

## 对相控阵雷达自适应旁瓣对消干扰技术研究

项正山, 黄全, 唐龙

(桂林长海发展有限责任公司, 广西 桂林 541001)

**摘要:** 自适应旁瓣对消雷达系统能够有效对抗来自副瓣方向的有源干扰, 在分析相控阵雷达自适应旁瓣对消工作原理基础上, 基于设计的辅助天线配置方案, 针对干扰源相对雷达角度变化以及雷达天线方向图差异, 对自适应旁瓣对消雷达系统的对消性能进行了系统全面仿真。仿真实验结果表明, 多个单一极化干扰源和单个极化干扰源对自适应旁瓣对消雷达系统分别干扰时, 闪烁干扰和极化干扰方法都存在干扰不理想的情况, 因此, 建议对自适应旁瓣对消雷达系统实施旁瓣干扰时, 采用多点干扰源闪烁干扰和极化干扰复合的干扰策略。

**关键词:** 自适应旁瓣对消; 旁瓣干扰; 极化干扰; 闪烁干扰

中图分类号: TN95

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200502

中文引用格式: 项正山, 黄全, 唐龙. 对相控阵雷达自适应旁瓣对消干扰技术研究[J]. 电子技术应用, 2020, 46(12): 144-150.

英文引用格式: Xiang Zhengshan, Huang Quan, Tang Long. Research on adaptive sidelobe cancellation technology of AESA[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(12): 144-150.

## Research on adaptive sidelobe cancellation technology of AESA

Xiang Zhengshan, Huang Quan, Tang Long

(Guilin Changhai Development Co., Ltd., Guilin 541001, China)

**Abstract:** Adaptive sidelobe cancellation radar systems can effectively resist active jamming from the sidelobe direction. Based on the analysis of the operating principle of AESA adaptive sidelobe cancellation, on the base of auxiliary antenna configuration design, the cancellation performance of the adaptive sidelobe cancellation radar system was simulated systematically and comprehensively in view of the change of jamming source relative to radar angle and the difference of radar antenna pattern. The simulation results show that when multiple single polarization jamming sources and single polarization jamming source is used for jamming the adaptive sidelobe cancellation radar system respectively, the blinking jamming and polarization jamming are not ideal. Therefore, jamming combination of blinking jamming with multiple jamming sources and polarization jamming is advised as the sidelobe jamming strategy against adaptive sidelobe cancellation radar systems.

**Key words:** adaptive sidelobe cancellation; sidelobe jamming; polarization jamming; blinking jamming

## 0 引言

随着宽带功率器件技术成熟与成本降低, 多波束、相控阵干扰机进一步提高了干扰机的输出功率, 仅采用低副瓣天线技术的传统雷达在对抗旁瓣有源干扰方面, 优势不再明显, 因此, 现代雷达普遍采用了自适应旁瓣对消技术(ASLC)来抑制干扰<sup>[1]</sup>。自适应旁瓣对消技术是当存在有源干扰时, 自适应地修正辅助天线权值, 使干扰信号在雷达主天线对应接收通道输出干扰信号功率最小, 即在雷达主天线方向图上表现为在干扰到达方向上形成零点, 从而抑制旁瓣方向的有源干扰<sup>[2]</sup>。

理论上多个单一极化干扰源闪烁干扰和单个极化干扰源可以对自适应旁瓣对消雷达系统实现干扰<sup>[3-6]</sup>, 通过干扰源快速角度变换和干扰源快速极化变换可有效破坏自适应旁瓣对消雷达系统中自适应天线加权因子解算。然而, 有关多个单一极化干扰源闪烁干扰和单

个极化干扰源极化干扰对旁瓣自适应对消系统的干扰对消效果定量研究报道较少, 仅有的报道大多偏向于定性讨论, 而干扰源相对雷达角度变化以及雷达天线方向图差异将直接对自适应旁瓣对消雷达系统的对消性能产生影响, 因此, 研究干扰源相对雷达角度变化和雷达天线方向图差异对自适应旁瓣对消雷达系统的对消性能影响是十分必要的。

本文系统全面地分析了自适应旁瓣对消雷达系统的干扰信号对消原理, 给出了多个单一极化干扰源闪烁干扰和单个极化干扰源可对抗自适应旁瓣对消雷达系统的理论依据。根据相控阵辅助天线配置的基本原则, 设计了辅助天线配置方案, 在此基础上, 分析和研究了不同条件下两种干扰手段对自适应旁瓣对消雷达系统的对消干扰性能的影响程度, 并提出多点干扰源闪烁干扰和极化干扰复合的干扰策略。此方法可有效规避两种

# 雷达与导航 Radar and Navigation

方法各自缺点,是对抗自适应旁瓣对消雷达系统的一个有效干扰方法。

## 1 工作原理

为实现相控阵雷达副瓣对消功能,在正常接收天线与接收通道以外,雷达系统额外增加了多个辅助天线和接收通道,通过自适应调整辅助通道接收信号的幅度和相位,使辅助天线阵列对干扰信号的响应与主天线对干扰信号的响应一致,以便主辅通道相减后,主天线接收通道保留目标信号,干扰信号输出趋于零。在具体实现方面,通常包括闭环副瓣对消技术和开环副瓣对消技术,由于闭环副瓣对消技术收敛速度慢,因而当前普遍采用开环副瓣对消技术,其工作原理如图1所示。ASLC系统的天线部分由一个主天线和  $n$  个辅助天线构成,理论上能够完全对消掉连续固定方向的  $n$  个干扰信号<sup>[2]</sup>。

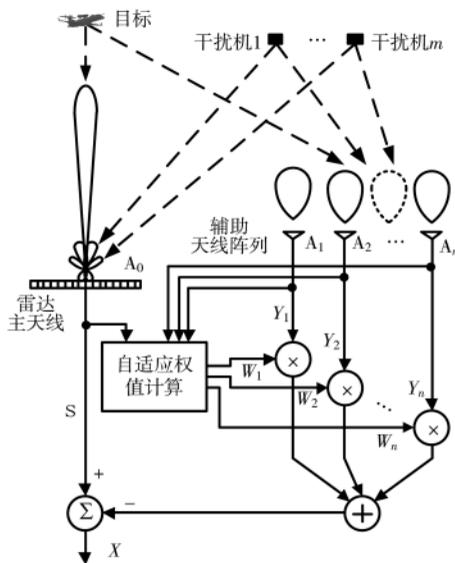


图1 开环副瓣对消工作原理图

假设  $S(t)$  为  $t$  时刻雷达主天线接收信号,  $Y_i(t)$  为第  $i$  个辅助天线  $t$  时刻接收信号, 辅助天线数为  $n$ ,  $W_i$  为自适应旁瓣对消系统的最优加权矢量, 则系统对消输出为主通道信号减去辅助天线阵列信号加权后的信号, 对消输出信号可表示为:

$$X(t) = S(t) - \sum_{i=1}^n W_i Y_i \quad (1)$$

其中最优权值为:

$$W_i = R_{YY}^{-1} R_{YX} \quad (2)$$

副瓣对消技术是基于辅助天线阵列信号样本采集, 实现主瓣接收通道干扰信号的消除。其中自适应权值求解是干扰信号对消的关键, 且对消权值求解过程非常耗时, 为更好实现干扰信号对消, 通常在一个脉冲信号重复周期内完成自适应对消权值计算, 雷达接收机通常的作法是在逆程(休止期)采集干扰信号样本, 求解的权值在下一个发送周期的正程(工作期)实现对消<sup>[1-3]</sup>, 如此循

环, 副瓣对消权值求解时序图如图2所示。

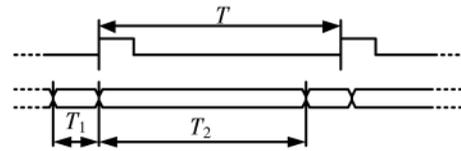


图2 副瓣对消权值求解时序图

根据式(2)可以看出,  $W_i$  计算结果与主天线和辅助天线增益以及接收信道的信号相位有关。首先, 在雷达接收信道的信号相位不变情况下, 雷达主天线和辅助天线增益突变, 将直接改变  $W_i$  的计算结果, 其次, 在雷达主天线和辅助天线增益不变的情况下, 主天线和辅助天线对应通道信号相位差产生突变, 也将直接改变  $W_i$  的计算结果, 据此快速变更雷达主天线和辅助天线增益、雷达主接收通道和辅助接收通道的信号相位将改变雷达自适应对消加权因子, 从而让雷达自适应副瓣对消功能失效。

根据以上分析, 在雷达天线增益快速变化方面, 干扰源交替发射与雷达主天线极化相同的干扰信号和极化相反的干扰信号, 可实现雷达接收到周期性幅度突变的干扰信号; 在雷达主天线和辅助天线对应通道信号相位差产生突变方面, 可通过在不同位置部署两个或多个干扰源, 多个干扰源相对雷达之间存在一定方向夹角基础上, 干扰源采用闪烁(或交替)干扰方式对雷达实施, 可实现雷达主天线和辅助天线对应接收通道信号的相位差突变。以下根据辅助天线配置基本原则, 设计一个自适应副瓣对消雷达天线阵面, 并在此基础上, 对单极化多点闪烁干扰和极化干扰分别进行仿真, 以此验证其干扰的有效性。

## 2 辅助天线配置方案

在相控阵天线中, 通常辅助天线在同一行或者同一列时, 对消性能严重下降<sup>[2]</sup>, 据此对一个  $25 \times 25$  的矩形天线阵列设置对消辅助天线阵, 假设辅助天线数量为5个, 辅助天线配置方案如图3所示, 其中具有相同形状

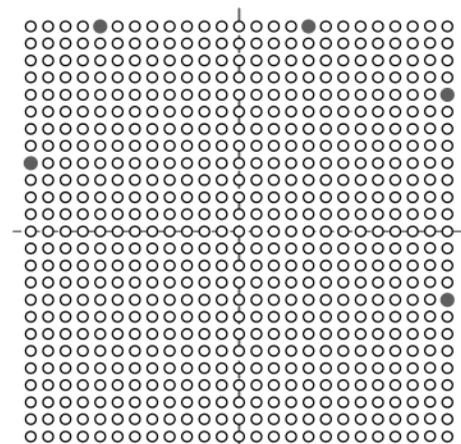


图3 辅助天线配置方案

# 雷达与导航 Radar and Navigation

的少数阵元(实心)代表一种辅助天线位置的配置情况。

## 3 单极化旁瓣对消仿真

### 3.1 单个干扰源对消仿真

#### 3.1.1 仿真条件

雷达与干扰机波束指向相对角度关系如图 4 所示,其中雷达波束指向与雷达天线阵面垂直,雷达天线阵面与地面垂直。以雷达波束指向为基准,干扰机与雷达连线相对雷达波束指向的方位夹角  $\phi_1$  为  $20^\circ$ ,俯仰夹角  $\theta_1$  为  $-5^\circ$ 。雷达的工作频率  $f=3\text{ GHz}$ (波长为  $\lambda=0.1\text{ m}$ ),线单元间距  $d=0.5\lambda$ ,雷达中频信号频率为  $25\text{ MHz}$ ,中频信号采样频率为  $100\text{ MHz}$ 。

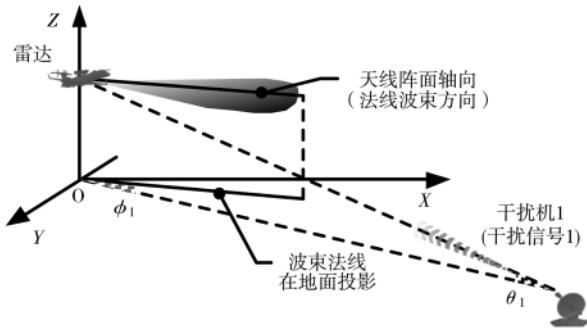


图 4 雷达与干扰机波束指向相对角度关系

#### 3.1.2 相参干扰源

干扰对消仿真为相对幅度变化仿真,干扰信号对消前后剩余干扰信号幅度比为自适应旁瓣对消雷达系统的干扰抑制比,即形成了雷达主天线在干扰到达方向上的凹点,采用单个干扰源对雷达实施干扰时,假设主天线和辅助天线在副瓣干扰方向增益相同,雷达主通道对消干扰前后信号结果如图 5 所示。

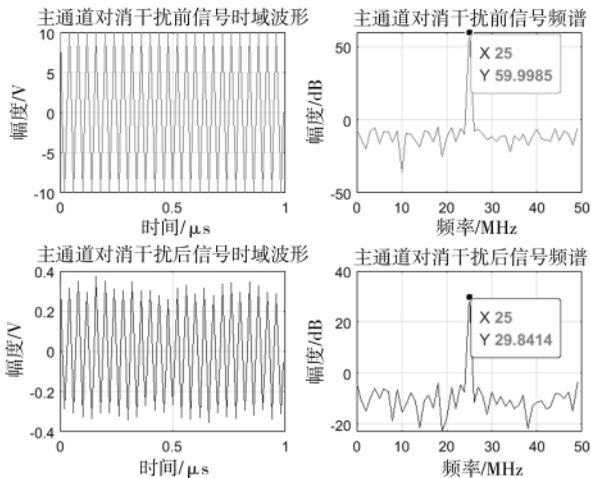


图 5 雷达主通道对消干扰前后信号结果

#### 3.1.3 非相参干扰源

根据干扰源、目标雷达之间夹角关系,需针对不同辅助天线产生相应的基带调频噪声信号,基带调频噪声信号带宽  $1\text{ MHz}$ ,雷达主天线和辅助天线基带噪声信号

如图 6 所示。

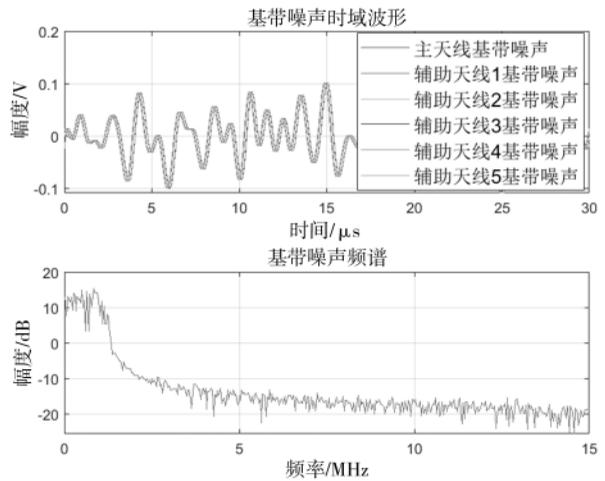


图 6 雷达主天线和辅助天线基带噪声信号

假设主天线和辅助天线在副瓣干扰方向增益相同,雷达主通道对消干扰前后信号结果如图 7 所示。

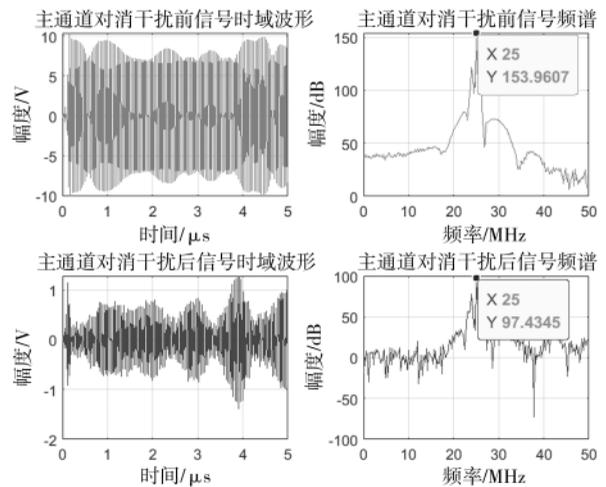


图 7 雷达主通道对消干扰前后信号结果

仿真结果表明,雷达对从旁瓣进入的相参干扰信号抑制效果在  $30\text{ dB}$  左右,对从旁瓣进入的噪声调频干扰信号抑制效果在  $60\text{ dB}$  左右,因此,单个干扰设备很难对自适应旁瓣对消雷达系统实施有效干扰,且雷达对非相参噪声干扰抑制效果较好。

### 3.2 两个干扰源对消仿真

#### 3.2.1 仿真条件

雷达与干扰机波束指向相对角度关系如图 8 所示,其中雷达波束指向与雷达天线阵面垂直,雷达天线阵面与地面垂直。以雷达波束指向为基准,干扰机 1 与雷达连线相对雷达波束指向的方位夹角  $\phi_1$  为  $20^\circ$ ,俯仰夹角  $\theta_1$  为  $-5^\circ$ ,干扰机 2 与雷达连线相对雷达波束指向的方位夹角  $\phi_2$  为  $-10^\circ$ ,俯仰夹角  $\theta_2$  为  $-3^\circ$ 。雷达的工作频率  $f=3\text{ GHz}$ (波长为  $\lambda=0.1\text{ m}$ ),线单元间距  $d=0.5\lambda$ ,雷达中频信号频率为  $25\text{ MHz}$ ,中频信号采样频率为  $100\text{ MHz}$ 。

# 雷达与导航 Radar and Navigation

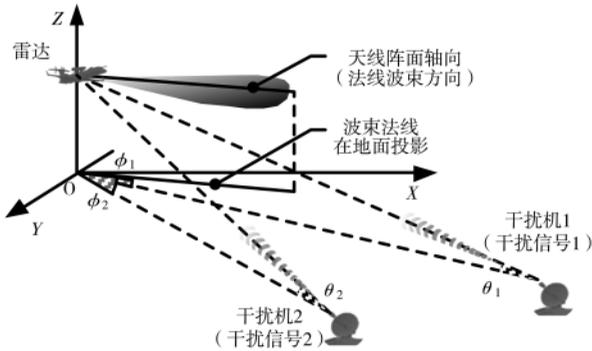


图8 雷达与干扰机波束指向相对角度关系

现针对两干扰机同时开机和交替开机两种情况分别进行仿真。

### 3.2.2 同时干扰

#### (1) 相参干扰源+相参干扰源

假设主天线和辅助天线相对干扰机1和干扰机2的副瓣干扰方向增益都相同，干扰机1与干扰机2都采用相参假目标的干扰方式，同时干扰时，雷达主通道对消干扰信号前后信号结果如图9所示。

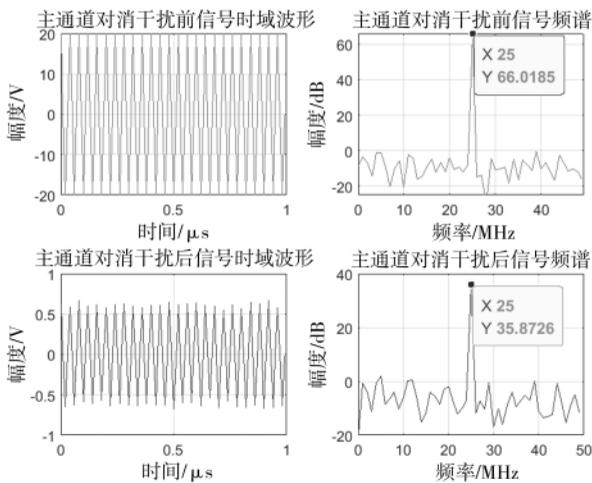


图9 主通道对消干扰前后信号结果

#### (2) 非相参干扰源+非相参干扰源

假设主天线和辅助天线相对干扰机1和干扰机2的副瓣干扰方向增益都相同，干扰机1与干扰机2都采用窄带调频的瞄准式噪声干扰，同时干扰时，主通道对消干扰信号前后信号波形如图10所示。

#### (3) 非相参干扰源+相参干扰源

假设主天线和辅助天线相对干扰机1和干扰机2的副瓣干扰方向增益都相同，干扰机1采用窄带调频的瞄准式的干扰方式，干扰机2都采用相参假目标的干扰方式，同时干扰时，雷达主通道对消干扰前后信号结果如图11所示。

仿真结果表明，同时干扰时，雷达对双干扰源的干扰抑制效果与单干扰源的抑制效果相同。

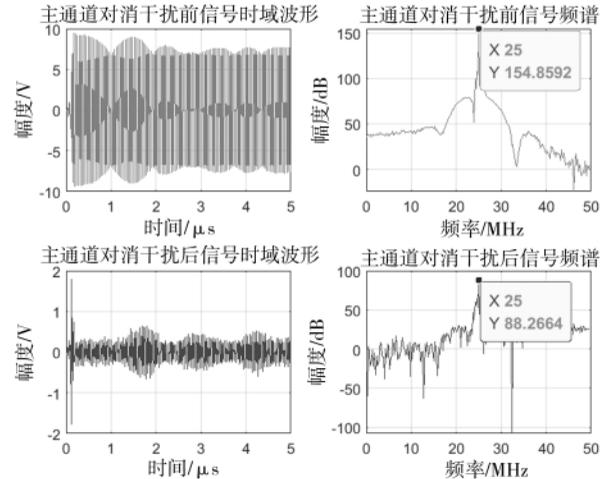


图10 雷达主通道对消干扰前后信号结果

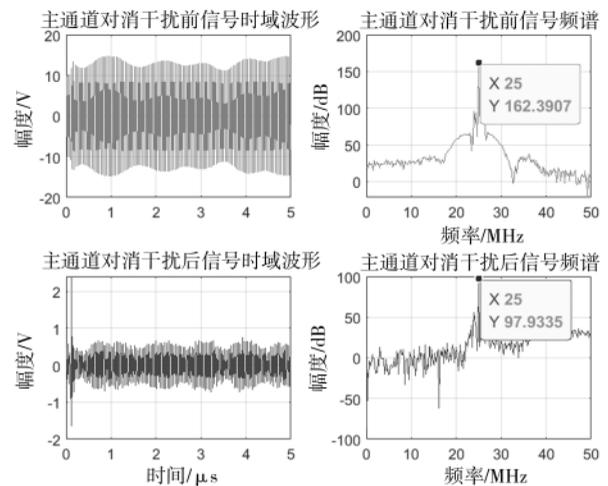


图11 雷达主通道干扰信号对消前后信号

### 3.2.3 交替干扰

#### (1) 相参干扰源+相参干扰源

假设主天线和辅助天线相对干扰机1和干扰机2的副瓣干扰方向增益都相同，干扰机1与干扰机2都采用相参假目标的干扰方式，交替干扰时，雷达主通道对消干扰信号1前后信号波形如图12所示，雷达主通道对消干扰信号2前后信号波形如图13所示。

#### (2) 非相参干扰源+非相参干扰源

干扰机1与干扰机2都采用窄带调频的瞄准式的干扰方式，交替干扰时，雷达主通道对消干扰信号1前后信号波形如图14所示，雷达主通道对消干扰信号2前后信号波形如图15所示。

#### (3) 非相参干扰源+相参干扰源

干扰机1采用窄带调频的瞄准式的干扰方式，干扰机2采用相参假目标的干扰方式，交替干扰时，主通道对消干扰信号1前后信号波形如图16所示，主通道对消干扰信号2前后信号波形如图17所示。

仿真结果表明，交替干扰时，雷达基本无法有效消

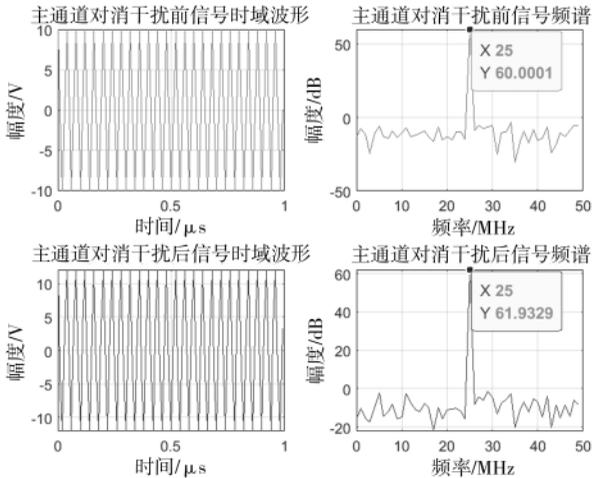


图 12 雷达主通道对消干扰信号 1 前后信号

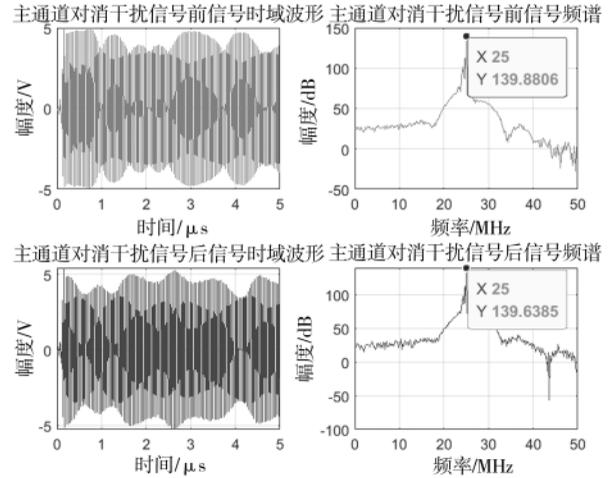


图 15 雷达主通道干扰信号 2 对消前后信号

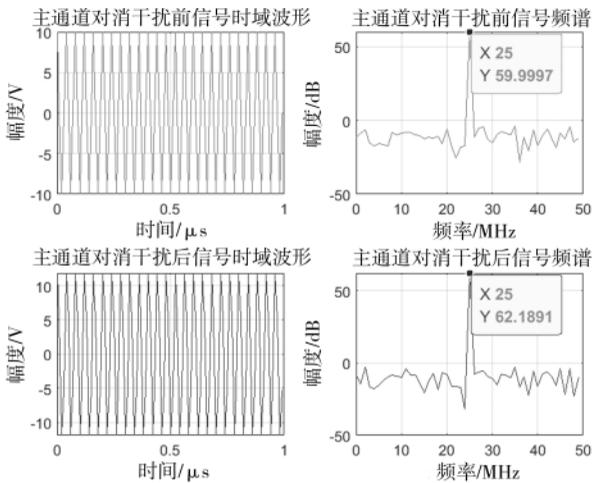


图 13 雷达主通道对消干扰信号 2 前后信号

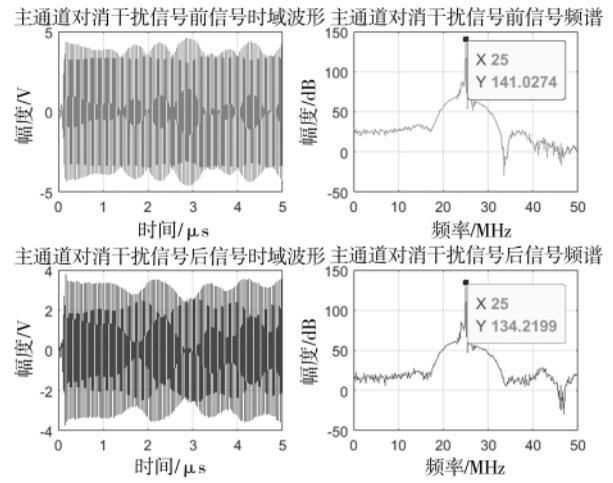


图 16 雷达主通道干扰信号 1 对消前后信号

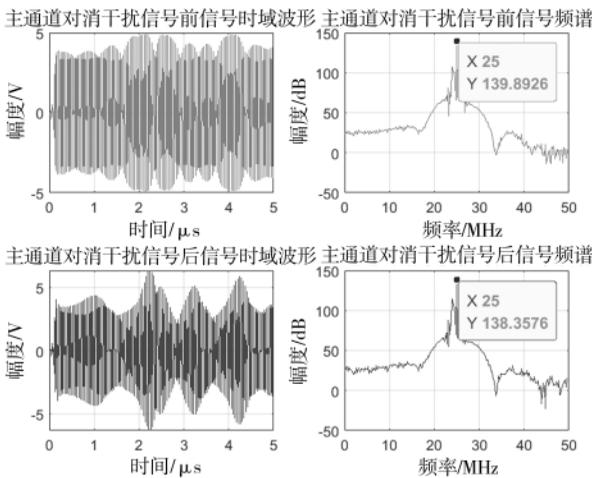


图 14 雷达主通道干扰信号 1 对消前后信号

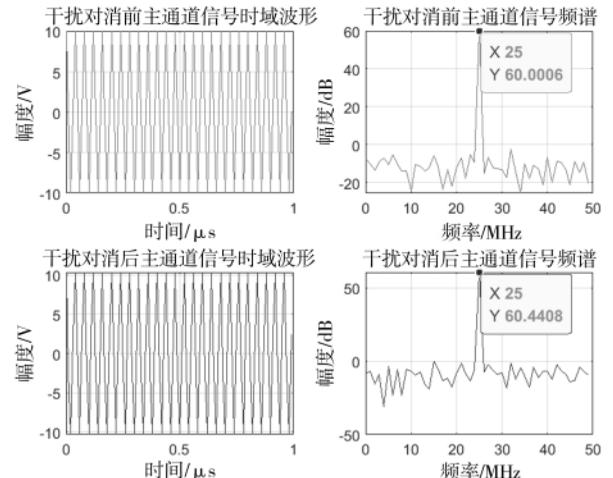


图 17 雷达主通道干扰信号 2 对消前后信号

除从副瓣进入的干扰信号,且相参干扰信号与噪声干扰对消效果差异不大。

### 3.3 干扰源位置对干扰效果影响仿真

根据图 8,干扰机 1 与雷达连线相对雷达波束指向的方位夹角  $\phi_1$  为  $20^\circ$ ,俯仰夹角  $\theta_1$  为  $-5^\circ$ ,假设干扰机 2

相对雷达方位角  $\phi_2$  变化范围为  $-10^\circ \sim 50^\circ$ ,相对雷达俯仰角  $\theta_2$  变化范围为  $-20^\circ \sim 10^\circ$ ,干扰机 1 与干扰机 2 都采用窄带调频的瞄准式的干扰方式,在统一时序控制下,对雷达实施交替干扰,不同位置干扰机 2 的雷达主通道对消干扰信号效果如图 18 和图 19 所示。

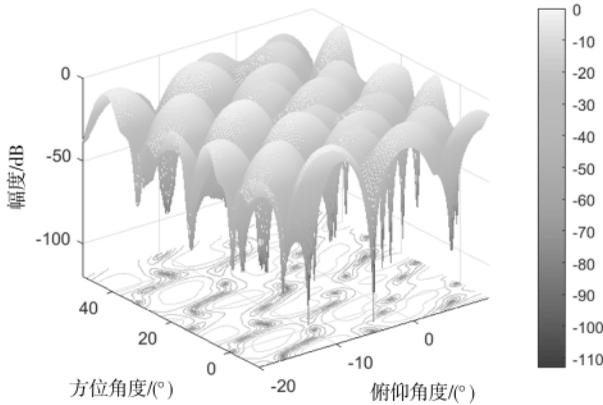


图 18 不同位置干扰机 2 的雷达主通道对消干扰信号效果

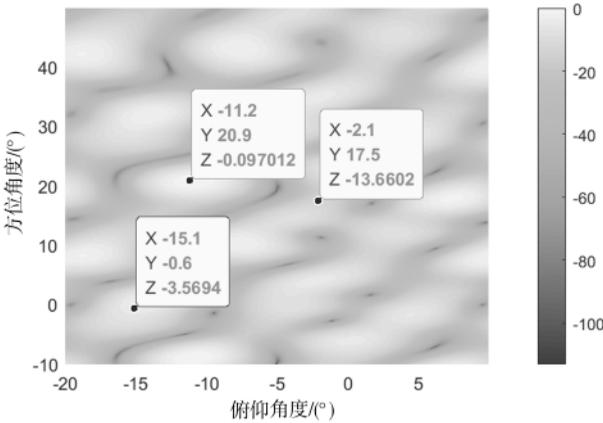


图 19 不同位置干扰机 2 的雷达主通道对消干扰信号效果

根据图 8, 干扰机 1 与雷达连线相对雷达波束指向的方位夹角  $\phi_1$  为  $20^\circ$ , 俯仰夹角  $\theta_1$  为  $-5^\circ$ , 假设干扰机 2 相对雷达方位角  $\phi_2$  变化范围为  $-10^\circ \sim 50^\circ$ , 相对雷达俯仰角  $\theta_2$  变化范围为  $-20^\circ \sim 10^\circ$ , 干扰机 1 与干扰机 2 都采用相参假目标干扰方式, 在统一时序控制下, 对雷达实施交替干扰, 不同位置干扰机 2 的雷达主通道对消干扰信号效果如图 20 和图 21 所示。

仿真结果表明, 干扰机位置对相参干扰与非相参干扰影响是不同的, 干扰机采用交替非相参干扰时, 雷达

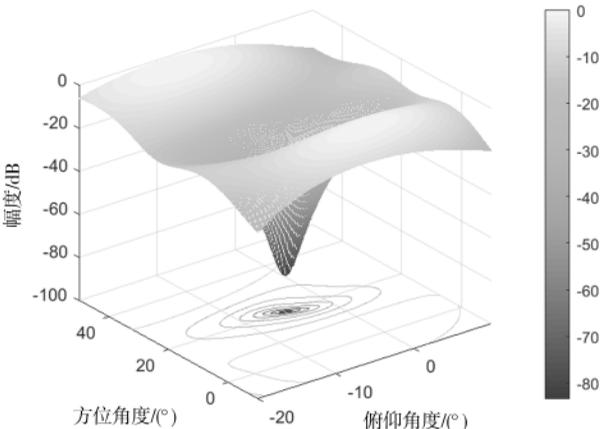


图 20 不同位置干扰机 2 的雷达主通道对消干扰信号效果

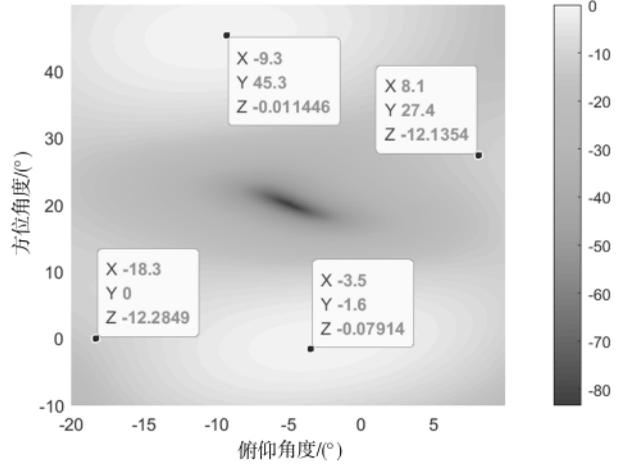


图 21 不同位置干扰机 2 的雷达主通道对消干扰信号效果

对干扰源的抑制强点在一定空间区域内分布存在一定的随机性, 即存在多个干扰抑制强点区, 但强点区相对较小; 干扰机采用交替相参干扰时, 雷达对干扰源的抑制强点是围绕干扰机 1 的位置产生的, 且干扰信号抑制能力规律性较强。

干扰机实施交替干扰时, 鉴于雷达对干扰机相参干扰与非相参干扰信号的抑制特点, 采用非相参干扰时, 干扰机相互之间部署距离可以近一些, 为保证其干扰效果, 需部署两个以上的干扰机; 采用相参干扰时, 干扰机相互之间部署距离需远一些, 为保证其干扰效果, 不同干扰机相对雷达之间夹角应  $20^\circ$  以上。

#### 4 极化对消仿真

天线按某种极化特性设计后, 正交极化上的分量理想值为 0, 实际天线由于加工精度及其他原因, 其正交分量不为 0。假设干扰源位于相对于雷达主波束的方位  $\phi$ 、俯仰  $\theta$ , 在此方向, 雷达主天线共极化增益为  $G_{mc}(\phi, \theta)$ 、雷达主天线交叉极化增益为  $G_{ms}(\phi, \theta)$ 、雷达辅助天线共极化增益为  $G_{ac}(\phi, \theta)$ 、雷达辅助天线交叉极化增益为  $G_{as}(\phi, \theta)$ , 雷达主辅天线不同极化方向图如图 22 所示。

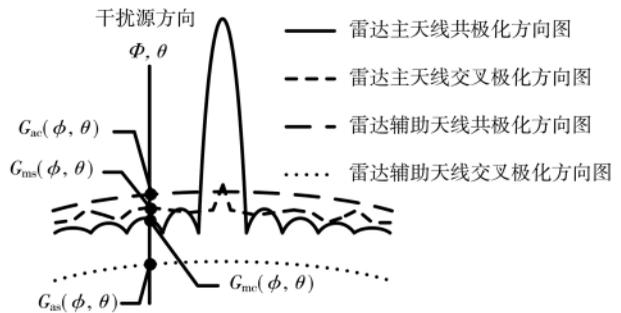


图 22 雷达主辅天线不同极化方向图

假设干扰机实施极化干扰时, 发射机输出功率不变, 经过空间传输损耗, 到达雷达天线口面, 干扰信号功率衰减为  $-60$  dBm, 干扰机与雷达连线相对雷达波束指向的方位夹角  $\phi$  为  $20^\circ$ , 俯仰夹角  $\theta$  为  $-5^\circ$ , 雷达辅助天

表1 雷达主通道干扰信号对消结果(辅助天线极化增益差 10 dB)

序号	主天线共极化增益/dBi	主天线交叉极化增益/dBi	辅助天线共极化增益/dBi	辅助天线交叉极化增益/dBi	主天线共极化对消结果/dBm	主天线交叉极化对消结果/dBm
1	20	-5	5	-5	-20	-40
2	10	-5	5	-5	-43.4	-64
3	5	-5	5	-5	-79.6	-83.2
4	0	-5	5	-5	-53.6	-72
5	-5	-5	5	-5	-51.2	-69.6
6	-10	-5	5	-5	-50.6	-69.8
7	-20	-5	5	-5	-50.4	-69.6

表2 雷达主通道干扰信号对消结果(辅助天线极化增益差 15 dB)

序号	主天线共极化增益/dBi	主天线交叉极化增益/dBi	辅助天线共极化增益/dBi	辅助天线交叉极化增益/dBi	主天线共极化对消结果/dBm	主天线交叉极化对消结果/dBm
1	20	-5	5	-10	-20	-51
2	10	-5	5	-10	-69.8	-81.8
3	5	-5	5	-10	-44	-72.4
4	0	-5	5	-10	-43.4	-69.8
5	-5	-5	5	-10	-41	-69.4
6	-10	-5	5	-10	-40.8	-68.8
7	-20	-5	5	-10	-40	-69.2

线共极化增益  $G_{ac}(\phi, \theta)$  为 5 dBi, 雷达辅助天线交叉极化  $G_{as}(\phi, \theta)$  为 -5 dBi, 根据雷达主天线极化方向图的不同增益, 对雷达主通道对消干扰信号进行仿真, 雷达主通道干扰信号对消结果(辅助天线极化增益差 10 dB)见表 1。

雷达辅助天线共极化增益  $G_{ac}(\phi, \theta)$  为 5 dBi, 雷达辅助天线交叉极化  $G_{as}(\phi, \theta)$  为 -10 dBi, 其他条件不变, 根据雷达主天线极化方向图的不同增益, 对雷达主通道对消干扰信号进行仿真, 雷达主通道干扰信号对消结果(辅助天线极化增益差 15 dB)见表 2。

仿真结果表明, 雷达主天线共极化对消后输出干扰信号幅度比雷达主天线交叉极化对消输出干扰信号幅度大, 其差值是雷达辅助天线共极化增益与交叉极化增益差值的两倍, 雷达辅助天线共极化增益一定, 其天线交叉极化增益越小, 雷达主天线共极化对消后输出干扰信号幅度越大, 即雷达主通道对消干扰信号能力越弱。

据此可以得出, 相对多站交替干扰, 极化干扰可以获得较为稳定的干扰效果, 可在雷达主通道内产生强弱交替的干扰信号, 从信号积累方面, 与全时段干扰相比, 相参积累增益降了 6 dB 信号处理增益。

## 5 结论

通过理论分析与仿真, 单个单一极化干扰源很难从雷达副瓣方向对自适应旁瓣对消雷达系统实施有效干扰, 两个或多个单一极化的干扰源采用闪烁干扰可以对自适应旁瓣对消雷达系统实施有效干扰; 单个极化干扰源可自适应旁瓣对消雷达系统实施有效干扰; 多源交替(或闪烁)干扰对干扰样式域干扰源部署位置存在一定的关系, 极化干扰则不存在位置部署问题, 因此, 综合

使用交替(或闪烁)干扰和极化干扰手段可实现对自适应旁瓣对消雷达系统的最佳干扰, 多站协同干扰时, 可有效降低干扰站作战部署要求。

## 参考文献

- [1] 李森, 李彦志, 张国毅, 等. 对自适应旁瓣对消系统的闪烁干扰方案研究[J]. 现代雷达, 2012, 34(2): 51-54.
- [2] 邱朝阳, 刘铭湖, 饶妮妮, 等. 辅助天线配置对自适应旁瓣对消系统性能的影响[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(2): 123-128.
- [3] 韩昭, 王强, 唐立科. 对相控阵雷达自适应旁瓣对消的多点源压制干扰[J]. 航天电子对抗, 2017(2): 17-21.
- [4] 龙世敏, 彭世蕤, 王振华. 自适应旁瓣对消系统干扰方法的分析与比较[J]. 电子信息对抗技术, 2016(1): 38-42.
- [5] 韩昭, 胡东. 对相控阵雷达副瓣的双极化干扰研究[J]. 舰船电子对抗, 2017, 40(5): 1-5.
- [6] 宁勇. 对相控阵雷达旁瓣干扰方法研究[J]. 电子对抗, 2009(6): 1-7.

(收稿日期: 2020-06-14)

## 作者简介:

项正山(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 雷达对抗及信号处理。

黄全(1972-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向: 雷达对抗及信号处理。

唐龙(1984-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 雷达对抗及信号处理。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所