

Gerçek Zamanlı PPP Servisleri ve Sayısal Hava Tahmin Modelleri ile Atmosferdeki Su Buharı Değişimlerinin İzlenmesi

Engin Tunalı¹

¹ Hacettepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 06800, Ankara.

Özet

Küresel Konum Belirleme Sistemleri (GNSS) gözlemleri ile atmosferdeki meteorolojik olayların temelini oluşturan su buharı değişimlerinin izlenmesi 1990'lı yılların başından beri yaygın olarak kullanılan yaklaşımlardan biridir. Yakın tarihe kadar post-process ya da yakın gerçek zaman (near real-time) GNSS çözümleri ile yürütülen çalışmalar özellikle 2013 yılından sonra Uluslararası GNSS Servisi - Gerçek Zamanlı Konum Servisinin (IGS - RTS) de devreye girmesiyle gerçek zamanlı su buharı değişimlerinin izlenmesi ve ani hava değişimlerinin gerçek zamanlı tahmin edilebilmesi alanlarına yönelmiştir. Bu çalışmada, gerçek zamanlı hassas konum belirleme (Real - Time PPP) ile kestirilen yoğunlaşabilir su buharının (Precipitable Water Vapor (PWV)) olağanüstü hava koşulları altındaki değişimleri Avrupa bölgesinde bulunan 11 IGS istasyonunda 3 haftalık PPP çözümleri ile izlenmiştir. Her bir PPP çözümü farklı bir sayısal hava tahmin modeli ile gerçekleştirilmiş ve elde edilen gerçek zamanlı su buharı değerleri, post-process PPP ve radyosonda verileri ile kıyaslanmıştır. Kıyaslama sonucunda farklı sayısal hava tahmin modellerini kullanan RT PPP ile post-process PPP çözümleri arasında ortalama -0.60 mm ile 0.35 mm aralığında değişen su buharı kestirim farkları gözlemlenmiştir. Farkların RMS değerleri ise 1.40 mm ile 2.30 mm aralığındadır. Radyosonda verileri ile yapılan karşılaştırmalarda ise su buharı farklarının standart sapmalarının 4.55 mm'yi aşmadığı belirlenmiştir. Sonuç olarak PPP ile yürütülen gerçek zamanlı hava tahmin çalışmalarında doğruluğu yükseltmek için uydu yörünge ve saat seçimi ile birlikte atmosferi modellemekte kullanılan meteorolojik verinin kaynağı da belirleyici olmaktadır.

Anahtar Sözcükler

Gerçek zamanlı PPP, IGS RTS, ıslak troposfer gecikmesi, sayısal hava tahmin modelleri, yoğunlaşabilir su buharı.

Monitoring Atmospheric Water Vapor Variations with Real-time PPP Services and Numerical Weather Prediction Models.

Abstract

Water vapor variations, which are significant for understanding the basics of meteorological events, have been monitored with Global Navigation Satellite Systems (GNSS) observations since the beginning of the 1990s. The studies that have been carried out until recently with post-process or near real-time GNSS solutions have dramatically turned to real-time water vapor monitoring applications after the advent of International GNSS Service – Real Time Service (IGS - RTS) in 2013. In this study, real-time precise point positioning (RT PPP) derived precipitable water vapor (PWV) variations were monitored under extreme weather conditions at 11 IGS sites located within the area in the Central Europe. Each RT PPP solution was performed with different numerical weather prediction (NWP) model and the PWV results were compared with the post-process PWVs and co-located radiosonde data. The mean PWV differences between the post-process and the RT PPP solutions were found to be in the range between -0.60 mm and 0.35 mm while the mean RMS values of the differences were 1.40 - 2.30 mm. The validation with the radiosonde data showed that an accuracy within 4.55 mm is achievable for RT PPP. These results imply that the weather monitoring performance of a RT PPP depends on a priori NWP model as well.

Keywords

Real-time PPP, IGS RTS, zenith wet delay, numerical weather prediction models, precipitable water vapor.

1. Giriş

Küresel Konum Belirleme Sistemleri (GNSS) gözlemleri 1990'lı yılların başından itibaren alçak atmosfer (troposfer) izleme çalışmalarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Bevis ve diğ. (1992) ile başlayan ilk çalışmalar Rocken vd. (1997), Tregoning vd. (1998), ve Hagemann vd. (2003) ile devam etmiştir. Zaman içinde “GNSS Meteorolojisi” adını alan bu çalışmaların temel hedefi: zamansal ve konumsal değişkenliği yüksek olan ve meteorolojik olayların temelini oluşturan atmosferik su buharı miktarını yaklaşık olarak tespit edebilmektir. Atmosferik yoğunlaşabilir su buharı ile aralarındaki yüksek korelasyon nedeniyle ıslak troposfer gecikmesi (ZWD) GNSS meteorolojisi için önemli bir parametredir. Yakın geçmişe kadar yürütülen GNSS ile atmosfer izleme çalışmalarının ortak özelliği genellikle post process ağ çözümleri olmalarıdır. PPP ile testler post-process olarak Zumberge vd. (1997), Kouba ve Heroux (2001) tarafından hassas uydu yörünge ve saat verileri ile gerçekleştirilmiş olup kestirilen zwd parametreleri daha sonra PWV değerlerine dönüştürülmüştür. International GNSS Service (IGS) bir önceki günün verilerine dayanarak ekstrapolasyonla üretilmiş hassas uydu yörünge ve saat verilerini

* Sorumlu Yazar E-posta: etunali@hacettepe.edu.tr (Engin Tunalı)

“Ultra-rapid predicted” ürün paketi içinde ve her 6 saatte bir yayınlamaktadır. Ancak 15 dakika zamansal çözünürlüğe sahip uydu saatleri gerçek zamanlı troposfer kestirimlerinde istenen doğruluğa ulaşmayı engellemektedir. IGS Gerçek Zaman Pilot Projesi (Real-time Pilot Project – IGS RTTP) kapsamında 2013 Nisan ayından itibaren PPP kullanıcılarına gerçek zamanlı uydu yörünge ve saat verileri Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) protokolleri üzerinden State Space Representation / Radio Technical Commission for Maritime Services (SSR / RTCM) formatında sağlanmaktadır. Kullanıcılar da BNC (Weber vd. 2016) , RTKLIB (Takasu vd. 2009) gibi istemci – sunucu mimarisine uygun tasarlanmış yazılımlar ile gerçek zamanlı PPP uygulamalarını yürütebilmektedir.

1.1 PPP Matematiksel Model

PPP gözlem denklemleri iyonosferin 1.mertebeden gecikme etkisini giderebilmek için faz ve kod gözlemlerinin iyonosfer bağımsız lineer kombinasyonlarını kullanmaktadır. Bunun ile birlikte anten faz kayıklığı ve değişimleri, wind-up, katı-yer gelgitleri, okyanus yüklemeleri, görecelilik etkisi ve multipath vb. hata kaynaklarının da uygun modeller ile etkileri denklemlerden çıkarılırsa meteorolojik çalışmalarda kullanabileceğimiz, Kouba vd. (2001) tarafından da ifade edilen en temel PPP denklem eşitliklerini elde ederiz.

$$L = \rho + c(dt - DT) + T_r + \varepsilon_\phi \quad (1)$$

$$P = \rho + c(dt - DT) + T_r + N\lambda + \varepsilon_p \quad (2)$$

Burada, L ve P sırasıyla iyonosfer bağımsız lineer kombinasyonların faz ve kod gözlem denklemleri, ρ uydu ve alıcı arasındaki geometrik mesafe, dt ve DT sırasıyla alıcı ve uydu saati için GPS zamanından olan sapma; c , ışığın boşluktaki hızı; T_r toplam troposfer yolu gecikmesi; λ iyonosfer bağımsız faz gözleminin dalga boyu; ε_ϕ ve ε_p iyonosfer bağımsız faz ve kod gözlemlerinin gürültüleri ve N iyonosfer bağımsız faz gözlemlerinin tamsayı belirsizliğidir.

1.2 Troposfer Gecikme Modeli

Denklemlerde ifade edilen toplam troposfer yolu gecikmesi, zenit kuru gecikme (ZHD) ve ZWD ile her bir gecikmenin ilgili izdüşüm fonksiyonu (mf_h ve mf_w) ve yatay gradyanların (G_n ve G_e) dikkate alınmasıyla hesaplanır. Dach vd. (2007) toplam troposferik gecikmeyi aşağıdaki gibi ifade etmişlerdir.

$$T_r = mf_h \cdot zhd + mf_w \cdot (zwd + [G_n \cdot \cos(\alpha) + G_e \cdot \sin(\alpha)]) \quad (3)$$

Toplam gecikmenin yüzde 90' ına karşılık ZHD genellikle oturumun gerçekleştiği bölgede ölçülmüş basınç değerleri ve Saastamoinen (1972) modeli ile hesaplanır. Öncül ZHD değeri modelde ne kadar doğru hesaplanırsa çözümde kestirilen ZWD değeri o kadar gerçeğe yakın elde edilir. Eğer bölgede meteorolojik veri kaynağı yoksa sayısal atmosfer modelleri (NWM) ya da sayısal hava tahmin modelleri (NWP) vasıtasıyla bu veriler ilgili konum için ara değer hesabıyla türetilir. Küresel harmonik Global Pressure and Temperature (GPT ve GPT2) (Bohm vd. 2006) ve taramalı tablo yapısında University of New Brunswick model (UNB3m) (Leandro, 2009) en çok kullanılan deneysel tahmin modelleridir. Altı saatte bir güncellenen Avrupa Orta Menzilli Hava Tahmin Merkezi (European Center for Medium Range Weather Forecasting – ECMWF) (Bohm vd. 2004) sayısal hava modeli de öncül troposfer gecikmelerini sağlamaktadır. PPP ile kestirilen ZWD değerleri su buharına aşağıdaki eşitliği kullanarak dönüştürülebilir.

$$PWV = ZWD \cdot \Pi \quad (4)$$

ZWD ve PWV arasındaki orantıyı temsil eden ve sabit bir büyüklük olan Π Bevis vd. (1994) tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$\Pi = \frac{10^{-6} M_w}{\rho R \left(k_2 - k_1 \frac{M_w}{M_d} + \frac{k_3}{T_m} \right)} \quad (5)$$

M_w ve M_d , sırasıyla su buharı ve kuru havanın molar kütleleri; R , Uluslararası gaz sabiti; T_m , ağırlıklı ortalama su buharı sıcaklığı ve k_1 , k_2 ve k_3 deneysel türetilmiş kırılma sabitleridir.

1.3 Gerçek Zamanlı Servisler: Troposfer Modelleme

IGS RTS birden çok analiz merkezinden elde ettiği uydu yörünge ve saat düzeltmelerini RTCM / SSR formatında kullanıcının yayın efemerisine (broadcast) gerçek zamanlı olarak NTRIP protokolleri vasıtasıyla sağlamaktadır. Düzeltmeler, Global Positioning System (GPS), Global Navigational Satellite System (GLONASS) ve diğer uydu sistemlerine ait uyduları kapsama durumuna bağlı olarak farklı ürün isimleri ile anılmaktadır (örn., GPS: IGS01, GPS+GLONASS: IGS03). Bu düzeltmeler daha sonra BNC vb. aracı arayüzlerde Kalman filtresine sokularak ilgili istasyonda koordinat, alıcı saat düzeltmesi, troposfer ve tamsayı belirsizliği kestirimi yapılabilmektedir. BNC (v.2.13) ile yürütülen PPP algoritmalarında troposfer modeli çok basit bir yaklaşımla ele alınmaktadır. Toplam troposfer yolu gecikmesi, standart atmosferik verilere göre Saastamoinen (1972) ile hesaplanan zenit yolu troposfer gecikmesi ile ZHD ve ZWD izdüşüm fonksiyonlarının birleştirildiği tek bir izdüşüm fonksiyonunun (mf_t) çarpılması sonucu elde edilir.

$$T_r = ZTD \cdot mf_t \quad (6)$$

Burada mf_t , sinyalin yükselim açısına göre değişkenlik göstermektedir.

$$mf_t = 1/\sin(e) \quad (7)$$

Bu eşitlikler atmosferdeki gerçek zamanlı su buharı hareketlerini izlemeyi ve hava tahmin çalışmalarına altlık oluşturacak troposfer gecikmelerini elde etmeyi amaçlayan kullanıcılara istenilen doğrulukta sonuçlar sağlamamaktadır. Bu sebeple IGS RTS tarafından sağlanan ürünlerinin daha gelişmiş bir troposfer model yaklaşımı ile test edilmesi ve sonuçların karşılaştırılması ihtiyacı doğmuştur.

2.Yöntem

Bu çalışma ile IGS RTS tarafından sağlanan gerçek zamanlı yörünge ve saat düzeltmelerinin troposferi modellemek için yeterli doğrulukta olup olmadığı sınanmıştır. Bunun için IGS gerçek zamanlı SSR ürünlerinden "IGS01", "IGS03", "CLK10" ve "CLK11" ürün sınıfında yayınlanan düzeltmeler BNC v.2.13 ortamında bu ürünlere tanımlanan ağırlıklarla orantılı olarak birleştirilerek tek bir düzeltme dosyası oluşturulmuş ve yayın efemerisine eklenmiştir. Düzeltmelerin getirilmesiyle elimizde BNC' den bağımsız, herhangi bir platformda kullanabileceğimiz, Uluslararası Dünya Dönme ve Referans Sistemleri Servisi (IERS)ve IGS standartlarına uygun hassas uydu yörünge (*.sp3) ve saat (*.clk) ürünleri elde edilmiştir. Ürünler daha sonra BERNESE v.5.2 (Dach vd. 2015) ortamında, BNC ile çözümde dikkate alınmayan hata kaynaklarının, jeofiziksel modellerin ve farklı sayısal hava tahmin modellerinin (örn., gpt, gpt2, unb, ecmwf) matematiksel modele eklenmesi ile RT PPP çözümlerinde kullanılmıştır. Tablo 1'de belirtilen Orta Avrupa merkezli 6 IGS istasyonunda meydana gelen ani hava değişimleri 20 Mayıs – 10 Haziran 2013 tarihleri arasında RT PPP gözlemleri ile izlenmiştir. Kestirimler sonucu elde edilen RT PPP PWV değerleri yakın konumlu radyasonda verileri ve IGS final uydu yörünge ve saat ürünlerini kullanan post-process PPP çözümleri ile karşılaştırılmıştır.

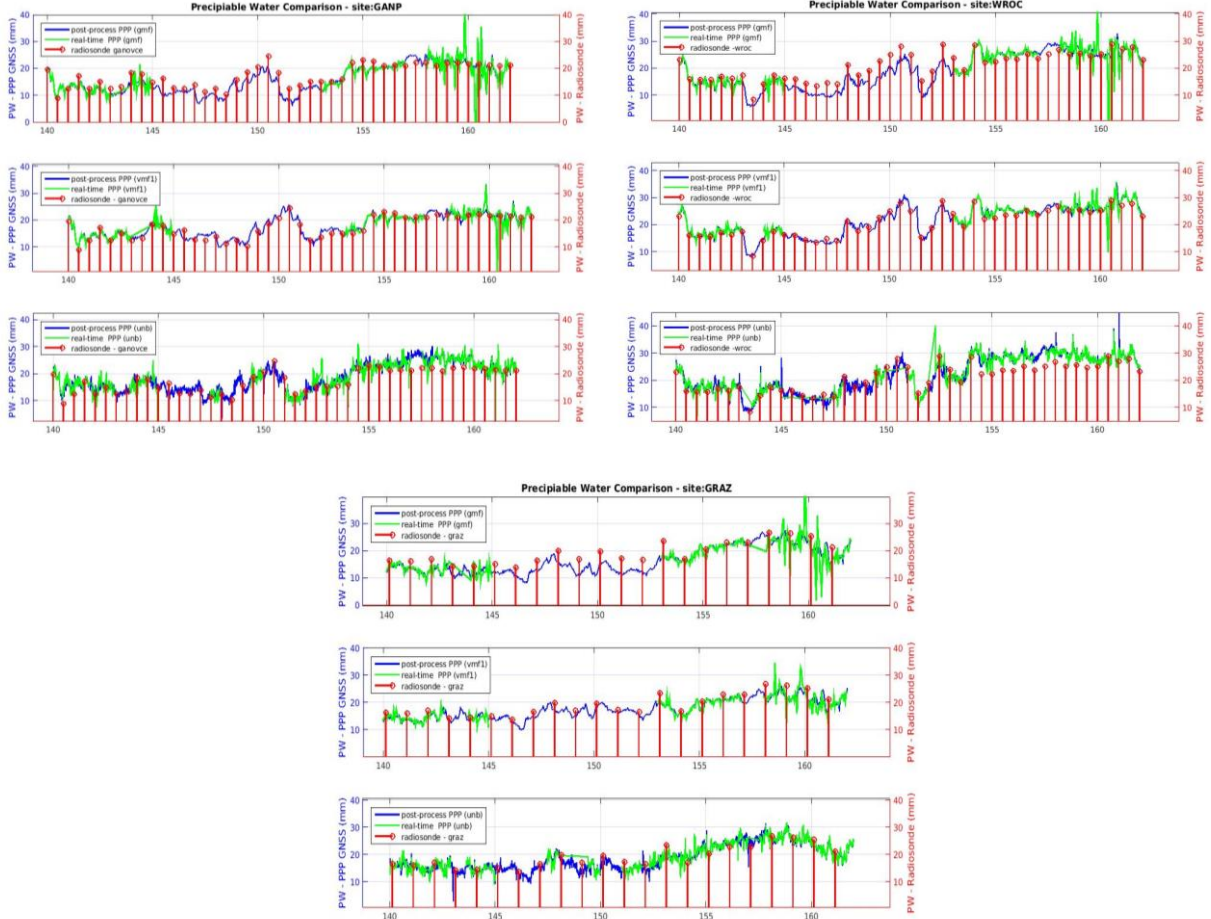
Tablo 1:Karşılaştırmada kullanılan IGS ve Radyosonda istasyonları

igs				radyosonda			
İst.	Enl.	Boy.	H	İst.	Enl.	Boy.	H
wroc	51.11	17.06	181.0	wroclac	51.11	16.88	119.6
ganp	49.03	20.32	745.2	ganovce	49.03	20.31	703.0
gope	49.91	14.78	592.6	praha	50.00	14.44	302.0
graz	47.06	15.49	538.3	graz	46.99	15.43	340.0
pots	52.37	13.06	144.4	lindenberg	52.21	14.11	112.0
zimm	46.87	7.46	956.7	payerne	46.81	6.94	490.0

3.Sonuç ve Öneriler

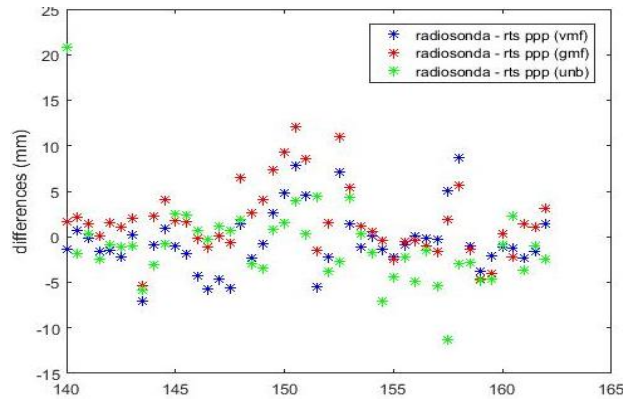
Bu çalışma ile IGS - RTS efemeris düzeltmelerini kullanarak elde ettiğimiz hassas yörünge ve saat verilerini çözümlerinde kullanılan RT PPP oturumlarının farklı atmosfer modelleri için ürettiği PWV kestirim değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 1'de görüldüğü üzere ECMWF / VMF1 troposfer model çiftini kullanan RT PPP çözümlerinin post-process PPP ve radyosonda

sonuçları ile en iyi uyumu gösterdiği gözlemlenmiştir. Buradan, ECMWF sayısal hava modelinden türetilen ZHD parametresinin ve ilgili izdüşüm fonksiyonu VMF1'in gerçek atmosfer koşullarını daha iyi yansıttığı sonucu çıkarılabilir. Deneysel modeller arasında GPT2 / GMF2 ile çözüm UN3m / Niell ile çözüme göre atmosfer değişimlerini daha iyi yansıtan sonuçlar vermiştir. Arazi koşullarında ECMWF meteorolojik verisine erişim belli bir gecikme ile sağlanabilmektedir. Gerçek zamanlı bir uygulama söz konusu olduğunda ve bölgede yersel meteorolojik verinin mevcut olmaması durumunda GPT2 / GMF2 modellerini çözüm denkleminde kullanan PPP çözümleri atmosferik değişimleri gözlemlemek için en uygun seçenek



Şekil 1: Farklı atmosfer modellerini (ecmwf / vmf1, gpt / gmf, unb3m / niell) kullanan rt PPP, post-process PPP ve radyosonda PWV karşılaştırması. Sol: ganp, orta: wroc, sağ: graz IGS istasyonu.

Kıyaslama sonucunda farklı sayısal hava tahmin modellerini kullanan RT PPP ile post-process PPP çözümleri arasında ortalama -0.60 mm ile 0.35 mm aralığında değişen su buharı kestirim farkları gözlemlenmiştir. Farkların RMS değerleri ise 1.40 mm ile 2.30 mm aralığındadır. Post-process çözümlere en yakın gerçek zamanlı çözümler gözlem denklemlerinde ECMWF / VMF1 model çiftini kullanan PPP oturumlarında gerçekleşmiştir.



Şekil 2: RT PPP – Radyosonda su buharı farkları: IGS "wroc" istasyonu.

Tablo 2: Radyasonda ile RT PPP PW değerleri arasında farkların istatistiksel özeti

Site	Ort. Fark (mm)			Std. Sapma (mm)		
	vmf	gmf	unb	vmf	gmf	unb
ganp	0.19	1.89	-0.41	2.91	3.43	4.38
gope	1.72	2.36	-0.15	3.42	4.10	4.01
graz	3.31	4.13	1.53	3.59	3.69	2.67
wroc	-0.45	1.69	-0.95	3.42	3.78	4.55
pots	1.83	3.03	0.09	3.86	3.55	3.87

Radyosonda verileri ile yapılan karşılaştırmalarda su buharı farklarının standart sapmalarının tablo 2'de ifade edildiği gibi 4.55 mm'yi (UNB / Niell) aşmadığı (ort fark: -0.45 ve 4.13 mm arasında) belirlenmiştir. Şekil 2'de IGS istasyonu "wroc" için verilen karşılaştırmada da ise radyasonda ile en büyük sapmalar ani su buharı değişimlerinin yaşandığı ve rekor yağmur değerlerinin kaydedildiği 2013 yılının 151, 152 ve 153'üncü günlerinde gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, PPP ile yürütülen gerçek zamanlı hava tahmin çalışmalarında doğruluğu yükseltmek için hassas uydu yörünge ve saat seçimi ile birlikte atmosferi modellemek için kullanılan öncül troposfer modeli, meteorolojik verinin kaynağı ve seçilen izdüşüm fonksiyonu da belirleyici olmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma "TUBİTAK 2214-A Yurt Dışı Sırası Araştırma Burs Programı" kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Bevis, M., S. Businger, T. Herring, C. Rocken, R. Anthes, and R. Ware (1992), GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using GPS, *J. Geophys. Res.*, 97, 15,787–15,801.
- Böhm, J., A. Niell, P. Tregoning, and H. Schuh (2006), Global mapping function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07304, doi:10.1029/2005GL025546.
- Böhm, J., Heinkelmann, R. & Schuh, H. (2007). Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, Vol. 81, pp. 679-683.
- Böhm, J., Möller, G., M. Schindelegger, G. Pain, R. Weber, 2015. Development of an improved blind model for slant delays in the troposphere (GPT2w), *GPS Solutions*.
- Collins, J.P. and R.B. Langley (1997). *Tropospheric delay model for the user of the wide area augmentation system*. Final contract report for Nav Canada, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 187, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., Canada
- Dach, R., S. Lutz, P. Walser, P. Fridez (Eds); 2015: Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, Universität of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9.
- Hagemann, S., L. Bengtsson, and G. Gendt (2003), On the determination of atmospheric water vapor from GPS measurements, *J. Geophys. Res.*, 108(21), 4678, doi:10.1029/2002JD003235.
- Kouba, J., and P. Heroux (2001), Precise point positioning using IGS orbit and clock products, *GPS Solut.*, 5(2), 12–28, doi:10.1007/PL00012883.
- Leandro, R.F., R.B. Langley and M.C. Santos (2007). "UNB3m_pack: A neutral atmosphere delay package for GNSS." *GPS Solutions*, Vol. 12, No. 1, pp. 65-70.
- Niell, A.E. (1996), Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research (B)*, 101, 3227–3246.
- Rocken, C., T. Van Hove, and R. Ware (1997), Near real-time sensing of atmospheric water vapor, *Geophys Res Lett*, 24, 3221–3224.
- Saastamoinen, J. (1972), Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, The use of artificial satellites for geodesy, *Geophys. Monogr. Ser.*, 15, 247–251.
- T.Takasu, RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS, FOSS4G 2009 Tokyo, Japan, November 2, 2009.

Tregoning, P., R. Boers, D. O'Brien, and M. Hendy (1998), Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations, *J. Geophys. Res.*, 103(D22), 28,701–28,710, doi:10.1029/98JD02516.

Weber, G., L. Mervart, A. Stürze, A. Rülke and D. Stöcker (2016):BKG ntrip client, version 2.12. mitteilungen des bundesamtes für kartographie und geodäsie, vol. 49, Frankfurt am main, 2016.