

실시간 응용을 위한 GPS 정밀 궤도력 결정

임형철[†], 박필호, 박종욱, 조정호, 안용원
한국천문연구원

PRECISE ORBIT DETERMINATION OF GPS SATELLITES FOR REAL TIME APPLICATIONS

Hyung-Chul Lim[†], Pil-Ho Park, Jong-Uk Park, Jung-Ho Cho, Yong-Won Ahn
GPS Research Group, Korea Astronomy Observatory
E-mail: hclim@kao.re.kr

(Received September 20, 2001; Accepted October 20, 2001)

요 약

GPS (Global Positioning System)를 이용한 정밀 응용분야에 있어 위성의 궤도력과 지구자전 상수 (Earth Orientation Parameter, EOP)의 정밀도는 매우 중요한 요소이다. 특히, GPS를 이용한 대기감시 등 신속한 정밀자료처리가 요구되는 응용분야는 실시간 또는 정밀하게 예측된 위성의 궤도력과 EOP를 필요로 한다. 이를 위해 IGS (International GPS Service)는 매일 3시, 15시(UTC)에 IGU (IGS Ultra Rapid Product)를 생성하여 서비스하고 있다. IGU는 48시간의 정밀 궤도력과 EOP로 구성되어 있는데, 처음 24시간은 관측한 데이터를 처리하여 산출하고 다음 24시간은 예측을 통해서 산출한 값으로 이루어져 있다. 본 논문에서는 독자적인 URP (Ultra Rapid Product)를 산출하기 위한 프로세싱 전략을 수립하고 타당성을 검증하였다. 이를 위해 32개 IGS 관측소의 48시간 관측 자료를 처리하여 URP를 산출하고, 그 결과를 IGS에서 제공하는 여러 정밀 궤도력 및 EOP와 비교하였다.

ABSTRACT

The accuracy of GPS applications is heavily dependent on the satellite ephemeris and earth orientation parameter. Specially applications like as the real time monitoring of troposphere and ionosphere require real time or predicted ephemeris and earth orientation parameter with very high quality. IGS is producing IGS ultra rapid product called IGU for real time applications which includes the information of ephemeris and earth orientation. IGU is being made available twice everyday at 3:00 and 15:00 UTC and covers 48 hours. The first 24 hours of it are based on actual GPS observations and the second 24 hours extrapolated. We will construct the processing strategy for yielding ultra rapid product and demonstrate the propriety through producing it using 48 hours data of 32 stations.

Key words: GPS, orbital determination, ultra rapid product

[†]corresponding author

표 1. IGS 궤도력*의 특징.

구분	방송력	IGP**	IGU	IGR	IGF
자연 주기	실시간	실시간	실시간	17시간 이후	13일 이후
생성 주기		매일	1일 2회	매일	주마다
정밀도	260cm	71cm	25cm	5cm	<5cm

*<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods.html>에 기초함.

**IGP 정밀도는 Springer & Hugentobler (2001)에 기초함.

1. 서 론

GPS를 이용한 실시간 응용분야는 꾸준히 증가하고 있다. 특히, GPS 관측소와 저궤도 위성에 탑재된 GPS 수신기의 데이터를 이용하여 대류층 및 이온층의 실시간 감시에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Springer & Hugentobler 2001). 이와 같은 실시간 정밀 응용연구에서 위성 궤도력과 EOP는 연구 결과에 영향을 미치는 중요한 요소로 실시간 또는 예측된 값으로 제공되어야 하고 높은 정밀도를 가져야 한다. GPS 위성은 방송궤도력이라 불리는 궤도 정보를 항법 메시지에 실어 실시간으로 송신하고 있지만 이는 오차가 큰 관계로 실시간 정밀 응용분야에 적용하기 어렵다. 한편 정밀한 궤도력과 EOP를 산출하기 위해서는 다수의 IGS 관측소 데이터를 처리해야 하는데, 처리 시간이 많이 소요되고 실시간으로 관측 데이터를 취득하기는 어렵다. 따라서 현재 시점까지 관측한 1일 이상의 IGS 관측소 데이터를 처리하여 48시간 중 일부는 궤도력과 EOP를 산출하고 나머지는 예측을 통해서 생성함으로써 실시간 응용분야에 활용 가능하다. IGS는 1990년대 중반부터 IGP (IGS Predicted Product)를 제공하여 왔다. IGP는 48시간의 궤도력과 EOP로 구성되어 있는데, 처음 12시간은 관측한 데이터를 처리하여 산출하고 다음 36시간은 예측을 통해서 산출한 값으로 이루어져 있다.

실시간 정밀 응용분야가 확대되고 정밀한 결과를 산출하기 위해 기존에 서비스하는 IGP보다 더 정밀한 실시간 궤도력과 EOP의 필요성이 요구되어 왔다. 1999년 La Jolla에서 열린 IGS 워크샵에서 공식 제기되어 이를 URP라 명명하였다 (Springer & Hugentobler 2001). 1999년 10월 GFZ (GeoForschungsZentrum Potsdam) 자료처리 센터에서 처음으로 URP를 산출하였으며, IGS는 2000년 5월부터 5개 자료처리센터 (Analysis Centers, ACs)에서 생성한 각 URP를 조합하여 생성한 IGU를 서비스하였다.

현재 IGS는 GPS 데이터의 고정밀 자료처리를 위해서 IGU 이외에 IGF (IGS Final Product)와 IGR (IGS Rapid Product)를 함께 서비스하고 있다. IGF와 IGR은 모두 관측 데이터를 처리하여 산출한 24시간의 궤도력과 EOP로 구성되어 있다. IGS의 모든 정밀 궤도력은 전세계 ACs에서 산출한 궤도력에 가중치를 부여하여 생성하는데 각각의 특징은 표 1과 같다.

IGU를 생성하기 위해 IGS 핵심 관측소를 비롯한 몇몇 관측소는 GPS 관측자료를 1시간 간격으로 IGS에 송부하는데, ACs는 이 데이터를 바탕으로 매일 2회 URP를 생성하여 IGS에 송부한다. IGS는 2시 55분, 14시 55분 UTC에 이들 결과값을 조합하여 48시간의 IGU를 생성한다. ACs에서 산출한 URP의 24시간 데이터는 관측 자료에 토대한 Fitting 기법, 다음 24시간은 모델링을 통한 예측으로 생성된다. IGU를 이용하면 대류층 천정지연 (Zenith Path Delay)을 7mm 정밀도로 산출할 수 있는데 이는 대류층 가감수량의 1mm에 해당된다 (Springer & Hugentobler 2001).

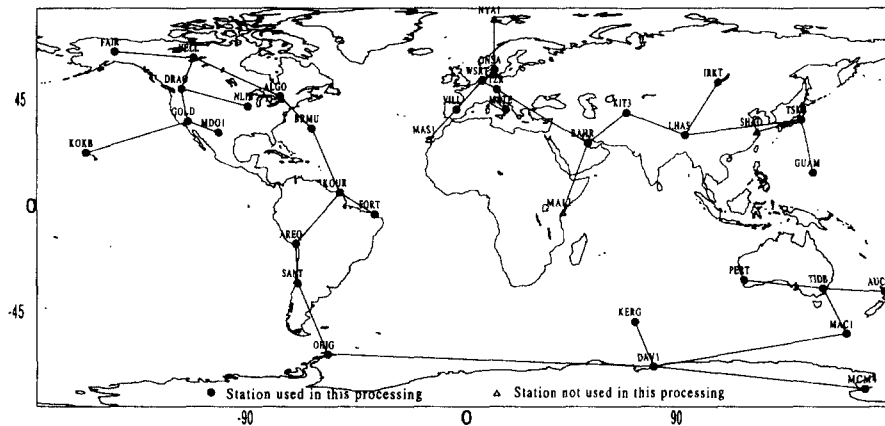


그림 1. URP 생성을 위해 사용한 GPS 관측소의 분포도.

국내의 경우 GPS를 이용한 실시간 대류층 및 이온층 연구가 미비한 반면, 국외에서는 이미 여러 기관에서 Bernese, Gipsy-Oasis와 같은 고정밀 자료처리 소프트웨어를 이용하여 시스템을 구축·운영하고 있다. 이러한 대류층 및 이온층 감시 등과 같은 정밀 자료처리 시스템을 구축하기 위해서 실시간 또는 예측된 정밀 궤도력과 EOP가 필요하므로 국외 여러 기관에서는 독자적 URP를 생성하거나 IGU를 활용한다. 그러나 국내에서는 URP를 산출하는 기술이나 관련 연구는 미비한 실정이다. 따라서 이 논문에서는 URP를 생성하는 자동 시스템을 구축하기 위한 처음 단계로 Bernese를 토대로 프로세싱 전략을 수립하여 ACs에 진출만한 정밀 궤도력 및 EOP를 산출하였다.

2. 프로세싱 전략

GPS 위성의 정밀 궤도를 결정하기 위해서는 자료처리에 사용되는 관측소의 위치가 지표상에 골고루 분포해야 하며 하루 이상의 관측 데이터를 이용하여야 한다 (Gurtner et al. 1989). 현재 200여 개의 관측소가 IGS 관측소로 활동 중에 있으나 매 시간 GPS 데이터를 송부하는 IGS 핵심 관측소 중 36개 관측소를 선택하고, 그림 1과 같이 단일 차분을 위한 기선거리를 5,000km 이하로 설정한다. 이러한 이유는 기선거리가 길수록 모호정수 결정률이 낮으며, 짧을수록 단일 차분을 형성하는 관측소의 수가 감소되어 전지구적 기선망을 구성하기 어렵기 때문이다. 각 관측소의 관측 자료는 RINEX (Receiver INdependent EXchange) 형식으로 제공되는데 URP를 산출하기 위해서 48시간의 RINEX 데이터를 이용하고, 관측소 좌표 등 자료처리에 필요한 초기값은 며칠 전의 RINEX 데이터를 처리하여 얻는다 (그림 2).

URP를 생성하기 위한 프로세싱 단계는 다음과 같다.

1. 관측 자료는 RINEX 형식으로 제공되는데, IGS로부터 36개 관측소에 대해 궤도 결정 기간의 24시간 데이터와 이전 24시간 데이터를 취득한다. 단, RINEX 데이터는 L1/L2의 의사거리 정보를 포함하여야 한다.
2. 자료 처리를 위한 초기값으로 전날 자료 처리하여 얻은 URP 또는 IGU의 궤도력과 EOP를 이

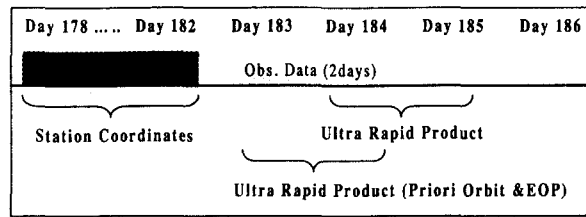


그림 2. Ultra Rapid Product 생성을 위한 관측 데이터 및 초기값.

표 2. 자료처리 전략.

Measurement Models	RHC phase rotation correction, Ground ant. phase center calibrations, Troposphere delay, Plate motions, Tidal displacements, Earth rotation, Satellite center of mass correction, Relativity corrections
Orbit Models	Geopotential(degree 12 and order 12), Sun and moon gravity, Solar radiation pressure and Y-bias, Tidal forces, Relativity
Estimated Parameters	Station coordinates, Satellite clock bias, Orbital parameters, Troposphere, Integer ambiguity, Earth orientation parameters
Reference Frame	J2000 (inertial), ITRF97 (terrestrial), TDT (terrestrial dynamic time)

용한다. 궤도 결정 기간 24시간의 초기값은 예측하여 얻은 궤도력과 EOP, 이전 24기간 데이터의 초기값은 Fitting하여 얻은 값을 사용한다.

3. 각 관측소의 좌표는 IGR 정밀 궤도력과 URP 결정 이전 5일간의 데이터를 처리하여 ITRF (International Terrestrial Reference Frame) 좌표로 결정하거나 IGS에서 제공하는 SINEX (Software INdependent EXchange) 파일을 이용한다.
4. 지정된 기선에 대해 RINEX 데이터를 단일 차분으로 형성하고, L1과 L2 주파수의 선형 조합으로 만든 L3 주파수를 이용해 Outlier와 Cycle slip을 제거한다.
5. 모호정수를 결정하기 위해서 이중 차분을 형성한다. 36개 관측소의 기선은 대부분 1,000km 이상이므로 QIF (Quasi-Ionosphere-Free) 방식을 이용한다. 모호정수를 결정하는 방법은 여러 가지가 있으나, 기선 길이가 2,000km 이상인 경우에는 QIF 방식이 가장 효과적이기 때문이다 (Hugentobler et al. 2001).
6. 최소 자승법을 이용하여 위성 궤도 요소, 관측소 좌표, 대류층 천정 지연, 지구 극운동 상수 등 여러 파라미터를 추정한다.
7. 추정된 위성 궤도와 EOP를 이용하여 48시간의 URP를 산출한다.

URP 궤도력과 EOP를 추정하기 위해서는 정밀한 위성 운동 및 관측 모델링을 적용하여야 한다. 또한 운동 방정식과 변화 방정식 (variation equation)을 수치적분하기 위해 Collocation method를 사용하였다 (Hugentobler et al. 2001). 표 2에는 URP 생성을 위해 사용한 모델링, 좌표계 및 추정 파라미터를 정리하였다.

위성 궤도에 영향을 미치는 여러 섭동 요소들은 정밀한 모델링이 이루어져 있다. 그러나 지구 비

표 3. 태양 복사압 모델의 정밀도.

모델	Fitting	Prediction	
	RMS (cm)	Median (cm)	RMS (cm)
ROCK (T20)	76	134	161
ROCK (T20 Scaled)	72	119	151
JPL Model (Scaled)	10	45	58
ECOM	5	17	22

주) Scaled: Direct solar radiation과 Y-bias를 고려.

대칭, 달, 태양의 중력에 이어 가장 큰 섭동 요소인 태양 복사압은 모델링이 어려워 모델링에 의한 오차도 크다. 현재 GPS 위성의 태양 복사압을 모델링하는데 기본적인 모델은 ROCK 모델이다 (Fliegel et al. 1992). 그러나 이 연구에서는 1994년 CODE (Center for Orbit Determination in Europe)에서 개발한 9개의 태양 복사압 파라미터를 갖는 ECOM (Extended CODE Orbit Model) 모델을 사용하였다 (Beutler et al. 1994). 표 3은 ROCK 모델을 포함한 여러 태양 복사압 모델을 사용하여 7일간의 Fitting과 2일간의 예측을 통해서 얻은 정밀도를 보여준다 (Springer 1999).

정밀한 궤도 운동을 모델링 하였다더라도 모델링 오차에 의한 조그마한 가속도가 위성에 작용한다 (Montenbruck & Gill 2000). 정밀한 궤도 결정을 수행하기 위해서는 이러한 미세한 가속도도 고려해 주어야 하므로 1일 2회 0시, 12시 (UTC)에 위성의 radial, along-track 방향으로 작용하는 펄스 형태의 가속도로 간주하여 모델링 하였다 (Springer et al. 1999). 펄스를 적용한 확률 궤도 파라미터 (Stochastic Orbit Parameter)는 궤도 요소를 추정할 때 다른 궤도 파라미터와 함께 결정하고, 궤도 예측 시에는 고려하지 않았다.

초기값으로 사용하는 모든 관측소의 관측 좌표는 모호정수를 결정할 때 고정 좌표로 설정하였다. 그러나 추정단계에서는 위치 성분 (x, y, z)이 각각 5mm 표준 편차를 가지도록 설정하였다. 그 이유는 동일한 조건에서 관측소 좌표의 1mm 표준 편차가 수 cm의 궤도력 차이로 나타났는데, 5mm 표준 편차를 적용하였을 때 산출한 URP와 IGF 궤도력의 차이가 가장 적었기 때문이다.

3. 궤도 결정 결과

2001년 7월 3일과 4일의 48시간 URP 궤도력과 EOP를 산출하기 위한 자료처리를 수행하였다. 프로세싱 전략에서 설정한 36개 IGS 핵심 관측소 중 32개 관측소의 GPS 데이터만 사용하였다. 이는 2001년 7월 2일과 3일에 32개 관측소의 관측 자료만이 IGS로부터 취득 가능하였기 때문이다. 고도 10도 미만인 위성 관측 자료를 제외하고 관측 간격을 60초로 하여 RINEX 파일을 구성하였다. 파라미터 추정단계에서 초기 궤도값은 2000년 7월 2일에 생성된 IGU 파일을, EOP는 CODE에서 예측한 자료를 사용하였다. 또한, 관측소 위치의 초기값은 IGS에서 제공하는 IGS01P27 SINEX 파일을 이용하였다.

IGS에서 제공하는 궤도력과 EOP는 15분과 24시간 간격으로 구성되어 있기 때문에 URP 궤도력과 EOP도 각각 같은 시간 간격으로 추정하여 산출하였다. 그림 3은 최소 자승법을 이용하여 1번 (Block IIA), 2번 (Block II), 3번 (Block I), 13번 (Block IIR) 위성에 대해서 산출한 궤도력과 IGF 궤도력의 차이를 나타낸다. 또한 정밀도를 비교하기 위해서 IGU와 IGR를 함께 나타냈다. 표 4는

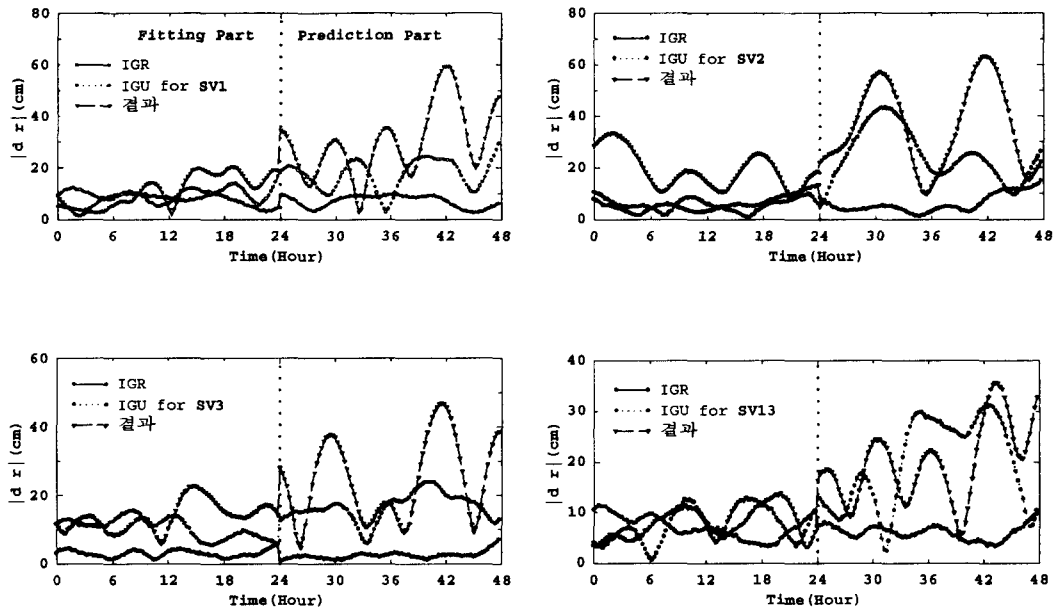


그림 3. 산출한 URP 궤도력 (dr은 IGF 궤도와의 거리 차이).

표 4. 산출한 URP의 궤도력 비교.

위성	Fitting Part (cm)			Prediction Part (cm)			Total (cm)		
	IGR	IGU	산출값	IGR	IGU	산출값	IGR	IGU	산출값
1	7.0	9.8	11.3	6.9	17.4	30.0	7.0	13.6	20.7
2	5.8	5.7	19.2	6.0	24.4	36.3	5.9	15.1	27.8
3	2.3	10.5	13.9	2.9	16.4	24.6	2.6	13.4	19.2
13	7.1	7.0	8.5	6.0	19.6	19.9	6.5	13.3	14.2

Fitting (24시간) 및 예측 부분 (24시간)과 전체 (48시간)에 대해서 IGF 궤도력과의 차이를 평균한 수치로 보여준다. 그러나 IGR은 궤도력을 예측하지 않으므로 24시간의 예측 궤도력을 Fitting 궤도력으로 대신하여 계산하였다. 또한, EOP에 대해서 IGF의 EOP를 기준으로 IGU, IGR 및 추정된 값과의 차이는 표 5와 같다.

이 연구에서 산출한 URP 궤도력은 Fitting 부분에서 2번 위성을 제외하고는 IGU와 비슷한 오차를 보였다. 예측 부분에서는 13번 위성만이 IGU와 비슷하나 나머지는 약 1.5배의 차이를 보였다. 예측 부분이 Fitting 부분보다 약 2배의 오차를 보이는 것은 Fitting 부분은 관측 데이터를 처리하여 위성 궤도를 결정하였고, 예측 부분은 결정된 위성 궤도로부터 궤도 전파 (Propagation)를 통해서 산출하였기 때문이다. 산출된 URP 궤도력은 48시간에 대해서 IGF와 평균 20cm 정도의 차이를 보이는 데 이는 GPS 실시간 정밀 응용분야에 이용될 수 있는 정밀한 궤도력이다. 또한, 산출한 EOP에 대해서 x, y축 값은 IGU와 비슷하나 UT1-UTC 값은 많은 차이를 보였다. 이러한 이유는 GPS 관측 데이터를 이용하여 EOP를 산출할 때 VLBI (Very Long Baseline Interferometry)와 SLR (Satellite Laser

표 5. 산출한 URP의 EOP 비교.

일시	산출값			IGU			IGR		
	x pole (10^{-6} ")	y pole (10^{-6} ")	Δt (μsec)	x pole (10^{-6} ")	y pole (10^{-6} ")	Δt (μsec)	x pole (10^{-6} ")	y pole (10^{-6} ")	Δt (μsec)
7.3.Oh	-40	-610	7.7	-233	-86	-1.5	115	-6	-2.9
7.4.Oh	-130	-421	13.0	472	419	1.1	72	1	-3.8

Δt 는 UT1-UTC

Ranging)보다 정밀하게 추정하기 어렵기 때문이다. 실험에 의하면 UT1-UTC의 $1 \mu sec$ 차이는 GPS 위성의 위치에 약 2mm 이내의 오차를 가져왔다. 따라서 산출한 UT1-UTC 오차는 위성의 위치에 최대 2.6cm 오차를 발생시킨다. 또한 7월 3일, 4일의 x, y축 오차는 위성의 위치 오차로 환산하면 5cm 이내에 해당된다.

4. 검토 및 토의

이 연구에서는 URP 궤도력과 EOP를 산출하기 위한 독자적인 프로세싱 전략을 수립하였다. 또한 수립한 프로세싱 전략을 통해 산출한 궤도력의 경우 IGF와 평균 20cm 오차를 보인다. 이는 IGU보다 다소 정밀도가 떨어지지만 약 70cm 오차를 가지는 IGP보다 높은 정밀도를 가지고 있다. 또한, EOP의 경우 정밀 궤도력을 생성하는데 충분한 정밀도로 산출되었다. 따라서 산출한 URP는 GPS 실시간 정밀 응용분야에 이용할 수 있으리라 판단된다.

URP를 실시간 응용분야에 사용하기 위해서는 전체 프로세싱 시간이 3시간 이내로 완료되어야 한다. 이는 5개 ACs가 자료 처리하여 IGS에 송부하는 시간과 비슷하다. 이 연구에서는 두 개의 CPU를 가지는 Sun Ultra 2 시스템 (200MHz, 256MB)에서 수동으로 자료 처리하였는데 자료 처리 시간이 약 1일 이상이 소요되었다. 따라서 자료처리 시스템 사양을 높이고 모든 자료처리를 자동화하는 시스템을 구축하여 자료처리 시간을 단축시키는 방안이 강구되어야 할 것이다. 또한, URP를 산출하기 위해 적용한 자료처리 방법 및 모델링을 분석하여 정밀도를 향상시키는 연구도 병행되어야 할 것이다.

참고문헌

- Beutler, G., Brockmann, E., Gurtner, W., Hugentobler, U., Mervart, L., & Rothacher, M. 1994, J. Geodesy, 19, 367
- Fliegel, H. F., Gallini, T. E., & Swift, E. R. 1992, J. Geophys. Res., 97(B1), 559
- Gurtner, W., Beutler, G., & Rothacher, M. 1989, Proceedings 5th International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, 1, 362
- Hugentobler, U., Schaer, S., & Fridez, P. 2001, Bernese GPS Software Version 4.2 (Berne: Univ. Berne Press), pp.136-246
- Montenbruck, O., & Gill, E. 2000, Satellite Orbits(Berlin: Springer), 112
- Springer, T. A. 1999, PhD Thesis, University of Berne

Springer, T. A., Beutler, G., & Rothacher, M. 1999, *J. Geodesy*, 73, 147

Springer, T. A., & Hugentobler, U. 2001, *Phys. Chem. Earth (A)*, 26, 623