

GPS を用いたパルサー-VLBI 観測の電離層遅延補正

関戸 衛、近藤哲朗、川合栄治
通信総合研究所 宇宙電波応用研究室
今江理人
時空計測研究室

概要

パルサーの位置天文 VLBI 観測の精度及び確度の向上を目指して、GPS の信号を使って電離層遅延量を測定し、VLBIデータの補正に適用した。その結果、電離層補正を行わなかった場合に比べて、フォーマルエラーは大きくなるものの、系統誤差の改善を示唆する結果が得られた。

1. はじめに

我々は 1995 年よりロシアのレベデフ物理学研究所とパルサーの VLBI による位置天文観測を行っている(関戸他、1998)。この観測では、1.4GHz または 2.2GHz 帯の単周波観測を行っており、この帯域では電離層の遅延が最も大きな不確定要因として誤差に影響する。単周波観測であるため測地 VLBI のように 2 周波同時観測による電離層補正ができないので、これまでの解析では電離層遅延を大気遅延量等に含めて推定し、天体の位置を求めてきた(Sekido et al., 1999)。より確実な電離層遅延の補正を行うため、今回 GPS 衛星を使った電離層総電子数観測装置(テックメータ)を鹿島、ロシアの両観測局に設置し、GPS 観測で得られる電離層遅延データを使ってパルサー VLBI 観測の補正を試みた。

2. テックメータの原理と電離層遅延測定における問題

2.1 テックメータの原理

電離層を電磁波が通過する際には、電離層のプラズマ周波数より高い周波数の電磁波は、周波数の二乗に反比例した遅延を受ける。GPS 衛星からは疑似拡散コード(P コード)が L1(15575.42MHz)と L2(1227.60MHz)の 2 周波の信号で発射されており、テックメータは L1, L2 の受信信号間の相関をとって P コードの相関を検出し、二つの周波数間での信号の到達時間差を求めて、GPS 衛星の視線方向の総電子数を測定する。我々は 1998 年春から、ロシアの Kalyazin 局及び、日本の鹿島局にテックメータを設置し、電離層の総電子数観測を開始した。GPS の信号を使って観測される電離層遅延量を、VLBI 観測の補正に使用するためには、(1)衛星コードバイアス、(2)受信機バイアス、(3)電離層モデル、の三つの課題がある。

2.2 衛星コードバイアス

衛星コードバイアスとは、GPS 衛星が L1, L2 の電波に載せた P コードを衛星から発射する時間差である。衛星コードバイアスについては、今回ドイツの研究機関 DLR から提供してもらった値を使用した。DLR は IGS (International GPS Service) 及びドイツ国内の GPS 観測点 合計約 27 観測点のデータを使って連日のヨーロッパ上空の地域的な電離層マップを作って公開しており、解析時に副産物として得られる毎日の GPS 衛星コードバイアスの推定値も公開している(<http://www.nz.dlr.de/gps/gps-ion.html>)。衛星コードバイアスのオフセットは数 ns 程度である。

2.3 受信機バイアス

受信機バイアスとは、受信機内部に起因する L1, L2 の受信時間差であり、次のような観測方程式をたて、観測データに最小二乗法でフィットさせ天頂遅延量 t_{zen} 、および受信機バイアス t_{rx} を推定した。

$$t_{obs,i} - t_{t,j} = t_{zen} \times fm(el_j) + t_{rx} \quad , \quad fm(el) = \frac{1}{\cos[\sin^{-1}\{\frac{R+h}{R+H} \cos(el)\}]} \quad (1)$$

$t_{obs,i}$ $t_{t,j}$ はそれぞれ、i 番目の観測遅延量、j 番衛星のコードバイアスであり、衛星コードバイアスは DLR の値を既知として使用する。fm(el) は球殻状マッピング関数で、R:地球半径、H:電離層高度、h:観測地点高度

(どちらも楕円体高)、 e_l :仰角である。マッピング関数としては、電離層がある高度(200 - 350km)で指数関数的に電子密度が大きくなっていることがロケット観測などで確認されており、球殻状のシートモデルが簡単な近似として成り立つ。電離層高度は300kmと仮定し、観測方程式を最小二乗フィットした結果、得られた天頂遅延と受信機バイアスの値は、鹿島局： $z_{en}=22.5 \pm 0.2ns$ 、 $r_x = -13.5 \pm 0.2ns$ 、Kalyazin 局： $z_{en}=15.8 \pm 0.1ns$ 、 $r_x = -7.7 \pm 0.1ns$ である。

2.4 電離層モデル

テックメータのデータを VLBI 観測の補正に使うには、電離層遅延の測定点がない天球領域を、測定点のある天球領域の電離層モデルを内挿及び外挿することによって求める必要がある。そこで、必要となる電離層モデルを考えるに当たって、太陽方向を基準とした座標系でみると、電離層は時間的に緩やかに変化する、地球を取り巻く球殻状の電子密度分布で近似できると仮定する(Kondo T., Imae M, 1993)。テックメータで観測された電離層遅延量を、(1)衛星コードバイアス、受信機バイアスの補正、(2)電離層高度300kmを仮定した球殻状電離層モデルのマッピング関数((1)式)で鉛直方向の遅延量へ変換し、各点を電離層面上の(地方時、緯度)で表現する (3) GPS と VLBI 観測の観測周波数の違いによる遅延の差を周波数比の二乗で補正、といった処理を施し、これを観測量とする。次に、電離層電子密度分布のモデルとして、緯度(Lat) 方向に一次傾斜の関数 $g(Lat)$ と Local Time(LT) 方向には一次傾斜と24時間を基本周期とする三角関数を4次まで使用した関数 $f(LT)$ との積からなる観測方程式を立てる。つまり $VTEC(LT, LAT) = f(LT) \times g(Lat)$ と表し、 $f(LT), g(Lat)$ をそれぞれ次のようにおく。VTEC は天頂方向の遅延量である。

$$f(LT) = a_0 + \sum_{m=1}^4 \{ a_m \cos(\frac{2\pi}{T} mLT) + b_m \sin(\frac{2\pi}{T} mLT) \} + c_0 LT, \quad g(LAT) = d_0 + d_1 LAT$$

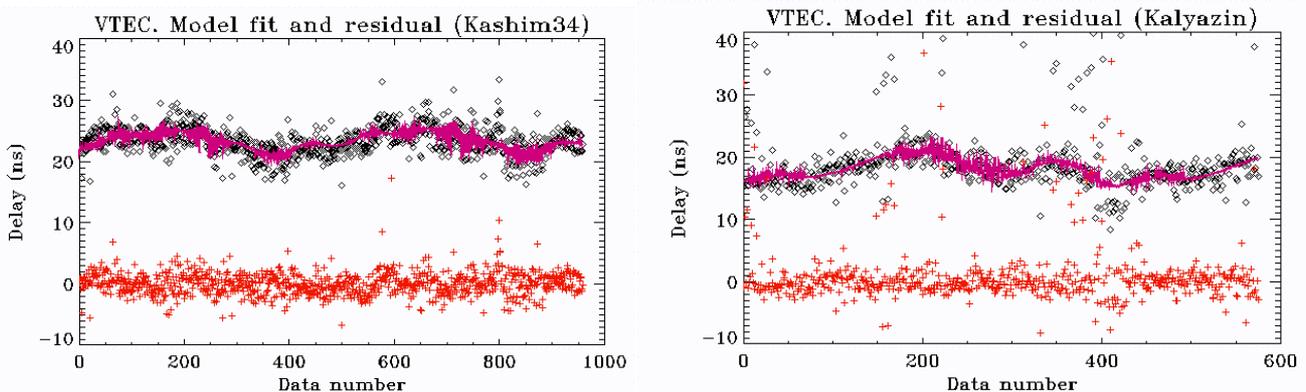


図1 電離層面上の鉛直遅延量をモデルフィッティングした結果とその残差。◇：観測された鉛直遅延量、実線：電離層モデル、+：残差である。モデルフィッティングした重みつき残差は鹿島：1.6ns、Kalyazin：2.6ns。

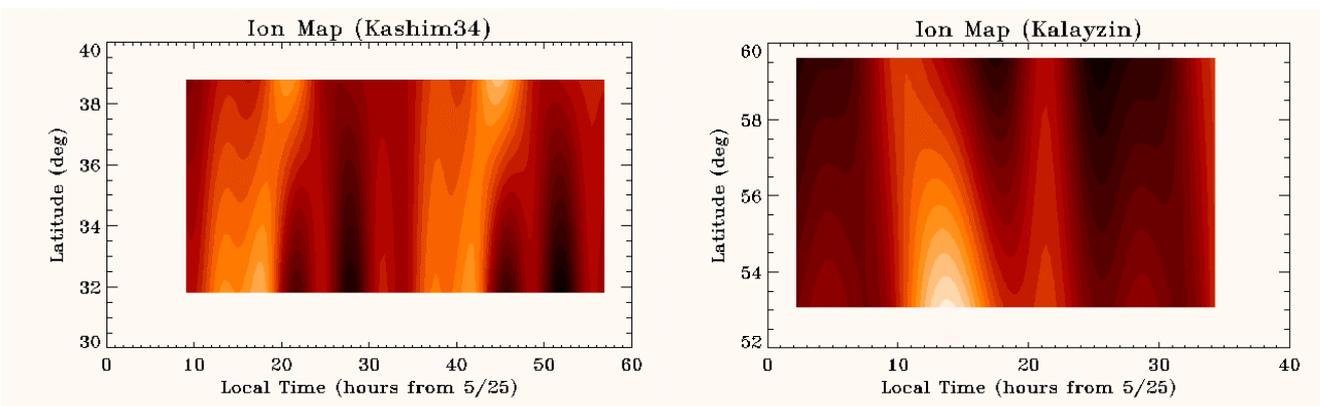


図2 モデルフィッティングにより得られた、鹿島(左)とKalyazin(右)上空での電離層電子面密度分布

二つの関数の積を展開して最終的な観測方程式とし、その係数を最小二乗法で解くことにより、電離層のモデルを求めた。最小二乗法を解くにあたっては、Kalayzin の観測値のばらつきが大きかったため、残差の大きな観測点の重みを小さくして、大きく離れた観測誤差の影響を受けにくくする「ロバスト推定法」(中川徹、小柳義夫、1982)を用いた。このモデルフィッティングの残差プロットを図1に、求められた電離層電子密度分布を図2に示す。こうして得られた電離層モデルを使って、VLBI 観測時の視線方向の電離層遅延を両観測局について計算し、その差をとって、VLBI 観測の補正量とした。位相遅延変化率については、位相遅延の符号が群遅延と逆符号であるため、符号を変えた群遅延量と仰角変化率及び球殻状マッピング関数の仰角変化率との積から算出した。

3 電離層遅延補正を加えた VLBI 解析

2節で求めた電離層補正值を、Mark-IIIデータベースに登録し、NASA/GSFC によって測地/位置天文 VLBI 解析用に開発された VLBI データ解析ソフトウェア calc/solve を使って1998年5月のVLBI観測データからパルサーPSR0329+54 の位置を推定した。解析には、群遅延と位相遅延変化率の両方を使った場合と、群遅延のみを使った場合の二通り行った。推定パラメータは、Kalyazin局のクロック、両局の大気のアフセットと、6時間毎の大気遅延変化率、パルサーPSR0329+54の座標である。解析結果を表1に示す。電離層補正を行わなかった場合と比べると、フォーマルエラーが2-3倍大きいこと、遅延残差が2倍程度大きい事が分かる。また、推定されたパルサーの座標値は、赤緯の値が30masほどシフトしている。

表1 電離層遅延の補正を行ったパルサー位置推定結果

| | | 残差 (ns) | PSR0329+54 の推定座標値 | |
|-------------|--------------|---------|-------------------|-----------------|
| | | | 赤経 (秒のみ) | 赤緯 (秒角のみ) |
| 電離層補正 あり | Delay & Rate | 1.8 | 59.581 ± 0.001 | 43.441 ± 0.01 |
| | Delay Only | 1.6 | 59.381 ± 0.001 | 43.446 ± 0.007 |
| なし | Delay & Rate | 0.8 | 59.3833 ± 0.0005 | 43.4757 ± 0.004 |

電離層補正を行って得られたPSR0329+54の位置の推定結果を1981.21年のBartel et al.(VLBI) (Bartel et al., 1985)、1981.21年エポックのFomalont et al.(VLA) (Fomalont et al., 1984)、及び電離層補正を行わない我々の1995.20年、1996.36年、1998.40年のデータと比較してみる(図3)。赤経の座標値はほとんど変わらないが、赤緯の値では30masほどシフトし、Bartel et al.の結果にHarrison et al.(Harrison et al., 1993)の固有運動(17 ± 1 mas/yr, 13 ± 1 mas/yr)を合わせた結果と良い一致を示す。このことは、電離層補正を行った方がフォーマルエラーはやや大きくなるものの、バイアス誤差のより小さい結果が得られることを示している。

4 結論

パルサーの位置天文 VLBI 観測を行っている鹿島 Kalyazin(ロシア)基線で、テックメータを使って単周波 VLBI 観測の電離層補正を行った。衛星コードバイアス、受信機バイアスを補正し、時間的に緩やかに変化する電離層モデルを、観測データに最小二乗フィットさせて、鹿島、Kalyazin両観測局上空の電離層分布をモデル化した。この電離層モデルを使って各局における VLBI 観測の視線方向の電離層遅延、遅延変化率を計算し、これを補正值として VLBI の解析を行った。その結果、電離層遅延の補正を行うことにより、過去の文献と良い一致を示す結果が得られ、位置天文 VLBI 観測の確度向上に有効であることが示された。しかし、位置決定精度については改善することができなかった。原因は(1)緯度の高い Kalyazin 局(57度)において北天の電離層遅延の測定が出来ないこと。(2)テックメータの(1.5GHzにおける)測定精度が2-3nsであり、精度が十分でないこと、などが考えられる。今後、パルサー VLBI 観測に同様の手法を適用し、過去の Bartel et al., Harrison et al.らの結果と一致する結果が得られるかどうか確認するとともに、測地 VLBI と GPS の同時観測を行い、GPS 観測から求められた電離層補正值の妥当性を確認する予定である。

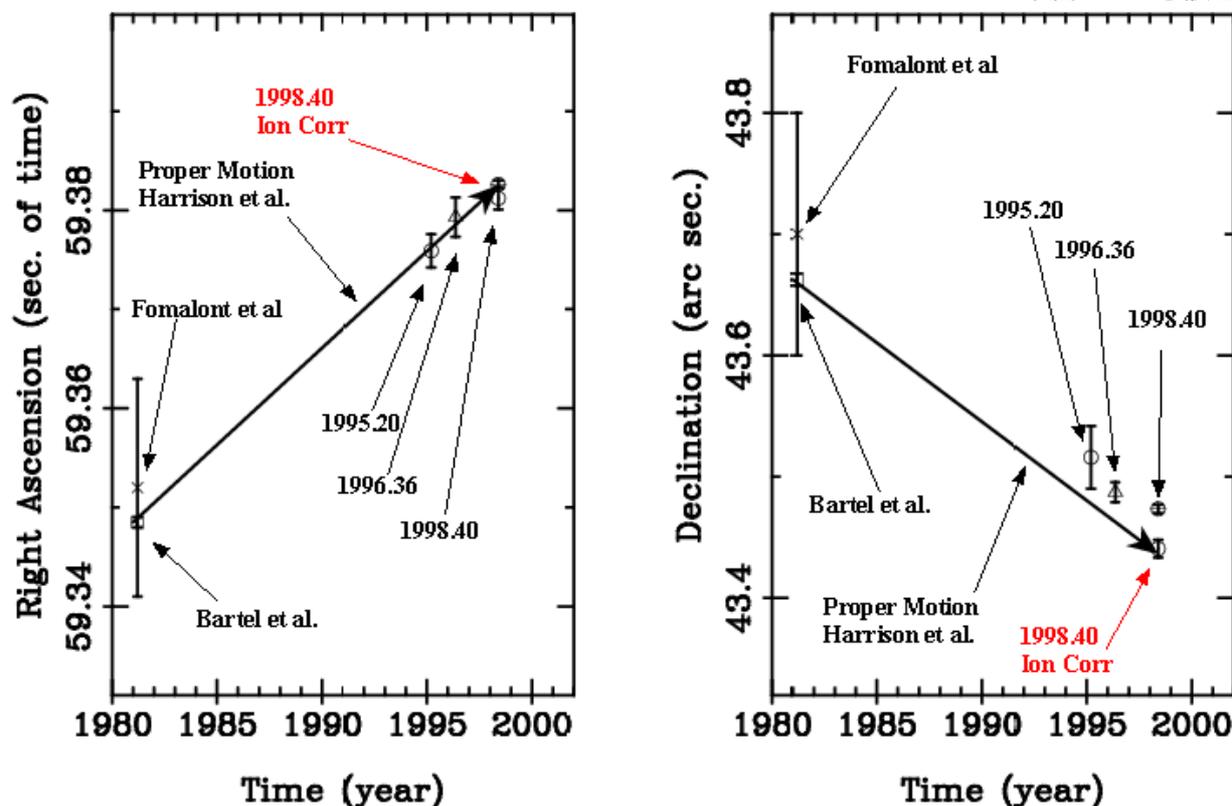


図3 電離層補正を行った解析の結果と、これまでの他の測定結果の比較。Bartel et al.(VLBI) (Bartel et al., 1985), Fomalont et al.(VLA) (Fomalont et al., 1984), 及び電離層補正を行わない我々の実験データ 1995.20, 1996.36, 1998.40, と電離層補正を行った結果。矢印は、Harrison et al.(Harrison et al., 1993) らが MARLIN の干渉計で求めた固有運動で 1981.21 から 1998.40 の期間の動きを示した。矢印の原点は Bartel et al. の結果に一致させている。

日露 VLBI 実験及び、テックメータを使った観測を行うにあたり多大な協力を頂いたロシアレベデフ物理学研究所のスタッフの皆さん、標準計測部パルサーグループの皆さん、及び、宇宙電波応用研究室の皆さんに感謝します。

5 参考文献

- 関戸 衛、他、“日露パルサー-VLBI による PSR0329+54 の観測結果”、1998 年度 VLBI 懇談会シンポジウム集録、pp168-171
- Sekido, M., et al., “Astrometric VLBI Observation of PSR0329+54”, 1999. PASJ, Vol.51, pp.595-601.
- Kondo T., Imae M., 1993, “Precise Ionospheric Correction by Using GPS Signals for VLBI Geodetic Measurements”, IUGG Vol. 13, 53
- 中川徹、小柳義夫、1982, “最小二乗法による実験データ解析”、東京大学出版会
- Bartel N., Ratner, M.I., Shapiro I.I., Cappallo R.J., Rogers A.E.E., and Whitney A.R., 1985, “Pulsar Astrometry via VLBI”, Astron.J, 90, 318.
- Fomalont E.B., Goss W.M., Lyne A.G., Manchester, R.N., 1984, “Astrometry of 59 pulsars: a comparison of interferometric and timing positions”, Mon.Not.R.astr.Soc., 210, 113
- Harrison P.A., Lyne A.G., and Anderson B., 1993, “New determinations of the proper motions of 44 pulsars”, Mon.Not.R.astr.Soc., 261, 113