激光相控阵与微波相控阵发射天线技术体制的比较

慈明儒[1],刘京郊[2],姜东升[3,4], 韩 龙[1],刘金生[2]

(1. 长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022; 2. 中国北方电子设备研究所,北京 100191;
3. 北京理工大学 光电学院,北京 100081; 4. 北京印刷学院 包装与印刷工程学院,北京 102600)

摘 要:借鉴微波相控阵雷达技术,有的放矢加快探测型激光相控阵雷达的技术发展与应用,从仿学微波相控阵雷达发射天线基础知识入手,提出微波相控阵雷达发射天线与光纤激光相控阵发射天线可比较的部分技术参数;分析了光纤激光相控阵发射天线的技术要点与潜在能力,并立足现有研发水平对其系统功能与规模进行了预测;尝试对光纤激光相控阵与微波相控阵天线的技术特点与面临主要问题进行了论述;提出两者体系内互相配置,不仅有助于提高微波相控阵雷达在复杂电磁环境下对中近程高速、隐身和多目标的探测、识别与定位能力;同时也可适当减少激光相控阵对目标大范围区域搜索的压力的观点。

关键词:激光相控阵; 相控阵雷达; 相控阵天线

中图分类号:O436.1 **文献标志码**:A **DOI**:10.3788/IRLA201847.0406001

Comparison of laser phased array and microwave phased array radar transmitting antenna

Ci Mingru[1], Liu Jingjiao[2], Jiang Dongsheng[3,4], Han Long[1], Liu Jinsheng[2]

(1. School of Electro-Optical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. North China Institute of Electronic Equipment, Beijing 100191, China;
3. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
4. School of Printing and Packaging Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

Abstract: For the development and application of detecting laser phased array radar based on technology of microwave phased array radar, the basic knowledge of microwave phased array radar antenna was simulated and learned at first. And partial content, which can be compared between microwave phased array radar antenna and optical fiber laser phased array radar, was compacted. Then, technical essential and potential ability of optical fiber laser phased array antenna was analyzed, its system function and scale were calculated based on the existing research and development level. Finally, the technical features and main questions of optical fiber laser phased array and microwave phased array antenna were tried to discuss. The system configuration of each other was put forward, which not only helped to improve the microwave phased array radar in complex electromagnetic environment of high-speed, short-range stealth

收稿日期:2017-11-14; **修订日期**:2017-12-17

基金项目:国防预研项目

作者简介:慈明儒(1986-),男,博士生,主要从事激光相控阵方面的研究。Email: 328227082@qq.com

导师简介: 刘京郊(1950-),女,高级工程师,博士生导师,主要从事光电子技术方面的研究。 Email: jingjiaol.cn@sina.com

and multi target detection, recognition and localization ability, but also may be appropriate to reduce the pressure on paint with the laser phased array searching a wide range regional target.

Key words: laser phased array; phased array radars; phased array antenna

0 引 言

最近 10 年来,随着激光雷达在高精度、全天时和成像识别等方面显示出的独特技术优势, 多种类型的先进固体激光雷达系统开始在军事侦察、环境监测、目标探测和对地侦查等方面得到广泛应用,并成为当今光电技术领域中最具军民两用应用前景的一类高新技术。

但随之也对提高激光雷达作用距离等使用性能提出紧迫需求,如大幅提高目标处的激光功率密度、扩展激光扫描空域范围、缩短搜索时间,及更好适应中小型机动平台承载条件等。显然,单纯靠提高激光器的输出功率或压缩激光发散角, 不是加大平台的供电、质量压力,就是难以解决作用距离与搜索视场同时兼顾的难题。在此形势下,发展激光相控阵技术的需求应运而生。

自 21 世纪初以来,激光合成相控阵技术开始被关注。典型代表一是以激光毁伤武器为应用背景的固体/光纤大功率激光合成技术, 多用于小行星防御、太空碎片清理等方向[1],在得到世界主要国家的高强度经费支持下得到快速发展, 配套相关的准直系统发展速度惊人, 现已接近外场能力演示与平台试用能力; 二是以激光探测雷达和空间激光通信为应用背景的光纤激光相干合成技术, 目前虽处于关键技术攻关和小规模相控阵能力验证阶段, 但相关的结合研究却十分火热,例如:光纤激光相控阵高速通信、光纤相干多普勒激光测风雷达和多路相干的频分复用与空间光通信等方面[2-4]。两类应用目标的技术发展重点略有不同, 前者——毁伤级激光武器系统主要关注的是提高到靶激光功率密度, 采取的主要是基于功率或光谱的非相干合成技术; 而后者——探测型激光相控阵系统则更关注的是作用距离与搜索、跟踪之间的兼容,采取的是一种类似微波相控阵雷达的相位相干合成技术。

探测型激光相控阵的基本组成单元(阵元)可采用固体激光器、光纤激光器或其他类型激光器,其中最具应用前景的当属光纤激光器。一是光纤激光器的光束质量好,故远场亮度高,作用距离远,且易实现小口径发射,降低发射光学系统体积;二是光纤激光器的电光转换效率高,结构紧凑,质量轻,更适合用于机载或星载;三是以光纤输出方式,较其他类型的激光器更容易利用多路并束实现输出功率的定标放大;四是在当今国内外精密制造的强力需求牵引下, 光纤激光器技术的进步速度非常快,由于民用市场巨大,故更有助于加快技术成熟与降低成本。因此,利用光纤激光器作为构建激光相控阵的基本单元,应该是一个高效短平快的可行技术途径。

由于光纤激光相控阵发射天线是整个激光相控阵系统的核心与主要难点, 故文中对此进行重点描述,而对激光相控阵的接收与控制等部分不再赘述。探测型光纤激光相控阵发射天线主要由光纤激光器发射模块(相控阵阵元)、相位控制单元和发射光学系统等组成, 通过控制和改变相控阵各阵元之间的相位,实现对相控阵(子阵列)主瓣的相位锁定、角度扫描与目标跟踪, 即采取与微波相控阵发射天线类似的技术体系与相位控制模式。

之所以采取仿学微波相控阵雷达的相位控制方法,研究实现探测型光纤激光相控阵发射天线的最佳技术路线,其考虑主要是基于光波与微波同属电磁波,探测雷达就是先从微波做起,而后延伸到光波; 而相控阵技术也是先从微波相控阵雷达起步,近几年才扩展到激光相控阵领域。两者对目标实施探测、扫描和跟踪的应用背景是一致的,差异只在于作用距离和覆盖视场。考虑到微波相控阵雷达技术已非常成熟,而激光相控阵技术则刚刚开始起步,所以若能通过借鉴和学习微波相控阵雷达技术,可更好地加快激光相控阵雷达技术的发展与应用。

文中尝试对微波相控阵与激光相控阵两者在发射天线部分的可类比知识进行一些凝练和总结,在

此基础上再对两者的技术体制和应用方向进行比较，以及对光纤激光相控阵的技术发展与应用前景给出一些预测。

1 微波相控阵发射天线的相关技术参数

1.1 微波相控阵雷达的主要功能与技术参数

微波相控阵雷达具有搜索、捕获、跟踪、识别、测距、测速和校准等主要功能;具有快速改变天线波束指向和波束形状，及由多部发射机在空间实现功率合成的能力；具有形成与相控阵天线和承载平台实现共形的发射和接收波束的能力；在多样化目标探测、多目标同时跟踪和扩展探测距离等方面,具备独特的技术体制优势[5]。

微波相控阵天线由多个天线单元组成，可以同一天线孔径形成多个独立的发射波束和接收波束；工作波长多选 3 cm 或其他波段；现役装备多以脉冲工作方式为主；相控阵结构布局的基本条件是满足相控阵阵元间隔小于 1/2 波长的条件，以确保在可见空间只有主瓣,而无栅瓣;通过控制相控阵阵元的相位、幅度与极化等参量,可输出一束相干合成的雷达波束,单波束角宽度为几度(典型值 6°),波束形状灵活可变;可实现电控快速角度扫描,扫描范围大于几十度(典型值 60°);在单波束探测基础上,可利用串行/并行多波束方法,实现对大视场范围内的多目标进行搜索与跟踪。

微波相控阵雷达天线的主要性能参数包括:工作波段、工作模式、阵元间隔、主瓣/栅瓣分布、单波束宽度、子阵/阵列角度扫描范围、多目标跟踪能力,以及极化状态、互耦效应和馈电方式;相控阵波束主要技术参数包括中心频率(主波束中心频率)、频带宽度(探测波束对应频率范围)、瞬时带宽(单波束角宽度)[6]。

微波相控阵雷达天线所涉及的理论问题主要涉及:相控阵天线辐射方向图综合、单元互耦影响及降低方法、宽角扫描匹配方法、相控阵天线扫描角扩展、天线副瓣电平降低、相控阵天线工作带宽增加、多波束形成方法、自适应天线方向图形成等。

1.2 微波相控阵雷达天线与光纤激光相控阵雷达可比参数

通过分析，认为可为后续开展激光相控阵和微波相控阵雷达发射天线特征进行比较的相关参数主要涉及以下四种。

(1) 栅瓣影响。若在可见空间出现栅瓣,则对主瓣目标探测产生影响。栅瓣的存在必然占据一定的总辐射能量,降低主瓣能量,影响作用距离;若从主瓣和栅瓣均可看到目标,则容易混淆目标位置,影响探测角精度。

(2) 阵元间距影响。相控阵阵元间距是相控阵雷达最基本参数之一，基本要求是小于波长的二分之一,其数据选取受到多方面因素制约。如间距过小,则阵元之间互耦合,易引起阵面与馈电网络失配;如间距过大,则角度扫描时出现栅瓣,会影响天线阵的增益与指向。

(3) 信号带宽影响。雷达信号带宽的确定准则包括:天线增益或方向性;主瓣宽度或旁瓣电平;主极化/交叉极化电平;输入阻抗或反射损耗。阵列天线带宽受到阵元间距、馈电方式、激励电流幅度和相位的制约,描述参数有重频、脉宽和编码。

(4) 天线波束指向影响。天线波束的指向与波束角(中心频率)在工作频段内发生的变化有关;天线宽度用绝对频率范围表示，也可用相对于中心频率百分比计算；相控阵天线希望拥有尽可能大的瞬时带宽。

2 光纤激光相控阵发射天线技术要点与潜在能力

“光纤激光相控阵”是以光纤激光器作为相控阵发射阵元,工作在光波段的相控阵系统,以光纤激光相控阵发射天线为主，论述其技术要点和可能具备的应用潜在。

2.1 光纤激光相控阵技术类型与应用目标

自光纤激光相控阵技术起步发展至今,探测型光纤激光相控阵系统，以对目标的探测、跟踪为主,兼顾激光照明、通信或干扰,采取的技术路线主要是将多路-甚多路单频/单模/偏振的小功率光纤激光器放大模块,通过控制相位实现能量集中度较高的主瓣光束,并能在一定空间范围内进行光束扫描与跟踪，类似微波相控阵探测雷达的技术路线。

在理想条件下，远场阵列主瓣的功率密度与参

与合成路数的平方成正比。因此利用光纤激光相控阵技术，一方面可大幅降低探测型激光相控阵的技术实现难度,减小对承载平台的压力,而且可弥补传统单波束激光雷达搜索距离近和覆盖视场小的体制弱点,更适合在防空探测、机载跟踪、星载通信和无人平台环境监测等领域军民两用。

下面就以仿照微波相控阵雷达发射天线技术体制的发展思路，结合课题组近年来在研发探测型光纤激光相控阵发射天线方面的一些体会，对近期已达的光纤激光相控阵技术能力和应用前景进行简要描述与预测。

2.2 光纤激光相控阵发射天线的基本功能与系统规模预测

以 MOPA 型的全光纤化的光纤激光相控阵发射天线为例进行说明，系统由多个具有电控扫描能力的相控阵子阵模块拼接而成，组合在一起覆盖所需的搜索空域,或在电控小角度扫描模块的基础上,增加一维/两维机扫,实现全方位覆盖。每个相控阵子阵由多个阵元组成，每个阵元为一路光纤激光放大器,子阵列是构建光纤激光相控阵的基本单元,排列方式可一维线阵，目前最常用的是一维 8 阵元线列，也可两维矩阵，近期目标是实现两维 30~40 个阵元。

光纤激光相控阵的工作波长在 1 μm 附近,典型值为 1.064 μm,该波段的连续的单频、单模、保偏的光纤激光器技术相对成熟,成本也较低;子阵中每路采用保偏的光纤激光放大器(虽然相对于保偏放大器来说,非保偏的放大器更容易保证模式的稳定[7],但是从远场合成效果来说依然选择保偏放大器) 在种子源激光功率注入 70 mW 以上的情况下,可输出 20 W 以上的保偏激光(由于考虑模式稳定效应，单模激光器输出的功率理论极限本身就不高[8]);子阵中各阵元之间的距离,在现有常用的 V 型槽结构下,一般为百微米量级,由于阵元间隔远大于 1/2 波长,因此在可见空间除了有阵列合成主光束以外,还存在诸多栅瓣;通过采取不等间隔的阵元排列方式,可起到一定的栅瓣抑制效果;通过精确调整每个子阵内各阵元输出端的安装位置，保证多路光纤激光放大器输出光束指向与偏振一致；采用 SPGD 算法对子阵内各阵元之间的相位进行实时控制,远场相干合成主瓣光束的能量集中度可达 30%~50%,相位控制精度优于 λ/20(目前查阅的文献国内最优控制精度为优于 λ/24[9]);在子阵相位锁定的基础上,通过精确快速改变子阵内各阵元之间的相位差,在阵元间隔 127 μm 情况下，可实现子阵合成主瓣光束的电控扫描,扫描范围约为 0.5°。

在线列子阵技术基础上构建的两维矩形子阵,可实现两维角度扫描和更高的输出功率。下面分别以探测型光纤激光相控阵的子阵、模块和系统为例,对未来光纤激光相控阵的天线阵规模与可能应用方向进行预测。

为简单起见，下面只考虑在理想情况下的最低配置情况。实际应用中,还需进一步考虑多路相控阵系统各耦合环节带来的功率衰减，以及为避免漏视场而增加的子阵数量。

(1) 相控阵阵元

一个阵元为构成光纤激光相控阵的最小单元,也是 MOPA 结构中的一路光纤激光放大器。输出功率 5~10 W/阵元(下面以 10 W 计算);输出光束为单频、单模、保偏光束。

(2) 相控阵子阵

相控阵子阵由基本阵元组成,可成一维线列、两维矩阵、圆形或任意形状排列。下面以一维线列和两维矩阵为例进行估算。

1) 线列子阵：阵元数 4 个；功率 40 W/线列子阵;一维电控扫描视场 0.5°、另一维大张角(经光纤或光学系统输出角度) 凝视覆盖；跟踪目标个数 1 个。

扫描方式与应用方向:俯仰电扫小角度 + 方位凝视步进机扫；一维小视场光纤激光相控阵跟踪雷达。

2) 两维子阵：阵元数 4×4=16 单元/矩形子阵；功率 16 单元/矩形子阵×10 W/单元=160 W/两维子阵;两维电扫视场 0.5°×0.5°;跟踪目标数 1 个。

扫描方式与应用方向:两维电扫小角度+步进机扫;两维小视场光纤激光相控阵跟踪雷达,适合在微波雷达或其他光电系统引导下，对目标实施小视场快速捕获与精密跟踪。

(3) 相控阵模块

相控阵模块可由多个子阵拼接而成，一个模块

覆盖的搜索视场 300×300/模块,据此进行估算。

模块布局:矩形;子阵数:60×60=3 600 子阵/模块;阵元数:3 600 子阵/模块×16 单元/子阵=57 600阵元/模块;模块功率:57 600 单元/模块×10 W/单元=5.76×10^5 瓦/模块;模块功能:各子阵独立,每个子阵形成一个主瓣,跟踪 1 个目标;也可令几个子阵(如 4 个)共同由一台激光种子源注入,实施统一相位控制,形成功率更高的主瓣,跟踪 1 个目标;跟踪目标数量:几十-数百个目标/模块

扫描方式与应用方向:两维电扫 30°;用于重点方向的光纤激光相控阵搜索、监视和多目标跟踪。

(4) 相控阵系统

相控阵系统可由多个相控阵模块拼接而成,一套系统覆盖的搜索视场 360°×30°,据此进行估算。

工作方式 1:全景凝视

系统由多模块拼接而成。模块数:最少 12 个;阵元数:57 600 阵元/模块×12 模块=6.91×10^5 阵元/系统;系统功能:可在 360°×30°范围内同时实施分区搜索和多目标跟踪,每个区域覆盖视场 30°×30°,适用于俯仰 300°范围内的方位 360°全景监视。

工作方式 2:俯仰电控扫描+方位凝视步进扫描

系统由一个相控阵模块作为凝视单元,其阵元数与总功率等与上述模块的计算结果相同;扫描方式:俯仰电扫覆盖 30°,方位通过机扫覆盖 360°;搜索时间:10~20 s/(360°×30°)。

应用方向:可与微波相控阵雷达配套使用,主要用于复杂电磁环境下百公里内的目标大空域警戒与全景监视。

通过上述估算可以看出,要想承担类似于微波相控阵雷达那样的的搜索、警戒与跟踪功能,主要途径也是拼接子阵。所需要的子阵数量与基本阵元数量,一是取决于每个光纤激光相控阵子阵可覆盖的电控扫描视场;二是取决于每个阵元的激光输出功率。

若基于现有 V 型槽结构下的百微米阵元间隔,则有望实现:凝视视场 30°×30°/模块;光纤激光放大器数量不少于几十万个;跟踪一个目标所需的每个子阵的输出功率为几十到百瓦量级;两维电控扫描的时间为几十毫秒。

在光纤激光相控阵模块基础上,若利用相邻的几个模块同时探测同一个目标,则有望进一步提高对目标的探测距离。

3 光纤激光相控阵与微波相控阵天线的综合比较

3.1 光纤/微波相控阵天线的相同/相似部分与比较

(1) 可类比的主要技术参数

参照前述微波相控阵雷达发射天线的主要技术参数,可将与光纤激光相控阵发射天线类比的参数罗列如下 (括号内为与微波相控阵雷达相对应的参数),如工作波长(工作频率)、偏振模式(极化状态)、偏振隔离度(互耦效应)、控制算法/模式(馈电方式)、扫描范围、主瓣宽度(波瓣宽度)、能量集中度(旁瓣能量),以及阵元数(单元数目)等。

(2) 可比较的模型与描述方式

① 微波相控阵雷达天线与扫描模型

微波相控阵雷达通常采用电扫描法,通过控制阵列天线上的移相器相移量来改变各阵元的激励相位,从而实现波束的扫描。图 1 所示为由 N 个阵元组成的多元一维的移相器天线直线阵列,阵元间距为 d。假设每个阵元为无方向性的点辐射源,所有阵元的馈线输入端为等幅同相馈电,各移相器的相移量分别为 0,φ,2φ,…,(N-1)φ,即相邻阵元的相位差为 φ。

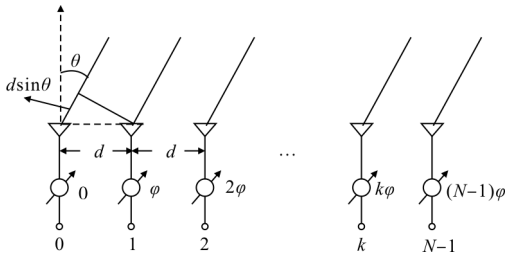

图 1 多元一维线列微波移相器阵列

Fig.1 Multivariant one-dimension alignment microwave phased array

考虑偏离法线方向远处某点的场强,应为各阵元在该点辐射场的矢量和为[10]:

$$E(\theta)=E_0+E_1+\cdots+E_{N-1}=\sum_{k=0}^{N-1}E_k \tag{1}$$

因各阵元是等幅馈电,忽略各阵元到该点距离上的微小差别对振幅的影响,可认为各阵元在该点

辐射场的振幅相等,用 E 表示。若以零号阵元 E_0 辐射场相位为基准,则

$$E(\theta)=E\sum_{k=0}^{N-1}e^{jk(\varphi-\phi)} \tag{2}$$

式中:$\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta$ 为由于波程差引起的相邻阵元辐射场相位差;ϕ 为相邻阵元激励电流相位差;$k\varphi$ 为波程差引起的 E_k 对 E_0 的相位超前;$k\phi$ 为激励电流相位差引起的 E_k 对 E_0 的相位迟后。

任一阵元辐射场与前一阵元辐射场之间的相位差为 $(\varphi-\phi)$。按等比级数求和并运用尤拉公式将公式(2)化简为:

$$E(\theta)=E\frac{\sin\left[\frac{N}{2}(\varphi-\phi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(\varphi-\phi)\right]}e^{j\left[\frac{N-1}{2}(\varphi-\phi)\right]} \tag{3}$$

由公式(3)可以看出,当 $\phi=\varphi$ 时,各分量同相相加,场强幅值最大,其值为:

$$|E(\theta)|_{\max}=NE \tag{4}$$

场强幅值最大时的归一化方向性函数为:

$$F(\theta)=\frac{|E(\theta)|}{|E(\theta)|_{\max}}=\frac{1}{N}\frac{\sin\left[\frac{N}{2}(\varphi-\phi)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}(\varphi-\phi)\right]}=$$

$$\frac{1}{N}\frac{\sin\left[\frac{N}{2}\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta-\phi\right)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta-\phi\right)\right]} \tag{5}$$

$\phi=0$ 时,也就是各阵元等幅同相馈电时,由公式(5)可知,若 $\theta=0$,有 $F(\theta)=1$,即方向图最大值在阵列法线方向。当 $\phi\neq0$ 时,则方向图最大值方向(波束指向)就要偏移,偏移角 θ_0 由移相器相移量 ϕ 决定。$\theta_0=\theta$ 时,应有 $F(\theta_0)=1$,由公式(5)可知应满足:

$$\phi=\varphi=\frac{2\pi d}{\lambda}\sin\theta_0 \tag{6}$$

公式(6)表明,在 θ_0 方向,各阵元的辐射场之间,由于波程差引起的相位差正好与移相器引入的相位差相抵消, 结果各分量同相相加获最大值。显然,为满足公式(6)要求只需改变 ϕ 值就可改变波束指向角 θ_0,从而形成雷达天线波束扫描。

② 光纤激光相控阵发射天线与扫描模型

光纤激光相控阵雷达也可采用类似于微波相控阵雷达常用的电扫描法, 通过控制阵列天线上的相位调制器改变各阵元之间的相位差, 从而实现激光波束的扫描。

对于阵元数为 N 的光纤激光列阵, 设每个阵元直径为 ω_0,第 i 个阵元的坐标为$(x_i,\ y_i)$,每个阵元的初始相位为 ϕ_i,光束传播方向角为$(\theta_x,\ \theta_y)$,阵元的轴向振幅为 A_i,则由夫朗和费衍射理论可知,列阵的远场分布可表示为:

$$I(\theta_x,\ \theta_y)\propto\left|\sum_{i=1}^{N}A_i\exp\{i[k(x_i\theta_x+y_i+\theta_y)+\phi_i]\}\right|^2\times$$

$$\exp\left[-\frac{k_2\omega_0^2}{2}\left(\theta_x^2+\theta_y^2\right)\right] \tag{7}$$

公式(7)由两部分组成,第一项是多孔径远场衍射图样,称为列阵因子(Array Factor,AF),第二项是单阵元孔径阵列因子的远场衍射图样, 称为阵元因子(Element Factor,EF)。列阵远场图样可看作是单孔径远场衍射因子 EF 被多孔径干涉因子 AF 调制的结果[11]。

当阵列中各子孔径的初始相位均保持一致时,公式(7)中的 ϕ_i 可作为常数项忽略,远场图样的中心峰值光强在中心零点处。当列阵中各个阵元初始相位不一致时,远场图样的中心点会发生漂移[12]。将公式(7)写成如下形式:

$$I(\theta_x,\ \theta_y)\propto\left|\sum_{i=1}^{N}A_i\exp\left\{ik\left[x_i\left(\theta_x+\frac{\phi_{xi}}{kx_i}\right)+y_i\left(\theta_y+\frac{\phi_{yi}}{ky_i}\right)\right]\right\}\right|^2\times$$

$$\exp\left[-\frac{k_2\omega_0^2}{2}\left(\theta_x^2+\theta_y^2\right)\right] \tag{8}$$

其中:

$$\phi_i=\phi_{xi}+\phi_{yi} \tag{9}$$

$$\phi_{xi}=kx_i\Delta\theta_x \tag{10}$$

$$\phi_{yi}=ky_i\Delta\theta_y \tag{11}$$

则公式(8)变为:

$$I(\theta_x,\ \theta_y)\propto\left|\sum_{i=1}^{N}A_i\exp\{ik[x_i(\theta_x+\Delta\theta_x)+y_i(\theta_y+\Delta\theta_y)]\}\right|^2\times$$

$$\exp\left[-\frac{k_2\omega_0^2}{2}\left(\theta_x^2+\theta_y^2\right)\right] \tag{12}$$

由上可以看出,通过以上变换,远场能量分布没有变化,但远场图样发生了$(\Delta\theta_x,\ \Delta\theta_y)$角度的偏移。即通过调节列阵中各阵元之间的初始相位, 就可以控制远场光束产生相应的$(\Delta\theta_x,\ \Delta\theta_y)$角度偏移。

若以二维方阵为例(图 2),设各子孔径在出射面

上的坐标为$(x_{mn},\ y_{mn})$，阵列周期为$(d_x,\ d_y)$，其中 $m=1,2,\cdots,N_x$，$n=1,2,\cdots,N_y$，则公式(12)可写成：

$$I(\theta_x,\ \theta_y)\propto\left|\sum_{m=1}^{N_x}\sum_{n=1}^{N_y}A_{mn}\exp\{i[k(md_x\theta_x+md_y\theta_y)]+\phi_{mn}\}\right|^2\times$$

$$\exp\left[-\frac{k_2\omega_0^2}{2}\left(\theta_x^2+\theta_y^2\right)\right] \tag{13}$$

设各子孔径的振幅均为 1，将上式展开整理得到：

$$I(\theta_x,\ \theta_y)\propto$$

$$\left\{\frac{\sin\left[\frac{1}{2}N_xkd_x(\theta_x+\Delta\theta_x)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}kd_x(\theta_x+\Delta\theta_x)\right]}\times\frac{\sin\left[\frac{1}{2}N_xkd_y(\theta_y+\Delta\theta_y)\right]}{\sin\left[\frac{1}{2}kd_y(\theta_y+\Delta\theta_y)\right]}\right\}\times$$

$$\exp\left[-\frac{k_2\omega_0^2}{2}\left(\theta_x^2+\theta_y^2\right)\right] \tag{14}$$

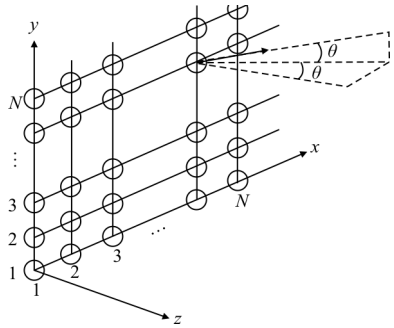

图 2 二维矩形激光相控阵方向图

Fig.2 Directional diagram of two-dimension rectangle laser phased array

表 1 微波相控阵与光纤激光相控阵主要技术性能的综合比较

Tab.1 Comprehensive comparison of main technical feature between microwave phased array and optical fiber laser phased array

Compared parameters	Microwave detecting phased array antenna	Detecting laser phased array antenna		
		Features of compared parameters	Technological difficulty	Research emphasis and solution channel
Operating wavelength	3 cm	0.000 1 cm	The key of expanding scanning angle of sub-array is how to meet the condition that array elements spacing less then λ/2	1) Research and develop multi-path fiber combiners whose array elements spacing less then 10 μm; 2) Develop optimization algorithm which is improved both in angle scan and stable phase lock; 3) Improve stability of multi-path optical fiber and optical fiber coupler
Array elements spacing	1.5 cm	0.012 7 cm		
Scanned area	60°	≤0.5°		
Width of main lobe	6°	0.005°/1 mrad	Guarantee high energy concentration of narrow main lobe	Improve coherence and stability of phase position、polarization、directing、power of sub-array
Grating lobe suppression	Grating lobe problem	Sever grating lobe problem	Realistic beam combination on the order of a micrometer	Explore new technology of suppressing grating lobe
Power of array element	Microwatts	Watt-dozens of watt	Medium-power quality seed laser; multi-path beam splitter of low loss;fiber laser and amplifiers of low injection	1) Improve synthetic ability of seed fiber to drive more array elements; 2) Fiber laser amplifiers of multipath integrated mould,reduce ligature and system scale;
System function	Phase lock/ scan/track	Phase lock/ scan/track	Integrated control algorithm based on precision of phase lock	Improve and perfect existing control algorithm, increase the accuracy and speed
Antenna structure	Matrix antenna made up of sub-array overlapping	Matrix antenna made up of sub-array overlapping	Small scale of scanning angle of sub-array, a large number of sub-array	Explore new technology for expending scanning scale of sub-array
Main technical difficulties	Compress width of field angle-improve spatial resolution	Suppress grating lobe-increase energy concentration of main lobe; Expand scanning scale-reduce the number of sub-array		

3.2 光纤/微波相控阵天线的主要差异与比较分析

表 1 给出光纤激光相控阵发射天线与微波相控阵雷达发射天线的主要参数比较，由表可以看出两者之间的主要相同与不同点，以及探测型光纤激光相控阵天线所面临的主要技术难点及可能解决途径。

由表 1 可见，微波相控阵雷达与光纤激光相控阵发射天线部分的相同点主要在于：

(1) 微波相控阵与光纤激光相控阵都是通过主动发射探测波束,实现对目标的搜索、捕获与跟踪；

(2) 微波相控阵与激光相控阵发射天线均是由多个发射阵元组成子阵,由多个子阵拼接成模块,再由多个模块构成发射系统的，覆盖视场的大小和作用距离的远近主要取决于参与合成的基本阵元数目与阵元的输出功率。

主要差异在于：

(1) 工作波长。 光纤激光相控阵工作波长最常用波长为 1 μm,微波相控阵雷达则多采用 3 cm 工作波长,激光比微波短 4 个数量级。

(2) 阵元工作方式。 光纤激光相控阵目前多采用技术最为成熟的单模/单频/保偏光纤连续激光放大器,输出功率最高几十到上百瓦,微波相控阵雷达则多采用脉冲工作体制。

(3) 阵元间隔与带来影响。 基于 V 型槽并束输出的光纤激光相控阵,其阵元间隔(127 μm)为激光波长(1 μm)的上百倍,很难像微波相控阵那样,比较容易地将阵元间隔控制在二分之一波长以内，因此在光纤激光相控阵远场方向图中除了主瓣以外,同时还存在着诸多栅瓣；而微波相控阵雷达则可将栅瓣抑制在有效工作区域以外，确保在可见空间只有一支主瓣。

(4) 主瓣波束宽度。 光纤激光相控阵的单波束宽度约为毫弧度量级，较微波相控阵的单波束宽度 6°至少低了两个数量级；

(5) 主要面临的技术问题。 由于微波相控阵与光纤激光相控阵受到各自物理或工艺上的限制,因此各自需要解决的技术问题或应用难点亦有所不同。其中,微波相控阵雷达面临的主要难题是如何尽可能压缩波束角宽度,提高空间分辨力;而光纤激光相控阵则主要是解决栅瓣抑制和提高扫描角度问题。因此,光纤激光相控阵的优势是空间分辨率高,但弱点是空间扫描角度范围小；而微波相控阵雷达的优势则是作用距离远、主瓣覆盖空域大,其弱点也正是因为单波束角度宽,故空间分辨率较低。据此,两者在应用方向的侧重点也有不同。

4 结束语

由于受本课题组专业领域的限制，文中只是尝试通过学习一点点微波相控阵雷达天线的基础知识，借此来与探测型光纤激光相控阵技术研发过程中获得的初步结果作些比较。其目的,一是加深对激光相控阵技术面临问题的理解；二是对今后探测型光纤激光相控阵系统的可能应用方式与系统规模做些预测。通过研究与比较看到,如何有效解决扫描角度扩展和栅瓣抑制的问题，已成为制约探测型激光相控阵仿学微波相控阵雷达传统技术体制继续走下去的关键。虽然可预料的技术实现难度相当高,但挑战与机遇并存。

同时也要看到，任何一种技术体制都不是万能的。微波相控阵的作用距离远、子阵覆盖的空间搜索角度范围大,但其空间分辨率较低,在此方面正好可发挥激光相控阵的技术优势。实际应用中,可将微波相控阵与激光相控阵组合成为一个体系，由微波相控阵雷达搜索和发现中远程目标,并给出 6°左右的目标所在空域信息，然后利用对应于该空域的激光相控阵模块,对目标区进行小角度搜索、高精度跟踪与精确测速。两者成体系配置,相互取长补短,不仅有助于提高微波相控阵雷达在复杂电磁环境下,对中近程高速、隐身和多目标的探测、识别与定位能力;同时也可适当缩小激光相控阵的目标搜索区域,与其小角度扫描能力匹配。

由于光纤激光相控阵发射天线可实现全光纤化,矩形天线阵的结构尺寸很小,所以或可直接加装在微波相控阵雷达之上，或可与承载飞行平台的外形实现共形。因此有理由认为,虽然探测型光纤激光相控阵技术的发展道路艰难,但应用前景是光明的。

参考文献：

[1] Wang Xiaolin, Zhou Pu, Li Rongtao, et al. Current situation, tendency and challenge of coherent combining of

high power fiber lasers [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2017, 44(2): 0201001. (in Chinese)
王小林, 周朴, 粟荣涛 ,等. 高功率光纤激光相干合成的现状、趋势与挑战[J]. 中国激光, 2017, 44(2): 0201001.

[2] Wang Tianshu, Sun Hongwei, Han Jian, et al. Fiber laser phased array for Deep-Space information transmission [J]. ***Journal of Deep Space Exploration***, 2014, 1(4): 282-288. (in Chinese)
王天枢, 孙鸿伟, 韩建, 等.可用于深空信息传输的光纤激光相控阵技术[J]. 深空探测学报, 2014, 1(4): 282-288.

[3] Hu Yang, Zhu Heyuan. 1.55 μm all-fiber coherent Doppler lidar for wind measurent [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(s1): S130001. (in Chinese)
胡杨, 朱鹤元. 1.55 μm 全光纤相干多普勒激光测风雷达[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(s1): S130001.

[4] Wang Yi, Yang Shuai, Ma Jing, et al. Performance analysis of coherent OFDM system in free space optical communication [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2016, 45(7): 0722003. (in Chinese)
王怡, 杨帅, 马晶, 等. 自由空间光通信中相干 OFDM 系统性能分析[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0722003.

[5] Zhang Guangyi. Principles of Phased Array Radar [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 13-37. (in Chinese)
张光义. 相控阵雷达原理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 13-37.

[6] Zhang Guangyi. Phased Array Radar Antennas[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006: 314-325. (in Chinese)
张光义. 相控阵雷达天线 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006: 314-325.

[7] Wang X L, Zhang H W, Su R T, et al. Experimental comparison of mode instabilly (MI) in high power fiber osbillator and fiber amplifier[C]//Laser Optics, 2016: A-22.

[8] Otto H J, Jauregui C, Limert J, et al. Average power limit of ytterbium-doped fiber-laser systems with nearly diffraction-limited beam quality [C]//SPIE, 2015, 9728: 97280E.

[9] Su R T, Zhang Z X, Zhou P, et al. Coherent beam combining of a fiber lasers array based on cascaded phased control [J]. ***IEEE Photonics Technology Letters***, 2016, 28 (22): 2585-2588.

[10] Ding Lufei. Principles of Radar [M]. Xi′an: Xidian University Press, 2002: 211-214. (in Chinese)
丁鹭飞. 雷达原理 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 211-214.

[11] Fan Xinyan. Research of active phase-locking fiber laser coherent combining technique[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 104-105. (in Chinese)
范馨燕. 主动锁相光纤激光相干合成技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 104-105.

[12] Polishuk A, Arnon S. Communication performance anlysis of microsatellites using an optical phased array antenna [J]. ***Optical Engineering***, 2003, 42(7): 2015-2024.