

20. 準天頂衛星 L1-SAIF 補強信号の GLONASS 対応

航法システム領域 ※坂井 丈泰、星野尾 一明、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 GPS に加えてロシアの GLONASS を補強対象とすることが可能である。このことを実証するため、L1-SAIF 実験局を GLONASS 対応に改修して実験を行ったので、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

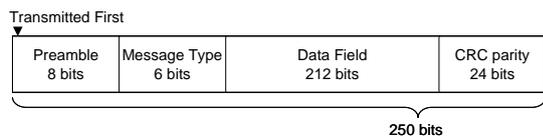


図 1 L1-SAIF メッセージの伝送フォーマット

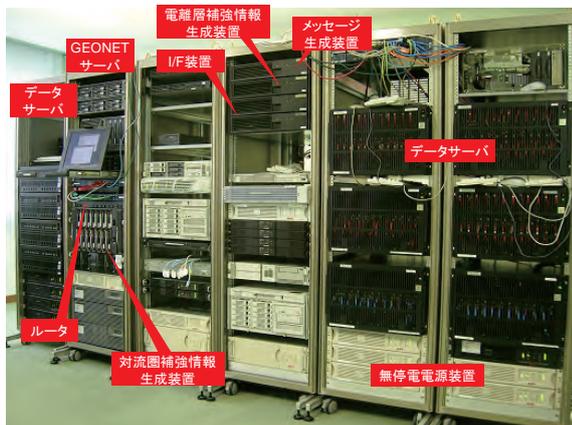


図 2 L1-SAIF 実験局 (L1SMS) の外観

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

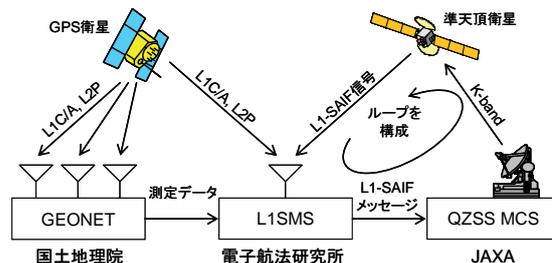


図 3 準天頂衛星補強系の全体構成

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. GLONASS の測位信号

GLONASS は FDMA 方式を採用しており、衛星毎に測位信号の周波数が異なっている。各衛星には -7 ~ 13 のいずれかの周波数番号 (FCN) が割り当てられており、L1 帯では周波数 1598.0625 ~ 1609.3125 MHz に対応している。周波数の違いは、キャリアスムージング処理及び電離層補正值の計算に影響する。なお、地球を挟んで反対側の位置にある衛星が同じ周波数を共用するため、FCN により衛星を識別することはできない。

GLONASS 衛星を識別するためには、軌道位置を示すスロット番号の使用が適切である。GLONASS 衛星には 1 ~ 24 のスロット番号が割り当てられており、これにより一意に各衛星を識別できる。

民生用途に利用できる L1 CSA 信号は 0.511

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

Mcps の拡散符号で変調されており、さらに伝送速度 50bps の航法メッセージが重畳されている。航法メッセージの最小単位は 2 秒間のストリングであり、15 ストリングで 1 フレーム (30 秒間)、5 フレームで 1 スーパーフレームを構成する。スーパーフレームは 150 秒毎に繰り返され、航法メッセージの内容が更新されない限り同一の情報が提供される。ストリングの先頭ビットは GLONASS 時刻の正秒に同期して送信される。

GLONASS 衛星は GLONASS 時刻にもとづいて稼動している。これは GLONASS 制御局で生成されている時刻であり、GPS 衛星がベースにしている GPS 時刻とは数百 ns 程度の差があることが知られている。GLONASS 衛星の軌道情報やクロック補正情報は、GLONASS 時刻を基準として与えられる。GPS と GLONASS を混用する受信機においては、両者の時刻系の差を考慮する必要がある。

また、GPS/GLONASS を混用する受信機においては、測位計算にあたり座標系も揃える必要がある。GLONASS 衛星が準拠する座標系は、ロシアが採用している PZ-90 である。この座標系は 2005 年に改訂が行われており (新しい座標系は PZ-90.02 と称されることがある)、GPS が採用している WGS-84 座標系との差は次のとおりである。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{WGS-84}} = \begin{bmatrix} -0.36 \\ 0.08 \\ 0.18 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{\text{PZ-90}} \quad (1)$$

4. GLONASS 対応の概要

L1-SAIF 補強系の GLONASS 対応について検討する。L1-SAIF 信号のベースとなっている SBAS 規格はもともと GLONASS を補強対象にできるように設計されているから、基本的にはこれを踏襲すればよい。なお、ここでいう GLONASS 対応とは、GLONASS 衛星のみを補強するのではなく、GPS 衛星と共用することを前提として適切な補強情報を生成することを意味する。

(1) 衛星の識別

GLONASS 衛星を識別するためにはスロット番号の使用が適当であり、SBAS/L1-SAIF メッセージにおいても PRN 38~61 をスロット 1~24 に対応させることとされている。

SBAS/L1-SAIF メッセージでは補強情報に衛星の PRN 番号を直接付随させるわけではなく、あらかじめ PRN マスク情報により補強対象の衛星を通知したうえで、PRN マスク番号 1~51 により衛星を識別する。すなわち、同時には 51 衛星までしか補強対象にできない制約がある。GPS 衛星 32 機に加えて、GLONASS 衛星 24 機を同時に補強対象とすることはできない。

このため、GLONASS に対応するためには PRN マスク情報を可変にする必要がある。SBAS/L1-SAIF メッセージはこれが可能なように設計されており、IODP (issue of data, PRN mask) により PRN マスク情報の更新を通知する仕組みとされている。ただし、IODP は 0~3 の範囲しか許されないから、PRN マスク情報をあまり頻繁に更新することはできない。

以上を勘案して、今回の試みでは 30 分毎に PRN マスク情報を更新することとした。いずれかの基準局で可視となった衛星については次回の PRN マスク更新の際に補強対象に組み入れ、逆にいずれの基準局からも可視でなくなった衛星については PRN マスクから除外する。複雑さを減らすために、GPS 衛星と QZSS 衛星については常時補強対象とし、PRN マスクの変更を行うのは GLONASS 衛星のみとした。

(2) 時刻オフセット

GPS と GLONASS を混用する受信機においては、両者の時刻系の差を考慮する必要がある。その方法の一つは受信機クロック誤差について両衛星系を別々に取り扱うことであるが、受信機の測位計算において未知数が増えることとなる。いま一つの方法は時刻系の違いをユーザに通知することであって、これならば未知数を増やすことなく GLONASS に対応できる。

SBAS/L1-SAIF メッセージでは、メッセージタイプ 12 を用いてこうした情報を伝送できる。問題は補強情報生成系において時刻オフセットをどう計算するかであるが、L1-SAIF 実験局内

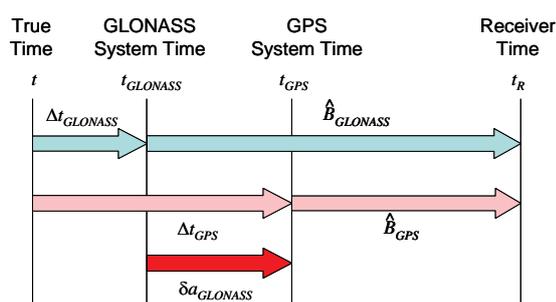


図 4 時刻オフセットの算出

部では受信機クロック誤差の計算が必要となることから、この部分において両衛星系を別々に取り扱うことで時刻オフセットを算出することとした。

(3) エフェメリス情報の識別

ディファレンシャル補正方式の基本的な仕組みは、あらかじめ位置がわかっている基準局で測位信号を測定してその誤差を求め、これをユーザ側に通知することで誤差を補正させて測位精度を改善することである。ここで、ディファレンシャル補正処理を正しく実行するためには補正情報を生成する側とユーザ側で使用するエフェメリス情報を一致させなければならないことに注意が必要である。SBAS/L1-SAIF ではこのための仕組みとして補正情報に IOD (Issue of Data) が付随しており、ユーザ受信機側ではこの情報を用いてエフェメリス情報を選択する。

GPS 衛星の場合はエフェメリス情報に IODE という識別情報が含まれていることから、これをそのまま SBAS/L1-SAIF 補強情報の IOD として用いる。一方、GLONASS 衛星が放送するエフェメリス情報にはこうした識別情報がないため、IOD はエフェメリス情報が送信された時刻をもとに付すこととなっている。具体的には IOD は Validity interval (V) と Latency time (L) から構成され、ユーザ受信機側では

$$t_{LT} - L - V \leq t_r \leq t_{LT} - L \quad (2)$$

を満たすエフェメリス情報を使用する。ここで、 t_{LT} は補強情報の送信時刻、 t_r はエフェメリス情報を受信した時刻である。

(4) 衛星位置の計算

GLONASS のエフェメリス情報は衛星の位置・速度・加速度を含んでおり、GPS が採用し

ているケプラーの六要素をベースとした表現ではない。従って任意の時刻の衛星位置を得るには数値積分が必要となるが、このための微分方程式は GLONASS ICD に掲載されている。特に加速度については摂動項しか放送されないため、定常的な成分については GLONASS ICD にもとづいて計算する。

(5) 実験局の改修

以上の方針に沿って L1-SAIF 実験局を改修し、GLONASS 対応を図ることとした。基準局として用いる国土地理院 GEONET からは GLONASS を含む観測データが BINEX 形式により送信されるので、これにも対応することとなった。

生成した補強情報を評価するためにはユーザ側の計算処理を実行する必要がある。このため、ユーザ受信機ソフトウェアについても GLONASS 対応に改修した。

5. 実験結果

前章に述べた方針に沿って L1-SAIF 実験局の改修を行い、リアルタイムに補強情報を生成したうえでその性能評価を行った。

(1) 基準局

GLONASS 対応の広域補強情報を生成するには、当然ながら GLONASS に対応した基準局のネットワークが必要となる。国土地理院の GEONET が 2012 年から GLONASS 対応を開始しており、実験にはこれを利用した。使用した電子基準点は図 5 の 6 点 (青) である。いずれも Trimble 社の NetR9 受信機を使用しており、RINEX 形式により観測データが提供されている。実験期間は 2013 年 1 月 6~9 日で、94 時間分の補強情報を生成・評価した。

性能評価を行うユーザ局としては、同じく図 5 に示す 11 点 (赤) を使用した。

(2) 衛星配置

まず最初に、補強情報が有効な衛星を確認した例を図 6 に示す。今回の試みでは 30 分毎に PRN マスク情報を更新することとしており、GLONASS 衛星についてはいずれかの基準局で可視となっている衛星のみが補強対象とされる (GPS 衛星と QZSS 衛星については常時補強対象とする)。

図 6 では、赤 : GPS、青 : GLONASS、緑 :

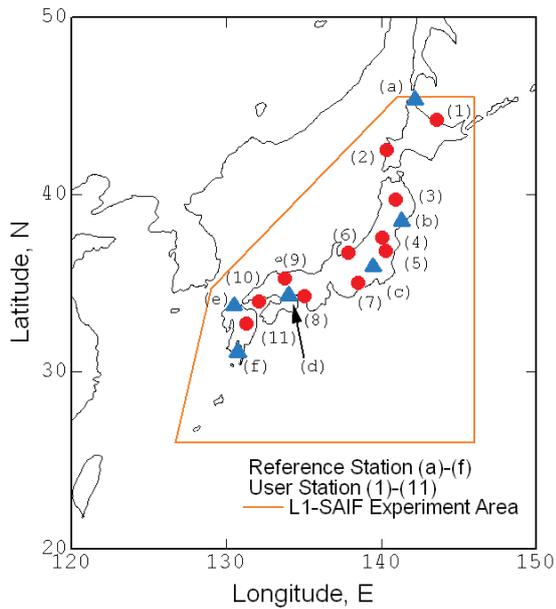


図5 使用した電子基準点（青：補強情報生成用の基準局，赤：評価用のユーザ局）

QZSS について、各時刻に PRN マスクが有効な衛星がプロットされている（縦軸は衛星の PRN 番号）。GLONASS 衛星については時間の経過とともに有効な衛星が変化しており、可視衛星だけが補強対象とされている。プロットが階段状に見えるのは、GLONASS 衛星のスロット番号が衛星の位置に直接対応していることによる。

ユーザ局(7)において使用可能な衛星数の平均値を仰角マスク別に表示すると、図7のとおりとなった。ここで表示されているのは、PRN マスク情報により補強対象とされており、かつ補強情報が得られている衛星の数である。準天頂衛星の利用によりほぼ常時にわたり衛星数を1だけ増加する効果が得られていることがわかる。また、GLONASS の利用により、7~8割程度の衛星数の増加を期待できる。こうした衛星数の増加は、都市部や山岳地帯など衛星の可視性が限られる局面において有効に作用するものと思われる。

(3) 測位精度

補強情報を適用した場合について、ユーザ局(7)におけるユーザ測位誤差の分布例を図8に示す。赤は GPS 単独測位（L1-SAIF による補強なし）、緑は L1-SAIF 補強のある GPS、青は

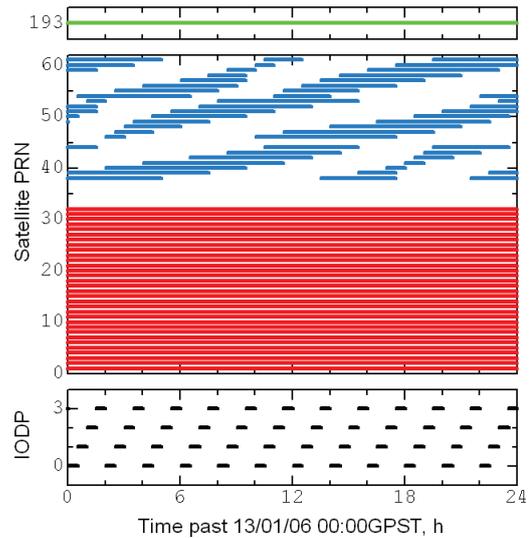


図6 補強情報が有効な衛星の変化

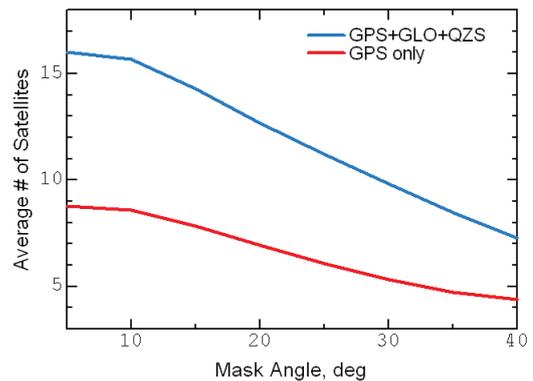
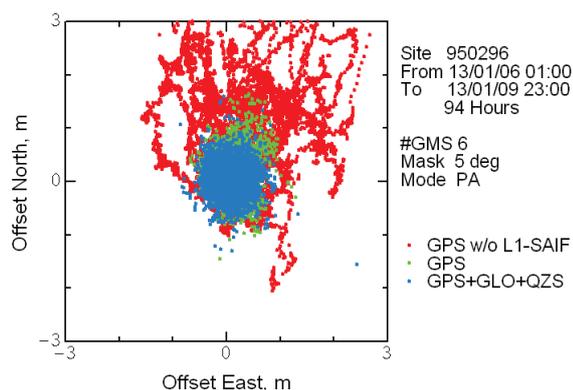


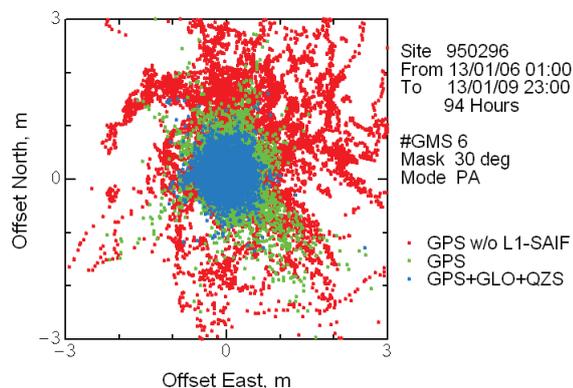
図7 ユーザ局(7)における仰角マスク別の平均衛星数

L1-SAIF 補強のある GPS+GLONASS+QZSS による測位結果である。GLONASS 及び準天頂衛星の利用により測位精度を改善できるが、低仰角の衛星が利用できる状況（低い仰角マスクが対応する）では改善の程度は大きくない。一方、低仰角の衛星が利用できない環境（高い仰角マスクが対応する）においては、GLONASS 衛星の利用により良好な測位精度を維持できることを確認できた。

11ヶ所のユーザ局における測位精度を仰角マスクを変えて調べた結果が図9である。いずれのユーザ位置においても、高い仰角マスクにおいて GLONASS の効果が大きく現れる点は共通している。ユーザ局位置の違いによる差はあまりみられないが、これは実験期間中の電離

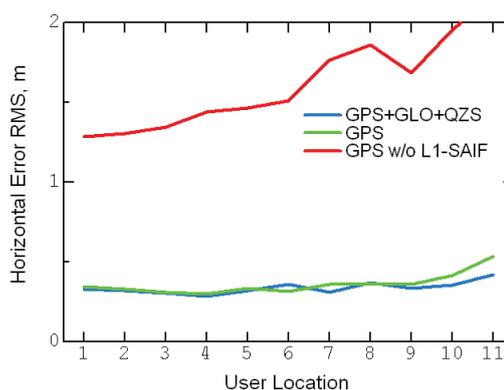


(a) 仰角マスク 5 度

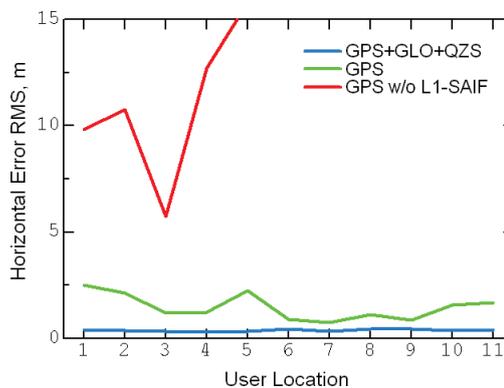


(b) 仰角マスク 30 度

図 8 ユーザ局(7)における測位誤差の分布



(a) 仰角マスク 5 度



(b) 仰角マスク 30 度

図 9 ユーザ局の位置と測位精度

層活動が静穏だったことから、一般には緯度により様相が異なる電離層遅延量による影響が大きくなかったものと推察できる。

6. まとめ

準天頂衛星の L1-SAIF 補強信号については、GPS に加えて GLONASS を補強対象とすることができる。実際に L1-SAIF 実験局を改修して予備実験を実施したところ、特に仰角マスクが高い状況について測位精度が改善されることを確認した。

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, Proc. ION ITM, pp. 354-364, San Diego, CA, Jan. 2010.

[8] GLONASS Interface Control Document, Version 5.0, Sept. 2002.

[9] T. Sakai, et.al.: QZSS L1-SAIF Supporting GPS/GLONASS Multi-Constellation Augmentation, Proc. ION ITM, pp. 209-223, San Diego, CA, Jan. 2013.