

21. 地上型衛星航法補強システムの基準局設置条件の検討

航法システム領域 ※齊藤 真二, 福島 荘之介

1 はじめに

国際民間航空機関（ICAO）は、航空交通流の増加など拡大する航空需要に対応し、安全性・定時性を向上させるため、全ての運航フェーズにおいて、航法衛星（GNSS；Global Navigation Satellite System）による航法システムの構築を進めている。

航法衛星を利用した航空機の着陸システムとして、GLS（GBAS（GNSS）Landing System）がある。GBAS（Ground-Based Augmentation System；地上型衛星航法補強システム）は、全運航フェーズにおいて、最も安全性要求が高い精密進入着陸を実現するための衛星航法補強システムであり、地上装置から放送する補強情報により測位精度や安全性を保証し、加えて経路情報を航空機に提供する。GBASは、各国で導入に向けて開発・評価が行われている。我が国においては、CARATSにおいてCAT-I GBASの導入の意志決定がされたところであり、今後、導入・運用に向けた動きが加速されることが予想される。電子航法研究所においては、GBASプロトタイプ装置を開発し、関西国際空港・仙台空港・新石垣空港に設置し、長期安定性試験や飛行評価試験を実施しているところである。

本稿では、GBASの地上装置のうち基準局の設置条件について、周辺障害物との離隔距離について検討した結果について述べる。

2 GBAS（地上型衛星航法補強システム）

GBASは図1に示すように、基準局・補強情報生成処理部・モニタ・VDB（VHF Data Broadcast；VHFデータ放送）送信部からなる地上サブシステム、および航空機の測位・誘導を行う機上サブシステムで構成される。

基準局は3~4式のGPS受信装置からなり、各受信装置のGPSアンテナを100m程度の間隔を開けて設置することで、マルチパス等の影響を軽減させている。補強情報生成処理部では、基準局で取得した衛星毎の擬似距離測定値などからDGPS（Differential GPS）測位に利用する擬似距離補正情報を生成する。また、システムの

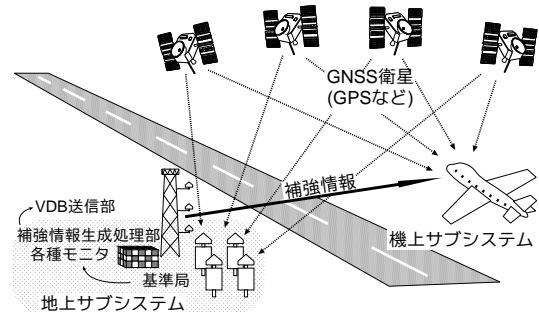


図1: GBASの概要図

完全性を保つために、GBASの運用に脅威となる異常の検出やリスクの低減などの処理を行う様々なモニタが組み込まれている。これらのモニタからの情報、擬似距離補正情報、進入着陸の経路情報などを併せて補強情報とし、VDB送信部より、航空機に放送する。GBASではデジタルデータとして経路情報を放送するため、1式の地上装置で複数の進入経路を同時に提供可能となっている。

機上サブシステムは、VDB受信機とGPS受信機とGLS処理部などで構成され、マルチ・モード・レシーバとして航空機に装備される。機上サブシステムでは、航空機の位置をDGPS測位により求め、補強情報に含まれる信頼性情報から、その測位結果が有効であるか否かを判断する。有効である場合は、選択した進入経路からの偏位を算出し、FMSやオートパイロット等に出力される。

このように、GBASでは測位結果の有効性の判断を機上装置側で行うため、信頼性の高い補強情報の生成が重要となる。

3 基準局設置条件の検討

GBAS地上装置の設置において、VDB送信アンテナと基準局の設置場所の選定が課題となる。VDB送信アンテナについては、複数の滑走路を有する大空港において滑走路からサービスエリア端までの覆域を確保できる設置場所の選定方法等が課題となっている。基準局については、電波干渉源や周辺障害物による影響を考慮した設置場所の選定方法が課題となっている。このうち、電波干渉源からの離隔については、実験

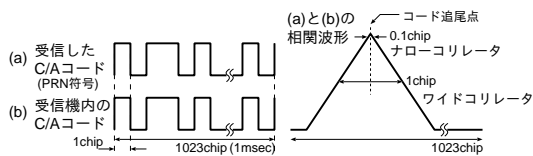


図2: GPS 信号 (C/A コード) と相関波形

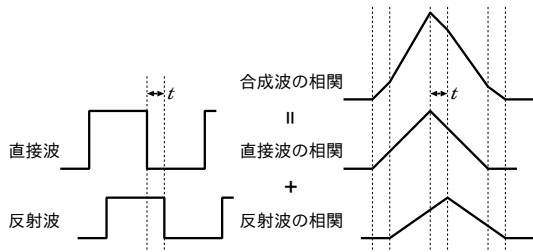


図3: 遅延 t の反射波が重畳した相関波形

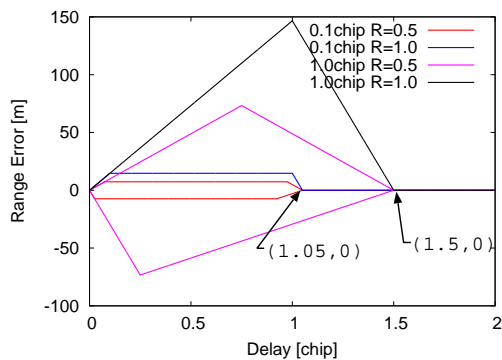


図4: 反射波の遅延と測距誤差の関係

により 285m とされている [1] が、周辺障害物による反射・回折の影響および電波干渉源の影響が生じないような設置場所の選定指針が明確になっていない。

ここでは、基準局の設置場所の条件について、周辺障害物からの離隔距離、障害物の許容高について検討する。

3.1 障害物からの離隔距離

GPS 衛星の信号は衛星毎に異なる PRN 符号でスペクトラム拡散されている。GPS 受信機では、補足する衛星に対応した PRN 符号と受信信号との相関をとり相関波形のピークを追尾することで信号を捕捉している (図 2)。基本的に相関波形はピークを中心として対称であるため、アーリーレイトコリレータを用いた GPS 受信機では相関器ペア (アーリーとレイト) の出力が同レベルとなる点の中央を追尾点とし、測距を行う。この相関器ペアの chip 幅 (相関器幅) は受信機の機種により異なり、1chip 幅のものや 0.1chip 幅のものがある。GBAS 基準局では 0.1chip 幅の GPS 受信機が用いられている。

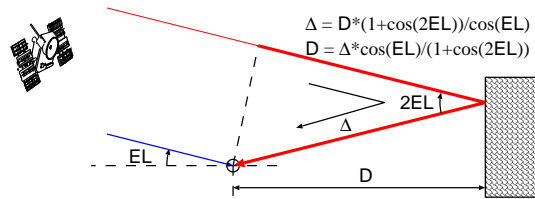


図5: 直接波と反射波の行路差

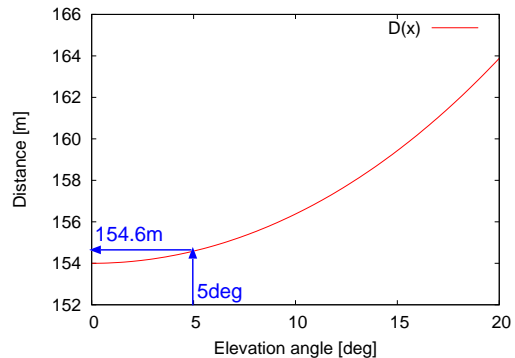


図6: 仰角と反射物までの離隔距離 (行路差 308m)

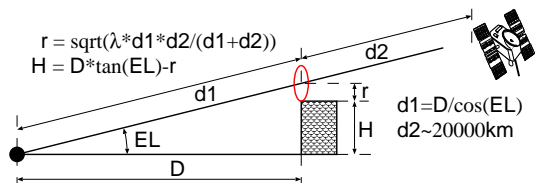


図7: 障害物の許容高の考え方

図 3 のように反射波が存在すると相関波形の対称性が崩れ測距誤差が生じる。反射波の遅延により生じる測距誤差は、相関器幅と反射の強度に依存し、図 4 のようになる。図中の R は直接波に対する反射波の強度比で、 $R=1$ は同相のみ、 $R=0.5$ は同相と逆相の場合の 0.1chip 幅と 1.0chip 幅の相関器幅の例を示している。

相関器幅を n -chip としたとき反射波の遅延が $1 + n/2$ -chip 以上の場合は、反射波による測距誤差は発生しない。GPS の C/A コードは 1.023Mchip/s であり光速を 3×10^8 m/s とすると 1.05chip は約 308m に相当し、0.1chip 幅の GPS 受信機では 308m 以上の行路差を持つ反射波による測距誤差は生じない。

図 5 のような垂直壁面からの反射を考える。直接波と反射波の行路差を Δ 、衛星仰角を EL とすると受信点と反射点の水平距離 D は、

$$D = \frac{\Delta \cdot \cos(EL)}{1 + \cos(2EL)}$$

となる。 $\Delta = 308$ m のとき仰角と離隔距離の関係を図 6 に示す。GBAS では仰角 5 度以上の衛

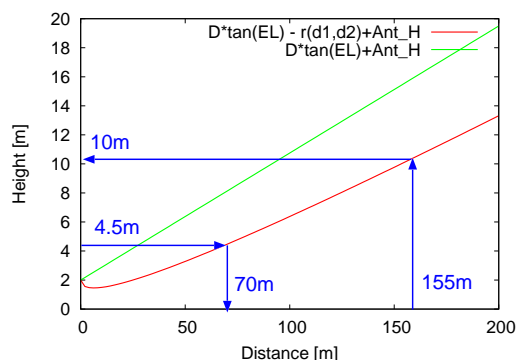


図8: 障害物までの距離と許容高（仰角5度，アンテナ設置高2m）

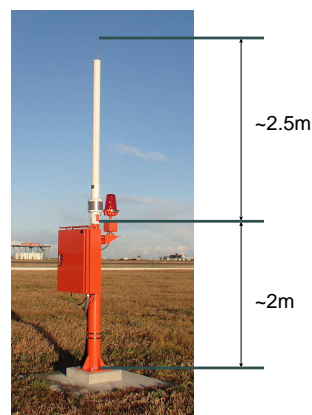


図10: 基準局装置の外観

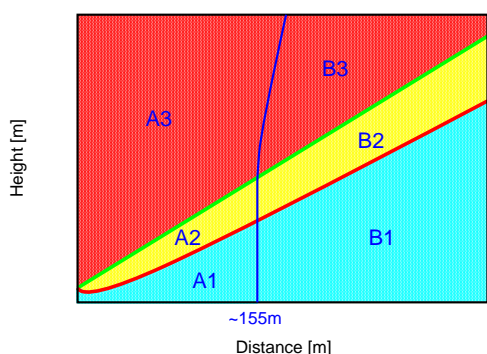


図9: 障害物からの離隔距離と許容高による領域区分

星を使用するので， $EL=5$ 度の場合を考えると $\Delta = 308\text{m}$ のとき $D \approx 154.6\text{m}$ となるので，基準局装置で反射波の影響をなくすためには，反射物までの離隔距離を約 155m 以上確保すれば良い。

3.2 障害物の許容高

周辺障害物の許容高について，受信点からの障害物の高さ H ，衛星仰角 EL ，受信点と障害物の水平距離 D とし図7のような場合を考える。

送受信点間を結ぶ伝搬路上において第1フレネル帯内に障害物があると信号強度が減衰する。送受信点間の距離を $d1 + d2$ としたとき，距離 $d1$ の点での第1フレネル帯の半径 r は，波長を λ とし，

$$r = \sqrt{\lambda \frac{d1 \cdot d2}{d1 + d2}}$$

と表される [2]。

図7において，受信点から水平距離 D だけ離れた障害物が第1フレネル帯を遮蔽しない高さを障害物の許容高 H とし，

$$H = D \cdot \tan(EL) - r$$

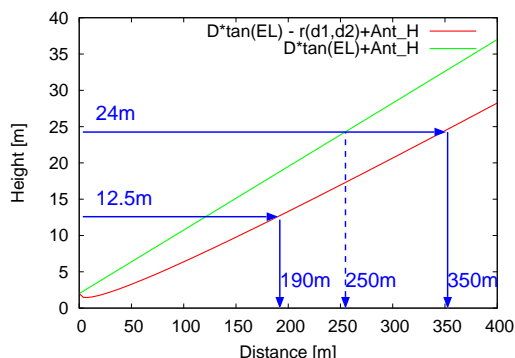


図11: 障害物までの距離と許容高（仰角5度，アンテナ設置高2m，400mまで）

と表すことができる。また，受信点から障害物までの距離 $d1$ と障害物から衛星までの距離 $d2$ は， $d1 \ll d2$ であり，それぞれ $d1 = D / \cos(EL)$ ， $d2 \approx 20000\text{km}$ とできる。受信アンテナ設置高 2m ， $EL=5$ 度の場合の障害物までの距離 D と許容高 H の関係を図8に示す。赤線で示した許容高より低い障害物であれば，受信信号強度への影響は無視でき，例えば， $D = 155\text{m}$ のとき， $H \approx 10\text{m}$ となる。

3.3 離隔距離と許容高による領域区分

ここまで述べた離隔距離と許容高について，横軸を離隔距離，縦軸を高さとし，赤線を許容高，緑線を衛星仰角に対応した高さとし図9のように領域分けをする。

3.1項で示したように，直接波と反射波の行路差が 308m 以上であれば反射波による測距誤差は生じない。図9において，領域 $B1 \sim B3$ が反射波による影響が生じない領域に対応する。

3.2項で示した許容高より，赤線より下の領域となる領域 $A1$ ， $B1$ に存在する物件は障害物，反射物にならない。また，赤線と緑線の間の領域

表 1: 主要航空機の全高（垂直尾翼高）

機種	B747	B777	B787	B737
全高	19.5m	18.5m	16.9m	12.5m
機種	A380	A350	A330	A320
全高	24.1m	16.9m	16.8m	11.8m

A2, B2に突出する物件は第1フレネル帯を遮るため、信号強度の減衰の原因となり、領域A2では測位誤差に影響を与える反射源ともなる。さらに緑線より上の領域A3, B3に突出する物件については、衛星の視線を遮るため、信号強度減衰だけでなく信号捕捉に影響を及ぼし、領域A3では測位誤差に影響を与える反射源となる。

3.4 基準局間の間隔

仙台空港設置の実験用のGBAS地上装置では、基準局のGPSアンテナとして図10のような約2.5m長のMLA（Multipath Limiting Antenna；マルチパス低減アンテナ）と呼ばれる大地反射波を強度を低減する受信パターンを持つアンテナを使用し、およそ2m高のアンテナマストに取り付けている。

隣接する基準局が反射物、障害物とならないためには、3.3項で定義した領域A1, B1から隣接基準局が突出しなければよい。3.2項で示した許容高から離隔距離を考えると、アンテナ設置高2mの場合、アンテナの最上部の地上高はおよそ4.5mなので、図8より、影響が生じない距離は約70mとなる。

図10のようなアンテナを基準局に用いる場合、基準局間の距離を最低70m以上確保しないと、隣接する基準局が障害物となり、反射波による測距誤差の発生や信号強度の低下の恐れがある。

また、複数の基準局に周辺の障害物からの影響が同時に発生しない配置とすることも必要である。

3.5 航空機との離隔距離

基準局が空港内に設置される場合、滑走路、誘導路上の航空機が障害物となる。影響が大きいと考えられる垂直尾翼との離隔について検討する。また、主要な航空機の全高（垂直尾翼高）を表1に示す。

3.3項で示した領域A1, B1から垂直尾翼が突出しないこととし、図11の赤線で示した仰角5度における許容高より、尾翼高が24mのA380

では350m、12.5mのB737では190mの離隔を確保する必要がある。

実際の空港での設置を考えると、この距離を確保するのは困難である。航空機が常に存在するわけではないことを考慮し、領域B2への突出を許容すると、図11の緑線まで緩和され、尾翼高が24mのときに250mとすることができる。しかし、この場合、航空機の通過の際に第1フレネル帯を遮ることになるので信号強度が減衰する可能性がある。

4 おわりに

障害物との離隔距離、障害物の許容高の考え方について述べ、影響の度合により領域区分を行い、基準局間隔、航空機との離隔距離について検討した。

周辺障害物との離隔距離・許容高については、図9で示した領域A1, B1内の物件であれば、反射波による測距誤差、障害物による信号強度の低下は発生しない。建物などの固定構造物は、この領域内となるようにすべきである。離隔距離・許容高が確保できない場合、劣化した信号を排除するために衛星の仰角と方位角でマスクをすることで障害物の方向の衛星を使用しないようにできるが、使用可能衛星数の減少によりアベイラビリティが低下することが予想される。

基準局間隔については、隣接基準局を周辺障害物と考え、領域A1, B1から突出しないこととする。また、複数の基準局で同時に影響がないような配置とすることも必要である。

航空機の垂直尾翼との距離については、領域A1, B1から突出しないことが望ましいが、航空機が常には存在しないことから、領域B2までの突出を許容することで緩和できる。

GBAS地上装置の設置において、以上のような条件を考慮し、基準局の設置場所を選定する必要がある。

参考文献

- [1] 福島 荘之介, 齊藤 真二, “PPD(個人用保護デバイス)の地上型衛星航法補強システムへの影響,” 測位航法学会論文誌, Vol.6, No.1, pp.1-6, 2015.
- [2] 渋谷 茂一, “電波伝搬基礎図表,” コロナ社, 1982.