

17. MSASのアーベイラビリティ向上

通信・航法・監視領域 ※坂井 丈泰、松永 圭左、星野尾 一明

1. はじめに

GPS (global positioning system) に代表される衛星航法システムの導入を進めている ICAO (international civil aviation organization : 国際民間航空機関) は、民間航空における航法用途に使用可能な衛星航法システムを GNSS (global navigation satellite system : 全世界的航法衛星システム) と呼び、そのひとつとして SBAS (satellite-based augmentation system : 静止衛星型衛星航法補強システム) を規格化した。SBAS は、これにより GPS を補強することで所要の航法性能が得られるシステムであって、周知のとおり我が国は MTSAT (運輸多目的衛星) を用いる MSAS (MTSAT satellite-based augmentation system : 運輸多目的衛星用衛星航法補強システム) を整備中である。

航法システムのアーベイラビリティとは、そのシステムが (特定の航法モードで) 利用可能な時間割合である。日本付近では電波伝搬に大きな影響をもつ電離層が活発なことが知られており、これが MSAS のアーベイラビリティを左右する最大の要因となっている。特に、電離層嵐と呼ばれる活動期におけるアーベイラビリティ低下が問題視されている。この問題に対処するため、電離層遅延補正方式を改良することにより特に電離層嵐の際におけるアーベイラビリティの向上を図ったので、その概要を報告する。

2. MSAS のアーベイラビリティ

SBAS のアーベイラビリティ (availability : 有効性) とは、特定の航法モードに必要なとされる航法性能が発揮されている時間割合のことをいう。ユーザにとっては、アーベイラビリティは SBAS を (ある航法モードで) 利用可能である確率を意味するから、アーベイラビリティが低いシステムは望ましくない。具体的には、アーベイラビリティはユーザ測位誤差の最大値の見積りであるプロテクションレベルが各航法モードに対応した警報限界 (アラートリミット) 内にある時間割合と言い換えられるから、プロテクションレベルを抑えることがアーベイラビリティの向上をもたらす。ただし、ユーザ測位誤差がプロテクションレベルを超えるような状態は許されないから、プロテクションレベルはむやみに小さくすることはできない。すなわち、アベ

イラビリティを向上させるためには、プロテクションレベルは常に現実のユーザ測位誤差よりも大きくなければならないとの条件のもとで、可能な限り小さなプロテクションレベルを与えることが要求される。

プロテクションレベルはユーザ測位誤差の最大値の見積りであり、これを超えるユーザ測位誤差が現れた場合はインテグリティ (integrity : 完全性) が破綻していることとなり安全上の問題がある。予測できない誤差要因がある場合はプロテクションレベルに十分なマージンを持たせるしかない。この点で現在の最大の問題となっているのが電離層伝搬遅延で、当所想定されていたよりも大きな不確実性が存在することが判明してきたことから、プロテクションレベル抑制における阻害要因となっている。

SBAS では、広いサービス範囲にわたって均一な測位性能を提供するため、電離層遅延量についてはユーザ位置の関数として補正することとされている。すなわち、経緯度で 5 度毎の格子点における遅延量が SBAS 衛星から放送され、ユーザ受信機は自分の位置における遅延量を内挿により求めて補正に利用する。この方式は主に北米大陸における電離層観測データに基づいて設計されており、中程度の磁気緯度における通常の電離層活動によく適合する。したがって、太陽活動の状態や磁気緯度の違いなどにより電離層活動が活発な時期あるいは地域においては、十分な補正能力が発揮されない可能性がある。このような場合はプロテクションレベルを増大させて対処するため、アーベイラビリティが低下することとなる。

2.1 プロテクションレベルの試算例

図 1 は、電離層嵐の時期における MSAS のプロテクションレベルを当所で開発したプロトタイプ SBAS により試算した例である。この試算では、モニタ局観測データとしては国土地理院が運用する GEONET から MSAS に近い配置の電子基準点を抽出・利用しており (図 2 参照)、プロトタイプ SBAS が生成した SBAS メッセージからプロテクションレベルを計算した。電離層活動による影響は南方ほど顕著となるため、対象地点として佐多 (鹿児島県) を選んである。

横軸付近に描かれている黒線は垂直ユーザ測位誤差、灰線は垂直プロテクションレベルである。プロテクションレベルは十分に余裕をもってユーザ測位誤差を上回っており、インテグリティは保たれている。

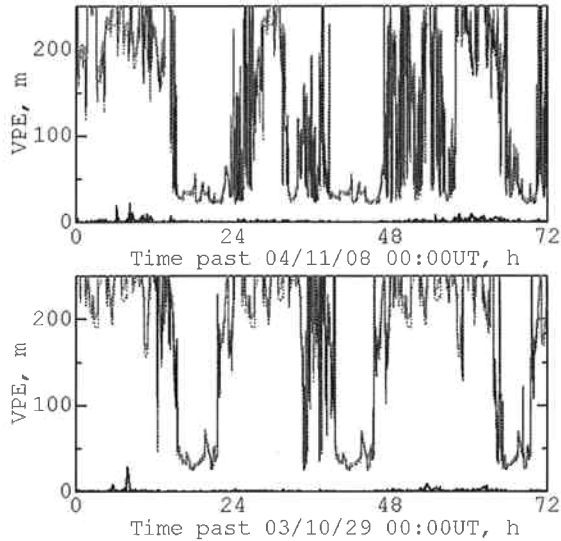


図1. 電離層嵐の際の垂直プロテクションレベル試算例（ユーザ位置：佐多）。（黒）垂直ユーザ測位誤差，（灰）垂直プロテクションレベル（VPL），（破線）VPLのうち電離層に起因する成分。

プロテクションレベルのうち、電離層に起因する成分を示しているのが破線であるが、プロテクションレベルそのものとほとんど差がないことがわかる。すなわち、プロテクションレベルにおいては電離層遅延補正が支配的な成分であることから、アベイラビリティを改善するためには電離層遅延補正の不確実性を抑制することが不可欠であるといえる。

2.2 SBASの電離層遅延補正方式

現行のSBASにおける電離層遅延補正方式は、経緯度で5度毎に設定されたIGP（ionospheric grid point）における電離層垂直遅延量をユーザに向けて放送することとされている[1]。測距信号が電離層を通過する位置はIPP（ionospheric pierce point）と呼ばれ、ユーザ受信機は各IPPにおける垂直遅延量をIGP垂直遅延量から内挿により求めて利用する。この際の内挿処理やIPP位置計算の手順も規格により定められており、SBAS準拠の受信機であれば同一の処理を実行することとなる。

ユーザ受信機側の処理手順が定められているのに対して、SBASサービスプロバイダがIGP垂直遅延量を推定する方法には特に制約はない。すなわち、SBASが規定された航法性能を提供する限り、サービスプロバイダの裁量で任意の推定アルゴリズムを採用してよい。各サービスプロバイダにとっては、サービスエリア内なるべく推定精度の良いアルゴリズムを採用することが、測位精度の向上につながることになる。

電離層遅延推定アルゴリズムとして米国WAASお

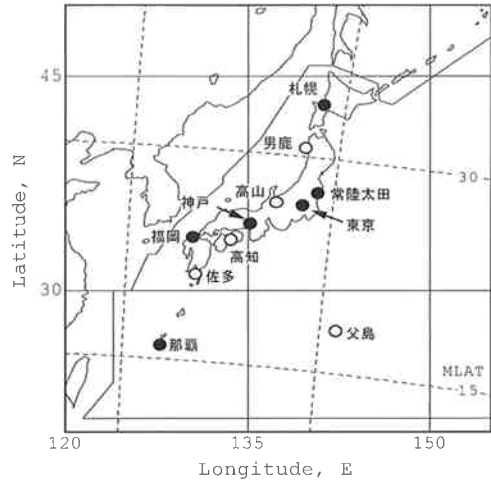


図2. 評価対象としたユーザ局とMSASモニタ局の位置関係。

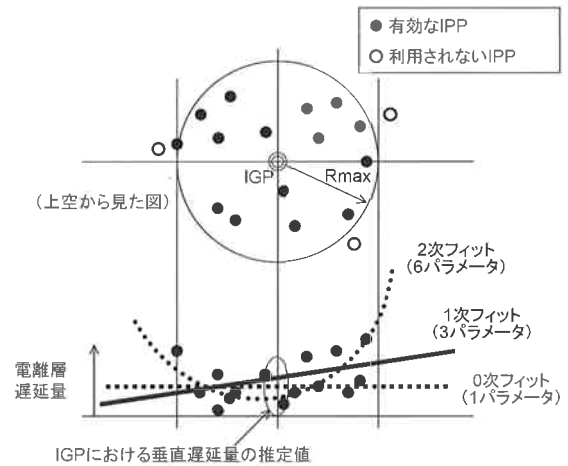


図3. プレーナフィットによる電離層遅延量の推定。

よび日本のMSASが採用しているプレーナフィット（planar fit）方式では、IGP周辺における電離層遅延観測データをもとにして、平面モデルによりIGP位置における電離層遅延量を推定する[2]。このためにモニタ局には二周波型受信機が設置されており、周辺の電離層による遅延量を観測している。平面モデルでは電離層垂直遅延量を経緯度に関する一次式として表現し、モニタ局における観測データを利用してその係数を推定することでIGP位置における垂直遅延量を得る（図3）。

プレーナフィット方式では、サービスエリア上空の電離層の様相が平面モデルに適合している場合限り正常な推定が行われる。磁気嵐等の影響により電離層活動が活発な場合はこうした条件が満たされないことがあり、平面モデルにより推定されたパラメータを信頼して補正情報を生成してはならない。このような状況を検出するのが電離層嵐モニタ（storm monitor）であって、平面モデルにより推定された電離層遅延量と実際のモニタ局における観測結果との

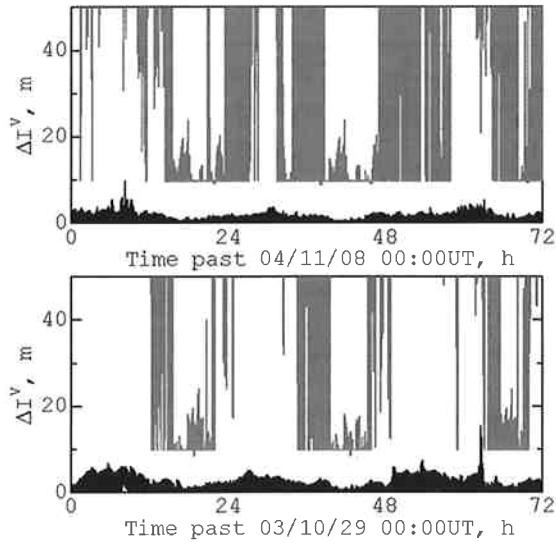


図4. 電離層遅延補正の残差とバウンド値（ユーザ位置：佐多）. (黒) 電離層遅延補正残差（垂直方向に換算）, (灰) バウンド値 (5.33 UIVE) .

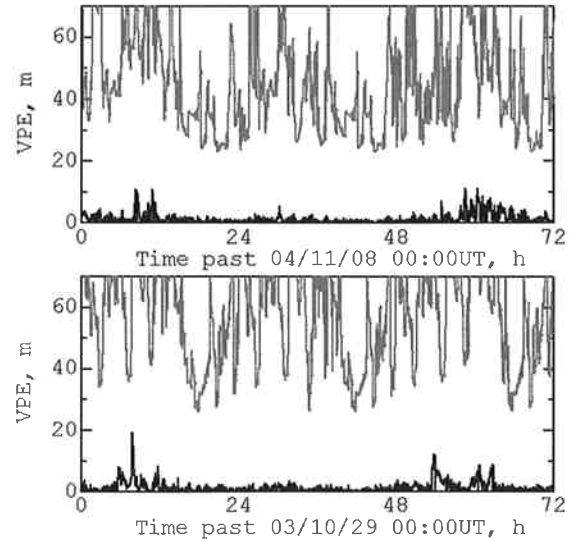


図6. 改良方式による垂直プロテクションレベル試算結果. 図1と比べて1/3程度にプロテクションレベルを抑制している.

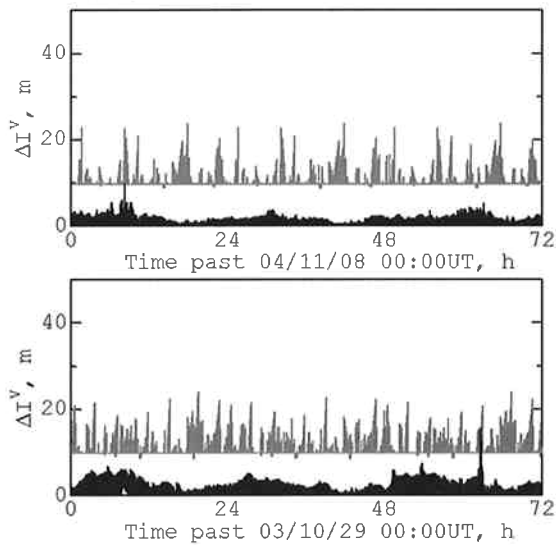


図5. 電離層嵐モニタを外した場合の電離層遅延補正の残差とバウンド値. (黒) 電離層遅延補正残差（垂直）, (灰) バウンド値 (5.33 UIVE) .

残差二乗和がカイ二乗統計量になることを利用してモデル適合性を検定するものである. 電離層嵐モニタにより平面モデルが実際の電離層に適合しないと判断された場合, その IGP については補正值の分散 (不確実性に対応する) が最大値に設定される.

3. プロテクションレベル

プロテクションレベルの計算過程で使用される電離層に起因する誤差のバウンド値 (5.33 UIVE) と実際の電離層補正残差を比較した例が, 図4である. いずれも垂直方向に換算してあり, プロテクションレ

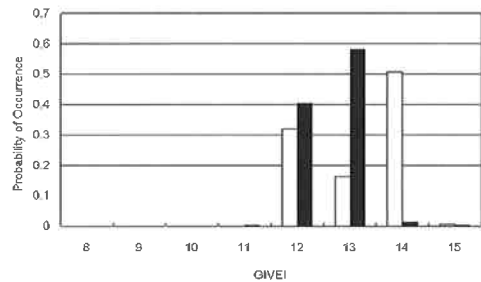


図7. GIVEI 値の分布例 (2004年11月8~10日). (白) 現行方式, (黒) 改良方式.

ベルがユーザ測位誤差を常に上回るためには, 基本的にはこのバウンド値が電離層補正残差よりも大きくなくてはならない. つまり, このバウンド値とは, 電離層補正残差の上限の見積りといえる.

補正残差が大きな時間帯にはこれに対応してバウンド値が極端に増大し, 図に表示しきれなくなっている様子がわかる. 一方, 図5は電離層嵐モニタを外した場合に同様の処理をしたものであり, バウンド値の極端な増大は発生しなくなっている. これらの比較より, バウンド値の極端な増大は電離層嵐モニタの働きによることがわかる.

電離層嵐モニタが反応した場合, その IGP については補正值の分散として最大値がセットされる. これにより図4でみられるようなバウンド値の極端な増大が起きているのであって, プロテクションレベルを抑えるためにはこうした場合の対応を変えることがひとつの方法となる. すなわち, 補正值の分散として最大値をセットする代わりに, 何らかの根拠のある値を与えることを考える.

このために, ゼロ次フィットを採用することを考え

表 1. 改良方式による MSAS の性能予測.

時期	電離層の状態	男鹿		高山		高知		佐多		父島	
		水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
2005 11/14~16	静穏	0.360	0.421	0.305	0.414	0.339	0.510	0.468	0.643	1.219	1.184
		19.50	31.49	18.75	31.64	19.10	33.79	21.22	37.18	51.10	59.34
2004 11/8~10	電離層嵐	1.507	1.662	0.953	1.449	0.973	1.482	1.430	2.035	2.987	3.184
		27.31	41.83	22.93	37.36	24.69	41.05	29.73	48.65	38.26	65.21
2004 7/22~24	活動期	0.431	0.561	0.381	0.533	0.396	0.589	0.581	0.772	0.823	1.352
		33.27	40.77	32.05	39.22	35.51	42.17	37.30	44.16	52.28	62.42
2004 6/22~24	静穏	0.396	0.602	0.424	0.600	0.384	0.645	0.490	0.771	0.708	1.078
		32.90	39.72	35.61	43.30	36.01	42.04	37.74	44.34	51.92	60.40
2003 10/29~31	電離層嵐	0.916	1.194	0.532	0.689	1.138	1.456	1.788	2.256	3.453	3.513
		32.73	48.88	31.32	47.87	40.14	61.95	41.13	64.01	44.01	73.00

(上段) ユーザ測位精度 (RMS), (下段) プロテクションレベル.

表 2. 電離層嵐の際の APV-I アベイラビリティ予測.

時期	男鹿	高山	高知	佐多	父島
2004 11/8~10	37.1	36.9	39.1	38.3	25.7
2003 10/29~31	77.6	86.8	81.6	68.7	33.8
	28.4	25.9	15.8	19.9	14.0
	59.0	62.1	34.9	33.9	18.7

(上段) 現行方式, (下段) 改良方式. (単位%)

た [3]. すなわち, 電離層嵐モニタが反応した場合は推定の次数を下げることにし, 1 次に代えてゼロ次の推定処理を実行する. 具体的には, 次の手順となる.

- (1) プレーナフィットを実行する.
- (2) 電離層嵐モニタが反応しない場合は, プレーナフィットの結果を採用する.
- (3) 電離層嵐と判定された場合は, ゼロ次フィットを実行してその結果を採用する.

この改良方式により計算されるプロテクションレベルの試算結果を, 図 6 に示す. 図 1 と比べると, プロテクションレベルの極端な増大がほぼなくなっている様子がわかる. プロテクションレベルは依然として十分に余裕をもってユーザ測位誤差を上回っており, インテグリティは保たれている.

電離層補正のバウンド値の算出には, IGP における補正值の不確実性を表す GIVE (grid ionosphere vertical error) 値が用いられる. 図 7 はその分布を示す例で, GIVEI=14 が最大値, GIVEI=15 は当該 IGP が使用できないことを表す. 現行方式では GIVEI=14 とされる IGP が多いが, 改良方式では GIVEI=13 に置き換えられており, GIVE 値が抑制されていることがわかる. これにより電離層補正のバウンド値が抑えられ, プロテクションレベルを低減する効果がある.

電離層活動の静穏期および擾乱期を含むいくつかの時期について, ユーザ測位精度とプロテクションレベルを計算した結果を表 1 にまとめた. ユーザ位置としては, 男鹿から父島までの 5 地点を選んである. いずれの地点においても, 電離層嵐の時期にはプロテクションレベルが現行方式の 1/3 程度に抑制され

ることがわかった.

表 2 は, 電離層嵐の際における垂直誘導付き進入モード (APV-I) のアベイラビリティである. 多くの地点では現行方式と比べて 2 倍以上のアベイラビリティが得られており, 電離層嵐の対策として本改良方式は有効であるものと考えられる.

4. むすび

日本付近では電波伝搬に大きな影響をもつ電離層が活発なことが知られており, これが MSAS のアベイラビリティを左右する最大の要因である. 特に, 電離層嵐と呼ばれる活動期におけるアベイラビリティの低下が問題視されていることから, この問題に対処する改良方式を検討した.

電離層嵐が検出された際にゼロ次フィットを実行するアルゴリズムについて, 当所で開発したプロトタイプ SBAS による性能評価を行ったところ, 現行方式の 1/3 程度にプロテクションレベルを抑制することがわかった. 電離層嵐の際における垂直誘導付き進入モード (APV-I) のアベイラビリティは 2 倍以上に改善されており, 改良方式の有効性を確認した.

参考文献

- [1] *International Standards and Recommended Practices, Aeronautical Telecommunications, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, vol. I, ICAO, Nov. 2002.*
- [2] T. Walter, et al., "Robust Detection of Ionospheric Irregularities," *Proc. ION GPS*, pp. 209-218, Salt Lake City, UT, Sept. 2000.
- [3] T. Sakai, K. Matsunaga, K. Hoshino, and T. Walter, "Prototype of Satellite-Based Augmentation System and Evaluation of the Ionospheric Correction Algorithms," *Proc. ION National Technical Meeting*, pp. 368-379, Monterey, CA, Jan. 2006.