

基于辅助源和相关熵的 ADS-B 信息时延估计新算法

栾声扬¹, 邱天爽¹, 宋爱民¹, 李景春², 谭海峰³

(1. 大连理工大学 电子信息与电气工程学部, 辽宁大连 116024;

2. 国家无线电监测中心, 北京 100037; 3. 北京邮电大学 信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 提出了一种基于辅助源和相关熵的 ADS-B 信息时延估计新算法。首先, 对报文信息时延产生机制进行了研究, 提出新的时延模型; 其次, 以辅助源信号所包含的多普勒频移特征为研究对象, 在信号相似性比较时引入相关熵提出时延估计算法; 然后, 分别研究了扫描步长与高斯核长对本时延估计精度的影响; 最后, 通过仿真实验验证了在不同噪声条件下本算法的时延估计性能。与已有方法相比, 本算法不需要更改报文格式, 在脉冲噪声条件下具有更高的时延估计精度, 故具有更好的实际应用价值。

关键词: 时延估计; 广播式自动相关监视; 多普勒频移; 相关熵; 辅助源

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

Novel time delay estimation algorithm for ADS-B based on an auxiliary source and correntropy

LUAN Sheng-yang¹, QIU Tian-shuang¹, SONG Ai-min¹, LI Jing-chun², TAN Hai-feng³

(1. Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China;

3. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: A novel time delay estimation algorithm was proposed to correct ADS-B latency employing an auxiliary signal source and correntropy. Firstly, the cause of message delay was analyzed and a new latency model was raised. Secondly, when comparing the signal similarity, the correntropy was introduced to estimate the delay using Doppler shift from signals of the auxiliary source as the research object. Thirdly, the influence of step length and Gaussian kernel length on evaluating the time delay was researched. Finally, simulations were carried out to verify the performance of the proposed algorithm in the impulsive noise environment. The new algorithm needs no change in message format and it is more practical and accurate compared with existing methods.

Key words: time delay estimation; automatic dependent surveillance-broadcast; Doppler shift; correntropy; auxiliary signal source

1 引言

广播式自动相关监视^[1] (ADS-B, automatic dependent surveillance-broadcast)系统是航空器通过广播模式数据链将机载导航设备和定位系统测得的数据自动广播出去的监控系统,它已成为空中交通管制^[2] (ATC, air traffic control)不可或缺的手段。国际民航组织 (ICAO, international civil aviation

organization)推荐以全球可互用的1090 MHz S模式扩展电文数据链 (1090ES)作为 ADS-B 的首选链路^[3]。ADS-B采用1090ES作为广播链路时,报文承载快速变化的飞行器位置和速度信息等^[4],其有效性不但与传感器的测量精度有关,更与测量时刻准确度有关。另外,这些信息的准确性与及时性,既会直接影响到空中交通管制的能力,也会间接影响到基于此类信息的各类实际

收稿日期: 2014-02-08; 修回日期: 2014-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61139001, 61172108, 81241059)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61139001, 61172108, 81241059)

应用问题的解决，例如，在基于飞机散射信号的地面无线电干扰源定位问题^[5,6]中，飞机位置信息和速度信息准确与否直接关系到干扰源定位的精度。

由于 1090ES 链路报文格式中没有为各类信息测量时刻（本文简称为“时间戳”）预留信息位^[7]，故常用报文接收时间戳来代替信息测量时间戳，这就导致报文信息存在时间延迟。另外，由于在飞行器中各系统信息处理耗时远大于无线电信号空间传播耗时，故不能采用因平面或者空间两点位置差异而引起的时延模型来分析该问题，进而无法通过经典的时延估计算法^[8,9]及改进算法^[10,11]进行估计；而是需要提出只有单个接收机的时延模型，并通过获取与测量时间戳有关的信号特征来进行时延估计。

针对 1090ES 链路信息时延的研究还处于起步阶段，只有少数学者例如 Jones S.R.^[12]和程拳^[13]等人对此进行了研究。文献[12]侧重于研究 ADS-B 信息时延对空中交通管制监视精度的影响，而不是估计时延；文献[13]提出每隔一段时间在报文中加入测量时间戳来估计时延的方法，虽然该方法能够将时延估计精确到每个报文，但需要修改现行的报文格式和报文发送规则，故难以在近期将其付诸实施，只能作为远期方案进行研究和讨论。

针对以上问题，本文提出了基于辅助源和相关熵的 ADS-B 信息时延估计新算法。首先，分析 ADS-B 信息时延的产生机制并给出了时延模型；然后，提出 ADS-B 信息时延估计算法，解释选取多普勒频移特征作为相似性比较对象以及采用相关熵作为衡量标准的原因；之后，分别分析扫描步长与高斯核长对时延估计精度的影响，并通过实验对噪声条件下的时延估计精度进行了进一步的研究；最后，通过比较时延修正前后民航干扰源的定位算法^[5]性能的变化，验证本文算法对 ADS-B 信息时延估计的有效性。相比文献[13]，本算法不需要修改报文格式，并且在噪声条件下具有较高的时延估计精度，故具有较好的实用性。

2 ADS-B 信息时延模型

2.1 ADS-B 信息时延产生机制

ADS-B 信息的报文类型有多种，其中更新频繁、重要性高的是位置报文和速度报文^[4]。报文中的经纬度信息是通过全球卫星导航系统传感器获取的，而飞行高度信息则是由气压计获取的，与其他各类必要信息共同生成 ADS-B 报文^[7]。

ADS-B 信息的传播方式也有多种，主要可分为空对空、空对地、地对空和地对地 4 类。其中，空对地传播是指空中的飞行器采用广播方式向地面基站等发送信息，该方式对空中交通管制具有重要意义。图 1 显示了此时 ADS-B 报文信息测量、发送与接收的过程。

在图 1 中，TOM(time of measurement)表示信息测量时刻，TOD(time of departure)表示信息发送时刻，TOR(time of receiving)表示信息接收时刻；在每一次测量、处理、传输信息的过程中，均存在信息时延。一般称从 TOM 到 TOD 的耗时为总时延，它是 ADS-B 信息时延的主要研究对象。但对于地面基站而言，TOM 和 TOD 都是未知的，只有 TOR 可通过连接在接收机上的 GPS 设备授时获得。若忽略无线电信号空间传输耗时，则可用 TOR 代替 TOD，TOM 到 TOR 的耗时也可被近似认为是总时延。

2.2 ADS-B 信息总时延分析

设测量时刻集合为 M ，满足 $M = \{TOM_n\}_{n=1}^N$ ，下标 n 表示报文的序号；同样，设接收时刻集合为 R ，满足 $R = \{TOR_n\}_{n=1}^N$ 。第 n 个测量时刻和第 n 个接收时刻满足

$$TOR_n = TOM_n + D_n \quad (1)$$

其中， D_n 是指第 n 个总时延。若将第 n 个总时延和第 $n-1$ 个总时延之差表示为 $\Delta D_{n-1} = D_n - D_{n-1}$ ，则 D_n 满足式(2)。

$$D_n = D_{n-1} + \Delta D_{n-1} = D_{n-2} + \Delta D_{n-2} + \Delta D_{n-1} = \dots = D_1 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta D_i \quad (2)$$

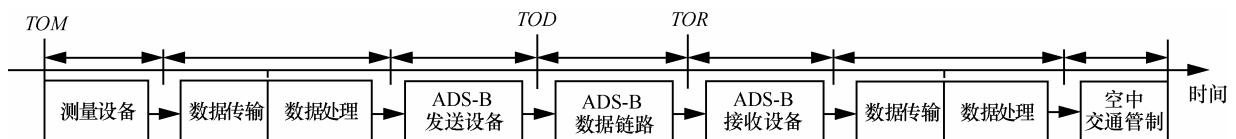


图 1 ADS-B 信息空对地传播方式

由文献[13]可知, $\Delta D_i (i=1,2,\dots,n-1)$ 是独立的并满足相同的正态分布, 即 $\Delta D_i \sim N(\mu_\Delta, \sigma_\Delta^2)$ 。其中, μ_Δ 表示该正态分布的均值, σ_Δ^2 表示该正态分布的方差, 由概率与数理统计相关理论可知 $\sum_{i=1}^{n-1} \Delta D_i$ 也服从于

正态分布, 可记作 $\sum_{i=1}^{n-1} \Delta D_i \sim N((n-1)\mu_\Delta, (n-1)\sigma_\Delta^2)$,

在实际应用中, 可使用该分布参数的样本估计值代替理论值, 如式(3)所示。

$$\sum_{i=1}^{n-1} \Delta D_i \sim N((n-1)\hat{\mu}_\Delta, (n-1)\hat{\sigma}_\Delta^2) \quad (3)$$

其中, $\hat{\mu}_\Delta$ 是均值 μ_Δ 的估计值, $\hat{\sigma}_\Delta^2$ 是方差 σ_Δ^2 的估计值, 一般情况下 $\hat{\mu}_\Delta \approx 0$ [13]。一方面说明连续的若干个总时延 $D_1, D_2, D_3, \dots, D_N$ 是近似相等的, 另一方面也要注意它们不满足独立同分布, 只满足式(2)所示的关系。将式(2)代入式(1), 结果如式(4)所示。

$$TOR_n = TOM_n + D_1 + \sum_{i=1}^{n-1} \Delta D_i \quad (4)$$

3 ADS-B 信息时延估计算法

3.1 多普勒与比较对象选取

在考察总时延时, 由于空间传输耗时可忽略不计, 故无法使用文献[10,11]中基于平面或者空间两点位置差异引起的时延估计算法, 而需要构造新的模型, 并提出适合于新模型的时延估计算法。本文首先在航线附近引入辅助无线电信号源(简称“辅助源”), 然后通过比较提取的实际多普勒频移特征与计算的理论多普勒频移特征来进行时延估计。

图 2 中, 白色的圆代表 ADS-B 信息发射机和辅助源发射机, 它们空间位置不同, 故用 2 个圆表示; 灰色的圆代表 ADS-B 信息接收机和辅助源信号接收机, 它们的空间位置相同, 故用一个圆表示。在时刻 t 辅助源发出的信号经飞机散射被接收机接收; 在时刻 $t+D$, ADS-B 报文信息也被接收机接收和译码, 但是该报文携带的信息实际反映是 t 时刻飞机的位置和速度, 故用实线表示 t 时刻发出的 2 个信号, 而其他的则用虚线表示。为了用时延估计变量 τ 来估计总时延 D , 而选取信号所携带的多普勒频移作为信号特征, 主要是由于它既能反映飞机的位置, 又能反映飞机的速度, 同时还是时间变量

的函数。显然, 通过 ADS-B 报文计算获取的多普勒曲线取值较为准确, 但存在时延误差, 而由散射信号参数估计获取的真实多普勒曲线时间信息准确, 但取值略有误差, 故可通过比较 2 条曲线的相似性来纠正 ADS-B 信息的时延误差。

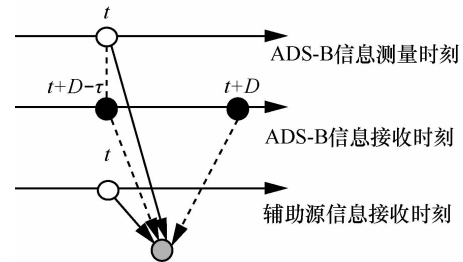


图 2 基于辅助源的时延模型

3.2 相关熵与比较方法选取

信号的相似性比较方法主要包括相关法、均方差法和相关熵法, 分别基于最大相关值准则、最小均方差准则 (MSE) 和最大相关熵准则 (MCC)。其中, 相关本质上是信号所在的低维希尔伯特空间中的内积运算, 而均方差值本质上则是该空间中的 2 范数运算。由内积而导出的范数运算能够度量希尔伯特空间中两点间的距离, 故上述 2 种方法能够比较信号的相似性。由核函数方法可知, 两组信号在 Mercer 核 [14] 中的运算本质上是高维再生核希尔伯特空间 (RKHS, reproducing kernel Hilbert space) 中的内积运算, 故也能够高维空间中衡量点与点的接近程度。又由于相关熵是 Mercer 核的数学期望且高斯核是典型的 Mercer 核 [15], 故采用高斯核的相关熵法能够衡量随机信号的相似程度。高斯核定义式如下

$$\kappa_\sigma(x-y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\|x-y\|_2^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

不妨设 $\mathbf{x} = \{x(n)\}_{n=1}^N$ 和 $\mathbf{y} = \{y(n)\}_{n=1}^N$ 表示两组长度为 N 的离散时间信号, 则相关法的代价函数记作

$$R(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{n=1}^N x(n)y(n) \quad (6)$$

均方差法的代价函数可以记作

$$M(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [x(n)-y(n)]^2 \quad (7)$$

相关熵法的代价函数可以记作

$$V(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(\frac{-(x(n) - y(n))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (8)$$

则由式(6)和式(7)可知, $R(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 和 $M(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 属于含噪信号的二阶统计量, 噪声完全体现其中, 故相关法和均方差法在比较信号相似性时具有“全局性”; 而由式(8)可知, 某时刻的脉冲噪声会导致指数函数取值极小而不会影响 $V(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ 的计算结果, 故相关熵法在比较信号相似性时具有“局部性”^[14]。脉冲噪声常常会在某一时刻引入较大的误差值, 并且以 α 稳定分布噪声为代表的脉冲噪声并不具有二阶统计量, 故在脉冲噪声条件下比较信号的相似性时, 相关熵法更具优势。

图 3 是理论多普勒频移 $f_{\text{Doppler}}^{\text{theory}}(t)$ 与在噪声条件下从辅助源信号中提取的多普勒频移 $f_{\text{Doppler}}^a(t)$ 的比较。

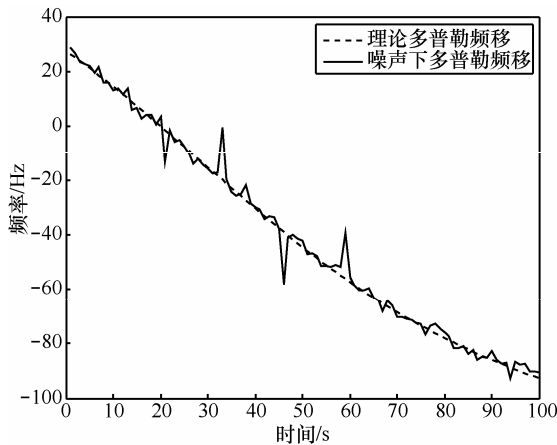


图 3 理论多普勒频移与噪声下多普勒频移的比较

显然, 实际的多普勒频移曲线受到了脉冲噪声的影响^[6], 故选用相关熵法来估计多普勒频移曲线相似性, 而不选用严重依赖于信号二阶统计量有界^[8]的相关法和均方差值法。

3.3 时延估计算法

ADS-B 信息时延估计算法主要步骤如下:

- 1) 建立坐标系;
- 2) 从辅助源信号中估计多普勒频移曲线 $f_{\text{Doppler}}^a(t)$;
- 3) 依据 ADS-B 报文信息计算理论多普勒频移曲线 $f_{\text{Doppler}}^{\text{ADSB}}(t)$, 并赋予一定时延 $f_{\text{Doppler}}^{\text{ADSB}}(t - \tau)$ 以便与 $f_{\text{Doppler}}^a(t)$ 比较相似性;

4) 计算曲线 $f_{\text{Doppler}}^a(t)$ 和 $f_{\text{Doppler}}^{\text{ADSB}}(t - \tau)$ 所对应的相关熵 $v(\tau)$;

5) 依据最大相关熵准则 (MCC) 估计 ADS-B 信息时延。

ADS-B 信息时延估计算法具体内容如下所述。

依据大地坐标系理论^[16], 建立空间笛卡尔坐标系。在该坐标系中, 记 t 时刻飞机位置坐标为 $x_p(t)$, 其中 $t \in [T_0, T_1]$, 辅助源位置坐标为 $x_a(t)$, 接收机位置坐标为 $x_r(t)$, 飞机速度为 $v_p(t)$, 光速为 c_0 , 辅助源信号发射载频为 f_a , 接收到信号中多普勒频移为 $f_{\text{Doppler}}(t)$, 它满足

$$f_{\text{Doppler}}(t) = f_a \left(1 - \frac{v_p(t)^T d_{p-a}(t)}{c_0} \right) \left(1 - \frac{v_p(t)^T d_{p-r}(t)}{c_0} \right) - f_a \quad (9)$$

其中, $d_{p-a}(t) = \frac{[x_p(t) - x_a(t)]}{\|x_p(t) - x_a(t)\|_2}$ 是指从辅助源位置指

向飞机位置的单位方向向量, $d_{p-r}(t) = \frac{[x_p(t) - x_r(t)]}{\|x_p(t) - x_r(t)\|_2}$

是指从接收机位置指向飞机位置的单位方向向量。由式 (9) 通过 ADS-B 信息计算获得用于估计总时延 D 的多普勒频移曲线, 记作 $f_{\text{Doppler}}^{\text{ADSB}}(t - \tau)$, 称 τ 为时延估计变量。

记连续时间信号的多普勒频移曲线 $f_{\text{Doppler}}^a(t)$ 与 $f_{\text{Doppler}}^{\text{ADSB}}(t - \tau)$ 的相关熵函数为 $v(\tau)$, 它满足

$$v(\tau) = E \left[\kappa_\sigma(f_{\text{Doppler}}^a(t) - f_{\text{Doppler}}^{\text{ADSB}}(t - \tau)) \right] \quad (10)$$

其中, $E[\cdot]$ 表示数学期望; 而 $\kappa_\sigma(\cdot)$ 是高斯核, 定义为式(5)。最终将原本的时延估计问题转化为优化问题, 如式(11)所示。

$$\hat{\tau} = \arg \max_{\tau \in [0, 2]} v(\tau) \quad (11)$$

4 实验仿真结果与分析

4.1 时延估计精度与核长和扫描步长的关系

为了说明时延估计均方根误差 ε 与扫描步长 μ 的关系, 选取辅助源坐标 $x_a(t) = [15\ 732, 2480, 0]^T$, 接收机坐标为 $x_r(t) = [4\ 300, 500, 0]^T$, 飞机初始位置为 $x_p(0) = [0, 0, 4\ 800]^T$, 由于高空平稳飞行的飞机可以近似认为是水平匀速直线运动的物体, 故设速度为 $v_p(t) = [160, 120, 0]^T$, 选取辅助源载频 $f_a = 127\ \text{MHz}$,

光速 $c_0 = 3 \times 10^8$ m/s, 选取不同 μ , 进行 1 000 次仿真, 则 ε 与 μ 的关系如表 1 所示。

实验次数	扫描步长/s	均方根误差/ms	
		$\sigma=0.1$	$\sigma=0.01$
1 000	0.01	2.839	2.897
1 000	0.02	5.884	6.345
1 000	0.03	9.638	281.202
1 000	0.04	11.760	559.703
1 000	0.05	14.870	629.963
1 000	0.06	18.662	673.039
1 000	0.07	23.032	674.692
1 000	0.08	26.475	679.947
1 000	0.09	29.559	699.983
1 000	0.1	30.815	710.447

为了进一步说明 σ 和 μ 对 ε 产生的影响, 在区间 $[0.01, 0.1]$ 内按照 0.005 的步长为 σ 和 μ 赋值, 并在每组条件下进行 1 000 次仿真, 得到 ε 与 σ 和 μ 的关系曲面, 如图 4 所示。

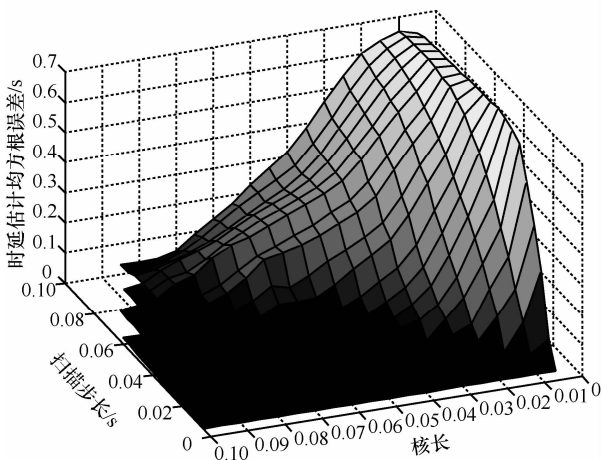


图 4 时延估计均方根误差与核长和扫描步长的关系

由表 1 和图 4 可见, 当 $\sigma=0.01$ 时, 随着 μ 的增加, ε 呈非线性激增, 由几毫秒跃升为几百毫秒; 而当 $\sigma=0.1$ 时, 随着 μ 的增加, ε 呈线性增加, 范围在几毫秒到几十毫秒之间。为说明此问题, 通过式 (7) 得到 σ 取值分别为 0.01、0.04、0.07 和 0.1 时的高斯核函数曲线, 如图 5 所示。

采用高斯核函数进行映射时, 存在“局部性”^[15], 即在某个范围 Ω 外的函数取值接近零。当 σ 较大时, Ω 也较大, 无论 μ 取值多少, 都可以找到较接近总时延 D 的时延估计 \hat{t} , 使 ε 也较小。而当 σ 较小时, Ω 也较小, 如果 μ 取值较大, 则会造成

$|f_{\text{Doppler}}^{\text{ADSB}}(t-\hat{t}) - f_{\text{Doppler}}^a(t)| > \Omega$, 难以分辨出接近 D 的 \hat{t} , 则此时 ε 会急剧恶化。

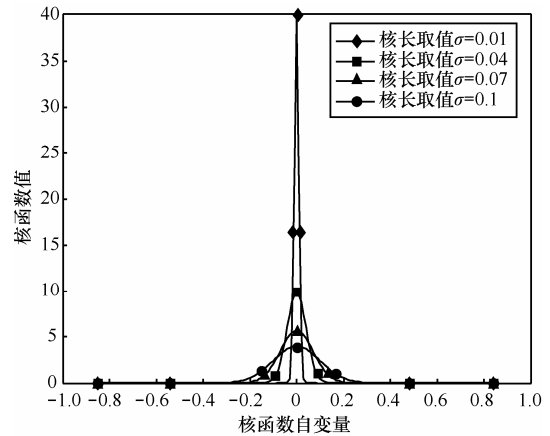


图 5 核长不同时的高斯核函数曲线

另外, 在航线附近较小的区域范围内选取若干个辅助源的位置, 当高斯核长 σ 为 0.1, 扫描步长 μ 为 0.1 时, 各点处时延估计均方根误差 ε 取值约为 30 ms, 波动范围为几个毫秒; 当 σ 为 0.01, 扫描步长 μ 为 0.1 时, 各点处 ε 取值约为 700 ms, 波动范围为十几个毫秒。综上可知, 在航线附近较小的区域范围内, 相对于 μ 和 σ 对 ε 所产生的影响, 辅助源位置的选取所产生的影响较小, 可忽略。由图 5 可知, 辅助源和接收机位置交换时, 多普勒频移不变, 故接收机位置的选取对 ε 所产生的影响也较小, 亦可忽略。

4.2 噪声条件下的时延估计精度

为了确定噪声条件下本文算法时延估计性能, 并同均方差值法以及相关法进行比较, 在 10 dB 到 50 dB 范围内以 1 dB 为步长为广义信噪比 (GSNR) 赋值, 不改变 4.1 节其他参数, 进行 1 000 次仿真, 比较采用不同时延估计方法的均方根误差 ε , 如图 6 所示。

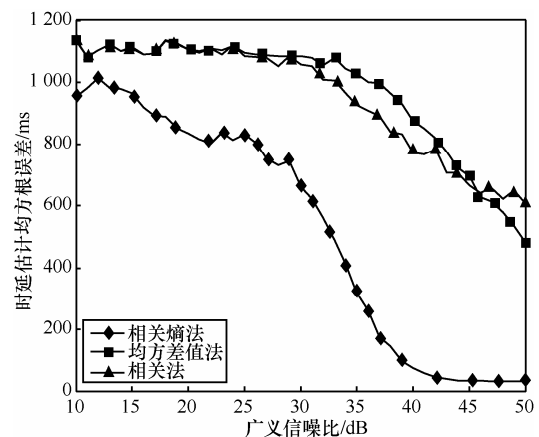


图 6 不同时延估计方法的均方根误差比较 ($\alpha = 0.75$)

由图 6 可见, 随着广义信噪比的不断增加, 采用 3 种不同方法对于报文时延的估计精度也不断增加。在 10 dB 到 35 dB 范围内, 采用相关法和均方差值法时, 时延估计精度提升不明显, 而采用相关熵法时时延估计精度则有较大的提升。另外, 在脉冲噪声条件下, 还可以采用分数低阶矩的方法, 但是其依赖于对于脉冲噪声参数的先验知识, 出于对比较不同方法时条件应相同的考虑, 故不将其作为比较对象。为了兼顾脉冲噪声和高斯噪声, 在比较以上 3 种方法后, 采用相关熵作为对噪声抑制的手段引入到时延估计算法中。同时, 若 GSNR 更低, 则应考虑增加信号预处理来提升广义信噪比。

4.3 算法的实用性验证

为了对本文算法的实际应用价值进行进一步的验证, 对 ADS-B 信息时延误差修正前后文献[5]中民航地面干扰源定位算法的性能进行了比较。考虑到 ADS-B 信息冲突处理机制和分组丢失、误码各种因素, ADS-B 信息的时延并不仅限于 0~2 s 的区间^[13], 所以不妨选取 0~10 s 作为 ADS-B 信息时延的可能取值范围。结果如图 7 所示。

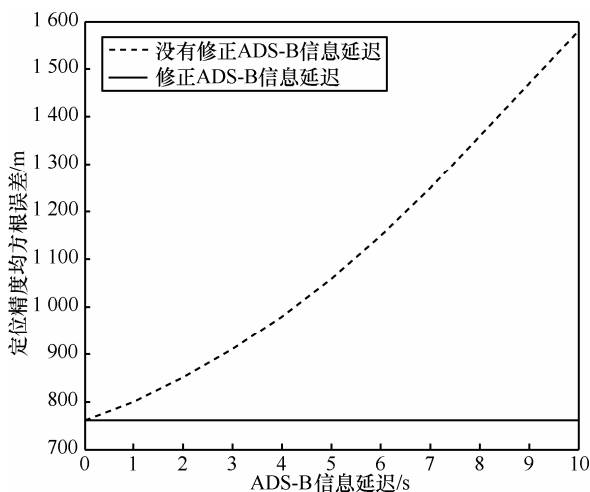


图 7 ADS-B 信息时延误差修正前后定位精度比较

由图 7 可见, 随着 ADS-B 信息时延不断增加, 文献[5]中定位精度不断恶化, 而进行时延估计后, 定位精度显著提高, 说明该 ADS-B 信息时延估计算法具有较好的实际应用价值。

5 结束语

针对 ADS-B 信息时延问题, 本文提出了一种基于辅助源和相关熵的 ADS-B 信息时延估计新算

法, 并提出了新的时延模型, 还对采用相关熵进行信号相似性比较进行了理论分析和说明。讨论并验证了时延估计精度与扫描步长和高斯核长的关系, 以及不同噪声条件下的时延估计精度。同文献[13]相比, 由于不需要改变现有的 1090ES 报文格式, 并且在噪声条件下时延估计精度更高, 故实用性更好, 对确保民航空中管制和飞行安全具有重要意义。

参考文献:

- [1] HICOK D S, LEE D. Application of ADS-B for airport surface surveillance[A]. Digital Avionics Systems Conference[C]. Bellevue, USA, 1998. 1-8.
- [2] YUAN M M, BAKER J W, MEILANDER W C. Comparisons of air traffic control implementations on an associative processor with a MIMD and consequences for parallel computing[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2013, 73(2): 256-272.
- [3] THEDFORD W A. ADS-B IN/OUT Technical Issues[R]. Tennes-see: Jacobs Technology, 2011.
- [4] DUAN P, RANKIN J. ADS-B feasibility study for commercial space flight operations[A]. Digital Avionics Systems Conference[C]. Salt Lake City, USA, 2010. 1-11.
- [5] 栾声扬, 邱天爽, 于玲等. 基于飞机散射信号的民航地面干扰源定位新算法[J]. 大连理工大学学报, 2014, 54(6): 626-631. LUAN S Y, QIU T S, YU L, *et al.* A novel algorithm for civil aviation ground interference source locating via plane scattered signals [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2014, 54(6): 626-631.
- [6] 邱天爽, 夏楠, 李景春等. 稳定分布噪声下基于高斯近似粒子滤波的干扰源定位算法[J]. 信号处理, 2012, 28(9): 1248-1253. QIU T S, XIA N, LI J C, *et al.* An interference localization algorithm based on Gaussian approximation particle filtering with stable distribution noise[J]. Journal of Signal Processing, 2012, 28(9): 1248-1253.
- [7] PURTON L, ABBASS H, ALAM S. Identification of ADS-B system vulnerabilities and threats[A]. Australian Transport Research Forum[C]. Canberra, Australia, 2010. 1-16.
- [8] 王宏禹, 邱天爽. 自适应噪声抵消与时间延迟估计[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1999. WANG H Y, QIU T S. Adaptive Noise Cancellation and Time Delay Estimation[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1999.
- [9] KNAPP C, CARTER G. The generalized correlation method for estimation of time delay[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1976, 24(4): 320-327.
- [10] 刘洋, 邱天爽, 李景春. 脉冲噪声环境下改进的顽健循环时延估计算法[J]. 通信学报, 2013, 34(6): 184-190. LIU Y, QIU T S, LI J C. Modified robust time delay estimation algorithm based on cyclostationarity in impulsive noise[J]. Journal on Communications, 2013, 34(6): 184-190.
- [11] 夏楠, 邱天爽. 基于改进粒子滤波的 PSK 信号时延和码元联合估计算法[J]. 通信学报, 2012, 33(4): 129-135. XIA N, QIU T S. Improved particle filtering based algorithm for time delay and symbols joint estimation of PSK signals[J]. Journal on Communications, 2012, 33(4): 129-135.
- [12] JONES S R. ADS-B Surveillance Separation Error Sensitivity Analysis[M]. The MITRE Corporation, 2009.
- [13] 程拳. ADS-B 延迟时间计算方法的可行性分析[J]. 计算机应用, 2012, 12(32): 9. CHENG Q. Feasibility analysis on method of calculating ADS-B latency[J]. Journal of Computer Applications, 2012, 12(32): 9.

- [14] MERVIER G, LENNON M. Support vector machines for hyperspectral image classification with spectral-based kernels[A]. Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. Toulouse, France, 2003. 288-290.
- [15] LIU W, POKHAREL P P, PRINCIPE J C. Correntropy: properties and applications in non-Gaussian signal processing[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(11): 5286-5298.
- [16] SNAY R A, SOLER T. Modern terrestrial reference systems PART 3: WGS 84 and ITRS[J]. Prof Surv, 2000, 203(1): 1-3.



宋爱民 (1978-), 男, 辽宁大连人, 大连理工大学博士生, 主要研究方向为非高斯信号处理。

作者简介:



栾声扬 (1983-), 男, 辽宁大连人, 大连理工大学博士生, 主要研究方向为信号与信息处理。



李景春 (1966-), 男, 河北宁晋人, 国家无线电监测中心教授级高级工程师、副主任兼总工程师, 主要研究方向为无线电信号处理理论与应用。



邱天爽 [通信作者] (1954-), 男, 江苏海门人, 大连理工大学教授、博士生导师, 主要研究方向为信号与信息处理。E-mail: qjutsh@dlut.edu.cn。



谭海峰 (1977-), 男, 湖北枝江人, 北京邮电大学博士生、高级工程师, 主要研究方向为电磁兼容分析、频谱管理。