

文章编号: 2095-2163(2019)03-0023-07

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

星基 ADS-B 系统模拟软件设计与实现

杜松涛¹, 刘海涛¹, 李保国²

(1 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300; 2 中星中航通用航空产业投资有限公司, 昆明 650211)

摘要: 星基 ADS-B 系统是一种覆盖全球的新型空中交通监视系统。为了评估星基 ADS-B 系统的监视性能, 本文给出了星基 ADS-B 系统等模型, 并以此为基础设计了星基 ADS-B 系统模拟软件, 利用计算机模拟得到了不同空中交通流量场景下的 ADS-B 消息正确接收概率和 95% 空中位置消息更新间隔等性能参数。结果表明: 共信道干扰会影响系统监视性能, 导致 ADS-B 消息正确接收概率降低和 95% 位置消息更新间隔增加。

关键词: 星基 ADS-B 系统; 模拟; 软件设计; 性能评估

Design and realization of satellite-based ADS-B system simulation software

DU Songtao¹, LIU Haitao¹, LI Baoguo²

(1 College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2 China Star General Aviation Investment Co., Ltd, Kunming 650211, China)

[Abstract] Satellite-based ADS-B system is a new form of air traffic surveillance system which works anywhere. To evaluate the monitoring performance of satellite-based ADS-B system, in this work, the model of satellite-based ADS-B system is proposed and the simulation software of the satellite-based ADS-B system is designed. The software can acquire the performance parameter of satellite-based ADS-B system, such as the correct probability of message reception and 95% position message update interval. The results show that the common-channel interference worsen the system that reduce the correct probability of message reception and increase 95% position message update interval.

[Key words] satellite-based ADS-B system; simulation; software design; performance evaluation

0 引言

星基 ADS-B 系统是新一代空中交通管制中一种快速、高效的监视系统, 由机载设备、低轨道通信卫星、地面站组成, 依靠飞机周期性地播发的状态矢量和身份标识信息实现对飞机的监视和追踪功能^[1-3]。与陆基 ADS-B 系统相比, 星基 ADS-B 系统将高灵敏度 ADS-B 接收机安装在低轨道卫星上, 使得该系统能够在陆基监视无法覆盖的地区, 如沙漠、海洋、山地、极地等地区, 实现连续不间断的航路监视与场面监视, 有效提高了航空飞行效率和安全水平。

星基 ADS-B 系统的研究主要集中在星基 ADS-B 技术可行性验证^[4-6]、星基 ADS-B 系统建设方案设计^[7-8]和星基 ADS-B 系统性能评估^[9-11]三个方面。在星基 ADS-B 技术可行性方面, 文献[4-6]通过发射低轨道试验卫星构建简化的星基 ADS-B 系统, 实现了卫星对 ADS-B 信号的接收, 验证了星基 ADS-B 技术的可行性。在星基 ADS-B 系统建设

方面, 文献[7-8]分别提出了基于“铱星”和基于“全球星”的 2 种低轨道卫星通信系统方案。在星基 ADS-B 系统性能评估方面, 文献[9]采用基于 Aloha 协议建立了星基 ADS-B 系统模型, 并仿真研究了航空器数量对信号冲突概率的影响; 文献[10]建立了航空器-卫星的传输链路模型, 并仿真研究了传输距离对接收信号强度的影响; 文献[11]建立了 1090ES 共信道干扰模型, 并仿真验证了共信道干扰下航空器数量对 ADS-B 消息更新间隔的影响。

针对星基 ADS-B 系统的性能评估与分析, 本文设计了星基 ADS-B 系统模拟软件, 通过统计分析 ADS-B 消息的播发数与接收数等模拟数据, 得到了 ADS-B 消息正确接收概率和 95% 位置消息更新间隔等性能参数。与其他相关工作相比, 本文采用计算机动态模拟 ADS-B 系统的方法代替硬件仿真方法。计算机模拟可以构建更复杂的系统模型, 提高性能评估工作的准确性, 还可以反映系统内各个空间对象的位置关系及其变化过程, 产生具有真实地理位置信息的 ADS-B 模拟消息。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0502402)。

作者简介: 杜松涛(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 航空移动通信。

收稿日期: 2019-03-01

1 系统模型

1.1 低轨道卫星系统模型

本文参照铱星二代系统的体系结构,采用 66/

$$\begin{cases} \lambda = \lambda_0 + \arctan(\cos i \cdot \tan \theta) - \omega_e t \pm \begin{cases} -180^\circ (-180^\circ \leq \theta < -90^\circ) \\ 0^\circ (-90^\circ \leq \theta < 90^\circ) \\ 180^\circ (90^\circ \leq \theta < 180^\circ) \end{cases} \\ \varphi = \arcsin(\sin i \cdot \sin \theta) \end{cases} \quad ; \quad (1)$$

其中, λ 、 φ 表示卫星星下点的地理经、纬度; λ_0 表示升交点经度; i 表示轨道倾角; θ 表示卫星在轨道平面内相对于右升交点的角距; ω_e 表示地球自转角速度; \pm 分别用于顺行和逆行轨道。

1.2 飞机运动模型

假设飞机是一个质量为常数且均匀分布的刚体,飞行过程中速率不变,高度恒定,同时忽略飞机飞行过程中受到气流干扰等因素而产生扰动运动,根据飞机在地面坐标系上的投影来描述飞机的位置和航迹。地面坐标系取地理北极为 Y 轴正方向,正东方向为 X 轴正方向,4 个象限从 Y 轴正半轴开始顺时针排列^[15]。在 $t - \Delta t$ 时刻飞机位置 $(x_{t-\Delta t}, y_{t-\Delta t}, z_{t-\Delta t})$ 已知的条件下,根据飞机飞行速率和航向角即可求得 t 时刻飞机的位置 (x_t, y_t, z_t) , 其表达式为:

$$\begin{cases} x_t = x_{t-\Delta t} + v\Delta t \sin \varphi; \\ y_t = y_{t-\Delta t} + v\Delta t \cos \varphi; \\ z_t = z_{t-\Delta t} \end{cases} \quad (2)$$

其中, v 表示飞机巡航速度, φ 表示飞机航向角。

1.3 星基 ADS-B 系统模型

在飞机飞行过程中,飞机通过卫星导航等系统获取地理位置与状态信息,并在 1 090 MHz 频率上周期性播发 DF-17 格式的位置消息(message)、速度消息、标识消息及飞机状态消息等;搭载于卫星上的 ADS-B 接收机正确接收 ADS-B 消息后,通过星间网络将 ADS-B 消息传输至关口卫星,再由关口卫星传输到星基 ADS-B 地面站并通过地面网络分发到 ADS-B 应用子系统^[16]。本文主要研究 ADS-B 消息从飞机播发至卫星接收之间的过程,因此星基 ADS-B 系统模型分为 ADS-B 消息信号飞机播发、ADS-B 消息信号链路传输、ADS-B 消息信号卫星接收三个过程分段模拟。

在模拟开始之前,系统为每一架飞机在 $[\Delta T_{\min}, \Delta T_{\max}]$ 的区间内随机生成各个类型消息的初始播发时刻,其中 ΔT_{\min} 和 ΔT_{\max} 分别为该类型消息的最小播发周期和最大播发周期。模拟开始之后,每一

架飞机依据纯 Aloha 协议播发消息,并在此基础上做出以下假设:

$$\begin{cases} -180^\circ (-180^\circ \leq \theta < -90^\circ) \\ 0^\circ (-90^\circ \leq \theta < 90^\circ) \\ 180^\circ (90^\circ \leq \theta < 180^\circ) \end{cases} \quad ; \quad (1)$$

架飞机依据纯 Aloha 协议播发消息,并在此基础上做出以下假设:

(1) ADS-B 消息和其他 1 090 MHz 共信道消息都具有相同的帧时(Frame Time);

(2) 接收机无需进行应答,检测到该消息发生冲突也无需重发。飞机播发 ADS-B 消息的同时根据消息的播发间隔计算下一次该类型消息的播发时刻,定义一架飞机的第 $i - 1$ 条消息和第 i 条消息的播发间隔为 ΔT_i , 则其在 $[0, \Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}]$ 的区间内服从均匀分布。ADS-B 消息的帧时和播发周期见表 1。

表 1 ADS-B 消息参数^[17]

Tab. 1 Parameter of ADS-B message^[17]

参数	取值
帧时	120 us
码元数目	112 bit
位置消息播发周期	0.4~0.6 s
速度消息播发周期	0.4~0.6 s
状态消息播发周期	0.4~0.6 s
标识消息播发周期	4.8~5.2 s

ADS-B 消息在飞机-卫星通信链路的传输过程中,造成信号功率衰减的主要因素包括自由空间传输损耗、电离层闪烁损耗、极化误差损耗、馈线损耗和大气吸收损耗^[10,18-21]。因此卫星接收信号功率 P_r 可表示为:

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L \quad (3)$$

其中, P_t 表示机载 ADS-B 发射机发射功率; G_t 和 G_r 分别表示飞机发射天线增益和卫星接收天线增益; L 表示链路传输对信号功率造成的损耗。

ADS-B 消息信号达到卫星接收机后,接收机首先根据自身灵敏度要求,对接收信号功率进行门限判定。若接收信号功率低于能够被接收机检测到的最低信号功率,即最低触发电平,则判定消息接收失败,接收机将无法探测到该条消息。卫星接收机灵敏度根据消息探测解码率来设定。定义接收机正确解码 ADS-B 消息信号的概率为消息探测解码率,用

E_p 表示, 与卫星接收信号功率 S 之间满足^[22]:

$$E_p(S) = 1 - 10^{-6.43 \cdot (S - S_0) / 20}. \quad (4)$$

其中, S_0 表示 $E_p = 0$ 时 ADS-B 消息的信号功率。在信号没有重叠和干扰的情况下, 最低触发电平 S_{MTL} 为探测解码率为 90% 时接收信号功率 S 的值^[17], 即 $E_p(S_{MTL}) = 0.9$ 。

卫星接收机成功探测并解码 ADS-B 消息信号后, 将对探测到的消息信号进行冲突检测, 检测接收信号之间的接收时刻间隔, 若接收时刻间隔小于 ADS-B 消息的帧时, 则判定产生冲突^[9], 丢弃产生冲突的消息。

2 软件设计

本文根据第 1 节所给出的系统模型与模拟方法设计了星基 ADS-B 系统模拟软件, 利用计算机模拟飞机航路飞行、卫星运动、ADS-B 消息播发、传输、接收等过程, 统计 ADS-B 消息的播发数量与接收数量等数据, 最后分析统计数据得到 ADS-B 消息正确接收概率和 95% 位置消息更新间隔。软件基于 Microsoft Visual Studio 2010 开发环境, 使用 C 语言编写完成。

图 1 显示给出了基于 Gane-Sarson 表示法的星基 ADS-B 系统模拟软件数据流模型图。在图 1 中, 正方形框表示外部实体, 是软件系统与外部环境的

接口; 圆角矩形框表示数据加工处理过程、开口矩形框表示数据存储, 是系统收集与保存的数据集合; 箭头表示数据流, 是系统与外部实体之间或者系统内部数据加工处理过程之间的通信形式, 箭头中的文字表示数据流的内容。各个处理过程按编号进行说明:

1. 读取用户设定的场景配置参数, 初始化模拟场景, 建立飞机信息表;
2. 根据当前模拟时刻和消息播发周期计算下一次播发消息的时刻;
3. 根据飞机运动模型更新飞机信息表中所有飞机的位置信息;
4. 根据低轨道卫星系统模型更新卫星信息表中所有卫星的位置信息;
5. 根据卫星上行链路预算分析, 计算 ADS-B 消息到达接收机的信号功率和接收时刻;
6. 根据消息的信号功率和接收时刻, 对 ADS-B 消息信息表中的所有消息进行正确接收判定, 将接收失败的消息从表中移除;
7. 将 ADS-B 消息信息表中 ADS-B 消息转换为 DF-17 格式的报文;
8. 利用以太网将 DF-17 报文发送至指定端口;
9. 将 DF-17 报文以二进制数据文件的形式存入计算机硬盘等外部存储设备中;

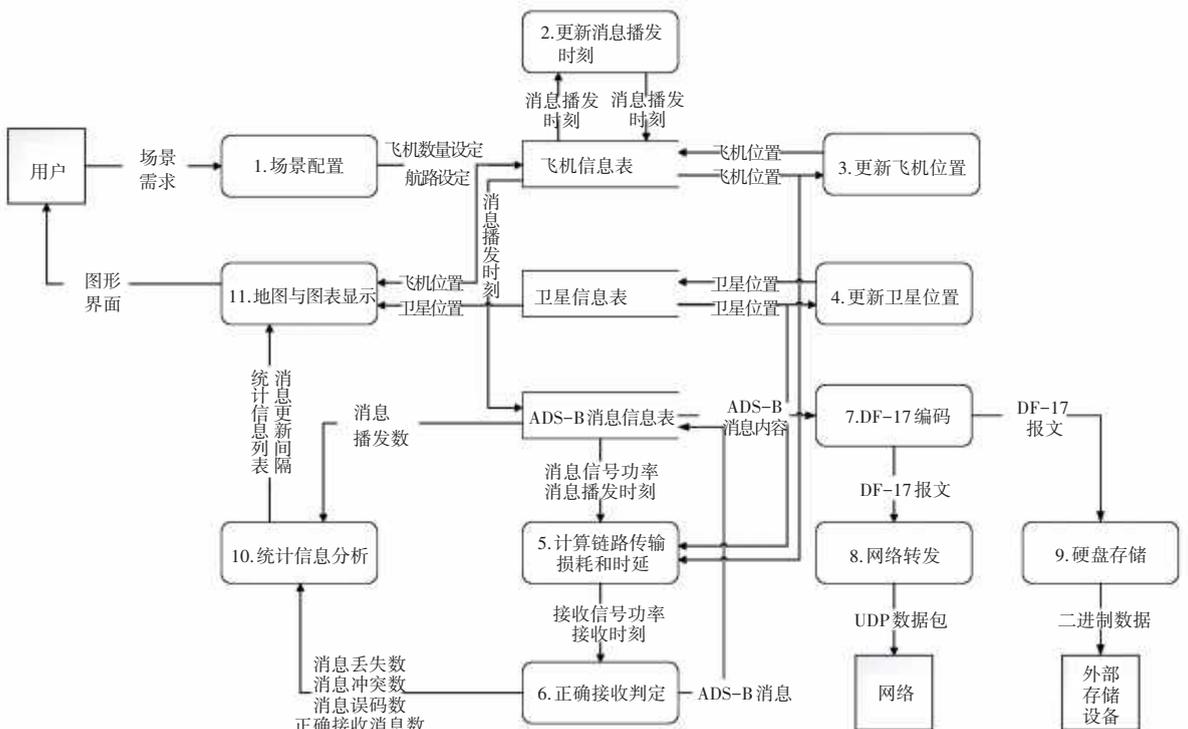


图 1 星基 ADS-B 系统模拟软件数据流图

Fig. 1 Data flow diagram of satellite-based ADS-B system simulation software

10.统计 ADS-B 消息的播发数量、正确接收数量等数据,计算 ADS-B 消息正确接收概率和 95% 位置消息更新间隔;

11.在软件主界面上显示并实时更新飞机位置、卫星波束覆盖范围和统计分析数据。

根据图 1 描述的系统逻辑功能,软件的架构设计如图 2 所示。在图 2 中,虚线框表示数据处理模块、实线框表示模块的主要功能、箭头表示模块的数据输入与输出。其中,卫星数据处理模块负责根据低轨道卫星系统模型计算卫星的位置和覆盖范围,

飞机数据处理模块负责根据飞机运动模型和 ADS-B 消息产生方法计算飞机的位置和消息播发时刻,1090ES 数据处理模块负责计算 ADS-B、Mode S 等 1090ES 消息信号的传输损耗和传输时延并判定 ADS-B 消息是否被正确接收,数据存储与网络转发模块负责将 ADS-B 消息数据按照 DF-17 格式编码之后存入硬盘或通过网络发送到指定端口,图形显示模块负责实时显示飞机信息及其运动轨迹和卫星信息及其运动轨迹。

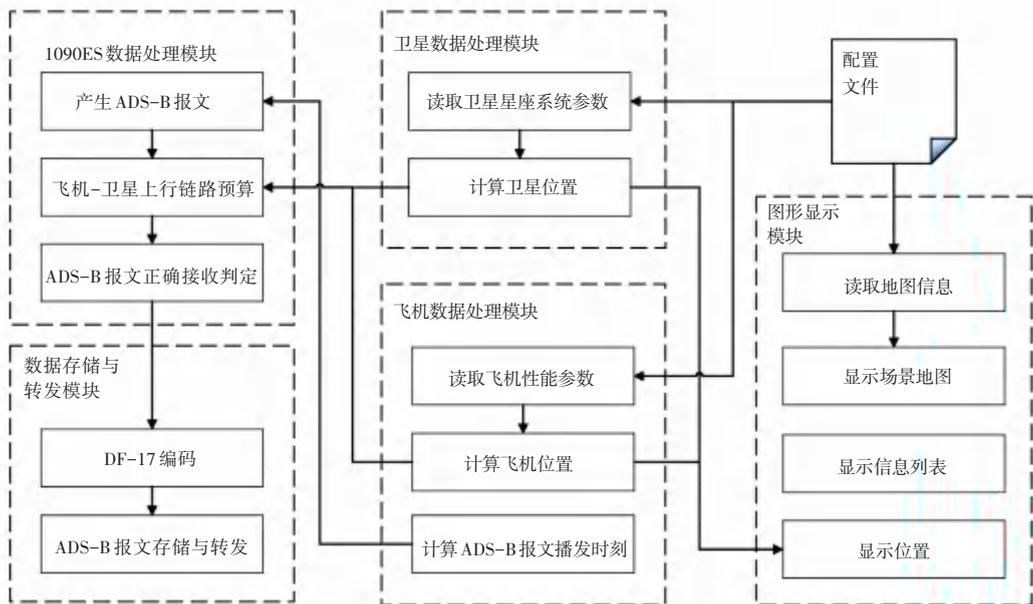


图 2 星基 ADS-B 模拟软件架构图

Fig. 2 Architecture diagram of satellite-based ADS-B system simulation software

3 模拟结果

3.1 软件界面与模拟参数

图 3 显示给出了星基 ADS-B 系统模拟软件的主界面。主界面左侧为地理信息显示区,黄色箭头图形表示发射 ADS-B 信号的飞机,白色透明箭头图形表示发射 Mode A/C 信号和发射 Mode S 信号的飞机,虚线圆形表示卫星波束覆盖范围,紫色三角形及其连接线表示导航点和航路,绿色靶心图形表示机场。主界面右侧为飞机信息、卫星信息、统计显示区。

为了度量星基 ADS-B 系统的性能,需要通过场景模拟来获得 ADS-B 消息正确接收概率和 95% 位

置消息更新间隔。模拟参数见表 2。

表 2 星基 ADS-B 系统模拟参数

Tab. 2 Simulation parameter of satellite-based ADS-B system

参数名称	取值
起始时刻	8:00:00
模拟时长	3 600 s
系统基本周期	0.1 s
发射 Mode A/C 信号的飞机比例	0.1
发射 Mode S 信号的飞机比例	0.6
发射 ADS-B 信号的飞机比例	0.3
飞机巡航速度	917 km/h
飞机巡航高度	13 km

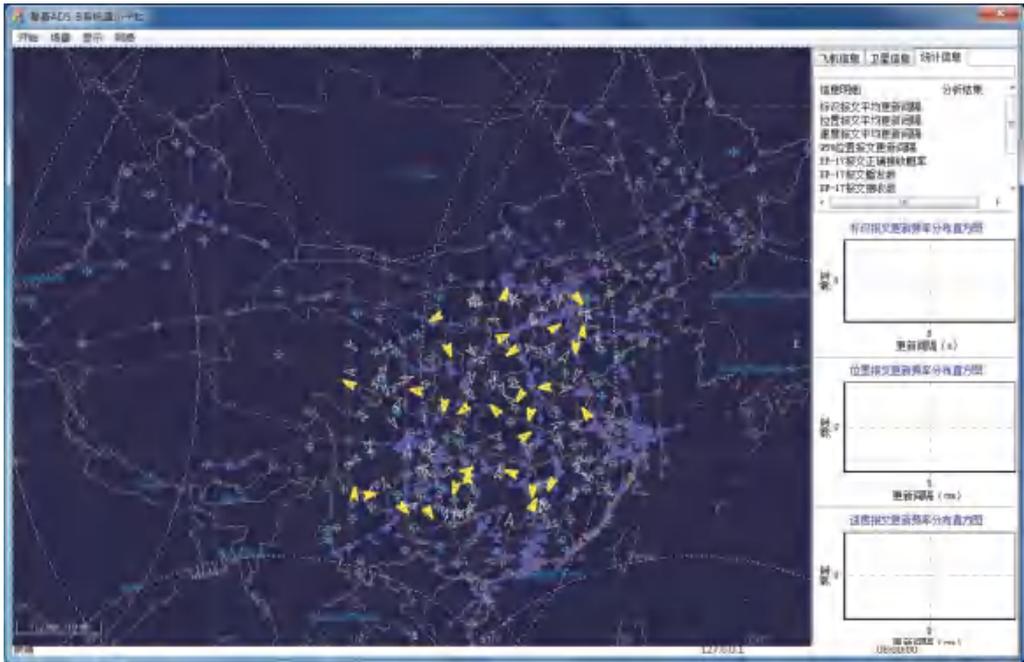


图 3 星基 ADS-B 系统模拟软件主界面

Fig. 3 Main interface of satellite-based ADS-B system simulation software

3.2 ADS-B 消息正确接收概率

ADS-B 消息正确接收概率是指模拟时间段内接收机正确接收的 ADS-B 消息占有所有播发的 ADS-B 消息的比例。

图 4 显示给出了 ADS-B 消息正确接收概率与发射 ADS-B 信号的飞机数量的关系曲线,其中横坐标表示发送 ADS-B 信号的飞机数量,纵坐标表示 ADS-B 消息正确接收概率,标注“□”的蓝色曲线表示信道中仅存在 ADS-B 信号时 ADS-B 消息冲突概率的实验结果,标注“◇”的黑色曲线表示信道中存在 ADS-B 信号、Mode S 信号和 Mode A/C 信号时 ADS-B 消息冲突概率的实验结果。结果表明:

(1) ADS-B 消息正确接收概率随着发射 ADS-B 信号的飞机数量的增加而降低;

(2) 加入 Mode S 信号和 Mode A/C 信号会降低 ADS-B 消息正确接收概率。

3.3 空中位置消息更新间隔

图 5 显示给出了发射 ADS-B 信号的飞机数量为 500 架时,模拟时间段内 ADS-B 位置消息更新间隔频率分布直方图,其中横坐标表示空中位置消息更新间隔,纵坐标表示该更新间隔的频率,图 5(a) 表示信道中仅存在 ADS-B 信号时空中位置消息更新间隔的频率分布直方图,图 5(b) 表示信道中存在 ADS-B 信号、Mode S 信号和 Mode A/C 信号时空中位置消息更新间隔的频率分布直方图。为了分析 ADS-B 位置消息更新间隔的散布程度,定义 95% 位

置消息更新间隔为 $\Delta T_{95\%}$, 表示位置消息的更新间隔 ΔT 以 0.95 的概率低于 $\Delta T_{95\%}$, 即 $P(\Delta T \leq \Delta T_{95\%}) = 0.95$ 。

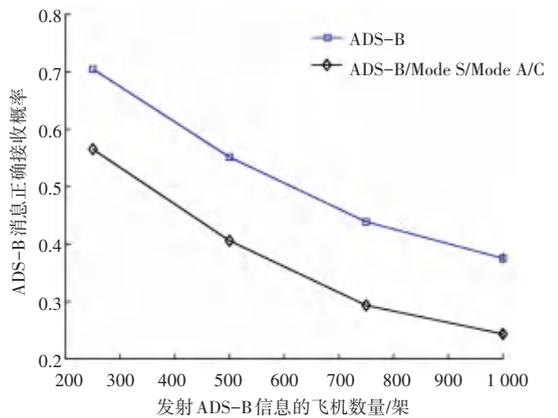


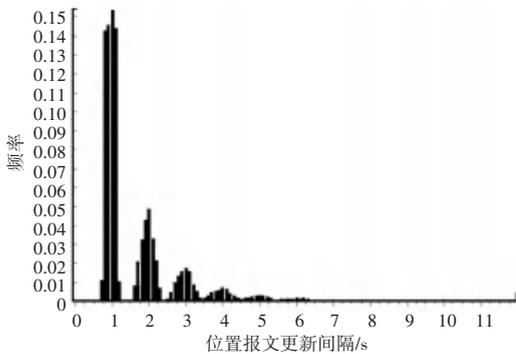
图 4 ADS-B 消息正确接收概率与飞机数量的关系曲线

Fig. 4 Relationship between the correct probability of message reception and the number of aircraft

图 6 显示给出了 95% 位置消息更新间隔与发射 ADS-B 信号的飞机数量的关系曲线。其中横坐标表示发送 ADS-B 信号的飞机数量,纵坐标表示 95% 位置消息更新间隔,标注“□”的蓝色曲线表示信道中仅存在 ADS-B 信号时 ADS-B 消息冲突概率的实验结果,标注“◇”的黑色曲线表示信道中存在 ADS-B 信号、Mode S 信号和 Mode A/C 信号时 ADS-B 消息冲突概率的实验结果。结果表明:

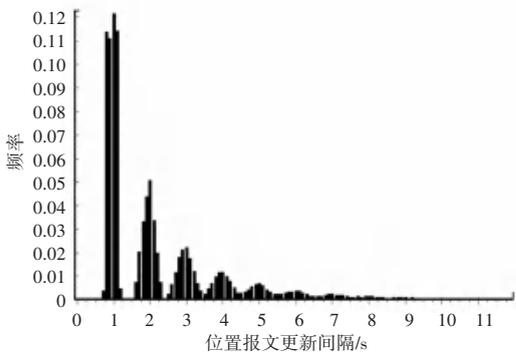
(1) 95% 位置消息更新间隔随着发射 ADS-B 信号的飞机数量的增加而增加;

(2)加入 Mode S 信号和 Mode A/C 信号会增加位置消息的更新间隔。



(a) 信道中仅存在 ADS-B 信号时

(a) When there is only ADS-B signal in the channel



(b) 信道中存在 ADS-B 信号、Mode S 信号和 Mode A/C 信号时

(b) When there are ADS-B signals, Mode S signals, and Mode A/C signals in the channel

图 5 ADS-B 位置消息更新间隔频率分布直方图

Fig. 5 Frequency distribution histogram of ADS-B position message update interval

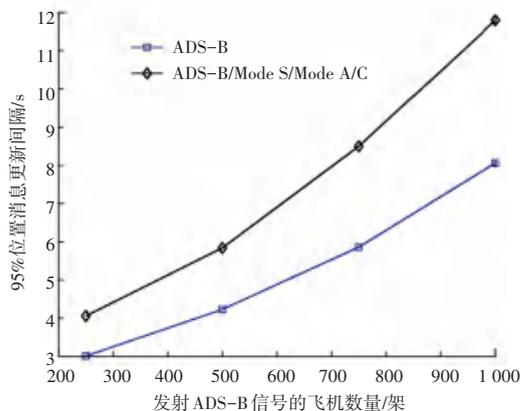


图 6 95%位置消息间隔与飞机数量的关系曲线

Fig. 6 Relationship between the 95% position message update interval and the number of aircraft

4 结束语

为了评估星基 ADS-B 系统的监视性能,本文给出了飞机运动模型、低轨道卫星系统模型和星基

ADS-B 系统模型,设计并编写了星基 ADS-B 系统模拟软件,利用计算机模拟得到了 ADS-B 消息正确接收概率和 95% 位置消息更新间隔等性能参数。最终研究结果表明:

(1)星基 ADS-B 系统模拟软件能够正确模拟 ADS-B 消息的播发、传输与接收;

(2)共信道干扰会影响星基 ADS-B 系统的监视性能,导致 ADS-B 消息正确接收概率降低和 95%位置消息更新间隔增加。

参考文献

- [1] 9871. Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter[S]. Canada: ICAO, 2012.
- [2] ZHANG Jun, LIU Wei, ZHU Yanbo. Study of ADS-B data evaluation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(4): 461-466.
- [3] 陈利虎, 陈小前, 赵勇. 星载 ADS-B 接收系统及其应用[J]. 卫星应用, 2016(3): 34-40.
- [4] FRANCIS R, VINCENT R, NOEL J M, et al. The flying laboratory for the observation of ADS-B signals[J]. International Journal of Navigation and Observation, 2011, 2011: 973656.
- [5] DELOVSKI T, WERNER K, RAWLIK T, et al. ADS-B over satellite—the world's first ADS-B receiver in space [C]//Small Satellites Systems and Services Symposium. Porto edro, Spain: DLR, 2014: 1-16.
- [6] ALMINDE L, KAAS K, BISGAARD M, et al. GOMX-1flight experience and air traffic monitoring results[C]// 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Reston, VA: AIAA, 2014: 1-7.
- [7] MARK R. Aireon Launch Begins New Era for Satellite-Based Aircraft Surveillance [EB/OL]. US: Flying Magazine, 2017. (2017-01-18) [2017-11-11]. <https://www.flyingmag.com/aireon-launch-begins-new-era-for-satellite-based-aircraft-surveillance>.
- [8] DIEGO M. Globalstar's Space-Based ADS-B [EB/OL]. Virginia: Globalstar, 2014. (2014-09-19) [2017-11-11]. <https://www.globalstar.com/en/index.php?cid=6300>.
- [9] Van Der PRYT R, VINCENT R. A simulation of signal collisions over the North Atlantic for a spaceborne ADS-B receiver using aloha protocol[J]. Positioning, 2015, 6(3): 23-31.
- [10] Van Der PRYT R, VINCENT R. A simulation of the reception of automatic dependent surveillance-broadcast signals in low earth orbit[J]. International Journal of Navigation and Observation, 2015, 2015: 567604(1)-567604(11).
- [11] GARCIA M A, STAFFORD J, MINNIX J, et al. Aireon space based ADS-B performance model [C]// 2015 Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS). Herdon, VA, USA: IEEE, 2015: 1-28.
- [12] 吴建军, 程宇新, 梁庆林, 等. 第二代铱星系统(Iridium Next)及其搭载应用概况[C]//第六届卫星通信新业务新技术学术年会. 北京: 中国通信学会卫星通信委员会, 2010: 304-313.
- [13] 冯少栋, 揭晓, 李仰志, 等. 低轨星座系统业务建模与仿真[J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 179-184.

(下转第 35 页)