

SBAS における規格外メッセージの送信

坂井 丈泰* a)

Broadcasting Non-Standard Messages by SBAS

Takeyasu SAKAI* a)

あらまし GPS 補強システムの一つ SBAS (静止衛星型衛星航法補強システム) は航空分野向けに制定された規格であるが、非航空分野における利用が妨げられているわけではない。非航空分野においては広域ディファレンシャル補正情報以外にもさまざまな情報が有用であり、このために静止衛星から放送される SBAS 信号は有効な情報伝達手段といえる。ただし、SBAS 規格で定められているメッセージにより送信できる情報は種類及び内容が限られていることから、応用によっては規格外のメッセージが必要となる場合がある。本論文では、航空用 SBAS 対応受信機に対する安全を確保しながら、規格外のメッセージを放送する方法について述べる。未定義のメッセージタイプを使用するほか、CRC パリティの生成多項式を変更する手法について詳細に検討した。

Abstract It is allowed to use SBAS (satellite-based augmentation system) for non-aviation applications while it was originally developed as a GPS augmentation system for aviation purpose. The SBAS signal broadcast from geostationary orbit is quite attractive to transmit various information useful for non-aviation users beyond wide-area differential information. Types and contents of SBAS messages are, however, fixed in the SBAS standard, so it might be necessary to transmit non-standard message for some applications. This paper describes potential methods to transmit non-standard messages for SBAS with SBAS-capable avionics kept safe against these messages. In addition to using undefined message types, detail analysis is given to the method using the different CRC parity.

キーワード GPS, SBAS, 規格外メッセージ, CRC パリティ

Keyword GPS, SBAS, non-standard message, CRC parity

1. まえがき

SBAS (satellite-based augmentation system: 静止衛星型衛星航法補強システム) は民間航空機の航法に GPS や GLONASS を利用するために必要とされる補強システムの一つであって、国際民間航空機関 (ICAO: international civil aviation organization) により国際標準規格とされている。GPS や GLONASS は位置情報の完全性等が十分ではないことから、補強システムによりこれを補うことで民間航空機が必要とする性能要件を満たすのである。航空用 GNSS 受信機は、SBAS から得た補強情報を GPS あるいは GLONASS の測定データに適用することで、所要の性能の航法装置として動作する。我が国においては、国土交通省航空局が MSAS (MTSAT-based augmentation system: 運輸多目的衛星用航法補強システム) の名称で SBAS を整備しており、2007 年 9 月より常時運用されている[1]。

SBAS は航空分野向けに制定された規格であるが、非航空分野における利用が妨げられているわけではない。SBAS の信号は暗号化されていないから、静止衛星から放送されている SBAS 信号を受信・解読して補強情報を得れば、このうちの特に広域ディファレンシャル補正情報は広く一般に有用である。現在市場にあるハンディ型受信機の多くはすでに SBAS

対応となっており、SBAS 信号が放送されていれば自動的にこれを受信し、利用するものが普通である。

さて、衛星航法システムの非航空分野における応用を考えると、広域ディファレンシャル補正情報以外にもさまざまな情報が有用な可能性がある。一例としては大規模災害の発生前後における同報メッセージの広域配信があげられるが、こうした用途では静止衛星から放送される SBAS 信号は有効な情報伝達手段といえる。ただし、SBAS 規格で定められているメッセージにより送信できる情報は種類及び内容が限られており、応用にあわせた規格外のメッセージが必要となる場合がある。

本論文では、航空用 SBAS 対応受信機に対する安全を確保しながら、規格外のメッセージを放送する方法について検討した結果を報告する。以下、第 2 章で SBAS 信号の仕様について述べ、第 3 章では規格外のメッセージを放送するための具体的な方法を述べる。このうちの CRC パリティを変更する手法について、第 4 章で詳細に検討することとする。

2. SBAS 信号

SBAS 規格は、実際には国際民間航空条約の第 10 附属書 (Annex 10) に SARPS (international standards and recommended practices: 標準及び勧告方式) [2] として定められている。SARPS では民間航空機の航法に求められる機能及び性能を満たす衛星航法システムを GNSS (global navigation satellite system) と称しており、具体的には GPS あるいは GLONASS に適切な補強を施して使用することとされている。SBAS は、

*独立行政法人 電子航法研究所

〒182-0012 東京都調布市深大寺東町 7-42-23

Electronic Navigation Research Institute

7-42-23 Jindaiji-Higashi, Chofu-shi, Tokyo, 182-0012

a) sakai@enri.go.jp

表 1 SBAS の RF 特性

Table 1 RF specifications for SBAS.

Specification	Value	Remark
Frequency	1575.42 MHz	GPS L1
Modulation	BPSK	RHCP
Spreading Code	GPS C/A	PRN 120~138
Chip Rate	1.023 Mcps	
Modulation Rate	500 sps	
Data Rate	250 bps	
Carrier Frequency Stability	$\leq 5 \times 10^{-11}$	@ 10s
Bandwidth	≥ 2.2 MHz	
Min. Reception Power	-161dBW	3dBi @5deg

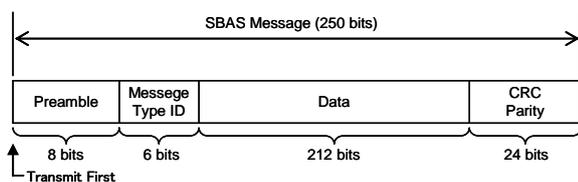


図 1 SBAS メッセージの構造

Fig. 1 Structure of SBAS message.

SARPS に規定されている補強システムの一つであり、我が国における MSAS のほか、米国では WAAS (wide area augmentation system)、欧州では EGNOS (European geostationary navigation overlay service) がすでに利用可能となっている。

SBAS に関連する規格としては、RTCA GPS/WAAS MOPS (minimum operational performance standards) [3]も参照されることが多い。これは受信機製造者向けの米国内規格であるが、FAA 基準を介して我が国の受信機認可基準ともなっており、SBAS 対応受信機の実質的な標準規格といえる。MOPS では、SBAS 対応受信機の機能・性能要件が規定されるとともに、付録として WAAS が放送する信号の内容が記載されている。

SBAS が放送する信号の周波数は GPS L1 信号と同じ 1575.42MHz で、RF 特性は表 1 のように規定されている。周波数及び変調方式は GPS の C/A 信号と同一であるから、GPS と同一のアンテナ及び受信回路を共用できる。すなわち、GPS の信号を受信・処理する受信機であれば、特にハードウェアを追加することなく SBAS 信号を受信することができる。地上における最低受信信号強度は GPS L1 C/A 信号の -158.5dBW に対して -161dBW とやや低く規定されており、実際には使用する静止衛星の周波数調整により決まる。

拡散符号には GPS L1 C/A 信号と同じゴールドコードが使用されており、PRN 120~138 が割り当てられている。PRN 番号の割当ては現時点では表 2 のとおりとなっており、我が国においては MSAS の PRN 129 と PRN 137 を受信できる。拡散変調の速度は 1.023Mcps (chips per second) で、GPS L1 C/A 信号と同一である。

GPS と大きく異なるのは、航法メッセージの変調速度である。

表 2 SBAS PRN 番号の割当て

Table 2 Assignment of SBAS PRN Codes.

PRN	System	GEO	Location
120	EGNOS	Inmarsat 3F2 AOR-E	16W
121	—	—	—
122	WAAS	Inmarsat 3F4 AOR-W	53W
123	—	—	—
124	EGNOS	Artemis	22E
125	—	—	—
126	EGNOS	Inmarsat 3F1 IOR-W	25E
127	GAGAN	Inmarsat 4F1	144W
128	GAGAN	GSAT-8	
129	MSAS	MTSAT-1R	140W
130	—	—	—
131	—	—	—
132	—	—	—
133	WAAS	Inmarsat 4F3 AMR	98W
134	WAAS	Inmarsat 3F3 POR	178E
135	WAAS	Galaxy 15 CRW	133W
136	—	—	—
137	MSAS	MTSAT-2	145E
138	WAAS	Anik F1R CRE	107W

まず、SBAS では 500sps (symbols per second) の速度でシンボル変調がなされている。また、データ符号化には符号化率 1/2 の FEC (forward error correction: 前方誤り訂正) 符号が採用されており、2 シンボルで 1 ビットの情報が表現される。これらよりデータ伝送速度は 250bps (bits per second) であり、GPS と比較すると 5 倍の速度でデータを送信できるよう設計されている。また、FEC 符号により 3dB の符号化ゲインが得られる。

SBAS の補強情報はメッセージ単位で伝送される。メッセージの伝送フォーマットは図 1 のとおりで、プリアンブルから始まる合計 250 ビットで構成されている。データ伝送速度が 250bps であるから、1 個のメッセージを伝送するには 1 秒間を要し、毎秒 1 個のメッセージが送信される。

すべてのメッセージは、プリアンブル (8 ビット)、メッセージタイプ ID (6 ビット)、データ領域 (212 ビット) 及び CRC パリティ (24 ビット) から構成されている。プリアンブルは「01010011」「10011010」「11000110」の 3 種類がこの順番で繰り返し使用され、「01010011」の先頭ビット (左側) は GPS 信号の航法メッセージのサブフレーム先頭に同期したタイミングで送出される。メッセージタイプ ID はメッセージの内容を識別するために用いられ、0~63 のメッセージタイプ (MT) が表 3 のとおり定義されている。データ領域の内容はメッセージタイプに応じて定められており、具体的な補強情報はこの部分に含まれる。CRC パリティは、次の生成多項式

$$G_{SBAS}(x) = x^{24} + x^{23} + x^{18} + x^{17} + x^{14} + x^{11} + x^{10} + x^7 + x^6 + x^5 + x^4 + x^3 + x + 1 \quad (1)$$

により得られる 24 ビットの CRC (cyclic redundancy check) 符号であり、メッセージ伝送における完全性の確保のために付加される。すなわち、SBAS 受信機は受信したメッセージについて CRC パリティが一致することを確認してから使用することとされており、CRC パリティが一致しないメッセージは破棄する。

なお、航空用 SBAS 受信機は、連続して 4 秒間以上にわたり正常なメッセージを受信できない場合は LNAV 以外の進入モードの航法を中断する。SBAS メッセージでは、数値は最上位ビットが先(図 1 の左側)に伝送される。小数点の位置は最下位ビットの右側であり、負数は 2 の補数により表現する。

3. 規格外メッセージの放送

非航空分野において有用な情報を SBAS から放送するために、SBAS の信号形式を維持しながら、現行の SBAS 規格に定められていないメッセージを使用することを考える。基本的な要請として、現行規格に準拠する航空用 SBAS 対応受信機に対して悪影響を及ぼす可能性があってはならない。また、将来的に SBAS 規格が改訂された場合にあっては、それに矛盾する可能性がない方法であることが望ましい。

これらの観点から、考えられる方法を以下に述べる。これらの方法は単独で用いることもできるが、併用も有効である。

3.1 未定義メッセージタイプの使用 SBAS ではメッセージの内容はメッセージタイプ毎に定められているのであるから、規格外のメッセージを放送するもっとも簡単な方法としては、SBAS が使用していないメッセージタイプを使用することが考えられる。

メッセージタイプ ID は 0~63 の 64 種類があり、現行の SBAS 規格では表 3 のとおりに定められている。内容が定義されていないメッセージはすべて「spare」とされており、このようなメッセージが放送されても受信機はそれを無視するしかない。ただし、未定義のメッセージが放送されない保証があるわけではなく、実際に MSAS 及び WAAS はメッセージタイプ 8 を放送することがある。

また、これらのメッセージタイプについて将来にわたり「spare」のままであることが保証されているわけではなく、今後何らかの定義がなされる可能性がある。実際に、MOPS ではいずれも「reserved for future messages」とされている。従って、未定義のメッセージを使用することとすると、将来における SBAS 規格の改訂によりそのメッセージに内容が与えられた場合に矛盾を生じることとなる。この問題の対策としては、下の 3.5 節の方法を併用することが有効である。

3.2 MT63 の使用 メッセージタイプ 63 は「null message」(空メッセージ)とされており、送るべき情報がない場合に送信する内容を持たないメッセージである。

航空用 SBAS 対応受信機はメッセージタイプ 63 については内容がないものとして無視するから、このメッセージに任意の情報を含めて放送しても差し支えない。メッセージタイプ 63 の定義が変更されることはないから、この方法では任意の情報を安全に放送することが可能である。

3.3 MT62 の使用 メッセージタイプ 62 は「reserved」

表 3 メッセージタイプ

Table 3 Message types.

Message Type	Contents
0	SBAS test mode
1	PRN mask
2~5	Fast corrections
6	Integrity information
7	Fast correction degradation factor
8	Spare
9	GEO ranging function parameters
10	Degradation parameters
11	Spare
12	SBAS network time/UTC offset parameters
13~16	Spare
17	GEO satellite almanacs
18	Ionospheric grid point masks
19~23	Spare
24	Mixed fast/long-term satellite corrections
25	Long-term satellite error corrections
26	Ionospheric delay corrections
27	SBAS service message
28	Clock-ephemeris covariance matrix
29~61	Spare
62	Reserved
63	Null message

(SARPS)あるいは「internal test message」(MOPS)とされており、SBAS の制御局が内部的な目的のために使用できるメッセージとされている。MSAS 及び WAAS は、このメッセージを TTA (time to alert: 警報時間)の測定に使用している。

受信機にとってメッセージタイプ 62 の取扱いはメッセージタイプ 63 と同じであり、このメッセージを使用することでも任意の情報を安全に放送することが可能である[4]。

3.4 プリアンプルの変更 SBAS のプリアンプルは 3 種類のうちいずれかであることが定められているから、これを変更してメッセージを送信することにより、航空用 SBAS 対応受信機に当該メッセージを使用させないようにすることが考えられる。航空用 SBAS 対応受信機が使用しないならば、データ領域に任意の内容を記載しても安全となる。

ところが、プリアンプルについては、SARPS では 3 種類のプリアンプルの送信順序が定められているのみで、受信機側の処理については特段の規定はない。また、MOPS ではプリアンプルをメッセージビット列の同期のために利用することが述べられているが、プリアンプルをチェックすることが要求されているわけではない。

従って、プリアンプルを変更した場合に受信機がどのような動作をするかは不明である。プリアンプルを変更しても、当該メッセージを受信機が使用しない保証はない。

3.5 CRC パリティの変更 すべての SBAS メッセージには 24 ビットの CRC パリティが付されており、受信機側では受信したメッセージについて計算した CRC パリティが送信されてきた内容と一致しない場合はそのメッセージを使用してはならないこととされている。これはメッセージの完全性を確保するために SARPS と MOPS のいずれにも規定されていることで、航空用 SBAS 対応受信機に対する基本的な要求といえる。

CRC パリティの計算方法を変更して、式(1)の生成多項式によるものと異なる値をメッセージに付して送信すれば、航空用 SBAS 対応受信機に当該メッセージを使用させないようにすることが可能である。このようにすれば、データ領域に任意の内容を記載しても安全である。また、3.1 節の方法と併用することにより、多種類の未定義メッセージタイプを安全に放送することが可能となる。

ただし、航空用 SBAS 受信機では、連続して 4 秒間以上にわたり正常なメッセージを受信できない場合は LNAV 以外の進入モードの航法を中断する規定があり、これには CRC パリティの不一致も含まれる。従って、この方法により連続して多数の規格外メッセージを放送することは避けるべきである。

3.6 伝送容量 SBAS において規格外のメッセージを放送する方法は以上のとおりであるが、これらにより実現可能なデータ伝送容量について検討する。

現行の MSAS が放送しているメッセージについて調査したところ、全メッセージのうちの 14%程度は MT63 で占められており、MT62 と MT63 を合わせると全体の 16~17%程度であった。これらについては規格外メッセージで置き換えることが可能であり、比較的容易に利用できるデータ帯域幅といえる。SBAS メッセージのデータ領域は 212 ビットであるから、少なくとも 35bps 程度の伝送容量が得られるものと考えられる。

なお、いずれの方法を採用した場合にあっても、SBAS としでの機能及び性能を維持するためには規格外メッセージを連続して送信することは避けるべきであることを注意する。

4. CRC パリティの変更による安全確保

SBAS 規格で定められていないメッセージを送るための方法は前章に述べたとおりである。このうち、特に 3.5 節の方法については航空用 SBAS 対応受信機に対して安全を確保する有効な手段となり得ることから、具体的な方式を検討する。

4.1 規格外メッセージに付加する CRC パリティ

1~2 種類の規格外メッセージを放送すれば十分な場合は MT62/MT63 の使用が簡便かつ有効な手段といえる。ただし、多種類の規格外メッセージを放送する必要がある状況ではデータ領域にメッセージ内容の識別情報を含めることとなり、212 ビットのデータ領域の全体を使用することができなくなる。

多種類の規格外メッセージ (NSM: non-standard message) を放送するには未定義のメッセージタイプの使用が有効である。ただしこの方法では、規格外メッセージで使用するメッセージタイプに対して将来的に SBAS 規格で何らかの定義が与えられた場合に矛盾を生じる不都合がある。この対策として、前章の 3.5 節の方法を組み合わせたことが考えられる。すなわち、

CRC パリティの生成多項式を変更したうえで、未定義のメッセージタイプを使用して規格外メッセージを放送することとする。

規格外メッセージで用いる CRC パリティの生成多項式については、式(1)と異なっていればよい。良好な特性をもつ 24 ビット CRC の生成多項式はいくつか提案されており、例えば

$$G_{NSM}(x) = x^{24} + x^{22} + x^{20} + x^{19} + x^{18} + x^{16} + x^{14} + x^{13} + x^{11} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^6 + x^3 + x + 1 \quad (2)$$

を利用可能である[5]。規格外メッセージについては式(2)により CRC パリティを付加することとすれば、式(1)にもとづいて CRC パリティ検査を行う航空用 SBAS 対応受信機が当該メッセージを使用することはない。仮に SBAS 規格の改訂により規格外メッセージが使用するメッセージタイプに対して異なる定義が与えられた場合にあっても、既存及び将来のいずれの航空用 SBAS 対応受信機も当該メッセージを誤って使用することはないから、安全を確保できる。

4.2 定式化

以上に述べた CRC パリティの生成多項式を変更して規格外メッセージを放送する方式については、式(2)の生成多項式により生成した CRC パリティが、式(1)にもとづく CRC パリティ検査に合格してしまう可能性が問題となる。放送された規格外メッセージを受信する際には伝送誤りが発生し得ることから、これも考慮する必要がある。通常、CRC パリティの誤り検出特性は送受信の両端で同一の生成多項式を用いることを想定して検討されており、異なる生成多項式に対してどの程度の誤り耐性があるのかは自明ではない。このため、どの程度の安全性が確保できるか検討した。

有限体 $GF(2)$ 上における演算を用いる。規格外メッセージとして

$$M_1(x) = \sum_{i=1}^{226} m_i x^{i-1} \quad (3)$$

を送信する場合を考える (CRC パリティは除いてある)。送信すべき 250 ビットの符号は、これに生成多項式 $G_{NSM}(x)$ から生成した CRC パリティを付して

$$T(x) = x^{24} M_1(x) + P(M_1(x) | G_{NSM}(x)) \quad (4)$$

と書ける。24 ビットの CRC パリティ

$$P(x) = \sum_{i=1}^{24} p_i x^{i-1} \quad (5)$$

は、 $x^{24} M(x)$ を生成多項式で割った商を $Q(x)$ としたときの余りの部分であり、

$$x^{24} M(x) = Q(x)G(x) + P(M(x) | G(x)) \quad (6)$$

の関係から

$$P(M(x) | G(x)) = x^{24} M(x) + Q(x)G(x) \quad (7)$$

と求められる。

さて、受信機が受信した符号を $\hat{T}(x)$ と書くことにする。送信される符号と生成多項式の間には

$$T(x) = Q(x)G_{NSM}(x) \quad (8)$$

の関係があるから、受信した符号 $\hat{T}(x)$ を生成多項式 $G_{NSM}(x)$ で割った余りが 0 であれば、伝送誤りはなかったもの

表 4 CRC パリティを変更した場合の見逃し率
Table 4 Missed detection rates for the different CRC parity.

Hamming Distance	# of trial	# of pass	False Negative Rate
0	3×10^9	367	1.22×10^{-7}
1	3×10^9	0	0
2	3×10^9	408	1.36×10^{-7}
3	3×10^9	0	0
4	3×10^9	385	1.28×10^{-7}
5	3×10^9	0	0
6	3×10^9	339	1.13×10^{-7}

と判断する。これが CRC パリティによる検査である。

受信機は, SBAS 規格メッセージについては生成多項式 $G_{SBAS}(x)$ にもとづいて伝送誤りの有無を判断する。従って, 受信した符号が

$$\hat{T}(x) = x^{24}M_2(x) + P(M_2(x)|G_{SBAS}(x)) \quad (9)$$

を満たすものであると, メッセージ $M_2(x)$ が伝送誤りなく受信されたものと判断されてしまう(見逃し事象と呼ぶ)。CRC パリティの変更による安全確保については, 結局のところ, 式(9)を満たすような $\hat{T}(x)$ が存在するかどうか, 存在する場合は $T(x)$ との間のハミング距離(伝送誤りを生じたビット数に相当する)

$$d = \left(T(x) - \hat{T}(x) \right)_{x=1} \quad (10)$$

の最小値が問題となる。

4.3 モンテカルロ法による検討

任意の $T(x)$ に対して式(9)を満たすような $\hat{T}(x)$ が存在する可能性を知るため, モンテカルロ法による検討を行った。すなわち, 次の処理を多数回実行し, ハミング距離別に CRC パリティ検査に合格する回数を求める。

- (i) 乱数により 226 ビットのメッセージを生成する。
- (ii) 生成多項式 $G_{NSM}(x)$ により CRC パリティを付加し, 250 ビットの $T(x)$ を得る。
- (iii) ハミング距離に相当する数のビットをランダムに反転させ, 受信された符号 $\hat{T}(x)$ とする。
- (iv) $\hat{T}(x)$ を生成多項式 $G_{SBAS}(x)$ で除した余りが 0 となるならば, 誤って CRC パリティ検査に合格することとなるから, 見逃し事象と判断する。

なお, メッセージは乱数により生成するが, 先頭 8 ビットにあるプリアンブルについては SBAS 規格で規定されている 3 種類 (53H, 9AH, C6H) のうちのいずれかをランダムに選択させた。モンテカルロ法の実行にあたっては, 十分に周期の長い乱数発生ルーチンを使用した。

モンテカルロ法による計算結果を表 4 に示す。見逃し事象となるようなメッセージは, 伝送誤りのビット数(ハミング距離)が偶数の場合に存在し, その割合, すなわち見逃し率(missed detection rate)あるいは偽陰性率(false negative rate)は $1.1 \sim 1.4 \times 10^{-7}$ 程度であった。CRC 符号長が 24 ビットであること, ビ

ット誤りが奇数の場合には見逃し事象が生じないことをあわせて考えると, $2^{-24} = 5.96 \times 10^{-8}$ であるから, 見逃し事象は偶然に生じているものとみなして差し支えない。

WAAS の回線設計では, FEC 適用時のビット誤り率について $p = 1.5 \times 10^{-8}$ とされている[6]。この条件で 2 ビットの誤りを生じる確率は

$$p^2(1-p)^{248} = 2.25 \times 10^{-16} \quad (11)$$

であるから, 問題となるのはビット誤りがない(ハミング距離が 0 となる)場合に限られる。

CRC 符号長が 24 ビットであるから, 完全にランダムなメッセージが与えられた場合に見逃し事象を生じる確率は $2^{-24} = 5.96 \times 10^{-8}$ である。このことに照らせば, 規格外メッセージに生成多項式 $G_{NSM}(x)$ による CRC 符号を付加するものとした場合の見逃し率は許容可能な水準にあるものとする。あるいは, メッセージの生成時に生成多項式 $G_{SBAS}(x)$ による検査を行い, これに合格するようであればメッセージの内容または送信順序を変更することでこの問題に対処することとしてもよい。メッセージの内容を変更した場合は自明であるが, 送信順序を変更するだけでもプリアンブルが変わることから, いずれも生成される CRC 符号には変化を生じる。

5. むすび

SBAS は航空分野向けに制定された規格であるが, 非航空分野における情報伝達手段としても有用である。このとき応用によっては SBAS 規格外のメッセージが必要となる場合があることから, 航空用 SBAS 対応受信機に対する安全を確保しながら, 規格外のメッセージを放送する方法について検討した。

内容が空であるものと規定されているメッセージタイプを使用する手法は, 確実であるがメッセージの種類を多くできない制約がある。未定義のメッセージタイプを使用する方法ではそのような制約は緩和されるが, 将来的に SBAS 規格が拡張された場合に矛盾を生じる懸念がある。この対策としては CRC パリティの生成多項式を変更する手法が考えられ, 詳細に検討したところ, 既存の航空用 SBAS 対応受信機に対する安全性を実用的な水準で確保できることがわかった。

(平成 24 年 8 月 6 日受付, 10 月 10 日再受付)

文 献

- [1] 真鍋英記, 運輸多目的衛星用航法補強システム(MSAS)の供用開始, 日本航海学会 GPS/GNSS シンポジウム, 東京, Nov. 2007.
- [2] International Standards and Recommended Practices, Annex 10 to the Convention on Civil Aviation: Aeronautical Telecommunications, Vol. I: Radio Navigation Aids, 6th Ed., July 2006.
- [3] Minimum Operational Performance Standards for Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment, RTCA, DO-229, Rev. D, Dec. 2006.
- [4] 坂井丈泰, 廣江信雄, 準天頂衛星 L1-SAIF 信号による広域緊急メッセージ放送, 電子情報通信学会 2012 年総合大会講演論文集, BS-2-12, p.S-41, March 2012.

- [5] Guy Castagnoli, Stefan Bräuer, and Martin Herrmann, Optimization of Cyclic Redundancy-Check Codes with 24 and 32 Parity Bits, IEEE Trans. Communications, vol.41, no.6, pp.883–892, June 1993.
- [6] Per K. Enge and A. J. Van Dierendonck, Wide Area Augmentation System, Global Positioning System: Theory and Applications, vol. II, AIAA, pp. 117–142, 1996.

著者紹介

坂井 文泰 (正員) 平 8 早大院修士課程了. 同年電子航法研究所入所. 現在, 同所航法システム領域主幹研究員. 平 14 ~15 米国スタンフォード大学客員研究員, 平 18~東京海洋大学客員准教授. 衛星航法システムの航空機応用に関する研究に従事. 平 18 IEEE AES 優秀論文賞, 平 19 米国航法学会 ION GNSS 優秀論文賞. 博士(工学).