

4. GPS を用いた電離層プラズマバブルの観測

衛星技術部 ※松永 圭左 坂井 丈泰 星野尾 一明
 京都大学理学研究科 齊藤 昭則
 名古屋大学太陽地球環境研究所 大塚 雄一

1. はじめに

最近の知見によると、電離層の擾乱が発生した場合、受信電波強度の急激な低下、位相変動（電離層シンチレーションと呼ばれる）が生じ、GPS 衛星等の信号が受信できなくなる、あるいは、電離層伝搬遅延が急激に変化することにより、測位不能あるいは測位誤差の増大となる事態が生じる可能性があることが明らかになってきた。このため、電離層擾乱をリアルタイムで予測できるシステムを構築し、あらかじめ警報を出す等の対応をとることが必要となる。

本研究の目的は、(1) 電離層擾乱予測技術の開発に係る各種要件を明らかにすること、(2) 日本の南西部において微細な電離層構造の変化を観測・収集するシステムの構築、(3) このシステムのデータと日本全域の観測が可能な国土地理院 GEONET の観測データを用いた、電離層擾乱の発生予兆となる現象の抽出、電離層擾乱の強さ、移動速度、発生範囲等の解析、(4) 電離層擾乱の動きを予測するデータ処理の基礎技術の開発、である。

2. 研究の背景^[1]

電離層とは、概括的には、高度約 100km から数千 km 程度までの、高層大気が太陽からの紫外線や X 線等の影響によって電子とイオンに解離している（プラズマ状態になっている）層で、その電離した電子の密度は高度や緯度、時刻等によって異なる。電離層の状態は、太陽活動の活発さ（太陽から放射される紫外線や X 線、荷電粒子、それに伴う磁場、等）、季節、時刻、場所（特に磁気緯度）等の要因により変化する。

赤道異常帯と呼ばれる磁気低緯度地域（磁気緯度 ± 15° 付近）では、活発な赤道性の電離層活動が観測されている。日本周辺では地理緯度に対して磁気緯度が低くなっており、赤道電離層特有の現象の影響を受けやすい。

赤道性の電離層擾乱の一つが、プラズマバ

ブルと呼ばれる現象である。プラズマバブルとは、電離層中でプラズマの穴（プラズマ密度の低い領域）が生じる現象であり、プラズマバブル内部では、その周りに比べてプラズマ密度が百分の 1 以上も低くなる。プラズマバブルは、磁気低緯度地域の日没直後にしばしば発生し、季節的には春秋分付近で多く、また太陽活動の極大期に激しくなる傾向がある。大きさは、東西方向に数十 km、磁気赤道から磁気緯度（磁力線）に沿って数百から約 2 千 km になり、東方向へ移動することが分かっている^[2]（図 1）。プラズマバブルの内部には、様々な空間スケールの電子密度変動（イレギュラリティ；不規則構造）が存在する。人工衛星から送信された電波は、イレギュラリティによって回折され、地上で受信されるときに電波の強度を強め合ったり弱め合ったりする。このため、受信信号の振幅や位相が変動する（シンチレーション）。シンチレーションを起こすイレギュラリティの空間スケールは、フレネル半径 $\sqrt{\lambda z}$ （ここで、 λ は送信電波の波長、 z は地上の受信点からイレギュラリティまでの距離）で表される。GPS 衛星の L1 波 (1.5GHz) を受信する場合、L 波

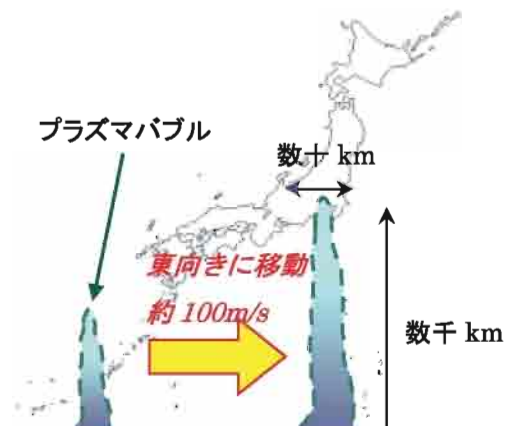


図 1 プラズマバブルのイメージ

帯の電波に対して最も影響のある電離層高度は、f2層と呼ばれる高度250～500kmの部分であるため、フレネル半径は約300mとなる。

3. プラズマバブルのGPSへの影響^[3]

GPS等の衛星航法システムでは、電波の発信源である衛星と受信するユーザの間に電離層が存在する。GPS等のLバンド帯の電波に対しても、電離層による信号遅延や信号強度の変化が生じるため、電離層活動は航法システムの性能に影響を与える。

ユーザは電離層遅延量を補正する必要があるが、単一周波数の信号のみを用いるユーザは、モデルあるいは外部からの情報を元に電離層遅延量を推定する方式をとることが多いが、プラズマバブルによる電離層遅延量の急激な減少などの空間的および時間的に細かい変動に対しては、モデルや外部情報からの補正では十分な精度が得られず、測位精度の劣化に繋がるおそれがある。

電離層シンチレーションによる影響としては、電波の振幅や位相が変動するため、GPS受信機が衛星電波を受信できなくなることがある^[4]。このため、補強システムにおいては、地上局で得られる補正情報の生成に必要なデータ量が少なくなり補正性能の劣化が生じる。また、ユーザにおいては、受信衛星数が減る、または

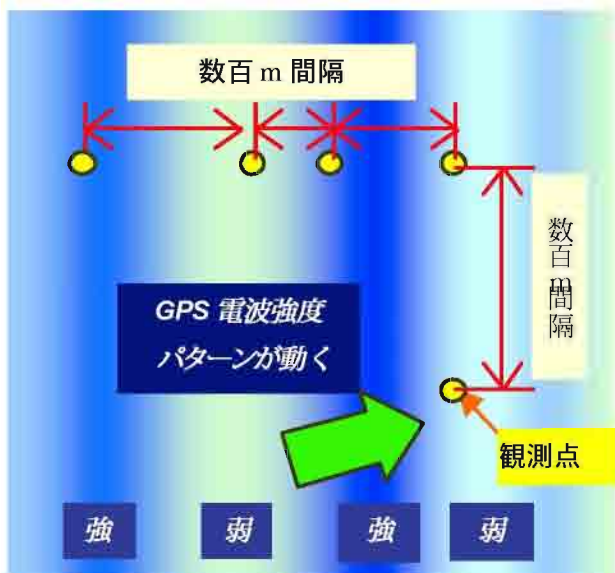


図2 稠密計測システムでのGPS電波強弱分布パターン観測のイメージ

衛星電波を復調して得られるはずの航法メッセージや補正情報が得られなくなるため、ユーザの測位精度および安全性が低下することが懸念される^[5]。

4. 電離層観測データ収集・解析システム開発

プラズマバブルのイレギュラリティの大きさ、時間変化、速度等の性質は、地上においてGPS電波がどのような強弱の分布パターン(シンチレーション・フェード・パターン)になっているか、またそのパターンがどのように動いているかを調べることで分かる^[6,7,8](図2)。そのために、複数のGPS受信機を数百m間隔で稠密に配置し、高速にデータを収集するシステム(電離層シンチレーション稠密観測システム)を石垣島に整備し、観測される信号強度データの時系列波形について任意の組み合わせの受信機間で相互相関関数を計算し、そのピークから擾乱域の局地ドリフト速度を推定するツールを製作した。

またプラズマバブルの移動方向や大きさの変化のデータを集めるために、国土地理院が整備している電子基準点網(GEONET)のデータを用いて解析を行うツールを製作した。

4.1. 電離層シンチレーション稠密観測システムの整備

プラズマバブルは赤道異常帯において最も多く発生するため、プラズマバブルのイレギュラリティ観測システムとして、沖縄県石垣市に複数のGPS受信機を数百m間隔で稠密に配置し、観測機器は、図3に示す4施設に設置した。各観測点の機器の主な構成は、GPSアンテナ、GPS受信機、RF機器(分配器等)、通信機器(ルータ)、無停電電源等が入った機器収納箱である(図4、5)。

プラズマバブルの観測を目的として、東西に約300m、約100m、約1,000m間隔、および南北に約600m間隔、計5基のアンテナを配置している。東西方向の間隔は、[8]の論文において、1,000m程度でも相関が取れているので、それよりも離れた距離でのイレギュラリティの状態を調査するため、および様々な間隔で解析が可能かを調べることを目的として設定した。南北方向は、数km以内で設置可能な限り離して設置した。

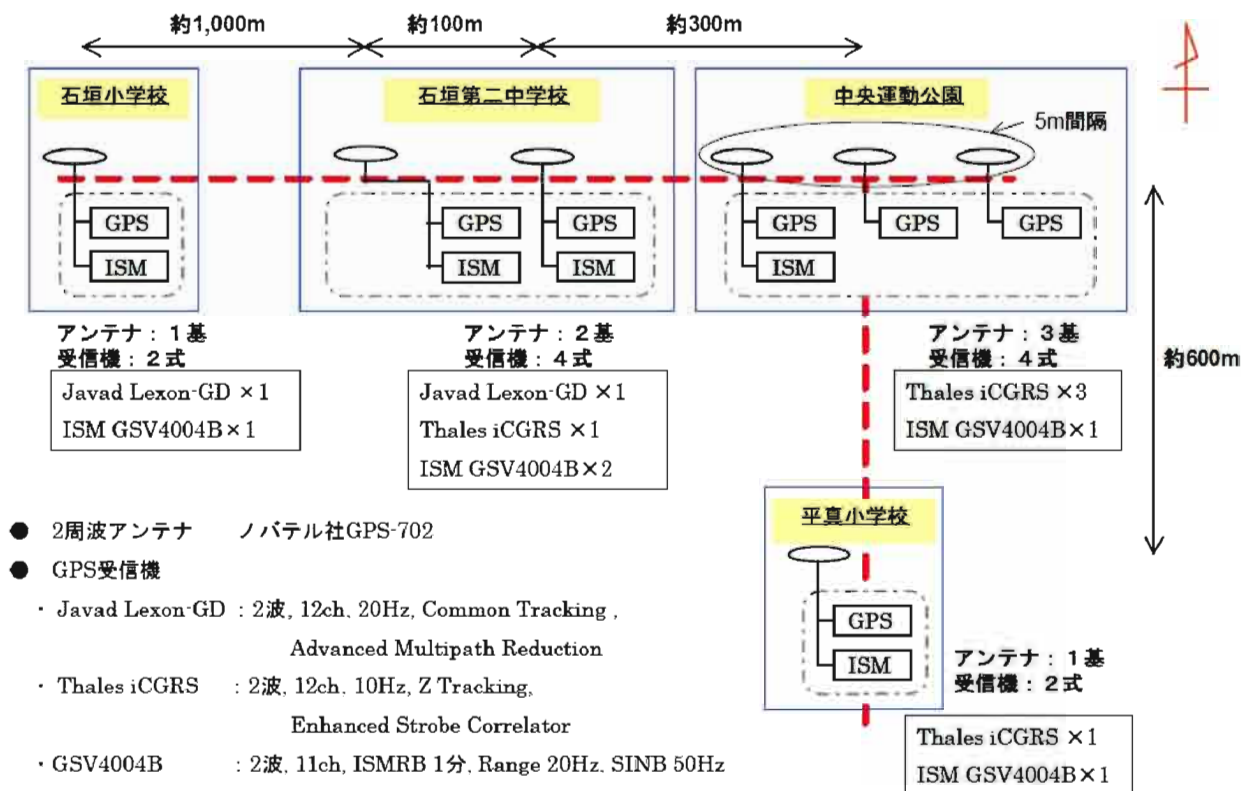


図 3 電離層シンチレーション稠密観測システムの機器配置図

設置した受信機は、計 12 台で、ISM が 5 台、および 2 周波の GPS 受信機が 7 台である。シンチレーション受信機（GSV 社製 GSV4004B）は、受信信号の振幅および位相情報を 50Hz の高サンプリングレートで出力することができる受信機である^[9]。2 種類の GPS 受信機（Javad 社製 Lexon-GD、タレス社製 iCGRS）は、シンチレーション受信機よりも低いレート（10Hz または 20Hz）で C/N0 値を出力するが、トラッキング方式等が異なる性能の受信機のシンチレーションによる影響を調査するため、および GPS 受信機のみでもプラズマバブルの観測が可能であることを調査する目的で、各観測点にシンチレーション受信機とともに設置した。

なお、石垣市中央運動公園には 5m 間隔で 3 基のアンテナを設置し、そのうち 2 基には GPS 受信機（タレス社製 iCGRS）のみを接続してある。これは、後処理でマルチパス除去等を行い、正確な電離層遅延量を求めることを目的とするものである。



図 4 アンテナ設置状況（中央運動公園）



図 5 機器収納箱（石垣第二中学校）

4.2. 電離層擾乱データ収集・解析システム開発

電離層シンチレーション稠密計測システムの各観測点（石垣島）から本研究所（調布）へのデータの収集、および、同データと本研究所内にあるGEONETデータを用いた電離層擾乱の解析を行うためのシステムを同所内に整備した（図 6）。

稠密計測システムの各観測点からのデータは、インターネットを経由して、電子研内の稠密観測データサーバに収集される。データの通信量は、各観測点毎に最大値で140～360kbpsと見込まれており、ADSL回線を使用している。観測点からの生データは、データ収集装置を用いて収集・格納される。格納された生データは、1時間毎にデータ前処理装置を用いてデータ内容毎に分割、およびデータ形式変換の処理を行われ、最終的にデータサーバ装置に保存される。GEONETデータは、電子研内に別途整備されたGEONETデータサーバシステムに格納されている。

データ解析は、データ解析装置に整備された解析ツールを用いて行われる。稠密計測データおよびGEONETデータは、稠密計測システムのデータ収集・前処理系とは異なるLAN経由

で、各データサーバからftpにてデータ解析装置に転送され、解析に用いられる。

5. 解析アルゴリズムの概要

5.1. イレギュラリティドリフト速度の解析

電離層シンチレーション稠密計測システムで受信するL1信号強度観測データ（ISMの50Hz振幅データまたはRINEXデータのC/N₀値）を用いて、任意の2つの受信機のペアで相互相関関数を計算し、そのピーク値の時間差からイレギュラリティの局地ドリフト速度を推定する。同時に、全ての受信機ペアの時間差を用いて、波面として見たイレギュラリティの向きと進行方向速度を推定する。

5.2. プラズマバブルの範囲・移動速度の解析

GPS信号の電離層遅延量が周辺より小さい領域をプラズマバブルと考え、プラズマバブルの移動速度および範囲を求める。

稠密観測システムの受信機またはGEONET観測点のGPS受信機について、任意の複数の受信機のTEC時系列データにおける急激なTEC値の減少、復帰タイミングと対応するIPP座標から、プラズマバブルのドリフト速度

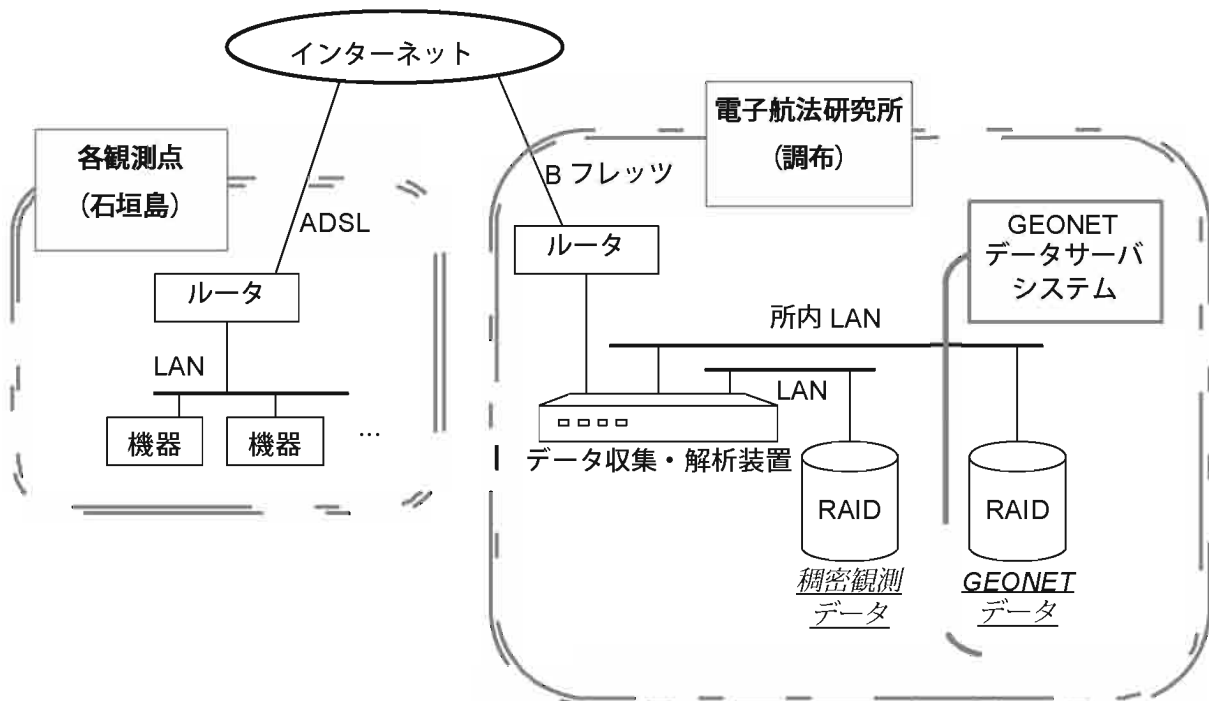


図 6 電離層擾乱データ収集・解析システム系統図

および範囲を推定する。

処理概要は次のとおり。

① TEC 減少・回復判定

受信機・衛星ペア毎の TEC 二階差分値から TEC の急激な減少・回復の開始点を識別し、TEC一階差分値により開始点から一定時間継続して減少・回復する場合を減少・回復点と判定する。継続判定には、任意の変化率以上で減少・回復するデータ数が超過判定個数を上回ることにより判別する。減少点・回復点の時刻については一定時間の中央値とする。

② プラズマバブルドリフト速度推定

①の判定結果をもとに、急激な減少の始まり同士を比較し、IPP位置ベクトル差と時間差から速度を計算する。比較は、時間的に過去のものから順次基準低下点とし、基準より時間が進んだところにある全ての低下点と行う。その後、低下点のペアに対応した分の速度を平均する。

③ プラズマバブル範囲推定

①の判定結果を基に、急激な減少開始点と回復点を比較し、そのIPPベクトル差から範囲を計算する。比較は、時間的に過去の減少開始点

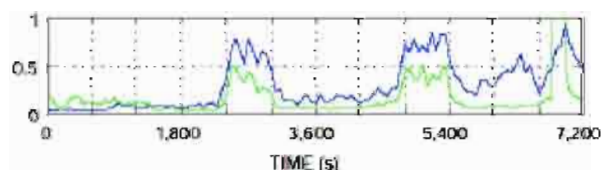


図7 石垣島で観測された GPS 信号の S_4 値
2005 年 3 月 12 日 12:30-14:30 (GPS 時刻)
PRN21

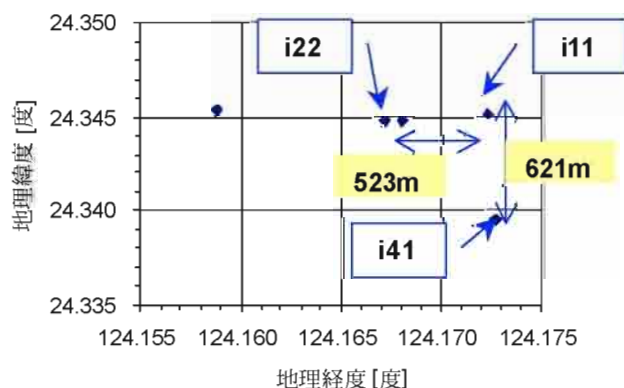


図8 観測点配置図

を順次基準低下点とし、基準より時間が進んだところにある全ての回復点と行う。減少開始点一回復点の組み合わせに対応した分の範囲(距離)を、②で求めた平均速度とペア毎の時間差から移動距離分を補正後、平均をとる。結果を地理方位、磁気方位に投影し、東西・南北成分を計算する。投影基準はIPP計算範囲の中心とする。

※ TEC (Total Electron Content): 全電子数

電波の伝播系路上の電子密度の線積分値。電離層遅延量に比例する。GPSの2周波計測により求めることが出来る。

※ IPP (Ionospheric Pierce Point): 電離層貫通点

電波を送信している衛星と受信機を結ぶ線と、薄膜であると仮定した電離層との交差点

6. 解析結果

2005年3月12日に発生したシンチレーションに関して、プラズマバブルのイレギュラリティ速度の解析を行った。この日の13:10-13:20および13:50-14:00 (GPS時刻)において、PRN21のGPS信号において、振幅シンチレーション強度の指標である S_4 値が大きくなっている(図7)ことから、この部分の振幅情報を調査した。

解析に用いた受信機データは、i11g (中央運動公園)、i22g (石垣第二中学校)、i41g (平真小学校) (いずれもGSV4004B受信機)である。各観測点の位置を図8に示す。

各観測点の、13:10:00から30秒間のL1振幅データが図9-1 (i11g)、図9-2 (i22g)、図9-3 (i41g)である。

すべての点において、振幅強度が周期4-7秒程度で変化していることが分かる。これらの結果より、イレギュラリティの速度を概算で算出した。この付近の地磁気の磁力線は、方位角約357度を向いており、地理的南北とほぼ平行である。仮に、i22の17秒目のピークとi11の19秒目のピークが同じイレギュラリティによるとすると、両者間は経緯度東西方向に約500m離れているため、地上での見かけの移動速度は東方向に約250m/sとなる。このとき、

IPPは東方向に約20m/sで移動しているため、イレギュラリティの移動速度は東方向に約270m/sとなる。

i41はi11とほぼ南北方向に位置するが、i41の波形はi11と時間的な強弱が一致していない。むしろ、i22との時間差が小さいとも見える。この場合、イレギュラリティが磁力線方向から傾いている可能性もある。

7. まとめ

衛星航法システムに影響を与える赤道性電離層擾乱の予測技術開発に係る要件を明らかにするために、石垣島に電離層シンチレーション稠密観測システムを設置した。また、GEONETデータを用いたプラズマバブルの解析ツールを整備した。

電離層シンチレーション稠密観測システムにおいて観測されたデータを用いてプラズマバブルのイレギュラリティの速度を解析した。イレギュラリティの相関を考えた場合、磁力線に垂

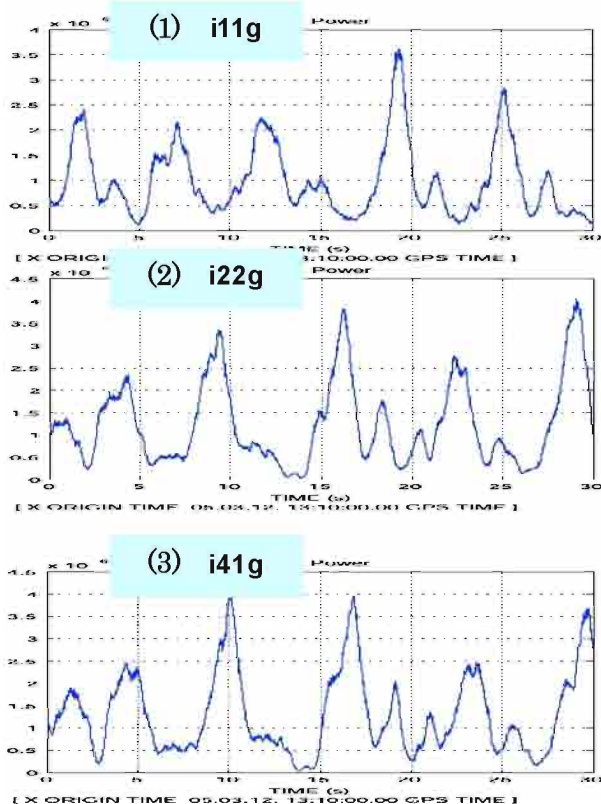


図9 GPS信号の振幅強度 (PRN21, L1)
2005年3月12日13:10:00から10秒間
(1) i11g, (2) i22g, (3) i41g

直な方向の移動速度は、約270m/sになった。今後、イレギュラリティの形の変化率、イレギュラリティの方向、等を考慮に入れた解析を行う必要がある。

8. 謝辞

今回の電離層シンチレーション稠密観測システム設置に関して、御協力いただいた石垣市役所、石垣市教育委員会、および各設置場所の施設の関係者に感謝いたします。

[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] Groves, K. M., Basu, S., Weber, E. J., Smitham, M., Kuenzler, H., Valladares, C. E., Sheehan, R., MacKenzie, E., Secan, J. A., Ning, P., McNeill, W. J., Moonan, D. W. & Kendra, M. J.: “Equatorial scintillation and system support”, Radio Science, Volume 32, Number 5, pp. 2047-2064, September-October 1999.
- [3] J. A. Klobuchar: “Ionospheric Effects on GPS”, Global Positioning System: Theory and Applications, B. Parkinson and J. Spilker, Eds., pp. 485-515, AIAA, Washington D.C., USA, Volume I, Chapter 12, 1996.
- [4] G. Bishop, S. Basu, E. Holland & J. Secan: “Impacts of Ionospheric Fading on GPS Navigation Integrity”, Proceedings of ION GPS-94, Institute of Navigation, Salt Lake City, UT, U.S.A., pp. 577-585, September 1994.
- [5] P. H. Doherty, S. H. Delay, C. E. Valladares & J. A. Klobuchar: “Ionospheric Scintillation Effects in the Equatorial and Auroral Regions”, Proceeding of ION GPS 2000, Institute of Navigation, Salt Lake City, UT, U.S.A., pp. 662-671, September 2000.
- [6] Kil, H., P. M. Kintner, E. R. de Paula, and I. J. Kantor, “Global Positioning System measurements of the ionospheric zonal apparent velocity at Cachoeira Paulista in Brazil”, J. Geophys. Res., 105, 5317-5327, 2000.
- [7] E. R. de Paula, et al., “.Ionospheric irregularity zonal velocities over Cachoeira Paulista”, J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, August, 2002.
- [8] P. M. Kintner, et al., “.Size, shape, orientation, speed, and duration of GPS equatorial anomaly scintillations”, Radio Science, Vol. 39, RS2012, 2004.
- [9] A. J. Van Dierendonck and Q. Hua, “.Measuring Ionospheric Scintillation Effects from GPS Signals”, Proceedings of ION 57th Annual Meeting, Albuquerque, NM, U.S.A., pp. 391-396, June, 2001.