

1. GBAS VDB の覆域評価手法に関する検討

航法システム領域 ※毛塚 敦, 齊藤 真二

青山学院大学 須賀 良介, 平井 翔太郎, 黒田 哲史, 橋本 修

1 はじめに

電子航法研究所では、国内におけるGBAS (Ground-Based Augmentation System) 普及に向けて、運用課題の一つである地上局の設置技術に関する研究を行っている。GBASは精密進入を衛星航法により実現する次世代着陸システムで、地上からGPSの精度と安全性を向上するための補強情報、経路情報をVHF帯データ放送 (VDB:VHF Data Broadcast)により108~118MHzで航空機に向けて放送する[1]。自動着陸をサポートするため、上空だけでなく、滑走路にもサービスを提供する必要がある、ICAOのSARPs (標準及び勧告方式) では、滑走路12ft~36ftで-87dBmの受信電力が要求されている (受信アンテナ無指向性, 機体実装損失15dB含む) [2]。

空港面上の VDB の覆域評価は主に実験用車両による実測で行われるが、VDB アンテナの適切な設置位置を決定することは試行錯誤を伴うため、複雑となる。そこで、電波伝搬シミュレーションにより高精度に受信電力を評価できることが望ましい。

電波伝搬解析手法には、滑走路上の電界レベルを精度良く求められる高精度電磁界解析手法と幾何光学近似をベースとしたレイトレース法がある。しかし、高精度電磁界解析手法を広大な空港面全体に適用するためには、膨大な計算コストを必要とする。また、レイトレース法は、比較的高い周波数帯で用いられ、VHF帯では精度が劣化する。そこで本研究では、両者の利点を活用した新たな2つの電波伝搬解析手法を青山学院大学と連携して開発した。この2つの手法はGBASの設置状況に応じて使い分けることが可能である。

また、受信電力の低下・瞬断が生じた場合、GBAS 機上装置へどのような影響を与えるかを明らかにしておくことは、電磁界解析の精度要

件を議論する上で重要である。これらの評価を同様に実験車両により評価するのは複雑であるため、実験室で評価できるような測定系構築した。結果の一例とともに本稿にて示す。

2 GBAS VDB 伝搬解析における課題

複雑な構造における電波の振る舞いを計算できる高精度電磁界解析手法にはモーメント法、有限要素法、FDTD法などがあり、フルウェーブ解析手法と呼ばれている。高精度な計算が可能である反面、波長に比べて大きな構造物の計算には計算時間と計算メモリを必要とするため、空港面全体に適用するためには膨大な計算コストが必要となる[3]。

一方で、レイトレース法は電波の伝搬を光線近似で扱ったものであり、建物による電波の反射・回折を考慮した覆域計算評価が可能である。フルウェーブ解析に比べて、計算コストが小さく済む反面、建物構造が小さい場合には電波の波動的な振る舞いにより光学近似に誤差が発生する。誤差は設置状況に依存するが、数波長以下で光学近似に誤差が発生する場合、VDBの波長が3m程度であることを考慮すると、建物サイズおよび建物間の隙間が10m以下となる場合には誤差が発生する。

日本国内には複数の滑走路を有する空港があるため、GBAS運用においては1つのVDBにより複数の滑走路面にサービスすることが想定される。さらに地面反射による上空での受信電力低下を発生させないためにはVDBアンテナ設置高さを低くする必要がある。このような設置条件下においては、建物に反射および建物間を通過する電波の伝搬を、特殊な大型計算機を用いることなく汎用PCにより高精度に解析するアルゴリズムの開発が必要となる。

3 新たな高精度電波伝搬解析手法

3.1 VDB アンテナがターミナルビル付近に設置された場合

空港面の特徴として、旅客ターミナルビル、管制塔、消防施設およびハンガー等は比較的狭いエリアに密集している。また、建物以外のエリア（エプロン、着陸帯）には建物が存在せず、地形の起伏が存在するのみである。この特徴に着目し、新たな電波伝搬解析手法を考案した。

概要を図 1 に示す。計算時間とメモリを要する高精度電磁界解析手法を空港面全体に適用するのではなく、複雑な形状を有する建物エリア

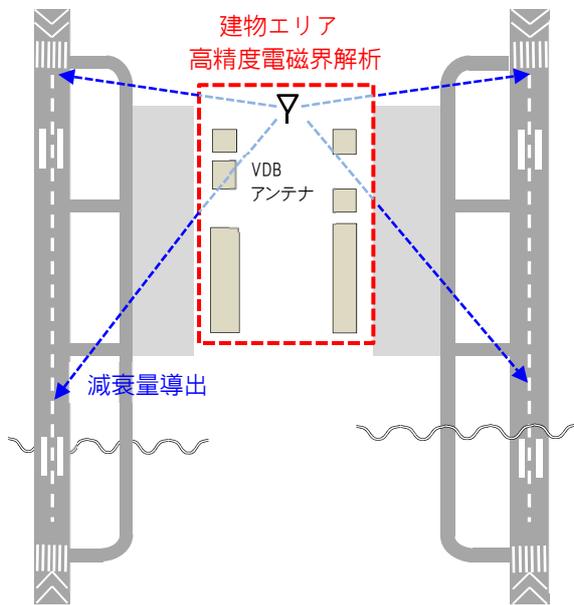


図 1 提案手法 1 : VDB アンテナがターミナルビル付近に設置された場合

のみに適用し、建物エリアからの複雑な放射パターンを正確に求める。誘導路や着陸帯における地面の起伏部分は主に減衰に寄与するため、それら減衰量を別途レイトレース法等により求め、建物エリアからの放射パターンに乗算し、最終的に滑走路上の電界分布を求める。

エプロン、誘導路、着陸帯のエリアは建物が存在しないため、滑走路上の航空機は VDB アンテナからの直達波と地面反射波の合成波を受信する。ここで、VDB は水平偏波を使用するため、地面反射の際に位相が反転する。一般的に長い距離を伝搬するほど直接波と地面反射波の行路長の差が小さくなり、直達波と地面反射波がほぼ逆位相になることから航空機が受信する合成

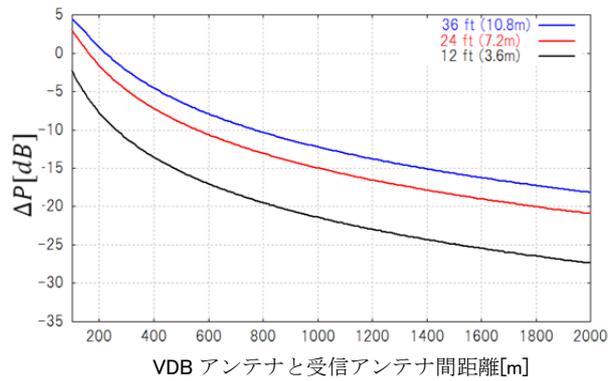


図 2 減衰量 ΔP

波は打ち消されて小さくなる。地面がフラットな場合の VDB アンテナから航空機までの距離に対する受信電力の減衰量 ΔP をレイトレース法により求めた結果を図 2 に示す。なお、送信アンテナ高さは 6m とし、受信アンテナ高さを 12 ~ 36 ft まで変化させている。これより、受信アンテナ高さが SARPs で規定された 12ft に近づくほど急激に減衰することが分かる。

高精度電磁界解析手法の放射パターンにより算出した滑走路上電力を P_d とした場合、レイトレース法等で求めた減衰量を ΔP を用いて、滑走路上で最終的に求められる受信電力 P_{sum} は

$$P_{sum}[dBm] = P_d[dBm] + \Delta P[dB] \quad (1)$$

となる。

本提案手法の精度に関しては文献[4]に示されている。文献[4]では、計算リソースの関係から実際よりも小さい空港を用いて評価を行っているが、本提案手法で計算した滑走路上受信電力が空港面全体を高精度電磁界解析で計算した場合と良好に一致しており、本提案手法の有効性が示されている。本手法を GBAS VDB の伝搬解析に適用することにより、膨大な計算リソースを必要とすることなく、汎用の PC にて高精度な覆域シミュレーションが可能となる。

3.2 VDB アンテナと滑走路間に建物が存在する場合

空港面のもう一つの特徴として、旅客ターミナル、貨物ターミナル、管制塔やその他建物が空港内制限エリアに面して一列に配置されている場合が多い。我々はこの特徴に着目し、前節

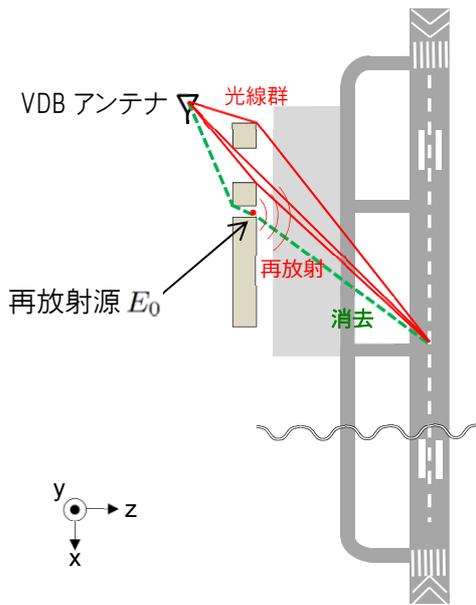


図3 提案手法2：VDB アンテナと滑走路間に建物が存在する場合

で提案した方法よりもさらに計算リソースを必要としない新たな電磁界解析手法を開発した。

レイトレース法は2章で述べた通り、電波の伝搬を光線で近似し、建物や地面による反射・回折する経路を算出し、複数の経路で到来する電磁界を受信点で重ね合わせることで受信電力を算出する方法である。そして本方法は、高精度電磁界解析に比べて計算コストを大幅に抑えることができるが、建物構造や建物間間隔が小さくなると計算誤差が発生する。狭い建物間から放射される電磁波は、平面波が維持されず、球面波として再放射する。そこで、図3に示すように、レイトレース法で各光線を求めた後、建物間隔が狭い箇所については、受信点での重ね合わせを行わず、別途再放射波源を導出し、建物間から再放射された電磁界を重ね合わせる。なお、再放射は式(2)により算出する。

$$E = -jk \frac{e^{-jkr}}{2\pi r} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} E_0 e^{jk y \sin \theta} dx dy \quad (2)$$

ここで、 E_0 は再放射源の複素電界、 d は建物間距離、 h は建物高さ、 r は再放射位置から滑走路受信点までの距離、 θ は建物正面方向と滑走路受信点間の角度である。本手法は空港面のように建物が概ね一列に並んでいる場合において適用しやすい。

参考文献[5]に本手法の有効性を示す。文献[5]では、まずは基本原理を確認するため、再放射源における再放射電力をフルウェーブ解析により算出している。本提案手法と電波暗室におけるスケールモデル実験の結果が良好に一致したことから、本提案手法の有効性が確認できた。なお、再放射源の電力をフルウェーブ解析ではなく理論的に算出できるようにすることが課題である。

4 受信電力低下時のシステム性能評価手法

前節では滑走路面上の受信電力を計算により高精度に評価する方法について述べたが、実際に覆域内において受信電力が低下・瞬断した際にGBAS機上装置へどのような影響を与えるかを明らかにすることは電磁界解析の精度要件を議論する上で重要となる。電界レベル測定と同様、実際の空港にて評価することは繁雑であるため、実験室にて評価可能な評価系を構築した。

測定系および測定の様子を図4、図5に示す。

2台のRFレコーダを用い、GBAS実験局が設置されている仙台空港付近にて同期して取得したGPSデータとVDBデータを再生する。VDB

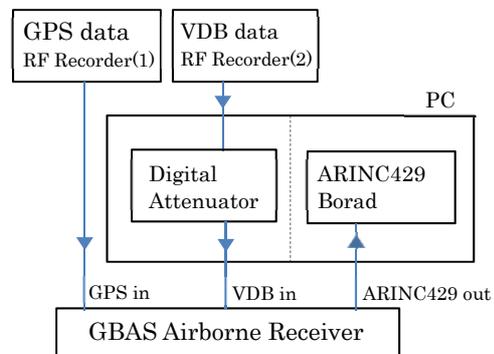


図4 受信電力低下・瞬断時のGBAS機上装置への影響測定系

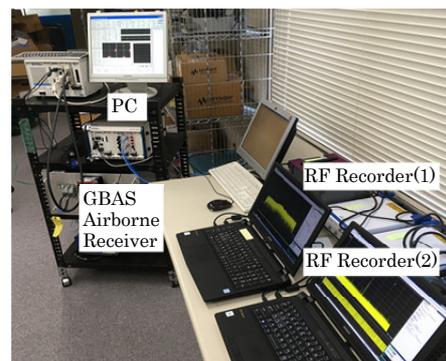


図5 測定の様子

データ側にはデジタルアッテネータを挿入し、時間軸上でソフトウェアにより減衰量を制御することで、時間軸上での受信電力低下や瞬断を模擬している。図5に測定の様子を示す。

結果の一例として、受信電力が一定時間大きく低下した場合においてGBAS機上装置が発出するコース偏移表示での警報 (Failure Warning) の発生率実測値を図6に実線で示す。警報は機上受信機が出力するSSM (Sign/Status Matrix) を通じて正常動作をしていない場合に出力される[6]。すなわち、電力が瞬断された場合において、GBAS機上受信機が使用できない状態が発生した確率を示している。警報の発生はVDBデータが消失するタイミングにより変化するため、ランダムな瞬断で多くの回数を測定した。図6の実測結果より、VDB受信時間が2.9秒以上で瞬断されると警報が発生し、3.4秒の瞬断で100%の警報発生率となることが分かった。

RTCA DO-253D (MOPS: 最低運用性能基準) [7]では、TYPE1メッセージが3.5秒以上経過した場合には偏差出力を無効にすべきである旨記述されている。TYPE1メッセージはVDBから2Hz (0.5秒で1回) で放送され、1スロットが最大0.0625秒であることを考慮すると、3秒弱の瞬断から警報が発生し、3.5秒弱で100%の警報が発生すると考えられる。

スロット長を0.0625秒とした場合の本想定を図6点線にて示す。実線で示す実測値と比較すると、よく類似した傾向を示していることから、警報発生の要因はTYPE1メッセージの消失が支配的であると考えられる。そして、図6の実測値より、2.8秒までの単一の遮断であるならば機上装置がコース偏移表示における警報を発出しないことが分かった。

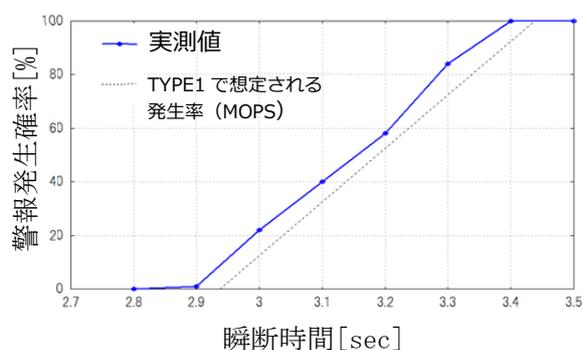


図6 受信電力遮断時間と警報発生率

この結果に対して着陸時の航空機の最低速度を考慮することにより滑走路覆域における部分的な受信電力喪失がGBAS機上装置へ影響を明らかにすることが可能となる。また、受信電力の覆域の劣化が連続する場合[8]の警報発生の可能性や、さらには建物だけでなく、誘導路上を移動する航空機 (尾翼) による警報発生の可能性を明らかにすることができる。

5 まとめと課題

本稿では、GBAS普及に向けた運用課題の一つである設置技術に関して、VDB覆域評価のための課題とその解決方法としての新たな電波伝搬解析方法を示した。また、受信電力の低下・瞬断が発生した際にGBAS機上受信機がどのように動作するかを実験室にて確認可能な測定系を紹介し、結果の一例として瞬断の許容時間を明らかにした。今後はこれら技術を実際の空港に適用し、評価手法の有効性を検証することが課題である。

参考文献

- [1] 杉本 末雄, 柴崎 亮介 (2010年9月), “GNSSハンドブック,” 朝倉書店, pp235-242.
- [2] ICAO SARPs Annex 10, Volume I, pp3-70, Seventh Edition, July 2018.
- [3] W. Dunkel et al., ”VDB Ground Coverage Simulations for Frankfurt Airport Montreal,” NSP JWG/4-IP/4, April 2019
- [4] 須賀, 毛塚, 橋本 (2019年6月), “空港面に適したVHF帯ハイブリッド電波伝播解析,” 電子情報通信学会論文誌, Vol.J102-C, No.6, pp.1-7.
- [5] 平井, 須賀, 毛塚, 橋本, “開口面法とレイトレース法のハイブリッド解析による空港面電波伝搬解析法の提案と有効性評価,” 信学技報 EST118 (398), pp.149-153, 2019年1月
- [6] ARINC CHARACTERISTIC 755-5, Multi-mode Receiver (MMR) –Digital, February 11, 2005
- [7] RTCA MOPS DO-253D, July 13, 2017
- [8] 毛塚, 齋藤, 吉原, “新石垣空港におけるVDBの覆域評価,” 電子航法研究所発表会, 2015年