

GLONASS 信号におけるチャンネル間バイアスの校正

山田 英輝^{†a)} 高須 知二^{††} 坂井 丈泰[†] 久保 信明^{††}
安田 明生^{††}

Calibration of Inter-Channel Biases on GLONASS Signals

Hideki YAMADA^{†a)}, Tomoji TAKASU^{††}, Takeyasu SAKAI[†], Nobuaki KUBO^{††},
and Akio YASUDA^{††}

あらまし GPS と GLONASS の併用により、衛星測位における利用率を向上させることができる。一方で、GLONASS 信号間にはチャンネル間バイアスと呼ばれるハードウェアバイアスが存在する。このチャンネル間バイアスの影響により、異機種受信機間の GPS/GLONASS 複合 RTK 測位においては、測位性能を劣化させてしまう問題がある。この問題を解決するためには、GLONASS の搬送波位相観測値に含まれるチャンネル間バイアスを校正する必要がある。本論文では、ゼロ基線における GLONASS のチャンネル間バイアスの校正手法の検討を行い、バイアスの校正が RTK 測位の性能の改善にどの程度有効であるかを評価した。具体的には、ゼロ基線におけるバイアスの校正テーブル及び校正係数の算出方法を明らかにするとともに、これらの推定値の有効性について従来の測位手法との比較評価を行った。実験の結果、大部分の受信機間において、ゼロ基線による校正手法を適用することで、GPS/GLONASS 複合 RTK 測位の利用率が大幅に改善することを確認できた。

キーワード RTK, GNSS, FDMA

1. ま え が き

衛星測位システム (GNSS) は、現在は米国の GPS だけでなく、ロシアの GLONASS がほぼ完全に運用されている。GPS 及び GLONASS を併用した測位では、GPS のみを用いる場合に比べて衛星測位における利用率を高めることができる。RTK (Real Time Kinematic) 測位とは、2 台の受信機を用いて cm クラスの精度で位置を決定する精密測位技術の一つである。同機種の受信機同士において、GPS 及び GLONASS を併用した RTK 測位 (以下、GPS+GLONASS RTK 測位と呼ぶ) では、より多くの衛星数を確保することができ、これにより cm クラスの精度で測位する RTK 測位の利用率が高まる [1]。

ただし一方で、GLONASS は衛星ごとに送信周波数の異なる FDMA (frequency Division Multiple

Access) 方式を採用しているため、GLONASS の搬送波位相観測値に各 GLONASS 衛星で固有のハードウェアバイアスが生じる。このハードウェアバイアスのことをチャンネル間バイアスと呼ぶ [2], [3]。同機種の受信機同士では、このチャンネル間バイアスは計算の過程で除去されることから問題とはならない。一方で、異機種の受信機同士では、チャンネル間バイアスは除去されず、このバイアス誤差が RTK 測位の利用率を低下させる問題がある。この問題を解決して GPS+GLONASS RTK 測位の利用率を高めるためには、GLONASS の搬送波位相観測値に含まれるチャンネル間バイアスを校正する必要がある。本論文では、はじめに異機種の受信機間におけるチャンネル間バイアスについて述べるとともに、その校正手法を検討する。更に、得られたバイアスの推定値が RTK 測位における性能の改善にどの程度有効であるかを評価した結果を報告する。

本論文の構成は、まず、2. で GPS+GLONASS RTK 測位の概要について示す。3. ではチャンネル間バイアスの校正手法について示す。4. では、バイアスの校正実験を行い、RTK 測位におけるバイアスの推定値の有効性について評価を行う。5. はむすびとする。

[†] 電子航法研究所, 調布市

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

^{††} 東京海洋大学, 東京都

Tokyo University of Marine Science and Technology, 2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo, 135-8533 Japan

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

2. GPS+GLONASS RTK 測位

本章では、GPS+GLONASS RTK 測位計算アルゴリズムとその問題点について説明する。

2.1 RTK 測位とアンビギュイティ決定

GNSS 衛星の測位信号によって得られる観測値には、コード擬距離観測値（以下、コード観測値と呼ぶ）と搬送波位相観測値がある。式 (1) 及び式 (2) にそれぞれの観測方程式（方程式の解は受信機の位置座標及びアンビギュイティ）を示す [4], [5]。上付き添字は衛星番号を表す。下付き添字は受信機を表す記号である。 H_P^i , H_Φ^i , $H_{p,u}(f^i)$, $H_{\Phi,u}(f^i)$ は次節に述べるチャネル間バイアスを意味する。

$$P_u^i = R_u^i + I_u^i + T_u^i + c \cdot (b_u - a^i) + H_P^i + H_{p,u}(f^i) + E_{P,u}^i \quad (1)$$

$$\Phi_u^i = (\lambda^i)^{-1} \cdot (R_u^i - I_u^i + T_u^i) + f^i \cdot (b_u - a^i) + N_u^i + H_\Phi^i + H_{\Phi,u}(f^i) + E_{\Phi,u}^i \quad (2)$$

u : 移動局を表す記号

i : 衛星番号

P : コード観測値 [m]

Φ : 搬送波位相観測値 [cycle]

c : 光速 [m/s]

λ : 搬送波の波長 [m]

f : 衛星の送信周波数 [Hz]

R : 受信機-衛星間の幾何学的距離 [m]

I : 電離層遅延量 [m]

T : 対流圏遅延量 [m]

E_P : コードマルチパス及び雑音 [m]

E_Φ : 搬送波位相マルチパス及び雑音 [cycle]

b : 受信機時計誤差 [s]

a : 衛星時計誤差 [s]

N : 搬送波位相アンビギュイティ [cycle]

H_P^i : 衛星側のコードのバイアス [m]

$H_{p,u}(f^i)$: 受信機側のコードのバイアス [m]

H_Φ^i : 衛星側の搬送波位相のバイアス [cycle]

$H_{\Phi,u}(f^i)$: 受信機側の搬送波位相のバイアス [cycle]

各衛星の測位信号によって得られるコード観測値または搬送波位相観測値の受信機間の差分を二重差と呼ぶ。式 (1) または式 (2) に対して、一重差によって得

られる観測値及びモデルに付随するパラメータは通常、 $(\bullet)_{uk}^i = (\bullet)_u^i - (\bullet)_k^i$ と表す。コード一重差観測値または搬送波位相一重差観測値では、対流圏遅延量、電離層遅延量、衛星時計誤差、衛星側のチャネル間バイアスなどの観測誤差は除去される。次に、各衛星の一重差観測値の差分を二重差と呼ぶ。二重差によって得られる観測値及びモデルに付随するパラメータは通常、 $(\bullet)_{uk}^{ij} = (\bullet)_{uk}^i - (\bullet)_{uk}^j$ と表す。式 (3) 及び式 (4) にそれぞれコード二重差及び搬送波位相二重差の観測方程式 [4], [5] を示す。

$$P_{uk}^{ij} = R_{uk}^{ij} + H_{P,uk}(f^i) - H_{P,uk}(f^j) + E_{P,uk}^{ij} \quad (3)$$

$$\Phi_{uk}^{ij} = (\lambda^i)^{-1} \cdot R_{uk}^i - (\lambda^j)^{-1} \cdot R_{uk}^j + (f^i - f^j) \cdot b_{uk} + N_{uk}^{ij} + H_{\Phi,uk}(f^i) - H_{\Phi,uk}(f^j) + E_{\Phi,uk}^{ij} \quad (4)$$

k : 基準局を表す記号

j : RTK 測位における基準衛星の番号

GPS では全衛星の送信周波数が等しいので、二重差により受信機時計誤差を除去することができる。一方、GLONASS では衛星間で送信周波数が異なるため、式 (4) においては、受信機時計誤差の一重差 b_{uk} が残ることとなる。GLONASS の b_{uk} は、GLONASS コード一重差観測値を利用した最小二乗法またはカルマンフィルタにより推定できる [6]。また、GPS では、式 (3) の $H_{p,uk}(f^i) - H_{p,uk}(f^j)$ (以後、 $H_{p,uk}(f^i, f^j) = H_{p,uk}(f^i) - H_{p,uk}(f^j)$ とする) 及び式 (4) の $H_{\Phi,uk}(f^i) - H_{\Phi,uk}(f^j)$ (以後、 $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j) = H_{\Phi,uk}(f^i) - H_{\Phi,uk}(f^j)$ とする) は一重差により除去できる。

受信機で取得される搬送波位相観測値は、ある瞬間における位相角の積算値を測定したものである。したがって、式 (4) より、受信機-衛星間の絶対的な距離を算出するためには、残りの不明な波数 N を知る必要がある。この不明な波数のことをアンビギュイティと呼ぶ。式 (4) におけるアンビギュイティの二重差 N_{uk}^{ij} は整数であり、整数化 [7] によって確からしい推定解 N_{uk}^{ij} が得られる。 N_{uk}^{ij} を確からしく推定した後は、得られた推定解 N_{uk}^{ij} の妥当性を検査（以下、アンビギュイティ検定 [8] と呼ぶ）する。この検査をパスすることによって初めて、妥当とされる N_{uk}^{ij} が決定される。決定した N_{uk}^{ij} の利用により式 (4) における位置座標を解くことで、RTK 測位における位置の解（以下、Fix 解と呼ぶ）が得られる。

2.2 チャネル間バイアスによる影響

異機種を受信機間における RTK 測位においては、GLONASS の $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の小数部分によって、妥当な Fix 解が得られなくなる問題がある。具体的に、 $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の整数部分については、式 (4) を満たすように N_{uk}^{ij} の推定値が整数分だけ変化するので、Fix 解の決定性能に影響を与えない。しかし、 $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の小数部分については、 N_{uk}^{ij} における整数分の調整では除去できないので、Fix 解の決定性能に影響を与えることになる。

このような GLONASS の問題点に基づき、本節でははじめに、GLONASS の $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ について整理する。GLONASS 測位信号の通信方式は FDMA 方式であるため、各 GLONASS 衛星間で送信周波数は異なる。式 (5) に GLONASS 衛星の送信周波数を示す [9]。

$$f^i = f_0 + K^i \cdot \Delta f \quad (5)$$

f_0 : GLONASS 衛星の中心送信周波数 [Hz]

(L1 で 1602 MHz, L2 では 1246 MHz)

K^i : i 番 GLONASS 衛星の周波数番号

($K^i = -7 \sim 6$)

Δf : サブバンド周波数 (L1 では 0.5625 MHz, L2 で 0.4375 MHz)

アンテナで受信された GLONASS 信号が受信機内部の高周波回路を通過する際に、回路遅延時間に送信周波数に応じた差を生じる。この信号間の回路遅延時間の差は、GLONASS のコード観測値及び搬送波位相観測値にチャネル間バイアスとして存在する [5], [10], [11]。ただし、同機種受信機間では、受信機間のハードウェアの構造及び回路遅延時間がほぼ同一であるため、一重差によりバイアスを除去できる [2], [11], [12]。一方で、ハードウェアの構造が異なる受信機間では、一重差によりバイアスを除去できない。本論文では以後、「チャネル間バイアス」は GLONASS 搬送波位相観測値に存在するチャネル間バイアスのことを指す。一方で、GLONASS コード観測値に存在するチャネル間バイアスを「コードバイアス」と呼ぶ。これまでの実験結果 [10], [13] から、コードバイアスの大きさは数十 cm から数 m 程度であるのに対して、チャネル間バイアスの大きさは数 cm から数十 cm 程度である。チャネル間バイアスの時間的な変動は、大部分の受信機機種では安定である [14]。

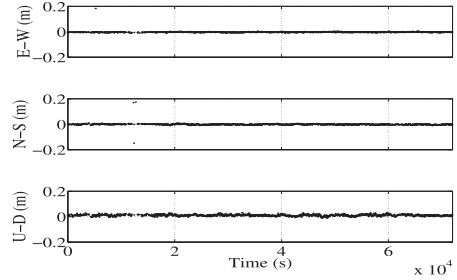


図 1 同機種受信機間 GPS+GLONASS RTK 測位結果
Fig. 1 Fix solutions of GPS+GLONASS RTK between the same type receivers.

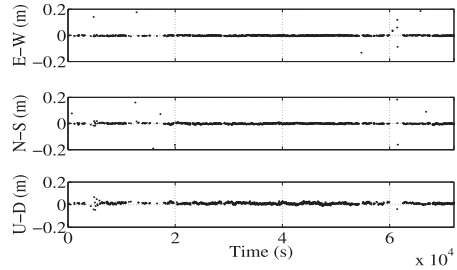


図 2 異機種受信機間 GPS+GLONASS RTK 測位結果
(従来の測位手法)
Fig. 2 Fix solutions of GPS+GLONASS RTK between different type receivers.

表 1 評価条件

Table 1 Evaluation conditions.

Date	2009-12-23 24 h (epoch intervals:30 s)
Measurements	Single-frequency carrier and code phase
Ambiguity resolution	Epoch by epoch [15]
	LAMBDA [5], Ratio test(threshold: 3) [8]
Filter	Kalman filter
Baseline length	300 m
Rover receivers	NovAtel,JAVAD
Base receivers	NovAtel,JAVAD,Trimble,Topcon
Rover antenna	NovAtel
Base antenna	Trimble

図 1 に NovAtel 社-NovAtel 社製の受信機間における GPS+GLONASS RTK 測位の Fix 解の例を示す。図 2 に NovAtel 社-Trimble 社製の受信機間における GPS+GLONASS RTK 測位 (文献 [10]) の Fix 解の例を示す。縦軸は東西方向 (E-W)、南北方向 (N-S)、上下方向 (U-D) の Fix 解の測位誤差を表し、原点は測量で得られた正確な位置を意味する。また、表 1 にこのときの評価条件を示す。RTK 測位の性能評価方法としては、RTK 測位の利用率を定義する。RTK 測位の利用率は、(Fix 解が得られた観測時間/全観測時間) $\times 100$ (%) と定義して、本論文では Fix 率と呼ぶ。

また、文献[10]は、式(3)におけるコードバイアスのみを校正した従来のGPS+GLONASS RTK測位の手法である。したがって、文献[10]の測位手法では、式(4)のチャンネル間バイアスは校正していない。

図1のGPS+GLONASS RTK測位のFix率は87%、RMS誤差はE-W: 0.01 m/N-S: 0.01 m/U-D: 0.01 mであった。このときのRTK-GPSのFix率は57%、RMS誤差はE-W: 0.04 m/N-S: 0.06 m/U-D: 0.19 mであったので、図1より、GLONASS衛星の追加はRTK-GPS測位の性能改善に有効であるといえる。図1と比較して、図2のGPS+GLONASS RTK測位のFix解のプロット数は減少していることが分かる。図2のFix率は52%であった。図2においてFix解のプロット数が減少している理由は、異機種受信機間で生じるチャンネル間バイアスの影響と考える。

3. チャンネル間バイアスの校正

測量においては、基準局と移動局アンテナ間の長さを基線長(baseline)と呼ぶ。アンテナが同一、すなわち基線長がゼロの基線のことをゼロ基線と呼ぶ。ゼロ基線テストは、一般的に受信機雑音の大きさを評価するために使用されるが、コードバイアスを校正する手法としても有用である[10]。単純なゼロ基線の二重差により、受信機-衛星間の幾何学的距離を除去できるため、コードバイアスと受信機雑音のみを抽出できる。一方で、チャンネル間バイアスについては、アンビギュイティを処理する必要があるため、単純なゼロ基線の二重差では校正できない。本論文では、ゼロ基線によるチャンネル間バイアスの校正手法について明らかにする。

3.1 従来手法

GLONASSのチャンネル間バイアスを校正するためには、二つの方法がある。二つの方法は、(i) バイアスを直接測定する方法[5],[16]、(ii) フィルタでバイアスを推定する方法[14],[17],[18]に分類できる。(ii)の方法では、GLONASSの搬送波位相二重差観測モデルに関し、バイアスが周波数に対して一次式で近似できるものとしてバイアスの校正係数(GLONASS衛星の周波数番号とバイアスとの関係を表す係数)を未知パラメータに加えて、未知パラメータをフィルタで推定する。(ii)の方法では、バイアスの校正係数の推定と同時に、アンビギュイティもフィルタで推定しなければならず、推定すべきパラメータが増えてしまう問題がある。したがって、バイアスの校正係数及びアン

ビギュイティの推定精度を上げるために、GPSのコード及び搬送波位相観測モデルも使用する。

しかし、ゼロ基線及び短基線においては、アンビギュイティをフィルタで直接推定及び決定せず、更にGLONASSの1周波観測モデルを用いるだけで、バイアスの校正を簡便に実施できる。同様の手法でバイアスを校正した例もあるが[13]、手法については詳しく述べられていない。

3.2 ゼロ基線における校正手法の検討

本論文では、ゼロ基線におけるGLONASSの1周波観測モデルのみを用いたチャンネル間バイアスの校正手法を明らかにする。はじめに、チャンネル間バイアスは式(6)のように表せる。式(6)では、GLONASSの受信機時計誤差 b_{uk} をフィルタで推定する。受信機の精密な位置は既知とする。

$$\begin{aligned} H_{\Phi,uk}(f^i, f^j) &= H_{\Phi,uk}(f^i) - H_{\Phi,uk}(f^j) \\ &= \Phi_{uk}^{ij} - \{(\lambda^i)^{-1} \cdot R_{uk}^i - (\lambda^j)^{-1} \cdot R_{uk}^j\} \\ &\quad - (f^i - f^j) \cdot b_{uk} - N_{uk}^{ij} - E_{\Phi,uk}^{ij} \\ &= \overline{\Phi_{uk}^{ij}} - N_{uk}^{ij} - E_{\Phi,uk}^{ij} \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)の $\overline{\Phi_{uk}^{ij}}$ は Φ_{uk}^{ij} から R と b_{uk} を取り除いた値であるので、 $\overline{\Phi_{uk}^{ij}}$ に含まれる成分はチャンネル間バイアスとアンビギュイティとノイズである。したがって、式(7)のように、 $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の小数部分は $\overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right]$ と表せる。

$$H_{\Phi,uk}(f^i, f^j) - [H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)] \approx \overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right] \quad (7)$$

$[X]$: X を超えない最大の整数

更に式(7)を変形することで、 $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ は式(8)のように表せる。

$$H_{\Phi,uk}(f^i, f^j) \approx \overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right] + [H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)] \quad (8)$$

式(8)において、整数 $[H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)]$ は2.2で述べたようにRTK測位におけるアンビギュイティの推定値に吸収される。したがって、 $\overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right]$ の値を用いるだけでGLONASSの搬送波位相二重差観測値に含まれるチャンネル間バイアスを校正できる。

3.3 校正テーブルの導出

次に、 $\overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right]$ をGPS+GLONASS RTK測位

に適用するためには、 $K^i - K^j$ における $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の校正テーブルを作成する必要がある。このとき、ゼロ基線テストでは、特定の衛星を観測できる時間帯に限られる。したがって、いくつかの基準衛星番号における $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ のテーブルを結合することで、 $K^i - K^j$ における $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ を推定できる。

3.4 校正係数の導出

$H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の校正テーブルと比較して、 $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の校正係数を求めることは情報量の観点で意味がある。式 (5) の送信周波数が K^i に関する一次式で表せるので、同様に、式 (9) のように $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ も $K^i - K^j$ に関する一次式（前述したバイアスの校正係数）で近似できる。

$$\begin{aligned} H_{\Phi,uk}(f^i, f^j) &\approx \beta \cdot (K^i - K^j) \\ &\approx \overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right] + [H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)] \end{aligned} \quad (9)$$

式 (9) の β がバイアスの校正係数（単位：cycle/channel）である。式 (9) より、 $\overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right]$ が $K^i - K^j$ に関する一次式となるような $\hat{H} = \{[H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)]\}$, $i = 1 \dots n$, $j = a \text{ fixed number}$ を探す。次に、 $\overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right]$ を $\hat{H}$ だけシフトさせることで、 $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の校正係数 β が推定できる。図 3 は、 $K^i - K^j$ （ただし、 $K^j = 0$ ）における $\overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right]$ （図中の $\times$ 印）をプロットしたものである。 $K^i = K^j = 0$ のときの $\overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right]$ の値は 0 である。図 3 より、この受信機間においては、 $\overline{\Phi_{uk}^{ij}} - \left[\overline{\Phi_{uk}^{ij}} \right]$ を $\hat{H}$ だけシフトすることで、 $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ が直線に近似できる（図中の黒丸）ことが分かる。

β の推定では、直線の傾きが急な場合（ β の整数部

分の絶対値が 1 以上）においては、 $\hat{H}$ の探索範囲が広がるため探索は困難に見えるが、大部分の実在する受信機間では、 β が 1 を超えることはない [14]。しかも実際は、2.2 で述べたように β の整数部分は RTK 測位におけるアンビギュイティの推定値に吸収されるので、校正係数の小数部分を推定できればよい。したがって、 $\hat{H}$ の探索は困難にならないといえる。

3.5 チャネル間バイアスの推定精度

式 (6) における b_{uk} は、受信機間の GLONASS コード一重差観測値のみを用いて最小二乗法で毎時刻推定する。ただし、各 GLONASS のコードバイアスについては推定していないが、各 GLONASS コード一重差観測値の最小二乗法によってコードバイアスの影響を低減できると考える。

このように $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ を推定する際には、GLONASS のコード一重差観測値を使用するので、 $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の推定精度について評価する必要がある。GLONASS のコード観測値に含まれるマルチパス及び受信機雑音の大きさを 0.3 m [12] とすると、コード一重差により $0.3 \text{ m} \times \sqrt{2} = 0.4 \text{ m}$ まで増大される。また、コードバイアスのおおむねの大きさを 0.6 m [10] とすると、GLONASS のコード一重差観測値の精度は $\sqrt{(0.4)^2 + (0.6)^2} = 0.7 \text{ m}$ となる。 b_{uk} の TDOP [4] を 0.9 とすると、 b_{uk} の推定精度は約 0.63 m (2.1015×10^{-9} 秒) となる。今、GLONASS の L1 周波数について考える場合、 $f^i - f^j$ の最大値は 7.5 MHz となる。したがって、 $(f^i - f^j) \cdot b_{uk}$ で生じる最大誤差の絶対値は 3.2 mm (0.016 cycle) 程度となる。

4. 校正実験

本章では、ゼロ基線におけるチャネル間バイアスの校正手法の妥当性及び有効性について評価する。

4.1 校正実験とその結果

表 2 に本論文のゼロ基線テストで使用する受信機及びデータ取得環境を示す。図 4 に受信機間別の

表 2 ゼロ基線テストにおける実験環境

Table 2 An experimental environment on zero-baseline test.

Receiver Maker(Type)	JAVAD (Legacy)	NovAtel (OEMV)	Topcon (NET-G3)	Trimble (R7GNSS)
Antenna	Trimble (Zephyr 2) / Baseline length: zero			
Site	Tokyo University of Marine and Science Technology (Open sky)			
Data	Single-frequency measurements			
Date	2009-12-23, about 24 h (epoch intervals: 30 s)			

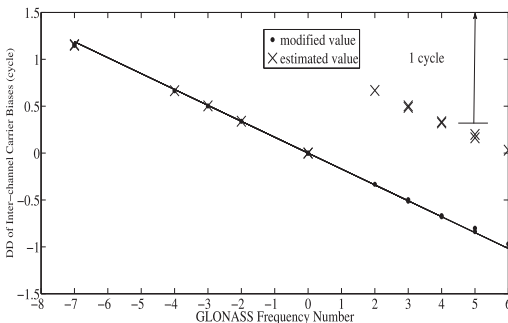


図 3 チャネル間バイアスの一次近似 (NovAtel-Trimble)

Fig. 3 Linear approximations of inter-channel carrier biases.

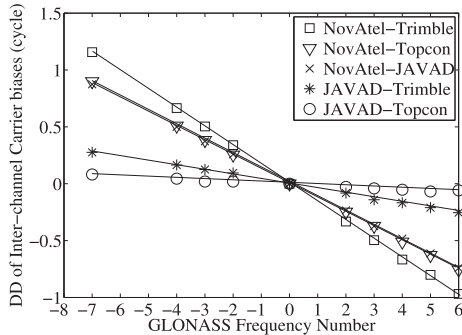


図 4 GLONASS のチャンネル間バイアス
Fig. 4 GLONASS inter-channel carrier biases.

表 3 GLONASS のチャンネル間バイアスの推定値 (単位: cycle)

Table 3 Measured values of GLONASS inter-channel carrier biases (unit: cycle).

Freq	NovAtel-Trimble	NovAtel-Topcon	NovAtel-JAVAD	JAVAD-Trimble	JAVAD-Topcon
-7	1.1569	0.8993	0.8742	0.2757	0.0193
-4	0.6653	0.5093	0.4991	0.1646	0.0183
-3	0.5034	0.3826	0.3725	0.1250	0.0151
-2	0.3393	0.2544	0.2586	0.0946	0.0102
0	0	0	0	0	0
2	-0.3324	-0.2474	-0.2346	-0.0823	-0.0031
3	-0.4964	-0.3725	-0.3730	-0.1411	-0.0013
4	-0.6664	-0.5109	-0.4815	-0.1673	-0.0245
5	-0.8010	-0.6290	-0.6124	-0.2100	-0.0503
6	-0.9688	-0.7556	-0.7406	-0.2544	-0.0204

表 4 GLONASS のチャンネル間バイアスにおける校正係数 β (単位: cycle/channel)

Table 4 Calibration factor for GLONASS inter-channel carrier biases (unit: cycle/channel).

	NovAtel-Trimble	NovAtel-Topcon	NovAtel-JAVAD	JAVAD-Trimble	JAVAD-Topcon
Calibration factor	-0.1696	-0.1272	-0.1293	-0.0473	-0.0051

$H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の推定結果を示す。横軸は GLONASS 衛星間の周波数番号の差 $K^i - K^j$ (ただし, $K^j = 0$) を表す。縦軸は $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の推定値を表す。ただし, 図 4 の $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の整数部分は, 整数サイクルのシフト操作を適用した値である。図 4 より, 本論文で扱う受信機の組合せにおいては, $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ は明らかに $K^i - K^j$ に対して直線上に存在することが分かる。また, 表 3 に, $K^i - K^j$ (表中の Freq に相当) における $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の校正テーブルを示す。表 3 のバイアス値は, 整数サイクルのシフト操作を適用したバイアス値の約 1 時間分の平均から算出している。表 4 に, $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の校正係数を示す。表 4

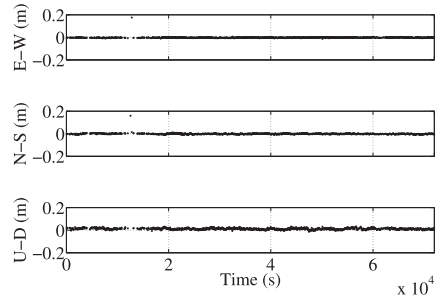


図 5 異機種受信機間 GPS+GLONASS RTK 測位結果 (チャンネル間バイアス校正後)

Fig. 5 Fix solutions of GPS+GLONASS RTK between different type receivers after calibration of inter-channel carrier biases.

の校正係数で得られた $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の推定値と表 3 の校正テーブルで得られた推定値の間の差は 0.01 ~ 0.03 cycle 程度であり, 大部分の受信機間における校正係数の算出方法は妥当といえる。

4.2 RTK 測位への適用

前節で, $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の校正テーブル及び校正係数を算出できることを確認した。次に, これらの校正手法を RTK 測位に適用することで, どの程度の測位性能の改善に寄与するかを明らかにする。また, 従来の測位手法 [10] に対して, 本論文で提案する校正手法がどの程度の優位性があるのかも明らかにする。具体的には, 表 1 と同じ評価条件のもとで, 従来の測位手法 [10] と比較して, $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の校正テーブル (Table Method) と校正係数 (Proportional Method) が RTK 測位の性能の改善にどの程度の有効性があるのかを評価する。

図 5 に, $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の校正係数を適用した NovAtel 社-Trimble 社製の受信機間 GPS+GLONASS RTK 測位の Fix 解の 1 日分の測位結果を示す。図 2 における従来の測位手法による Fix 解のプロット数と比較して, 図 5 における $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ 補正後の Fix 解のプロット数は大幅に増加していることが分かる。表 5 に, 各測位モードにおける受信機間別の GPS+GLONASS RTK 測位の Fix 率及び測位精度 (RMS 誤差) を示す。 $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の校正テーブルまたは校正係数を適用した RTK 測位では, 大部分の受信機の組合せにおいて, 従来の測位手法及び RTK-GPS 測位 [10] と比較して, Fix 率及び測位精度の大幅な改善を示している。また, 表 5 より, 校正テーブル及び校正係数のどちらも同程度の Fix 率及び測位精度の改

表 5 GPS+GLONASS RTK 測位の Fix 率及び測位精度

Table 5 Fix ratios and position accuracies of GPS+GLONASS RTK.

Receiver Combination	No Calibration [10]	Table Method	Proportional Method
	Fix rate	Fix rate	Fix rate
	E-W/N-S/U-D accuracy (m)	E-W/N-S/U-D accuracy (m)	E-W/N-S/U-D accuracy (m)
NovAtel-Trimble	52 % 0.05/0.07/0.11	80 % 0.01/0.02/0.05	79 % 0.01/0.02/0.05
NovAtel-Topcon	47 % 0.07/0.09/0.15	80 % 0.03/0.05/0.10	80 % 0.03/0.05/0.10
NovAtel-JAVAD	34 % 0.11/0.18/0.35	67 % 0.07/0.04/0.13	69 % 0.06/0.03/0.11
JAVAD-Trimble	37 % 0.10/0.11/0.30	62 % 0.06/0.08/0.18	62 % 0.06/0.08/0.18
JAVAD-Topcon	69 % 0.04/0.06/0.14	69 % 0.05/0.07/0.15	69 % 0.05/0.07/0.15

善が見られる．今回， $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ を直線でよく近似できたため， $H_{\Phi,uk}(f^i, f^j)$ の 2 種類の校正手法の間で，Fix 率及び測位精度の改善に差がほとんど見られなかったといえる．

4.3 GLONASS 周波数番号による影響

3.5 では， b_{uk} とチャンネル間バイアスの推定に及ぼすコードバイアスによる誤差の影響の大きさを一定としたが，実際には同時刻に見える GLONASS 衛星の周波数番号配置により，この大きさは変わる．例えば，同時刻において各周波数番号が正負に幅広く配置される場合では， b_{uk} の推定値に加わるコードバイアスによる誤差の影響が小さくなるので，結果としてチャンネル間バイアスの推定精度は良好となることが考えられる．本節では，実際の周波数番号配置とチャンネル間バイアスの推定精度との関係の例により，最低でどの程度の観測時間があればチャンネル間バイアスを校正できるかを考察する．

図 6 に表 2 の実験環境における GLONASS の周波数番号の時間的推移を示す．図 6 より，周波数番号が偏る時間帯は 10000～14000 秒付近（周波数番号 +3, +5, +6）であった．14000 秒以降では周波数番号 -4 の信号を受信し，その受信前後ではチャンネル間バイアスの推定値の間に差を生じることを確認した．これは各衛星の周波数番号が正負に分布したことによりチャンネル間バイアスの推定条件が改善したためと考えられる．具体的には，校正係数の推定値の差は 0.4 mm/channel 程度（0.002 cycle/channel）であり，校正テーブルの推定値の差は 1.6 mm 程度（0.008 cycle）であった．し

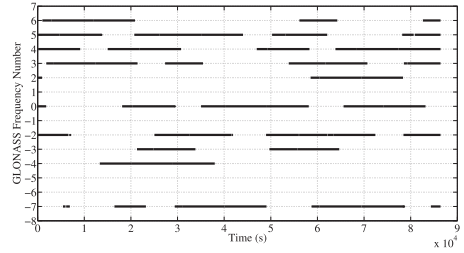


図 6 GLONASS 周波数番号の時間的推移（1 日分）

Fig. 6 Time shifts of GLONASS frequency numbers for a day.

かし，これらの各校正手法におけるチャンネル間バイアスの推定値の差は RTK 測位の性能に差を与えるものではなかった．したがって，校正係数を推定する際には，わざわざ周波数番号配置が正負に分布する時間帯がくるのを待つ必要はない．ただし，時間平均により推定値に含まれる雑音成分を除去する必要があるため，少なくとも 30 分程度の実験データの取得が必要と考える．一方で，校正テーブルを作成する上では，図 6 より明らかなように，30 分程度のデータ量ではテーブルの一部しか作成できないので，できれば 24 時間程度のデータが必要といえる．

5. む す び

本論文では，GLONASS のチャンネル間バイアスにおけるゼロ基線による校正手法の検討とその評価を行った．まず，ゼロ基線テストによりチャンネル間バイアスの校正テーブル及び校正係数を算出した．チャンネル間バイアスの校正手法は，コードバイアスの校正手法と比較して，異機種受信機間 GPS+GLONASS RTK 測位に有効であることが明らかとなった．また，チャンネル間バイアスの校正係数を用いた GPS+GLONASS RTK 測位の Fix 率及び測位精度は，チャンネル間バイアスの校正テーブルを用いた場合と比較しても，ほとんど同等であることを示した．したがって，チャンネル間バイアスをよく直線にモデル化できる場合は，校正テーブルよりも校正係数を測位に適用する方が情報量の観点から効率的といえる．

今後の課題としては，アンテナ機種の変化や高周波回路周辺の温度変化・経年変化がバイアスの校正係数に与える影響の評価が挙げられる．また，現状では校正係数の与え方は受信機の組合せごとであるため，今後は受信機ごとに校正係数を与える方法を検討したい．

謝辞 本研究において，ゼロ基線テストで使用する

データの取得実験にあたり、実験に協力頂いた株式会社アムテックス、株式会社トプコン、株式会社ニコン・トリニプル、東京大学の海老沼拓史氏に感謝の意を示す。

文 献

- [1] R.B. Ong, M.G. Petovello, and G. Lachapelle, "Assessment of GPS/GLONASS RTK under various operational conditions," Proc. ION GNSS 2009, pp.3297–3308, Savannah, Sept. 2009.
- [2] D. Kozlov, M. Tkachenko, and A. Tochilin, "Statistical characterization of hardware biases in GPS + GLONASS receivers," Proc. ION GPS 2000, pp.817–826, Utah, Sept. 2000.
- [3] T. Felhauer, "On the impact of RF front-end group delay variations on GLONASS pseudorange accuracy," Proc. ION GPS 97, pp.1527–1532, Missouri, Sept. 1997.
- [4] P. Misra and P. Enge, Global positioning system: Signals, measurements, and performance, 2nd ed., Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [5] P. Raby and P. Daly, "Using the GLONASS system for geodetic survey," Proc. ION GPS 93, pp.1129–1138, Utah, Sept. 1993.
- [6] D. Kozlov and M. Tkachenko, "Instant RTK cm with low cost GPS+GLONASS C/A receivers," Proc. ION GPS 97, pp.1559–1569, Kansas City, Missouri, Sept. 1997.
- [7] P.J.G. Teunissen, "The least-square ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS ambiguity estimation," J. Geodesy, vol.70, pp.65–82, 1995.
- [8] P.J.G. Teunissen and S. Verhagen, "On the foundation of the popular the ratio test for GNSS ambiguity resolution," Proc. ION GNSS 2004, Long Beach, pp.2529–2540, Sept. 2004.
- [9] Russian Institute of Space Device Engineering: GLONASS ICD ed. 5.1, Moscow, 2008.
- [10] H. Yamada, T. Takasu, N. Kubo, and A. Yasuda, "Evaluation and calibration of receiver inter-channel biases," Proc. ION GNSS 2010, pp.1580–1587, Portland, Sept. 2010.
- [11] J. Sleewagen, A. Simsky, W.D. Wilde, F. Boon, and T. Willems, "Demystifying GLONASS Inter-Frequency Carrier Phase Biases," InsideGNSS, May/June 2012.
- [12] L. Wanninger and S. Wallstab-Freitag, "Combined processing of GPS, GLONASS, and SBAS code phase and carrier phase measurements," Proc. ION GNSS 2007, pp.866–875, Texas, Sept. 2007.
- [13] H. Yamada, T. Takasu, T. Sakai, N. Kubo, and A. Yasuda, "Performance improvement of RTK-GPS/GLONASS with the calibration tables of inter-channel biases," Proc. ENC GNSS 2011, pp.1–12, London, Nov. 2011.
- [14] L. Wanninger, "Carrier-phase inter-frequency biases

of GLONASS receivers," J. Geodesy, pp.139–148, Aug. 2011.

- [15] M. Pratt, B. Burke, and P. Misra, "Single-epoch integer ambiguity resolution with GPS L1-L2 carrier phase measurements," Proc. ION GPS 1997, pp.1737–1746, Kansas City, Sept. 1997.
- [16] S. Yudanov, V. Varyukhin, S. Sila-Novitskiy, and J. Ashjaee, US Patent application number: 20100164798, July 2010.
- [17] A. Boriskin and G. Zyryanov, "Algorithms to calibration and compensate for GLONASS biases in GNSS RTK receivers working with 3rd party networks," Proc. ION GNSS 2008, pp.376–384, Georgia, Sept. 2008.
- [18] A. Al-Shaery, S. Zhang, and C. Rizos, "An enhanced calibration method of GLONASS inter-channel bias for GNSS RTK," GPS Solution, May 2012.

(平成 24 年 10 月 9 日受付, 25 年 3 月 11 日再受付)



山田 英輝

2006 東京海洋大・工卒。2011 同大学院博士課程了。2011 電子航法研究所研究員。現在, GNSS/SBAS 測位アルゴリズム全般に関する研究に従事。



高須 知二

東京海洋大学産学連携研究員。精密測位アルゴリズム (PPP, RTK) の研究に従事。



坂井 丈泰 (正員)

1996 早稲田大学大学院修士課程了。同年電子航法研究所入所。現在, 同所主幹研究員。2002~2003 米国スタンフォード大客員研究員, 2006~東京海洋大客員准教授。衛星測位システムの航空機応用に関する研究に従事。2006 IEEE AES 優秀論文賞, 2007 米国航法学会 ION GNSS 優秀論文賞。博士 (工学)。



久保 信明 (正員)

1998 北海道大学大学院了。同年 NEC 入社。その後、東京商船大学（現東京海洋大学）に転職し、現在、東京海洋大学准教授。現在、GPS/GNSS の都市部での精度向上、マルチパス誤差低減技術の開発に従事。



安田 明生 (正員：フェロー)

1966 名工大卒。1972 名大大学院博士課程了。同年、名古屋大学工学部助手。1975 東京商船大学助教授。1987 同教授。2003 東京海洋大学教授。現在、東京海洋大学特任教授、主な研究領域は GPS/GNSS 分野全般。