

日本付近のGPS信号電離層伝搬遅延

衛星技術部 松永 圭左 星野尾 一明

1. はじめに

現在、航空局により整備が進められている運輸多目的衛星用衛星航法補強システム（MSAS: MTSAT Satellite-Based Augmentation System）は、GPSを補強し、米国のWAAS、欧州のEGNOSとともに世界的にシームレスな航空航法サービスを提供する静止衛星型衛星航法補強システム（SBAS; Satellite-Based Augmentation System）である。

SBASの重要な機能として、地上に配備した監視局（GMS; Ground Monitoring Station）で得たGPSデータをもとに、中央制御局（MCS; Master Control Station）でGPSを用いた測位の精度向上に必要な補正情報を作成し、静止衛星経由でGPSユーザーへ放送するサービスがある（図1）。

電離層遅延量がGPS測位誤差に与える影響は最も大きく、電離層遅延量補正情報の性能がSBASの精度や利用可能率、連続稼働率等に直接影響を与える。

日本周辺は、米国や欧州に比べ磁気緯度が低いいため、電離層の活動が活発である^[1]。このため米国等と同じ電離層遅延量の補正情報作成手法を用いた場合、補正精度が低くなり、結果として利用可能率の低下を引き起こす可能性が大きい。MSASの性能向上のため、日本周辺の電離層状態に適した手法の開発が必要とされている。

本報告では、日本付近における電離層遅延量の平面近似精度について解析した結果について述べる。

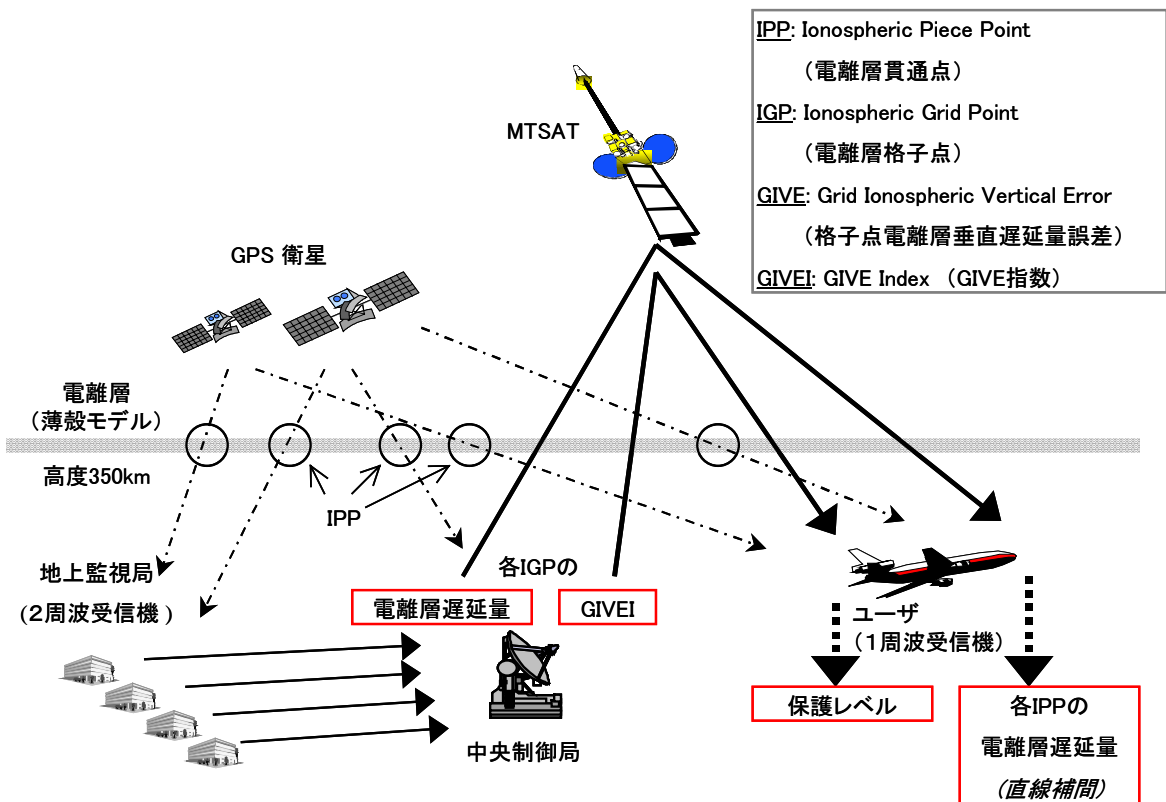


図1 . SBASにおける電離層遅延量補正方法概略図

2. SBAS の電離層遅延量補正方法^[2]

SBAS のユーザは 1 周波受信機を用いることを想定しており、ユーザ自身では GPS 航法メッセージによる電離層遅延補正しかできない。一方、SBAS の GMS には 2 周波 GPS 受信機が設置されており、各衛星からの GPS 信号の電離層による伝搬遅延量を測定できる。

SBAS では、電離層を高度一定の薄殻とするモデルを用いている。高度としては、電子密度が最も高い F2 層の標準的な高度 (350[km]) を用いる。薄殻モデルを用いると、GPS 信号伝搬経路と電離層との交わる点(電離層貫通点:IPP; Ionospheric Pierce Point)がで、交差角を用いるマッピング関数によりその点での垂直遅延量(信号経路が電離層薄殻と垂直に交差する場合の遅延量)が求まる。

中央制御局(MCS)では、複数の地上監視局(GMS)から収集した各 GPS 信号の電離層遅延量から、日本周辺での電離層垂直遅延量分布を作成する。その分布から経緯度 5° の格子点(IGP; Ionospheric Grid Point)での垂直遅延量を推定し、各 IGP での垂直遅延量と垂直遅延量推定誤差(GIVE; Grid Ionospheric Vertical Error)を補正情報として静止衛星経由で放送する(図 2)。ユーザは、IGP の補正情報から、受信している各 GPS 信号の IPP での遅延量およびその誤差を線形補間し、位置および測位精度を計算する(図 3)。

ユーザは、誤差の限界を推定計算するため、

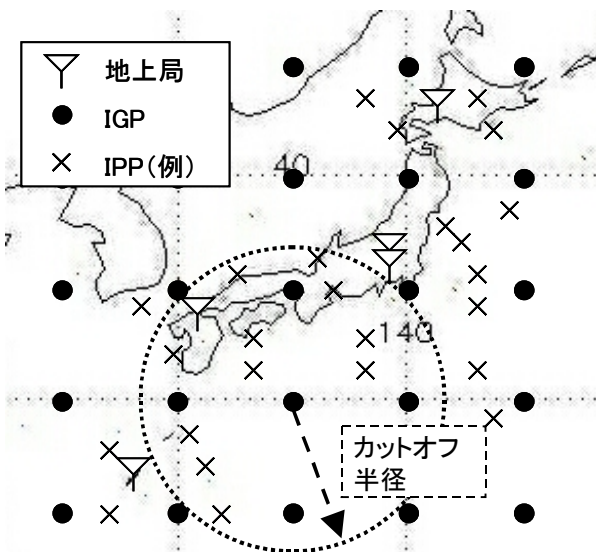


図 2 . 受信サイト位置と日本周辺の格子点(IGP)

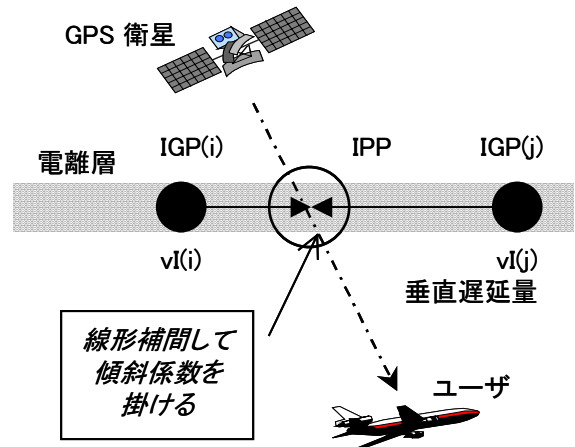


図 3 . ユーザの IPP における内挿補間方法

GIVE 等を用いて保護レベル(99.99999%で測位結果が入る範囲)を計算するが、この値が飛行フェーズごとに規定された値よりも大きくなると、そのフェーズの航法装置として利用不可能となる。すなわち、保護レベルが大きくなると、利用可能率を下げることになる。

3. 解析データ

当所では、MSAS の 4 箇所の地上監視局とほぼ同じ場所(札幌、所沢、福岡、那覇)および当研究所(調布)に 2 周波 GPS 受信機(Ashtech Z-12)を設置しデータ収集を行なっている。

電離層の活動が活発な 2000 - 2002 年の太陽活動極大期の 30 秒サンプリングデータを使用した。解析する日は、電離層活動の目安となる地磁気擾乱指数 Kp を参考に、各季節から Kp 値が大、小の日を選んだ(表 1)[3]。解析プログラムは、RINEX 形式のデータを入力とし、サイクルスリップ除去等の前処理を行なっている。

表 1 解析データの年月日とその日の Kp 値

季節	年月日	Kp 最大値	Kp 合計
秋	2001/ 9/21	2+	8-
	2001/10/ 3	7	43+
冬	2001/11/29	1+	5+
	2001/12/30	5-	27-
春	2002/ 2/23	2+	8
	2002/ 3/24	6	37+
夏	2002/ 6/13	3-	15-
	2002/ 6/16	3-	15

4. 解析結果

4.1. 周波数間バイアス推定

2周波受信機を用いた電離層遅延量測定では、電離層の分散性のため周波数によって信号の位相速度および群速度が異なることを利用している^[4]。

受信機および衛星側の送信装置には、L1信号とL2信号の経路が完全に一致しないため、および周波数特性により、周波数間バイアス（IFB; Inter-Frequency Bias）が存在する。このため、IFBが分からないと電離層による遅延量が正確に

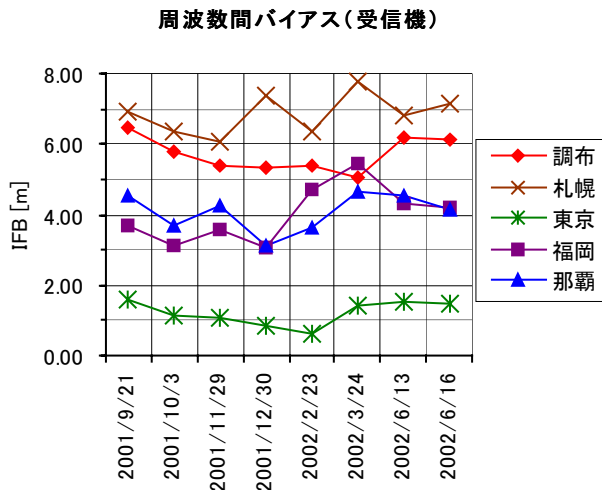


図4. 受信機周波数間バイアス推定値

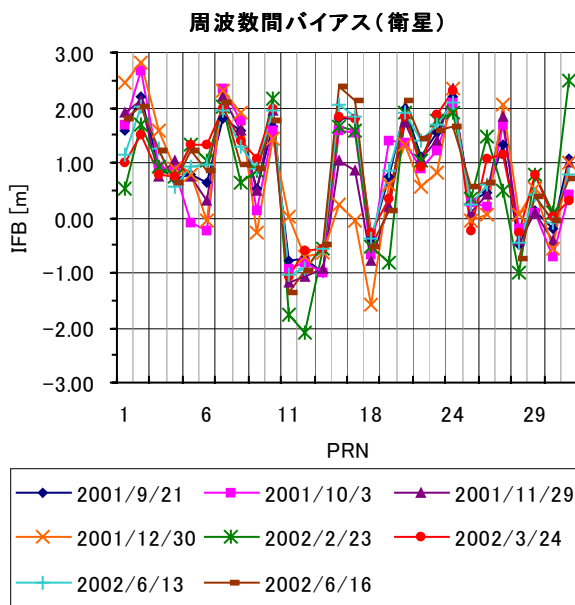


図5. 衛星周波数間バイアス推定値

測定できないことになる。

ある期間の全サイトにおける全衛星のデータを用い、IFBは変化率が小さいものとして、カルマンフィルタ処理で、各衛星および各受信機のIFBを求めた。電離層遅延量は、太陽磁気経緯度を座標とする球面調和函数を用いて展開している。

各サイトの受信機のIFBを図4に示す。日によって、値が1-2[m]変化している。また日による変化傾向もサイト毎に異なる。図5には衛星のIFBを示した。日によって、こちらも値が1-2[m]程度異なる結果が出た。ここで求めた受信機および衛星のIFB変動率は大きいと考えられるため、推定方法を改良する必要がある。

4.2. 平面近似を使用した電離層遅延量およびGIVE解析

4.2.1. 平面フィッティング^[5]

当初、電離層遅延量の計算は、各IPPの電離層垂直遅延量から、IGPとIPP間の距離の逆数に比例する重みを付けてIGPでの電離層遅延量を推定していたが、WIPP (WAAS Integrity Performance Panel; WAAS インテグリティ性能パネル)において、空間的な分布が平面で表されるというモデルを採用することになった(図6)。各IGPからある距離(カットオフ半径)内にある電離層垂直遅延量を用い、分布を平面で近似し、最小2乗法で

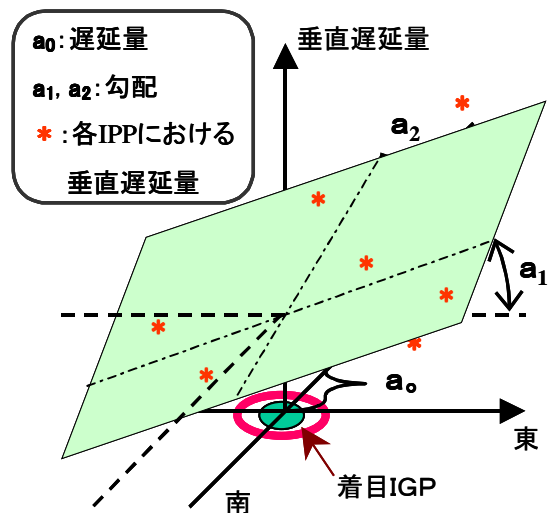


図6. 電離層遅延量分布平面フィッティング概略図

電離層垂直遅延量残差 95%値
(カットオフ半径=1,000[km])

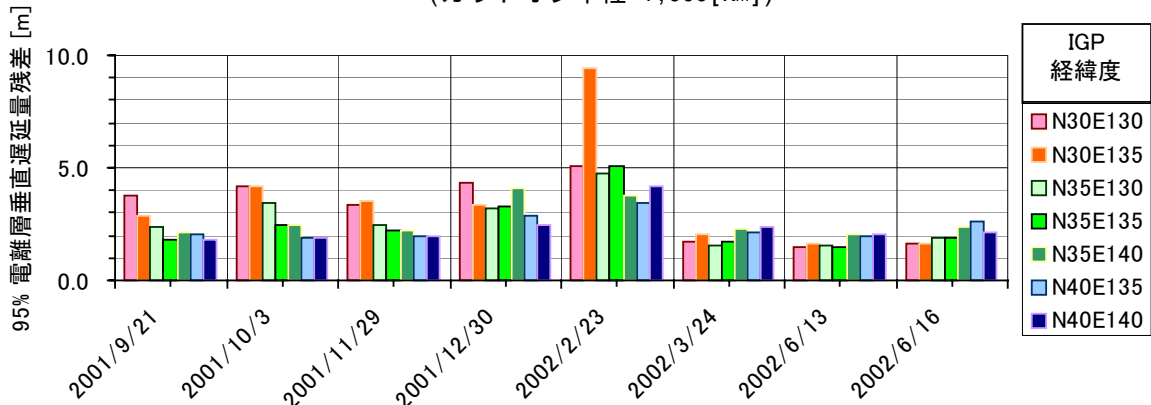


図7. 各 IGP における電離層垂直遅延量の近似平面からの残差 95% 値

求めた平面の IGP での値を求める。また平面と測定値との差（電離層垂直遅延量残差）をもとにした平面近似のフィッティングの一致度を表すパラメータ（ χ^2 乗値）による検定を行い、GIVE 値を算出している。

4.2.2. 解析結果

図7に日別の各 IGP での電離層垂直遅延量残差の 95% 値を示す。表1と比べてみると、日本周辺では電離層活動と Kp 値との相関が低いことが分かる。特に、Kp 値が小さい 2002 年 2 月 23 日の 95% 残差は他の日に比べて大きくなっている。この日と 1 ヶ月後の 2002 年 3 月 24 日のデータを調べてみた。

電離層遅延量の空間的な変化率を調べるため、カットオフ半径を変えた場合の 95% 残差を図8に示した。3 月 24 日はカットオフ半径が 250-1,000[km]の範囲で、95% 残差が 2-3[m]を維持

していたのに対し、2 月 23 日はカットオフ半径が 500[km]の場合で 95% 残差が 5[m]以上になる IGP もあった。すなわち、電離層の密度分布が 500km より小さいスケールで平面近似が適当でなくなるほど変化していたと推定できる。

両日の北緯 30° 東経 130° の IGP の電離層遅延量・GIVE 値を図9、および近似平面の東西・南北方向の傾きを図10に示す。GIVE 値は通常正の値であるが、 χ^2 乗検定でエラー（電離層嵐）と判断された場合、便宜上 GIVE = -1 としてある。平面フィッティングに使用するデータが少ないと、安全係数が大きくなり、また電離層嵐と判断されることも多くなるので、カットオフ半径を 1,000[km]とした。2 月 23 日は求めた電離層遅延量が激しく変化しており、 χ^2 乗検定で電離層嵐と判断された時間割合も多いことが分かる。2 月 23 日の近似平面の傾斜は、3 月 24 日と比べて 2 倍以上（遅延量 1[m] / 距離 100[km]）になってい

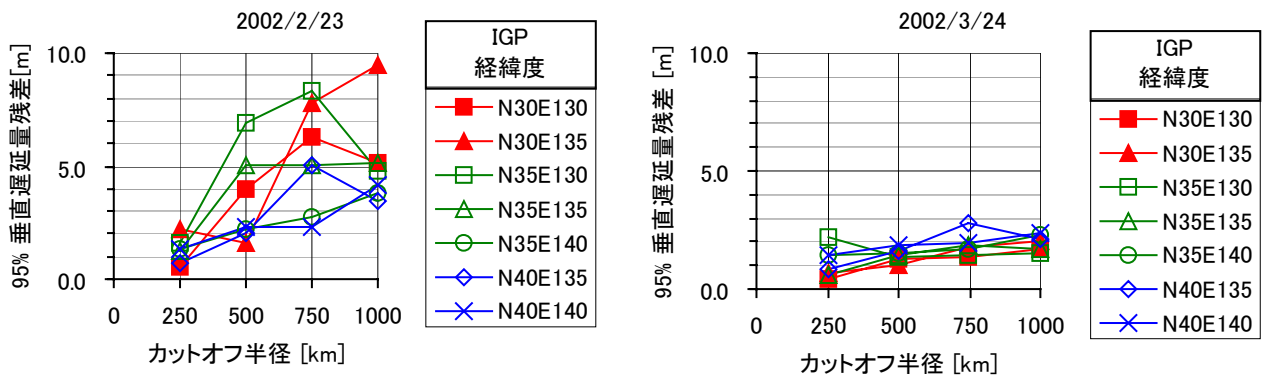


図8. 電離層垂直遅延量残差の 95% 値 v.s. カットオフ半径

た。

以上から、平面フィッティングで電離層嵐と判断される場合は、500[km]以下の空間スケールで電離層密度の変化が1[m]/100[km]程度で生じていることが分かった。

5. まとめ

日本周辺のデータを用い、電離層遅延量平面近似手法の初期解析を行なった。まず、衛星および受信機の周波数間バイアスを推定した結果、解析した日によって衛星、受信機とも1-2[m]の違いが生じた。今後、カルマンフィルタのパラメータ調整などを行い、推定精度を向上させる必要がある。また、電離層の空間分布に平面モデルを使用し、電離層状態と GIVE 値の関係を調べた。電離層の

空間変化率が500[km]以下で電離層遅延量1[m]/距離100[km]程度変化している場合には、2乗検定で電離層嵐と判断される割合が多いことが分かった。これは米国において電離層嵐が発生した時の勾配とほぼ等しい。また、米国での調査結果では、電離層活動が平穏な場合で、電離層垂直遅延量の近似平面からの残差分布の95%値は約0.7[m]であるが^[5]、今回の結果から、日本周辺では1-2[m]程度であるため、電離層が静穏時においても空間変化率は高いことが分かった。

今後の課題としては、日本周辺で平面近似が有効である時間的割合を調べ、フィッティングの際の重み付け、異常データの除去等のアルゴリズム改良を行なう必要がある。また、薄殻モデル以外の電離層モデルの導入検討も考えられる。各 IGP

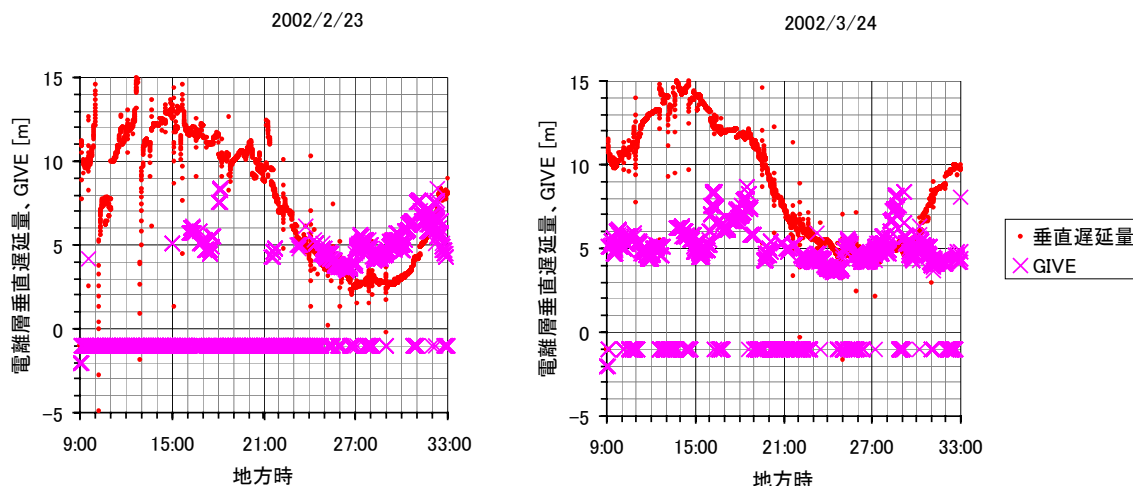


図9 . 電離層垂直遅延量と GIVE の時間変化 (IGP : 北緯 30° 東経 130°)

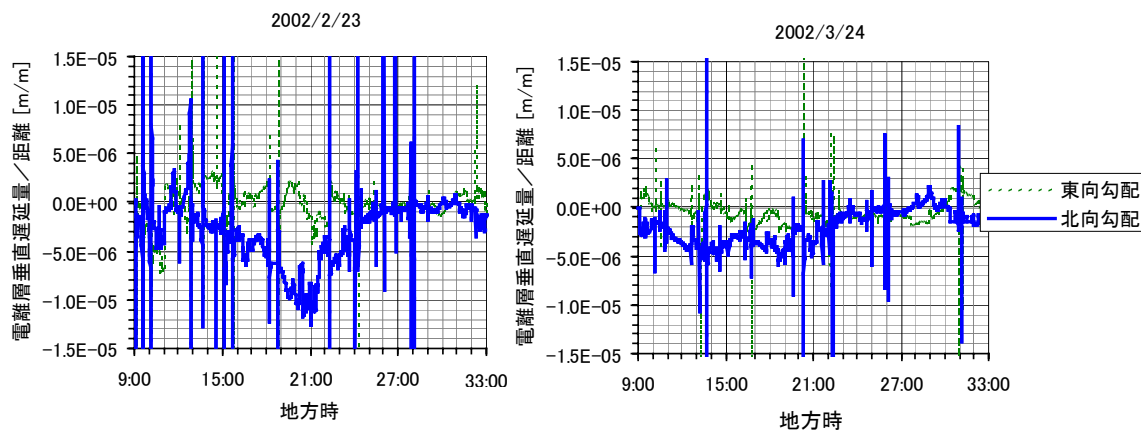


図10 . 近似平面の東向および北向勾配の時間変化 (IGP : 北緯 30° 東経 130°)

での遅延量推定精度を向上するだけでなく、ユーザにおける線形補間の電離層遅延量精度およびインテグリティの担保を考慮し、最終的にはMSASの利用可能率を上げることに留意しなければならない。

[参考文献]

- [1] 恩藤忠典, 丸橋克英, 他, 「宇宙環境科学」, オーム社, 2000年.
- [2] RTCA-Special Committee 159 WG-2, “Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System / Wide Area Augmentation System Airborne Equipment”, RTCA Document Number DO-229C, November 2001.
- [3] 京都大学地磁気世界資料解析センター,
地磁気データサービス,
<http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>
- [4] Parkinson, B. W., Spilker, J. J., eds., “Global Positioning System: Theory and Applications”, Vol. 1, chap 12., AIAA, 1995.
- [5] Walter, T., Hansen, A., Blanch, J., and Enge, P., “ Robust Detection of Ionospheric Irregularities ”, in the proceedings of ION GPS, Salt Lake City, UT, September 2000.