

文章编号: 2095-4980(2017)06-0946-06

宽带信号下的双基地 MIMO 雷达收发角估计

李小英, 陈逸伦

(信息工程大学 信息工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 针对双基地多输入多输出(MIMO)雷达收发角联合估计问题, 利用信号的循环平稳特性, 构造宽带循环平稳信号下接收数据的循环自相关矩阵。对矩阵进行特征值分解, 利用 MUSIC, ESPRIT 等空间谱估计算法估计出信号的收发角。宽带信号能够携带更多的信息量, 利于不断增加的实际需求, 而信号的循环平稳特性能够很好地抗干扰以及消除高斯噪声带来的影响。实验仿真结果表明, 算法在宽带循环平稳信号下具有良好的角度估计性能。

关键词: 双基地多输入多输出雷达; 收发角估计; 宽带循环平稳信号; 空间谱估计算法

中图分类号: TN953+.5

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201706.0946

DOD-DOA estimation of wide-band signals in bistatic MIMO radar

LI Xiaoying, CHEN Yilun

(Institute of Information Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou Henan 450001, China)

Abstract: Focused on the Direction Of Departure(DOD) and Direction Of Arrival(DOA) estimation of bistatic Multiple Input Multiple Output(MIMO) radar, an estimation method is presented by using wide-band cyclostationary signal. Firstly, an autocorrelation matrix of receiving wide-band cyclostationary signals is constructed. And then eigenvalues of the matrix are decomposed. At last, DOD-DOA are estimated by spatial spectrum estimation algorithm such as MUSIC algorithm or ESPRIT algorithm. Wide-band cyclostationary signal can carry more information, which is increasingly important, and its cyclostationary property restrains Gaussian noise as well as interference from different frequencies effectively. The result of simulation shows that the method has good angle estimation performance with wide-band cyclostationary signals.

Keywords: bistatic Multiple Input Multiple Output radar; estimation of DOD-DOA; wide-band cyclostationary signal; spatial spectrum estimation algorithm

信号的波达方向是雷达参数估计中的一个重要研究内容, 国内外学者经过漫长的研究, 使其得到迅速全面的发展。伴随着理论基础的不断完善和科学技术的不断进步, 角度估计技术已从最初的低分辨力方位发展至如今的超分辨力测向跟踪, 在信号的选择上从简单的窄带信号延伸到信息量丰富的宽带信号^[1]。

随着信号处理的不断发展, 在窄带信号下的高分辨算法已经比较成熟, 而相对于窄带信号, 宽带信号携带更多的信息, 因此, 它在目标检测、参数估计和探测跟踪等方面具有更广泛的应用前景^[2]。20 世纪 90 年代中后期, 宽带信号下的波离方向角(DOD)估计开始被提出, Doron 等首先通过对宽带信号进行正弦分解并求解正弦函数所对应的频率上的多项式的根, 进而得到窄带信号的初始值, 最后利用最小二乘法求解方向估计值^[3]。近几年, 基于信号子空间类的宽带信号算法也广受学者青睐, Gong 等提出了一种改进式非相干信号子空间(Incoherent Signal-subspace, ISM)算法, 通过在最大功率下进行频点选择来构造频谱密度矩阵, 用于窄带测向算法, 再加权综合, 降低了复杂度^[4-5]。

在实际应用场景中, 许多自然界的信号及人造信号都存在循环平稳特性^[6], 且循环平稳特性仅与自身参数有关, 如调制类型、码速率等, 具有不同循环频率的信号互不循环相关, 因此, 循环平稳信号在信号的选择性、抗干扰等方面具有较好的优势。文献[7]利用这一特性将信号的循环平稳特性与共轭循环平稳特性相结合, 采用子空间分解法对 DOA 进行了估计; 文献[8]提出一种利用分数低阶的循环相关性进行 DOA 估计的方法, 解决了宽带条件下 DOA 估计困难的问题。

收稿日期: 2016-01-18; 修回日期: 2016-05-16

多输入多输出(MIMO)雷达是一种具有多个发射阵元和多个接收阵元的新体制雷达, 它利用发射分集和波形分集技术扩展了阵列孔径, 并提高了参数估计性能。由于波离方向角和波达方向角(DOA)2 个参数同时运用, 能更精确地估计目标的位置, 因此本文在宽带循环平稳信号条件下, 针对双基地 MIMO 雷达的波离角和波达角估计, 通过利用信号的循环平稳特性达到抑制高斯噪声和消除不同频率处的干扰的目的, 提高了估计精确度。

1 双基地 MIMO 雷达信号模型

假设一个发射端和接收端均为均匀线阵的集中式双基地 MIMO 雷达系统, 发射间距和接收间距分别为 d_t 和 d_r , 阵元数分别为 M 和 N 。设雷达系统各发射端同时发射相同载频和带宽的时域正交编码信号 $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)]^T$, 雷达系统模型如图 1 所示。

对于位于 (θ_k, φ_k) ($k=1, 2, \dots, Q$) 处的 Q 个远场目标 (θ_k 和 φ_k 分别为第 k 个目标的 DOD 和 DOA), 假设发射阵元同时发射 M 个具有相同循环频率 α 的 $s_m(t)$ ($m=1, 2, \dots, M$), 经过目标反射到接收阵元, DOD 和 DOA 分别为 θ_k 和 φ_k , 假设目标为散射体, 表示为复随机变量 ξ_k ($\xi_k \sim CN(0, 1)$), 各阵元上的信号、噪声及干扰信号互不循环相关, 则第 p 个接收阵元上的信号为:

$$y_p(t) = \sum_{k=1}^Q \xi_k \sum_{m=1}^M s_m [t + (p-1)\tau_{bk} + (m-1)\tau_{ak}] + w_p(t) \tag{1}$$

式中: $\tau_{ak} = d_t / \lambda \sin(\theta_k)$, $\tau_{bk} = d_r / \lambda \sin(\varphi_k)$ 分别为相邻发射阵元和相邻接收阵元上信号的时延, λ 为波长; $w_p(t)$ 为第 p 个接收阵元上的加性平稳高斯噪声和干扰信号。

2 循环平稳信号基本定义

对于一个随机信号 $s(t)$, 在任意时间 t 内, 如果它的一阶和二阶统计特性随时间的变化呈现出一定的周期性, 即信号均值 $m_s(t) = E[s(t)]$ 和自相关函数 $R_s(t, \tau) = E[s(t+\tau/2)s^*(t-\tau/2)]$ 满足

$$\begin{cases} m_s(t) = m_s(t+T) \\ R_s(t, \tau) = R_s(t+T, \tau) \end{cases} \tag{2}$$

式中 $T=K/\alpha$, K 为整数, α 为循环频率, 则称 $s(t)$ 为广义周期平稳信号^[9]。

通常 $s(t)$ 是周期遍历历过程, 因此

$$R_s^\alpha(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} s(t+\tau/2)s^*(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t} dt = \langle s(t+\tau/2)s^*(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t} \rangle \tag{3}$$

式中: $\langle \rangle$ 为对全部时间进行平均; $R_s^\alpha(\tau)$ 为周期自相关函数。根据循环相关函数的定义, 假设 $s'(t) = s(t+\tau_d)$, 则

$$R_{s's}^\alpha(\tau) = \langle s'(t+\tau/2)s'^*(t-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t} \rangle = \langle s(t'+\tau/2)s^*(t'-\tau/2)e^{-j2\pi\alpha t'} e^{j2\pi\alpha\tau_d} \rangle = R_{ss}^\alpha(\tau) e^{j2\pi\alpha\tau_d} \tag{4}$$

$R_s^\alpha(\tau)$ 的傅里叶变换 $S_s^\alpha(f)$ 称为周期谱密度函数, 简称周期谱。

$$S_s^\alpha(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_s^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \tag{5}$$

当 $\alpha=0$ 时, $S_s^\alpha(f)$ 就是通常的功率谱密度函数。

对于连续随机过程 $s(t)$, 当对它进行采样取离散值 $s(nT_s)$ ($n=\pm 1, \pm 2, \dots$) 时, 它的循环自相关函数则为:

$$R_{ss}^\alpha(kT_s) = \lim_{N_s \rightarrow \infty} \frac{1}{2N_s + 1} \sum_{n=-N_s}^{N_s} s(nT_s + kT_s)s^*(nT_s) e^{-j2\pi\alpha nT_s} e^{-j\pi\alpha kT_s} \tag{6}$$

式中 T_s 为采样间隔。

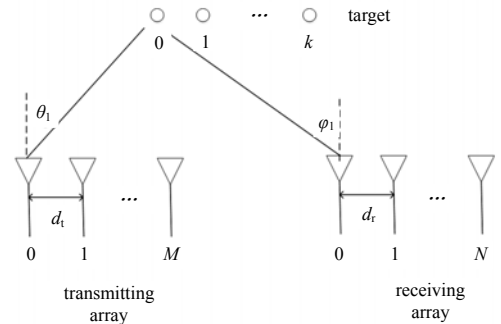


Fig.1 Bistatic MIMO radar system
图 1 双基地 MIMO 雷达系统图

3 收发角联合估计

利用信号的循环平稳特性来抑制高斯噪声和干扰信号，构造出接收数据的循环相关矩阵。根据循环相关函数的定义，第 p 个接收阵元与第 q 个接收阵元的循环相关函数可以表示为：

$$R_{y_p y_q}^\alpha(\tau) = \left\langle y_p(t + \tau/2) y_q^*(t - \tau/2) e^{-j2\pi\alpha t} \right\rangle = \left\langle \left\{ \sum_{k_1=1}^Q \xi_{k_1} \sum_{m_1=1}^M s_{m_1} \left[t + (p-1)\tau_{bk_1} + (m_1-1)\tau_{ak_1} + \tau/2 \right] + w_p(t + \tau/2) \right\} \right. \\ \left. \left\{ \sum_{k_2=1}^Q \xi_{k_2} \sum_{m_2=1}^M s_{m_2} \left[t + (q-1)\tau_{bk_2} + (m_2-1)\tau_{ak_2} - \tau/2 \right] + w_q(t - \tau/2) \right\}^* e^{-j2\pi\alpha t} \right\rangle \quad (7)$$

由于发射信号及噪声间互不循环相关，对上式进行整理可以表示为：

$$R_{y_p y_q}^\alpha(\tau) = \left\langle \sum_{k_2=1}^Q \sum_{k_1=1}^Q \xi_{k_1} \xi_{k_2}^* \sum_{m=1}^M s_m \left[t + (p-1)\tau_{bk_1} + (m-1)\tau_{ak_1} + \tau/2 \right] s_m^* \left[t + (q-1)\tau_{bk_2} + (m-1)\tau_{ak_2} - \tau/2 \right] e^{-j2\pi\alpha t} \right\rangle \quad (8)$$

求解式(8)，令 $s'_m(t) = s_m[t + (\delta_1 + \delta_2)/2]$ ，其中 $\delta_1 = (p-1)\tau_{bk_1} + (m-1)\tau_{ak_1}$ ， $\delta_2 = (q-1)\tau_{bk_2} + (m-1)\tau_{ak_2}$ ，则上式可以写作

$$R_{y_p y_q}^\alpha(\tau) = \left\langle \sum_{k_2=1}^Q \sum_{k_1=1}^Q \xi_{k_1} \xi_{k_2}^* \sum_{m=1}^M s'_m \left[t + (\delta_1 - \delta_2 + \tau)/2 \right] s'^*_m \left[t - (\delta_1 - \delta_2 + \tau)/2 \right] e^{-j2\pi\alpha t} \right\rangle = \sum_{k_2=1}^Q \sum_{k_1=1}^Q \xi_{k_1} \xi_{k_2}^* \sum_{m=1}^M R_{s'_m s'_m}^\alpha(\delta_1 - \delta_2 + \tau) \quad (9)$$

根据式(4)，式(9)也可以表示为：

$$R_{y_p y_q}^\alpha(\tau) = \sum_{k_1=1}^Q \sum_{k_2=1}^Q \sum_{m=1}^M \xi_{k_1} \xi_{k_2}^* R_{s'_m s'_m}^\alpha(\delta_1 - \delta_2 + \tau) e^{j2\pi\alpha(\delta_1 + \delta_2)/2} = \sum_{k_1=1}^Q \sum_{k_2=1}^Q \sum_{m=1}^M \xi_{k_1} \xi_{k_2}^* R_{s'_m s'_m}^\alpha \left[(p-1)\tau_{bk_1} - (q-1)\tau_{bk_2} + \right. \\ \left. (m-1)(\tau_{ak_1} - \tau_{ak_2}) + \tau \right] e^{j\pi\alpha((p-1)\tau_{bk_1} + (q-1)\tau_{bk_2} + (m-1)(\tau_{ak_1} + \tau_{ak_2}))} \quad (10)$$

令 $E_{p,m}(k_1) = \xi_{k_1} e^{j\pi\alpha((p-1)\tau_{bk_1} + (m-1)\tau_{ak_1})}$ ， $F_{q,m}(k_2) = \xi_{k_2}^* e^{j\pi\alpha((q-1)\tau_{bk_2} + (m-1)\tau_{ak_2})}$ ，

$R_{p,q,m}(k_1, k_2) = R_{s'_m s'_m}^\alpha \left((p-1)\tau_{bk_1} - (q-1)\tau_{bk_2} + (m-1)(\tau_{ak_1} - \tau_{ak_2}) + \tau \right)$

则式(9)化简为：

$$R_{y_p y_q}^\alpha(\tau) = \sum_{k_1=1}^Q \sum_{k_2=1}^Q \sum_{m=1}^M R_{p,q,m}(k_1, k_2) E_1(k_1) E_2(k_2) \quad (11)$$

式(11)中，当 k_1, k_2 在 $[1, Q]$ 上取遍时，令 $\mathbf{A}_{p,q,m} = \begin{bmatrix} R_{p,q,m}(1,1) & R_{p,q,m}(1,2) & \cdots & R_{p,q,m}(1,Q) \\ R_{p,q,m}(2,1) & R_{p,q,m}(2,2) & \cdots & R_{p,q,m}(2,Q) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ R_{p,q,m}(Q,1) & R_{p,q,m}(Q,2) & \cdots & R_{p,q,m}(Q,Q) \end{bmatrix}$ ，

$\mathbf{E}_{p,m} = [E_{p,m}(1) \ E_{p,m}(2) \ \cdots \ E_{p,m}(Q)]^T$ ， $\mathbf{F}_{q,m} = [F_{q,m}(1) \ F_{q,m}(2) \ \cdots \ F_{q,m}(Q)]^T$ ，则式(11)可以写成

$$\mathbf{R}_{y_p y_q}^\alpha(\tau) = \sum_{m=1}^M \mathbf{E}_{p,m}^T \mathbf{A}_{p,q,m} \mathbf{F}_{q,m} \quad (12)$$

当取 $p=q$ 时，可以得到 N 个元素，将其组成 $N \times 1$ 维的循环自相关矢量，即

$$\mathbf{R}_Y(\alpha) = \left[\mathbf{R}_{y_1 y_1}^\alpha(\tau), \mathbf{R}_{y_2 y_2}^\alpha(\tau), \cdots, \mathbf{R}_{y_N y_N}^\alpha(\tau) \right]^H \quad (13)$$

将时延 τ 取不同的值，可以得到伪数据矩阵

$$\mathbf{R}(\alpha) = \left[\mathbf{R}_Y^\alpha(0), \mathbf{R}_Y^\alpha(T_s), \cdots, \mathbf{R}_Y^\alpha((L-1)T_s) \right] \quad (14)$$

式中 L 为采样点数，对式(14)得到的矩阵 $\mathbf{R}(\alpha)$ 进行特征值分解，求得信号子空间 \mathbf{U}_S^α 和噪声子空间 \mathbf{U}_N^α ，根据 MUSIC(Multiple Signal Classification)、ESPRIT(Estimation Signal Parameter via Rotational Invariance Techniques)

等基于特征子空间类的算法得到谱函数,进行谱峰搜索,即可得到 DOD 和 DOA。

对于宽带信号,中心频率随着时间的变化而改变,不同频率下的导向矢量不同,导致信号子空间随时间而变化。由于循环相关函数能够保留信号的相位信息,因此,利用发射信号的循环频率,可以去除噪声和非相同循环频率处的干扰信号,对于信号的带宽也无限制。

算法步骤:

- 1) 求解接收端上各阵元的接收数据 $y_p(t)(p=1,2,\dots,N)$;
- 2) 构造接收数据 $y_p(t)$ 的循环互相关函数 $\mathbf{R}_{y_p y_q}^\alpha(\tau)(p,q=1,2,\dots,N)$;
- 3) 在式(12)中,取 $p=q$ 构造 $N \times 1$ 维的循环自相关矩阵 $\mathbf{R}_y^\alpha(\tau)$;
- 4) 取不同的时延值 τ , 得到伪数据矩阵 $\mathbf{R}(\alpha)$;
- 5) 对 $\mathbf{R}(\alpha)$ 进行特征值分解,得到信号子空间 \mathbf{U}_S^α 和噪声子空间 \mathbf{U}_N^α ;
- 6) 结合 MUSIC,ESPRIT 等算法进行谱峰搜索获得目标位置。

4 实验仿真

本文将通过仿真来验证算法的可行性。假设双基地 MIMO 雷达系统拥有 $M=4$ 的发射阵和 $N=5$ 的接收阵,阵元间距 $d_1=d_r=\lambda/2$,远场空域中存在着 4 个点目标,目标位置分别为 $(-12^\circ,-43^\circ), (25^\circ,64^\circ), (-71^\circ,18^\circ), (57^\circ,-62^\circ)$,目标的反射系数分别为 $\zeta_1=0.65, \zeta_2=0.27, \zeta_3=0.74, \zeta_4=0.82$ 。若发射阵同时发射具有相同循环频率的二相相移键控(Binary Phase-Shift Keying, BPSK)宽带信号,信号的中心频率 $f_0=25$ MHz,循环频率为 $\alpha=0.5$,时域采样点为 1 024,取 100 次的蒙特卡罗实验均值作为估计结果。

实验 1: 对算法的有效性进行验证。

假设空域中存在信噪比为 5 dB 的加性高斯噪声以及信噪比为 5 dB 的以 23° 入射到接收阵的干扰信号,干扰信号的循环频率为 $\alpha=0.6$ 。仿真结果如图 2 和图 3 所示,可以看出本文算法在双基地 MIMO 雷达系统中能够很好地抑制高斯噪声,也能较好地滤除干扰信号,具有很好的 DOD-DOA 估计效果。

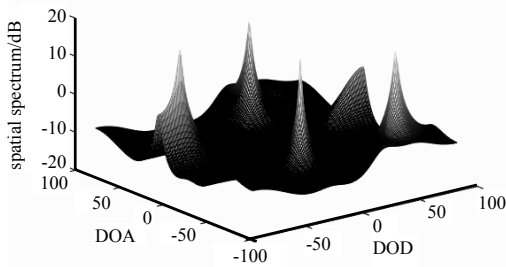


Fig.2 Spectrum of the estimated DOD-DOA with the proposed algorithm
图 2 本文算法的谱估计图

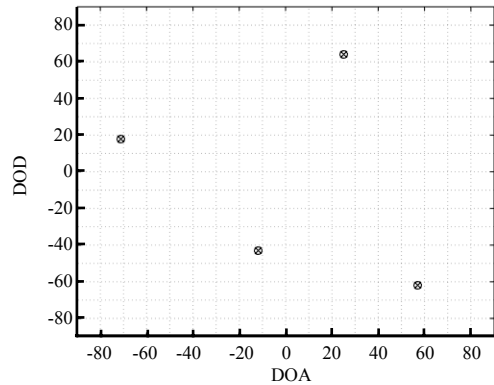


Fig.3 Estimation of the DOD-DOA with the proposed algorithm
图 3 本文算法下 DOD-DOA 估计值

根据文献[10],在衡量算法性能优劣时可以利用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来表示,其定义可表达为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{QG} \sum_{k=1}^Q \sum_{i=1}^G \left\{ (\hat{\theta}_{ki} - \theta_k)^2 + (\hat{\phi}_{ki} - \phi_k)^2 \right\}} \quad (15)$$

实验 2: 对算法的性能进行实验说明。

假设在接收端存在着以 23° 入射到接收阵的干扰信号,干扰信号的循环频率为 $\alpha=0.6$ 。系统噪声为与信号具有相同带宽的平稳带限高斯过程,信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)为 5 dB。图 4 所示为加权 MUSIC(WMUSIC)算法与循环 MUSIC 算法随信噪比变化的均方根误差曲线图,可以看出,存在高斯噪声与一个干扰信号背景下,循环 MUSIC 算法的性能明显优于 WMUSIC 算法,尤其是在低信噪比时,这是因为循环 MUSIC 算法在求解循环

平稳协方差矩阵时不仅抑制了干扰信号，还有效消除了高斯噪声的影响，而 WMUSIC 算法仅针对干扰信号进行了处理，未考虑噪声带来的影响，总体而言，循环 MUSIC 算法的性能优于 WMUSIC 算法。

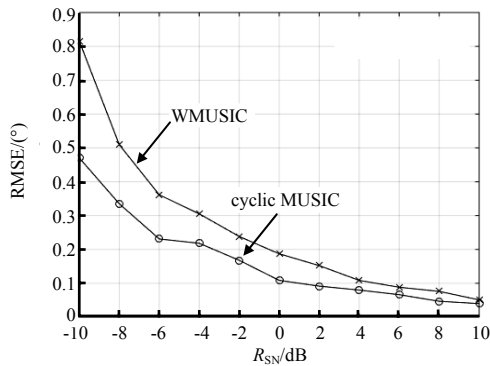


Fig.4 RMSE of the DOD-DOA estimation versus SNR with an interference signal

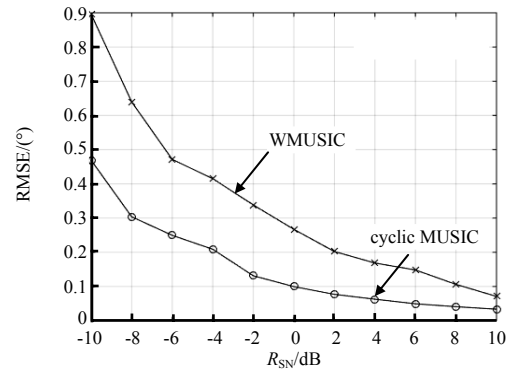


Fig.5 RMSE of the DOD-DOA estimation versus SNR with two interference signals

图 4 一个干扰信号时 DOD-DOA 联合估计均方根误差随信噪比的变化 图 5 2 个干扰信号时 DOD-DOA 联合估计均方根误差随信噪比的变化

假设空域中存在着分别以 23° 和 54° 入射到接收阵的 2 个干扰信号，循环频率分别为 $\alpha=0.6$ 和 $\alpha=0.3$ 。图 5 为存在 2 个干扰信号时 WMUSIC 算法与循环 MUSIC 算法随信噪比变化的均方根误差曲线图，可以看出，当存在多个干扰信号时，循环 MUSIC 算法能够很好地估计出目标的位置，其角度估计性能依然优于 WMUSIC 算法。

5 结论

由于宽带信号能够携带更多信息量，对于科技更为发达的未来，宽带信号将得到越来越多的关注。本文针对宽带循环平稳信号下的双基地 MIMO 雷达收发角估计，通过对具有循环平稳特性的宽带信号求解其循环互相关函数，达到抑制高斯噪声和具有不同循环频率的干扰信号的目的。仿真实验表明该算法对于双基地 MIMO 雷达 DOD-DOA 的联合估计具有良好的效果。

参考文献：

- [1] 刘付刚. 宽带信号波达方向估计方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2013. (LIU Fugang. The research on Direction Of Arrival estimation of wide-band signals[D]. Harbin,China:Harbin Engineering University, 2013.)
- [2] WANG Y,GAO Y,JIANG H,et al. DOA estimation of MIMO radar system based on cyclic statistics[C]// 2012 8th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing(WiCOM). Shanghai,China:IEEE, 2012:1-4.
- [3] DORON M A,WEISS A J,MESSER H. Maximum-likelihood direction finding of wide-band sources[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1993,41(1):411-414.
- [4] 官兵,徐以涛,李佳. 改进的非相干信号子空间宽带测向算法[J]. 无线电工程, 2011,41(3):11-13. (GONG Bing,XU Yitao, LI Jia. Modified incoherent subspace method for wideband direction finding[J]. Radio Engineering of China, 2011,41(3): 11-13.)
- [5] GONG Bing,XU Yitao,LIU Zhongjun. A fast algorithm of modified ISM for wideband direction finding[C]// International Conference of China Communication, 2010:417-422.
- [6] 陈辉,王永良,皮兴宇. 基于信号共轭循环平稳特性的算法研究[J]. 电子与信息学报, 2004,26(2):213-219. (CHEN Hui, WANG Yongliang,PI Xingyu. The pre-processing method based on signal conjugate cyclostationary[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004,26(2):213-219.)
- [7] 刘付刚,刁鸣. 应用循环平稳特性的宽带信号 DOA 估计[J]. 应用科学学报, 2012,30(2):146-150. (LIU Fugang,DIAO Ming. DOA estimation of wideband signals based on cyclostationarity[J]. Journal of Applied Sciences, 2012,30(2):146-150.)
- [8] 尤国红,邱天爽,兰天. 脉冲噪声环境下宽带循环平稳信号 DOA 估计算法[J]. 数据采集与处理, 2012,27(4):399-403. (YOU Guohong,QIU Tianshuang,LAN Tian. DOA estimation algorithm of wideband cyclostationary signals in impulsive noise environment[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2012,27(4):399-403.)
- [9] 李川. 基于信号循环平稳特性的到达角估计[D]. 成都:西南交通大学, 2006. (LI Chuan. Angles of arrival estimation based on cyclostationary of signals[D]. Chengdu,China:Southwest Jiaotong University, 2006.)

(下转第 991 页)