

GPS利用全電子数測装置を用いての 単周波VLBI電離層補正

関東支所 宇宙電波応用研究室
近藤哲朗、雨谷 純、小山泰弘、今江理人

1. はじめに

現在行われている測地VLBIでは2周波数帯を受信することによって電離層で生じる遅延を補正している。この電離層補正が他の方法で可能ならばVLBI局としては単周波数帯のみの受信で良いことになり小型で可搬性に優れたVLBI局実現のためにははなはだ都合がよい。機動性に優れた車載局が実現すれば緊急を要する地殻変動観測の場合に、すみやかに移動し、測定が可能となり、GPSによる精密測位の基準点となることが可能であろう。一方、GPS衛星は電離層の影響を取り除くために自ら2周波数帯で電波を放射しており、システムの普及に伴いこの衛星からの電波を利用して地球電離層の全電子数(単位底面積の円柱に含まれる全電子数:TEC)を精度よく測る装置が開発され(例えばRoyden et al., 1984^[1])安価に入手できるようになってきた。当所でもGPS衛星を利用した全電子数測定装置が開発され^{[2][3]}、(株)日本通信機から Realtime TECMETER Model 7633として市販化されている。

こうしたGPS衛星利用TEC測定装置で求めたTECの単周波VLBIへの応用の可能性を探るために2周波VLBI観測との同時観測を何度か実施している。両者で測定されるTECを比較することにより適用の可能性が評価できるが一般にはGPS衛星の方向とVLBIで観測する電波星方向は異なるため単純に両者の比較を行うことができない。そのため何らかの方法で全電子数データを電波星方向に投影する必要がある。この方法が確立されればGPS衛星を利用した電離層観測にも役立てることができると期待される。投影法の簡単なモデルについてはすでに第412, 419, 421回談話会で報告してきた^{[4][5][6]}が、今回モデルの改良を含めて総合的に検討を行った。

2. 種々のマッピング法

GPS衛星方向と電波星方向は一般に異なる。電波星方向のTECを求めるにGPS衛星方向に対して求められたTECを何らかの方法で変換(ここではこの変換のことをマッピングと呼ぶことにする)する必要がある。一般的にはある地点Pを中心とした天球内でのTEC分布を直接にモデル化する方法(ここでは直接法と呼ぶ)とPを中心とした地理的なある範囲内での垂直TEC分布をモデル化した後、そこでの入射角に応じた補正係数をかけてP点から観測されるTECに変換する方法(間接法と呼ぶ)の2つが考えられる。

直接法はP点を中心とした方位角 Az 、仰角 EI および時刻 t の関数としてTECを

$$TEC = f(Az, EI, t) \quad (1)$$

と表すことである。

間接法はP地点から見たある視線方向と電離層の交差点の緯度、経度を λ 、 ϕ として

$$TEC = S(EI) g(\lambda, \phi, t) \quad (2)$$

と表すことである。ここで g は垂直TECの時刻 t における空間分布、 $S(EI)$ は経路長の仰角依存性を示している。今回の報告では電離層を高度 h の無限小の厚さの

球面と考えて、

$$S(EI) = 1.0 / \cos(\sin^{-1}(R_E \cos EI / (R_E + h))) \quad (3)$$

としている。さらに簡単化のため h を 300 km に固定した (したがって P 点の Az , EI から λ , ϕ は一意的に求められる)。

f または g をある数式モデルで表し、TECMETERでの観測値から数式モデルを記述するパラメータを求めることができればここで言うマッピングができたことになる。時刻 t における観測値が天球上で十分な数で一様に分布していれば直接法でも間接法でも十分に精度の良いマッピングが可能であろう (極端に言えば電離層に対しての知識が無くても観測値の簡単な内挿のみで高精度のマッピングができる)。しかしながら現実には一度に見えるGPS衛星の数はたかだか4個か5個であり、時間によっては1個も見えなかったり、ある狭い範囲内に限られていたりする。こうした限られたデータから高精度のマッピングを行うには電離層に対する知識を積極的に活用することが必要であり (電離層をある高度の層で代表させているのもその1つである)、定常状態での電離層の緯度依存性や太陽、地球を軸とする座標系を考えた場合にほぼ固定した構造を持っているであろうという先験的な情報は間接法の方が組み込みやすい。例えば、間接法に現われてくるパラメータの内、経度と時刻を合わせて1つの地方時というパラメータで考えると太陽、地球軸に固定した座標系 (つまり日周変動) を考えていることになる。これらを踏まえて今回、直接法および間接法での現実的な数式モデルをいくつか考えてみた。

[直接法]

モデルA

仰角依存性のみを考えたもっとも簡単なモデルは

$$TEC = N_o(t) S(EI) \quad (4)$$

である。ここで $N_o(t)$ は P 点の天頂方向のTECであり、求めるパラメータも $N_o(t)$ である。推定に用いるデータ数を増やすために $N_o(t)$ をある時間範囲内 (ここでは2時間とした) で一定とする。

モデルB

モデルAに対して方位角依存性を補正項として加える。天頂においてなめらか (1次導関数まで連続) であり、最小限のパラメータの増加に押さえて、

$$TEC = N_o(t) S(EI) + (90^\circ - EI) (A(t) \cos Az + B(t) \sin Az) \quad (5)$$

とモデル化することができる。未知数 (パラメータ) は $N_o(t)$, $A(t)$, $B(t)$ である。モデルBをもっと一般化すると、球面調和関数による表現となるが、データ数の制限から(5)式あたりが現実的な所と思われる。モデルAと同様にパラメータはある時間範囲内 (2時間) で一定とする。

[間接法]

モデルC

TECMETERで観測する緯度範囲の内ある緯度 λ を中心とした $\Delta \lambda$ の範囲のTEC日変化をフーリエ級数で表す。

$$\begin{aligned} TEC &= S(EI) g(t) \\ &= S(EI) \left\{ a_0 + \sum_{m=1}^M (a_m \cos 2\pi m t + b_m \sin 2\pi m t) + c \cot \right\} \quad (6) \end{aligned}$$

ここで t は日単位で表した時刻である。{}内の最後の項は日周成分以外をモデル化するための項である。未知パラメータは a_0, a_m, b_m, c_0 。これらのパラメータを緯度毎に決定することにより TECMETER で観測する緯度範囲をカバーする。現実的には1日周期とその4倍の高調波程度までを考えればよい近似となるため^[7]、 $M=4$ とする。必要に応じて、緯度方向への内挿を行う。モデルCを一般化すると地球表面内のある帯状の範囲内の垂直TECの球面調和関数による表現となる。

モデルD

TECMETERで観測する緯度範囲 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ の地球表面の帯状の領域をある地方時範囲の領域に分割しその領域毎のTECを2変数の多項式で表す。

$$TEC = S(EI) g(\lambda, LT) = S(EI) \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M p_{n,m} \lambda^n LT^m \quad (7)$$

ここでLTは地方時である。未知パラメータ $p_{n,m}$ を地方時の領域毎に求める。とりあえず2次までを考える（このモデルはLanyi and Roth, 1988^[8]とほぼ同じモデルである）。

以上4つのモデルについてパラメータを最小二乗フィッティングで求める。実際の観測方程式としては、衛星毎のオフセットおよびTECMETER自体のオフセットも未知パラメータとして組み込む。すなわち、TECMETERで観測されるTECは

$$TEC_i = TEC + O_s + O_i \quad (8)$$

と表せる。ただし、右辺のTECはモデルAからD、 O_s は衛星で生じるオフセット（ s は衛星の区別）、 O_i はTECMETER側で生じるオフセット（ i は観測器の区別）を表す（今回 O_s はデータ数の制約から推定を行っていない）。

3. 各種モデルの比較結果（モデルDを除く）

各種モデルで得られた電波星方向のTEC2周波VLBIで観測される電離層での遅延補正量と比較した。VLBI基線の両端局1および2でGPS観測結果からマッピングしたTECを TEC_1 、 TEC_2 とすると

$$\Delta \tau_{\text{obs}} = 1.34 \times 10^{-7} \cdot (TEC_2 - TEC_1) / f^2 \quad (\text{sec}) \quad (2)$$

ここで f : Xバンド受信周波数 (Hz)

でVLBI観測からえられる遅延補正量に相当する遅延を計算できる。モデルから求めた遅延補正量とVLBI観測から得られる遅延補正量と比較することによりモデルの良否を判定することにする。図1に各モデルの比較を示す（機器定数は1日の平均値としてあらかじめ推定した値を用い、かくモデルごとには固定した機器定数を使用している）。比較に使用した実験は1989年12月6日に実施した鹿島-父島基線実験（基線長約1000km）（図の左列）と1990年6月30日に実施した鹿島-南鳥島実験（基線長約2000km）（図の右列）である。今回モデルDのプログラム開発が間に合わなかったのでモデルAからCまでの比較を行っている。図の上段はモデルA、中段はBそして下段はCを示す。それぞれの図の横軸はVLBI観測から得た遅延補正量、縦軸はGPS観測から得た遅延補正量である。図中の破線は両者の関係を直線近似した場合を示す。比較のために傾き 45° の直線で近似した場合を点線で示す。

よいモデルは直線近似の勾配および残差から判定できるが（1）破線の勾配が点線すなわち 45° に近く（2）直線近似後の残差のばらつきが小さい、ほど良いモデルといえる。モデルAは鹿島-南鳥島実験時は良いモデルとなっているが、鹿島-父島実験ではそれほど良いモデルとはなっていない。モデルBは鹿島-父島実験

ではモデルBに比べて良くなっているが、逆に鹿島-南鳥島実験に対しては悪化している。これらに比べてモデルCは両者に対して良い結果を与えるモデルといえることができる。

4. まとめ

実際にVLBIの電離層補正に適用するには実験の条件に余り依存しない、モデルCが適していると言えよう。モデルDは今回、結果が間に合わなかったが、モデルCと同等程度か時間帯によってはそれ以上よい結果が得られるかも知れない。いずれにしても、直接法よりも間接法の方が適用範囲が広そうである（GPS観測方法を電離層観測に応用するためにも間接法が適している）が、条件によっては直接法の方が良い場合もありそうである。そこで単周波VLBIへの応用に限れば両者を混合した実用的モデルも検討する必要があるだろう。

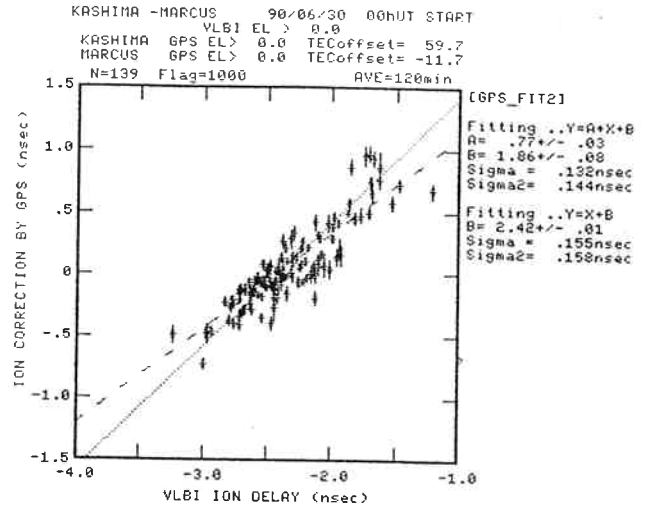
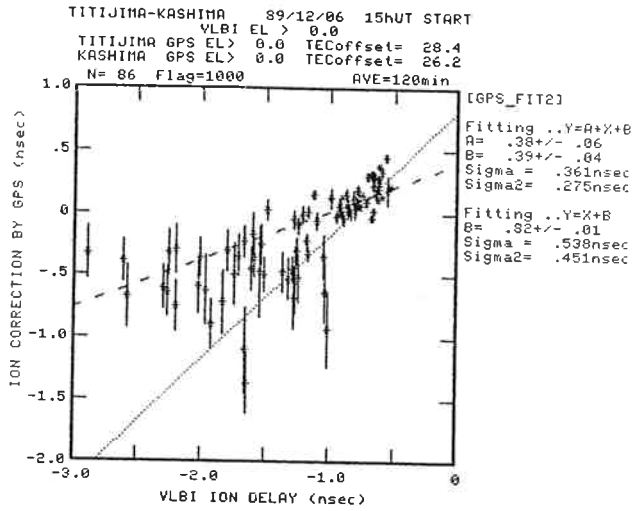
参考文献

- [1] Royden, H.N., R.B. Miller, and L.A. Buennagel, "Comparison of NAVSTAR satellite L band ionospheric calibrations with Faraday rotation measurements", *Radio Sci.*, **19**, 798-804, 1984.
- [2] 今江理人、三木千紘、高橋富士信「2周波相関方式高精度GPS受信装置 - 電離圏全電子数測定と精密測位への応用 -」、第77回通信総合研究所研究発表会予稿、1989、11月。
- [3] 三木千紘、今江理人、「スペクトル逆拡散を利用した電離層伝播遅延時間測定法」、021202、昭和63年。
- [4] 近藤哲朗、雨谷 純「単周波数帯VLBIの電離層補正について - その3」、第412回研究談話会資料、1989、7月。
- [5] 近藤哲朗、今江理人、雨谷 純、金子明弘「GPS衛星を用いてのVLBI電離層補正」、第419回研究談話会資料、1989、12月。
- [6] 近藤哲朗、今江理人、雨谷 純、金子明弘、松坂 茂、飛田幹男「GPS衛星利用全電子数測定結果とVLBIで得られた全電子数の比較」、第421回研究談話会、1990、2月。
- [7] Kondo, T. and S. Hama, "Estimation of total electron content using very long baseline interferometer", *Proc. NIPR Symp. Upper Atmos. Phys.*, **3**, 96-104, 1990.
- [8] Lanyi, G.E. and T. Roth, "A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations", *Radio Sci.*, **23**, 483-492, 1988.

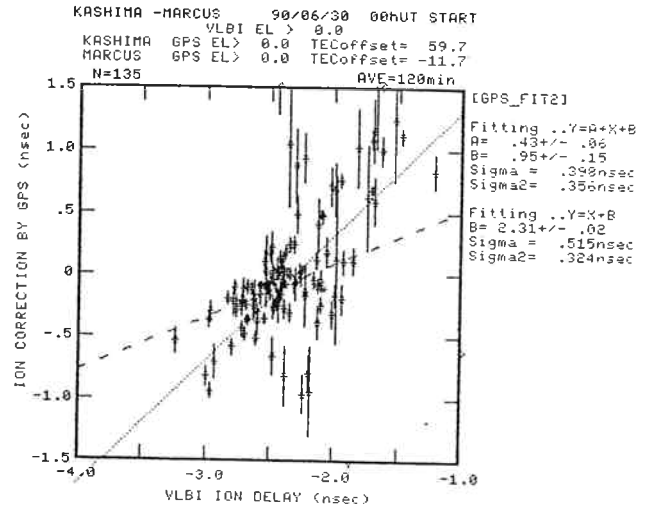
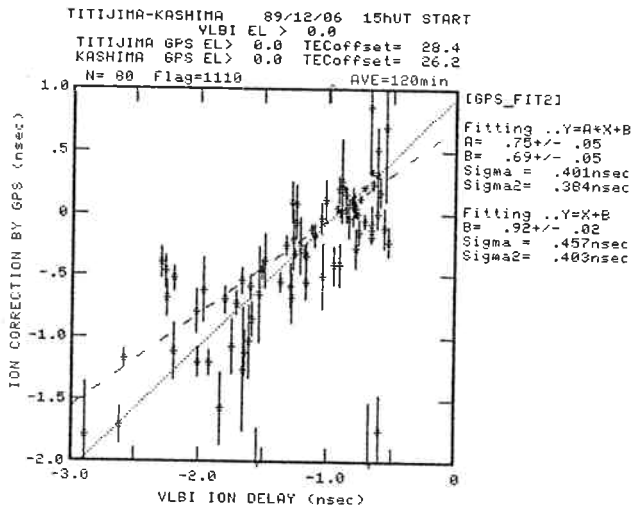
鹿島-父島 (DEC. 6, 1989)

鹿島-南鳥島 (JUN. 30, 1990)

A



B



C

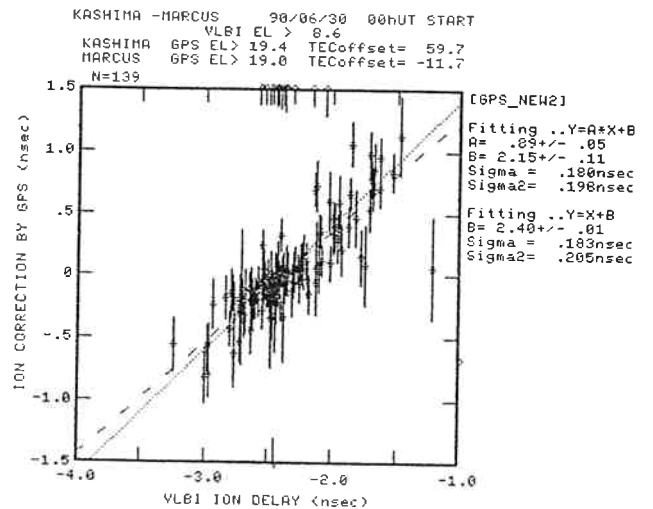
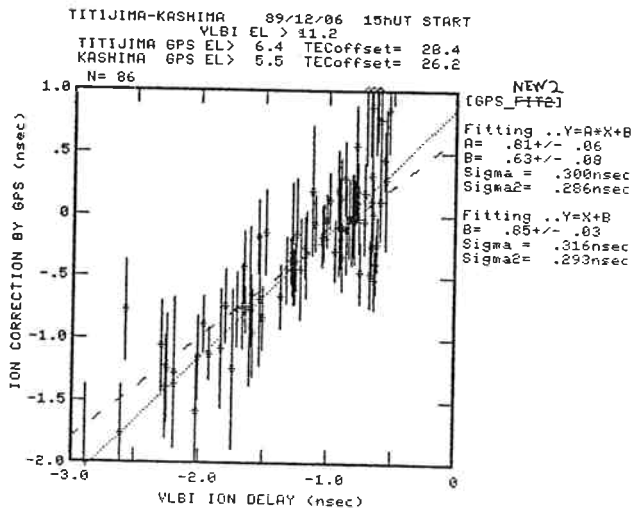


図1. 各種モデルの比較。上から下へモデルA、B、Cに対応する。左側3枚は鹿島-父島実験(1989.12.6)、右側3枚は鹿島-南鳥島実験(1990.6.30)である。それぞれの図の横軸は2周波VLBI観測で得た電離層遅延(8GHzでの電離層遅延の2局での差)、縦軸はGPS観測で得たTECから計算したVLBI観測遅延に相当する電離層遅延。図中の破線は両者の関係を直線近似した場合を示す。比較のために傾き45°の直線で近似した場合を点線で示す。