

İYONOSFER TEİ VERİLERİNİN UZAY-ZAMANSAL ARADEĞERLEMESİ

SPATIO-TEMPORAL INTERPOLATION OF IONOSPHERIC TEC DATA

Aykut Yıldız, Orhan Arıkan

Feza Arıkan

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Bilkent Üniversitesi
ayildiz, oarikan@ee.bilkent.edu.tr

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Hacettepe Üniversitesi
arikan@hacettepe.edu.tr

ÖZETÇE

GPS sinyalleri iyonosferdeki elektron yoğunluğunun kestirilmesi için önemli bir bilgi kaynağıdır. Ancak, GPS alıcılarında sinyallerin kaydedilemediği durumlar olmaktadır. Bu kesinti sırasında iyonosfer elektron içeriğinin kestiriminin yapılabilmesi için kesinti süreleri içinde kalan verilerin aradeğerleme ile kestirimi gereklidir. Bu çalışmada, bir GPS ağındaki ölçümlerin uzay-zamansal ilintileri kullanılarak yeni bir aradeğerleme tekniği geliştirilmiştir. Gerçek veriye dayalı sonuçlar, geliştirilen tekniğin yüksek başarılı kestirimler ürettiğini göstermiştir.

ABSTRACT

GPS signals are crucial, because they are used to estimate the electron density in the ionosphere. However, sometimes GPS receivers can not receive signals. In order to estimate ionospheric electron density during this cutoff, the interpolation of the data is necessary. In this paper, a new interpolation scheme that uses spatio-temporal correlation in the GPS network is proposed. The simulation results on real data show that the proposed technique produces promising results.

1. GİRİŞ

Atmosferin yaklaşık 80km yüksekliğinden başlayan ve 1200km'ye kadar yükselen iyonosfer tabakası zaman ve uzayda değişiklik gösteren dinamik bir iyon dağılımına sahiptir [1], [2]. İyonosferin HF iletişimi için uygun bir kanal olması çok önemli uygulamaların hayata geçmesini sağlamıştır. Modern iletişim ihtiyaçlarının gereği olan yüksek kapasitelere erişim iyonosferin gerçek zamanda izlenmesini ve bu izleme sonucunda kullanılması gereken frekans bölgelerinin alıcı/verici pozisyonlarına uygun olarak belirlenmesini gerektirmektedir [3], [4].

Gerçek zamanlı olarak yer belirleme ve rota takip sistemleri GPS alıcılarını kullanmaktadır. Bu alıcılara ulaşan sinyaller iyonosferden geçerken kırılmakta ve faz kaymasına uğramaktadır. Yüksek hassasiyet gerektiren uygulamalarda iyonosfer kaynaklı bu etkilerin düzeltilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, iletişim sistemlerinde olduğu gibi, iyonosferin gerçek zamanda gözlenmesi gerekmektedir [2], [3], [4], [5].

İyonosferin çok yüksek bir irtifa aralığında olması iyonosferdeki iyon dağılımının kısa zaman aralıklarıyla geniş bir

coğrafi bölgede doğrudan ölçülmesini imkansız kılmaktadır. Bu nedenle iyonosferin gözlenme ihtiyacı dolaylı ölçümlerle yapılmaktadır. Bu amaçla kullanılan en etkin yöntemlerden birisi hassas GPS alıcılarındaki ham veriler üzerinde iyonosfer kaynaklı faz kaymalarının tespitine dayanmaktadır. GPS uydusundan GPS alıcısına ulaşan sinyaller arasındaki faz kayması, uydu-alıcı arasındaki yol üzerindeki toplam iyon sayısı ile ilintilidir [2], [3]. Bu fiziksel bağıntı kullanılarak ölçülen faz farklarından uydu-alıcı arasındaki Toplam Elektron İçeriği (TEİ) kestirimleri elde edilir. Bir GPS ağındaki tüm alıcılar ve her an görülebilen en az 4 GPS uydusu sayesinde, geniş bir coğrafi bölge üzerinde yer alan iyonosferin çeşitli noktalarında TEİ kestirimleri elde edilmiştir [1], [2], [3], [4], [6].

Türkiye'nin bu amaçla kullanılacak çok güçlü bir ölçüm altyapısı bulunmaktadır. Şekil 1'de gösterilen TUSAGA-aktif ölçüm ağı sayesinde yaklaşık 80km×80km aralıklarla yerleştirilmiş 147 istasyonda gerçek zamanla TEİ kestirimleri elde edilmektedir [1], [3], [5]. Bu kestirimlerin birlikte değerlendirilmesiyle yurdumuz üzerinde TEİ haritaları elde edilmektedir [1], [2], [3]. Bir örneği Şekil 3'de gösterilen bu TEİ haritaları iletişim ve pozisyon belirleme ihtiyaçlarına karşılık verebilecek gerçek zamanlı bilgi üretmektedir. Bu haritaların kesintisiz olarak yenilenmesi, GPS istasyonlarında yapılan ölçümlerde oluşabilecek boşlukların aradeğerlemesiyle doldurulmasını gerektirmektedir. Şekil 2'de TUSAGA-aktif ağında 2009 yılında oluşan boşlukların sürelerinin dağılımı verilmiştir. Bu dağılımdan gözüktüğü gibi boşlukların %90'ı 40 dakikadan kısa olmasına rağmen, oldukça uzun süreli boşluklar da bulunmaktadır. Bu çalışmada GPS istasyonlarında elde edilen TEİ verilerinin uzay-zamansal aradeğerlemesini yaparak kesintisiz TEİ haritalarının oluşmasını sağlayan gerçek zamanda kullanılacak bir teknik geliştirilmiştir.

TEİ verileri zaman ve uzayda ilintili bir yapıdadır. Şekil 4'te bir istasyonda ölçülen TEİ verisinin bir gün içinde değişimine bir örnek verilmiştir. Görüldüğü gibi TEİ verilerinin zamansal ilintisi kısa süreli boşlukların kolaylıkla var olan diğer verilerden doldurulmasını sağlamaktadır. Ancak uzun süreli boşluklar bu şekilde güvenilir biçimde doldurulamamaktadır. Bu durumda TEİ ölçümlerindeki uzaysal ilintinin kullanılması gereklidir. Şekil 3'de gösterilen TEİ haritasında bu ilintinin özellikle birbirlerine 200km'ye kadar yakın olan istasyonlarda önemli seviyede olduğu gözlenmektedir.

Tablo 1: İstasyonların optimal doğrusal kombinasyon katsayıları

Mersin	Kilis	Antep
0.3531	0.3023	0.2907

$$\hat{\mathbf{X}}_{j,u,z} = \mathbf{D}\hat{\mathbf{X}}_{j,u} + (\mathbf{I} - \mathbf{D})\hat{\mathbf{X}}_{j,z} \quad (6)$$

$$\mathbf{D}^* = \underset{\mathbf{D}}{\operatorname{argmin}} \sum_{m=1}^{G_s} \left\| \mathbf{x}_{j,I}^m - \left(\mathbf{D}\hat{\mathbf{X}}_{j,u}^m(\alpha^*) + (\mathbf{I} - \mathbf{D})\hat{\mathbf{X}}_{j,z}^m \right) \right\|^2 \quad (7)$$

Bu optimizasyon problemini çözülebilir hale getirmek için Dnk. 9'de görüldüğü gibi \mathbf{D} matrisi $\check{\mathbf{D}}$ vektörüne dönüştürülürken $\hat{\mathbf{X}}$ vektörleri ise $\check{\mathbf{X}}$ köşegen matrislerine dönüştürülür.

$$\mathbf{D}\hat{\mathbf{X}}_{j,u}(\alpha^*) + (\mathbf{I} - \mathbf{D})\hat{\mathbf{X}}_{j,z} = \check{\mathbf{X}}_{j,u}(\alpha^*)\check{\mathbf{D}} + \check{\mathbf{X}}_{j,z}(\mathbf{1} - \check{\mathbf{D}}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \operatorname{Diag}(\check{D}_1, \check{D}_2, \dots, \check{D}_N) \\ \check{\mathbf{X}}_{j,u}(\alpha^*) &= \operatorname{Diag}(\hat{X}_{j,u}^1(\alpha^*), \hat{X}_{j,u}^2(\alpha^*), \dots, \hat{X}_{j,u}^N(\alpha^*)) \\ \check{\mathbf{X}}_{j,z} &= \operatorname{Diag}(\hat{X}_{j,z}^1, \hat{X}_{j,z}^2, \dots, \hat{X}_{j,z}^N) \end{aligned} \quad (9)$$

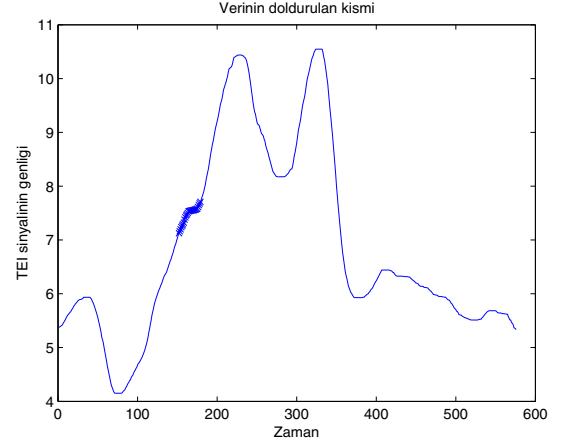
$$\begin{aligned} \mathbf{A}^m &= \check{\mathbf{X}}_{j,z}^m - \check{\mathbf{X}}_{j,u}^m(\alpha^*) \\ \mathbf{b}^m &= \check{\mathbf{X}}_{j,z}^m \cdot \mathbf{1} - \mathbf{x}_j^m \end{aligned} \quad (10)$$

Dnk. 9'daki dönüşümlerden sonra Dnk.7'in çözümü yine Dnk.3'daki gibi elde edilir. Burada kullanılan \mathbf{A}_m ve \mathbf{b}_m parametreleri Dnk.10'daki gibi seçilir. Bu şekilde elde edilen D^* vektörü optimaldir ve önceden hesaplanmış uzaysal aradeğerlemenin ve zamansal aradeğerlemenin birleştirilmesi amacıyla kullanılır.

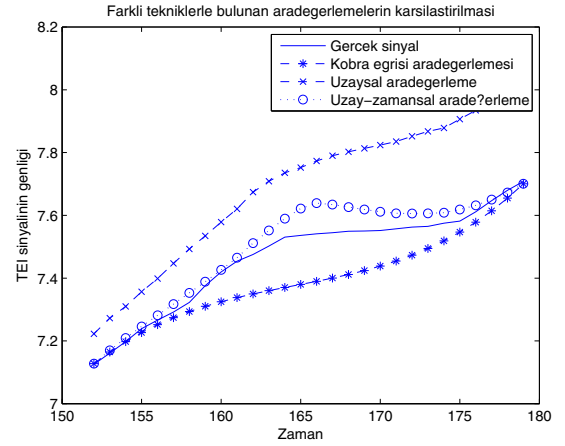
3. Deney sonuçları ve başarımların analizi

Bu bölümde uzay-zamansal aradeğerlemenin sadece uzaysal ve sadece zamansal aradeğerleme teknikleriyle karşılaştırılması yapılacaktır. Bu karşılaştırılmanın yapılabilmesi için aradeğerleme yapılan sinyal kısmının bilinmesi gerekir. Bu yüzden Şekil 4'da gösterilen boşluk içermeyen bir TEI verisi örneği alınarak bu verinin işaretli kısmı atılmıştır. Aradeğerleme algoritmamıza girdi olarak verilen bu veri 1 Ağustos 2009 tarihinde Adana'da ölçülen Tusaga-Aktif verisidir.

Uzaysal aradeğerlemenin ilk aşaması olarak optimal α katsayılarının bulunması gerekmektedir. Bu katsayılara sahip çevre istasyonlar olarak Mersin, Antep ve Kilis tercih edilmiştir. Katsayıların eğitilmesi için aradeğerleme tarihine yakın $G_s = 10$ gün seçilmiştir. Bu parametre seçimleri altında Dnk. 3'daki kapalı biçim formülü kullanılarak Tablo 1'te gösterilen katsayılar elde edilmiştir.



Şekil 4: 1 Ağustos 2009 tarihinde Adana'da ölçülen TEI verisi ve atılan kısmı



Şekil 5: Farklı tekniklerle elde edilen aradeğer sinyalleri

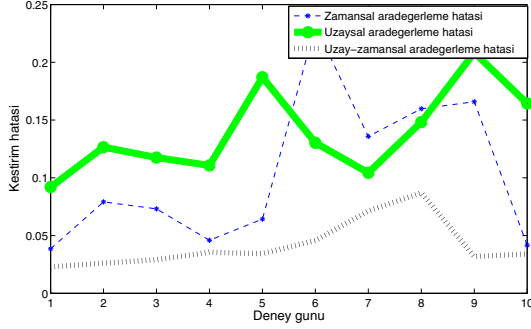
Uzaysal aradeğerlemeyle, zamansal aradeğerlemeyle ve bu ikisinin kombinasyonu ile elde edilen sinyaller Şekil 5'ta gösterilmiştir. Burada, zaman aradeğerlemesinin uç noktalarda daha iyi performans sergilediğini göstermektedir. Bu nedenle uç noktalarda uzay-zamansal aradeğerleme zaman aradeğerlemesine daha yakın bir görünüm arz etmektedir. Orta noktalarda ise uzaysal aradeğerleme eğrisi de sonuca etki ederek sonucu iyileştirmektedir. Söz konusu üç aradeğerleme tekniğinin hata değerleri Dnk.11'deki gibi hesaplanır ve elde edilen hata değerleri Tablo 2'te gösterilmektedir. Bu tabloda uzay-zamansal aradeğerlemenin yüksek başarıma sahip olduğu gözlemlenmektedir.

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{n=0}^{N-1} |\mathbf{X}_j^m - \hat{\mathbf{X}}_j^m|^2}{N}} \quad (11)$$

Elde edilen aynı α^* ve D^* parametreleri kullanılarak yapılan bir başarımların analizi Şekil 6'ta gösterilmektedir. Bu teknikte bir önceki deneye yakın olmak suretiyle seçilen

Tablo 2: Üç farklı aradeğerleme tekniğinin hata performansı

Uzaysal aradeğerleme hatası	Zamansal aradeğerleme hatası	Uzay-zamansal aradeğerleme hatası
0.2291	0.0889	0.0439



Şekil 6: 10 farklı gün için hata performansı

10 gün için Adana verisi üzerinde aynı saat aralığı atılarak aradeğerleme yapılmış ve hata başarımları karşılaştırılmıştır. Burada uzaysal aradeğerlemenin her gün belirli bir başarımların artışı sağladığı gözlemlenmektedir.

4. Sonuçlar

Bu makalede zamansal ve uzaysal aradeğerlemeler birleştirilerek elde edilen uzay-zamansal aradeğerleme tekniği sunulmuştur. Krig tabanlı uzay aradeğerlemesinin ve Kobra zamansal aradeğerlemesinin optimal bir kombinasyonla birleştirilmesiyle elde edilen tekniğin başarımlarını yüksek ve gürbüz bir teknik olduğu ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bir parametre eğitim sürecinden sonra aradeğerlemenin yapılması son derece hızlı bir şekilde uygulanabilmektedir. Buna ek olarak, teknik hem kısa veri boşluklarının hem de uzun veri boşluklarının doldurulmasında kullanılabilir. Bu iyi nitelikleriyle ön plana çıkan tekniğin TUSAGA-aktif verilerine uygulanması için eğitilen parametrelerin zamana ve uzaya karşı bağımlılığı incelenecektir.

Teşekkür

Bu çalışma, TUBITAK EEEAG 109E055 numaralı proje tarafından desteklenmiştir.

5. KAYNAKÇA

- [1] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data" Journal of Geophysical Research-Space Physics, 108(A12), 1469-1480, 2003.
- [2] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., "Regularized esti-

mation of VTEC from GPS data for a desired time period" Radio Science, 39(6), RS6012, 2004.

- [3] Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., "Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model" Advances in Space Research, doi:10.1016/j.asr.2007.01.082, 39, 867-874, 2007.
- [4] Nayir, H., Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O., "Total Electron Content Estimation with Reg-Est", J. Geophys. Res., 112, A11313, 1-11, 2007.
- [5] Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U., and Arikan, O., "Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC", Radio Sci., 43, RS4004, 1-13, 2008.
- [6] Erturk, O., Arikan, O. and Arikan, F., "Tomographic Reconstruction of the Ionospheric Electron Density as a Function of Space and Time", Adv. Space Res., 43, 1702-1710, 2009.
- [7] Gulyaeva, T.L., Arikan, F. and Delay, S.H., "Scale Factor Mitigating Non-Compliance of Double Frequency Altimeter Measurements of the Ionospheric Electron Content over the Oceans with GPS-TEC Maps", Earth, Planets and Space, 61, 1103-1109, 2009.
- [8] Sayin, I., Arikan, F., and Arikan, O., "Regional TEC Mapping with Random Field Priors and Kriging", Radio Sci., 43, RS5012, 1-14, 2008.
- [9] Sayin, I., Arikan, F., Arikan, O. "Synthetic TEC Mapping with Ordinary and Universal Kriging", Proceedings of RAST-2007, Recent Advances in Space Research, Harbiye Askeri Muze, Hava Harb Okulu, Istanbul, 14 - 16 Haziran 2007.
- [10] Sayin, I., Arikan, F., Arikan, O. "Regional Space-Time Interpolation of GPS-TEC with Kriging", Abstracts Booklet of IRI/COST 296-2007, Institute of Atmospheric Physics, Prag, Cek Cumhuriyeti, 10 - 14 Temmuz 2007.
- [11] Sayin, I., Yilmaz, A., Arikan, F., Gurun, M., O. Arikan, "Comparison of Kriging, Random Field Priors and Neural Network on Synthetic TEC Data", (Ingilizce) Turkish National Geodetic Commission, Turkiye Ulusal Jeodezi Komisyonu (TUJK) Scientific Meeting 2007 on Monitoring and Modeling of the Ionosphere and Troposphere, ODTU, Ankara, 14-16 Kasim 2007.
- [12] Sayin, I., Arikan, F., Gulyaeva, T., "Regional Mapping of Total Electron Content with Kriging and Random Field Priors", (Ingilizce) IV. Atmosfer Bilimleri Sempozyumu AT-MOS'2008 Bildiriler Kitabı, ITU, Maslak Istanbul, 25-28 Mart 2008, pp: 224-232.