

• 天馈伺系统 •

中图分类号: TN958.93

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2015)04-0059-06

新一代二维阵 OTHR 阵列结构与方向图性能研究

严 韬 陈建文 罗 欢 鲍 拯

(空军预警学院 重点实验室, 武汉 430019)

摘要:以新一代二维阵天波超视距雷达(OTHR)为研究对象,重点对阵列结构与方向图性能进行了研究。首先,总结了新一代二维阵 OTHR 的研究现状并分析了其性能优势;然后,选取均匀十字阵、均匀矩形阵、cantor 多圆环阵和阿基米德螺旋阵等四种典型二维阵列进行了方向图仿真分析,结果表明 cantor 多圆环阵和阿基米德螺旋阵具有较优的方向图性能;同时,利用遗传算法对均匀矩形阵、cantor 多圆环阵和阿基米德螺旋阵进行稀疏优化,在保持方向图性能的前提下进一步减少了阵元个数;最后,针对二维阵 OTHR 的工程实践,阐述了其适用条件,指出了阵列结构选取、误差校准及降低处理复杂度等三个方面的问题,并提出了相应的解决方案,为新一代二维阵 OTHR 阵列结构的选择提供了理论依据。

关键词:新一代天波超视距雷达;二维阵列;方向图;稀疏阵列;遗传算法

A Study on Array Configurations and Radiation Pattern Performance for New Generation 2-D Array OTHR

YAN Tao, CHEN Jianwen, LUO Huan, BAO Zheng

(Key Research Laboratory, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430019, China)

Abstract: The new generation 2-D array over-the-horizon radar(OTHR) is studied, especially the array configurations and radiation pattern performance are made. Firstly the current research evolvements of 2-D array OTHR are addressed and the performance advantages are analysed. And then, radiation pattern based on uniform cross array, uniform rectangle array, cantor multi-ring arrays and archimedes spiral array are simulated and analysed, simulation results proved the better radiation pattern performance of cantor multi-ring arrays and archimedes spiral array. After that the uniform rectangle array, cantor multi-ring arrays and archimedes spiral array are thinned by utilizing genetic algorithm, element number of array is reduced while maintaining the performance of radiation pattern. Finally, aiming at the problem of engineering application for 2-D array OTHR, applicability conditions are discussed, actual problems such as array configuration selection, error calibration and complexity reduction are pointed out and the corresponding solutions are proposed. Theory foundation of array selection configurations for new generation OTHR is provided.

Key words: new generation skywave over-the-horizon radar; 2-D arrays; radiation pattern; sparse array; genetic algorithm

0 引言

天波超视距雷达(Over-the-Horizon Radar, OTHR)利用大气电离层对高频电磁波的折射,通过后向返回散射路径来探测 800 km ~ 3 500 km 外的空/海目标,作用距离远,监测面积广,是实现远程战略预警最经济有效的手段,在战略防空、反导预警、对海监视等领域发挥着重要的作用^[1-2]。

尽管发展迅速,受工作电磁环境与目标探测机理的限制,OTHR 存在着测量精度差、分辨力不足的缺点,主要原因是^[3]:(1)在 OTHR 工作频段内(3 MHz ~ 30 MHz)存在许多外部噪声和干扰,这些外部噪声和干扰通常比接收机内部噪声高 20 dB ~ 40 dB,成为限制接收机灵敏度的主要因素;(2)作为 OTHR 信号传

输的基本媒介,电离层为不均匀、各向异性、色散的随机介质,其时空变化特性限制了 OTHR 的测量精度及其分辨率;(3)电离层的多层结构易使雷达产生目标点迹的“模式模糊”和“多径效应”,对目标的检测和跟踪带来不良的影响。

传统 OTHR 通常采用庞大的一维发射和接收阵列,在方位上进行扇区相位扫描,俯仰上通过宽波束来覆盖其扫描范围,这种阵列结构和工作模式使得传统 OTHR 性能受到高频空间干扰和电离层状态的严重制约。基于传统阵列的解决办法通常是在接收端通过信号处理手段实现,这些方法能从一定程度上缓解矛盾,但大多有特定的适用条件,且在工程中难以实现。一种有效解决上述问题的方法是采用二维阵列天线,二维阵列具备全方位扫描能力,扩大雷达威力范围;同时,利用二维波束形成更好的实现空间抗干扰和电离层传播模式识别,改善雷达的性能。基于上述背景本文以新一代 OTHR 二维阵列结构为研究目标,分析了

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61072132, 61471391)

通信作者:严韬 Email: yantaokjld@163.com

收稿日期:2014-11-20 修订日期:2015-01-21

其性能优势,指出了其工程应用的适用条件和需解决的关键问题,并通过方向图仿真分析得出关于天波雷达二维阵列结构选取的相关结论,为将二维阵列结构应用于 OTHR 提供理论依据。

1 新一代二维阵天波超视距雷达

1.1 国内外研究现状

基于传统一维阵列 OTHR 存在的技术瓶颈,以二维阵列天线为代表的新一代 OTHR 已成为天波雷达领域的研究热点之一。21 世纪初期,各主要 OTHR 研制国家均已各有各自的研发计划,如美国的“下一代天波”(Next Generation Over-the-Horizon Radar, NGOTHR)计划^[4-5]、法国的 NOSTRADAMUS 雷达^[6-8]和澳大利亚部署的 JORN 雷达系统^[9-12]等。NGOTHR 计划明确指出把二维发射与接收阵列列入美国下一代天波超视距雷达的核心技术之一^[5]。法国的 NOSTRADAMUS 雷达进展最快,已于 2003 年在巴黎附近列装,是世界上第一部较为成熟的二维阵 OTHR,其天线结构如图 1 所示。该雷达利用 3 个相互夹角 120° 的臂组成 Y 形天线,每个臂长 400 m,宽 80 m,阵元在每个臂上随机分布,共有 288 个双锥形阵元,其中,发射天线由整个天线靠近中间的 100 个阵元组成,接收天线为整个天线。在这种单站体制下,电磁波在发射与返回的过程中经过同一块电离层,降低了电离层变化对雷达性能的影响,该雷达还可以在不使用其他电离层探测设备的条件下,通过频率扫描和仰角扫描确定实时电离层结构状态,并结合任务需求确定雷达最优工作频率^[7-8]。

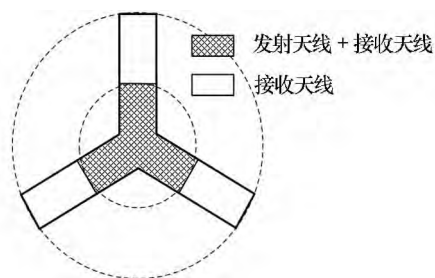


图 1 NOSTRADAMUS 雷达天线

澳大利亚的 JORN Laverton 系统通过将现有两个独立工作的一维均匀线阵组合成 L 形阵列^[9],每个线阵有 240 个阵元,线阵之间夹角为 90° ,其阵列结构如图 2 所示。严格来说,这套系统并不是新一代天波超视距雷达,而是利用现有系统所进行的实验,其能够应用二维阵列处理的角度只有 10° 。基于该系统,文献[10]提出一种子阵相位误差未知情况下的波束形成方法;文献[11]提出仰角滤波技术来抑制由电离层扰动带来的扩展多普勒杂波;文献[12]研究了自适应估计子阵幅度和相位误差的方法,这些研究结果充分证

明了二维阵列天波雷达的性能潜力。

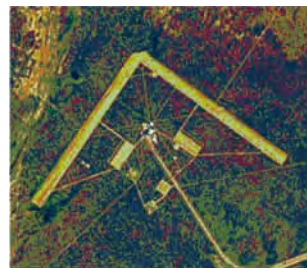


图 2 JORN 雷达天线结构

上述研究表明,二维阵列 OTHR 正成为天波雷达领域关注的焦点,理论上尚处于探索阶段,已有两个系统的天线阵列均基于传统线阵组合而成,性能并非最优^[13]。在二维阵列结构研究方面,文献[14]利用遗传算法设计了一种“蜻蜓”形二维天线,据称该天线在阵元数最少情况下形成的波束最窄,但文献中并没有提到阵元位置的具体参数;文献[15]利用数学中 Cantor 集的概念提出了 Cantor 多圆环阵;文献[16]在 Cantor 多圆环阵的基础上将每个环上阵元位置进行一个等角度的移位,从而形成 Cantor 螺旋阵列;文献[17]将锥形线阵的思想用于圆阵,提出了泰勒多圆环阵;文献[18]对阿基米德螺旋曲线进行离散采样提出了阿基米德螺旋阵,并验证了其应用于高频天波雷达的优越性;文献[19]利用模拟退火算法对多圆环阵的半径进行了优化。在国内,天波超视距雷达的相关研究仍集中在传统阵列系统,二维阵列 OTHR 的研究尚未见公开报道。但也有一些新体制的 OTHR 被提出,例如:文献[20-21]提出的分布式 OTHR 和认知 OTHR,以及文献[22-23]研究的高频外辐射源雷达(HFPBR),这些研究都为国内 OTHR 的发展推进奠定了良好的理论基础。

1.2 二维阵 OTHR 性能优势

(1) 系统集成度更高,资源配置更灵活

传统 OTHR 通过独立的电离层探测设备和管理系统,实施对电离层传播信道和电波环境的监测,进而确定雷达当前的工作频率和波形参数,其调整过程长,实时性不强,尤其是在电离层变化剧烈的情况下将严重影响雷达性能。采用二维发射和接收阵列可以实现雷达一体化设计,即将传统的电离层探测设备纳入雷达收发系统,利用一副二维天线同时完成雷达信号的发送与接收和电离层信息诊断,实现电离层信道和雷达工作参数的实时选择,降低雷达管理维护成本,例如 NOSTRADAMUS 雷达。同时,二维阵列 OTHR 可以实现资源灵活配置,例如在发射时选取部分阵列以形成宽波束来提高全域搜索的效率和必要的数据率,在接收时利用全阵列形成窄波束来提高雷达分辨力,改善目标探测性能。

(2) 扫面范围更大, 威力覆盖更广

天波超视距雷达是以一定的方位扇区搜索进行目标探测, 传统一维阵列 OTHR 只能对一个 60° 扇区进行扫描, 其威力覆盖范围^[3]为 $60^\circ \times (800 \text{ km} \sim 3\,500 \text{ km})$ 。采用二维阵列能在 360° 范围内实现扫描, 在雷达探测能量和传播损耗一定的情况下, 其威力覆盖范围增加为 $360^\circ \times (800 \text{ km} \sim 3\,500 \text{ km})$ 。

(3) 目标信息利用率更高, 应对环境能力更强

传统的 OTHR 在俯仰上通常是利用宽波束或多波束进行覆盖, 目标俯仰信息利用的较少, 因此, 易受电离层不稳定状态的影响。二维阵列 OTHR 在俯仰上能形成窄的接收波束, 可以利用目标的俯仰信息, 从而提高坐标定位和仰角滤波能力, 解决电离层不稳定多层结构带来的多模、多径传播问题, 降低电离层对雷达性能的影响。

(4) 干扰抑制能力更强, 回波信杂噪比更高

从系统角度讲, 二维阵列 OTHR 增加了系统自由度, 可以提供更多的自由度实现多个零点来抑制杂波与干扰; 从波束形成的角度讲, 二维阵列可以形成比一维线阵更窄的接收波束, 从而降低外噪声干扰和地、海杂波的强度, 获得更高的信杂噪比, 提高目标检测概率。

(5) 测高性能得到提升, 雷达功能进一步拓展

由于天波超视距雷达特殊的工作体制, 目标高度无法直接获知, 只能间接估算。现有的天波雷达测高方法主要是基于回波的“微多径”模型采用超分辨、电磁匹配等方法进行目标高度的粗略估计, 尽管精度较差, 但对于目标特性的粗分类具有一定的参考价值。由于二维阵列 OTHR 可以利用目标的俯仰信息, 这为利用“微多径技术”来测量目标高度提供了新的思路, 为进一步粗略识别临近空间目标、无人机、弹道导弹、巡航导弹等重要战略目标提供决策依据。

2 典型二维阵列方向图仿真分析

2.1 仿真说明

分别选取均匀十字阵、均匀矩形阵、cantor 多圆环阵和阿基米德螺旋阵四个二维阵列进行方向图仿真分析。为保持一致性, 四种阵列均为 160 个阵元, 其中, 均匀十字阵由两个 80 阵元的均匀线阵垂直相交组成; 均匀矩形阵的大小为 80×2 , 阵元间距和均匀十字阵一致; 图 3 给出了所选 cantor 多圆环阵和阿基米德螺旋阵的阵元分布示意图, 其中, cantor 多圆环阵有 8 个圆环, 每个圆环上均匀分布 20 个阵元, 各圆环半径按文献[15]所给方式确定; 图 3b) 为三臂 160 阵元的阿基米德螺旋阵^[18]阵元分布示意图。为方便描述, 后文分别简称十字阵、矩形阵、圆环阵和螺旋阵。

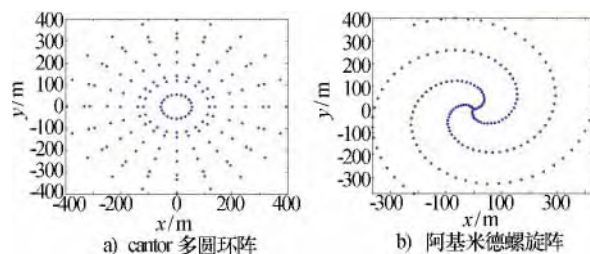


图 3 阵元分布示意图

以阵列所在平面为 XOY 平面建立三维直角坐标系, 则四个阵列的阵元个数相等且在 X 方向的阵列孔径也相等。令主波束指向为 (θ, φ) , 其中 θ 为主波束与 Z 轴的夹角, 即俯仰角; φ 为主波束在 XOY 平面的投影与 X 轴的夹角, 即方位角。所有阵元均为全向辐射单元且不考虑阵元间的互耦效应, 采用均匀激励, 雷达工作频率 $f_0 = 15 \text{ MHz}$ 。分别选取 3 dB 主瓣宽度 (MLW)、峰值副瓣电平 (ASLL) 和平均副瓣电平 (PSLL) 作为刻画方向图性能的指标。

2.2 方向图仿真分析

(1) 四种二维阵列水平方向图比较

图 4 为选取的四种二维阵列的水平面 ($\theta = 90^\circ$ 平面) 方向图, 其主波束指向 $\varphi = 60^\circ$, 各指标参数值见表 1 所示。由仿真结果可以看出, 主瓣性能方面, 四种阵列都具有较窄的主瓣宽度, 其中, 矩形阵最窄, 仅为 1° ; 副瓣性能方面, 尽管十字阵和矩形阵具有较优的平均副瓣电平, 但两个阵列都有很高的峰值副瓣, 分别为 -6.8 dB 和 -6.6 dB 。圆环阵和螺旋阵有较优的峰值副瓣电平, 其平均副瓣电平相对较高, 均在 -20 dB 左右。综合主副瓣性能来看, 圆环阵和螺旋阵方位方向图性能相对较优。矩形阵和十字阵出现高副瓣的原因在于阵元在二维栅格平面内的稀疏抽取, 如果是正方形平面阵列则可以避免高副瓣的产生, 但会使阵元个数急剧增加。

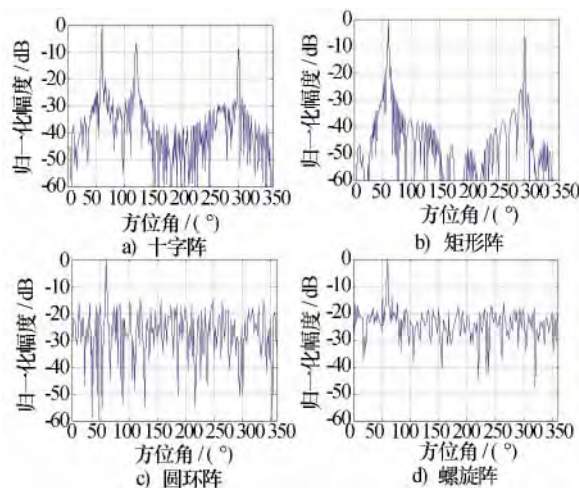


图 4 水平方向图比较

表1 水平面方向图性能参数

	$MLW/(^{\circ})$	$PSLL/dB$	$ASLL/dB$
十字阵	1.6	-6.8	-33.2
矩形阵	1.0	-6.6	-42.3
圆环阵	1.4	-15.2	-20.7
螺旋阵	1.5	-14.2	-20.5

(2) 四种典型二维阵列垂直方向图比较

图5为四种二维阵列的垂直面($\varphi = 60^{\circ}$ 平面)方向图,其主波束指向 $\theta = 30^{\circ}$,其性能参数见表2所示。由仿真可以看出,四种阵列都具有较好的垂直面方面性能,主瓣性能方面,十字阵和矩形阵的主瓣宽度在 2° 以上,圆环阵和螺旋阵在 2° 以下;副瓣性能方面,十字阵具有最优的副瓣性能,其峰值副瓣电平和平均副瓣电平都最低,其次为圆环阵,矩形阵和螺旋阵相对较差。

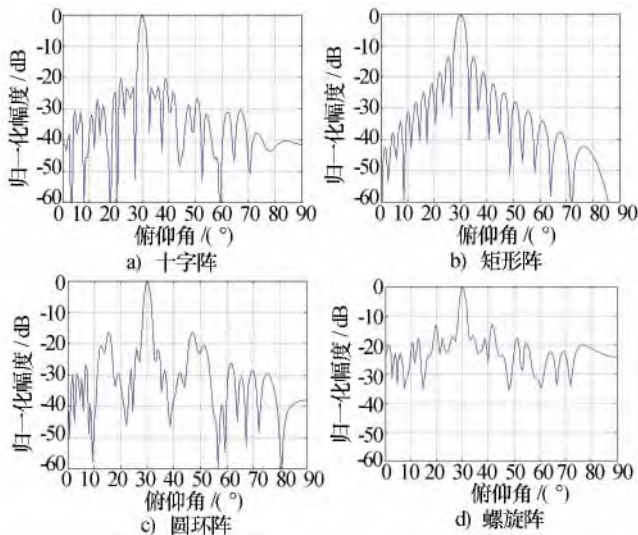


图5 俯仰方向图对比

表2 垂直方向图性能参数

	$MLW/(^{\circ})$	$PSLL/dB$	$ASLL/dB$
十字阵	2.0	-20.2	-30.5
矩形阵	2.9	-13.5	-28.1
圆环阵	1.8	-16.6	-27.2
螺旋阵	1.9	-13.4	-19.2

2.3 稀疏优化

为了获得良好的分辨力,传统一维阵列 OTHR 的阵列通常很长,阵元较多,如果在相应的孔径上直接进行二维布阵,则需要更多的阵元,工程应用困难。要想把二维阵列 OTHR 推向工程化,必须寻求更为合理的二维阵列。一种可行的方法是采用二维稀疏阵,以较少的阵元取得较优的波束性能。本节利用遗传算法对上节中的均匀矩形阵、cantor 多圆环阵和阿基米德螺旋阵进行进一步稀疏优化。

本文采用遗传算法^[24],以峰值旁瓣电平最低为优化目标,对三种阵列的阵元位置进行稀疏优化。遗传操作中采用单点交叉和单点变异,交叉概率和变异概率分别为 0.9 和 0.1。稀疏后阵元分布如图 6a)~图 6c) 所示,其阵元个数分别减少 35、38 和 35 个。图 6d)~图 6f) 为三种阵列稀疏前后的垂直方向图性能对比,其性能参数见表 3 所示。从主瓣性能来看,稀疏后各阵列主瓣宽度均略有增加,但变化不大;峰值副瓣电平均降低,其中矩形阵降低了 7.2 dB,圆环阵和螺旋阵降低 3 dB 左右;平均旁瓣电平方面,螺旋阵基本保持不变,矩形阵和圆环阵分别增加了 4.3 dB 和 3.5 dB。可以看出,阵列稀疏是以抬高远区的旁瓣电平来降低峰值副瓣电平的,稀疏后的三种阵列在保持主瓣性能的前提下降低了峰值副瓣水平,减少了阵元个数,取得了较优的性能。

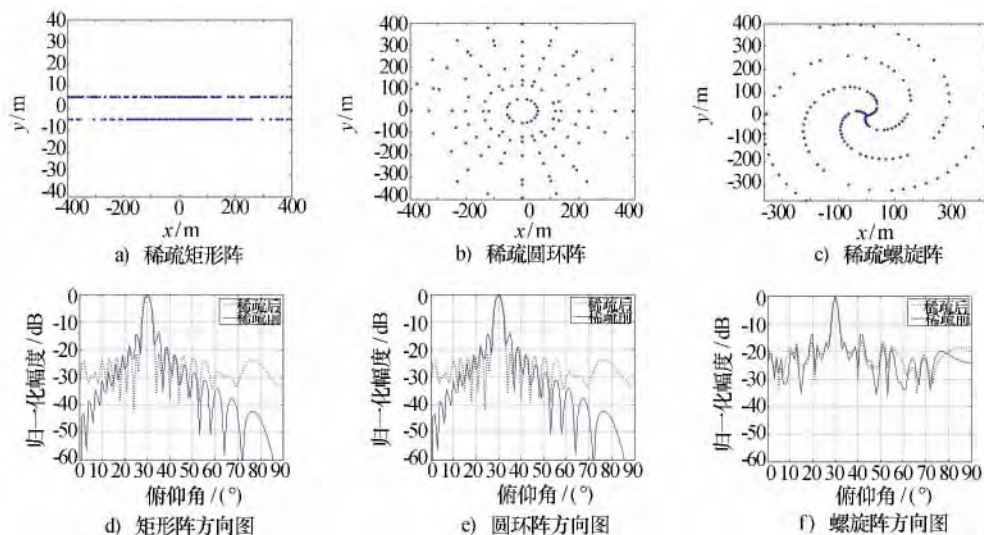


图6 稀疏后的阵元分布示意图与垂直面方向图

表3 稀疏前后俯仰方向图性能参数

	$MLW/(^{\circ})$	$PSLL/dB$	$ASLL/dB$	阵元数
矩形阵	2.9	-13.5	-28.1	160
圆环阵	1.8	-16.6	-27.2	160
螺旋阵	1.9	-13.4	-19.2	160
稀疏矩形阵	3.0	-20.7	-23.8	125
稀疏圆环阵	2.0	-19.3	-23.7	122
稀疏螺旋阵	2.0	-16.6	-20.1	125

综合所有仿真结果可以得到如下结论: (1) 在阵元个数和阵列孔径一致的情况下, 均匀十字阵和均匀矩形阵具有较好的垂直方向图性能, 但其水平方向图性能较差, cantor 多圆环阵和阿基米德螺旋阵在水平面和垂直面都有较好的性能, 综合性能较优; (2) 采用遗传算法进行稀疏优化后, 阵元个数减少, 主瓣性能基本保持不变, 峰值副瓣水平降低, 平均副瓣水平升高, 因此稀疏二维阵列是把二维阵列应用到 OTHR 的关键。

3 二维阵列 OTHR 工程化分析

3.1 二维阵列 OTHR 适用条件

不失一般性, 二维阵 OTHR 阵列布置也可以分为两种情况: 收发共址与收发分离, 其具体适用条件应根据基本国情、任务需求的不同而不同。

(1) 收发共址

采用一副二维天线同时进行发射接收, 即单基地模式。天线收发共址时必须采用脉冲波形。单基地脉冲模式有利用实现雷达系统一体化, 降低雷达成本, 同时可以实现多目标、多任务的战略需求, 在一个脉冲内发射针对不同目标的探测子脉冲, 实现同时探测飞机、舰船和导弹的功能, 如果把电离层诊断设备纳入收发系统之内, 则还可以专门设定一个脉冲用于探测电离层信道, 从而实现多任务需求。其不足之处在于需解决耦合及高功率辐射泄漏的影响且能量积累不够, 难以获得大的平均功率。单基地脉冲体制适合国土纵深较小、有远距离探测需求的国家, 例如法国的 NOS-TRADAMUS 雷达。

(2) 收发分离

采用两幅二维天线分别进行发射接收, 即双基地模式。双基地模式能较好地解决收发隔离与电磁兼容问题, 但又面临着收发站的时间、空间及相位同步问题, 且系统庞大, 维护和管理成本较高。在这种模式下, 其发射波形可以采用脉冲波形或连续波。连续波信号能以最经济的手段和最简单的技术产生大的平均发射功率, 且在同平均功率下对其他高频用户的干扰较小, 其缺点是功能单一, 不能实现多功能。双基地脉冲体制适用于国土纵深较大且具有远距离、多功能战略需求的国家。例如俄罗斯的 LADOGA 天波雷达系统; 双基地连续波体制适用于国土纵深大、海域宽广, 具有远距离战略需求的国家, 如美国的 AN/TPS-71 天

波超视距雷达。

3.2 应考虑的几个问题

前已述及, 相对于传统一维阵列 OTHR, 二维阵列 OTHR 在雷达性能上具备得天独厚的优势。尽管二维阵列 OTHR 性能优越, 但雷达系统更为复杂, 相应的实现代价也更高, 因此在工程实践的过程中还有一些问题值得考虑:

(1) 阵列结构选择问题

传统一维阵列 OTHR 的阵列结构都极其庞大, 其接收天线长度通常达 2 km ~ 3 km, 阵元数以百计。在此孔径基础上一个满布的二维阵列意味着上万个天线阵元及相应接收设备, 工程难以实现且成本太高, 这也是传统天波系统只采用一维阵列的原因之一。因此, 新一代 OTHR 必须选择更为优化的二维阵列, 一方面, 从前面仿真结果来看, 宜选用综合性能较优圆环阵列和螺旋阵列; 另一方面, 从工程实用角度讲, 应选取稀疏二维阵列以满足雷达系统设计需求。

(2) 信号与信息处理复杂度问题

二维阵列结构使系统自由度增加, 随之也会带来信号处理复杂度的增加, 其核心就是运算量问题, 例如自适应波束形成、脉冲压缩、CFAR 检测等运算量将成数量级的增长, 这也给集成电路的运算性能提出了更高的要求。解决这个问题应从两方面入手: 一是设计优化的二维阵列, 在保持阵列方向图性能的前提下对阵元进行稀疏优化, 降低系统自由度, 进而降低运算量; 二是寻求新的信号处理算法, 如一些降维和降秩类算法, 在不降低系统自由度的前提下减小运算量。

(3) 阵列误差校准问题

二维阵列 OTHR 增强了雷达对电离层的识别性, 可以大大减小由电离层变化带来的误差, 但同时也增加了阵列误差, 这给空域自适应波束形成带来了严重的影响, 因此必须寻求最佳的阵列校准技术和方案。一方面在雷达责任区内设置多个信标源, 同时采取在线校准和脱机校准技术, 并结合责任区内的信标源进行联合校准; 另一方面借鉴空时自适应信号处理 (STAP) 的理念, 将阵列误差视为一种与方向变化相似的随机因素, 自适应地加以克服。

4 结束语

二维阵列 OTHR 是新一代 OTHR 研究的重点和热点之一, 二维阵列可以实现全方位扫描和俯仰波束控制, 有效改善传统一维阵列 OTHR 性能。本文从传统一维阵列 OTHR 存在的技术瓶颈出发, 对新一代 OTHR 二维阵列性能展开研究, 总结了当前研究现状, 阐述了其性能优势, 选取四种二维阵列进行方向图仿真分析, 结果表明 cantor 多圆环阵和阿基米德螺旋阵

有较好的方向图性能,在此基础上利用遗传算法对阵列进行稀疏优化,指出稀疏二维阵是将二维阵应用于 OTHR 的关键。尽管新一代二维阵列 OTHR 的研究还处在起始阶段,但随着作战需求的不断变迁和科学技术的更新发展,二维阵列 OTHR 理论必将得到进一步完善,其工程实践也必将日趋成熟,OTHR 的发展必将进入一个崭新的历史时期。

参考文献

- [1] Headrick J, Thomason J. The development of over-the-horizon radar at the naval research laboratory [C]//Proceedings of the International Conference on Radar. Rome: IEEE Press, 2008: 1-5.
- [2] 周万幸. 天波超视距雷达发展综述[J]. 电子学报, 2011, 39(6): 1373-1378.
Zhou Wanxing. An overview on development of skywave over-the-horizon radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(6): 1373-1378.
- [3] 周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
Zhou Wenyu, Jiao Peinan. Over-the-horizon radar technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [4] James D L. High-frequency, sky-wave, over the horizon radar (OTHR) technology [R]. USA: Department of the Air Force, USA, 2008.
- [5] Miller L C B. NORAD: moving forward with risk reduction [R]. USA: North American Aerospace Defense Command, 2009.
- [6] Bazin V, Molinier J P, Munoz J, et al. Nostradamus: an OTH radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System Magazine, 2006, 21(10): 3-11.
- [7] Saillant S, Auffray G, Dorey P. Exploitation of elevation angle control for a 2-D HF skywave radar [C]//Proceedings of the International Conference on Radar. [S. l.]: IEEE Press, 2003: 662-666.
- [8] Bazin V, Moli J P, Munoz J, et al. A general presentation about the OTH-radar NOSTRADAMUS [C]//IEEE International Conference on Radar. [S. l.]: IEEE Press, 2006: 634-642.
- [9] Jindalee operational radar network (JORN) [R]. Jane's radar and electronic warfare systems, 2010.
- [10] Johnson B A, Abramovich Y I. Wide-aperture 2-D HF sky-wave radar beamforming with unknown phase offset between sub-arrays [C]//Proceedings of International Radar Symposium Conference. Krakow, Poland: IEEE Press, 2006: 1-6.
- [11] Johnson B A, Abramovich Y I. Elevation filtering in wide-aperture HF skywave radar [C]//Proceedings of IEEE International Radar Conference. Boston, MA: IEEE Press, 2007: 367-372.
- [12] Johnson B A, Abramovich Y I. Adaptive estimation of unknown phase offset between sub-arrays in distributed aperture systems [C]//Proceedings of International Information, Decision and Control Conference. Adelaide, Australia: IEEE Press, 2007: 34-36.
- [13] Vallecchi A, Cerretelli M, Linari M, et al. Investigation of optimal array configurations for full azimuth scan HF sky-wave radars [C]//Proceedings of the 6th European Radar Conference. Rome: IEEE Press, 2009: 200-203.
- [14] Berizzi F, Mese E D, Monorchio A, et al. On the design of a 2D array HF skywave radar [C]//IEEE Radar Conference. Rome: IEEE Press, 2008: 1-6.
- [15] Jaggard D L, Jaggard A D. Cantor ring arrays [C]//IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. Atlanta GA: IEEE Press, 1998: 866-869.
- [16] Hebib S, Raveu N. Cantor spiral array for the design of thinned arrays [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2006, 5(1): 104-106.
- [17] Milligan T A. Space-tapered circular (ring) array [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2004, 46(3): 70-73.
- [18] Vallecchi A, Cerretelli M, Linari M, et al. Investigation of optimal array configurations for full azimuth scan HF sky-wave radars [C]//Proceedings of the 6th European Radar Conference. Rome: IEEE Press, 2009: 200-203.
- [19] Lozano M V, Pena F A, Moreno E. Pencil-beam pattern synthesis with a uniformly excited multi-ring planar antenna [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 2000, 42(6): 70-74.
- [20] 卢琨. 分布式天波超视距雷达体制研究[J]. 现代雷达, 2011, 33(6): 16-19.
Lu Kun. A study on distributed skywave over-the-horizon radar [J]. Modern Radar, 2011, 33(6): 16-19.
- [21] Lu Kun, Cheng Xuyuan. Cognitive over-the-horizon radar [C]//IEEE CIE International Conference on Radar. Chengdu: IEEE Press, 2011: 993-996.
- [22] Wan Xianrong, Zhao Zhixin, Zhang Delei, et al. HF passive bistatic radar based on DRM illuminators [C]//International Radar Conference. Chengdu: IEEE Press, 2011: 157-160.
- [23] 万显荣, 赵志欣, 柯亨玉, 等. 基于 DRM 数字调幅广播的高频外辐射源雷达实验研究[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 11-17.
Wan Xianrong, Zhao Zhixin, Ke Hengyu, et al. Experimental research of HF passive radar based on DRM digital AM broadcasting [J]. Journal of Radars, 2012, 1(1): 11-17.
- [24] Zhao Fei, Cheng Naiping. Genetic algorithm in the design of thinned arrays with low sidelobe levels [C]//International Conference on Wireless Communications & Signal Processing. Nanjing: IEEE Press, 2009.

严 韬 男, 1987 年生, 博士。研究方向为天波超视距雷达信号处理。