

GPS衛星毎のL1, L2送信器間の オフセットの推定について

関東支所鹿島宇宙通信センター
宇宙電波応用研究室
近藤哲朗

標準測定部
周波数・時刻比較研究室
川合栄治

1. はじめに

GPS衛星からL1 (1575MHz) およびL2 (1227MHz) の電波が放射されているが、それぞれの電波は共通のPコードと呼ばれるコードで変調がかけられている。したがってL1とL2間の伝播遅延を容易に測る事ができ、その値から伝播路上の全電子数(TEC)が測定できる。しかしながらこうして測定される伝播遅延にはL1, L2送信器間のオフセットが含まれているため複数のGPS衛星を観測して得たTECデータから1つの電離層TEC分布を精度良く求めるためには衛星毎のオフセットを補正しなければならない。現在15ヶ以上のGPS衛星が電波をだしているが、このオフセットを1局のGPS利用全電子数測定装置(TECMETER)データから衛星毎に推定した。今回の推定では電離層を高度300kmの層状と仮定し、さらに『ある観測局から見たGPS衛星の電離層投影点の軌跡(時刻UT-緯度LAT面上)での2つのGPS衛星の交点での鉛直方向での全電子数は等しくなければならない』という単純な原理を用いた。実際にUT-LATプロット上で2つのGPS衛星の軌跡の交点を調べるとほとんどすべてのGPS衛星の組み合わせについて結び付ける事が出来る。実際の推定には各衛星毎のオフセットおよびTECMETERの機器内オフセットも未知数として最小自乗フィッティングを行う。ただTECMETERオフセットと各衛星毎の共通オフセットはパラメータ間のカップリングが強いため、TECMETERオフセットを独立に推定することが困難なことが多く実際には得られた衛星毎のオフセットは相対値のみが意味を持つてくる。

2. GPS衛星軌跡の時刻(UT)-緯度(LAT)投影

電離層を地上からある高度(h)の層状と仮定すると、GPS衛星からの電波が地上の観測点Oに到達する途中に電離層を横切るがその点Pの地上投影点P'が存在する(図1)。さらに電離層が太陽-地球座標系に対して固定した構造であると

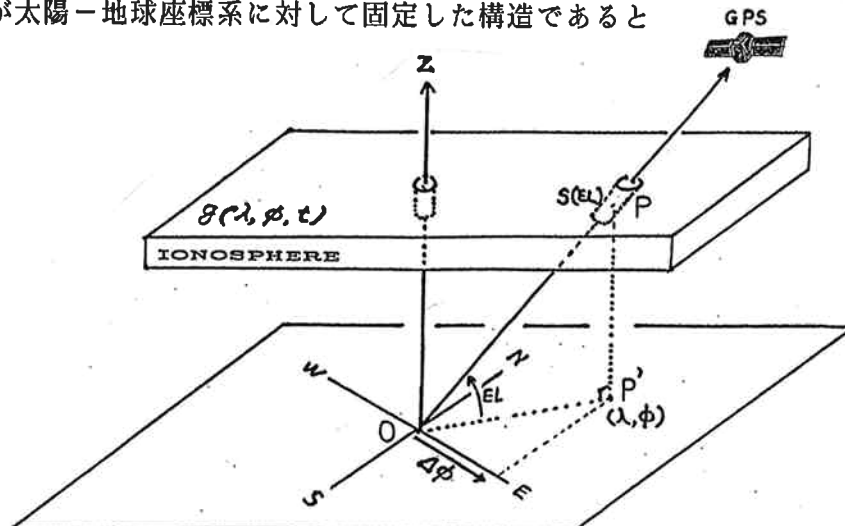


図1. 電離層通過点Pとその地上投影点P'。

仮定すると（—電離層全電子数が顕著な日変化を示すことは第1近似としてこの仮定を用いても良いことを示している—）、 P' と O の経度の違いを地方時の違いとして観測点 O の時刻に補正を加えることが出来る。つまり図1の様な状況において O 点の地方時を t とすると経度の違い $\Delta\phi$ （東向きを正）を用いて P' の地方時を

$$t' = t + \Delta\phi / 360^\circ$$

と表すことができる。ただし t および t' は日単位で表している。ここで O 点の時刻としては地方時のかわりにUTを用いることができる。つまり経度の違いをUTの違いとして O 点の時刻に押し込めることに相当する。こうすることにより O 点からみたGPS衛星の動きを P' 点の動きとして O 点の時刻(UT)と P' 点の緯度(LAT)つまりUT-LAT面上で表すことが出来る。こうして得られたGPS衛星軌跡の例を図2に示す。なお電離層高度は300kmとした(以下、すべて電離層高度は同じ値)。

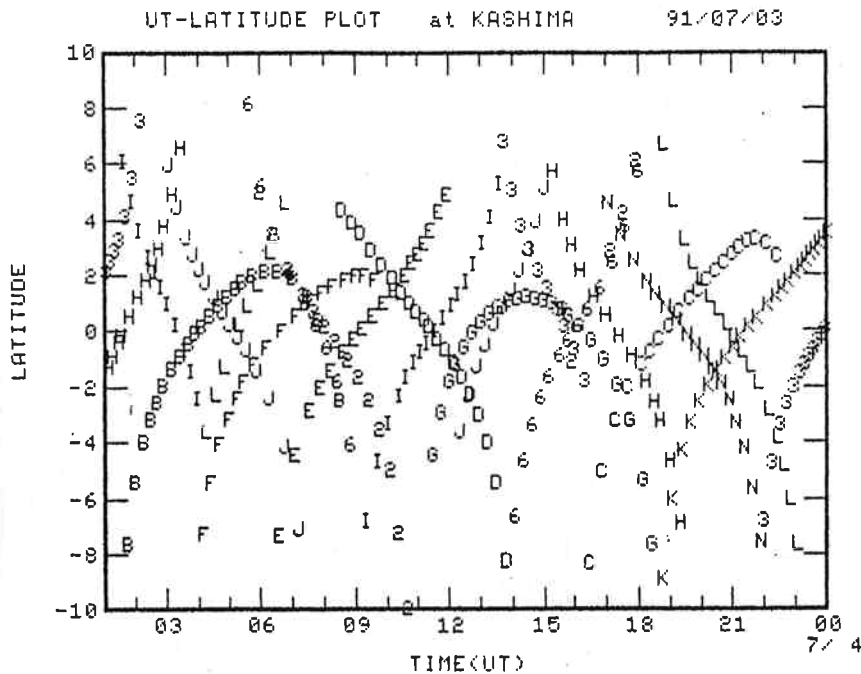


図2. UT-LAT図上でのGPS衛星の軌跡例。1991年7月3日に鹿島で観測したデータからGPS衛星の位置をUT-LAT上にプロットした。緯度は鹿島に対する相対緯度。文字の違いはGPS衛星の違いを示す。

UT-LAT図上でのこうしたGPS衛星の軌跡は毎日ほぼ同じパターンを繰り返す(1日あたり4分ずつ時間軸方向にずれるだけである)。

3. GPS衛星毎のL1, L2オフセットの推定

図2に示されるようにUT-LAT図上で複数のGPS衛星の軌跡が交差している。ここで、その交点における垂直方向全電子数は等しくなければならないと仮定するとGPS衛星毎のL1, L2間のオフセットを求めることが出来る。UT-LAT図上での2つのGPS衛星 i, j の交点での天頂TECを N_{ij} とするとそれぞれのGPS衛星方向に対して観測されるTECは

$$N_i = S(E_{ij-i}) N_{ij} + O_i + O_t \quad (1)$$

$$N_j = S(E_{ij-j}) N_{ij} + O_j + O_t \quad (2)$$

ここで、 $S()$ は天頂TECをある仰角にマッピングするための関数、 E_{ij-i} 、 E_{ij-j} は衛星 i, j の仰角である(通常衛星の組み合わせが異なると仰角も異なるため少しくどい表現ではあるが組み合わせを示すために ij を入れている)。 O_i 、 O_j は衛星 i, j それぞれのL1, L2間のオフセット、 O_t はTECMETERの機器オフセットである。 $S()$ として次式を用いている。

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

ここで E: 仰角
 R_E : 地球半径
 h : 電離層高度 (300 km)

ところで1~2週間ほどの観測では交点の仰角はほぼ一定なので(1)(2)式においてS()は定数とみなすことが出来る(N_{ij} は毎日変化しても良い)。そこで観測されたTECをS()で割った値つまり(1)(2)から

$$N_{ij} / S(E_{ij-i}) = N_{ij} + (O_i + O_t) / S(E_{ij-i}) \quad (1)'$$

$$N_{ij} / S(E_{ij-j}) = N_{ij} + (O_j + O_t) / S(E_{ij-j}) \quad (2)'$$

を考える。例えば(1)'をX軸、(2)'をY軸にとって観測データをプロットするとL1, L2間オフセットやTECMETERの機器オフセットが変動しないならば斜め45°の直線上にデータ点はのぼらずである。実際にプロットした例を図3に示すがほぼ45°の直線上にデータが分布していることがわかる。通常交点での観測データが無いことが多いので内挿により交点でのデータを得ている。

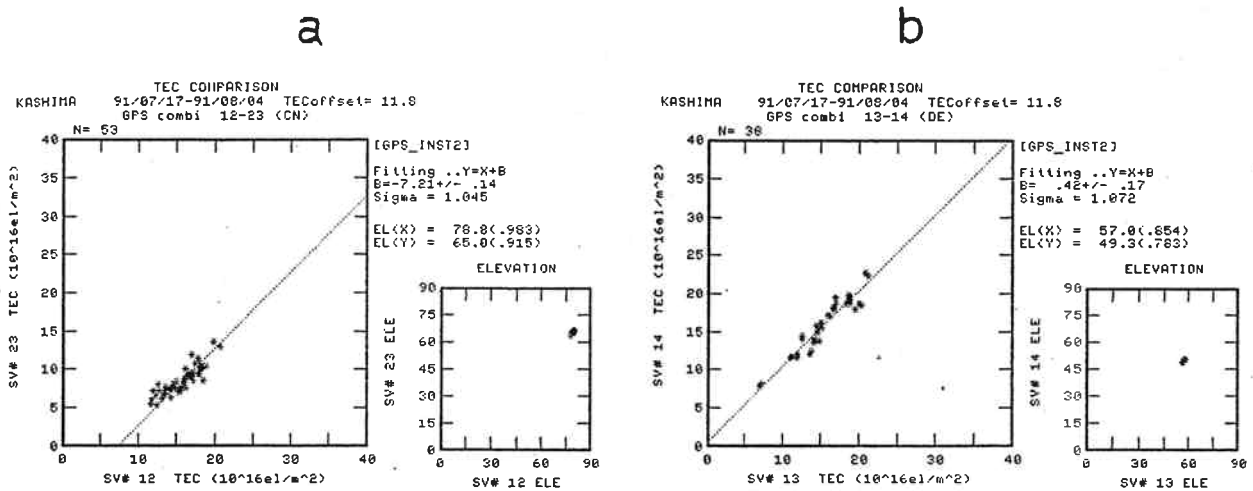


図3. GPS衛星軌跡の交点におけるTEC(観測値/仰角係数)
 (期間91.7.17-8.4)。a. SV#23と12の交点。b. SV#
 13と14の交点。

さて45°の直線のY切片を b_{ij} とすると

$$b_{ij} = (O_j + O_t) / S(E_{ij-j}) - (O_i + O_t) / S(E_{ij-i}) \quad (4)$$

と表される。(4)式を観測方程式として色々な衛星の組み合わせに関して求めた b_{ij} からL1, L2間のオフセットとTECMETERのオフセットを最小二乗推定で求めることが出来る。最小二乗推定に必要な偏微分係数は(4)式から

$$\frac{\partial b_{ij}}{\partial O_i} = - \frac{1}{S(E_{ij-i})}$$

$$\frac{\partial b_{ij}}{\partial O_j} = \frac{1}{S(E_{ij-j})}$$

$$\frac{\partial b_{ij}}{\partial O_t} = \frac{1}{S(E_{ij-j})} - \frac{1}{S(E_{ij-i})}$$

で計算される。したがって例えばGPS衛星が4個として異なる衛星間の交点がすべての衛星の組み合わせに付いて存在したとすると、ヤコビアン行列は

$$\begin{matrix}
 & 0_1 & 0_2 & 0_3 & 0_4 & 0_t \\
 \begin{matrix} b_{12} \\ b_{13} \\ b_{14} \\ b_{23} \\ b_{24} \\ b_{34} \end{matrix} & \left(\begin{array}{ccccc}
 -1/S(E_{12-1}) & 1/S(E_{12-2}) & 0 & 0 & 1/S(E_{12-2})-1/S(E_{12-1}) \\
 -1/S(E_{13-1}) & 0 & 1/S(E_{13-3}) & 0 & 1/S(E_{13-3})-1/S(E_{13-1}) \\
 -1/S(E_{14-1}) & 0 & 0 & 1/S(E_{14-4}) & 1/S(E_{14-4})-1/S(E_{14-1}) \\
 0 & -1/S(E_{23-2}) & 1/S(E_{23-3}) & 0 & 1/S(E_{23-3})-1/S(E_{23-2}) \\
 0 & -1/S(E_{24-2}) & 0 & 1/S(E_{24-4}) & 1/S(E_{24-4})-1/S(E_{24-2}) \\
 0 & 0 & -1/S(E_{34-3}) & 1/S(E_{34-4}) & 1/S(E_{34-4})-1/S(E_{34-3})
 \end{array} \right)
 \end{matrix}$$

となる。ここでヤコビアン行列にランク落ちがなければすべてのパラメータが推定出来ることになる。

4. 結果

1991年7月17日から8月4日まで鹿島で観測したTECMETERデータを用いて、実際にGPS衛星毎のL1, L2間オフセットを推定した。この期間15衛星についてデータが取得できた。この内、UT-LAT図上で交点が得られた組み合わせは表1に示す21通りであった。これらの21通りの組み合わせについてまず b_{ij} を求め、さらに

表1. GPS衛星の組み合わせ表

		GPS SV#														
		2	3	6	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	23
GPS SV#	2															
	3	-														
	6	○	-													
	11	○	-	-												
	12	-	-	-	-											
	13	-	-	-	-	-										
	14	○	-	-	-	-	○									
	15	○	-	-	-	-	-	-								
	16	-	○	-	-	○	○	-	-							
	17	-	-	○	-	○	-	-	-	-						
	18	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-					
	19	-	○	-	○	-	-	-	○	○	-	-				
	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
	21	○	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	
	23	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-

その値を観測量として衛星毎のオフセットを求めた。今回用いたデータからは幸いにもすべての衛星についてオフセットを推定できた(つまり表1ですべての衛星について何らかの組み合わせで結び付けられていた)。ただしTECMETERのオフセットを推定しようとするとヤコビアン行列のランク落ちが生じたためTECMETERのオフセットは推定しなかった。したがって推定で得たGPS衛星毎のオフセットにはTECMETERオフセットも含まれていることになり衛星毎の相対値のみが意味を持つてくる。結果を図4で示すが、図では衛星毎のオフセットの重み付き平均値を引き去っている。オフセットはTECで表示してあるが、 $10^{16} \text{el}/\text{m}^2 = 0.35 \text{nsec}$ で時間単位に変換できる。図からオフセットのばらつきは $\pm 10 \times 10^{16} \text{el}/\text{m}^2$ におさまっていることが読み取れる。この結果が正しいのかどうか客観的に評価する方法が今のところないが、例えばオフセットが安定であるならば違う季節に取得したデータから求めたオフセットを比較してみるという方法が考えられる。

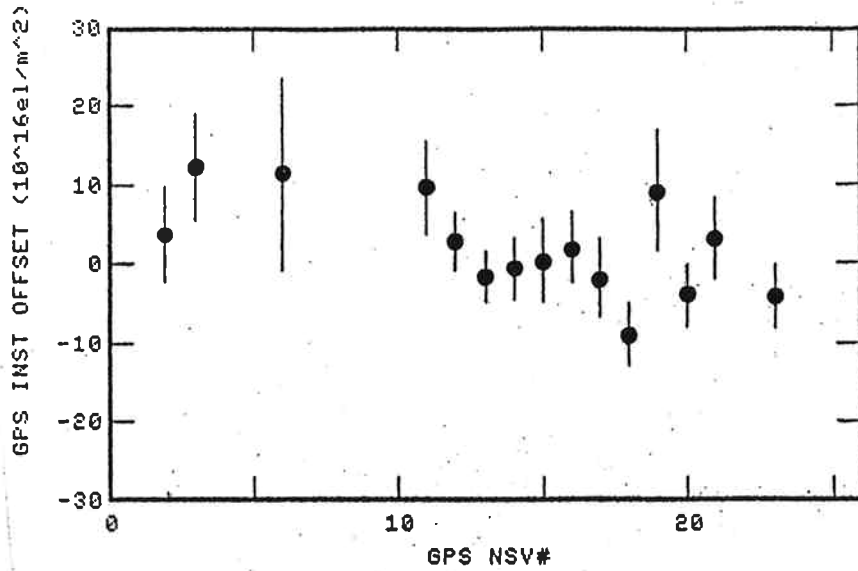


図4. GPS衛星毎のL1, L2オフセット推定値。

5. おわりに

本研究はTECMETERデータを単周波VLBIの電離層補正に応用するところから始まっている^[1]。つまり電離層垂直TEC分布を精度良く求めるための一環として検討したGPS衛星毎のオフセットの推定方法が今回の方法である。もっと長期にわたるデータを使うことによりTECMETER自体のオフセットも独立に求められる可能性がある。しかしながらこうして得られたオフセットの客観的評価がむつかしく、現在評価法を検討中である。

参考文献

[1] 近藤、雨谷、小山、今江「GPS利用全電子数測定装置を用いての単周波VLBI電離層補正」、第434回共通研究談話会資料、1991、6月。