

MSAS 利用性の計算

衛星技術部 * 星野尾 一明、伊藤 実、新井 直樹、松永 圭左

1. はじめに

現在、国土交通省は、次世代航空保安システムの中核をなす MSAS (MTSAT Satellite-based Augmentation System、運輸多目的衛星用衛星航法補強システム)を整備している。MSAS の中枢を担う航法統制局は神戸及び常陸太田に設置しており、MTSAT (運輸多目的衛星)の打ち上げ後運用が開始される予定である。

MSAS の利用性(アベイラビリティ)は、衛星配置、地上局監視局配置、電離層状態等により影響を受け変化する。MSAS サービスボリュームモデル (SVM: Service Volume Model)は MSAS の利用性、連続性(コンティニューイティ)、完全性(インテグリティ)等を計算するシミュレーションモデルであり、MSAS のアベイラビリティ等の性能を衛星配置、測距性能等を仮定あるいは MSAS のメッセージを利用して計算するものである。MSAS の地上監視局の増設、電離層遅延補正等の性能向上を行った場合にサービスレベル、範囲がどの様になるかを推定することができる。

本論文では MSAS 地上監視局増設と電離層補正精度の向上によるサービス範囲の拡大、精密進入アベイラビリティおよび、MSAS が利用できない場合、SBAS 受信機に装備される RAIM(受信機自律型インテグリティ監視)機能のアベイラビリティの計算結果について述べる。

2. サービスボリュームモデル (SVM) ⁽¹⁾

ここで述べる SVM は文献(1)に記載されているもので、MSAS、WAAS(米国の広域補強システム、EGNOS(欧州 GPS 静止衛星オーバーレイ航法サービス)等、静止衛星型衛星航法補強システム(SBAS)の設置者が相互運用性を評価するために統一した考えで SBAS アベイラビリティ等を計算するために合意した計算方法、パラメータに準拠すると共に SBAS メッセージを利用してアベイラビリティを計算する機能および RAIM によるアベイラビリティを計算する機能を付加している。

2.1 計算方法とパラメータ

アベイラビリティはシステムが要求される精度、インテグリティ、コンティニューイティを満たしサービス可能な時間の割合と定義される。アベイラビリティはサービス領域内に設定した地点毎に計算される。

入力は衛星配置、GPS および静止衛星(GEO)の平均故障間隔(MTBF)、平均修復時間(MTTR)、航法として要求される精度、インテグリティ、コンティニューイティの値に基づき、時刻、場所を与えて、それぞれの時刻、場所におけるアベイラビリティを計算する。

衛星の軌道は RTCA MOPS 229C⁽²⁾の Appendix B で規定される衛星配置あるいはアルマナックを使用する。GPS 衛星等システム構成要素の信頼性は統計的なモデルを用いる。

衛星は3個以上の地上監視局から可視でない場合は利用できないと判断され、精密進入の場合は IGP(電離層格子点、緯度経度 5° 毎の格子点)を囲む4個の象限内において、IPP(電離層貫通点)の存在する象限が3個未満のとき IGP は監視されていないことになり、システムは精密進入には利用できないとされる。これらは EGNOS の場合は異なる数値が使用される。また、精度、インテグリティ、コンティニューイティは後述のように計算され、要求値が満たされない場合は利用できないと判断される。

(1) 精度(95%)

前提として利用者における各衛星に対する測距誤差 σ_i を計算あるいは仮定する。SBAS メッセージから計算する場合は RTCA MOPS 229C の計算方法に基づき計算される。SVM における精度は以下の式で計算する。

非精密進入(NPA)、エンルートの場合

$$HNSE(95\%) = 2.45 \text{MAX}_i [HDOP \sigma_i]$$

$$VNSE(95\%) = 1.96 \text{MAX}_i [VDOP \sigma_i]$$

MAX_i は選択した衛星の中で最大値のものを示す。

精密進入の場合

$$HNSE(95\%) = 2.45\sigma_H$$

$$VNSE(95\%) = 1.96\sigma_V$$

σ_H 、 σ_V は衛星と利用者の位置関係と各衛星の測距誤差を重みとして用いて求めた、水平及び垂直方向の測位誤差。

(2) インテグリティ

インテグリティを満足しているかどうかの判断は水平保護限界値 (HPL)、垂直保護限界値 (VPL) を計算し、水平警報値 (HAL)、水平警報値 (VAL) と比較し、要求値より小さいと利用可能とする。擬似距離情報を利用してユーザーが位置計算をした時、擬似距離情報には様々な誤差が含まれているので正確な位置は算出されない。そこで保護限界値 (垂直、水平) として VPL、HPL を算出する。計算の詳細は RTCA MOPS 229C を参照。

$$HPL = \begin{cases} K_{H,NPA} \cdot d_{major} & \text{エンルート, NPA} \\ K_{H,PA} \cdot d_{major} & \text{精密進入 (PA)} \end{cases}$$

$$VPL = K_{V,PA} \cdot d_U$$

(3) コンティニューイティ

コンティニューイティ (継続性) は、ある時間間隔にわたって継続した航法サービスを受けることの出来る確率である。システム全体が要求を満足するかどうかを判断するときコンティニューイティを用いてアベイラビリティを計算する必要がある。現実的なアベイラビリティを計算する場合は、コンティニューイティを使用しないでアベイラビリティを計算する。この場合コンティニューイティ喪失の解析は実施する必要がある。詳細は文献 (1) を参照。

コンティニューイティ計算の入力は、最低衛星数、精度もしくはインテグリティの航法要求、GPS 衛星、GEO 衛星の MTBF 値、衛星の組み合わせに応じて計算された精度、インテグリティ、継続性を考慮する時間間隔である。

(4) アベイラビリティ

GPS 衛星、GEO 衛星の MTBF、MTTR、精度要求、インテグリティ要求、コンティニューイティ要求、衛星の組み合わせに応じて計算される精度、インテグリティ、継続性の値を入力として、場所 u における時刻 t の瞬時アベイラビリティ $IAL(u, R, t)$ は以下の式で計算される。

$$IAL(u, R, t) = \sum_{i=0}^{C_{gps}} \left\{ \sum_{j=0}^{C_{geo}} (W_i^{gps} \cdot W_j^{geo} \cdot K_{ij}) \right\}$$

$$K_{ij}^V = \frac{1}{N_{ij}^V} \sum_{n=1}^{N_{ij}^V} bool[R(ij, n)]$$

ここに、 W_i^{gps} 、 W_j^{geo} は可視の GPS 及び GEO 衛星において、それぞれのすべての組み合わせを考慮した利用率。 N_{ij}^V は可視衛星のすべての組み合わせ数を示す。また、上記の $bool$ 関数内の R は航法要求を満足すかどうかを示し、 $bool$ 関数は航法要求が満足されると 1 となり満足されない場合は 0 となる。 K_{ij}^V は、与えられた GPS 衛星と GEO 衛星が故障した場合の航法要件を満足する条件付確率である。ここで、航法要求とは、アベイラビリティを算出する下記の 4 個の条件である。

最低 4 個以上の衛星が可視であること。

航法に要求される精度を満足すること。

航法に要求されるインテグリティを満足すること (最低 1 つの GEO 衛星が利用可能)。

航法に要求される継続性を満足すること。

上記の 4 個のみを要求事項とすることもあれば、4 個から 1 個まで全てを要求事項とすることもある。例えば、4 個から 1 個まで全てを航法要求とした場合、精度を満足しない時点で、継続性も満足しないことになる。精度、継続性の要求値は精密進入 (APV-I 等) と非精密進入 (NPA) で異なる。

3. RAIM アベイラビリティ

圏も西日本に偏る。図 4 は女満別、秋田、輪島に GMS を追加した場合の APV-I アベイラビリティである。図 5 はクロックエフェメリス誤差、電離層補正精度を改善したもので、北海道の一部を除きある。図 5 はクロックエフェメリス誤差、電離層

補正精度を改善したもので、北海道の一部を除き欧州 GPS 静止衛星オーバレイ航法サービス (MTSAT Satellite-based Augmentation System、運輸多目的衛星用衛星航法補強システム) RAIM のアベイラビリティの計算においては、利用可能衛星数、インテグリティを満足していることが条件となり、ある時刻における利用者の場所と衛星の配置に基づきアベイラビリティを計算する。インテグリティを満足しているとは HPL_{RAIM} が HAL を越えないことを意味する。詳細は省略するが、 HPL_{RAIM} は次式で算出する⁽³⁾。

$$HPL_{RAIM} = \text{MAX}_{k,n} \{ HSlope_k \times Threshold_k + (pmd) \times H \}$$

$$= \text{MAX}_{k,n} \{ ARP_k \} + (pmd) \times H$$

Threshold は RAIM の誤警報率を基準とし、残差の二乗和根が 2 乗分布に従うとの仮定で検出統計量である残差の二乗和根を求める。*Hslope* は衛星 *k* の検出統計量が水平測位精度に与える係数を示し HDOP と同様の係数であり、利用者と衛星の位置関係から求めます。*(pmd)* は誤検出率を基準とし *Threshold* と同様な方法で求める。誤検出率 0.001 のとき *(pmd)* = 3.0902 である。*H* は各衛星の測距誤差による水平位置精度である。RAIM の場合、各衛星の測距誤差は SA ON の場合 33.3m、SA OFF の場合 13.5m を使用する。

4. 計算結果

表 1 に SVM 等の解析条件 (標準値) を示す。

4.1 NPA および RAIM アベイラビリティ

図 1 に MSAS の GMS、MRS 配置と MTSAT 1 R 140° E) を仮定した場合の MTSAT カバレッジ内 1 日平均 NPA アベイラビリティを示す。MSAS を使用した場合、日本の FIR (飛行情報区) 内の NPA アベイラビリティは 99.95% 以上が得られる。

図 2 は MSAS が利用できない場合を想定した RAIM アベイラビリティである。日本を含む中緯度地域でのアベイラビリティは 90 - 99% である。

4.2 APV-I アベイラビリティ

図 3 にベースラインとなる、APV-I アベイラビリティを示す。1 日平均では APV-I アベイラビリティは 99% 以下であり、高いアベイラビリティ範囲も西日本に偏る。図 4 は女満別、秋田、輪島に GMS を追加した場合の APV-I アベイラビリティで

表 1 解析条件 (標準値)

測位精度要求 95%(m) 水平/垂直	APV-I 16/20 NPA 220/-	警報値(m) 水平/垂直	APV-I 40/50 NPA 556/-
UDRE(m)	4.5 (1.75)	UIVE(m)	4.0 (0.9)
GEO MTBF(時)	79690.9	GEO MTTR(時)	0.85
GPS MTBF(時)	長期 54787.5	短期 予測可能 6217.0	短期 予測不 可能 36525
GPS MTTR(時)	長期 91.5	短期 予測可能 12.2	
地上局 MTBF(時)	130,000 (GMS) 2,500 (GES)		
連続性要求 (計算せず)	1-10 ⁻⁸ /15 秒 (APV-I)、 1-10 ⁻⁵ /時 (NPA)		
RAIM 測距誤差(m)	33.5(SA ON) 13.5(SA OFF 標準)、7.5(GEO)		
利用性要求 (目標値)	0.999 以上 (ER/NPA) 0.99 以上 (APV-I)		
解析期間	2004 年 1 月 1 日 00:00-23:59		
衛星配置	GPS : Yuma227、GEO:140° E		
時間間隔	600 秒		
仰角マスク	5 度		

ある。図 5 はクロックエフェメリス誤差、電離層補正精度を改善したもので、北海道の一部を除き 90% 以上のアベイラビリティとなる。

5. あとがき

SVM を使用して MSAS アベイラビリティ計算結果を示した。現状の MSAS では NPA は 99.9% 以上のアベイラビリティがあり、精密進入 (APV-1) のためには電離層補正誤差 (UIVE: User Ionospheric Vertical Error)、クロックエフェメリス誤差 (UDRE: User Differential Range Error) の改善が必要と予想できる。SVM は決められた条件あるいはデータに基づき SBAS の利用率等の計算を行うことができ、地上監視局の配置等、システム性能向上大きな影響のあるパラメータが何であるかを検討する上で有効である。

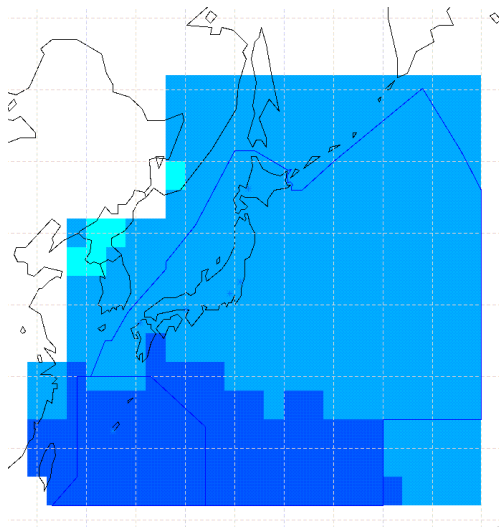


図1 MSAS En-Route/NPA
アベイラビリティ

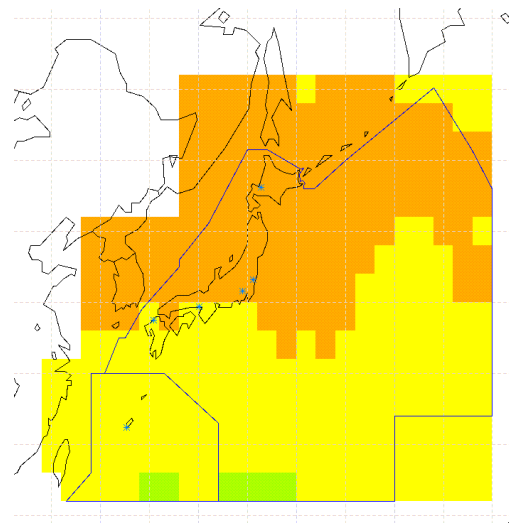


図2 MSAS RAIM
アベイラビリティ

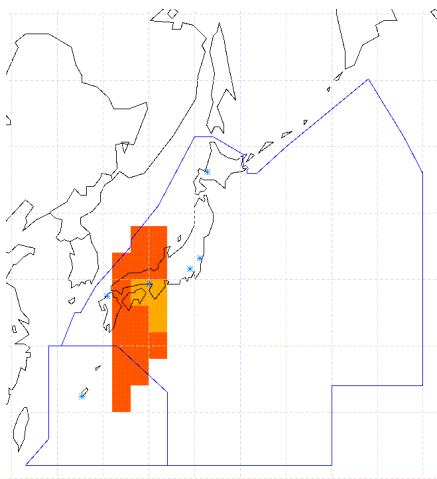


図3 APV-I アベイラビリティ
(MSAS GMS 配置、ベース)

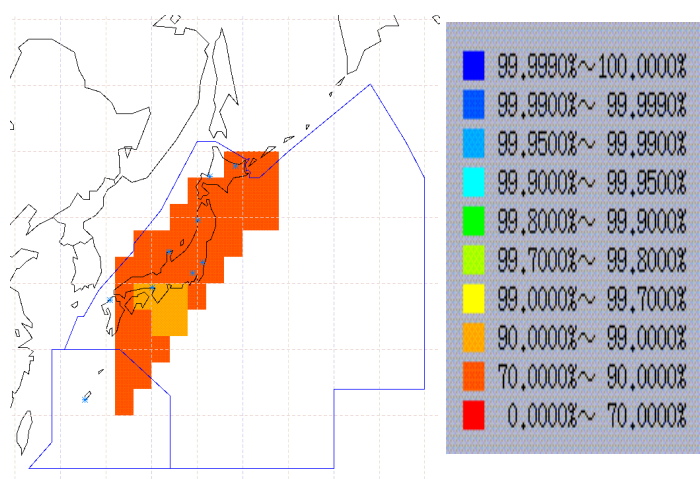


図4 APV-I アベイラビリティ
(ベースに女満別、秋田、輪島 GMS 追加)

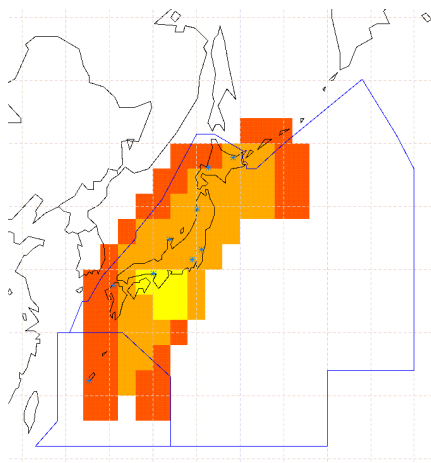


図5 APV-I アベイラビリティ
(ベースに3 GMS 追加、UIVE, UDRE 改善)

参考文献

- (1) SERVICE VOLUME MODEL SIMULATION ASSUMPTIONS FOR SBAS PERFORMANCES”, IWG/SVM/2.0, June 30 2000
- (2) MINIMUM OPERATIONAL PERFORMANCE STANDARDS FOR GLOBAL POSITIONING SYSTEM/WIDE AREA AUGMENTATION SYSTEM AIRBORNE EQUIPMENT”, RTCA DO-229C, November 28, 2001
- (3) T. Walter, P. Enge: ”Weighted RAIM for Precision Approach”, Proceedings of ION GPS-95, September 12-15, 1995, pp.1995-2004