

11. 準天頂衛星 L1-SAIF 補強信号のレンジング機能

航法システム領域 ※坂井 丈泰・山田 英輝・伊藤 憲

1. はじめに

我が国で最初の実用向け衛星測位実証実験を行う準天頂衛星 (quasi-zenith satellite) QZS-1 は、2010年9月11日に宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 種子島宇宙センターから打ち上げられ、「みちびき」との愛称が付けられた。準天頂衛星を使用する衛星測位システムである準天頂衛星システム QZSS (quasi-zenith satellite system) の特長の一つはユーザに対する衛星の仰角を高くできることで、都市部や山間部における通信・測位に有効である。この性質を利用して広い範囲にわたるユーザに対して高仰角から補強信号を放送することで、アベイラビリティが高く、かつ測位精度及び信頼性にすぐれた測位システムの構築を目指している[1-3]。

QZSS が放送する測距信号のうち、サブメータ級の補強信号である L1-SAIF (submeter-class augmentation with integrity function) については、国土交通省の委託を受けて当所が研究開発を実施した。信号形式については ICAO (国際民間航空機関) による補強信号の国際標準規格 SBAS (satellite-based augmentation system: 静止衛星型衛星航法補強システム) をベースとして、GPS L1 信号と同一の周波数にて広域補強情報を放送する。

L1-SAIF 信号は補強情報の放送のみならず測距信号としても利用可能である (レンジング機能)。このことを実証するため、L1-SAIF 信号により測定した距離を用いて測位実験を行ったので、結果を報告する。

2. L1-SAIF 信号の概要

最初に、L1-SAIF 信号について概要を述べる。L1-SAIF 信号の詳細な仕様は、他の補完信号とともに IS-QZSS として規定されている[4]。

(1) 信号の構造

L1-SAIF 信号は GPS と同一の L1 周波数 (1575.42 MHz) にて準天頂衛星 QZS から放送されるもので、GPS と同じ C/A コードによ

る拡散変調方式が採用されている (変調速度も GPS と同じ 1.023 Mcps)。GPS L1 信号を利用する受信機は、同一のアンテナ及び受信回路で L1-SAIF 信号についても受信できる。拡散符号の PRN 番号は 183~192 が割り当てられており、QZS-1 は PRN 183 を使用している。符号化速度は GPS の 50 sps に対して 500 sps と高速化されており、符号化率 1/2 の畳込み符号 (FEC) が用いられているためデータ速度は 250 bps となる。すべての L1-SAIF メッセージは図1のとおり 250 ビットから構成されており、毎秒 1 メッセージが放送される。

(2) メッセージ内容

L1-SAIF メッセージには 0~63 のタイプが定義されており、それぞれのフォーマットに従って補正情報が収容される。タイプ 0~28, 62~63 は SBAS と同一の内容であり、ディファレンシャル補正情報は高速補正、長期補正、電離層遅延補正に分けられ、それぞれ衛星クロック (変化の速い成分)、衛星軌道及びクロック (変化が遅い成分)、電離層伝搬遅延の補正に用いる。タイプ 52~60 は L1-SAIF で追加してあるメッセージで、大気遅延補正の高精度化や QZS 自身の軌道情報の放送といった目的に用いる。

なお、IS-QZSS には、信号形式及びメッセージ内容の定義に加えて、ユーザ受信機側の処理アルゴリズムも記載されている[4]。これは補正情報の利用手順をあらかじめ詳細に定めることで補正情報の解釈に関する誤りを防止するため、GPS IS や SBAS SARP s と同様である。

(3) L1-SAIF 実験局

準天頂衛星は L1-SAIF 信号を生成・放送する機能を持つが、これに乗せる補強メッセージについては地上実験局にて生成し、衛星にアップリンクする。このために当所実験室に L1-SAIF 実験局 (L1SMS) を整備した (図2) [5-7]。

L1-SAIF 実験局の目的は L1-SAIF 補強信号に乗せる補強メッセージを生成することである。生成したメッセージは JAXA 筑波宇宙センター

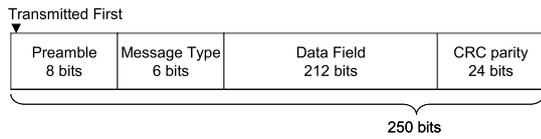


図1 L1-SAIF メッセージの伝送フォーマット



図2 L1-SAIF 実験局(L1SMS)の外観

に設置されている準天頂衛星の主制御局 (MCS : master control station) に商用通信回線を介して送信する。

GPS 測定データは国土地理院の電子基準点ネットワーク (GEONET) から取得する。データ配信拠点である日本測量協会とは IP-VPN 回線により接続しており、当所実験室までリアルタイムに測定データが伝送される。

全体の構成は、図3のとおりである。L1-SAIF 実験局は GEONET の GPS 測定データを受信・処理し、生成した補強メッセージを JAXA

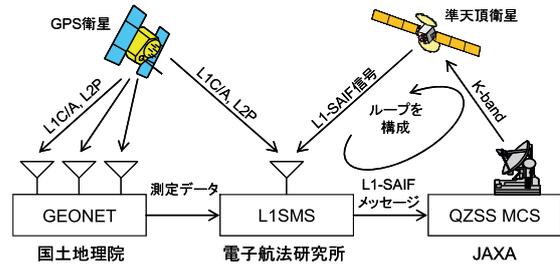


図3 準天頂衛星補強系の全体構成

MCS に送信する。このメッセージは L1-SAIF 信号に乗せられてユーザに向けて放送される。

3. レンズ機能の実装

先に述べたとおり L1-SAIF 信号の構造は GPS L1 C/A 信号と同一であるから、GPS 信号と同様に測距信号として使用して擬似距離を測定することができる。帯域幅も 20 MHz が確保されているから、GPS と同等の測距性能が期待できる。

このレンジング機能を実際に利用可能とするために追加したメッセージについて述べる [8]。

(1) QZS エフェメリスメッセージ (MT58)

受信機側で L1-SAIF 信号を測距信号として使用して位置の計算に用いるためには、擬似距離を測定できるのみならず、QZS-1 のクロック補正值及び軌道情報を含むエフェメリス (ephemeris) 情報を提供する必要がある。このために L1-SAIF メッセージの一つとしてメッセージタイプ (MT) 58「QZS エフェメリス」

表1 L1-SAIF メッセージ(太線内は拡張メッセージ, 他は SBAS 互換)

タイプ	メッセージ内容	タイプ	メッセージ内容
0	テストモード	28	クロック・軌道共分散
1	PRN マスク	52~53	対流圏遅延補正
2~5	高速補正	54~55	電離層遅延補正
6	インテグリティ情報	56	信号バイアス補正
7	高速補正劣化係数	57	(軌道情報関係)
10	劣化パラメータ	58	QZS エフェメリス
18	IGP マスク	59	QZS アルマナック
24	高速・長期補正	60	(広域情報)
25	長期補正	62	内部テスト用
26	電離層遅延補正	63	NULL メッセージ

表 2 MT58:QZS エフェメリス

項目	ビット数	単位	内容
$t_{0,0}$	8	60 s	エポック時刻
URA	4	1	測距精度指標
x	26*	1.28 m	位置 (X)
y	26*	1.28 m	位置 (Y)
z	26*	1.28 m	位置 (Z)
vx	24*	0.5 mm/s	速度 (X)
vy	24*	0.5 mm/s	速度 (Y)
vz	24*	0.5 mm/s	速度 (Z)
ax	5*	$2 \mu\text{m/s}^2$	加速度 (X)
ay	5*	$2 \mu\text{m/s}^2$	加速度 (Y)
az	5*	$2 \mu\text{m/s}^2$	加速度 (Z)
a_{Qf0}	22*	2^{-30} s	クロック補正值
a_{Qf1}	13*	2^{-40} s/s	クロックドリフト
合計	212		

* : 2 の補数表現

を定義しており、表 2 に示すと通りの形式によりエフェメリス情報を放送できるようにした。表 2 の情報量は合計で 212 ビットであるから、L1-SAIF メッセージのデータ領域に収まる。

MT58 では、衛星の軌道情報を ECEF 直交座標値で表現する。これは GLONASS と同様であって、メッセージにはエポック時刻における位置・速度・加速度が記載されている（加速度については摂動項のみであり、位置及び速度から計算できる成分は除く）。受信機側では、数値積分により所望の時刻における衛星位置を計算することとなる。このような表現とした理由は、少ないビット数で衛星位置を表現し、一つのメッセージ (212 ビット) にエフェメリス情報を収容することである。GPS が採用しているケプラー要素による軌道の表現と比べると有効時間が短くなるが、エポック時刻から少なくとも 5 分間程度は有効であることを確認している。

(2) エフェメリス情報の作成

MT58 を作成・放送するには、準天頂衛星の位置及びクロック補正值の予測情報が必要となる。このためには広い範囲にモニタ局を配置して観測データを収集し、軌道予測ソフトウェア等を使用するのが普通であり、実験局設備及びその運用のいずれも大規模なものとなる。

そのような状況を避けるため、L1-SAIF 実験局においては JAXA の補完信号 (QZS L1 C/A) により放送されている情報を利用することとし

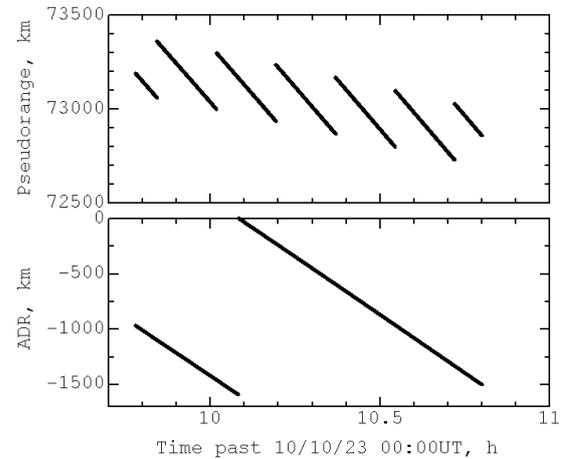


図 4 L1-SAIF 試験信号による
擬似距離の測定例

た。すなわち、準天頂衛星の場合は補強信号に加えて JAXA による補完信号が放送されているところであり、これによりエフェメリス情報が得られるのである。QZS L1 C/A 信号で放送されているエフェメリス情報を受信・解読すれば準天頂衛星の位置・速度・加速度を計算できるから、L1-SAIF 実験局ではこれを MT58 の形式に編集する機能を実装した。

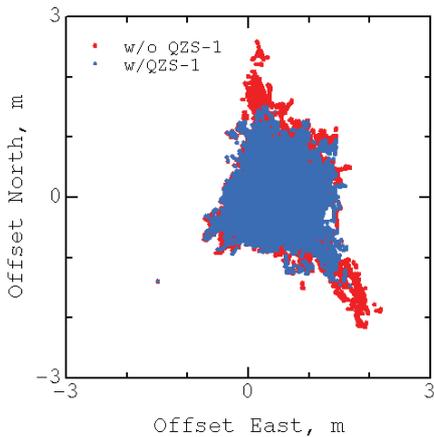
なお、この方式では QZS L1 C/A 信号と L1-SAIF 信号の送信アンテナの違いにより 1m 程度のオフセット誤差を生じるが、L1-SAIF 信号のユーザにとっては補強情報に含まれるディファレンシャル補正情報によりこれは補正されるから、特に影響はない。両信号は同一の信号原子周波数標準をもとに生成されるから、クロック補正情報は同一でよい。

4. 実験結果

L1-SAIF 信号のレンジング機能について、実験を実施した結果を述べる。

(1) L1-SAIF 試験信号による擬似距離測定

他の補完信号に先駆けて、L1-SAIF 信号は 2010 年 10 月 19 日に試験放送が開始されており、当所では岩沼分室 (仙台空港内) に常置した L1-SAIF プロトタイプ受信機を利用してこれを受信した。10 月 23 日 09:46~10:48 の 1 時間にわたり測定された擬似距離は図 4 のとおりであって、上段はコード位相、下段は搬送波



L1-SAIF レンジング	測位精度(RMS)	
	水平	垂直
あり (青)	0.636 m	0.763 m
なし (赤)	0.674 m	0.819 m

図5 L1-SAIF 補完の有無と測位誤差
(JAXA 小金井局, 2011年8月18日)

位相による擬似距離である。

コード位相擬似距離は定期的に約 300km (光速×1ms) のジャンプを繰り返しているが、これは測定エポックを GPS 時刻に合わせるために受信機が受信時刻を 1ms 単位で調整しているため、GPS 受信機では一般的な動作である。

搬送波位相による擬似距離ではこの測定エポックの調整による影響は顕著ではないが、測定値が有限のビット数で表現されていることからオーバーフローにより大きなジャンプを生じていることがわかる。これも受信機の仕様によるもので、特に問題はない。

(2) 測位実験

次に、MT58 の放送機能を L1-SAIF 実験局に組み込んだうえで L1-SAIF メッセージを生成し、これによる補強性能を確認する実験を行った。補強情報を生成するためには L1-SAIF 実験局にも準天頂衛星対応受信機によるモニタ局ネットワークが必要となるが、これには JAXA モニタ局 (4 局) から送られてくる観測データを使用することとした。

ユーザ側の測位性能を調べた結果の例を図5に示す。評価対象としては JAXA 小金井局の準天頂衛星対応一周波数受信機を用いており、実験期間は 2011 年 8 月 18 日 02:10:14~23:59:59

である。

L1-SAIF のレンジング機能を使用しない場合 (赤) と使用する場合 (青) の測位誤差を表示してあり、いずれも L1-SAIF メッセージによる補強処理 (ディファレンシャル補正処理) は施されている。図中の表のとおり、RMS 値では大きな違いはみられないが、最大誤差については 0.6~1m の改善がみられた。

5. まとめ

当所で開発を進めてきた L1-SAIF 信号は、補強情報を放送するほかに、距離を測定するレンジング機能を有している。実際にユーザ受信機側で測位処理に使用するためには準天頂衛星のエフェメリス情報が必要となるが、これを放送する機能を L1-SAIF 実験局に実装したうえで測位実験を行い、L1-SAIF 信号のレンジング機能が有効であることを確認した。

参考文献

- [1] 宮野智行 他：QZSS の可能性，日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム，Nov. 2004.
- [2] 坂井丈泰，福島荘之介，伊藤憲：準天頂衛星 L1-SAIF 実験局の総合検証試験，第 10 回電子航法研究所研究発表会，June 2010.
- [3] 寺田弘慈：準天頂衛星システムの状況について，測位航法学会 GPS/GNSS シンポジウム，Nov. 2010.
- [4] IS-QZSS, Version 1.4, Feb. 2012. (<http://qzss.jaxa.jp/USE/is-qzss/>)
- [5] 坂井丈泰，福島荘之介，新井直樹，伊藤憲：GPS 広域補強システムのプロトタイプ評価，電子情報通信学会論文誌，vol. J89-B, no. 7, pp. 1297~1306, July 2006.
- [6] 坂井丈泰，福島荘之介，伊藤憲：準天頂衛星 L1-SAIF 実験局の性能確認，第 9 回電子航法研究所研究発表会，June 2009.
- [7] T. Sakai, et. al.: Recent Development of QZSS L1-SAIF Master Station, ION ITM, San Diego, CA, Jan. 2010.
- [8] T. Sakai, et. al.: Ranging Quality of QZSS L1-SAIF Signal, ION ITM, Newport Beach, CA, Jan. 2012.