

18. 日本における GBAS の電離層モニタ方式に関する検討

通信・航法・監視領域 ※吉原 貴之、齋藤 享、藤井 直樹、
工藤 正博、福島 荘之介、齋藤 真二

1. はじめに

GBAS はディファレンシャル GPS 技術を基礎として、空港面内に設置した GPS 基準局で擬似距離の補正情報とそこに含まれる受信機ノイズ、電離層、対流圏などの残留誤差情報を生成し、航空機側に VHF 帯で送信する。航空機側ではこれらの補正情報を用いて測位計算を行うとともに、各残留誤差情報から保護レベル(Protection Level:PL)を計算して最終的な測位解の信頼性をリアルタイムで評価している[1, 2]。

GBAS における電離層の影響は地上基準局と航空機側で受信した擬似距離データにほぼ等しく含まれていることから、その大部分を補正可能である。しかし、電離層遅延に局所的な空間勾配（以下、電離層勾配）があった場合に、後述の擬似距離の平滑処理によって GBAS の測位結果に深刻な影響をもたらすようなレンジ誤差を生じることが指摘され[3]、GBAS の安全性に関わるインテグリティ（完全性）に対する脅威となることが報告されている[4]。

本研究では GBAS プロトタイプ開発において検討を進めている GBAS (CAT-I) について日本の電離層環境下での電離層脅威について整理し、その軽減手法の開発を目的としている。

2. GBAS の安全性と電離層リスク

2.1 電離層リスク

GBAS では基準局側、航空機側双方の擬似距離に含まれるマルチパス誤差の影響を低減するため、「キャリア・スムージング」と呼ばれる擬似距離の搬送波による平滑処理（時定数：100 秒）を行っている。このとき、①C/A コードによる擬似距離と搬送波に含まれる電離層遅延量は、その大きさが同じで極性が異なっており、②100 秒前までの搬送波に含まれる電離層遅延量が平滑化された擬似距離に影響する。そのため、図 1 に示すように航空機が GBAS 基準局か

ら数 10km 離れた地点から着陸コースに進入し、CAT-I のデシジョンハイト (DH) である高度 60m の地点に到達するまでの間に電離層勾配があった場合には、その領域を通過する GPS 衛星についてこの影響を受ける。

電離層勾配は通常、水平方向に 1km あたりの電離層遅延変化率で表し、通常は小さな値となるために単位は mm/km で表記することが多い。この電離層勾配 dl/dx が与える衛星視線(スラント)方向に沿ったレンジ誤差の最大値 δI の目安は電離層遅延に時間変化がなく、GPS 衛星の動きを無視すると式 (1) のように表現される。

$$\delta I \cong \frac{dl}{dx}(x + 2\tau v) \quad (1)$$

ここで GBAS 基準局と航空機の離隔距離を x とする。米国では電離層勾配の最大値を 0.425m/km、GBAS 基準局から DH までの離隔距離の最大値を 6km と設定して安全性の設計を行っているが、スムージング時定数 τ が 100 秒、航空機速度 v を 0.070km/s とするとレンジ誤差の最大値はおおよそ 8.5m と算出される[5]。これは DH における GBAS CAT-I の垂直警報限界 (Vertical Alert Limit ; VAL) である 10m と比較しても無視できない大きさとなる。

このように航空機の進入方向に沿って電離層

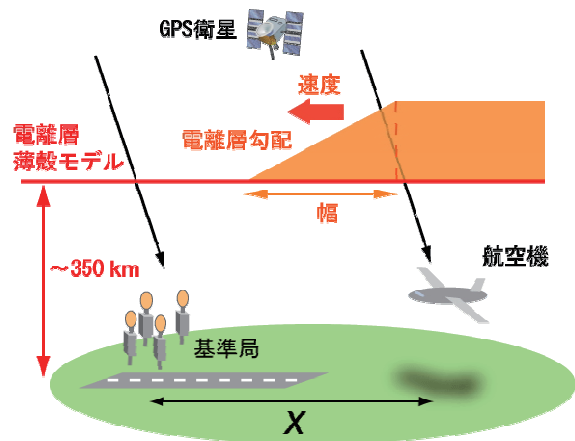


図 1. GBAS と電離層遅延空間勾配

勾配があった場合には、その影響を受ける GPS 衛星信号についてレンジ誤差が生じることとなり、受信可能な GPS 衛星個数の減少などの悪条件が重なると最終的な測位解がさらに劣化する。結果として、垂直保護レベル（Vertical Protection Level ; VPL）が 10m 以下であるにもかかわらず、垂直誤差が DH における垂直警報限界 10m を超えるという危険な状態となり得ることが示されている[4]。なお、ここでは電離層勾配異常のモデル化については、図 1 の様に電離層勾配のほか、幅、および移動速度の 3 つのパラメータで表現される後述の電離層フロントの検討が行われている。

2.2 リスク評価と軽減策

保護レベルが警報限界内にある状態で、電離層勾配による測位誤差が警報限界を超えることはインテグリティに対するリスクとなる。GBAS のリスクとしては他にも、GPS 衛星故障による信号歪、放送暦異常などが知られている。これらのリスク評価とその軽減を図った上で、インテグリティ要件（ $1-2 \times 10^{-7}$ ）をシステム全体で満たす必要がある。そのためには、リスク毎に残留リスクの割り当てを行い、システム全体で要件を満たすよう設計する必要がある、これは一般にリスクアロケーションと呼ばれる。

各々のリスクに関しては、その現象が発生する確率（事前確率）などを考慮して割り当てられた要件を満たすかどうか議論する。その結果、あるリスクに対して、そのままでは要件を満たさない場合には、リスクを軽減する必要が生じ、①GBAS 基準局側で異常検出機能を備えて補強情報の信頼性を高めるか、または②そのリスクを包含可能なように保護レベルの計算アルゴリズムを改良するなどの対策が必要となる。前者はモニタによるリスク軽減策であり、後者は一般的には通常の状態においても残留誤差情報を大きめに見積もる（誤差パラメータのインフレーション）ことでリスクを軽減する手法がとられる。

3. 米国における電離層脅威モデルとその軽減策

3.1 電離層脅威モデル

GBAS インテグリティに対する電離層勾配異常のリスク評価については、米国における検討

が先行している。そこでは、SED（Storm Enhanced Density）と呼ばれる地磁気擾乱に伴って発生する電離層擾乱によってもたらされる電離層フロントを想定し、米国における衛星型補強システムである WAAS（Wide Area Augmentation System）モニタ局や米国内に展開されている定点の GPS 観測ネットワークである IGS（International GNSS Service）/ CORS（Continuously Operating Reference Station）などで蓄積された GPS 観測データから電離層勾配の大きさ、スロープの幅、速度といった前述の 3 つのパラメータを抽出し、電離層脅威モデルを構築している[6]。

その結果、米国においては電離層勾配の考慮すべき最大値として高仰角および低仰角 GPS 衛星でそれぞれ、425mm/km および 375mm/km を採用した。これらはいずれも 2003 年 11 月 20 日に北アメリカ大陸で観測された SED の観測値が基になっている。また、フロント幅と速度の設定は 25-200km および 750m/s の範囲として、これら 3 つのパラメータの組み合わせから航空機側で起こりうる測位誤差をシミュレーション評価し、後述の軽減策なしにはインテグリティ要件を満たせないと結論づけた[5]。

3.2 モニタによる軽減手法

このような電離層脅威モデルのうち、GBAS 基準局で電離層遅延の急激な時間変化として電離層勾配異常を検出することが可能な場合が存在する。そのような場合には、GBAS 基準局で異常を検出した段階でその影響を受けている GPS 衛星の補強情報の放送を中止するなど有効な対処が可能となる。この急激な時間変化の検出手法としては、電離層遅延の影響がコード擬似距離と搬送波位相で同程度の大きさで極性が逆であることを利用したコード擬似距離から搬送波位相による擬似距離を差し引く Code-Carrier Divergence (CCD) という手法が用いられ、これは CCD モニタと呼ばれる[7]。

電離層遅延の時間変化は、GPS 衛星の動きを無視すれば電離層勾配×フロント速度と考えることができ、急激な時間変化が生じる場合ほど CCD モニタによる検出が容易となる。また、航空機側で警報限界を超えるような測位誤差が生

じる前に CCD モニタで電離層勾配異常を検出する場合にリスクの軽減が図られる。すなわち、電離層フロント速度が、航空機の進入速度と同方向で速い場合に航空機が DH に到達する前に検出可能な電離層フロントや、進入方向の逆側から GBAS 基準局に先に到達する電離層フロントに有効である。

3.3 最悪ケース

しかしながら、電離層フロントが基準局に到達せずに異常を検出できず、航空機側のみが電離層勾配異常の影響を受ける場合には、警報限界を超える大きな測位誤差がもたらされる場合がある[4]。これは電離層フロントが地上に対してはほぼ静止している場合に相当し、最悪ケースと呼ばれる。

電離層フロント速度と GBAS 基準局による検出を議論する際には、厳密には GPS 衛星の動きを考慮する必要がある。具体的には電離層フロントが高度 350km 程度の薄殻モデル上に存在することを仮定しているため、GBAS 基準局で受信した GPS 衛星電波の幾何学的な伝搬経路がそれを貫く点（電離層ピアスポイント；IPP）の速度と電離層フロント速度の相対速度が重要となる。したがって、前述の電離層フロントが静止している状態とは、電離層フロント速度と GBAS 基準局の IPP 速度が一致し、両者が相対的に静止している、つまり同期している場合に相当する。ここで、注意しなければならないのは、レンジ誤差をもたらす電離層勾配は、航空機の進入方向成分のみが問題となるのでこれらの速度の同期は滑走路方向成分で考える必要がある[8]。

3.4 ジオメトリ・スクリーニング

GBAS 基準局では電離層勾配異常を検出できないこのような場合には、誤差の統計的特性から残留誤差情報をインフレートしてインテグリティを保証する手法がよくとられるが、電離層脅威モデルで想定する電離層勾配の異常値があまりにも大きすぎるため、実際にはジオメトリ・スクリーニング（Geometry Screening）による残留誤差情報のインフレートが行われる。これは、常に航空機側に GBAS 基準局では検出

できない電離層勾配異常が存在することを前提として、測位演算において許容されない測位誤差をもたらす可能性のある GPS 衛星の組み合わせを地上側で抽出し、航空機側でそのような GPS 衛星の組み合わせで測位演算を行った場合には、保護レベルが警報限界を超えてその結果を使用できないように残留誤差情報をインフレートする手法である。その際、電離層フロントに同期する GPS 衛星個数を 2 個として電離層勾配の異常値を与え、さらに測位演算に使用できる GPS 衛星数を 2 個減少させて上述の測位解の信頼性が低い GPS 衛星の組み合わせを探索する[7,8]。

4 日本の電離層脅威モデルと軽減策の検討

4.1 電離層脅威モデルと最悪ケース

日本においては、このような SED による電離層勾配を考慮する必要があることに加え、米国に比べて低磁気緯度に位置しているために、プラズマバブルによる電離層勾配にも着目する必要がある。SED に関しては、現在までのところ日本では数例しか確認されておらず、また、米国のような数 100mm/km を超えるような電離層勾配異常の報告はない[9, 10]。このような電離層勾配異常の再調査をする一方、米国における電離層脅威モデルをそのまま導入してよいかどうかの検討をする必要がある。

また、プラズマバブルに関しては電離層勾配の最大値を把握するとともに、受信点上空に複数存在した場合も検討する必要がある。その際、GPS 衛星信号に対する影響として、電離層勾配異常とともに激しいシンチレーションによる受信瞬断の影響も考えられるため、南北に長い帯状のプラズマバブルの領域を通過する GPS 衛星についてこれら 2 つの効果をどのような配分で電離層脅威モデルへ取り込み、最悪ケースの探索を行うかを検討する必要がある。

4.2 軽減手法の開発

電離層勾配異常のモニタ方式については、米国で検討された時間変化を検出する CCD モニタに加えて、滑走路方向の空間的な電離層勾配異常を検出するための GBAS 基準局とは別に GPS 受信局を設置するフィールドモニタと呼

ばれる手法も考えられる。これらのモニタ手法の検討においては、異常を検出できない確率（未検出確率）や通常状態を誤って異常と検出する確率（誤警報確率）などの検出性能を評価した上で日本における電離層脅威モデルのうち、検出できる場合を切り分け、検出できない事象へのさらなる軽減手法である統計的およびジオメトリ・スクリーニングの両視点から誤差パラメータのインフレーションを検討する必要がある。

例えば、プラズマバブルのジオメトリ・スクリーニングに関しては、その構造が南北に長い帯状であることや、主に東側に移動することなどの特性を利用すれば、プラズマバブルの移動に同期しそうなGPS衛星を抽出して、それらだけに異常値を与えて航空機側の測位結果を評価するなどの工夫が考えられる。図2はGPS衛星のIPP速度の東向き成分の計算例を示しているが、プラズマバブルの典型的な伝搬速度である100m/s前後（赤色；90～110m/s）を中心とした橙色の領域（50～150m/s）にあるGPS衛星がプラズマバブルと同期する可能性があるといえる。異常値を与えるGPS衛星をある程度絞り込むことで、アベイラビリティ（有効性）の向上と計算量の削減が期待できる。

5. まとめ

GBASの電離層モニタ方式に関して、米国における電離層脅威モデルと軽減策を整理し、日本においては低緯度におけるプラズマバブルを考慮した脅威モデルの構築と軽減手法の開発が必要であることが明らかとなった。これらを踏まえ、日本におけるSEDなど1つの電離層フロントが存在する場合、およびプラズマバブルのような複数の電離層フロントが存在する場合にインテグリティ要件を満足するために必要な①電離層異常を検出するモニタ手法、②モニタで検出できない場合のさらなるリスク軽減手法について検討しているところである。なお、最終的にはそれら手法を用いてインテグリティを保証した場合のシステムの有効性（アベイラビリティ）の見通しも重要な課題となっている。

参考文献

[1] ICAO SARPs, ANNEX 10, 2006.

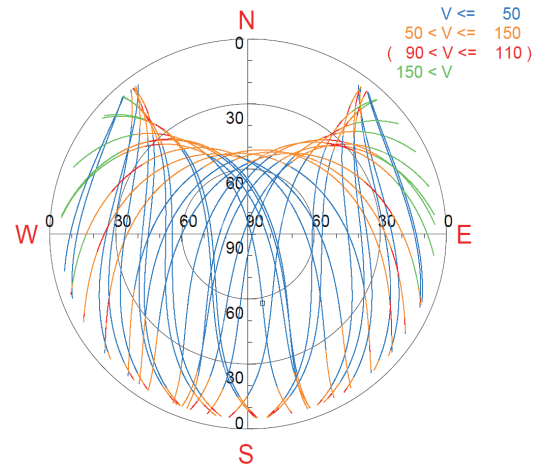


図2. 沖縄地方の東向きGPS衛星のIPP速度例

[2] RTCA SC-159, RTCA/DO-246C, 2005.

[3] J. Christie et al.: “Analytical and Experimental Observations of Ionospheric and Tropospheric Decorrelation Effect for Differential Satellite Navigation during Precision Approach”, proc. of ION GPS-98, pp 739-747, 1998.

[4] M. Luo et al.: “Ionospheric Spatial Gradient Threat for LAAS: Mitigation and Tolerable Threat Space”, ION NTM 2005.

[5] S. Pullen et al.: “The Impact and Mitigation of Ionosphere Anomalies on Ground-Based Augmentation of GNSS”, the 12th International Ionospheric Effects Symposium, 2008.

[6] A. Ene et al.: “A Comprehensive Ionospheric Storm Data Analysis Method to Support LAAS Threat Model Development”, ION NTM 2005, 2005.

[7] S. Ramakrishnan et al.: “Targeted Ephemeris Decorrelation Parameter Inflation for Improved LAAS Availability during Severe Ionosphere Anomalies”, ION NTM 2008.

[8] J. Lee et al.: “Position-Domain Geometry Screening to Maximize LAAS Availability in the Presence of Ionosphere Anomalies”, ION GNSS 2006

[9] H. Konno et al.: “Analysis of Ionosphere Gradient Using Japan GEONET Data”, ION NTM 2005.

[10] 吉原ほか: “局所的な電離層遅延空間勾配のGBASへの影響について”, 信学技報, 2005.