

GPS 擬似距離データによる電子基準点位置の解析

河合雅司 (富山商船高等専門学校)

On the Positions of GPS Stations Determined by Point Positioning Using GPS Pseudo Ranges

Kawai Masashi (Toyama National College of Maritime Technology)

Abstract

There are periodic fluctuations of about 12-hour period in post-fit range residuals in orbital analysis of geosynchronous satellites. It is considered that the cause of the periodic fluctuations is movement of the satellite tracking station. The verification on the cause was tried using GPS pseudo ranges observed every 30 seconds in 2003 at Toyama, Wakkanai and Yonakuni GPS stations. These GPS stations are operated by Geographical Survey Institute (GSI).

As results of spectrum analysis and average processing of these stations coordinates determined by point positioning, it was revealed that they move several meters with about 12-hour period. It is considered that the cause of GPS stations' movements is the Earth's plates which move horizontally periodically with flows in the mantle due to tidal generating forces, such as ocean currents and tidal currents.

Keywords: GPS, GPS stations, Earth's plates

キーワード: GPS, 電子基準点, プレート運動

1. 緒言

静止衛星の軌道解析において、軌道決定後の観測距離と計算距離の残差に、振幅約 1m、周期約 12 時間の周期変動が存在し、現在の軌道解析理論でこの周期変動を説明することはできない。もし衛星観測局の位置が 12 時間周期で数メートル程度変動していると仮定すれば、これを説明することが可能である。そこで、国土地理院の富山、稚内及び与那国の電子基準点で 2003 年に観測された 1 年間分の擬似距離データを用いて電子基準点の位置を求め、この位置をフーリエ解析したところ、電子基準点位置が約 12 時間周期で変動していることが確認できた。又、この位置を 12 時間周期の位相毎に平均したところ、GPS 擬似距離データから求めた電子基準点位置が数メートルのオーダーで周期的に変動している様子を確認することが出来た。これらの結果及びその考察について以下に報告する。

2. 電子基準点位置の計算

本研究では、国土地理院の電子基準点で観測さ

れた GPS 衛星擬似距離データを用いて、電子基準点の位置を求めた。ここでは、擬似距離データ、GPS 衛星位置、電波伝搬補正、測位計算等について述べる。

(1) 観測データ

国土地理院の電子基準点富山・稚内・与那国で 2003 年 1 月 1 日 12 月 31 日までの 1 年間に観測された 30 秒毎の GPS 擬似距離データ (L1 波 C/A コード) を用いて電子基準点の位置を求めた。各電子基準点の地球固定座標系における位置を Table 1 に示す。

(2) GPS 衛星の位置

ITRF97 系地球固定座標における GPS 衛星の位置及び GPS 衛星原子時計の時刻補正值については、IGS 暦を使用し多項式補間により求めた。IGS 暦のダウンロードサイトは、次の通りである。
http://igsceb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html

IGS 暦の補間において、衛星位置については 17 次、原子時計補正值については、3 次の多項式補間を用いた。

(3) 電波伝搬補正

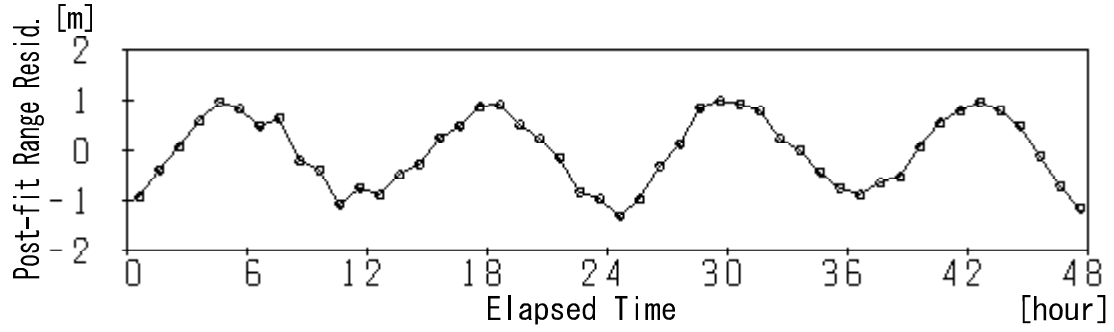


Fig. 1: An example of 12-hour period fluctuations in post-fit range residuals in orbital analysis of geosynchronous satellites.

Table 1 Earth-centered, Earth-fixed coordinates of GPS stations operated by GSI (ITRF97)

Station	Station No.	Station Code	Latitude	Longitude	Height above ellipsoid
Toyama	950249	5437715501	36° 38' 3.62"N	137° 11' 42.70"E	75.30m
Wakkanai	940001	6841068001	45° 24' 10.78"N	141° 45' 1.56"E	74.62m
Yonaguni	950499	3622574501	24° 27' 15.03"N	122° 56' 34.22"E	47.34m

対流圏電波伝搬遅延については、NASA の軌道解析プログラム GEODYN II で使用されているモデルを用いて補正した。対流圏補正モデルには様々なモデルが存在するが、本研究に関してはどのモデルを用いても得られる結果は同じである。

電離層電波伝搬遅延については、L1 波 C/A コード及び L2 波 P コードによる擬似距離データを用いて次式により補正した。

$$\Delta \rho_{IL1} = \frac{r_{CAL1} - r_{PL2} - (C_{PIP2} - C_{PIC1})}{\left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2 - 1} \quad (1)$$

$L_1 = 1.57542 \text{GHz}$, $L_2 = 1.2276 \text{GHz}$

$\Delta \rho_{IL1}$: r_{CAL1} に対する電離層補正值

r_{CAL1} : L1 波 C/A コードの擬似距離

r_{PL2} : L2 波 P コードの擬似距離

L_1, L_2 : L1 波及び L2 波の周波数

C_{PIP2} : ディファレンシャルコードバイアス(P1-P2)

C_{PIC1} : ディファレンシャルコードバイアス(P1-C1)

上式におけるディファレンシャルコードバイアスは、欧州軌道決定センターの次のサイトからダウンロードした。

<http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>

(4) 測位計算

L1 波 C/A コード擬似距離を用いて、単独測位により、電子基準点位置を求める。測位計算には C/A コードを送信した時刻 t_r での ITRF97 系地球固定座標における GPS 衛星位置が必要である。

分かっているのは、コードを受信した時刻 t_r であり、まず IGS 暦より時刻 t_r での地球固定座標における衛星位置と速度を求め、これを慣性座標系 (J2000.0 平均赤道面座標系) に変換した後、次式を用いて繰り返し計算により時刻 t_r における衛星位置を求める。ただし、次式において X_J , Y_J , Z_J の初期値は、 $X_J(t_r)$, $Y_J(t_r)$, $Z_J(t_r)$ とする。

$$\Delta t = \frac{\sqrt{(X_J - X_0)^2 + (Y_J - Y_0)^2 + (Z_J - Z_0)^2}}{V_c} + \Delta D \quad (2)$$

$X_J(t_r) = X_J(t_r) - V_{XJ}(t_r) \cdot \Delta t$

$Y_J(t_r) = Y_J(t_r) - V_{YJ}(t_r) \cdot \Delta t$

$Z_J(t_r) = Z_J(t_r) - V_{ZJ}(t_r) \cdot \Delta t$

X_0, Y_0, Z_0 : J2000.0 平均赤道面座標系における

時刻 t_r での受信点位置

X_J, Y_J, Z_J : J2000.0 平均赤道面座標系における

時刻 t_r での衛星位置

V_c : 電波伝搬速度 (光速)

ΔD : 電波伝搬遅延 (電離層遅延 + 対流圏遅延)

上式により求めた J2000.0 平均赤道面座標系における衛星位置を地球固定座標系に変換し、観測擬似距離に電波伝搬補正、衛星原子時計の補正を行い最小自乗法により 30 秒毎の電子基準点位置を計算する。本研究では、電離層電波伝搬補正における受信機のインターフレクエンシーバイアスによる誤差は定誤差として受信機時計の同期誤差に含めて処理されている。

更に、このようにして求めた地球固定座標系における電子基準点位置を、表1に示す電子基準点位置を原点とする地表面座標系に変換する。本研究で使用された地表面座標系は、原点における測地学的接平面の法線をZ軸(上方が正)、接平面内において北へY軸(北方が正)、東へX軸(東方が正)をとった3次元直交座標系である。

L1波C/AコードGPS衛星擬似距離より求めた30秒毎1年間分の地表面座標系における電子基準点位置のX, Y座標値をフーリエ解析した結果をFig.2 Fig.7に示す。

これらの図から、電子基準点位置が約12時間周期(地球自転周期の半分)で変動していることが分かる。又、約12時間周期の変動の他に、約24時間周期及び約8時間周期の変動も存在していることが分かる。

3. 解析結果

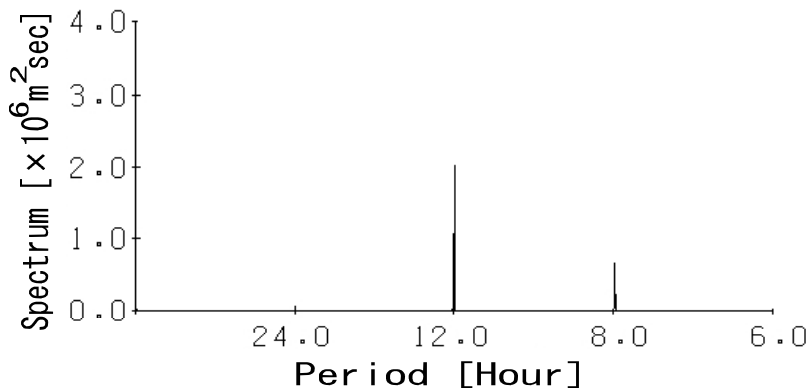


Fig.2 The Spectrum of x-coordinates of Toyama station in 2003

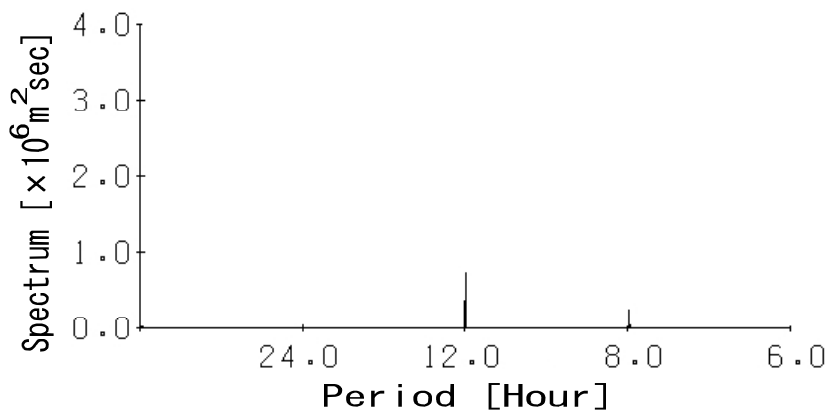


Fig.3 The Spectrum of y-coordinates of Toyama station in 2003

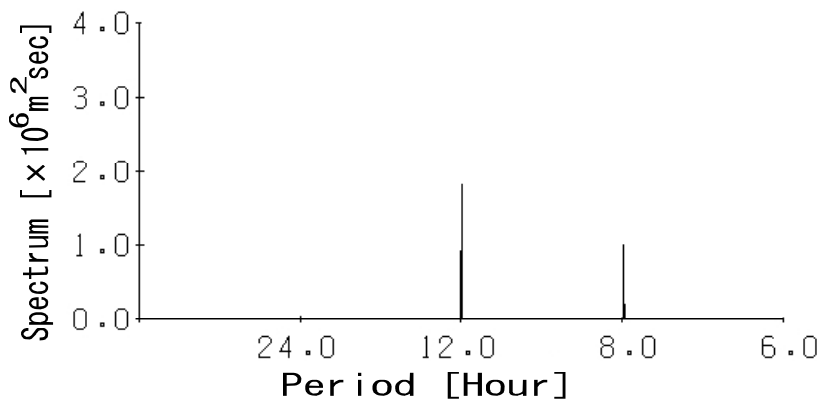


Fig.4 The Spectrum of x-coordinates of Wakkanai station in 2003

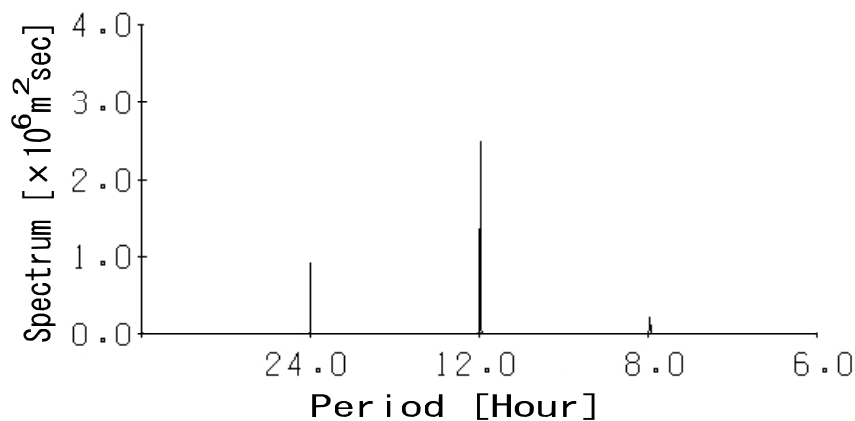


Fig.5 The Spectrum of y-coordinates of Wakkanai station in 2003

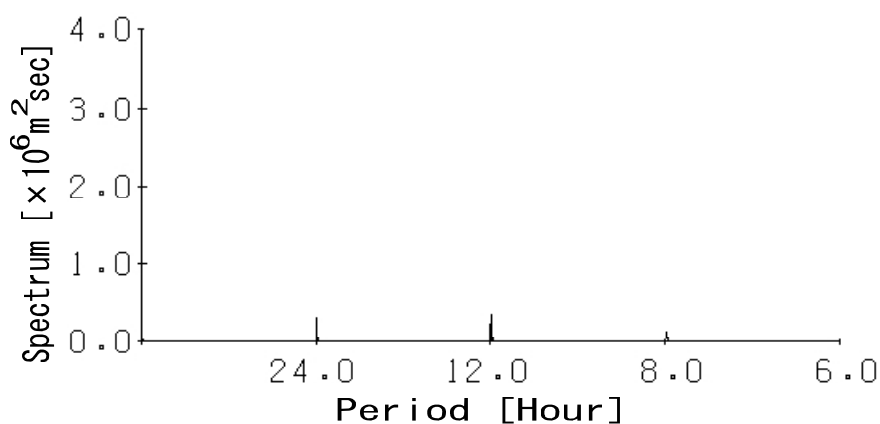


Fig.6 The Spectrum of x-coordinates of Yonaguni station in 2003

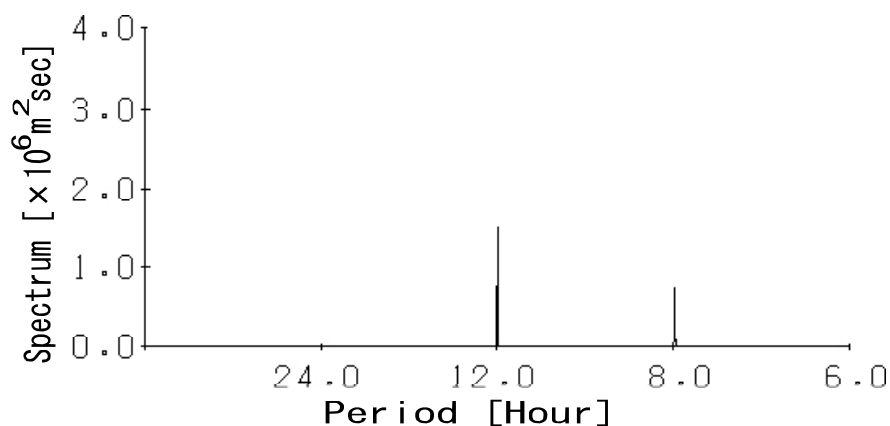


Fig.7 The Spectrum of y-coordinates of Yonaguni station in 2003

次に地表面座標系における 30 秒毎の電子基準点位置に、次式に示す位相番号を付ける。

$$n = \text{int}\left[\frac{t - \text{int}(t/T) \cdot T}{T/12}\right] \quad (3)$$

n : 位相番号

t : 2003年 1月 1日 0時(GPS時)から

位置決定時刻までの経過時間

T : 位置変動周期($T=11.97$ 時間)

この位相番号毎に電子基準点位置を平均した結

果を Fig.8 Fig.10 に示す。これらの図における座標原点は、Table 1 に示された電子基準点位置である。

これらの図から、GPS 疑似距離データを用いて単独測位により求めた電子基準点位置が、約 12 時間周期で 5m 程度変動していることが分かる。又、電子基準点位置は一様な速度で変動するのではなく、海洋における潮流のようにある時はほとんど動かず、ある時は大きく動いて周期的に変動している様子が確認できる。

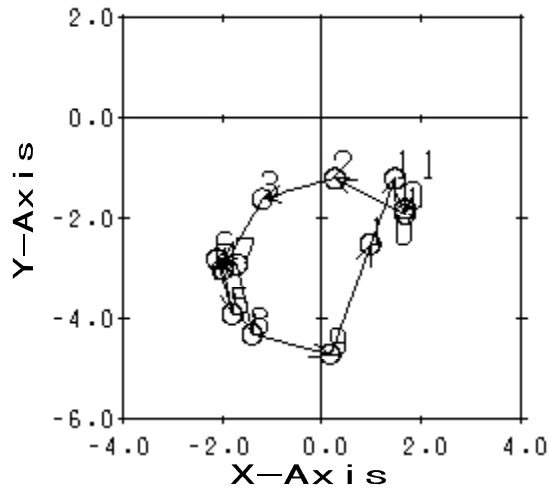


Fig.8 The positions of Toyama station averaged every phase number over year 2003.

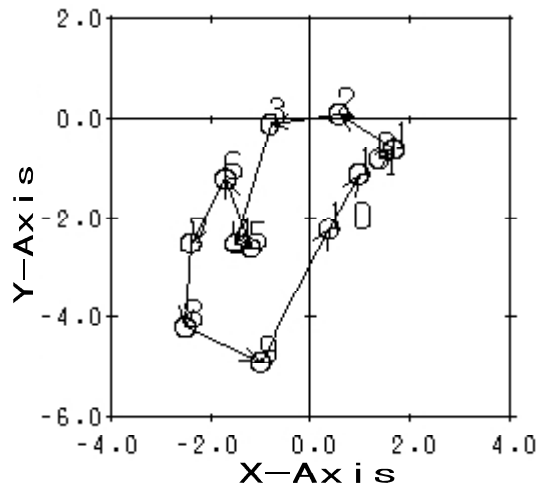


Fig.9 The positions of Wakkanai station averaged every phase number over year 2003.

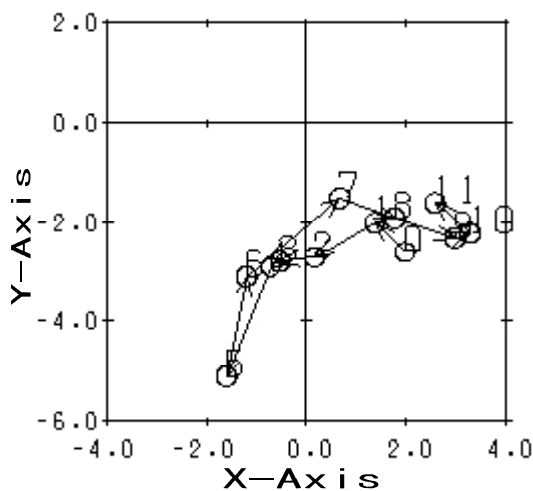


Fig.10 The positions of Yonaguni station averaged every phase number over year 2003.

4. 結言

静止衛星の軌道解析において、衛星観測局から静止衛星までの軌道決定後の観測距離と計算距離の残差(O-C)に約 12 時間周期の変動が生じる。これについて調べるために、国土地理院の電子基準点で観測された GPS 衛星擬似距離データを用いて求めた電子基準点位置を解析したところ次のことが分かった。

- (1) 電子基準点位置が約 12 時間周期(地球自転周期の 1/2)で変動しており、変動の幅は 5m 程度である。
- (2) 電子基準点は、約 12 時間周期で加速度運動している。(大きく動く時とほとんど動かない時がある)
- (3) 電子基準点位置の変動には、約 24 時間周期、約 8 時間周期の変動も存在している。

電子基準点位置の変動の理由であるが、月や太陽の潮汐力によって地球のマントル内部に海洋における海流や潮流のような流れが存在しており、この上に浮いているプレートが、マントル内部の流動と共に約 12 時間周期で 5m 程度動いていると考えることができる。

本研究では、1 年間分のデータを用いて解析したが、数年間分のより長期間のデータを用いて更に詳しく電子基準点位置の解析を行うこと及び、約 24 時間周期、約 8 時間周期の位置変動について調べることは今後の課題である。

参考文献

- Kawai Masashi(2003):A Study on Positions of GPS Stations Determined by Point Positioning Using GPS Pseudo Ranges, Proceedings of 2003 International Symposium on GPS/GNSS, 509-514.
- Masashi KAWAI(1992):A Study on the Orbita l Analysis of Geosynchronous Satellites- V., The Journal of Japan Institute of Navigation, Vol.101,7-14.
- Benjamin W. Remondi(1989):Extending the National Geodetic Survey Standard GPS Orbit Formats, NOAA Technical Report NOS 133 NGS 46, NOAA.
- William F. Eddy, Despina E. Pavlis, John J. McCarthy, et al.(1989):GEODYN II -Systems Description, Vol.1, NASA Goddard Space Flight Center.
- The Geodetic Society of Japan(1989):新訂版 GPS -人工衛星による精密測位システム-, Japan Association of Surveyors.

