



·高功率微波技术专辑·

光导微波源阵列合成时控技术初步研究^{*}

牛昕玥¹, 谷炎然¹, 楚旭¹, 姚金妹^{1,2}, 易木保^{1,2}, 王朗宁^{1,2}, 荀涛^{1,2}

(1. 国防科技大学 前沿交叉学科学院, 长沙 410073; 2. 国防科技大学南湖之光实验室, 长沙 410073)

摘要: 基于宽禁带光导半导体的固态光导微波源是高功率微波产生的一种新途径, 该方案具有功率密度高、频带范围宽等特点, 且其低时间抖动特性使其在功率合成方面具有巨大潜力, 利用光波束形成网络构建光导微波有源相控阵是光导微波器件迈向实用的重要途径。分析了光导微波相控阵系统原理, 设计了光导微波真延时网络架构, 并构建了差分真延时相控阵和考虑相位随机误差的真延时相控阵的理论模型, 对影响功率合成和波束扫描的关键因素开展定量分析和仿真验证。结果表明, 对于发射 1 GHz 信号的 $n \times 10$ 阵列, 延时均方差在 10 ps 以下时, 指向偏差小于 0.13°, 峰值增益损耗小于 2%; 延时步进精度在 10 ps 以下时, 指向偏差小于 0.2°, 峰值增益损耗小于 0.03%。由此提出延时精度指标, 为未来更高功率、更大规模的光导微波合成技术发展提供参考。

关键词: 宽禁带光导半导体; 有源相控阵; 光波束形成网络; 光真延时; 时延误差

中图分类号: TN78

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230260

Primary study on time control technology of active phased array based on photoconductive microwave source

Niu Xinyue¹, Gu Yanran¹, Chu Xu¹, Yao Jinmei^{1,2}, Yi Muyu^{1,2}, Wang Langning^{1,2}, Xun Tao^{1,2}

(1. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Nanhu Laser Laboratory, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Solid-state photoconductive microwave source based on wide-bandgap photoconductive semiconductor is a new way of high power microwave generation. The scheme has the characteristics of high power density and wide frequency band, and its low time jitter characteristic makes it have great potential in power synthesis. The construction of active phased array of photoconductive microwave devices using optical beamforming network is an important way for the application of photoconductive microwave devices. In this paper, the principle of optical microwave phased array system is analyzed, and the theoretical models of differential true delay phased array and true delay phased array considering phase random error are constructed. The key factors affecting power synthesis and beam scanning are quantitatively analyzed and simulated, and the delay precision index is proposed. The results show that for the $n \times 10$ array transmitting signal at 1 GHz, when the delay phase variance is less than 10 ps, the pointing deviation is less than 0.2° and the peak gain loss is less than 2%. When the delay step accuracy is less than 10 ps, the pointing deviation is less than 0.2°, and the peak gain loss is less than 0.03%. On this basis, the real time delay network architecture of photoconductive microwave is designed, which provides a reference for the development of higher power and larger scale photoconductive microwave synthesis technology in the future.

Key words: wide-bandgap photo-conductive semiconductor, active phased array, optical beamforming network, optical true time delay, time delay error

基于宽禁带光导半导体器件的固态光导微波源是高功率微波产生的一种新途径。此类光导微波源不仅具有超宽带、低损耗、体积重量小、抗电磁干扰等光纤引入的独特优势^[1-2], 还具有功率密度高、频带范围宽的特点^[3-4],

* 收稿日期: 2023-08-11; 修订日期: 2023-10-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(62071477、62101577); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ40660)

联系方式: 牛昕玥, xinyue.niu@outlook.com。

通信作者: 荀涛, xtao_0301@hotmail.com;

姚金妹, yao_jinmei@163.com。

其输出参数灵活可调、低时间抖动的特性使其在频率捷变和功率合成等方面具有巨大潜力^[5-7]。当前,光导器件的单路输出受单个器件承压能力和响应线性度等因素的制约,其高效和线性两个指标不能兼得^[8]。因此光导微波要实现高功率应用,在不断提升单路功率容量至百千瓦级输出的基础上^[9-10],必须突破阵面合成技术。另一方面,微波光子技术与相控阵列技术的结合可以满足雷达等应用在高频、宽带、多波段等方面的发展需求,突破传统雷达面临的瓶颈,克服宽带宽角扫描时信号瞬时带宽受限的难题^[11]。

波束成形技术是相控阵设计中必不可少的技术,目前有多种实现方案,如模拟波束成形、数字波束成形、光控波束成形等。而基于电移相器的传统模拟波束成形方式在进行宽角扫描时,由于渡越时间、孔径效应的影响,收发信号不能有效地同相合成,难以实现期望的波束指向控制^[12];用于补偿的射频延迟线由波导或同轴电缆构成,对宽带信号的传输损耗和工程实现都带来不便;其余模拟波束形成网络如透镜、矩阵等,当天线孔径和带宽变大时,会出现体积变大和灵活性变差的问题。传统的全数字波束成形(DBF)结构各路信号独立调制独立接收,考虑到硬件设备的构建成本与实际功耗,不适宜在大规模光导微波相控阵中应用^[13]。基于光真延迟(OTTD)的光控波束成形技术可避免波束偏斜,且具有重量轻、体积小、低损耗、抗电磁干扰等固有优势^[14-18]。从20世纪80年代至今已出现约4种光真延时技术,其中一些技术已经应用到微波光子功率合成的时控链路^[19-22]。

本文在SiC光导半导体开关(PCSS)实现单路高功率输出的基础上,面向光导微波源阵列合成实际应用进行新的探索,设计了一种满足高功率输出和高精度扫描需求的光导微波源阵列。同时,本文定量分析影响系统功率合成增益的因素,研究光控时延技术,探索高功率环境下多路相位控制与链路集成的优选方式,为在光导微波相控阵系统的波束扫描提供技术基础。

1 系统架构设计

首先,在1.1节中介绍所提出系统的架构,概述其组成部分、结构特点与预期优势,对系统架构未来发展方案进行展望;在1.2节中描述架构中所采用的分光及延时方案的技术细节与特点。

1.1 系统架构概览

光导微波相控阵中各路光电转换器件输出低抖动、高相干的微波信号,实现波束方向可控的空间功率合成。在脉冲簇激光器模块中,任意波形发生器(AWG)作为产生微波信号的调制源,半导体二极管激光器(LD)产生的脉冲激光经声光调制器(AOM)、电光调制器(EOM)和光纤固体级联放大系统后,输出调制放大的光载微波信号。波束形成网络(BFN)通过适当调节各路输入信号的相位差以使得相控阵实现期望波束辐射,光波束形成网络(OBFN)既可以通过空间光延时来实现,也可以通过光纤光延时实现。

图1和图2分别展示了两种不同的系统结构,两者的区别主要在于不同的分光与延时方案的选择。

如图1所示,激光经光纤传输和空间分束后在光波束形成网络(OBFN)中产生一定光程差,其后进入阵列前端的光耦合结构,最后照射到SiC光导半导体上实现光电转换,由各天线单元对馈入的调制电信号进行空间辐射输出。该方案先将弱光信号放大,其后对强光进行分束和延时调节。由于输入到分束模块的光功率较高,分光模块必须采用空间分光方案,这带来“分光-耦合”模块的体积相对较大的缺点。

在此结构的基础上进一步优化,提出如图2所示的全光纤结构,其具有弱光条件下分光延时和全光纤激光放大的特点。并且,将光程调控部分放置在弱光环境中,有利于系统选择或移植更多种类的光程调控器件。最后各路光信号由光纤直接馈入SiC器件实现光电转换。该方案与图1中方案相比,可以进一步突破单路激光的输出峰值功率上限,且具有减小体积重量、易于控制调节和多路拓扑等优势。

实现延时的方法也可分为空间延时和光纤延时。光纤延时法使用 m 个光开关级联可实现 m 位差分延时,具有结构紧凑的优点,缺点是温度和环境会使光纤中的光程产生漂移,且光开关一般不具备在峰值功率激光条件下 ze 工作的能力;空间延时具有光程连续可调、可抗高功率、稳定性好的优点,缺点是体积重量相对较大,调节速度较慢。

考虑到全光纤系统对应的各路光纤放大模块制作周期较长,本文中采用空间分光与空间延时系统作为阵列的初步验证方案;值得注意的是,全光纤系统相较于空间光系统的优势更大,依然是最终目标。

1.2 光延时方案

实际应用中,为了解决单极性输出时辐射效率低的问题,拟采用推挽放大方式将非过零信号转化为过零信号。一个天线阵元的馈入信号由两个并联的光导半导体提供,分别连接两个极性相反的脉冲功率源进行供电。这

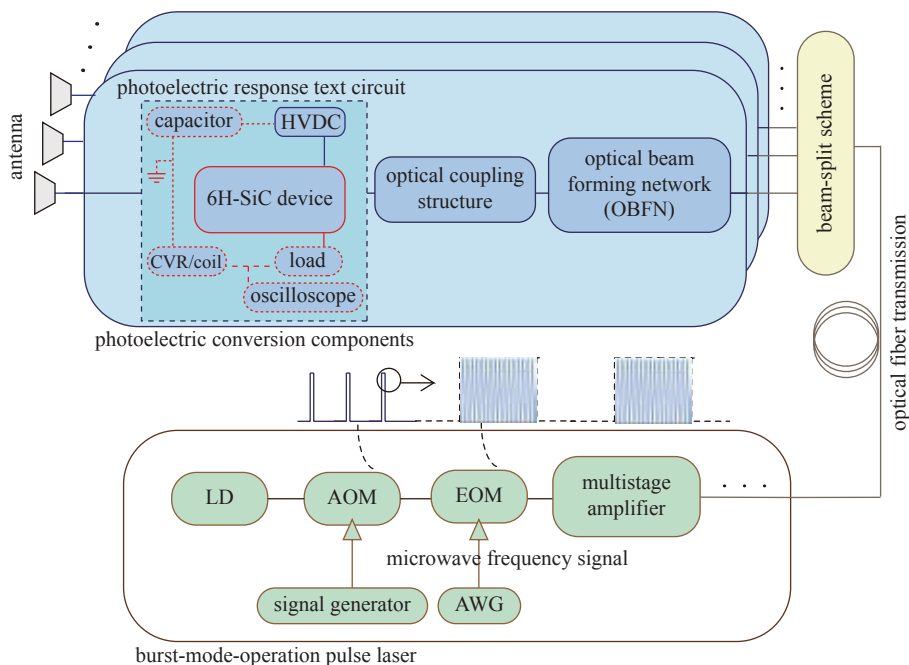


Fig. 1 Scheme of the optically controlled phased array system based on linear SiC devices, including the photoelectric conversion components and the burst-mode operation pulse laser

图 1 基于线性 SiC 器件的光控相控阵系统架构示意图, 其中包括光电转换模块和簇发模式脉冲激光器模块

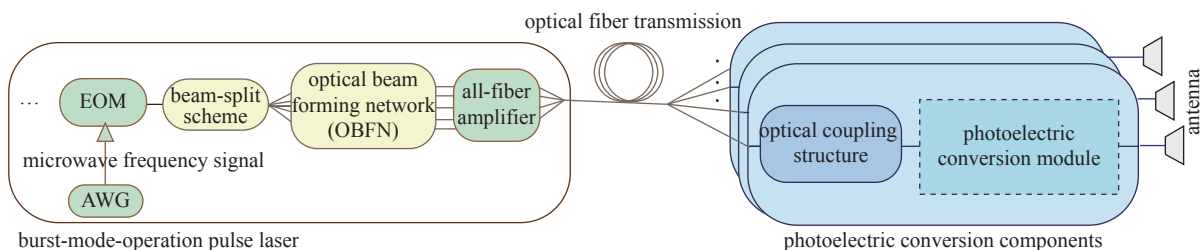


Fig. 2 Scheme of the optically controlled phased array system in the future, where the optical signal is delayed first and then amplified

图 2 光控相控阵系统架构展望, 其中激光器模块采用全光纤方案实现分光、延时与放大

就要求当不同阵元之间进行相对相位调整的同时, 同一阵元的两个光导半导体上所施加信号的相位差恒为 π , 即光信号延时 τ 随调制主频 f 的改变产生相应的调整。因此, 图 3 所示的光延时网络不仅包含可调节棱镜组模块以实

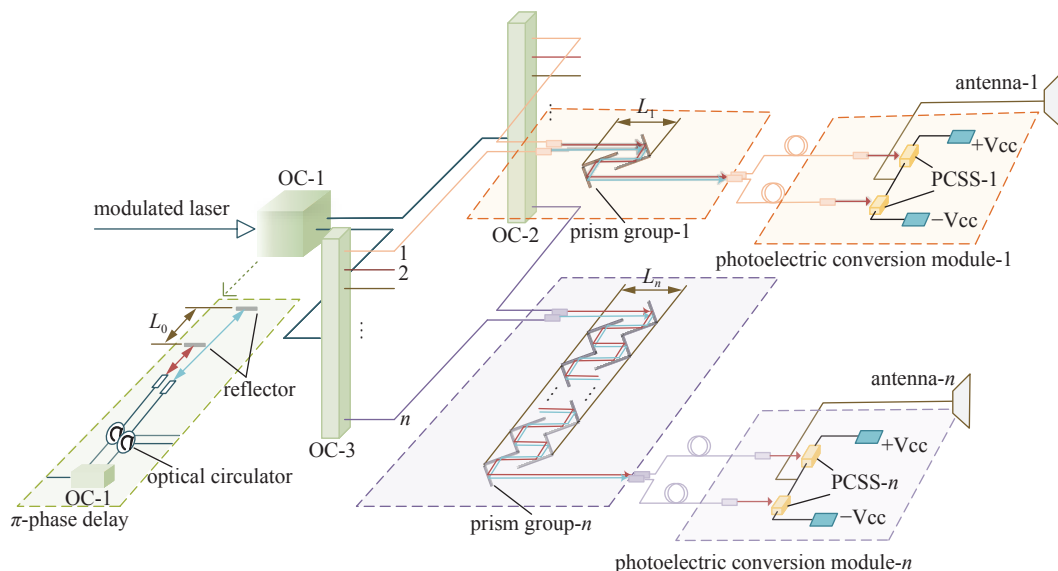


Fig. 3 Optical time delay architecture

图 3 光延时方案示意图

现基本相位调节,还包含 π 相位延时模块来满足宽带输出需求。

π 相位延时模块针对推挽输出而设计,其包括光耦合模块(OC-1)、光环形器、光纤-空间光耦合器、两个相对距离为 L_0 的反射镜。根据主频 f 的变化调节两反射镜间距 L_0 ,即可实现随主频变化的固定相位差,反射光经过光纤-空间光耦合器和光环形器后从 π 相位延时模块输出。反射镜间距与主频的关系为

$$L_0 = \frac{c\tau}{2} = \frac{c}{4f} \quad (1)$$

可调节棱镜组模块是针对阵元间实时相差调整而设计,采用了文献 [23] 中提出的棱镜组方法。其包括前棱镜组、后棱镜组及若干光耦合模块。后棱镜组与其前棱镜组间距为 L_1-L_n ,各平面棱镜组中棱镜的个数等差递增,从而实现 n 组等差递增的延时。同时,各组内两路光之间相对相位差 π 固定不变。调整棱镜组间距 L_1-L_n 以改变不同阵元间的相对相位差,从而实现相控阵的波束扫描。

2 阵列仿真分析

本章首先构建了差分真时延相控阵和考虑随机相位误差的真时延相控阵的理论模型。其次,分别在光真延时相控阵理论模型的基础上引入了由延时精度(步进)带来的差分误差和由环境带来的光纤链路相位误差,并结合光导微波源阵列合成实际需求提出延时误差指标。最后,考虑到理论仿真不能反映天线单元互耦带来的影响,在 CST 中进行了实体模型仿真分析,通过仿真结果的高度一致性验证了理论模型的可靠性。

2.1 真时延相控阵理论模型

在如图 4 所示的相控阵天线模型的基础上分别引入了由延时精度\步进带来的差分误差和由环境带来的光纤链路相位误差,构建了如式(2)所示的差分真时延相控阵和式(3)所示的考虑随机相位误差的真时延相控阵的理论模型。其中, F_a 为阵因子方向图函数; n 为阵元数; a_i 为第 i 个阵元的辐射信号的幅值; k 为波数; $i-(n+1)/2$ 为以阵列中心为原点,第 i 个阵元距离阵列中心的距离; d 为阵元间距; θ_0 为辐射角度; θ 为辐射方向图的横坐标; v 为光在介质中的传播速度; t_{\min} 为可调最小延时步进; σ 为各路信号时间延迟的标准差。

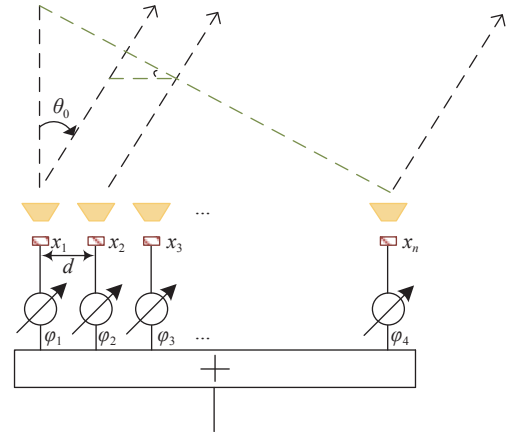


Fig. 4 Theoretical model of phased array antenna

图 4 相控阵天线理论模型

$$F_a = \sum_{i=1}^n a_i \exp \left\{ jk \left(i - \frac{n+1}{2} \right) d \sin \theta - \left[\left(i - \frac{n+1}{2} \right) (d \sin \theta_0 / vt_{\min}) \right] t_{\min} v \right\}, \quad \theta \in [-90^\circ, 90^\circ] \quad (2)$$

$$F_a = \sum_{i=1}^n a_i \exp \left\{ jk \left(i - \frac{n+1}{2} \right) \left[d \sin \theta - \left(\frac{d \sin \theta_0}{v} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp \left(-\frac{t^2}{2\sigma^2} \right) \right) v \right] \right\}, \quad \theta \in [-90^\circ, 90^\circ] \quad (3)$$

2.2 馈电相位误差分析

当仅考虑功率合成,不考虑波束扫描时,对线阵和面阵进行分析可得:射频频率对指标的影响比阵元数对指标的影响更大,对 8×10 阵列,当其辐射 3 GHz 信号时 90% 效率对应时延精度指标是 13~14 ps;随着阵元数增加,阵列稳定性增加,阵列合成效率的时间分布趋于某一恒定数值。对一维阵列和二维面阵,瞬时合成效率的最恶劣值为 90% 时所对应的时延均方差分别如表 1 和表 2 所示。在实际设计中,该均方差值对应系统所能容忍的最大时延误差起伏范围。时延误差为系统静态误差和实时动态误差的总和,静态误差常指由于加工或光纤弯曲引入的固定延时差;动态误差由环境因素引入(如温度或振动等),以时间抖动的形式出现,在频域上体现为相位噪声。

表 1 对于 $1 \times n$ 阵列,功率合成损耗小于 10% 时对应的时延均方差

Table 1 Delay variance when the loss is less than 10% for a $1 \times n$ array antenna

number of array elements	90% of the theoretical gain/dB	time delay index at 1 GHz/ps	time delay index at 3 GHz/ps
1×4	11.58	26	9
1×8	17.6	30	10
1×10	19.54	32	11

表 2 对于 $m \times n$ 面阵, 功率合成损耗小于 10% 时对应的时延均方差
 Table 2 Delay variance when the loss is less than 10% for a $m \times n$ array antenna

number of array elements	90% of the theoretical gain/dB	time delay index at 1 GHz/ps	time delay index at 3 GHz/ps
2×4	17.6	29	10
8×8	35.67	41	13-14
8×10	37.6	43	13-14

其后, 分析 1×10 阵列在波束扫描的情况下其输出性能受步进误差和延时误差的影响, 仅考虑差分延时精度影响的分析结果如图 5 所示。结果表明, 对于考虑差分延时的光真延时相控阵列, 波束指向偏差随扫描角度和延时步进的增大而增大, 当步进为 10 ps, 发射信号频率为 1 GHz, 方位角扫描范围 $0 \sim 30^\circ$ 时, 指向偏差将小于 0.2° , 功率合成损耗小于 0.03%。

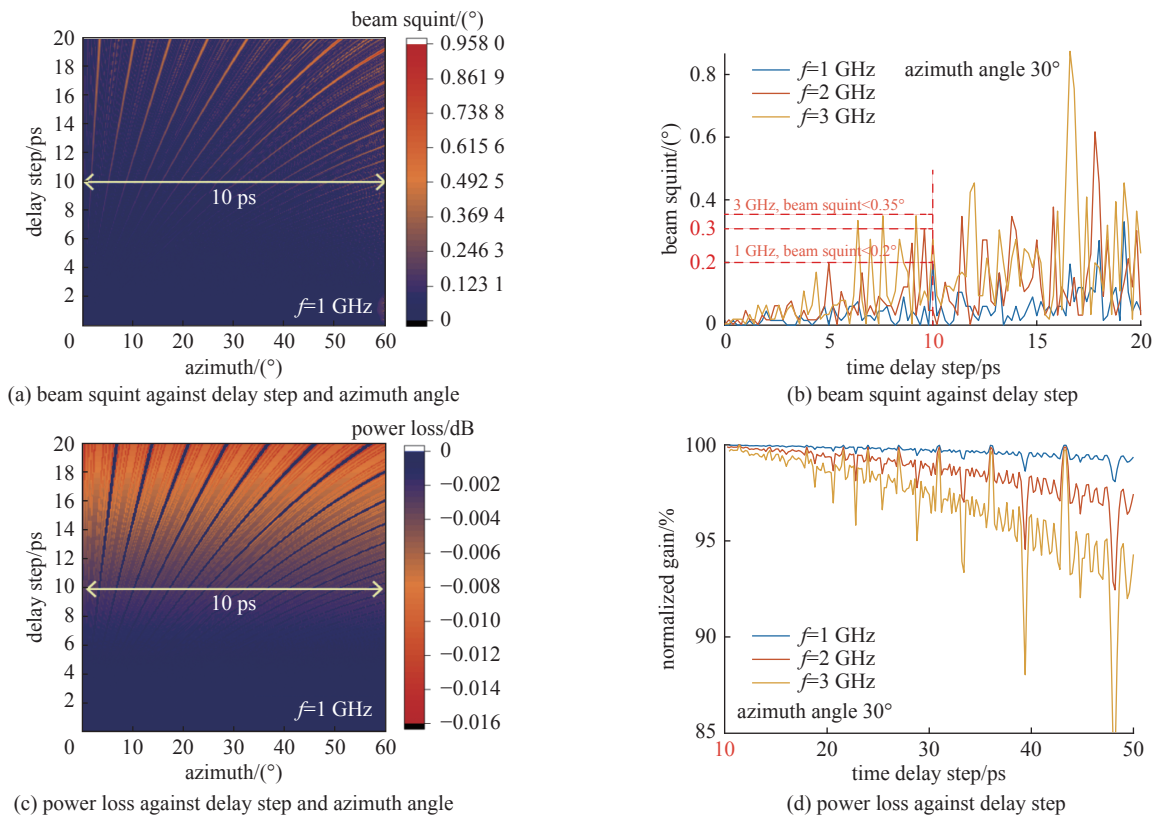


Fig. 5 Analysis results of OTTD phased array considering time delay step

图 5 考虑差分延时步进的 光真延时相控阵列分析结果

对于仅考虑延时误差的光真延时相控阵列, 分析结果如图 6 所示。波束指向偏差随延时均方差的增大而增大, 当延时均方差为 10 ps, 发射信号频率为 1 GHz, 方位角扫描范围 $0 \sim 30^\circ$ 时, 指向偏差将小于 0.13° , 功率合成损耗小于 2%。

2.3 CST 仿真分析与验证

考虑到纯理论仿真不能反映天线单元互耦带来的影响, 在 CST 中进行了相应的阵列仿真分析, 具体设置如下: 在 CST 中建立任意 1×10 阵列, 使用外部程序控制 CST 对各阵元端口进行预设相位/幅度分布的馈电, 计算结束后在数据后处理模板中导出远场方向图并利用程序批量读取关键指标, 最后对 $0 \sim 60^\circ$ 之间每个角度间隔的仿真结果与理论结果的偏离值取平均。

相位均方差在 10° 以内的仿真如图 7 所示, 相位均方差在 10° 以上的仿真结果如表 3 所示。结果表明, 发射 1 GHz 信号, 相位或时延的均方差为 10° (27 ps) 时, 在 2.2 节理论模型中, $0 \sim 60^\circ$ 的波束偏斜是 $0.25 \sim 0.64$, 主瓣功率减小 0.1 dB, 在 CST 仿真模型中对应的平均波束偏斜是 0.40° , 主瓣功率减小约 0.1 dB。经比较, 各项指标变化趋势及范围的一致性较高, 证明了理论模型的可靠性, 因此进一步确定系统延时误差小于 10 ps 的精度指标。

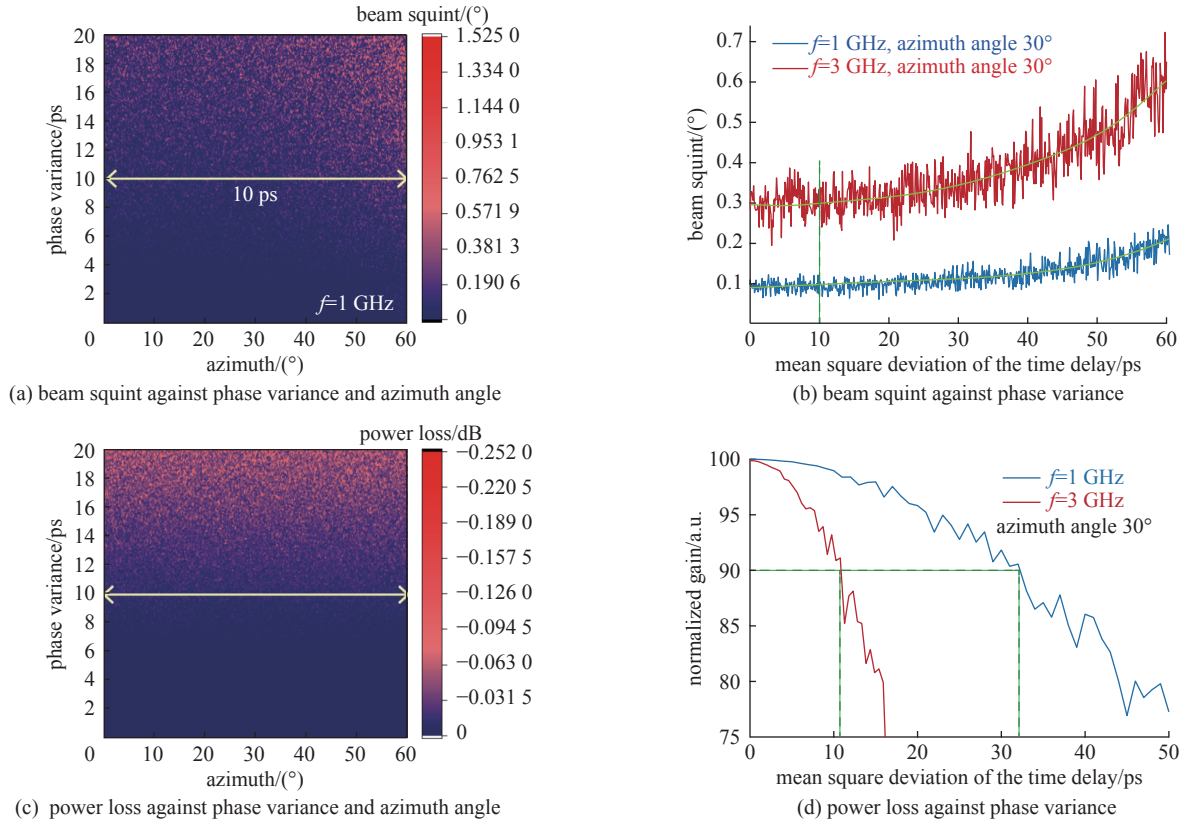


Fig. 6 Analysis results of OTTD phased array considering time delay error

图 6 考虑延时误差的光真延时相控阵列分析结果

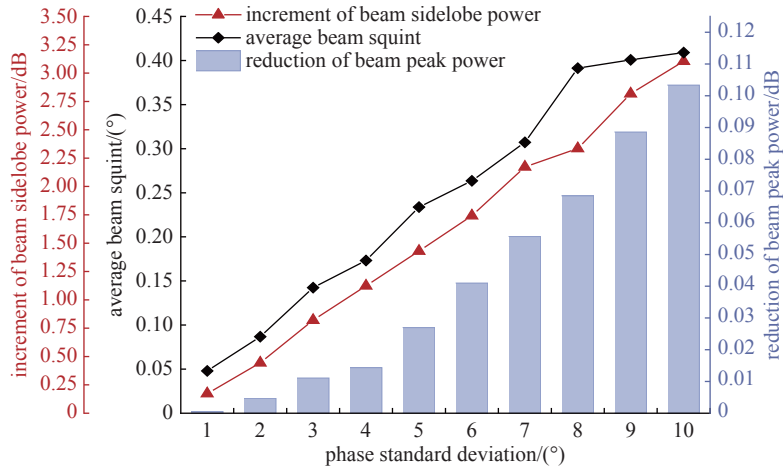


Fig. 7 Increment of beam sidelobe power, average beam squint and reduction of beam peak power against phase standard deviation in the simulation result in CST

图 7 CST 仿真结果中, 旁瓣增益的增加值, 平均波束偏斜角度和主瓣峰值功率的下降值

表 3 相位均方差对相控阵列关键指标的影响

Table 3 Influence of phase variance on the key indicators of phased array

phase standard deviation/(°)	element number	beam squint/(°)	main lobe power/dB	side lobe power/dB
10	10	0.40	-0.10	+3.00
15	10	0.64	-0.22	+4.64
20	10	0.94	-0.40	+5.95

3 结 论

本文面向光导微波源阵列合成高功率输出、高精度控制等实际需求, 探索多路光导器件的功率合成、损耗分

析和时序控制等关键问题, 系统分析各参数对相控阵列增益、波束指向精度等系统关键指标的影响并开展仿真验证。结果表明, 对于发射 1 GHz 信号的 $n \times 10$ 阵列, 差分延时精度或延时均方差为 10 ps 时, $0 \sim 30^\circ$ 扫描范围内指向偏差将分别小于 0.2° 和 0.13° , 功率合成损耗分别小于 0.03% 和 2%, 并据此提出阵列各路延时误差小于 10 ps 的精度指标。

参考文献:

- [1] Kelkar K S, Islam N E, Fessler C M, et al. Design and characterization of silicon carbide photoconductive switches for high field applications[J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, 100: 124905.
- [2] Sullivan J S, Stanley J R. Wide bandgap extrinsic photoconductive switches[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(5): 2528-2532.
- [3] Majda-Zdanczewicz E, Supruniuk M, Pawłowski M, et al. Current state of photoconductive semiconductor switch engineering[J]. *Opto-Electronics Review*, 2018, 26(2): 92-102.
- [4] Tsao J Y, Chowdhury S, Hollis M A, et al. Ultrawide-bandgap semiconductors: Research opportunities and challenges[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2018, 4: 1600501.
- [5] Rakheja S, Huang L, Hau-Riege S, et al. Performance modeling of silicon carbide photoconductive switches for high-power and high-frequency applications[J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2020, 8: 1118-1128.
- [6] Zhu Li, Hu Long, Shen Xin, et al. Improved current and jitter performances of photoconductive semiconductor switch based on reduced graphene oxide/metal electrode[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2023, 44(2): 289-292.
- [7] Hu Long, Su Jianchang, Qiu Ruicheng, et al. Ultra-wideband microwave generation using a low-energy-triggered bulk gallium arsenide avalanche semiconductor switch with ultrafast switching[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2018, 65(4): 1308-1313.
- [8] Xiao Longfei, Yang Xianglong, DuanPeng, et al. Effect of electron avalanche breakdown on a high-purity semi-insulating 4H-SiC photoconductive semiconductor switch under intrinsic absorption[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(11): 2804-2808.
- [9] Wang Langning, Chu Xu, Wu Qilin, et al. Effects of high-field velocity saturation on the performance of V-doped 6H silicon carbide photoconductive switches[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(4): 4879-4886.
- [10] He Xuan, Zhang Bin, Liu Shuailin, et al. High-power linear-polarization burst-mode all-fibre laser and generation of frequency-adjustable microwave signal[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9: e13.
- [11] Shi Nuannuan, Li Wei, Zhu Ninghua, et al. Optically controlled phase array antenna [Invited] [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17: 052301.
- [12] 何梓昂, 徐嘉鑫, 周涛, 等. 宽带恒定束宽光学多波束形成技术研究[J]. *半导体光电*, 2022, 43(1): 51-55. (He Zi'ang, Xu Jiabin, Zhou Tao, et al. Study on wideband constant beamwidth optical multi-beam forming technologies[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2022, 43(1): 51-55)
- [13] Zhao Qingchao, Zhang Yi, Wang Wei, et al. On the frequency dispersion in DBF SAR and digital scalloped beamforming[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 58(5): 3619-3632.
- [14] Ye Xingwei, Zhang Fangzheng, Pan Shilong. Optical true time delay unit for multi-beamforming[J]. *Optics Express*, 2015, 23(8): 10002-10008.
- [15] Zheng Pengfei, Wang Chenquan, Xu Xuemeng, et al. A seven bit silicon optical true time delay line for Ka-band phased array antenna[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 1-9.
- [16] Cheng Qiman, Zheng Shilie, Zhang Qiang, et al. An integrated optical beamforming network for two-dimensional phased array radar[J]. *Optics Communications*, 2021, 489: 126809.
- [17] Li Shupeng, Wang Xiangchuan, Qing Ting, et al. Optical fiber transfer delay measurement based on phase-derived ranging[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(16): 1351-1354.
- [18] 王邦继, 刘庆想, 周磊, 等. 相控阵天线主控系统中实时数据交互[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30: 013003. (Wang Bangji, Liu Qingxiang, Zhou Lei, et al. Real-time data exchange of beam steering system for phased array antenna[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30: 013003)
- [19] 田中成, 靳学明, 朱玉鹏. 微波光子电子战技术原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 30-32. (Tian Zhongcheng, Jin Xueming, Zhu Yupeng. Principle and application of microwave photonic electronic warfare technology[M]. Beijing: Science Press, 2018: 30-32)
- [20] Yu Anliang, Zou Weiwen, Li Shuguang, et al. A multi-channel multi-bit programmable photonic beamformer based on cascaded DWDM[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2014, 6(4): 1-10.
- [21] Blik L, Wahls S, Visscher I, et al. Automatic delay tuning of a novel ring resonator-based photonic beamformer for a transmit phased array antenna[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(19): 4976-4984.
- [22] 田博宇, 彭英楠, 胡奇琪, 等. 光学相控阵技术研究进展与发展趋势[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35: 041001. (Tian Boyu, Peng Yingnan, Hu Qiqi, et al. Review of optical phased array technology and its applications[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 041001)
- [23] 王建, 蔡海文, 杨飞, 等. 光控微波波束形成器: CN103414519B[P]. 2016-09-07. (Wang Jian, Cai Haiwen, Yang Fei, et al. Optically controlled microwave beamformers: CN103414519B[P]. 2016-09-07)