

## 可重构微波光子多波束形成技术研究

林樾, 苏君, 范志强, 王云祥, 史双瑾, 邱琪

### Study of reconfigurable microwave photonics multi-beamforming technology

引用本文:

林樾, 苏君, 范志强, 王云祥, 史双瑾, 邱琪. 可重构微波光子多波束形成技术研究[J]. *激光技术*, 2024, 48(5): 719–725.

LIN Yue, SU Jun, FAN Zhiqiang, et al. Study of reconfigurable microwave photonics multi-beamforming technology[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 48(5): 719–725.

## 您可能感兴趣的其他文章

### 1. 基于DPMZM的微波光子倍频激光雷达仿真分析

引用本文: 阳琴, 陈孝林, 曾诚, 等. 基于DPMZM的微波光子倍频激光雷达仿真分析[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 729–735.

### 2. 基于光栅阵列的列车高精度定位测速方法研究

引用本文: 王沁宇, 童杏林, 张翠, 等. 基于光栅阵列的列车高精度定位测速方法研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(1): 46–51.

### 3. 一种波束扫描固态等离子体超表面的设计

引用本文: 李文煜, 章海锋, 刘婷, 等. 一种波束扫描固态等离子体超表面的设计[J]. *激光技术*, 2018, 42(6): 822–826.

### 4. 一种基于光学隧穿效应的新型拾音器方案探索

引用本文: 曾令筏, 邹景岚, 张豪磊, 等. 一种基于光学隧穿效应的新型拾音器方案探索[J]. *激光技术*, 2017, 41(6): 872–875.

### 5. 基于数字微镜阵列的平顶光束空间整形

引用本文: 娄艳阳, 郑贤良, 张世超, 等. 基于数字微镜阵列的平顶光束空间整形[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 916–920.

文章编号: 1001-3806(2024)05-0719-07

## 可重构微波光子多波束形成技术研究

林 樾, 苏 君, 范志强, 王云祥, 史双瑾, 邱 琪\*  
(电子科技大学 光电科学与工程学院, 成都 610054, 中国)

**摘要:** 在微波光子多波束形成系统中, 为了实现多路射频信号与多个波束间的重构, 提出了基于光真延迟和光交换阵列的可重构多波束形成技术方案, 其中包括光电转换、光交换阵列、多波束分光阵列、固定光延迟阵列以及光电转换等部分。理论分析了该方案的工作原理和重构机制, 建立了仿真模拟实验系统, 并验证了基于4端口Benes网络的4路射频信号与固定4波束间重构的性能, 得到了多种重构状态下的波束方向图。结果表明, 该方案相比基于可变光真延迟的方案减少了约2个数量级的光开关使用数量, 降低了系统的成本和控制复杂度, 实现了4路射频信号和4波束之间的重构。该研究结果为多波束形成技术的应用提供了一种新的途径。

**关键词:** 光通信; 微波光子; 多波束形成; 可重构; 光交换阵列

**中图分类号:** TN929.18 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2024.05.016

### Study of reconfigurable microwave photonics multi-beamforming technology

LIN Yue, SU Jun, FAN Zhiqiang, WANG Yunxiang, SHI Shuangjin, QIU Qi\*

(School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** A reconfigurable multi-beamforming technology scheme based on optical true time delay and optical switch array was proposed to achieve the reconfiguration between multiple radio frequency (RF) signals and multiple beams in the microwave photonic multi-beamforming system. The scheme includes electro-optical conversion, optical switch array, multibeam splitter array, fixed optical true time delay array, and photoelectric conversion. The working principle and reconfiguration mechanism of the proposed scheme were theoretically analyzed. A simulation system was established to evaluate the performance of reconfiguration between four RF signals and fixed four beams based on the 4-port Benes network and to obtain the beam pattern under various configured states. The results indicate that the proposed scheme reduces the number of optical switches required by about 2 orders of magnitude compared to the scheme based on variable optical true time delay. The cost can be decreased, and complexity of the system can be controlled at the same time. The reconfiguration between four RF signals and four beams is realized, and a new approach for the application of multi-beamforming technology is provided.

**Key words:** optical communication; microwave photonics; multi-beamforming; reconfigurable; optical switch arrays

## 0 引言

波束形成技术最早被应用于雷达设备中, 在雷达领域有着深入研究和广泛应用<sup>[1-2]</sup>。近年来, 随着商用无线通信系统射频(radio frequency, RF)信号带宽的提升, 波束形成技术也被逐步引入到无线通信领域。鉴于微波光子技术中光波束形成(optical beamforming, OBF)具有低损耗、大带宽、免疫电磁干扰以及无孔径

渡越效应的优势<sup>[3-5]</sup>, 因此在宽带系统中, 光波束形成网络(OBF network, OBFN)相比采用电子移相器的电波束形成网络有着更明显的技术优势和应用潜力。

现代无线通信系统的演进也为OBFN的发展提供了新应用方向, 多波束技术便是其中之一<sup>[6]</sup>。多波束天线使用同一物理阵面同时形成多路独立的波束, 对预定区域进行信号覆盖, 其优势在于充分利用了空分复用维度, 同时解决了单一波束无法有效进行信号全方位覆盖的技术问题。

OBFN现有技术方案包括: 基于可变光真延迟(variable optical true time delay, VOTTD)线<sup>[7-11]</sup>、基于光微环谐振器<sup>[12-13]</sup>、基于光色散介质提供多波长群延迟<sup>[14-16]</sup>、基于波长选择器件进行光路切换<sup>[17]</sup>等多种结构。这些方案向多波束演进时, 需要增加较多的

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62201120; 61971110); 四川省科技计划资助项目(2023NSFSC0448; 2023NSFSC1379)

\*通信作者: qqiu@uestc.edu.cn

收稿日期: 2023-10-17; 修回日期: 2023-11-24

资源开销,因此提高了系统成本和控制复杂度<sup>[18-20]</sup>,不利于 OBFN 在未来无线通信系统中进行大规模部署。

为了降低多波束 OBFN 的系统成本和控制复杂度,本文作者分析了基于 VOTTD 的多波束 OBFN 性能,提出了一种固定延迟的可重构多波束 OBFN 结构,引入可重构光交换阵列,建立了多个微波信号与多个波束间的重构,实现了多波束指向角控制。

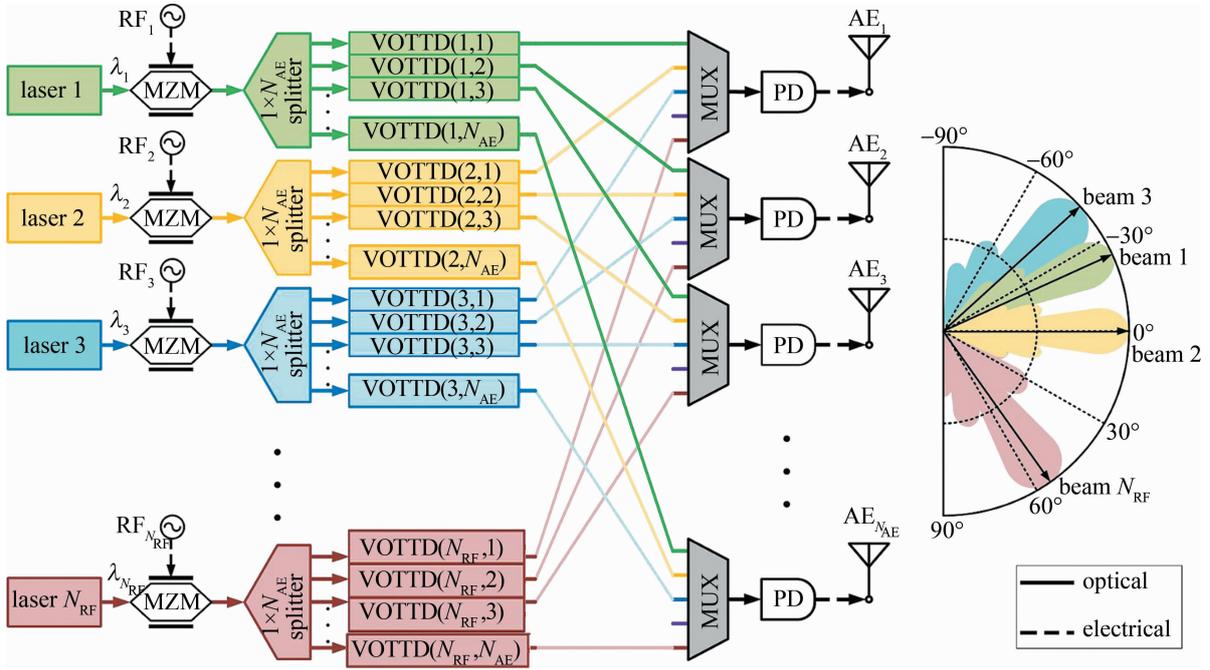


图1 多波束 OBFN 发射系统结构示意图

Fig. 1 Illustration of the multi-beam OBFN transmitter architecture

$N_{RF}$  路微波信号通过电光转换被调制到不同波长的光载波上。调制后的光信号经过光分路器后分为  $N_{AE}$  路支路信号,每一路支路信号通过独立的 VOTTD 单元进行信号延迟。延迟后的不同波长支路信号通过 MUX 进行合路,然后由光电探测器 (photodetector, PD) 完成光电转换。多路延迟微波信号分别馈送入  $N_{AE}$  路天线阵元向自由空间中辐射。最终不同天线阵元辐射的相同微波信号将根据真延迟值进行叠加,形成指定方向传播的信号波束。

VOTTD 单元常采用如图 2 所示结构<sup>[21]</sup>。图中, OS (optical switch) 表示光开关。

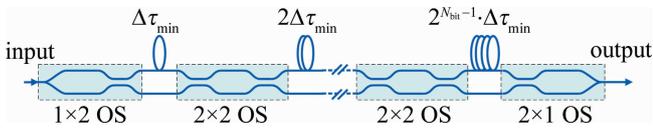


图2  $N_{bit}$  位可变光真延迟结构示意图

Fig. 2 Schematic view of variable optical true time delay structure with  $N_{bit}$

对于具有  $N_{bit}$  段等比差值真延迟段、最小真延迟步进为  $\Delta\tau_{min}$  的 VOTTD,其功能在于提供  $2^{N_{bit}}$  种离散的

## 1 光多波束形成网络工作原理

基于 VOTTD 的多波束 OBFN 发射系统的结构如图 1 所示。系统中包含了电光转换、多波束分光阵列、VOTTD 阵列、波分复用器 (multiplexer, MUX) 阵列、光电转换以及后续的天线阵元 (antenna element, AE) 与配套电路。图中, MZM (Mach-Zehnder modulator) 表示马赫-曾德尔调制器。

光学真延迟值  $\Delta\tau_k$ , 可表示为:

$$\Delta\tau_k = k \cdot \Delta\tau_{min}, (k = 0, 1, 2, \dots, 2^{N_{bit}} - 1) \quad (1)$$

式中:  $N_{bit}$  是延迟线中包含的真延迟段数量。

在实际部署中,基于 VOTTD 的多波束 OBFN 可提供  $N_{beam}$  个指向不同离散角度的波束对角度范围为  $[-\theta_{max}, +\theta_{max}]$  的扇形区域进行覆盖,其波束排布方式如图 3 所示。图中,  $N_{beam}$  表示波束数量;  $\theta_{max}$  表示最大波束指向角度。

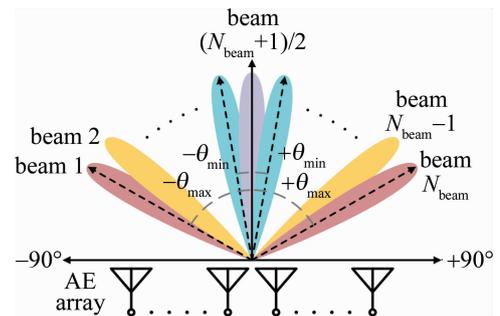


图3 OBFN 波束排布方式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the OBFN beam distribution

按照图中各波束的编号方式,上述波束形成系统所能提供的各波束指向角度  $\theta_m$  可以通过下式进行描述:

$$\theta_m = \arcsin\left[\frac{2\sin\theta_{\max}}{N_{\text{beam}} - 1}(m - 1) - \sin\theta_{\max}\right],$$

$$(m = 1, 2, \dots, N_{\text{beam}}) \quad (2)$$

显然,基于 VOTTD 的多波束 OBFN 发射系统中波束间的角度间隔并非均匀,根据三角函数  $\sin x$  的特性,波束指向角更集中在阵面法线附近。

根据上述波束的对称性简化分析,仅考虑  $(0, +\theta_{\max}]$  范围内的波束形成,如图 3 所示。对于最小非零波束指向角  $+\theta_{\min}$ ,其所需的延迟最小值即为 VOTTD 所能提供的最小延迟值  $\Delta\tau_{\min}$ ,有:

$$\sin\theta_{\min} = \frac{\Delta\tau_{\min} \cdot c}{d} \quad (3)$$

式中: $c$  表示真空中光速; $d$  表示相邻阵元之间的距离。而对于同侧最大波束指向角度  $+\theta_{\max}$ ,其所需的延迟最大值应不大于 VOTTD 所能提供最大延迟值,以保证 VOTTD 可以提供所有  $N_{\text{beam}}$  路波束形成所需的延迟值,上述规律可描述为:

$$(N_{\text{AE}} - 1) \frac{d}{c} \sin\theta_{\max} \leq (2^{N_{\text{bit}}} - 1) \Delta\tau_{\min} \quad (4)$$

此外,式(2)中还给出了同侧最小非零波束指向角  $+\theta_{\min}$  与最大波束指向角  $+\theta_{\max}$  之间的关系,即:

$$\sin\theta_{\max} = \frac{N_{\text{beam}} - 1}{2} \sin\theta_{\min} \quad (5)$$

联立式(3)~式(5)并化简,可得在具有  $N_{\text{AE}}$  路天线阵元的多波束 OBFN 形成  $N_{\text{beam}}$  路波束对角度范围  $[-\theta_{\max}, +\theta_{\max}]$  的扇形区域提供覆盖的实际部署中,

系统对所采用的 VOTTD 参数——延迟步进  $\Delta\tau_{\min}$  以及延迟位数  $N_{\text{bit}}$  的要求,即下式:

$$\begin{cases} \Delta\tau_{\min} = \frac{2d}{(N_{\text{beam}} - 1)c} \sin\theta_{\max} \\ N_{\text{bit}} = \left\lceil \lg\left[\frac{(N_{\text{AE}} - 1)(N_{\text{beam}} - 1)}{2} + 1\right] \right\rceil \end{cases} \quad (6)$$

式中:操作符  $\lceil x \rceil$  表示对  $x$  进行向上取整。基于式(6),在采用 VOTTD 构成 OBFN 对  $N_{\text{RF}}$  路微波信号进行多波束形成的系统中,包含的光开关单元总数  $N_{\text{switch}}$  可以通过下式进行计算:

$$N_{\text{switch}} = N_{\text{AE}} \cdot N_{\text{RF}} \cdot (N_{\text{bit}} + 1) = N_{\text{AE}} \cdot N_{\text{RF}} \cdot \left\lceil \lg\left[\frac{(N_{\text{AE}} - 1)(N_{\text{beam}} - 1)}{2} + 1\right] + 1 \right\rceil \quad (7)$$

观察式(7)可知,基于 VOTTD 的多波束 OBFN 发射系统所包含的光开关总数  $N_{\text{switch}}$  与天线阵元数量  $N_{\text{AE}}$ 、独立微波信号路数  $N_{\text{RF}}$  以及波束数量  $N_{\text{beam}}$  有关。在未来的无线通信系统中,随着微波信号频率的提升,天线阵面中往往集成了大量天线阵元,甚至多达 512 或 1024 只天线阵元<sup>[22]</sup>。这一特点使得上述波束形成系统中往往需要使用大量的光开关单元,同时需要极为复杂的控制信号进行控制,这将大大增加了系统的成本和控制复杂度。

## 2 固定延迟多波束形成网络

为了减少多波束 OBFN 发射系统中包含的光开关单元数量,降低多波束 OBFN 的成本及控制复杂度,本文作者提出了固定延迟的多波束 OBFN 发射系统,其结构如图 4 所示。

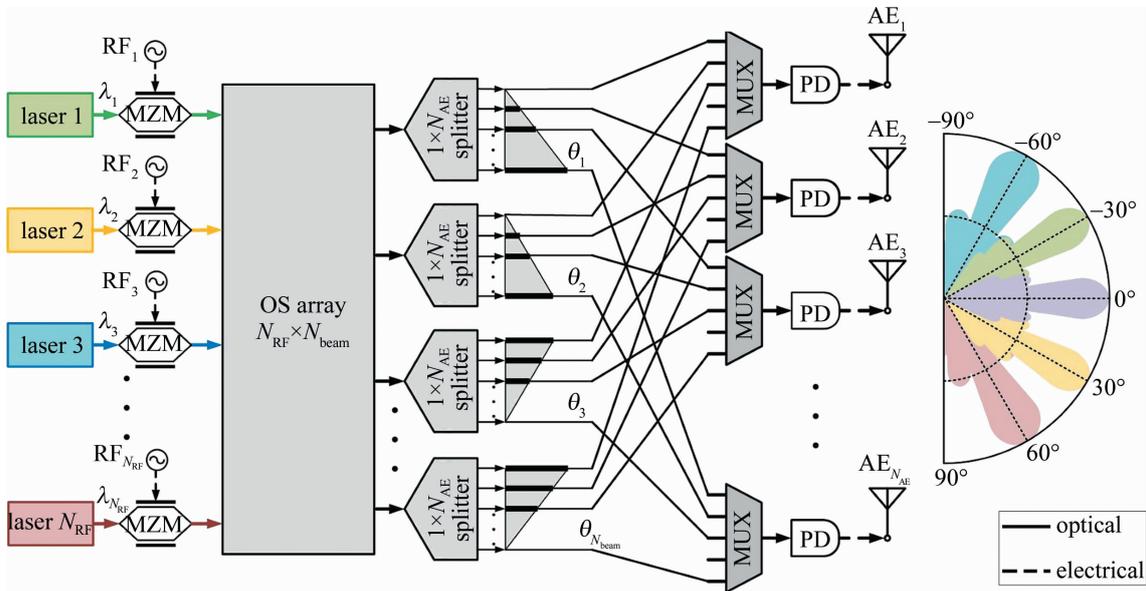


图 4 固定延迟的多波束 OBFN 发射系统结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fixed-delay multi-beam OBFN transmitter architecture

固定延迟多波束 OBFN 发射系统的光路可以分为 5 个部分:电光转换、光交换阵列、多波束分光阵列、固定延迟阵列以及光电转换。其核心部分为光交换阵列和由多波束分光阵列与固定延迟阵列组成的固定延迟多波束 OBFN。

光交换阵列是由  $2 \times 2$  光开关单元构成的光路拓扑结构,其每个输入端口连接了电光转换中的一只光电调制器,每个输出端口则分别连接了多波束分光阵列中的一只分光路器。因此光交换阵列的输入端口数为  $N_{RF}$ ,输出端口数为  $N_{beam}$ ,其功能在于对输入光交换阵列的信号进行路由控制,建立并重构多路输入信号与多波束 OBFN 中固定延迟阵列间的光路连接,实现信号波束指向角的切换。此处可采用的光交换阵列有 Benes 网络<sup>[23]</sup>、N-stage 网络<sup>[24]</sup>、crossbar 网络<sup>[25]</sup>、NWN 型网络<sup>[26-27]</sup>、双层网络(double layer network, DLN)<sup>[28]</sup>、Spanke's 网络<sup>[29]</sup>和 Jajszczyk's 网络<sup>[30]</sup>等。

多波束分光阵列和固定延迟阵列组成固定延迟的多波束 OBFN。其中一只分光器连接  $N_{AE}$  段具有固定延迟差值的光传播介质,组成固定波束形成模块 (beamforming module, BFM),用于为输入该模块的微波信号形成指向固定角度的波束。因此,BFM 的数量

即为 OBFN 形成波束的数量  $N_{beam}$ 。此外,由于采用固定延迟值设置,因此 OBFN 中无需进行任何控制,其成波束指向角的设置可以采用更均匀的排布方式,有:

$$\theta_m' = \frac{2\theta_{max}}{N_{beam} - 1}(m - 1) - \theta_{max},$$

$$(m = 1, 2, \dots, N_{beam}) \quad (8)$$

### 3 可重构多波束形成技术研究

本文中提出的可重构多波束形成网络实例化结构如图 5 所示。图中,  $RF_x$  为第  $x$  路射频微波信号输入。采用 4 端口 Benes 网络作为光交换阵列,与固定延迟多波束 OBFN 形成交换连接。其中天线阵面参数为 16 阵元均匀线性排列的 1 维阵列,工作中心频率为  $f_0 = 4$  GHz,阵元间隔取微波信号波长的一半,有  $d = 37.5$  mm。鉴于 Benes 网络为对称网络,即输入端口数量等于输出端口数量。因此,图 5 所示的结构最多支持 4 路微波信号的多波束形成。假设发射系统需形成波束覆盖角度范围为  $[-22.5^\circ, 22.5^\circ]$  的扇形区域,波束指向角度由式 (8) 进行计算,分别设置为  $-22.5^\circ, -7.5^\circ, 7.5^\circ, 22.5^\circ$ , 对应于 4 个固定 BFM。

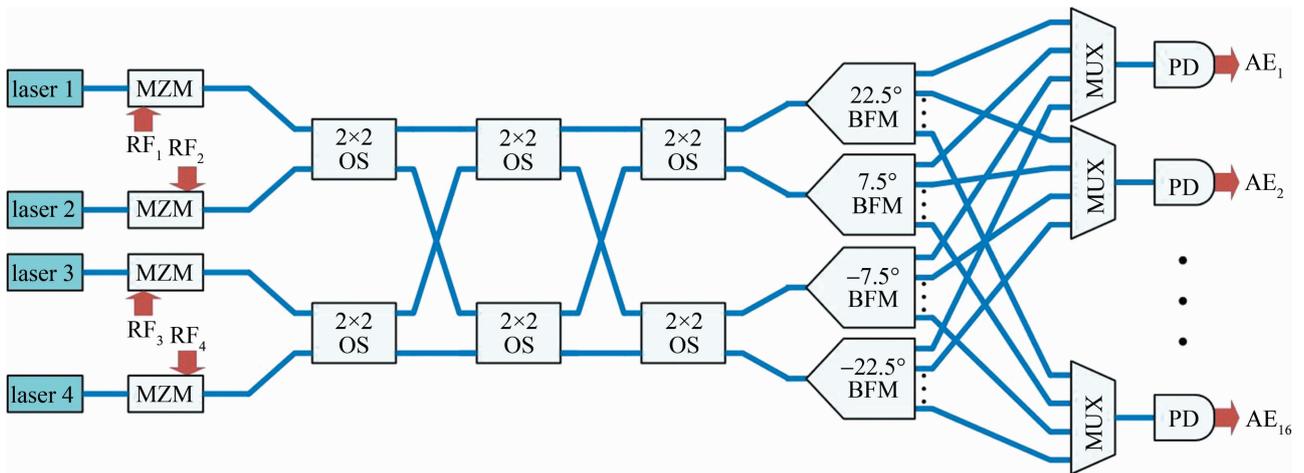


图 5 基于 4 端口 Benes 网络的固定延迟多波束 OBFN 发射系统

Fig. 5 Fixed delay multi-beam OBFN transmitter base on 4-port Benes network

#### 3.1 工作原理

4 路独立微波信号与 4 只固定 BFM 之间存在的连接可能数为 24 种。通过配置 Benes 网络中包含的 6 只  $2 \times 2$  光开关的工作状态 (直通状态: bar; 交叉状态: cross) 可以实现全部连接可能。将图 5 中 Benes 网络中 6 只光开关单元的工作状态按从左至右,自上而下的顺序表示为一个 6 位序列  $[x_1 x_2 x_3 x_4 x_5 x_6]$ ,  $x$  可取值 0 或 1,其中“0”值表示当前光开关处于直通状态,“1”值表示光开关处于交叉状态。而微波信号与固定

BFM 之间的连接状态,也可以按照自上而下的顺序也可以表示为一个 4 位序列  $[y_1 y_2 y_3 y_4]$ ,  $y$  可取值为 1, 2, 3 或 4,表示当前固定 BFM 被用于进行微波信号  $y$  的波束形成。因此,上述 24 种可能的微波信号与 BFM 连接状态,均存在着对应的光开关配置状态 (存在不同光开关配置状态可实现相同的连接状态的情况),其中的关系如表 1 所示。

图 6 展示了表 1 中两种微波信号-BFM 连接状态与 Benes 网络光开关配置状态以及对应连接状态的波

表 1 微波信号-BFM 连接状态与 Benes 网络光开关配置状态对应关系  
Table 1 Connection of microwave signal-BFM and corresponding optical switch states of Benes networks

connection	switch states						
	[000000]		[001000]		[010010]		[010111]
[1234]	[000101]	[2134]	[001101]	[3412]	[011110]	[4321]	[011011]
	[101000]		[100000]		[110011]		[110110]
	[101101]		[100101]		[111111]		[111010]
	[000001]		[001001]		[010011]		[010110]
[1243]	[000100]	[2143]	[001100]	[3421]	[011111]	[4312]	[011010]
	[101100]		[100001]		[110010]		[110111]
	[101001]		[100100]		[111110]		[111011]
[1324]	[000111]	[2314]	[011000]	[3214]	[010000]	[4213]	[010100]
	[111000]		[100111]		[101111]		[101011]
[1342]	[000110]	[2341]	[011001]	[3241]	[010001]	[4231]	[010101]
	[111001]		[100110]		[101110]		[101010]
[1423]	[000011]	[2413]	[011100]	[3124]	[001111]	[4132]	[001010]
	[111100]		[100011]		[110000]		[110101]
[1432]	[000010]	[2431]	[011101]	[3142]	[001110]	[4123]	[001011]
	[111101]		[100010]		[110001]		[110100]

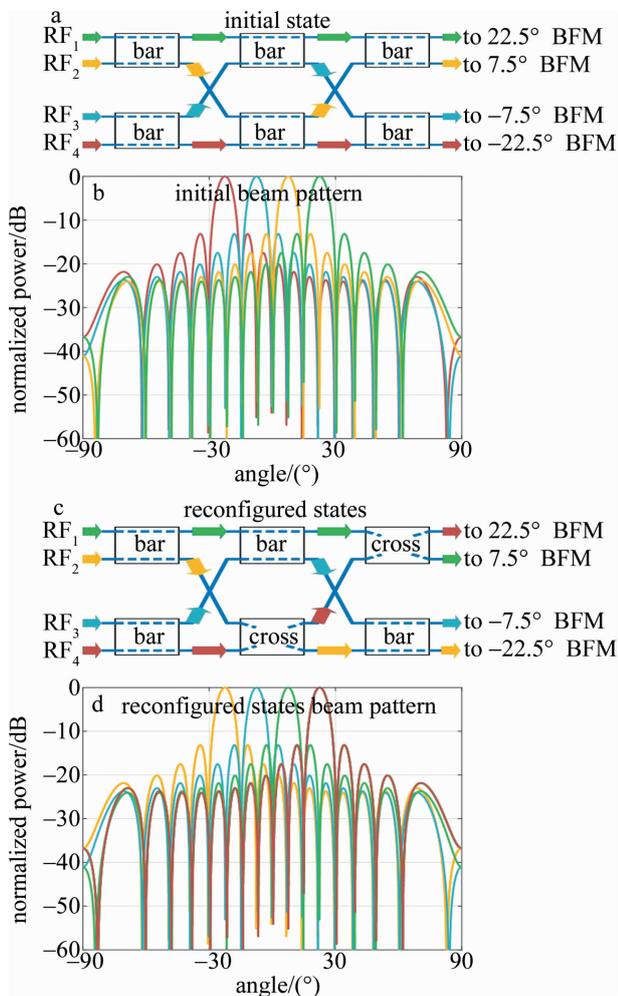


图 6 Benes 网络配置状态与相应的波束方向图

Fig. 6 Configuration states of Benes network and corresponding beam pattern  
束方向图。图 6a 中, Benes 网络光开关配置状态为 [000000], 得到微波信号-BFM 连接状态为 [1234], 因

此形成了图 6b 所示的波束方向图;图 6c 中, Benes 网络光开关配置状态为 [001010], 微波信号-BFM 连接状态为 [4132];该连接状态下形成的波束方向图如图 6d 所示。对比图 6b 和图 6d 可以发现,不同颜色所代表的信号波束指向角度发生了变化。因此,重构 Benes 网络中光开关配置状态,就可以实现微波信号与 BFM 的不同连接状态,从而实现信号波束指向角的切换。

### 3.2 性能分析

不同于采用 VOTTD 的多波束 OBFN 发射系统中,需要独立控制所有 VOTTD 单元中的光开关实现对波束形成角度的控制,在固定延迟多波束 OBFN 发射系统中,对信号波束形成角度的控制是通过配置光交换阵列中的光开关实现的。前者系统中包含的光开关数量  $N_{switch}$  与天线阵元数量  $N_{AE}$ 、独立微波信号路数  $N_{RF}$  以及波束数量  $N_{beam}$  有关,针对具体的工作场景需求,可以通过式(7)进行计算。而后者系统中包含的光开关数量  $N_{switch}'$  与系统中所采用的光开关交换网络类型有关,此处以端口数为  $N_{RF}$  的 Benes 网络为例,系统中包含的光开关数量可以通过下式计算:

$$N_{switch}' = \left(\frac{N_{RF}}{2}\right) \cdot (2 \lg N_{RF} - 1) \quad (9)$$

上式表明,固定延迟多波束 OBFN 中包含的光开关单元数量  $N_{switch}'$  仅与独立微波信号路数  $N_{RF}$  或波束数量  $N_{beam}$  有关。

为了更好地对比两方案中包含的光开关数量,假设在基于 VOTTD 的多波束 OBFN 中存在  $N_{beam} = N_{RF}$  的限制。通过式(7)和式(9)进行计算,将得到的结果

绘制折线图,如图7所示。

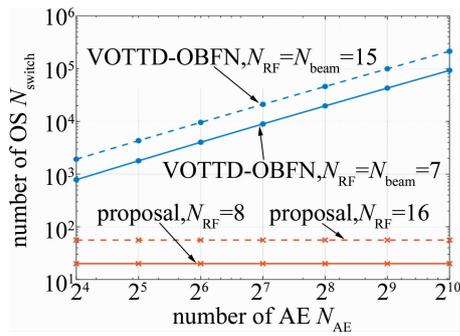


图7 两种 OBFN 系统中包含光开关单元数量

Fig.7 Number of optical switches contained in two OBFN systems

对比图7中相同线型可以直观发现,当两种 OBFN 系统具有相似的波束形成能力,即能为相同数量级的独立微波信号提供多波束形成时,基于 VOTTD 的多波束 OBFN 发射系统中包含的光开关数量远大于固定延迟多波束 OBFN 发射系统,且两者间的差距随着阵面中天线阵元的数量的增长而愈发显著。因此,固定延迟多波束 OBFN 减少了光开关单元的使用数量,也意味着其具有更低的成本和控制复杂度,更适合为未来无线通信系统中集成了大量天线阵元的阵面提供波束形成。

图6d和图6b中多个信号波束指向角分别为  $-22.5^\circ$ 、 $-7.5^\circ$ 、 $7.5^\circ$ 、 $22.5^\circ$ ,各个波束指向角间隔  $\Delta\theta$  相等,为  $\Delta\theta = 15^\circ$ 。此外,并对比式(2)和式(8)中所描述的 OBFN 波束排布可以发现,固定延迟多波束 OBFN 发射系统具有相等的波束指向角间隔,所形成的波束排布更为均匀。因此,该方案平滑了多波束指向角度。

综上所述,相比于采用 VOTTD 的多波束形成网络,固定延迟多波束形成网络的优点在于:极大地减少了光开关单元的使用数量,具有更低的系统成本和控制复杂度;同时形成的信号波束排布更均匀,平滑了多波束指向角度。但该方案也存在着不足:由于采用了固定延迟的 BFM 来形成固定指向的波束,因此形成的波束欠缺了灵活性,同时有限且固定的波束无法充分覆盖扇形区域。一种有效的解决办法是增加波束数量,鉴于 Benes 网络中输入-输出端口数量  $N$  仅能拓展为 2 的幂指数倍的限制,即  $N$  为 4, 8, 16 等,因此可以采用端口设置更灵活的光交换阵列,例如树型网络中的 Spanke's 网络或 Jajszczyk's 网络等。另一种解决办法是增加波束的灵活性,例如将部分 BFM 替换为 VOTTD 阵列,在保持较低的光开关使用数量的前提下,拓展波束的覆盖范围。

## 4 结论

分析了基于可变光延迟的多波束 OBFN,针对其网络内包含光开关单元数量大以及形成波束排布不均的特性,提出了基于可重构光交换阵列的固定延迟多波束 OBFN 技术方案。采用了固定光延迟阵列平滑了多波束指向角度,引入了光交换阵列建立了微波信号与多个波束之间的重构机制。对基于 4 端口 Benes 网络的固定延迟多波束 OBFN 发射系统进行了仿真实验研究,实现了微波信号与 4 个固定指向角度为  $-22.5^\circ$ 、 $-7.5^\circ$ 、 $7.5^\circ$ 、 $22.5^\circ$  波束间的重构,验证了方案可行性。波束图仿真实验结果表明,固定延迟多波束 OBFN 技术方案具有相等的波束间隔,形成了更均匀的波束排布。网络内的光开关数量对比显示,光交换阵列中的光开关数量相较于可变光延迟阵列降低了至少 2 个数量级,由此大幅度减少了光开关的使用数量,降低了系统的成本和控制复杂度。基于可重构光交换阵列的固定延迟多波束 OBFN 技术方案更贴合未来无线通信系统的硬件需求,更适合进行大规模部署与应用。

## 参考文献

- [1] MAILLOUX R J. Phased array antenna handbook[M]. 2nd ed. Norwood (MA), USA: Artech House Co, 2017: 1-79.
- [2] BALANIS C A. Antenna theory: Analysis and design[M]. 3rd ed. Hoboken (NJ), USA: Wiley, 2005: 1-5.
- [3] SEEDS A J, WILLIAMS K J. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 24(12): 4628-4641.
- [4] YAO J P. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [5] JOSÉ C, NOVAK D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
- [6] HONG W, JIANG Zh H, YU Ch, et al. Multibeam antenna technologies for 5G wireless communications[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(12): 6231-6249.
- [7] YEGNANARAYANAN S, TRINH P D, COPPINGER F, et al. Compact silicon-based integrated optic time delays[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(5): 634-635.
- [8] HOWLEY B, WANG X L, CHEN M, et al. Reconfigurable delay time polymer planar lightwave circuit for an X-band phased-array antenna demonstration[J]. Journal of Lightwave Technology, 2007, 25(3): 883-890.
- [9] TSOKOS C, MYLONAS E, GROUMAS P, et al. Optical beamforming network for multi-beam operation with continuous angle selection[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2019, 31(2): 177-180.
- [10] CHENG Q M, ZHENG Sh L, ZHANG Q, et al. An integrated optical beamforming network for two-dimensional phased array radar[J]. Optics Communications, 2021, 489: 126809.
- [11] LIN D D, SHI Sh Q, CHENG W, et al. A high performance silicon nitride optical delay line with good expansibility[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(1): 209-217.
- [12] MEIJERINK A, ROELOFFZEN C G H, MEIJERINK R, et al. Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broad-

- band phased array receive antennas—part I: Design and performance analysis[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(1): 3-18.
- [13] ZHUANG L M, ROELOFFZEN C G H, MEIJERINK A, *et al.* Novel ring resonator-based integrated photonic beamformer for broadband phased array receive antennas—part II: Experimental prototype[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(1): 19-31.
- [14] XUE X X, XUAN Y, BAO Ch Y, *et al.* Microcomb-based true-time-delay network for microwave beamforming with arbitrary beam pattern control [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(12): 2312-2321.
- [15] WANG G Ch, DAI T G, JIANG J F, *et al.* Continuously tunable true-time delay lines based on a one-dimensional grating waveguide for beam steering in phased array antennas[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(18): 4998-5003.
- [16] ZHENG W, WANG Ch, YANG W L, *et al.* An optical beamforming network based on dispersing optics[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(2): 188-192(in Chinese).  
郑伟, 王超, 杨文丽, 等. 基于色散光学的光波束形成网络[J]. *激光技术*, 2022, 46(2): 188-192.
- [17] ZHANG X B, ZHAO M Y, JIAO Y Q, *et al.* integrated wavelength-tuned optical mm-wave beamformer with doubled delay resolution [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(8): 2353-2359.
- [18] YARON L, ROTMAN R, ZACH S, *et al.* Photonic beamformer receiver with multiple beam capabilities[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(23): 1723-1725.
- [19] ZHAO J, YANG F, DING Z, *et al.* Configurable photonic true-time delay network and its application in multi-beamforming[J]. *Laser Physics Letters*, 2019, 16(12): 126203.
- [20] SANTACRUZ J P, ROMMEL S, ROELOFFZEN C G H, *et al.* Incoherent optical beamformer for AROF fronthaul in mm-wave 5G/6G networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2023, 41(5): 1325-1334.
- [21] SONG Q Q, HU Zh F, CHEN K X. Scalable and reconfigurable true time delay line based on an ultra-low-loss silica waveguide[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(16): 4434-4439.
- [22] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, *et al.* 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [23] BENES V E. *Mathematical theory of connecting networks and telephone traffic*[M]. New York, USA: Academic Press, 1965.
- [24] SPANKE R A, BENES V E. N-stage planar optical permutation network[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(7): 1226-1229.
- [25] HINTON H S. A nonblocking optical interconnection network using directional couplers [DB/OL]. (1984-01)[2023-11-23]. [https://www.researchgate.net/publication/243674935\\_A\\_Nonblocking\\_Optical\\_Interconnection\\_Network\\_Using\\_Directional\\_Couplers](https://www.researchgate.net/publication/243674935_A_Nonblocking_Optical_Interconnection_Network_Using_Directional_Couplers).
- [26] SULIMAN F M, MOHAMMAD A B, SEMAN K. A new nonblocking photonic switching network[C]// GLOBECOM'01. *IEEE Global Telecommunications Conference*. San Antonio, TX, USA: IEEE, 2001, 4: 2071-2076.
- [27] SULIMAN F M, MOHAMMAD A B, SEMAN K. A space dilated lightwave network—a new approach[C]// 10th International Conference on Telecommunications, 2003. Papeete, France: IEEE, 2003: 1675-1679.
- [28] LU Ch Ch, THOMPSON R A. The double-layer network architecture for photonic switching[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(8): 1482-1489.
- [29] SPANKE R. Architectures for large nonblocking optical space switches[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1986, 22(6): 964-967.
- [30] JAJSZCZYK A. A class of directional-coupler-based photonic switching networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1993, 41(4): 599-603.