

基于MUSIC算法的二次雷达应答信号分离方法

张 海^① 陈小龙^① 张 涛^{*①②} 张财生^①

^①(海军航空大学 烟台 264001)

^②(92337部队 大连 116023)

摘 要: 为了提高在高密度信号环境下对二次监视雷达(SSR)应答信号的接收性能, 该文提出一种将信源数估计和信号到达方向(DOA)估计相结合构建分离矩阵实现交叠信号分离的算法。首先根据交叠信号量测的特征值分布来确定交叠信号的个数; 然后利用MUSIC算法作谱峰搜索得到各信号的DOA, 并重构混合矩阵; 最后通过计算混合矩阵的广义逆得到分离矩阵, 并实现对交叠信号的分离。以6阵元均匀线阵为前提进行仿真分析, 结果表明所提分离算法可达到90%以上的分离成功率, 分离性能和独立成分分析(ICA)算法相当, 优于基于投影技术分离算法(PA), 但计算量远小于ICA算法, 不足ICA算法计算量1/10, 更易于工程化应用。

关键词: 交叠信号分离; 阵列天线; SSR应答信号; MUSIC算法; 混合矩阵重构

中图分类号: TN958.96; V19

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)12-2984-08

DOI: 10.11999/JEIT190842

Overlapping Secondary Surveillance Radar Replies Separation Algorithm Based on MUSIC

ZHANG Hai^① CHEN Xiaolong^① ZHANG Tao^{*①②} ZHANG Caisheng^①

^①(Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

^②(92337 Troop, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to improve the reception performance of Secondary Surveillance Radar (SSR) replies in high-density signal environment, a separation algorithm is proposed, which constructs the separating matrix with estimating the source number and the Direction Of Arrival (DOA) of signal. Firstly, the number of overlapping signals is determined with the eigenvalues distribution of the measurements. Secondly, the mixing matrix with the DOA of signals, which is estimated by peak value searching in MUSIC algorithm. Finally, the separating matrix is estimated by calculating the Moore-Penrose inverse of the reconstructed mixing matrix, achieving separation of overlapping signals. Simulation is done based on uniform linear array with 6 elements. The results show that the proposed separation algorithm can achieve more than 90% success rate to separate two short Mode S replies, and the separating performance is similar to the Independent Component Analysis (ICA) algorithm and is better than Projection Algorithm (PA). The amount of calculation is less than 10 percent of ICA algorithm, thus the proposed separation algorithm is easier to engineering application.

Key words: Overlapping signal Separation; Array antenna; Secondary Surveillance Radar (SSR) replies; MUSIC algorithm; Mixing matrix reconstruction

1 引言

随着航空业的不断发展, 越来越多的航空器及地面车辆投入运营, 随之而来的是用于监视的电子

设备数量明显增加, 而且多种监视系统(诸如多点定位系统(Multi-Station Multilateration, MLAT)、空中交通预警和防撞系统(Traffic alert and Collision Avoidance System, TCAS)以及自动相关监视系统(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)等)为了实现兼容需求而共享二次监视雷达(Secondary Surveillance Radar, SSR)的下行链路(1090 MHz)以及信号协议^[1-3], 使得该信道日益拥塞, 各种信号之间的干扰愈发严重。尤其是MLAT系统和ADS-B接收系统, 一般采用全向或宽波束天线进行接收^[4-6],

收稿日期: 2019-11-01; 改回日期: 2020-03-20; 网络出版: 2020-04-10

*通信作者: 张涛 radarads@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金(U1933135, 61871391, 61931021);
山东省重点研发计划(2019GSF111004)

Foundation Items: The National Nature Science Foundation of China (U1933135, 61871391, 61931021), The Key Research and Development Program of Shandong Province (2019GSF111004)

不具有SSR系统的空域滤波功能，同时其较远的作用距离使得其收到的信号数量比TCAS系统更多，十分普遍的信号交叠现象使得这些系统急需有效的信号分离技术，以达到其性能要求。

要实现信号的分离，交叠的信号至少应在空域、时域和频域中的一个上存在差别^[7,8]。时间上的交叠和共同的信道使得在时频域上的分离方法很难达到很好的效果。从对实测信号的频率统计来看，81.3%的应答信号的载频与理论载频之差都在123.6 kHz以内，利用匹配滤波方法进行交叠信号分离的效果并不理想^[9]。王洪等人^[10]利用A/C应答的特点在时域上对A/C交叠信号的分离进行了研究，但该方法不能适用于S模式交叠的情况。从目前来看，从时域和频域着手对信号进行分离的效果皆不甚理想。

从目前的公开文献来看，对SSR交叠信号分离算法的研究主要集中在利用阵列信号数据处理的方法从空域上对信号进行分离。Galati, Petrochilos等人^[4-6]进行了多年的深入研究，提出了基于投影技术(Projection Algorithm, PA)的分离算法，可以实现对不完全交叠的两个S模式应答信号的分离，但对完全交叠和两个以上信号的交叠并不适用。其在PA算法的基础上提出的扩展投影算法(Extended Projection Algorithm, EPA)可以解决大于两个但不超过阵元数的信号交叠的问题，但也无法解决信号完全交叠的问题^[2]。文献^[11]采用了独立成分分析(Independent Component Analysis, ICA)方法对交叠信号进行盲分离，可以实现对完全交叠信号的分离，且有较好的分离效果，但计算量较大。还有其他一些算法，如曼切斯特解码算法(Manchester Decoding Algorithm, MDA)^[12]，其分离效果皆不如投影类算法和盲分离类算法^[13]。

上述方法都能有效地解决一部分问题，但无法同时解决信号完全交叠和交叠个数超过两个的问题。在信道日益拥堵、信号愈发密集的情况下，各种情况都会发生^[14,15]，若能同时解决上述两个问题，将有效提高在高密度信号背景下的SSR信号解码率，增强对目标监视的连续性。基于空域特征的分离方法必然与信号的到达方向有关，而基于矩阵特征空间分解的多信号分类算法(Multiple Signal Classification, MUSIC)可以有效估计信号的个数及来波方向^[16,17]，这些参数和阵列天线自身的参数相结合，再进行阵列数据处理从理论上可以实现对交叠信号的分离。所以，本文将对基于MUSIC算法的SSR应答信号分离技术进行研究。

2 数据模型

2.1 SSR应答信号简介

SSR应答信号是机载二次雷达应答机收到地面

二次雷达询问机主波束发来的询问信号而产生的应答。应答信号为脉冲调制，标称载波频率为1090 MHz。目前在空间中共存着两种模式的应答信号：一种是传统的不带有地址码的A/C模式；一种是S模式^[18]。S模式是为了降低询问和应答率而出现的，将最终代替A/C模式，但由于航空业自身的特点，两者将长期地共存。每个S模式应答机都有一个全球唯一的地址码，包含在S模式应答信号中。地址码的运用允许地面询问机进行点名询问，并能够实现和飞机之间的通讯。

S模式被应用于多种系统：TCAS系统利用S模式实现告警与防撞；ADS-B系统利用S模式数据链广播飞机的位置、速度等信息实现对空监视；TIS系统利用S模式数据链发送交通、天气等信息实现地对空的信息传输^[19]；MLAT系统利用S模式信号实现定位监视。所以，实现对A/C/S模式交叠信号的分离，也即是解决了上述系统中的交叠信号分离问题，同时分离算法不止适用于SSR应答信号，对类似的有限长度的信号也同样适用。

2.2 数据模型

在国际民用航空公约附件10中规定^[20]：A/C模式应答信号的长度为21.7 μs ；S模式应答信号为64/120 μs (短/长应答报文)；两种应答信号的脉冲宽度略有差别。载频为1090 MHz，但国际民航组织(International Civil Aviation Organisation, ICAO)允许其最多有 ± 3 MHz的 f_c 容差(现在减少为 ± 1 MHz)，所以实际载频与 f_c 略有差异。

SSR应答信号采用S模式应答信号采用脉冲位置调制(Pulse Position Modulation, PPM), $b[n] \in \{0, 1\}$ 表示调制信号， T_s 表示采样间隔(本文中的采样频率 $f_s = 1/T_s = 120$ MHz，为直接射频频欠采样)。在不考虑信号强度的情况下，可在接收端将信号表示为

$$s[n] = b[n] \exp(j2\pi n f_c T_s + \Delta\phi) \quad (1)$$

式中， $\Delta\phi$ 为信号初相。

下面将考虑具有 m 个阵元的天线阵列，收到 d 个独立信号的情况。第 i 个阵元的第 n 次采样为 $x_i[n]$, $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ ，那么该天线阵列的一次采样为 m 维列向量 $\mathbf{x}[n]$ ，在 T 次采样后，量测矩阵 $\mathbf{X}$ 可表示为

$$\mathbf{X} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S} + \mathbf{N} \quad (2)$$

式中， $\mathbf{X} = [\mathbf{x}[1], \mathbf{x}[2], \dots, \mathbf{x}[T]]$ 为 $m \times T$ 维的量测矩阵； $\mathbf{S} = [\mathbf{s}[1], \mathbf{s}[2], \dots, \mathbf{s}[T]]$ 为 $d \times T$ 维的信号矩阵； $\mathbf{N}$ 为 $m \times T$ 维噪声矩阵，在时间上和空间上都是白色的。 $\mathbf{M}$ 为 $m \times d$ 维的混合矩阵，包含阵列天线的特征和信号的复增益。假设应答信号是独立的(因

此也是不相关的), 那么 $E\{s_i s_j^*\} = 0, i \neq j$, 由于 $d \leq m$, 所以矩阵 $\mathbf{M}$ 是列满秩的。

在不考虑多径条件下, $\mathbf{M}$ 可以表示为 $\mathbf{M} = \mathbf{A}\mathbf{G}$, 其中 $\mathbf{A}$ 为 $m \times d$ 维的阵列流型矩阵, $\mathbf{G}$ 为增益矩阵。假设天线阵列为线性阵列, m 为 k 个阵元与第 1 个阵元之间的距离, $f_{e,i}$ 为第 i 个信号的载频, $\mathbf{A}$ 的第 i 列可表示为

$$\mathbf{a}(i) = \begin{bmatrix} 1 \\ \exp(j2\pi D_2 \sin(\theta_i) \frac{f_{e,i}}{c}) \\ \vdots \\ \exp(j2\pi D_m \sin(\theta_i) \frac{f_{e,i}}{c}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, c 为光速, θ_i 为第 i 个信号的来波方向, 即与阵列天线视轴的夹角。若天线阵列为均匀线阵, 阵元之间的间距 $D = \lambda/2$, 且所有信号的载频均为 f_c , 那么矩阵 $\mathbf{A}$ 可表示为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ \exp(j\pi \sin(\theta_1)) & \cdots & \exp(j\pi \sin(\theta_d)) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \exp(j\pi \sin(\theta_1))^{m-1} & \cdots & \exp(j\pi \sin(\theta_d))^{m-1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

增益矩阵 $\mathbf{G}$ 与各阵元的波瓣图有关, 理想情况下, 各阵元具有相同的波瓣图, 且在各方向上的增益具有一致性, 那么可对 $\mathbf{G}$ 进行归一化, 当作全 1 矩阵进行处理, 那么 $\mathbf{M} = \mathbf{A}$ 。一般来说, $m > d$, 故矩阵 $\mathbf{M}$ 是列满秩的, 是左可逆的。

3 分离算法

由式(4)可知, 矩阵 $\mathbf{M}$ 中各元素的值只与信号的个数及来波方向有关, MUSIC 算法可以较好地估计出上述两参数, 从而得到矩阵 $\mathbf{M}$ 的估计值 $\hat{\mathbf{M}}$, 在无噪声情况下, 对量测矩阵 $\mathbf{X}$ 左乘 $\hat{\mathbf{M}}$ 的 Moore-Penrose 广义逆 $\hat{\mathbf{M}}^\dagger$, 即可得到对信号的估计

$$\hat{\mathbf{S}} = \hat{\mathbf{M}}^\dagger \mathbf{X} = (\hat{\mathbf{M}}^H \hat{\mathbf{M}})^{-1} \hat{\mathbf{M}}^H \mathbf{X} \quad (5)$$

第 1 步是要估计出交叠信号的个数。通用做法是利用量测矩阵的协方差矩阵特征值的分布来估计信号源个数^[15]。首先计算协方差矩阵, $\mathbf{R}_x = E\{\mathbf{X}\mathbf{X}^H\} = (\mathbf{X}\mathbf{X}^H)/T$; 然后对 $\mathbf{R}_x$ 进行特征值分解

$$\mathbf{R}_x = \mathbf{V}_R \mathbf{D}_R \mathbf{V}_R^{-1} \quad (6)$$

式中, $\mathbf{V}_R$ 为 $\mathbf{X}$ 的特征向量矩阵, $\mathbf{D}_R$ 为 $\mathbf{X}$ 的特征值矩阵, $\mathbf{D}_R = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$, λ_i 为 $\mathbf{X}$ 的第 i 个特征值, $\mathbf{V}_R$ 中的第 i 列为对应的特征向量, 并有 $\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \dots \leq \lambda_m$ 。另外, 由式(2)可得

$$\mathbf{R}_x = E\{\mathbf{X}\mathbf{X}^H\} = \mathbf{M}\mathbf{R}_s\mathbf{M} + \sigma^2 \mathbf{I}_d \quad (7)$$

式中, $\mathbf{R}_s = E\{\mathbf{S}\mathbf{S}^H\}$ 为 $d \times d$ 维的信号协方差矩阵; σ^2 为 $m - d$ 维噪声子空间的特征值。在 $\mathbf{D}_R$ 中, 大的特征值对应着不同的信号源, 小的特征值对应着噪声, 也即是 $\sigma^2 = \lambda_1 = \dots = \lambda_{m-d}$ (假设 $d < m$)。区分噪声和信号需要一个合适的门限, 但实际上信号的强度、长度都不一样, 很多时候需要依靠主观地来判断。如何设定自适应门限以自动判断信源的个数是关键问题。

本文采用 6 阵元均匀线阵 (Uniform Linear Array, ULA) (阵元间距 $\lambda/2$), 而超过 6 个 SSR 应答信号交叠在一起的概率极低^[14,15], 所以一般来说, 最小的特征值对应着噪声。由于 A/C 应答信号的长度较短, 所以在相同的信噪比下其对应的特征值较小, 通用标准中要求能够解码信噪比大于 10 dB 的 A/C 应答信号。在时长 184 μs (1 个 S 模式长报文 120 μs 和 1 个 S 模式短报文 64 μs 之和) 内, A/C 应答信号随机出现, 经 10^5 次蒙特卡洛仿真得出, 信噪比为 10 dB 的 A/C 应答信号对应的特征值大于最小特征值 5 dB 的概率超过 99.99%, 故将判定为信号的特征值门限定为 $\lambda_{\text{th}} = 10^{0.5} \lambda_1$ 。大于门限的特征值所对应的特征向量张成 d 维的信号子空间 $\mathbf{V}_s$, 小于门限的特征值所对应的特征向量张成 $m - d$ 维的噪声子空间 $\mathbf{V}_N$ 。噪声子空间和信号子空间正交, 构造空间谱函数

$$P_{\text{MUSIC}}(\theta) = \left| \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{V}_N \mathbf{V}_N^H \mathbf{a}(\theta)} \right|, \quad \mathbf{a}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & \exp(j\pi \sin(\theta)) & \cdots & \exp(j\pi \sin(\theta))^{m-1} \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

通过对 $P_{\text{MUSIC}}(\theta)$ 作 1 维搜索, 求出信号的来波方向 $(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_d)$, 从而得到 $\hat{\mathbf{M}}$, 由式(5)得到对信号的估计 $\hat{\mathbf{S}}$ 。

当然对于信源数的估计还可以采用其他方法, 如文献[21]中的信息论方法、平滑秩序列法、盖式圆方法、正则相关技术等; 估计信号来波方向也可以采用最大似然及子空间拟合算法、旋转不变子空间算法等^[21,22]。

上述分离算法的优势在于既能实现对超过两个的交叠信号进行分离, 同时也能够处理在时域上完全重叠的信号。下面就一个交叠实例, 对该分离算法进行描述。

对于一个四重交叠 (两个 S 模式短报文、1 个 S 模式长报文以及 1 个 A/C 模式应答) 信号, 如图 1 所示, 两个 S 模式短报文的到达时间差为 4 μs , A/C 模式应答信号完全被 S 模式长报文覆盖。

常规检测解码方法无力应对此种场景^[23]: (1) 第 1 个 S 模式短报文的数据位被大量干扰, 导致误码过

多而无法通过校验; (2)第2个S模式短报文的报头和数据块都被其他信号干扰, 基本不能有效检测; (3) S模式长报文的报头被干扰, 将导致检测失败; (4)由于其他信号的存在将导致信号电平可能被错误估计, 以致A/C模式信号检测失败。所以在常规检测解码之前需要对交叠信号作有效的分离。

利用MUSIC算法估计信号个数及来波方向的实例如图2所示。 λ_1 为最小的特征值, 有4个特征值超过 $10^{0.5}\lambda_1$, 表明在所处理数据时长内存在4个SSR信号, 通过对 $P_{\text{MUSIC}}(\theta)$ 作1维谱峰搜索, 即可得到4个信号的来波方向。

通过对交叠信号个数及来波方向的估计得到矩阵 $\hat{M}$, 然后通过式(5)实现对信号的分离。4个信号都得到了较好的分离, 分离后通过常规解码器(带有纠错功能)均可正确解码^[24]。

第2个S模式短报文应答和S模式长报文交叠的部分分离后还有一点能量残留, 这跟两个信号的来波方向密切相关, 当两个信号的来向过于接近时, 信号子空间具有很高的相关性, 可能导致分离失败。

信号能否正确分离, 受制于交叠信号的空间谱

分布以及信号的信噪比等因素, 下节将从多个方面对本文提出的分离算法进行性能分析。

4 性能分析

多个交叠信号的分离本质上与两个交叠信号的分离是一样的。一般来说, 在S模式应答信号上叠加一个A/C应答可以通过纠错算法实现对S模式应答的正确接收解码, 而A/C应答信号之间的交叠可以通过检测交叠框架脉冲来进行分离和解码^[10]。通过分析不同算法对两个S模式交叠信号的分离效果可以准确地评估其性能。所以, 为了全面地对本文提出的分离算法性能进行分析, 下面皆考虑在6阵元ULA下的两个S模式短报文信号交叠的情况。

4.1 交叠信号个数检测性能分析

正确地检测出交叠信号的个数是有效分离的前提, 阵列天线具有一定的空间分辨率, 若两个信号的来波方向过于接近, 使得两个信号无法区分, 以至于无法正确检测出交叠信号个数, 最终导致分离失败^[2]。另外两个信号的信噪比也会影响量测矩阵的协方差矩阵的特征值分布, 从而影响对信号个数

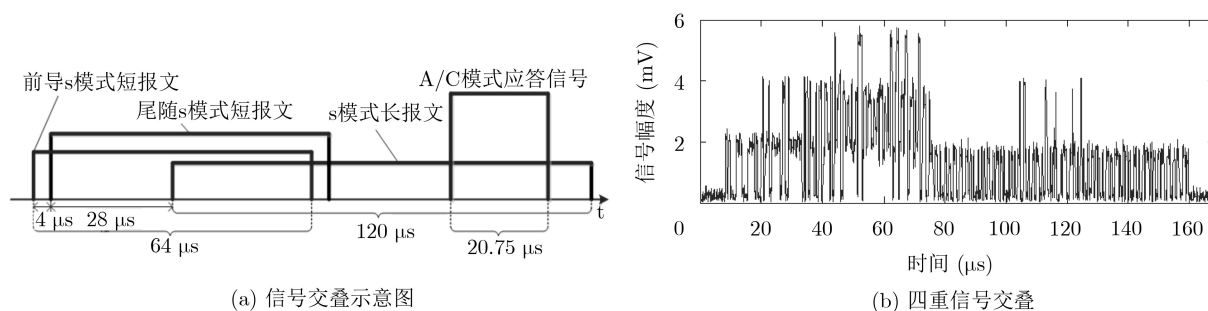
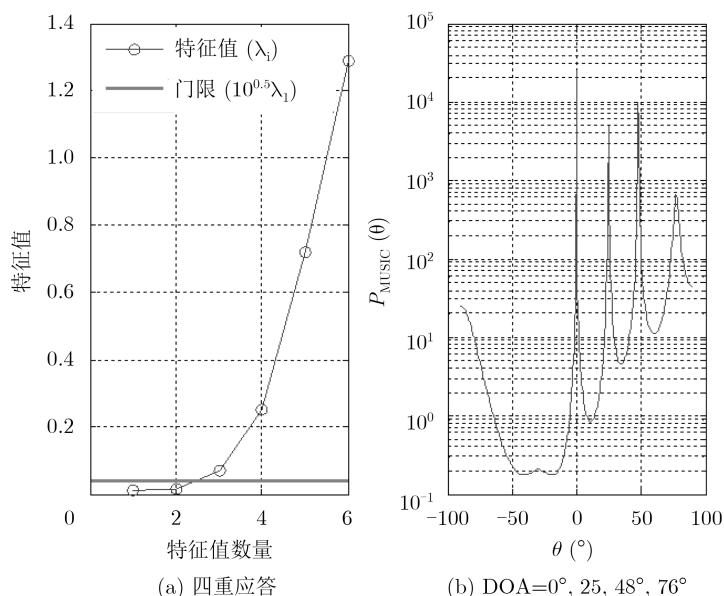


图1 SSR应答信号四重交叠



(a) 四重应答

(b) DOA=0°, 25°, 48°, 76°

图2 特征值分布及信号的空间谱

的检测。为了全面地评估信号到达方向(Direction Of Arrival, DOA)以及信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)对交叠信号个数检测的影响,采用覆盖不同DOA和SNR的仿真数据来进行分析。

首先,对具有相同功率的两个信号在不同DOA下特征值的变化进行仿真。假设:(1)信号SNR为10 dB;(2)检测门限为 $10^{0.5} \lambda \min$;(3)两信号完全交叠;(4)蒙特卡洛仿真次数为 10^4 次。

仿真结果显示,对于信号个数的估计不仅与两个信号的DOA之差有关,还与两个信号的DOA有关,而对于不同SNR(但两信号SNR一样)、不同DOA下的交叠信号个数的正确检测概率如表1所示。仿真条件与上述相同。很显然,SNR越高越有利于信号个数的检测。两信号越靠近阵列天线视轴,正确检测的概率越高。

4.2 测向误差对分离性能的影响分析

MUSIC算法通过对 $P_{\text{MUSIC}}(\theta)$ 作1维谱峰搜索,可以得到信号的来波方向。测向误差跟信号的SNR、数据长度、谱峰搜索步进以及阵列天线系统误差等因素有关。所以在系统工作之前,应该对阵列天线的系统误差进行校准。在作谱峰搜索时减小搜索步进,以减低测向误差。测向误差对分离性能的影响如图3所示。仿真条件:(1)两个S模式短报文交叠长度固定($32 \mu\text{s}$,为报文长度的一半);(2)蒙特卡洛仿真次数: 10^4 次,在每一次仿真中,两个

S模式信号的DOA为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 上的随机值,报文中数据块的值也为随机值;(3)低置信度比特个数小于10个时判定为分离成功(小于10个的低置信度比特个数可以通过纠错实现正确解码^[24])。

可以看出分离失败率对测向误差不敏感,仅在测向误差大于 0.8° 时,第2个应答信号的解码失败率略有上升。同时可以看出,在SNR大于10 dB时,SNR对交叠信号的分离失败率影响较小。从两个应答的误码率来看,第1个应答信号的误码率要略高于第2个,这是因为在交叠 $32 \mu\text{s}$ 的情况下,第1个应答信号的数据块有32 bit受到了干扰,而第2个应答信号的数据块只有24 bit受到了干扰。

两个S模式应答信号完全交叠时的分离概率如图4所示。可以看出,当测向误差小于 0.8° 时,交叠信号的分离失败率和误码率都变化不大。对比图3和图4可以看出,在两个S模式应答全交叠的情况下,第1个应答信号的分离失败率比交叠 $32 \mu\text{s}$ 时上升了9.5%,第2个应答信号的分离失败率上升了7.5%。所以,当测向精度达到一定程度后,SNR大于10 dB以上,分离失败率和误码率对测向误差及SNR不敏感,影响分离失败率和误码率的主要因素是信号的交叠程度。总的来说,在最恶劣的情况下(信号完全交叠),本文的分离算法皆表现出良好的分离效果,综合考虑两个应答信号的分离失败率仅不到10%(见图4(a))。

在本文采用的6阵元ULA条件下,对测向误差的要求为小于 0.8° ,这样的要求并不苛刻,可以通过减小谱峰搜索步进和对阵列天线系统误差校准来降低测向误差。

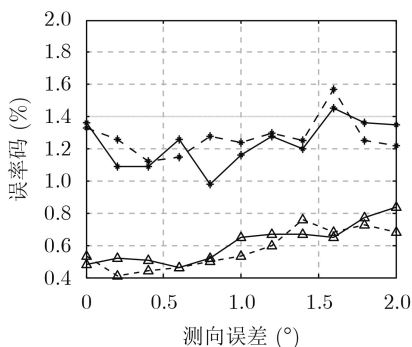
4.3 与PA, ICA分离算法性能对比

目前能实现SSR交叠信号分离的算法主要有投影类算法(如PA, EPA)和盲分离算法(ICA)。

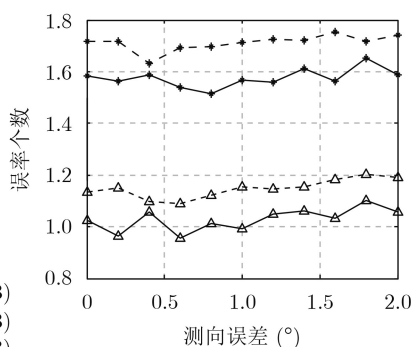
PA算法以及其扩展算法EPA要求两两信号之间不能完全交叠,利用某个信号在某段时间内独立存在以估计器分离参数实现信号的逐一分离。PA算

表1 交叠信号个数检测正确概率(%)

DOA	4 dB	8 dB	12 dB	16 dB	20 dB
0°	93.63	95.84	97.51	98.61	99.17
15°	93.07	95.84	96.95	97.78	98.89
30°	92.80	95.29	96.40	97.23	98.61
45°	90.86	93.91	95.84	96.40	98.34
60°	85.87	91.97	95.29	95.29	98.06
75°	72.58	78.95	87.81	93.91	97.51
90°	71.75	77.84	82.55	86.70	90.03



(a) 不同测向误差下的分离失败率



(b) 不同测向误差下的误码个数

图3 不同测向误差下的失败率和误码率

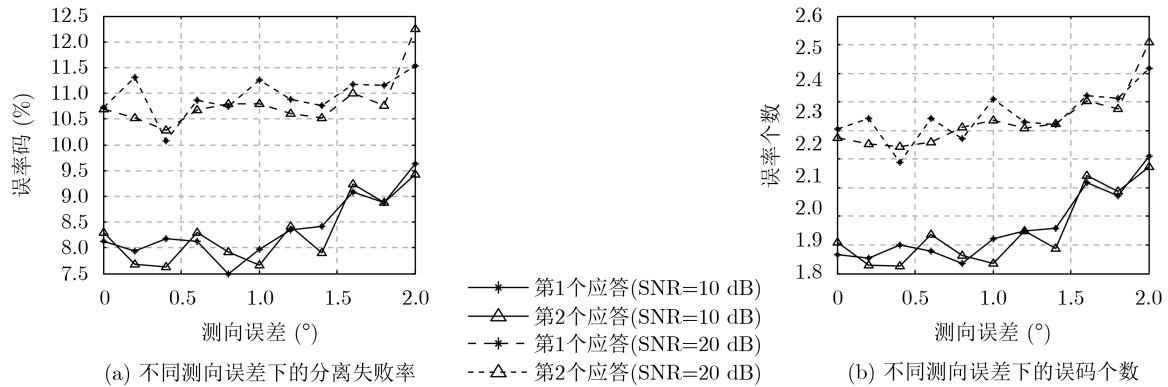


图4 不同测向误差下的失败率和误码率(完全交叠)

法主要解决两个S模式应答信号交叠的情况, 要求每个信号至少有 $4\ \mu\text{s}$ 以上单独存在的时间; EPA算法可以分离A/C/S模式交叠信号, 但要求待分离信号至少有 $8\ \mu\text{s}$ 以上单独存在的时间, 以便估计出更准确的分离参数, 减少分离残留量对其他信号的影响。所以对于小于 $4\ \mu\text{s}$ 单独存在时间的交叠信号, 诸如PA, EPA等基于投影技术的分离算法基本失效^[2]。

基于ICA的盲信源分离有多种实现方法, 如最大熵法、最小互信息法、自然梯度学习法以及快速定点算法(Fast Fixed Point Algorithm, FFPA)等。FFPA基于高效定点迭代结构, 相较于基于梯度算法其收敛速度是3次方的, 收敛速度快10倍以上^[25], 所以本文用于对比的ICA算法是基于FFPA的。

基于FFPA的ICA算法认为交叠的各信号相互独立, 且仅允许有1个呈高斯分布的信号源, 在这样的条件下通过构造比照函数来测度信号的独立性, 利用比照函数与信号独立(自相关为1)之差来调整分离矩阵, 在该差值小于收敛门限或超过最大迭代次数后得到各个信号的分离向量^[11]。

本文提出的基于MUSIC的分离算法可用SABM (Separating Algorithm Based on MUSIC)表示。为了较好地评估SABM算法与PA, ICA算法的性能, 进行不同交叠程度下的分离性能仿真。仿真条件: (1)交叠信号为两个S模式短报文; (2) SNR=10 dB; (3)蒙特卡洛仿真次数: 10^4 次, 在每一次仿真中, 两个S模式信号的DOA为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 上的随机值, 报文中数据块的值也为随机值; (4)阵列天线为6阵元ULA; (5) SABM算法中将测向精度设定为 0.2° ; (6)ICA收敛门限为 10^{-9} ; (7)分离矩阵列向量的迭代公式为 $\mathbf{w}(i) = \mathbf{E}[\mathbf{v}(\mathbf{w}^T(i-1)\mathbf{v})^3] - 3\mathbf{w}(i-1)$, 其中 $\mathbf{v}$ 为对采样数据 $\mathbf{x}$ 的白化。3种分离算法对交叠信号的分离失败率如图5所示。

可以看出SABM算法的分离性能和ICA算法相当, 优于PA算法分离性能。观察分离失败率变化的整体趋势, 显然地, 随着交叠程度的下降, 两个

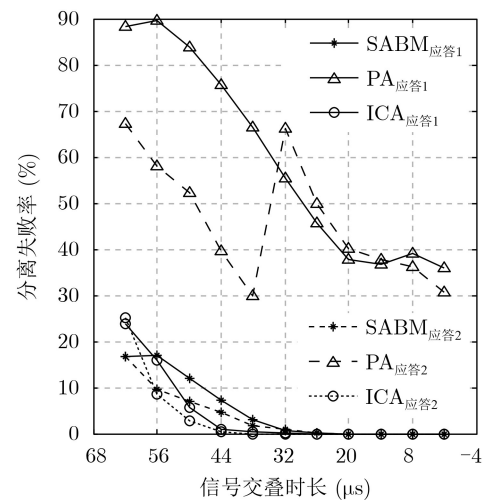


图5 不同交叠程度下的不同算法的分离失败率

应答信号的分离失败率也随之下降, 但PA算法中第2个应答信号的分离失败率出现了一个跃变, 这是因为在交叠程度小于一半($32\ \mu\text{s}$)后, 报头检测成了决定分离结果的主要因素(第2个应答信号的报头始终受到第1个应答信号的干扰)。

3种分离算法对交叠信号的分离误码率如图6所示, 总体趋势与分离失败率一致。可以看出在信号交叠时长大于 $56\ \mu\text{s}$ 时, SABM算法的性能略优于ICA算法, 而当交叠时长小于 $56\ \mu\text{s}$ 时, ICA算法略优。

总体来说, 本文提出的SABM算法与ICA算法分离交叠信号的性能相当, 皆优于PA算法。SABM算法在信号交叠程度较高时表现最优。值得注意的是, 通过对SABM算法和ICA算法的计算量仿真表明, SABM算法的计算量不足ICA算法的 $1/10$ (ICA算法迭代次数具有不确定性), 甚至更少。在工程应用时, 若硬件计算能力充裕, 在信号交叠时长大于 $56\ \mu\text{s}$ 时选择SABM算法, 小于 $56\ \mu\text{s}$ 时选择ICA算法; 若硬件计算能力受限(如嵌入式CPU), 则可直接考虑SABM算法, 在达到较高分离性能的同时, 实现实时解码输出。综合来看, 本文提出的SABM分离算法具有更好的应用前景。

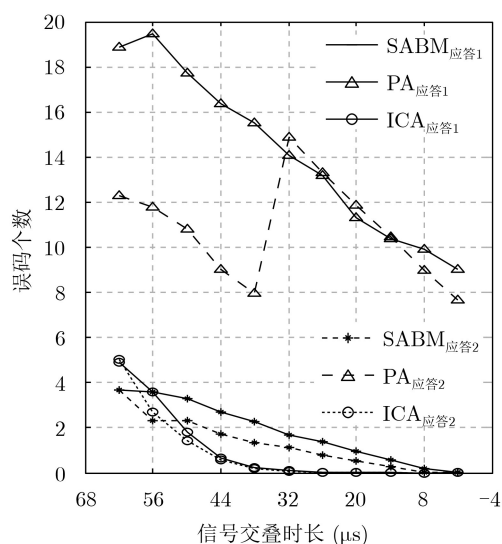


图6 不同交叠程度下的不同算法的误码率

5 结束语

本文提出的SABM算法将信源数估计算法与估计信号到达方向的音乐算法相结合,构建分离矩阵,实现对多重SSR交叠信号的分离。通过对SABM算法原理的分析、推导以及分离性能的仿真验证,结果表明:(1) SABM算法对交叠信号的分离成功率大于90%;(2) SABM算法对交叠信号的分离性能与ICA算法相当,皆优于PA算法;(3) SABM算法在信号交叠程度较高时表现最优;(4) SABM算法的计算量不足ICA算法的1/10倍,更易于工程化。本文中仅在6阵元的ULA情况下对比分析了各分离算法的性能,在后续的研究中可考察在不同阵列形式下的分离性能。

参考文献

- [1] 张军. 空域监视技术的新进展及应用[J]. 航空学报, 2011, 32(1): 1-14.
ZHANG Jun. New development and application of airspace surveillance technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2011, 32(1): 1-14.
- [2] PETROCHIOS 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](https://doi.org/10.1109/TAES.2009.5259177).
- [3] 王洪, 刘昌忠, 汪学刚. 二次雷达S模式综述[J]. 电讯技术, 2008, 48(7): 113-118. doi: [10.3969/j.issn.1001-893X.2008.07.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893X.2008.07.029).
WANG Hong, LIU Changzhong, and WANG Xuegang. Mode S for secondary surveillance radar (SSR): An introduction and overview[J]. *Telecommunication Engineering*, 2008, 48(7): 113-118. doi: [10.3969/j.issn.1001-893X.2008.07.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893X.2008.07.029).
- [4] PETROCHIOS N, GALATI G, MENE L, et al. Separation of multiple secondary surveillance radar sources in a real environment by a novel projection algorithm[C]. The 5th IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, Athens, Greece, 2005: 125-130.
- [5] PETROCHIOS N, GALATI G, and PIRACCI E. Projection techniques for separation of multiple secondary surveillance radar sources in a real environment[C]. The 4th IEEE Workshop on Sensor Array and Multichannel Processing, Waltham, USA, 2006: 344-348.
- [6] PETROCHIOS N, PIRACCI E G, and GALATI G. Separation of multiple secondary surveillance radar sources in a real environment for the near-far case[C]. Antennas and Propagation Society International Symposium, Honolulu, USA, 2007: 3988-3991.
- [7] CHEN Xiaolong, CHEN Baoxin, GUAN Jian, et al. Space-range-Doppler focus-based low-observable moving target detection using frequency diverse array MIMO radar[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 43892-43904. doi: [10.1109/ACCESS.2018.2863745](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2863745).
- [8] 陈小龙, 关键, 黄勇, 等. 雷达低可观测目标精细化处理及应用[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 19-27.
CHEN Xiaolong, GUAN Jian, HUANG Yong, et al. Radar refined processing and its applications for low-observable moving target[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(20): 19-27.
- [9] GALATI G, BARTOLINI S, and MENE L. Analysis of SSR signals by super resolution algorithms[C]. The 4th IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology, Rome, Italy, 2004: 166-170.
- [10] 王洪, 黄荣顺, 徐自励. 多点定位中A/C模式混叠信号的时域分离算法[J]. 电子科技大学学报, 2013, 42(6): 848-851. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2013.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2013.06.007).
WANG Hong, HUANG Rongshun, and XU Zili. Separating algorithm of A/C garbles in time domain for multilateration[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2013, 42(6): 848-851. doi: [10.3969/j.issn.1001-0548.2013.06.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-0548.2013.06.007).
- [11] 王洪, 刘昌忠, 汪学刚, 等. 多点定位混叠信号的盲分离[J]. 电讯技术, 2009, 49(12): 1-4. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2009.12.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2009.12.001).
WANG Hong, LIU Changzhong, WANG Xuegang, et al. Blind Separation of gables in multilateration[J]. *Telecommunication Engineering*, 2009, 49(12): 1-4. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2009.12.001](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-893x.2009.12.001).
- [12] PETROCHIOS N and VAN DER VEEN A J. Algorithms to separate overlapping secondary surveillance radar replies[C]. 2004 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, Canada, 2004: 11-49.
- [13] 刘松, 庞育才. 基于扩展ESPRIT的随机阵列高效DoA估计算

- 法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(6): 1324–1329. doi: [10.11999/JEIT180672](#).
- LIU Song and PANG Yucai. Efficient augmented ESPRIT-based direction-of-arrival estimation algorithm for random arrays[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(6): 1324–1329. doi: [10.11999/JEIT180672](#).
- [14] 王洪. 1030/1090 MHz频谱的共享与干扰问题综述[J]. 电讯技术, 2013, 53(1): 105–109. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2013.01.021](#).
- WANG Hong. Overview of sharing and interference at 1030/1090 MHz[J]. *Telecommunication Engineering*, 2013, 53(1): 105–109. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2013.01.021](#).
- [15] 孙清清, 王洪, 黄忠涛, 等. 1090MHz信号同频干扰与窜扰概率探究[J]. 通信技术, 2013, 46(2): 8–11. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2013.02.005](#).
- SUN Qingqing, WANG Hong, HUANG Zhongtao, *et al.* Exploration on 1090MHz co-channel interference and probability of garble[J]. *Communications Technology*, 2013, 46(2): 8–11. doi: [10.3969/j.issn.1002-0802.2013.02.005](#).
- [16] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(3): 276–280. doi: [10.1109/TAP.1986.1143830](#).
- [17] 王旭东, 仲倩, 闫贺, 等. 一种二维信号波达方向估计的改进多重信号分类算法[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(9): 2137–2142. doi: [10.11999/JEIT181090](#).
- WANG Xudong, ZHONG Qian, YAN He, *et al.* An improved MUSIC algorithm for two dimensional direction of arrival estimation[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(9): 2137–2142. doi: [10.11999/JEIT181090](#).
- [18] 张蔚. 二次雷达原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 144–146.
- ZHANG Wei. Secondary Radar Principle[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 144–146.
- [19] RTCA D. RTCA DO-260B 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: RTCA, Inc., 2011.
- [20] ICAO A. 10 (Aeronautical Telecomm.) to the convention on international civil aviation[J]. *Volume I*, 1996: 52–60.
- [21] 王永良, 陈辉, 彭应宁, 等. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 40–52.
- WANG Yongliang, CHEN Hui, PENG Yingning, *et al.* Spatial Spectrum Estimation Theory and Algorithm[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 40–52.
- [22] ROY R and KAILATH T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques[J]. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1989, 37(7): 984–995. doi: [10.1109/29.32276](#).
- [23] 王洪, 刘昌忠, 汪学刚, 等. 强干扰背景下S模式解码方法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(12): 2876–2880.
- WANG Hong, LIU Changzhong, WANG Xuegang, *et al.* Mode S decoding methods in heavy jamming environment[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(12): 2876–2880.
- [24] 张涛, 唐小明, 金林. 基于置信度的S模式信号随机多位纠错技术[J]. 电讯技术, 2015, 55(9): 1005–1009. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2015.09.010](#).
- ZHANG Tao, TANG Xiaoming, and JIN Lin. Confidence-based brute force technique with random errors for Mode S reply[J]. *Telecommunication Engineering*, 2015, 55(9): 1005–1009. doi: [10.3969/j.issn.1001-893x.2015.09.010](#).
- [25] 孙守宇. 盲信号处理基础及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 50–95.
- SUN S Y. Blind Signal Processing Foundation and It's Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010: 50–95.
- 张 海: 男, 1976年生, 副教授, 研究方向为雷达信号处理、雷达目标特性等.
- 陈小龙: 男, 1985年生, 副教授, 研究方向为雷达动目标检测、海杂波抑制、雷达信号精细化处理等.
- 张 涛: 男, 1986年生, 工程师, 研究方向为ADS-B系统设计与信号处理等.
- 张财生: 男, 1983年生, 讲师, 研究方向为雷达信号处理、ADS-B信号处理等.

责任编辑: 陈 倩