相干地面到卫星光链路的非线性抑制

S. Civelli[1,2,*], M. Secondini[2,3], L. Pot`ı[3,4]

[1]*CNR-IEIIT，意大利比萨 Via Caruso 16，56122，stella.civelli@cnr.it*[2] *圣安娜高等学校 TeCIP研究所，意大利比萨 Via G. Moruzzi 1，56124*[3] *PNTLab，CNIT，意大利比萨 Via G. Moruzzi 1，56124*[4] *Universitas Mercatorum，意大利罗马 Piazza Mattei 10，00186*

摘要：我们提出用于卫星通信高功率光放大器的非线性抑制数字信号处理技术。在复杂度几乎不增加的情况下，可接受的链路损耗提高6 dB。© 2025 作者

arXiv:2601.05655v1 [cs.IT] 9 Jan 2026

1. 引言

近年来，光卫星通信已成为一种有效技术，可用于补充甚至可能取代传统射频（RF）卫星链路 [1–4]。然而，地面到卫星光链路会受到严重损伤，其原因是随时间变化的大气条件以及卫星与地球之间的相对运动（即指向角变化），二者都会导致显著衰减和性能退化。为确保卫星接收到足够的接收功率，从而提升吞吐量并在不利条件下保持稳健性，发射功率应尽可能高。近期已展示出多种高功率光放大器（HPOA），包括带内纤芯泵浦掺铒光纤 [5],包层泵浦掺铒光纤 [6], 以及包层泵浦掺铒镱光纤 [7]。所有这些方案都存在物理和实际约束或局限，因此需要根据具体应用进行定制设计 [8]。主要挑战之一是，当高功率信号在光纤中传输时，光纤非线性不可避免地会出现——无论是在放大器内部的掺杂光纤中，还是沿输出尾纤或任何额外的跳线中。抑制这种非线性对于提高发射功率至关重要，进而可实现更高吞吐量或更长传输距离 [9, 10]。一方面，可以通过精心设计HPOA来抑制非线性。例如，与掺铒镱光纤放大器（EYDFA）相比，掺铒光纤放大器（EDFA）通常需要相对更长的掺杂光纤，因此后者是抑制非线性效应的更佳选择。然而，超高功率EYDFA会受到高阶模功率转移的影响，导致指向稳定性波动；此外，光致暗化还会造成长期功率退化 [8]。此外，大模场面积方案缺乏商业化且可靠的组件，维持单模运行也可能颇具挑战。另一方面，可以通过适当设计信号和/或采用数字信号处理（DSP）来抑制光纤非线性。例如，已有研究探讨了HPOA之后短单模光纤（SMF）尾纤中的克尔非线性 [10], ，并提出了一种适用于直接检测系统的补偿方法。此外，相干通信已应用于空间通信，使更先进的数字信号处理和更高吞吐量成为可能 [2, 11]。本文提出用于相干光卫星通信上行链路的抑制与补偿技术，并介绍低复杂度数字信号处理方法，以实现更高发射功率，从而延长传输距离或提高数据速率。

2. 高功率光放大器的非线性缓解技术

本文仅关注克尔非线性效应，因为它预计是主要问题 [10]。尽管光纤通信系统中的克尔非线性抑制已得到广泛研究，但高功率光放大器中的动态特性有所不同。前一种情况下，非线性效应会在较长时间内（与符号率和光纤长度成正比）与色散相互作用，产生自相位调制和交叉相位调制效应，并伴有少量四波混频。频谱展宽很小，光功率也相对较低（通常低于 20dBm）。相比之下，高功率光放大器内部的光纤较短（< 100m），但光功率要高得多（最高可达 ≈ 50dBm）。在这些条件下，非线性效应与色散的相互作用较弱，主要取决于瞬时功率，表现形式主要是频谱展宽。本文提出两种源自光纤通信、专为高功率光放大器场景量身定制的数字信号处理技术，以抑制非线性效应：信号整形和非线性相位旋转（NLPR）。

概率幅度整形（PAS）通过分布匹配器（DM）实现星座整形。分布匹配器将信息比特映射为由N 个整形幅度组成的块，其目标概率分布为 [12]。对于有限的块长度N，每个块内的幅度具有很强的相关性。这种相关性会导致

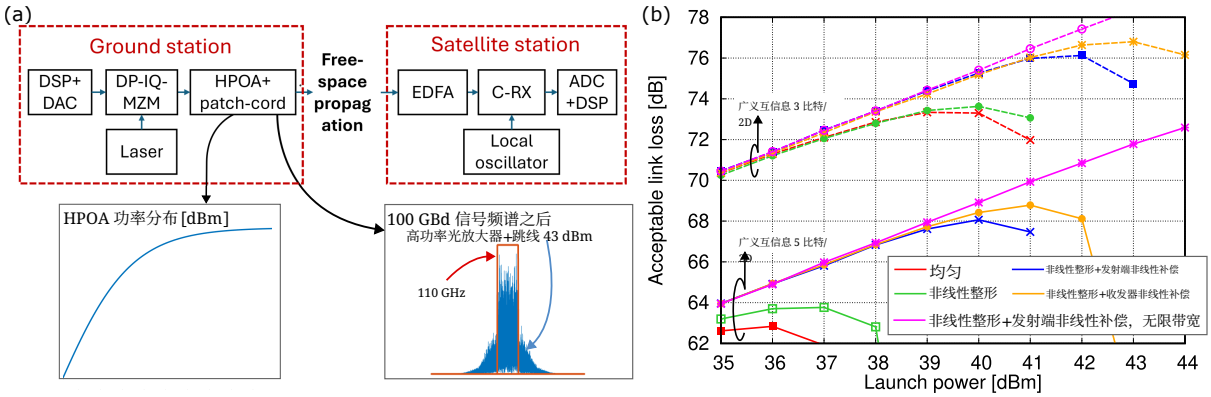


图1. (a) 系统设置，(b) 系统性能　　nce

速率损失，且该损失会随着 N 增大而消失。同时，它会减小块内的幅度波动，从而相应地降低非线性效应。采用四维映射（跨正交分量和偏振）的球形整形通常能获得最佳性能，而最优块长度取决于光纤色散引起的信道记忆。在光纤系统中，最优 N 通常较大（$N > 64$） [13], 而在 HPOA 场景中，光纤色散的影响可以忽略不计，因此预计最优块长度会短得多。本文提出采用四维映射的球形整形，并使用极短的块长度（$N = 4$）；我们将证明，这种方法可带来显著的整形增益，并且能够通过查找表轻松实现，复杂度可忽略不计。

接下来，我们提出采用非线性相位旋转（NLPR）来抑制非线性效应。忽略色散的影响时，光纤非线性效应可建模为简单的相位旋转 $\theta(t)$，其大小与瞬时信号功率成正比。这种失真可通过在发射端、接收端或两端分别施加逆相位旋转$-\theta(t)$ 以数字方式补偿，且计算复杂度极低。在发射端执行 NLPR 最有利，因为（i）发射信号不含噪声，可避免信号与噪声相互作用；（ii）卫星站对复杂度有非常严格的要求。然而，发射端和接收端的前端带宽均受限。由于非线性效应会造成显著的频谱展宽，部分信号频谱可能被滤除，从而降低 NLPR 的整体效果。为解决这一问题，可将 NLPR 分配到发射端（$-\kappa\theta$）和接收端（$(\kappa-1)\theta$），并对 κ 进行优化。正如我们将展示的，这种方法能够抑制频谱展宽并提升整体性能。

3. 系统设置与性能

我们通过对图 1(a) 所示系统进行数值仿真，评估所提出技术的性能。位于地面站的发射端（TX）执行数字信号处理（DSP），并使用数模转换器（DAC），将信息比特映射为双偏振（DP）M阶正交幅度调制（QAM）星座中的符号，分布方式为均匀分布或概率整形分布。这些符号对频域根升余弦信号进行调制，其滚降系数为 0.05，符号率为 R $=$ 100GBd。我们假设电带宽为 110 GHz。生成的模拟信号通过双偏振同相正交马赫-曾德调制器（DP-IQ-MZM）调制连续波 C波段激光器。光信号经高功率光放大器（HPOA）放大后，以功率 P 发射至自由空间。本文将 HPOA 建模为长度为 30m 的掺铒光纤放大器（EDFA），其衰减为 0.2dB/km，非线性系数为 3.6W^{-1}km^{-1}，色散为 D $=$ 17ps/nm/km，并额外包含 3m 单模光纤（SMF），用作尾纤和跳线。光纤传输采用分步傅里叶法（SSFM）仿真，并使用足够多的步数。HPOA 中的功率分布假设如图 1(a) 插图所示。信号离开 HPOA 后发射至自由空间，并由卫星站接收。在本研究中，我们将自由空间传输建模为信号衰减，损耗为 L。在接收端（RX），低噪声掺铒光纤放大器（EDFA）（噪声系数为 $N_F = 4$dB）对信号进行放大，同时引入 ASE噪声。信号由相干接收机（C-RX）接收，随后由 ADC+DSP 模块处理，该模块的带宽同样为 110 GHz。假设 EDFA 增益和链路损耗都很大，则 RX 处的整体信噪比（SNR）为 $P/(RLh\nu N_F)$，其中 $h\nu$为光子能量。我们假设发射端激光器和本振线宽可以忽略，因为它们可通过载波相位恢复（CPR）进行恢复。

图1(b) 展示了广义互信息（GMI）分别等于 3bit/2D（实线）或 5bit/2D（虚线）时，可接受的链路损耗随发射功率的变化关系——即能够达到目标 GMI 的最大链路损耗；借助理想的前向纠错码即可实现该目标。对于 64阶正交幅度调制，采用 4.5bit/2D 的整形；对于 256阶正交幅度调制，采用 6.5bit/2D 的整形，目标 GMI 分别为 3bit/2D 和

5bit/2D。首先，图中比较了均匀正交幅度调制与采用球形整形的整形正交幅度调制的性能，后者使用了经优化的块长度$N = 4$（绿色）。后者标记为非线性整形，可通过查找表实现：对于 64阶正交幅度调制上的 4.5bit/2D 整形，发射端和接收端所需查找表分别为 256 位和 1280 位；对于 256阶正交幅度调制上的 6.5bit/2D 整形，分别为 6144 位和 36864 位。总体而言，通过复杂度可忽略的查找表实现整形，能够容忍更高的链路损耗；目标 GMI 为 5bit/2D 时，链路损耗最多可增加 1dB。不过，我们认为，针对 HPOA 场景恰当设计整形方式，或可进一步提升非线性整形增益。接下来，图中展示了在查找表整形基础上加入非线性相位旋转后的性能。假设器件带宽非常大，并在发射端进行非线性相位旋转时的理想性能作为参考（灰色），能够完全补偿非线性效应（在所考虑的功率范围内）。然而，当电带宽限制为 110 GHz 时，发射端采用非线性相位旋转的性能会下降（洋红色），但仍可带来最高 4dB 的额外增益。将非线性相位旋转分配到发射端和接收端（$\kappa = 0.6$）后，这一增益还会进一步提高，但接收机复杂度也会适度增加。总体而言，我们的结果表明，对于目标 GMI 为 3bit/2D 或 5bit/2D 的情况，采用低复杂度查找表实现概率整形，并结合发射端和接收端的非线性相位旋转，可分别使链路损耗增加 3.5dB 和 6dB。省略接收端的非线性相位旋转仅会造成轻微的性能损失。

4. 结论

本研究提出了两种互补的数字信号处理技术，用于减轻相干地面到卫星光链路中地面站高功率光放大器产生的非线性效应。通过在地面站对信号进行适当整形，同时将复杂度降至最低，可接受的链路损耗最多可增加5.2 dB（广义互信息为5 bit/2D，整形速率为6.5 bit/2D，采用基于查找表的整形和发射端非线性相位旋转的256阶正交幅度调制、100 GBd信号）。在卫星站仅增加少量复杂度，性能还能进一步提升，使链路损耗最高可达6 dB。

致谢

本研究部分由欧盟通过NextGenerationEU意大利国家复苏与韧性计划（NRRP）下的“未来电信”合作项目（PE00000001——“RESTART”计划）资助。

参考文献

1. H. Kaushal 和 G. Kaddoum，“太空光通信：挑战与缓解技术”，《IEEE通信调查与教程》**19**，57–96（2016）。 2. R. Li、B. Lin 等，“激光空间网络综述：终端、链路与架构”，《IEEE Access》**10**，34815–34834（2022）。 3. R. Boddeda、D. R. Arrieta 等，“地球静止轨道—地面光链路的可达容量”，《光波技术期刊》**41**，3717–3725（2023）。 4. R. Boddeda、D. R. Arrieta 等，“当前状况、前景及利用相干光学在卫星通信中实现单载波速率超过100 Gbps的机遇”，载于*ECOC 2024*：第*50*届欧洲光通信会议，（VDE，2024），第406–409页。 5. L. V. Kotov、V. Temyanko 等，“高能量单频芯泵浦掺铒光纤放大器”，《光波技术期刊》**41**，1526–1532（2022）。 6. L. V. Kotov、M. E. Likhachev 等，“976 nm包层泵浦、输出功率超过100 W的无镱掺铒全光纤放大器”，载于第十一届光纤激光器：技术、系统与应用，，第8961卷（SPIE，2014），第149–154页。 7. T. Matniyaz 、 F. Kong 等，“ 铒镱光纤主振荡功率放大器实现 302 W 单模功率 ”，《光学快报》 **45**，2910–2913（2020）。 8. J. W. Nicholson、A. Grimes 等，“用于自由空间光通信上行链路的高功率光纤激光器”，《IEEE量子电子学专题精选期刊》（2025）。 9. V. Billault、S. Leveque 等，“用于自由空间光通信的高功率光放大器光学相干合束”，《光学快报》**48**，3649–3652（2023）。 10. E. Ciaramella 和 G. Cossu，“用于卫星链路的自由空间系统中超高功率 10×10 Gbit/s波分复用强度调制的光纤非线性效应”，《光学快报》**32**，7959–7968（2024）。 11. F. P. Guiomar、M. A. Fernandes 等，“相干自由空间光通信：机遇与挑战”，《光波技术期刊》**40**，3173–3186（2022）。 12. G. B¨ocherer、F. Steiner 和 P. Schulte，“带宽高效且速率匹配的低密度奇偶校验编码调制”，《IEEE通信汇刊》**63**，4651–4665（2015）。 13. S. Civelli、E. Forestieri 和 M. Secondini，“概率整形与载波相位恢复下的非线性整形增益”，《光波技术期刊》**10**，3046–3056（2022）。