

7. 広域マルチラレーションの評価試験結果

監視通信領域 ※島田 浩樹，宮崎 裕己，古賀 禎，角張 泰之，二瓶 子朗

1. まえがき

我が国の首都圏空港では、滑走路や誘導路の増設、新たなターミナルビルの整備等により空港容量の拡張が進められている。空港容量を拡張するには、これらのインフラ整備に加えて航空交通管制の高度な運用方式の導入も必要であり、成田国際空港では平行滑走路の同時離着陸方式の導入が進められている。

このような高度な運用方式を実施するには更なる安全の確保が重要であり、空港周辺の空域を飛行する航空機を高頻度かつ高精度で測位する航空機監視システムが必要不可欠となる。現在、空港周辺空域の監視は、二次監視レーダー（SSR: Secondary Surveillance Radar）を利用して行われているが、位置の更新頻度が低いことや空港近傍で性能が低下するなどの課題が指摘されている。このため、SSRの課題を解決できる監視技術が必要であり、その候補として広域マルチラレーション（WAM: Wide Area Multilateration）が期待されている。

一方、我が国における「将来の航空交通システムに関する長期ビジョン（CARATS）」では、変革の方向性として、軌道ベースの運用（TBO: Trajectory Based Operation）への移行が示されている。このTBOでは、航空機の現在位置と将来位置（空間、時間）を「正確に把握」することが最重要であり、これを実現する監視技術としてもWAMの活用が期待されている。

このような背景から当研究所は、我が国で導入が期待されているWAM技術の確立を目的として、WAM実験装置（以下、実験装置とする）の試作・評価を進めている⁽¹⁾。本実験装置は、WAMの課題となる「高性能化」を最重点目標として試作・評価を行っている。これまでに、東京国際空港（以下、羽田空港とする）周辺の空域を監視対象として実験装置を配置して、WAM諸機能の確認と（最小構成での）基本性能の検

証を目的とした初期評価を実施した⁽²⁾。次に、初期評価の結果を踏まえて実験装置を拡張して評価試験⁽³⁾を実施した結果、性能向上を確認した一方、遠方において十分な性能（位置精度・検出率）が得られていないとの課題も判明した。このため現在は、遠方における性能向上を目的に適用した対策の評価を進めている。

本稿では初めにWAMの概要を述べ、次に実験装置の特徴や配置について説明する。そして、前述した課題を克服するための対策を適用した評価結果を報告する。

2. WAMの概要

2.1 測位原理

図1にWAM測位の概要を示す。WAMでは、航空機に搭載されたトランスポンダが送信するSSR応答信号やスキッタ信号⁽⁴⁾の到達時刻を複数の受信局で測定する。次に、同じ航空機からの信号をグルーピングし、受信局間の到達時間差を求めて、航空機と各受信局との距離差に変換する。そして、「距離差が一定」との条件からなる双曲面同士の交点を求めることで航空機の位置を算出する。3次元の測位を行うには、最低4局の受信局で信号を検出することが必要となる。

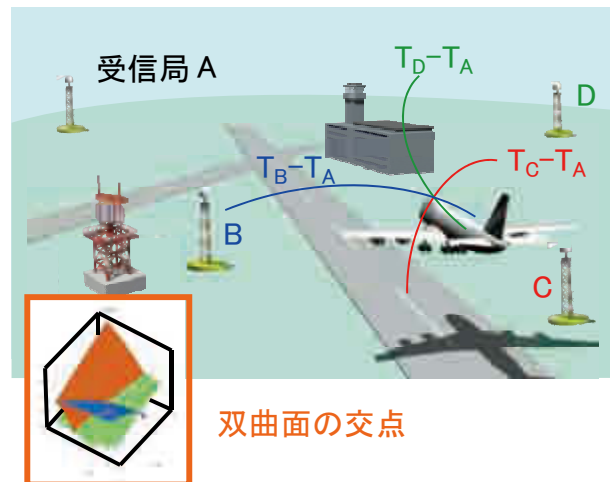


図1 WAM測位の概要

2.2 高い性能を得るには

WAMの測位誤差 (σ_p) は、距離差（信号到達時間差）の測定誤差 (σ_d) と、航空機と受信局アンテナの位置関係で決まる精度劣化指数（DOP: Dilution Of Precision）を乗じることで概算でき、一般的に以下の式（1）で表される。

$$\sigma_p = \sigma_d \times \text{DOP} \quad \dots (1)$$

ここで、 σ_p と σ_d は標準偏差の値である。 σ_d は時刻検出の分解能に依存し、高い分解能を得るには信号検出のサンプリング周波数を増加させることが必要である。また、各受信局間の時刻を正確に同期させることも重要である。一方DOPは、図2のDOP値の分布例が示すように、受信局アンテナが航空機を取り囲む配置となる場合に良好な（小さい）値が得られる。このため、広い覆域に対して良好なDOPを確保するには、受信局を広範囲に配置することが必要になる。

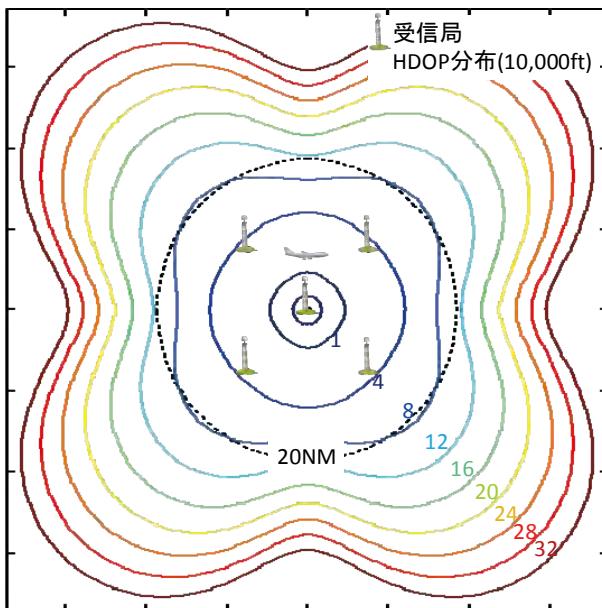


図2 DOP値の分布例

2.3 高性能化への対策

広い覆域に対して安定した性能を得るには、上述したとおり受信局を広く配置することが有効である。しかしながら、受信局数の増加は整備や維持に係る費用の増大を伴うため、少ない受信局数で安定した高い性能を得るかが課題となる。高性能化を図るにあたり有効と考えられる対策例を以下に示す。

2.3.1 質問機能の活用

WAMは基本的に受動監視方式であるが、質問機能を活用した性能改善が可能である。具体的には、信号干渉により検出ロスが発生した場合、当該航空機に対してSSR個別質問を行い、その応答信号を利用して測位を行うことで検出率の向上が可能となる。

2.3.2 測位計算方式の改良

前項の質問機能に関連して、質問送信から応答受信までの時間を測定して、求めた距離も利用して測位を行うこと（以下、レンジング測位とする）、航空機が送信する高度情報を利用して2次元測位を行うことで、遠方での性能改善が期待できる。

2.3.3 追尾機能の活用

悪いDOP値となる受信局の組み合わせや、信号干渉により検出タイミングが正確でない場合の測位結果は大きな測位誤差が生じる。この場合、当該測位結果を棄却することや、平滑処理を利用することで誤差を軽減できる。

3. WAM実験装置

3.1 実験装置の構成

図3に実験装置の構成を示す。実験装置は送受信局、受信局、ターゲット処理装置から構成され、各装置は広域ネットワーク（WAN）で接続される。なお、当研究所は日本電気株式会社と共同研究契約を締結して、WAMを用いたモードA/Cトランスポンダ搭載機の監視に関する研究を進めている。実験装置の受信局6～8は、本共同研究で整備した日本電気株式会社の設備品である。

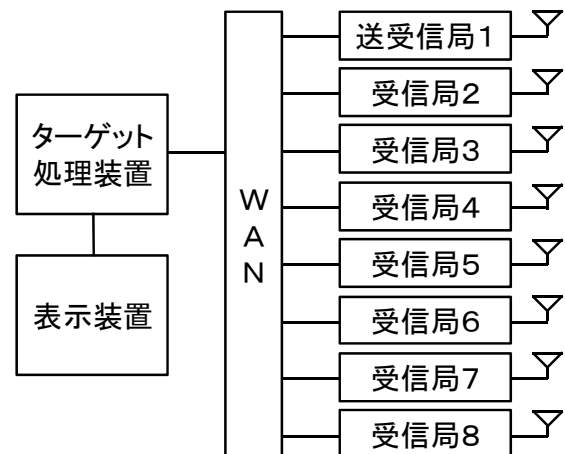


図3 実験装置の構成

3.2 各装置の機能概要

3.2.1 受信局

受信局は、SSR 応答とスキッタ信号を受信して、信号検出時刻を測定するとともに信号内容を解読し、これらをターゲット情報として送出する。なお、時刻検出では2ナノ秒サンプリングを採用しており一般的な分解能（10ナノ秒程度）よりも高精度な時刻検出が期待できる。

3.2.2 送信局

送信局は、航空機に対してSSR質問を送信する。本実験装置では高性能化を図るため、質問機能を活用したレンジング測位ができる設計とした。

3.2.3 ターゲット処理装置

ターゲット処理装置は、受信局から送出されたターゲット情報を相関処理してマルチラレーション測位、送信局への質問制御、レンジング測位、および追尾処理などを行う。受信局間の時刻同期には、一般的なGPS（Global Positioning System）方式よりも高い同期精度が実現できるGPSコモンビュー方式を採用した。GPSコモンビュー方式とは、受信局間で同時に同一のGPS衛星からの信号を受信することにより、衛星が持つ時計の誤差を相殺して、高精度な時刻同期を図る方式である。

3.3 受信局の配置

実験装置は、羽田空港周辺の空域を対象に受信局を配置している。設定覆域は空港用SSRと同等の60NMとした。本覆域を得るために、各受信局の最低受信感度を -85dBm （受信距離：100NM相当）に設定した。図4に受信局の配置を示す。受信局配置は、羽田空港の出発・到着機が多い南西方向の位置検出を重視した。前年度に報告した評価は、受信局7局構成（受信局1～7、受信局3は大和）で実施したが、特に遠方において性能要件を満たしていないエリアが確認された。このため、遠方での性能改善を図るためにシステム拡張を行った。まず、受信局1に送信局を追加して送受信局とした。次に、受信局8を稼働させた（受信局1～8、受信局3は大和）。さらに、受信局3を大和から箱根に移設して更に広い配置とした。（以下、受信局7局構成を7局、移設前の受信局8局構成を8局（大和）、移設後を8局（箱根）とする。）

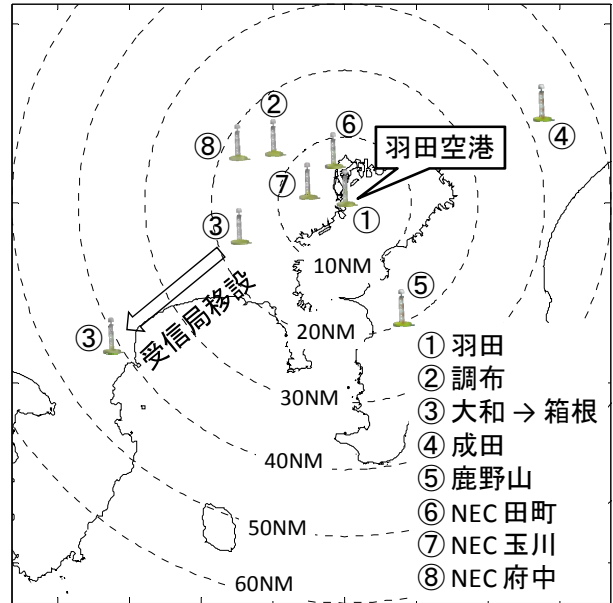


図4 受信局の配置

4. WAMの評価試験

4.1 評価方法

評価項目は測位誤差（平面方向）と検出率とした。規定値として、欧州が策定したWAM監視性能要件⁽⁶⁾を参照した。評価対象航空機にはエアライン機を利用した。測位誤差は二乗平均誤差（RMS）値から算出しており、真位置には航空機から送信されるADS-B⁽⁶⁾位置情報を利用した。ADS-B位置はGPSを利用して測位された情報であるがGPS単独測位による誤差や情報を送信するまでの遅延等による誤差が含まれるため、本測位誤差は参考値である。WAMの測位誤差は、航空機の飛行ルート、飛行高度、および航行速度に依存して変化する。このため測位誤差は、一定の時間に設定覆域内を飛行した航空機（ADS-B搭載機）毎に誤差を算出して、その中央値を評価した。一方、検出率は更新時間4秒内の測位の有無から算出した。WAMの性能は受信局配置（エリア）に依存するため、測位誤差および検出率ともに羽田空港を中心とした距離区分毎に解析した。また、誤目標（予測位置に対して1,000m以上離れた測位結果等）は排除した。

4.2 評価結果

4.2.1 測位誤差

表1に航空機数が多い時間帯（10時台）1時間分の解析による測位誤差値を受信局配置毎（7

局，8局（大和），8局（箱根））に比較して示す。表1から，対象覆域となるエリアを広く取り囲むことにより，測位誤差が減少していることがわかる。本結果から，受信局配置は測位誤差の改善に重要な要素であることを実証できた。

表1 受信局配置毎の測位誤差値（RMS）

距離	7局	8局（大和）	8局（箱根）
2～10NM	55.6m	40.0m	38.4m
10～20NM	95.4m	69.9m	54.9m
20～30NM	227.0m	180.6m	99.2m
30～40NM	518.6m	446.8m	234.8m
40～50NM	589.6m	493.4m	327.6m
50～60NM	887.7m	691.0m	424.9m
ADS-B 機数	115 機	133 機	125 機

次に，高性能化への対策である，高度情報を適用した2次元測位による評価結果を示す。本評価では，典型的なルートを飛行する羽田空港への到着機（ADS-B搭載機）を1機選定して，8局（大和）配置において3次元および2次元測位による各誤差を比較した。高度情報は拡張スキッタ信号に格納された気圧高度値を利用した。ただし，気圧補正を行っていないため厳密な値ではない。2次元測位は，検証用プログラムを作成して，収集したログデータからオフラインで位置を算出した。図5に対象航空機の航跡を（a）高さ方向のDOP（VDOP）分布，（b）平面方向のDOP（HDOP）分布とともに示す。各DOP分布は対象高度を10,000ftに設定している。また図6に図5で示した航跡のADS-B高度とWAM高度の比較およびADS-B高度により計算したDOP（VDOP，HDOP）のグラフを示す。図5（a）と図6から20NM付近のVDOP値は低く，高度誤差はほとんど生じていない。しかし20NM以内は最終進入で連続的に高度を下降し，それに伴いVDOP値も悪化しており，もう一方の20NM以遠でもVDOP値は次第に上昇していく。VDOP値に連動する形で，高度誤差も大きくなる。高度方向の測位誤差の発生が平面方向の測位誤差の悪化に影響を与えていると考えている。

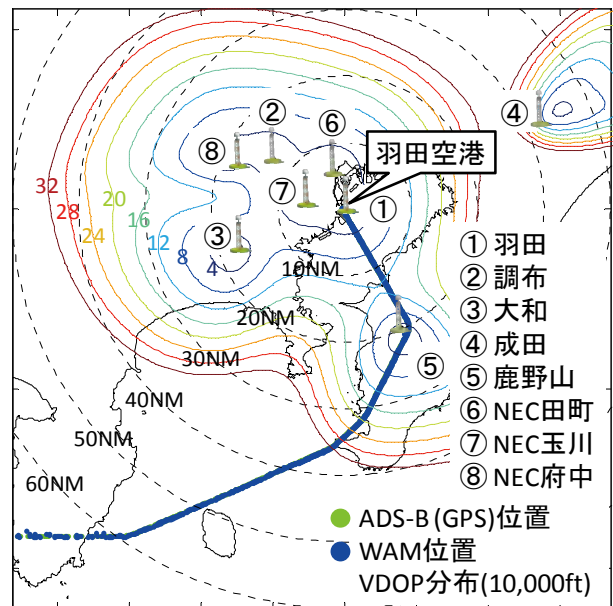


図5（a） 到着機航跡とVDOP分布

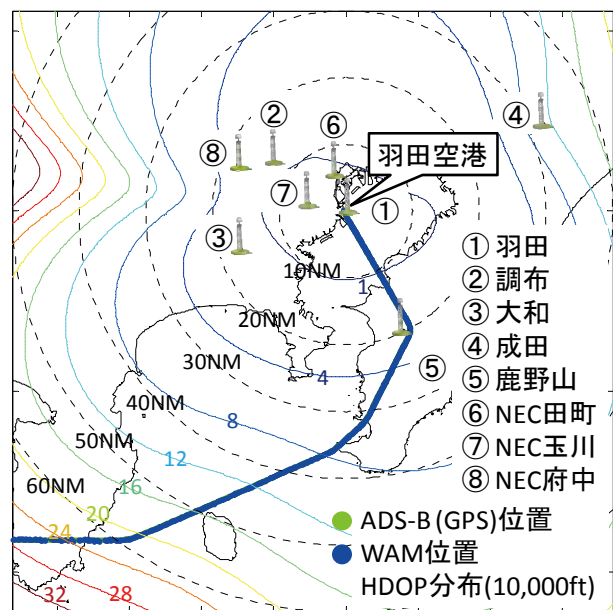


図5（b） 到着機航跡とHDOP分布

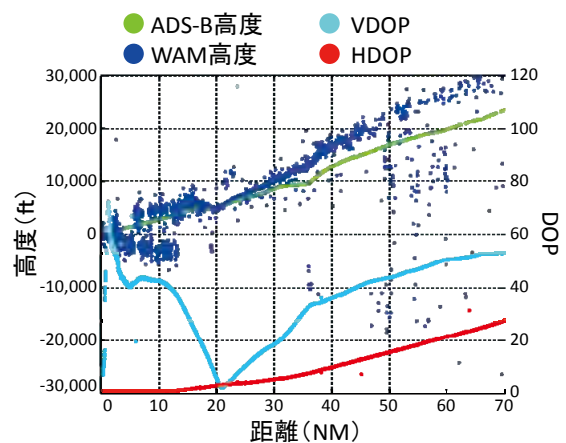


図6 高度と各DOPの関係を示すグラフ

図7に実験装置による3次元測位と気圧高度を適用した2次元測位における測位誤差（平面方向）の距離に対する分布を示す。また表2に距離区分毎の測位誤差値の比較を示す。図7と表2から、20NMまでの測位誤差は類似した傾向であるが、20NM以遠では2次元測位は、3次元測位と比較して測位誤差が減少傾向にあることがわかる。この傾向は図5(b)と図6に示すHDOP値の変移へと近づいていることから、平面方向の測位誤差が増大する一因として、高さ方向の測位誤差が大きく影響しているものと考えられる。特に40~50NMのエリアでは、2次元測位による測位誤差は性能要件を満たす値が得られている。本結果から、高度情報を適用した2次元測位方式は、測位誤差の改善に有効であると考えられる。

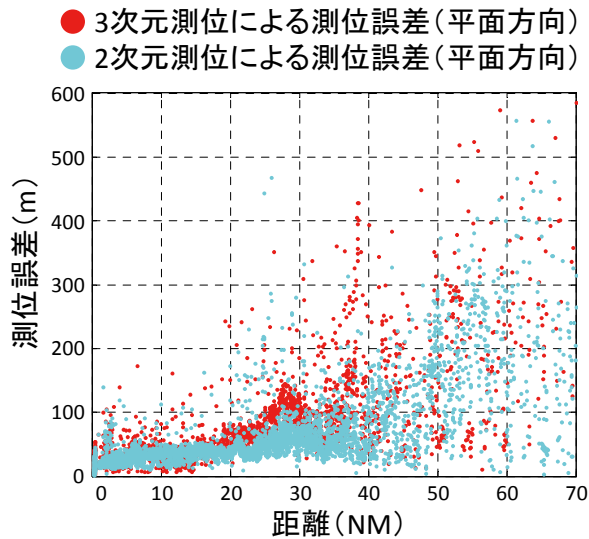


図7 測位誤差（平面方向）の分布

表2 3次元と2次元測位による測位誤差値(RMS)

距離	3次元測位	2次元測位
2~10NM	36.5m	32.6m
10~20NM	44.2m	40.7m
20~30NM	94.8m	66.2m
30~40NM	138.8m	74.2m
40~50NM	161.0m	130.4m
50~60NM	229.7m	207.6m
性能要件	150m (RMS) 以下	

4.2.2 検出率

実験装置の構成において説明したとおり、羽田受信局に送信局を接続して、送受信局とする拡張を加えている。このため、今回の評価では高性能化への対策として、質問機能を活用した検出率の評価を実施した。本評価では、個別質問に対する応答からも測位を行う方式（以下、アクティブ方式とする）と、これまでの受動監視方式（以下、パッシブ方式とする）とで検出率を比較した。本評価におけるアクティブ方式では、覆域内ターゲットに対して毎秒1回の質問頻度でモードS個別質問（UF4：高度要求）を行う設定とした。なお、受信局構成については8局（箱根）配置である。図8に対象航空機の航跡を示す。緑はアクティブ方式による測位、青はパッシブ方式による測位の航跡を示している。実験装置の質問覆域は評価試験時では40NMで設定していたが、図8から50NM付近まで質問が到達していることがわかる。表3に図8で示した航跡に対する検出率の比較を示す。パッシブ方式の場合、遠方（40~50NM）では性能要件を満たしていないが、アクティブ方式では測位数の増加により、性能要件を満足する結果が得られている。本結果から、質問機能の活用は遠方における検出率の改善に有効であることを確認できた。

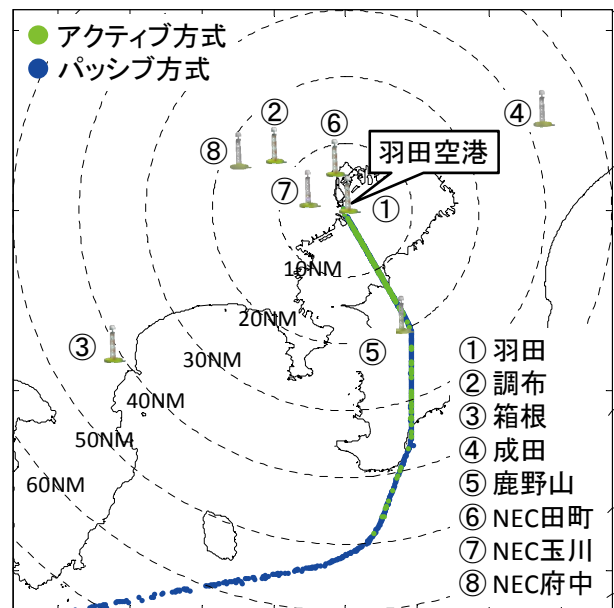


図8 8局（箱根）構成での到着機航跡

表3 質問制御の有無による検出率

距離	パッシブ方式	アクティブ方式
2～10NM	100 %	100 %
10～20NM	100 %	100 %
20～30NM	100 %	100 %
30～40NM	100 %	100 %
40～50NM	96.4 %	100 %
50～60NM	91.8 %	91.8 %
性能要件	97%以上	

5. まとめ

本稿では、WAM および実験装置の概要を説明して、昨年度に実施した評価試験で判明した課題に対してシステム拡張を行い、その評価試験の結果を示した。測位誤差については、受信局配置を広げることで誤差が減少することを実証した。また、高度情報を適用した2次元測位を行うことにより、特に遠方において測位誤差が減少することが示された。一方検出率は、質問機能の活用により測位回数を増加させることで、性能向上が可能であることを確認できた。今回の評価結果では、測位誤差と検出率ともに40～50NMにおいては改善効果が確認できた一方、50～60NMにおいては性能要件を満たす効果が得られていない。このため実験装置に対して、更なる高性能化への対策を適用する計画である。本対策としては、質問機能によるレンジング測位、追尾機能の活用、および受信局組み合わせ毎の最適解算出などを検討している。

今後は、上述した対策を実験装置に実装して評価試験を行い、更なる性能検証を進めていく計画である。

[謝辞]

実験装置の設置・調整、ならびに評価試験の実施において、多大なご協力をいただきました関係各位に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- [1] 宮崎他：“広域マルチラテレーションの基礎実験結果”，第10回電子航法研究所発表会講演概要，平成22年6月
- [2] 宮崎他：“広域マルチラテレーションの評価試験”，第11回電子航法研究所発表会講演概要，平成23年6月
- [3] 島田他：“広域マルチラテレーションの評価試験”，第12回電子航法研究所発表会講演概要，平成24年6月
- [4] ICAO: “Aeronautical Telecommunications”, Annex10 Volume IV, Fourth Edition, July 2007.
- [5] EUROCAE: “Technical Specification for Wide Area Multilateration (WAM) System”, Version 1.0, ED-142, October 2009.
- [6] RTCA: “Minimum Operational Performance Standards for 1090MHz Extended Squitter ADS-B and TIS-B”, RTCA/DO-260B, December 2009.