

研究论文

基于多芯光纤远端光真时延多波束赋形系统的研究

张宸博¹, 朱逸萧^{2*}, 胡卫生²

摘要 在 5G/6G 光载无线接入网中,远端无线单元需具备多波束赋形功能,以支持泛在移动终端的可靠接入。针对这一需求,多芯光纤凭借其通道数量多、通道间时延一致性好的优势,成为具有潜力的链路方案。提出一种基于多芯光纤的远端光真时延多波束赋形架构,可用于 5G 光载无线接入网。该架构利用多芯光纤作为链路,并在中心单元部署具有等色散间隔的啁啾光栅用于提供等间距时延。通过分别调节多路光载波的波长,系统可连续调整远端对应波束的指向,实现中心化的多波束操控。为了验证架构可行性,采用 2 km 的 7 芯光纤作为光载无线链路开展实验,搭建了 2×2 远端波束赋形验证系统。实验结果表明:通过调谐各个光载波的波长,可实现各波束指向的独立控制;与传统单模光纤相比,多芯光纤将通道间时延抖动降低了 1 个量级以上,最大时延抖动仅为 1.7 ps,从而确保波束指向的长期稳定性。此外,实验还表明,多芯光纤的芯间串扰对预设时延和宽带无线信号信噪比的影响可忽略不计。本架构为实现远端波束赋形功能提供了可行、稳定的解决方案,对于 5G/6G 移动接入网具有重要应用价值。

关键词 光载无线技术;远端波束赋形;光真时延;多芯光纤

毫米波具有丰富的频谱资源,且支持大带宽和高传输容量。自第 5 代移动通信技术(5G)时代以来,毫米波段已逐渐应用于移动网络^[1-4]。然而,由于毫米波在空间传播中的严重衰减和功率损耗,需要依靠天线阵发射高指向性、大增益的波束,从而克服其传播限制^[5]。迄今为止,大量天线阵已在光载无线接入网的远端无线单元部署。然而,如何实现天线阵的多波束产生和操控成为一大技术挑战^[5-6]。传统的天线阵通过移相器阵列控制波束指向。然而,随着无线信号

带宽的不断增加,移相器阵列面临波束斜视问题:不同频率的波束在相同移相值作用下会出现指向偏差^[7-8]。相比之下,真时延天线阵不存在波束斜视问题成为当下研究重点^[8-10]。特别是光学方案产生的真时延系统,即光真时延系统^[6,8-9],因其能够与光载无线接入网紧密结合,受到广泛关注。

近年来,许多光真时延波束赋形方案被提出,包括基于 N 比特可调时延线阵列^[11-12]、色散器件(如啁啾光栅)^[13-14],以及慢光效应器件^[15](如光环形谐振器)的波束赋形系统等。然而,在上述的大多数研究中,射频波束主要在本地生成,难以和光载无线链路有效结合,从而限制了天线阵列的远端部署及波束指向的远程操控能力。

1. 北京大学电子学院,北京 100871

2. 上海交通大学电子工程系,上海 200240

收稿日期: 2025-05-06; 修回日期: 2025-05-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(62271305)

作者简介: 张宸博,助理研究员,研究方向为光载无线通信,电子信箱: zhangchenbo@pku.edu.cn; 朱逸萧(通信作者),副教授,研究方向为短距光互连,电子信箱: yixiaozhu@sjtu.edu.cn

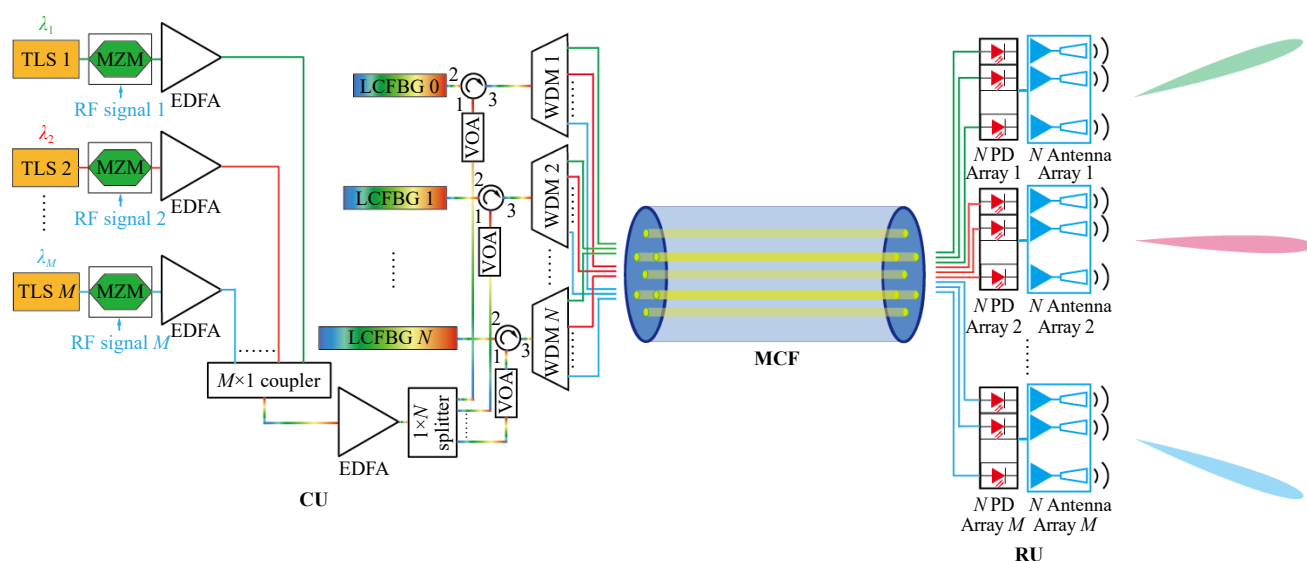
引用格式: 张宸博,朱逸萧,胡卫生. 基于多芯光纤远端光真时延多波束赋形系统的研究[J]. 科技导报, 2025, 43(12): 153-160; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2025.05.00016

针对上述问题,提出一种基于多芯光纤的远端光真时延多波束赋形方案,适用于 5G/6G 光载无线接入网的多波束远端控制。该方案中,在中心单元部署一系列具有等色散间隔的啁啾光栅(CFBG),用于实现远端多波束方向的连续、精确调节;通过多芯光纤,不同波束所对应的光载无线信号被传输至远端无线单元。借助多芯光纤低串扰和高芯间一致性的优势,传输至远端天线阵的无线信号不仅信噪比不受影响,信号之间的时延差也能够稳定维持在预设值。通过这一设计,有效实现了多波束的远端精准操控,且弥补

了现有系统在远端波束指向稳定性方面的不足,具有重要的应用价值。

1 远端多波束赋形系统原理

图 1 展示了本文提出远端多波束赋形系统的原理图。该系统可在远端无线单元同时产生 M 个射频波束。每个波束由 N 元天线阵产生,并由中心单元操控波束指向。



CU, 中心单元; RU, 远端无线单元; MCF, 多芯光纤; TLS, 可调谐激光器; MZM, 马赫曾德调制器; EDFA, 掺铒光纤放大器; VOA, 可调衰减器; WDM, 解波分复用器件; PD, 光电探测器

图 1 远端多波束赋形系统原理

为了实现这一目的, M 台可调谐激光器被部署在中心单元, 产生波长为 $\lambda_1 \sim \lambda_M$ 的光载波, 分别与波束 1~ M 对应。这 M 个光载波分别被调制上需传远发射的射频信号, 并由掺铒光纤放大器放大。随后, 分布在 M 个不同波长的光载射频信号耦合至一路, 经再次放大后, 被分成 N 组相同的波分复用信号, 从而分别对应远端天线阵的 N 个天线单元。这 N 组信号由 N 元啁啾光栅阵列的各光栅($\text{CFBG}_1 \sim \text{CFBG}_N$)分别反射。这里, $\text{CFBG}_1 \sim \text{CFBG}_N$ 以相等的色散间隔排列, 使得 N 组信号之间引入相等的时延差。其中, CFBG_k 的色散值 D_k (ps/nm) 可以写成

$$D_k = D_0 + (k-1) \cdot D \quad (1)$$

式中, D 为色散间隔, D_0 为任意的基准色散偏置。经

过 N 元啁啾光栅阵列后, 使用 N 个相同的解波分复用器件分离 M 波信号, 从而生成 $M \times N$ 路单波长信号。随后, 使用总计含有 $M \times N$ 个纤芯的多芯光缆, 将 $M \times N$ 路信号传输至远端无线单元。传输时, 同一波长 λ_i 的 N 路不同时延信号(对应同一波束 i)应由同一根多芯光纤传输至远端, 以确保各复制信号经历一致的热学和力学环境。在远端无线单元中, 每个波束对应的 N 路复制信号由 N 元光电探测器阵列检测, 随后经 N 元天线阵辐射至空间。需要说明的是, 目前架构中 N 个解波分复用器被部署在中心单元, 如图 1 所示。这使得远端无线单元实现最大简化, 仅需要光电探测和天线发射环节, 但传输链路所需纤芯数量为 $M \times N$ 。若远端无线单元的成本预算充足, N 个解波分复用器

也可在远端部署,从而将传输所需纤芯数量降低至 N 个。此外,考虑到 M 个波束可能共用相同的射频频率,图 1 中的远端无线单元处展示了 M 个天线阵列。若 M 个波束的工作频率不同,则仅需远端部署 1 个天线阵,从而提高阵面利用率。

针对远端射频波束的操控问题,波束 i 的指向可以通过调谐对应激光器的波长 λ_i 实现控制。首先,选择基准波长 λ_0 ,通过预设中心单元或远端无线单元的尾纤长度,使 λ_0 处对应的各路光真时延信号经历相等光程,时延差为 0。当波长调节为 λ_i 后,相邻天线单元之间的时延间隔 $\Delta\tau_i$ 可表示为

$$\Delta\tau_i = D \cdot (\lambda_i - \lambda_0) \quad (2)$$

因此,波束 i 的指向角度 θ_i 为

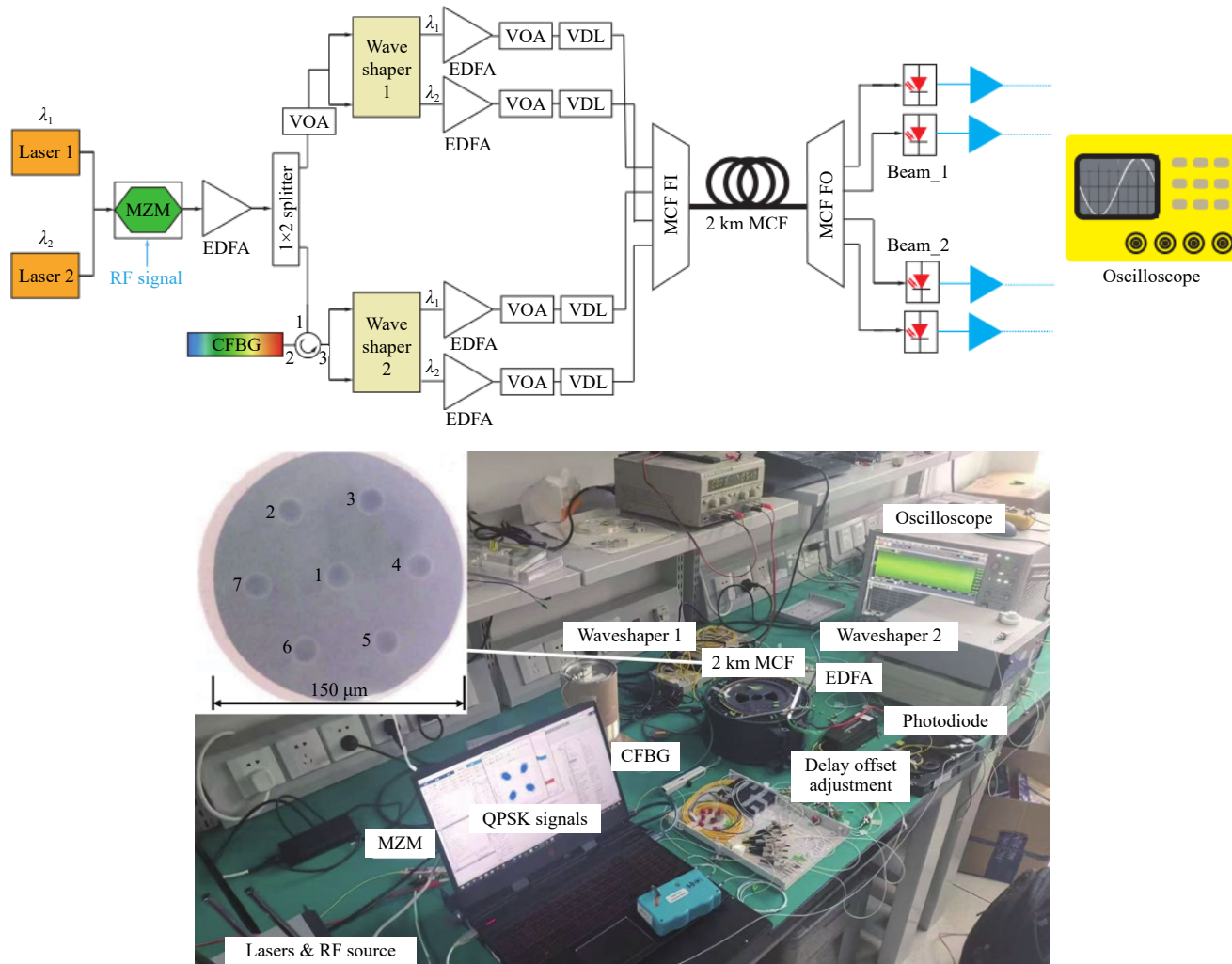
$$\theta_i = \arcsin\left(c \cdot \frac{\Delta\tau_i}{d}\right) \quad (3)$$

式中, c 为光速, d 为天线单元之间的间距。当使用波长数为 M 时,啁啾光栅阵列可同时提供 M 个时延值 $\Delta\tau_1 \sim \Delta\tau_M$,从而实现远端无线单元 M 个波束方向 $\theta_1 \sim \theta_M$ 的中心控制。

2 实验和结果分析

2.1 验证实验装置

受限于实验设备和器件数量,开展了 2 波束 $\times$ 2 元天线阵的验证实验,实验装置和系统实物如图 2 所示。2 台波长为 λ_1 和 λ_2 的激光器输出连续光被耦合,由 MZM 调制上射频信号,并被掺铒光纤放大器放大。这 2 波调制信号被功分为 2 路。第 1 路不经过任何啁啾光栅,即 $D_1 = 0$ ps/nm; 第 2 路经过色散为



VDL, 可调时延线; FI, 扇入; FO, 扇出

图 2 2 波束 $\times$ 2 元天线阵实验装置和实物系统

4.83 ps/nm、带宽为 30 nm 的啁啾光栅反射, 即 $D_2 = 4.83$ ps/nm; 色散间隔 $D = D_2 - D_1 = 4.83$ ps/nm。由于啁啾光栅对第 2 路信号带来额外损耗, 一个可调衰减器被插入 1 路, 以平衡 2 路功率。随后, 采用 2 台商用波分/解波分复用器(Waveshaper 4000 s)进行波长分离, 同时进行单边带滤波以避免色散造成的射频功率衰落。波长分离后, 4 个光真时延通道的信号(2 个通道应用 λ_1 , 远端产生波束 1; 另 2 个通道应用 λ_2 , 远端产生波束 2)被放大和功率控制后, 分别通过对应的可调时延线, 用于将各通道在基准波长 λ_0 的时延差归零, $\lambda_0 = 1550.92$ nm(193.300 THz)。

实验中, 采用 2 km 的 7 芯单模光纤作为光载无线传输链路。7 芯光纤包层直径为 150 μ m, 芯间间距为 42 μ m, 如图 2 所示。这 4 路光真时延信号经 4 个纤芯, 分别被传输至远端无线单元。其中, 纤芯 1 和纤芯 2 用于波束 1, 纤芯 3 和纤芯 4 用于波束 2, 它们的串扰矩阵如表 1 所示。经传输后, 4 路信号分别由 4 个相同的光电探测器探测, 并分别被射频放大器放大, 提供给 2 组 2 元天线阵。

表 1 实验所使用 4 个纤芯的芯间串扰矩阵

串扰值/dB	纤芯1	纤芯2	纤芯3	纤芯4
纤芯1	—	-43.4	-29.7	-39.4
纤芯2	-38.8	—	-33.6	-28.9
纤芯3	-31.4	-42.9	—	-39.3
纤芯4	-40.1	-31.1	-41.5	—

2.2 通道间时延差的测量和评估

首先, 开展不同波长下波束 1 和波束 2 的通道间时延差测量实验。通过调谐 2 台激光器的波长(λ_1 和 λ_2), 可分别在中心单元(本地背靠背)以及远端无线单元(经 2 km 多芯光纤传输后)测试时延值, 以评估通道间时延差和光载波波长之间的关系, 同时验证多芯光纤链路对通道间时延差的影响。实验中, 调制的射频信号为 18 GHz 的正弦波; 2 个光载波 λ_1 和 λ_2 均以 50 GHz 为步长, 由 192 THz 扫描至 195 THz; 在本地或远端无线单元接收时, 经光电探测后, 由 100 GS/s 的示波器同时采集每波束对应的 2 个通道, 并实时获取二者的相位差, 从而计算出通道之间的时延差。示波器工作在 16 次平均模式, 以降低时钟抖动和量化

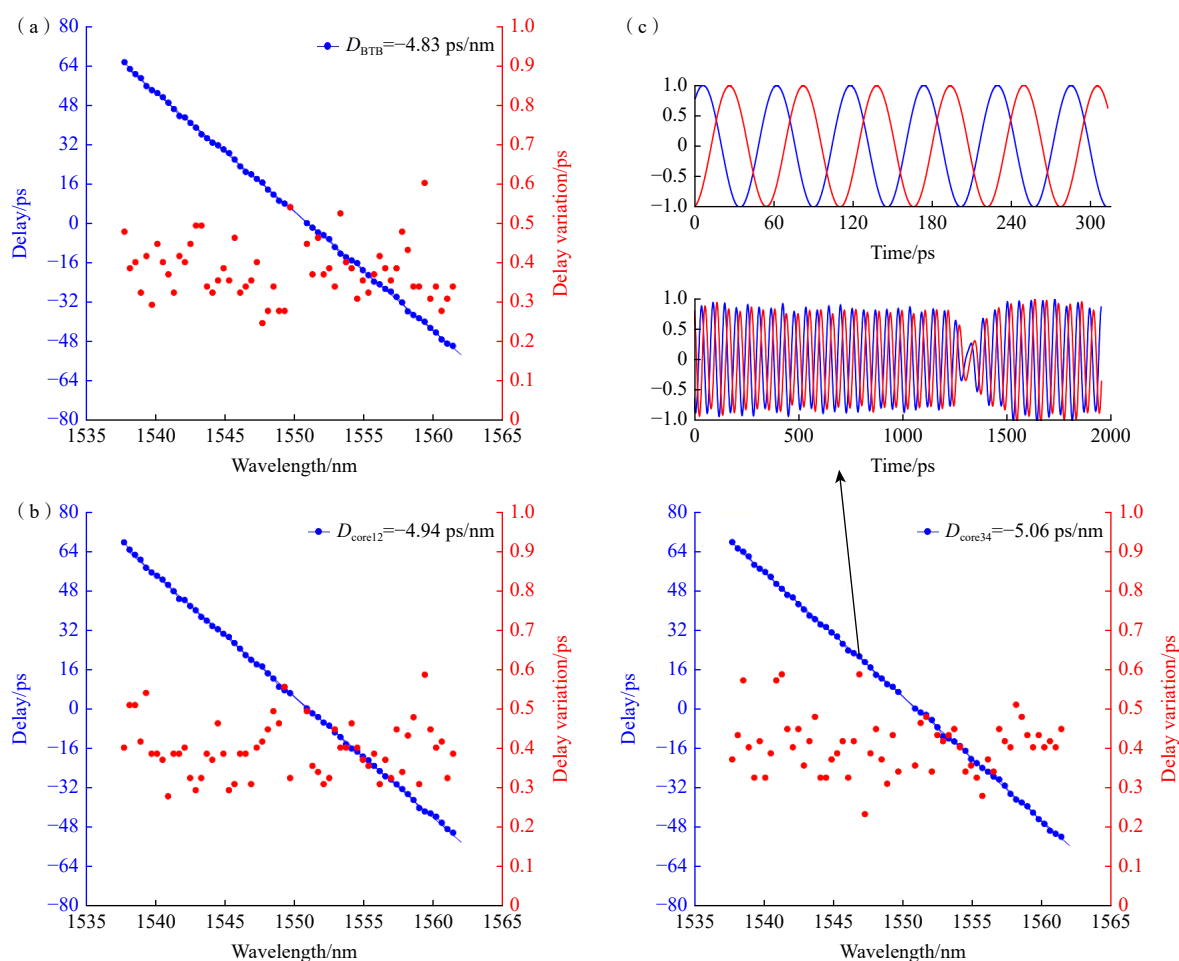
误差的影响, 每个波长测试时间为 1 min。

图 3(a)以波束 1 的 2 个光真时延通道为例, 给出了中心单元处(本地背靠背)不同波长对应的时延差作为参考基线。经实验, 本地时延差-波长曲线的斜率为 -4.83 ps/nm, 与所使用的啁啾光栅参数一致。图 3(b)展示了远端无线单元处波束 1 对应 2 个通道的时延差-波长关系, 测得斜率为 -4.94 ps/nm。它们由纤芯 1 和纤芯 2 传输至远端。图 3(c)展示了远端无线单元处波束 2 对应 2 个通道的时延差-波长关系, 测得斜率为 -5.06 ps/nm。它们由纤芯 3 和纤芯 4 传输至远端。由此可见, 远端波束 1 和波束 2 对应的时延差-波长曲线与本地背靠背基本一致。0.2 ps/nm 左右的微小差异是由纤芯色散的细微不同导致, 在实际应用中可忽略不计。除此之外, 图 3(a)、(b)和(c)还给出了不同波长下, 时延差在 1 min 之内的短期稳定性(红色散点)^[16]。无论对于远端波束 1 和波束 2 还是本地波束, 1 min 内的时延差抖动均处于 0.2~0.6 ps。这一结果表明, 由于多芯光纤具有低芯间串扰, 串扰导致的多径效应^[16]对时延的短期稳定性可忽略不计。因此, 本实验证实了采用多芯光纤链路传远后, 可在中心单元改变光载波的波长实现远端天线阵的时延控制, 且时延差可准确维持中心单元的预设值。

2.3 多芯光纤传远后通道间时延差的长期稳定性

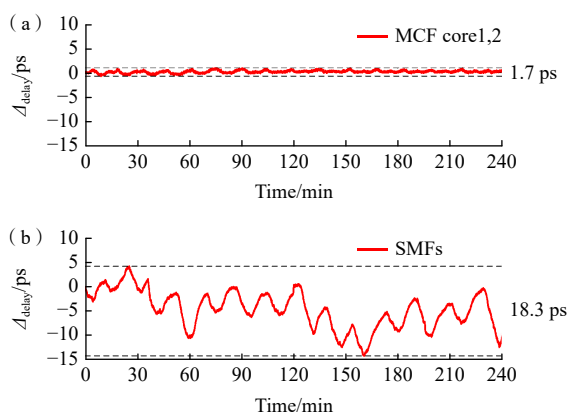
为进一步验证采用多芯光纤链路实现远程波束控制的有效性和长期稳定性, 开展对比实验: 分别将光真时延信号经多芯光纤或多条标准单模光纤传远, 在远端无线单元测量通道间时延差的长期抖动性能。实验装置图如图 2 所示(进行对照实验时, 多芯光纤替换为 4 根 2 km 的标准单模光纤), 调制信号仍为 18 GHz 正弦波。接收信号时, 用示波器同时采集同一波束对应的 2 个光真时延通道。每 3 s 记录一次通道间时延(相位)差, 总计测量时间为 4 h^[17]。实验时, 多芯光纤和 4 根单模光纤均放置于相同温度和力学环境中, 环境温度在 20~23 $^{\circ}$ C 呈周期性波动。

图 4 展示了 4 h 长期稳定性实验结果。采用多芯光纤传远时, 由于各纤芯都处于相同的包层内, 各传输通道均经历了一致的外界环境变化, 通道间最大时延抖动仅为 1.7 ps。然而, 当链路替换为独立的 4 根单模光纤后, 4 个纤芯分别处于不同的光纤包层和套筒内, 在空间上存在间隔, 导致各通道所经历的外界



(a) 中心单元处的时延差-波长关系; (b) 远端无线单元处, 波束 1 对应通道的时延差-波长关系(经纤芯 1、2 传远); (c) 远端无线单元处, 波束 2 对应通道的时延差-波长关系(经纤芯 3 和纤芯 4 传远), 两真时延通道的时域波形, 分别为单频信号和调制后的信号

图 3 时延差-波长关系



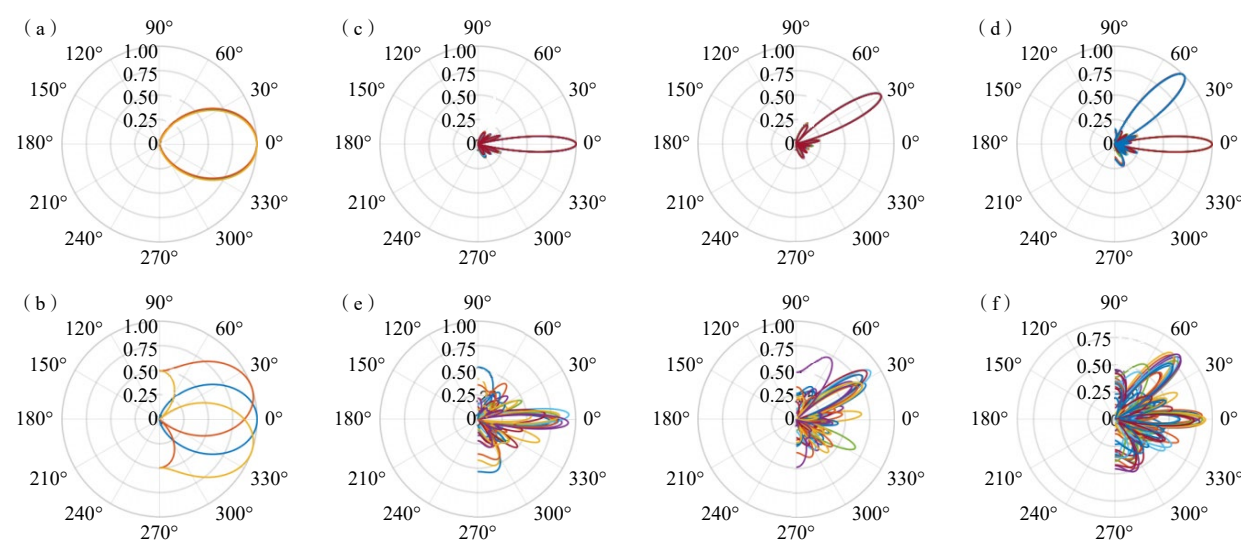
(a)(b)分别对应多芯光纤和标准单模光纤

图 4 远端无线单元处, 通道间时延差的长期稳定性

环境(主要为温度分布)存在差异。而标准单模光纤的热稳定系数为 $40 \text{ ps}/(\text{km} \cdot ^\circ\text{C})$, 将造成严重的时延抖动。如图 4 所示, 最大时延抖动高达 18.3 ps , 与参考

文献[17]的测量结果相当。因此, 多芯光纤链路可将通道间时延差的长期稳定性提高 1 个量级, 有益于天线阵的拉远应用。

根据式(3)和图 4 的测量结果, 分析了远端波束的指向稳定性。这里信号频率为 $f_{\text{RF}} = 18 \text{ GHz}$, 阵元间距 $d = c/2f_{\text{RF}}$ 。对于经多芯光纤拉远的 2 单元天线阵, 波束指向的最大变化 $< 3.5^\circ$, 如图 5(a)所示。然而, 若经 2 根标准单模光纤拉远, 波束指向的最大变化高达 38.5° , 如图 5(b)所示。进一步, 可仿真 8 单元天线阵的波束指向稳定性, 取射频频率 $f_{\text{RF}} = 25 \text{ GHz}$ 。图 5(c)展示了使用多芯光纤拉远产生单波束的仿真结果, 波束可以精确地指向所需角度(以 0° 和 30° 为例)。图 5(d)展示了使用多芯光纤拉远产生多波束的仿真结果(以 0° 和 45° 双波束为例), 各波束指向角度准确、抖动小于 1° , 且主瓣幅度同样稳定。与此相



(a)(c)(d)为多芯光纤对应结果; (b)(e)(f)为单模光纤对应结果

图 5 远端波束指向的稳定性

反,图 5(e)、(f)展示了使用标准单模光纤拉远产生单波束和多波束的仿真结果。不仅波束主瓣方向存在严重偏移,主瓣功率还会向多个方向分散,从而造成多波束之间的干扰。因此,本实验证实经多芯光纤拉远后,波束指向稳定性得以保障,多波束赋形系统得以实现。

2.4 远端波束的信号性能评估

最后,在 18 GHz 的射频载波上加载 1 Gbaud 的正交相移键控(QPSK)信号,研究多芯光纤传远对宽带无线信号性能的影响。图 6 展示了误差矢量幅度(EVM)和光电探测功率的关系曲线。可以发现,中心单元处(BTB),QPSK 信号达到 EVM 阈值时对应的光功率约为-17.3 dBm,且啁啾光栅的引入不会影响信号质量。经 2 km 多芯光纤传输至远端无线单元后,EVM 阈值对应的光功率在-16.8~-16.5 dBm。各纤芯的传输代价< 0.8 dB,影响非常小。因此,多芯光纤可支持 Gbaud 级宽带信号传远,满足 5G/6G 信号传输需求。

3 结论

提出并演示了一种基于多芯光纤的远端光真时延多波束赋形系统。系统可支持 M 个波束的远端产生和远程真时延操控。表 2 从多个能力维度对比了本方案和其他光真时延波束赋形方案的性能。首先,

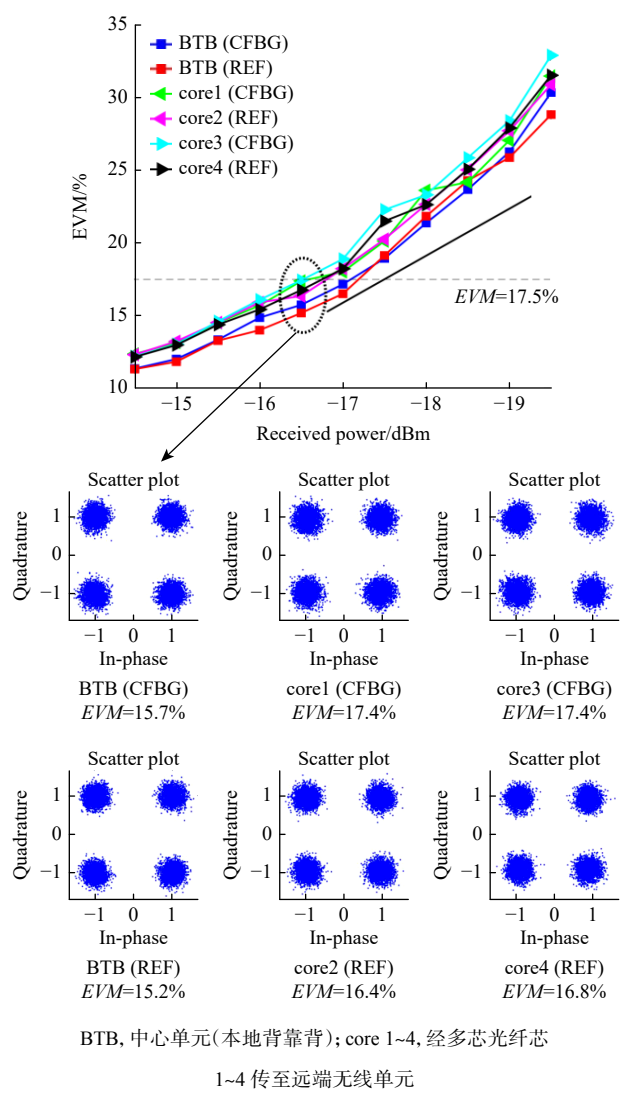


图 6 传输无线信号的性能

表 2 光真时延波束赋形方案性能对比

光真时延方案	波束指向控制连续性	多波束赋形能力	支持带宽	是否支持远端天线阵	参考文献
N比特可调时延线阵列	不连续	具备	宽带	不支持	[11–12]
多波长光源结合色散器件	连续	不具备	宽带	不支持	[13]
微环谐振器阵列	连续	具备	窄带	支持	[15]
本方案	连续	具备	宽带	支持	—

本方案通过改变对应激光器的波长,可在中心单元连续且独立地操纵各波束,具备多波束、无间断指向控制能力。其次,本方案所使用光学器件和光纤链路均具有宽响应带宽,适配 5G/6G 时代 GBaud 级宽带无线信号的应用。最后,本方案采用多芯光纤将天线阵列拉远,经实验证实,可支持通道一致性优、指向长期稳定的远端波束赋形。上述 3 个优势保证了本方案的实用性和可行性。

未来,本系统有望进一步优化。其一,可用波导上的啁啾光栅代替光纤布拉格光栅,减小真时延模块的尺寸。其二,产生多波束的光载波可替换为电光调制型光频梳,以简化光源的功耗。最后,可应用更多纤芯的多芯光纤,或考虑多芯少模光纤,从而支持远程接入更多单元的天线阵。

参考文献 (References)

[1] Osseiran A, Monserrat J F, Marsch P. 5G移动无线通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.

[2] Lim C, Nirmalathas A. Radio-over-fiber technology: Present and future[J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(4): 881–888.

[3] 郭贺铨. 5G开启移动通信新时代[J]. 科技导报, 2020, 38(2): 1.

[4] 刘海鹏, 周淑秋. 5G行业专网应用研究进展[J]. 科技导报, 2022, 40(23): 97–105.

[5] Pan S L, Zhang Y M. Microwave photonic radars[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(19): 5450–5484.

[6] Ye X W, Zhang F Z, Pan S L. Optical true time delay unit for multi-beamforming[J]. Optics Express, 2015, 23(8): 10002–10008.

[7] 夏明耀, 王均宏. 电磁场理论与计算方法要论[M]. 北京: 北

京大学出版社, 2013.

[8] Corral J L, Marti J, Regidor S, et al. Continuously variable true time-delay optical feeder for phased-array antenna employing chirped fiber grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 1997, 45(8): 1531–1536.

[9] Shi N N, Li W, Zhu N H, et al. Optically controlled phase array antenna[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(5): 052301.

[10] Kim M, Hacker J B, Mihailovich R E, et al. A DC-to-40 GHz four-bit RF MEMS true-time delay network[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2001, 11(2): 56–58.

[11] Zhu C, Lu L J, Shan W S, et al. Silicon integrated microwave photonic beamformer[J]. Optica, 2020, 7(9): 1162.

[12] Cheng Q M, Zheng S L, Zhang Q, et al. An integrated optical beamforming network for two-dimensional phased array radar[J]. Optics Communications, 2021, 489: 126809.

[13] Xue X X, Xuan Y, Bao C 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.

[14] Pastor D, Ortega B, Capmany J, et al. Fully automatic simultaneous fiber grating amplitude and group delay characterization[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1997, 14(6): 373–375.

[15] Morant M, Trinidad A, Tangdionga E, et al. Multi-beamforming provided by dual-wavelength true time delay PIC and multicore fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(19): 5311–5317.

[16] Zhang C B, Gao Y Y, Zuo M Q, et al. Using ASE sources in remote beamforming system with Space-Division-Multiplex fiber[J]. Optics Communications, 2022, 504: 127477.

[17] Zhang C B, Lei P, Liu R W, et al. Large-scale true-time-delay remote beamforming with EO frequency combs and multicore fiber[J]. Optics Letters, 2021, 46(15): 3793–3796.

Research on a remote true-time-delay multi-beamforming system based on multicore fibers

ZHANG Chenbo¹, ZHU Yixiao^{2*}, HU Weisheng²

1. School of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China

2. Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract In 5G/6G radio-over-fiber (RoF) networks, remote radio units (RUs) require multi-beamforming functionality to ensure reliable access for ubiquitous mobile terminals. To meet this requirement, multi-core fibers (MCFs) have emerged as a promising solution for RoF links due to their advantages of supporting multiple channels and maintaining excellent inter-channel delay consistency. Here, we propose a remote optical true-time-delay multi-beamforming architecture based on MCFs, which is suitable for 5G RoF networks. The architecture utilizes MCFs as the link, while deploying chirped fiber Bragg gratings with equal dispersion spacing to provide equal-space time delays at the centralized unit. By independently tuning the wavelengths of each optical carrier, the corresponding beam direction can be continuously adjusted, enabling centralized multi-beam control. To validate the feasibility of this architecture, we use a 2-km 7-core fiber as the RoF link for experiment and build a 2×2 remote beamforming system. Experimental results demonstrate that by tuning the wavelength of each optical carrier, independent control of each beam direction can be achieved. Compared to single-mode fibers, MCF reduces inter-channel delay jitter by more than an order of magnitude, with a maximum delay jitter of 1.7 ps, ensuring long-term stability of the beam direction. Furthermore, the inter-core crosstalk of MCF has a negligible impact on both the preset delays and the signal-to-noise ratio of broadband wireless signals. This architecture provides a feasible and stable solution for realizing remote beamforming, offering significant application value for 5G/6G mobile access networks.

Keywords radio-over-fiber; remote beamforming; optical true time delay; multicore fiber ●



(责任编辑 王微)