

Feasibility analysis on method of calculating ADS-B latency

Qing Cheng, Jean-Pierre Daniel

► **To cite this version:**

Qing Cheng, Jean-Pierre Daniel. Feasibility analysis on method of calculating ADS-B latency. Journal of Computer Applications, 2012, 32 (9), pp 2664-2666 <<http://www.joca.cn/EN/Y2012/V32/I09/2664>>. <10.3724/SP.J.1087.2012.02664>. <hal-01303552>

HAL Id: hal-01303552

<https://hal-enac.archives-ouvertes.fr/hal-01303552>

Submitted on 18 Apr 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ADS-B 延迟时间计算方法的可行性分析

程 擎^{*1}, DANIEL Jean-Pierre²

1、 中国民航飞行学院空中交通管理学院, 四川广汉, 618300

2、 法国国立民航学院通信导航监视系, 法国图卢兹

* 通信作者电子邮箱 deglechq@163.com

摘要:

为了提高广播式自动相关监视系统(ADS-B)的精度,提出了一种精确计算每个ADS-B报文延迟时间的方法。影响ADS-B监视精度的因素包括机载导航系统的定位精度和延迟时间,根据ADS-B提供的报文内容,利用飞机的相邻位置和速度来计算飞行时间,再根据相邻报文的接收时间差来计算延迟时间差,在初始报文中发送 t_1 时刻的条件下,可以计算其后所有报文的延迟时间并对延迟时间进行修正,最后利用随机选取3架飞机的ADS-B报告对该方法进行了分析。验证结果表明采用该方法ADS-B的监视精度小于10米,满足场面监视的需要。

关键词:

广播式自动相关监视; 延迟; 测量时间; 接收时间; 平均值

中图法分类号:

V243 电子设备, 967.5 空中交通管制导航系统

文献标识号: A

Feasibility analysis of a method of calculating ADS-B Latency

CHENG Qing^{*1}, DANIEL Jean-Pierre²

1、 The Air Traffic Management College, Civil Aviation Flight University of China, Sichuan Guanghan, 618300, China)

2、 The department of communication navigation surveillance, Ecole nationale de l'aviation civile

Abstract:

To improve Automatic Dependent Surveillance Broadcast(ADS-B) surveillance accuracy, this paper proposed a method accurately calculating every ADS-B report latency. The factors influencing ADS-B surveillance accuracy included position accuracy of airborne navigation system and latency, a method calculating flight time using aircraft adjacent position and velocity was proposed according to ADS-B report content, and calculated the different latency based on the different receive time of adjacent reports, with the conditions of ADS-B transmitting the time of t_1 in the initial report, the subsequent all report latencies could be calculated, so all latencies could be corrected to improve ADS-B surveillance accuracy. At last, the authors carried out feasibility analysis using randomly selected three aircraft ADS-B reports. The results show that ADS-B surveillance accuracy is less 10m and meets requirement of airport surface surveillance.

Key words:

Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B); latency; time of measure(TOM); time of receive(TOR); Mean

0 引言

广播式自动相关监视系统 (Automatic Dependent Surveillance Broadcast, ADS-B) 是一种协作相关的监视系统, 它采用机载导航系统获得飞机精确的位置和速度等信息, 利用机载 ADS-B 设备广播飞机的位置信息和其他一些参数^[1]。通过空地数据链, ADS-B 地面站接收这些信息, 并传输到空中交通管制中心, 可以实现管制中心对飞机位置的监视^[2]。ADS-B 监视精度由机载导航系统的位置精度和延迟时间确定, 国外的一些研究机构和学者研究了 1090ES (1090 extended squitter)^[3] 和 UAT (The universal access transceiver)^[4] 数据链模式的 ADS-B 延迟, 延迟时间对间隔误差的影响^[5], ADS-B IN/OUT 的技术问题中的位置总的延迟时间、补偿和未补偿的延迟时间^[6]。在世界各国对 ADS-B 的研究中, 对 ADS-B 的延迟时间研究主要是对最大延迟和补偿后的延迟对监视精度的影响, 但是没有具体到每个 ADS-B 报文的延迟时间的计算, 本文提出了一种计算 ADS-B 延迟时间的方法, 通过该方法可以计算每个 ADS-B 报文的延迟时间, 从而对延迟时间进行精确的补偿来提高 ADS-B 的监视精度。

1 影响 ADS-B 精度的因素

ADS-B 的位置精度由机载导航系统的定位精度和延迟时间确定, 如式 (1):

$$\sigma = \sigma_N + \tau \cdot V \quad (1)$$

式 (1) 中 σ_N 是导航系统的精度, 该精度由导航精度等级 (Navigation Accuracy Category, NAC) 表示, 其中位置导航精度等级 (Navigation Accuracy Category for Position, NAC_P) 有 0~11 共 12 个等级, 表示导航系统不同的导航精度^[7]。机载导航系统往往采用全球定位系统 (the Global Positioning System, GPS) 来确定飞机的位置, 其定位精度较高, 为了提高其定位精度和完好性, 可以采用多种增强系统^[8]。对于延迟时间导致的误差可采用补偿方法来提高定位精度, 但对于每次报文的延迟时间, 采用固定的时间补偿往往并不能最好的提高定位精度, 通过计算精确的延迟时间来进行补偿, 能大大提高监视精度。

2 ADS-B 延迟时间的计算方法

2.1 ADS-B 延迟时间

机载导航系统测量飞机位置的时间是测量时

间 (Time of Measure, TOM), 机载 ADS-B 系统发送报文的时间是发送时间 (Transmitting Time, T_D), 延迟时间是从 TOM 到 T_D , 其中包括了导航系统测量处理时间、数据传输和处理时间及 ADS-B 设备的处理和发送时间, 如图 1 所示。另外, 地面 ADS-B 接收机接收报文的时间是接收时间 (Time of Receive, TOR), 本文 ADS-B 的延迟时间也包括报文在空间的传输时间和地面 ADS-B 接收机的接收时间, 所以 ADS-B 的延迟时间是从 TOM 到 TOR, 即:

$$\tau = TOR - TOM \quad (2)$$

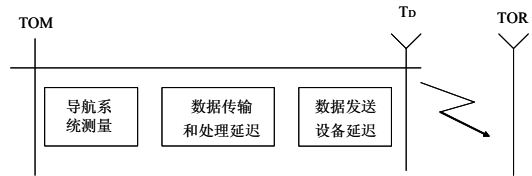


图1 ADS-B 延迟时间

2.2 计算 ADS-B 延迟时间的方法

根据 ADS-B 的数据更新率知, T_1, T_2, \dots, T_n 是 ADS-B 接收机的 TOR, t_1, t_2, \dots, t_n 是机载导航系统测量飞机位置的时刻 TOM, 如图 2 所示。其中 n 时刻的延迟时间是:

$$\tau_n = T_n - t_n \quad (3)$$

在式 (3) 中, 根据接收到的 ADS-B 报文, T_n 已知, 在报文中没有 t_n 时间, 所以 t_n 是不确定的, 故不能计算延迟时间。

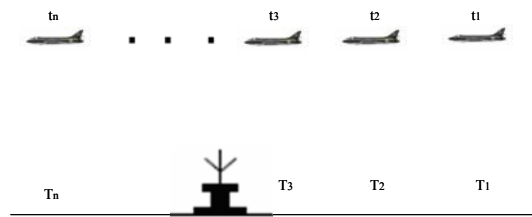


图2 飞机测量时刻和 ADS-B 接收时刻

在 ADS-B 报告中, 包含的信息有时间、飞机位置、飞机呼号、S 模式地址、国籍、速度、飞行高度和航向等。根据两相邻的报告时间, 可计算:

$$\Delta T_{n-1} = T_n - T_{n-1} \quad (4)$$

ADS-B 报文中飞机位置采用椭球坐标系 (φ, λ, h) , 其中 φ 是纬度, λ 是经度, h 是飞行高度。经过坐标变换到笛卡尔直角坐标系 (x, y, z) , 其坐标转换利用式 (5)~(8), 式中, $a = 6378137$ 米是椭球的长半轴,

$e = 8.18191908426622 \text{ E} - 2$ 是扁平率^[9]。

$$v = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \phi}} \quad (5)$$

$$X = (v + h) \cos \phi \cos \lambda \quad (6)$$

$$Y = (v + h) \cos \phi \sin \lambda \quad (7)$$

$$Z = \left[v(1 - e^2) + h \right] \sin \phi \quad (8)$$

根据直角坐标系的两相邻 ADS-B 位置和速度, 可计算相邻位置的时间差:

$$Diff_{n-1} = \frac{Position_n - Position_{n-1}}{V} = \frac{\sqrt{(X_n - X_{n-1})^2 + (Y_n - Y_{n-1})^2 + (Z_n - Z_{n-1})^2}}{V} \quad (9)$$

根据在不同位置的测量时间 t_1 、 t_2 、…… t_n , 可计算:

$$Diff_{n-1} = t_n - t_{n-1} = \Delta t_{n-1} \quad (10)$$

根据式(4)和(10), 有:

$$\begin{aligned} \Delta \tau_{n-1} &= \Delta T_{n-1} - \Delta t_{n-1} \\ &= (T_n - T_{n-1}) - (t_n - t_{n-1}) \\ &= (T_n - t_n) - (T_{n-1} - t_{n-1}) \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)中, $\Delta \tau$ 是延迟时间差, 式(11)整理为:

$$\begin{aligned} (T_n - t_n) &= \Delta \tau_{n-1} + (T_{n-1} - t_{n-1}) \\ \tau_n &= \Delta \tau_{n-1} + (T_{n-1} - t_{n-1}) \end{aligned} \quad (12)$$

在式(12)中, τ_n 是第 n 个报文的延迟时间, $\Delta \tau_{n-1}$ 和 T_n 可知, 当前航班飞机的 ADS-B 的数据链主要采用 1090SE, 其报文只有 112 位, 不能在每个报文中发送 t_n 时间。但如果飞机在开始发送报文或者每隔一段时间(如 10 分钟), 就发送一次飞机位置的测量时间。如在 t_1 时刻发送报文时, 把位置测量时刻 t_1 加载到报文中, 则可采用该方法计算其后所有的延迟时间, 利用延迟时间可修正 ADS-B 的延迟时间导致的偏差, 从而可提高 ADS-B 的监视精度。

3 计算 ADS-B 延迟时间方法的可行性分析

为了分析该方法的可行性, 需要利用 ADS-B 接收机接收的 ADS-B 实时数据来进行分析。本文利用 Kinetic Avionic Products Limited 的 ADS-B 接收机记录了 3 种不同时间的报文数据, 分别是 15

分钟、25 分钟和 40 分钟。把记录的这些数据分别用微软 Excel 进行格式转换, 按照飞机 S 模式地址和接收报文的时间进行飞机进行分类和报文时间进行排序。

3.1 ADS-B 延迟时间差分布

对于同一 S 模式地址的飞机, 利用 Excel 函数计算 $\Delta \tau_1$, $\Delta \tau_2$, …… $\Delta \tau_n$, 随机抽取每种数据的一架飞机, 分别是法国的 ATT104、德国的 DLH93N 和爱尔兰的 AEL404, 其 $\Delta \tau_n$ 分布如图 3~5 所示, 其横坐标是 Excel 中 ADS-B 报告行数, 纵坐标是延迟时间差, 单位是秒。

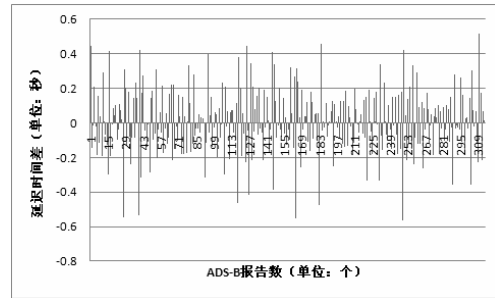


图3 法国 ATT104 延迟时间差分布

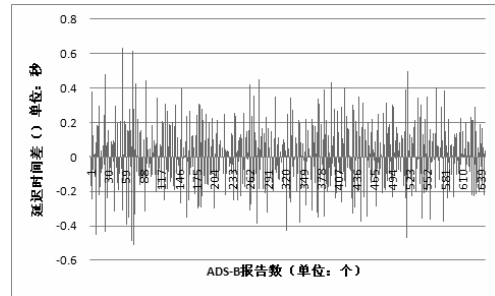


图4 德国 DLH93N 延迟时间差分布

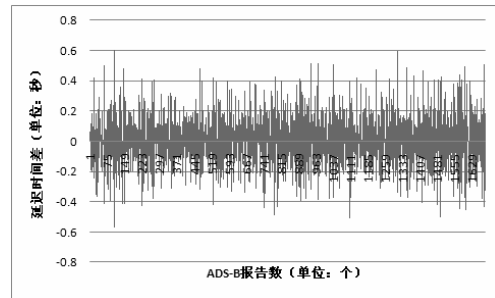


图5 爱尔兰 AEL404 延迟时间差分布

根据 ADS-B 报告中飞机的飞行动态, ADS-B 报文中相邻 2 个报文的飞机位置相差很小, 其延迟时间应基本相等, 即根据本文的计算延迟时间的理论, 式(9)计算的延迟时间差应等于 0。从图 3~5 中 3 架飞机的延迟时间差 $\Delta \tau_n$ 分布图可见, 虽然 ADS-B 报告记录的时间长短不同, 但延迟时间差

$\Delta\tau_n$ 主要都集中在 0 附近, 一些延迟时间差较大的情况是由于电波的传输环境不同所致。

3.2 ADS-B 延迟时间差正态分布分析

利用 Microsoft Excel 的 Average 函数计算 3 架飞机延迟时间差 $\Delta\tau_n$ 的平均值, Stdev 函数计算延迟时间差 $\Delta\tau_n$ 的标准偏差, 如表 1 所示。

表 1 $\Delta\tau_n$ 的平均值和标准偏差

| | ATT104 | DLH93N | AEL404 |
|---------|-----------|----------|-----------|
| 平均值(s) | 0.006982 | 0.011627 | 0.004467 |
| 标准偏差(s) | 0.1828131 | 0.174653 | 0.1715991 |

根据 3 架飞机的延迟时间差平均值和标准偏差, 利用 Normdist(x, mu, sigma, cumulative) 函数得到法国 ATT104、德国 DLH93N 和爱尔兰 AEL404 飞机 ADS-B 延迟时间差的正态分布图, 如图 6~8 所示。

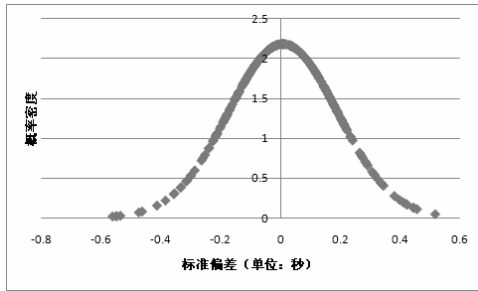


图 6 法国 ATT104 延迟时间差的正态分布

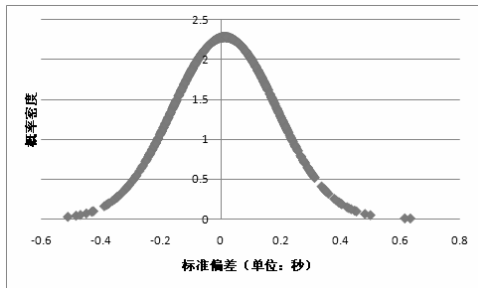


图 7 德国 DLH93N 延迟时间差的正态分布

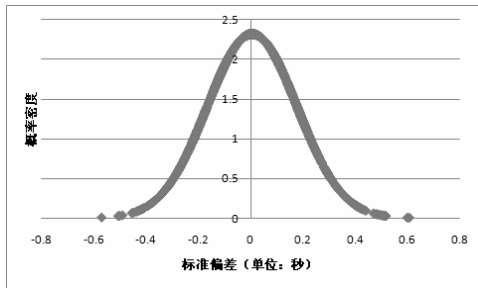


图 8 爱尔兰 AEL404 延迟时间差正态分布

根据飞机沿航迹的速度 (V) 和延迟时间差的标准偏差, 可计算飞机沿航迹的距离误差 (σ_D):

$$\sigma_D = \sigma \cdot V \quad (13)$$

在 95% 时间概率下, 根据正态分布, 飞机沿航迹的距离误差为:

$$2\sigma_D = 2\sigma \cdot V \quad (14)$$

根据表 1 中的标准偏差、式(14)和 3 架飞机的 ADS-B 报文中的速度数据, 可计算 3 架飞机沿航迹的距离误差(95%), 如表 2 所示。

表 2 沿航迹的距离误差 (95%)

| | ATT104 | DLH93N | AEL404 |
|-----------------|-----------|----------|-----------|
| 平均值(s) | 0.006982 | 0.011627 | 0.004467 |
| 标准偏差(s) | 0.1828131 | 0.174653 | 0.1715991 |
| 速度 (m/s) | 247 | 180 | 211 |
| $2\sigma_D$ (m) | 90.3 | 62.8 | 72.42 |

根据表 2 中数据知, 利用本文的修正延迟时间理论, 其最大距离误差(95%)分别为 90.3 米、62.8 米和 72.42 米。而根据 ADS-B 理论, 如果 $NAC_p < 10$ 和导航完整性等级 (Navigation Integrity Category, NIC) < 9 , ADS-B 延迟时间小于 1.2 秒 (95%), 如果 $NAC_p \geq 10$ 和 $NIC \geq 9$ 的情况下, ADS-B 延迟时间小于 0.4 秒(95%)^[10], 而 $NAC_p \geq 10$ 和 $NIC \geq 9$ 要求在具有广域增强系统 (the Wide Area Augmentation System, WAAS) 和本地增强系统 (the Local Area Augmentation System, LASS) 等增强的情况下才能达到, 文中 3 架飞机的 GPS 导航源工作在 $NAC_p < 10$ 和 $NIC < 9$ 情况下。按照 ADS-B 报文中的 3 架飞机的速度数据、标准偏差和 ADS-B 的延迟时间 1.2 秒, 可比较在标准偏差(95%)和最大延迟时间情况下的距离误差, 如表 3 所示。根据表 3 沿航迹距离误差数据知, 按照延迟时间 1.2 秒计算的 3 架飞机的距离误差分别为 296.4 米、216 米和 253.2 米, 远远大于修正延迟时间后的最大距离误差(90.3 米、62.8 米和 72.42 米)。所以, 采用该方法计算 ADS-B 延迟时间, 可大大减小沿航迹的距离误差, 即增强了 ADS-B 的位置精度。

表 3 修正前后沿航迹的距离误差的比较

| | ATT104 | DLH93N | AEL404 |
|------------------|--------|--------|--------|
| 速度 (m/s) | 247 | 180 | 211 |
| $2\sigma_D$ (m) | 90.3 | 62.8 | 72.42 |
| $NAC_p < 10$ (m) | 296.4 | 216 | 253.2 |

3.3 ADS-B 用于场面监视的精度分析

当前的大型机场需要对场面移动目标进行监

视, 可通过场面建设雷达和多点定位等监视系统, ADS-B如果达到场面监视的精度, 也可作为场面监视系统使用。ADS-B能否用于场面监视, 根据国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)对系统能否使用的判定方法, 可以通过与成熟的监视系统比较来进行判断^[11]。

民航场面监视的间隔标准是 50 米, 而典型的场面监视雷达(Airport Surface Detection Equipment-Model-3, ASDE-3)的距离精度是 10 米^[12]。根据公式(1), 增加导航系统的定位精度和减小ADS-B的延迟时间, 可以增加ADS-B的位置精度。在机场采用LASS后, ADS-B的NAC_{P11} 的估计位置不确定性(the Estimated Position Uncertainty, EPU) $<3m$ ^[10]。设飞机在机场滑行的速度最大是 30kt, 可修正延迟时间后沿航迹的距离误差(95%), 如表 4 所示。

表 4 滑行的距离误差

| | ATT104 | DLH93N | AEL404 |
|-----------------|-----------|----------|-----------|
| 标准偏差(s) | 0.1828131 | 0.174653 | 0.1715991 |
| 速度 (kt) | 30 | 30 | 30 |
| $2\sigma_D$ (m) | 5.64283 | 5.39096 | 5.29669 |

根据 $EPU < 3m$ 和表 4 滑行的距离误差可计算滑行时 ADS-B 的位置精度分别是: 8.64283 米、8.39096 米和 8.29669 米。根据与场面监视雷达的比较知, 利用计算 ADS-B 延迟时间的方法, 飞机滑行时 ADS-B 的位置精度小于场面监视雷达的距离精度 10 米, 证明通过该方法计算 ADS-B 的延迟时间后, ADS-B 可以用于场面监视。

4 结论

ADS-B作为当前新的民航监视系统, 具有很高的监视定位精度, 可以作为ICAO航路区域 5 海里和终端区域 3 海里最小管制间隔标准的监视系统^[13], 但要作为场面监视系统, 还需要提高其精度。本文提出了一种计算ADS-B延迟时间的方法, 通过该方法, 可以精确计算延迟时间, 从而提高ADS-B的监视精度, 使ADS-B在机载导航系统定位精度减弱和没有增强系统的情况下也能提供高精度, 并能满足空管的各种监视, 在使用本地增强的情况下, 也可用于机场的场面监视。

参考文献:

[1] 王鲁杰. 中国民航应优先发展ADS-B应用技术[J]. 中国民用航空, 2006, 1:27-30.
 [2] 张军. 现代空中交通管理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005:210-223.

[3] IAN LEVITT. Total Latency and Uncompensated Latency in ADS-B[R]. RTCA Special Committee 186, Working Group 3. RTCA, Washington DC 18 – 21 August 2009.
 [4] STAN JONES, MITRE. Latency in ADS-B UAT MOPS[R]. RTCA Special Committee 186, Working Group 5. RTCA, 19 June 2001.
 [5] STANLEY R. JONES, ADS-B surveillance separation error sensitivity analysis[R]. The MITRE Corporation, August 2009.
 [6] WM A. THEDFORD. ADS-B IN/OUT technical issues[R]. USA, 31 July 2011
 [7] DO-242A , Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) [S]. RTCA, Inc, 2002:38-42.
 [8] 范凯, 刘钝. 全球导航卫星系统在民用航空中的应用[J]. 全球定位系统, 2011, 1: 71-30.
 [9] JEAN-PIERRE DANIEL. Introduction to GPS[R]. Toulouse: July 2009: 35-37.
 [10] DO-242A , Minimum Aviation System Performance Standards for Automatic Dependent Surveillance Broadcast(ADS-B), Appendix K[S]. RTCA, Inc, 2002: page K-1.
 [11] Doc 9689-AN/953. Manual on airspace planning methodology for the determination of separation minima[S]. ICAO, first edition, 1998
 [12] STANLEY R. JONES. Determination of Requirements for Automatic Dependent Surveillance Broadcast (ADS-B) to ADS-B Three Nautical Miles (nm) Separation Standard[R]. The MITRE Corporation, 2004.
 [13] JEAN-PIERRE DANIEL. Present techniques of surveillance primary surveillance radar [R]. Toulouse: January 2011: 33.