölgelerinin uydunun hareketi ile başka yerlere hareket etmesi ve o bölgede sinyalin iletişim için yeterli olmayacak derecede zayıflamasıdır. Bu sinyal zayıflaması kapsama alanının dar

(spot) veya geniş (wide) huzme olmasına göre değişmektedir. Uydunun salınım açısı ile kapsama alanı kuzey-güney yönünde sinüs eğrisi şeklinde hareket etmekte ve belirli açılarda sinyal iletişim sağlayamayacak derecede zayıflamaktadır. Kapsama alanı uydunun eğim açısına bağlı olarak kuzey-güney yönünde, boylamdaki hareketine bağlı olarak doğu-batı yönünde hareket etmektedir. Kapsama alanı uydunun sapma (yaw) açısına bağlı olarak kapsama alanı merkezi etrafında dönmektedir.

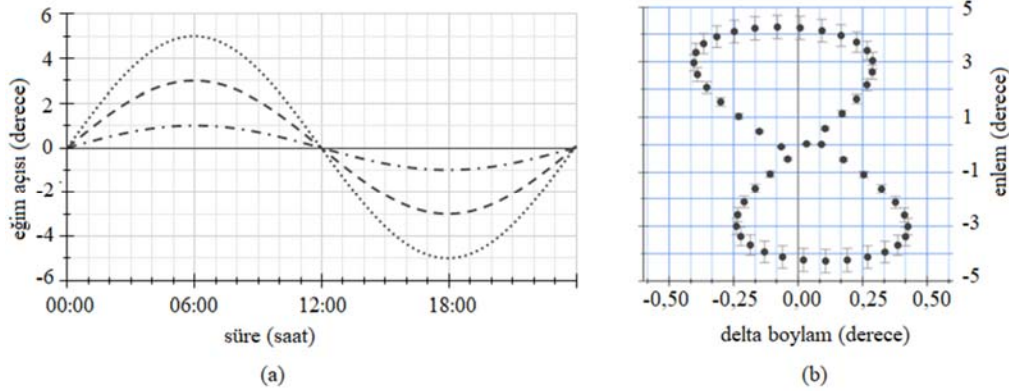
Yer sabit yörünge olarak tanımlanan ve Uluslararası Telekom Birliği (ITU-R) düzenlemelerine göre kuzey-güney ve doğu-batı yönünde $\pm 0,1^\circ$ derece kontrol penceresi içerisinde işletilen haberleşme uydularında bu hareketlerden kaynaklı sapmalar oldukça küçüktür ve işletme toleransları içerisinde değerlendirilmektedir [4, 5]. Salınımlı yörüngede ise bu sapmaların mutlaka dikkate alınması gerekmektedir.

Şekil 2a'da salınımlı yörüngede işletilmekte olan bir haberleşme uydusunun zamana bağlı olarak ekvator düzlemi ile uydunun bulunduğu noktanın açısı gösterilmektedir. Başlangıç t_0 anında ekvator düzlemi üzerinde bulunan uydunun kuzey yarımküre yönünde yükselmekte ve 6 saat sonra $t=6$ anında kuzeyde en yüksek eğim açısına ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra uydunun ekvatora doğru hareket etmekte ve t_0 anından 12 saat sonra tekrar ekvator düzlemi üzerine gelmektedir. Uydunun hareketi aşağı yönlü devam etmekte güney yarımküredeki bu hareket t_0 anından 18 saat sonra $t=18$ 'de güney yarımkürede en alt noktaya ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra geri dönüş başlamakta ve uydunun ekvatora doğru yönelmektedir. Başlangıç t_0 anından 24 saat sonra tekrar ekvator düzlemi üzerinde bulunmakta ve eğim açısı sıfır olmaktadır. Sinüs fonksiyonu şeklinde olan bu uydunun hareketinin genliği eğim açısını belirlemektedir.

Şekil 2b'de görülen salınımlı yörünge de işletilen haberleşme uydularının izdüşümü (ayakizi) ekvator düzlemi üzerinde 8 rakamına benzer bir şekli göstermektedir. Eğim açısı (i) bu şeklin boyuna ve genişliğine etki etmekte, dış-merkezlilik değeri ise genişliğe ilave katkı sağlamaktadır. Uydunun kapsama alanında, uydunun hareketi ile dünya üzerinde bu şekle benzer bir hareket göstermektedir. Kapsama alanı merkezi enlemi ve boylamı bu şeklin görünümünde değişiklikler oluşturmaktadır. Uydunun yörünge parametrelerinde hata sınırları içinde olan küçük değişimler kapsama alanı üzerinde etkiler meydana getirmektedir. Kapsama alanındaki bu sapmaları hesaplamak için kullanılan yöntemlerden birisi, hata elipsoidi yöntemidir. Bu yöntem ile uydunun yörünge parametrelerindeki belirsizliklerin dikkate alınması ve dikkate alınmaması durumunda kapsama alanları hesaplanmakta ve ortaya çıkan farkların etkisi değerlendirilmektedir [6]. Yer sabit



Şekil 1. Haberleşme uydusunun yörüngesi eğim açısı, ekvator düzlemi ile açı
(Communication satellite's orbit inclination angle, with equatorial plane)



Şekil 2. (a) Bir haberleşme uydusunun 1° , 3° ve 5° eğim açısı için zamana bağlı eğim açısı değişim grafiği (b) Salımlı yörüngedeki bir haberleşme uydusunun dünya üzerindeki izdüşümü (ayakizi)

(Communication satellite inclination angle variation for 1° , 3° , 5° with respect to time, Inclined communication satellite footprint on the earth)

yörüngede işletilmekte olan haberleşme uydularının, anten yönlendirme hatası, eğim açısı ($0,1^\circ$ 'den küçük) ve dış-merkezlilik kapsama alanının hedef bölge üzerinde kuzey-güney yönünde ve doğu batı yönünde sapmalar meydana getirmektedir. Bu sapmalar düzeltildiğinde özellikle kapsama alanı kenar bölgelerinde performans artışları gerçekleşmektedir [7]. Haberleşme uyduları 5. nesil (5G) sistemleri, hücresel ve karasal ağları dolaylı uyduların teknolojilerini desteklemekte, yedekleyici veya tamamlayıcı fonksiyon icra etmektedir. Haberleşme uydusu antenlerinin kapsama alanı içerisinde bir referans noktaya yönlendirilmesi (boresight) ile tasarlanan teorik kapsama alanı elde edilmektedir. Bu kapsama alanı yörüngedeki belirsizlikler, uydunun yönlem alt sistemi duyarlılığı, anten şeklinde meydana gelen ısıya bağlı bozulmalar, uydunun yönlendirme hataları vb. nedenlerle sapmalara veya değişimlere maruz kalmaktadır. Bu problem hassas hesaplamalar ve Kalman filtreleri ile kalibre edilerek çözülebilmektedir [8].

Uydu yörüngeleri altı klasik parametre (Kepler elemanları) ile tanımlanabilmektedir. Bu parametreler, yarı-asal eksen (a), yörünge boyutunu belirler, dış-merkezlilik (e) yörünge şeklini, eğim açısı (i), uydunun bulunduğu yörünge düzlemi ile ekvator düzlemi arasındaki açıyı, yükselme düğüm açısı (Ω), uydunun ekvator düzlemini güneyden kuzeye geçerken kestiği nokta ile bahar gündönümü referans doğrultusu arasındaki açıyı, yerberi argümanı (ω), yükselme noktası ile yerberi noktası arasındaki açıyı ve gerçek ayırıklık (θ), uydunun bulunduğu konum ile yerberi doğrultusu arasındaki açıyı ifade eder [9].

Yarı asal eksen yere eş zamanlı yörüngeden Δa (km) kadar farklılaştığı zaman uydunun $-0.013\Delta a$ derece/gün drift rate (kayma hızı) ile doğu veya batı yönünde hareket eder. Çevresel kuvvetlerden kaynaklı dış-merkezlilik uydunun boylamında $\pm 2e(180/\pi)$ kadar salınma neden olmaktadır. Eğiklik açısından kaynaklı i açısı ise $\pm(i/4)(\pi/180)$ derece boylamda değişime neden olur [10]. Uydunun uzaydaki konumunun belirlenmesi ve buna bağlı kapsama alanı hareketinin belirlenmesi için dinamik model, statik model ve açı modeli gibi yaklaşımlar bulunmaktadır [11]. Kapsama alanı hareketi eğri tabanlı zarflama gibi yöntemlerle başarılı bir şekilde hesaplanmaktadır [12]. Uydunun hareketinden kaynaklı yer istasyonu anteni bakış açıları geliştirilen algoritmalar ile hesaplanmaktadır [13].

2. Koordinat Sistemleri (Coordinate Systems)

Bu çalışmada uydunun temel yörünge parametreleri (Kepler elemanları) için iki kütle yaklaşımı yer merkezli ataletsel (YMA, ECI) koordinat sistemi kullanılmıştır. Bu koordinat sisteminde X eksenini

bahar dönüm noktasını, Z dünyanın dönüş eksenini ve Y bu iki eksenin ortogonalını ifade etmektedir. Uydunun yönelimi ve uydunun yuvarlanma, yunuslama ve sapma açısı modellenmesi için uydunun gövdesi merkezli kartezyen koordinat sistemi seçilmiştir. Uydunun konumu, uydunun üzerindeki antenin dünyaya bakış açısı ve kapsama alanı merkezindeki hedef noktaya yönelmesi, bu noktanın uydunun hareketine bağlı değişimini modellemek için farklı koordinat sistemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada uydunun yayınının merkezi için seçilen kapsama alanı merkezindeki hedef nokta coğrafi koordinatlar (enlem, boylam, yükseklik) ile ifade edilmiştir. Uydunun uzaydaki konumu için dünya sabit dünya merkezli (YSYM, ECEF) koordinat sistemi kullanılmıştır. Bu koordinat sisteminde X başlangıç Greenwich boylamını, Z dünyanın dönüş eksenini ve Y bu iki eksene ortogonal eksenini göstermektedir. Uydunun üzerindeki antenin dünya üzerindeki kapsama alanı içinde hedef nokta merkezli yayını için uydunun merkezli kartezyen koordinat sistemi kullanılmıştır [14, 15]. Bu koordinat sisteminde Y eksenini dünyaya doğru dik doğrultuda, X doğu yönünde ve Z bu iki vektöre ortogonal olarak kuzey yönünü göstermektedir. Şekil 3, YSYMA, uydunun sabit kartezyen ve uydunun anteni merkezli kartezyen koordinat sistemini göstermektedir.

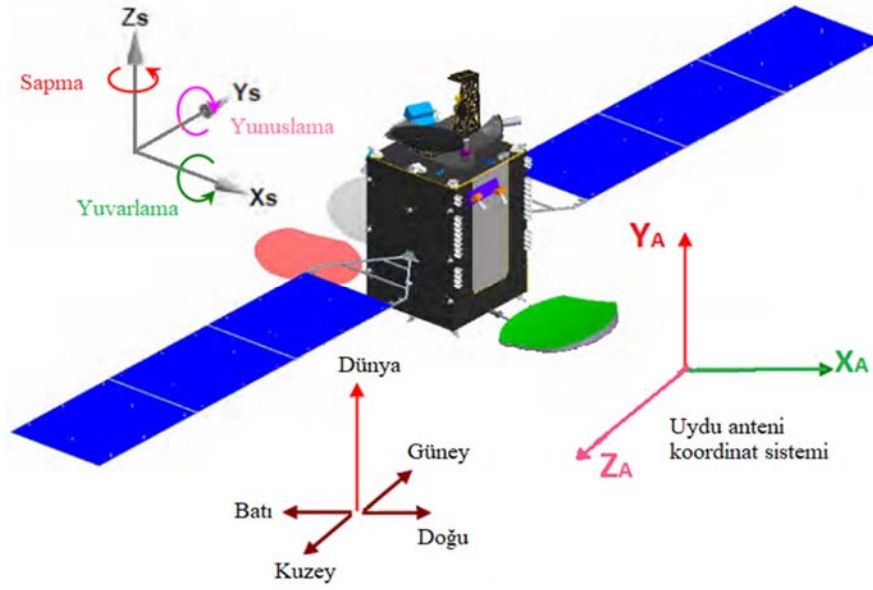
3. Haberleşme Uydularının Yörünge Hareketi (Orbital Movement of the Communication Satellites)

Uydunun günlük hareketine bağlı olarak uydunun merkezli koordinat sisteminde Z eksenini sürekli dünyaya doğru bakmakta ve uydunun bir periyot süresi içinde Y eksenini etrafında 360 derece dönüş yapmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi bu standart dönme ile kapsama alanı merkezi sürekli olarak hedef noktaya sabitlenmektedir.

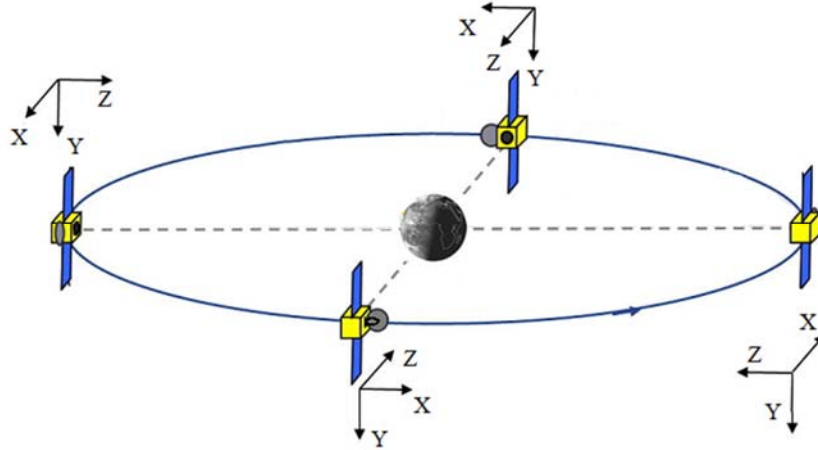
Haberleşme uyduları uzayda durağana yakın şekilde işletildiği için üretilirken uydunun antenleri tasarlanan hedef coğrafi bölgeye yayın yapacak şekilde üretilmektedir. Kapsama alanı merkezi yayının hedef noktası (boresight) olarak seçilmektedir. Örnek olarak bu çalışmada Ankara / Gölbaşı uydunun kontrol merkezi (39,63880 K enlemi ve 32,80150 D, boylamı) hedef nokta olarak seçilmiştir. Uydunun hareketine bağlı olarak uydunun ekvator üzerindeki izdüşümü ve kuzey-güney ve doğu-batı yönünde Şekil 5'te görüldüğü gibi hareket etmektedir. Kapsama alanı hedef noktasında bu hareketi takip etmektedir.

Uydunun yönelimindeki değişimleri hesaplamak için yukarıda bahsedilen bu koordinat sistemlerini birbirine dönüştürmek gerekmektedir.

Uydunun Kepler yörünge elemanlarının kartezyen YSYM koordinat sisteminde dönüştürülmesi Eş. 1 ve Eş. 2 denklemleri ile önce konum ve hız hesaplanır.



Şekil 3. Uydu gövdesi ve sol üstte uydu merkezli kartezyen koordinat sistemini, sağ alt uydu anteni merkezli kartezyen koordinat sistemini ve bu koordinat sistemlerinin dünyaya göre yönelimi
(Satellite's body and satellite centered cartesian coordinate system on the top left, satellite antenna coordinate system on the left and attitude of those coordinate system to the earth)



Şekil 4. Uydu merkezli kartezyen koordinat sistemi ve bu koordinat sisteminin dünyaya göre yönelimi
(Satellite centered coordinate system and attitude of the coordinate system)

$$r = \frac{a(1-e^2)}{(1+e\cos\theta)}, v = \frac{\sqrt{\mu}}{\sqrt{a(1-e^2)}} \quad (1)$$

Burada r:dünya merkezine göre uydunun konumu, v: uydunun hızı, $\mu = GM$ 3,986.10¹⁴, a: yarı asal eksen, e: dış-merkezlilik.

Eş. 2, Eş. 3 ve Eş. 4 ile Kartezyen koordinata dönüşüm yapılır.

$$x = r[\cos(\theta + \omega) \cos(\Omega) - \cos(i) \sin((\theta + \omega)) \sin(\Omega)] \quad (2)$$

$$y = r[\cos(\theta + \omega) \sin(\Omega) + \cos(i) \sin((\theta + \omega)) \cos(\Omega)] \quad (3)$$

$$z = r \sin(\theta + \omega) \sin(i) \quad (4)$$

Burada x, y, z kartezyen koordinat sisteminde uydunun konumunu göstermektedir.

Benzer şekilde Eş. 5, Eş. 6 ve Eş. 7 ile uydunun hız değerleri hesaplanabilir.

$$V_x = v[(e + \cos(\theta))(-\sin(\omega)\cos(\Omega) - \cos(i) \sin(\Omega) \cos(\omega)) - \sin(\theta)((\cos(\omega) \cos(\Omega) - \cos(i) \sin(\Omega) \sin(\omega))] \quad (5)$$

$$V_y = v[(e + \cos(\theta))(-\sin(\omega) \sin(\Omega) + \cos(i) \cos(\Omega) \cos(\omega)) - \sin(\theta)(\cos(\omega) \sin(\Omega) - \cos(i) \sin(\Omega) \sin(\omega))] \quad (6)$$

$$V_z = v[(e + \cos(\theta)) \sin(i) \cos(\omega) - \sin(\theta) \sin(i) \sin(\omega)] \quad (7)$$

Burada V_x , V_y , V_z , kartezyen koordinat sisteminde uydunun hızını ifade etmektedir.

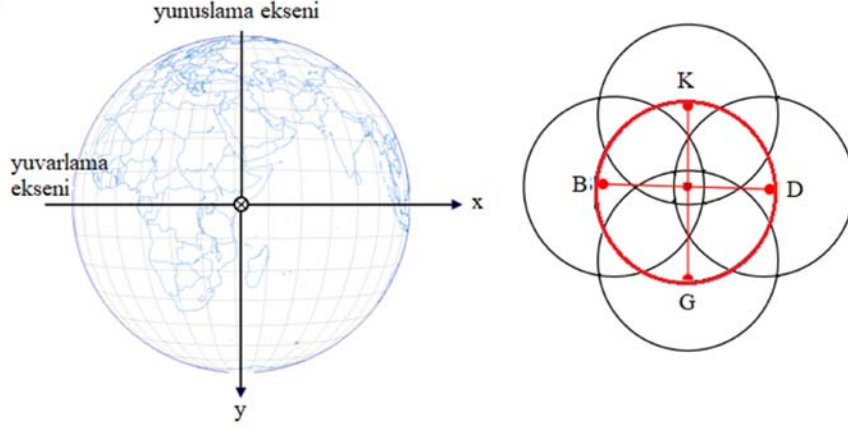
Böylece Eş 1 – Eş 7 denklemleri ile uydunun uzaydaki konumu (pozisyonu) ve hızı hesaplanmış olur.

Şekil 3'te görülen uydu anteni sabit kartezyen koordinat sisteminin, hesaplamalarda kolaylık sağlaması için uydu gövdesi sabit kartezyen koordinat sistemine dönüşüm matrisi Eş. 8'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{bmatrix} \quad (8)$$

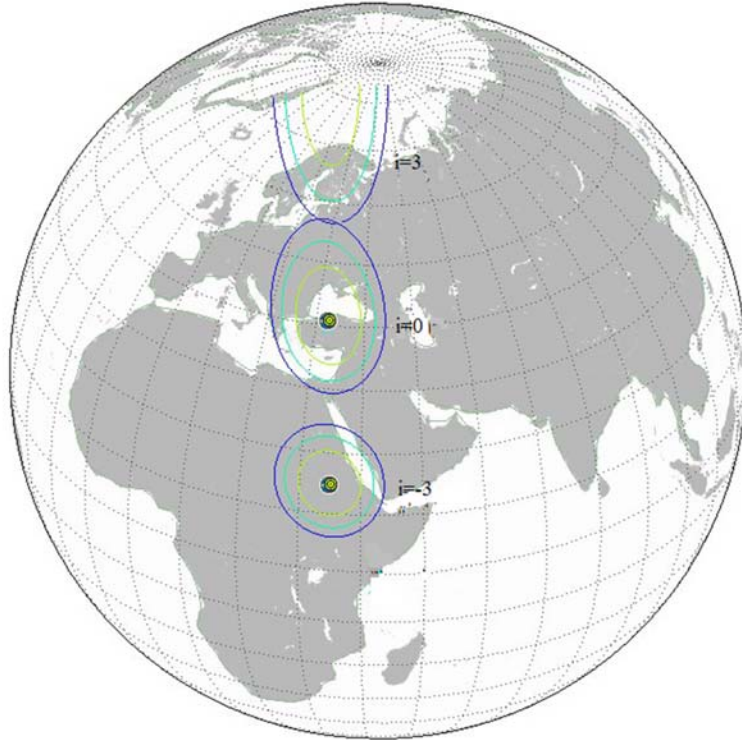
Salınımlı yörüngede işletilmekte olan Test-1B uydusunun kapsama alanının eğim açısına bağlı olan yer küre üzerindeki hareketinin simülasyonu yapılmıştır. Şekil 6'da Test-1B uydusunu Türkiye ve

yakın çevresini içeren kapsama alanının 3° eğim açısı için dünya üzerindeki hareketi görünmektedir. Türkiye üzerindeki kapsama alanı güç eğrileri $i \leq 0,1^\circ$ için olup tam yörünge kontrolü durumundaki yayın bölgesini göstermektedir. Uydunun günlük periyodik hareketi içerisinde uydu eğiminin artması ile kapsama alanı kuzeye doğru kaymakta eğim açısı 3°'ye ulaştığında Şekil 6'de görüldüğü gibi kapsama alanının yarıdan fazlası dünya dışına çıkmakta sinyalin büyük kısmı uzay boşluğuna gönderilmektedir. Uydu periyodik hareketine devam edip güney yönünde ilerlediğinde kapsama alanı güney yarım küreye doğru kaymaktadır Türkiye kapsama alanı 3° eğim açısında ekvator bölgesindeki Somali ve çevresindeki ülkelerin üzerinde



Şekil 5. Sol tarafta Bir haberleşme uydusunun 42.0° D boylamından dünyayı görüşü ve uydu merkezli kartezyen koordinat sisteminin yönelimi, sağ tarafta uydu kapsama alanının dünya üzerinde bir hedef noktaya yönlendirilmesi ve yuvarlanma ve yunuslama açılarının bu hedef noktanın kuzey-güney ve doğu-batı yönünde sapmaya etkisi

(Earth view from a satellite located at 42.0 E longitude and attitude of the satellite centered coordinate system on the left figure, pointing the coverages to the target location and effect of roll and pitch angle to movement of the target in north-south and east-west direction on the right figure).



Şekil 6. Test-1B uydusunun eğim açısı değişimi ile Türkiye kapsama alanının dünya üzerinde hareketi (Test-1B Turkey coverage movement on the earth due to inclination variation.)

olmaktadır. Kapsama alanı uydu salınımı ile dünya üzerinde hareket ederken dünyanın küre yüzeyinden dolayı şekil değiştirmekte ekvator ve çevresinde çember şeklinde iken kuzey kutbuna doğru uzayan elips şeklini almaktadır. Kapsama alanı şekli eğim açısıyla değişmektedir.

Salınımlı yörüngede işletilmekte olan haberleşme uydularının kapsama alanının merkez hedef noktası kapsama alanının özellikle kuzey-güney hareketindeki kaymayı ve kapsama alanı şeklini belirlemektedir Tablo 1'de görüldüğü gibi Ekvator kapsama alanı boylam 42°D enlem 0° ve 5°'ye kadar olan eğim açısında kapsama alanı başlangıç noktasına göre en fazla 550 kilometre kuzey-güney yönünde sapmaktadır. Aynı uydunun merkez koordinatı boylam 32,77° D ve enlem 39,734° K olan Türkiye kapsama alanına -5°'de başlangıç noktasına göre 4304 kilometre sapma olmakta yaklaşık 2,75°'den sonra ise uydu sinyali kuzey kutbu üstünden uzay boşluğuna gitmektedir.

Tablo1. FBESat1 uydusunun coğrafi koordinat sisteminde uydu eğim açısı ve Türkiye ve ekvator kapsama alanı hareketi (Turkey and equator coverages movement and inclination of FBESat1 satellite in the geographical coordinate system)

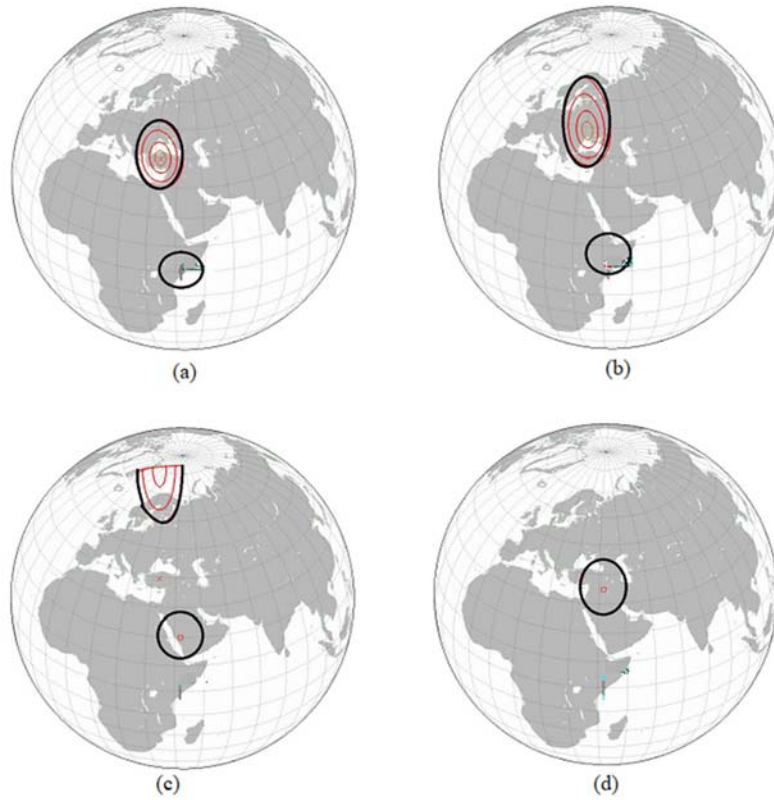
i	Ekvator			Türkiye		
	LatU	LonU	d km	LatU	LonU	d km
0,0	0,000	0,000	0,000	39,734	32,770	0,000
1,0	0,986	42,012	109,769	48,695	30,871	1008,885
-1,0	-0,986	42,013	109,771	30,040	33,969	1084,638
3,0	2,996	42,003	333,513	ub	ub	ub
-3,0	-2,998	42,003	333,736	14,879	34,920	2774,775
5,0	4,967	42,001	552,924	ub	ub	ub
-5,0	-4,967	42,001	552,924	1,133	35,195	4304,078

Uydu kapsama alanı ve uydu eğim açısına bağlı olarak kuzey-güney yönünde hareket etmekte ve kapsama alanı merkez noktası eğim açısı ile birlikte değerlendirildiğinde Şekil 7'de görüldüğü gibi bazı açı değerleri ve üzerinde uydu sinyali uzay boşluğuna gitmektedir. FBESat1 Türkiye ve ekvator adlı iki kapsama alanı olan uydu olarak seçilmiştir. FBESat1 uydusu Türkiye kapsama alanı Test-1B uydusu kapsama alanı ile aynıdır. Şekil 7d'de Türkiye kapsama alanı tamamen uzay boşluğuna çıkmış durumda olup sadece ekvator kapsama alanı görülmektedir. Salınımlı yörünge hareketlerine bağlı olarak Test-1B uydusu Türkiye kapsama alanında EIRP (effective isotropic radiated power, etkin sinyal yayılım gücü) ve G/T (gain over temperature, kazanç gürültü oranı) değişimi görülmektedir. Test-1B uydusunun Ankara üzerine yayın yapma gücünün (EIRP) ve sinyal alma gücünün (G/T) uydu eğim açısına göre değişimi Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Test-1B uydusunun salınımı ile EIRP ve G/T güç değişimi (EIRP and G/T variation due to Test-1B satellite inclination)

i	EIRP (dBW)	G/T (dB/K)	Δ EIRP (dB)	Δ G/T (dB)
0°	56,60	14,74	0,00	0,00
1°	41,80	3,77	-14,80	-10,97
3°	20,31	-17,05	-36,29	-31,79
5°	---	---	---	---
-1°	46,67	4,71	-9,63	-10,03
-3°	20,82	-22,59	-35,74	-37,73
-5°	---	---	---	---

Buradaki değerler kapsama alanı şekline göre değişmektedir. Daha geniş bir alana yayın yapan batı veya doğu kapsamasında sinyal değişimi daha az olmaktadır. Kapsama alanı kuzey veya güney



Şekil 7. Test1B ve FBESat1 uydusunun (a) $i=0^\circ$ (b) $i=1^\circ$ (c) $i=3^\circ$ için Türkiye kapsama alanı ve FBESat1 uydusunun uydusunun (a) $i=0^\circ$ (b) $i=1^\circ$ (c) $i=3^\circ$ (d) $i=5^\circ$ ekvator kapsama alanının kuzey yarımkürede hareketi (Test-1B satellite coverage movement on the north hemisphere for $i=0^\circ, 1^\circ, 3^\circ$ and FBESat1 equator coverage movement on the north hemisphere for $i=0^\circ, 1^\circ, 3^\circ, 5^\circ$)

kutbuna yaklaştıkça sinyal değişimi artmakta ekvator ve çevresinde sinyal değişimi daha az olmaktadır.

4. Kapsama Alanı Sabitleme Metodu (Boresight Re-Targeting Method)

Salınımlı yörüngede işletilmekte olan haberleşme uydusunun eğim açısının artması ile kapsama alanı kuzey-güney yönünde hareket etmektedir. Şekil 8’de görüldüğü gibi ekvator düzlemi üzerinde ($i < 0,1^\circ$) olan uyduda, eğim açısının artması ile kuzey yarım kürede kuzeye doğru hareket etmektedir. Uydu izdüşümü, uydu ekvator dünya üzerinde A noktasında iken bu izdüşüm eğim açısının artması ile A’ noktasına kaymaktadır. Şekil 8’de görüldüğü gibi uydu yuvarlanma açısına α kadar düzeltme uygulanarak uydu izdüşümü A noktasına getirilmektedir. Şekil 8’de teorik yuvarlanma açısı düzeltme görülmektedir. Yunuslama açısı, uydu eğim açısı ile ve uydunun eğimli açıdaki yörüngesinin ekvator düzlemi ile yaptığı açı ile hesaplanmaktadır. Uydunun ekvator düzlemi üzerine izdüşümü, eğim açısı ile bozulmakta ve kuzeye veya güneye doğru olan kayma Eş. 9 ile ifade edilen yuvarlanma açısı düzeltmesi ile tekrar eski yerine ekvator düzlemi üzerindeki izdüşümüne getirilmektedir. Geometrik üçgen kuralları uygulanarak α yuvarlanma açısı düzeltme değeri Eş. 9’da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\alpha = \text{atan} \left(\left(\frac{r+h}{h} \right) \tan(i) \right) - i \quad (9)$$

Burada

α : uygulanan yuvarlanma açısı düzeltmesin,

i : yörünge eğim açısı

r : dünya yarıçapı (WGS84’e göre ekvatorunda 6378,137 km,

kutuplarda 6356,752 km, $f=1/298,25722$)

h : uydunun yüksekliği

Benzer şekilde yunuslama açısı düzeltme değeri Eş. 10 ile ifade edilebilir.

$$\beta = \text{atan} \left(\left(\frac{r+h}{h} \right) \tan(\Delta l) \right) \quad (10)$$

β : uygulanan yunuslama düzeltme açısı

Δl : uydunun ilk konumuna göre boylamındaki değişim

Yuvarlanma açısı düzeltmesi ile salınımlı yörüngedeki haberleşme uydusunun kapsama alanı kayması düzeltilerek, kapsama alanı merkezi tekrar sıfır eğim açısı noktasında olan enlem ve boylama yönlendirilmektedir. Kapsama alanının şeklinde ise dünyanın küre şeklinde olmasından kaynaklanan değişimler olmaktadır. Bu şekil

değişikliği kapsama alanı merkezinin ekvatora yakın olması durumunda daha az olmakta ekvatorundan uzaklaştıkça artmaktadır. Yuvarlanma açısı düzeltmesi için uydu X eksenine uygulanan açı değişimi uydularda tepki tekerlekleri ile yapılmaktadır. ITU-R standartları dikkate alındığında en fazla $\pm 0,1^\circ$ açı değişiminde açı düzeltmesi gerekmektedir. Bu çalışmada uydu eğim açısında meydana gelen her $0,05^\circ$ ’lik değişimde yuvarlanma açısı düzeltmesi yapılmıştır. Bu durumda 3° eğim açısı için düzeltme sayısı $ds=3/0,05$ ile hesaplanmaktadır. Her bir yarım küre için 60 toplam 120 düzeltme komutu kullanılacaktır. Bu yuvarlanma açısı düzeltme komutları zamanı gelince işletilmek üzere önceden günlük veya haftalık olarak uydu komut kayıt sistemine yüklenebilir. Düzeltme sayısı azaltılmak istenirse eğim açısı değişimi $0,1^\circ$ olarak ayarlanabilir bu durumda düzeltme adedi yarı yarıya azalacaktır.

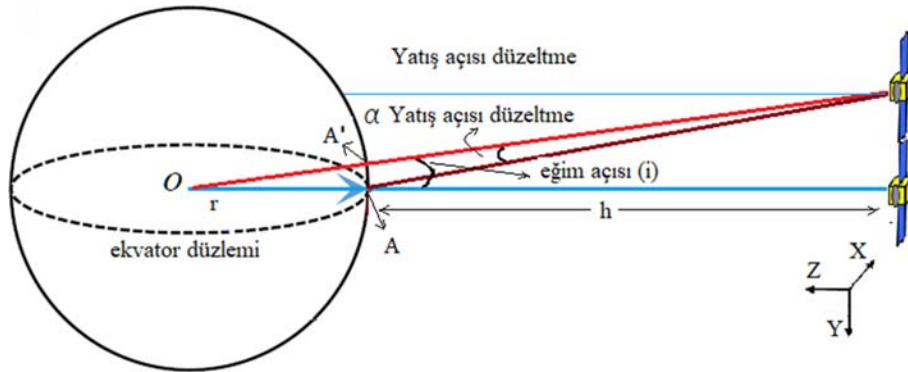
Bu çalışmada uydu kapsama alanını sabitlemek için kullanılan yuvarlanma ve yunuslama açısı düzeltme işlemi aşağıdaki algoritma ile ifade edilebilir.

- FBESat1 uydusu başlangıç t_0 anında boylam 42° , enlem 0° (ekvator üzerinde), kabul edilerek uydu enlem boylam ve yükseklik değerleri hesaplanması.
- Zamanı ilerleterek, zamana bağlı uydunun uzaydaki konumunun hesaplanması
- Uydunun konumunun değişmesi ile hareket eden kapsama alanı, merkez noktasının hesaplanması,
- Uydunun kapsama alanı merkezinin ilk noktaya dönmesi (sabit kalması, hareket etmemesi) için uydunun döndürülmesinde kullanılacak yuvarlanma (α) ve yunuslama (β) düzeltme açılarının hesaplanması
- Hesaplanan yuvarlanma ve yunuslama açılarına göre uydu yöneliminin düzeltilmesi için uyduya komutların gönderilmesi
- Uydu yöneliminin düzeltilmesi ile hareket etmiş olan kapsama alanının tekrar ilk başlangıç noktasına gelmesi.

Önerilen bu yöntem salınımlı yörüngede işletilmekte olan haberleşme uydularına uygulanarak kapsama alanı sabitlemesi hedeflenmiştir.

5. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu çalışmada salınımlı yörüngede işletilmekte olan bir haberleşme uydusunun eğim açısı 5° kadar çıkması durumuna kapsama alanı hareketi analiz edilmiştir. Geliştirilen yöntemi FBESat1 uydusuna uygularken uydu yörünge parametreleri; zaman başlangıcı 15 Ocak 2021 00:00 UTC, $a=42164,2$ km, $e=5 \times 10^{-5}$, yerberi açısı $=360^\circ$, yükselisi açısı $=148,878^\circ$, gerçek ayrıklık $=7,52^\circ$ olarak alınmıştır. Eğim açısı 1° , 3° ve 5° derece alınarak farklı durumların simülasyonu yapılmıştır. Tablo 3’de görüldüğü gibi 1° , 3° , ve 5° eğim açılarında



Şekil 8. Bir haberleşme uydusunun eğim açısı ile ekvator düzlemine göre yükselmesi ve yuvarlanma açısı düzeltmesi ile kapsama alanı merkezinin yeniden hedef noktaya yönlendirilmesinin geometrik gösterimi.

(A communication satellite ascension from the equatorial plane and re-pointing the coverage area center to the target, geometric illustration)

uyduya yuvarlanma ve yunuslama açısı düzeltilmesi uygulandığında kapsama alanı sabitlenmektedir. Uydu kapsama alanına 24 saatlik uydu salınım periyodu içerisinde en fazla $0,863^\circ$ yuvarlanma düzeltme açısı 5° eğim açısında uygulanmaktadır. Yunuslama düzeltme açısı düzeltilmesi ise 2×10^{-3} derece civarındadır. Uydu platformlarında yuvarlanma ve yunuslama hassasiyeti genel olarak 10-3 derece mertebesinde olduğundan bu değerden daha küçük farklarda hata düzeltmeleri uygulanmaz. FBESat1 uydusu yunuslama açısı en fazla $2,09 \times 10^{-2}$ olduğu için göreceli olarak küçük olan etki bu çalışmada düzeltme yönünde çok az etki etmiştir. Tablo 3'te verilen değerler Türksat uydu merkezinde kullanılan programların ürettiği değerler ile karşılaştırılmış ve birbirine çok yakın sonuçlar görülmüştür. İlave olarak System Toolkit (STK) yazılımı ile yapılan karşılaştırmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir.

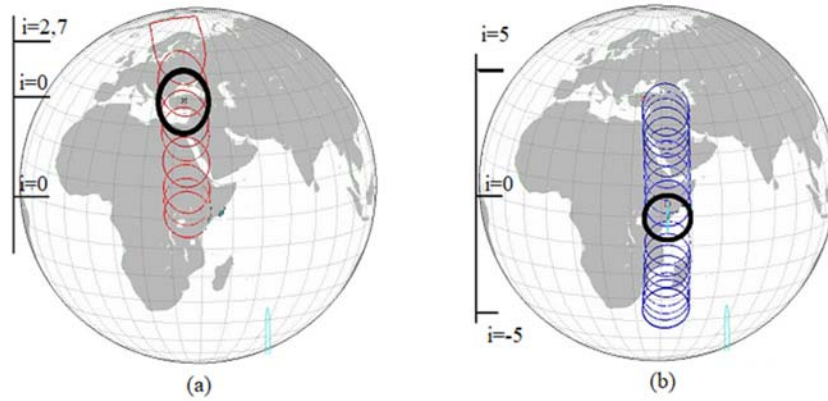
Tablo 3. FBESat1 ve Test-1B uydusunun salınımına bağlı eğim açısı ve yuvarlanma düzeltme değerleri
(FBESat1 and Test-1B inclination angle and satellite roll bias)

Zaman	$i=1^\circ$	$i=3^\circ$	$i=5^\circ$
t_0	$0,000^\circ$	$0,000^\circ$	$0,000^\circ$
t_0+6	$0,169^\circ$	$0,522^\circ$	$0,863^\circ$
t_0+12	$-0,001^\circ$	$-0,004^\circ$	$-0,007^\circ$
t_0+18	$-0,169^\circ$	$-0,522^\circ$	$-0,863^\circ$

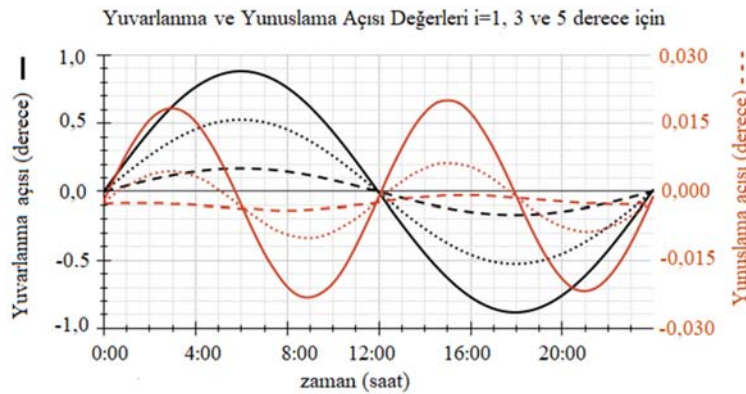
FBESat1 ve Test-1B uydusunun sabit Türkiye kapsama alanı Şekil 9a'da, FBESat1 uydusunun sabit ekvator kapsama alanı Şekil 9b'de siyah daire şeklinde gösterilmiştir. Bu kapsama alanları uydu salınımına bırakıldığında şekilde iz olarak gösterildiği gibi kuzey-güney yönünde hareket etmektedir. Yuvarlanma ve yunuslama açılarında düzeltme uygulandığında tüm eğim açıları kapsama alanı tekrar başlangıç noktasındaki siyah daire ile gösterilen bölgeye odaklanmaktadır. Kapsama alanının hedef merkez noktası salınımına bağlı harekette nasıl bir sonuç vereceğini etkilemektedir.

Uydu $8,7^\circ$ eğim açısına ulaştığında ekvator kapsama alanı merkez noktası bile uzay boşluğuna yayın yapmaktadır. Bu durumda enlem $40^\circ K$ ve boylam $30^\circ D$ hedef noktasına yayın yapmakta olan bir kapsama alanı merkezi uydu $2,7^\circ$ eğim açısına ulaştığında uzay boşluğuna yayın yapmaya başlamaktadır. Dolayısıyla yükselen eğim açısı kapsama alanının yayınlarının yerküre üzerinde kuzey ve güney kutup noktalarına yaklaştıktan sonra uzay boşluğuna yönelmesine neden olmaktadır.

Eş. 9 ve Eş. 10'daki formüller uygulandığında elde edilen sonuçlar uydu için yuvarlanma ve yunuslama düzeltme açıları olarak uygulanmaktadır. Şekil 10'da noktalı eğri çizgi 1° , kesik eğri 3° ve kesiksiz eğri 5° eğim açısı için, sol eksen uygulanacak yuvarlanma açısını, sağ eksen uygulanacak yunuslama açısını göstermektedir. Uydunun bir periyodu olan 24 saatlik dilimde zamana bağlı olarak uygulanan bu düzeltme ile kapsama alanı başlangıç noktasında sabit hale gelmektedir. Bu düzeltmeler periyodik olarak uygulanmaktadır.



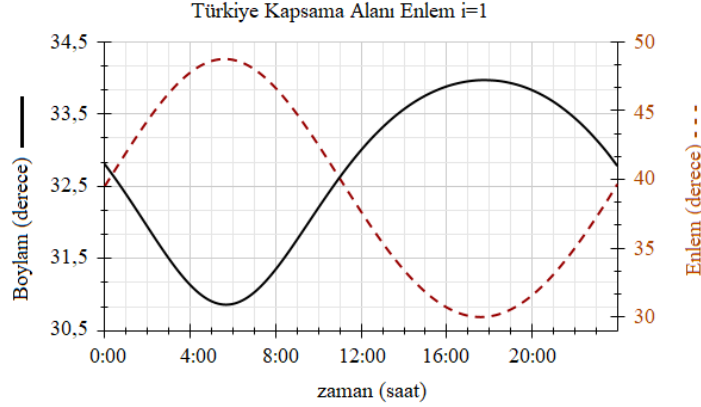
Şekil 9. (a) Türkiye kapsama alanı (b) ekvator kapsama alanı salınımına bağlı 24 saatlik hareketi. Siyah daire başlangıç ve sabitleme hedef yapılacak bölgeyi göstermektedir. (Turkey coverage on the left figure and equator coverage on the right figure movement due to inclination for 24 hours. The left circle shows the initial and pointed location)



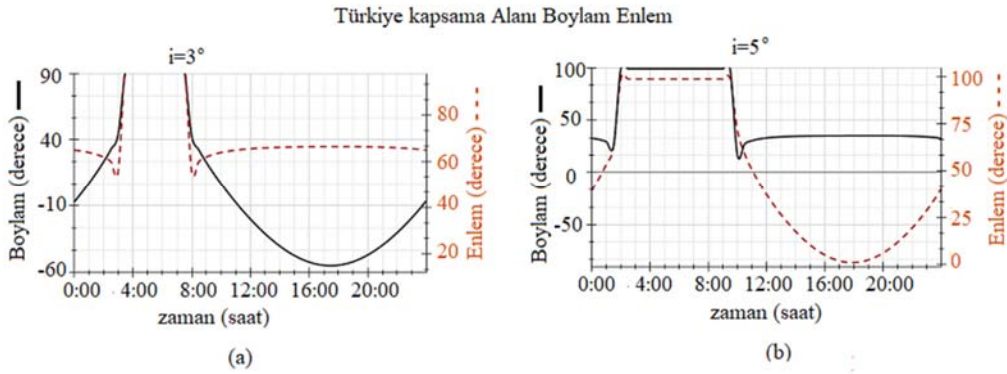
Şekil 10. Uyduya uygulanan yuvarlanma ve yunuslama düzeltme açılarının zamana bağlı grafiği.
(Roll and pitch biases applied to satellite with respect to time)

Şekil 11'de uydunun eğim açısı 1° olması durumunda yerküre üzerinde Türkiye kapsama alanının hareketini, sol eksen boylam değişimini, sağ eksen enlem değişimini göstermektedir. Türkiye kapsama alanının Şekil 12a'da eğim açısı 3° ve Şekil 12 b'de eğim açısı 5° için enlem ve boylam hareketi görülmektedir. Şekil 12a'da yaklaşık olarak t0

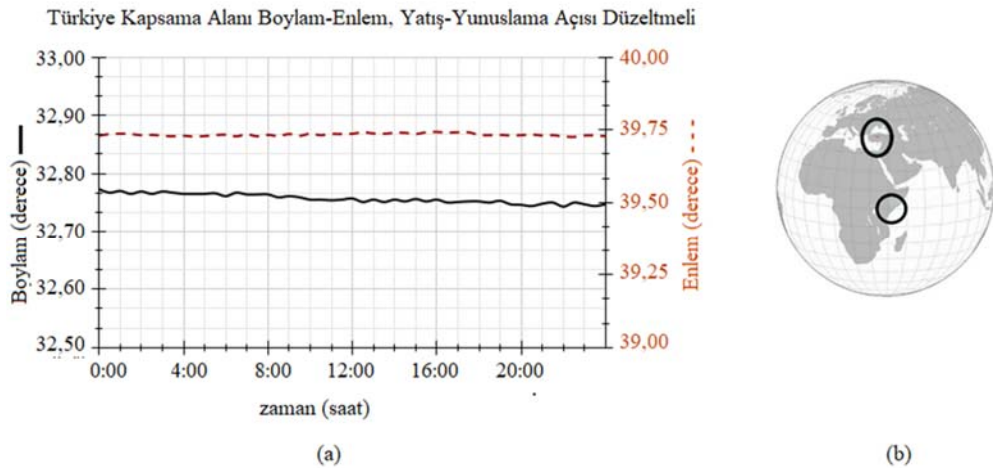
anından sonraki 4 ve 8. saatler arasında Şekil 12b'de ise 1 ve 12. saatler arasında kapsama alanı sinyalinin uzay boşluğuna gönderildiği görülmektedir. Uyduya yuvarlanma ve yunuslama düzeltme açısı uygulandığında ise Türkiye kapsama alanı merkezi e Şekil 13a'da sol siyah eksenle boylam değişimi, sağ kırmızı eksenle enlem değişimi



Şekil 11. Türkiye kapsama alanı eğim açısı 1° için enlem-boylam değişimi (Turkey coverage's latitude-longitude change for 1° inclination.)



Şekil 12. Türkiye kapsama alanı eğim açısı (a) 3° için, (b) 5° için, enlem ve boylam değişimi (Turkey coverage's latitude-longitude change for 1° inclination on the left figure and for 5 inclination on the right figure.)



Şekil 13. Türkiye kapsama alanının yuvarlanma ve yunuslama düzeltme açıları uygulandıktan sonra (a) enlem boylam olarak grafik değişimi (b) Türkiye ve ekvator kapsama alanının yuvarlanma ve yunuslama düzeltme açıları uygulandıktan sonra yerküre üzerindeki sabitlenmiş görüntüsü (Turkey coverage's latitude-longitude change for 1° inclination Turkey coverage latitude-longitude change graph on the left figure, Turkey and equator coverages view on the right figure, after applying roll and pitch biases)

Tablo 4. Uyduların hedef referans noktaya açı düzeltmesi ile yönlendirilme performansı.
(The performance of satellites attitudes to the reference point after biases)

	Türkiye Kapsama		Ekvator Kapsama	
	Enlem (°)	Boylam(°)	Enlem(°)	Boylam(°)
En Büyük	39,755	32,773	0,001	42,000
En Küçük	39,716	32,768	-0,001	42,000
Ortalama	39,735	32,771	0,000	42,000
Standart Sapma	0,01371	0,00156	0,00083	0,000

görülmektedir. Boylam ve enlem değerleri tam kontrollü uyduda olduğu gibi yaklaşık durağan değerlere ulaşmıştır. Böylece kapsama alanı merkezi Şekil 13b’de yerküre üzerinde görsel olarak belirtildiği gibi sabitlenmekte ve tam kontrollü yörüngede olduğu gibi hareket $\pm 0,1^\circ$ kontrol penceresi içerisinde kalmaktadır.

Uyduların hedef referans noktaya (Türkiye kapsama alanı için boylam $32,77^\circ$ D, enlem $39,734^\circ$ K, ekvator kapsama alanı için boylam $42,00^\circ$ D, enlem $0,000^\circ$ K) yuvarlanma ve yunuslama açısı düzeltmesi ile yönlendirilme performansı en büyük, en küçük, ortalama ve standart sapma değerleri Tablo 4’te verilmiştir. Görüleceği gibi fark yuvarlanma açısında mili derece seviyesinde yunuslama açısında ise mili dereceden daha küçük olup sıfır olarak alınmıştır. Uydu anteni hedef bölgeye hassas bir şekilde yönlendirilmiştir.

Bu çalışmada önerilen yöntem ile uydu gövdesine yuvarlanma ve yunuslama açısı düzeltmesi yapıldığında kapsama alanı uydunun tam kontrollü $i \leq 0,1^\circ$ olarak işletildiği durumdaki kapsama alanı ile coğrafi olarak aynı bölgede olmaktadır.

Kapsama alanında meydana gelen bu sapma uydu gövdesinde yuvarlanma açısı düzeltmesi uygulanarak düzeltilebilmektedir. Kapsama alanının doğu-batı yönündeki sapması ise uydu yunuslama açısı ile düzeltilebilmektedir.

Tablo 5. Test-1B uydusunun salınımı ile EIRP ve G/T güç değişimi ve düzeltme uygulandıktan sonra elde edilen Δ kazanç
(Test-1B satellite EIRP and G/T variation due to inclination and obtained Δ gain after applying biases)

i	EIRP (dBW)	G/T (dB/K)	Δ EIRP (dB)	Δ G/T (dB)
0°	56,60	14,74	0,00	0,00
1°	41,80	3,77	14,80	10,97
3°	20,31	-17,05	36,29	31,79
5°	---	---	N/A	N/A
-1°	46,67	4,71	9,63	10,03
-3°	20,82	-22,59	35,74	37,73
-5°	---	---	N/A	N/A

Tablo 5’de görüldüğü gibi düzeltme açıları uygulandıktan sonra uydu kapsama alanının uydunun tam kontrollü işletildiği durumdaki bölgeye gelmesi EIRP ve G/T değerleri tüm salınım açılarında 56,60 dBW ve 14,74 dB/K değerlerine gelmiştir. Ayrıca 5° ve -5° eğim açısında uzay boşluğuna giden sinyal tekrar hedef kapsama alanı üzerine yönlendirilmiştir. Böylece kapsama alanı sinyal gücü uydunun tam kontrollü yörüngede işletildiği durum seviyeye çıkarılmıştır.

6. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada uydu gövdesine uygulanan dönme açıları ile uydunun salınlı yörüngede işletilmesinden kaynaklanan kapsama alanı hareketi hedef nokta üzerine başarılı bir şekilde sabitlenmiş ve tam kontrollü uydu kapsama alanı ile aynı bölgeye odaklanma gerçekleştirilmiştir. Böylece uydu takip özelliğine sahip uydu yer istasyonları alış ve veriye kapsama alanı hareketinden kaynaklı EIRP ve G/T dalgalanması probleminden kurtulmuş ve stabil (kararlı) sinyal alış ve veriş imkanına kavuşmuş olmaktadır. Sonuçlar 3. parti yazılımlar ve literatürdeki, çalışmalar uyumludur. Uydu işletmecileri

salınlı yörüngede çalıştırdıkları uydularına düzeltme açıları uygulayarak kapsama alanı kayması problemini önerilen metot ile çözebilirler, uydu üzerinden kesintisiz ve güvenilirliği yüksek iletişim sağlayabilirler. Salınlı yörüngede işletilen ancak kapsama alanı sabitlenmiş bu uydular üzerinden müşterilere yeni uydu yayın servisleri sunmak mümkün olur.

Teşekkür (Acknowledgement)

Türksat Uydu Haberleşme ve Kablo TV İşletme AŞ’ye mühendislik teorik bilgilerin değerlendirilmesine ve doğruluğunu teyit edilmesine sağladığı katkıdan dolayı teşekkür ederim.

Kaynaklar (References)

1. Soop, E. M., Introduction to Geostationary Orbits”, ESA, France, 1983.
2. Oz, I., A Conjoint Analysis of Propellant Budget and Maneuver Life for a Communication Satellite, Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences, 4.1, 84-95, 2021.
3. Oz, I., Yılmaz, Ü. C., Determination of Coverage Oscillation for Inclined Communication Satellite, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 24 (5), 963-973, 2020.
4. International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R RS.484-3. Station-keeping in longitude of geostationary satellites in the fixed-satellite service, 2004.
5. International Telecommunication Union, Recommendation ITU-R S.743-1. The coordination between satellite networks using slightly inclined geostationary-satellite orbits (GSOs) and between such networks and satellite networks using non-inclined GSO satellites, International Telecommunication Union Electronic Publishing, 1994.
6. Dai, G., Chen, X., Zuo, M., Peng, L., Wang, M., & Song, Z., The Influence of Orbital Element Error on Satellite Coverage Calculation, International Journal of Aerospace Engineering, 2018.
7. Emam, A. E., Victor, J., & Elghany, M., Performance Assessment of GSO Satellite before and after Enhancing Pointing Effect, International Journal of Electronics and Communication Engineering, 9 (12), 1434-1440, 2015.
8. Sun, C., Jiang, H., Zhang, J., Tao, Y., Li, B., & Zhao, Modeling and Calibrating the Ground-Surface Beam Pointing of GEO Satellite, IEEE Access, 7, 121897-121906, 2019.
9. Yılmaz, Ü. C., Uydularda Yörünge eğiklik Açısı ve İletişime Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2005.
10. Cui, J. X., Shi, H. L., & Pang, F., Azimuth and elevation of slightly inclined geostationary-satellite orbits, International Conference on Computer Engineering and Technology, 2, 350-352, 2009.
11. Xu, Y., Lian, Z., Tan, Y., Li, J., & He, R., Static and dynamic models of observation toward earth by satellite coverage, 3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics, 582-587, 2010.
12. Zuo, M., Dai, G., Peng, L., & Wang, M., An envelope curve-based theory for the satellite coverage problems, Aerospace Science and Technology, 100, 105750, 2020.
13. Yang, C., & Zhou, Q., A Fast Algorithm for Solving Satellite Swing Angle, Chinese Control Conference (CCC), 6281-6285, 2019.
14. Ibrahim, M., Zahara, M., Emam, A., & Elghany, M. A., Evaluation of Orbit Determination Using Dual Ranging Method, WSEAS International Conferences, 2007.
15. Abacı H., Uydu Yörünge Kestirimi ve Yörünge Benzetimi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2008.

