

基于交替投影的 MIMO 雷达信号盲分离算法研究

唐 波,张 玉,张 浩

(电子工程学院 504 教研室,安徽合肥 230037)

摘 要: 多输入多输出(multiple-input-multiple-output, MIMO)雷达利用灵活的发射波形设计以及阵列配置,在微弱目标探测及高分辨参数估计方面有着巨大优势.为侦察识别 MIMO 雷达信号,建立了 MIMO 雷达信号侦察模型.基于最大似然估计以及交替投影算法,并利用 MIMO 雷达信号的恒模特性对 MIMO 雷达信号进行了盲分离.通过理论推导和数值仿真分析了所提算法分离 MIMO 雷达信号的性能.结果表明该算法在信噪比高于 0dB 时,其分离后的信号与原信号具有很高的相关系数,且分离指数较低,性能明显优于现有的非圆复信号 Fast ICA(non-circular complex Fast ICA, NC-Fast ICA)算法.

关键词: MIMO 雷达; 信号盲分离; 最大似然估计; 交替投影; 恒模特性

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2017)09-2092-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.006

Blind Separation of MIMO Radar Signals Based on Alternating Projection

TANG Bo, ZHANG Yu, ZHANG Hao

(504 Lab, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China)

Abstract: Exploiting brisk transmit waveforms and elaborate array configuration, multiple-input-multiple-output (MIMO) radar system has significant advantages in weak-target detection and high-resolution parameter estimation. In this paper, a mathematical model is established for interception, reconnaissance and identification of MIMO radar signals. By using maximum likelihood estimation and alternating projection, an algorithm which makes use of the constant modulus property of the radar signals is proposed for blind separation of MIMO radar signals. Both theoretical and numerical results are provided to demonstrate the performance of the proposed algorithm. It is shown that, if the signal to noise ratio (SNR) is higher than 0dB, the proposed algorithm can achieve a satisfactory separation performance and the correlations of the separated signals with the original signals are very high. Moreover, the proposed algorithm significantly outperforms the existing non-circular complex fast independent component analysis (NC-Fast ICA) algorithm.

Key words: multiple-input-multiple-output (MIMO) radar; signal blind separation; maximum likelihood estimation; alternating projection; constant modulus property

1 引言

多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达^[1-5]是近年来的研究热点. MIMO 雷达包括两种典型配置:分布式 MIMO 雷达^[1,3](亦称统计 MIMO 雷达, Statistical MIMO radar)和集中式 MIMO 雷达^[1,2](Colocated MIMO radar). 分布式 MIMO 雷达各发射/接

收单元之间相距较远,可用空间分集来克服目标 RCS 闪烁、改善目标检测性能以及提高目标定位精度^[1,3]. 集中式 MIMO 雷达的发射/接收单元间距较小(大约在波长量级). 相比于传统的相控阵雷达,集中式 MIMO 雷达在目标参数估计精度、参数辨识能力、抗干扰性能、强杂波背景中的低速运动目标检测能力^[1]等方面具有显著的优势. 由于在目标检测、参数估计和干扰抑制能

力方面的独特优势, MIMO 雷达已经成为了新体制雷达系统的重要发展方向, 在未来的信息对抗中将扮演关键的角色. 与此同时, MIMO 雷达的出现也给现有电子侦察和干扰系统带来了新的挑战. 首先, MIMO 雷达可采用全空域覆盖、低功率辐射的“凝视”工作模式, 故为侦察截获 MIMO 雷达信号, 电子对抗侦察接收机必须具备更高的灵敏度; 其次, 分布式 MIMO 雷达和集中式 MIMO 雷达均可采用收发分置的配置方式, 使得施放有源干扰的难度很高; 第三, MIMO 雷达系统的各个发射通道可以同时辐射相互独立的低截获信号, 侦察接收机所截获的信号可能在时域、频域均相互重叠, 且截获的信号具有明显的空变特性, 从而导致分选、识别 MIMO 雷达信号的难度明显增加.

现有对 MIMO 雷达的研究大多集中在其系统构建及信号处理算法设计上, 对 MIMO 雷达系统的侦察识别问题涉及较少. 文献[6]在分析 MIMO 雷达工作特点的基础之上, 初步探讨了侦察 MIMO 雷达面临的难点, 提出了相应对策; 文献[7,8]研究了儿种常见 MIMO 雷达信号的调制识别方法, 但需要指出的是, 对 MIMO 雷达信号进行调制识别的前提为信号的有效分离; 文献[9]针对集中式 MIMO 雷达的对抗侦察问题, 基于阵列合成技术提出了对 MIMO 雷达方位和载波频率的联合估计算法; 文献[10]提出了对分布式 MIMO 雷达的侦察方法, 通过采用最小描述长度 (Minimum description length, MDL) 算法估计 MIMO 雷达发射机数目, 并结合高分辨谱估计算法实现了对分布式 MIMO 雷达信号的分离; 文献[11]首次提出了一种基于空间多位置采样的集中式 MIMO 雷达信号侦察方法, 通过估计侦收信号中的波形个数来识别 MIMO 雷达. 文献[12]在文献[11]的基础之上, 进一步地提出了基于非圆复信号 Fast ICA (Non-circular Complex Fast ICA, NC-Fast ICA) 算法的 MIMO 雷达信号盲分离算法, 然而 NC-Fast ICA 算法作为一种通用的盲分离算法, 没有充分利用 MIMO 雷达信号的恒模特性, 在信噪比超过一定阈值时分离性能没有明显改善.

为了侦察集中式 MIMO 雷达信号、分析其脉内调制特征, 并为后续的 MIMO 雷达干扰实施奠定基础, 本文首先建立了 MIMO 雷达的侦察接收模型. 在此基础之上, 基于最大似然估计方法以及交替投影算法, 并利用 MIMO 雷达信号的恒模特性提出了一种可对 MIMO 雷达信号实现有效盲分离的新算法. 不同信噪比条件下的仿真结果验证了该算法的有效性, 其性能明显优于现有文献中的 NC-Fast ICA 算法.

2 侦察信号模型

采用与文献[11,12]类似的模型, 待侦察的集中式

MIMO 雷达如图 1 所示, 其发射通道数 (或独立波形数) 为 N_T . 为简单起见, 假设发射阵元等间隔排列, 阵元间距离记为 d_T .

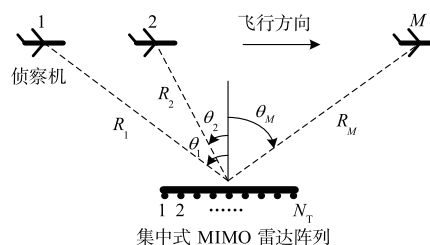


图 1 对 MIMO 雷达侦察示意图

为了能够侦察并分离 MIMO 雷达信号, 侦察机在一次侦察接收期间分别在空间中 M 个不同的位置接收 MIMO 雷达信号并进行数据采集, 且采集位置数不小于 MIMO 雷达的发射通道数, 即 $M \geq N_T$. 将侦察接收机各采集点相对于 MIMO 雷达阵列法线的出发角分别记为 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_M$. 在该侦察体制中, 可以使用 M 架侦察机同时在相应的 M 个位置对 MIMO 雷达信号进行采集. 如果 MIMO 雷达的发射信号在侦察接收期间内不发生变化, 也可以考虑采用一架侦察机先后在这 M 个位置对 MIMO 雷达信号进行采集. 在这种侦察方式中, 可能会面临观察时间起点差异的问题. 此时可以考虑采用如下方法来克服这一问题: 基于能量检测算法估计 MIMO 雷达信号的到达时间, 在此基础上补偿观察时间起点之间的差异. 另外, 也可以利用文献[9]中的方法估计 MIMO 雷达的到达角, 然后基于到达角估计结果对 MIMO 雷达进行测向交叉定位, 利用定位结果来调整观察时间起点之间的差异.

将侦察接收机在角度 θ_m 接收到的信号记为 $y_m(t)$, 其可以建模为:

$$y_m(t) = \alpha_m \sum_{i=1}^{N_T} s_i(t - \tau_{m,i}) + v_m(t) \quad (1)$$

其中 α_m 为侦收信号的强度, 取决于 MIMO 雷达的发射功率、天线增益、信号传播路径长度以及侦察天线增益等多种因素, $s_i(t)$ 为第 i 个通道的发射波形, $\tau_{m,i}$ 为第 i 个通道所发射信号到侦察接收机的延时, $v_m(t)$ 为接收机热噪声. 在远场窄带假设下, 各发射通道到侦察接收机之间的时延差可以忽略, 即

$$s_i(t - \tau_{m,i}) \approx s_i(t - \tau_m) e^{-j2\pi d_T / \lambda \sin \theta_m \times (i-1)} \quad (2)$$

其中 $\tau_m = \tau_{m,1}$, λ 为 MIMO 雷达信号的波长.

利用式(1)和式(2), 并将 $y_m(t)$ 经过 A/D 采样后的信号记为 \mathbf{y}_m , 可得

$$\mathbf{y}_m = \alpha_m \mathbf{a}_T^T(\theta_m) \mathbf{S} + \mathbf{v}_m \quad (3)$$

其中:

$\mathbf{a}_T(\theta_m) = [1 \ e^{-j2\pi d_T / \lambda \sin \theta_m} \ \dots \ e^{-j2\pi d_T / \lambda \sin \theta_m \times (N_T-1)}]^T \in \mathbb{C}^{N_T \times 1}$ 为 MIMO 雷达阵列在角度 θ_m 的发射导引矢量, $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{N_T \times L}$ 为

MIMO 雷达各个通道发射波形经过采样后的信号矩阵, \mathbf{S} 的第 k 行对应于通道 k 发射信号, L 为发射信号采样后的长度, \mathbf{v}_m 为白噪声矢量.

记 $\mathbf{Y} = [\mathbf{y}_1^T \cdots \mathbf{y}_M^T]^T \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 为一次侦察接收获得的数据矩阵, $\mathbf{V} = [\mathbf{v}_1^T \cdots \mathbf{v}_M^T]^T \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 为接收机噪声矩阵, $\mathbf{A} = [\alpha_1 \mathbf{a}_T(\theta_1) \cdots \alpha_M \mathbf{a}_T(\theta_M)]^T \in \mathbb{C}^{M \times N_T}$ 为混合矩阵, 则

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{V} \quad (4)$$

从式(4)中的侦察信号模型可以看出, 侦收信号为 MIMO 雷达各个通道发射信号经过时域混叠之后的信号. 通常很多 MIMO 雷达系统都采用了近似正交的发射信号^[1], 其中包括频分正交和码分正交信号. 频分正交信号中心频点互不相同, 一般要求各信号中心频点之间的间隔大于信号带宽. 对于频分正交信号, 侦察接收机可以采用频谱分析法等估计各信号中心频率以及工作带宽, 在此基础上设计带通滤波器分离 MIMO 雷达信号. 不同于频分正交信号, 码分正交信号具有相同的中心频率, 具备低截获特性, 在 MIMO 雷达系统中得到了广泛应用^[1-5]. 故当集中式 MIMO 雷达信号发射码分正交信号时, 侦收的信号在时、频域均相互重叠, 常规分离方法已难以奏效, 故必须研究新的信号分离算法.

3 基于交替投影的 MIMO 雷达信号分离算法

为简单起见, 假设接收机热噪声 $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_M$ 服从均值为 $\mathbf{0}$, 方差为 σ^2 的白复高斯分布, 且相互独立. 此时 \mathbf{y}_m 服从均值为 $\alpha_m \mathbf{a}_T^T(\theta_m) \mathbf{S}$ 、协方差矩阵为 $\sigma^2 \mathbf{I}_L$ 的复高斯分布, 其概率密度函数可以写成

$$p(\mathbf{y}_m) = \frac{1}{\pi^L \sigma^{2L}} \exp\left(-\frac{1}{\sigma^2} (\mathbf{y}_m - \alpha_m \mathbf{a}_T^T(\theta_m) \mathbf{S}) \times (\mathbf{y}_m - \alpha_m \mathbf{a}_T^T(\theta_m) \mathbf{S})^H\right) \quad (5)$$

不难得出, 所侦收的数据 $\mathbf{y}_m, m = 1, \dots, M$, 的联合概率密度分布可以表示为

$$p(\mathbf{Y}) = \frac{1}{\pi^{ML} \sigma^{2ML}} \exp\left(-\frac{1}{\sigma^2} \sum_{m=1}^M (\mathbf{y}_m - \alpha_m \mathbf{a}_T^T(\theta_m) \mathbf{S}) \cdot (\mathbf{y}_m - \alpha_m \mathbf{a}_T^T(\theta_m) \mathbf{S})^H\right) \quad (6)$$

为了从侦察接收数据中分离出各通道所发射的信号矩阵 \mathbf{S} , 这里采用最大似然估计方法^[13]. 为了使得似然函数最大, 需要使得

$$\sum_{m=1}^M (\mathbf{y}_m - \alpha_m \mathbf{a}_T^T(\theta_m) \mathbf{S}) (\mathbf{y}_m - \alpha_m \mathbf{a}_T^T(\theta_m) \mathbf{S})^H \quad (7)$$

最小.

利用矩阵乘积的基本性质^[14], 可将上式写成

$$\sum_{m=1}^M (\mathbf{y}_m - \alpha_m \mathbf{a}_T^T(\theta_m) \mathbf{S}) (\mathbf{y}_m - \alpha_m \mathbf{a}_T^T(\theta_m) \mathbf{S})^H = \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{S}\|_F^2 \quad (8)$$

其中 $\|\cdot\|_F$ 表示矩阵的 Frobenius 范数^[14]. 因此似然

函数最大时, 残差矩阵 $\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{S}$ 的 Frobenius 范数取值最小. 注意到混合矩阵 \mathbf{A} 也为未知量, 故而为实现信号盲分离, 可求解如下的双矩阵变量优化问题:

$$\min_{\mathbf{A}, \mathbf{S}} \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{S}\|_F^2 \quad (9)$$

可以使用交替投影算法^[15,16]来求解式(9)中的优化问题. 交替投影算法是一种循环迭代算法, 能够保证至少收敛到局部最优解, 且当投影集合为凸集时, 交替投影算法能够收敛到全局最优解. 在使用交替投影算法求解式中的优化问题时, 给定初值, 接下来的每一步迭代中涉及到两个投影算子的求解, 即①固定信号矩阵 \mathbf{S} 求解混合矩阵 \mathbf{A} ; ②固定混合矩阵 \mathbf{A} 求解信号矩阵 \mathbf{S} . 下面给出第 $(k+1)$ 步迭代中上述两个优化问题的求解方法.

3.1 固定信号矩阵 $\mathbf{S}^{(k)}$ 求解混合矩阵 $\mathbf{A}^{(k+1)}$

将经过 k 次迭代得到的信号矩阵记作 $\mathbf{S}^{(k)}$. 当信号矩阵 $\mathbf{S}^{(k)}$ 固定时, 优化混合矩阵 \mathbf{A} 需要解如下优化问题

$$\min_{\mathbf{A}} \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{S}^{(k)}\|_F^2 \quad (10)$$

注意到上式中的代价函数又可写成

$$\|\mathbf{Y} - \mathbf{A}\mathbf{S}^{(k)}\|_F^2 = \text{tr}(\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H) + \text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{S}^{(k)}(\mathbf{S}^{(k)})^H\mathbf{A}^H) - \text{tr}(\mathbf{Y}(\mathbf{S}^{(k)})^H\mathbf{A}^H) - \text{tr}(\mathbf{A}\mathbf{S}^{(k)}\mathbf{Y}^H) \quad (11)$$

将式(11)对混合矩阵 \mathbf{A} 求导并令求导结果为 $\mathbf{0}$ ^[14], 可得

$$\mathbf{A}\mathbf{S}^{(k)}(\mathbf{S}^{(k)})^H - \mathbf{Y}(\mathbf{S}^{(k)})^H = \mathbf{0} \quad (12)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{A}^{(k+1)} = \mathbf{Y}(\mathbf{S}^{(k)})^H(\mathbf{S}^{(k)}(\mathbf{S}^{(k)})^H)^{-1}$$

即信号矩阵 $\mathbf{S}^{(k)}$ 固定时的最优混合矩阵 $\mathbf{A}^{(k+1)}$ 是方程 $\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{S}^{(k)}$ 的最小二乘解.

3.2 固定混合矩阵 $\mathbf{A}^{(k+1)}$ 求解信号矩阵 $\mathbf{S}^{(k+1)}$

在雷达系统中, 为使得发射机始终工作在饱和状态, 通常要求发射信号具有恒模特性. 在 MIMO 雷达波形设计中, 同样也要求发射信号具有恒定包络. 因此, MIMO 雷达广泛采用的发射信号中, 例如, 相位编码信号、离散频率编码信号以及频分正交线性调频信号等, 均为恒模信号. 故而混合矩阵 $\mathbf{A}^{(k+1)}$ 固定时信号矩阵 $\mathbf{S}^{(k+1)}$ 的分离可以等价如下优化问题的求解:

$$\min_{\mathbf{S}} \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}^{(k+1)}\mathbf{S}\|_F^2 \quad (13)$$

$$\text{s. t. } |s_m(l)| = 1, m = 1, \dots, N_T, l = 1, \dots, L$$

其中 $s_m(l)$ 为矩阵 \mathbf{S} 第 m 行第 l 列元素, 且不失一般性, 采用盲信号处理的常用假设^[17], 约定信号幅度为 1.

然而, 信号的恒模约束是一个高度非凸的约束, 这就导致了优化问题求解难度增加. 为了能够求解混合矩阵 $\mathbf{A}^{(k+1)}$ 固定时的信号矩阵 $\mathbf{S}^{(k+1)}$, 可以采用非凸优化中常用的分块坐标下降 (Block Coordinate Descent, BCD) 算法^[18,19]. 注意到:

$$\mathbf{Y} - \mathbf{A}^{(k+1)}\mathbf{S} = \mathbf{Y} - \mathbf{A}^{(k+1)}\mathbf{S}_{-m} - \mathbf{a}_m^{(k+1)}s_m^T \quad (14)$$

其中 $\mathbf{a}_m^{(k+1)}$ 及 s_m 分别为混合矩阵 $\mathbf{A}^{(k+1)}$ 的第 m 列以及

信号矩阵 \mathbf{S} 的第 m 行(即第 m 个发射信号), $\mathbf{A}_{-m}^{(k+1)}$ 为除去 $\mathbf{a}_m^{(k+1)}$ 的部分混合矩阵, \mathbf{S}_{-m} 为除去第 m 个发射信号的部分信号矩阵. 分块坐标下降算法的主要思想是利用式(12)将信号矩阵 \mathbf{S} 的优化问题分解为对矩阵 \mathbf{S} 每一行的序贯优化问题(共 N_T 个). 这样的处理方式既减轻了优化问题求解的运算量, 也加快了算法的收敛速度.

具体来说, 分块坐标下降算法将如下优化问题

$$\min_{\mathbf{S}} \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}^{(k+1)} \mathbf{S}\|_F^2 \quad (15)$$

分解为 N_T 个更简单的子优化问题, 其中第 m 个优化问题($m = 1, 2, \dots, N_T$)可以表述为

$$g_m: \min_{s_m} \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}_{-m}^{(k+1)} \mathbf{S}_{-m} - \mathbf{a}_m^{(k+1)} s_m^T\|_F^2 \quad (16)$$

$$\text{s. t. } |s_m(l)| = 1, l = 1, \dots, L$$

且在求解 g_m 时, 仅令 s_m 为待优化变量, \mathbf{S}_{-m} 的前 $m-1$ 行取最新迭代结果, 后 $N_T - m$ 行取上一次迭代结果.

令 $\mathbf{Y}_r = \mathbf{Y} - \mathbf{A}_{-m}^{(k+1)} \mathbf{S}_{-m}$, 则 g_m 又可写成

$$g_m: \min_{s_m} \|\mathbf{Y}_r - \mathbf{a}_m^{(k+1)} s_m^T\|_F^2, \text{ s. t. } |s_m(l)| = 1, l = 1, \dots, L \quad (17)$$

将 g_m 的代价函数展开, 可得

$$\|\mathbf{Y}_r - \mathbf{a}_m^{(k+1)} s_m^T\|_F^2 = \text{tr}(\mathbf{Y}_r \mathbf{Y}_r^H) + L \|\mathbf{a}_m^{(k+1)}\|_2^2 - 2 \text{Re}((\mathbf{a}_m^{(k+1)})^H \mathbf{Y}_r s_m^*) \quad (18)$$

其中等式右边的前两项与待优化变量 s_m 无关, $\|\cdot\|_2$ 表示矢量的 2-范数.

令 $\mathbf{b} = (\mathbf{a}_m^{(k+1)})^H \mathbf{Y}_r$, 则利用简单的代数不等式, 可得在恒模约束下

$$\text{Re}((\mathbf{a}_m^{(k+1)})^H \mathbf{Y}_r s_m^*) = \text{Re}(\mathbf{b} s_m^*) \leq \sum_{l=1}^L |b(l)| \quad (19)$$

其中 $b(l)$ 为 \mathbf{b} 的第 l 个元素, 且当且仅当

$$s_m(l) = \exp(j \angle b(l)) \quad (20)$$

时等号成立.

故而 g_m 的最优解为:

$$s_m = \exp(j \angle (\mathbf{a}_m^{(k+1)})^H \mathbf{Y}_r) \quad (21)$$

综上, 基于交替投影的 MIMO 雷达信号盲分离流程如算法 1 所示.

算法 1 基于交替投影的 MIMO 雷达信号分离算法

第一步: 利用侦察接收信号估计发射信号数 N_T , 例如采用文献[20]中的 MDL 算法估计发射信号数.

第二步: $k=0$, 初始化信号矩阵 $\mathbf{S}^{(k)}$, 例如采用幅度为 1、相位随机编码的信号矩阵.

第三步: 利用式(12)更新混合矩阵 $\mathbf{A}^{(k+1)}$.

第四步: $m=0$. 令 $\mathbf{S}^{(k+1)} = \mathbf{S}^{(k)}$.

(4a) 去除 $\mathbf{A}^{(k+1)}$ 第 m 列将其记为 $\mathbf{A}_{-m}^{(k+1)}$; 去除 $\mathbf{S}^{(k+1)}$ 第 m 行, 将其记为 $\mathbf{S}_{-m}^{(k+1)}$.

(4b) 利用式(21)计算 s_m , 并将 $\mathbf{S}^{(k+1)}$ 的第 m 行更新为 s_m .

(4c) $m = m + 1$. 如果 $m \leq N_T$, 回到步骤(4a), 否则转到第五步.

第五步: 如果残差 $\|\mathbf{Y} - \mathbf{A}^{(k)} \mathbf{S}^{(k)}\|_F$ 在相邻两次迭代之间的取值变化不明显, 则停止迭代, 否则 $k = k + 1$, 并转到第三步.

3.3 分离算法收敛性证明

将第 k 次迭代中求解第 m 个子优化问题得到的信号矩阵记作 $\mathbf{S}^{(k,m)}$, 可以得出

$$\begin{aligned} \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}^{(k)} \mathbf{S}^{(k)}\|_F^2 &\geq \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}^{(k+1)} \mathbf{S}^{(k)}\|_F^2 \geq \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}^{(k+1)} \mathbf{S}^{(k,1)}\|_F^2 \\ &\geq \dots \geq \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}^{(k+1)} \mathbf{S}^{(k,N_T)}\|_F^2 = \|\mathbf{Y} - \mathbf{A}^{(k+1)} \mathbf{S}^{(k+1)}\|_F^2 \end{aligned} \quad (22)$$

其中第 1 个不等号成立是由于 $\mathbf{A}^{(k+1)}$ 是 $\mathbf{S}^{(k)}$ 固定时的最优解, 第 $m+1$ ($m = 1, \dots, N_T$) 个不等号成立是由于 s_m 的最优性. 因此基于交替投影的 MIMO 雷达信号分离算法能够使得每经过一次迭代都能减少残差矩阵的范数, 故而保证了算法的全局收敛性.

4 数值仿真

考虑采用 $N_T = 4$ 个发射通道的集中式 MIMO 雷达, 发射阵元间距为两倍波长; 为简单起见, 假设该 MIMO 雷达采用连续相位编码信号作为发射信号, 信号长度为 $L = 128$; 侦察机分别从相对于 MIMO 雷达法线方向 -14.5° 至 14.5° 的 $M = 10$ 个空间均匀分布的位置对 MIMO 雷达信号进行侦察.

图 2 给出了本文算法分离 MIMO 雷达信号时残差矩阵的范数随着迭代次数的变化曲线, 其中信号信噪比为 5dB, 采用随机生成的相位编码信号作为初值, 算法在残差矩阵的范数相对变化量小于 10^{-3} 时停止迭代. 可以看出本文算法收敛速度很快.

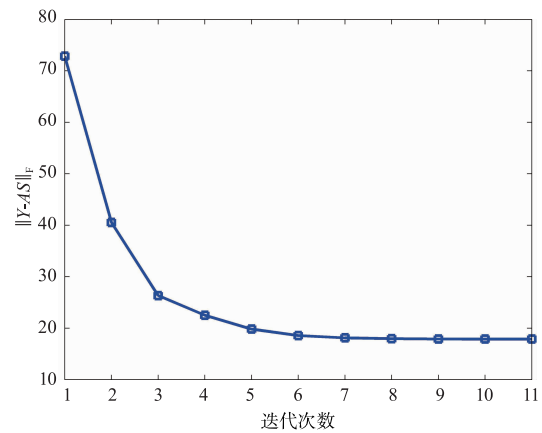


图 2 残差范数随着迭代次数的变化曲线

图 3 给出了使用本文算法分离的 MIMO 雷达信号与原信号实部及虚部的比较结果. 可以看出分离后的信号与原信号的差别较小. 经计算, 分离后的信号与原信号的相关系数均在 0.99 以上, 因此本文算法具有很好的分离效果.

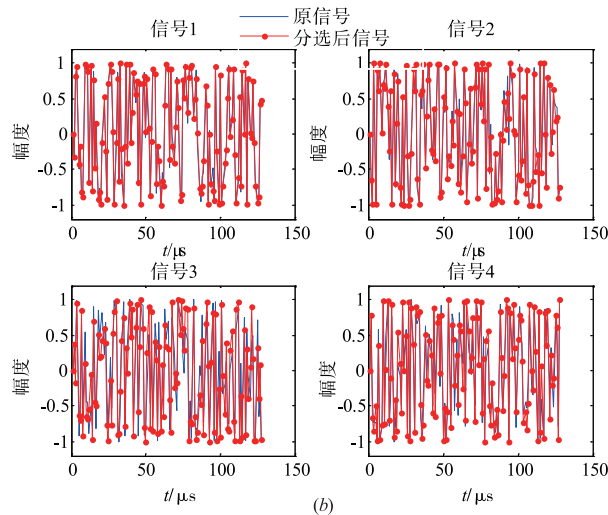
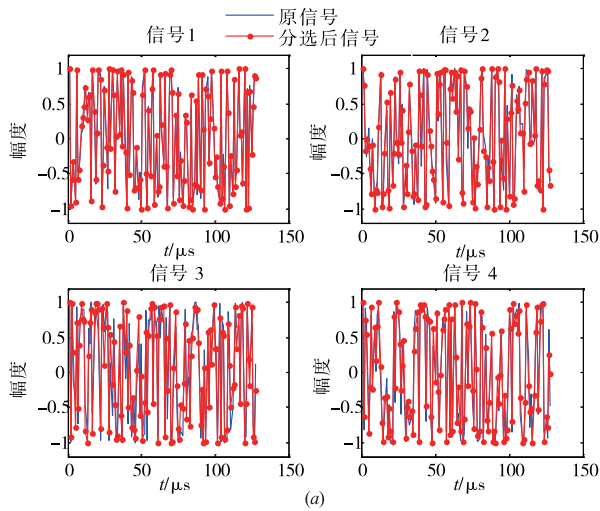


图3 分离后信号与原信号比较。(a)信号实部 (b)信号虚部

图4给出了当系统信噪比从 -10dB 变化到 20dB 时,分别采用本文算法以及文献[12]中的 NC-Fast ICA 算法分离的 MIMO 雷达信号与原信号的平均相关系数曲线,图5给出了两种算法的平均分离指数,其中在计算平均相关系数以及平均分离指数时,进行了50次独立的蒙特卡洛实验,分离指数 I_A 定义为^[10]

$$I_A = \frac{\sum_{i=1}^{N_r} \left(\sum_{j=1}^{N_r} \frac{|I_{ij}|}{\max_k |I_{ik}|} - 1 \right) + \sum_{j=1}^{N_r} \left(\sum_{i=1}^{N_r} \frac{|I_{ij}|}{\max_k |I_{kj}|} - 1 \right)}{2N_r(N_r - 1)} \quad (23)$$

I_{ij} 为矩阵 $\mathbf{I} = \mathbf{W}\mathbf{A}$ 第 i 行第 j 列的元素,本文算法中分离矩阵 \mathbf{W} 定义为

$$\mathbf{W} = (\hat{\mathbf{A}}^H \hat{\mathbf{A}})^{-1} \hat{\mathbf{A}}^H \quad (24)$$

$\hat{\mathbf{A}}$ 为使用本文算法得到的混合矩阵.在完全分离的情况下, $I_A \rightarrow 0$,因此,分离指数 I_A 越小,代表算法的分离效果越好.

从图4以及图5可以看出,随着信噪比的逐渐增加,两种算法分离后的 MIMO 雷达信号与原信号的相关

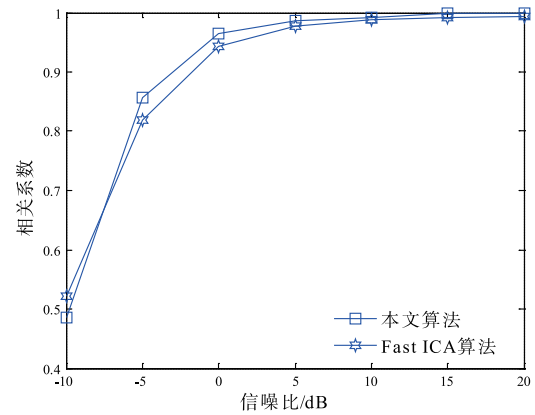


图4 不同信噪比下分离后信号与原信号的相关系数

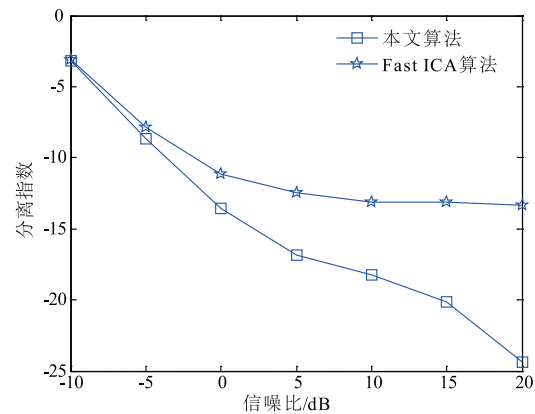


图5 本文算法与NC-Fast ICA算法的分离指数比较

系数也在不断增加,分离指数越来越低.当信噪比高于 0dB 时,分离后的信号与原信号的相关系数能达到 0.9 以上,分离指数低于 -10dB ,因此具有较好的分离效果.对于 0dB 以上的信噪比,与 NC-Fast ICA 算法相比,本文算法分离的信号与原信号的相关系数要更高,分离指数亦显著地低于 NC-Fast ICA 算法.故而本文算法对于 MIMO 雷达信号的分离性能明显优于文献[12].

5 结论

建立了集中式 MIMO 雷达信号的侦察接收模型,基于最大似然估计方法提出了 MIMO 雷达信号的分离算法.利用 MIMO 雷达信号的恒模特性,设计了交替投影算法分离 MIMO 雷达信号.理论分析及数值仿真结果表明,本文算法具有全局收敛特性,且收敛速度很快.当信噪比高于 0dB 时,使用本文算法分离得到的 MIMO 雷达信号与原信号的相关系数在 0.95 以上,分离指数可以达到 -14dB 以下,可以有效地分离 MIMO 雷达信号,性能明显优于现有的 NC-Fast ICA 算法.

参考文献

- [1] Li Jian, Stoica P. MIMO Radar Signal Processing [M].

- Hoboken, NJ John Wiley & Sons, 2009.
- [2] Li Jian, Stoica P. MIMO radar with colocated antennas[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5): 106 – 114.
- [3] Haimovich A M, Blum R S, Cimini L J. MIMO radar with widely separated antennas [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(1): 116 – 129.
- [4] Tang Bo, Tang Jun, Peng Yingning. MIMO radar waveform design in colored noise based on information theory [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(9): 4684 – 4697.
- [5] 唐波, 张玉, 李科, 等. 杂波中 MIMO 雷达恒模波形及接收机联合优化算法研究 [J]. 电子学报, 2014, 42(9): 1705 – 1711.
Tang Bo, Zhang Yu, Li Ke, et al. Joint constant-envelope waveform and receiver design for MIMO radar in the presence of clutter [J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(9): 1705 – 1711. (in Chinese)
- [6] 梁百川. 对 MIMO 雷达的电子侦察技术 [J]. 舰船电子对抗, 2008, 31(5): 17 – 19, 27.
Liang Bai-chuan. Electronic reconnaissance technology for MIMO radar [J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2008, 31(5): 17 – 19, 27. (in Chinese)
- [7] Wang Xiaojing, Xiong Ying, Tang Bin, et al. An approach to the modulation recognition of MIMO radar signals [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013, 2013(1): 1 – 11.
- [8] Wang Xiaojing, Xiong Ying, Li Yunhao, et al. Modulation recognition of MIMO radar signal based on joint HOS and SNR algorithm [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2014, 25(2): 226 – 236.
- [9] 梁浩, 崔琛, 代林, 等. 对 MIMO 雷达参数的侦察估计及性能分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(10): 2272 – 2278.
Liang Hao, Cui Chen, Dai Lin, et al. Reconnaissance and estimation performance analysis for colocated MIMO radar parameters [J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(10): 2272 – 2278. (in Chinese)
- [10] 高昊, 王剑, 高艳涛, 等. 分布式多输入多输出雷达的侦察分析 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014(10): 1367 – 1372.
Gao Hao, Wang Jian, Gao Yantao, et al. Reconnaissance analysis of MIMO radar with widely separated antennas [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2014(10): 1367 – 1372. (in Chinese)
- [11] Tang Xiaowei, Tang Jun, Tang Bo. A new electronic reconnaissance technology for MIMO radar [A]. CIE International Conference on Radar [C]. Chengdu: IEEE, 2011. 24 – 27.
- [12] 汤小为, 唐波, 汤俊. 集中式 MIMO 雷达信号盲分离算法研究 [J]. 宇航学报, 2013, 34(5): 679 – 685.
Tang Xiao-wei, Tang Bo, Tang Jun. Blind source separation algorithm for colocated MIMO radar signals [J]. Journal of Astronautics, 2013, 34(5): 679 – 685. (in Chinese)
- [13] Kay S. 统计信号处理基础——估计与检测理论 [M]. 罗鹏飞, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006. 129 – 135.
- [14] 张贤达. 矩阵分析与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006. 34 – 47.
- [15] Tropp J A, Dhillon I S, Heath R W, et al. Designing structured tight frames via an alternating projection method [J]. IEEE Trans Inf Theory, 2005, 51(1): 188 – 209.
- [16] Stoica P, Selén Y. Cyclic minimizers, majorization techniques, and the expectation-maximization algorithm: a refresher [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2004, 21(1): 112 – 114.
- [17] Hyvärinen A, Karhunen J, Oja E. Independent Component Analysis [M]. New York: John Wiley & Sons, 2004.
- [18] Wright S J. Coordinate descent algorithms [J]. Mathematical Programming, 2015, 151(1): 3 – 34.
- [19] Aharon M, Elad M, Bruckstein A. K-SVD: An algorithm for designing overcomplete dictionaries for sparse representation [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(11): 4311 – 4322.
- [20] Wax M, Kailath T. Detection of signals by information theoretic criteria [J]. IEEE Trans on ASSP, 1985, 33(2): 387 – 392.

作者简介



唐波 男, 1985 年 8 月出生于江西临川, 2006 年和 2011 年于清华大学电子工程系获工学学士和工学博士学位, 现为电子工程学院讲师. 研究兴趣主要包括自适应阵列信号处理、雷达波形设计等.
E-mail: tangbo06@gmail.com



张玉 男, 1962 年 10 月生于安徽芜湖, 1989 年毕业于电子工程学院获工学硕士学位, 现为电子工程学院教授, 研究兴趣主要包括雷达信号处理、通信信号处理等.

张浩 男, 1986 年 7 月出生于湖北仙桃, 2012 年毕业于清华大学自动化系获工学硕士学位, 现为电子工程学院助教, 主要研究方向为信号处理.