

引用格式: 刘海涛, 王松林, 秦定本, 等. 星基 ADS-B 接收机监视容量分析[J]. 航空学报, 2018, 39(5): 321866. LIU H T, WANG S L, QIN D B, et al. Performance analysis of surveillance capacity of satellite-based ADS-B receiver[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(5): 321866 (in Chinese). doi: 10.7527/S1000-6893.2018.21866

星基 ADS-B 接收机监视容量分析

刘海涛*, 王松林, 秦定本, 李冬霞

中国民航大学 天津市智能信号与图像处理重点实验室, 天津 300300

摘 要: 星基广播式自动相关监视(ADS-B)系统是实现广域范围内航空器监视的重要手段。星基 ADS-B 系统内部存在严重的共信道干扰,共信道干扰限制了系统的监视性能。为了定量给出星基 ADS-B 接收机监视容量的计算方法,首先,给出了星基 ADS-B 系统的模型;随后,通过理论分析得到了星基 ADS-B 接收机报文冲突概率及报文正确接收概率,以此为基础理论,分析得出星基 ADS-B 接收机位置报文更新间隔及监视容量的计算方法;最后,构建了星基 ADS-B 仿真系统,仿真验证了理论计算公式的正确性。研究表明:星基 ADS-B 接收机的监视容量由飞机-卫星空天链路的误码率及 ADS-B 应用子系统所要求的位置报文更新间隔联合决定。

关键词: 星基 ADS-B 系统; 报文冲突概率; 报文正确接收概率; 位置报文更新间隔; 监视容量

中图分类号: V355.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6893(2018)05-321866-08

广播式自动相关监视(ADS-B)是一种基于全球卫星定位系统和航空数据链的民航新一代航空器监视技术^[1-3]。相对于传统雷达监视,ADS-B 监视具有成本低、监视范围广、监视精度高等优点,因此 ADS-B 在民用航空领域获得广泛应用。地基 ADS-B 系统由机载发射机及 ADS-B 地面站组成,且地面站沿陆地航路部署,因此地基 ADS-B 系统无法实现陆地偏远地区、海洋及地球南北两极的监视覆盖,据文献[4]的统计地球表面近 71% 的区域没有实现航空器监视覆盖。法航 447 空难及马航 370 失联事件后,为解决全球范围内航空器的可靠监视问题,文献[5-8]提出星基监视的概念,通过将 ADS-B 接收机部署于低轨道卫星中,利用多颗低轨道卫星形成覆盖全球的星基监视系统,从而实现全球范围内航空器的可靠监视。星基监视代表航空器监视技术的未来发展方向,其在民用航空领域具有广泛的应用价值^[9]。

目前,围绕着星基监视,国内外研究主要集中在以下 3 个方面:星基 ADS-B 技术可行性验证,星基 ADS-B 系统方案及星基 ADS-B 系统性能评估。为了验证星基监视技术的可行性,全球多个团队^[10-13]研制了星基 ADS-B 试验装置,并发射低轨道试验卫星,实现了全球范围内 ADS-B 信号的接收,验证了星基监视技术的可行性。在星基 ADS-B 系统建设方面,Aireon 公司提出了基于“铱星”的星基监视方案^[14],该方案通过在“铱星”中搭载 ADS-B 接收机形成覆盖全球的星基监视系统,预计 2018 年该系统可提供商用服务;美国全球星公司提出了 ADS-B 链路增强系统,该系统通过低轨道卫星搭载 ADS-B 接收机,并通过 C 波段链路将接收的 ADS-B 信息传输到地面站,最后由地面站分发给地面应用子系统^[15]。在星基 ADS-B 系统性能评估方面,为评估共信道干扰对星基 ADS-B 系统报文更新间隔的影响,文献[16]

收稿日期: 2017-11-15; 退修日期: 2017-12-28; 录用日期: 2018-01-15; 网络出版时间: 2018-01-25 10:34
网络出版地址: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20180517.html>
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0502402)
* 通信作者: E-mail: htliucauc@qq.com

建立了星基 ADS-B 共信道干扰模型,并仿真研究了共信道干扰对位置报文更新间隔性能的影响,此外,文献[17-18]也通过仿真的方法开展了类似的研究。

星基 ADS-B 系统是一个干扰受限的系统,系统存在共信道干扰限制了系统的监视性能,因此定量给出共信道干扰对系统监视性能的影响具有重要的意义。文献[16-18]主要通过仿真方法给出了共信道干扰对监视性能的影响,仿真方法主要优点是构建的模型与实际系统较接近,然而该方法的缺点是缺乏严格的理论分析;此外文献[16-18]仅研究了共信道干扰对报文更新间隔的影响,没有给出共信道干扰对监视容量的影响。为克服以上工作的不足,论文首先给出星基 ADS-B 系统模型,然后理论分析给出星基 ADS-B 系统报文冲突概率、报文正确接收概率及位置报文更新间隔的计算公式,最后分析给出了星基 ADS-B 接收机监视容量的计算方法,并通过仿真验证了理论结果的正确性。论文有两方面的贡献:①定量给出星基 ADS-B 接收机位置报文更新间隔的计算方法;②定量给出了星基 ADS-B 接收机监视容量的计算方法。

1 星基 ADS-B 系统模型及监视容量分析

1.1 星基 ADS-B 系统

图 1 给出了星基 ADS-B 系统组成。星基 ADS-B 系统由机载 ADS-B 发射机、星基 ADS-B 接收机、星间通信链路、星基 ADS-B 地面站及 ADS-B 应用子系统构成。在航空器飞行过程中,航空器通过全球卫星导航系统获取航空器的相关信息,并周期性产生位置报、速度报、航班标识报及飞机状态报等,并调制到 1 090 MHz 频率以随机突发方式发射;搭载于低轨道卫星的星基 ADS-B 接收机解调报文后,通过星间链路的传输,最后通过星地链路传输到星基 ADS-B 地面站;星基 ADS-B 地面站将收到的报文信息转换为 CAT 021 的报文,并通过地面网络分发到 ADS-B 应用子系统。

在星基 ADS-B 系统中,各个机载 ADS-B 发射机以随机突发方式发射 ADS-B 信号,当航空器数量较多时,不同航空器发射信号可能同时到达

星基 ADS-B 接收机,导致接收机无法解调冲突信号,使系统监视性能下降。为方便理论分析,本文只考虑了 ADS-B 信号间存在的冲突,暂没有考虑 1 090 MHz 工作频率上 A/C 模式及 S 模式应答信号对 ADS-B 信号干扰的影响。

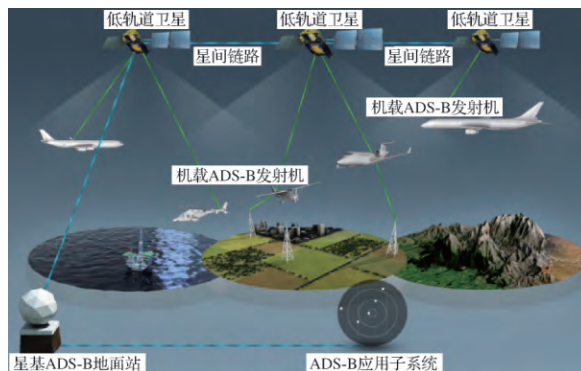


图 1 星基 ADS-B 系统

Fig. 1 Satellite-Based ADS-B system

1.2 报文冲突概率

假设机载 ADS-B 发射机报文发射的速率为 v (报文数/s),则机载 ADS-B 发射机的报文发送周期为 $T = 1/v$ (单位为 s),另外假设星基 ADS-B 接收机覆盖空域内航空器数量为 N ,则星基 ADS-B 接收机覆盖空域内全部机载 ADS-B 发射机产生报文到达星基 ADS-B 接收机的速率为

$$\lambda = Nv = \frac{N}{T} \quad (1)$$

假设单个 ADS-B 报文的持续时间为 τ ,则将单个 ADS-B 报文传输期间内,星基 ADS-B 接收机收到的报文个数定义为星基 ADS-B 接收机的负载:

$$G = \lambda\tau \quad (2)$$

此外假设机载 ADS-B 发射机产生的报文到达星基 ADS-B 接收机的时刻是服从泊松分布的随机变量,则在 t 时间内有 k 个报文到达星基 ADS-B 接收机的概率为^[19]

$$P(k, t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t} \quad (3)$$

假设某时刻一个报文到达星基 ADS-B 接收机,那么在该时刻前 τ 与后 τ 的 2τ 时间内均没有其他报文到达,则该报文与其他报文无冲突,则星基 ADS-B 接收机报文无冲突的概率为

$$P_{nc} = P(0, 2\tau) = e^{-2G} \quad (4)$$

根据式(4)可计算得到星基 ADS-B 接收机报文冲突的概率为

$$P_{collision} = 1 - P_{nc} = 1 - e^{-2G} \quad (5)$$

式(5)表明:星基 ADS-B 接收机中报文冲突的概率决定于系统负载因子 G , 当报文产生速率 v 及报文持续时间 τ 给定情况下, 系统负载因子 G 仅决定于星基 ADS-B 接收机覆盖区域内航空器的数量, 覆盖范围内航空器数量越多, 则星基 ADS-B 接收机产生报文冲突的概率越高。

1.3 报文正确接收概率

ADS-B 系统原设计用于航空器的空地监视, 现将 ADS-B 应用于星基监视, 将产生以下问题。由于航空器与卫星的距离远大于航空器与地面站的距离, 因此星基 ADS-B 接收机解调器输入信噪比较低, 导致星基 ADS-B 接收机解调器误码率增高, 因此在研究星基 ADS-B 接收机监视容量时还需考虑空天链路误码率的影响。

假设机载 ADS-B 发射机与星基 ADS-B 接收机空天链路的误码率为 P_s , 且 ADS-B 报文包含 n 个码元, 则在不存在报文冲突情况下, ADS-B 报文全部码元均被正确解调的概率为

$$P_d = (1 - P_s)^n \approx 1 - nP_s \quad (6)$$

进一步将 ADS-B 报文与其他报文不冲突的事件记为 A , ADS-B 报文被正确接收的事件记为 B , 则星基 ADS-B 接收机正确接收 ADS-B 报文的概率为

$$P_r = P(A, B) = P(B/A)P(A) \quad (7)$$

式中: $P(A)$ 为报文不冲突事件 A 的概率; $P(B/A)$ 为报文无冲突条件下, ADS-B 报文被正确接收的概率。分别将式(4)与式(6)代入式(7)可得到 ADS-B 报文被正确接收的概率为

$$P_r = P_d \cdot P_{nc} = (1 - P_s)^n \cdot e^{-2G} \approx e^{-2N_{avr}} \cdot (1 - nP_s) \quad (8)$$

式(8)表明:当报文产生速率 v 、报文持续时间 τ 及报文码元数 n 给定情况下, 报文正确接收概率由星基 ADS-B 接收机覆盖区域内航空器数量 N 及链路误码率 P_s 联合确定。

1.4 位置报文更新间隔

机载 ADS-B 发射机产生的报文类型有:位置

报文、速度报文、场面位置报文、航空器标识报文及状态报文等, 其中位置报文提供了航空器的三维坐标, 利用位置报文可实现航空器的监视, 位置报文的更新间隔对航空器监视性能有重要的影响, 下面给出星基 ADS-B 接收机位置报文更新间隔的定量计算方法。

为方便分析, 假设某航空器初始位置报文发送时刻为 t_0 , 其随后第 I 个位置报文的发送时刻

为 $t_0 + \sum_{i=1}^I T_i$, 其中 T_i 为第 i 个位置报文的发送间隔, 由 ADS-B 技术规范知道 $\{T_i, i = 1, 2, \dots\}$

为统计独立的且取值在 $[0.8, 1.2]$ 之间均匀分布的随机变量^[20], 另外假设该机载 ADS-B 发射机与星基 ADS-B 接收机的链路传输延迟为 t_r , 则

该飞机发送的第 I 个位置报文到达星基 ADS-B 接收机的时刻为 $t_0 + \sum_{i=1}^I T_i + t_r$ 。此外假设 t_0 时刻发送的位置报文在 $t_0 + t_r$ 时刻已被星基 ADS-B

接收机正确接收, 由于星基 ADS-B 接收机存在共信道干扰及报文解调错误, 因此该飞机随后发送的位置报文被星基 ADS-B 接收机正确接收的时

刻可能为 $t_0 + \sum_{i=1}^I T_i + t_r, I = 1, 2, \dots$, 将星基 ADS-B 接收机两次正确接收该航空器位置报文的间隔定义为位置报文的更新间隔 ΔT , 则 ΔT

是一个随机变量, 其可能取值及相应概率为

$$\Delta T = \begin{cases} T_1 & \text{以概率 } P_r \text{ 发生} \\ T_1 + T_2 & \text{以概率 } (1 - P_r)P_r \text{ 发生} \\ \vdots & \\ \sum_{i=1}^I T_i & \text{以概率 } (1 - P_r)^{I-1}P_r \text{ 发生} \\ \vdots & \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_r 为星基 ADS-B 接收机报文正确接收的概率, 其由式(8)给出。假设位置报文的发送间隔 $\{T_i, i = 1, 2, \dots\}$ 已给定情况下, 位置报文更新间隔的条件均值为

$$E[\Delta T/T_i, i = 1, 2, \dots] = P_r T_1 + P_r(1 - P_r) \cdot (T_1 + T_2) + \dots + P_r(1 - P_r)^{I-1} \cdot \sum_{i=1}^I T_i + \dots \quad (10)$$

考虑到 $\{T_i, i = 1, 2, \dots\}$ 为统计独立且取值为 $[0.8, 1.2]$ 之间均匀分布的随机变量, 且 $E(T_i)$

$= T_{\text{pos}}, T_{\text{pos}}$ 为飞机位置报文的平均发送周期。进一步对式(10)中的 $\{T_i, i = 1, 2, \dots\}$ 进行统计平均得到位置报文更新间隔的均值为

$$\begin{aligned} \Delta \bar{T} &= E_{T_i} \{E(\Delta T/T_i, i = 1, 2, \dots)\} = \\ &P_r \cdot E(T_1) + P_r(1 - P_r) \cdot E\left(\sum_{i=1}^2 T_i\right) + \dots + \\ &P_r(1 - P_r)^{i-1} \cdot E\left(\sum_{i=1}^I T_i\right) + \dots = \\ &P_r \cdot T_{\text{pos}} + P_r(1 - P_r) \cdot 2T_{\text{pos}} + \dots + \\ &P_r(1 - P_r)^{i-1} \cdot iT_{\text{pos}} + \dots \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)两边同乘因子 $(1 - P_r)$ 可得

$$\begin{aligned} (1 - P_r) \cdot \Delta \bar{T} &= P_r(1 - P_r)T_{\text{pos}} + P_r(1 - P_r)^2 \cdot 2T_{\text{pos}} + \dots + P_r(1 - P_r)^{i-1} \cdot \\ &(i - 1)T_{\text{pos}} + P_r(1 - P_r)^i \cdot iT_{\text{pos}} + \dots \end{aligned} \quad (12)$$

式(11)与式(12)错位相减后可得

$$\begin{aligned} P_r \cdot \Delta \bar{T} &= P_r T_{\text{pos}} + P_r(1 - P_r)T_{\text{pos}} + \dots + \\ &P_r(1 - P_r)^{i-1} \cdot T_{\text{pos}} - P_r(1 - P_r)^i \cdot iT_{\text{pos}} \end{aligned} \quad (13)$$

对式(13)进行整理后表示为

$$\begin{aligned} \Delta \bar{T} &= \left[\frac{1 - (1 + iP_r)(1 - P_r)^i}{P_r} \right] T_{\text{pos}} = \\ &\frac{T_{\text{pos}}}{P_r} - \frac{(1 + iP_r)(1 - P_r)^i}{P_r} T_{\text{pos}} \end{aligned} \quad (14)$$

当 $i \rightarrow \infty$ 时,位置报文更新间隔的均值化简为

$$\Delta \bar{T} = \frac{T_{\text{pos}}}{P_r} \quad (15)$$

最后,将式(8)代入式(15),可得到位置报文更新间隔的均值表示为

$$\Delta \bar{T} = e^{2Nv\tau} \cdot (1 - P_s)^{-n} \cdot T_{\text{pos}} \approx \frac{e^{2Nv\tau}}{1 - nP_s} T_{\text{pos}} \quad (16)$$

参考 ADS-B 技术规范^[2],ADS-B 报文包含码元个数 $n = 112$,报文长度 $\tau = 120 \mu\text{s}$,机载 ADS-B 发射机报文产生速率 $v = 3.1$ 报文数/s,飞机位置报文的平均发送周期 $T_{\text{pos}} = 1 \text{ s}$ 。则式(16)最终化简为

$$\Delta \bar{T} \approx \frac{1.0007^N}{1 - 112P_s} \quad (17)$$

式(17)表明:星基 ADS-B 接收机中,位置报文更新间隔的均值由星基 ADS-B 接收机覆盖区域内航空器数量 N 及链路误码率 P_s 联合决定。

位置报文更新间隔的均值仅描述了星基 ADS-B 接收机输出位置报文的平均间隔,该参量

不能完全反映位置报文达到的散布程度。下面结合 ADS-B 地面应用子系统的需求,引入了 95% 位置报文更新间隔 $\Delta T_{95\%}$ 的概念,即位置报文更新间隔 ΔT 以 0.95 的概率低于 $\Delta T_{95\%}$:

$$P(\Delta T \leq \Delta T_{95\%}) = 0.95 \quad (18)$$

假设 95% 位置报文更新间隔 $\Delta T_{95\%}$ 取值为

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^j T_i, \text{ 则} \\ P(\Delta T \leq \Delta T_{95\%}) &= P(\Delta T \leq \sum_{i=1}^j T_i) = P_r + \\ &(1 - P_r)P_r + \dots + (1 - P_r)^{j-1} \cdot \\ &P_r = 1 - (1 - P_r)^j \end{aligned} \quad (19)$$

将式(19)结果代入式(18)后,整理可得

$$\begin{aligned} j &= \frac{\ln(1 - 0.95)}{\ln(1 - P_r)} \approx \\ &\frac{2.9957}{N \times 7.44 \times 10^{-4} - \ln(1.00074^N + 112P_s - 1)} \end{aligned} \quad (20)$$

由于 $\Delta T_{95\%} = \sum_{i=1}^j T_i$ 为一个随机变量,进一步取平均后可得

$$\begin{aligned} \Delta T_{95\%} &= E\left(\sum_{i=1}^j T_i\right) = j \cdot E(T_i) = \\ &\frac{2.9957}{N \times 7.44 \times 10^{-4} - \ln(1.00074^N + 112P_s - 1)} T_{\text{pos}} \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)表明:95% 位置报文的更新间隔 $\Delta T_{95\%}$ 仅由星基 ADS-B 接收机覆盖空域内航空器数量 N 及链路误码率 P_s 联合确定。

1.5 星基 ADS-B 接收机的监视容量

对式(21)进行变换,可得到航空器数量 N 与 95% 位置报文的更新间隔 $\Delta T_{95\%}$ 的关系为

$$N = \frac{\ln(1 - nP_s) - \ln[1 - (0.05)^{T_{\text{pos}}/\Delta T_{95\%}}]}{2v\tau} \quad (22)$$

下面基于式(22)引入星基 ADS-B 接收机监视容量的概念。假设 ADS-B 地面应用子系统所要求的 $\Delta T_{95\%}$ 取值为 ΔT_{req} ,则星基 ADS-B 接收机可提供满足 ADS-B 地面应用子系统性能要求的航空器数量称为星基 ADS-B 接收机的监视容量。根据以上定义,星基 ADS-B 接收机的监视容量计算公式为

$$C = \frac{\ln(1 - nP_s) - \ln[1 - (0.05)^{T_{\text{pos}}/\Delta T_{\text{req}}}] }{2v\tau} \quad (23)$$

参考 ADS-B 技术规范^[2], ADS-B 报文的码元数目 $n = 112$, ADS-B 报文长度 $\tau = 120 \mu\text{s}$, 机载 ADS-B 发射机报文产生速率 $v = 3.1$ 报文数/s, 飞机位置报文的发送平均周期 $T_{\text{pos}} = 1 \text{ s}$, 则星基 ADS-B 接收机的监视容量的定量计算公式为

$$C \approx -1\,344 \times \ln(1 - 0.05^{1/\Delta T_{\text{req}}}) - 1.5 \times 10^5 P_s \quad (24)$$

式(24)表明:星基 ADS-B 接收机的监视容量由 ADS-B 应用子系统所要求的位置报文更新间隔 ΔT_{req} 及链路误码率 P_s 联合决定。

2 仿真结果

2.1 仿真参数设置

星基 ADS-B 系统仿真参数如表 1 所示,在仿真程序中,通过合理设置仿真时间来保证统计数据的准确性。航空器数量为 500 与 1 000 架时,仿真时间设置为 100 s;航空器数量为 1 500 与 2 000 架时,仿真时间为 300 s;航空器数量为 2 500 与 3 000 架时,仿真时间为 500 s;航空器数量为 3 500 与 4 000 架时,仿真时间为 800 s。

表 1 星基 ADS-B 系统仿真参数^[2,20]

Table 1 Simulation parameters for satellite-based ADS-B system^[2,20]

| 参 数 | 取 值 |
|------------------------------------|------------------------------------|
| 卫星高度/km | 800 |
| 覆盖区域半径/km | 1 360 |
| 电波传播速率/(km · s ⁻¹) | 3 × 10 ⁵ |
| 报文速率 v /(报文数 · s ⁻¹) | 3.1 |
| 位置报文周期/s | 0.8~1.2 |
| 速度报文周期/s | 0.8~1.2 |
| 状态报文周期/s | 0.8~1.2 |
| 标识报文周期/s | 9.6~10.4 |
| 链路误码率 P_s | 10 ⁻⁴ ~10 ⁻² |
| 报文码元数目 n /bits | 112 |
| 报文长度 $\tau/\mu\text{s}$ | 120 |

2.2 报文冲突概率

图 2 为星基 ADS-B 接收机报文冲突概率与航空器数量的关系曲线。曲线比较表明:①理论

结果与计算机仿真结果完全一致,验证理论式(5)的正确性;②随着航空器数量的增加,星基 ADS-B 接收机报文冲突的概率显著增加。

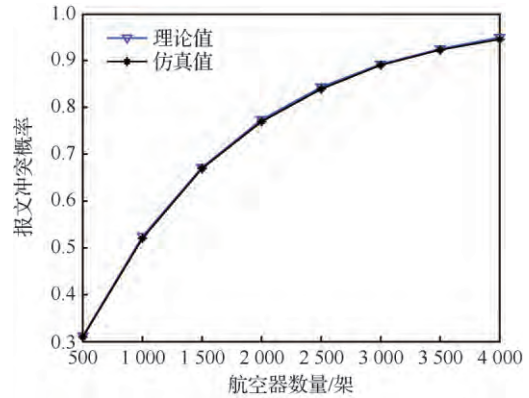


图 2 报文冲突概率与航空器数量的关系

Fig. 2 Relationship between message collision probability and number of aircraft

2.3 报文正确接收概率

图 3 为星基 ADS-B 接收机报文正确接收概率与航空器数量的关系曲线。曲线比较表明:①仿真结果与理论结果完全一致,验证理论公式的正确性;②链路误码率对星基 ADS-B 报文正确接收概率影响较大,当链路误码率为 10⁻² 时,500 架飞机情况下报文正确接收概率仅为 0.2,当链路误码率降低至 10⁻³ 时,报文正确接收概率则提升至 0.6;③航空器数量对报文正确接收概率影响较大,随着航空器数量的增加,报文正确接收概率迅速下降,当航空器数量超过 3000

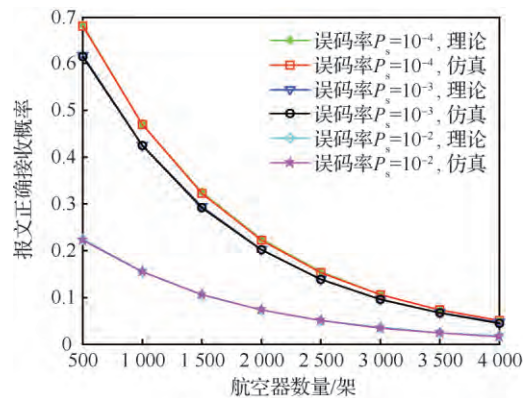


图 3 报文正确接收概率与航空器数量的关系曲线

Fig. 3 Relationship between correct probability of message reception and number of aircraft

以后,报文正确接收概率低于 0.1。

2.4 95%位置报文更新间隔

图 4 为 95%位置报文更新间隔与航空器数量的关系曲线。曲线比较表明:①仿真结果与理论计算完全一致,验证理论公式的正确性;②误码率对 95%位置报文的更新间隔影响较大,链路误码率为 10^{-3} 时,4 000 架航空器的 95%报文更新间隔为 60 s,而当链路误码率恶化至 10^{-2} 时,4 000 架航空器 95%位置报文更新间隔将提高到 180 s;③航空器数量对 95%位置报文更新间隔影响较大,随着航空器数量的增加,95%位置报文更新间隔增大,例如航空器数量为 1 500 时,95%位置报文更新间隔为 10 s,当航空器数量增加到 3 500 时,95%位置报文更新间隔显著提高到 40 s。

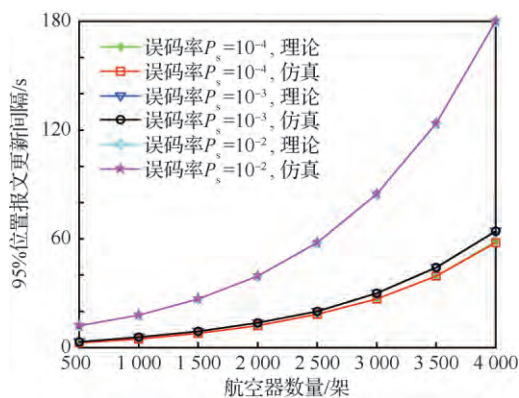


图 4 95%位置报文更新间隔与航空器数量的关系

Fig. 4 Relationship between of 95% position message update interval and number of aircraft

2.5 监视容量

图 5 为星基 ADS-B 接收机监视容量与要求的位置报文更新间隔的关系曲线。曲线比较表明:①仿真结果与理论计算完全一致,验证理论公式的正确性;②误码率对监视容量影响显著,当误码率为 10^{-2} 时,要求的位置报文更新间隔为 12 s 时,监视容量仅为 500 架,当误码率下降至 10^{-4} 时,监视容量则提高到 2 000 架;③监视容量与要求的报文更新间隔近似呈现线性关系,要求的位置报文更新间隔每减小 1 s,监视容量减少 83.3 架。

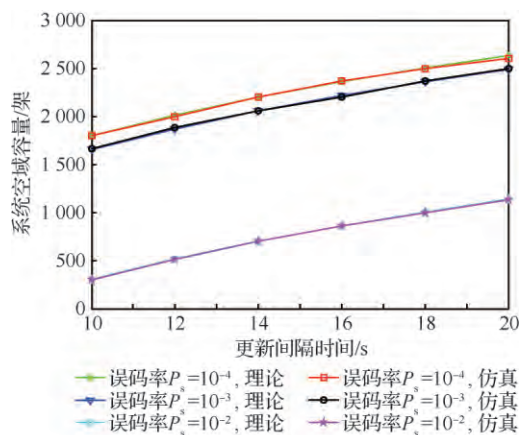


图 5 监视容量与要求的位置报文更新间隔的关系曲线

Fig. 5 Relationship between surveillance capacity and requested position message update interval

表 2 进一步计算给出了要求的位置报文更新间隔为 $\Delta T_{\text{req}} = 15 \text{ s}^{[16]}$ 时,不同链路误码率情况下,星基 ADS-B 接收机的监视容量。

由表 2 可观测到:误码率 $P_s = 10^{-4}$ 时,星基 ADS-B 接收机可为 2 282 架航空器提供监视服务,链路误码率 $P_s = 10^{-3}$ 时,监视容量为 2 146 架,当链路误码率 $P_s = 10^{-2}$ 时,监视容量仅为 784 架。

表 2 星基 ADS-B 接收机的监视容量

Table 2 Surveillance capacity of satellite-based ADS-B receiver

| 误码率 | $P_s = 10^{-2}$ | $P_s = 10^{-3}$ | $P_s = 10^{-4}$ |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 监视容量/架 | 784 | 2 146 | 2 282 |

3 结 论

1)星基 ADS-B 接收机的监视容量由 ADS-B 应用子系统所要求的位置报文更新间隔及飞机-卫星链路的误码率联合确定。

2)当要求的位置更新间隔给定后,提高飞机-卫星链路传输的可靠性,可显著提高星基 ADS-B 接收机的监视容量。

参 考 文 献

- [1] ICAO. Technical provisions for mode S services and extended squitter; 9871[S]. Montreal: ICAO, 2012.
- [2] RTCA DO-260B. Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic de-

- pendent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information services-broadcast (TIS-B): ED-102A[S]. Washington, D. C. : Radio Technical Commission for Aeronautics, 2009.
- [3] ZHANG J, LIU W, ZHU Y. Study of ADS-B data evaluation[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(4): 461-466.
- [4] BLOMENHOFER H, PAWLITZKI A, ROSENTHAL P, et al. Space-based automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) payload for in-orbit demonstration[C] // Advanced Satellite Multimedia Systems Conference. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2012: 160-165.
- [5] DELOVSKI T, HAUER LC, BERHRENS J. ADS-B high altitude measurements in non-radar airspaces[J]. European Journal of Navigation, 2010, 8(2): 1-28.
- [6] GUPTA O P. Global augmentation of ADS-B using Iridium NEXT hosted payloads[C] // Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2011: 1-15.
- [7] FRANCIS R, NOEL J M, VINCENT R. Orbital monitoring of automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) signals for improved air traffic surveillance in remote and oceanic airspace[C] // Proceedings of the 62nd International Astronautical Congress. Paris: IAF, 2011: 3111-3119.
- [8] ITU. Working document towards a preliminary draft new report itu-rm. [ADS-B]-Reception of automatic dependent surveillance broadcast via satellite and compatibility studies with incumbent systems in the frequency band 1088.7-1091.3 MHz; Annex 12 to Working Party 5B[R]. Budapest: International Telecommunication Union, 2015.
- [9] Flight Safety Foundation. Benefits analysis of space-based ADS-B[EB/OL]. (2016-06-29) [2017-11-11]. <http://flight.safety.org/wpcontent/uploads/2016/10/ADS-B-report-June-2016-1.pdf>.
- [10] FRANCIS R, VINCENT R, NOEL JM, et al. The flying laboratory for the observation of ADS-B signals[J/OL]. International Journal of Navigation and Observation, 2011 [2017-11-15]. <http://dx.doi.org/10.1155/2011/973656>.
- [11] 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. Berlin: DLR, 2014: 1-16.
- [12] ALMINDE L, KAAS K, BISGAARD M, et al. GOMX-1 flight experience and air traffic monitoring results[C] // 28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Reston, VA: AIAA, 2014: 1-7.
- [13] 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.
- CHEN L H, CHEN X Q, ZHAO Y. Satellite-based ADS-B receiving system and application[J]. Satellite Application, 2016(3): 34-40 (in Chinese).
- [14] MARK R. Aireon launch begins new era for satellite-based aircraft surveillance[EB/OL]. New York: Flying Magazine, 2017. (2017-01-18) [2017-11-11]. <https://www.flyingmag.com/aireon-launch-begins-new-era-for-satellite-based-aircraft-surveillance>.
- [15] DIEGO M. Globalstar's space-based ADS-B[EB/OL]. (2014-09-19) [2017-11-11]. <https://www.globalstar.com/en/index.php?cid=6300>.
- [16] GARCIA M A, STAFFORD J, MINNIX J, et al. Aireon space based ADS-B performance model[C] // Integrated Communication, Navigation, and Surveillance Conference. Piscataway, NJ: IEEE Computer Society, 2015: C2-1-C2-10.
- [17] PRYT R V D, 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.
- [18] MARTIN J P, GARCIA C E, FOLONIER M F, et al. Satellite ADS-B message collision simulation[C] // VIII Conferencia Científica de Telecomunicaciones, 2015: 1-6.
- [19] ABRAMSON N. The aloha system: Another alternative for computer communications[C] // Fall Joint Computer Conference. New York: ACM, 1970: 281-285.
- [20] RTCA. Minimum operational performance standards for air traffic control radar beacon system/mode select (AT-CRBS/Mode S) airborne equipment: DO-181D[S]. Washington, D. C. : Radio Technical Commission for Aeronautics, 2008.

(责任编辑: 苏磊)

Performance analysis of surveillance capacity of satellite-based ADS-B receiver

LIU Haitao^{*}, WANG Songlin, QIN Dingben, LI Dongxia

Tianjin Key Lab for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: Satellite-based Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) is an important technology for wide-area aeronautical surveillance. Experiments show that the surveillance performance provided by the satellite-based ADS-B system deteriorates seriously due to co-channel interference within the system. To quantitatively analyze the surveillance capacity of the satellite-based ADS-B system, a model for the satellite-based ADS-B system is developed. The collision probability and the correct reception probability of messages sent by the ADS-B transmitter of civil aircraft are theoretically derived. The update intervals of position messages and the surveillance capacity of the satellite-based ADS-B receiver are obtained. Simulation results verify the correctness of these theoretical results. Our study shows that the surveillance capacity of the satellite-based ADS-B receiver is jointly determined by the symbol error rate of the aircraft-satellite link and the required update interval of the ADS-B application subsystem.

Keywords: satellite-based ADS-B system; collision probability of messages; correct reception probability of messages; update interval of position message; surveillance capacity

Received: 2017-11-15; Revised: 2017-12-28; Accepted: 2018-01-15; Published online: 2018-01-25 10:34

URL: <http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20180517.html>

Foundation item: National Key Research and Development Plan(2016YFB0502402)

^{*} Corresponding author. E-mail: htliucauc@qq.com