

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105907

基于宽波束的电子战相控阵使用方式

于鹏 李钊 赵志强

(中国电子科技集团公司第29研究所 成都 610036)

摘要: 针对告警接收机测量结果错误导致电子战相控阵的干扰波束无法对准目标问题,提出了一种基于宽波束的电子战相控阵使用方式,利用遗传算法设计了可以覆盖干扰空域的阵列方向图,对宽波束的干扰效能进行了分析。结果表明,在告警接收机出现测向误差大、虚警、型号识别错误等异常情况下,基于宽波束的电子战相控阵仍然可以正常工作,提高了设备可靠性。另外,针对宽波束发射增益下降导致的烧穿距离扩大问题,提出了提高阵列通道功率、根据距离远近切换工作模式等使用建议。

关键词: 电子战相控阵;告警接收机;宽波束

中图分类号: TN972 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1099

Usage of electronic warfare phased array based on wide-beam

Yu Peng Li Zhao Zhao Zhiqiang

(CETC 29th Research Institution, Chengdu 610036, China)

Abstract: Aiming at the problem that the interference beam of EW phased array can't aim at the target due to the error of the measurement result of the warning receiver, this paper proposes a wide beam-based EW phased array operation mode, designs the array direction pattern that can cover the interference space domain by using genetic algorithm, and analyzes the jamming efficiency of the wide beam. The results show that the electronic warfare phased array based on wide beam can still work normally and improve the reliability of the equipment under the abnormal conditions such as large direction finding error, false alarm and type identification error of the warning receiver. In addition, to solve the problem of widening the burn through distance caused by the decrease of the transmission gain of wide beam, some suggestions are put forward to improve the power of the array channel and switch the working mode according to the distance.

Keywords: EW phased array; warning receive; wide-beam

0 引言

现代雷达技术的不断发展,对电子战设备的要求越来越高。相控阵具有等效辐射功率高、波束捷变、覆盖空域宽、可靠性高等优点,目前在电子战中的应用越来越广泛^[1-2]。

电子战对雷达进行干扰时,时间和方向是保证干扰有效的两个充分条件^[3]。目前,电子战采用相控阵体制时,有的设备只形成一个波束,利用波束捷变覆盖干扰空域内的目标;有的设备采用数字波束形成技术,形成多个发射波束,同时覆盖干扰空域内的多个目标^[4]。但无论是单个波束还是同时多波束,相控阵采用的都是窄波束,且由于雷达信号在空域和时域都是不连续的,时间上不允许电子战相控阵像雷达相控阵那样全空域逐波束扫描,而是基于电子

战告警接收机测量的威胁目标方向,调整干扰波束“指哪打哪”(测向误差较小时)^[5]或者小范围搜索并截获目标后调整干扰波束对准目标(测向误差较大时)^[6]。另外,由于相控阵使用窄波束和波束捷变的方式,为了节省干扰波束资源,告警接收机对雷达参数进行测量、分选后,与加载的数据库进行比较,只有识别为威胁信号,电子战相控阵才会启动对威胁目标的干扰。

针对电子战相控阵的上述工作方式,本文首先分析其局限性,然后提出一种基于宽波束的电子战相控阵使用方式,实现干扰和告警的解耦合,然后进行了基于宽波束的干扰效能分析和波束仿真,最后给出了使用建议。

1 告警接收机引导电子战相控阵工作的局限性

电子战告警接收机瞬时、全空域的探测、识别各种威胁

收稿日期:2021-03-08

目标,包括低截获概率雷达信号,给出威胁目标的型号、方位、距离等信息,增强操作人员对战场环境的态势感知能力,同时测量的参数也可实现干扰引导。

虽然告警接收机不断往数字化、集成化和智能化方向发展,但是战场电磁信号环境日新月异,雷达具有频段更宽、脉冲密度更高、信号体制更复杂、参数更加多变等特点,对告警接收机不断带来新的挑战^[7]。告警接收机的主要指标包括灵敏度、反映时间、频率测量范围、测向精度、虚警和漏警概率、型号识别准确率、定位距离等。根据告警接收机引导电子战相控阵工作的原理,告警接收机影响相控阵工作的主要因素为测向精度、虚警率、型号识别准确率,下面分别进行分析。

1) 测向精度的影响分析。目前,告警接收机主要采用比幅测向和干扰仪测向,两种测向体制的原理和精度不同^[8]。比幅测向的误差较大(均方根误差为 10° 左右)^[9];干扰仪测向精度较高,但是受通道相位误差、安装误差等影响,存在一定解模糊失败的概率^[10],此时测向角度会跳区。当告警接收机测向误差较大并超过相控阵的搜索空域时,相控阵无法截获目标,干扰波束也无法对准目标,导致干扰无效。

2) 虚警的影响分析。受多径反射、信号交叠等因素影响,告警接收机告警出的目标数量会超过真实目标,发生虚警现象^[11]。由于相控阵的波束较窄,必须采用波束捷变方式实现多目标干扰,因此虚假目标会浪费相控阵的干扰时间资源,降低对真实目标的干扰效果。当虚假目标过多时,甚至无法对真实目标进行干扰。

3) 型号识别错误的影响分析。目前,战场电磁环境非常复杂,雷达的 5 大参数(频率、重频、脉宽、幅度、方向)会高度交叠,给告警接收机的准确识别带来很大的压力。虽然目前已经开展了人工智能识别的研究^[12],可以大大提高识别准确度,但还是存在一定的识别错误概率。当告警接收机把应该干扰的 A 雷达识别为不应该干扰的 B 雷达时,电子战设备为了节省干扰波束资源,不会对 A 雷达进行干扰。

因此,电子战相控阵基于告警接收机引导的工作方式,在告警接收机不能正常工作时,电子战设备对威胁目标的干扰效率显著降低,甚至完全无效。

2 电子战相控阵宽波束的优点

为了提高电子战相控阵的干扰效率,电子战相控阵需改变目前的窄波束和波束捷变的使用方式,而是产生特定宽度的宽波束。采用宽波束后,电子战设备利用宽波束侦收干扰脉冲,经过脉冲参数测量、确认后发射干扰激励信号,并利用宽波束发射到空域中,把发射的干扰信号快速对准目标。

宽波束与单个窄波束、同时多波束的对比如图 1 所示。根据能量守恒原理,电子战相控阵采用宽波束的发射天线

增益小于窄波束天线增益。

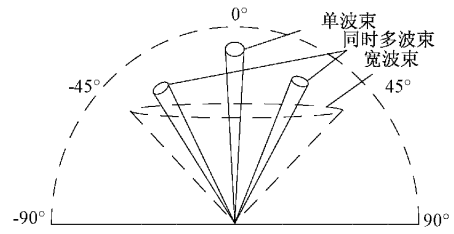


图 1 电子战相控阵的宽波束和窄波束对比

电子战相控阵采用宽波束,不需要告警接收机提供测向引导信息,即使告警接收机测向误差很大也不会带来任何影响;即使告警接收机虚警很多,因波束不再捷变,也不会减少对真实目标的干扰时间;即使在型号识别错误的情况下,电子战设备经过脉冲参数测量、确认后就可发出干扰信号,而不必节省干扰波束资源。

因此,电子战相控阵采用宽波束,可以实现干扰和告警的解耦合,在告警接收机工作不正常时,也能对目标进行辐射和干扰。

3 基于宽波束的干扰效能分析

根据微波工程原理,对于具有方向性的相控阵天线系统,其增益和方位面 3 dB 波束宽度、俯仰面 3 dB 波束宽度的乘积为恒定值,如式(1)所示。波束越宽,增益越小。

$$A = G \cdot BW_{f_w} \cdot BW_{f_y} \quad (1)$$

根据相控阵天线原理,对于相控阵的单个窄波束,法线方向方位面或俯仰面的波束宽度与信号波长、方位或俯仰面物理尺寸有关,分别利用式(2)和(3)计算得到。

$$BW_{f_w} = \frac{51\lambda}{D_{f_w}} \quad (2)$$

$$BW_{f_y} = \frac{51\lambda}{D_{f_y}} \quad (3)$$

电子战相控阵采用宽波束工作时,需要侦收和干扰的空域确定了宽波束的方位面波束宽度和俯仰面波束宽度,假设分别为 WBW_{f_w} 和 WBW_{f_y} ,则根据式(1),电子战相控阵采用宽波束后,天线增益下降为窄波束的 $1/M$,如式(4)所示。

$$\frac{1}{M} = \frac{BW_{f_w}}{WBW_{f_w}} \cdot \frac{BW_{f_y}}{WBW_{f_y}} = \frac{(51\lambda)^2}{WBW_{f_w} \cdot WBW_{f_y} \cdot D_{f_w} \cdot D_{f_y}} \quad (4)$$

电子战设备按照应用分类,分为自卫干扰设备和支援干扰设备,如图 2 所示。保护对象上安装自卫干扰设备,发射自卫干扰信号,负责保护自身;支援干扰设备发射支援干扰信号,对远距离的保护对象起到保护作用。电子战设备的干扰效能采用“烧穿距离”来定义,随着保护对象和雷达距离越来越远,雷达接收的干信比越来越低,当干信比降低到雷达可以正常工作时,保护对象和雷达之间的距离称为

烧穿距离。烧穿距离越小,代表电子战设备的干扰效能越好。

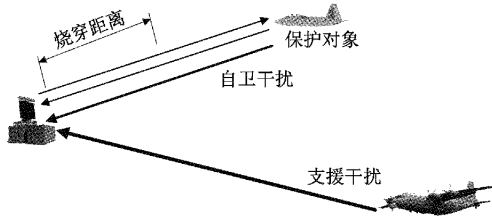


图 2 自卫干扰和支援干扰示意图

无论自卫干扰还是支援干扰,烧穿距离均指雷达刚刚探测到保护对象时,保护对象和雷达之间的距离。在实际使用中,可能只有自卫干扰或支援干扰,也可能两种干扰方式同时存在。因为支援干扰设备和自卫干扰设备的发射功率、方向均不同,两种干扰条件下的烧穿距离也不同。

根据雷达对抗的原理,自卫干扰的烧穿距离如式(5)所示,支援干扰的烧穿距离如式(6)所示。

$$R = \sqrt{\frac{P_i G_i \sigma K_j \Delta f_j}{4\pi P_j G_j \gamma_j \Delta f_r}} \quad (5)$$

$$R = \sqrt{\frac{P_i G_i G_r \sigma R_j^2 K_j \Delta f_j}{4\pi P_j G_j G'_r \gamma_j \Delta f_r}} \quad (6)$$

式中: R 表示烧穿距离; P_i 表示雷达的发射功率; G_i 表示雷达的发射天线增益; G_r 表示雷达的接收天线增益; σ 表示保护对象的雷达反射面积; R_j 表示支援干扰时,支援干扰设备距离雷达的距离; P_j 表示电子战设备的发射功率; G_j 表示电子战设备的发射天线增益; G'_r 表示雷达的副瓣接收天线增益; γ_j 表示电子战设备天线和雷达天线极化不匹配带来的极化损耗; K_j 表示压制系数; Δf_j 表示干扰带宽; Δf_r 表示雷达带宽。

当电子战相控阵从窄波束发射改为宽波束发射时,在不改变相控阵通道输出功率的条件下,式(5)和(6)除电子战设备的发射天线增益 G_j 降低外,其他参数保持不变。假设电子战发射天线增益下降为原来的 $1/M$, 则支援干扰的烧穿距离扩大为原来的 \sqrt{M} 倍,自卫干扰的烧穿距离扩大为原来的 \sqrt{M} 倍。

4 波束仿真和对比

可借鉴雷达相控阵中广泛应用的阵列波束赋形技术^[13]产生所需要的宽波束。阵列波束赋形常见方法为解析法和智能优化搜索算法。解析法需要获得目标方向的解析表达式,求解困难。智能优化搜索算法包括遗传算法、粒子群算法和差分进化算法等,不需要目标方向的解析表达式,通过对目标函数迭代和全局最优搜索,实现对任意形状的方向图设计,已经广泛应用于天线阵波束设计^[14-15]。

宽波束的宽度需覆盖威胁目标空域,波束宽度内天线增益起伏较小以保证所有方向发射的功率基本相同。下面以俯仰波束宽度不变、方位波束宽度为 40° 为例,基于遗传

算法进行波束赋形,得到所需的宽波束方向图,其他智能搜索算法得到类似的结果。

仿真条件:波束控制方式:移相器;方位阵列规模: 1×20 ;工作频率:6 GHz;阵元间距:半波长;遗传算法种群规模:200;变异概率:0.2;进化代数:400。优化目标: $\pm 20^\circ$ 范围内波束平坦、增益起伏在 ± 1.5 dB 以内, $-90^\circ \sim -25^\circ$ 、 $+25^\circ \sim +90^\circ$ 范围内的副瓣电平相对主瓣电平下降 9 dB 以上。

为了确保相控阵的通道功率不降低,不对阵元的幅度加权,仅相位加权。优化后每个单元天线的三维坐标、相位信息如表 1 所示。

表 1 阵列中单元天线的坐标、相位信息

序号	X 坐标/ mm	Y 坐标/ mm	Z 坐标/ mm	相位/ rad
1	0	0	0	4.91
2	0	36	0	0.00
3	0	72	0	0.79
4	0	108	0	2.36
5	0	144	0	3.53
6	0	180	0	4.71
7	0	216	0	4.71
8	0	252	0	4.12
9	0	288	0	4.32
10	0	324	0	4.71
11	0	360	0	4.32
12	0	396	0	3.34
13	0	432	0	1.96
14	0	468	0	0.59
15	0	504	0	6.08
16	0	540	0	4.51

赋形后的宽波束方向图和不同指向的窄波束方向图对比如图 3 所示。窄波束方向图波束宽度约 5.5° 左右,宽波束方向图在 $-20^\circ \sim +20^\circ$ 的波动起伏在 ± 1.5 dB 以内,可瞬时覆盖干扰空域,解决告警出错时相控阵不发射或发射后波束对不准目标的问题,从而提高电子战设备的干扰效率。同时,天线增益下降约 10 dB,应用于支援干扰时烧穿距离扩大约 1.8 倍,应用于自卫干扰时烧穿距离扩大约 3.2 倍。

5 宽波束的实际使用建议

电子战相控阵采用宽波束时,首先确定其波束宽度,利用阵列波束赋形得到不同阵元的相位信息,然后把相位信息存储到波束控制软件中。在使用宽波束前,波束控制软件把相位信息下发到阵元通道的移相器中。由于电子战相控阵为宽频段系统,实际使用宽波束时,波束控制软件需要

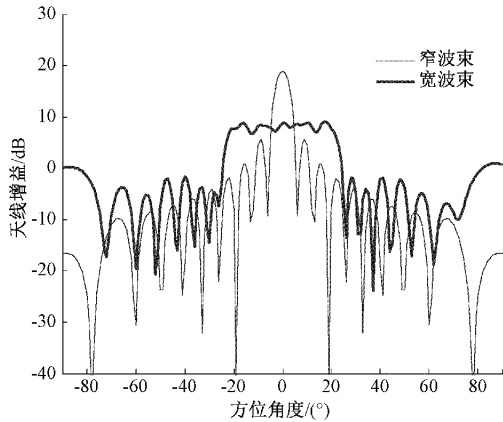


图 3 宽波束和不同指向窄波束的方向图对比

存储不同频点(如步近 100 MHz)的相位信息,根据需要干扰的威胁对象频率读取和下发。

电子战设备研制立项时,烧穿距离是一项重要的约束指标。若考虑后期使用时采用宽波束方式,则立项论证时需要适当的提高电子战相控阵的通道功率或阵面孔径,确保窄波束和宽波束方式下,电子战设备均满足烧穿距离的指标要求。

对于现有的电子战相控阵设备,若考虑相控阵工作在宽波束方式,首先需分析烧穿距离指标的余量,确定允许天线增益下降多少,然后据此计算宽波束的波束宽度是否能够覆盖干扰空域。当烧穿距离的余量较大时,可直接使用宽波束方式;对于烧穿距离余量不大的电子战设备,可改进波束控制软件,同时具备宽波束方式和窄波束方式,通过切换工作方式,电子战设备距离雷达较远时采用宽波束发射,电子战距离雷达较近时采用基于告警接收机引导的窄波束发射,尽量利用宽波束的优势,避免告警错误带来的干扰失效。

6 结 论

本文介绍了一种电子战相控阵宽波束使用方式,克服了电子战相控阵对告警设备的依赖,可提高电子战设备在复杂电磁环境下的干扰效果,通过理论分析和仿真对比证明了可行性。最后,给出了电子战相控阵采用宽波束方式的使用建议,供设计人员参考。另外,本文在宽波束仿真时采用移相器的波束控制方式,对于宽带电子战设备需存储和使用不同频点的相位信息。下一步可继续研究采用数控延时器的控制方式,不同阵元的延时量与频率无关,在多目标情况下不必调整宽波束,设备响应的实时性更强,更适用于工作在宽频带的电子战相控阵设备。

参考文献

- [1] 张焱,陈楠楠,王月悦.从几种国外新型电子战系统看电子战的未来发展[J].舰船电子对抗,2020,43(4):9-13.
- [2] 夏辉,史海庆,黎之乐.下一代支援干扰吊舱发展综述[J].电子信息对抗技术,2019,34(6):52-55.
- [3] 张洋,杨超,谭世川,等.雷达干扰六要素[J].电子信息对抗技术,2016,31(5):57-61.
- [4] 王明,柳桃荣.发射多波束形成技术在电子战中的应用[J].舰船电子对抗,2017,40(2):32-34,59.
- [5] 巩强,陈乃功.宽带相控阵波束指向研究[J].电子信息对抗技术,2017,32(6):79-81.
- [6] 吴福全,苏小桅.用“聚焦法”实现对 TWS 信号的快速跟踪[J].电子信息对抗技术,2015,30(4):68-70.
- [7] 鲁旭.机载雷达告警接收机的发展现状与发展前景展望[J].信息通信,2020(5):64-65.
- [8] 马珂,徐声海.比幅测向与比相测向侦察技术比较研究[J].舰船电子对抗,2020,43(2):16-20.
- [9] 吴自新,王超,王正海,等.一种四信道比幅测向校正方法[J].电子测量技术,2013,36(6):64-68.
- [10] 张广宇,王笃祥,陈卓,等.一种星载干涉仪解模糊失散识别方法[J].航天电子对抗,2017,33(3):25-27,41.
- [11] 王洪迅,王红卫.一种新的雷达告警器虚警机理[J].电讯技术,2013,53(2):156-161.
- [12] 贾朝文,张学帅,鄢勃,等.人工智能机载辐射源识别技术[J].电子信息对抗技术,2020,35(5):1-5.
- [13] 王旭,朱永杰.针对主瓣波动的阵列赋形方向图设计[J].火控雷达技术,2016,45(4):21-26.
- [14] 肖支才,龙玉峰,郭家豪,等.基于非线性变因子的粒子群算法[J].电子测量技术,2020,43(5):67-70.
- [15] 丁扬,王郑杰,伍捍东,等.基于遗传算法的余割平方波束赋形天线设计[J].微波学报,2020,36(S1):119-122.

作者简介

于鹏,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为电子对抗总体技术。

E-mail: paul_0528@qq.com

李钊,理学硕士,高级工程师,主要研究方向为电子对抗总体技术。

E-mail: lliizzxx@163.com

赵志强,工学硕士,高级工程师,主要研究方向为电子对抗天线技术。

E-mail: zhaozhiqiangrlr@sina.com