

New Coding Modulation and Transmission Technology for 5G Fronthaul Network

Guohuan Wang¹ Xu Li²

1. Unicom Group Finance Co., Ltd., Beijing, 100000, China

2. Beijing Yunlian Zhigao Information Consulting Co., Ltd., Beijing, 100086, China

Abstract

In response to the needs of the development of 5G fronthaul networks, the paper proposes a large-capacity transmission system based on high-order code modulation and multi-core and few-mode fiber. The paper introduces the transmission principle of high-order signal modulation and multi-core few-mode fiber, and builds a new transmission system based on high-order coding. The research results show that the use of high-level coding technology and multi-core and few-mode fiber can effectively increase communication capacity and provide a flexible solution for the development of 5G technology.

Keywords

optical communication; high-order modulation signal; multi-core and few-mode fiber; space division multiplexing

面向 5G 前传网络的新型编码调制与传输技术

王国环¹ 李旭²

1. 联通集团财务有限公司, 中国 · 北京 100000

2. 北京云联智高信息咨询有限公司, 中国 · 北京 100086

摘要

针对 5G 前传网络发展的需求, 论文提出了一种基于高阶编码调制和多芯少模光纤的大容量传输系统。论文介绍了高阶信号调制和多芯少模光纤的传输原理, 搭建了基于高阶编码的新型传输系统。研究表明, 采用高阶编码技术和多芯少模光纤能有效地提升通信容量, 为 5G 技术的发展提供了灵活的解决方案。

关键词

光通信; 高阶调制信号; 多芯少模光纤; 空分复用

1 引言

现如今, 随着通信技术和互联网业务的蓬勃发展, 网络流量的需求也在持续增长, 5G 接入技术能大大提升信息的传输速率和可靠性, 因而成为了当前的研究热点。下图 1 是 5G 前传的网络结构图, DU 与 RRU 之间采用无源光网络点对点树形网络拓扑结构, OLT 和 ONU 之间普遍采用光纤进行信息传输, 这势必对光纤的通信容量的要求越来越高^[1-5], 目前传统的 QPSK 或者 16QAM 等调制方式越来越不能满足这种需求, 随着越来越先进的 DSP 方法的提出以及光学器件的不断成熟和发展, 调制技术必然会从比较低阶的 QPSK 和 16QAM 调制不断演变到 64QAM、128QAM 等甚至更高的调制阶数^[6]。

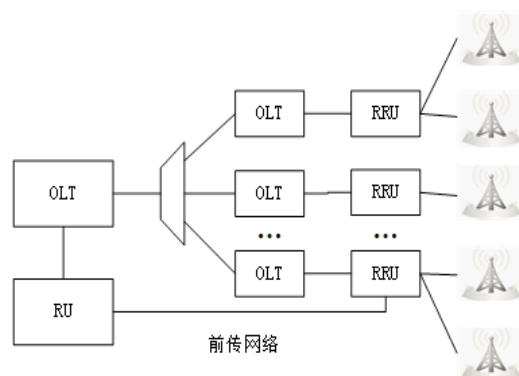


图 1 5G 前传网络示意图

由于传统的单模光纤已经达到了香农极限, 增加功率会导致光纤中非线性效应的提升, 从而影响信道中的信息传输效率。在已经引入了时间、偏振、频率、正交等复用技术之后, 唯一未被深入研究的空间维度——空分复用技成为突破光纤

通信容量的必然选择^[7]，这就促成了多芯少模光纤的发展。

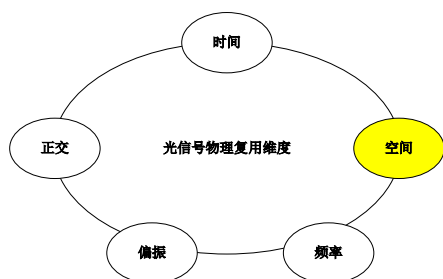


图 2 光信号的 5 种物理复用维度

论文研究了一种能传输高阶调制信号的多芯少模光纤高速传输系统，在发送端发送 64QAM、128QAM 等高阶调制信号，并能通过多芯少模光纤信道进行传输，最后进行频域均衡，时钟恢复，色散及非线性补偿等 DSP 处理。从而有效地提升了信道容量，延长了通信距离。通过仿真并对实验结果进行分析，该模型对 5G 前传网络的性能有着显著的提升。

2 高阶调制技术

2.1 高阶调制技术原理

常见的高阶 QAM 调制信号有 14QAM、128QAM、256QAM 以及更高阶的 512QAM 和 1024QAM 等，论文以 64QAM 信号为例来介绍光通信系统中高阶调制信号产生的原理。

64QAM 信号由 AWG 电域产生，然后通过 IQ 调制器调制到光域，从而得到 64QAM 调制光信号。主要通过两种方法来实现：通过 AWG 和 DAC 产生 8 阶强度信号或者采用 3 个幅度不同的电信号来获得 8 阶强度的电信号。再对这两种方式产生的信号分别调制 IQ 的同向分量和正交分量，从而实现光 64QAM 的调制^[6]。这种方法使用方便，并且通过改变 AWG 输出信号的阶数，可以实现 128QAM 等其他高阶调制信号，缺点是比较容易受到 DAC 速率和精度的限制。

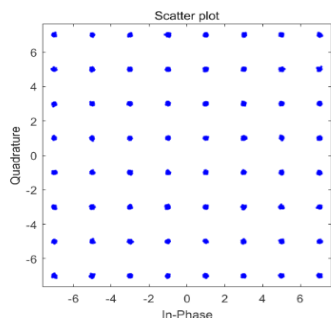


图 3 64QAM 信号星座图

2.2 高阶调制中的关键技术

由于高阶调制信号中符号间的最小欧式距离会变得更小，因此更容易受到信道中诸如色散、非线性等效应的干扰影响，使信号的传输效率降低，同时也加大了后续的 DSP 处理的难度和复杂度。

在光纤信道中，基于马尔科夫 (Manakov) 方程即改进的非线性薛定谔方程可以描述光纤传播中平均两偏振态的功率和相位的关系：

$$\frac{\partial A_{x,y}}{\partial(-z)} = \frac{\alpha}{2} A_{x,y} + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_{x,y}}{\partial t^2} - j \frac{8\gamma}{9} (|A_x|^2 + |A_y|^2) A_{x,y} = \left(\hat{D} + \hat{N} \right) A_{x,y} \quad (1)$$

其中：

$$\hat{D} = \frac{\alpha}{2} A_{x,y} + j \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A_{x,y}}{\partial t^2}$$

$$\hat{N} = -j \frac{8\gamma}{9} (|A_x|^2 + |A_y|^2) \quad (2)$$

其中， $A_{x,y}$ 是 x/y 极化状态中缓慢变化的复数场包络， z 和 t 分别是空间和时间坐标。光纤参数 α 、 β_2 和 γ 分别定义为衰减系数，色散参数和非线性系数。上述非线性薛定谔方程描述了单偏振的光脉冲在光线中传播的各种效应，主要包含了三个部分，右边的第一项表示了光脉冲的损耗，第二项描述了光纤色散，而第三项描述了光纤的克尔非线性效应（包括自相位调制、交叉相位调制和四波混频效应）带来的相位变化。 \hat{D} 称为线性算子， \hat{N} 称为非线性算子，整个马尔科夫 (Manakov) 方程可简化为由线性算子与非线性算子所主导。随着调制格式阶数的增多，所受到的非线性影响会增大，因此非线性损伤补偿是高阶调制的关键技术之一。

在相干光通信系统中，概率整形是采用常数结构分布匹配 (CCDM)，它可将均匀分布的数据调整成任意概率分布的数据，从而对 QAM 信号的同相与正交分量信号幅度进行概率分布，使信号符号保持均匀分布，并与前向纠错相结合进行联合编码，实现逼近香农容量极限的技术。随着调制格式阶数的增多，概率整形所采用的整形架构变复杂，CCDM 方法需要较长数据序列才能获得较高的计算精度，具有计算时间长的弊端，因此低复杂度概率整形是高阶调制的关键技术之一。

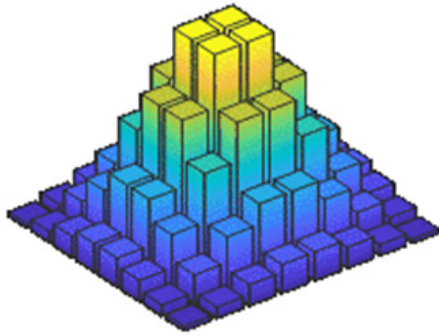


图 4 概率整形 64QAM 信号星座图

3 多芯少模光纤

多芯光纤是实现空分复用的重要技术，通过在一个包层中设置多个纤芯以及在纤芯中采用模分复用，极大的提升了信道容量。同时，由于纤芯中的模式数比多模光纤要少，也降低了光纤中模式色散以及模式耦合对光信号传输的影响，从而延长了通信距离。但是信号在多芯少模光纤进行传输时，除了受到常见的光纤衰减、色散和非线性等效应的干扰，还会受到芯间串扰以及模式耦合的影响，因此对于这两种效应的研究将会成为多芯少模光纤中的关键技术。图 5 为光信号在多芯少模光纤中的传输示意图。

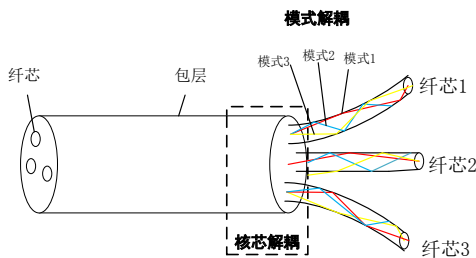


图 5 多芯少模光纤传输示意图

3.1 芯间串扰

多芯光纤芯间串扰的本质是相邻纤芯模式之间的相互耦合，当多芯光纤中相邻的纤芯接近时，光纤中传输的模式就会发生耦合，通常以微扰法来分析耦合的传输特征^[8]，但是建立在传统单模光纤耦合器的波导理论并不适用于多芯光纤中的芯间串扰，因为在实际的多芯光纤信道中，在纵向距离上寻在着结构的不均匀性以及波动性，使用中的弯曲等因素也会对波导耦合产生影响，并且这些扰动的因素都是随机的。因此，多芯光纤中的芯间串扰是一个具有统计特征的随机量，为了准确的分析芯间串扰，必须要把这些随机因素引入到模式耦合理论中。

我们以双芯光纤来分析芯间串扰，在光纤弯曲半径一定的条件下，耦合电场的离散变化可以用下式来表示^[9]。

$$\begin{aligned}
 & A_{n,N} = A_{n,N-1} \\
 & -jK_{nm} \exp[-j\phi_{rd}(N)] A_{m,N-1} \\
 & = A_{n,0} - jK_{nm} \sum_{l=1}^N \exp[-j\phi_{rd}(l)] A_{m,l-1}
 \end{aligned} \tag{3}$$

其中， $A_{n,N}$ 表示第 N 个相位匹配点后耦合到 n 芯的电场强度， K_{nm} 表示 m 芯到 n 芯的耦合系数， ϕ_{rd} 表征 m 芯和 n 芯之间的相位偏移。我们令初始条件 m 芯注入光功率为 1， n 芯不注入光，在串扰足够低的情况下，即 $A_{n,N} \ll 1, A_{m,l} \cong 1$ 串扰可以表示为 $|A_{n,N}|^2$ ，耦合电场的变化为：

$$A_{n,N} = -jK_{nm} \sum_{l=1}^N \exp[-j\phi_{rd}(l)] \tag{4}$$

假设相位偏移 ϕ_{rd} 为随机过程的有限样本，在 $(0,2\pi)$ 上均匀分布，由此可知 $K_{nm} \exp[-j\phi_{rd}(l)]$ 的实部和虚部均为 0，方差为 $\frac{|K_{nm}|^2}{2}$ ，当有很多个随机均匀分布相位项相加之后，所得结果的实部与虚部是满足高斯分布的，它们的方差是与相加的个数有关，即实部和虚部均值为 0，方差为 $\frac{N|K_{nm}|^2}{2}$ 的高斯分布。此外，如果纤芯的结构相同，耦合系数 K_{nm} 可以表示为 $K_{nm}=K_{mn}$ 。由于 $A_{n,N}$ 的实部和虚部都是高斯分布，那么串扰 $A_{n,N}$ 即为自由度为 2 的卡方分布。如果考虑偏振，即串扰与偏振互相独立，那么串扰是自由度为 4 的卡方分布。

3.2 模式耦合

假设光沿 z 方向传播，并且定义 (x,y) 为横向平面。未扰动的折射率分布的平方为 $n_0^2(x,y)$ 。通过求解依赖于 $n_0^2(x,y)$ 的波动方程，获得了关于 D 正交理想的传播模式场为：

$$E_{\mu}(x,y), \mu = 1, \dots, D \tag{5}$$

其中，传播常数为 $\beta_{\mu}, \mu = 1, \dots, D$ 。在正交理想传播模式场基础上，任何传播场都可以描述为：

$$E(x,y,z) = \sum_{\mu=1}^D A_{\mu}(z) E_{\mu}(x,y) \tag{6}$$

其中 $A_{\mu}(x,y), \mu = 1, \dots, D$ 是复数值系数，描述每个传播模式的振幅和相位。如果光纤的折射率分布或几何形状受到干扰，由于 $E_{\mu}(x,y)$ 是未受干扰的光纤的本征模，它们会通过干扰耦合。如果忽略损耗，则通过场耦合方程描述传播和耦合：

$$\frac{dA_\mu}{dz} = -j\beta_\mu A_\mu + \sum_{\nu \neq \mu} C_{\mu\nu}(z) A_\nu \quad \mu = 1, \dots, D \quad (7)$$

等式右侧第一项描述未耦合传播，第二项描述耦合。因此，传播场可以描述为：

$$E(x, y) = \sum_{\mu} A_\mu(z) E_\mu(x, y) \exp(-j\beta_\mu z) \quad (8)$$

假设折射率受到较小扰动的影响，可以将其分解为横向和纵向相关性。折射率分布可描述为：

$$n^2(x, y, z) = n_0^2(x, y) + \delta n^2(x, y) f(z) \quad (9)$$

因此，场耦合方程中，复值场耦合系数与以下项成正比：

$$C_{\mu\nu}(z) \propto \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta n^2(x, y) E_\nu^*(x, y) \cdot E_\mu(x, y) dx dy \cdot f(z) \quad (10)$$

式中的第一个因素是一个重叠积分，描述了指数扰动的横向依赖性描述了不同模式的场分布耦合，并确定了模式耦合的耦合原则。

4 仿真结果

本次仿真建立的光纤信道为双芯同质光纤，即两根纤芯的参数相同，两根光纤的纤芯折射率为 1.5，包层折射率设为 1.4955，纤芯的半径为 4.8μm，改变两根光纤的弯曲度以及芯间距离，通过模式耦合方程可以求得不同的模式耦合系数，进而通过 2.1 节可以求得芯间串扰。

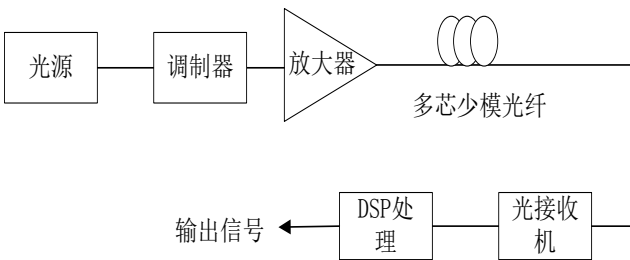


图 6 传输系统模型

本次仿真系统如图 6 所示，在发射端产生中心波长为 1550nm，比特率为 100Gbit/s 的光信号，经过调制成为高阶调制信号，在进入信道之前，先经过光放大器放大信道，然后进入多芯少模光纤进行传输。在信道中对光信号加入高斯白噪声、芯间串扰、色散以及非线性效应。具体步骤为：先把光纤分为个 k_1 个步长，计算 PMD，然后在每个 PMD 段内再分为 k_2 段，采用傅里叶方法计算色散为非线性：把每个小段平均分为两部分，先对前半部分添加色散，再对整个

小段光纤添加非线性，最后对后半部分再添加色散。总共有 $k_1 \cdot k_2$ 。最后把每个分布式傅里叶方法的步长分为 k_3 段进行串扰计算，一共有 $k_1 \cdot k_2 \cdot k_3$ 段。得到的仿真结果如图 7 所示。

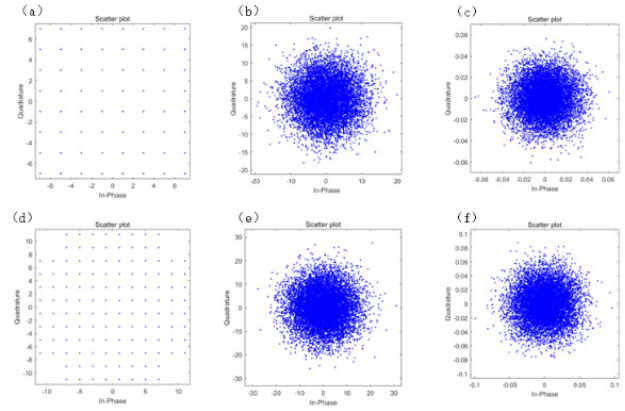


图 7 高阶调制信号以及经过多芯少模信道的输出

其中，(a) 为 64QAM 信号，(b) 和 (c) 分别是其经过不同纤芯的输出；(d) 为 128QAM 信号，(e) 和 (f) 分别是其经过不同纤芯的输出

将接受到的受损伤的信号进行 DSP 处理，以得到原始发送数据。本次仿真采用的 DSP 方法是级联恒模算法 (CMMA)。CMMA 算法通过利用发送序列的恒模特性和信道输出的高阶统计量，用以消除各个模式与恒模之间的误差值^[10]。搭建的 CMMA 算法的盲均衡器如图 8 示。

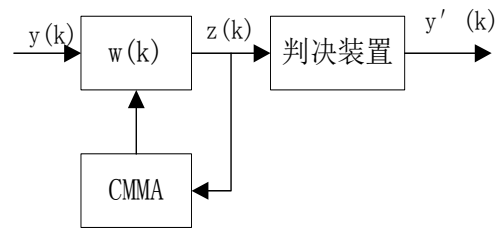


图 8 CMMA 算法的盲均衡器示意图

其中 $y(k)$ 是接收端接受到的信号， $w(k)$ 是长度为 $2N+1$ 的均衡器权向量， N 值大小由抽头器个数决定， $w(k) = [w_{-N}(k), \dots, w_0(k), \dots, w_N(k)]$ ， $z(k)$ 是均衡器输出的信号， $y'(k)$ 是 $z(k)$ 经过判决后输出的最终信号。通过 CMMA 迭代公式

$$w(k+1) = w(k) - 2\mu \left(|z(k)|^2 - R^2 \right) y^*(k) z(k) \quad (11)$$

再经过判决之后即可得到经过 DSP 补偿的信号。其中 μ 为迭代步长， R^2 为 CMMA 模值， $y^*(k)$ 是 $y(k)$ 的共轭。经过 DSP 补偿的最终输出信号如图 9 所示。

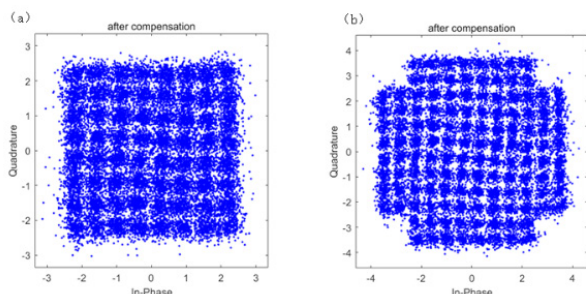


图9 接收信号经过 DSP 判决输出后的最终结果

其中，(a) 64QAM 信号，(b) 128QAM 信号。

5 结语

论文提出了一种基于高阶调制信号和多芯少模光纤的光无线融合传输系统。研究表明，本次搭建的系统能传输 64QAM、128QAM 等高阶调制信号，且能对接收到的信号进行 DSP 信号处理和算法均衡。上述方法将成为未来大容量 5G 前传网络的一个重要参考方案。

参考文献

[1] Guo X,Wang Q,Li X, et al. First demonstration of OFDM ECDMA for low cost optical access networks[J]. Optics Letters,2015, 40(10):2353.
 [2] Fang Y,Yu J,Zhang J,et al.Ultrahigh-capacity access network

architecture for mobile data backhaul using integrated W-band wireless and free-space optical links with OAM multiplexing[J]. Optics Letters,2014,39(14):4168.
 [3] 欧阳钦,王宏斌.网络与专业网管远程统管与排障方案分析[J].软件,2015,36(5):121-124
 [4] 任忠良.一种基于 SIFT 特征的快速图像匹配算法[J].软件,2015,36(6):53-57
 [5] 皮祖成,陈文,马龙,等.面向对象的无人机任务设备通信接收软件设计[J].软件,2018(07):63-67.
 [6] 余建军,迟楠,陈林.基于数字信号处理的相干光通信技术[M].北京:人民邮电出版社,2013:10
 [7] 李博睿.基于多芯光纤的空分复用光传输系统基础理论与关键技术研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
 [8] Snyder A W, Love J. Optical waveguide theory[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
 [9] Hayashi T,Taru T,Shimakawa O,et al.Design and fabrication of ultra-low crosstalk and low-loss multi-core fiber[J]. Optics express, 2011, (17):16576-16592.
 [10] Li Y, Liu K J R. Adaptive blind source separation and equalization for multiple-input/multiple-output systems[J]. IEEE Transactions on Information Theory,1998,44(7).