
相干调制与全自适应光学实现Tbits传输速率

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/24982.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

相干调制与全自适应光学实现Tbits传输速率。

近日，来自瑞士苏黎世联邦理工学院电磁场研究所的Juerg Leuthold教授等人在Light: Science Applications上发表了题为Tbit/s Line-Rate Satellite Feeder Links Enabled by Coherent Modulation and Full-Adaptive Optics的高水平文章。文中提出了一种新的四维BPSK (4D-BPSK) 调制格式，作为一种在最低SNR下传输高数据速率的技术，并且通过实验显示了53公里的自由空间光传输，分别为13.3 Gbit/s和210 Gbit/s，每比特只有4.3和7.8个光子，误码率为 10^{-3} 。

研究背景

卫星通信链路基于射频通信，通常在Ku波段 (12-18 GHz) 和Ka波段 (26.5 – 40 GHz)，而自由空间光通信技术是应对未来卫星地面网络带宽需求的一种解决方案。光通信将通过波分复用提供进一步的缩放。尽管射频技术不太容易受到云层和其他天气条件对能见度的影响，但每个地面站的可用射频带宽通常仅限于几GHz。因此，它们仍然需要比光学技术多五倍的地面网关来实现Tbit/s量级的系统吞吐量。此外，用于地面应用的光子技术的成熟不仅降低了开发成本和时间，还降低了未来系统的尺寸、重量和功耗。然而，到目前为止，只有几次卫星地面数据传输演示：例如，2008年，在双向低轨地面链路中，1000公里以上的数据速率高达5.6 Gbit/s，因此自由空间光 (FSO) 通信仍然是一个研究热点。

最近，已有的研究证明了FSO通信在中小距离上实现高数据速率的能力，这需要相对较短的距离所提供的高信噪比，主要依赖于先进的高阶调制技术。然而，对于未来的卫星链路，其目标是克服更长的距离，传输500 Gbit/s或更高的速率，因此研究哪种调制格式可以在提供最高容量的同时应对更长距离的挑战是当下的研究热点，在地球卫星链路中，大气条件，如湍流、云层和湿度，以及长距离，可能会导致显著的自由空间损失 (FSL)，这些损失会随着时间的推移而变化，并导致接收光功率降低 (ROP)。因此，FS通信链路需要具有鲁棒性，能够在理想条件下和不利的低SNR情况下传输最高容量。

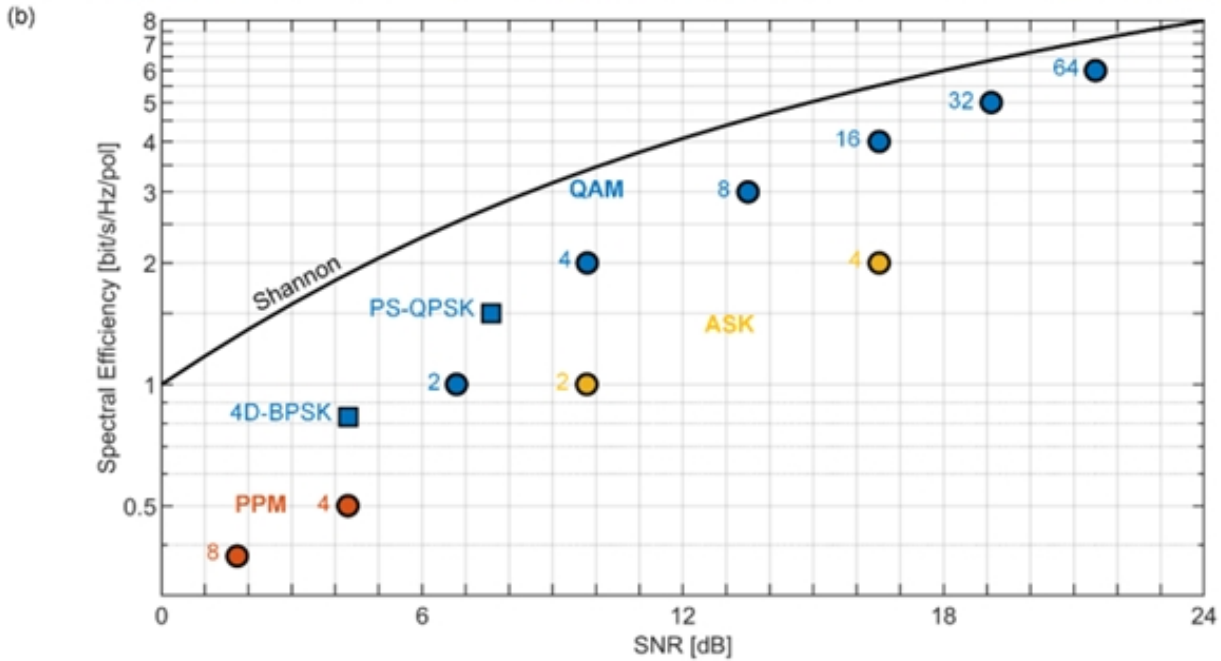


图1. (a) 光学卫星通信链路的愿景。(b) 对于误码率为 10^{-3} 的PPM (红色)、PAM (黄色)、QAM (蓝色) 调制格式, 作为所需信噪比 (SNR) 的函数的频谱效率, 以及根据香农信道容量定理 (绘制的曲线) 作为上限的所需SNR。此外, 绘制了两种4D QAM调制格式 (正方形), 即偏振切换 (PS) QPSK (PS-QPSK) 和4D-BPSK, 它们最近显示出最高的灵敏度。与偏振复用 (PM) 4QAM相比, 在 10^{-3} 的误码率下, 它们分别具有0.97 dB和1.7 dB的灵敏度优势。

到目前为止, 偏振切换 (PS) 4QAM (PS-QPSK) 调制格式被认为是相干调制系统中功率效率最高的调制格式。在 10^{-3} 的误码率 (BER) 下, 与偏振复用 (PM) 2QAM相比, 它具有0.97 dB的优势。然而, 这是在非常低的频谱下实现的, 因此链路容量很低, 并且主要用于深空通信。最近, 在1 m传输实验中, 利用QPSK调制格式与前向纠错 (FEC) 编码方案和相敏放大器 (PSA) 相结合, 在10.52 Gbit/s的数据速率下实现了每比特1光子的接收器灵敏度。虽然这次演示显示出前所未有的灵敏度, 但其系统的复杂性、成本较高, 对未来的商业卫星链路具有很大的挑战性。

提高卫星地球链路整体吞吐量的另一种方法是减少大气损伤的影响，即FSL和大气湍流。虽然FSL可以通过高功率光学放大器和大型光学望远镜进行部分补偿，并且可以通过自适应光学（AO）、多孔径和纠错编码等技术缓解大气通道引入的时变强度波动，但是在具有相干调制格式的FSO通信系统中，其对信号质量的影响尚不清楚。因此，对在不利条件下以最低复杂度提供最高容量的调制格式的研究仍然十分重要。

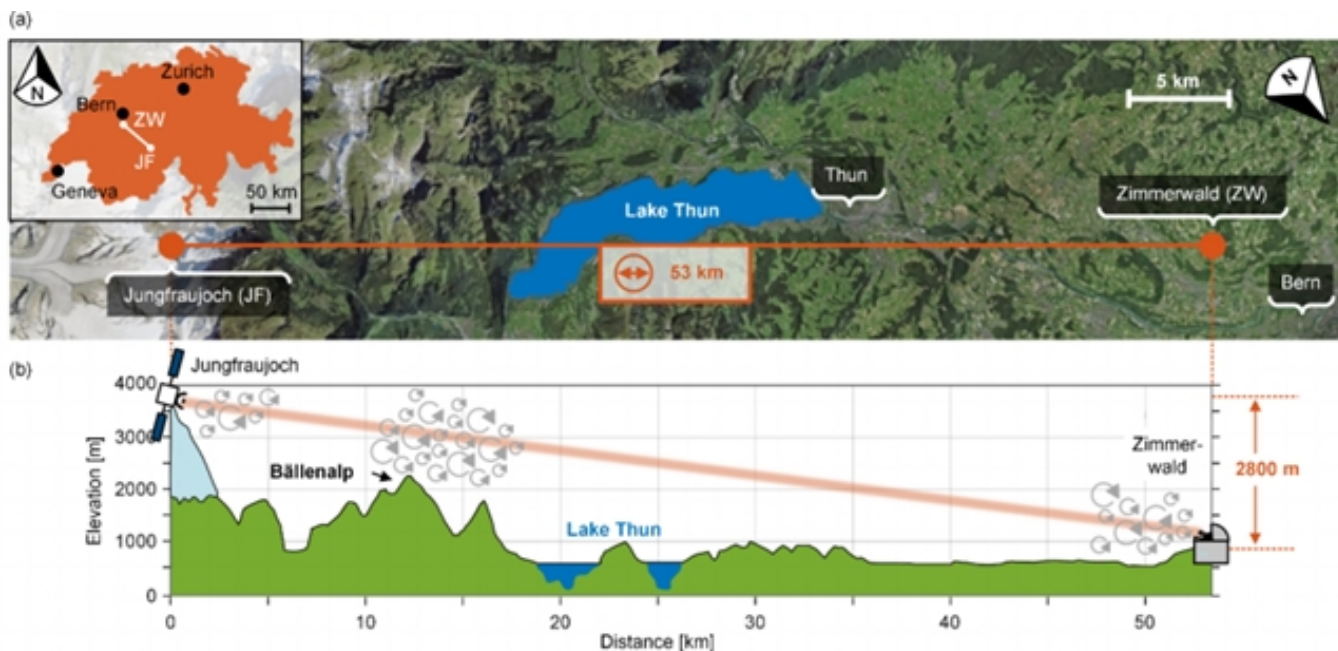


图2. FSO传输实验的鸟瞰图。

创新研究

自由空间光通信技术是应对未来卫星地面网络带宽需求的一种解决方案，该技术可以克服射频瓶颈，并在只有少数地面站的情况下获得Tbit/s量级的数据速率。针对这一问题，Juerg Leuthold教授等人展示了在瑞士阿尔卑斯山少女峰山顶（3700米）和伯尔尼市附近齐默瓦尔天文台（895米）之间53.42公里的自由空间信道上的单载波Tbit/s线路速率传输，实现了高达0.94 Tbit/s的净速率。

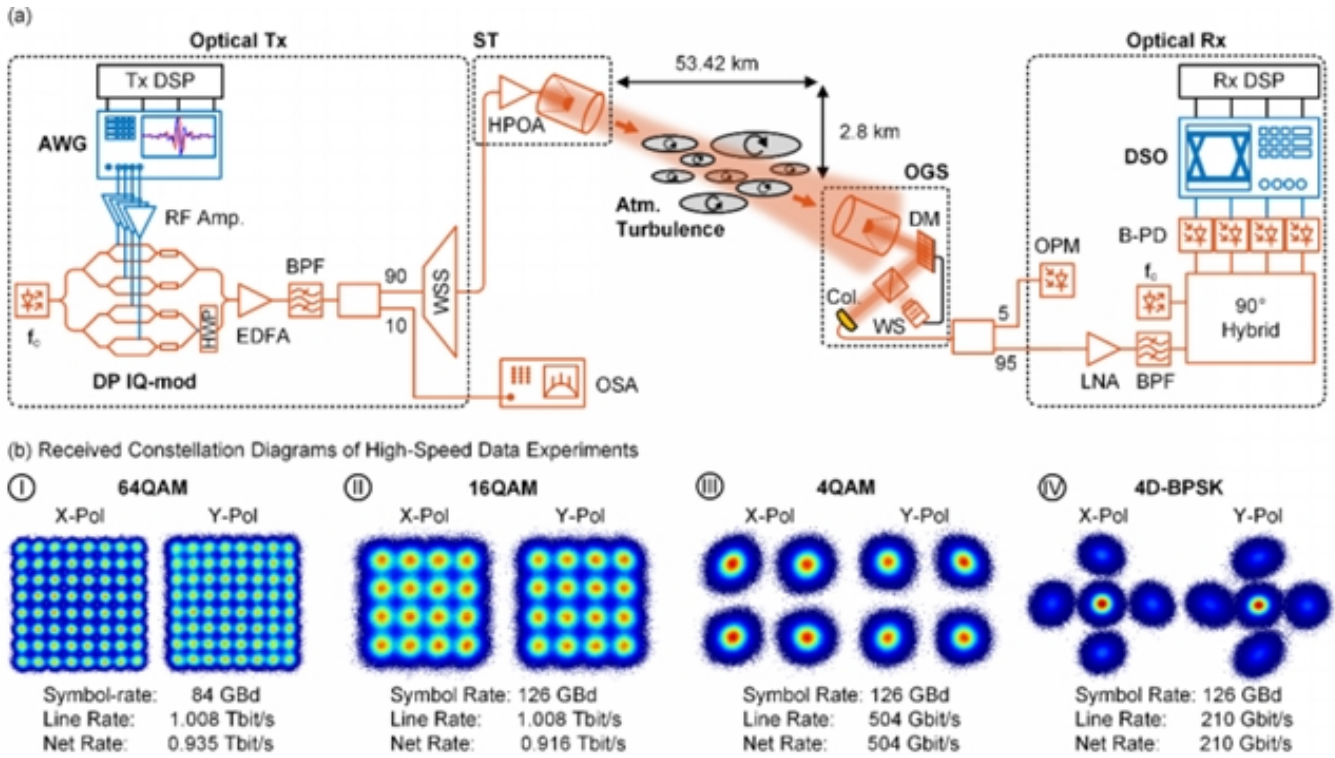


图3. 具有高速数据传输的53公里自由空间光链路 (FSO) (a) 实验装置；首先，由任意波形发生器 (AWG) 生成双偏振复调制信号，并通过DP-IQ调制器将其混合到光载波 f_c (1550 nm) 上。然后，它通过波长选择开关 (WSS) 进行光学均衡，并被馈送到空间终端 (ST)。随后，信号通过湍流大气通道在53公里的FSO距离上传输。在接收器侧，相位失真的波前在由波前传感器 (WS) 和可变形反射镜 (DM) 组成的自适应光学系统中进行校正，并耦合到单模光纤。在低噪声放大器 (LNA) 中进行预放大后，数据信号在由本地振荡器、 90° 混合和平衡光电探测器 (B-PD) 组成的光相干接收器中被映射回基带。最后，通过标准离线数字信号处理阶段来评估数字信号。(b) 显示了高速数据传输的接收图，这通过高级调制格式实现了高达1.008 Tbit/s的线路速率。

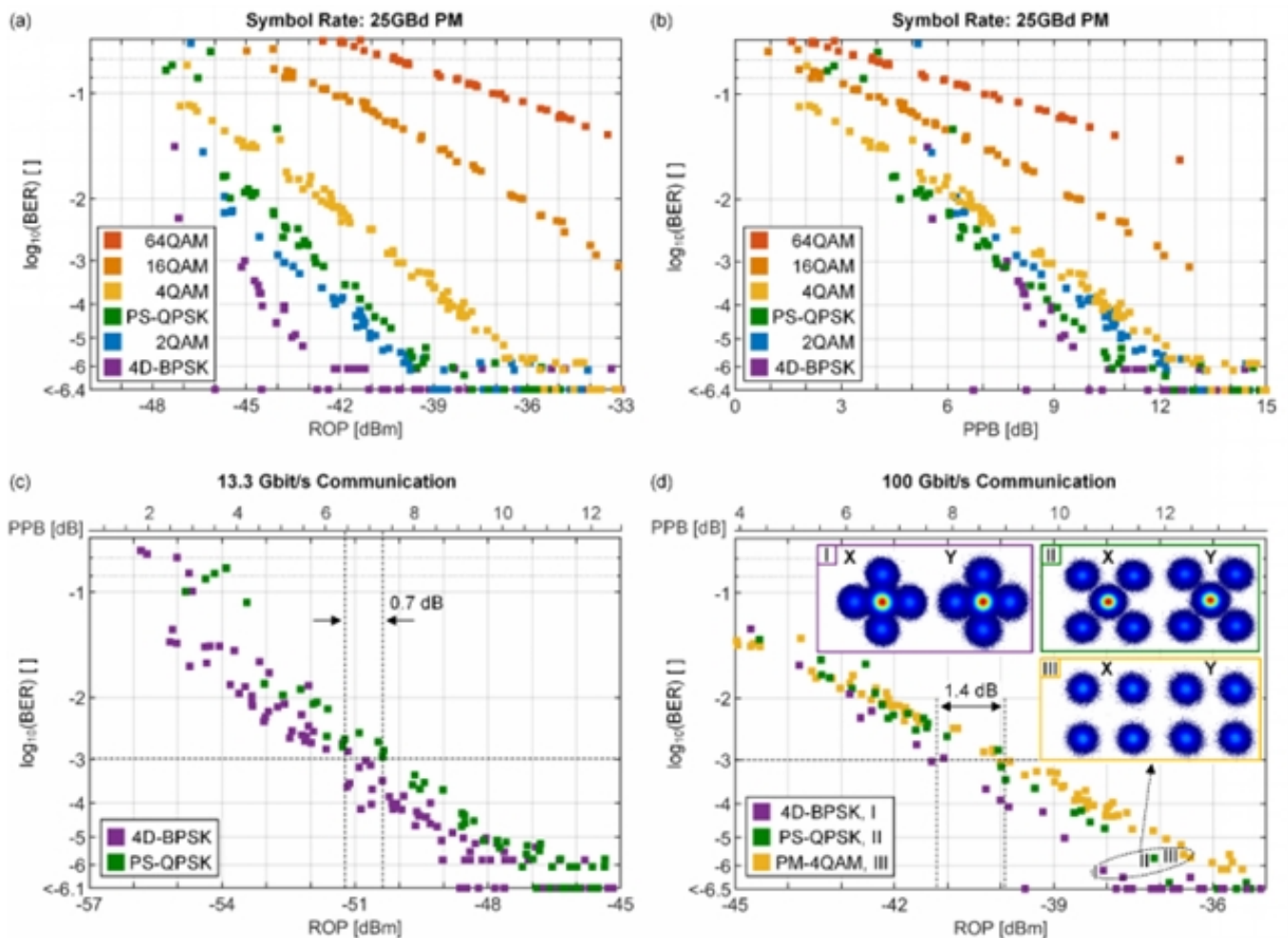


图4. 53公里FSO链路中高级调制格式的灵敏度；对于符号速率为25 GBd的偏振复用QAM调制格式，误码率（BER）是（a）ROP和（b）光子每比特（PPB）的函数。还研究了4D调制格式PS-QSPK和4D-BPSK。对于给定的BER，它们需要最低数量的PPB。4D-BPSK被证明是功率效率最高的调制格式，在BER为 10^{-3} 时，测量的灵敏度优势分别为0.7 dB和1.4 dB，优于PS-QPSK和PM 4QAM。与低噪声放大器光学相干Rx前端相结合，它能够以分别低至-51.3 dBm和-41.2 dBm的ROP进行传输，距离理想的散粒噪声极限仅1.4 dB。

具体而言，研究人员通过采用全自适应光学系统来校正信道的畸变波前，并通过使用偏振复用的高阶复调制格式，实现了高吞吐量、高信噪比SNR，并且发现自适应光学不会使相干调制格式接收失真，即使在强湍流条件下，自适应光学滤波也可以处理相干调制格式。

此外，研究人员还提出了新的调制格式4D-BPSK，作为在不利条件下接收的解决方案，这种新型思维BPSK（4D-BPSK）调制格式具有处理低信噪比条件的能力，允许在最低ROP下传输高数据速率。实验表明，4D-BPSK方式可以在 10^{-3} 的误码率下以创纪录的4.3光子/比特（PPB）的低灵敏度运行，同时仍能以 >200 Gbit/s的线路速率进行传，相比PM 4QAM和PS-QPSK分别具有1.7 dB和0.7 dB的灵敏度优势。更准确地说，13.3 Gbit/s和100 Gbit/s的数据是以-51.3 dBm和-41.2 dBm的接收光功率发送的。

最后，研究者还探索了自适应光学在减轻大气湍流的不利影响及其对光学卫星通信系统中先进调

制格式信号质量的影响方面的潜力，并考虑到大规模自由空间光学部署，衰减是唯一需要克服的挑战，甚至这种限制也可以通过引入新的低SNR调制格式来扩大。研究表明，先进的相干调制编码与全自适应光学滤波相结合是实现下一代Tbit/s卫星通信的合适手段。

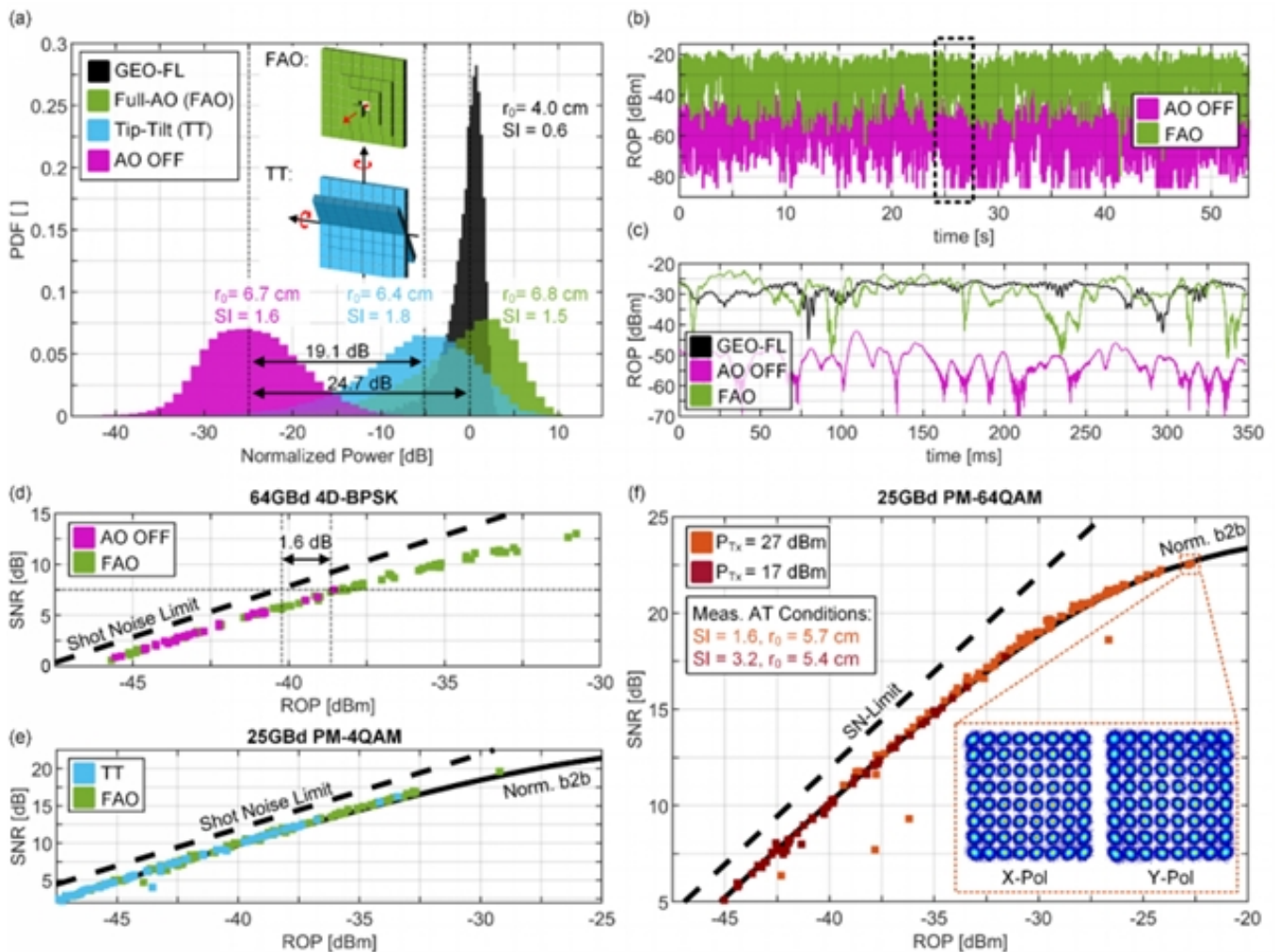


图5. 对自适应光学 (AO) 性能的研究。(a) 概率密度函数 (PDF) 作为不同自适应光学设置的归一化功率的函数，即全自适应光学校正 (FAO, 绿色)、倾斜度校正 (TT, 蓝色) 和无校正 (OFF, 粉红色)。为了进行比较，绘制了GEO馈线上行链路 (FL) 与FAO (黑色) 最坏情况下的预期PDF。与TT设置和OFF设置相比，FAO设置中的操作在中值接收光功率 (ROP) 中分别产生 5.6 dB增益和24.7 dB增益。与参考GEO-FL的比较表明，实验是在最坏情况下的湍流条件下进行的。在测量的SI=1.5的FAO配置中的测量比参考GEO-FL的湍流要大得多。(b) 第二级粮农组织和关闭设置的ROP与时间。(c) (b) 的放大说明信道的相干时间在几毫秒的数量级。这里再次以黑色绘制了最坏情况GEO-FL情景的代表性时间演变图，并将其调整为FAO ROP的中值。采用FAO增加了Rx的中值耦合功率，并降低了功率衰落的频率。(d-e) 自适应光学的作用是提供ROP优势。(f) 使用高阶调制格式64QAM的不同发射功率 P_{Tx} 的信噪比作为ROP的函数。

该文章发表在国际顶尖学术期刊《Light: Science Applications》，题为Tbit/s Line-Rate Satellite Feeder Links Enabled by Coherent Modulation and Full-Adaptive Optics。(来源：LightScienceApplications微信公众号)

相关论文信息：<https://www.nature.com/articles/s41377-023-01201-7>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：Juerg Leuthold 来源：《光：科学与应用》

更多科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](https://www.iikx.com)转发