

一种基于盲源分离的 MIMO 雷达侦察识别方法

蒋海荣, 张 玉, 冉金和
(电子工程学院, 合肥 230037)

摘 要: 针对集中式 MIMO 雷达信号分选面临的问题, 提出一种新的侦察识别方法, 令多侦察机同时在不同方位对 MIMO 雷达信号进行采样, 使其能够获得多个独立的观测量, 在此基础上, 利用盲分离技术中的复值非高斯性最大化(CMN)算法对 MIMO 雷达信号进行分选。仿真结果表明, 在不考虑幅度起伏的条件下, 当 SNR 达到 6 dB 时, 对相位编码、频分线性调频等典型正交波形的分离指数均低于 -10 dB, 同时, 分离后波形的相关性分析也验证了方法的有效性。

关键词: MIMO 雷达; 侦察识别; 信号分选; 盲源分离

中图分类号: V271.4; TN957.51

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2013)12-0046-05

An MIMO Radar Reconnaissance Identification Method Based on Blind Source Separation

JIANG Hairong, ZHANG Yu, RAN Jinhe
(Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: To correctly sort MIMO radar signals, a new reconnaissance method is presented, which can make multiple reconnaissance planes collect radar signals in multiple positions at the same time, and multiple independent observations can be obtained. The blind source separation algorithm of complex maximization of non-Gaussianity (CMN) is utilized to sort MIMO radar signals. Simulation results show that a separation performance of -10 dB can be achieved with SNR as 6 dB for several typical orthogonal waveforms such as phase-coded and frequency division liner frequency modulation waveforms without considering the amplitude fluctuation. The relative analysis of separated waveforms also demonstrates the validity of the method.

Key words: MIMO radar; reconnaissance identification; signal sorting; blind source separation

0 引言

MIMO 雷达是近年来获得广泛关注的新体制雷达, 对 MIMO 雷达的侦察识别是当前研究的热点, 也是亟需解决的难点问题之一。对于同时发射多个正交波形的 MIMO 雷达, 接收机侦收到的是同时到达的混合信号, 如果信号设计不严格, 会导致其频谱存在部分混叠现象。常规的雷达信号分选是按照串行规则进行检测的, 因而, 无法对 MIMO 雷达信号进行有效的分选。在这种情况下, 空间未知线性混叠信号的分离成为 MIMO 雷达侦察识别最为严峻的问题。

目前, 各国的科研人员对 MIMO 雷达的研究主要是基于自身的性能和相关算法, 但如何对其进行有效的侦察识别和干扰, 只是提出了一些初步的探索。文献[1-2]提出了设计 MIMO 雷达电子侦察以及对抗系统的一些思想; 文献[3]对多路正交频分线性调频信号进行盲源分离仿真, 直接使用随机矩阵作为混合矩阵, 并未考虑 MIMO 雷达信号的采集方案; 文献[4-5]提出了一种基于空间多位置采样和信源数估计的 MIMO 雷达电子侦察体制, 通过分析可疑雷达发射正交波形数目来识别 MIMO 雷达, 但没有对正交波形进行信号分选。本文针对集中式 MIMO 雷达的特殊构型, 建立起一种满足盲源分离条件的 MIMO 雷达侦察模型。假设多侦察机同时在不同方位对 MIMO 雷达进行侦察, 即 MIMO 雷达信号从多个不同角度进入侦察机接收天线, 从而能够获得多个独立的观测量, 最后利用一种稳健的复信号盲源分离算法对 4 种典型 MIMO

收稿日期: 2013-01-25

修回日期: 2013-03-06

基金项目: 安徽省自然科学基金(1208085QF103); 国家自然科学基金(61201379)

作者简介: 蒋海荣(1988—), 女, 江苏南通人, 硕士生, 研究方向为 MIMO 雷达信号处理。

正交波形进行盲源分离仿真与分析。实验结果表明该方法有效可行。

1 MIMO 雷达盲源分离问题的基本条件

盲源分离算法通常需要满足以下对于可分性的约束条件^[6]：

- 1) 各个源信号之间是统计独立的；
- 2) 混合矩阵列满秩，且观测信号维数不少于源信号维数；
- 3) 源信号中至多只能有一个高斯信号，且为平稳随机过程。

在上述假设条件成立时，盲源分离问题有解。MIMO 雷达各阵元发射的是相互正交的波形，一般采用相位和离散频率编码信号，因此，侦察机在某个位置截获的信号是多个正交波形的混合，条件 1)、3) 可以满足。但是，集中式 MIMO 雷达阵元间距通常仅为若干个波长，较小的阵元间距使得所有雷达信号均以相同的到达角进入侦察机阵列天线，故而只能获得多发射波形的一个有效观测数。即使侦察机采用线性阵列接收雷达信号，所构建的混合矩阵也是秩亏的，此时条件 2) 无法满足，不能对正交波形进行盲源分离。

为了能够将盲源分离算法应用于分选 MIMO 雷达信号，本文根据 MIMO 雷达的工作特点建立一种新的侦察方法，并在此基础上构造盲源分离的信号模型。考虑到实际电子侦察系统的复杂性，结合 MIMO 雷达信号本身的特点，假设在 MIMO 雷达信号的侦察处理过程中，以下几点是成立的：

- 1) 假定接收到的信号为二相编码信号 (BPSK)、四相编码信号 (QPSK)、频分线性调频信号 (OFDM-LFM)、离散频率编码信号 (DFCW)；
- 2) 假定已知待侦察 MIMO 雷达的距离和方位，为后续侦察机的位置分布提供依据；
- 3) 假定在侦察接收机采样时间窗内目标 MIMO 雷达工作在相同模式，发射的脉冲不变，且发射的是窄带信号，即接收机能够获得 MIMO 雷达的一组全脉冲数据。

2 MIMO 雷达信号侦察模型

2.1 传统侦察模型

根据集中式 MIMO 雷达的工作特点建立的侦察模型如图 1 所示。图中假设 MIMO 雷达是一个 K 阵元均匀线阵，发射阵元间距为 d_r ，每个单元各自独立发射窄带正交波形，波长为 λ 。当面临集中式 MIMO 雷达时，侦察机接收的雷达信号为

$$Y(t) = AS(t) + N(t) \quad (1)$$

式中： $Y(t) \in \mathbf{C}^{1 \times L}$ ，为侦察机接收信号， L 为信号采样点数； $N(t)$ 为噪声； $A = \mathbf{a}^T(\theta_i) \in \mathbf{C}^{1 \times K}$ ， $\mathbf{a}(\theta_i) = [1, e^{j2\pi d_r \sin \theta_i / \lambda \times 1}, \dots, e^{j2\pi d_r \sin \theta_i / \lambda \times (K-1)}]^T$ ，为 MIMO 阵列的发射导引矢量； θ_i 为 MIMO 雷达的出发角； $S(t) = [S_1(t), S_2(t), \dots, S_K(t)]^T$ ，为发射波形矩阵。由于没有信号的先验信息，因此无法用匹配滤波器对正交波形进行分离。而与盲分离的信号模型相比， A 只是一个行向量，不满足混合矩阵满秩的条件。显然，在这种情况下，传统侦察模型无法分离接收到的混合信号来准确判断雷达的工作模式，进而影响后续信号处理及干扰方式的选择。

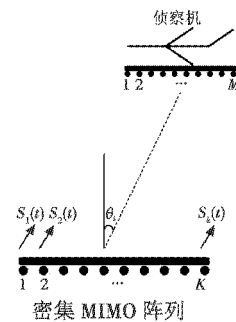


图 1 传统 MIMO 雷达信号侦察模型示意图

Fig. 1 The schematic of traditional electronic reconnaissance mode for MIMO radar

2.2 盲分离的侦察模型

为使侦察机可以在多视角观测位置采集雷达信号，本节先利用传统数字波束形成器对截获信号进行接收波束形成处理，达到提高信噪比的目的，然后令多个侦察机同时在不同方位对 MIMO 雷达进行侦察，侦察模型如图 2 所示。假设多个侦察机（一共 N 个）能够在不同位置截获 MIMO 雷达信号，这些位置相对于雷达的出发角为 $\theta_i = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N]$ ， $\theta_i \in (-90^\circ, 90^\circ)$ ，侦察机到雷达的距离分别为 R_1, R_2, \dots, R_N 。侦察位置数大于等于最多可能发射的正交波形个数，即 $N \geq K$ 。

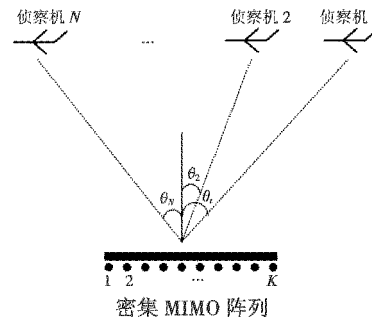


图 2 新的 MIMO 雷达信号侦察模型示意图

Fig. 2 The schematic of new electronic reconnaissance mode for MIMO radar

第 n 个侦察机接收到位于 θ_n 方向的信号可表示为

$$p_n(t) = \alpha_n \cdot \mathbf{a}^T(\theta_n) \mathbf{s}(t - \tau_{R_n}) e^{j2\pi f_c(t - \tau_{R_n})} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{a}(\theta_n) = [1, e^{j\phi}, \dots, e^{j(K-1)\phi}]^T$, 为发射导引矢量, $\phi = \pi\rho \sin \theta_n$, 为发射通道间的空间相位差, $\rho = 2d_r/\lambda$, 为阵元间距与半波长的比例系数; α_n 为侦察机在位置 n 接收的脉冲幅度; $\tau_{R_n} = R_n/c$, 为从雷达到位置 n 的传播延时, c 为光速; $\mathbf{s}(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_K(t)]^T$, 表示 MIMO 雷达发射的 K 个正交波形组成的信号矢量, $s_k(t)$ 表示第 k 个基带信号形成的相参脉冲串。基于集中式 MIMO 雷达的工作原理, 侦察信号模型离散化的矩阵形式可以表示为

$$\mathbf{Y} = \mathbf{B}\mathbf{A}\mathbf{S} + \mathbf{N}' \quad (3)$$

式中, $\mathbf{Y} \in \mathbf{R}^{N \times L}$, 为各侦察机的采样数据值。式(3)中的 $\mathbf{B}\mathbf{A}$ 即为 MIMO 雷达的盲分离混合矩阵, 且 $\mathbf{B}\mathbf{A}$ 和 \mathbf{A} 等秩。考虑到侦察接收机在采样时会引入随机相位(忽略脉冲内部的相位变化), 可将总的相位值用 $[0, 2\pi]$ 内均匀分布的随机矢量 $\boldsymbol{\phi} = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N]^T$ 表示, 在脉冲起伏的情况下将 α_n 建模为服从 $(1, \sigma_A^2)$ 分布的高斯随机变量, 因此, $\mathbf{B} = \text{diag}(\alpha_1 e^{j\phi_1}, \dots, \alpha_N e^{j\phi_N}) \in \mathbf{R}^{K \times K}$, 表示各个位置接收信号的幅相调制; $\mathbf{A} = [\mathbf{a}(\theta_1), \dots, \mathbf{a}(\theta_N)]^T \in \mathbf{C}^{N \times K}$, 是发射导引矢量组成的矩阵; $\mathbf{S} = [s_1^T, s_2^T, \dots, s_K^T]^T \in \mathbf{C}^{K \times L}$ 是 MIMO 雷达的基带信号采样矩阵且 $s_k \in \mathbf{C}^{1 \times L}$, 在理想正交情况下满足 $\mathbf{S}\mathbf{S}^H/L = \mathbf{I}_{KK}$; $\mathbf{N}' \in \mathbf{C}^{N \times L}$ 是复高斯白噪声。

对于式(3)中的盲分离混合矩阵 $\mathbf{B}\mathbf{A}$, 由于 $\mathbf{B}\mathbf{A}$ 和 \mathbf{A} 等秩, 只需分析导引矩阵 \mathbf{A} 即可。令 $v_n = \sin \theta_n$, 则 $-1 < v_1 < \dots < v_N < 1$, $\Delta v = v_N - v_1$ 表示侦察机在 v 空间分布的角度范围, $\Delta v = \Delta V/N - 1$ 为 v 空间内 N 点的均匀采样步长, $\mu_n = v_n/\Delta v$ 为归一化后的角度值。 \mathbf{A} 中第 n 行 k 列的元素可表示为 $a_{nk} = e^{j\pi\rho(k-1)\sin \theta_n} = e^{j\pi\mu_n(k-1)\rho\Delta v}$, 则 \mathbf{A} 的列矢量形式表示为

$$\mathbf{A} = [\mathbf{u}(\varphi_1), \mathbf{u}(\varphi_2), \dots, \mathbf{u}(\varphi_K)] \quad (4)$$

式中: $\mathbf{u}(\varphi_k) = [e^{j\pi\mu_1\varphi_k}, e^{j\pi\mu_2\varphi_k}, \dots, e^{j\pi\mu_N\varphi_k}]^T$, $\mathbf{u}(\varphi_k)$ 可理解为 N 个侦察机采样形成的 N 元虚拟阵列对第 k 个信号的接收导引矢量, $\varphi_k = (k-1)\rho\Delta v$, 表示 MIMO 雷达发射的第 k 个外源信号对该虚拟阵列的入射角, 相邻信号角度间隔为 $\rho\Delta v$ 。显然, 当 $\rho\Delta v$ 足够大且 $N = K$ 时, \mathbf{A} 的列向量线性无关且为适定的列满秩混合矩阵, 能够满足盲分离条件 2), 即本节的信号侦察模型使应用盲分离算法成为可能。

3 盲源分离算法

根据上述集中式 MIMO 雷达信号的侦察模型, 可以采用一些常用的盲分离算法对雷达信号进行分离, 例如, 非圆信号复数快速独立分量分析 (NC-FastICA) 算法、复值非高斯性最大化 (CMN) 算法, 以及复数特

征矩阵的联合近似对角化 (JADE) 算法等。从运算复杂度和性能方面综合考虑选择 CMN 算法作为 MIMO 雷达波形的盲分离算法。

3.1 信号预处理

信源数目估计是盲源分离研究中首先要面对的问题。本文用信息论准则中的 MDL 算法来估计 MIMO 雷达发射机的个数^[7]。该算法首先对 N 路观测信号 \mathbf{Y} 求协方差矩阵 $\mathbf{R}_Y = E[\mathbf{Y}\mathbf{Y}^H]$ 的特征值, 将其特征值按由大到小记为 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_N$ 。根据 MDL 准则估计的信号源个数为

$$\tilde{n} = \underset{k}{\text{argmin}} L_{\text{MDL}}(k), \quad k = 1, \dots, N$$

$$L_{\text{MDL}}(k) = -\lg \left[\frac{\prod_{i=k+1}^N \lambda_i^{\lambda_i}}{\frac{1}{N-k} \sum_{i=k+1}^N \lambda_i} \right]^{(N-k)L} + \frac{1}{2} k(2N-k) \lg L \quad (5)$$

式中, L 表示信号维数。CMN 算法在对混合信号进行盲分离以前, 还要对观测数据向量进行去均值和白化处理。对于侦察模型中的 MIMO 雷达观测信号 \mathbf{Y} , $\mathbf{m} = E(\mathbf{Y})$ 表示均值。令

$$\bar{\mathbf{Y}} = \mathbf{Y} - \mathbf{m} \quad (6)$$

则 $E\{\bar{\mathbf{Y}}\} = E\{\mathbf{Y} - \mathbf{m}\} = E\{\mathbf{Y}\} - \mathbf{m} = \mathbf{0}$ 。

所谓白化, 就是寻找白化矩阵 \mathbf{V} , 通过一定的线性变换, 使得变化后的观测信号 $\mathbf{X} = \mathbf{V}\bar{\mathbf{Y}}$ 的相关矩阵满足 $\mathbf{R}_X = E[\mathbf{X}\mathbf{X}^H] = \mathbf{I}$ 。最常用的白化方法是先对 $\bar{\mathbf{Y}}$ 的协方差矩阵进行奇异值分解:

$$E\{\bar{\mathbf{Y}}\bar{\mathbf{Y}}^T\} = \mathbf{M}\mathbf{D}\mathbf{M}^T \quad (7)$$

白化后的观测矩阵 \mathbf{X} 为

$$\mathbf{X} = \mathbf{M}\mathbf{D}^{-1/2}\mathbf{M}^T\bar{\mathbf{Y}} \quad (8)$$

白化通常不能恢复源信号各个分量间的统计独立性, 但白化能够简化盲源分离算法或改善盲源分离算法的性能。

3.2 CMN 盲源分离算法

CMN^[8] 算法采用反双曲正弦函数 $G(y) = a \sinh(y)$ 作为算法的激活函数, 具体步骤如下所述。

1) 初始化, 随机产生一个 $K \times 1$ 维的初始化解混矩阵 $\mathbf{w}_k(0)$ 。

2) 迭代, γ 是复值信号峭度, μ 是步长调节参数, g 为解析函数 G 的导数, \mathbf{x} 为白化矩阵 \mathbf{X} 的列矢量。

$$\mathbf{w}_k \leftarrow \mathbf{w}_k + 2\gamma\mu E\{\mathbf{x}\mathbf{G}^*(\mathbf{w}_k^H\mathbf{x})g(\mathbf{w}_k^H\mathbf{x})\} \quad (9)$$

3) 正交化。

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_k - \sum_{j=1}^{k-1} \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H \mathbf{w}_k \quad (10)$$

4) 归一化。

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{w}_k / \|\mathbf{w}_k\| \quad (11)$$

5) 判断收敛,若 $\|w_k - w_{k-1}\| \leq \varepsilon$ (ε 为收敛系数,本文取 $\varepsilon = 0.0001$),判定算法收敛。若未收敛,回到 2)。

6) $k = k + 1$,若 $k \leq K$,回到 1)。

7) 信号恢复,计算 $\hat{s}_k = w_k^H X, k = 1, 2, \dots, K$,即为源信号 S 的估计值。

4 仿真分析

对于分离效果的评价,利用全局系数矩阵 G 来构造互通道干扰测量误差准则,定义为

$$E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^N \frac{|g_{ij}|}{\max |g_{ij}|} - 1 \right) + \sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=1}^N \frac{|g_{ij}|}{\max |g_{ij}|} - 1 \right) \quad (12)$$

式中: g_{ij} 为全局传输矩阵 $G = WA$ 中的元素, A 是混合矩阵, W 是分离矩阵。性能指标 E 总是非负的, E 越小表示分离效果越好,实际中,当 $10 \lg E < -15$ dB 时表示该算法的分离性能已经相当好。

实验一 考察 4 种信号在不同信噪比下正交波形个数估计的正确率。MIMO 雷达发射机个数为 6,发射阵列稀疏且 $\rho = 10$,6 架侦察机沿直线排列,侦察角度范围是 $[-75^\circ, 75^\circ]$,飞机在侦察空间内均匀采样,脉内采样点数 512,进行 100 次蒙特卡罗实验。从图 3 中可以得出,当信噪比 $R_{s,N} > 2$ dB 时,MDL 算法对 4 种信号波形数的估计正确率均大于 90%。

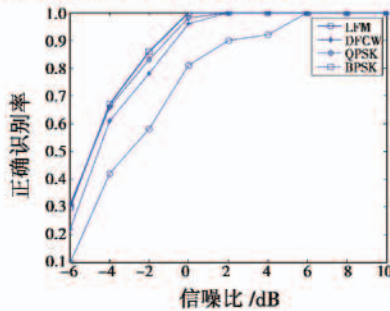


图 3 发射天线估计正确率 ($K=6$)

Fig.3 Correct estimation probability of signal sources ($K=6$)

实验二 考察信噪比对分离性能的影响。仅考虑幅度不起伏的情况,即令 $\sigma_A^2 = 0$,其余参数同实验一。图 4 给出了 4 种 MIMO 雷达信号正交波形的分离指数随 SNR 的变化曲线,可以看出,分离性能随 SNR 的增大而提高,当 SNR 达到 6 dB 时,4 种波形的分离指数均低于 -10 dB,这证明了本文运用盲分离算法的可行性。从图 4 中不难发现,CMN 算法对相位编码信号、离散频率编码信号的分离效果较好,而对载频间隔严格相等的频分线性调频信号的分离效果较差。

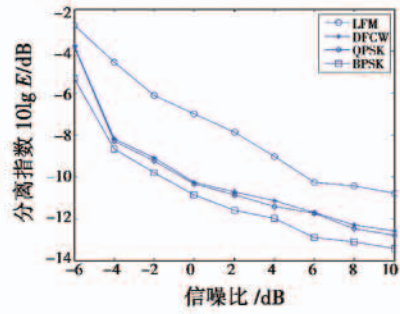


图 4 不同信噪比下的分离性能

Fig.4 Separation performance at different SNR

实验三 考察分离出的多路正交波形进行后续相关处理的效果。

首先选取相位编码信号(PCW)中的 QPSK 信号进行盲分离仿真,PCW 信号是通过相位离散编码得到的,具有低截获性能等优势,迄今为止,已经提出了一些方法来设计具有低自相关旁瓣的正交码。本例主要采用文献[9]中提出的 GA 优化设计方法,参数设置为:正交波形数 $K=4$,子码组数 $N=256, R_{s,N}=10$ dB,其余参数同实验二。图 5 给出了利用上述盲源分离算法恢复得到的四路 QPSK 波形的自相关函数,图 6 为互相关函数。

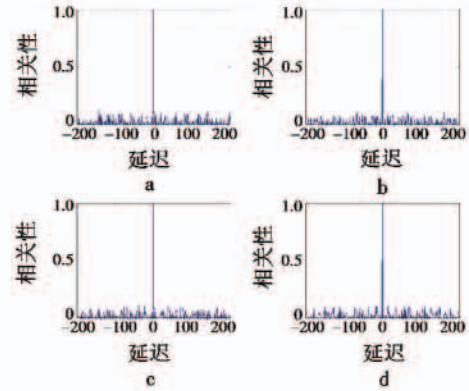


图 5 分离波形(QPSK)的自相关函数

Fig.5 Auto-correlation functions of separated waveforms(QPSK)

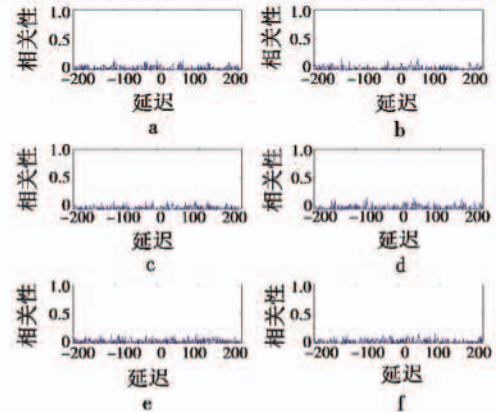


图 6 分离波形(QPSK)的互相关函数

Fig.6 Cross-correlation functions of separated waveforms(QPSK)

由图可知,分离波形各自的自相关性较好,而彼此的互相关性很差,与原始正交波形的相关特性非常相似,则对相关性的分析能够判断侦察到的是 MIMO 雷达系统中的多路正交发射信号,从而识别出对方为多发多收的 MIMO 雷达体制。

5 结论

目前,对 MIMO 雷达的信号侦察与分选方法研究较少。针对这一问题,本文建立一种新的 MIMO 雷达信号侦察模型,使其能够满足盲源分离算法的约束条件,从而达到信号分选的目的。仿真实验结果表明,当不存在幅度起伏且信噪比为 6 dB 时,本文方法对 4 种典型 MIMO 雷达信号正交波形的分离度均低于 -10 dB,同时对分离后波形的相关性分析结果也验证了 MIMO 雷达的存在。

参考文献

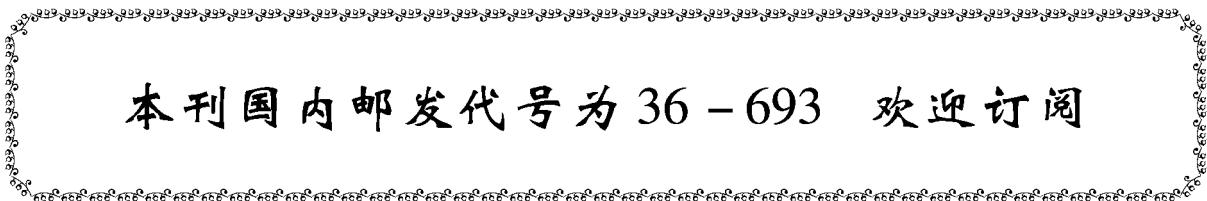
[1] 张锡祥. 对 MIMO 雷达的干扰构想[J]. 现代雷达, 2010,32(4):1-4.
 [2] 梁百川. 对 MIMO 雷达的电子侦察技术[J]. 舰船电子

对抗,2008,31(5):17-20.
 [3] 盛志超. 一种对 MIMO 雷达侦察识别的新方法[J]. 舰船电子对抗,2011,34(6):4-7.
 [4] 吴庆天. MIMO 雷达的性能分析与侦察识别[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
 [5] TANG Xiaowei, TANG Jun. A new electronic reconnaissance technology for MIMO radar [C]//IEEE CIE International Conference on Radar, Chengdu, China, Oct. 24-27, 2011:79-83.
 [6] COMON P. Independent component analysis, a new concept [J]. Signal Processing, 1994, 36(3):287-314.
 [7] FISHLER E, GROSMANN M. Detection of signals by information theoretic criteria; General asymptotic performance analysis[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 50(5):1027-1036.
 [8] NOVEY M, ADALI T. ICA by maximization of nongaussianity using complex functions [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2008, 19(4):596-609.
 [9] 刘波. MIMO 雷达正交波形设计及信号处理研究[D]. 成都:电子科技大学,2009.

(上接第 17 页)

[2] 陈行勇,张殿宗,钱祖平,等. 战场电磁环境复杂性定量分析研究综述[J]. 电子信息对抗技术,2010,25(4):44-50.
 [3] 陈利虎,张尔扬. 一种新的定量评估电磁环境复杂度方法[J]. 电子对抗,2009(2):6-8.
 [4] 金朝,丁竑,李冬,等. 战场电磁环境复杂度评估及其应用[J]. 火力与指挥控制,2011,36(12):194-197.
 [5] 邵国培,刘雅奇,何俊,等. 战场电磁环境的定量描述与模拟构建及复杂性评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2007,21(4):17-20.
 [6] 代合鹏,苏东林. 电磁环境复杂度定量分析方法[J].

微波学报,2009,25(3):25-27.
 [7] 连世伟,李修和,沈阳. 基于灰色关联度的战场电磁环境复杂度模型[J]. 电子信息对抗技术,2011,26(12):62-67.
 [8] 邹阳森,刘东,杨建文,等. 复杂电磁环境系统的效能评估[J]. 兵工自动化,2009,28(11):86-88.
 [9] 章季阳,王伦文. 一种改进的电磁环境复杂度定量评估方法[J]. 微波学报,2011,27(6):37-46.
 [10] 王国民,刘万洪,蔡啸,等. 复杂电磁环境及其判断方法探析[J]. 通信对抗,2008(1):46-49.
 [11] 张最良. 军事运筹学[M]. 北京:军事科学出版社, 1993.



本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅