

20. 準天頂衛星による広域DGPS補強実験システムの開発

通信・航法・監視領域 ※福島荘之介, 坂井丈泰, 新井直樹, 伊藤憲

1. はじめに

GPSの近代化, Galileo衛星の打ち上げ等, 衛星航法技術の発展が著しい. 我が国においても, 測位衛星システム開発の基本方針が総合科学技術会議において示され, 準天頂衛星システム(QZSS: Quasi-Zenith Satellite System)計画が進められている[1]. 宇宙航空研究開発機構(JAXA)は, QZSSプロジェクトにおいて, 関連機関との協力によるQZSSを利用した高精度測位実験を計画している. この目的は, 衛星測位に必要な基盤技術の開発及び実証である. 電子航法研究所は, QZSSによる広域DGPS補強技術を開発を担当し, 高精度測位実験に参加するため, テストシステムを開発中である[2]. テストシステムは, 高精度測位実験においてJAXAのMCS(マスターコントロール局)と接続する計画のオンライン実験システムとその前段階で補正方式の評価を目的として開発されるオフライン実験システムから成る. オンライン実験システムにより生成される補強情報は, MCSを経由しQZSS衛星からサブメータ級補強信号(L1-SAIF)として放送し, 実証する計画である. 本稿では, 開発中のオフライン実験システムの機能概要と測位性能について報告する.

2. オフライン実験システムの機能概要

オフライン実験システムは, ハードウェアと複数のソフトウェアモジュール群により構成される. ソフトウェアモジュール群は, インターネット及びテープ媒体からGPS観測データ, GPS軌道歴, 地球回転パラメータ等を収集するモジュールと収集データを解析する6種類のモジュール群から成る. 図1に装置の構成を示す. GPS観測データは, 主に国土地理院の電子基準点により構成されるGEONET[3]の1秒間隔の観測データ(リアルタイムデータと呼ばれる場合もある)とする. 実験用の1秒観測データは, 1週間を単位としテープ媒体で全国約1,200点が提供される. 解析モジュール群は, これらを組み合わせることにより, 入力データから任意のモ

ニタ局を指定して, 航空用の広域DGPSであるSBAS(静止衛星型補強システム)とほぼ同等の放送補正メッセージを作成する. また, 入力データから任意にユーザ局を指定し, SBAS補正方式の性能を評価する機能を持つ. 次に, 主要な解析モジュールの機能を説明する.

2.1 周波数間バイアスの推定

広域DGPS補正方式において, 測位誤差の最大要因は電離層遅延である. モニタ局では, GPSの2周波(L1及びL2)の観測データを利用し, 周波数により群遅延と位相進みが異なることを利用して, 電離層遅延量を推定する. このとき, 観測データに含まれる, 衛星側及び受信機側の周波数間バイアス(IFB: Inter-frequency bias, L1/L2バイアスとも呼ばれる)[4]を推定し, 除去する必要がある. 周波数間バイアスは, 衛星内部のL1, L2信号の経路差, 周波数特性により発生し, モニタ局受信機内部にも存在する. 通常, 周波数間バイアスの変化は小さく, 初期には定数の様に扱われる場合もあった. その後, 温度変化によりバイアス値が変動する可能性が指摘され, 適当な間隔で推定する事例が多くなった. 解析モジュールでは, 複数のモニタ局の観測データを用い, 衛星及び受信機の周波数間バイアスを同時に推定する.

入力に用いる搬送波位相観測値は, サイクルスリップを検出・除去し, 異常データを排除す

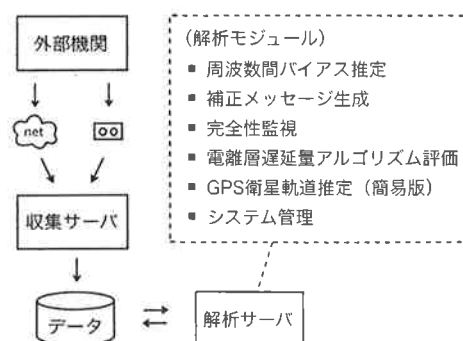


図1: オフライン・テストシステムの構成

る。電離層は単層の薄膜モデルと仮定して、電離層遅延量に対して観測方程式を立て、拡張カルマンフィルタにより解を得る。電離層遅延量は太陽磁気座標系（地磁気軸をz軸，地磁気太陽赤道面内の太陽方向をx軸とした回転座標系）を用い球面調和関数としてモデル化する [5, 6].

2.2 電離層遅延補正量の生成

周波数間バイアスを除去した視線方向の電離層遅延量は、GPS衛星からの測距信号が電離層を通過する地点（IPP: Ionosphere Pierce Point）における垂直遅延量に換算する。このため、電離層を高度 $H_{ion}=350$ km の薄膜と仮定し、傾斜係数（obliquity factor）

$$f(E) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{R_E}{R_E + H_{ion}} \cos E\right)^2}}$$

により変換する。ここで、 E は衛星仰角， R_E は地球半径である。

SBAS補正方式では、電離層遅延量を経緯度で5度毎に設定されるIGP（Ionospheric grid point）における垂直遅延量として、ユーザに放送する。ユーザ側では、受信衛星のIPP位置における垂直遅延量を、周囲のIGP位置で放送される垂直遅延量から双一次補間（bilinear interpolation）して求め、視線方向の遅延量に変換して利用する [7]。放送されるIGPにおける垂直遅延量を作成する方法は、いくつか提案されている。本モジュールでは、(1) 従来提案された、IPPのクロバッチャモデルと観測値による遅延量の差を利用し、距離による重み付き補間でIGPの遅延量を推定する方式（距離クロバッチャ）、(2) 米国WAASで採用されているWIPP（WAAS Integrity Performance Panel）により提案されたプレーナフィット（planar fit）方式（図2）、の2方式を選択可能としている。方式(2)は、カットオフ半径と呼ぶ各IGPからの距離内にあるIPPでの観測値を用い、最小二乗法によりその分布を平面近似し、求めた平面のIGPにおける値を垂直遅延量とする [8, 9]。その他、本モジュールでは、SBASを拡張し、IGPを1度毎に稠密に設定する機能も実装している。また、電離層を3層の薄膜と仮定して遅延量を求める方法も検討されている。

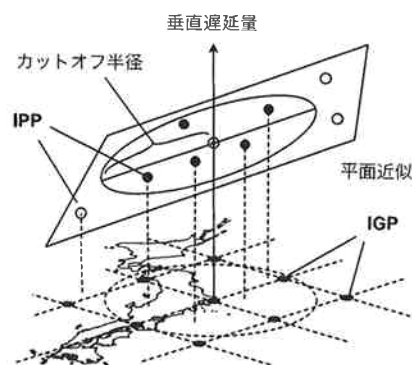


図2: プレーナフィット方式によるIGP毎の垂直電離層遅延量

2.3 長期補正、高速補正

長期補正は、エフェメリスと衛星クロックの誤差に相当する。本モジュールでは、IGS（International GNSS Service）の提供する精密軌道歴（最終解）を用いて、エフェメリス誤差、クロック誤差を求める手法をとる。この手法以外に、複数のモニタ局による観測値から、最小二乗法等によりエフェメリス誤差、クロック誤差を求める方法も検討されている [10]。放送される長期補正メッセージには、エフェメリスの IODE（Issue of data, ephemeris）を付加し、ユーザ側が受信するエフェメリスと対応させる。電離層補正後、長期補正により衛星位置とクロックを補正した擬似距離に残るのは、長期補正で取り除けない周期の短い誤差要因となる。この衛星毎の誤差要因を複数のモニタ局について平均し、高速補正值とする。

2.4 評価機能

計算された電離層補正值、長期補正值、高速補正值は、メッセージタイプを示すヘッダを付加したSBAS放送メッセージ（テキスト形式）にフォーマット化される。放送メッセージには、これら補正值以外に、インテグリティ情報であるUDRE（高速補正と長期補正の誤差推定値）、GIVE（電離層補正の誤差推定値）も含まれる。メッセージの送信間隔は、その最大間隔が規定されており、例えば高速補正は最大60秒、長期補正は120秒、電離層補正は300秒である [7]。ソフトウェアモジュールでは、この送信間隔を設定により可変できる。

これらのメッセージと任意に指定したユーザ局のデータを用いて、ユーザ測位精度を評価することが可能である。また、インテグリティ監視に関しては、SBAS と同等のプロテクションレベルを計算し、スタンフォードチャート、GIVE、UDRE のトレンドを表示する機能を持つ。評価の基本的手法は、例えば電離層遅延量補正值を作成する際のパラメータ、補正值を適用する間隔などを変化させ、その補正值、測位精度への影響を調べる。この機能により、補正值作成アルゴリズムを改良した場合の効果を比較可能である。また、異なるユーザ局、異なる日時のデータを選択可能である。

3. 性能評価

3.1 電離層遅延量

図3に電離層静穏日（2004年11月19日）の衛星側の周波数間バイアスの推定結果と航法メッセージとしてGPS衛星から放送された T_{GD} [12]の比較を示す。周波数間バイアスの推定間隔は10分とし、グラフには収束後の値を示した。グラフには、基準6局から周波数間バイアスを推定した結果と基準30局から推定した結果を示す。いずれの場合も放送された T_{GD} と推定バイアスの傾向はよく一致しており、両者の相関係数を求めたところ、0.938（基準6局）と0.940（基準30局）となった。基準6局と基準30局から推定した結果に大きな差はない。

放送される T_{GD} は、衛星側の周波数間バイアスを示しているが、L1-PコードとL2-Pコードのバイアスであり、推定しているL1-C/AコードとL2-Pコードのバイアスとは本来完全に一致しない。電離層擾乱日（2004年11月10日）で同様の推定を行った結果、相関係数は、0.919（基準6局）と0.913（基準30局）と予想どおり低下した。図4に、推定に利用した基準6局（□）と基準30局（●）の配置を示す。図中の数値は、基準点のIDである。

周波数間バイアスを除去した電離層遅延量は、IPPにおける垂直遅延量に換算され、2.2節に示したプレーナフィットによりIGPにおける垂直遅延量が求められる。図5は、ユーザ局周辺のIGP位置（5度毎）で与えられる垂直遅延量をユーザ局のIPP位置で双一次補間した値とユーザ局で2周波から求めた遅延量の一例である。こ

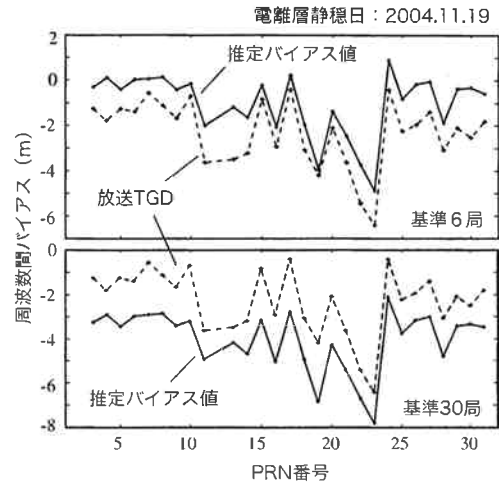


図3: 周波数間バイアスの推定結果

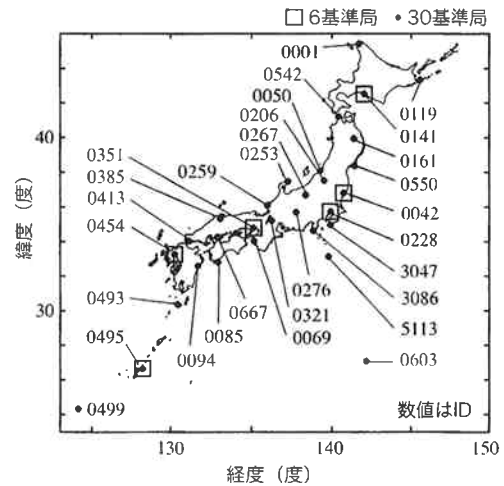


図4: ユーザ局，基準6局，基準30局の配置

の例は、電離層静穏日（2004年11月19日）にEL角が最大70度を越える衛星（PRN3）であり、ユーザ局は世田谷局（ID:0228）である。グラフから2つの値は同一の傾向を持ち、50cm以下の差で一致することがわかる。同局で同一日の他の衛星についても、同じ傾向であった。

3.2 測位精度

IGP位置で与えられる垂直遅延量は、電離層補正值としてSBASメッセージの形にフォーマット化される。2.3節に示したように、長期補正值、高速補正值も同様にフォーマット化する。ユーザ局では、IGPの垂直遅延量をユーザのIPP位置で双一次補間し、長期補正と高速補正（衛星に起因）を適用する。また、対流圏遅延量については、ユーザ側でMOPSモデル [11]により

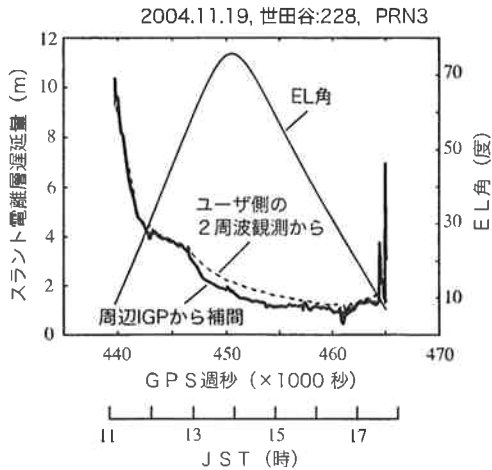


図 5: 電離層遅延量の推定結果の一例

排除する。MOPS モデルは、経験的な地表気象パラメータを、年通算日と緯度の関数で補間し、大気屈折率の高度分布モデルとマッピング関数により、垂直遅延量を求める。

図 6 は、神戸北局 (ID:0351) において、電離層静穏日 (2004 年 11 月 19 日) と電離層擾乱日 (2004 年 11 月 10 日) に、各 SBAS 補正タイプの適用間隔を可変した場合の 1 日の水平 RMS 誤差である。グラフは基準 6 局と 30 局の場合を比較している。基準 6 局のグラフから、測位誤差が 1 m 程度と最良なのは、静穏日に各補正タイプを 1 秒毎に適用した場合である。また、高速補正を 30 秒間隔、長期補正を 30 分間隔、電離層補正を 30 分間隔に広げても、測位誤差に変化はない。これは、測位誤差が 1.8~2.0 m 程度である電離層擾乱日においても同様である。IGP 間隔は SBAS では 5 度間隔に配置されるが、1 度間隔に稠密に配置した場合にも、大きな差はなく、電離層擾乱日において、わずかに改善が見られる。最も影響が大きいのは、各メッセージタイプを適用しない場合であって、高速補正、長期補正、電離層補正をそれぞれオフにした場合には、誤差が増加する。誤差が最大になるのは、電離層擾乱日において、電離層補正をオフにした場合である。

基準 30 局の場合にも、この傾向は同様であって、高速補正、電離層補正の適用間隔を広げても、測位誤差にほとんど変化は見られず、0.8~0.9 m となる (長期補正の適用間隔については、誤差の増加傾向が見られるが、SBAS は 120 秒

を最大適用間隔としている)。また、擾乱日については、IGP を 1 度間隔とした場合に改善効果がある。ただし、電離層補正の適用間隔を広げた場合には、誤差が増大する。以上の結果をまとめると、(1) 静穏日には、高速補正を 30 秒間隔、長期補正を 10 分間隔、電離層補正を 30 分間隔に広げても、測位誤差にほとんど変化はない、(2) 静穏日には、基準 6 局よりも基準 30 局により補正値を生成した方が、測位誤差が 0.1~0.2 m ほど改善される、(3) 静穏日には、IGP 間隔 (5 度、1 度) の影響はない、(4) 擾乱日には、基準 30 局での推定が IGP 間隔を 1 度にしたときに有効となる (ただし、電離層補正の適用間隔を広くすると誤差が増大する)、となる。

図 7 に、電離層静穏日 (2004 年 11 月 19 日) の全国の都市付近のユーザ局 (12 カ所) の 24 時間の測位誤差 (RMS 値) を示す。基準局の配置は、図 4 と同様である。図から現状の SBAS に近い IGP:5 度で基準 6 局の場合 (上図の白棒)、10 ユーザ局の測位誤差は 1 m 程度であるが、札幌、沖縄の誤差は 1.4~1.9 m であることがわかる。この原因は、基準局とユーザ局の配置に係り、基準局の外側にある IGP に電離層推定値が存在しない時間帯が生じ、外側のユーザ局の IPP での双一時補間が不能になり、電離層補正値の生成できない衛星が発生することによる。このため、ユーザが測位演算に利用できる衛星数が減少して DOP (幾何学的精度劣化指数) が低下し、測位誤差となる。比較のため、基準 30 局とした場合、IGP を 1 度とした場合を示す。札幌、那覇の測位誤差は、基準 30 局とするか IGP を 1 度とすることにより、改善が期待される。

4. むすび

QZSS による広域 DGPS 補強技術を開発する目的で、オフラインのテストシステムを開発し、現状の性能を評価した。本稿では、オフラインテストシステムの概要と主要機能を示し、特に現状の測位性能の評価結果を示した。測位性能評価では、電離層静穏日と擾乱日について、SBAS 方式をベースに基準 6 局と 30 局で補正メッセージを作成し、電離層補正を適用する IGP を 5 度、1 度間隔として比較した。この結果、6 局に比較して 30 局では、精度が改善されるが、IGP を 1 度間隔にする効果は電離層擾乱日に限られるこ

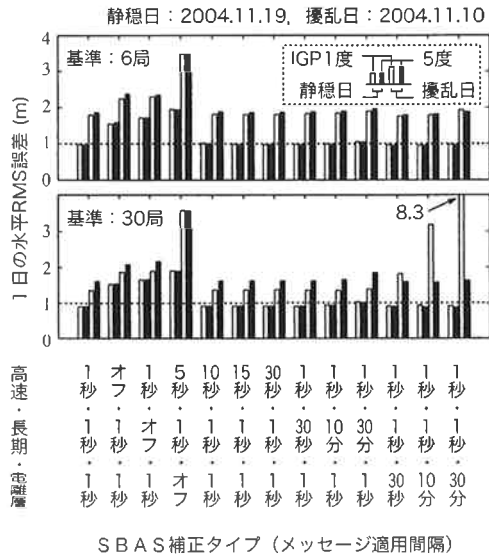


図 6: メッセージをオフまたは適用間隔を可変した場合の測位誤差の変化, 神戸北局 (ID:0351)

とがわかった。また、静穏日に基準6局、IGP:5度の場合、水平面誤差が約1m (RMS値)となるが、札幌、沖縄では誤差が増加することも確認された。札幌、沖縄の測位精度は、基準30局、IGP:1度とした場合に改善が見込まれる。

今後の課題は、性能評価を継続し、国内の北端、南端地域のユーザ測位精度と基準局配置、IGP間隔の関係を明らかにすることである。また、現状システムの評価結果を活用し、オンライン実験システムを開発することが、次の段階となる。

謝辞

本実験システムの開発にあたり、電子基準点(1200点)の1秒間隔データを提供頂いた、国土地理院測地センター衛星測地課衛星情報係の関係者、オフラインテストシステムの設計・製作に係わった関係者に感謝致します。

参考文献

[1] 総合科学技術会議, 宇宙開発利用専門委員会, 我が国における測位衛星システムのあり方について, 平成16年1月.

[2] 福島荘之介, 坂井丈泰, 新井直樹, 伊藤憲, 河野功, 小暮聡, “準天頂衛星によるGPSの補強,” 信学総大, KB2-7, Mar. 2004.

[3] 国土地理院: 電子基準点とは (<http://terras.gsi.go.jp/>)

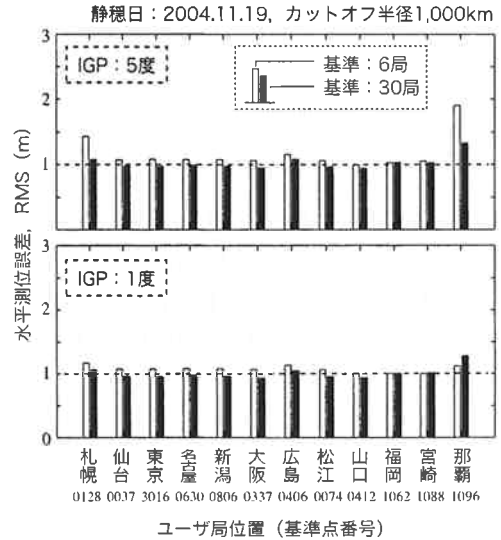


図 7: 12 ユーザ局での 24 時間の水平 RMS 誤差 (電離層静穏日)

[4] Brian D. Wilson, C.H. Yinger, W.A. Free, C. Shank, “New and improved the broadcast interfrequency biases,” GPS WORLD, pp.56-66, Sept. 1999.

[5] 松永圭左, 星野尾一明, “SBAS への電離層遅延, シンチレーションの影響,” 第1回電離圏の利用と影響に関するシンポジウム, pp.17-1-11, Mar. 2003.

[6] 坂井丈泰, “GPS による電離層全電子数観測のためのバイアス誤差推定法,” 信学論, vol.J88-B, no.12, pp.2382-2389, Dec. 2005.

[7] RTCA, Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, DO-229C, Nov. 2001.

[8] 坂井丈泰, 松永圭左, 星野尾一明, Todd Walter, “低磁気緯度地方における電離層活動の SBAS への影響,” 信学技報, SANE2003-97, pp.25-30, Jan. 2004.

[9] 坂井丈泰, 福島荘之介, 新井直樹, 伊藤憲, “準天頂衛星サブメータ級補強機能の性能評価,” 信学技報, SANE2005-44, pp.25-30, July 2005.

[10] 坂井丈泰, 福島荘之介, 新井直樹, 伊藤憲, “SBAS 広域ディファレンシャル情報の品質

- 評価,” 信学技報, SANE2005-93, pp.31-36, Jan. 2006.
- [11] 新井直樹, 坂井丈泰, 福島荘之介, 伊藤憲, “準天頂衛星システムにおける対流圏遅延量補正方式の検討,” 信学技報, SANE2004-37, pp.13-18, July 2004.
- [12] Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces, Interface Control Document, ICD-GPS-200, Rev. C, Oct. 1993.