GLONASSにおける電離層伝搬遅延量の補正 —GPSの航法メッセージを用いて—

新井直樹*・星野尾一明*・伊藤 実*・村上篤史*

The Correction of Ionospheric Delay on GLONASS —By Using GPS Navigation Message—

Naoki ARAI, Kazuaki HOSHINO, Minoru ITO and Atsushi MURAKAMI

Abstract

The GLObal NAVigation Satellite System (GLONASS) navigation message does not include ionospheric parameters. So we can not correct ionospheric delay when we use a L1-GLONASS receiver. This paper shows the correction of the ionospheric delay on L1-GLONASS signal by using ionospheric parameters in the GPS navigation message.

We placed L1-GLONASS receivers of 8 channels in different places of Japan (Sapporo, Tokorozawa, Fukuoka, and Naha). These receivers include GPS receiving unit. The ionospheric delay at GLONASS frequency was calculated from a delay at GPS frequency. We corrected GLONASS pseudorange by using ionospheric delay at GLONASS frequency.

GLONASS vertical bias error was decreased to a few meters from a few ten meters by using the ionospheric delay correction.

1. はじめに

GLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)はGPSと同様に人工衛星を利用した測位システムである。しかしGPSと異なりGLONASS衛星の航法メッセージには、電離層による電波の伝搬遅延量に関する情報が含まれていない。

一般に1周波のGPS受信機では、GPS衛星の航法メッセージに含まれている電離層パラメータを用いて、電離層の伝搬遅延による測位誤差を補正することができる。しかし、GLONASS衛星の航法メッセージに電離層パラメータが含まれていないことから、1周波のGLONASS受信機では、電離層の伝搬遅延による測位誤差を補正することができない。そのため、垂直方向に平均して数十mのバイアス誤差が生じてしまう。

そこで本研究では、GPSの航法メッセージに含まれている電離層パラメータを用いて、GLONASSにおける電離層の伝搬遅延量を補正し、測位精度の向上を試みた。

2. GLONASSの現状とGPSとの比較

GLONASSはロシアによる全地球的航法衛星システムで、1982年10月に最初の衛星が打ち上げられた⁽¹⁾。1993年にはロシア大統領令により、GLONASS計画を推進することが公式に表明された⁽²⁾。その後も継続して打ち上げが行われ、1996年1月には24個の衛星による測位システムが完成したと言われている。しかしそれ以後は、現在(1997年7月)に至るまで新たな衛星の打ち上げが行われておらず、故障によりいくつかの衛星が運用を終了したため、現状では20個程度の衛星が軌道上に配置され、15個程度の衛星が利用可能な状態にある。

*正会員 運輸省電子航法研究所 (〒181-0004 三鷹市新川6-38-1)

GPSとGLONASSはよく似た測位システムであるが、いくつかの相違点がある。両者の比較を表1⁽³⁾に示し、この中から特徴的な違いについて解説する。

GPSでは、米国の国防上の理由から意図的に精度を劣化させるためにSA (Selective Availability)が施されているが、GLONASSではこのような処理は行われていない。

また送信周波数は、GPSはすべての衛星が同じ周波数で放送しているが、GLONASSは衛星ごとに異なった周波数を割り当てて放送している。なお、送信周波数については現在のところ1602.0MHz～1615.5MHzを割り当てているが、移動体用衛星との干渉をさけるために、低周波数側にシフトする予定である。このシフトは段階的に行われ、2005年までは1602.0MHz～1608.8MHz(表1のKの値が0～+12)、2005年以降は、1598.1MHz～1605.4MHz(表1のKの値が-7～+6)を使用する計画である⁽⁴⁾。

システム時系は、GPSはUTC (USNO)に同期したGPS Timeを、GLONASSはUTC (SU)に同期したGLONASS Timeを用いている。Lewandowski⁽⁵⁾らはGPS TimeとGLONASS Timeとを比較し、それぞれの時系の間に数十 μ secの差があったと報告している。なお、1997年7月1日にGLONASSは一時運用を休止したが、その際にGLONASS Timeに修正が加えられ、GPS Timeとの差が減少した可能性がある。

座標系は、GPSはWGS84座標系を、GLONASSはPZ-90座標系を用いており、これらの座標系を変換するための変換式が報告されている^{(6),(7),(8)}。これらの変換式を用いて、日本周辺におけるWGS84とPZ-90との差を求めると⁽⁹⁾、地表面で水平方向は10m程度、垂直方向は1m程度の差があると考えられる。

衛星から放送される航法メッセージ⁽⁴⁾は、GPSとGLONASSとでかなりの違いがみられるが、その中でも特に大きな違いは、電離層による電波の伝搬遅延量に関する情報の有無である。

GPSおよびGLONASSにおいて、2周波の受信機を用いて測位を行う場合には、L1帯とL2帯の周波数で電離層による伝搬遅延量が異なるので、これらの差から電離層の影響を除去し、測位誤差を補正することができる。あるいはGPSにおいて1周波の受信機を用いる場合には、GPS衛星の航法メッセージに含まれている電離層パラメータを用いて電離層による伝搬遅延量をモデル化し、測位誤差を補正することができる。しかしGLONASS衛星の航法メッセージには電離層パラメータが含まれていないので、1周波のGLONASS受信機を用いて測位を行う場合には、電離層の伝搬遅延による測位誤差を補正することができない。

3. 電離層伝搬遅延量の補正とGLONASSへの適用

GPSの航法メッセージに含まれている電離層パラメータは、Klobucharモデル⁽¹⁰⁾を用いている。Klobucharモデルは電離層の複雑な日変化を単純な曲線で近似し、図1に示すように、一定値(5ns)と、余弦関数の上半分を組み合わせたものである。この一定値は地球上のどの受信点においても同じ値とする。また余弦関数は受信点における地方時の14時にピークを持ち、振幅Aおよび周期Tは、次式から与えられる。

$$\left. \begin{aligned} A &= \alpha_0 + \alpha_1 \Phi_m + \alpha_2 \Phi_m^2 + \alpha_3 \Phi_m^3 \\ T &= \beta_0 + \beta_1 \Phi_m + \beta_2 \Phi_m^2 + \beta_3 \Phi_m^3 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで Φ_m は地磁気緯度、 $\alpha_0 \sim \alpha_3$ および $\beta_0 \sim \beta_3$ はGPS衛星から放送されている8個のパラメータである。

このようにして得ることができるGPSの電離層モデルを、本研究では、次に示す方法でGLONASSに適

表1 GPSとGLONASSの比較

Parameter	GPS	GLONASS
SIGNAL STRUCTURE		
C/A Code (L1)		
Code rate	1.023 MHz	0.511 MHz
Chip length	293 m	587 m
Selective availability	Yes	No
P Code		
Code rate	10.23 MHz	5.11 MHz
Chip length	29.3 m	58.7 m
Selective availability	Yes	No
Encryption (anti-spoofing)	Yes	No
Signal separation	CDMA	FDMA
Carrier frequency	1575.42 MHz 1227.60 MHz	1602 + K $\times$ 0.5625 MHz, where K is within the range -7 to +24 1246 + K $\times$ 0.4375 MHz, where K is within the range -7 to +24
SATELLITES		
Number	24	24
Planes	6	3
Satellite per plane	4, unevenly spaced	8, evenly spaced
Orbital inclination	55°	64.8°
Orbital radius	26560 km	25510 km
Orbital period	11h 58 m	11h 15 m
NAVIGATION MESSAGE		
Duration	12.5 min	2.5 min
Capacity	37500 bits	7500 bits
Time reference	UTC (US Naval Observatory)	UTC (SU, Russia)
Geodetic datum	WGS 84	PZ-90

用した。まずKlobucharモデルから、GPS衛星の送信周波数における電離層の垂直方向の伝搬遅延量が与えられる。この遅延量から、衛星の仰角に応じた伝搬遅延量 $\tau(GPS)$ を求める。その後、次式により $\tau(GPS)$ を、GLONASS衛星の送信周波数における電離層の伝搬遅延量 $\tau(GLO)$ に変換する。

$$\tau(GLO) = \{f(GPS)/f(GLO)\}^2 \times \tau(GPS) \quad (2)$$

ここで $f(GPS)$ と $f(GLO)$ は、それぞれGPS衛星およびGLONASS衛星の送信周波数である。

この方法で求めたGLONASSにおける電離層の伝搬遅延量を用いて、衛星と受信点との距離(擬似距離)を補正し、測位計算を行った。

図1 GPSの航法メッセージから求めた電離層モデル

4. 実験システム

実験に用いたGLONASS受信機のブロック図を図

2に示す。この受信機は8チャンネルのL1-GLONASS受信機で、8個のアナログユニットを備えている。アナログユニットを複数個備えているのは、GLONASSは衛星ごとに異なった周波数を割り当てて放送しているため、受信機側に受信するチャンネルの数だけRF部が必要になるためである。GLONASSアナログユニットの出力はGLONASSデジタルユニットに加えられ、ここで各衛星の擬似距離および航法メッセージ等を得る。

GPSの受信ユニットは、衛星からのデータを受信し、各GPS衛星の擬似距離および航法メッセージ等を出力する。GLONASS処理ユニットでは、GPSの航法メッセージの中の電離層パラメータを用いて、GLONASSの周波数における電離層の伝搬遅延量を求める。そしてGLONASSデジタルユニットから得られた情報

図2 GLONASS受信機のブロック図

図3 GLONASS受信機の設置位置

を用いて測位計算を行う際に、電離層の伝搬遅延量を補正する。このようにして受信機の位置や速度などを求め、外部に出力する。

このようなGLONASS受信機を、図3に示す位置に設置した。受信機のアンテナの測量値は、VLBI基準点からGPSの干渉測位により、WGS84座標系における座標値を求めた。受信機の基準信号は、セシウム発振器による高安定度の基準信号を用いた。各受信点で受信したデータは、ISDN(Integrated Services Digital Network)回線を用いて電子航法研究所に転送し、研究所内のファイルサーバに保存している。

5. 実験結果

5.1 時刻に対する変化

本報告では主に測位点の高さの変化、すなわち楕円体高の測位誤差に注目し、評価を行う。

伝搬遅延量の補正を行う前の、時刻に対する高さの変化を図4に示す。受信点は福岡航空交通管制部(福岡市)、データの収集期間は1996年10月14日00:00(UTC)から24時間である。この図において縦軸は、WGS84座標系におけるアンテナの測量値と、GLONASS受信機から測位結果として出力された高さとの差である。すでに述べたとおり、GLONASSではPZ-90座標系を用いているが、日本周辺においてPZ-90座標系とWGS84座標系の垂直方向の差は大きくない(1m程度)と考えられる。そこで本報告では垂直方向に関して、PZ-90座標系をWGS84座標系として扱った。

電離層の伝搬遅延量の補正を行った後の、高さの差の変化を図5に示す。受信点は同じく福岡航空交通管制部、データの収集期間は1996年11月3日である。図4と図5を比較すると、測位点の分散については大きな改善はみられない。しかし補正を行った後はバイアス誤差が減少し、測位点の高さとアンテナの測量値が近づいた。

なお図4において、補正を行う前の測位点の高さとアンテナの測量値との差の平均値は24.0m、同じく図5において補正後の平均値は4.2mであった。

5.2 長期的な変化

高さの変化について24時間ごとのデータの平均値を求め、補正を行う前後の長期的な変化を調べた。当研究所では1995年末から連続してGLONASSのデータを受信し、収集を行っている。これらのデータの中から、約1週間ごとに1日の割合でデータを抽出し、平均値を求めた結果を図6、7に示す。受信点はそれぞれ札幌航空交通管制部(札幌市)および福岡航空交通管制部である。連続してデータが欠けている期間は、実験システムの機能向上や、プログラムの更新などのためにデータの収集を行うことができなかったものである。

電離層の伝搬遅延量を補正する機能は、受信機のファームウェアを変更することによって実現した。

図4 電離層伝搬遅延量補正前の高さの変化
(福岡航空交通管制部)

図5 電離層伝搬遅延量補正後の高さの変化
(福岡航空交通管制部)

図6 電離層伝搬遅延量補正前後の高さの変化(札幌航空交通管制部)

図7 電離層伝搬遅延量補正前後の高さの変化(福岡航空交通管制部)

この作業は1996年11月に行った。図6および図7において、補正を行う前後で測位点の標準偏差に大きな変化は見られない。しかし補正を行う前は、測位点の高さの平均値は、アンテナの測量値に対し数十mほど大きい値が得られていたが、補正を行った後はこの差が減少し、アンテナの測量値に近づいた。

電離層の伝搬遅延量の補正を行う前後について、各受信点における測位点の高さとアンテナの測量値との差の平均値を表2に示す。この表が示すように、電離層の伝搬遅延量の補正を行うことにより、すべての受信点において、測位点の高さとアンテナの測量値との差は減少した。なお補正後の平均値の値が、受

信点の緯度が減少するにしたがって測位点の高さが連続的に増加している。これが、PZ-90座標系とWGS 84座標系の違いによるものなのか、あるいは電離層の伝搬遅延量の補正が不完全なことによるものなのかは、判別できていない。

6. 実験結果の検証と考察

6.1 電離層の伝搬遅延が測位結果に与える影響

実験結果における補正を行う前後の高さの変化について、測位計算の過程をふまえながら以下に考察する。なお、正確に3次元的な図を記すことが困難なので、ここでは2次元的に簡略化した図を示し、検討を試みることにする。

いま仮に、測位に用いる衛星が受信点から見て図8(a)に示す方向に位置し、かつ電離層などの伝搬遅延が全くないと仮定する。受信機が測位計算を行う際には、軌道情報から得た4個の衛星の位置(図8では3個の衛星の位置)と、それぞれの衛星からの電波の伝搬時間から求めた擬似距離($R1 \sim R3$)を用いる。これらの情報から、受信点の座標に関する3個の未知数(x, y, z)と、受信機の時計の補正值(t)、あわせて4個の未知数が収束するように解を求める。すなわち4個の球面(図8では3個の円弧)が1点で交わるように、受信機の時計を修正する。その結果、受信機の3次元的な座標と正確な時刻を得ることができる⁽¹¹⁾。

実際の測位計算を行う際には、受信機から得られる擬似距離には受信機の時計の誤差と、電離層などによる電波の伝搬遅延により生じる誤差が含まれている。図8(b)に示すように電離層の伝搬遅延による伝搬時間の増加、すなわち擬似距離の増加は、受信点において天頂方向の衛星(図8では衛星1)からの電波は増加分が小さく、仰角が低い衛星(衛星2および3)からの電波は増加分が大きい。これは仰角が低い衛星からの電波のほうが電離層を通過する距離が長くなり、電離層の影響をより大きく受けるためである。

この場合に、それぞれの擬似距離の増加分が異なっている、1つの共通な値、すなわち受信機の時計の補正值(t)を修正し

て、解が収束するように測位計算を行う。その結果、4個の未知数を求めることができるが、得られた座標値は、すべての擬似距離の増加分が等しい場合に比べて垂直方向にずれる。したがって、電離層の伝搬遅延による影響を受け、仰角の低い衛星ほど擬似距離がより大きく増加すると、測位計算の結果得られる測位点の座標値は、垂直方向のバイアス誤差が大きくなる。

6.2 数値計算による検証

電離層の伝搬遅延量の補正を行わない場合

表2 各受信点における電離層伝搬遅延量補正前後の高さの変化

	測位点の高さとアンテナの測量値との差 平均値 (m)	
	補正前 '95.12 ~ '96.10	補正後 '96.11 ~ '97.6
札幌航空交通管制部	+21.9	-1.9
東京航空交通管制部	+22.4	-1.1
福岡航空交通管制部	+23.1	+1.2
那覇航空交通管制部	+25.8	+2.1

図8(a) 伝搬遅延量がない場合の測位点

と行った場合とで、測位計算の結果が垂直方向にどのように変化するかを、数値計算を用いて以下に検証する。使用した計算式は文献11に示すものであり、GPSの測位計算に用いられているものと同様である。

計算の条件として、衛星からの電波を受信した瞬間に、受信点において、衛星の見える方向は表3に示すとおりであるとする。なおこの表において、電離層の伝搬遅延による擬似距離の増加分の割合は、垂直方向の増加分を1とした時に、それぞれの衛星の仰角から見積もることができる⁽¹²⁾。

初期値である受信点の座標および各衛星の座標から、数値計算上の衛星までの真の距離が与えられる。この真の距離に、電離層の伝搬遅延による増加分を加えて擬似距離とするが、ここでは、垂直方向の増加分をパラメータとして変化させる。各衛星の真の距離に対する増加分は、垂直方向の増加分に仰角にしたがって表3の割合を掛けたものとする。

以上を前提条件とし、逐次近似法を用いて解が収束するまで計算を続ける。その結果として、受信点の座標値と受信機の時計の補正値を得ることができる。このような手順にしたがって求めた測位計算による高さとの差と、垂直方向の擬似距離の増加分との関係を図9に示す。この図から、仰角が低い衛星からの電波のほうが電離層を通過する距離が長くなることにより、擬似距離がより大きく増加すると、測位計算の結果は真の高さよりも高くなることがわかる。

表3 測位計算に用いる衛星の配置と擬似距離の増加分の割合

衛星番号	方位	仰角	電離層の伝搬遅延による擬似距離の増加分の割合
1	160.87	89.25	1 倍
2	267.00	10.60	3 倍
3	108.81	10.74	3 倍
4	345.94	49.30	1.3 倍

図8(b) 伝搬遅延量がある場合の測位点

図9 垂直方向の擬似距離の増加分に対する、測位計算による高さの変化
(ただし表3に示す衛星位置の場合)

電離層の伝搬遅延量を補正することは、擬似距離を減少させることである。したがって衛星と受信点との見かけの距離が短くなるので、感覚的には電離層の伝搬遅延量を補正を行わないほうが高さが低く、補正を行ったほうが高さが高くなるように感じられる。しかし実際には、電離層の伝搬遅延量を補正することにより、高さは減少する。なおかつ補正することにより高さが減少することは、GLONASS受信機特有の結果ではなくGPS受信機でも同様である。これらのことは、GLONASSによる測位結果、上記の数値計算結果、およびGPSによる測位結果からも確かめられている。

上記の数値計算の結果は、今回の実験結果である図4および表2において、電離層の伝搬遅延量の補正を行う前は、測位点の高さがアンテナの測量値よりも数十m大きかったことと傾向が一致する。そして、GLONASSにおける電離層の伝搬遅延量を求め、擬似距離を補正して測位計算を行うことにより、測位点の垂直方向のバイアス誤差が減少したということが確認された。

7. おわりに

GPSの航法メッセージに含まれている電離層パラメータを用いて、GLONASSにおける電離層の伝搬遅延量を補正した。その結果、測位点の分散については大きな改善がみられなかったが、垂直方向のバイアス誤差が大幅に減少した。このことから本研究で用いた手法が、1周波のGLONASS受信機で測位を行う際に、垂直方向の測位精度の改善に有効であるということが確認された。

今後はさらに継続してGLONASSのデータを収集し、伝搬遅延量の補正の方法について検証を続けるとともに、2周波のGLONASS受信機を用いて電離層による伝搬遅延量を直接測定し、今回の結果と比較検討する必要がある。

謝 辞

データ収集の際にご協力いただいた運輸省の札幌、東京、福岡、那覇の各航空交通管制部の関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- (1) <http://mx.iki.rssi.ru/SFCSIC/glonass.html>
- (2) V. Kuranov, "General Information on GLONASS System and its Present Status", ICAO GNSSP/2 WP/70, 1995.
- (3) Ashtech "GG24 GPS+Glonass Reference Manual", pp.6.
- (4) V. Kuranov, "GLONASS-Interface Control Document", ICAO GNSSP/2 WP/66, 1995.
- (5) W. Lewandowski et al., "Experiment Using GPS/GLONASS Common-View Time Transfer Between Europe and North America", ION GPS-96 A3, 1996.
- (6) V. Kuranov et al., "Estimation of the WGS-84 and PZ-90 Coordinate Systems Transformation Parameters", ICAO GNSSP WG-B WP/18, 1996.
- (7) U. Rossbach et al., "Transformation Parameters Between PZ-90 and WGS84", ION GPS-96 A3, 1996.
- (8) P. N. Misra et al., "Integrated Use of GPS and GLONASS: Transformation Between WGS84 and PZ-90", ION GPS-96 A3, 1996.
- (9) 新井他: "GLONASSの現状と測位誤差", 信学技報SANE97-35, 1997.
- (10) 村上他: "GPS信号の電離層遅延の実測値と放送値の比較", 第29回電子航法研究所研究発表会講演概要, 1997.
- (11) 日本測地学会., "新改訂GPS-人工衛星による精密測位システム-", pp.121-130, 1989.
- (12) B. W. Parkinson et al., "Global Positioning System: Theory and Applications Volume I", pp. 49-51, AIAA, 1996.

質 疑 応 答

今津隼馬(東京商船大学)：発表に使われました補正モデルを、2周波受信による補正值により評価されましたでしょうか。

新井直樹：当研究所では現在のところ、2周波のGLONASS受信機を保有しておりません。そのため、今回の電離層モデルによる結果と、2周波の受信機により電離層の伝搬遅延量を直接測定した結果とを比較していません。しかし2周波のGLONASS受信機の入手を予定しておりますので、近い将来、これらを比較した結果をご報告できると思います。

天井 治(電子航法研究所)：GLONASS-M衛星の話が講演中にございましたが、この衛星には電離層伝搬遅延量の情報が含まれる予定があるのでしょうか。ご存知でしたら教えて下さい。

新井直樹：申し訳ありませんが、存じません。