

基于匹配滤波原理的 MIMO 雷达信号分选算法

陈璐¹, 毕大平^{1,2}, 张伟¹

(1. 电子工程学院, 合肥 230037; 2. 安徽省电子制约技术重点实验室, 合肥 230037)

摘要: 针对多输入多输出(MIMO)雷达信号的分选问题, 借鉴雷达接收机中匹配滤波的思想, 提出了一种类匹配滤波的雷达对抗侦察分选算法。该算法将雷达对抗侦察接收机截获的脉冲信号构成待测脉冲组, 首个脉冲作为参考信号, 参考信号与待测脉冲组进行类匹配滤波运算, 运算结果峰值超过门限时, 则判定该信号与参考信号为同一信道; 若不超过门限, 则不为同一信道。去除同一信道的信号之后, 继续重新进行分选, 直到所有待测脉冲分选完毕。实验仿真表明, 分选算法具有抗噪声能力强、受脉间抖动的影响小、对截获信号的数目要求低、分选错误率低、工程实现简单的特点。

关键词: MIMO 雷达; 雷达对抗侦察; 匹配滤波运算; 信号分选; 脉间抖动

中图分类号: TN971.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2015)12-0107-05

MIMO Radar Signal Sorting Algorithm Based on Principle of Matched Filtering

CHEN Lu¹, BI Da-ping^{1,2}, ZHANG Wei¹

(1. Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China; 2. Key Laboratory of Electronic Restriction, Hefei 230037, China)

Abstract: To the sorting problem of Multiple-Input and Multiple-Output (MIMO) radar signals, by using the idea of matched filtering in radar receiver, a cluster matched filtering-based sorting algorithm of radar countermeasure reconnaissance is proposed. Pulse signals intercepted by radar reconnaissance receiver constitute the pulse group to be tested, with the first pulse being used as the reference signal. Cluster matched filter operation is made to the reference signal and the pulse group to be tested. When the operation result exceeds the threshold, it is judged that the tested pulse signals are in the same channel as the reference signal; otherwise, they are not in the same channel. After removal of signals in the same channel, sorting continues to be performed again, until sorting of all tested pulse signals is completed. Experimental simulation shows that the proposed sorting algorithm has strong anti-noise capability and low sorting error rate, is less affected by inter-pulse jitter, requires less number of intercepted signals, and easy to be implemented in engineering.

Key words: MIMO radar; radar countermeasure reconnaissance; matched filtering operation; signal sorting; inter-pulse jitter

0 引言

近年来, 无线通信技术获得飞速发展, 尤其是多输入多输出(MIMO)技术广泛应用于无线通信领域。鉴于雷达和通信系统的相似性, 学者们将 MIMO 的思想推广到雷达领域^[1], MIMO 雷达应运而生。作为一种新体制雷达, MIMO 雷达通过分集技术, 在低截获概率、动目标检测、杂波抑制、目标参数估计、目标成像等领域的性能都优于传统体制雷达^[2-5], 因此, MIMO 体

制将成为未来雷达发展的一个趋势。然而, 针对 MIMO 雷达的对抗侦察技术和干扰技术相关研究较少, 所以应该加强这一方面的技术研究。

雷达对抗侦察系统中最关键的部分是信号处理系统, 而信号分选则是信号处理系统的重要环节。20 世纪 70 年代, Campbell 等人开始对信号分选问题进行研究^[6]; 80 年代, Rogers 等人开始研究基于脉冲重复周期(PRI)的信号去交错算法^[7]; 为适应复杂的信号环境, 文献[8]在 PRI 分选的基础上提出了累积直方图(CDIF)算法; 为解决 CDIF 算法计算量大的问题, 文献[9]对 CDIF 算法改进后提出了时序差直方图(SDIF)算法; 为解决 SDIF 算法对重频抖动信号分选效果差的

收稿日期: 2014-12-31

修回日期: 2015-02-03

作者简介: 陈璐(1989—), 男, 河南洛阳人, 硕士生, 研究方向为雷达信号侦察技术。

问题,文献[10]提出了 PRI 变换算法,从而使信号分选中出现的子谐波得到了抑制;文献[11]提出了平面变换技术,解决了重频参差的信号分选问题。

本文主要针对 MIMO 雷达信号的分选问题,根据其信号特点,提出了一种基于匹配滤波原理的脉冲分选方法,有效摆脱了传统分选方法对 PRI 分选的依赖性,在低信噪比条件下,仍然具有较好的分选效果。

1 MIMO 雷达信号的分析

MIMO 雷达通过采用多输入多输出的天线阵列结构^[12],构成多个收发通道,而且在信号样式上,采用正交信号,使各个信道内的信号相互正交,而在接收端采用匹配滤波技术^[13],使不同信道的信号不相互干扰,形成多通道雷达,这种收发特点和信号样式使得 MIMO 雷达具有优越的探测性能和低截获性能。

假设 MIMO 雷达共有 M 个全向发射天线, N 个接收天线。在发射端分别产生 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$ 共 M 组互不相关的正交信号,保证在空间传播时不会产生同相叠加问题;在接收端,通过 N 个接收天线产生 N 个接收通道,利用匹配滤波器组接收各个回波,并进行叠加处理,这样就在空间中形成了 MN 个信道,提高了信号在空间中的探测目标的能力,并且降低了信号的截获概率,如图 1 所示。

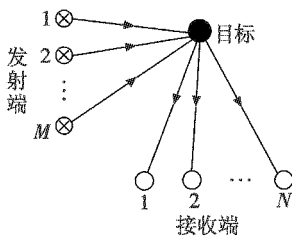


图 1 MIMO 雷达基本原理图

Fig. 1 The basic principle of MIMO radar

假设 t 时刻 M 个全向发射天线发射 M 个信道正交信号为 $s_1(t), s_2(t), \dots, s_M(t)$, 其中各个信号需满足

$$\int_{-\infty}^{\infty} s_i(t) \cdot s_j^*(t - \tau) dt = \delta(i - j)\delta(\tau) \quad i, j = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

式中, $\delta(t)$ 为冲激函数, 满足 $\delta(t) = \begin{cases} \infty & t=0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases}$, 当各个信道的信号满足上式时, 即相同信道内的信号有强自相关性, 不同信道内的信号互相关性弱, 则说明信号满足 MIMO 雷达对信号的要求。

2 传统的信号分选方法

一般的信号分选方法主要以信号的脉冲描述字 (PDW) 为分选依据, 包括载频 (RF)、到达方向 (DOA)、

到达时间 (TOA)、脉冲宽度 (PW)、脉冲幅度 (PA), 通过预选和主分选两个步骤, 将时域交错的信号分开, 常见的分选方法有以下几种^[14]。

1) 动态关联法, 基于先验信息, 选取适当的脉冲间隔作为脉冲周期 PRI, 以此 PRI 为基准, 在合适的容差的基础上向后搜索下一个脉冲, 达到足够的门限数量脉冲之后, 就可以认为是同一部雷达的脉冲序列。优点是分选速度快, 缺点是当出现脉冲丢失时, 分选容易发生漏警。分选结果的优劣与首先检测到的 PRI 大小有关, PRI 范围大时, 无法检测。

2) 累积差值直方图算法 (CDIF), 通过累积各级差值直方图来估计原始脉冲序列中可能存在的 PRI, 并根据该 PRI 来进行序列搜索。优点是对干扰脉冲和脉冲丢失不敏感, 缺点是对 PRI 抖动信号、存在多径效应的信号会产生错误。

3) 序列差值直方图算法 (SDIF), 在 CDIF 基础上进行改进, 利用雷达脉冲的 TOA 差进行直方图统计, 但是对不同阶的到达时间差直方图的统计结果不进行累积, 相应的检测门限也与 CDIF 不同。优点是计算速度比 CDIF 快, 具有最佳检测门限, 缺点是不进行级间积累, 性能下降, 不能解决抖动脉冲的分选问题。

4) PRI 变换法及其改进算法, 对交叠的脉冲序列进行 PRI 变换, 形成 PRI 谱图, 与门限做比较, 进行分选。优点是分选较为准确, 能有效抑制谐波分量, 缺点是当 PRI 存在较大抖动量时, 算法的有效性就会迅速下降。

3 类匹配滤波信号分选

通过前文的比较分析, 发现传统的分选算法有一个明显的缺点是对 PRI 抖动量非常敏感, 抖动量越大, 算法的准确性能就越差。对于 MIMO 这种具有特殊信号体制特点的雷达而言, 可以考虑采用一种新的分选算法进行信号分选, 以提高对 MIMO 雷达侦察的效果。

MIMO 雷达信号主要特点是多个通道发射信号, 同时信号满足两个基本条件: 1) 同一通道的信号自相关性能好; 2) 不同通道信号的互相关性差。现有的关于 MIMO 雷达信号样式设计的文献中^[15-19], MIMO 雷达的信号主要分为两大类: 调频信号和调相信号。但是, 不管 MIMO 雷达的频率和相位如何编码, 都要满足条件 1) 和条件 2)。因此, 可以考虑利用这两个条件进行 MIMO 雷达不同信道信号的分选。

3.1 匹配滤波基本原理

在雷达探测中, 由于已知雷达的发射信号样式, 据此可以在雷达接收机中设计匹配滤波器, 从而达到接收机输出信噪比最大的目的, 能够在低信噪比条件下实现雷达的探测功能。

设雷达接收机接收到的回波 $x(t)$ 满足

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (2)$$

式中： $s(t)$ 为确知的雷达信号； $n(t)$ 为功率谱密度为 $N_0/2$ 的高斯白噪声。回波经过冲激响应为 $h(t)$ 的线性时不变系统得

$$y(t) = s_0(t) + n_0(t) \quad 0 \leq t \leq T \quad (3)$$

式中： $s_0(t)$ 为线性系统对应于雷达信号 $s(t)$ 的输出； $n_0(t)$ 为线性系统对应于噪声 $n(t)$ 的输出。则系统输出信噪比为

$$R_{s,n_0} = \frac{s_0^2(t)}{E\{n_0^2(t)\}} \quad (4)$$

平稳白噪声通过传输函数为 $H(j\omega)$ 的系统之后，平均功率为

$$E\{n_0^2(t)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{N_0}{2} |H(j\omega)|^2 d\omega \quad (5)$$

信号 $s(t)$ 经过系统之后的输出为

$$s_0(t_0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) H(j\omega) e^{j\omega t_0} d\omega \quad (6)$$

式中， $S(\omega)$ 为 $s(t)$ 的傅里叶变换。将式(5)、式(6)代入式(4)，并求其最大值，得到传输函数为

$$H(j\omega) = CS^*(\omega) e^{-j\omega t_0} \quad (7)$$

当 $C=1$ 时，匹配滤波器的冲激响应 $h(t)$ 为

$$h(t) = F^{-1}\{H(j\omega)\} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S^*(\omega) e^{j\omega(t-t_0)} d\omega = s^*(t_0 - t) \quad (8)$$

由上式可知，匹配滤波器的冲激响应为信号 $s(t)$ 的共轭，对实信号而言，为信号 $s(t)$ 的延时，匹配滤波器的输出信号为

$$s_0(t) = \int_0^T h(\tau) s(t - \tau) d\tau = \int_{-T}^t s(\tau - t) s(\tau) d\tau \quad (9)$$

根据冲激响应 $h(t)$ ，就可以设计雷达信号的匹配滤波器，对雷达信号进行匹配接收。

3.2 类匹配滤波运算

在雷达对抗侦察中，由于不知道所要侦察信号的相关参数，所以无法实现匹配滤波。但是通过式(9)可知，如果同一雷达发射同样的脉冲信号 $s(t)$ ，将前后的脉冲信号 $s(t)$ 经过延时、相乘、积分之后，与匹配滤波输出结果相同，从而达到运算输出信噪比最大。根据这种思想，通过设计“类匹配滤波算法”，可以在雷达对抗侦察接收机中达到与匹配滤波同样的输出效果。

下面定义类匹配滤波算法。假设雷达对抗侦察接收机截获一串脉冲 $\mathbf{X}(m) = [\mathbf{x}_1(m_1), \mathbf{x}_2(m_2), \dots, \mathbf{x}_n(m_n)]^T$ ，其中， $\mathbf{x}_n(m_n)$ 表示对第 n 个脉冲进行采样所得到的数据向量。以 $x_1(m)$ 为例，定义类匹配滤波运算

$$\mathbf{W} = x_1(m) \otimes \mathbf{X}(m) = \begin{pmatrix} \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_1(k-m)x_1(k) \\ \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_1(k-m)x_2(k) \\ \vdots \\ \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_1(k-m)x_n(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} \quad (10)$$

运算 $x_1(m) \otimes \mathbf{X}(m)$ 代表变量 $x_1(m)$ 与矩阵 $\mathbf{X}(m)$ 的每一个脉冲分量分别做相关运算，得到分选矩阵 \mathbf{W} 。

根据前文对匹配滤波器的分析可知，相关运算与匹配滤波的结果等效，即在 $\mathbf{X}(m)$ 的所有脉冲中，假设脉冲 $x_i(m)$ 与 $x_1(m)$ 为同一发射机发射的脉冲，此时 w_i 将产生峰值，否则将不产生峰值。设置门限值 α ，其值为峰值最大值的 1/2，即

$$\alpha = \frac{\sqrt{2}}{2} \max_{i=1, \dots, n} \{ \max_{j=1, \dots, m} (w_{ij}) \} \quad (11)$$

建立分选判断矩阵 $\mathbf{R}^{n \times 1}$ ，矩阵的每个元素 r_i ($i=1, 2, \dots, n$) 满足

$$r_i = \begin{cases} 1 & \max_{i=1, \dots, n} (w_i) \geq \alpha \\ 0 & \max_{i=1, \dots, n} (w_i) < \alpha \end{cases} \quad (12)$$

则可得出结论：当 $r_i=1$ 时，对应的 $X(t)$ 中的 $x_i(m)$ 与 $x_1(m)$ 为同一雷达发射机发射的信号脉冲；当 $r_i=0$ 时，对应的 $X(t)$ 中的 $x_i(m)$ 与 $x_1(m)$ 为不同雷达发射机发射的信号脉冲。

3.3 MIMO 雷达信号类匹配滤波分选算法

假设两 MIMO 雷达脉冲信号 $x_1(m), x_2(m)$ 为

$$x_1(m) = s_1(m) + n_1(m) \quad 0 \leq m \leq N \quad (13)$$

$$x_2(m) = s_2(m) + n_2(m) \quad 0 \leq m \leq N \quad (14)$$

式中： $s(m)$ 为雷达发射的信号； $n(m)$ 为高斯白噪声。两个信号被接收机截获之后，对采样数据按照式(10)进行运算，即

$$w_2 = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x_1(k-m)x_2(k) \quad (15)$$

将式(1)、式(13)、式(14)代入上式得

$$w_2 = \begin{cases} \delta(\tau) & s_1(t), s_2(t) \text{ 为同一信道信号} \\ 0 & s_1(t), s_2(t) \text{ 为不同信道信号} \end{cases} \quad (16)$$

可以得出结论，对于 MIMO 雷达信号而言，将两个截获的脉冲信号进行类匹配滤波运算之后，如果两个脉冲是同一信道信号，则运算结果 w 将产生峰值，否则，不会产生峰值。因此，可以利用这个性质进行不同信道混叠信号的分选。

类匹配滤波分选算法描述：根据上文分析，同一信道的脉冲经过类匹配滤波运算之后，存在峰值，不同信道的脉冲运算结果为零，由此，可以得到一种基于类匹

配滤波运算的 MIMO 雷达分选方法。具体分选算法流程如图 2 所示。

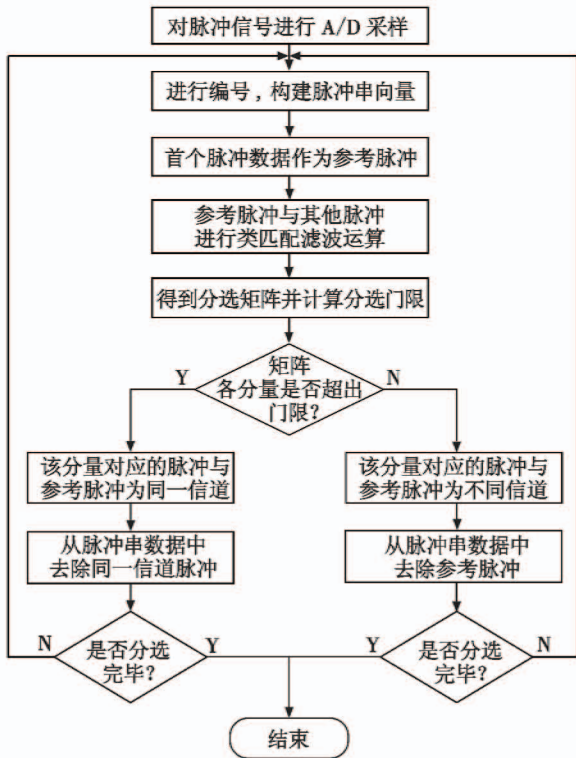


图 2 类匹配滤波分选算法流程图

Fig.2 The flow chart of cluster matched filtering sorting method

经过上文的分析可知,理论上类匹配滤波分选对 MIMO 雷达信号会有较理想的结果,该算法不仅适用于 MIMO 雷达信号,对于常见雷达信号的分选也会有较好的效果。因为,同一部雷达只要前后发射的脉冲信号不发生改变,那么前后脉冲的类匹配滤波运算峰值

就较大;不同的雷达由于发射信号存在差异,会导致不同雷达脉冲信号运算之后峰值较低(虽然不为零)。因此,类匹配滤波分选算法可以适用于一般雷达信号的分选。

4 实验仿真及分析

由文献[20]得到一组 128 位四相编码的 MIMO 雷达信号,其中 $[0,1,2,3]$ 代表 $[0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}]$,如表 1 所示。

表 1 128 位四相编码
Table 1 128 bits of four-phase coding

编码	128 位四相码
pm_1	$[3,0,1,1,3,2,1,3,0,3,1, \dots, 3,3,1,2]$
pm_2	$[0,1,1,3,0,2,2,1,2,0,1, \dots, 3,2,0,0]$
pm_3	$[2,2,1,0,2,0,1,2,0,1,3, \dots, 1,1,2,2]$
pm_4	$[1,3,1,3,3,1,3,3,0,3,2, \dots, 1,3,3,3]$

4.1 类匹配滤波分选仿真实验

以 MIMO 雷达为实验对象,生成 4 个信道的正交相位编码信号,相关参数如表 2 所示。

表 2 4 个信道的信号参数
Table 2 Signal parameters of four channels

信道	编码	载频/MHz	脉冲宽度/ms	脉冲周期/ms	起始时间/ms	脉冲个数
1	pm_1	300	0.128	10	0	4
2	pm_2	300	0.128	13	1.5	4
3	pm_3	300	0.128	15	3	4
4	pm_4	300	0.128	17	4.5	4

在信噪比为 0 dB 条件下,利用本文分选算法,对混叠在一起的 4 个信道信号进行分选,其分选结果如图 3a 所示。在信噪比为 0 dB、脉间抖动量为 20% 条件下,重新进行实验分选,结果如图 3b 所示。

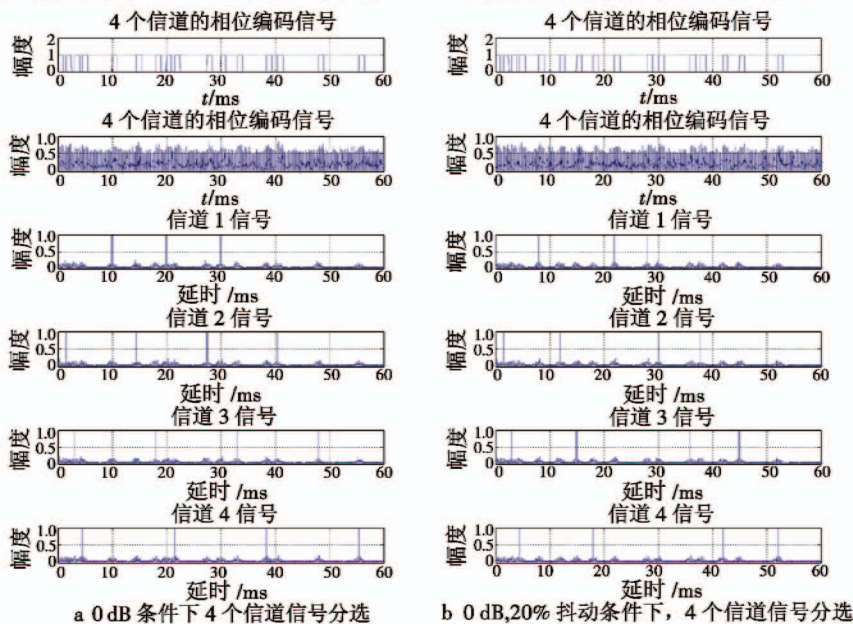


图 3 MIMO 雷达信号类匹配滤波分选结果

Fig.3 The sorting result of MIMO radar cluster matched filtering sorting method

图 3 中,每个分选结果图上峰值对应同一信道的信号,峰值所在时刻对应该信号到达时间。

通过图 3 分选结果可以看出:1) 类匹配滤波分选可以清晰地将不同信道的 MIMO 雷达分选出来;2) 类匹配滤波分选算法对噪声不敏感,在低信噪比条件下依然效果很好;3) 脉间抖动对类匹配滤波分选算法没有影响。

4.2 不同条件下对比实验

在不同信噪比条件下和不同抖动条件下,将本文提出的类匹配滤波分选算法与 PRI 变换算法、CDIF 分选算法、SDIF 分选算法这 3 种传统的分选方法进行 1000 次统计对比实验,结果如图 4 所示。

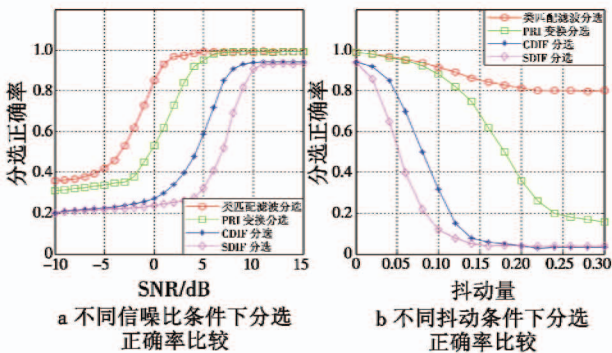


图 4 类匹配滤波分选算法与传统分选算法对比

Fig. 4 Cluster matched filtering sorting algorithm and traditional sorting algorithm

结果表明,在高信噪比条件下,本文算法与传统算法分选正确率相差不大,而在低信噪比条件下,本文算法要优于传统分选算法,并且在高抖动量条件下,本文算法的分选性能要明显优于传统分选算法。

5 结论

通过上面的理论推导和仿真分析可以看出,针对 MIMO 雷达信号的特点,通过类匹配滤波分选算法能较好地将不同信道的信号分选出来,并且与传统的分选方法相比有以下几个优点:1) 受信噪比约束较小,在低信噪比条件下,分选效果也较为理想;2) 不受脉间抖动量的影响,在信号脉间存在调制的条件下,本文算法也有较好的分选效果;3) 对截获脉冲的个数要求低,2 个脉冲依然能完成分选;4) 峰值高,门限容易确定,分选结果错误率低。因此,本文算法有较好的适用性。

参考文献

[1] FISHER E, HAIMOVICH A, BLUM R, et al. MIMO radar: an idea whose time has come [C]//Proceeding of the IEEE Radar Conference, 2004:71-78.
[2] BLISS D W, FORSYTHE K W. Multiple-input multiple-

output radar and imaging: degrees of freedom and resolution [C]//Proceeding of 37th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, 2003:54-59.
[3] FISHLER E, HAIMOVICH A, BLUM R, et al. Spatial diversity in radar-models and detection performance [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54(3):823-838.
[4] LI J, STOICA P. MIMO radar with collocated antennas [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(5):106-114.
[5] GOGINENI S, NEHORAI A. Polarimetric MIMO radar with distributed antennas for target detection [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(3):1689-1697.
[6] CAMPBELL J W, SAPERSTEIN S. Signal recognition in complex radar environments [J]. Watlons-Johnson Tech Notes, 1976, 3(6):81-87.
[7] ROGERS J A V. ESM Processor system for high pulse density radar environment [J]. IEEE Signal Processing, 1985, 132(7):621-625.
[8] NISHIGUCHI K. A new method for estimation of pulse repetition intervals [J]. National Convention Record of IECE of Japan Information and Systems Section, 1983, 9(1):230-247.
[9] MILOJEVIC D J, POPOVIC B M. Improved algorithm for the deinterleaving of radar pulses [J]. Radar and Signal Processing, 1992, 139(1):98-104.
[10] NISHIGUCHI K, KOBAYASHI M. Improved algorithm for estimating pulse repetition intervals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(2):407-421.
[11] 赵仁健,龙德浩,熊平,等.密集信号分选的平面变换技术[J].电子学报,1998,26(1):77-82. (ZHAO R J, LONG D H, XIONG P, et al. Plane transformation for signal deinterleaving in dense signal environment [J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(1):77-82.)
[12] YU Y, PETROPULU A P, POOR H V. Power allocation for CS-based collocated MIMO radar system [C]//IEEE 7th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM), 2012:217-220.
[13] FRIEDLANDER B. Waveform design for MIMO radars [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(5):1227-1238.
[14] 杨学永,宋国栋,钱轶,等.现代雷达信号分选跟踪的几种方法[J].现代雷达,2014,36(3):43-48. (YANG X Y, SONG G D, QIAN Y, et al. Several methods of radar signal sorting and tracking [J]. Modern Radar, 2014, 36(3):43-48.)