

文章编号: 2095-4980(2017)04-0590-05

一种随机跳频宽带雷达滤波器设计方法

彭江, 欧建平, 张军

(国防科学技术大学 ATR 实验室, 湖南 长沙 410000)

摘要: 针对随机跳频宽带雷达设计了一种旁瓣抑制滤波器, 考虑到瞬时带宽信号获取的代价较高, 以及其抗干扰性能弱等不足, 采用了一种脉冲频点随机跳变的跳频信号。根据信号特点, 在前人研究的基础上提出了针对该信号的滤波器的设计方案。仿真结果表明, 所设计的滤波器很好地抑制了旁瓣, 具有峰值旁瓣低、收敛速度快、易实现等特点, 在一定程度上提高了宽带雷达的性能。

关键词: 随机跳频; 滤波器; 旁瓣抑制

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0590

A novel filter design for random hopped-frequency wide-band radar

PENG Jiang, OU Jianping, ZHANG Jun

(ATR Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410000, China)

Abstract: With the development of electronic countermeasure technology, the requirements on anti-jamming ability, resolution of radar become stricter than before. In this paper, a kind of sidelobe suppression filter is designed for random hopped-frequency wide-band radar. Taking the high price of instantaneous bandwidth signal and weak anti-interference into consideration, a discrete random step-frequency signal is adopted. According to the signal characteristics and on the basis of predecessors, a filter design is proposed for the signal. The simulation results show that the designed filter can suppress the sidelobe obviously, with the characteristics of lower peak sidelobe and easy to be realized, which improves the performance of wide-band radar.

Keywords: random hopped-frequency; filter; sidelobe suppression

为了充分利用频谱资源以获得最好的测距分辨力, 需要采用非连续谱信号形式, 即采用随机跳频信号。然而非连续谱会导致脉压输出高旁瓣情况^[1-2], 高的距离旁瓣不但使雷达回波图像中出现虚假目标, 而且大尺寸的目标很容易淹没小尺寸目标, 造成目标丢失, 并且有可能使大尺寸的目标被碎裂成为多个小尺寸的“目标”, 在雷达图像上显示为众多的小斑点, 严重影响了雷达的性能。为了提高雷达的距离分辨力, 旁瓣的抑制变得尤为重要。

对于旁瓣抑制问题, 一方面, 人们寻求具有优良的非周期自相关性能的信号, 致力于波形设计及信号编码。如文献[3]中准随机跳频脉冲信号, 其各脉冲频率在可用频带内非均匀分布, 进而获得期望的距离旁瓣特性; 文献[4]中将每个脉冲分为若干个具有不同起始频率和调频斜率的线性调频片段, 通过优化控制脉冲内各片段的参数实现对信号自相关函数的控制; 文献[5]中将各脉冲的幅度作为用以优化信号距离旁瓣的自由度, 对信号功率分布加入了限制以保证波形幅度变化范围不超出发射机放大器的动态范围。近些年, 针对随机跳频信号设计的问题, 也涌现出了许多随机进化算法^[6-8], 如遗传算法、差分进化算法、粒子群算法等, 在随机跳频脉冲信号设计问题中得到了广泛应用。另一方面, 根据信号波形的特点, 采用相应的处理方法, 如 Rihaczek 在前人的基础上, 通过对巴克码功率谱密度函数的分析, 推导出了一种通过减小功率谱密度函数的波动来压低旁瓣电平的易于数字化实现的方法, 这是一类有代表性的方法; Ackroyd 应用积分旁瓣电平作为目标函数, 作为最小均方逼近导出的最小二乘设计方法, Baden 利用加权迭代来进一步优化峰值旁瓣电平; 文献[3]中通过自适应脉冲压缩来间接达到旁瓣抑制的目的。

然而这些方法并不针对随机跳频信号, 对旁瓣的改善极为有限。再者跳频信号处理受到速度的影响, 出现目标单元抖动和距离模糊现象, 而频点的跳变又引起了很高的距离旁瓣, 使得随机跳频信号的处理变得更加困难。

收稿日期: 2015-11-16; 修回日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61471370)

针对以上问题,本文中采用改进的自适应迭代最小二乘算法来设计相应的滤波器,以此来实现对旁瓣的抑制。在传统的最小二乘算法迭代过程中,门限值为一个固定参数,不能根据上一时刻结果自适应调整门限参数,在本文中根据输出结果动态地调整算法门限,加快了算法的收敛速度。此方案不仅能较好地抑制随机跳频信号的距离旁瓣,增强目标识别能力,而且具有易实现、易处理的特点,在一定程度上提高了宽带雷达对目标的识别能力。

1 信号分析

随机跳频信号时典型的非平稳信号,其载波频率随机跳变,所用载波频率的集合称为跳频信号的频率集,最大载波频率与最小载波频率的差称为跳频信号的带宽,载波频率随时间的变化规律称为跳频信号的跳频图案^[9]。随机跳频信号雷达是均匀步进频雷达的进一步推广。在均匀步进频雷达体制中,瞬时频率 f_m 为:

$$f_m = f_c + m\Delta f, m = 0, 1, 2, \dots, M - 1 \tag{1}$$

式中: Δf 为固定步长; f_c 为基带载频。而在随机跳频雷达体制下 f_m 不再是线性递增的,而是在一定带宽内服从随机分布。为了获得较好的统计特性,同时避免 1 个信号周期内脉冲数过大对信号无模糊测速范围造成限制,全随机跳频信号抛弃了周期重复的信号体制,在 1 次积累过程中以给定分布函数随机产生跳频组合,因而称其为“随机跳频信号”。

根据工作频带的电磁环境状况,从可用工作频带内按照一定分布随机抽选出 N 个可用跳频点组成可用频率集,随机信号发射频率在此频率集中随机选取,图 1 为 1 组全随机跳频信号发射示意图,则在 1 次积累过程中全随机跳频信号 $s(t)$ 可表示为^[3]:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}_T(t - nT_r) A e^{j2\pi f_n t} \tag{2}$$

式中: $\text{rect}_T(t) = \begin{cases} 1, & -\frac{T}{2} \leq t < \frac{T}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$; T 为脉冲宽度; T_r 为脉冲重

复周期; A 为脉冲幅度; N 为 1 次积累过程中脉冲总数; f_n 为第 n 个脉冲的发射频率,这些频率以确定的某一概率密度出现。通过上述对发射频率的随机选取,在不同次独立实验及同次试验中不同片段的信号频率组合都是不同的。为了使分析更为简便,假定接收信号幅度为 1,目标径向速度为零,则回波信号 $s_r(t)$ 可表示为:

$$s_r(t) = \sum_{n=0}^{K-1} e^{j2\pi f_n(t-\tau)} \text{rect}_T(t - nT_r - \tau) \tag{3}$$

式中: $\tau = \frac{2R_0}{c}$, R_0 为初始距离, c 表示光速。

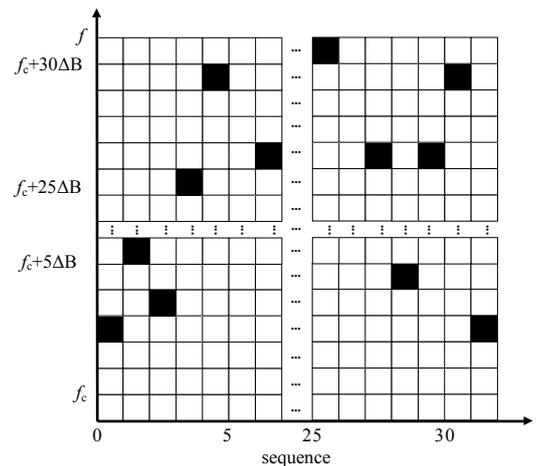


Fig.1 A group of pulse frequency point distribution of rand hopped-frequency signal
图1 一组随机跳频信号脉冲频点分布

2 算法描述及实现

算法的实现主要就是旁瓣抑制滤波器的设计,而滤波器的性能与所采用的准则密切相关^[10]。现有的旁瓣抑制准则主要有:一种是以均方误差最小为准则的积分旁瓣电平(Integrated Sidelobe Level, ISL)最低;另一种是以 Minimax 为准则的峰值旁瓣水平(Peak-Side-lobe Level, PS�)最低^[11]。前者主要用于杂波服从均匀分布的情况,而后者多用于杂波非均匀分布的情况。在本文中基于以上 2 种准则提出了改进的旁瓣抑制算法。

2.1 积分旁瓣最小处理

按照波形参数,将同一个原始距离分辨单元分成 M 个基本距离单元,对每个基本距离单元独立设计相应的滤波器,当信号为来自某一基本距离单元范围内的回波时,对应的滤波器响应最大,期望值为 1;而对于来自其他距离单元的回波时,该滤波器的响应最小,期望值为零。

第 m 个基本距离单元的回波信号为:

$$s_{rm} = (e^{-j2\pi f_0 \tau m/M}, e^{-j2\pi f_1 \tau m/M}, \dots, e^{-j2\pi f_{N-1} \tau m/M}) \tag{4}$$

那么 M 个基本距离单元上的回波信号矩阵为:

$$\mathbf{S}_r = (s_{r0}^T, s_{r1}^T, \dots, s_{r(M-1)}^T)^T \quad (5)$$

记第 m 个基本距离单元对应的滤波器为 f_m , M 个滤波器可以写成滤波器集 \mathbf{F} :

$$\mathbf{F} = (f_0, f_1, \dots, f_{M-1})^T \quad (6)$$

每个滤波器的输出为 M 维列向量, 期望输出矩阵 $\mathbf{D} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 维矩阵。根据积分旁瓣最小准则要求: a) 旁瓣的积分和最小; b) 主瓣峰值最大, 期望值为 1。那么上述问题可转化为寻求最优解 \mathbf{F} 使得实际输出 $\mathbf{S}_r \times \mathbf{F}$, 最接近期望输出 \mathbf{D} 。在这里, 需要在一定条件下约束求解, 那么第 m 个基本距离单元对应的滤波器可以描述为: a) 旁

瓣积分最小: $\min \sum_{i=0, i \neq m}^{M-1} |s_{ri} f_m| = f_m^H (\mathbf{S}')^H \mathbf{S}' f_m$, \mathbf{S}' 为除去第 m 行的 \mathbf{S}_r ; b) 峰值最大: $s_{rm} f_m = 1$ 。那么可以求解得出最

优滤波器为: $f_m = [(\mathbf{S}')^H \mathbf{S}']^{-1} \cdot s_{rm}^H \cdot \{s_{rm} \cdot [(\mathbf{S}')^H \mathbf{S}']^{-1} \cdot s_{rm}^H\}^{-1}$, 以此可以求解出滤波器集 \mathbf{F} 。

2.2 最大峰值处理

随机跳频信号引起的距离旁瓣的分布是很不均匀的, 峰值旁瓣也是随机出现的, 不一定在主瓣附近, 因此经过积分旁瓣最小处理后, 峰值旁瓣往往还是很高, 不能满足目标检测的要求。峰值旁瓣一般是通过迭代处理进行抑制的, 其大致原理是通过目标函数的迭代加权, 有选择性地对旁瓣进行抑制。迭代的过程中, 在 ISL 和 PSL 中折衷选择, 最后逼近峰值旁瓣最小。

在传统的加权迭代最小二乘算法迭代过程中, 其门限值为一个固定不变的参数, 在本文中通过总结分析传统加权迭代最小二乘算法的优劣性, 将其固定的门限值改为与算法上一时刻输出的峰值旁瓣相关联的变量。此改进的加权迭代最小二乘算法不但提升了算法的收敛速度, 并根据输出的峰值旁瓣与设定旁瓣值的差值自动调整加权因子, 更加有效地实现了对峰值旁瓣的抑制。具体实现方法如下:

1) 初始化: 初始化加权因子 $\mathbf{w}^0 = [1, 1, \dots, 1]^T$, 初始化门限 $d = 0.5$, 数据矩阵 $\mathbf{S}'^0 = \mathbf{S}'$;

2) 当前时刻参数计算: k 时刻旁瓣: $\mathbf{s}l = \mathbf{S}' f_m$; k 时刻对应的滤波器: $f_m = [(\mathbf{S}'^k)^H \mathbf{S}'^k]^{-1} \cdot s_{rm}^H \cdot \{s_{rm} \cdot [(\mathbf{S}'^k)^H \mathbf{S}'^k]^{-1} \cdot s_{rm}^H\}^{-1}$;

3) 下一时刻数据更新: $k+1$ 时刻的门限 $d^{k+1} = \lambda \cdot \max |sl|$, 其中 λ 为收敛因子。 $k+1$ 时刻数据矩阵 $\mathbf{S}'^{k+1}(i, j) = \mathbf{S}'^k(i, j) \cdot w^k(i)$, 其中 $i = 0, 1, 2, \dots, M-1$, $j = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 。 $k+1$ 时刻加权因子计算: 如果旁瓣值大于此时刻门限, 则对加权因子 $w^{k+1}(i) = w^k(i) + \eta \cdot sl^k(i)$; 否则加权因子保持不变。其中 η 为修改步进因子。

4) 算法终止条件: 如果 $d^k < \varepsilon$, 跳转至 2), 否则退出, 其中 ε 为期望最大旁瓣水平。

3 仿真结果及分析

为了有效地比较算法优化前后的优劣, 将积分旁瓣处理的结果和积分旁瓣处理后再采用改进的最小二乘算法处理的结果进行对比。

3.1 单目标仿真结果及分析

选取波形与信号处理参数如下: 设载频 $f_c = 35$ GHz, 脉冲宽度 $\tau = 1$ μ s, 脉冲重复周期 $T = 100$ μ s, 一个积累过程中脉冲个数 $N = 32$, 跳频总带宽 $B = 100$ MHz, 脉间无频谱混叠。基本距离单元数 $M = 300$ 。

在静止单目标状态下, 假定目标位置在基本距离单元 58 处, 进行了算法的仿真, 其结果见图 2。图 2 为积分旁瓣最小算法 (Minimal Integral Sidelobe, MISL) 处理后的输出结果, 图 3 为在

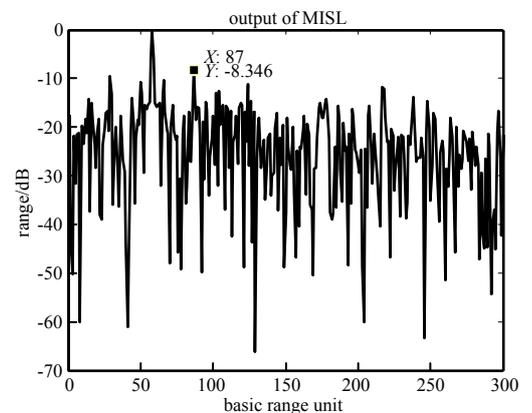


Fig.2 MISL output of single target
图 2 单目标 MISL 输出结果

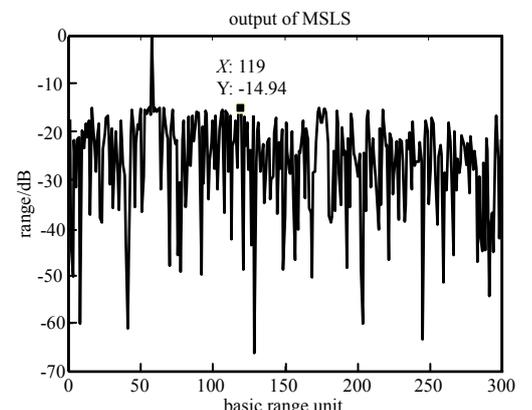


Fig.3 MSLS output of single target
图 3 单目标 MSLS 输出结果

积分旁瓣最小的基础上改进的自适应迭代最小二乘的最大旁瓣抑制算法(Maximum Sidelobe Suppression, MSLS)处理后的结果。从图 2 中可以看出, MISL 处理的结果中旁瓣幅度比较高, 最大旁瓣出现在基本单元 87 处, 其幅度值为 -8.346 dB , 且参差不齐; 而经过 MSLS 处理后, 可以看到旁瓣幅度有了明显下降, 最大旁瓣出现在基本距离单元 119 处, 其幅度值为 -14.94 dB , 并且旁瓣幅度比较平整。结果表明, MSLS 有效抑制了最大旁瓣, 降低了峰值旁瓣的幅度, 相对于 MISL 有了 7 dB 左右改善。

在图 4 中可以看到, 经过多次(仿真中为 32 次)计算, 对比 MISL 和 MSLS 两种算法的实验结果可以进一步得出, MSLS 大大地降低了回波的峰值旁瓣, 在归一化的幅度下峰值旁瓣均值由 MISL 的 0.4258 降低至 0.1794 。进一步验证了算法的有效性。

3.2 多目标仿真结果及分析

波形参数设计参照 3.1 节。当 2 个目标距离比较远的时候, 2 种算法表现出来的差异和 3.1 节基本一致, MSLS 相对 MISL 的处理结果中, 峰值旁瓣水平从 -5.583 dB 降低至 -14.9 dB , 并且整体旁瓣幅度比较平整, 见图 5 和图 6。为排除实验的偶然性, 在 2 个目标相距很远的情况下, 经过多次仿真得出 2 种滤波器对应的实验结果, 见图 7, 得到同样的结论。

当 2 个目标距离很小的时候, 在分辨力不高的情况下, 目标回波会发生混叠, 强目标回波的旁瓣会“淹没”弱目标的回波, 此时如果不加以处理将造成弱目标丢失的结果。图 8 中, 当一强、一弱两目标分别处在 150 和 152 基本距离单元处时, MISL 处理后的输出结果表明 2 个目标的主瓣已经混叠在一起, 无法区分识别, 将 2 个目标当成 1 个目标处理, 并且旁瓣幅度也较大。然而, 从图 9 中可以看出, 经过改进的 MSLS 基本已将 2 个目标的主瓣分离开, 且旁瓣水平有了明显的降低, 旁瓣整体幅度也比较平整。

为了排除仿真中的偶然性, 同样做了多次(仿真中为 32 次)计算, 对比 MISL 和 MSLS 两种算法的实验结果得出, MSLS 更大程度地降低了回波的峰值旁瓣, 在归一化的幅度下峰值旁瓣均值由 MISL 的 0.91 降低至 0.2473 , 见图 10。根据滤波器的统计特性充分验证了算法的有效性。

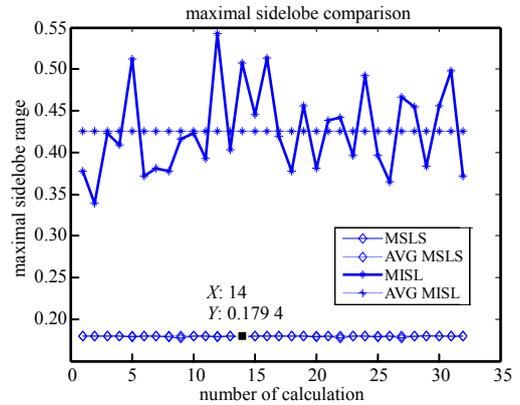


Fig.4 Two kinds of filters' statistic characteristics of single target
图 4 单目标下 2 种滤波器的统计特性

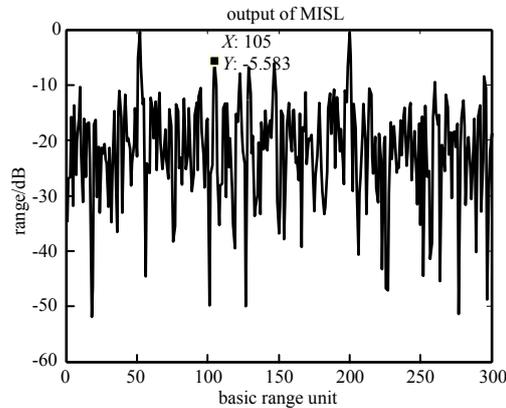


Fig.5 MISL output of multi-target
图 5 多目标时 MISL 输出结果

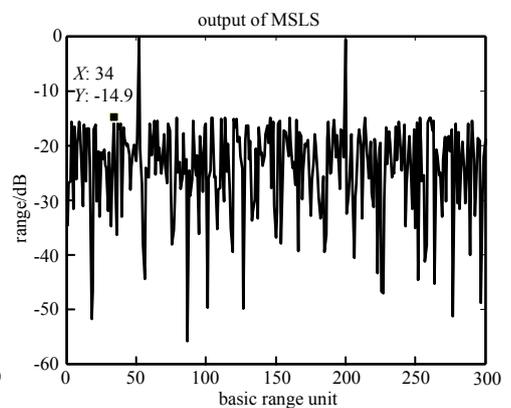


Fig.6 MSLS output of multi-target
图 6 多目标 MSLS 输出结果

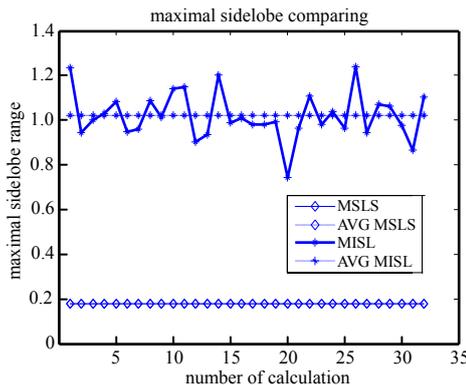


Fig.7 Two kinds of filters' statistic characteristics of multi-target
图 7 多目标相距较远时 2 种滤波器的统计特性

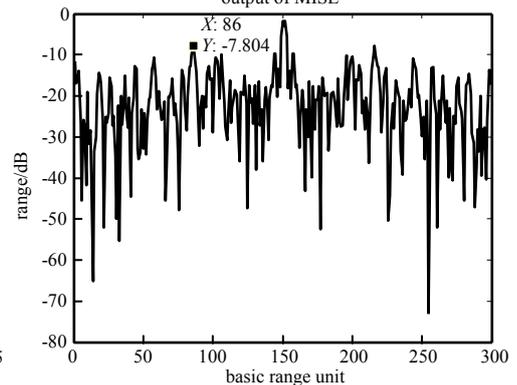


Fig.8 MISL output of closely multi-target
图 8 多目标距离很近时 MISL 输出结果

4 结论

由于随机跳频信号的旁瓣随机性比较强,而频点的跳变又引起了很高的距离旁瓣,随机跳频信号的处理变得更加困难,传统的旁

瓣抑制算法(如加经典窗等)效果不佳,因此本文针对随机跳频信号,在积分旁瓣最小的基础上,提出了改进的自适应迭代最小二乘算法来抑制最大旁瓣。仿真结果表明,此算法在旁瓣抑制和雷达距离分辨力上有了很大的提升,达到了设计的要求,在一定程度上提高了宽带雷达的性能。

参考文献:

- [1] LEI Qiang, LI Hongwei. High resolution radar imaging based on compressed sensing using sparse stepped-frequency signal[C]// 2010 9th International Symposium on Antennas Propagation and EM Theory. Guangzhou, China: [s.n.], 2010: 670-674.
- [2] 赵德华, 毛智能, 位寅生. 全随机跳频脉冲信号设计与处理[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 464-468. (ZHAO Dehua, MAO Zhineng, WEI Yinsheng. Full-random hopped-frequency waveform design and processing[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(3): 464-468.)
- [3] 赵德华. 跳频脉冲信号旁瓣抑制技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. (ZHAO Dehua. Sidelobe suppression technology research for hopped frequency waveform[D]. Harbin, China: Harbin Institute of Technology, 2013.)
- [4] LUI W X, LU Y L, LESTURGIE M. Optimal sparse waveform design for HFSWR system[C]// 2007 International Waveform Diversity and Design Conference. Singapore: [s.n.], 2007: 127-130.
- [5] WANG G H, LU Y L. Sparse frequency transmit waveform design with soft power constraint by using PSO algorithm[C]// 2008 IEEE Radar Conference. Roma, Italy: IEEE, 2008: 127-130.
- [6] KURUP D G, HIMDI M, RYDBERG A. Synthesis of uniform amplitude unequally spaced antenna arrays using the differential evolution algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2003, 51(9): 2210-2217.
- [7] OLIVERI G, MASSA A. Genetic algorithm(GA)-enhanced almost difference set(ADS)-based approach for array thinning[J]. IET Microwaves Antennas & Propagation, 2011, 5(3): 305-315.
- [8] KHODIER M M, CHRISTODOULOU C G. Linear array geometry synthesis with minimum sidelobe level and null control using particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2005, 53(8): 2674-2679.
- [9] 严超会, 汤建龙. 跳频信号的跳周期估计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2011, 9(1): 74-77. (YAN Chaohui, TANG Jianlong. Hop duration estimation for frequency-hopping signals[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2011, 9(1): 74-77.)
- [10] 位寅生, 刘永坦, 许荣庆. 准随机跳频信号的二维处理[J]. 电子学报, 2003, 31(6): 801-804. (WEI Yinsheng, LIU Yongtan, XU Rongqing. A novel 2-D signal processing scheme for quasi random step frequency signal[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(6): 801-804.)
- [11] ZRNIC B M, ZEJAK A J, PETROVIC A. Pulse compression radar: self-clutter suppression using modified RLS algorithm[C]// IEEE International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services. Yugoslavia: [s.n.], 1999: 363-366.

作者简介:



彭江(1991-), 男, 江西省宜春市人, 硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理与自动目标识别. email: whutpengjiang@126.com.

欧建平(1974-), 男, 湖南省衡阳市人, 副教授, 主要研究方向为雷达信号处理.

张军(1973-), 男, 长沙市人, 研究员, 主要研究方向为雷达信号处理与自动目标识别.

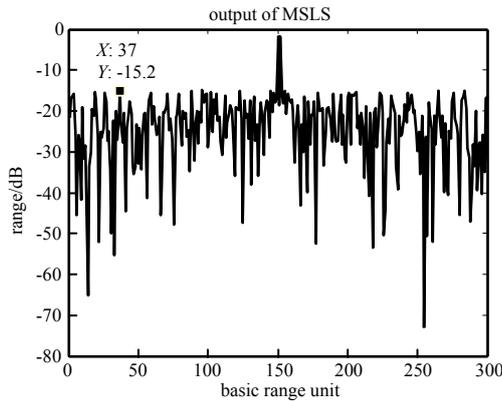


Fig.9 MSLS output of close multi-target
图9 多目标距离很近时 MSLS 输出结果

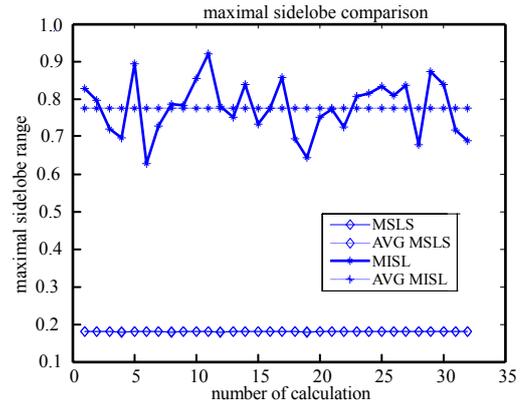


Fig.10 Two kinds of filters' statistic characteristics of close multi-target
图10 多目标相距较近时 2 种滤波器统计特性