

GPS による電離層全電子数観測のためのバイアス誤差推定法

坂井 丈泰^{†a)}

Bias Error Calibration for Observing Ionosphere by GPS Network

Takeyasu SAKAI^{†a)}

あらまし 電離層遅延は衛星航法システムの主要な誤差要因であるが、逆に位置があらかじめ分かっている受信機を利用すれば電離層の観測が可能となる。最近では国内外の GPS 観測ネットワークが整備されていることから GPS は電離層観測の有力な手段となっており、レーダ等による観測に対して電離層全電子数の空間的・時間的分布を知ることができる特徴がある。二周波 GPS 受信機による電離層観測では観測データに含まれる周波数間バイアスを推定・除去する必要があるが、本論文はこのための手法について述べる。バイアス推定処理で用いる電離層モデルの比較も試みたところ、2 層以上の電離層を仮定するモデルが有効であることが分かった。

キーワード 電離層, TEC, GPS, 衛星航法

1. ま え が き

高度 100 ~ 1000 km に分布する電離層は電波伝搬に対する影響が大きく、短波以下の周波数の電波が反射されて遠方まで到達することはよく知られている。GPS (global positioning system: 全地球測位システム) をはじめとする衛星航法システムは無線信号のドップラシフトあるいは伝搬時間を利用してユーザ位置を測定するから経路上の電離層による影響を受け、例えば GPS の場合では最大で 300 ns (距離に換算して 100 m) 程度の遅延となる。

電離層遅延は GPS の主要な誤差要因であるが、逆に位置があらかじめ分かっている受信機を利用すれば GPS 受信機により電離層を観測することが可能である。電離層による無線信号の伝搬遅延時間は経路上にある自由電子の総数、すなわち全電子数 (total electron content; TEC) により決まり、GPS による観測データは全電子数に比例した遅延を含んでいる。このことを利用すると GPS 衛星及び受信機の組合せごとに多数の伝搬経路に対応する遅延量が得られ、電離層全電子数の空間的・時間的分布を調べやすい点がレーダやイオノゾンデによる観測に対する特徴といえ

る。最近では国内外の GPS 観測ネットワークが整備されていることから、GPS は電離層観測の有力な手段となってきた。

GPS 信号により電離層を観測する場合は、受信データに含まれるバイアス誤差が問題となる。これは送信機及び受信機のハードウェアに起因するバイアスであって、それぞれの衛星及び受信機に固有の定数となることを利用して推定・除去する必要がある。

本論文は、GPS による電離層全電子数の観測について、バイアス誤差の推定問題も含めて具体的な方法を述べるとともに、日本付近における観測例を示す。以下、2. で観測手法について述べ、3. に実際の観測例を示す。バイアス補正に利用する電離層モデルの選択について 4. で検討し、5. をまとめとする。バイアス推定処理で用いる電離層モデルの比較を試みたところ、2 層以上の電離層を仮定するモデルが有効であることが分かった。

2. 観 測 手 法

電離層による遅延量は周波数の 2 乗に反比例し、伝搬経路上の全電子数 (TEC) に比例する。GPS が使用するマイクロ波帯 (例えば L1=1575.42 MHz) では 100 m 程度までの遅延となり、受信機による距離測定値に影響が現れる。この現象を利用して、GPS 測距信号の電離層遅延量から電離層全電子数を得る手法について述べる。

[†] 独立行政法人電子航法研究所, 調布市

Electronic Navigation Research Institute, 7-42-23 Jindaiji-Higashi, Chofu-shi, 182-0012 Japan

a) E-mail: sakai@enri.go.jp

2.1 電離層遅延量の測定原理

GPS 測距信号の伝搬経路上にある全電子数を $TEC \text{ el/m}^2$ (単位底面積の円柱に含まれる電子数として定義するため, 単位面積当たりとなる) とすれば, 周波数 $f \text{ Hz}$ における遅延量は

$$\Delta\rho = -\Delta\phi = \frac{40.3 \text{ TEC}}{f^2} > 0 \quad (1)$$

と書ける [1]. 群遅延と呼ばれる $\Delta\rho$ がコード擬似距離を長く測定させる一方, 搬送波位相に対する影響 $\Delta\phi$ は符号が逆となり, 位相距離は短く測定される. この性質を利用して電離層全電子数を観測するには, (i) コード擬似距離と搬送波位相の差 (ii) 周波数の異なるコード擬似距離の差 (iii) 周波数の異なる搬送波位相の差, のいずれかを求めればよい.

GPS による電離層観測では, GPS 衛星及び受信機の組合せごとに遅延量=全電子数が得られることから空間的な分布を調べるのに都合がよい. ただし, 実際に観測される電離層の位置については受信機の配置のほかに GPS 衛星の軌道にも左右され, 観測者が自由に設定できるわけではない.

さて, 実際の搬送波位相観測値と電離層遅延量の関係を述べる. 搬送波位相は整数アンビギュイティやサイクルスリップといった問題があるため使いにくい, コード擬似距離に比べて測定ノイズやマルチパス誤差が少ないことから精度の良い観測を期待できる. エポック k で受信機 i が衛星 j について得る搬送波位相の観測値は, L1 及び L2 (1227.6 MHz) の各周波数について,

$$\begin{aligned} \phi_i^{j(L1)}(k) &= R_i^j(k) - B^j(k) + b_i(k) + T_i^j(k) \\ &\quad + M_i^{j(L1,\phi)}(k) + \xi_i^{j(L1,\phi)}(k) \\ &\quad - I_i^j(k) + \lambda_{L1} N_i^{j(L1)} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \phi_i^{j(L2)}(k) &= R_i^j(k) - B^j(k) + b_i(k) + T_i^j(k) \\ &\quad + M_i^{j(L2,\phi)}(k) + \xi_i^{j(L2,\phi)}(k) \\ &\quad - \gamma I_i^j(k) + \eta_i + \tau^j + \lambda_{L2} N_i^{j(L2)} \end{aligned} \quad (3)$$

とモデル化できる ($\gamma = (f_{L1}/f_{L2})^2 \sim 1.647$). ここで, R : 真距離, B : 衛星クロック誤差, b : 受信機クロック誤差, T : 対流圏遅延, M : マルチパス誤差, ξ : 受信機雑音, I : 電離層遅延 ($= -\Delta\phi$), η : 受信機側周波数間バイアス, τ : 衛星側周波数間バイアス, である (単位はすべて [m]). N は搬送波位相のアンビギュイティを意味する整数値であって (λ は波長), あら

じめ擬似距離との比較により解いておく. また, 搬送波位相が整数値だけジャンプするサイクルスリップについても補正しておく必要があるが, これには例えば $\phi_i^{j(L1)}(k) - \phi_i^{j(L2)}(k)$ が連続になることを利用するなどの方法がある [2].

電離層遅延だけを取り出すためには周波数間の観測値の差分を用いるが, 実際には

$$\begin{aligned} \tilde{I}_i^j(k) &\triangleq -\frac{\phi_i^{j(L1)}(k) - \phi_i^{j(L2)}(k)}{1 - \gamma} \\ &\approx I_i^j(k) + \frac{1}{1 - \gamma} (\eta_i + \tau^j) \end{aligned} \quad (4)$$

となり, 衛星及び受信機の周波数間バイアス (inter-frequency bias; IFB) が残っている [3], [4]. これは送信機及び受信機のハードウェアに起因するバイアス誤差であって, それぞれの衛星及び受信機に固有の定数である. 本来は L1 及び L2 のいずれの周波数でも観測される性質のものであるが, 衛星クロック誤差との区別がつかないことから, L2 観測データに含まれるバイアス誤差を, L1 信号を基準として表現することとした. なお, 式 (4) は搬送波位相に基づいた表現であるが, 擬似距離を利用する場合も, 符号が逆になる以外は全く同様な関係となる.

電離層遅延量を正しく求めるためには, この周波数間バイアスを推定・除去しなければならない. 周波数間バイアスはハードウェアが発生するものであるから, 少なくとも受信機側については受信機の電気的特性として直接測定することが可能である. しかし, このような測定を実際に行うことは難しく, また受信機ネットワーク全体に適用するのは現実的ではないことから, ソフトウェアにより推定・除去する方法が一般的に用いられる. 以下, この方法について整理する.

2.2 薄膜モデル: 単一受信機

第一の方法は受信機ごとに衛星バイアスを推定するもので, 例えば

$$\tau = \arg \min_{\tau} E(\tau) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E &= \sum_{j_1 \neq j_2} \sum_{k_1 \neq k_2} W(\mathbf{x}^{j_1}(k_1), \mathbf{x}^{j_2}(k_2)) \\ &\quad \cdot \left[\frac{\tilde{I}_{j_1}^{j_1}(k_1) - \tau^{j_1}}{f(e^{j_1}(k_1))} - \frac{\tilde{I}_{j_2}^{j_2}(k_2) - \tau^{j_2}}{f(e^{j_2}(k_2))} \right]^2 \end{aligned} \quad (6)$$

の最小化によりバイアス $\tau = \{\tau^j\}$ を得る [5]. この処理は, 多くの測定値を直接比較し, 相互の差が小さくなるような $\{\tau^j\}$ の組合せを求めるものと解釈でき

る． $W(\cdot)$ は適当な重み関数， $x^j(k)$ はエポック k に衛星 j -受信機間を結ぶ直線が電離層を通過する位置 (ionospheric pierce point ; IPP) を意味し，これらにより離れた地点間については重みを下げる働きをもたせる．電離層については高度 h の薄膜で近似しており，空間的に一定であるとの仮定がある．この方法により求められる $\{\tau^j\}$ は受信機バイアスを含んだ値であり，最小化処理は受信機単位で実行される必要がある．

$f(e)$ は，電離層を薄膜で近似している場合に，斜め方向に測定される電離層遅延を垂直遅延に換算するために用いられる係数 (obliquity factor) で，衛星の仰角 e から

$$f(e) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_E}{R_E+h} \cos e\right)^2}} \quad (7)$$

として求めるのが一般的である (R_E は地球半径)．この係数は仰角 90 度で 1 であり，仰角 5 度の衛星では 3 程度の値となる．

[7] の方法も式 (5) に近いが，特に多数の受信機による観測に適するよう工夫されている．[6] は衛星の組合せを選ぶことで計算を簡略化する方法を述べている．

2.3 薄膜モデル：受信機ネットワーク

一方，多数の受信機を含むグローバルな観測ネットワークを利用する場合，衛星及び受信機の周波数間バイアスを同時に推定するのが効率的である．[8] ~ [10] はいずれも類似の手法であって，基本的には，観測方程式

$$\tilde{I}_i^j(k) = f(e_i^j(k)) M(x_i^j(k)|\alpha) + \eta_i + \tau^j \quad (8)$$

を $\{\alpha, \eta_i, \tau^j\}$ について解く． $M(\cdot|\alpha)$ はパラメータ α による電離層分布モデルであり，二次曲面 [8]，三次スプライン関数 [9]，あるいは球面調和関数 [10] などが用いられる．座標系としては，地磁気軸を Z 軸，地磁気赤道面内の太陽方向を X 軸とした回転座標系 (Solar-Magnetic coordinate) を用い，電離層が座標系内で時間的に大きく変化しないものとして取り扱う．

この方法の利点は，電離層を適当にモデル化することで多数の観測データを同時に取り扱えるようになり，周波数間バイアスの推定精度が向上することである．式 (8) は基本的には最小二乗法により解くが，データ数が多くなると一度に処理できず，また電離層の時間的な変化も許容した方が望ましいことから，一般にはカルマンフィルタを使用する．

なお，簡単に周波数間バイアスを得る方法としては，電離層遅延量の変動が小さな夜間の観測データを利用して，電離層遅延の空間的な分布を一定と仮定したうえで式 (8) を解くことも可能である (すなわち， M を一定値とする)．ただしこの方法では，実際の電離層遅延量の変動が大きい場合には当然ながら正しい解が得られない．

2.4 三次元モデル

式 (8) は電離層を薄膜で近似するとの前提があったが，これを一般化すると次のように書ける．

$$\tilde{I}_i^j(k) = \int_{LOS_i^j(k)} N(x|\alpha) dl + \eta_i + \tau^j \quad (9)$$

$LOS_i^j(k)$ はエポック k において衛星 j -受信機 i 間を結ぶ直線 (line of sight) を意味し，積分はこの伝搬経路に沿って行う． $N(\cdot|\alpha)$ は電離層電子密度の三次元モデルで，積分可能であれば任意の関数でよいが，普通は高度方向 (高度 h) と水平方向 (緯度 θ ，経度 λ) を分離して取り扱う．

$$N(h, \theta, \lambda) = V(h) \cdot H(\theta, \lambda) \quad (10)$$

高度方向の分布は電離層生成理論から導かれた Chapman 関数が用いられることがあり，ピーク高度 h_l ，スケール H_l に対して

$$V_l^C(h) = \exp \left[1 + \frac{h_l - h}{H_l} - \exp \left(\frac{h_l - h}{H_l} \right) \right] \quad (11)$$

で表される．経験的には $h_l = \{250, 350, 450\}$ ， $H_l = \{50, 70, 90\}$ の 3 層構造が得られており [10]，図示すると図 1 のようになる．

水平方向については，例えば球面調和関数を用いると全球を少ないパラメータで表すことができ便利である．高度方向の層数を L ，水平方向モデルの基底関数の数を M とすれば

$$N(h, \theta, \lambda|\alpha) = \sum_l^L \sum_m^M \alpha_{l,m} V_l(h) \cdot H_m(\theta, \lambda) \quad (12)$$

と書け，電離層のパラメータは LM 個となる．これより式 (9) は

$$\tilde{I}_i^j(k) = \sum_l^L \sum_m^M \alpha_{l,m} \left(\int_{LOS_i^j(k)} V_l(h) \cdot H_m(\theta, \lambda) dl \right) + \eta_i + \tau^j \quad (13)$$

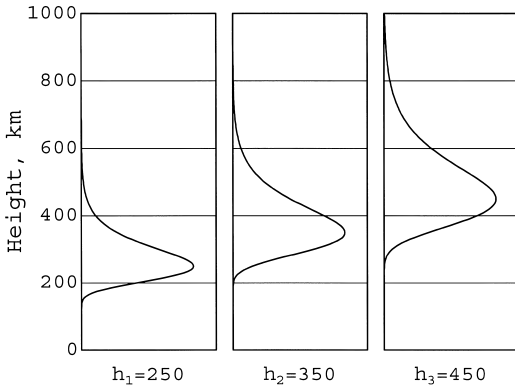


図 1 Chapman 関数の例
Fig.1 Chapman functions.

とできるから、伝搬経路に沿った基底関数の積分が求められるればよい。

高度方向に薄膜モデルを用いる場合は

$$V_l^T(h) = \delta(h_l - h) \quad (14)$$

と表されるから、

$$\int_{LOS_i^j(k)} V_l^T(h) \cdot H_m(\theta, \lambda) dl = f(e_i^j(k)) \cdot H_m(\theta, \lambda) \quad (15)$$

より式 (8) が得られる。

3. 観測例

国土地理院が運用している電子基準点ネットワーク (GEONET)[11] を利用して、電離層の観測を試みた。GEONET は測量用の二周波型 GPS 受信機を採用しているから、前述した手法により電離層遅延量が得られる。使用した電子基準点の配置は図 2 のとおりで、GEONET () は国内にしか基準点をもたないため、更に IGS (international GPS service) による観測データ () を加えて計 28 地点とした。図中の破線は磁気緯度を表す。

電離層活動が活発な状況における観測例を与えるため、観測期間は 2003 年 5 月 28~29 日とした。図 3 は、5 月下旬の 5 日間の Kp 指数 (Kp index) 速報値である [12]。Kp 指数は地磁気活動の活発さを表す指標であって、一般に電離層が活発に活動している際には大きな値を示す。5 月 29 日夜 (日本時間=UTC+9 h) には磁気嵐が発生しており、北海道で低緯度オーロラを観測したとの報告もある。

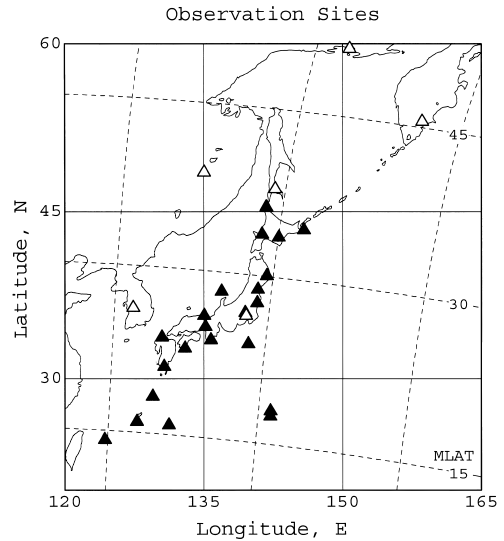


図 2 観測局の配置
Fig.2 Observation stations.

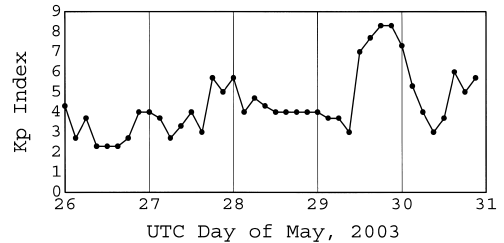


図 3 Kp 指数の変化
Fig.3 Kp Index.

式 (13) に基づいてバイアス推定を行った際の経過を、図 4 に示す。使用した電離層モデルは 3 層薄膜モデル ($h_l = \{250, 350, 450 \text{ km}\}$) で、水平方向については四次の球面調和関数としたため、モデルパラメータは 75 個、受信機及び衛星のバイアス値を含めると未知数は 130 個である。5 月 28~29 日の 48 時間分の観測データを 10 分ごとに仰角マスク 5 度として取り出し (観測データは 55438 点)、カルマンフィルタで処理した。GPS 衛星や電離層をすべて観測するには 24 時間を要するためそれまでは不規則な挙動を示すが、その後はほぼ一定値に収束している。計算対象としたデータは電離層活動が活発な状態を含むものであったが、そうした場合にあっても周波数間バイアスは問題なく推定できる。

図 5 は、衛星バイアスの推定結果 () と航法メッセージに含まれる群遅延パラメータ T_{GD} () との衛

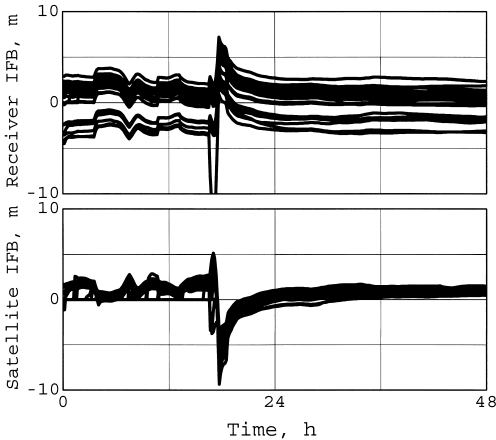


図 4 周波数間バイアスの推定経過
Fig. 4 Estimation process of interfrequency biases.

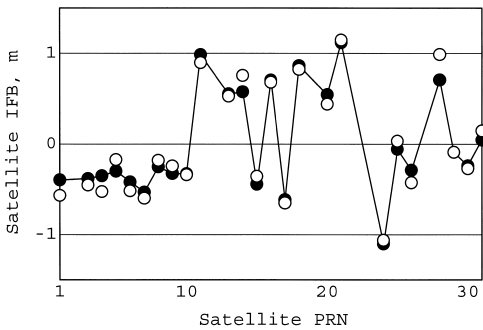


図 5 衛星バイアスの推定結果
Fig. 5 Estimated interfrequency bias for each satellite.

星ごとの比較である．もともと T_{GD} は衛星に搭載されている送信機の周波数間バイアスを打上げ前に実測した値であったが，最近では軌道上で校正がなされた値が放送されているため [3]，これらの値を比較することができる（ただし，放送されている T_{GD} は L1 P/Y コードを基準としているため，これを L1 C/A コード向けに変換する必要がある．これらの間には ± 0.6 m 程度までの違いがある）．図からも分かるように両者はほぼ一致しており，差の RMS 値は 10.9 cm であった． T_{GD} の量子化単位が 9.03 cm であることを考えると，実際にはほとんど差はない．

バイアスを補正して得た 5 月 28～29 日の電離層全電子数の時間変化を，図 6 に示す（式 (7) により垂直方向に換算してある．また $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$ で，GPS L1 周波数では 0.163 m の遅延量に相当する）．横軸は 5 月 28 日 00:00 からの経過時間で，IPP

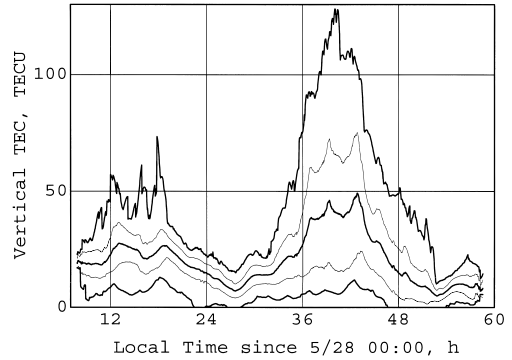


図 6 全電子数の計算結果（垂直方向に換算）
Fig. 6 Vertical TEC results with removal of IFB.

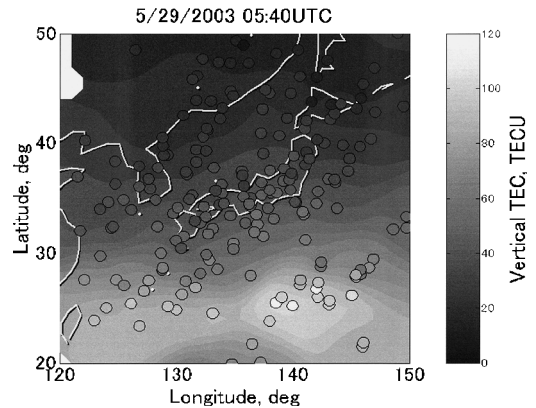


図 7 全電子数の分布例（5/29 05:40UT）
Fig. 7 Spatial distribution of Vertical TEC (5/29 05:40UT).

位置（地理経緯度）における地方時で表示した．中央の太線は平均値，その上下の細線は標準偏差，外側の太線は最大・最小値を表す．いずれの日も地方時の午後から全電子数が大きくなり，夕方に最大値を示し，夜間～明け方にかけて小さくなる様子が分かる．磁気嵐が発生した 29 日は，特に全電子数が大きい．前日 28 日には磁気嵐はなく，この季節における典型的な変化を示している．

図 6 でピークを示している時間帯における全電子数の空間的な分布を描くと，図 7 のようになっている．この図は垂直方向の全電子数を濃淡で表示しており，多数の丸いプロットは IPP における測定値を意味する（高度 350 km の薄膜電離層モデルにより IPP 位置を求めた．図 6 でも同様）．背景は，見やすくするために IPP 測定値の移動平均を表示したものである．

表 1 電離層高度と衛星 IFB 推定精度

Table 1 Satellite IFB estimation performance dependent on the ionospheric shell height.

高度, km	100	200	300	350	400	500	600	700	800	900	1000
磁気嵐状態 (残差 RMS, m)	0.602	0.395	0.246	0.197	0.165	0.151	0.179	0.220	0.262	0.304	0.343
静穏期 (残差 RMS, m)	0.194	0.150	0.121	0.111	0.105	0.102	0.106	0.115	0.125	0.136	0.146

表 2 電離層の層構成と衛星 IFB 推定精度

Table 2 Satellite IFB estimation performance dependent on the number of ionospheric layers.

高度, km		350	250,350	350,450	350,800	250,350,450	300,500,800	300,600,1000
未知パラメータの個数		80	105	105	105	130	130	130
薄膜モデル	磁気嵐状態 (残差 RMS, m)	0.197	0.109	0.107	0.128	0.109	0.122	0.133
	静穏期 (残差 RMS, m)	0.111	0.085	0.078	0.074	0.076	0.072	0.074
スケール, km		70	50,70	70,90	70,90	50,70,90	50,70,90	50,70,90
Chapman	磁気嵐状態 (残差 RMS, m)	0.192	0.146	0.120	0.129	0.113	0.126	0.126
	静穏期 (残差 RMS, m)	0.111	0.103	0.092	0.080	0.088	0.079	0.083

4. 電離層モデルの選択

バイアス推定処理にあたっては、2. で述べたとおり適当な電離層モデルを設定する必要があるが、どのようなモデルが適切であるか比較をした例はない。観測データに含まれているバイアスの真値が不明であることから、バイアス推定の精度を直接知ることができず、適当なモデルを判断することは難しい。

モデル比較の方法として、バイアス推定処理後の式 (8) の残差、すなわち電離層モデルと観測値の差を評価する例がある。これは当然小さいことが望ましいが、残差が小さいことが必ずしもバイアス値が正確に求められていることを保証するわけではない。バイアス推定は基本的に最小二乗法により行われているから、得られる解は電離層モデルパラメータとバイアス推定値を最小二乗の意味でバランスさせているに過ぎない。パラメータの多い複雑なモデルを使えば残差を抑えることはできるが、これにより電離層が正確に近似されているとは限らない。

ここでは、一つの方法として、衛星バイアスの推定結果を群遅延パラメータ T_{GD} と比較することとした。最近放送されている T_{GD} については、GPS による位置の測定に用いた場合に実際に測位精度を向上させることが報告されており [3]、現実の衛星バイアスを適切に反映していると考えられるからである。

また、先に紹介した観測例では磁気嵐状態の電離層においてもバイアスが正しく推定できることを述べたが、比較のために電離層が静穏状態にある場合 (2004 年 6 月 22 ~ 23 日, K_p 指数 = 0+ ~ 1) についても推定

結果の比較を行った。

4.1 電離層モデルの比較：高度方向

まず、単層薄膜モデルの場合に、電離層高度と推定精度の関係を求めた結果を表 1 に示す。電離層高度を上げると式 (7) の仰角依存性が小さくなり、低仰角での関数値が小さくなる。表中の値は衛星 IFB 推定結果の T_{GD} に対する残差 (RMS 値) であり、小さな方が望ましい。球面調和関数の次数は 4 とした。

推定誤差は電離層高度に対して下に凸な関数となっており、衛星バイアスの推定には 400 ~ 500 km 程度が適していることが分かる。ただし T_{GD} の量子化誤差を考えると、350 ~ 600 km 程度の高度であれば大きな違いはない。

表 2 は、電離層の高度方向のモデルを変えた場合のバイアス推定精度である。水平方向のモデルはやはり四次の球面調和関数とした。表中の未知パラメータのうち 55 個は受信機及び衛星バイアスで、残りが電離層パラメータとなる。薄膜モデルの電離層高度は 250 ~ 450 km 程度とされることが多いが、実際には高度 800 km 以上に分布する低密度の自由電子による寄与も大きいとする意見があることから [5]、2 層以上の多層モデルについてはそのような高度にも電離層を設定した。表 1 も合わせると、全体的な傾向として (i) 単層モデルより多層モデルが優れている (ii) 多層モデルであれば衛星バイアスの推定性能はそれほど変わらない (iii) 電離層高度は必ずしも高くする必要はない (iv) 高度設定が適切であれば薄膜モデルと Chapman モデルの差は大きくない、といった特徴がうかがえる。ただし、いずれもバイアス推定にあつ

表 3 球面調和関数の次数と衛星 IFB 推定精度

Table 3 Satellite IFB estimation performance dependent on the order of spherical harmonics.

次数		0	1	2	3	4	5	6
基底関数の個数		1	4	9	16	25	36	49
未知パラメータの個数		56	59	64	71	80	91	104
L = 1	磁気嵐状態 (残差 RMS, m)	0.820	0.275	0.241	0.213	0.197	0.176	0.169
	静穏期 (残差 RMS, m)	0.329	0.107	0.117	0.113	0.111	0.109	0.108
未知パラメータの個数		57	63	73	87	105	127	153
L = 2	磁気嵐状態 (残差 RMS, m)	0.820	0.176	0.113	0.103	0.105	0.100	0.099
	静穏期 (残差 RMS, m)	0.347	0.096	0.096	0.089	0.085	0.083	0.082
未知パラメータの個数		58	67	82	103	130	163	202
L = 3	磁気嵐状態 (残差 RMS, m)	0.870	0.139	0.115	0.110	0.109	0.103	0.103
	静穏期 (残差 RMS, m)	0.365	0.092	0.089	0.081	0.076	0.075	0.076

表 4 仰角マスクと衛星 IFB 推定精度

Table 4 Satellite IFB estimation performance dependent on the mask angle.

仰角マスク, 度		5	10	15	20	25	30	35	40
データ数		55438	52273	47572	42556	37553	32896	28489	24360
磁気嵐状態 静穏期		58358	54824	49968	44730	39454	34469	29749	25173
L = 1	磁気嵐状態 (残差 RMS, m)	0.197	0.191	0.172	0.155	0.139	0.136	0.143	0.165
	静穏期 (残差 RMS, m)	0.111	0.110	0.106	0.103	0.103	0.104	0.113	0.124
L = 2	磁気嵐状態 (残差 RMS, m)	0.109	0.108	0.108	0.103	0.101	0.101	0.109	0.129
	静穏期 (残差 RMS, m)	0.085	0.083	0.080	0.078	0.077	0.076	0.079	0.090
L = 3	磁気嵐状態 (残差 RMS, m)	0.109	0.110	0.110	0.105	0.104	0.101	0.103	0.109
	静穏期 (残差 RMS, m)	0.076	0.075	0.075	0.075	0.077	0.075	0.075	0.081

での挙動であって、現実の電離層の構造を反映しているとは限らない点には注意されたい。

4.2 電離層モデルの比較：水平方向

水平方向のモデルとして用いている球面調和関数の次数と推定精度の関係を、表 3 に示す。高度方向は 1~3 層の薄膜モデル ($h_i = \{350\}, \{250, 350\}, \{250, 350, 450\}$) を用いた。この表からは、モデル次数を上げるほど衛星バイアスの推定精度は向上するが、三次以上では大きな差はないことが分かる。また、0 次の場合には多層化しても意味がなく、少なくとも一次以上のモデルを使用する必要がある。2 層以上のモデルならば、磁気嵐状態にあっても三次程度の球面調和関数で十分といえる。

4.3 仰角マスクの比較

ここまでの計算結果はすべて仰角マスクを 5 度としたものであった。一般に低仰角の衛星は観測ノイズが大きいことが知られ、これを抑える目的で適当な仰角マスクを設定するのが普通である。すなわち、仰角マスク以下の仰角で得られた観測データを計算に使用しないことで、観測ノイズの混入を防止する。バイアス推定の際には、[7] は 30 度、[5] では 35 度など、30 度以上に設定される例が多い。

仰角マスクの設定にあたっては、マスクによって

データそのものが減少してしまうことに注意が必要である。また、式 (8) による電離層遅延とバイアス誤差の分離には仰角の違いも寄与していることから、仰角マスクを上げて天頂付近の観測データばかりとなるとバイアス誤差の推定精度が低下する可能性がある。

仰角マスクを変えたときのバイアス推定精度の例を、表 4 に示す。表 3 の場合と同じく、1~3 層薄膜モデルと四次の球面調和関数を用いた。推定誤差は仰角マスクに対して下に凸な関数になってはいるが、その関連は弱く、数 cm 以内の差にとどまっている。特に、多層モデルにおいては仰角マスクによらずほぼ同じ推定結果が得られていることから、いずれの仰角の観測データについてもよくモデル化されているものといえる。表 4 には、それぞれの仰角マスクを設定した場合の観測データ数も表示した。データ量が多い方がロバストな処理が期待できるため、仰角マスクはあまり高くせず、15~20 度程度に設定すべきと考える。

5. む す び

電離層遅延は衛星航法システムの主要な誤差要因であるが、逆に位置があらかじめ分かっている受信機を利用すれば電離層の観測が可能である。この原理に基づく電離層観測について具体的な手法を述べるとも

に、主要な観測誤差となる周波数間バイアスについても推定方法を整理した。

国土地理院の GEONET ネットワーク及び IGS による観測データを利用して電離層全電子数の分布を求め、磁気嵐発生中の電離層の様子を例示した。航法メッセージに含まれる群遅延パラメータとの比較によれば、バイアス誤差の推定は正常に行われている。周波数間バイアスの推定に利用する電離層モデルの比較も試みたところ、一般的に用いられている 350 km の電離層高度は妥当といえる範囲内であり、この付近に 2~3 層の薄膜モデルを仮定するのが有効と思われる。従来高めに設定されることが多かった仰角マスクについては、特に多層モデルを使用する場合にあっては推定精度との関連は弱く、15~20 度までに抑えてデータ量を確保すべきと考える。

本論文では実データを使用してバイアス推定性能を測定したが、IRI モデル等を利用して同様の検証を行うことは可能である。衛星航法システムへの影響を検討する上では、磁気嵐の際の電離層遅延量観測データを蓄積し、遅延補正性能やインテグリティ性能を評価することが重要である。

文 献

- [1] J. Klobuchar, "Ionospheric effects on GPS," Global Positioning System: Theory and Applications, vol.1, pp.485-515, AIAA, 1996.
- [2] C. Kee, T. Walter, P. Enge, and B. Parkinson, "Quality control algorithms on WAAS wide-area reference stations," NAVIGATION: J. Institute of Navigation, vol.44, no.1, pp.53-62, 1997.
- [3] B. Wilson, C. Yinger, W. Feess, and C. Shank, "New and improved: The broadcast interfrequency biases," GPS World, pp.56-66, Sept. 1999.
- [4] D. Coco, C. Coker, S. Dahlke, and J. Clynch, "Variability of GPS satellite differential group delay biases," IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol.27, no.6, pp.931-938, Nov. 1991.
- [5] N. Lunt, L. Kersley, G. Bishop, A. Mazzella, and G. Bailey, "The effect of the protonosphere on the estimation of GPS total electron content: Validation Using Model Simulations," Radio Science, vol.34, no.5, pp.1261-1271, 1999.
- [6] M. Birch, J. Hargreaves, and G. Bailey, "On the use of an effective ionospheric height in electron content measurement by GPS reception," Radio Science, vol.37, no.1, pp.15-1-15-19, 2002.
- [7] Y. Otsuka, T. Ogawa, A. Saito, T. Tsugawa, S. Fukao, and S. Miyazaki, "A new technique for mapping of total electron content using GPS network in Japan," Earth, Planets and Space, vol.54, pp.63-70, 2002.
- [8] E. Sardón, A. Rius, and N. Zarraoa, "Estimation of the transmitter and receiver differential biases and the ionospheric total electron content from global positioning system observations," Radio Science, vol.29, no.3, pp.577-586, 1994.
- [9] A. Mannucci, B. Wilson, D. Yuan, C. Ho, U. Lindqwister, and T. Runge, "A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements," Radio Science, vol.33, no.3, pp.565-582, 1998.
- [10] A. Hansen, Tomographic estimation of the ionosphere using terrestrial GPS sensors, PhD Thesis, Stanford University, 2002.
- [11] 国土地理院: GPS 連続観測システム
(http://terras.gsi.go.jp/gps/geonet_top.html)
- [12] 京大大学地磁気世界資料解析センター
(<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html>)
(平成 17 年 3 月 15 日受付, 7 月 15 日再受付)



坂井 文泰 (正員)

平 6 早大・理工・電気卒。平 8 同大学院修士課程了。同年運輸省電子航法研究所入所。GPS による航空航法システムの研究に従事。平 10 本会第 10 回回路とシステム軽井沢ワークショップ奨励賞, 平 17 IEEE AES Japan Chapter 優秀論文賞。平 13~早稲田大学理工学総合研究センター客員研究員, 平 14~15 米国スタンフォード大学客員研究員。日本航海学会 GPS 研究会及び航空宇宙研究会運営委員, 機械学会交通・物流部門運営委員, 電気学会通信・高度位置情報応用システム調査専門委員会委員。ION (Institute of Navigation), RIN (Royal Institute of Navigation), 日本航海学会, 日本航空宇宙学会各会員。博士 (工学)。