

ADS-B延迟转发电文检测及干扰台定位方法

苏志刚* 关静 郝敬堂 韩冰 周隽

(中国民航大学中欧航空工程师学院 天津 300300)

摘要: 广播式自动相关监视(ADS-B)技术因明码广播特点, 面临较严重的电子欺骗风险。针对延迟转发电文的检测与相应干扰台定位问题, 根据ADS-B地面站接收电文的位置间隔的分布特点, 该文提出利用顺序电文间瞬时速度与关注期内平均速度间的差异性检测延迟转发电文的方法。根据延迟转发电文的原始电文位置与干扰台间的空间关系, 利用ADS-B地面站获取的延迟转发电文位置及时间戳, 采用多点定位技术实现对干扰台定位。仿真结果表明, 利用瞬时速度与平均速度间的差异性可以有效地实现对延迟转发电文存在与否的检测, 干扰台的定位精度与ADS-B地面站的定时精度、采用定位的电文数目、干扰台与航线间距离和干扰台方位等因素有关, 且采用正视区域的位置电文可以获得对干扰台较好的定位性能。该文方法可以使ADS-B地面站独立地检测延迟转发干扰和定位相应干扰台。

关键词: 监视技术; 广播式自动相关监视; 电子欺骗; 延迟转发电文; 多点定位技术

中图分类号: TN918; TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)02-0329-06

DOI: 10.11999/JEIT191006

Method for Detecting the Delay-forwarding ADS-B Messages and Positioning of Jammer

SU Zhigang GUAN Jing HAO Jingtang HAN Bing ZHOU Jun

(Sino-European Institute of Aviation Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) technology is faces serious security risk of spoofing due to the characteristics of broadcasting the clear text. In view of the detection of delay-forwarding messages and the positioning of corresponding jammers, according to the distribution characteristics of the interval between radiation positions of messages received by ADS-B ground station, a method is proposed for detecting delay-forwarding messages by using the difference between the instantaneous velocity of sequential messages and the average velocity of interest of period. According to the spatial relationship between the positions of the original messages of those delay-forwarding messages and the jammer, the positions of the delay-forwarding messages received by ADS-B ground station and their received time stamps are used to locate the position of jammer with the multilateration technique. The simulation results show that the difference between the instantaneous velocity and the average velocity can effectively detect the presence or absence of delay-forwarding messages, the positioning accuracy of jammer is related to the timing accuracy of ADS-B ground station, the number of messages used for positioning, the distance between jammer and track and the azimuth of jammer. The better positioning performance of jammer can be obtained by using the message positions in side-looking area. The proposed method can help the ADS-B ground station independently to detect the delay forwarding interference and to locate the corresponding jammer.

Key words: Surveillance technology; Automatic Dependent Surveillance-Broadcast(ADS-B); Spoofing; Delay-forwarding message; Multilateration

收稿日期: 2019-12-18; 改回日期: 2020-09-23; 网络出版: 2020-12-09

*通信作者: 苏志刚 srsu@vip.sina.com

基金项目: 天津市自然科学基金(17JCYBJC43100), 中央高校基本科研业务费项目(3122016U007)

Foundation Items: The Natural Science Foundation of Tianjin (17JCYBJC43100), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (3122016U007)

1 引言

广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)技术是基于明码通信链路的监视技术。采用明码通信链路必然会面临较严重的电子欺骗干扰风险,如全球卫星导航系统^[1]和民航的ADS-B系统^[2]。21世纪初以来,围绕如何提升ADS-B系统抗干扰能力,实现对电子欺骗干扰识别成为推进新一代空管监视体系建设亟待解决的问题。

对于ADS-B系统,电子欺骗干扰就是通过产生虚假电文使ADS-B地面站形成虚假航迹或增加真实电文延时使ADS-B地面站获得的航空器位置在时间上存在偏差,即时空偏差,从而达到干扰目的。电子欺骗干扰相对于压制式干扰^[3,4]更具隐蔽性,一般电子欺骗干扰可分为自主生成式和延迟转发式两类^[5-7]。对于ADS-B系统,自主生成式干扰是根据1090MHz扩展电文的最低运行性能标准^[8]生成的虚假电文,使ADS-B地面站误以为虚假电文来自真实航空器。延迟转发式干扰是通过增加真实ADS-B电文的延迟,使ADS-B地面站在航空器监视上形成时空偏差。增强ADS-B数据链保密性的方法^[9,10]可以增大自主生成式干扰实施的技术难度,实现对自主生成式干扰的抑制。然而,此类方法无法检测或抑制延迟转发式干扰。另外,增强ADS-B数据链的保密性通常需要对现有航空标准进行修订,这势必对现有机载设备及相关地面系统进行改造,带来巨大的更新成本,进而影响ADS-B技术在国际上的推广。采用验证ADS-B电文真实性的方法^[11-14]能够同时解决自主生成式干扰和延迟转发式干扰的检测与抑制问题,但此类方法通常需要额外的系统或技术手段,例如,当利用航空器位置验证实现对ADS-B电文真实性的判识时,通常需要多点定位^[13]、多源融合^[14]等配合,实现成本较高。现有的ADS-B系统抗干扰研究,无论增强ADS-B数据链保密性的方法,还是验证ADS-B电文真实性的方法,均针对于电子欺骗干扰的检测或抑制,并没有涉及对干扰台的定位,不利于对干扰台的举证与取缔。

当延迟转发电文时,延迟转发电文与实时电文在时间上交织,被ADS-B地面站接收后,ADS-B地面站顺序由电文中解释出的航空器位置(为方便陈述,不妨在下文中将其称为电文位置)出现较大的波动,由此进行2次推算出的瞬时速度相对平均速度有着较大的差异。本文基于此特点,提出利用瞬时速度与平均速度差异性来检测延迟转发干扰存在与否,并结合多点定位技术,利用延迟转发电文精确的接收时间戳信息及电文位置信息实现对干扰台的定位。

2 问题描述

ADS-B系统属于非独立式协作监视系统^[15],被监视的航空器由机载S模式应答机遵循文献^[8]的标准产生ADS-B电文,以协作方式主动提供自身的位置、速度、事件和识别码等信息。由于ADS-B电文不包含时间信息,所以ADS-B系统按电文接收时间顺序以电文位置更新航空器位置。ADS-B延迟转发电文与实时电文在时间上交织,使ADS-B地面站顺序解译ADS-B位置电文时,获得的航空器位置信息存在较大的波动,从而影响稳定航迹的生成,如图1所示。航空器在 P_0, P_1 和 P_2 等处辐射的ADS-B电文被干扰台接收并延迟一段时间后再转发,使ADS-B地面站接收的这些延迟转发的电文与来自航空器在 P_k, P_{k+1} 和 P_{k+2} 等处辐射的实时电文在时间上交织,使ADS-B系统解译出航空器的位置更新顺序为 $P_k, P_0, P_{k+1}, P_1, P_{k+2}, \dots$ 。航空器位置呈现剧烈变化,对ADS-B系统生成航迹造成干扰,甚至无法形成稳定航迹。

因此,ADS-B系统需要具备检测是否受到延迟转发电文干扰的能力,从而能够剔除延迟转发电文。甚至,ADS-B系统应具备利用延迟转发电文对干扰台定位的能力。

3 延迟转发电文检测方法

当延迟转发干扰存在时,ADS-B地面站解释出的航空器位置在实时电文提供的位置与延迟转发电文提供的位置间跳跃,从ADS-B地面站角度看,航空器的电文位置间隔发生较显著的变化,据此所计算出的航空器瞬时速度也将出现较大的偏差。

在较短关注期间 T 内,可将航空器的飞行视为沿航线以速度 v_0 匀速飞行。为叙述方便,不妨将关注期间内首个电文标注为第1个电文,其后 T 时间段为关注期。假设关注期内电文总数为 K ,其中第 k 个位置电文的发射时刻、接收时刻及在空中的传播时间分别为 $t_{s,k}, t_{r,k}$ 和 t_k 。若考虑电文或为延迟转发电文的可能性,将三者间关系可描述为

$$t_{r,k} = t_{s,k} + t_k + h_k \tau + \xi_k \quad (1)$$

其中, h_k 用于标识电文类型的逻辑变量, $h_k = 0$ 表

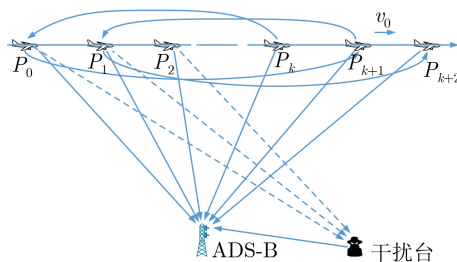


图1 延迟转发干扰对航迹更新的影响

示电文为实时电文, $h_k = 1$ 表示电文为延迟转发电文; τ 为干扰台介入所引起的转发电文相对原实时电文的延迟, 该延迟是干扰台内部转发引起的延迟与电文由干扰台向ADS-B地面站传播延迟的综合作用; ξ_k 为时间测量引入的随机误差, 其服从方差为 σ_t^2 的零均值高斯分布。

ADS-B地面站接收的第 m 个电文及跟随其后的第 n 个电文间的航空器平均速度为

$$\bar{v}_{mn} = \frac{v_0(t_{s,n} - t_{s,m})}{t_{r,n} - t_{r,m}} \quad (2)$$

考虑两电文在空间中传播的时间差, 与两电文发射时间差的关系可近似表示为

$$t_n - t_m = v_0(t_{s,n} - t_{s,m}) \cos \theta_m / c \quad (3)$$

其中, θ_m 为航空器在第 m 个电文位置时ADS-B地面站方向与航向间的夹角, c 为电磁波的传播速度。综合式(1)、式(2)和式(3)可得

$$\bar{v}_{mn} = \left[1 - (1 - \rho)\rho + \frac{(h_n - h_m)\tau}{t_{r,n} - t_{r,m}}(1 - \rho) \right] v_0 \quad (4)$$

其中, $\rho = v_0 \cos \theta_m / c$ 。因为 $v_0 \ll c$, 所以式(4)可近似为

$$\bar{v}_{mn} = \left[1 + \frac{h_n - h_m}{t_{r,n} - t_{r,m}} \tau \right] v_0 \quad (5)$$

由式(5)可见, 当 $h_n = h_m$ 时, 即前后两电文属于同类电文时, 平均速度 $\bar{v}_{mn} = v_0$; 当 $h_n \neq h_m$ 时, 即前后两电文属于不同类电文时, 平均速度 $\bar{v}_{mn} = [1 \pm \tau / (t_{r,n} - t_{r,m})] v_0$, 显然此时的速度 \bar{v}_{mn} 受延迟量与前后两电文接收时间差间的比值影响。

对于关注期内的航空器平均速度

$$\bar{v}_{1K} = \begin{cases} v_0, & \text{两电文同类} \\ [1 \pm \tau / T] v_0, & \text{两电文异类} \end{cases} \quad (6)$$

通常延迟 τ 与关注时长 T 大小可比拟, 因此, 航空器在关注期间的平均速度 \bar{v} 通常是实际速度 v_0 的数倍关系。相邻电文间的航空器平均速度可视为航空器瞬时速度。由于延迟转发电文与实时电文间的交织, 相邻电文通常属于不同类别, 故

$$\bar{v}_{k(k+1)} = \begin{cases} v_0, & \text{两电文同类} \\ [1 \pm \tau / (t_{r,(k+1)} - t_{r,k})] v_0, & \text{两电文异类} \end{cases} \quad (7)$$

相邻电文的接收间隔 $(t_{r,(k+1)} - t_{r,k}) \leq 0.5 \text{ s} \ll \tau$, 故瞬时速度 $|\bar{v}_{k(k+1)}| \gg v_0$ 。比较式(6)和式(7)可见, 当不存在延迟转发电文时, 航空器在关注期内的平均速度与瞬时速度相等, 均等于航空器的实际速度; 当存在延迟转发电文时, 由于延迟转发电文与实时电文间的交织, 使得相邻电文通常属于不同类

别, 航空器在关注期内的平均速度与瞬时速度存在显著的差异。不妨设置判决门限 η , 当

$$\frac{E[|\bar{v}_{k(k+1)}|]}{\bar{v}_{1K}} \geq \eta \quad (8)$$

成立时, 说明接收电文中存在延迟转发电文。式(8)中 $E[|\bar{v}_{k(k+1)}|]$ 表示关注期内瞬时速度的平均值。分离延迟转发电文时仍可利用门限 η 进行判决, 若

$$|\bar{v}_{k(k+1)}| / \bar{v}_{1K} \geq \eta \quad (9)$$

成立, 则根据两个电文的位置信息, 位置处于航向后方的即为延迟转发电文。ADS-B地面站可利用提取出的延迟转发电文进一步实现对干扰台的定位。

4 延迟转发干扰台定位方法

假设已经完成对整个关注期内延迟转发电文的检测, 并假设延迟转发电文数为 N 。以关注期间内首个延迟转发电文的电文位置为原点建立直角坐标系 xoy , 如图2所示。以航空器的航向为 x 轴正方向, 垂直于 x 轴且远离ADS-B地面站的方向为 y 轴正方向。通常干扰台距离ADS-B地面站相对较近, 而且选择定位干扰台的航迹通常距离ADS-B地面站较远, 因此, 干扰台与ADS-B地面站常常处于航迹的同侧。设干扰台的坐标为 $P_j(x_j, y_j)$ 。航空器辐射的ADS-B电文的各时间参数间关系如式(1)所示。

干扰台转发延迟 τ 的引入使得电文接收时刻 $t_{r,k}$ 出现偏差, 从而影响对航空器的位置更新。为消除转发延迟 τ 的影响, 将关注期内的延迟转发电文均相对首个延迟转发电文进行差分处理

$$t_{r,k} - t_{r,1} = t_{s,k} - t_{s,1} + t_k - t_1 + \xi_k - \xi_1 \quad (10)$$

两差分电文的传播路径差

$$r_k - r_1 = c(t_k - t_1) = ct_{r,k1} - \frac{c}{v_0}(x_k - x_1) - \varepsilon_k \quad (11)$$

其中, $t_{r,k1} = t_{r,k} - t_{r,1}$ 为两电文的接收时间间隔; $\varepsilon_k = c(\xi_k - \xi_1)$ 为距离误差项; 航空器速度 v_0 若未知, 可利用首末电文信息由式(5)估计出。

根据第 k 个电文位置 $P_k(x_k, 0)$ 可以将其与干扰台间距离表示为

$$r_k = \sqrt{(x_k - x_j)^2 + y_j^2} \quad (12)$$

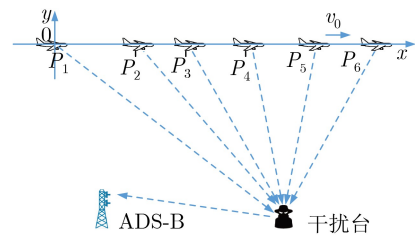


图2 干扰台与航迹间几何关系

联立式(11)与式(12), 消除 r_k 后整理得

$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \left[\left(ct_{r,k1} - \frac{c}{v_0}(x_k - x_1) \right)^2 + x_1^2 - x_k^2 \right] \\ & = (x_k - x_1)x_J + \left[ct_{r,k1} - \frac{c}{v_0}(x_k - x_1) \right] r_1 + \eta_k \end{aligned} \quad (13)$$

其中, η_k 为误差项。

利用关注期间内全部延迟转发电文, 可构建出 $N-1$ 个类似于式(13)的等式。将这些等式合并为矢量形式

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}^T \mathbf{p} + \mathbf{e} \quad (14)$$

其中, $\mathbf{y} = [y_2, y_3, \dots, y_N]^T$, $y_k = -[(ct_{r,k1} - c(x_k - x_1)/v_0)^2 + x_1^2 - x_k^2]/2$, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3, \dots, \mathbf{a}_N]$, $\mathbf{a}_k = [x_k - x_1, (ct_{r,k1} - c(x_k - x_1)/v_0)]^T$, $\mathbf{p} = [x_J, r_1]^T$ 和 $\mathbf{e} = [\eta_2, \eta_3, \dots, \eta_N]^T$ 。所以, \mathbf{p} 的最小二乘估计为

$$\hat{\mathbf{p}} = (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}\mathbf{y} \quad (15)$$

利用 $\hat{\mathbf{p}}$ 中的分量 \hat{x}_J 和 \hat{r}_1 , 可以获得干扰台的纵坐标估计

$$\hat{y}_J = -\sqrt{\hat{r}_1^2 - \hat{x}_J^2} \quad (16)$$

基于以上的准备, 可将延迟转发干扰台的定位方法具体表述为:

步骤1 根据式(8)判断关注期内是否存在延迟转发干扰, 若式(8)成立, 则说明存在延迟转发干扰。

步骤2 当关注期内存在延迟转发干扰时, 找出满足式(9)的顺序两电文, 将电文位置偏向航向后方的电文视为延迟转发电文。将关注期内全部延迟转发报文分离出来。

步骤3 以分离出的延迟转发电文中首个电文位置为原点, 沿航向设置 x 轴, 将所有延迟转发电文位置在 x 轴的坐标表示为 x_1, x_2, \dots, x_N , 相应电文的接收时刻记为 $t_{r,1}, t_{r,2}, \dots, t_{r,N}$ 。

步骤4 根据位置参数 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 、时间参数 $\{t_{r,1}, t_{r,2}, \dots, t_{r,N}\}$ 和速度参数 v_0 , 由式(14)构建矢量方程, 并由式(15)获得相应的解 $\hat{\mathbf{p}} = [\hat{x}_J, \hat{r}_1]^T$ 。

步骤5 根据 $\hat{\mathbf{p}} = [\hat{x}_J, \hat{r}_1]^T$, 由式(16)获得干扰台的纵坐标 \hat{y}_J 。因此, 干扰台的位置估计为 $P_J(\hat{x}_J, \hat{y}_J)$ 。

5 仿真分析

通过仿真实验来验证本文方法对检测延迟转发电文和定位相应干扰台的有效性。

首先, 评估ADS-B地面站采用顺序电文间的航空器瞬时速度与关注期内平均速度间的差异性判断

延迟转发干扰存在与否的可行性。考虑某航空器沿航线以 $v = 300 \text{ m/s}$ 匀速飞行。以关注期间内首个电文位置为原点, 持续采集该航空器在航线飞行150 km范围内的电文。ADS-B地面站在图2所示的直角坐标系中的坐标为(50 km, -20 km), 干扰台的坐标为(80 km, -25 km)。航空器按文献[8]的标准辐射位置电文, 干扰台引入的电文延迟为10 s。假设航空器飞临(75 km, 0 km)附近时干扰台的延迟转发电文开始介入。ADS-B电文碰撞的概率为 $p_c = 0.01$ 。ADS-B地面站利用顺序接收30 s的电文判断ADS-B地面站是否受到延迟转发干扰的影响。

由图3可见, 延迟转发干扰介入前后, 关注期内的平均速度与瞬时速度均值差异显著。当延迟转发干扰介入前, 关注期内的平均速度与瞬时速度均值几乎相同; 当延迟转发干扰介入后, 关注期内的平均速度出现波动, 但波动范围相对较小, 但瞬时速度均值迅速升高。在图3圈出位置, 平均速度出现波动, 但与后期的波动不同, 只是单向波动, 这是因为随着关注期的滑动, 部分延迟转发干扰进入关注期, 用于计算平均速度的首电文均来自实时电文, 末电文来自延迟转发电文。

下面分析利用提取出的延迟转发电文及其时间戳信息对干扰台定位的性能。采用与前例相同的场景, 探讨系统定时误差对干扰台定位性能的影响。定义干扰台定位的均方根误差

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(\hat{x}_n - x_J)^2 + (\hat{y}_n - y_J)^2]} \quad (17)$$

在不同定时误差下利用200次蒙特卡罗实验结果统计干扰台的均方根误差, 如图4所示。

由图4可见, 在相同的航线位置, 当定时误差增大时, 相应干扰台定位的均方根误差也随之增大。同时, 干扰台定位误差也和电文位置与干扰台的相对位置有关。当电文位置处于干扰台与航线的垂直区域(不妨称为正视区域)附近时, 定位均方根

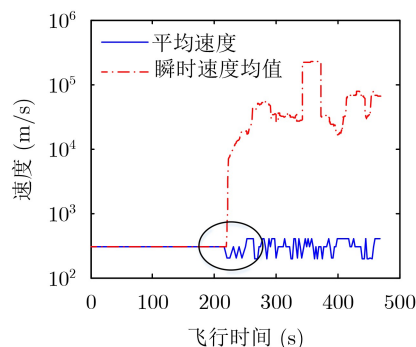


图3 延迟转发电文对速度的影响

误差最小。当电文位置远离正视区域时,定位均方根误差增大。

考虑用于定位干扰台的延迟转发电文数目对干扰台定位精度的影响。采用与前例类似场景,但ADS-B地面站定时误差的标准差固定为 $\sigma_t = 60 \text{ ns}$ 。采用不同数量的电文,利用200次蒙特卡罗实验结果统计干扰台位置估计的均方根误差。正视区域附近的定位误差与电文数目之间的关系如图5所示。由图5可见,随着延迟转发电文数目的增加,对干扰台定位精度也逐渐提高。在使用较高电文数目进行定位时,定位精度的变化也相对比较缓慢,更适宜在较大范围内实现对干扰台的高精度定位。对比图4和图5可以发现,在航线上,航空器若远离正视区域,对干扰台的定位误差会显著升高,所以干扰台的定位误差还受到干扰台位置矢量与航向矢量间的夹角的影响。

6 结论

利用顺序电文间的瞬时速度与关注期内平均速度差异性实现对延迟转发干扰的检测,并利用分离出的延迟转发电文位置及其接收时间戳信息,采用多点定位思想实现对延迟转发干扰台的定位。仿真结果表明,利用瞬时速度与平均速度差异性可以有效地实现对延迟转发干扰存在与否的检测。利用分离出的延迟转发电文可以实现对干扰台定位,其定位精度与所利用的延迟转发电文数目、干扰台与电

文位置间的距离、干扰台方位等有关。本文方法可以使ADS-B地面站不借助任何额外系统、不改变现有通信协议的基础上,独立地实现对延迟转发干扰的检测及对相应干扰台的定位。

参考文献

- [1] 王璐, 吴仁彪, 王文益, 等. 基于多天线的GNSS压制式干扰与欺骗式干扰联合抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(9): 2344–2350. doi: [10.11999/JEIT151295](https://doi.org/10.11999/JEIT151295).
WANG Lu, WU Renbiao, WANG Wenyi, et al. Joint GNSS interference mitigation approach for jamming and spoofing based on multi-antenna array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(9): 2344–2350. doi: [10.11999/JEIT151295](https://doi.org/10.11999/JEIT151295).
- [2] MANESH M R and KAABOUCH N. Analysis of vulnerabilities, attacks, countermeasures and overall risk of the automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) system[J]. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 2017, 19: 16–31. doi: [10.1016/j.ijcip.2017.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2017.10.002).
- [3] 王文益, 刘慎悦, 吴仁彪, 等. 基于最小色散方法的广播式自动相关监视压制式干扰抑制[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 898–904. doi: [10.11999/JEIT170636](https://doi.org/10.11999/JEIT170636).
WANG Wenyi, LIU Shenyue, WU Renbiao, et al. Jamming suppression for automatic dependent surveillance-broadcast based on minimum dispersion method[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 898–904. doi: [10.11999/JEIT170636](https://doi.org/10.11999/JEIT170636).
- [4] 王珊珊, 刘峥, 谢荣, 等. 有源欺骗干扰环境下的DOA估计[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(5): 1040–1046. doi: [10.11999/JEIT180488](https://doi.org/10.11999/JEIT180488).
WANG Shanshan, LIU Zheng, XIE Rong, et al. DOA estimation under active deception jamming environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(5): 1040–1046. doi: [10.11999/JEIT180488](https://doi.org/10.11999/JEIT180488).
- [5] LIU Ke, WU Wenqi, and WU Zhijia. Using the receiver clock offset abnormal to prove the existence of spoofing signal[C]. The 37th Chinese Control Conference (CCC), Wuhan, China, 2018: 4592–4596. doi: [10.23919/chicc.2018.8483884](https://doi.org/10.23919/chicc.2018.8483884).
- [6] LIU Ke, WU Wenqi, TANG Kanghua, et al. Single receiver against repeater deception jamming technology research[C]. The 8th China Satellite Navigation Conference, Shanghai, China, 2017: 23–35. doi: [10.1007/978-981-10-4591-2_3](https://doi.org/10.1007/978-981-10-4591-2_3).
- [7] 张建中, 穆贺强, 文树梁, 等. 基于LFM分段脉冲压缩的抗间歇采样转发干扰方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(7): 1712–1720. doi: [10.11999/JEIT180851](https://doi.org/10.11999/JEIT180851).
ZHANG Jianzhong, MU Heqiang, WEN Shuliang, et al. Anti-intermittent sampling repeater jamming method based on LFM segmented pulse compression[J]. *Journal of*

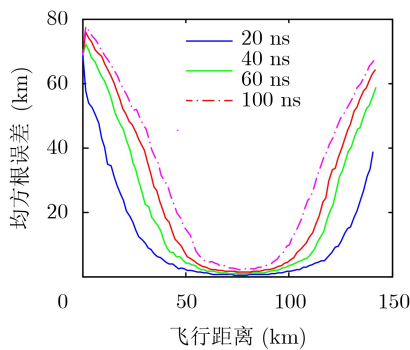


图4 定时误差对干扰台定位精度的影响

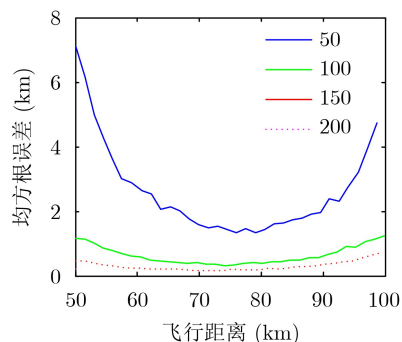


图5 用于定位的电文数目对定位精度的影响

- Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1712–1720. doi: [10.11999/JEIT180851](https://doi.org/10.11999/JEIT180851).
- [8] RTCA. RTCA DO-260B-2009 DO-260B (2009) minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance-broadcast (ADS-B) and traffic information services-broadcast (TIS-B)[S]. Washington DC: Radio Technical Commission for Aeronautics, 2009.
- [9] STROHMEIER M, SCHÄFER M, PINHEIRO R, *et al.* On perception and reality in wireless air traffic communication security[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, 18(6): 1338–1357. doi: [10.1109/TITS.2016.2612584](https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2612584).
- [10] 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. doi: [10.1016/j.ijcip.2013.02.001](https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2013.02.001).
- [11] RECK C, REUTHER M S, JASCH A, *et al.* Verification of ADS-B positioning by direction of arrival estimation[J]. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2012, 4(2): 181–186. doi: [10.1017/S1759078712000086](https://doi.org/10.1017/S1759078712000086).
- [12] WANG Wenyi, CHEN Geng, WU Renbiao, *et al.* A low-complexity spoofing detection and suppression approach for ADS-B[C]. Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS), Herdon, USA, 2015: 1–24. doi: [10.1109/ICNSURV.2015.7121236](https://doi.org/10.1109/ICNSURV.2015.7121236).
- [13] CHIANG J T, HAAS J J, CHOI J, *et al.* Secure location verification using simultaneous multilateration[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(2): 584–591. doi: [10.1109/TWC.2011.120911.101147](https://doi.org/10.1109/TWC.2011.120911.101147).
- [14] LIU Weiyi, WEI Jian, LIANG Mengchen, *et al.* Multi-sensor fusion and fault detection using hybrid estimation for air traffic surveillance[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2013, 49(4): 2323–2339. doi: [10.1109/TAES.2013.6621819](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6621819).
- [15] 中国民航局. 民用航空监视技术应用政策[R]. AC-115-TM-2018-02, 北京: 中国民航局, 2018.
- Civil Aviation Administration of China. Civil aviation surveillance technology application policy[R]. AC-115-TM-2018-02, Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2018.
- 苏志刚: 男, 1972年生, 教授, 主要研究方向为信号与信息处理及其在监视与导航领域的应用.
- 关 静: 女, 1977年生, 副教授, 主要研究方向为流程优化, 排队、排序算法优化与分析.
- 郝敬堂: 男, 1989年生, 实验师, 主要研究方向为空管监视数据处理、冲突探测、空管信息仿真等.
- 韩 冰: 男, 1987年生, 讲师, 主要研究方向为信息与信号处理及其在监视导航领域的应用.
- 周 隽: 女, 1988年生, 讲师, 主要研究方向为空中交通管理与应用数学.

责任编辑: 陈 倩