

文章编号: 2095-4980(2023)09-1117-08

有源相控阵天线子阵划分对旁瓣匿影性能影响

张广磊, 陈峰峰*, 单蛟龙, 莫修辞

(中国航空工业集团公司 雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063)

摘 要: 由于缺少旁瓣匿影性能评估的统一标准, 子阵划分对旁瓣匿影性能影响研究较少。对此, 本文提出旁瓣匿影性能评估参量——旁瓣匿影率, 其本质是计算满足旁瓣匿影要求区域占整个方向图区域的比例。其中保护通道直接利用子阵级数据通过加权非相参积累方式构建, 可实现保护通道的自适应干扰抑制, 支撑干扰条件下的自适应旁瓣匿影。实验表明, 子阵划分非均匀性越强, 子阵数越多, 扫描角越小, 有源相控阵天线的旁瓣匿影率越高, 旁瓣匿影性能越好。

关键词: 子阵划分; 保护通道; 旁瓣匿影率; 方向图

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021290

Influence of subarray partition of active phased array antenna on side-lobe blanking performance

ZHANG Guanglei, CHEN Fengfeng*, SHAN Jiaolong, MO Xiuci

(Leihua Electronic Technology Research Institute, AVIC, Wuxi Jiangsu 214063, China)

Abstract: Due to lack of a unified standard for performance evaluation of side-lobe blanking, there are few studies on the effect of subarray partition on the side-lobe blanking performance. The performance evaluation parameter of side-lobe blanking—side-lobe blanking ratio is put forward, whose essence is to calculate the proportion of the area satisfying the requirement of the side-lobe blanking in the whole pattern region. The guard channel is constructed by weighted non-phase-coherent accumulation of subarray data directly, which can realize adaptive interference suppression and support the adaptive side-lobe blanking under the interference condition. The simulation results show that the stronger the non-uniformity of subarray partition, the larger the number of the subarray; the smaller the scanning angle, the higher the side-lobe blanking ratio and the better the side-lobe blanking performance of the active phased array antenna.

Keywords: subarray partition; guard channel; side-lobe blanking ratio; pattern

旁瓣匿影通过比较主通道与保护通道检测目标的功率, 剔除从旁瓣进入的干扰信号。传统保护通道需要单独的接收通道, 当干扰进入保护通道时, 旁瓣匿影失效^[1]。子阵划分技术是目前大型有源相控阵雷达中自适应阵列处理的一个标准流程, 该技术不仅在物理层面起到了降维作用, 也在降低算法维数与系统复杂度, 加快算法收敛速度与系统复杂度等方面具有实质性的作用。子阵划分直接决定阵列处理性能, 反之, 阵列处理技术的研究也为子阵优化设计提供启示与指导^[2]。子阵级数据采用非相参积累直接构建保护通道, 同时可利用子阵自由度抑制干扰, 形成自适应保护通道, 实现自适应旁瓣匿影功能。目前, 关于自适应波束形成^[3]、空时自适应处理^[4]、自适应旁瓣对消^[5]以及广义单脉冲测角^[6]等阵列处理流程对子阵划分的研究较多。其中, 文献[7]提出系统性的旁瓣匿影性能评估标准, 但在雷达工程方案设计前期的可操作性相对较难, 无法从旁瓣匿影处理流程方面对子阵划分优化设计提供必要的参考与指导。

针对上述需求, 本文首先提出旁瓣匿影率的概念, 其本质是计算满足旁瓣匿影要求的区域占整个方向图区域的比例。然后, 通过仿真实验分析子阵划分对旁瓣匿影性能的影响。实验结果表明, 子阵划分非均匀性越强,

收稿日期: 2021-07-20; 修回日期: 2021-08-26

基金项目: 航空科学基金资助项目(20172007002)

*通信作者: 陈峰峰 email:cyf1935@163.com

子阵数越多,扫描角越小,旁瓣匿影率越高,旁瓣匿影性能越好。该结论为大型机载有源相控阵雷达子阵划分技术提供重要的参考与指导。

1 传统旁瓣匿影系统

图1为传统旁瓣匿影系统。从天线旁瓣进入的强干扰与杂波对主瓣接收信号造成干扰,并引起雷达测角失效。通过制造超低旁瓣天线,可以尽量降低雷达天线主瓣以外干扰与杂波的接收强度,进而最大限度减小干扰与杂波所造成的影响。但超低旁瓣天线成本高,且超低旁瓣会造成主瓣方向图展宽,增益下降。成本较低的旁瓣匿影系统可有效解决旁瓣强干扰与杂波对雷达系统的影响。早期雷达采用方向性较强的天线作为主天线,保护天线则由放置在主天线旁边的若干个低增益天线构成,如图1(a)传统旁瓣匿影系统流程图所示,其工作过程如下:

若主通道功率>保护通道功率,目标,保留;

若主通道功率<保护通道功率,干扰,剔除。

为实现通过比较主通道与保护通道信号功率,剔除旁瓣干扰信号的功能,保护天线旁瓣增益需大于雷达主天线所有方向旁瓣增益,而主瓣增益要小于雷达主天线主瓣增益,如图1(b)所示。

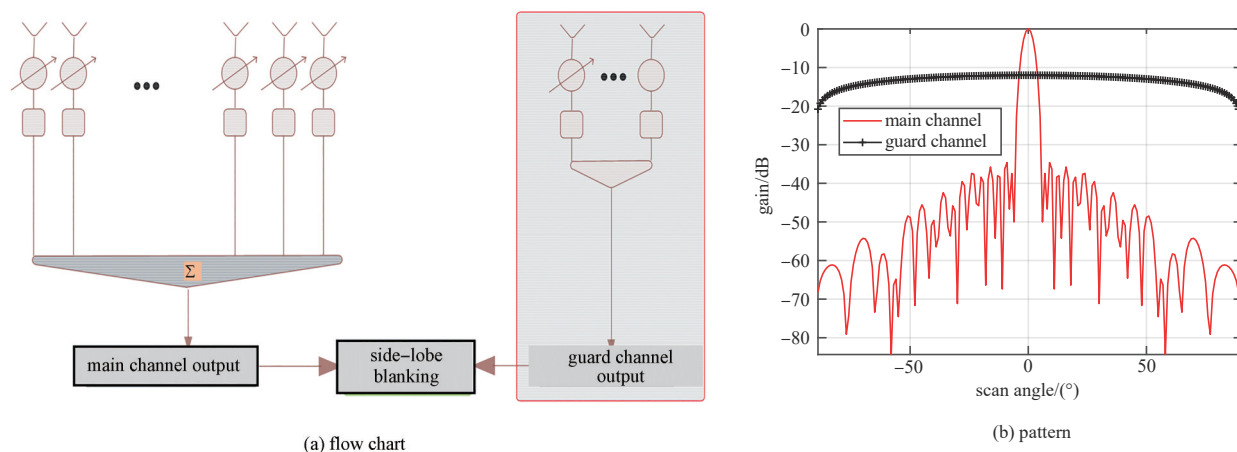


Fig.1 Traditional side-lobe blanking system

图1 传统旁瓣匿影系统

但由于传统保护通道需要单独的接收链路,当存在干扰时,保护通道被干扰覆盖,无法形成自适应保护通道。如果此时将主通道检测出的目标信号功率与保护通道的干扰信号功率进行比较,有可能导致真实目标被误认为是从旁瓣进入的干扰信号,将其剔除,旁瓣匿影失效。此外,在防空反导雷达 SPY-6,以及尺寸可变的捷变波束雷达等未来模块化数字阵雷达系统中,不具备单独的保护通道,无法实现旁瓣匿影功能。为提高雷达在高烈度体系化对抗中的作战能力^[8],结合有源相控阵雷达数字化趋势,需要采用子阵级数据直接构建保护通道,实现自适应旁瓣匿影功能。

2 子阵级数据构建旁瓣匿影系统

图2为子阵级数据构建的旁瓣匿影系统。通过对大型阵列雷达进行子阵划分,在子阵内采用模拟波束形成,子阵间采用数字波束形成,可以极大地减少接收通道数、硬件成本与工程实现代价,如图2(a)所示。利用子阵级通道直接通过非相参积累构建保护通道,使其增益小于阵列和波束主瓣增益,大于阵列和波束旁瓣增益,实现旁瓣匿影功能,如图2(b)所示。主通道和波束方向图为^[9]:

$$f_{\text{sum}}(\theta, \varphi) = \omega_{\text{sub}}^H A_s(\theta, \varphi) = \omega_{\text{sub}}^H T^H a(\theta, \varphi) \quad (1)$$

式中: ω_{sub}^H 为全1的 L 行矩阵,表示子阵级加权值, L 为子阵个数; θ 、 φ 分别为方向图的俯仰角和方位角;

$A_s(\theta, \varphi) = T^H a(\theta, \varphi)$ 为子阵级导向矢量;

$$T = a(\theta, \varphi) W T_0 \quad (2)$$

式中： $\mathbf{a}(\theta, \varphi) = \text{diag}\left\{g_m \exp\left\{j2\pi\left[x_m\alpha(\theta_0, \varphi_0) + y_m\beta(\theta_0, \varphi_0)\right]/\lambda\right\}\right\}_{m=1,2,\dots,M}$ 为阵元导向矢量； (x_m, y_m) 为第 $m(m=1, 2, \dots, M)$ 个阵元的坐标； $\alpha(\theta, \varphi) = \sin\theta \cos\varphi$ ； $\beta(\theta, \varphi) = \sin\theta \sin\varphi$ ； (θ_0, φ_0) 表示波束指向俯仰角和方位角； $\mathbf{W} = \text{diag}(w_m)_{m=1,2,\dots,M}$ ， w_m 为第 m 个阵元的加权系数，以便获得低副瓣方向图； $\mathbf{T}_0$ 为 $M \times L$ 的子阵形成矩阵，在其第 $l(l=0, 1, \dots, L-1)$ 列的所有元素中，只有与第 l 个子阵的阵元序号相对应的元素值为 1，其余均为 0。

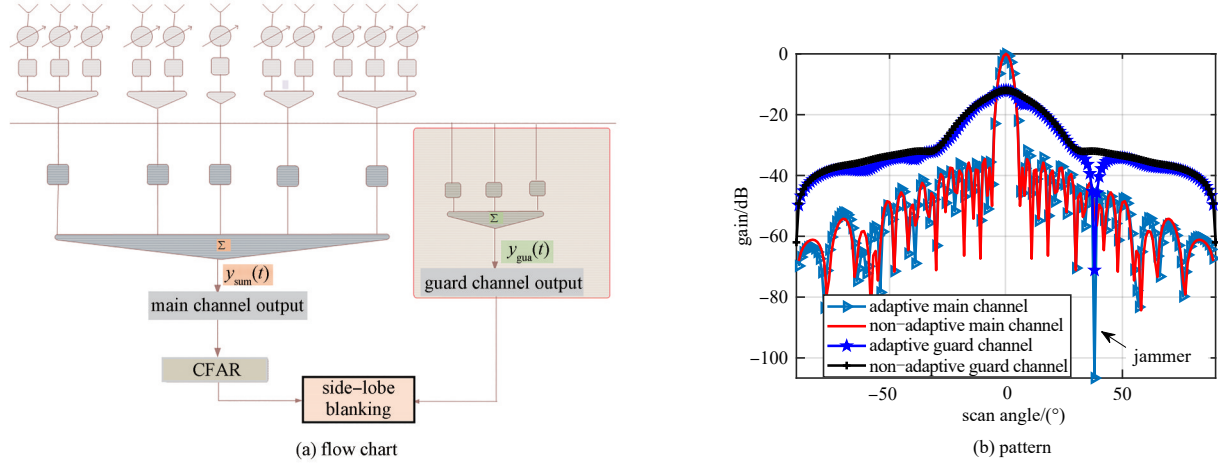


Fig.2 Side-lobe blanking system constructed by subarray data

图2 子阵级数据构建旁瓣匿影系统

设阵元输出信号为 $\mathbf{X}(t) = [X_1(t), \dots, X_m(t), \dots, X_M(t)]^T$ ，则子阵级接收数据 $\mathbf{X}_s(t)$ 为：

$$\mathbf{X}_s(t) = \mathbf{T}^H \mathbf{X}(t) \quad (3)$$

其协方差矩阵为：

$$\mathbf{R}_{\text{sub}} = E[\mathbf{X}_s(t) \mathbf{X}_s^H(t)] \quad (4)$$

由主通道和波束方向图得到保护通道的方向图为：

$$f_{\text{gua}}(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M |A_{s,m}(\theta, \phi)|^2 \quad (5)$$

式中 $A_{s,m}(\theta, \phi)$ 为 $A_s(\theta, \phi)$ 的第 m 列元素。

保护通道输出为：

$$y_{\text{gua}}(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M |X_{s,m}(\theta, \phi)|^2 \quad (6)$$

将子阵级主通道自适应波束形成方法推广到保护通道中，其自适应方向图如图 2(b)所示，其公式为：

$$f_{\text{gua_smi}}(\theta, \phi) = \sum_{m=1}^M |A_{ss,m}(\theta, \phi)|^2 \quad (7)$$

式中 $A_{ss}(\theta, \phi) = \mathbf{R}_{\text{sub}}^{-1/2} \mathbf{A}_s(\theta, \phi)$ ，与之对应的自适应保护通道输出 $y_{\text{gua_smi}}(t)$ 为：

$$y_{\text{gua_smi}}(t) = \sum_{m=1}^M |X_{ss,m}(t)|^2 \quad (8)$$

式中 $\mathbf{X}_{ss,m}(t) = (\mathbf{R}_{\text{sub}}^{-1/2})^H \mathbf{X}_s$ ，表示预白化后的子阵级数据。

3 旁瓣匿影率

子阵划分直接决定阵列处理性能，反之，阵列处理技术的研究也对子阵优化设计提供启示与指导。由于子阵相位中心远大于半波长，子阵技术极易产生栅瓣及高副瓣，尤其在规则划分子阵扫描过程中，较大的栅瓣会严重影响保护通道方向图的性能。采用非规则子阵，打乱了子阵相位中心的周期性^[10-11]，可有效提高保护通道

方向图特性。现有算法多以自适应处理与测角等为目标函数对子阵划分性能进行约束与子阵优化设计,较少涉及旁瓣匿影性能分析,主要是因为缺少旁瓣匿影性能的统一判决标准。

针对上述需求,本文提出旁瓣匿影率的概念,并将其作为保护通道方向图对旁瓣匿影性能影响的统一评估标准。旁瓣匿影率 σ 的本质是在整个方向图区域内计算满足旁瓣匿影要求区域所占的比例,表达式为:

$$\sigma = \frac{\sum_{i \in \Omega_{\text{SLB}}} i}{\sum_{i \in \Omega} i} \quad (9)$$

式中: Ω_{SLB} 满足旁瓣匿影的区域; Ω 为整个角度区域。

图3为旁瓣匿影率示意图,从图中可以发现,旁瓣匿影率 σ 越高,表示在整个方向图范围内满足旁瓣匿影要求的区域越大,旁瓣匿影性能越好。

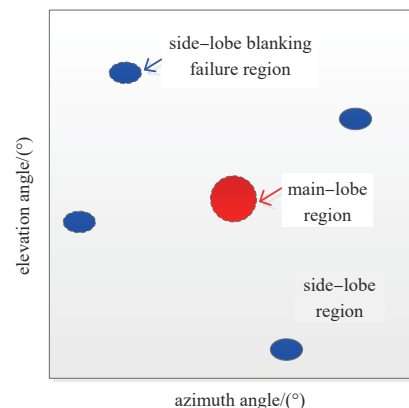


Fig.3 Schematic diagram of side-lobe blanking ratio
图3 旁瓣匿影率示意图

4 仿真实验

为了分析子阵划分对雷达旁瓣匿影性能的影响,首先给出不同子阵划分设计方案,然后分析其旁瓣匿影性能与旁瓣匿影率。

4.1 子阵划分

为了验证不同数目、不同形式子阵划分对雷达旁瓣匿影性能的影响,采用不同子阵数目(8、16、32)、不同子阵划分形式(棋盘阵、圆靶阵、Nickel阵,又名不规则阵)等相互组合得到9种子阵划分设计方案。图4~6分别为8、16、32子阵划分方案,其中每一个标志表示一个天线阵元,相同标志对应同一个子阵,且被相同的颜色覆盖,各个子阵之间无交叉,子阵加权相位中心用大号红色实心点标出,阿拉伯数字表示子阵编号。不规则阵是Nickel通过参考和差保护加权求解方法,经过“量化”与“相交”2个关键步骤得到的子阵划分方案。

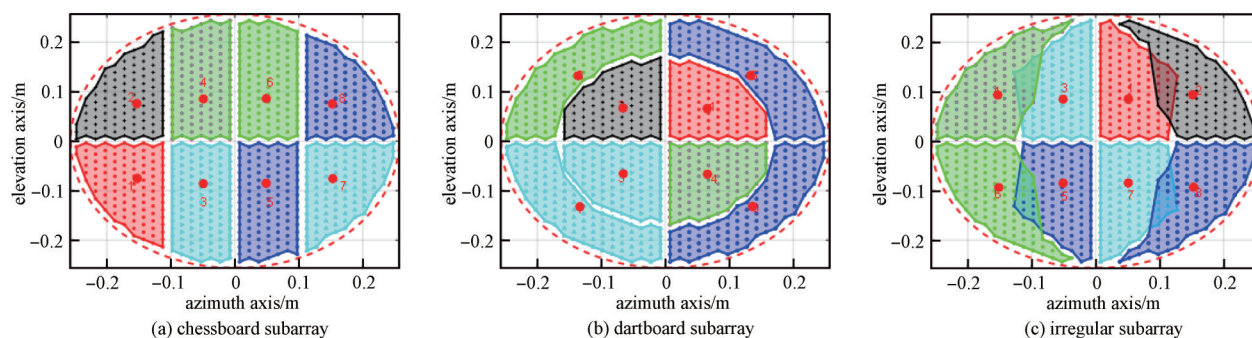


Fig.4 8-subarray partition strategy
图4 8子阵划分方案

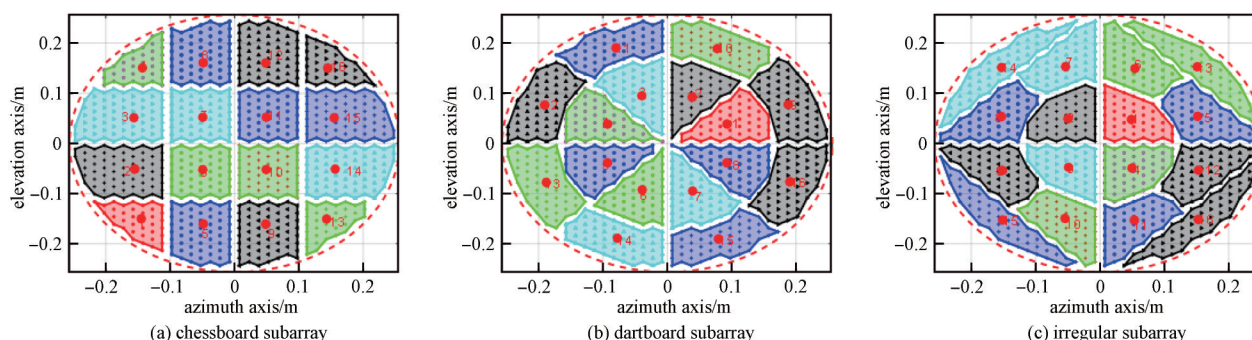


Fig.5 16-subarray partition strategy
图5 16子阵划分方案

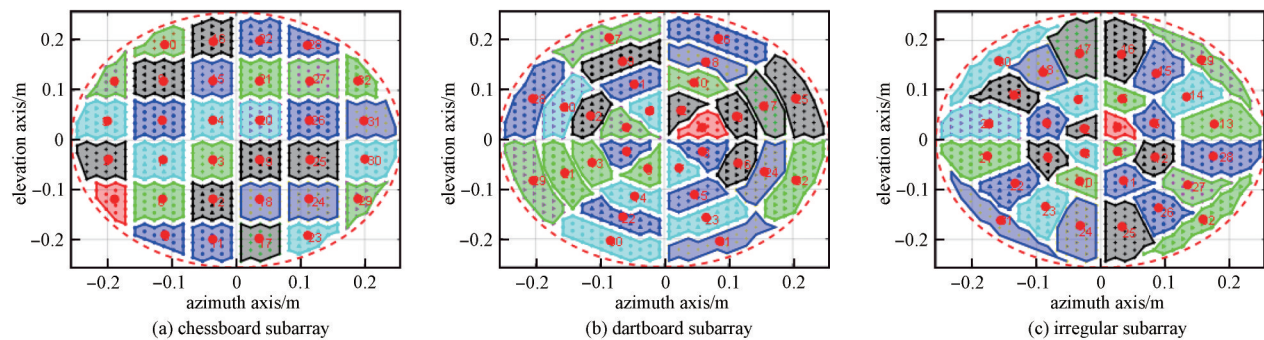


Fig.6 32-subarray partition strategy
图 6 32 子阵划分方案

4.2 旁瓣匿影

首先分析主通道与保护通道的方向图特性。图 7 为棋盘 32 子阵主通道与保护通道方向图，可以发现，主通道方向图主瓣较窄，副瓣较低，而保护通道正好相反。这是由于保护通道是利用子阵级数据通过非相参积累构建得到的，其方向图由各个子阵方向图幅度平均得到，与子阵方向图比较接近。在方向图主瓣区，主通道功率大于保护通道，而在旁瓣区正好相反，但由于子阵划分数目及划分方式等原因，导致在部分旁瓣区域内，主通道的功率大于保护通道的功率，旁瓣匿影失效，旁瓣匿影率降低，雷达作战性能降低。

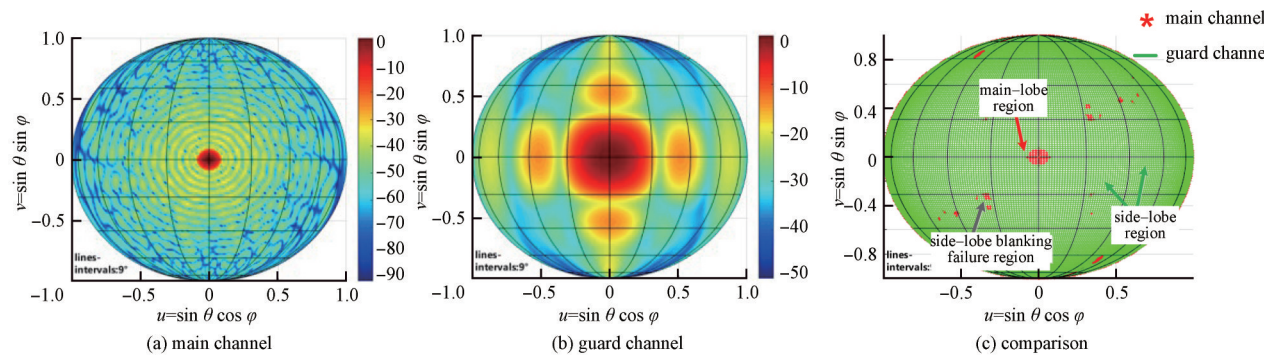


Fig.7 Main channel and guard channel patterns of 32-subarray of chessboard
图 7 棋盘 32 子阵主通道与保护通道方向图

图 8 为棋盘 32 子阵主通道与保护通道输出频谱。由于非相参积累具备一定的平滑作用，保护通道的噪声功率起伏远小于主通道。当保护通道功率大于主通道功率一定阈值时，判断为干扰，将其剔除；反之，判断为目标信号，将其保留，进行后续的测角与解模糊算法。

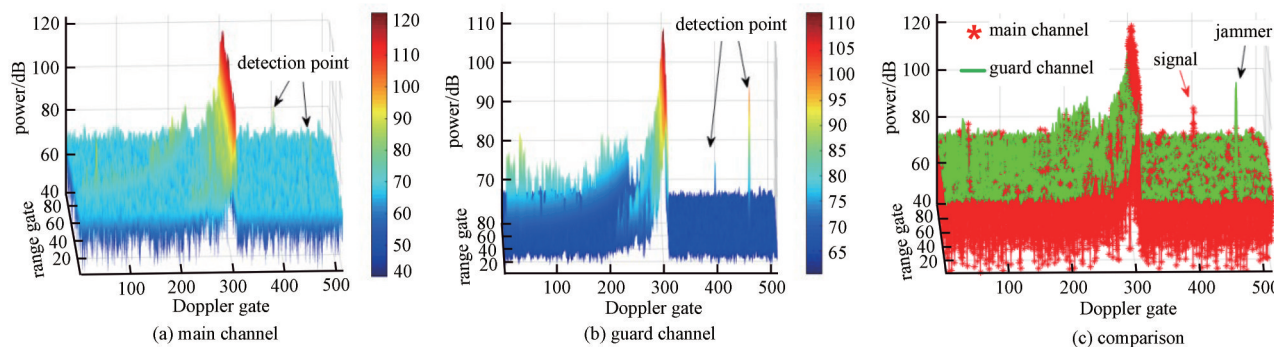


Fig.8 Main channel and guard channel spectra of 32-subarray of chessboard
图 8 棋盘 32 子阵主通道与保护通道频谱

对比分析图 4~6 子阵划分方案的旁瓣匿影性能。首先对比法线处的方向图，如图 9~11 所示。可以发现，不同子阵划分方案对应的旁瓣匿影性能不同，旁瓣匿影率也不同。

为更全面地对比不同子阵划分结果在不同扫描角的旁瓣匿影性能，图 12 给出不同扫描角度的旁瓣匿影率，表 1 列出了上述子阵划分方案旁瓣匿影率的均值。由于方向图关于四象限对称，因此本文只给出了单个象限的仿

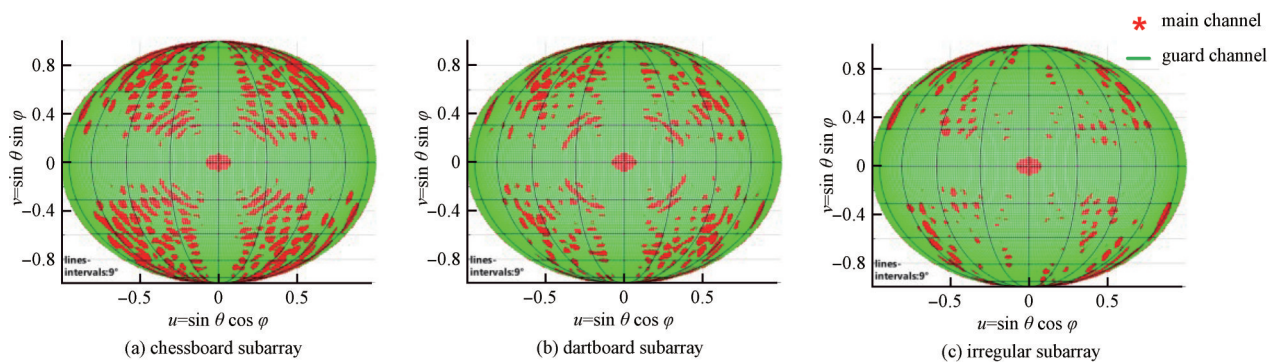


Fig.9 8-subarray partition strategy

图 9 8子阵划分方案

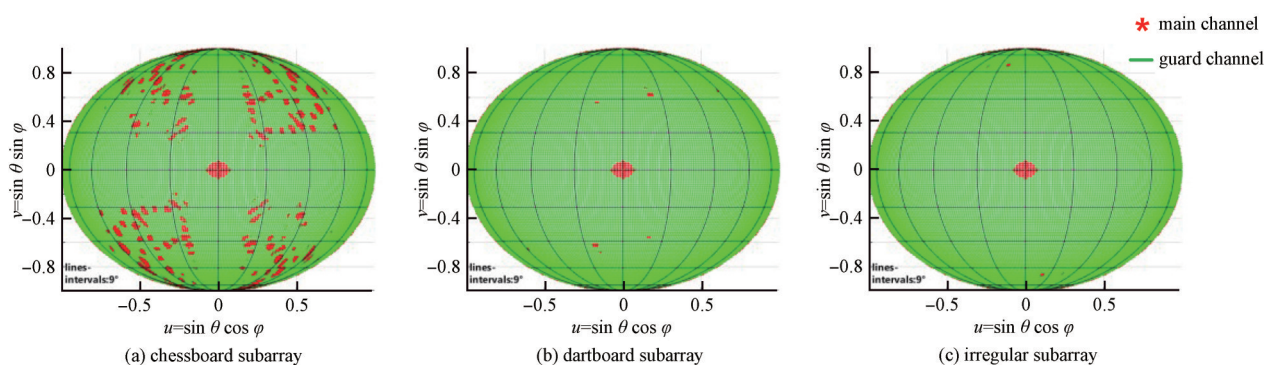


Fig.10 16-subarray partition strategy

图 10 16子阵划分方案

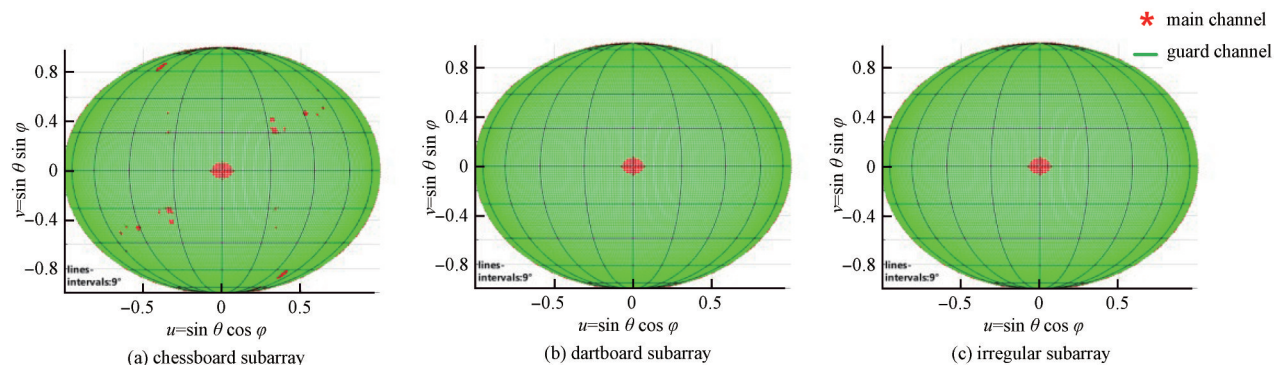


Fig.11 32-subarray partition strategy

图 11 32子阵划分方案

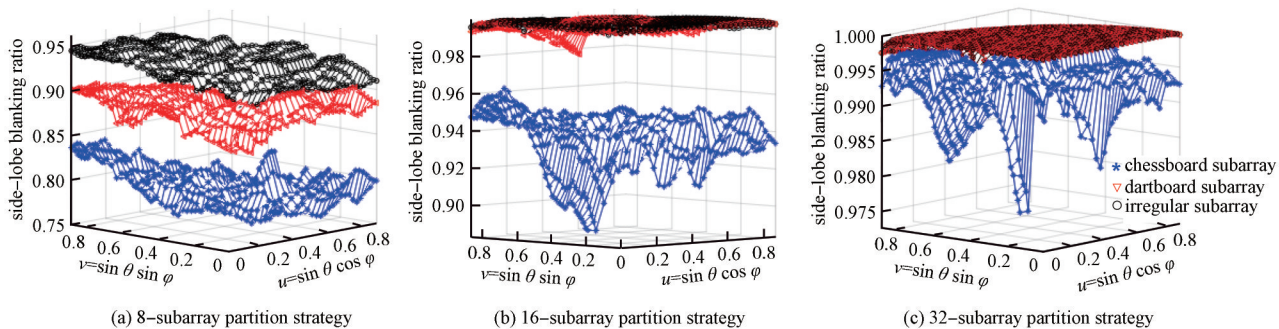


Fig.12 Side-lobe blanking ratio

图 12 旁瓣匿影率

真结果。通过分析旁瓣匿影率以及其均值，得出以下结论：

- 1) 随着子阵数目的增多，旁瓣匿影率逐渐增加。当子阵数增到 32 时，不同形式子阵划分旁瓣匿影率变化不明显，即随着子阵数目的增多，子阵划分形式对旁瓣匿影性能影响的权重就越低；
- 2) 随着子阵划分不均匀性的增加，子阵相位中心被打乱得越明显，旁瓣匿影率逐渐增加；
- 3) 随着波束指向的增大，主通道与保护通道方向图性能恶化，旁瓣匿影率逐渐降低。

表 1 旁瓣匿影率均值表
Table1 Mean value table of side-lobe blanking ratio

subarray partition strategy	8-subarray partition strategy/%			16-subarray partition strategy/%			32-subarray partition strategy/%		
	chessboard	dartboard	irregular	chessboard	dartboard	irregular	chessboard	dartboard	irregular
	subarray	subarray	subarray	subarray	subarray	subarray	subarray	subarray	subarray
mean value of side-lobe blanking ratio	79.49	88.31	93.17	93.87	99.69	99.79	99.38	99.92	99.92

5 结论

大型有源相控阵雷达采用子阵划分技术将复杂的阵列信号处理任务分解，可以在保证雷达系统性能的同时最大限度地降低系统复杂度。同时，利用子阵级数据通过非相参积累直接构建保护通道，可以消除传统独立保护通道无法进行自适应旁瓣匿影的不足，提升雷达在未来复杂干扰环境下的作战能力。本文提出旁瓣匿影率的概念，分析不同扫描角下不同子阵划分方案的旁瓣匿影率。仿真结果表明，子阵划分非均匀性越强，子阵数越多，扫描角越小，旁瓣匿影率越高，旁瓣匿影性能越好。该研究成果为大型机载有源相控阵雷达子阵划分设计提供重要的技术支撑。

参考文献：

[1] 胡航. 现代相控阵雷达阵列处理技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2017. (HU Hang. Array processing techniques for modern phased array radar[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2017.)

[2] 熊子源,徐振海,张亮,等. 阵列雷达最优子阵划分研究[J]. 雷达科学与技术, 2011,4(9):370-377. (XIONG Ziyuan,XU Zhenhai, ZHANG Liang,et al. A summary of optimum sub-array partitioning problem in array radar[J]. Radar Science and Technology, 2011,4(9):370-377.)

[3] 胡航,邓新红. 子阵级平面相控阵 ADBF 的旁瓣抑制方法[J]. 电波科学学报, 2008,23(1):201-205. (HU Hang,DENG Xinhong. Sidelobe suppression method for ADBF at subarray level with planar phased array[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2008,23 (1):201-205.)

[4] KLEMM Richard. Principles of space-time adaptive processing[M]. 3rd ed. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2005.

[5] 熊子源. 阵列雷达最优子阵划分与处理研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2015. (XIONG Ziyuan. The optimal subarray partitioning and processing for array radars[D]. Changsha,China:National University of Defense Technology, 2015.)

[6] NICKEL U. Array processing for radar:achievements and challenges[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2013 (2013):261230-1-21.

[7] 高其嘉,李建勋,王晓莉,等. 雷达副瓣匿影性能评估方法[J]. 现代雷达, 2018,40(7):14-18,46. (GAO Qijia,LI Jianxun, WANG Xiaoli,et al. A study on radar sidelobe blanking technology performance evaluation method[J]. Modern Radar, 2018,40(7):14-18,46.)

[8] 陈小龙,张海,孙嘉辰,等. 机载预警雷达网络化协同探测模式及性能分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(2):215-221. (CHEN Xiaolong,ZHANG Hai,SUN Jiachen,et al. Networked collaborative detection mode and performance analysis of airborne early warning radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(2):215-221.)

[9] 鲁欢,南亨,谭伟杰. 基于 IAA 的协方差矩阵重构稳健波束形成方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(5):820-825. (LU Huan, NAN Heng, TAN Weijie. Robust beamforming using IAA-based interference-plus-noise covariance matrix reconstruction[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(5):820-825.)

[10] NICKEL U. Detection with adaptive arrays with irregular digital subarrays[C]// Proceedings of the 2007 IEEE Radar Conference. Waltham,MA,USA:IEEE, 2007:635-640.

[11] 罗钉. 机载有源相控阵火控雷达技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2018. (LUO Ding. Airborne AESA fire-control radar[M]. Beijing,China:Aviation Industry Press, 2018.)