

基于改进单天线投影算法的广播式自动相关监视信号分离

王文益* 邵宇识

(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: 广播式自动相关监视(ADS-B)作为一种新的监视技术正受到国际民用航空组织(ICAO)的大力推广。然而, 由于ADS-B信号传输具有随机性, 多条信号交织问题不可避免。该文提出一种改进的单天线投影算法(PASA)。利用单通道分离交织信号, 首先对单通道接收到的数据提出一种新的矩阵重构方式, 从而降低两条信号之间的相对时延和频偏要求; 然后利用投影算法分离交织信号。仿真实验结果验证了该算法的有效性。

关键词: 广播式自动相关监视; 信号解交织; 单通道; 矩阵重构

中图分类号: TN967.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)11-2720-07

DOI: 10.11999/JEIT190673

Signal Separation for Automatic Dependent Surveillance-Broadcast Using Improved Single Antenna Project Algorithm

WANG Wenyi SHAO Yushi

(Tianjin Key Laboratory for Advanced Signal Processing, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: The Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B), as a new surveillance technology, is being vigorously promoted by International Civil Aviation Organization (ICAO). However, overlapping among multiple signals is inevitable because of the randomness of ADS-B signal transmission. An improved Project Algorithm Single Antenna (PASA) algorithm which separates the overlapping signals with one single channel is proposed. Firstly, a new matrix reconstruction method for the data that received by single channel is proposed to decrease the requirement of relative time delay and frequency difference between two ADS-B signals, and then the overlapping signals can be separated by utilizing the projection algorithm. The effectiveness of the algorithm is verified by simulation experiments.

Key words: Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B); Signal separation; Single channel; Matrix reconstruction

1 引言

ADS-B作为一种应用于空中交通管理的监视技术, 其机载ADS-B通信设备在同一频段以随机广播的方式向外发送飞机的位置等信息, 使地面站可以对其进行监视。因此, ADS-B系统应用于民用航空可以有效追踪飞机的多种飞行状态参数。然而由于ADS-B信号具有随机广播发送的特点, 不同ADS-B信号之间会不可避免地产生信号交织问题。如果没有有效的交织信号分离算法, 交织问题将会导致解码错误和监视信息丢失, 从而造成ADS-B系统监

视性能的显著下降。

信号解交织问题可以分为时域解交织与空域解交织, 空域解交织利用阵列天线所具有的空间分辨能力来分离交织信号^[1]。目前基于阵列天线的信号分离方法可以分为两类, 其中一类是利用波达方向(Direction Of Arrival, DOA)估计方法分离不同来向的信号, 如文献^[2]中利用最大似然估计的方法进行信号解交织, 但该方法需要阵列校准。而针对准确估计信号DOA问题, 文献^[3]中利用矩阵重构技术提高了互质阵列欠定情况下的DOA估计精度和分辨率。另一类为盲源分离算法, 如快速独立主成分分析(Fast Independent Component Analysis, FastICA)^[4], 该算法需要知道重叠信号的个数且对迭代初值的选取较为敏感, 不能直接应用于ADS-B信号分离; 用于处理S模式2次雷达信号交织问题的曼彻斯特解码算法(Manchester Decoding

收稿日期: 2019-09-03; 改回日期: 2020-08-01; 网络出版: 2020-08-20

*通信作者: 王文益 wenyi_wang@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(U1833112)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (U1833112)

Algorithm, MDA)^[5,6]亦可以用于ADS-B信号分离,但其性能随着重叠信号相对时延增加而变差;PA(Project Algorithm)通过利用交织信号的单信号区间来分离交织信号^[7,8],但是该算法需要两条信号的相对时延大于4 μs 。

相比于阵列天线接收机,单天线ADS-B接收机更加普遍并且成本低、维护方便,因此本文考虑利用单通道接收机解决ADS-B信号交织问题。目前已经有许多学者提出了针对不同信号的单通道交织信号分离算法,文献[9]中提出一种基于时域基函数的信号分离算法;文献[10]中同样也提出利用线性时变滤波器分离交织信号,但以上两种方法只适用于语音信号,并不适用于ADS-B信号交织问题;文献[11]针对具有固定脉冲重复周期的雷达信号,提出利用线性方程组的求解来分离交织信号,同样该方法也具有局限性;文献[12]针对单通道ADS-B信号交织问题,提出一种基于累加分类判决的解交织算法,但该算法要求信号之间存在一定的功率差。近年来,不少学者在对单通道信号分离算法进行研究时,尝试将单通道问题转换为多通道问题,从而利用目前比较成熟的多通道信号分离算法进行信号解交织^[13]。文献[14]将单通道接收到的数据转化为多通道数据接收模型,从而利用阵列信号处理中的MDA分离交织信号,但该方法仍然需要比较复杂的联合对角化计算;文献[15]提出运用PASA算法分离单通道S模式2次雷达交织信号,通过将单通道转化为多通道,再利用PA达到信号分离的目的。由于ADS-B信号与S模式2次雷达信号体制相近,PASA算法同样可以应用于ADS-B信号解交织。但是该算法的缺点在于将单天线接收到的交织信号进行矩阵构造后,如果想要准确估计其中一条信号的虚拟导向矢量,要求信号之间的相对时延大于10 μs 。因此本文基于PASA算法提出一种新的矩阵重构方法来降低算法对信号之间的相对时延要求,即两条信号相对时延大于0.5 μs 便可分离交织信号。除此之外,该方法也可以降低信号之间的频偏要求。

2 信号模型

1090ES数据链格式下的ADS-B信号载波频率为1090 MHz,可允许的频率偏差范围为 ± 1 MHz。

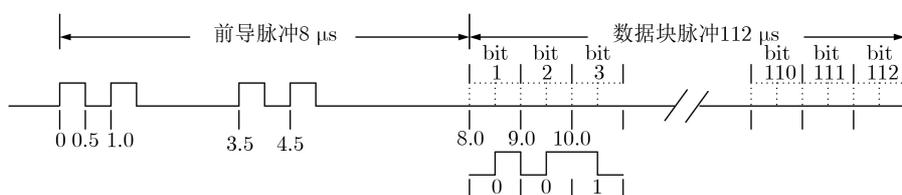


图1 ADS-B基带信号

每帧ADS-B基带信号由8 bit的前导脉冲和112 bit的数据块脉冲组成,且每一比特符号都使用曼彻斯特编码方式进行编码,即“0”编码为“01”,“1”编码为“10”,随后通过脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM)获得基带PPM信号^[16]

$$D(t) = \sum_{v=0}^Q b_v p(t - vT_s) \quad (1)$$

其中, Q 表示二进制符号数, b_v 表示第 v 个二进制符号, $p(t)$ 表示一个脉冲宽度为 $T_s = 0.5 \mu\text{s}$ 的矩形脉冲。

图1为经过PPM调制后的ADS-B基带信号。

在给定的信号采样频率下,单通道接收到的信号可以表示为

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{s} + \mathbf{n} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{s} = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_m \ \dots \ s_M]^T$ 表示ADS-B信号, M 为全部采样点数, \mathbf{n} 表示加性高斯白噪声, s_m 可以表示为

$$s_m = \sum_{i=1}^I \sqrt{P_i} D_i(m - \tau_i) \cdot \exp(j(2\pi(f_0 + f_i)m/f_s + \varphi_i)) \quad (3)$$

其中, f_0 表示接收机的中频频率, f_s 表示信号采样频率, I 代表ADS-B信号交织个数。对于第 i 条ADS-B信号, f_i 来自于接收机频差和多普勒频移, τ_i 表示从观测时间开始的相对时延。 p_i , $D_i(m)$ 和 φ_i 分别表示第 i 条信号的功率、编码二进制符号和初始相位。为了便于描述,令式(3)中的 $I = 2$,即对两条信号交织问题进行分析。

3 基于改进PASA算法的ADS-B信号分离

3.1 PASA算法原理

文献[15]中提出了基于PA算法的PASA算法,该算法首先对接收到的数据重新排列构造如式(4)矩阵

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} s_1 & s_{k+1} & \dots & s_{M-k+1} \\ s_2 & s_{k+2} & \dots & s_{M-k+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_k & s_{2k} & \dots & s_M \end{bmatrix} + \mathbf{N} \quad (4)$$

其中, k 称作重构因子, \mathbf{N} 是由式(2)中与ADS-B信号相对应的噪声 \mathbf{n} 构成的矩阵。

其次, PASA算法利用一个大小固定的滑动窗口对式(4)进行滑动处理得到一个子矩阵, 通过对该子矩阵的奇异值分析来确定信号交织的位置, 从而可以将矩阵 \mathbf{X} 中只包含先达信号的数据选取出来并表示成形式为

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{m}\mathbf{s}_1 + \mathbf{N}_1 \quad (5)$$

其中, $\mathbf{s}_1 = [s_1 \ s_{k+1} \ \dots \ s_{Nk+1}]$, \mathbf{N}_1 为包含了矩阵 \mathbf{N} 中对应于先达信号噪声的矩阵。虚拟导向矢量 \mathbf{m} 为

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp\left(\frac{j2\pi(f_0 + f_1)}{f_s}\right) \\ \vdots \\ \exp\left(\frac{j2\pi(f_0 + f_1)(k-1)}{f_s}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

对矩阵 \mathbf{X}_1 进行奇异值分解, 通过寻找大奇异值对应的奇异向量可以得到先达信号对应的虚拟导向矢量 \mathbf{m} 。利用同样的方法可以得到后达信号的虚拟导向矢量, 最后根据求得的导向矢量通过信号投影算法分离交织信号。但是PASA算法要求两条ADS-B信号之间的相对时延大于10 μs , 否则该算法的性能将会下降。通过式(5)可以分析得出: 如果两条信号的相对时延小于10 μs , 由于不能提供足够数量的单信号样本, 因此无法保证重叠样本检测和虚拟导向矢量估计的准确性。

3.2 改进的PASA算法

鉴于PASA算法的不足, 本文基于PASA算法提出一种改进方法来降低算法对信号之间相对时延的要求。由于ADS-B信号的编码方式使每1 bit的信号只有0.5 μs 有信号。通常, 一条ADS-B信号的时长为120 μs , 两条重叠ADS-B信号的相对时延小于0.5 μs 的概率非常低。为了保证能够利用尽可能少的数据来分离交织信号, 可以将信号门限定为0.5 μs , 即考虑改进PASA算法在两条信号相对时延仅大于0.5 μs 时分离交织信号。

对0.5 μs 时间内的单信号数据按照式(7)方式进行矩阵重构

$$\mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \dots & s_{L-k+1} \\ s_2 & s_3 & \dots & s_{L-k+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_k & s_{k+1} & \dots & s_L \end{bmatrix} + \mathbf{N}_2 \quad (7)$$

其中, 矩阵 \mathbf{X}_2 为Hankel矩阵, 即矩阵 \mathbf{X}_2 中的所有元素由其第1列和最后一行数据组成。 L 表示先达信号第1个0.5 μs 时间内的样本数量, 而由图1可以看出0.5 μs 即为1个脉冲的持续时间, 如果选取时间大于0.5 μs , 则会因为选取的信号不连续而对后续算法的处理产生影响。而0.5 μs 信号的采样数 L 的具

体数值由采样频率 f_s 决定, 即 $L = f_s T_s$, 其中 $T_s = 0.5 \mu\text{s}$ 。 \mathbf{N}_2 为由式(2)中与先达信号相对应的噪声 \mathbf{n} 构成的矩阵。

由于第1个0.5 μs 时间内只包含1条ADS-B信号, 根据式(3)可以得出由 L 个样本可以获得的有效信息为 $\exp(j(2\pi(f_0 + f_1)m/f_s + \varphi_1))$, 因此将式(3)代入式(7)中, 通过整理可以得到矩阵 \mathbf{X}_2 的另外一种表示方法

$$\mathbf{X}_2 = \mathbf{m}\mathbf{s}_2 + \mathbf{N}_2 \quad (8)$$

其中, $\mathbf{s}_2 = [s_1 \ s_2 \ \dots \ s_{L-k+1}]$ 。

将式(8)与式(5)进行对比可以看出: 当可以利用的单信号样本数据相同时, 本文提出的矩阵重构方法在没有改变信号虚拟导向矢量的同时增加了可以利用的快拍数, 也就是说通过新的矩阵重排方式, 使式(7)中相邻两列的数据仅有1个数据不同, 从而保证了由0.5 μs 数据构成的矩阵列数与PASA算法利用10 μs 数据中的有效样本构成的矩阵列数相似。快拍数量的增加即可以保证对信号虚拟导向矢量的准确估计, 从而有效分离交织信号。因此该改进算法在信号相对时延仅仅大于0.5 μs 时就可以进行信号解交织。

由于该算法主要是利用新的矩阵重构方式来估计出0.5 μs 数据中由信号频率参数产生的虚拟导向矢量, 而两条ADS-B信号存在频差, 从而产生不同的虚拟导向矢量, 最终通过利用虚拟导向矢量构造的权重矩阵来进行交织信号的分离。

由式(7)同样可以得出, 重构因子 k 表示了虚拟阵元数, 即重构因子 k 的值越大, 表示虚拟阵列的阵元数越多, 对接收信号的频偏要求越低, 但是可以利用的单信号快拍数据将会变少; 重构因子 k 的值越小, 表示虚拟阵列的阵元数越少, 对接收信号的频偏要求越高, 但是可以利用的单信号快拍数据将会变多。因此该方法的本质就是用尽可能少的单天线采样数据构造尽可能大的虚拟阵列接收数据, 并且在虚拟阵元数给定的情况下, 保证足够多的单信号快拍可用于后续算法处理。

至此, 改进的PASA算法用于信号解交织步骤总结如下: (1)对只包含先达信号的第1个0.5 μs 的数据按照式(7)进行矩阵重构; (2)对重构矩阵 \mathbf{X}_2 进行奇异值分解: $\mathbf{X}_2 = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^H$, 选取矩阵 \mathbf{U} 中大奇异值对应的奇异向量作为先达信号的虚拟导向矢量 \mathbf{m}_1 ; (3)利用相同方法对只包含后达信号的最后0.5 μs 时间的数据进行处理得到后达信号的虚拟导向矢量 \mathbf{m}_2 ; (4)构造矩阵 $\mathbf{M} = [\mathbf{m}_1 \ \mathbf{m}_2]$ 并求该矩阵的Moore-Penrose伪逆运算: $\mathbf{W} = \mathbf{M}^\dagger = (\mathbf{M}^H \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^H$; (5)利用矩阵 \mathbf{W} 分别构造先达信号和后达信号

的权重矩阵： $\mathbf{W}_1 = [m_1 \ 0] \mathbf{W}$ ， $\mathbf{W}_2 = [0 \ m_2] \mathbf{W}$ ；
 (6)利用权重矩阵进行投影算法得到解交织信号。
 其中，由于改变了矩阵重构方式，关于步骤(6)中提
 取解交织信号的方法在此进行详细说明。

对于先达信号，从单通道接收机接收到的第
 1个信号数据开始，将每0.5 μs 时间内的样本数据按
 照式(7)的构造方法得到矩阵 \mathbf{Y}_i ，再将得到的每一
 个矩阵都进行如下投影处理

$$\hat{\mathbf{Y}}_i = \mathbf{W}_1 \mathbf{Y}_i \quad (9)$$

将多余的数据去除并把剩余的数据恢复成为单

行数据便可以得到解交织后的先达信号。同理，通
 过利用权重矩阵 \mathbf{W}_2 进行相同处理可以得到解交织
 的后达信号，从而实现单通道ADS-B交织信号分离。

最后对两种算法的复杂度进行分析，此时只计
 算乘加次数。 N_1 和 N_2 分别为改进PASA算法和PASA
 算法中求信号虚拟导向矢量时所利用的快拍数。由
 于PASA算法中需要利用奇异值分解来进行信号交
 织位置检测，当进行交织位置检测时利用的滑动窗
 口大小为 N_3 ，进行 M_1 次滑动处理确定信号交织位
 置，表1为两种算法复杂度对比。

表 1 两种算法复杂度对比

	改进PASA	PASA
算法复杂度	$23N_1^3 + 3kN_1^2 + 6k^2 + 14k - kN_1 - N_1^2 + 8$	$23M_1N_2^3 + 3kM_1N_2^2 + 6k^2 + 14k - kM_1N_2 - M_1N_2^2 + 8$

由表1可以看出，所提出的改进PASA算法中
 在进行交织信号分离时可以免去PASA算法中的重
 叠位置检测步骤，从而减少了算法复杂度。当两条
 信号的相对时延小于0.5 μs 时，通过提高采样率可
 以保证足够数量的单信号样本，方法仍然适用。

4 仿真实验结果

不妨将仿真实验的相关参数设置为：采样频率
 80 MHz，中频频率10 MHz。仿真生成两条信号，
 其信噪比均为15 dB，其中信号1的数据位信息为：
 飞机号780AAA，高度10000 m，经纬度(117.5°，
 37.5°)；信号2的数据位信息为：飞机号780ABC，
 高度11000 m，经纬度(110.5°，31.5°)。两条信号相
 对时延为50 μs ，信号之间的频偏为0.8 MHz，图2
 为两条信号交织的时域波形图。

将改进的PASA算法用于该条信号解交织，仿
 真结果如图3所示。由图可以得出，改进PASA
 算法仅利用首尾各0.5 μs 时间内的单信号数据便可
 以有效分离交织信号。

为了进一步验证改进算法的有效性，将解交织
 的两条信号分别送入软件接收机解码，解码结果如
 表2所示。

为了验证改进PASA算法相比于PASA算法降
 低了相对时延要求，令式(4)和式(7)中的重构因子
 $k = 20$ ，信号频偏保持不变仍为0.8 MHz，图4比
 较了相对时延对两种算法输出信噪比的影响。两条信
 号的相对时延从0.5 μs 开始逐渐增加到15 μs ，从仿

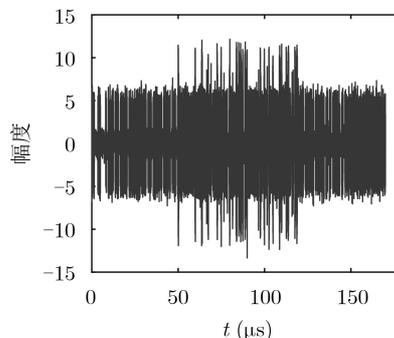
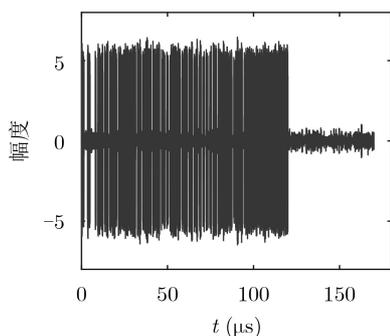
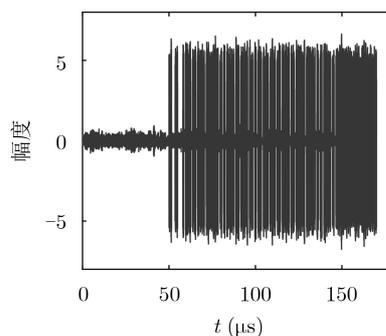


图 2 交织信号时域波形图



(a) 解交织信号1



(b) 解交织信号2

图 3 解交织信号时域波形图

表2 接收机解码结果

	AA	DF	消息类型	高度(m)	经度(°)	纬度(°)
信号1	780AAA	17	空中位置消息	10000	117.5	37.5
信号2	780ABC	17	空中位置消息	11000	110.5	31.5

真结果可以看出,当信号相对时延小于 $10\ \mu\text{s}$ 时,本文算法性能优于PASA算法,只有当相对时延大于 $10\ \mu\text{s}$,PASA由于拥有足够多的数据用于准确估计信号导向矢量,其性能才与本文提出的算法保持一致。

由于载波频率偏差和多普勒频移的存在,信号之间会产生频偏,因此针对信号频偏对两种算法性能影响进行仿真实验。需要指出的是,由于改进PASA算法提出的矩阵重构式(7)中的每相邻两列数据中只有一个元素不同,因此利用有限数量的样本可以构造更多的列数据。除此之外,重构因子 k 的取值也可以根据实际情况而选择不同数值。本次仿真实验中令式(4)中的 $k=20$,式(7)中的 $k=30$,假设两条信号的相对时延仅为 $0.5\ \mu\text{s}$,图5比较了信号频偏对两种算法解码正确率的影响。从仿真结果可以看出,本文提出的算法性能优于PASA算法,当两条信号的频偏大于 $0.6\ \text{MHz}$ 时,两种算法的解码正确率都为100%。

从该仿真实验结果同样可以得出,重构因子 k 的增大可以降低信号之间的频偏要求,但是由

式(7)可以得知,随着 k 值的增大,利用有限样本构造的列数据数量将会减少,从而无法准确估计出信号的虚拟导向矢量,影响交织信号分离效果。因此仿真实验将两条信号的相对频偏设为 $0.25\ \text{MHz}$,相对时延仍为 $0.5\ \mu\text{s}$, k 的值从30开始逐渐变化,观察信号的解码正确率。仿真结果如表3所示,即随着 k 值的逐渐增大,信号解码正确率呈现出先上升后下降的趋势。

在接下来的仿真实验中,令式(7)中的 k 分别为30和35,两条信号的相对时延仅为 $0.5\ \mu\text{s}$,图6为信号频偏与不同 k 值条件下本文算法解码正确率的关系曲线。从图6可以看出当 $k=35$,信号频偏大于 $0.3\ \text{MHz}$ 时该算法对信号的解码正确率趋近于100%。由于本文所提算法利用单天线进行交织信号分离,无法根据信号的来向不同进行信号分离,可以利用的有效信息很少,因此对信号之间的频偏要求更高。

最后观察信号输入信噪比对两种算法解码正确率的影响,此时令式(4)中的 $k=20$,式(7)中的 $k=35$,两条信号的相对时延仅为 $0.5\ \mu\text{s}$,信号频偏为 $0.5\ \text{MHz}$ 。由图7可以看出,本文所提算法在信噪比大于 $12\ \text{dB}$ 时便可以保证解码正确率趋近于100%,而PASA需要信噪比大于 $16\ \text{dB}$ 才可以与本文所提算法性能保持一致。

通过以上全部仿真实验可以得出改进PASA算法可以有效分离相对时延大于 $0.5\ \mu\text{s}$ 的交织信号,并且降低了信号之间的频偏要求。

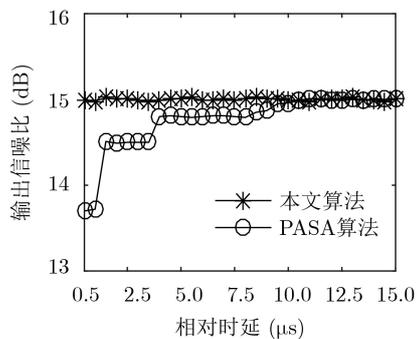


图4 相对时延与输出信噪比关系曲线

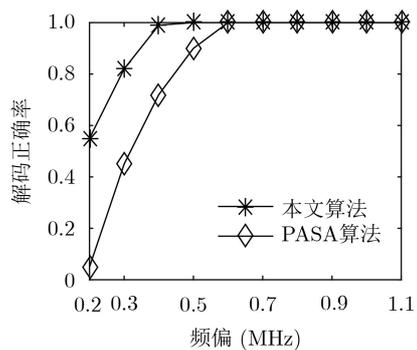
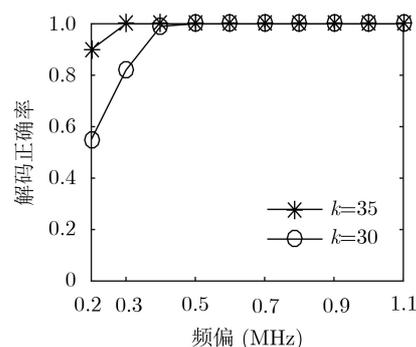


图5 信号频偏与解码正确率关系曲线

表3 不同 k 值对应的信号解码正确率(%)

重构因子 k	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
解码正确率	51	73	82	90	92	95	93	88	84	81

图6 不同 k 值条件下的信号频偏与解码正确率关系曲线

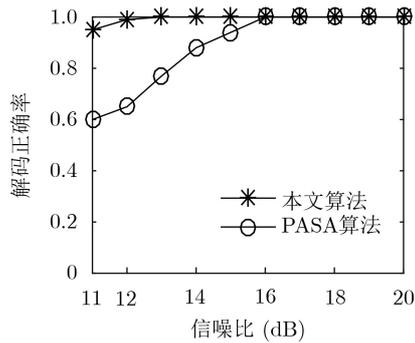


图7 信噪比与解码正确率关系曲线

5 结束语

本文针对ADS-B信号交织问题，提出一种改进的PASA算法来实现信号解交织。通过一种新的矩阵重构方法降低了信号之间的相对时延要求，从而在无需进行信号重叠样本检测的情况下达到分离交织信号的目的。通过仿真实验表明该算法在信号相对时延大于 $0.5 \mu\text{s}$ 时便可以有效分离交织信号并且可以降低信号之间的频偏要求。

参考文献

- [1] 张小飞, 汪飞, 陈伟华, 等. 阵列信号处理的理论与应用[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2013: 1–7.
ZHANG Xiaofei, WANG Fei, CHEN Weihua, et al. Theory and Application of Array Signal Processing[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 1–7.
- [2] 唐波, 程水英, 张浩. 基于多通道阵列处理的二次雷达混扰信号分选[J]. 电讯技术, 2014, 54(5): 534–540. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2014.05.002.
TANG Bo, CHENG Shuiying, and ZHANG Hao. Separation of garbled secondary surveillance radar signal based on multichannel array processing[J]. *Telecommunication Engineering*, 2014, 54(5): 534–540. doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2014.05.002.
- [3] 孙兵, 阮怀林, 吴晨曦, 等. 基于Toeplitz协方差矩阵重构的互质阵列DOA估计方法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(8): 1924–1930. doi: 10.11999/JEIT181041.
SUN Bing, RUAN Huailin, WU Chenxi, et al. Direction of arrival estimation with coprime array based on Toeplitz covariance matrix reconstruction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(8): 1924–1930. doi: 10.11999/JEIT181041.
- [4] NOVEY M and ADALI T. On extending the complex FastICA algorithm to noncircular sources[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(5): 2148–2154. doi: 10.1109/TSP.2007.911278.
- [5] PETROCHILOS N and VAN DER VEEN A J. Algebraic algorithms to separate overlapping secondary surveillance radar replies[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(7): 3746–3759. doi: 10.1109/TSP.2007.894248.
- [6] PETROCHILOS N, PIRACCI E G, and GALATI G. Improved MDA, a case for de-garbling SSR mode S replies[C]. 2014 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications-Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles, Rome, Italy, 2014: 87–91. doi: 10.1109/TIWDC-ESAV.2014.6945454.
- [7] PETROCHILOS N, GALATI G, and PIRACCI E. Separation of SSR signals by array processing in multilateration systems[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(3): 965–982. doi: 10.1109/TAES.2009.5259177.
- [8] 卢丹, 赵敏同. 用于ADS-B解交织的高增益稳健PA算法[J]. 信号处理, 2018, 34(9): 1060–1067. doi: 10.16798/j.issn.1003-0530.2018.09.006.
LU Dan and ZHAO Mintong. A robust and high gain algorithm for separating overlapped ADS-B signal based on PA[J]. *Journal of Signal Processing*, 2018, 34(9): 1060–1067. doi: 10.16798/j.issn.1003-0530.2018.09.006.
- [9] JANG G J, LEE T W, and OH Y H. Single-channel signal separation using time-domain basis function[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2003, 10(6): 168–171. doi: 10.1109/LSP.2003.811630.
- [10] HOPGOOD J R and RAYNER P J W. Single channel nonstationary stochastic signal separation using linear time-varying filters[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(7): 1739–1752. doi: 10.1109/TSP.2003.812837.
- [11] CHENG Hao, TANG Bin, DU Jingjing, et al. Single channel pulse train radar signal separation using algebraic method[C]. 2009 IET International Radar Conference, Guilin, China, 2009: 1–4. doi: 10.1049/cp.2009.0285.
- [12] 吴仁彪, 吴琛琛, 王文益. 基于累加分类的ADS-B交织信号处理方法[J]. 信号处理, 2017, 33(4): 572–576. doi: 10.16798/j.issn.1003-0530.2017.04.017.
WU Renbiao, WU Chenchen, and WANG Wenyi. A method of overlapped ADS-B signal processing based on accumulation and classification[J]. *Journal of Signal Processing*, 2017, 33(4): 572–576. doi: 10.16798/j.issn.1003-0530.2017.04.017.
- [13] 付卫红, 周新彪, 农斌. 单通道盲源分离的研究现状与展望[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(5): 1–11. doi: 10.13190/j.jbupt.2017-001.
FU Weihong, ZHOU Xinbiao, and NONG Bin. The research of SCBSS technology: Survey and prospect[J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2017, 40(5): 1–11. doi: 10.13190/j.jbupt.2017-001.
- [14] 李丞, 张玉, 唐波. 基于曼彻斯特编码算法的单通道二次雷达信号重构方法[J]. 探测与控制学报, 2018, 40(3): 66–69.
LI Cheng, ZHANG Yu, and TANG Bo. Secondary

- surveillance radar replies received in single channel based on Manchester decoding algorithm[J]. *Journal of Detection & Control*, 2018, 40(3): 66–69.
- [15] GALATI G, PETROCHILOS N, and PIRACCI E G. Degarbling Mode S replies received in single channel stations with a digital incremental improvement[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(6): 681–691. doi: [10.1049/iet-rsn.2014.0335](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0335).
- [16] WANG Wenyi, WU Renbiao, and LIANG Junli. ADS-B signal separation based on blind adaptive beamforming[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(7): 6547–6556. doi: [10.1109/TVT.2019.2914233](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2914233).
- 王文益: 男, 1980年生, 教授, 主要研究方向为自适应阵列信号处理.
- 邵宇识: 男, 1995年生, 硕士, 研究方向为自适应阵列信号处理.
- 责任编辑: 马秀强