

基于 $3 \times 80\text{km}$ 大有效面积光纤的 31.2Tb/s DCI 传输系统

Xin Zhao, Bingbing Wu, Fang Li, Rui Tang, Lu Liu, Xiaohua Tang

张哲轩 译

摘要: 我们展示了一种基于新型大有效面积 (A_{eff}) 光纤的 240km 多跨段传输系统的性能。该系统专为数据中心互连 (DCI) 应用设计, 在 C 波段内实现了单波长 1.2Tbit/s 的传输速率以及 31.2Tbit/s 的总容量。研究结果表明, 这种新型光纤在传输效率和降低非线性效应方面表现出卓越的性能, 从而能更有效地满足长途传输和高带宽业务的需求。

关键词: 数据中心互连 (DCI); 大有效面积光纤; 光传输系统; 非线性效应; 大容量传输

I. 引言

随着数据中心或智能计算中心之间数据互连需求的不断增长, 传统光通信系统面临着诸多要求, 亟需引入能够支持更宽带宽、更低时延以及更长传输距离的创新技术。

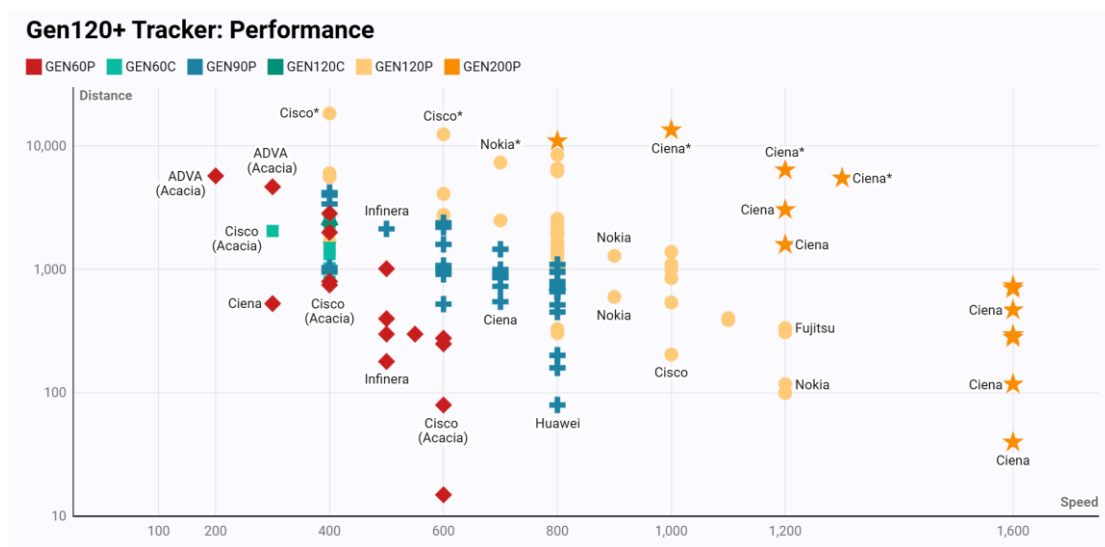


图 1. Gen120+ 相干技术的试验与部署 (工作于 $120+$ GBaud 实现 $1+$ Tbps 速率)

基于具有更大有效面积和更宽频谱带的新型光纤的超大容量长途光传输系统, 已成为应对这一挑战的强有力解决方案。近年来, 大量的研究集中在提升数据中心互连 (DCI) 的容量上, 旨在实现单波长超过 1Tb/s 的数据速率 [1][2], 如图 1 所示。此外, 随着对超 1 太比特 (B1T) 技术探索的加速, 使得与 B1T 系统相兼容的光纤成为了一个关键的研究领域 [3]。

我们测试了一个基于 64QAM 调制格式、单波长速率为 1.2Tbps 的大容量光传输系统, 并在 C 波段内, 将该新型光纤与广泛使用的 G.652.D 和 G.654.E 光纤的性能

特征进行了比较，包括衰减系数、非线性效应及其他传输性能。我们的研究包含了在 C 波段内，该新型光纤与当前普遍部署的 G. 652. D 和 G. 654. E 光纤之间性能特征的对比分析，重点关注衰减系数、非线性效应以及其他传输性能参数。通过对该系统的对比研究，探索了该系统在数据中心互连应用中的性能极限，并为光通信系统的优化和升级提供了建议与指导。

II. 实验装置

A. 光纤特性

本实验所用新型光纤的特性和具体参数如表 I 所示。该新型光纤具有更大的有效面积和更低的成缆截止波长（支持 S 波段和 L 波段）。该新型光纤在 1550nm 处的衰减系数与 G. 654. E 光纤相当，达到 0.15dB/km 至 0.16dB/km 的水平。目前光纤传输衰减系数的最低记录是在 1550 nm 处为 0.1406 dB/km，在 1566 nm 波长处为 0.1397 dB/km [4][5]。

表 I. 光纤特性的光学参数

特性 (Characteristics)	单位	新型光纤	G. 654. E	G. 652. D
1550nm 处的衰减系数	dB/km	≤ 0.152	≤ 0.154	≤ 0.185
1550nm 处的有效面积 (A_{eff})	μm^2	>150	>120	>85
成缆截止波长	nm	<1460	<1530	<1530

B. 高阶调制

发射机采用 64QAM 调制格式，波特率为 155 Gbaud，如图 2 所示。该配置支持 1.2Tbit/s 的单信道传输带宽。

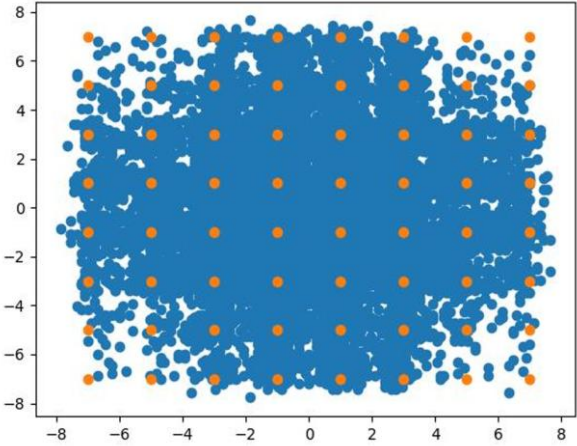


图 2. 1.2Tbit/s 光模块的星座图

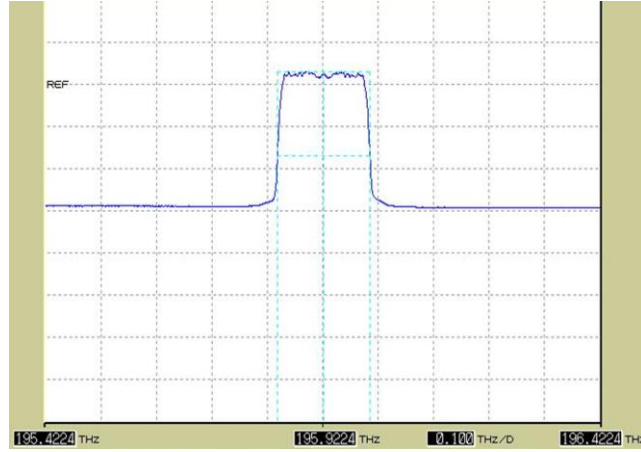


图 3. 1.2Tbit/s 发射机的 20dB 谱宽

单信道 1.2Tbit/s 发射机的 20dB 谱宽为 167.5GHz，如图 3 和表 II 所示。

选取了三个波长的发射机来测试中心波长偏移、边模抑制比和输出功率性能，如表 II 所示。

表 II. 发射机的性能参数

中 心 频 率 (THz)	中 心 频 率 偏 移 (GHz)	边模抑制比 (SMSR) (dB)	输 出 功 率 (dBm)
191.375	-2.7	33.9	0.4
193.600	-2.4	33.0	0.4
195.925	2.6	31.8	0.3

C. 系统配置

实验系统配置在 C 波段(C4.8THz)内,包含总共 26 个信道(每信道 1.2Tbit/s),波长间隔为 175GHz。复用和解复用使用波长选择开关(WSS)器件进行。光放大器采用支持 C4.8T 频谱范围的掺铒光纤放大器(EDFA)。

传输系统由三个跨段组成，每个跨段长 80 km，每跨段衰减为 22 dB，如图 4 至图 6 所示。为了评估光传输系统的性能，采用了 G. 654. E 和 G. 652. D 这两种类型的光纤进行对比。因此，本实验系统利用三种类型的光纤，在相同的传输环境下验证单波长 1.2Tbit/s 的传输性能。



图 4. 实验装置照片

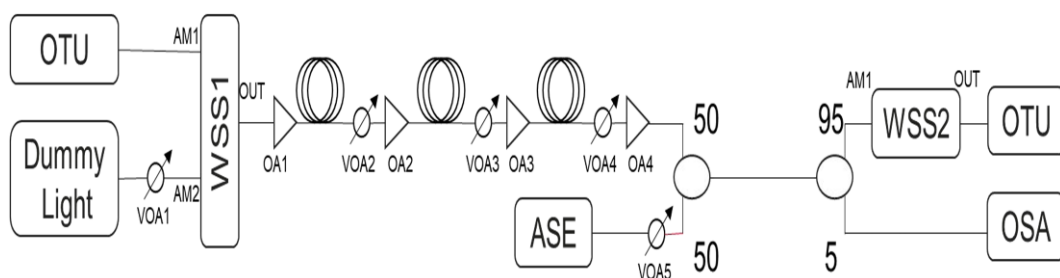


图 5. 基于 3×80km 光纤的实时 26 波长×1.2Tbit/s (64QAM) 传输实验装置
(注：图中 OTU 为光传送单元，WSS 为波长选择开关，VOA 为可变光衰减器，ASE 为放大自发辐射源，OSA 为光谱分析仪)

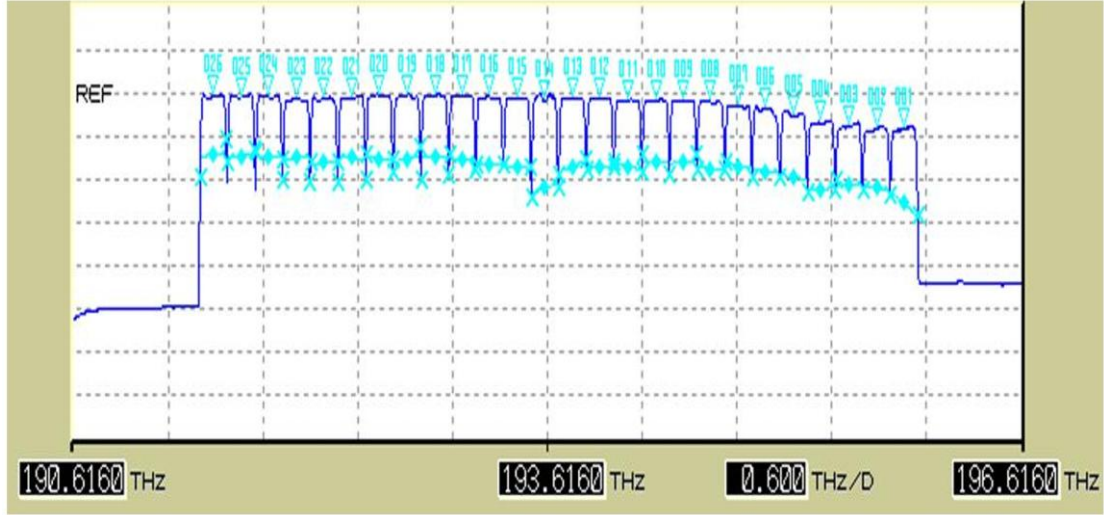


图 6. 接收端的接收信号光谱

III. 实验结果

通过系统测试和分析，我们在相同的传输距离下，评估了使用不同光纤类型的系统性能。在跨越三个跨段、传输距离为 240 km 的条件下，使用三种类型光纤的测试系统中，所有信道的性能均优于接收机的前向纠错（FEC）门限，且实现了 24 小时无丢包、无误码传输。

从 R_n 参考点的角度来看，新型光纤在纠错前（Pre-FEC）性能和 OSNR 代价方面表现最佳，如图 7 所示。从实验结果可以看出，G. 652.D 光纤的 OSNR 代价达到 1.46dB，而新型光纤的 OSNR 代价仅为 0.27dB，显示出显著的性能优势。

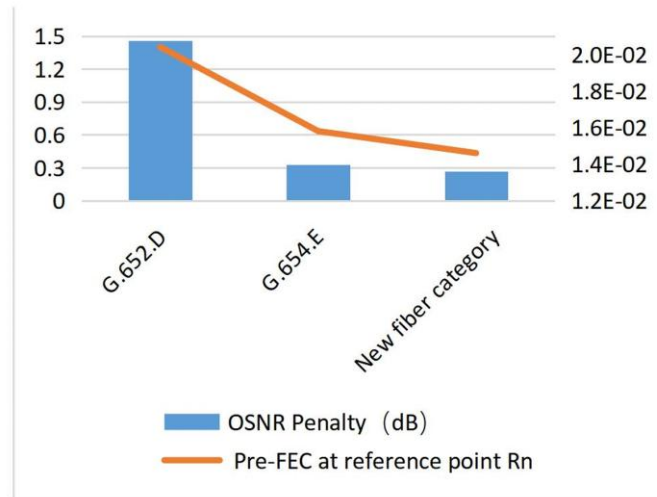


图 7. 参考点 R_n 的 OSNR 和 纠错前（Pre-FEC）性能

实验系统配置在扩展 C 波段，采用单信道 1.2Tbit/s 速率及 64QAM 调制。结果表明，新型光纤系统的 OSNR 代价和非线性效应性能均优于 G. 652.D 和 G. 654.E 光纤，如图 8 和图 9 所示。

当 OSNR 代价为 2dB 时，相比于 G.652.D 光纤，G.654.E 光纤展现出的 50 GHz 等效入纤功率高出 3.5 dB，而新型光纤展现出的等效入纤功率则高出近 5 dB。

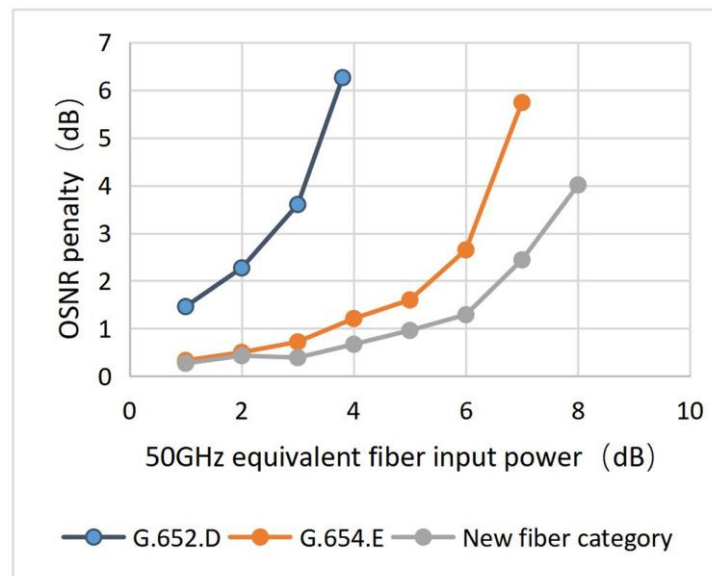


图 8. 3×80km 传输系统的 OSNR 代价结果

(注：横坐标为 50GHz 等效入纤功率，纵坐标为 OSNR 代价)

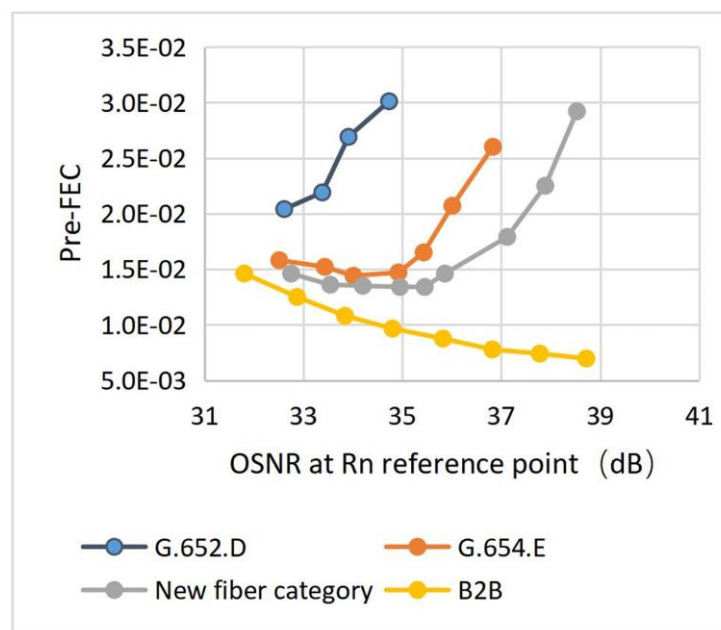


图 9. 3×80km 传输系统的非线性效应结果

(注：横坐标为参考点 Rn 的 OSNR，纵坐标为 Pre-FEC 误码率)

当 Q 因子为 6.2 时，G.654.E 光纤展现出的 50GHz 等效入纤功率比 G.652.D 光纤高 5 dB，而新型光纤展现出的等效入纤功率比 G.652.D 光纤高约 6.5 dB，如图 10 所示。同时，根据测试结果，在 G.652.D 光纤系统环境下，单波长功率仅能提升不到 3dB，而在 1dBm 的基础上，新型光纤系统可以进一步提升 8dB，展现出更好的抗非线性传输性能。

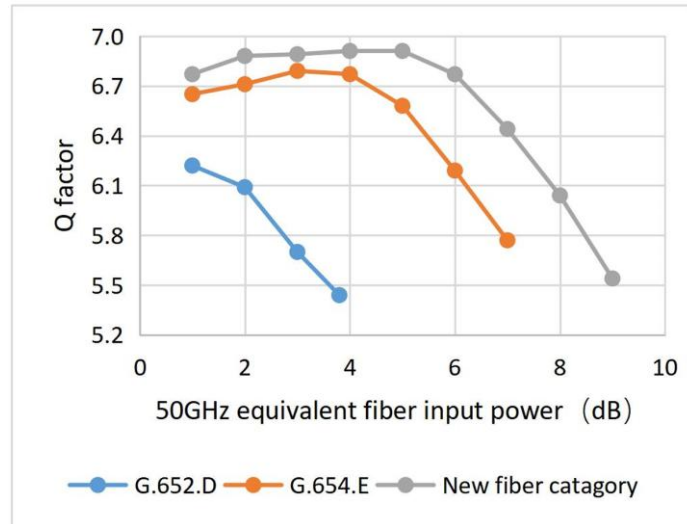


图 10. 3×80km 系统的 Q 因子结果

通过对使用三种类型光纤的三跨段传输性能进行对比实验，可以看出，增大光纤有效面积并降低传输损耗，能够更好地支持超高速和超长距离光传输系统，并为系统提供更大的性能冗余余量。

IV. 结论

综上所述，本实验展示了使用新型光纤的单波长 1.2Tbit/s 光通信系统的性能，该系统在数据中心互连场景中实现了 31.2Tbit/s 的总容量。具有更大有效面积、更低成缆截止波长和更低衰减系数的这一新型光纤，在提升系统性能方面发挥了重要作用。

该系统的传输距离超过 200 km，满足了未来数据中心互连的高带宽和低时延需求。它也有助于构建基于算力网络的 1 ms 时延圈。随着技术的不断发展和（传输）代价的降低，这种新型光纤有望在各个领域获得更广泛的应用。高速光通信系统将从更有效地支持人工智能和云计算网络。

致谢

本工作得到了国家重点研发计划（2023YFB2805300）的资助。

参考文献

- [1] H. Zhang, “Real-Time 1.2Tb/s Large Capacity DCI Transmission”, W3H.3, OFC 2024.
- [2] F. Pittala, “1.71 Tb/s Single-Channel and 56.51 Tb/s DWDM Transmission over 96.5

km” , IEEE PTL 34, 2022.

[3] <https://signal.ai/2024/10/gen120-coherent-trials-and-deployments/>

[4] Sergei Makovejs, “The next decade of optical fibers: implications on system design” , M2C.1, OFC 2022.

[5] Shin Sato, “Record Low Loss Optical Fiber with 0.1397 dB/km” , Tu2E.1, OFC 2024.