

# 基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证

刘海涛\*, 冯景勃, 李冬霞, 王磊

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津, 300300)

**摘 要:** 星基广播式自动相关监视 (ADS-B) 是实现广域范围内航空器监视的重要技术手段。为解决星基 ADS-B 系统存在的虚假目标干扰问题, 提出一种基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证方法。建立星基 ADS-B 验证系统模型, 理论分析给出空天链路多普勒频移改变量的计算方法, 并采用柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫 (k-s) 检验方法识别虚假 ADS-B 消息, 最后, 通过计算机仿真验证所提方法的正确性和有效性。仿真结果表明: 所提方法的检测概率达到 97.75% 以上, 漏警概率低于 4.50%; 此外, 所提方法只需单颗低轨道卫星进行监视, 并且对航空器和卫星的定位误差不敏感。

**关 键 词:** 星基 ADS-B; 位置验证; 多普勒频移的改变量; k-s 检验; 定位误差

**中图分类号:** TN925

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5965(2025)01-0001-08

星基广播式自动相关监视 (automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B) 是实现广域范围内航空器监视的重要手段。通过将 ADS-B 接收机部署在低轨道卫星上, 接收航空器播发的 ADS-B 消息, 并通过卫星链路传输至地面站, 最后, 通过地面网络分发给应用终端以实现航空器的监视<sup>[1-2]</sup>。相对地基监视系统, 星基 ADS-B 系统具有覆盖范围广、不受地理环境限制、可满足航空器持续监视等多方面的优势<sup>[3-4]</sup>。因此, 星基 ADS-B 系统在民航、军航等领域具有广泛的应用前景。由于 ADS-B 以广播方式工作, 且 ADS-B 消息格式公开, 此外系统没有采取任何加密认证措施, ADS-B 系统存在虚假目标干扰问题, 严重威胁到航空飞行安全<sup>[5-7]</sup>。相比于地基 ADS-B 系统, 星基 ADS-B 系统监视范围更广, 虚假目标干扰问题更加突出<sup>[8]</sup>, 因此, 针对星基 ADS-B 系统存在的虚假目标干扰问题, 开展星基 ADS-B 位置消息验证的研究具有重要的意义。

近年来, 针对地基 ADS-B 系统存在的虚假目标干扰问题, 国内外开展了大量研究。相关研究主要分为 4 类: 基于波达方向的方法<sup>[9]</sup>、基于信号到达时间差的方法<sup>[10-11]</sup>、基于多普勒效应的方法<sup>[12-13]</sup>和基于加密认证的方法<sup>[14-16]</sup>。

基于波达方向方法的思想是地面基站通过测向获得接收信号的来向, 同时利用航空器播发的 ADS-B 位置消息和地面基站位置, 计算得到信号来向, 最后, 通过比较 2 个信号来向以验证 ADS-B 位置消息的真实性。该方法存在主要问题是地面基站需要具备空间测向的能力, 接收设备较复杂。基于信号到达时间差的方法思想是地面设置多个基站, 同时接收航空器播发的 ADS-B 消息, 利用信号到达时间差构建方程组, 计算航空器的空间位置, 最后与航空器 ADS-B 位置消息进行对比, 以验证 ADS-B 消息的真实性。该方法存在的主要问题是需要多个地面基站, 且多个地面基站需维持精确时间同步。基于多普勒效应方法的思想是地面基站

收稿日期: 2022-12-31; 录用日期: 2023-03-10; 网络出版时间: 2023-05-10 16:58

网络出版地址: [link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230510.1319.001](http://link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20230510.1319.001)

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0502402); 国家自然科学基金 (U1733120); 天津市多元投入基金 (21JCQNJC00770)

\* 通信作者. E-mail: [htliucauc@qq.com](mailto:htliucauc@qq.com)

**引用格式:** 刘海涛, 冯景勃, 李冬霞, 等. 基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证 [J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51 (1): 1-8.  
LIU H T, FENG J B, LI D X, et al. Aircraft position verification with one satellite based on Doppler shift change [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51 (1): 1-8 (in Chinese).

通过频率估计获得信号的载波频率,同时利用航空器播发的 ADS-B 消息和地面基站位置,计算得到链路的多普勒频率,最后,通过计算两组频率的相关系数,以验证 ADS-B 位置消息的真实性。该方法存在的主要问题是实际系统中,ADS-B 发射机和接收机存在载波偏移,将影响验证性能。基于加密认证方法的思想是合法航空器通过私钥对其播发的 ADS-B 消息签名,而非法航空器无法获得授权密钥,无法实现 ADS-B 消息的签名,地面基站利用公钥对接收的 ADS-B 消息核验签名,从而验证 ADS-B 消息的真实性。该方法存在的主要问题是与 ADS-B 系统现行技术规范不兼容,难以与现有的航空器监视系统融合。

针对星基 ADS-B 系统存在的虚假目标干扰问题,文献[8]提出基于信号到达时间差的航空器独立位置验证方法。该方法利用信号到达时间差构建一个双曲面方程,并计算航空器位置报告点与双曲面的最短距离,最后,将最短距离与阈值门限进行比较,以判定航空器播发 ADS-B 位置消息的真实性。文献[17]提出基于联合时差/频差的双星定位方法。该方法根据信号到达时间差、载波频率差及航空器所在球面方程,构建 3 个参量的方程组,并计算得到航空器的空间位置坐标,最后,与航空器播发的 ADS-B 位置消息进行比较以验证消息的真实性。以上 2 种方法存在的问题是最少需要 2 颗搭载 ADS-B 接收机的低轨道卫星,此外,要求 2 颗卫星保持精确的时间同步。

为解决星基 ADS-B 系统存在的虚假目标干扰问题,提出一种基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证方法。首先,建立星基 ADS-B 验证系统模型,然后,理论分析给出空天链路多普勒频移改变量的计算方法,最后,通过柯尔莫哥洛夫-斯米尔诺夫(Kolmogorov-Smirnov, k-s)检验方法以验证 ADS-B 消息的真实性。与已有方法相比,本文方法仅需使用单个星载 ADS-B 接收机,不涉及时间同步问题,并且对航空器和卫星的定位误差 insensitive。

## 1 星基 ADS-B 验证系统

### 1.1 系统模型

图 1 为星基 ADS-B 验证系统的示意图。系统由航空器、搭载星载 ADS-B 接收机的低轨道卫星、地面关口站、地面验证终端、应用子系统组成。系统工作原理为:航空器通过全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)获取航空器空间位置及速度等信息,并通过 1 090 数据链以明文广播的方式播发 ADS-B 消息,星载 ADS-B 接

收机通过接收航空器播发的 ADS-B 消息,获取航空器位置、速率、标识等信息,同时记录 ADS-B 消息的接收时刻及载波频率,相关信息通过星间链路、星地链路传输至地面关口站,与此同时,卫星通过 GNSS 系统获取自身空间位置、速度和相应时间信息,并同样传输至地面关口站,地面关口站将收到的信息分发给地面验证终端,地面验证终端利用本文方法对航空器位置信息进行验证。

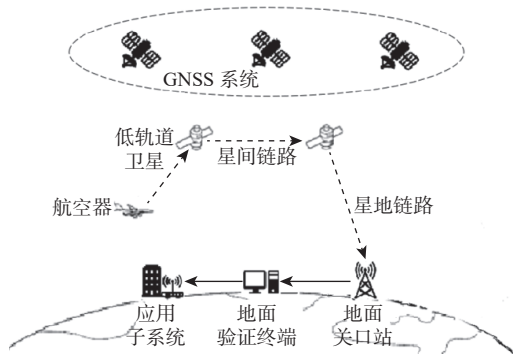


图 1 星基 ADS-B 验证系统示意图

Fig. 1 Diagram of satellite-based ADS-B verification system

### 1.2 信号模型

$t$  时刻,星载 ADS-B 接收机接收的 ADS-B 信号表示为

$$s(t) = \sqrt{P}d(t)\cos(\Phi + 2\pi f) + n(t) \quad (1)$$

式中:  $P$  为接收信号功率;  $d(t)$  为 ADS-B 基带信号;  $f$  为载波频率;  $\Phi$  为载波的初始相位;  $n(t)$  为信道输入高斯白噪声。

载波频率  $f$  的表达式为

$$f = f_0 + \Delta f_i + f_d + \Delta f_r \quad (2)$$

式中:  $f_0$  为 ADS-B 系统的标称频率;  $\Delta f_i$  为航空器 ADS-B 发射机的载波频偏;  $f_d$  为航空器与星载 ADS-B 接收机链路的多普勒频移;  $\Delta f_r$  为星载 ADS-B 接收机的载波频偏。

ADS-B 信号载波频率的估计值可表示为<sup>[18]</sup>

$$\hat{f} = f + \sigma \quad (3)$$

式中:  $\sigma$  为载波频率估计的误差,目前精度已达  $10^{-1}$  Hz<sup>[18]</sup>。

## 2 空天链路的多普勒频移

### 2.1 航空器与卫星通信链路的多普勒频移

图 2 为地心地固坐标系下某时刻航空器与卫星的位置关系。图中:  $O$  为地心地固坐标系的原点,该时刻,航空器位于  $P$  点,  $(x_p, y_p, z_p)$  为航空器的位置坐标,  $\mathbf{v}_p = [v_{p,x}, v_{p,y}, v_{p,z}]$  为航空器的速度矢量。卫星位于  $S$  点,  $(x_s, y_s, z_s)$  为卫星的位置坐标,  $\mathbf{v}_s = [v_{s,x}, v_{s,y}, v_{s,z}]$  为卫星的速度矢量。  $\mathbf{r}_{sp}$  为矢量  $\mathbf{OS}$  与矢

量  $OP$  的位置差矢量,  $\mathbf{v}_{sp}$  为矢量  $\mathbf{v}_s$  与  $\mathbf{v}_p$  的速度差矢量,  $\theta$  为位置差矢量  $\mathbf{r}_{sp}$  与速度差矢量  $\mathbf{v}_{sp}$  的夹角。

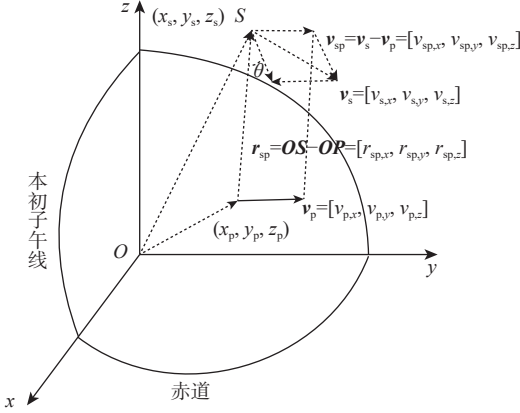


图 2 航空器与卫星的位置关系

Fig. 2 Position relationship between aircraft and satellite

航空器与星载 ADS-B 接收机链路的多普勒频移为<sup>[19]</sup>

$$f_d = \frac{f_{ot} \|\mathbf{v}_{sp}\|}{c} \cos \theta = \frac{f_{ot} (r_{sp,x} v_{sp,x} + r_{sp,y} v_{sp,y} + r_{sp,z} v_{sp,z})}{c \sqrt{r_{sp,x}^2 + r_{sp,y}^2 + r_{sp,z}^2}} \quad (4)$$

式中:  $f_{ot} = f_0 + \Delta f_i$  为航空器 ADS-B 发射机发射信号的载波频率, 由于  $f_0 \gg \Delta f_i$ , 故  $f_{ot} \approx 1090 \text{ MHz}$ ;  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  为光速。

## 2.2 基于 ADS-B 位置消息的多普勒频移

在地面验证终端中, ADS-B 位置消息的接收时刻记为  $t_p(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ , 相应 ADS-B 位置消息为  $m_p(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ , ADS-B 速度消息为  $m_v(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ 。对 ADS-B 位置消息  $m_p(i)$  进行译码并通过坐标变换, 得到航空器在地心地固坐标系下的位置坐标  $(x_p(i), y_p(i), z_p(i))$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ; 对 ADS-B 速度消息  $m_v(i)$  进行译码并通过坐标变换, 得到航空器在地心地固坐标系下速度矢量  $\mathbf{v}_p(i) = [v_{p,x}(i), v_{p,y}(i), v_{p,z}(i)]$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ 。

与此同时, 在地面验证终端中提取相应时刻卫星在地心地固坐标系下的位置坐标  $(x_s(i), y_s(i), z_s(i))$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$  及速度矢量<sup>[20-22]</sup>  $\mathbf{v}_s(i) = [v_{s,x}(i), v_{s,y}(i), v_{s,z}(i)]$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ 。

通过  $(x_p(i), y_p(i), z_p(i))$  和  $(x_s(i), y_s(i), z_s(i))$  计算得到一组位置差矢量  $\mathbf{r}_{sp}(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ ; 并且通过  $\mathbf{v}_p(i)$  和  $\mathbf{v}_s(i)$  计算得到一组速度差矢量  $\mathbf{v}_{sp}(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ 。

最后, 将位置差矢量  $\mathbf{r}_{sp}(i)$  和速度差矢量  $\mathbf{v}_{sp}(i)$  代入 2.1 节中式 (4), 得到一组航空器与星载 ADS-B 接收机链路的多普勒频移  $f_d(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ 。

进一步得到一组多普勒频移的改变量为

$$\Delta f_d(i) = f_d(i+1) - f_d(i) \quad i = 1, 2, \dots, I-1 \quad (5)$$

## 2.3 基于载波频率估计的多普勒频移

在地面验证终端中, 提取 ADS-B 位置消息相应信号的载波频率估计值, 并且记为  $\hat{f}(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, I$ 。进一步计算得到载波频率的改变量为

$$\begin{aligned} \Delta \hat{f}(i) &= \hat{f}(i+1) - \hat{f}(i) = f_d(i+1) - f_d(i) + \sigma(i+1) - \sigma(i) \\ \sigma(i) &= \Delta f_d(i) + \Delta \sigma(i) \quad i = 1, 2, \dots, I-1 \end{aligned} \quad (6)$$

由于载波频率估计的误差较小<sup>[18]</sup>,  $\Delta \hat{f}(i) \approx \Delta f_d(i)$ , 故信号载波频率的改变量近似等于多普勒频移的改变量。

## 3 位置验证方法

根据 2.2 节和 2.3 节, 利用 2 种不同方法得到航空器与星载 ADS-B 接收机通信链路的多普勒频移改变量  $\Delta f_d(i)$  及  $\Delta \hat{f}(i)$ 。

进一步采用非参数假设检验中的 k-s 检验方法, 通过判断  $\Delta f_d(i)$  与  $\Delta \hat{f}(i)$  服从的分布是否具有显著性差异, 来完成 ADS-B 信号来源的验证。与其他检验方法相比, k-s 检验具有良好的统计特性, 广泛应用于判断 2 组样本服从的分布是否一致的场景<sup>[23-24]</sup>, 检验过程如下。

**步骤 1** 首先, 建立如下假设:

$H_0$ :  $\Delta f_d(i)$  与  $\Delta \hat{f}(i)$  服从的分布没有显著性差异

$H_1$ :  $\Delta f_d(i)$  与  $\Delta \hat{f}(i)$  服从的分布具有显著性差异

**步骤 2** 计算  $\Delta f_d(i)$  与  $\Delta \hat{f}(i)$  的经验分布函数。

$$\begin{aligned} \Delta f_d(i) \text{ 的经验分布函数为 } S_{\Delta f_d}(x) &= \frac{\Delta f_d(i) \leq x \text{ 的个数}}{I-1} \\ \Delta \hat{f}(i) \text{ 的经验分布函数为 } S_{\Delta \hat{f}}(x) &= \frac{\Delta \hat{f}(i) \leq x \text{ 的个数}}{I-1} \end{aligned}$$

**步骤 3** 计算 k-s 检验的检验统计量  $D$ ,  $D = \max_x |S_{\Delta f_d}(x) - S_{\Delta \hat{f}}(x)|$ 。

**步骤 4** 依据检验统计量  $D$  及  $\Delta f_d(i)$  与  $\Delta \hat{f}(i)$  的样本数  $I-1$ , 通过查 k-s 检验临界值表或利用  $p$  值近似公式得到  $p$  值。

**步骤 5** 比较  $p$  值与显著性水平  $\alpha$  的大小, 通常取  $\alpha = 0.05$ 。当  $p > \alpha$  时, 接受原假设  $H_0$ ,  $\Delta f_d(i)$  与  $\Delta \hat{f}(i)$  服从的分布无明显差异, 判定 ADS-B 信号来源为航空器; 当  $p < \alpha$  时, 接受备择假设  $H_1$ ,  $\Delta f_d(i)$  与  $\Delta \hat{f}(i)$  服从的分布具有显著性差异, 判定 ADS-B 信号来源为欺骗源。

## 4 仿真实验

### 4.1 仿真参数

为验证本文方法的正确性, 构建基于多普勒频移改变量的星基 ADS-B 验证仿真系统。仿真系统由航空器、欺骗源、卫星 3 个节点构成, 表 1 为仿真系统的主要技术参数。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Simulation parameter setting

| 参数                                 | 数值   |
|------------------------------------|------|
| 频率估计误差的标准差 <sup>[18]</sup> /Hz     | 1.0  |
| 卫星定轨误差的标准差 <sup>[20-22]</sup> /m   | 10.0 |
| ADS-B水平位置误差的标准差 <sup>[25]</sup> /m | 4.0  |
| ADS-B垂直位置误差的标准差 <sup>[25]</sup> /m | 6.6  |

4.2 仿真场景

图 3 为利用卫星仿真软件 STK 构建的仿真场景 A。其中,包括 200 架速度为 900 km/h、高度为 10 km、飞行方向任意的航空器的航迹;1 颗高度为 700 km 的低轨道卫星的轨迹;200 个位于地表的静止欺骗源,均匀分布于航迹群中心的正下方区域 A 处。在卫星仿真软件中可见,卫星飞过整个航迹群的时间约为 85 s,航空器每秒播发 2 条 ADS-B 位置消息和速度消息,则对于每条航迹,星载 ADS-B 接收机可接收到 170 条 ADS-B 位置消息和 170 条 ADS-B 速度消息。

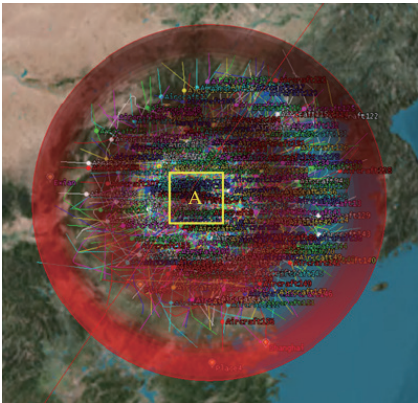


图 3 仿真场景 A

Fig. 3 Simulation scenario A

图 4 为利用卫星仿真软件 STK 构建的仿真场景 B。其中,包括 200 架速度为 900 km/h、高度为 10 km、飞行方向任意的航空器的航迹;1 颗高度为 700 km 的低轨道卫星的轨迹;4 组 200 个位于地表的静止欺骗源,分别均匀分布于航迹群的东南西北 4 个方向处。

4.3 仿真结果

通过 4.1 节和 4.2 节的仿真参数和场景设置,并假设 200 条航迹对应的 ADS-B 消息由相应航空器或某欺骗源发送,得到的仿真结果如图 5 所示(仿真场景 A)。

图 5(a) 为 ADS-B 信号来源为航空器或欺骗源时的  $p$  值分布。仿真结果表明:①当信号来源为航空器时,200 条航迹的  $p$  值均大于显著性水平 0.05,虚警概率为 0;②当信号来源为欺骗源时,200 条航

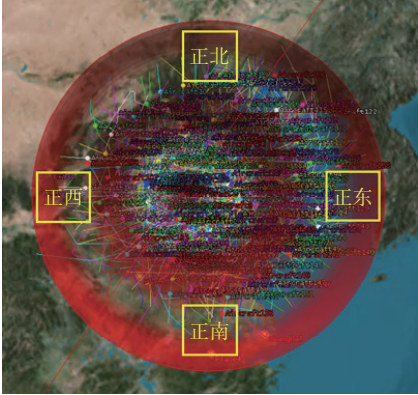
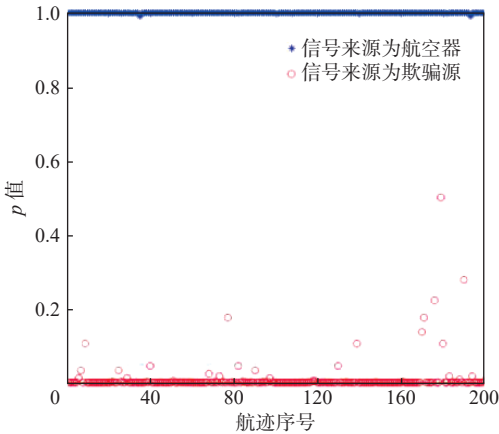


图 4 仿真场景 B

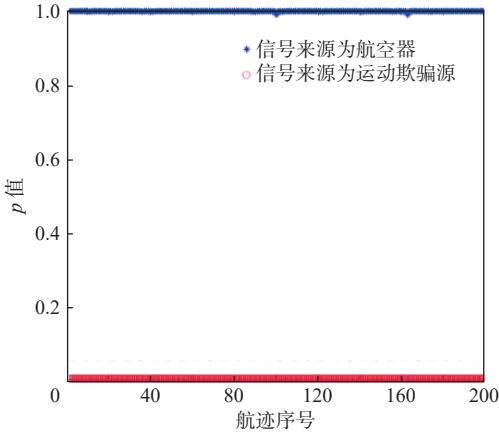
Fig. 4 Simulation scenario B

迹的  $p$  值绝大多数小于显著性水平 0.05,漏警概率约为 4.50%,检测概率为 97.75%。可见利用本文方法可有效识别 ADS-B 信号来源。

欺骗源的运动状态可能会影响 ADS-B 信号来源的判定,故在仿真场景 A 的区域 A 处生成 200 个速度为 100 km/h、行驶方向任意、沿地表行驶的运动欺骗源,得到的仿真结果如图 5(b) 所示。仿真结果表明:①当信号来源为航空器时,200 条航迹的  $p$  值均大于显著性水平 0.05,虚警概率为 0;②当信



(a) ADS-B 信号来源为航空器或欺骗源



(b) ADS-B 信号来源为航空器或运动欺骗源

图 5  $p$  值分布(仿真场景 A)

Fig. 5  $p$ -value distribution (simulation scenario A)

号来源为运动欺骗源时, 200 条航迹的  $p$  值均小于显著性水平 0.05, 漏警概率为 0, 检测概率为 100%。可见本文方法对欺骗源的运动状态具有一定的稳健性。

欺骗源的空间位置可能会影响 ADS-B 信号来源的判定, 故在航迹群的东南西北 4 个方向, 分别设置了 4 组包含 200 个静止欺骗源的欺骗源群组, 得到的仿真结果如表 2 所示(仿真场景 B)。

表 2 欺骗源的空间位置对检测性能的影响  
Table 2 Influence of spatial location of spoofing source on detection performance

| 欺骗源的空间位置 | 虚警概率/% | 漏警概率/% | 检测概率/% |
|----------|--------|--------|--------|
| 正东       | 0      | 1.00   | 99.50  |
| 正西       | 0      | 2.00   | 99.00  |
| 正南       | 0      | 1.50   | 99.25  |
| 正北       | 0      | 3.50   | 98.25  |

由表 2 可知, ①欺骗源的空间位置不会影响虚警概率的大小; ②欺骗源的空间位置会轻微影响漏警概率, 且漏警概率均低于 3.50%, 检测概率达到 98.25% 以上。可见本文方法对欺骗源的空间位置具有稳健性。

由于星基 ADS-B 系统存在信号碰撞问题, 因此, 分别假设接收端每 2 秒丢失 1 条 ADS-B 消息(消息丢失率为 25%)、每秒丢失 1 条 ADS-B 消息(消息丢失率为 50%)、每 2 秒丢失 3 条 ADS-B 消息(消息丢失率为 75%), 并与消息无丢失(消息丢失率为 0)的情况进行对比, 得到的仿真结果如表 3 所示。

由表 3 可知, ①当消息丢失率为 0 时, 漏警概率约为 4.50%, 检测概率为 97.75%; ②当消息丢失率为 25% 时, 漏警概率约为 5.00%, 检测概率为 97.50%; ③当消息丢失率为 50% 时, 漏警概率约为 6.00%, 检测概率为 97.00%; ④当消息丢失率为 75% 时, 漏警概率约为 31.50%, 检测概率为 84.25%。综上结果表明, 本文方法对 ADS-B 消息的丢失具有一定的稳健性, 在 ADS-B 消息丢失一半的情况下(每秒接收 1 条 ADS-B 位置消息和速度消息), 仍具有较好的检测性能。

表 3 消息丢失率对检测性能的影响  
Table 3 Influence of message loss rate on detection performance

| 消息丢失率/% | 虚警概率/% | 漏警概率/% | 检测概率/% |
|---------|--------|--------|--------|
| 0       | 0      | 4.50   | 97.75  |
| 25      | 0      | 5.00   | 97.50  |
| 50      | 0      | 6.00   | 97.00  |
| 75      | 0      | 31.50  | 84.25  |

由于 ADS-B 信号的频率估计误差会对检测性能产生影响, 因此, 分析了频率估计误差范围为 1~100 Hz 时<sup>[26-28]</sup>, 本文方法的检测性能, 仿真结果如图 6 所示。

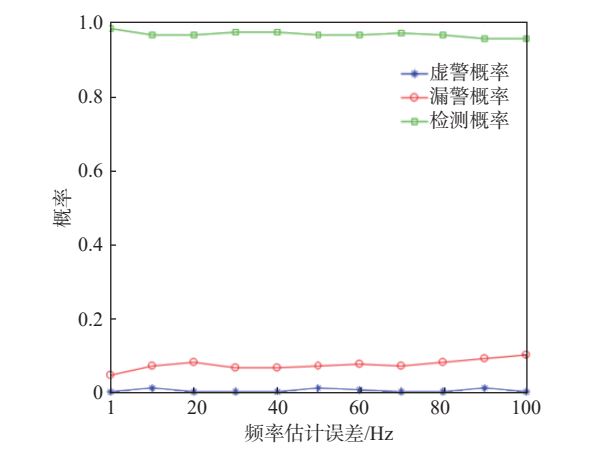


图 6 频率估计误差对检测性能的影响  
Fig. 6 Influence of frequency estimation error on detection performance

仿真结果表明: ①频率估计误差对虚警概率的影响较小, 虚警概率始终保持在 0 附近; ②漏警概率随着频率估计误差的减小而减小, 随着频率估计误差由 100 Hz 减小至 1 Hz, 漏警概率减小至 4.50% 左右, 检测概率增大至 97.75% 左右, 并且检测概率始终大于 95.00%。3 条曲线表明: 本文方法在 ADS-B 信号的频率估计误差已达  $10^{-1}$  Hz 精度时, 具有较好的检测性能。

图 7(a) 为 ADS-B 水平位置误差对检测性能的影响(仿真场景 A)。仿真结果表明: ①随着 ADS-B 水平位置误差由 5 m 增大至 40 m, 虚警概率始终保持在 0 左右; ②漏警概率始终保持在 4.50% 左右; ③检测概率始终大于 97.75%。3 条曲线表明: 本文方法对 ADS-B 水平位置误差不敏感。

图 7(b) 为 ADS-B 垂直位置误差对检测性能的影响(仿真场景 A)。仿真结果表明: ①随着 ADS-B 垂直位置误差由 5 m 增大至 40 m, 虚警概率始终保持在 0 左右; ②漏警概率始终保持在 4.50% 左右; ③检测概率始终大于 97.75%。3 条曲线表明: 本文方法对 ADS-B 垂直位置误差不敏感。

图 8 为卫星定轨误差对检测性能的影响(仿真场景 A)。仿真结果表明: ①随着卫星定轨误差由 10 m 增大至 100 m, 虚警概率始终保持在 0 左右; ②漏警概率略微增大, 由 4.50% 增大至 6.00% 左右; ③检测概率略微降低, 且始终大于 97.00%。3 条曲线表明: 本文方法对卫星定轨误差较不敏感, 在卫星定轨误差已达到几米的精度时, 具有较好的检测性能。

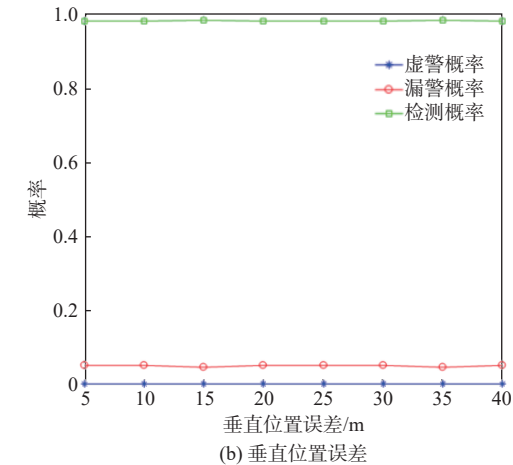
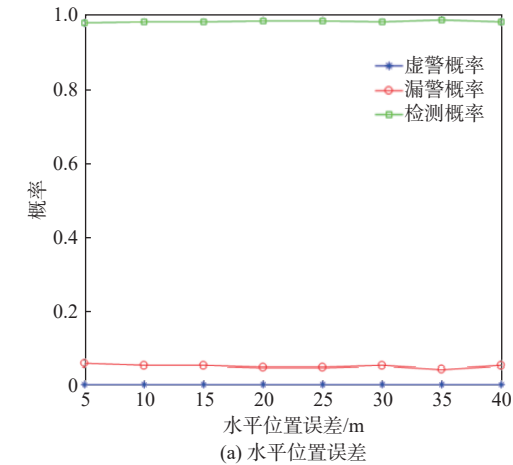


图 7 ADS-B 水平和垂直位置误差对检测性能的影响(仿真场景 A)

Fig. 7 Influence of ADS-B horizontal and vertical position error on detection performance (simulation scenario A)

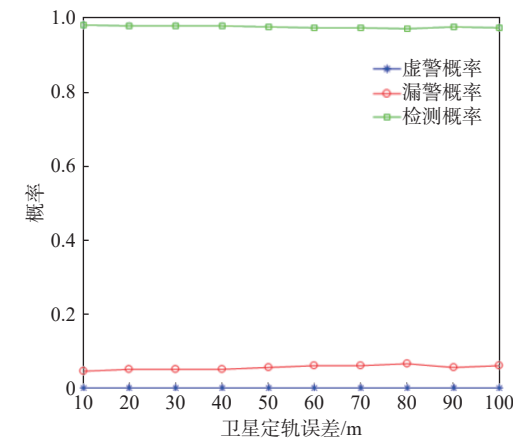


图 8 卫星定轨误差对检测性能的影响(仿真场景 A)

Fig. 8 Influence of satellite orbit determination error on detection performance (simulation scenario A)

图 9 为不同数据比较方法对检测性能的影响(仿真场景 A)。仿真结果表明: ①使用 k-s 检验达到最高的检测概率, 约为 97% 以上; ②使用 3 种非参数假设检验的检测概率均大于使用相关系数法的

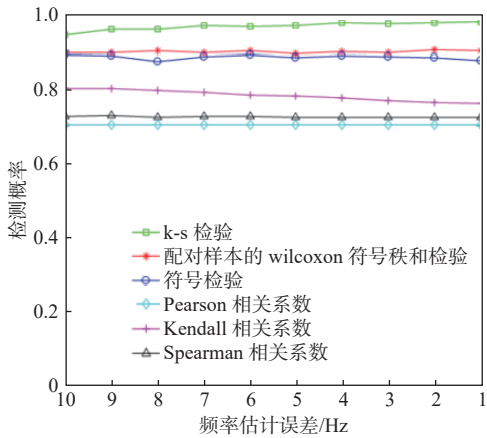


图 9 不同数据比较方法对检测性能的影响(仿真场景 A)

Fig. 9 Influence of different data comparison methods on detection performance (simulation scenario A)

检测概率。几条曲线比较表明: k-s 检验更适用于星基 ADS-B 系统基于本文方法对 ADS-B 位置消息进行验证。

导致结果②的原因为: 对于星基 ADS-B 系统, 空天链路的多普勒频移受卫星速度和高度的影响较大, 所以当欺骗源与待伪造的航迹距离较近时, 2 组多普勒频移改变量的变化趋势近似一致, 而相关系数主要检测的是数据变化趋势, 因此, 使用相关系数法的检测性能较差; 而非参数假设检验可从中位数、分布函数等方面对 2 组数据进行分析比较, 充分利用数据的统计特性, 具有更高的检测概率。

## 5 结 论

为克服星基 ADS-B 系统存在的虚假目标干扰问题, 提出一种基于多普勒频移改变量的单星航空器位置验证方法。通过仿真验证可得如下结论:

- 1) 本文方法的检测概率达到 97.75%, 漏警概率低于 4.50%;
- 2) 对欺骗源的空间位置和运动状态具有稳健性;
- 3) 在 ADS-B 消息丢失一半的情况下仍具有较好的检测性能;
- 4) 对航空器和卫星的定位误差 insensitive。

## 参考文献 (References)

[1] 刘海涛, 杨宁, 李冬霞, 等. “北航空事卫星一号”监视载荷的统计性能[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(11): 2883-2889.  
LIU H T, YANG N, LI D X, et al. Statistical performance of surveillance payload of Beihang Aeronautical Satellite-1[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(11): 2883-2889(in Chinese).  
[2] 张学军, 谭元皓, 李雪缘, 等. 星基 ADS-B 系统及关键技术发展

- 综述[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9): 1589-1604.
- ZHANG X J, TAN Y H, LI X Y, et al. A review of development of space-based ADS-B system and its key technologies[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(9): 1589-1604(in Chinese).
- [3] BLOMENHOFER H, PAWLITZKI A, ROSENTHAL P, et al. Space-based automatic dependent surveillance broadcast (ADS-B) payload for In-orbit demonstration[C]//Proceedings of the 6th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2012: 160-165.
- [4] WERNER K, BREDEMEYER J, DELOVSKI T. ADS-B over satellite: Global air traffic surveillance from space[C]//Proceedings of the Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles. Piscataway: IEEE Press, 2014: 47-52.
- [5] SCHAFER M, LENDERS V, MARTINOVIC I. Experimental analysis of attacks on next generation air traffic communication [C]//Applied Cryptography and Network Security. Berlin: Springer, 2013: 253-271.
- [6] COSTIN A, FRANCILLON A. Ghost in the Air(Traffic): On insecurity of ADS-B protocol and practical attacks on ADS-B devices [EB/OL]. (2012-07-21)[2022-10-10]. <https://www.eurecom.fr/publication/3788>.
- [7] FINKE C, BUTTS J, MILLS R, et al. Enhancing the security of aircraft surveillance in the next generation air traffic control system[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2013, 6(1): 3-11.
- [8] DOLAN J, GARCIA M A. Aireon independent validation of aircraft position via space-based ADS-B[C]//Proceedings of the Enhanced Solutions for Aircraft and Vehicle Surveillance Applications Conference.[s.l.]: [s.n.], 2018.
- [9] WANG W Y, CHEN G, WU R B, et al. A low-complexity spoofing detection and suppression approach for ADS-B[C]//Proceedings of the Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: K2-1-K2-8.
- [10] NAGANAWA J, MIYAZAKI H. A theory of aircraft position verification using TDOA[C]//Proceedings of the Asia-Pacific Microwave Conference. Piscataway: IEEE Press, 2018: 833-835.
- [11] 王文益, 李文静, 卢丹, 等. 利用 TDOA 相关系数的 ADS-B 欺骗式干扰检测[J]. 信号处理, 2019, 35(11): 1784-1790.
- WANG W Y, LI W J, LU D, et al. ADS-B spoofing detection method using TDOA correlation coefficient[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(11): 1784-1790(in Chinese).
- [12] 陈蕾, 吴仁彪, 卢丹. 利用多普勒效应的 ADS-B 欺骗式干扰检测方法[J]. 信号处理, 2018, 34(6): 722-728.
- CHEN L, WU R B, LU D. ADS-B spoofing detection method using Doppler effect[J]. Journal of Signal Processing, 2018, 34(6): 722-728(in Chinese).
- [13] GHOSE N, LAZOS L. Verifying ADS-B navigation information through Doppler shift measurements[C]//Proceedings of the IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference. Piscataway: IEEE Press, 2015: 1-27.
- [14] LI W, KAMAL P. Integrated aviation security for defense-in-depth of next generation air transportation system[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security. Piscataway: IEEE Press, 2011: 136-142.
- [15] HABLEEL E, BAEK J, BYON Y J, et al. How to protect ADS-B: Confidentiality framework for future air traffic communication [C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Communications Workshops. Piscataway: IEEE Press, 2015: 155-160.
- [16] AMIN S, CLARK T, OFFUTT R, et al. Design of a cyber security framework for ADS-B based surveillance systems[C]//Proceedings of the Systems and Information Engineering Design Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2014: 304-309.
- [17] 李桓, 李洪星, 王晋, 等. 基于频率补偿的双星时差频差联合无源定位装置及方法: CN110068340B[P]. 2020-08-18.
- LI H, LI H X, WANG J, et al. A passive location device and method for binary time difference and frequency difference based on frequency compensation: CN110068340B[P]. 2020-08-18(in Chinese).
- [18] TAO F, JUN L. Parameter estimation of weak space-based ADS-B signals using genetic algorithm[J]. ETRI Journal, 2021, 43(2): 324-331.
- [19] 仲伟志, 郭庆. 基于高动态运动模型的多普勒频移仿真[J]. 计算机工程, 2010, 36(20): 22-24.
- ZHONG W Z, GUO Q. Doppler frequency shift simulation based on high dynamic motion model[J]. Computer Engineering, 2010, 36(20): 22-24(in Chinese).
- [20] CZAB C, SZ A, BPA B, et al. Real-time orbit determination of Low Earth orbit satellite based on RINEX/DORIS 3.0 phase data and spaceborne GPS data-ScienceDirect[J]. Advances in Space Research, 2020, 66(7): 1700-1712.
- [21] WANG F H, GONG X W, SANG J Z, et al. A novel method for precise onboard real-time orbit determination with a standalone GPS receiver[J]. Sensors, 2015, 15(12): 30403-30418.
- [22] MONTENBRUCK O, RAMOS-BOSCH P. Precision real-time navigation of LEO satellites using global positioning system measurements[J]. GPS Solutions, 2008, 12(3): 187-198.
- [23] 方坤, 何怡刚, 黄源, 等. 基于 K-S 检验的瑞利衰落信道统计特性评估[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(8): 36-41.
- FANG K, HE Y G, HUANG Y, et al. Evaluation for statistical characteristics of Rayleigh fading channels via Kolmogorov-Smirnov test[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(8): 36-41(in Chinese).
- [24] WANG F G, WANG X D. Fast and robust modulation classification via kolmogorov-smirnov test[J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58(8): 2324-2332.
- [25] DEPARTMENT O. Global positioning system standard positioning service performance standard[J]. GPS & Its Augmentation Systems, 2008, 35(2): 197-216.
- [26] 陆安南, 杨小牛. 单星测频测相位差无源定位[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(2): 244-247.
- LU A N, YANG X N. Passive location from the combined set of frequency and phase difference measurements by single satellite[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(2): 244-247(in Chinese).
- [27] 黄静, 赵薇薇, 陈雪华, 等. 单星测频静态目标无源定位研究[J]. 中国空间科学技术, 2019, 39(4): 11-17.
- HUANG J, ZHAO W W, CHEN X H, et al. Passive positioning algorithm based on single satellite frequency measurement[J]. Chi-

nese Space Science and Technology, 2019, 39(4): 11-17(in Chinese).

[28] 朱重儒, 朱立东. 一种基于加权最小二乘载频估计的单星定位算法[J]. 空间电子技术, 2021, 18(2): 9-15.

ZHU Z R, ZHU L D. A single satellite location algorithm based on weighted least square carrier frequency estimation[J]. Space Electronic Technology, 2021, 18(2): 9-15(in Chinese).

Aircraft position verification with one satellite based on Doppler shift change

LIU Haitao\*, FENG Jingbo, LI Dongxia, WANG Lei

(School of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Satellite-based automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) is an important technology for wide-area aircraft surveillance. To solve the problem of false target interference existing in the satellite-based ADS-B system, a position verification method with one satellite based on Doppler shift change was proposed. First, the system model of satellite-based ADS-B was presented. Then, the formula for the Doppler shift change of aerospace link was theoretically provided. Furthermore, the Kolmogorov-Smirnoff (k-s) test was used to verify the authenticity of the ADS-B position message. Finally, the correctness and effectiveness of the proposed scheme were verified by computer simulation. The simulation results show that the probability of detection of the proposed method is more than 97.75%, and the false dismissal probability is less than 4.50%. In addition, only one low-orbit satellite is required for monitoring, and it is not sensitive to positioning errors of aircraft and satellites.

**Keywords:** satellite-based ADS-B; position verification; Doppler shift change; Kolmogorov-Smirnoff test; positioning error