

3. 準天頂衛星システムによる SBAS サービス

航法システム領域 ※坂井 丈泰，北村 光教，麻生 貴広，星野尾 一明

1 まえがき

GPS に代表される衛星航法システムの性能を大陸規模の広い範囲にわたって向上させる広域補強システムとして、ICAO（国際民間航空機関）による標準規格 SBAS（satellite-based augmentation system：静止衛星型補強システム）がある。SBAS 規格の補強システムとしては、米国の WAAS，我が国の MSAS（MTSAT satellite-based augmentation system：運輸多目的衛星用航法補強システム），欧州の EGNOS，そしてインドの GAGAN が運用されており、ロシア・韓国・中国も整備を進めている。

現行の SBAS は単一の GNSS（具体的には GPS と GLONASS のいずれか）及び単一の周波数を補強対象としており、静止衛星から補強情報を伝送する。これに対して、近年は複数の GNSS 及び周波数に対応した DFMC（dual-frequency multi-constellation）SBAS が検討されており、ICAO において L5 SBAS としてベースライン規格が策定されたところである。

このベースライン規格の特徴の一つは、非静止衛星からの SBAS 信号の送信が許容されていることである。これにより、極域を中心に静止衛星の信号を受信しにくい状況を改善できるものと期待されている。SBAS 信号を送信可能な衛星としては、我が国の準天頂衛星も含まれる。

電子航法研究所では平成 29 年夏より準天頂衛星の L5 信号を使用して実証実験を開始し、最近初めて欧州において本信号の受信実験を実施した。本報告では、L5 SBAS ベースライン規格の準天頂衛星対応とあわせて、この受信実験の概要を述べる。

2 次世代 SBAS の概要

民間航空機が利用する衛星航法システムについては、ICAO SARPS（standards and recommended practices：標準及び勧告方式）として国際標準規格が定められている。2001 年の SARPS 改訂で GNSS が導入され、GPS 及び GLONASS

といったコアシステムとあわせて補強システムとして SBAS が規定された[1][2]。SBAS 対応受信機は、コアシステムの GNSS 衛星が送信している測距信号を受信・処理して距離を測定するとともに、SBAS 衛星が送信する補強信号から得られる情報を用いて、所要のインテグリティを満たす航法を行う。

現行の SARPS は、L1 周波数で信号を送信する一周波数対応の L1 SBAS を規定している。ユーザ受信機が受信するのは単一コアシステムの一周波数の信号で、電離圏伝搬遅延については SBAS が送信する補正情報により補正する。

これに対して、L5 周波数で送信される L5 SBAS の大きな特徴は、ユーザ受信機が各コアシステムについて二周波数の信号を受信することである。電離圏伝搬遅延は周波数の二乗に反比例する性質があるから、複数の周波数の測距信号を利用すれば電離圏伝搬遅延を除去できる。あわせて GPS 及び GLONASS 以外のコアシステム、すなわち Galileo 及び BeiDou にも対応し、多数の GNSS 衛星を併用できるように工夫されている。測距信号は二周波数を利用するが、補強情報は L5 信号のみにより送信されることに注意されたい。また、L1 SBAS と L5 SBAS は互いに独立して稼働する。

L5 SBAS のベースライン SARPS は 2018 年秋に策定され[3][4]、現在は 2020 年末の正式承認を目指して検証作業が進められている。

3 非静止衛星による SBAS

L5 SBAS ベースライン SARPS における RF 信号の仕様を、比較のために L1 SBAS の仕様とともに表 1 に示す。L1 SBAS との大きな違いとしては、変調速度が 10.23 Mcps とされとともに帯域幅が拡大され、FEC（forward error correction）に加えてマンチェスタ符号が採用されている。250 ビット長のメッセージの構造は基本的に L1 SBAS と同様であるが、メッセージ先頭のプリアンブルは 8 ビットから

4 ビットに短縮され、代わりにデータ領域は 216 ビットとなっている。

以下に、非静止衛星による SBAS 信号の送信を可能とするため調整した規定について述べる。

3.1 ドップラ周波数

まず必要なのはドップラ周波数範囲の拡大である。静止衛星は地上から見て相対的に静止していることからドップラ周波数が小さいが、非静止衛星ではユーザから見た視線方向速度がドップラ周波数となってあらわれる。準天頂衛星の場合はこれが最大で 2.2 kHz 程度になる。

ドップラ周波数については当初は±40 kHz 以内とされていた。これは人工衛星の必要条件である第一宇宙速度（約 7.9 km/s）をドップラ周波数に換算した値である。ところが、これは GPS 衛星について規定されている±5 kHz に対して大き過ぎ[2]、SBAS 信号の捕捉に時間がかかるため受信機メーカーからの反対があった。

このため、準天頂衛星以外も含むさまざまな軌道を想定して次項の受信電力との兼ね合いも含めて検討し、ドップラ周波数の範囲として±5 kHz を提案した[5][6]。これは GPS 衛星と同じ値であり受信機メーカーに受け入れられやすいと判断した。図 1 は提出資料の例で、離心率とドップラ周波数の関係を示す（ i は軌道傾斜角）。ICAO における議論の結果、非静止衛星についてはドップラ周波数の範囲を±7 kHz とすることで落ち着いた。

3.2 受信電力

次に、受信電力の変動について考慮する必要がある。仰角 5 度にて覆域が定義されているものとする、受信機-衛星間の距離の差異に起因する受信電力の変動幅は静止衛星の場合で 1.3 dB 程度であり、これは適切なアンテナパターンを設定することで抑えられる。

一方、非静止衛星の場合は受信機-衛星間の距離が変化するため受信電力の変動が大きい。SBAS 信号について規定されている最大及び最小電力の差は 7.5 dB であり、マージンも考慮すると、受信電力変動幅は静止衛星に対して +3 dB 程度までの増加にとどめたい。

準天頂衛星の場合（離心率 0.075）について受信電力の変動幅を計算すると表 2 の通り 2.8 dB 程度であり、静止衛星に対して約+1.4 dB と

なることを確認した。静止衛星に対して+3 dB

表 1 L5 SBAS の RF 仕様

項目	L5 SBAS	L1 SBAS
周波数	1176.45 MHz	1575.42 MHz
帯域幅	20~24 MHz	≥ 2.2 MHz
変調方式	BPSK	
変調速度	10.23 Mcps	1.023 Mcps
拡散符号	PRN 120~158	
符号速度	1 Ksps	500 sps
符号化	1/2 FEC+マン チェスタ符号	1/2 FEC
データ速度	250 bps	
メッセージ長	250 ビット	
プリアンブル	4 ビット 6 パターン	8 ビット 3 パターン
CRC 長	24 ビット	

まで許容するものとする離心率は 0.15 以下であればよく、将来的な準天頂衛星の軌道設計の自由度も確保できる[5][6]。

3.3 コード位相

SBAS 信号のコード位相の変動幅については、L1 SBAS では±1 μs 以内と定められている。ベントパイプ方式では専用の周波数標準が地上に設置されるため大きな問題はないが、準天頂衛星の場合は軌道上の周波数標準を他の測距サービスと共用することからこれは難しい。

一般に、非静止衛星から測距信号を送信する場合、地上局との通信リンクが常時あるわけではないことから周波数標準を軌道上に配置する。リアルタイムな制御はできず、コード位相の維持については周波数標準の性能に依存する。

GPS 及び準天頂衛星の航法メッセージでは、コード位相に相当するクロック補正值 a_0 の値域は±1 ms とされている。これを根拠として、非静止衛星に対応するためコード位相の変動幅を±1 ms 以内とすることを提案し[7]、ベースライン SARPS ではその通りとなっている。

4 プロトタイプによる実証実験

電子航法研究所では、L5 SBAS の標準規格策定作業にあわせてプロトタイプを開発した。現在のところ GPS・GLONASS・Galileo・

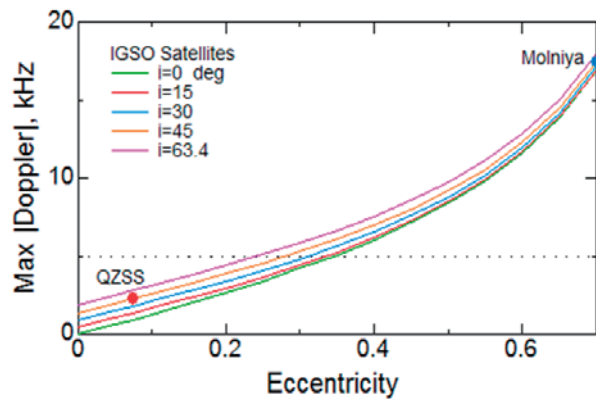


図1 離心率とドップラ周波数

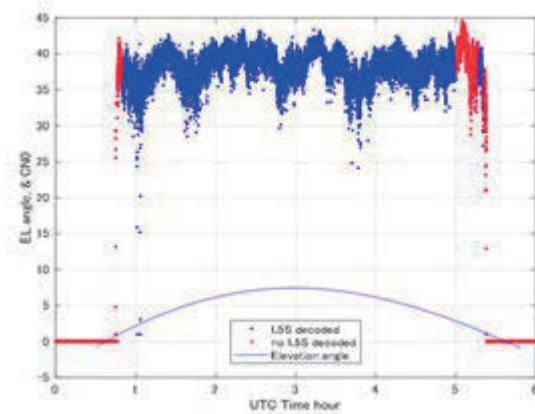


図4 プラハにおける L5S 信号の受信例

表2 離心率と最大受信電力差

離心率	電力差 [dB]	GEO に対する相対値	備考
0	1.324	0	
0.075	2.770	1.446	QZSS
0.1	3.258	1.934	
0.15	4.252	2.928	
0.2	5.273	3.949	
0.3	7.432	6.108	
0.4	9.832	8.508	
0.5	12.628	11.304	
0.6	16.129	14.805	
0.7	21.126	19.802	Molniya

QZSS に対応しており、L1/L5 あるいは L1/L2 の二周波数による SBAS 補強処理を行う。L1/L2 モードは、L5 信号を送信する GPS 衛星がまだ少ないことから研究用に用意した。

本プロトタイプを使用して、2017年8月より準天頂衛星 2~4 号機による実証実験を実施している。実証実験全体の構成は図2の通りで、国土地理院 GEONET から電子基準点データのリアルタイム配信を受け、これによりプロトタイプが生成した L5 SBAS メッセージを通信回線経由で QZSS 主局に送信し、これが準天頂衛星 L5S 信号により送信される。図3は実証実験実施中の画面例で、生成したメッセージそのもののほか、測位誤差やクロック・軌道補正值などが一目でわかるように表示されている。

本実証実験は2017年10月上旬より定常的に

実施している。得られた知見は ICAO における L5 SBAS ベースライン規格に反映されており、今後も検証活動に活用する予定である。

5 欧州における受信実験

欧州は EGNOS V3 として L5 SBAS の開発を進めているところで、日欧政府間の日欧宇宙政策対話でも当該分野における協力を取り決めている。この具体的な取組みの一環として、プラハの GSA (European GNSS Agency) 本部において初の準天頂衛星 L5S 受信実験を行った。

実施期間は2019年3月21~22日の2日間で、日本から JAVAD Alpha-G3T 及び古野電気 GW-11 両受信機を持ち込んだ。Alpha-G3T は3周波数の多数の GNSS 信号（ただし L5S は含まない）を受信する一方、GW-11 は L1 C/A に加えて L5S 信号を受信できる。

プラハにて受信した L5S 信号の C/N0 及び衛星の仰角を図4に示す。中欧では準天頂衛星の仰角はそれほど高くないが、現地時刻における夜間の4時間程度にわたり仰角が0~7度となり L5S 信号を受信できた。C/N0 は30~45 dB-Hz 程度で、送信したメッセージも正常にデコードされており、欧州において準天頂衛星の測距信号を受信できることを確認した。

6 むすび

ICAO にてベースライン規格が策定された L5 SBAS の特徴の一つは、我が国の準天頂衛星も含む非静止衛星から送信できることである。これにより、極域を中心に静止衛星の信号を受

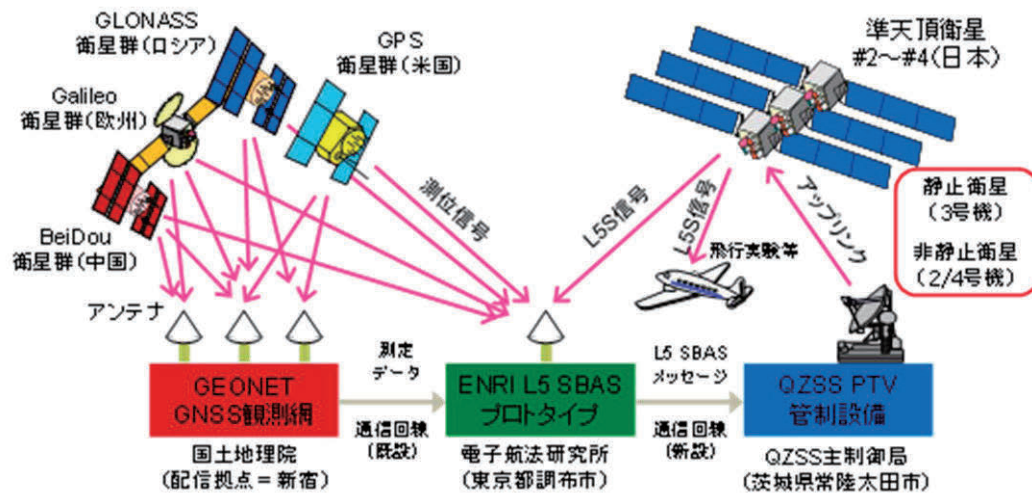


図2 実証実験の全体構成

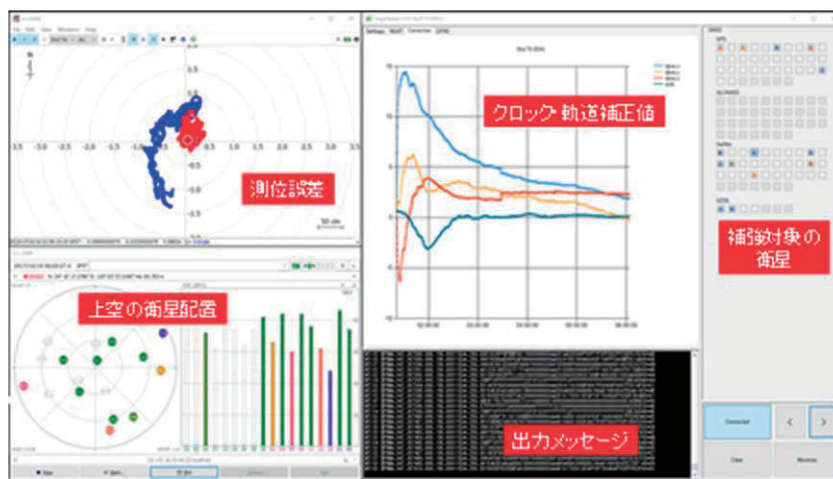


図3 実証実験中の画面例

信じにくい状況を改善できるものと期待されている。

電子航法研究所では準天頂衛星の L5S 信号を使用して L5 SBAS の実証実験を実施しており、最近では初めて欧州において本信号の受信実験を実施して正常に受信できることを確認した。引き続き、北欧地域における受信実験を行い、ICAO におけるベースライン規格の検証活動に貢献することとしたい。

参考文献

[1] Amendment 76 to Annex 10 Aeronautical Telecommunications, International Standards and Recommended Practices, ICAO, Nov. 2001.
 [2] Minimum Operational Performance Standards

for Airborne Equipment Using Global Positioning System/Wide Area Augmentation System, RTCA, DO-229, Jan. 16, 1996.
 [3] DFMC SBAS SARPS – PART A VERSION 2.1, ICAO NSP/5-WP/20, Nov. 2018.
 [4] DFMC SBAS SARPS – PART B VERSION 1.6, ICAO NSP/5-WP/22, Nov. 2018.
 [5] T. Sakai, “Doppler Range for Non-GEO SBAS Satellites,” ICAO NSP DS2SG, June 2018.
 [6] T. Sakai, “Requirements for SBAS IGSO,” EUROCAE WG-62, June 2018.
 [7] T. Sakai, “SBAS Ephemeris Clock Correction,” ICAO NSP DS2SG, Oct. 2017.