

中图分类号: TN956

文献标志码: A

文章编号: 1674-2230(2024)04-0087-06

引用格式: 夏碧君, 朱磊, 张圣鹞, 等. 雷达旁瓣对消系统角度敏感性分析[J]. 电子信息对抗技术, 2024, 39(4): 87-92.

雷达旁瓣对消系统角度敏感性分析*

夏碧君^{1,2}, 朱磊^{1,2}, 张圣鹞^{1,2}, 田蕴琦^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十九研究所, 成都 610036; 2. 电磁空间安全全国重点实验室, 成都 610036)

摘要:旁瓣对消(Sidelobe Cancellation, SLC)作为雷达抗干扰的重要措施之一,在电子对抗中起着重要的作用。为了深入分析不同参量对旁瓣对消性能的影响,越来越多的学者开展旁瓣对消技术研究并根据研究结果进行SLC系统改进或研究攻击旁瓣对消系统薄弱环节的新型干扰技术。目前,研究主要针对干扰个数、干扰形式、辅助阵元位置、通道一致性等因素对旁瓣对消系统性能的影响,而分析多干扰角度分布对旁瓣对消系统性能影响的较少。对此,首先建立SLC系统干扰抑制比数学理论模型,然后通过仿真分析多干扰角度分布对旁瓣对消系统性能的影响,为实际分布式支援干扰角度参数优化提供理论支撑。

关键词:雷达;旁瓣对消;抗干扰;干扰角度;仿真分析

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2230.2024.04.012

Angle Sensitivity Analysis of Radar Sidelobe Cancellation System

XIA Bijun^{1,2}, ZHU Lei^{1,2}, ZHANG Shengmiao^{1,2}, TIAN Yunqi^{1,2}

(1. Southwest China Research Institute of Electronic Equipment, Chengdu 610036, China;

2. National Key Laboratory of Electromagnetic Space Security, Chengdu 610036, China)

Abstract: Sidelobe cancellation (SLC), as one of the important measures for radar anti-jamming, plays an important role in electronic countermeasures. In order to deeply analyze the impact of different parameters on the performance of sidelobe cancellation, more and more scholars are conducting research on sidelobe cancellation technology and improving SLC systems or researching new interference technologies that attack the weak links of sidelobe cancellation systems based on the research results. At present, scholars mainly focus on the impact of factors such as the number of jamming, jamming forms, auxiliary array element positions, and channel consistency on the performance of sidelobe cancellation systems. There is limited research on the impact of multi-jamming angle distribution on the performance of sidelobe cancellation systems. To address this, a mathematical theoretical model for the jamming suppression ratio of the SLC system is established first. Then, through simulation analysis, the impact of multiple jamming angle distributions on the performance of the sidelobe cancellation system is analyzed. Theoretical support is provided for the optimization of actual distributed support jamming angle parameters.

Key words: radar; sidelobe cancellation; anti-jamming; jamming angle; simulation analysis

* 收稿日期: 2023-03-24; 修回日期: 2023-08-15

通信作者: 夏碧君

作者简介: 夏碧君(1990—), 女, 硕士, 高级工程师; 朱磊(1993—), 男, 硕士, 工程师; 张圣鹞(1987—), 女, 博士, 高级工程师; 田蕴琦(1994—), 女, 硕士, 工程师。

1 引言

现代电子战战场环境越来越复杂,雷达在工作的同时受到各种有意或无意的干扰。为提高雷达的抗干扰性能,雷达采取各种抗干扰措施,旁瓣对消(Sidelobe Cancellation, SLC)作为雷达最重要的抗干扰手段之一,可大大削弱旁瓣干扰对雷达性能的影响。但旁瓣对消的性能受多方因素影响,如辅助阵元位置、干扰类型、干扰个数、干扰角度等。文献[1]分析了干扰个数对 SLC 系统对消性能的影响,提出饱和干扰概念;文献[2]分析了辅助单元位置对 SLC 系统对消性能的影响;文献[3]分析了通道失配对 SLC 对消性能的影响;文献[4]分析了信号相关性对 SLC 对消性能的影响;文献[5]分析了干扰入射角度和目标入射角度对 SLC 对消性能的影响,涉及的干扰角度主要是单干扰情况;文献[6]分析了饱和干扰时多干扰角度分布对 SLC 对消性能的影响,提出饱和多机干扰部署方式,但并未分析非饱和时干扰角度分布对 SLC 对消性能的影响。

针对多干扰角度分布对 SLC 对消性能影响理论基础薄弱的问题,本文分别从非饱和干扰(干扰个数不大于辅助通道个数)和饱和干扰(干扰个数大于辅助通道个数)两个维度分析了多干扰角度分布对旁瓣对消系统的影响。分析结果表明,旁瓣对消系统性能主要受 SLC 系统可分辨的干扰个数影响,而非实际的干扰个数;干扰角度的分布会影响旁瓣对消系统实际可分辨的干扰个数;当干扰个数非饱和且实际可分辨干扰个数与实际干扰个数相等时,旁瓣对消效果最好。

2 旁瓣对消抑制比理论模型

2.1 SLC 系统阵列方向图函数模型

假设 SLC 辅助通道数为 N ,主通道数为 M ,采用最小均方误差(Minimum Mean Squared Error, MMSE)求 SLC 最佳权矢量。设 SLC 处理后输出信号为^[7]:

$$\mathbf{e} = \mathbf{d} - \mathbf{W}^H \mathbf{X}_s \quad (1)$$

式中: $\mathbf{d} \in \mathbb{C}^{1 \times L}$ 为主通道合成输出信号, L 为样本长度, $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为辅助通道权矢量, $\mathbf{X}_s \in \mathbb{C}^{N \times L}$ 为辅助通道接收的阵列信号。

对主、辅通道权值同时引入加权常数 μ ,约束 SLC 处理后噪声叠加始终按非相参叠加^[8],即:

$$P_{N_0} = (N+M)P_{N_i} = \frac{\mathbf{n}_o \times \mathbf{n}_o^H}{L} \quad (2)$$

$$\mathbf{n}_o = \mu((\mathbf{a}_h(\theta_d))^H \mathbf{n}_h - \mathbf{W}^H \mathbf{n}_s) \quad (3)$$

$$P_{N_i} = \frac{\sum_{i=1}^{M+N} \mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_i^H}{(M+N)L} \quad (4)$$

式中: P_{N_0} 为 SLC 输出噪声功率, P_{N_i} 为 SLC 输入信号单通道噪声功率, \mathbf{n}_o 为 SLC 处理后输出噪声, $\mathbf{n}_h \in \mathbb{C}^{M \times L}$ 为主通道噪声信号, $\mathbf{n}_s \in \mathbb{C}^{N \times L}$ 为辅助通道噪声信号, $\mathbf{n}_i \in \mathbb{C}^{1 \times L}$ 为通道 i 的噪声信号, $\mathbf{a}_h(\theta_d)$ 为主通道在 θ_d (目标方向)的导向矢量。

则优化函数为:

$$\begin{aligned} \min E(|\mathbf{e}|^2) \\ \text{s. t. } P_{N_0} - (N+M)P_{N_i} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

在不考虑约束时,可推导出辅助通道最佳权矢量 \mathbf{W}_{opt} 计算公式如下所示:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = (\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{X_d} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{R}_X \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 为辅助通道自协方差矩阵, $\mathbf{r}_{X_d} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 为主辅通道互协方差矩阵, γ 为对角加载量。

将 P_{N_0} 和 P_{N_i} 的计算公式带入约束条件可得^[9]:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{M+N} \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i^H = \mu^2((\mathbf{a}_h(\theta_d))^H \mathbf{n}_h (\mathbf{n}_h)^H \mathbf{a}_h(\theta_d) - \\ (\mathbf{a}_h(\theta_d))^H \mathbf{n}_h (\mathbf{n}_s)^H \mathbf{W} - \\ \mathbf{W}^H \mathbf{n}_s (\mathbf{n}_h)^H \mathbf{a}_h(\theta_d) + \mathbf{W}^H \mathbf{n}_s (\mathbf{n}_s)^H \mathbf{W}) \end{aligned} \quad (7)$$

对式(7)左右两边取期望,假设各通道接收的噪声均为互不相关的高斯白噪声,且噪声功率为 δ^2 ,则式(7)可化简为:

$$\begin{aligned} (M+N)\delta^2 = \mu^2((\mathbf{a}_h(\theta_d))^H \mathbf{R}_{n_{hh}} \mathbf{a}_h(\theta_d) - \\ (\mathbf{a}_h(\theta_d))^H \mathbf{R}_{n_{hs}} \mathbf{W} - \\ \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{n_{sh}} \mathbf{a}_h(\theta_d) + \mathbf{W}^H \mathbf{R}_{n_{ss}} \mathbf{W}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{R}_{n_{hh}} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 为主通道噪声自相关矩阵, $\mathbf{R}_{n_{ss}} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 为辅通道噪声自相关矩阵, $\mathbf{R}_{n_{hs}} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 和 $\mathbf{R}_{n_{sh}} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 为主辅通道互相关矩阵。由于噪声为各通道相关独立的高斯白噪声,则式(8)可化简为:

$$M+N = \mu^2((\mathbf{a}_h(\theta_d))^H \mathbf{a}_h(\theta_d) + \mathbf{W}^H \mathbf{W}) \quad (9)$$

将式(9)中的辅助通道权矢量 \mathbf{W} 替换为最佳权矢量 \mathbf{W}_{opt} , 可得加权常数 μ 的计算公式如下:

$$\mu = \sqrt{\frac{M+N}{M + ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})^H ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})}} \quad (10)$$

根据以上结论, 结合阵列知识可推导出 SLC 系统阵列方向图函数模型如下:

$$F(\theta) = \sqrt{\frac{M+N}{M + ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})^H ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})}} \cdot [\mathbf{a}_h(\theta_d); -(\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}}]^H \mathbf{a}(\theta) = \sqrt{\frac{M+N}{M + ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})^H ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})}} \cdot (\mathbf{a}_h(\theta_d)^H \mathbf{a}_h(\theta) - \mathbf{r}_{\text{Xd}}^H ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1})^H \mathbf{a}_s(\theta)) \quad (11)$$

式中: $\mathbf{a}(\theta) = [\mathbf{a}_h(\theta); \mathbf{a}_s(\theta)]$, $\mathbf{a}_h(\theta)$ 为 SLC 主通道导向矢量, $\mathbf{a}_s(\theta)$ 为 SLC 辅助通道导向矢量。

2.2 干扰抑制比模型

SLC 系统一般采用干扰抑制比来描述对消性能, 干扰抑制比越大, SLC 对消性能越好。SLC 系统干扰抑制比数学模型如下:

$$CG = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_{\text{J}_{\text{in}}}}{P_{\text{J}_{\text{out}}}} \right) \quad (12)$$

$$CG = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\sum_{l=1}^L P_{\text{J}_l}}{\sum_{l=1}^L \left(\sqrt{\frac{M+N}{M + ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})^H ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})}} \cdot \mathbf{a}_h(\theta_d)^H \mathbf{a}_h(\theta_{\text{J}_l}) - \mathbf{r}_{\text{Xd}}^H ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1})^H \mathbf{a}_s(\theta_{\text{J}_l}) \right)^2 P_{\text{J}_l}} \right) \quad (16)$$

3 仿真分析

3.1 干扰角度分布对 SLC 干扰抑制比的影响

假设辅助通道个数等于 8, 发射天线增益 40 dB, 接收天线增益 35 dB, 接收副瓣平均水平 -30 dB, 辅助通道增益 6 dB, 到达雷达接收基阵口面信号的功率为 -155 dBm, 接收机通道噪声功率 -100 dBm, 单个干扰源到达雷达接收基阵口面的干扰功率 -86 dBm。干扰角度分布采用在方位等间隔布设, 如图 1 所示。先利用干扰 1 和干扰 2 的布设角度固定两端干扰方位, 为避免干扰布设于主瓣范围内(在此假设雷达主瓣宽度为 8°),

式中: $P_{\text{J}_{\text{in}}}$ 为 SLC 系统的输入干扰功率; $P_{\text{J}_{\text{out}}}$ 为 SLC 系统的输出干扰功率, 即干扰对消剩余量。

根据 SLC 系统阵列方向图函数模型 $F(\theta)$ 可推导出 SLC 系统的输出干扰信号模型 J_o :

$$J_o = \sum_{l=1}^L F(\theta_{\text{J}_l}) \cdot j_l = \sum_{l=1}^L \sqrt{\frac{M+N}{M + ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})^H ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})}} \cdot (\mathbf{a}_h(\theta_d)^H \mathbf{a}_h(\theta_{\text{J}_l}) - \mathbf{r}_{\text{Xd}}^H ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1})^H \mathbf{a}_s(\theta_{\text{J}_l})) \cdot j_l \quad (13)$$

则输出干扰功率计算公式如下:

$$P_{\text{J}_{\text{out}}} = \frac{J_o J_o^H}{L} = \frac{1}{L} \left(\left| \sqrt{\frac{M+N}{M + ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})^H ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1} \mathbf{r}_{\text{Xd}})}} \cdot \mathbf{a}_h(\theta_d)^H \mathbf{a}_h(\theta_{\text{J}_l}) - \mathbf{r}_{\text{Xd}}^H ((\mathbf{R}_X + \gamma \mathbf{I})^{-1})^H \mathbf{a}_s(\theta_{\text{J}_l}) \right|^2 P_{\text{J}_l} \right) \quad (14)$$

式中: P_{J_l} 为干扰 l 的输入功率。

在此假设各干扰之间不相关, 各干扰功率按非相参叠加, 则 SLC 系统对消前干扰功率为:

$$P_{\text{J}_{\text{in}}} = \sum_{l=1}^L P_{\text{J}_l} \quad (15)$$

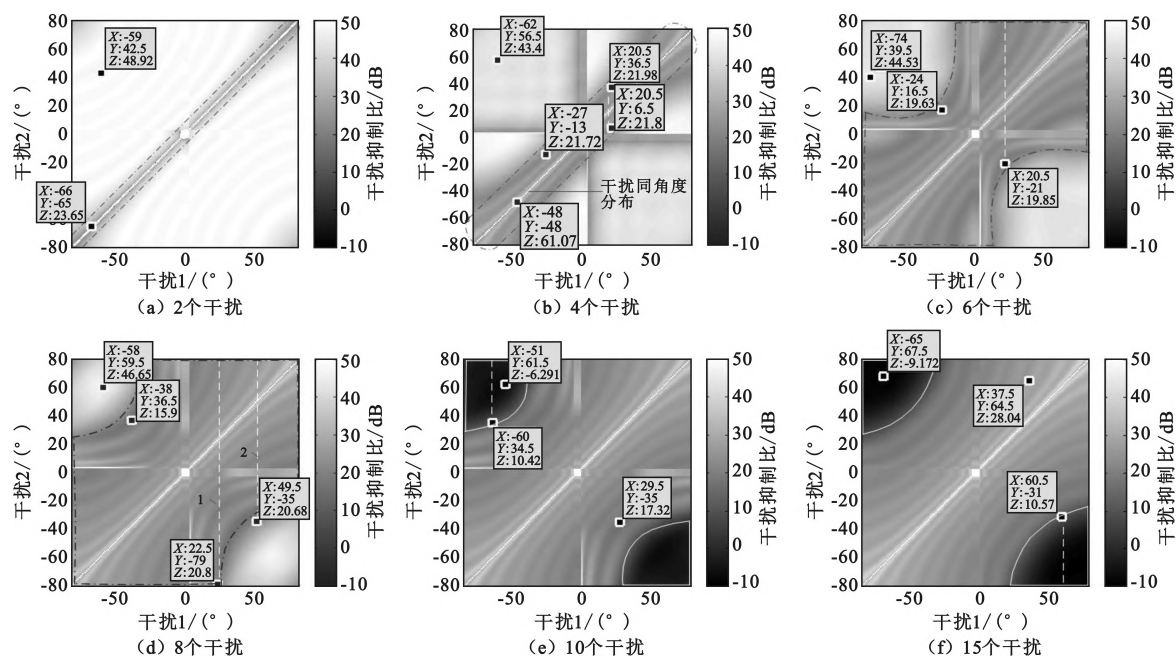
从而得到干扰抑制比数学模型如下:

若干扰 1 和干扰 2 位于同侧, 则其余的干扰均匀分布于中间; 若干扰 1 和干扰 2 分布于异侧, 则将干扰分为两组, 分别均匀布设于干扰 1 与 -4° 之间、 4° 与干扰 2 之间。



图 1 干扰分布示意图

图 2 为不同干扰个数时, 干扰抑制比与干扰角度分布之间的对应关系^[10]。图 3 为不同干扰个数时, 辅助通道协方差矩阵大特征值个数统计。表 1 为不同干扰个数条件下, 干扰对消情况统计。



注: 1. x 为干扰 1 角度值, y 为干扰 2 角度值, z 为干扰抑制比。
2. 颜色越深表示干扰抑制比越低, 颜色越浅表示干扰抑制比越高。

图 2 干扰抑制比

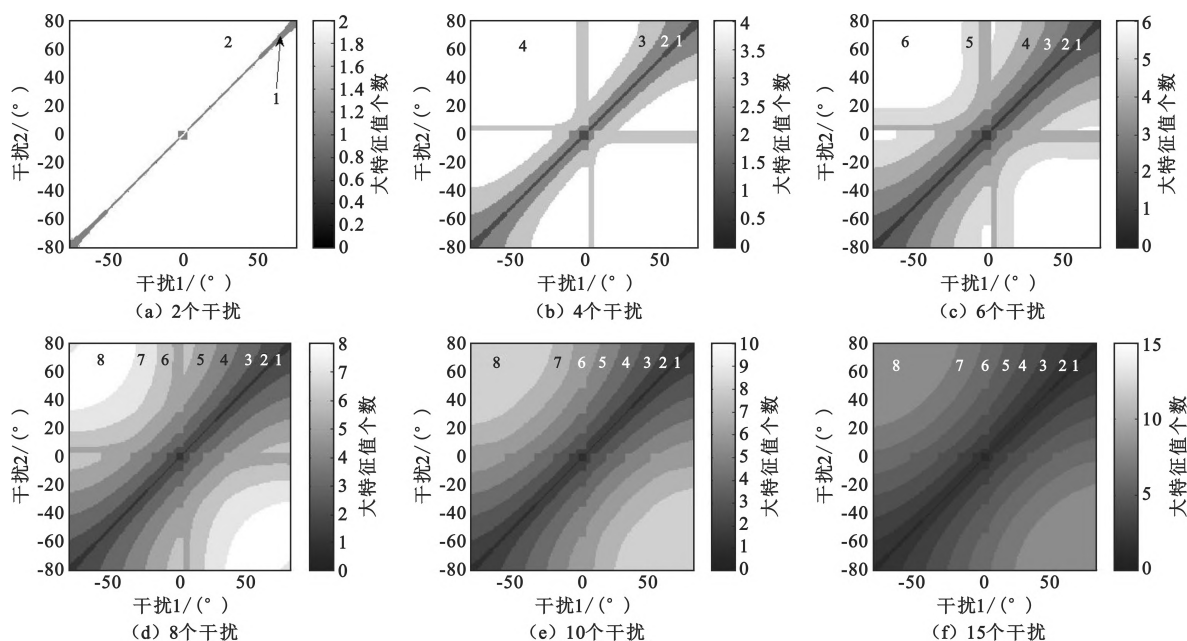


图 3 大特征值个数统计

表 1 干扰抑制比情况统计

干扰个数	$CG \leq 20$ dB 的角度分布占比/%	最小干扰抑制比/dB
2	0	23.57
4	0	21.71
6	2.08	19.24
8	6.32	15.89
10	35.90	-6.29
15	38.51	-9.17

3.2 结果分析

根据仿真结果分析如下:

(1) 从图 2 可知, 无论干扰个数多少, 副对角线上干扰抑制比均远大于其他区域, 干扰抑制比约 60 dB, 副对角线表征所有干扰源从同一角度入射。因此, 单角度副瓣干扰效果差于多角度副瓣干扰效果。

(2)对于干扰方,总是希望干扰抑制比越小越好(对应图 2 颜色越深越好)。根据图 2 可知,当干扰个数一定时,不同干扰角度分布方式对于干扰抑制比具有较大的影响,当前仿真条件下,干扰抑制比差异不小于 20 dB。对于非饱和干扰,当干扰分布于图 2(a)~图 2(d)中黑色虚线包围区域时,干扰抑制比相对较小(除所有干扰同角度入射情况),且随着干扰个数的增加,黑色虚线包围区域越来越大;对于饱和干扰,当干扰分布于图 2(e)和图 2(f)中白色实线包围区域时,干扰抑制比相对较小,且此区域大小几乎不随干扰个数增加而变化。

(3)从表 1 可知,当干扰个数从 2 增加到 15 时,最小干扰抑制比从 23.57 dB 下降到 -9.17 dB;干扰抑制比小于 20 dB 的角度分布占比从 0%上升到 38.51%。由此可知,干扰个数越多,通过合理选择干扰入射角度,可获得越低的干扰抑制比;想要获得一定的干扰抑制比,干扰个数越多,对于干扰入射角度选择范围越大。

(4)从图 3 可以看出,不同干扰角度分布时,辅助通道协方差矩阵的大特征值个数不同,非饱和干扰时,以副对角线为对称轴,辅助通道协方差矩阵大特征值个数逐渐从 1 增加到干扰源个数。

图 2(a)~图 2(d)中黑色虚线包围区域的大特征值个数小于辅助通道个数;饱和干扰时,以副对角线为对称轴,辅助通道协方差矩阵大特征值个数逐渐从 1 增加到辅助通道个数。图 2(e)和图 2(f)中白色实线包围区域大特征值个数等于辅助通道个数。

(5)辅助通道协方差矩阵大特征值个数可用于估计干扰源个数。结合图 2 和图 3 可知,非饱和干扰时,若任意两干扰分布间隔角度大于 SLC 系统角度分辨率(本文是通过大特征值个数来表征干扰间隔角度是否大于 SLC 系统角度分辨率),则 SLC 可以正确分辨出干扰个数,SLC 对消性能好,干扰抑制比较大;反之,SLC 无法正确估计出干扰个数,SLC 可以实现干扰对消,但对消性能下降。饱和干扰时,若实际分辨出的干扰个数等于辅助通道个数(受辅助通道个数限制,最多只能分辨出与辅助通道个数相等的干扰数),此时 SLC 几乎无法实现干扰对消,干扰抑制比非常小;反之,SLC 实际分辨出的干扰个数小于辅助通道个数,无法实现饱和干扰,SLC 可以实现干扰对消,但由于估计出的干扰个数不是真实的干扰个数,对消性能下降。结合以上分析,将不同条件下干扰对消情况总结为图 4。

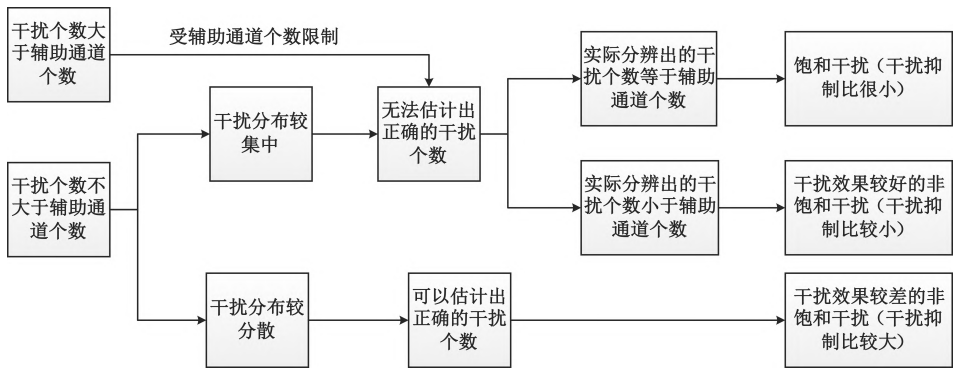


图 4 不同条件下,干扰对消情况图示

(6)根据以上分析可知,为尽可能提高干扰费效比,非饱和干扰时,应将各干扰源集中分布在一定的角度范围内,此角度范围与雷达 SLC 系统角度分辨率有关;饱和干扰时,各干扰尽可能分散。表 2 为当前仿真条件下,为尽可能获得较低的干扰抑制比,干扰角度分布实例。

表 2 干扰角度分布实例

干扰个数	干扰 1 布设角度/(°)	干扰 2 最佳布设范围/(°)
4	20.5	6.5~36.5 (图 2(b)中白色虚线所示范围)
6	20.5	-21~80 (图 2(c)中白色虚线所示范围)

表 2(续)

干扰 个数	干扰 1 布设 角度/(°)	干扰 2 最佳布 设范围/(°)
8	22.5	-80~80 (图 2(d)中白色虚线 1 所示范围)
	49.5	-35~80 (图 2(d)中白色虚线 2 所示范围)
10	-60	34.5~80 (图 2(e)中白色虚线所示范围)

4 结束语

本文首先推导了旁瓣对消系统干扰抑制比数学模型,再根据数学模型仿真分析了不同干扰个数从不同角度入射时干扰抑制比的大小。分析结果表明,旁瓣对消性能受干扰个数及干扰角度分布影响。干扰个数越多,干扰抑制比较小区域越大,且最小干扰抑制比也越小。干扰分布角度对 SLC 系统的影响主要通过扰乱 SLC 系统对干扰源个数估计实现。对于非饱和干扰,若干扰分布较分散,SLC 系统可以正确估计出干扰源个数,则干扰抑制比较大;若干扰分布较集中,则 SLC 系统无法正确估计出干扰源个数,干扰抑制比较小。对于饱和干扰,无论干扰角度如何分布,SLC 系统均无法正确估计出干扰源个数,干扰抑制比较小;且当干扰分布较分散以至于实际可分辨干扰个数等于辅助通道数时,干扰抑制比非常小,SLC 几乎无法实现干扰对消。由此可知,通过合理设计干扰个数及干扰布设角度,有望获得更小的干扰抑制比,提高副瓣干扰效能。

参考文献:

[1] 胡生亮,金嘉旺,李仙茂. 雷达旁瓣对消的多方位饱和干扰技术研究[J]. 雷达与对抗,2003(3):45-49.

[2] 张智猛,徐振海,刘煜孜. 辅助单元位置对旁瓣对消性能的影响[J]. 现代雷达,2022,44(9):7-12.

[3] 吴克钊,聂海江,刘志武,等. 旁瓣对消系统的分布式干扰方法研究[J]. 航天电子对抗,2021,37(6):43-47.

[4] 冉小凤,魏青. 相关性对旁瓣对消效果的影响[J]. 电子科技,2011,24(3):56-58,61.

[5] XIAO S J,HE F M,LI B,et al. The influence of signal incident angle on generalized sidelobe cancellation system[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021,1971(1):1-5.

[6] 范忠亮,夏润梁. 针对压制干扰雷达副瓣对消的多干扰机部署设计[J]. 航天电子对抗,2020,36(6):39-42.

[7] 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,2017,33(2):17-21.

[8] 祝飞,林强,李飞. 自适应旁瓣对消系统综述[J]. 舰船电子对抗,2020,43(1):12-18.

[9] 侯少岭,蔺东霞,王永海. 阵列多波束雷达通道失配对旁瓣对消性能的影响[J]. 航天电子对抗,2016,32(1):43-45.

[10] MOHAMMED J R,SAYIDMARIE K H. Sidelobe cancellation for uniformly excited planar array antennas by controlling the side elements[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2014, 13: 987-990.