

## 2.ADS-B 方式高度維持性能監視の評価結果

監視通信領域 ※松永 圭左, 宮崎 裕己

### 1 はじめに

国際民間航空機関 (ICAO) においては、高度 29,000 から 41,000 フィートの空域にて、航空機の垂直方向の管制間隔を従来の 2,000 フィートから 1,000 フィートに短縮する短縮垂直間隔 (RVSM; Reduced Vertical Separation Minimum) 方式を 1994 年に制定しており[1]、日本の管制空域では 2005 年から運用が始まっている[2]。RVSM 運航の導入による効果として、使用フライトレベルが増えることによる空域容量の増加、使用高度の選択肢が増えることによる消費燃料・飛行時間の節減、航空路交差点で発生する高度変更クリアランスの減少等がある。

RVSM 運用を導入した場合は、地域監視機関 (RMA; Regional Monitoring Agency) が、担当する空域を飛行する航空機の高度維持性能の監視を含む継続的な安全性評価を行うこととなっている[3]。日本においては、地域監視機関として国土交通省航空局 (以下、航空局) が地上設置型高度監視装置 (HMU; Height Monitoring Unit) を瀬戸内、仙台、新潟の 3 箇所に整備し、高度維持性能監視を実施している[4]。

航空機の高度維持および航空管制は、気圧高度に基づいているため、航空機高度維持性能監視では、航空機の気圧高度計の誤差を測定する必要がある。誤差の測定は、飛行中の航空機の気圧高度計の高度を、別途計測された幾何高度と比較することにより行う。現在、航空局が整備している HMU では、幾何高度の計測に、マルチラテレーション (MLAT; Multi-Lateration) 方式 (航空機の応答装置からの信号を、地上に複数配置された受信局で受信し、各受信局間の受信時刻の差から幾何高度を計測) が用いられている。一方、異なる方式の高度監視システム (HMS; Height Monitoring System) として、ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast ; 放送型自動位置情報伝送・監視機

能) データに含まれる GNSS 幾何高度情報を用いる高度監視システム (ADS-B 方式 HMS ; AHMS) が、豪州等により開発・運用されている。ADS-B 方式 HMS は、マルチラテレーション方式に比べて広範囲の空域を飛行する航空機のデータを収集できる利点があり、また、受信局数の低減、および時刻を精密に同期するための装置が不要であることから、整備・運用コストが低くなることが見込まれる。

電子航法研究所において、平成 26 年度に ADS-B 方式 HMS の誤差要因調査を実施した結果、主要な誤差要因として、高度情報の量子化誤差、気象データの誤差、および GNSS 幾何高度の基準 (ジオイド高または楕円体高) の判定の誤り、があることが判明した[5]。特に幾何高度の基準判定および気象データは地域的な特性があるため、我が国において ADS-B 方式 HMS を導入した場合の性能評価を行う必要がある。このため、電子航法研究所では ADS-B 方式 HMS の試験システムを整備し、航空機から放送される ADS-B データの収集および HMS の性能評価を行っている。

### 2 高度維持性能監視の概要と HMS

#### 2.1 高度維持性能監視の概要

航空機の高度維持および航空管制は、気圧高度情報に基づいており、高度維持性能監視における誤差 (高度誤差) は、図 1 のように分類される[6][7]。航空管制で割り当てられている気圧高度 (割当高度) と実際に航空機が飛行している真の高度の差が、高度維持誤差 (TVE; Total Vertical Error) である。TVE は飛行技術誤差 (FTE; Flight Technical Error) と気圧高度計誤差 (ASE; Altimetry System Error) から成る。FTE は機上の装置で用いられる気圧高度と割当高度の差である。ASE は、機上装置で用いられる気圧高度と真の高度の差である。

高度維持性能監視においては、RVSM 空域の運航承認を得た航空機（RVSM 承認機）に対し、高度誤差が以下の条件

- ・ TVE  $\geq$  90[m] (300[ft])
- ・ ASE  $\geq$  75 [m] (245[ft])

に該当する航空機を RVSM 非適合機として確認する必要があることが規定されている[6][7]。

RMA が高度維持性能監視を実施する際には、高度測定誤差の要件として、TVE の測定誤差の標準偏差を 15[m] (50[ft])以下とすることが規定されている[6][7]。

## 2.2 HMS における高度誤差の測定方法

高度誤差を求めるためには、航空機の気圧高度計で計測した高度に加え、真の高度が必要である。真の高度を測定するために、HMS では、気圧高度計とは異なる方法で計測された幾何高度を用いる。(図 2)

航空機から周期的に放送される ADS-B データには、航空機の緯度・経度、気圧高度、および幾何高度情報が含まれている。ADS-B 方式 HMS では、ADS-B データ、気象データ、およびジオイド高データを用いて、各航空機の高高度誤差の算出処理を行う。

### ○ 気圧高度計幾何高度

気圧高度は、気圧高度計で計測した気圧値を ICAO の標準大気モデル（平均海水面≡ジオイドでの、気圧=1,013.25[hPa]、気温=15[°C]）[8]で一意的に変換した高度値である。すなわち、気圧高度値は気圧値の代替表現であり、一意に気圧値に変換される。

この気圧値を実際の幾何学的な高度に変換す

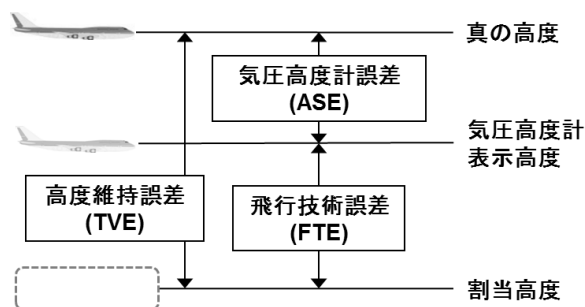


図1 高度維持性能誤差分類

るために気象データを用いる。気象データは、実際に計測された観測値に基づき3次元モデルで生成されており、緯度経度格子点の上空における気圧と幾何高度の対応が示されている。

変換された幾何高度は、ジオイド面からの高度 (HAG; Height Above Geoid) である。これを、GPS 等の GNSS (Global Navigation Satellite System) の座標系で使用されている回転楕円体 (楕円体面) からの高度 (楕円体高; HAE; Height Above Ellipsoid) に変換するために、ジオイド高データ (経緯度地点における楕円体面からジオイド面までの幾何高度データ) を用いる。

これらの処理により、気圧高度計幾何高度が求まる。

### ○ GNSS 幾何高度

真の高度値として、ADS-B 方式 HMS では、機上の GNSS 受信機で計測された幾何高度を用いる。GNSS 幾何高度は、航空機から放送される ADS-B データに含まれており、地上に設置した ADS-B 受信機で収集する。

### ○ ASE (気圧高度計誤差)

気圧高度計幾何高度と GNSS 幾何高度との差が ASE となる。なお、ASE 値の算出にあたっては、気圧高度計の計測誤差、GNSS 幾何高度の計測誤差、およびその他の誤差の影響を軽減するため、割当高度が一定となる飛行 (レ

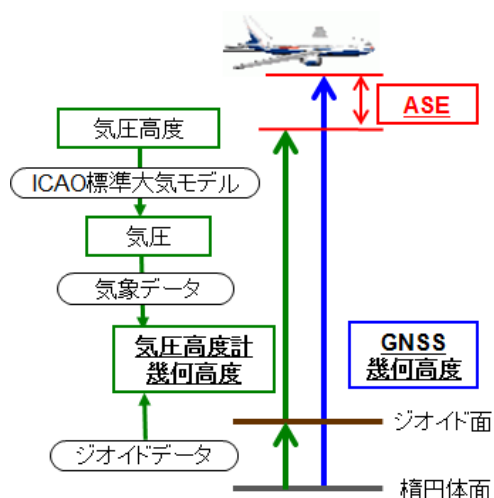


図2 ASE 算出処理説明図

ベルフライト) 区間のデータの平均値を ASE 値とする。

### 3 ADS-B 方式 HMS 試験システム

我が国において ADS-B 方式 HMS を導入した場合の性能評価を行うため、電子航法研究所では、平成 27 年度から ADS-B 方式 HMS の試験システムを整備し、AHMS の性能評価を行っている。

ADS-B データ収集のために、電子航法研究所の本所(調布)、岩沼分室(岩沼)、および大阪航空局高松空港事務所の3箇所に ADS-B 受信システムを設置し、飛行している航空機からのデータ収集を行っている。(図 3,4)

収集データを用いた高度誤差評価を実施するために、誤差評価ツールを開発した。

ジオイドデータは、EGM2008 データを用いた[9]。データベースの内容は、経緯度 1 分の格子点データとなっており、線形内挿補間して使用する。

気象データとしては、気象庁のメソ数値予報モデル GPV (MSM) データを用いた[10]。MSM データは数値予報モデルによる予測値で、3 時間毎に配信され、日本周辺の経緯度 0.125 度×0.1 度の格子点における 16 気圧面(1000~100 [hPa]) のジオポテンシャル高度等の値が示されている。経緯度、気圧、時刻に関しては内挿処理しており、ジオポテンシャル高度から幾何



図 3 ADS-B 受信システム  
(高松空港事務所)

高度への変換は、文献[8]第 2.3 節の式(9)に従っている。

### 4 ADS-B 方式 HMS の主要な誤差要因

ADS-B 方式 HMS の誤差要因を調査した結果、主要な誤差要因として、以下に示す項目が判明した[5]。ADS-B データを用いた ASE 測定には、下記の誤差要因の考慮が必要となる。

#### (1) 高度情報の量子化誤差

ADS-B データに含まれる気圧高度および GNSS 幾何高度の値は、25[ft]単位の値となっている[11]。量子化誤差は一様に分布していると仮定した場合、十分なデータ数を平均化することにより除去できる。

#### (2) 気象データに含まれる誤差

気圧高度を幾何高度に変換するために、気象データを用いる。観測点の配置や、気象状況、気象モデルの特性等により、誤差が生じる可能性がある。このため、季節・時刻・場所、気象データの生成/予報時刻から時間経過による劣化、および気象条件等による誤差の影響を分析する必要がある。

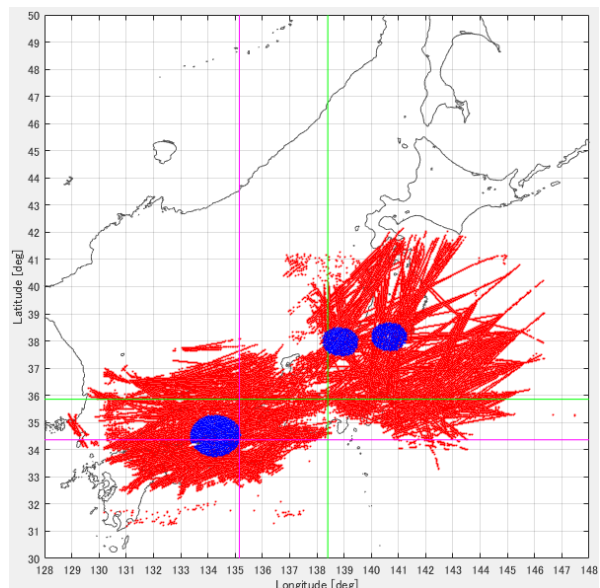


図 4 航跡データ (1 日分)  
赤: 試験システムの ADS-B データ  
青: 航空局 HMU のデータ

### (3) 幾何高度の基準の判定

ADS-B データに含まれる GNSS 幾何高度は、航空機の装置により HAG または HAE のいずれかの値が送信されている。しかしながら、ADS-B データにはどちらの幾何高度かを示す情報は含まれていない。このため、AHMS において幾何高度基準を判別する必要がある。

ASE 値は一定であることを前提としているため、各航空機について地理的にジオイド高が異なる地点を飛行している時のデータを得ることにより、ASE 値が一定になる高度基準が正しいと判別する。

## 5 誤差評価ツールを用いた解析

### 5.1 誤差評価ツールの表示内容

ADS-B 方式 HMS の性能評価を実施するために、誤差評価ツールを開発した。図 5 に誤差評価ツールの解析結果の表示例として、1 航空機の高度誤差に関するデータを示す。

図 5 には、航空機の航跡、気圧高度、ASE 等の内容が表示されている。以下に、各表示内容を説明する。

### (a) 入力データおよび出力内容の設定

時間範囲、航空機の種類、地図表示範囲、ジオイド高表示、気象データ表示の設定を行う。

### (b) 航跡表示

### (c-1) ADS-B データ内容表示

### (c-2) HMU データ内容表示

### (d) 気圧高度 (時系列)

### (e) ASE (時系列)

ADS-B データに関しては、GNSS 幾何高度の基準が、楕円体面として算出した高度 (HAE) とジオイド面として算出した高度 (HAG) の両方の ASE を表示している。

HMU データに関しては、現時点では、TVE 値を表示する設定となっている。

### (f) ASE\_HAE・ASE\_HAG - ジオイド高の対応

### (g) 気圧高度の度数

### (h) ジオイド高の度数

### (i) ASE\_HAE・ASE\_HAG の度数

### (j) ADS-B データの FTC (Format Type Code) [11] の度数

### (k) ADS-B データの NIC (Navigation Integrity Category) [11] の度数

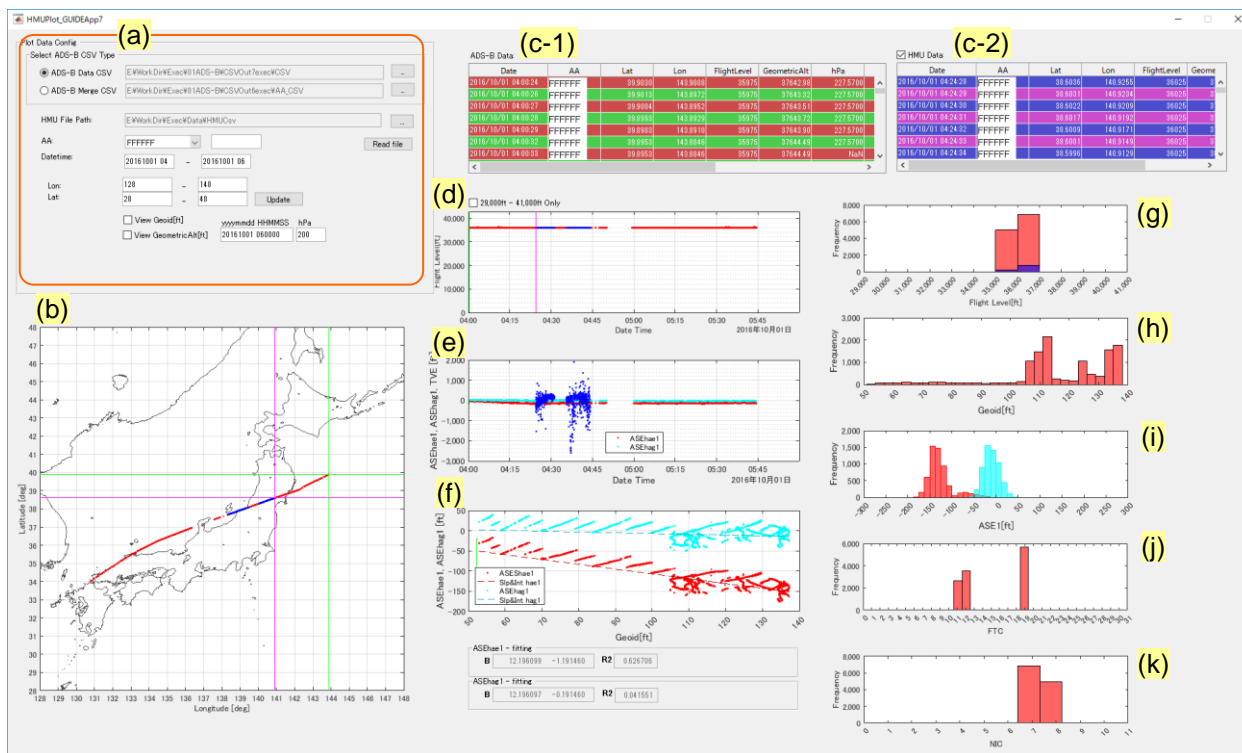


図 5 誤差評価ツール表示例

誤差表示ツールは、試験システムで収集した ADS-B データに加え、比較検討用に航空局から提供してもらっている 3 箇所の HMU データを処理できる。図 5 の(b), (d), (e), (g)において HMU データは青色で表示される。

## 5.2 表示内容の分析

例として、図 5 に示された航空機の ASE 分析内容を説明する。

図 5-(b)に示された航跡で、本航空機は太平洋から西南西に飛行しており、ADS-B データは岩手沖から九州北部までのデータが受信されている(赤色)。途中、仙台付近と新潟付近において HMU の覆域を飛行している(青色)。ジオイド高に関しては、約 50ft から約 140ft の範囲を飛行していることが分かる(図 5-(h)および図 6)。

### (1) ASE 値の量子化誤差および気象データに関する分析

ASE の測定結果に関しては、図 5-e に時系列の値が示されている。ADS-B 方式 HMS による ASE は、GNSS 幾何高度情報の基準面の違いにより、ASE\_HAE (赤色)、ASE\_HAG (水色)の 2 種類の結果が表示されている。HMU に関しては、データの都合上 TVE 値を表示している(青色)。HMU (MLAT 方式)の TVE

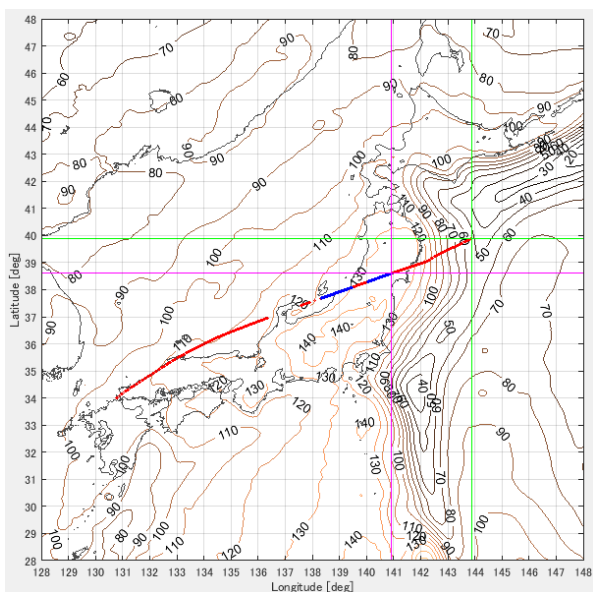


図 6 航跡データとジオイド高

値は、+1,000ft 以上から-2,000ft 以下まで大きく分散していることが分かる。ADS-B 方式の ASE 値に関しては、ASE\_HAE が 0~-200ft, ASE\_HAG が+50~-50ft の値になっており、HMU の値に比べて小さい範囲に収まっている。

ADS-B 方式 HMS の ASE 値の挙動を調べるために、図 5-e の一部分を拡大したグラフを図 7 上に示す。図の範囲においては、ASE\_HAG と ASE\_HAE は共に概ね一定の値をとっている。詳細にみると、時間経過と共に値が徐々に大きくなり、所々において不連続に値が変化しているのが分かる。これは、ADS-B データに含まれる気圧高度情報および GNSS 幾何高度情報が 25ft 単位に量子化されていることに起因している。

参考として、気象データから算出したこの時刻付近における気圧高度 36,000ft (277hPa) の幾何高度を等高線として図 7 下に示した。気圧高度 36,000ft で飛行している航空機は、幾何

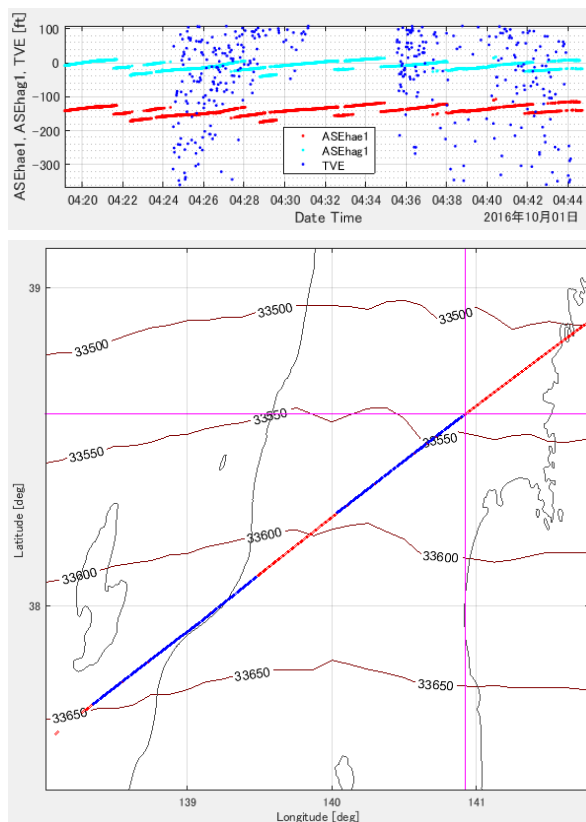


図 7 (上) ASE,TVE の時間変化  
(下) 航跡と気象データの幾何高度  
(気圧高度 36,000ft(=277hPa), 時刻 04:30)

高度では約 33,500ft から 33,650ft に上昇しており、ASE の挙動と一致することが分かる。

## (2) GNSS 幾何高度基準の判別

ASE\_HAE と ASE\_HAG のどちらが正しいかを判別するために、図 5-(f)の ASE とジオイド高の対応グラフを用いる。前節 4 の(3)で記したように、ASE は一定であることを前提としているため、ジオイド高が変化しても ASE 値が変わらない方が当該航空機の ASE であるとする。

ASE\_HAE と ASE\_HAG の各々を 1 次関数回帰した結果、ASE\_HAE の傾きは -1.19、ASE\_HAG の傾きは -0.19 となり、ASE\_HAG が正しい ASE 値であると判別された。

図 5 に示された航空機の ASE (レベルフライト区間の平均値) を、表 1 に示す。

## 6 まとめ

ADS-B 方式 HMS 試験システムを整備し、誤差評価ツールを開発して、収集した ADS-B データを使用して ASE 測定結果を算出した。本稿では、1 航空機の ASE 測定結果について分析結果を報告した。今後、試験システムの覆域を航行する航空機全体に対しての ASE 測定結果の誤差評価を行う。

今回分析した航空機については、ジオイド高が約 50ft から約 140ft の範囲のデータが得られ、GNSS 幾何高度の基準の判定が可能であった。今後、ジオイド高差が小さい範囲のデータしか得られなかった場合の判定に関して、判定手法の検討を実施する必要がある。他の主要な誤差要因に関しては、量子化誤差の定量的評価、および長期間のデータをもちいた気象データの誤差評価を実施する必要がある。最終的には、対応策を導出し、ADS-B 方式 HMS の性能評価を行う予定である。

表 1 ASE 測定結果

システム	ASE [ft]
ADS-B 試験システム	-10
HMU (仙台)	60
HMU (新潟)	-68

## 謝辞

ADS-B 受信システムの設置、HMU データの提供に御協力頂いた、高松空港事務所、航空交通管理センター、技術管理センター、並びに国土交通省航空局の関係各位に謝辞を表します。

## 参考文献

- [1] ICAO Annex 6 “Operation of Aircraft”, Ninth Edition, July 2010.
- [2] [http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/12/120930\\_.html](http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/12/120930_.html) (参照, 2017 年 4 月)
- [3] ICAO Annex 11 “Air Traffic Services”, Thirteenth Edition, July 2001.
- [4] [http://www.jasma.jp/HMU-status\\_and\\_monitoring-process.html](http://www.jasma.jp/HMU-status_and_monitoring-process.html) (参照, 2017 年 4 月)
- [5] 松永 圭左, 宮崎 裕己, “ADS-B 方式高度維持性能監視の誤差要因”, 電子航法研究所第 15 回研究発表会講演概要, 2015 年 6 月.
- [6] ICAO Doc 9574 AN/934 “Manual on Implementation of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive”, Second Edition, 2002.
- [7] ICAO Doc 9937 AN/477 “Operating Procedures and Practices for Regional Monitoring Agencies in Relation to the Use of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive”, First Edition, 2010.
- [8] ICAO Doc 7488, “Manual of the ICAO Standard Atmosphere”, Third edition, 1993.
- [9] [http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08\\_wgs84.html](http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html) (参照, 2017 年 4 月)
- [10] <http://www.jmbcs.or.jp/jp/online/file/f-online10200.html> (参照, 2017 年 4 月)
- [11] ICAO Doc 9871, “Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter”, Second edition, 2012.