

· 抗干扰专题 ·

DOI:10.16592/j.cnki.1004-7859.2021.08.009

复杂环境下雷达 SLC 与 MTI 兼容性设计研究

徐 牧^{*1}, 王华彬¹, 韩宏川², 王 成¹, 曹 原¹

(1. 解放军 93209 部队, 北京 100085; 2. 解放军 93128 部队, 北京 100085)

摘要:针对杂波与干扰复合的复杂环境,研究了雷达抗干扰及反杂波处理兼容性设计问题。首先,分析了传统旁瓣对消(SLC)采样及对消处理方法在应对杂波环境时存在的性能不足;然后,基于仿真及实测数据,对比分析了“先做动目标显示(MTI),再做 SLC”、“先做 SLC,再做 MTI”等不同处理方法的抗干扰性能;最后,针对不同的应用场景,提出了雷达系统 SLC 及 MTI 兼容性优化设计方案,对雷达系统设计研制具有重要的参考价值。

关键词:复杂环境;抗干扰;旁瓣对消;动目标显示

中图分类号:TN974 文献标志码:A 文章编号:1004-7859(2021)08-0057-05

引用格式:徐 牧, 王华彬, 韩宏川, 等. 复杂环境下雷达 SLC 与 MTI 兼容性设计研究[J]. 现代雷达, 2021, 43(8): 57-61.

XU Mu, WANG Huabin, HAN Hongchuan, et al. Compatibility design of SLC and MTI of radar system in complex environment[J]. Modern Radar, 2021, 43(8): 57-61.

Compatibility Design of SLC and MTI of Radar System in Complex Environment

XU Mu^{*1}, WANG Huabin¹, HAN Hongchuan², WANG Cheng¹, CAO Yuan¹

(1. The Unit 93209 of PLA, Beijing 100085, China; 2. The Unit 93128 of PLA, Beijing 100085, China)

Abstract: The compatibility design of radar anti-jamming and anti-clutter processing, especially in complex environment comprising clutter and jamming is studied in this paper. Firstly, the deficiency of traditional sidelobe cancellation (SLC) technology is analyzed when dealing with noise jamming in clutter. Secondly, the anti-jamming performances of two typical signal processes are compared with simulation and real data, which are called “executing moving target indicator (MTI) before SLC” and “executing SLC before MTI” respectively. Finally, the optimized compatibility design of SLC and MTI is proposed dealing with different conditions, showing great significance to radar system design.

Key words: complex environment; anti-jamming; sidelobe cancellation; moving target indicator

0 引言

现代电子战环境下,雷达面临的电磁环境日益复杂,经常要在强杂波及有源干扰复合共存的环境中探测目标。通常,雷达系统采用动目标显示(MTI)等技术来反杂波,采用旁瓣对消(SLC)技术对抗有源干扰^[1-2]。在复杂环境下,雷达系统需同时采取 MTI 和 SLC 两种处理,以实现对目标的最佳探测。传统雷达信号处理流程通常先做 SLC,再做 MTI,主要考虑有源干扰相对杂波变化较快,尽量先完成 SLC 对消。

传统 SLC 设计通常在雷达休止期进行干扰采样及对消权系数计算^[3]。由于休止期不存在杂波,即使不做 MTI 也不影响 SLC 样本及权系数计算的准确性,“先做 SLC,再做 MTI”的处理策略不会影响 SLC 的对消性能。但随着灵巧噪声干扰、多干扰源协同干扰等

干扰样式及干扰策略的日益成熟^[4-5],雷达休止期已很难采集完整准确的干扰样本。为有效对抗干扰,雷达系统不得不在工作期也进行 SLC 采样及权系数计算^[6]。特别是在杂波区,干扰与杂波复合共存,“先做 SLC,再做 MTI”的传统设计会存在一定问题。在杂波区进行 SLC 干扰样本采样时,杂波区样本中同时混有干扰及杂波分量。不同于干扰信号主要来自确定的旁瓣方向,杂波空间分布特性复杂,可认为来自多个不同方向,且主要成分来自主瓣方向。因此,在杂波区做 SLC,相当于 SLC 系统需同时应对多个不同方向干扰源(包括主瓣方向),由于辅助天线数量有限,会导致 SLC 对消性能恶化。文献[7]指出了“先做 SLC,再做 MTI”会对反杂波性能造成影响,但未分析对抗干扰性能的影响;文献[8]仿真分析了杂波对 SLC 性能的影响,但未给出解决方法;文献[9]提出了一种基于收敛权值存储的 SLC 改进方法,但存储权值也无法保证

不受杂波影响,无法完全解决杂波环境中 SLC 有效对消问题。

为此,本文针对杂波与干扰复合的复杂环境,研究了雷达抗干扰与反杂波的兼容性设计问题。在分析传统 SLC 采样及对消处理在应对杂波环境时性能不足的基础上,基于仿真及实测数据,对比分析了“先做 MTI,再做 SLC”、“先做 SLC,再做 MTI”等不同处理方法的抗干扰性能,并分析了天线旋转对 SLC 处理性能的影响。基于分析结论,针对不同的应用场景,文中提出了雷达系统 SLC 及 MTI 兼容性优化设计方案,对雷达系统设计研制具有重要的参考价值。

1 杂波与干扰复合环境下 SLC 问题分析

SLC 系统在雷达主天线附近增设辅助天线阵对抗旁瓣干扰,主、辅天线的干扰回波信号可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{y}(t) = \sum_{i=1}^N J_i(t) + n(t) \\ \mathbf{X}(t) = \sum_{i=1}^N A_i \mathbf{u}(\theta_i) J_i(t) + n(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{y}(t)$ 、 $\mathbf{X}(t)$ 分别为主、辅天线回波信号; N 为干扰源数量; $J_i(t)$ 为第 i 个干扰信号; $n(t)$ 为噪声; $A_i(t)$ 为第 i 个干扰源方向主、辅助天线干扰幅度比; $\mathbf{u}(\theta_i)$ 为辅天线接收第 i 个干扰信号的导向矢量,即

$$\mathbf{u}(\theta_i) = [e^{-j2\pi d_1 \sin(\theta_i)/\lambda}, e^{-j2\pi d_2 \sin(\theta_i)/\lambda}, \dots, e^{-j2\pi d_M \sin(\theta_i)/\lambda}]^T \quad (2)$$

式中: $d_1, \dots, d_i, \dots, d_M$ 为辅天线间距; M 为辅助天线数; θ_i 为第 i 个干扰方向角。SLC 即利用主天线与辅助天线干扰信号间存在的幅相关系(由 A_i 及 θ_i 确定),通过自适应算法对辅助天线信号加权求和,再与主天线信号相减使主通道干扰输出功率最小而实现干扰对消,即

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{y}(t) - \mathbf{W}^H \mathbf{X}(t) \quad (3)$$

式中: \mathbf{W} 为权矢量。使式(3)输出最小的最优权矢量计算公式为

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{R}_{XY} \quad (4)$$

式中: \mathbf{R}_{XX} 为辅天线信号自相关矩阵; \mathbf{R}_{XY} 为主、辅助天线信号互相关矩阵。SLC 干扰对消也可从空域滤波角度分析,其实质是在干扰源方向形成零点抑制干扰。为取得理想的对消效果,辅助天线数需大于等于干扰源数,否则将严重影响对消性能。在杂波与干扰复合

环境下,主、辅天线接收信号同时包含杂波与干扰,此时式(1)的回波信号变为

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{y}_c(t) = \sum_{i=1}^N J_i(t) + \sum_{j=1}^{N_c} C_j(t) + n(t) \\ \mathbf{X}_c(t) = \sum_{i=1}^N A_i \mathbf{u}(\theta_i) J_i(t) + \\ \quad \sum_{j=1}^{N_c} B_j \mathbf{u}(\theta_j) C_j(t) + n(t) \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: $\mathbf{y}_c(t)$ 、 $\mathbf{X}_c(t)$ 分别为主、辅天线接收的干扰及杂波复合信号; N_c 为杂波散射单元数; $C_j(t)$ 为第 j 个杂波散射单元信号; θ_j 为杂波散射单元方向; $\mathbf{u}(\theta_j)$ 为辅天线第 j 个杂波散射单元信号的导向矢量; B_j 为第 j 个杂波散射单元方向主、辅助天线杂波幅度比。对比式(5)及式(1)可知,由于杂波空间分布特性复杂, N_c 数目很多且来自不同方向,特别是主瓣方向占较大比重,空间导向矢量较之干扰信号复杂得多。利用混有杂波及干扰的样本计算对消权系数无法准确反映主天线与辅助天线干扰信号的幅相关系,无法在干扰方向形成准确零点,导致 SLC 性能恶化。

2 雷达系统 SLC 与 MTI 兼容性设计分析

2.1 问题分析

在杂波与干扰复合的复杂环境下,雷达需同时实现反杂波及抗干扰功能,涉及到 SLC 与 MTI 的兼容性设计问题。总体而言,SLC 与 MTI 功能相对独立,兼容性设计可分为两类:“先做 SLC,再做 MTI”及“先做 MTI,再做 SLC”。

1) “先做 SLC,再做 MTI”

此为传统设计方法,主要考虑有源干扰相对杂波变化较快,SLC 尽量在一个重复周期完成;而杂波特性变化缓慢,可利用相邻重复周期目标回波进行 MTI 处理。对于简单干扰场景(如杂波区无干扰、全量程干扰特性一致、非灵巧噪声干扰等),此方法有效。但正如前文分析,对于杂波与干扰复合的复杂场景,若不做 MTI 直接做 SLC,SLC 采样样本中的杂波分量将影响对消性能。此外,每个脉冲重复周期 SLC 对消权系数变化将引起地杂波起伏,导致 MTI 对消不干净。因此,无论从反杂波或是抗干扰角度,“先做 SLC,再做 MTI”的处理方法应对复杂环境都存在性能不足。

2) “先做 MTI,再做 SLC”

针对传统设计方法应对复杂环境的性能不足,一

种自然的优化设计方法是先采取 MTI 反杂波, 再采取 SLC 对抗有源干扰。先做 MTI, 将主、辅天线接收信号中的杂波分量滤除, 之后再进行 SLC 采样及对消, 可有效降低杂波分量对 SLC 对消权系数估计的影响, SLC 可实现有效的干扰对消。因此, 从原理上来说, 在杂波与干扰复合的复杂环境下, “先做 MTI, 再做 SLC”较之“先做 SLC, 再做 MTI”具有更好的处理性能。

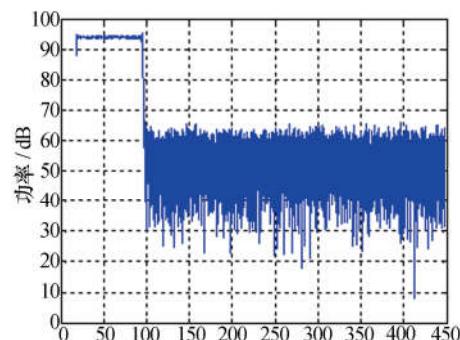
但也要看到, 对于天线阵面水平旋转的雷达, MTI 处理周期内天线已旋转一定角度, 相当于干扰源方向随天线旋转已发生变化, 每一脉冲重复周期内的最优权系数都略有不同, “先做 MTI, 再做 SLC”在有效规避杂波影响的同时, 会造成一定处理损失。

2.2 仿真试验

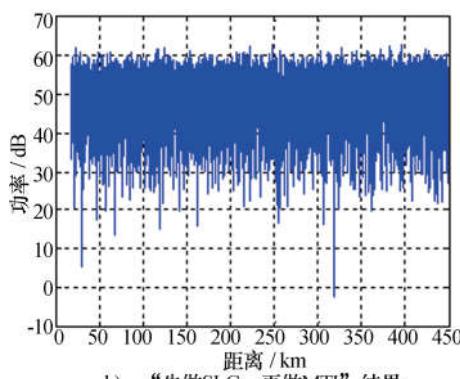
设置典型复杂场景, 分析不同兼容性设计方法的抗干扰性能差异, 具体参数如表 1 所示。分别采取“先做 SLC, 再做 MTI”以及“先做 MTI, 再做 SLC”两种方法进行处理, SLC 采样及权系数计算在杂波区进行, 具体结果如图 1 所示。其中, 图 1a) 为脉压后原始数据, 图 1b)、图 1c) 分别为“先做 SLC, 再做 MTI”、“先做 MTI, 再做 SLC”的处理结果。对比可知: 对于“先做 SLC, 再做 MTI”, 因样本中杂波分量的影响, SLC 无法有效抑制干扰, 导致最终处理后存在大量干扰剩余; 对于“先做 MTI, 再做 SLC”, 可有效抑制杂波, 确保后续 SLC 功能正常, 目标被成功检测。试验结果表明: 在杂波与干扰复合环境下, “先做 MTI, 再做 SLC”的性能明显优于“先做 SLC, 再做 MTI”的处理方法。

表 1 主要仿真参数

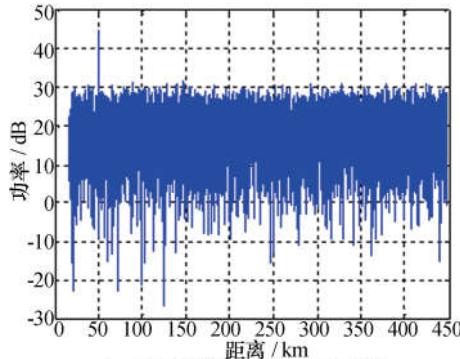
| 项目 | 参数 | 取值 |
|----|-----------------------------|--------|
| 雷达 | 载频/GHz | 3 |
| | 对消天线数目 | 3 |
| | 天线旁瓣电平/dB | -35 |
| | PRF/Hz | 300 |
| | MTI 阶数 | 3 |
| 干扰 | 噪声功率/dB | 10 |
| | 干扰源数量 | 2 |
| | 干扰类型 | 噪声压制干扰 |
| | 单干扰噪比/dB | 30 |
| | 干扰方位角/(°) | 10, 50 |
| 杂波 | 杂波类型 | 地杂波 |
| | 杂波谱标准差/(m·s ⁻¹) | 0.3 |
| | 杂噪比/dB | 60 |
| | 杂波范围/km | 0~100 |
| 目标 | 信噪比/dB | 20 |
| | 距离单元/km | 50 |



a) 脉压后回波数据



b) “先做 SLC, 再做 MTI”结果



c) “先做 MTI, 再做 SLC”结果

图 1 SLC 及 MTI 兼容性设计性能分析(仿真试验)

2.3 实测数据验证试验

基于 L 波段试验雷达实测数据对不同兼容性设计的抗干扰性能做进一步验证。雷达全量程遭受压制干扰, 干扰平均强度 50 dB 左右, 并伴有密集假目标干扰, 干扰强度最大 70 dB。同时, 在 100 km 内特别是 70 km 附近存在强地杂波, 杂波最大强度接近 80 dB。分别采用“先做 MTI, 再做 SLC”及“先做 SLC, 再做 MTI”两种方法, 处理结果如图 2 所示。图 2a)~图 2c) 分别为脉压后、“先做 MTI, 再做 SLC”、“先做 SLC, 再做 MTI”的处理结果, MTI 阶数为三阶, SLC 采取全量程分段采样对消处理。重点关注杂波区, 对比可知: “先做 SLC, 再做 MTI”后杂波区干扰对消不够彻底, 且杂波也有较多剩余; 而“先做 MTI, 再做 SLC”, 杂波区的杂波及干扰都获得了较好的抑制效果。实测数据结

果也同样验证了在干扰及杂波复合环境下，“先做 MTI，再做 SLC”具有更好的处理性能。

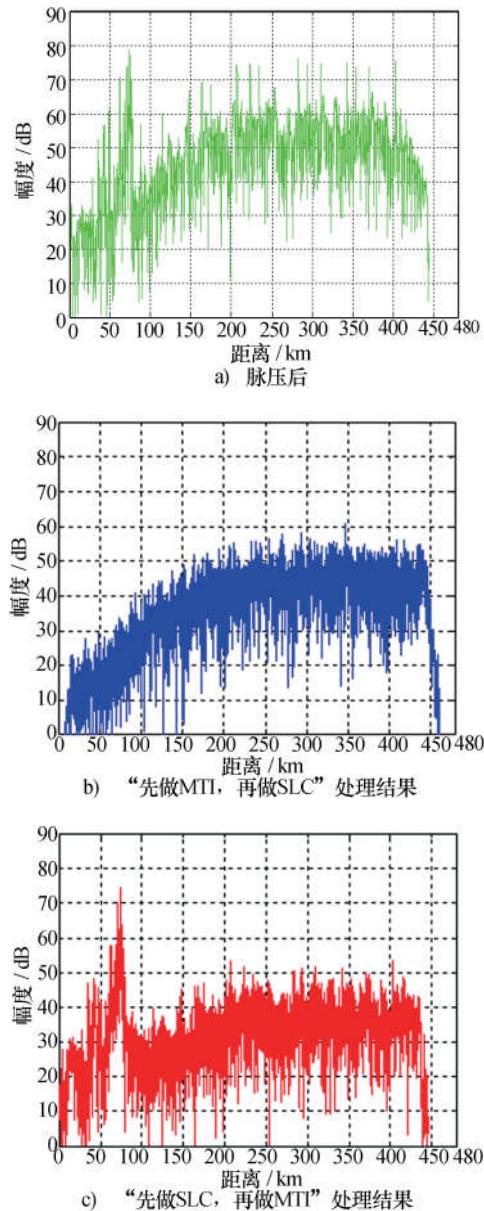


图 2 SLC 及 MTI 兼容性设计性能分析(实测数据验证)

2.4 天线旋转影响分析

仿真及实测数据试验都表明：在复杂环境下，“先做 MTI，再做 SLC”较之传统“先做 SLC，再做 MTI”具有更优的处理性能。前文也指出，MTI 期间天线旋转对 SLC 性能会有一定影响，下面进行仿真试验分析。仿真设噪声压制干扰的干噪比为 35 dB，噪声幅度 10 dB，辅助天线数量为 2，雷达进行三阶 MTI 处理，结果如图 3 所示。其中，图 3a)~图 3d) 分别为不做 MTI 直接进行 SLC(等效天线不旋转)以及不同脉冲重复频率(PRF)条件下“先做 MTI，再做 SLC”的干扰对消结果。表 2 给出了不同条件下干扰对消比损失的具体值。对比可知：相比于不做 MTI 直接 SLC 处理，MTI

处理后再做 SLC，干扰对消性能确实有一定损失；但相比于不做 MTI 直接 SLC 导致的杂波区对消性能明显恶化，因天线旋转造成的处理损失是完全可以接受的。特别是，PRF 越大(或 MTI 阶数越小)，MTI 期间天线旋转角度越小，SLC 对消性能损失也会越小。

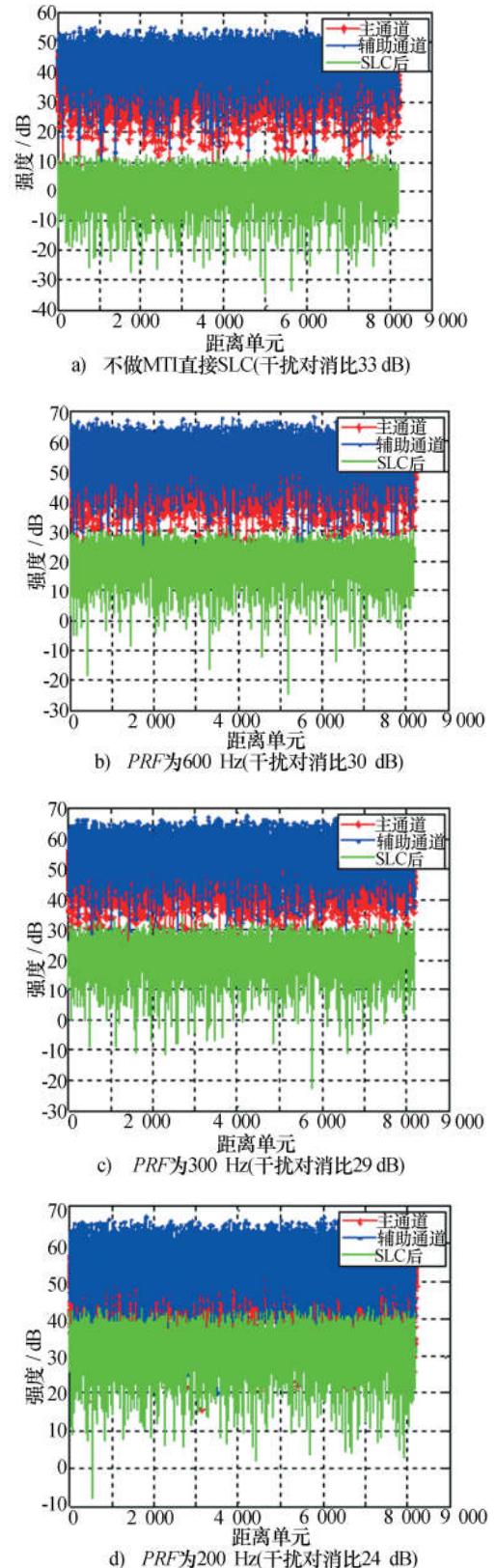


图 3 天线旋转影响分析试验

表 2 不同条件下 SLC 对消性能损失分析

| 序号 | PRF/Hz | 干扰对消比损失/dB |
|----|--------|------------|
| 1 | 600 | 3 |
| 2 | 300 | 4 |
| 3 | 200 | 9 |

3 雷达系统 SLC 及 MTI 兼容性优化设计方案

未来雷达系统面临的电磁环境必将日益复杂, 要满足杂波及干扰复合下的目标探测需求, 应高度重视雷达信号处理过程中 SLC 及 MTI 的兼容性设计问题, 确保雷达能够兼顾实现理想的反杂波及抗干扰性能。综合考虑不同兼容性设计的性能差异、天线旋转导致的 SLC 性能损失、动目标检测(MTD)模式积累时长等因素, 提出雷达系统 SLC 及 MTI(MTD)兼容性优化设计方案如下:(1) 常规处理模式下, “先做 MTI, 再做 SLC”; (2) MTD 模式下(或常规模式因其他因素考虑在工程实现时选择先做 SLC), “先做 SLC, 再做 MTD”, 同时在对消权系数计算前进行预处理(如简单一次对消), 滤除样本中的杂波分量; (3) 基于杂波图处理分析获得杂波区范围, 仅在杂波区内做 MTI, 杂波区外不做 MTI; (4) 基于干扰感知分析杂波区内、外干扰特性是否一致, 若一致则利用杂波区外采样点计算对消权系数用于杂波区内 SLC 对消。

通过上述优化设计, 可兼顾杂波区、非杂波区、不同工作模式及应用场景, 提升雷达系统复杂环境下的综合探测性能。

4 结束语

针对传统 SLC 采样及对消在应对杂波环境时的性能不足, 研究了杂波与干扰复合环境下的 SLC 及 MTI 兼容性设计问题, 基于仿真及实测数据分析了不同设计方法的性能差异, 提出了雷达系统 SLC 及 MTI 兼容性优化设计方案, 对雷达系统设计研制具有重要的参考价值。本文主要针对噪声压制干扰与地杂波复合情况进行研究, 后续将扩展干扰及杂波类型, 研究在密集假目标干扰、组合干扰、气象杂波等更为复杂环境下, 实现雷达反杂波及抗干扰的全面优化设计。

参 考 文 献

- [1] SKOLNIK M I. Radar handbook [M]. 2d ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [2] FARINA A. Singal sidelobe canceller: theory and evaluation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1977, 13(6): 690–699.
- [3] 冉小凤. 自适应旁瓣对消系统的对抗性能研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011.
RAN Xiaofeng. Study on countermeasure performance of adaptive side-lobe cancellation system [D]. Xi'an: Xidian University, 2011.
- [4] SCHLEHER D C. Electronic warfare in the information age [M]. Norwood: Artech House, 1999.
- [5] MCGUFFIN B F. Distributed jammer performance in Rayleigh fading [C]// Proceedings of 21th International Conference on Military Communication. Anaheim: IEEE Press, 2002: 669–674.
- [6] 王晓莉, 张新生, 刘建辉, 等. 雷达副瓣对消关键技术分析与验证 [J]. 现代雷达, 2018, 40(7): 19–22.
WANG Xiaoli, ZHANG Xinsheng, LIU Jianhui, et al. Analysis and verification for key techniques of radar sidelobe cancellation [J]. Modern Radar, 2018, 40(7): 19–22.
- [7] 孙晓兵, 张守宏. 数字旁瓣相消与动目标显示的兼容性分析 [J]. 现代雷达, 1992, 14(5): 50–56.
SUN Xiaobing, ZHANG Shouhong. The analysis of the compatibility of digital sidelobe canceller (DSLC) and moving target indicator (MTI) [J]. Modern Radar, 1992, 14(5): 50–56.
- [8] 刘晓斌, 刘进, 赵锋, 等. 地杂波对旁瓣对消性能影响建模与仿真 [C]// 第二届中国指挥控制大会论文集. 北京: 中国指挥与控制学会, 2014: 429–433.
LIU Xiaobin, LIU Jin, ZHAO Feng, et al. Modeling and simulation of the influence of land clutter to the performance of sidelobe cancelling [C]// Proceedings of the 2nd China Conference on Command and Control. Beijing: Chinese Institute of Command and Control, 2014: 429–433.
- [9] 阚保强, 蔡理, 王建业, 等. 雷达自适应旁瓣干扰对消系统的改进 [J]. 现代雷达, 2007, 29(5): 46–48.
KAN Baoqiang, CAI Li, WANG Jianye, et al. Improvement of the performance of adaptive sidelobe cancellation on radar [J]. Modern Radar, 2007, 29(5): 46–48.

作者简介:

徐 牧 男, 1979 年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为雷达工程、雷达信号处理。