

2. MC/MF GBAS 実験用装置の開発

航法システム領域 ※齋藤 享、吉原 貴之

1 まえがき

GBAS (Ground-Based Augmentation System) は、GNSS (Global Navigation Satellite System) を用い、空港内に設けた地上装置を利用して高精度測位を可能とする補正情報や、GNSS 信号に異常があった場合に警報を発する等の補強情報を生成し、VHF データ放送(VDB)を用いて空港周辺の航空機に対して補強メッセージを放送し精密進入・着陸を実現するシステムである。

ICAO (International Civil Aviation Organization) では、これまでに GPS/GLONASS の L1 信号 (1.57542 GHz) を用いてカテゴリ-I 精密進入を実現する GBAS (GAST-C)、及びカテゴリ-III 精密進入・着陸を実現する GBAS (GAST-D) の標準化が完了した [1]。これに対応し、RTCA では GBAS 機上装置とのインターフェース定義 [2]、最小性能基準 [3] が GAST-C/D に対応するように改められている。

近年、GPS、GLONASS に加え、Galileo、Beidou が GNSS として整備されてきており、また GPS、GLONASS を含め、L1 信号に加えて L5 信号 (1.17645 GHz) ほか複数の新信号の提供が進んでいる。このような複数衛星系 (Multi-Constellation)、複数周波数 (Multi-Frequency) が利用な状況を、MC/MF GNSS 環境と呼ぶ。これらを民間航空航法に利用するための国際標準の策定が ICAO において進められており、近い将来に 4 衛星系の 2 周波信号が民間航空航法において利用可能となる見込みである。

これまでの 1 周波 GNSS 信号を用いた衛星後方においては、電離圏による遅延が大きな誤差要因であり、GBAS においても基準局と航空機との電離圏遅延量の空間的な違いによる潜在誤差への対策が容易ではない。特に日本を含む電離圏変動が大きい磁気低緯度地域では、電離圏擾乱に伴う電離圏の空間・時間変動が GBAS のアベイラビリティを制限する大きな要因となってきた。これに対し、これまでの L1 信号に加え L5 信号を利用することにより、電離圏

遅延量が信号の周波数に依存する性質を用いて、電離圏遅延に起因する誤差を解消し、全世界でカテゴリ-III GBAS が高いアベイラビリティを持って利用可能となると期待されている。

また、電離圏プラズマの不規則構造に伴う GNSS 信号の強度・位相の不規則変動 (シンチレーション) による測距精度の劣化、衛星追尾外れによる使用可能衛星数の減少が、電離圏に起因するもう一つの大きな障害である。これに対し、複数の衛星系を用いることにより、使用可能な衛星数が大幅に増加し、シンチレーションの影響を受けない衛星を十分確保することが可能になると期待されている。

加えて、1 つの衛星系に障害が発生した場合においても、他の衛星系を用いることにより、航法サービスを継続することが可能であり、耐障害性の観点からも複数衛星系の使用は有効であると考えられている。

ICAO では、GAST-D の次のステップとして、MC/MF GNSS 環境に対応した GBAS の標準化が始まる場所である。これに先立ち、欧州では SESAR において MC/MF GBAS のコンセプト・補強方式の比較検討を行う研究が行われており、補強方式の候補の提案、VDB メッセージフォーマットの提案などが行われている [4-7]。

電子航法研究所では 2016 年度より、日本を含む磁気低緯度地域に適した MC/MF GBAS のコンセプト・補強方式の開発を目標として、地上・機上実験装置の開発を行ってきた。本研究では、MC/MF GBAS 地上・機上実験装置の開発状況と、今後の実験計画及び ICAO 等における国際標準化への反映計画について述べる。

2 MC/MF GBAS 補強方式

本研究では、GBAS 補強方式として、以下の 3 つの方式を検討する。

1. 電離圏フリー線形結合
2. 1 周波測位・2 周波電離圏モニタ

3. ダイバージェンスフリー線形結合

このうち、1 及び 2 は SESAR においても検討が進められているものである。

2.1 2周波電離圏フリー方式

電離圏遅延量が周波数の2乗に反比例する性質を利用し、同一の衛星が放送する L1 及び L5 の2つの周波数の信号を用いて、電離圏遅延誤差を消去することができる。式(1), (2)はコード擬似距離及び搬送波位相の電離圏フリー(IF)線形結合を表し、さらにこれらを用いて、IF 搬送波位相によって平滑化した IF コード擬似距離($\tilde{\rho}_{IF}$)を得る(式(4))。

$$\rho_{IF} = (1 + \alpha)\rho_1 - \alpha\rho_5 \quad (1)$$

$$\phi_{IF} = (1 + \alpha)\phi_1 - \alpha\phi_5 \quad (2)$$

$$\alpha = 1/((f_1/f_5)^2 - 1) \quad (3)$$

$$\tilde{\rho}_{IF,j} = k\rho_{IF,j} + (1 - k)(\tilde{\rho}_{IF,j-1} + \phi_{IF,j} - \phi_{IF,j-1}) \quad (4)$$

$$k = 1/\tau \quad (5)$$

ここで、 ρ_1, ρ_5 は L1 及び L5 信号のコード擬似距離測定値、 ϕ_1, ϕ_5 は L1 及び L5 信号の搬送波位相測定値、 f_1, f_5 は L1 及び L5 信号の周波数である。式(4)において、添え字 j は j 番目のサンプルを表し、式(5)において τ はサンプリング間隔を示す。

IF 線形結合を用いることにより、電離圏遅延は原理的に消去される。一方で、2つのコード擬似距離を結合させることにより、測定雑音が増加する。L1 及び L5 周波数でコード雑音と同じであるとすると、L1 単周波のコード雑音に比べて 2.58 倍増加する。これは、電離圏擾乱時に対応できる一方で、大半を占める電離圏静穏時に雑音が大幅に増加することを意味しており、慎重なトレードオフが必要となる。

2.2 1周波測位・2周波電離圏モニタ方式

IF 線形結合を用いた場合の雑音の増加を避けつつ、2周波を用いることにより得られる電離圏遅延情報を利用するため、測位には L1 信号のみを用い、電離圏の異常の有無の判定のためのモニタ処理のためだけに L1 及び L5 信号を用いる方式が提案されている。この時、平滑

化されたコード擬似距離は、これまでの1周波 GBAS と同様であり、以下のように表される。

$$\tilde{\rho}_{1,j} = k\rho_{1,j} + (1 - k)(\tilde{\rho}_{1,j-1} + \phi_{1,j} - \phi_{1,j-1}) \quad (6)$$

この時、電離圏遅延量の空間変動に伴う GBAS 補正誤差に加え、平滑化されたコード擬似距離には、電離圏遅延がコード擬似距離と搬送波位相において符号が逆であることに起因する、コード・キャリア・ダイバージェンス(CCD)による誤差が蓄積する。従って2周波信号を用いた電離圏モニタ処理により、電離圏勾配と CCD による誤差蓄積が許容範囲を超えないように保護する必要がある。

2.3 2周波ダイバージェンスフリー方式

2周波の結合によるコード雑音の増加を抑えつつ、CCD の影響を排除する方式が、ダイバージェンスフリー(DF)線形結合である。平滑化された DF コード擬似距離は式(7)で与えられる。平滑化に用いるコード擬似距離は L1 信号のもののみである一方、式(8)で与えられる DF 搬送波位相を用いる。

$$\tilde{\rho}_{DF,j} = k\rho_{1,j} + (1 - k)(\tilde{\rho}_{DF,j-1} + \phi_{DF,j} - \phi_{DF,j-1}) \quad (7)$$

$$\phi_{DF} = \phi_1 + 2\alpha(\phi_1 - \phi_5) \quad (8)$$

搬送波位相の雑音はコード雑音に比べて極めて小さいので、コード雑音は L1 単周波相当でありつつ、電離圏遅延誤差において一般的に支配的な CCD による誤差蓄積を防ぐことができる。

DF 方式の欠点としては、CCD によらない各瞬間の電離圏空間勾配に伴う電離圏遅延誤差の監視が必要であることが挙げられる。加えて、IF 方式と1周波測位・2周波モニタ方式が、いずれも L5 信号の単純な擬似距離補正值の追加で実現でき、追加される補正值の汎用性が高いのに比べ、DF 方式では、地上装置が DF 専用の擬似距離補正值を生成する必要があり、VDB の伝送帯域の有効活用という面で不利である点が挙げられる。

SESAR ではこれらの不利な点を考慮して検

討から外しているが、電離圏異常の発生頻度が高い磁気低緯度地域を考慮すると、IF方式と1周波測位・2周波モニタ方式の利点を併せ持つDF方式は依然として検討の価値があると判断し、本研究の対象とした。

表 1. 対象とする衛星系・信号

衛星系	第1周波数	第2周波数
GPS	L1 C/A	L5
GLONASS	L1 C/A	L2
Galileo	E1	E5a
SBAS	L1 C/A	-
QZSS	L1 C/A	L5

3 MC/MF GBAS 実験装置

本研究では、実験用 MC/MF GBAS の地上装置及び機上装置の双方を開発する。まず、一般的な信号品質モニタ以外のインテグリティモニタを装備しないディファレンシャル GNSS システムとして開発し、接続実験を通して GBAS 補強方式の性能比較を行う。並行して必要となるインテグリティモニタを開発する。

本研究では、表 1 に示す衛星系及び信号を検討の対象とする。GPS L1 C/A, L5, Galileo E1, E5a の組み合わせを基本としつつ、GLONASS にも対応する。GLONASS については L5 周波数の信号が現状放送されていないため、代替として L2 信号を用いる。加えて、SBAS 衛星によるレンジング及び準天頂衛星(QZSS)を補完的に使用する。QZSS は航空用途の使用のため

の国際標準化が行われていないが、L5 信号を放送する GPS 衛星の数が十分でないため、GPS を補完するものとして実験的に使用する。

MC/MF GBAS 実験装置による実験は、仙台空港及び新石垣空港において実施が予定されており、それぞれ一部異なるハードウェア構成で実施される。

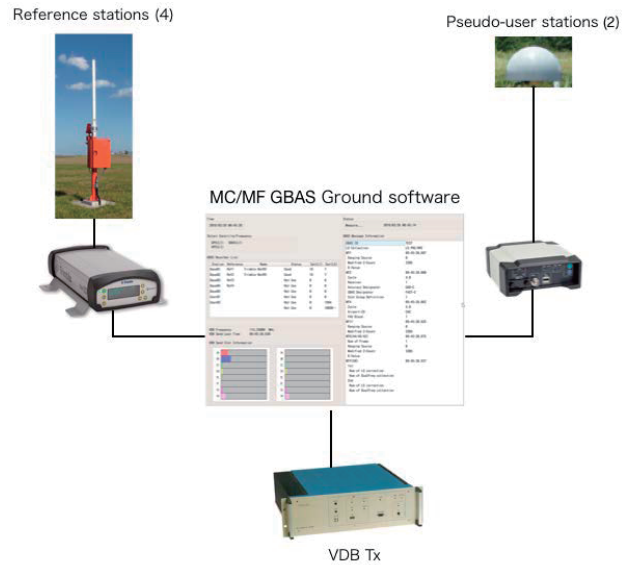


図 1. MC/MF GBAS 地上実験装置

3.1 MC/MF GBAS 地上実験装置

GBAS 地上装置のハードウェアは、GBAS 地上基準局受信機・アンテナ 4 式、GBAS 擬似ユーザ受信機・アンテナ 2 式、計算機、及び VDB 送信機・アンテナから構成される。

MC/MF GBAS 地上ソフトウェアは、基準局受信機の制御・データ収集を行い、データを処理し GBAS 補強メッセージを生成し、送信す

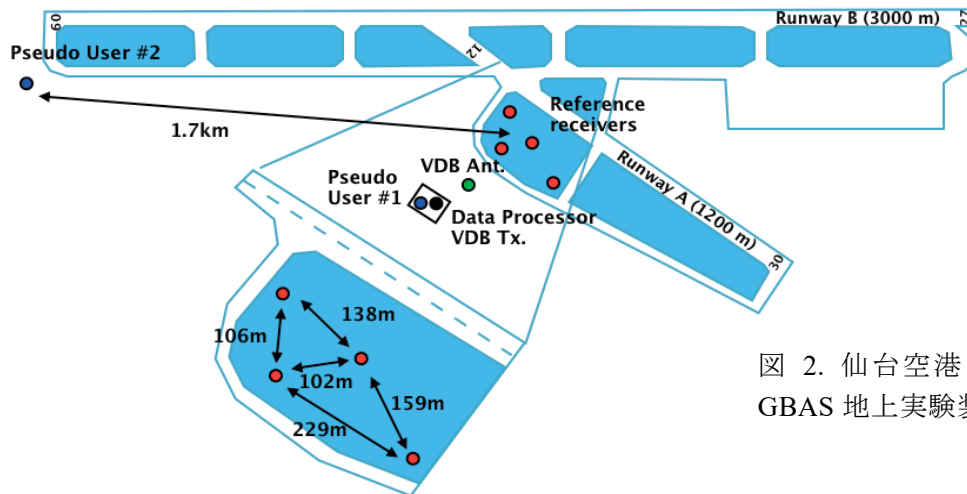


図 2. 仙台空港における MC/MF GBAS 地上実験装置の機器配置

べきメッセージを VDB 送信機へ送付する。同時に擬似ユーザ受信機の制御・データ収集を実施する。

GBAS 地上実験装置の概念を図 1 に示す。また、ハードウェア構成を表 2 に示す。

MC/MF GBAS 地上実験装置は、第 2 節に示した 3 つの補強方式に対応した GBAS 補強メッセージを生成し、VDB により送信する。GAST-C/D をサポートするためのメッセージ（タイプ 1, 2, 3, 4, 及び 11）に加え、選択により L5 コード擬似距離補正值、IF コード擬似距離補正值、DF コード擬似距離補正值のいずれかを含むメッセージを生成し放送する。また、限られた VDB データ帯域内で多数の衛星を補強するため、使用可能性を示すメッセージも別途生成する。これらのフォーマットは、SESTAR において提案されているものを用いる。なお、GBAS メッセージとしての全体の形式はこれまで通りであり、メッセージデータの中身が異なるだけであるので、後方互換性は確保されている。

MC/MF GBAS 地上実験装置は現在仙台空港において初期動作試験とデータ収集を行っている。仙台空港における実験装置の機器配置を図 2 に示す。4 台の基準局アンテナ及び 1 台の擬似ユーザアンテナ(#2)は空港内に、もう 1 台の擬似ユーザアンテナ(#1)は電子航法研究所岩沼分室に設置されており、電子航法研究所岩沼分室内に設置されたそれぞれ対応する受信機に接続されている。計算機及び VDB 送信機・アン

テナは電子航法研究所岩沼分室内に設置されている

表 2. GBAS 地上実験装置ハードウェア

機器	仙台空港	新石垣空港
基準局受信機	Trimble NetR9	
基準局アンテナ	ARL-1900	JAVAD G3T
擬似ユーザ受信機	NovAtel ProPak-6	
擬似ユーザアンテナ	Trimble Choke-ring	
VDB 送信機	Telerad EM9009(A)	
VDB アンテナ	3 素子 Alford Loop	3 素子折返し ダイポール

3.2 MC/MF GBAS 機上実験装置

MC/MF GBAS 機上実験装置は、電子航法研究所における GAST-D 機上実験装置 [8]を元に開発された。

ハードウェアは、GNSS 受信機・アンテナ、VDB 受信機・アンテナ、スペクトラムアナライザ、及び計算機からなる。表 3 及び図 3 に主な GBAS 機上実験装置構成機器を示す。

MC/MF GBAS 地上実験装置は、送信される GBAS 補強メッセージを受信し、その内容と選択した補強方式から決まる方式で測位を行い、その結果を出力する（図 4）。

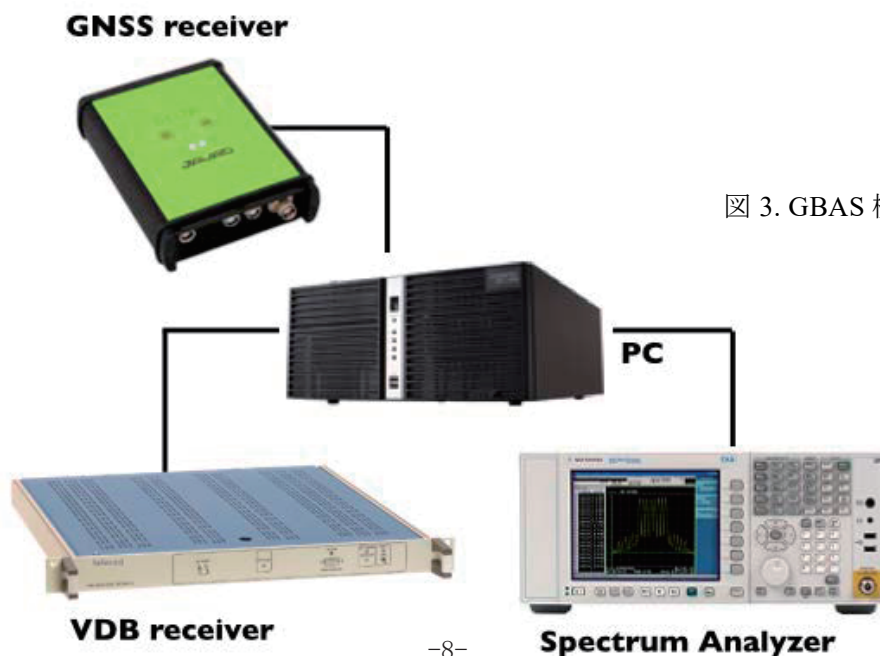


図 3. GBAS 機上実験装置

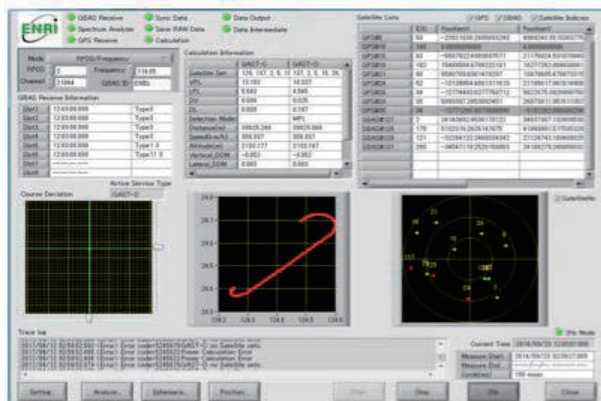


図 4. GBAS 機上実験ソフトウェア

表 3. GBAS 機上実験装置ハードウェア

GNSS 受信機	JAVAD Delta G3T
VDB 受信機	Telerad RE9009(A)
スペクトラムアナライザ	Agilent 9010A
GNSS アンテナ（実験用航空機搭載時）	AeroAntenna AT1675-381
VDB アンテナ（実験用航空機搭載時）	Comant CI 120-200 G/S-L

ディモニタの一つとして、新しい信号の歪みを検出するアルゴリズムの開発を行っている。衛星から放送される信号は必ずしも理想的な波形をしてはならず、衛星の故障により信号が歪み、大きな測距誤差を生じることがある。信号歪みモニタはこれまでに GPS L1 C/A 信号について多くの研究がなされてきているが、信号の性質は衛星のハードウェア、変調方式によって異なるため、新信号の特性に合わせた信号歪みモニタアルゴリズムが必要となる。

電子航法研究所では、デジタル受信機・ソフトウェア受信機技術に基づいた変調波形解析装置を開発し、新信号の波形特性を調べ、新信号に対応した信号歪みモニタの基礎開発を行っている。

3.4 実験計画と今後の展望

図 5 に、これまでの開発状況と今後の実験計画を示す。

2018 年 3 月までに、MC/MF GBAS 地上実験装置が仙台空港に設置され、試験とデータの連

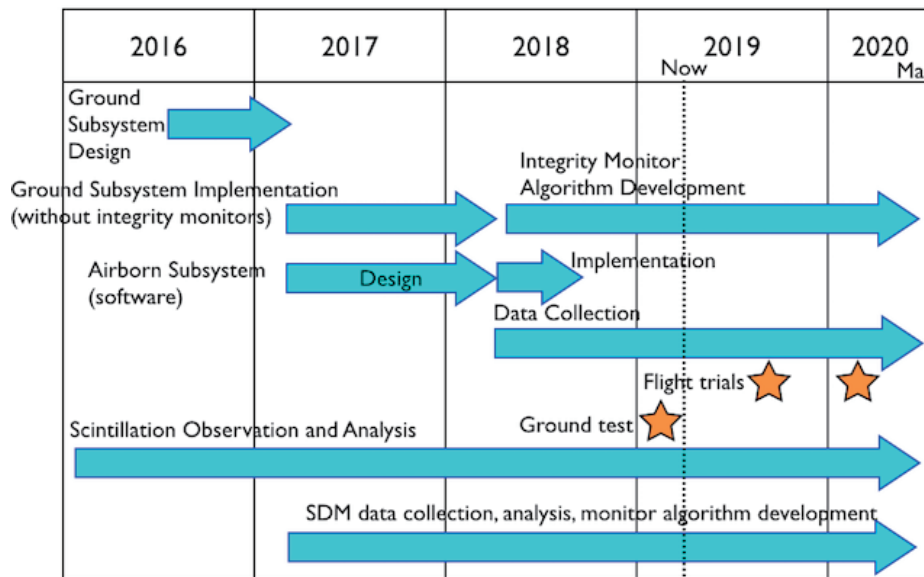


図 5. MC/MF GBAS 実験装置の開発状況と実験計画

3.3 インテグリティモニタ開発

GBAS 測位機能に加え、それぞれの補強方式、Galileo などの新しい衛星系、L5 などの新しい信号に対応したインテグリティモニタの開発が必要である。

新しい衛星系、信号に対応したインテグ

続収集を行っている。MC/MF GBAS 機上装置は 2019 年 3 月までに開発を行い、仙台空港において第 1 回の車両による地上走行実験を実施した。実験データは現在解析中である。

MC/MF GBAS 地上実験装置は、仙台空港におけるさらなる動作試験とデータ収集を行った

後、より電離圏擾乱が発生しやすい新石垣空港に移設される予定である。新石垣空港には GAST-D 地上実験装置が設置されており、その一部を利用する形で実験を実施する。2019年9月と2020年3月の2回にわたり、飛行実験を含む地上・機上装置の接続実験を実施する予定である。

これらの結果を用い、日本を含む磁気低緯度の電離圏環境に適した方式という観点から補強方式の評価を行い、ICAOなどの国際標準策定に反映させていく予定である。

4 まとめ

本研究では、次世代の MC/MF GBAS の国際的な検討状況を踏まえ、CAT-III 進入・着陸を十分高いアベイラビリティと耐障害性をもって実現するための技術検討を行っている。技術検討の大きな焦点は、MC/MF GBAS のコンセプトの確立と補強方式の選定であり、先行する欧州の結果も参考にしつつ、日本が位置する磁気低緯度地域における性能の最大化を目標とした研究開発を行っている。

これまでに、MC/MF GBAS 地上・機上実験装置の開発を行い、仙台空港においてデータ収集を開始するとともに、第1回の地上走行実験を実施した。今後、さらなる動作試験とデータ収集を行った後、新石垣空港に移設し、より活発な電離圏環境下で飛行実験を含む実験を実施する予定である。

これらを元に、今後活発化する MC/MF GBAS 国際標準策定において大きな貢献を行うとともに、成果を最大限反映させることを目標として研究開発活動を行っていく方針である。

参考文献

[1] International Civil Aviation Organization, Annex 10 to the Convention on International

Civil Aviation, Volume I, Radio Navigation Aids, Seventh edition, Applicable: 8 November 2018.

- [2] RTCA DO-246E, “GNSS-Based Precision Approach Local Area Augmentation System (LAAS) Signal- in-Space Interface Control Document (ICD),” July 13, 2017.
- [3] RTCA DO-253D, “Minimum Operational Performance Standards for GPS Local Area Augmentation System Airborne Equipment,” July 13, 2017.
- [4] Stanisak, M., Lipp, A., and Feuerle, T., Possible VDB Formatting for Multi-Constellation / Multi-Frequency GBAS Services, Proc. ION GNSS+ 2015, 1507-1518, 2015.
- [5] T. Feuerle, M. Stanisak, S. Saito, T. Yoshihara, and A. Lipp. “GBAS Interoperability Trials and Multi-Constellation/Multi-Frequency Ground Mockup Evaluation.” In: Proceedings of the 6th SESAR Innovation Days. 2016.
- [6] T. Feuerle, M. Stanisak, S. Saito, T. Yoshihara, and A. Lipp, “GBAS Interoperability and Multi-Constellation / Multi-Frequency Trials,” Air Traffic Management and Systems III, Springer, in press.
- [7] M. Felux, M.-S. Circiu, J. Lee, and F. Holzapfel, “Ionospheric Gradient Threat Mitigation in Future Dual Frequency GBAS,” International J. Aerospace Engineering, Vol. 2017, 4326018, doi:10.1155/2017/4326018, 2017.
- [8] Saito, S., Yoshihara, T., Kezuka, A., Saitoh, S., Fukushima, S., and Otsuka, Y., GAST-D Flight Experiment Results with Disturbed and Quiet Ionospheric Conditions, Proc. ION GNSS+ 2015, 1494-1499., 2015