

文章编号: 2095-4980(2024)08-0872-06

基于光 Blass 矩阵的光控二维多波束产生

肖永川¹, 张浩¹, 李嘉琪², 庾财斌¹, 王茂旭¹, 于优¹, 杨硕¹, 瞿鹏飞¹

(1.重庆光电技术研究所, 重庆 400060; 2.上海无线电设备研究所, 上海 200090)

摘要: 多波束是电子信息装备实现多功能、多任务、大容量信息传输与处理的关键。围绕新一代相控阵系统对宽带多波束形成网络的应用需求, 提出一种基于光 Blass 矩阵的两级级联结构产生二维多波束的实现方法。通过光域相干波束形成技术完成第一级水平方向的波束合成, 再利用光域非相干波束形成技术实现第二级垂直方向的波束合成, 进而获得空域二维波束。采用该架构, 一方面可突破光波长数量不足对光控波束形成网络阵列规模的限制, 可将光控相控阵系统的单元规模从数十个提升至数百个甚至更多; 另一方面可大幅减少光控多波束芯片的数量, 对于阵元数 $N \times N$ 、波束数量 $M \times M$ 的多波束系统, 波束芯片数量可从 M^2 个减少到 $(N+M)$ 个。同时该方案可采用光子集成技术手段实现, 在简化多波束系统结构与提升系统可靠性方面具有无可比拟的优势。

关键词: 微波光子技术; 光控相控阵; 多波束; 二维波束; 光 Blass 矩阵

中图分类号: TN29

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022179

Two-dimensional multi-beam forming based on optical Blass matrix

XIAO Yongchuan¹, ZHANG Hao¹, LI Jiaqi², YU Caibin¹, WANG Maoxu¹,
YU You¹, YANG Shuo¹, QU Pengfei¹

(1.Chongqing Optoelectronic Research Institute, Chongqing 400060, China; 2.Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China)

Abstract: According to the application requirements of multi-beam in multi-functional phased array system, a two-dimensional multi-beam forming method based on the combination of optical Blass matrix and a two-stage cascade structure is proposed, in which coherent beam forming method in optical domain is employed to form the first-stage beam in horizontal direction, and the incoherent beam forming method in optical domain is employed to form the second-stage beam in vertical direction, such that the two-dimensional beams can be realized. This architecture bears several advantages: on the one hand, the scale of optical phased array system can be increased from dozens to more than several hundreds units, and this can break the limitation on the scale of the optical array beamforming due to the small quantities of optical wavelengths. On the other hand, it can significantly reduce the number of optical beam forming chips, and the number of beam chips can be reduced from M^2 to $(N+M)$ for the system with array number of $N \times N$ and beam number of $M \times M$. Moreover, the structure of the multi-beam system can be drastically simplified by combining the photon integration technology, which is helpful to improve the integration degree and engineering realizability.

Keywords: microwave photonics; optically controlled phased array; multi-beam forming; two-dimensional multi-beam; optical Blass matrix

多波束技术是阵列电子信息系统实现多任务与多功能的关键技术, 可有效提升雷达系统的多目标探测、跟踪与识别能力, 有效提升电子对抗系统的全空域目标侦察能力, 以及大幅提升通信系统的数据传输容量, 在电子信息装备中具有广泛的应用价值^[1]。基于光子技术的光控波束形成网络技术不仅具有瞬时带宽宽、串扰小、重量轻、抗电磁干扰能力强、可集成实现等优点, 而且采用光学真延时手段可消除波束偏斜与孔径渡越时间的限制, 极大地提高了电子信息装备的综合作战效能。基于光学真延时的光控波束形成网络技术在国内外都得到了广泛研究, 包括采用光纤延时^[2-4]、光栅延时^[5-7]、空间光调制^[8-9]和片上光延时^[10-11]等方案来实现光控多波束网

收稿日期: 2022-09-21; 修回日期: 2022-12-27

络。由于受到波长数量不足带来的影响，限制了光控相控阵系统的规模，更制约了二维光控相控阵系统的发展。

本文提出一种基于光 Blass 矩阵通过二级合成同时实现二维多波束的方法：采用相干光波束合成方法实现水平方向一级子波束，再在垂直方向采用非相干光波束合成得到二维空间波束，最终实现多个指向波束的同时输出。文中以某 X 波段多波束需求为例，设计了 64 单元共 25 波束的多波束形成网络系统，在水平与垂直方向可以实现±45°的空域覆盖，在宽带条件下具有高的波束指向精确度。采用本架构不仅可以突破波长数量不够带来的阵列规模限制，而且结合光子集成手段，可大幅缩小光控相控阵系统的体积，提升可靠性。

1 多波束原理

常规的光控相控阵系统采用不同的波长作为载波，实现稳定的光域波束合成。由于受国际电信联盟电信标准分局(International Telecommunication Union Telecommunication Standardization Sector, ITU-T)可用光波长数量的限制，单纯依赖多波长复用的光域波束合成难以实现大的阵列规模。为突破该限制，本文设计的波束合成方案如图 1 所示，设定天线单元阵列规模为 $N \times N$ ，输出波束数量为 $M \times M$ ，按照水平与垂直方向 2 个维度逐级合成。其中，第一级采用相干合成方案，第二级采用非相干合成方案。具体为：首先将 $N \times N$ 个单元分成 N 行，每一行设定为一个线阵单元，每行线阵采用同一个激光器作为载波，该激光器经过分路后对 N 路射频信号进行阵列电光调制、延时以及相干合成，得到 M 个相干子波束。不同的行采用不同波长的激光器，通过第一级合成共产生 $M \times N$ 个子波束；第二级则需在第一级合成的波束基础上，每一行取出一个子波束，这样在第二级将 N 个波长对应的信号进行非相干合成，最终得到 $M \times M$ 个二维波束。在多波束实现方式中，Blass 矩阵的设计灵活性高，较其他方式更适用于大规模相控阵系统^[12-13]。因此本文以 Blass 矩阵为基础，结合光子技术的特点进行变形设计，分别实现第一级的相干波束与第二级的非相干波束合成。将 Blass 矩阵与光控相控阵技术相结合，并采用光子集成技术，不仅可以将光控多波束功能单元的数量从常规的 $M \times M$ 减少为 $N + M$ 个，还可大幅减小多波束系统体积，提升系统集成度与可靠度。

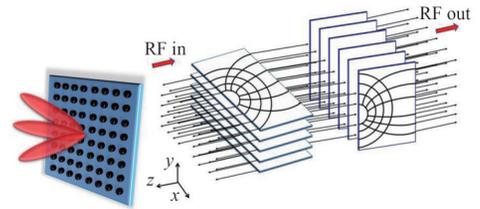


Fig.1 Schematics of multi-beam forming
图1 多波束总体架构

1.1 相干波束合成设计

相干光波束(Coherent Beamforming, CB)合成采用图 2 所示的系统架构。激光器(Laser Diode, LD)通过光分路器分成多路，作为载波经过电光相位调制加载射频信号，然后送入 Blass 矩阵中进行波束合成。电光相位调制可以解决常规电光调制器需要偏置控制带来的系统复杂性、稳定性与集成性等方面的问题，有利于提高光控相控阵系统可靠性，减小系统体积、功耗。对于电光相位的调制解调，采用单边带滤波(Single Side Band Filter, SSBF)与载波再注入的方式，将相位调制转换成强度调制，便于后续光电探测器解调。图 2 中分出来的额外的 2 路光信号，即是用作再注入解调的载波。

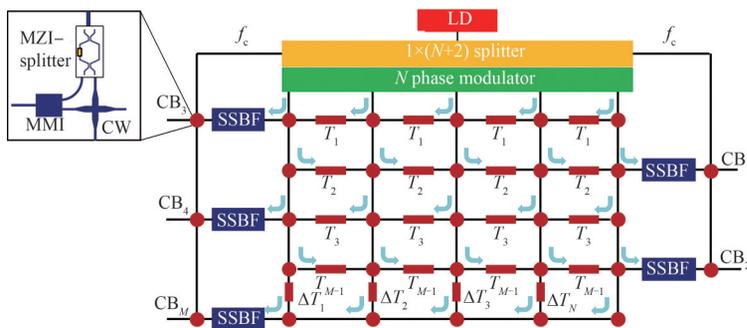


Fig.2 Schematics of coherent multi-beam forming
图2 相干多波束架构

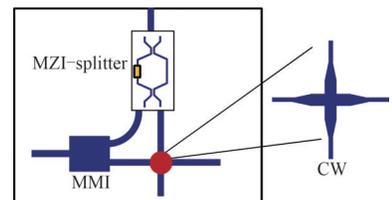


Fig.3 Structure of beam combining and waveguide crossing
图3 相干波束合束与交叉互连设计

由图 2 可知，Blass 矩阵中的关键功能之一是信号的分路、合路与交叉互连。其中分路器具有不同的分光比，以保证各合成波束信号质量的一致性，采用如图 3 所示的结构实现。该结构包括 1 个可调谐光分路器、1 个多模干涉(Multimode Interference, MMI)合路器、1 个信号的交叉互连结构。信号的交叉互连结构可采用十字形渐变交叉波导(Crossing Waveguide, CW)实现^[14]。可调谐光分路器采用对称马赫增德尔干涉结构(Symmetric Mach-

Zehnder Interferometer, S-MZI)实现分路功能, 通过调节 S-MZI 干涉臂的相位差即可实现不同比例的信号分路输出。

可调光分路器结构如图 4(a)所示, 它由 2 个输入、输出 3 dB 耦合器与相位可调谐的干涉臂组成, 通过改变干涉臂的附加相移即可实现分光比的调谐, 该功能结构的输入输出关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} E_{out,1} \\ E_{out,2} \end{bmatrix} = \frac{E_{in,1}}{2} \begin{bmatrix} e^{j\Delta\phi} - 1 \\ e^{j\pi/2}(e^{j\Delta\phi} + 1) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $\Delta\phi$ 为波导光学相位差。

根据式(1), 分析了输出两臂的归一化强度与相位差之间的关系, 如图 4(b)所示。从图中可知, 2 个输出端口具有互补的传输特性, 当相位差在 $0 \sim \pi$ 之间变化时, 光功分器可实现任意分光比输出。在 Blass 矩阵中, 通过该可调光分路器保证参与合成的各光延时通道幅度分配的均匀性。

由于相干波束形成中各路信号采用相位调制转换到光域, 为将相位调制转换为强度调制, 采用载波再注入的方式实现: 首先通过滤波得到一个边带, 再将该边带与载波重新组合, 即可实现相位调制(Phase Modulation, PM)到强度调制(Intensity Modulation, IM)的转换^[15], 具体频谱处理过程如图 5 所示。

1.2 非相干波束合成设计

根据前面的分析可知, 相干波束形成的子波束具有不同的光载波波长, 在第二级光波束形成网络中可利用波分复用的方式进行多波长的非相干合成, 从而得到二维多波束, 详细实现架构如图 6 所示。输入的波束信号, 共包含 N 个波长, 且每个波长输出 M 个子波束, 因此在垂直维度上可将每个波长各取出一个相应的子波束, 用于信号合成。在光域非相干合成过程中, 与第一级光域相干合成不一样的是, 参与合成的是光信号的调制包络而不是光载波。

非相干波束合成架构同样采用 Blass 矩阵方式实现, 主要的区别在于非相干合成是将多个不同波长的信号进行合成。为降低损耗, 采用非对称马赫增德尔干涉结构(Asymmetric Mach-Zehnder Interferometer, A-MZI)通过波长复用实现多波长信号合路, 基本原理如图 7 所示。

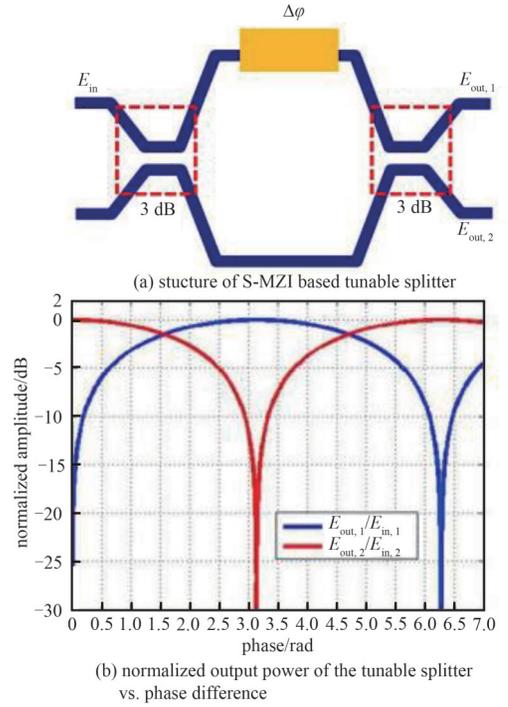


Fig.4 Structure and characters of tunable optical splitter
图 4 可调光分路器结构及特性

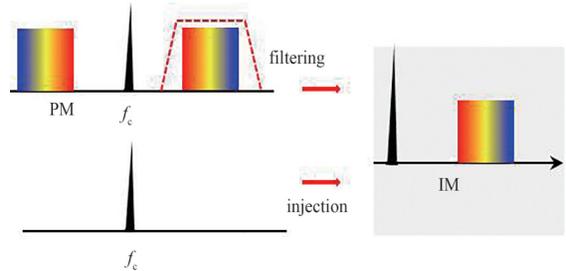


Fig.5 Phase modulation to intensity modulation conversion based on carrier injection
图 5 基于载波注入的相位调制到强度调制转换

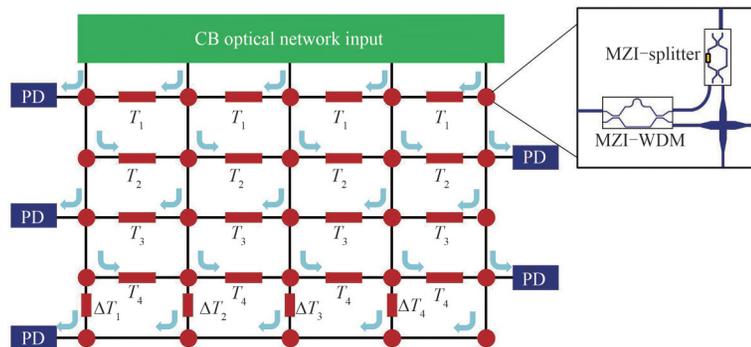


Fig.6 Schematics of noncoherent multi-beam forming
图 6 非相干多波束合成架构

设定 A-MZI 两干涉臂的长度差为 ΔL , 则光信号在上下两臂传输产生的相位差为:

$$\Delta\theta = 2\pi n_0 \Delta L / \lambda \tag{2}$$

式中： n_0 为A-MZI采用的光波导材料折射率； λ 为光波长。当 $\Delta\theta=(2k+1)\pi(k=0,1,2,3,\dots,n)$ 时，信号交叉输出；当 $\Delta\theta=2k\pi(k=0,1,2,3,\dots,n)$ 时，信号直通输出。因此可以使输入的2个波长信号分别位于A-MZI频响峰值与谷值位置处，则这2个信号会从同一个端口输出，实现信号的光域叠加。

由图7可知，A-MZI干涉结构具有正弦形式的周期响应，其自由光谱范围 $R_{FS}=c/(n_0\Delta L)$ ，因此通过改变干涉臂的长度差 ΔL ，即可实现不同波长间隔光信号的复用。为实现更多波长的合成，采用多级MZI复用结构，如图8所示。结合密集波分复用标准波长，各级波分单元的 R_{FS} 可以按照 $2N \times R_{FS,0}$ 设置为100 GHz、200 GHz、400 GHz等，并且可通过增大第2、第3级波长的间隔，减小串扰，提高波束质量。

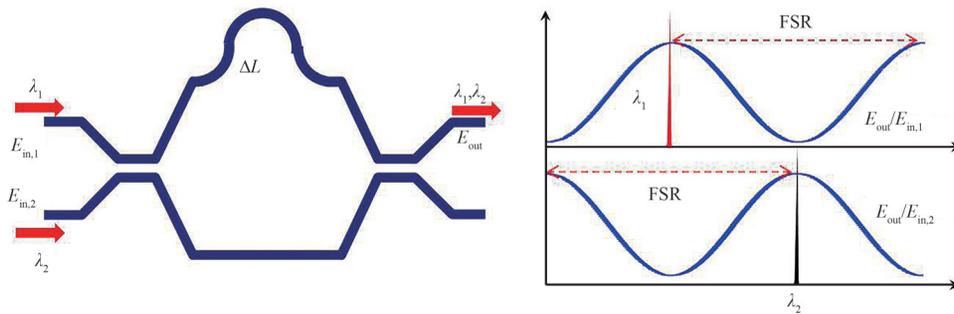


Fig.7 Structure of A-MZI based wavelength division multiplexing
图7 基于A-MZI结构波长复用原理

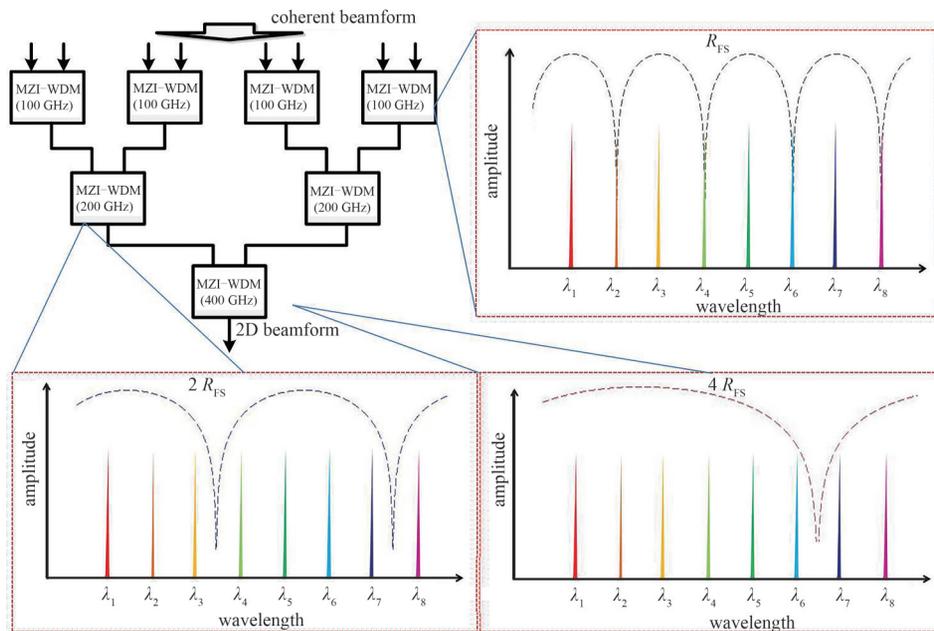


Fig.8 Beam combining based on cascaded MZI wavelength division multiplexing
图8 基于级联MZI波分复用的光波束合成原理

2 仿真与分析

基于该架构，围绕某X波段(8~12 GHz)光控相控阵系统需求为例进行说明。设定天线间距为1.5 cm(以10 GHz为中心频率，天线间距 $d=\lambda_{RF}/2$)，阵元规模为 8×8 (共64个阵元)，设定同时产生的波束数量为25个，相关参数要求见表1，则可得到光控波束系统的方向图函数位：

表1 多波束系统指标

Table1 Parameters of multi-beam forming

parameter	value
array scale	$8 \times 8(64)$
RF/GHz	8~12
scanning range/(°)	± 45
beam number	$5 \times 5(25)$

$$|F(\theta)| = \frac{\sin N \left[\frac{\pi d}{\lambda_{\text{RF}}} \sin \theta - \theta_k \right]}{\sin \left[\frac{\pi d}{\lambda_{\text{RF}}} \sin \theta - \theta_k \right]} \quad (3)$$

式中 $\theta_k = \frac{2k-1}{N} \times \frac{\pi}{2} = \arcsin\left(\frac{\Delta L}{d}\right)$, 为第 $k(k=0,1,2,\dots,n)$ 个波束指向。

为实现 $\pm 45^\circ$ 的覆盖, 则按照 -45° 、 -25° 、 0° 、 25° 、 45° 几个角度对应的波束指向配置延时, 见表 2。

根据式(3)仿真不同指向波束的方向图, 如图 9 所示。从图中可以看出, 采用宽带光学真延时可以同时实现多个不同指向且无偏斜的波束, 仿真得到的副瓣抑制大于 25 dB, 后续可通过加窗的方式进一步提高副瓣抑制制度。

表 2 各延时单元延时量

Table 2 Time delay of each delay unit

delay unit	value
T_1/ps	15
T_2/ps	15
T_3/ps	30
T_4/ps	30

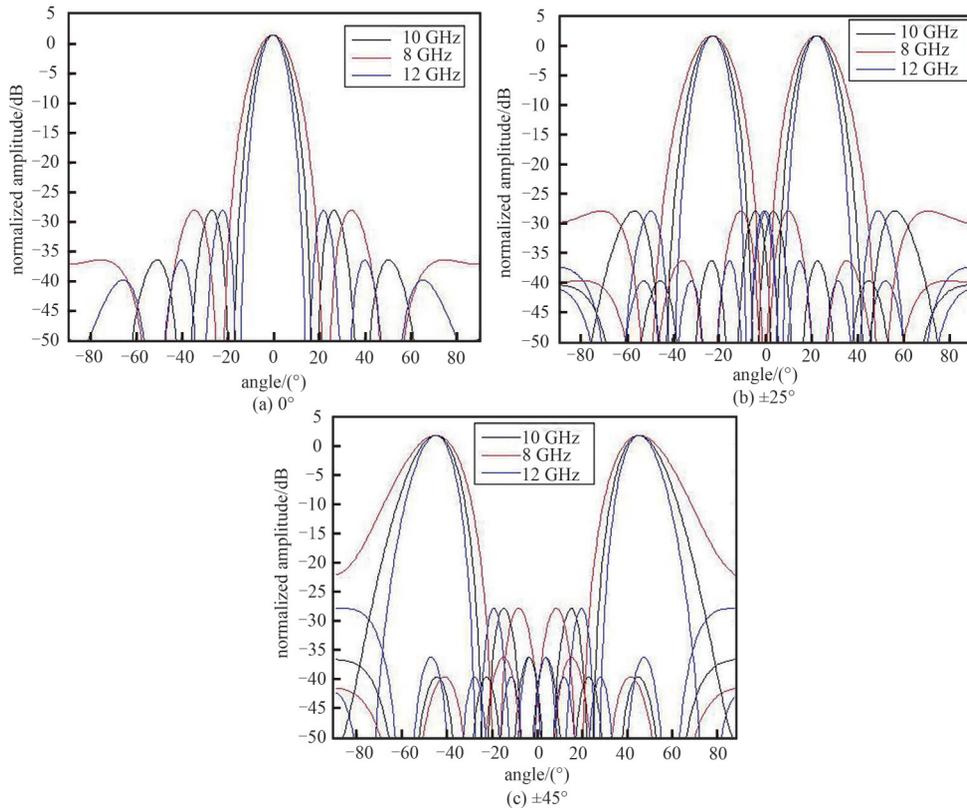


Fig.9 Beam patterns for different frequencies

图 9 不同频率的波束方向图

随着光子集成技术的发展, 基于硅-绝缘体(Silicon-On-Insulator, SOI)、InP、 Si_3N_4 、铌酸锂-绝缘体(Lithium-Niobate-On-Insulator, LNOI)等材料的光子集成芯片在波导损耗、光场调控等性能方面取得了显著突破, 为多波束架构的实现提供了很好的平台支撑, 如激光器可采用 InP 材料, Blass 矩阵相干与非相干波束芯片可用低损耗的 Si_3N_4 波导, 相位调制器阵列可用 LNOI 波导, 探测器可用 InP 或 GeSi 波导等材料实现, 并通过多芯片异质异构集成开发出小体积、低功耗、轻量化的光控多波束形成系统。

3 结论

本文提出了一种基于光 Blass 矩阵的二维多波束形成网络实现方法, 采用光域相干与非相干相结合的两级级联架构合成得到二维多波束。本文详细分析了基于光 Blass 矩阵的二维多波束形成网络的实现原理, 并结合某典型需求设计了一种规模为 64 元 25 波束的二维多波束形成网络, 在垂直/水平方向可实现 $\pm 45^\circ$ 范围全覆盖。由于结合了单波长相干波束合成与多波长非相干合成, 该方案可有效突破光波长数量不足对阵列规模的限制, 从而可支撑光控相控阵系统在阵元规模上的大幅扩展与提升。同时, 该波束形成网络系统结构简单, 便于利用光电多芯片异质异构高集成实现。

参考文献：

- [1] 石海然,张涛,薛欣,等. Ka 频段八波束接收组件的设计与实现[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(2):252-257. (SHI Hairan, ZHANG Tao, XUE Xin, et al. Design of a Ka band 8 beams receiver module[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(2):252-257.) doi:10.11805/TKYDA.201902.0252.
- [2] FRANKEL M Y, ESMAN R D. True time-delay fiber-optic control of an ultrawideband array transmitter/receiver with multibeam capability[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1995,43(9):2387-2394. doi:10.1109/22.414593.
- [3] MATTHEWS P J, FRANKEL M Y, ESMAN R D. A wide-band fiber-optic true-time-steered array receiver capable of multiple independent simultaneous beams[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1998,10(5):722-724. doi:10.1109/68.669401.
- [4] SUBBARAMAN H, CHEN M Y, CHEN R T. Photonic crystal fiber-based true-time-delay beamformer for multiple RF beam transmission and reception of an X-band phased-array antenna[J]. Journal of Lightwave Technology, 2008,26(15):2803-2809. doi:10.1109/JLT.2008.925596.
- [5] GRANIERI S, JAEGER M, SIAHMAKOUN A. Multiple-beam fiber-optic beamformer with binary array of delay lines[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003,21(12):3262-3272. doi:10.1109/JLT.2003.821733.
- [6] LIU Yanyan, BURHAM G, JIN Guanghai, et al. Wideband multi-beam photonics-based RF beamformer[C]// 2010 IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology. Waltham: IEEE, 2010: 581-585. doi: 10.1109/ARRAY.2010.5613310.
- [7] 张业斌,吴彭生,李琳. 基于光纤色散的 X 波段光控相控阵波束形成技术[J]. 科技创新与应用, 2018(22):140-141,143. (ZHANG Yebin, WU Pengsheng, LI Lin. X band optically controlled phased array beamforming technology based on optical fiber dispersion[J]. Technology Innovation and Application, 2018(22):140-141,143.)
- [8] AKIYAMA T, MATSUZAWA H, HARAGUCHI E, et al. Spatial light modulator based optically controlled beamformer for variable multiple-spot beam antenna[C]// 2011 International Topical Meeting on Microwave Photonics jointly held with the 2011 Asia-Pacific Microwave Photonics Conference. Singapore: IEEE, 2011:401-404. doi:10.1109/MWP.2011.6088756.
- [9] MENGUAL T, VIDAL B, STOLTIDOU C, et al. Optical beamforming network with multibeam capability based on a spatial light modulator[C]// OFC/NFOEC 2008-2008 Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference. San Diego: IEEE, 2008:1-3. doi:10.1109/OFC.2008.4528104.
- [10] CHARCZENKO W, SURETTE M R, MATTHEWS P J, et al. Integrated optical Butler matrix for beam forming in phased-array antennas[C]// SPIE-The International Society for Optical Engineering. Los Angeles: SPIE, 1990:196-206. doi:10.1117/12.18158.
- [11] GALLO J T, DESALVO R. Experimental demonstration of optical guided-wave Butler matrices[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997,45(8):1501-1507. doi:10.1109/22.618463.
- [12] TSOKOS C, MYLONAS E, GROUMAS P, et al. Analysis of a multibeam optical beamforming network based on blass matrix architecture[J]. Journal of Lightwave Technology, 2018,36(16):3354-3372. doi:10.1109/JLT.2018.2841861.
- [13] 张光义. 相控阵雷达原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2009. (ZHANG Guangyi. Principles of phased array radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
- [14] CHEN Long, CHEN Y K. Compact, low-loss and low-power 8×8 broadband silicon optical switch[J]. Optics Express, 2012,20(17):18977-18985. doi:10.1364/OE.20.018977.
- [15] BURLA M, MARPAUNG D, ZHUANG Leimeng, et al. Integrated photonic Ku-band beamformer chip with continuous amplitude and delay control[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013,25(12):1145-1148. doi:10.1109/LPT.2013.2257723.

作者简介：

肖永川(1987-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究领域为微波光子技术与光电集成技术 .email:273463161@qq.com.

张浩(1989-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为时频光产生与传输技术.

李嘉琪(1989-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为时频光产生与传输技术.

庾财斌(1990-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微波光子与光传感技术.

王茂旭(1992-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波光传输与光电集成技术.

于优(1991-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为微波光传输与光电集成技术.

杨硕(1993-), 男, 学士, 工程师, 主要研究方向为微波光传输技术.

瞿鹏飞(1983-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为微波光传输与处理.