



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 113726433 B

(45) 授权公告日 2022.09.06

(21) 申请号 202110801844.6

(22) 申请日 2021.07.15

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 113726433 A

(43) 申请公布日 2021.11.30

(66) 本国优先权数据
202110666550.7 2021.06.16 CN

(73) 专利权人 暨南大学
地址 510632 广东省广州市天河区黄埔大
道西601号

专利权人 香港理工大学深圳研究院

(72) 发明人 周骥 王海德 余长源

(74) 专利代理机构 广州知友专利商标代理有限
公司 44104

专利代理师 宣国华 何秋林

(51) Int. Cl.

H04B 10/2513 (2013.01)

H04B 10/54 (2013.01)

H04B 10/556 (2013.01)

H04B 10/079 (2013.01)

(56) 对比文件

US 2013183040 A1, 2013.07.18

US 2020169273 A1, 2020.05.28

CN 107634814 A, 2018.01.26

CN 111130650 A, 2020.05.08

范哲等. 光纤OFDM系统中的色散补偿技术研究.《激光技术》.2011, (第01期),

徐伟等. OFDM在光纤信道传输中的应用与性能.《中国新通信》.2012, (第22期),

Liang, WX (Liang, Weixian) [1]; Wang, HD (Wang, Haide). 56 Gbit/s 00K Signal in C-band Over 20 km Dispersion-Uncompensated Link Transmission With Receiver-Side EDC Algorithm.《IEEE PHOTONICS JOURNAL》.2021, 第12卷(第5期),

Zhe Li; M. Sezer Erkılınç Kai Shi; Eric Sillekens. SSBI Mitigation and the Kramers-Kronig Scheme in Single-Sideband Direct-Detection Transmission With Receiver-Based Electronic Dispersion Compensation.《Journal of Lightwave Technology》.2017, 第35卷(第10期),

(续)

审查员 余芳芳

权利要求书2页 说明书10页 附图5页

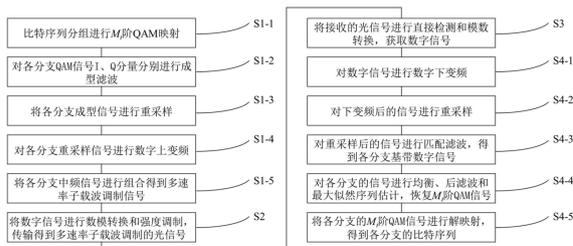
(54) 发明名称

一种多速率子载波调制信号收、发方法和系统

(57) 摘要

本发明涉及多速率子载波调制信号收、发方法和系统,其发送方法先根据光纤色散信道的零点信息,通过对比特序列进行分组和M_i阶映射,以灵活分配速率,再通过滚降升余弦滤波器对各分支进行成型滤波,以消除部分码间串扰,然后通过重采样,对成型滤波信号进行速率调整,以调整各分支的带宽,继而再通过对重采样信号进行数字上变频,实现频谱搬移,得到中心频率为f_i、带宽为B_i,成功避开各信道零点位置的各子

载波中频信号,最后,通过将各子载波信号相加得到多速率子载波调制信号。本发明发送方法能在灵活分配速率的同时,生成能灵活避开光纤色散信道频谱零点位置的、具有高色散容忍度的待发送信号。



CN 113726433 B

[接上页]

(56) 对比文件

Longsheng Li;Xiaoling Zhang;Deming Kong;Meihua Bi;Shi Jia.Digital-Analog Hybrid Optical Access Integrating 56-Gbps PAM-4 Signal and 5G mmWave Signal by Spectral Null Filling.《Journal of

Lightwave Technology》.2021,第39卷(第5期),
Wang, HD (Wang, Haide);Zhou, J (Zhou, Ji).Adaptive Channel-Matched Detection for C-Band 64-Gbit/s Optical OOK System Over 100-km Dispersion-Uncompensated Link.《JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY》.2020,第38卷(第18期),

1. 一种多速率子载波调制信号发送方法,用于发送基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;其特征在于,所述多速率子载波调制信号发送方法包括如下步骤:

步骤S1、根据光纤色散信道零点信息,设计子载波的数量 N ,各子载波的中心频率 f_i 和带宽 B_i ,避开信道零点位置,生成所述多速率子载波调制信号,其中 $i=1,2,\dots,N$,具体过程如下:

步骤S1-1、将待发射的比特序列分为 N 组,对每一组的比特流进行 M_i 阶映射;

步骤S1-2、对各分支信号的I、Q分量分别进行成型滤波,得到成型滤波信号;

步骤S1-3、对所述步骤S1-2输出的信号以相应的采样比进行重采样,得到不同速率的各带宽为 B_i 的子载波重采样信号;

步骤S1-4、对所述步骤S1-3输出的信号进行数字上变频,得到各中心频率为 f_i 的子载波中频信号;

步骤S1-5、对所述步骤S1-4输出的 N 个子载波中变频信号进行组合,得到待发射的所述多速率子载波调制信号;

步骤S2、对步骤S1输出的所述多速率子载波调制信号进行数模转化和强度调制,得到多速率子载波调制光信号,最后进行光纤传输。

2. 根据权利要求1所述的发送方法,其特征在于,步骤S1-1中所述光纤色散信道零点信息,通过光纤信道频率响应理论公式 $H(f) = \cos(2\pi^2\beta_2Lf^2)$ 计算得到,其中, β_2 为色散系数, L 为光纤长度;或通过传输一组信号对实际信道频率响应进行估计得到。

3. 根据权利要求1所述的发送方法,其特征在于,步骤S1-1中的映射采用常规QAM星座映射、概率星座整形QAM映射或PAM映射。

4. 根据权利要求1所述的发送方法,其特征在于,步骤S1-2中所述成型滤波由滚降升余弦滤波器实现,其冲激响应为:

$$g_i(n) = \frac{\sin \pi(1 - \beta_i)n/T_i + 4\beta_in/T_i \cdot \cos \pi(1 + \beta_i)n/T_i}{\pi t/T_i [1 - (4\beta_in/T_i)^2]}$$

其中, β_i 为第 i 组滚降升余弦滤波器的滚降系数, T_i 是符号持续时间。

5. 一种与权利要求1-4任一所述发送方法适配的多速率子载波调制信号接收方法,用于接收基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;其特征在于,所述多速率子载波调制信号接收方法包括如下步骤:

步骤S3、将经过光纤传输后的光信号进行直接检测和模数转换,获取数字信号;

步骤S4、对步骤S3中的所述数字信号进行恢复处理,具体包括如下分步骤:

步骤S4-1、对所述数字信号进行数字下变频操作,得到数字下变频信号I和Q分量;

步骤S4-2、对下变频后的信号进行重采样;

步骤S4-3、对重采样后的信号进行匹配滤波,得到各分支基带数字信号;

步骤S4-4、对各分支基带数字信号进行均衡、后滤波和最大似然序列估计,恢复 M_i 阶映射信号;

步骤S4-5、将各分支的 M_i 阶映射信号进行解映射,得到各分支的比特序列。

6. 根据权利要求5所述的接收方法,其特征在于,步骤S4-4中最大似然序列估计采用Viterbi算法或BCJR算法。

7. 一种多速率子载波调制信号发送系统,用于发送基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;其特征在于,包括:

多速率子载波调制信号生成单元,其用于根据光纤色散信道零点信息,设计子载波的数量 N ,各子载波的中心频率 f_i 和带宽 B_i ,避开信号零点位置,生成所述多速率子载波调制信号,其中 $i=1,2,\dots,N$;

数模转换器,用于将所述多速率子载波调制信号进行数模转化;

电光调制器,用于将所述数模转换器输出的模拟电信号进行强度调制,得到待进行光纤传输的多速率子载波调制光信号;

其中,所述多速率子载波调制信号生成单元包括:

比特分组子单元,用于将待发射的比特序列分为 N 组;

映射子单元,用于将每组待发射的比特序列进行 M_i 阶映射,得到映射信号;

成型滤波子单元,用于对各组所述映射信号的 I 和 Q 分量分别进行成型滤波,得到各组 I 和 Q 分量成型滤波信号;

重采样子单元,用于对各组所述 I 和 Q 分量成型滤波信号以相应的采样比进行重采样,得到不同速率的各带宽为 B_i 的子载波重采样信号;

数字上变频子单元,用于对所述子载波重采样信号进行数字上变频操作,得到各中心频率为 f_i 的子载波中频信号;

加法器子单元,用于在时域上对所述子载波中频信号进行求和,得到所述多速率子载波调制信号。

8. 一种与权利要求7所述发送系统适配的多速率子载波调制信号接收系统,用于接收基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;其特征在于,包括:

光电探测器,用于对接收的光调制信号进行直接检测,得到模拟电信号;

模数转换器,用于将所述模拟电信号转换为数字信号;

多速率子载波调制信号恢复单元,用于恢复所述多速率子载波调制信号,其包括:

数字下变频子单元,用于将接收转换后的数字信号进行数字下变频操作,得到数字下变频信号 I 和 Q 分量;

重采样子单元,用于对所述数字下变频信号 I 和 Q 分量进行重采样;

匹配滤波子单元,用于对重采样后的各组数字下变频信号 I 和 Q 分量进行匹配滤波,得到各组 I 和 Q 分量成型滤波信号;

均衡器子单元,用于对各组 I 和 Q 分量成型滤波信号进行组合,得到复数信号,对复数信号进行均衡处理,得到均衡信号;

后滤波和最大似然序列估计子单元,用于对所述均衡信号进行后滤波处理,降低带内的高频噪声,和对降噪后的信号进行最大似然序列估计,恢复 M_i 阶映射信号;

解码器子单元,用于对各分组的 M_i 阶映射信号进行解映射,得到各分组的比特序列。

一种多速率子载波调制信号收、发方法和系统

技术领域

[0001] 本发明涉及光通信技术,具体的说涉及一种具有灵活速率分配和高色散容忍度的多速率子载波调制光通信数据的收、发方法和系统。

背景技术

[0002] 近年来,4K/8K高清电视、增强现实/虚拟现实和边缘云计算等应用正在推动全球数据流量的增长。为了满足日益增长的容量需求,具有低成本、低功耗和体积小等优点的强度调制和直接检测系统一直备受业界关注。然而,传输损耗较低的C波段强度调制和直接检测系统却面临着光纤色散带来的功率衰落的挑战。在C波段强度调制和直接检测光纤通信系统中,光纤色散信道引起的信号频谱零点损伤问题(光纤色散信道对信号频率整体均存在损伤,在频谱零点位置最为严重),是限制系统容量距离积提升的主要障碍。

[0003] 为了解决光纤色散带来的信号频谱零点损伤问题,常用色散补偿模块对光纤色散进行补偿,但是需要对不同长度的光纤链路定制色散补偿模块,同时色散补偿模块会引入较大的插入损耗。此外,复数信号调制方案在抵抗色散方面受到了越来越多的关注,主要包括光单边带调制和色散预补偿。强度调制和相干检测结合的方案也可用于色散补偿。然而,这些方案需要复杂的发射机或复杂的收发机。在强度调制/直接检测光通信系统中,数字信号处理也可以有效补偿色散导致的频谱零点损伤,但是通常算法复杂度较高。采用比特和功率分配的离散多音调制也具有一定的色散容忍度,但其峰值平均功率比相对较高,导致光调制效率较低。

[0004] 因此,研究一种同时具有灵活速率分配和高色散容忍度的强度调制/直接检测光通信系统,具有重要的实用性和现实意义。

发明内容

[0005] 本发明所要解决的技术问题是,提出一种同时具有灵活速率分配和高色散容忍度的多速率子载波调制光通信数据收、发方法和系统。

[0006] 为了解决上述技术问题,本发明采取的技术方案如下:

[0007] 一种多速率子载波调制信号发送方法,用于发送基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;所述多速率子载波调制信号发送方法包括如下步骤:

[0008] 步骤S1、根据光纤色散信道零点信息,设计子载波的数量 N ,各子载波的中心频率 f_i 和带宽 B_i ,避开信道零点位置,生成所述多速率子载波调制信号,其中 $i=1,2,\dots,N$,具体过程如下:

[0009] 步骤S1-1、将待发射的比特序列分为 N 组,对每一组的比特流进行 M_i 阶映射;

[0010] 步骤S1-2、对各分支信号的I、Q(In-phase and quadrature,同相和正交)分量分别进行成型滤波,得到成型滤波信号;

[0011] 步骤S1-3、对所述步骤S1-2输出的信号以相应的采样比进行重采样,得到不同速率的各带宽为 B_i 的子载波重采样信号;

[0012] 步骤S1-4、对所述步骤S1-3输出的信号进行数字上变频,得到各中心频率为 f_i 的子载波中频信号;

[0013] 步骤S1-5、对所述步骤S1-4输出的N个子载波中变频信号进行组合,得到待发射的所述多速率子载波调制信号;

[0014] 步骤S2、对步骤S1输出的所述多速率子载波调制信号进行数模转化和强度调制,得到多速率子载波调制光信号,最后进行光纤传输。

[0015] 本发明的多速率子载波调制信号发送方法,先根据光纤色散信道的零点信息,如图1所示,通过步骤S1-1对比特序列进行分组和 M_i 阶映射,以灵活分配速率,这里的映射常采用QAM(QuadratureAmplitudeModulation,正交幅度调制)映射或PAM映射,再通过步骤S1-2用滚降升余弦滤波器对各分支进行成型滤波,以消除部分码间串扰,然后通过步骤S1-3重采样,对成型滤波信号进行速率调整,以调整各分支的带宽,继而通过步骤S1-4对重采样信号进行数字上变频,实现频谱搬移,得到中心频率为 f_i 、带宽为 B_i ,成功避开各信道零点位置的各子载波中频信号,最后,通过步骤S1-5将各子载波信号相加得到多速率子载波调制信号,实现多速率子载波调制信号的生成。

[0016] 步骤S1-1中所述光纤色散信道零点信息,可以通过光纤信道频率响应理论公式 $H(f) = \cos(2\pi^2\beta_2 L f^2)$ 计算得到,其中, β_2 为色散系数, L 为光纤长度;也可以通过传输一组信号对实际信道频率响应进行估计得到。

[0017] 通过上述两种办法,均可以得到光纤色散信道零点的数量和位置信息,进而确定分支的数量N、每个子载波的中心频率和所携带信号的速率。

[0018] 所述QAM映射可以是常规QAM星座映射,也可以是概率星座整形QAM映射。

[0019] 步骤S1-2中所述成型滤波可以由滚降升余弦滤波器实现,其冲激响应为:

$$[0020] \quad g_i(n) = \frac{\sin \pi(1 - \beta_i)n/T_i + 4\beta_i n/T_i \cdot \cos \pi(1 + \beta_i)n/T_i}{\pi t/T_i [1 - (4\beta_i n/T_i)^2]}$$

[0021] 其中, β_i 为第i组滚降升余弦滤波器的滚降系数, T_i 是符号持续时间。

[0022] 步骤S1-4中对所述步骤S1-3输出的信号进行数字上变频,得到各子载波I和Q中频信号,可以分别表示为

$$[0023] \quad s_{I,i}(n) = \sum_k \left[R_{i,k} g \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \cos 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \right]$$

$$[0024] \quad s_{Q,i}(n) = \sum_k \left[I_{i,k} g \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \sin 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \right]$$

[0025] 其中, F_s 是采样率, R_i 和 I_i 分别为所述步骤S1-3输出的重采样I和Q分量, k 表示第k个符号的索引, $R_{i,k}$ 为第i分支的第k个重采样信号的I分量, $I_{i,k}$ 为第i分支的第k个重采样信号的Q分量。

[0026] 步骤S1-5中所述多速率子载波调制信号,可以表示为

$$\begin{aligned}
 [0027] \quad s(n) &= \sum_{i=1}^N s_{I,i}(n) + s_{Q,i}(n) \\
 &= \sum_{i=1}^N \sum_k \left[R_{i,k} g \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \cos 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right) + I_{i,k} g \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \sin 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \right]
 \end{aligned}$$

[0028] 本发明还提供一种多速率子载波调制信号接收方法,用于接收基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;所述多速率子载波调制信号接收方法包括如下步骤:

[0029] 步骤S3、将经过光纤传输后的光信号进行直接检测和模数转换,获取数字信号;

[0030] 步骤S4、对步骤S3中的所述数字信号进行恢复处理:

[0031] 步骤S4-1、对所述数字信号进行数字下变频操作,得到数字下变频信号I和Q分量;

[0032] 步骤S4-2、对下变频后的信号进行重采样;

[0033] 步骤S4-3、对重采样后的信号进行匹配滤波,得到各分支基带数字信号;

[0034] 步骤S4-4、对各分支基带数字信号进行均衡、后滤波和最大似然序列估计,恢复 M_1 阶映射信号;

[0035] 步骤S4-5、将各分支的 M_1 阶映射信号进行解映射,得到各分支的比特序列。

[0036] 步骤S4-1将接收到的数字信号进行数字下变频,得到各分支信号的I和Q分量,步骤S4-2对变频后的信号进行重采样,步骤S4-3对重采样后的信号进行匹配滤波,实现子载波信号的解调,步骤S4-4对各分支的信号进行均衡、后滤波和最大似然序列估计,恢复 M_1 阶映射信号,最后,将各分支的 M_1 阶映射信号进行解映射,得到各分支的比特序列,实现多速率子载波调制信号的恢复。

[0037] 步骤S4-1中对所述数字信号进行数字下变频操作,得到的数字下变频信号I和Q分量可以分别表示为:

$$[0038] \quad m_{I,i}(n) = \sum_k \left[s(t) \otimes h(t) + z(t) \right] \Big|_{t=\frac{n}{F_s}} \times g \left(-n + \frac{k}{F_s} \right) \cos 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right)$$

$$[0039] \quad m_{Q,i}(n) = \sum_k \left[s(t) \otimes h(t) + z(t) \right] \Big|_{t=\frac{n}{F_s}} \times g \left(-n + \frac{k}{F_s} \right) \sin 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right)$$

[0040] 其中, z 为噪声, s 为所述多速率子载波调制信号, h 表示信道的冲激响应 g 为匹配滤波器的冲激响应。

[0041] 步骤S4-3中所述匹配滤波可以由滚降升余弦滤波器实现,对重采样后的信号进行匹配滤波,得到各分支基带数字信号,可以分别表示成:

$$[0042] \quad y_{I,i}(n) \propto \frac{1}{2} \times R_{i,k} \otimes h(t) + z'(t) \Big|_{t=\frac{n}{F_s}}$$

$$[0043] \quad y_{Q,i}(n) \propto \frac{1}{2} \times I_{i,k} \otimes h(t) + z'(t) \Big|_{t=\frac{n}{F_s}}$$

[0044] 其中, R 和 I 分别为步骤S4-2的I和Q分量重采样信号, z' 为重采样后的噪声。

[0045] 步骤S4-4中所述后滤波用于对所述均衡后的噪声进行白化处理,抑制由均衡放大的噪声高频分量,其输出可以表示成:

$$[0046] \quad p_i(n) = q_i(n) + \alpha \times q_i(n-1)$$

- [0047] 其中, α 为后滤波器抽头系数, q_i 表示第*i*个分支经过均衡后的信号。
- [0048] 最大似然序列估计可以用Viterbi算法或BCJR算法实现。
- [0049] 本发明另外还提供一种具有灵活速率分配和高色散容忍度的光通信数据收、发系统,采取的技术方案分别如下:
- [0050] 一种多速率子载波调制信号发送系统,用于发送基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;包括:
- [0051] 多速率子载波调制信号生成单元,其用于根据光纤色散信道零点信息,设计子载波的数量*N*,各子载波的中心频率 f_i 和带宽 B_i ,避开信号零点位置,生成所述多速率子载波调制信号,其中 $i=1,2,\dots,N$;
- [0052] 数模转换器,用于将所述多速率子载波调制信号进行数模转化;
- [0053] 电光调制器,用于将所述数模转换器输出的模拟电信号进行强度调制,得到待进行光纤传输的多速率子载波调制光信号;
- [0054] 其中,所述多速率子载波调制信号生成单元包括:
- [0055] 比特分组子单元,用于将待发射的比特序列分为*N*组;
- [0056] 映射子单元,用于将每组待发射的比特序列进行 M_i 阶映射,得到映射信号;
- [0057] 成型滤波子单元,用于对各组所述映射信号的I和Q分量分别进行成型滤波,得到各组I和Q分量成型滤波信号;
- [0058] 重采样子单元,用于对各组所述I和Q分量成型滤波信号以相应的采样比进行重采样,得到不同速率的各带宽为 B_i 的子载波重采样信号;
- [0059] 数字上变频子单元,用于对所述子载波重采样信号进行数字上变频操作,得到各中心频率为 f_i 的子载波中频信号;
- [0060] 加法器子单元,用于在时域上对所述子载波中频信号进行求和,得到所述多速率子载波调制信号。
- [0061] 一种多速率子载波调制信号接收系统,用于接收基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;包括:
- [0062] 光电探测器,用于对接收的光调制信号进行直接检测,得到模拟电信号;
- [0063] 模数转换器,用于将所述模拟电信号转换为数字信号;
- [0064] 多速率子载波调制信号恢复单元,用于恢复所述多速率子载波调制信号,其包括:
- [0065] 数字下变频子单元,用于将接收转换后的数字信号进行数字下变频操作,得到数字下变频信号I和Q分量;
- [0066] 重采样子单元,用于对所述数字下变频信号I和Q分量进行重采样;
- [0067] 匹配滤波子单元,用于对重采样后的各组数字下变频信号I和Q分量进行匹配滤波,得到各组I和Q分量成型滤波信号;
- [0068] 均衡器子单元,用于对各组I和Q分量成型滤波信号进行组合,得到复数信号,对复数信号进行均衡处理,得到均衡信号;
- [0069] 后滤波和最大似然序列估计子单元,用于对所述均衡信号进行后滤波处理,降低带内的高频噪声,和对降噪后的信号进行最大似然序列估计,恢复 M_i 阶映射信号;
- [0070] 解码器子单元,用于对各分组的 M_i 阶映射信号进行解映射,得到各分组的比特序列。

[0071] 另外需要说明的是,当所述光调制信号为QAM信号(正交幅度调制信号)时,各个子载波可以采样常规的每符号携带整数比特的QAM方案,也可以采样概率星座整形后每符号携带非整数比特的QAM方案。

[0072] 与现有技术相比,本发明具有以下有益效果:

[0073] 本发明多速率子载波调制信号收、发方法和系统提供了一种针对强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号的收、发方法和相应的收、发系统,在发射端,其先根据光纤色散信道零点信息,确定子载波的数量、中心频率和所携带信号的带宽,再在灵活分配速率的同时,生成能灵活避开光纤色散信道频谱零点位置的、具有高色散容忍度的多速率子载波调制信号。由于发射端发射的多速率子载波调制信号,本身避开了信道零点位置,所以经信道传输后,受信道色散影响而损失的功率大大减少,随着接收光功率的增加,误码率能很容易的达到20%的软判决前向纠错门限甚至7%的硬判决前向纠错门限,如图8所示。可见,相比于现有技术,本发明方法或系统,在能够灵活地进行速率分配的同时,还具有很高的色散容忍能力。

附图说明

[0074] 图1为本发明中多速率子载波调制信号频谱处理的结构示意图;

[0075] 图2为本发明较佳实施例的多速率子载波调制信号收、发方法的流程图;

[0076] 图3为本发明较佳实施例的多速率子载波调制信号收、发系统的结构示意图;

[0077] 图4为信道频率响应的示例图;

[0078] 图5为经本实施例步骤S1生成的多速率子载波调制信号的频谱图;

[0079] 图6为通过实施例一发送方法发送的信号经过背靠背无色散链路传输后,通过实施例二接收时步骤S3得到的多速率子载波调制信号的频谱图;

[0080] 图7为通过实施例一发送方法发送的信号经过有色散链路传输后,通过实施例二接收时步骤S3得到的多速率子载波调制信号的频谱图;

[0081] 图8为通过本发明信号发送方法发送的信号分别经过背靠背和光纤色散信道传输和恢复后的接收光功率-误码率性能对比图。

具体实施方式

[0082] 下面结合实施例及其附图对本发明进行详细说明,以帮助本领域的技术人员更好的理解本发明的发明构思,但本发明权利要求的保护范围不限于下述实施例,对本领域的技术人员来说,在不脱离本发明之发明构思的前提下,没有做出创造性劳动所获得的所有其他实施方式,均应落入本发明的保护范围。

[0083] 实施例一

[0084] 一种多速率子载波调制信号发送方法,用于发送基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;如图2所示,所述多速率子载波调制数据发送方法包括如下步骤:

[0085] 步骤S1、如图1所示,根据光纤色散信道零点信息,设计子载波的数量 N ,各子载波的中心频率 f_i 和带宽 B_i ,避开信道零点位置,生成所述多速率子载波调制信号,其中 $i=1, 2, \dots, N$,具体过程如下:

[0086] 步骤S1-1、将待发射的比特序列分为 N 组,对每一组的比特流进行 M_i 阶QAM映射;

[0087] 步骤S1-2、对各分支的QAM信号I、Q分量分别进行成型滤波,得到成型滤波信号;

[0088] 步骤S1-3、对步骤S1-2输出的信号以相应的采样比进行重采样,得到不同速率的各带宽为 B_i 的子载波重采样信号;

[0089] 步骤S1-4、对所述步骤S1-3输出的信号进行数字上变频,得到各中心频率为 f_i 的子载波中频信号;

[0090] 步骤S1-5、对所述步骤S1-4输出的N个子载波中变频信号进行组合,得到待发射的所述多速率子载波调制信号;

[0091] 步骤S2、对步骤S1输出的所述多速率子载波调制信号进行数模转化和强度调制,得到多速率子载波调制光信号,最后进行光纤传输。

[0092] 本发明的多速率子载波调制信号发送方法,先根据光纤色散信道的零点信息,如图1所示,通过步骤S1-1对比特序列进行分组和 M_i 阶映射,以灵活分配速率,这里的映射常采用QAM(Quadrature Amplitude Modulation,正交幅度调制)映射或PAM映射,再通过步骤S1-2用滚降升余弦滤波器对各分支进行成型滤波,以消除部分码间串扰,然后通过步骤S1-3重采样,对成型滤波信号进行速率调整,以调整各分支的带宽,继而通过步骤S1-4对重采样信号进行数字上变频,实现频谱搬移,得到中心频率为 f_i 、带宽为 B_i ,成功避开各信道零点位置的各子载波中频信号,最后,通过步骤S1-5将各子载波信号相加得到多速率子载波调制信号,实现多速率子载波调制信号的生成。

[0093] 步骤S1-1中所述光纤色散信道零点信息,可以通过光纤信道频率响应理论公式 $H(f) = \cos(2\pi^2\beta_2 L f^2)$ 计算得到,其中, β_2 为色散系数,L为光纤长度。也可以通过传输一组信号对实际信道频率响应进行估计得到。

[0094] 通过上述两种办法,均可以得到光纤色散信道零点的数量和位置信息,进而确定分支的数量N、每个子载波的中心频率和所携带信号的速率。

[0095] 所述QAM映射可以是常规QAM星座映射,也可以是概率星座整形QAM映射。

[0096] 步骤S1-2中所述成型滤波可以由滚降升余弦滤波器实现,其冲激响应为:

$$[0097] \quad g_i(n) = \frac{\sin \pi(1 - \beta_i)n/T_i + 4\beta_i n/T_i \cdot \cos \pi(1 + \beta_i)n/T_i}{\pi n/T_i [1 - (4\beta_i n/T_i)^2]}$$

[0098] 其中, β_i 为第i组滚降升余弦滤波器的滚降系数, T_i 是符号持续时间。

[0099] 步骤S1-4中对所述步骤S1-3输出的信号进行数字上变频,得到各子载波I和Q中频信号,可以分别表示为

$$[0100] \quad s_{I,i}(n) = \sum_k \left[R_{i,k} g \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \cos 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \right]$$

$$[0101] \quad s_{Q,i}(n) = \sum_k \left[I_{i,k} g \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \sin 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \right]$$

[0102] 其中, F_s 是采样率, R_i 和 I_i 分别为所述步骤S1-3输出的重采样I和Q分量,k表示第k个符号的索引, $R_{i,k}$ 为第i分支的第k个重采样信号的I分量, $I_{i,k}$ 为第i分支的第k个重采样信号的Q分量。

[0103] 步骤S1-5中所述多速率子载波调制信号,可以表示为

$$\begin{aligned}
 [0104] \quad s(n) &= \sum_{i=1}^N s_{I,i}(n) + s_{Q,i}(n) \\
 &= \sum_{i=1}^N \sum_k \left[R_{i,k} g \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \cos 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right) + I_{i,k} g \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \sin 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right) \right]
 \end{aligned}$$

[0105] 实施例二

[0106] 一种多速率子载波调制信号接收方法,其用于接收实施例一发送的数据,如图2所示,其包括如下步骤:

[0107] 步骤S3、将经过光纤传输后的光信号进行直接检测和模数转换,获取数字信号;

[0108] 步骤S4、对步骤S3中的所述数字信号进行恢复处理,包括:

[0109] 步骤S4-1、对所述数字信号进行数字下变频操作,得到数字下变频信号I和Q分量;

[0110] 步骤S4-2、对下变频后的信号进行重采样;

[0111] 步骤S4-3、对重采样后的信号进行匹配滤波,得到各分支基带数字信号;

[0112] 步骤S4-4、对各分支基带数字信号进行均衡、后滤波和最大似然序列估计,恢复 M_1 阶QAM信号;

[0113] 步骤S4-4、将各分支的 M_1 阶QAM信号进行解映射,得到各分支的比特序列。

[0114] 步骤S4-1将接收到的数字信号进行数字下变频,得到各分支信号的I和Q分量,步骤S4-2对变频后的信号进行重采样,步骤S4-3对重采样后的信号进行匹配滤波,实现子载波信号的解调,步骤S4-4对各分支的信号进行均衡、后滤波和最大似然序列估计,恢复 M_1 阶映射信号,最后,将各分支的 M_1 阶映射信号进行解映射,得到各分支的比特序列,实现多速率子载波调制信号的恢复。

[0115] 步骤S4-1中对所述数字信号进行数字下变频操作,得到的数字下变频信号I和Q分量可以分别表示为:

$$[0116] \quad m_{I,i}(n) = \sum_k \left[s(t) \otimes h(t) + z(t) \right] \Big|_{t=\frac{n}{F_s}} \times g \left(-n + \frac{k}{F_s} \right) \cos 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right)$$

$$[0117] \quad m_{Q,i}(n) = \sum_k \left[s(t) \otimes h(t) + z(t) \right] \Big|_{t=\frac{n}{F_s}} \times g \left(-n + \frac{k}{F_s} \right) \sin 2\pi f_i \left(n - \frac{k}{F_s} \right)$$

[0118] 其中, z 为噪声, s 为所述多速率子载波调制信号, h 表示信道的冲激响应 g 为匹配滤波器的冲激响应。

[0119] 步骤S4-3中所述匹配滤波可以由滚降升余弦滤波器实现,对重采样后的信号进行匹配滤波,得到各分支基带数字信号,可以分别表示成:

$$[0120] \quad y_{I,i}(n) \propto \frac{1}{2} \times R_{i,k} \otimes h(t) + z'(t) \Big|_{t=\frac{n}{F_s}}$$

$$[0121] \quad y_{Q,i}(n) \propto \frac{1}{2} \times I_{i,k} \otimes h(t) + z'(t) \Big|_{t=\frac{n}{F_s}}$$

[0122] 其中, R 和 I 分别为步骤S4-2的I和Q分量重采样信号, z' 为重采样后的噪声。

[0123] 步骤S4-4中所述后滤波用于对所述均衡后的噪声进行白化处理,抑制由均衡放大的噪声高频分量,其输出可以表示成:

[0124] $p_i(n) = q_i(n) + \alpha \times q_i(n-1)$

[0125] 其中, α 为后滤波器抽头系数, q_i 表示第 i 个分支经过均衡后的信号。

[0126] 最大似然序列估计可以用Viterbi算法或BCJR算法实现。

[0127] 下面对实施例一发送的信号进行传输距离试验。本次试验传输距离为50公里。

[0128] 图4为实测的光纤色散信道频率响应的示例图,如图可见,除了光电器件的带宽限制引起的低通滤波效应以外,光纤色散效应引起了7个频谱零点(波谷位置),这将会对信号在零点附近的频率成分有非常强的功率衰落,最终严重影响误码率性能。

[0129] 图5为实施例一步骤S1-5生成的多速率子载波调制信号的频谱图,如图可见,经过多速率子载波调制后,在光纤色散效应引起的频谱零点附近没有信号,避开了频谱零点。

[0130] 图6为通过实施例一发送方法发送的信号经过背靠背无色散链路传输后,通过实施例二接收时步骤S3得到的多速率子载波调制信号的频谱图。如图可见,经过无色散链路传输后,接收到的信号仅存在由光电器件带宽限制引起的信号低通滤波损伤。说明,在链路不存在色散效应时,多速率子载波调制信号能够正常地传输。

[0131] 图7为通过实施例一发送方法发送的信号经过有色散链路传输后,通过实施例二接收时步骤S3得到的多速率子载波调制信号的频谱图。如图可见,经过色散链路的传输后,接收到的信号虽存在由光电器件带宽限制引起的信号低通滤波损伤,和光纤色散效应带来的各子载波信号的滤波损伤,但由于信号经实施例一步骤S1处理后,生成的多速率子载波调制信号,避开了信道零点,因此,步骤S3接收到的信号不存在频谱零点损伤,大大减少了信号受色散影响而损失的功率,从而使得其可以通过步骤S4顺利恢复。

[0132] 图8为通过本发明信号发送方法发送的信号分别经过背靠背和光纤色散信道传输和恢复后的接收光功率-误码率性能对比图。图6对应图8中的曲线“概率星座整形QAM(背靠背)”,图7对应图8中的曲线“概率星座整形QAM(50km)”。如图可见:

[0133] 需要提前说明的是,没有经过实施例一处理的信号,在整个信号带宽内都存在功率,即不存在图5中信号缺口,这种信号在经过光纤传输后,色散零点位置附近的信号会受到非常严重的影响,导致严重的功率衰落现象,由于信号受色散影响而损失的功率较多,即使增加接收光功率,误码率通常也达不到20%的软判决前向纠错门限,不能被正常恢复。

[0134] 而经过本实施例一处理的信号,如图8所述,经过背靠背的无色散链路传输后,采用常规的QAM调制,在接收光功率为-8dBm时,误码率可以达到20%软判决前向纠错门限;在接收光功率为-5dBm时,误码率可以达到7%硬判决前向纠错门限;采用概率星座整形QAM调制时,能够充分利用信噪比,在接收光功率为-9dBm时,误码率可以达到20%软判决前向纠错门限;在接收光功率为-7dBm时,误码率可以达到7%硬判决前向纠错门限;

[0135] 经过光纤色散链路传输后,采用常规QAM调制,在接收光功率达到-4dBm时,误码率能达到20%软判决前向纠错门限;在接收光功率达到-4dBm时,采用概率星座整形QAM调制时,其误码率达到7%硬判决前向纠错门限。

[0136] 结合图6、图7和图8可以证明,经本发明发送方法处理的信号,在背靠背和光纤色散信道均能实现正常传输。而且,可灵活避开光纤色散带来的频谱零点,有效容忍强度调制/直接检测光通信系统中的光纤信道损伤。相比基于传统的信号收、发方法,本发明还具有灵活的速率分配优势。

[0137] 实施例三

[0138] 如图3所示,实施例三公开了一种实现实施例一信号发送方法的系统,用于收发基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;本实施例的多速率子载波调制信号发送系统包括:

[0139] 多速率子载波调制信号生成单元,其用于根据光纤色散信道零点信息,设计子载波的数量 N ,各子载波的中心频率 f_i 和带宽 B_i ,避开信号零点位置,生成所述多速率子载波调制信号,其中 $i=1,2,\dots,N$;

[0140] 数模转换器,用于将所述多速率子载波调制信号进行数模转化;

[0141] 电光调制器,用于将所述数模转换器输出的模拟电信号进行强度调制,得到待进行光纤传输的多速率子载波调制光信号;

[0142] 其中,所述多速率子载波调制信号生成单元包括:

[0143] 比特分组子单元,用于将待发射的比特序列分为 N 组;

[0144] QAM映射子单元,用于将每组待发射的比特序列进行 M_i 阶QAM映射,得到QAM信号;QAM映射可以是常规QAM星座映射,也可以是概率星座整形QAM映射;

[0145] 成型滤波子单元,用于对上述各组QAM信号的I和Q分量分别进行成型滤波,得到各组I和Q分量成型滤波信号;

[0146] 重采样子单元,用于对每组所述I和Q分量成型滤波信号以相应的采样比进行重采样,得到不同速率的各带宽为 B_i 的子载波重采样信号;

[0147] 数字上变频子单元,用于对所述子载波重采样信号进行数字上变频操作,得到各中心频率为 f_i 的子载波中频信号;数字上变频可以用滚降升余弦滤波器实现;

[0148] 加法器子单元,用于在时域上对所述子载波中频信号进行求和,得到所述多速率子载波调制信号。

[0149] 实施例四

[0150] 如图3所示,实施例四公开了一种实现实施例三信号接收方法的系统,用于收发基于强度调制/直接检测光通信系统的光调制信号;本实施例的多速率子载波调制信号接收系统包括:

[0151] 光电探测器,用于对接收的光调制信号进行直接检测,得到模拟电信号;

[0152] 模数转换器,用于将所述模拟电信号转换为数字信号;

[0153] 多速率子载波调制信号恢复单元,用于恢复所述多速率子载波调制信号,其包括:

[0154] 数字下变频子单元,用于将接收转换后的数字信号进行数字下变频操作,得到数字下变频信号I和Q分量;

[0155] 重采样子单元,用于对所述数字下变频信号I和Q分量进行重采样;

[0156] 匹配滤波子单元,用于对重采样后的各组数字下变频信号I和Q分量进行匹配滤波,得到各组I和Q分量成型滤波信号;

[0157] 均衡器子单元,用于对每组I和Q分量成型滤波信号进行组合,得到复数信号,对复数信号进行均衡处理,得到均衡信号;

[0158] 后滤波和最大似然序列估计子单元,用于对所述均衡信号进行后滤波处理,降低带内的高频噪声,和对降噪后的信号进行最大似然序列估计,恢复 M_i 阶QAM信号;所述最大似然序列估计可以用Viterbi算法或BCJR算法实现;

[0159] 解码器子单元,用于对各分组的 M_i 阶QAM信号进行解映射,得到各分组的比特序

列。

[0160] 上面针对实施例一、二的传输距离试验,其试验过程和试验结果同样适用于实施三、四的信号收、发系统,在此不再赘述。

[0161] 本发明不局限于上述具体实施方式,根据上述内容,按照本领域的普通技术知识和惯用手段,在不脱离本发明上述基本技术思想前提下,本发明还可以做出其它多种形式的等效修改、替换或变更,均落在本发明的保护范围之内。

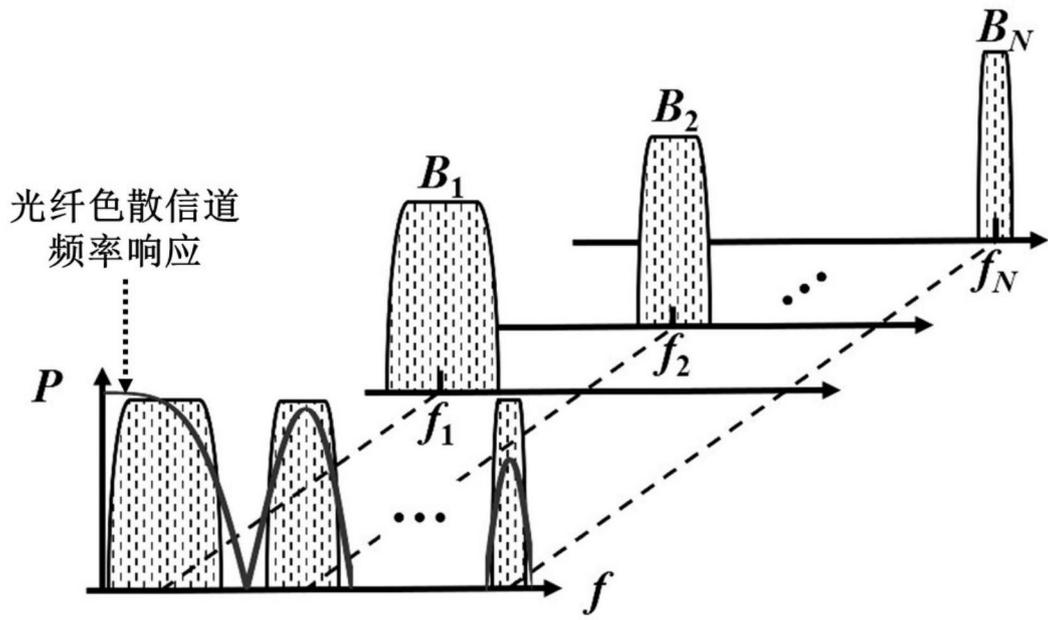


图1

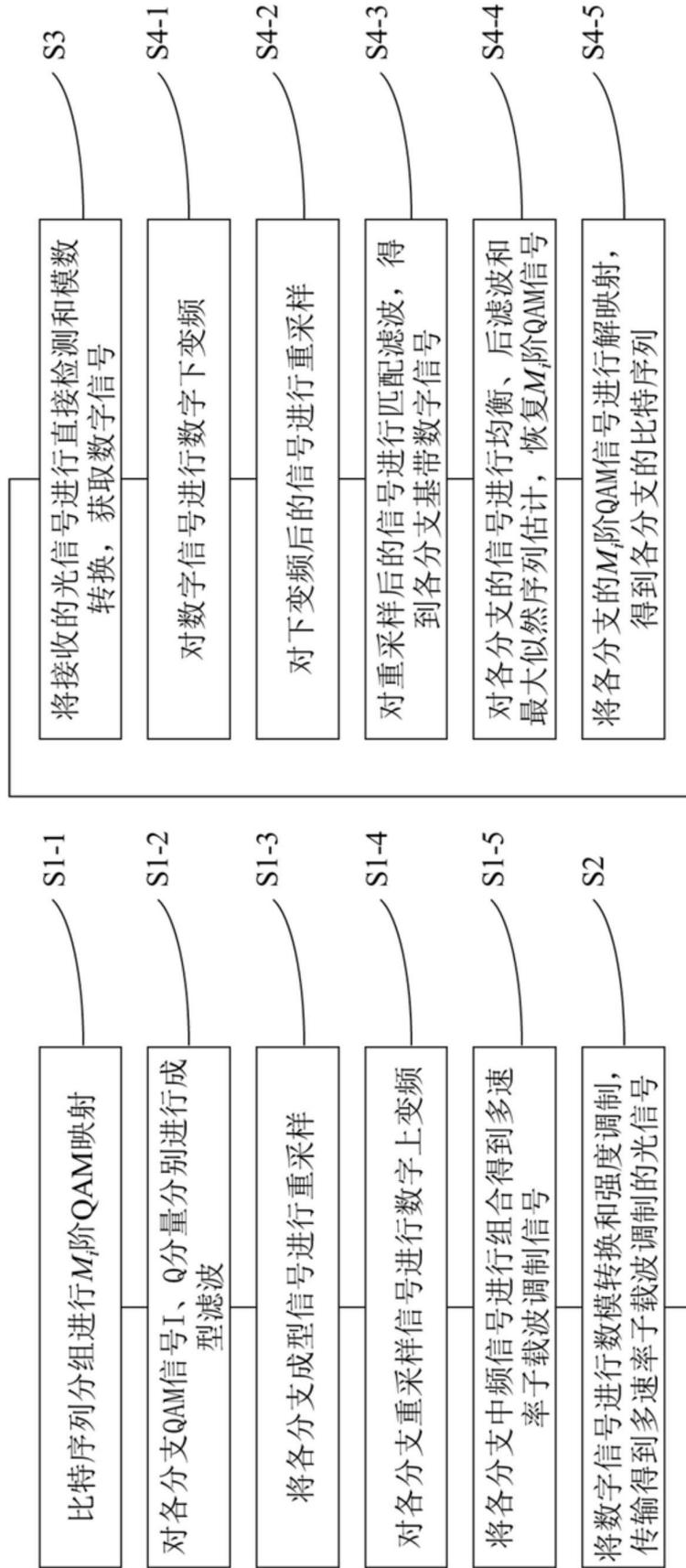


图2

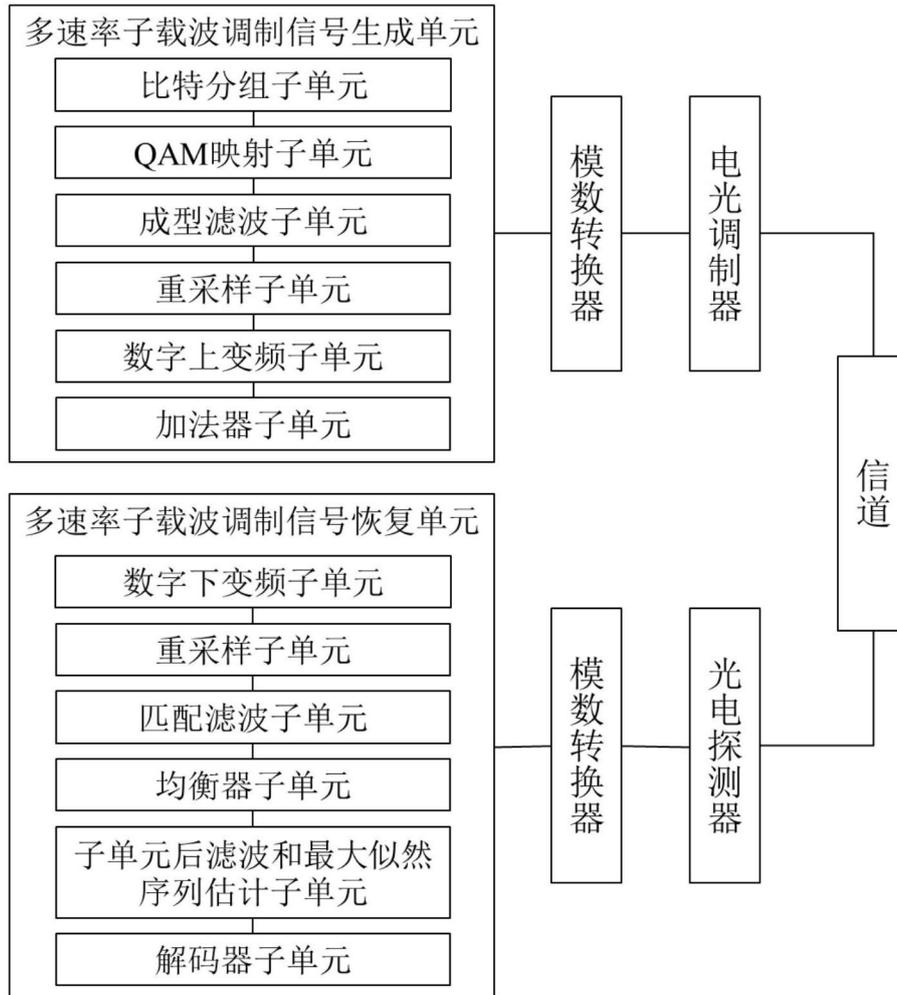


图3

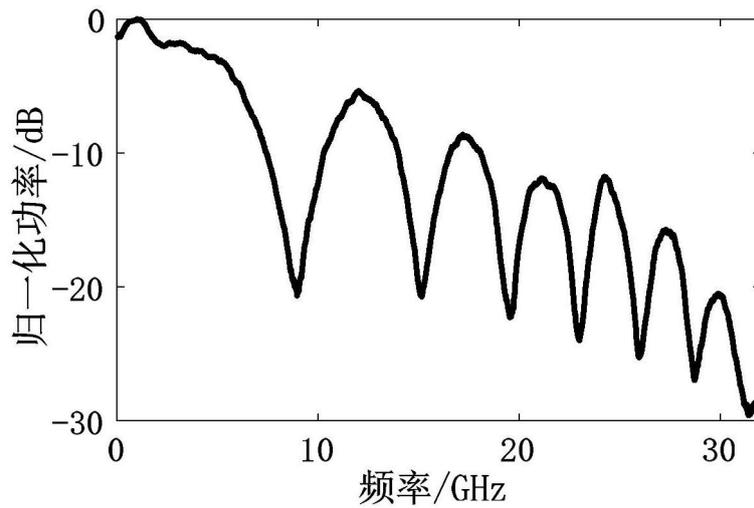


图4

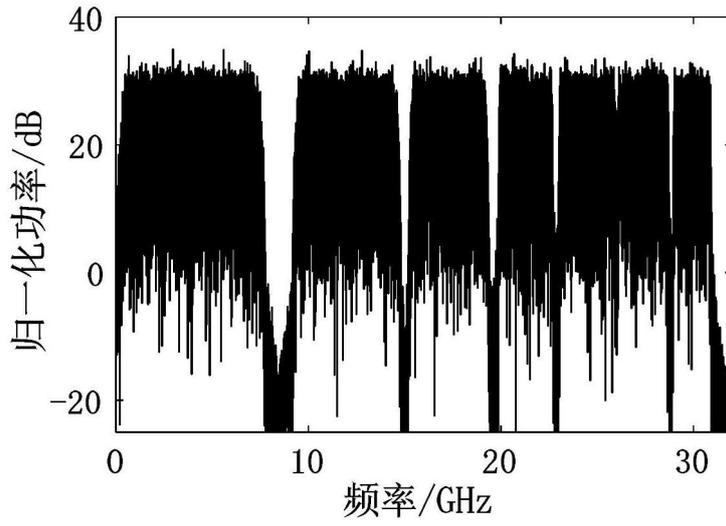


图5

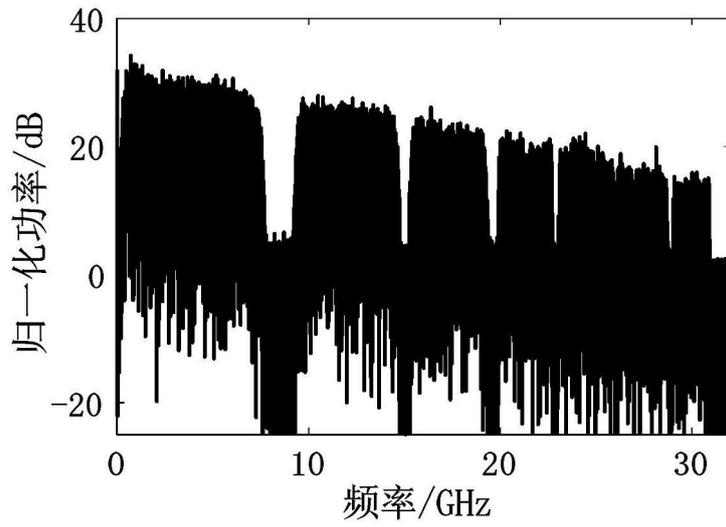


图6

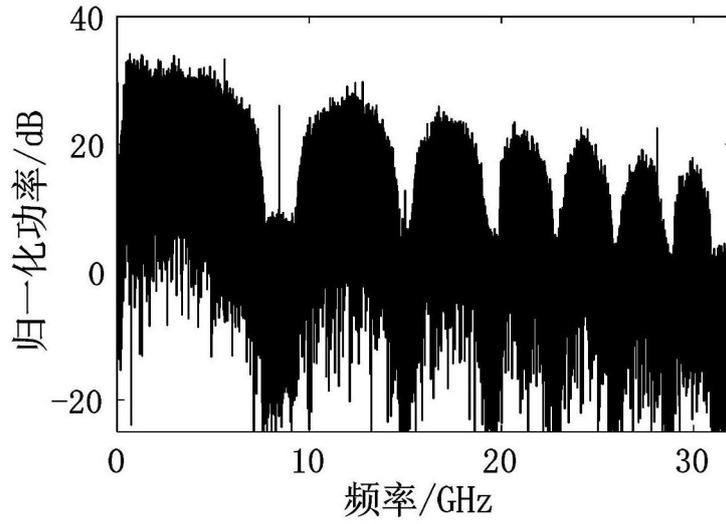


图7

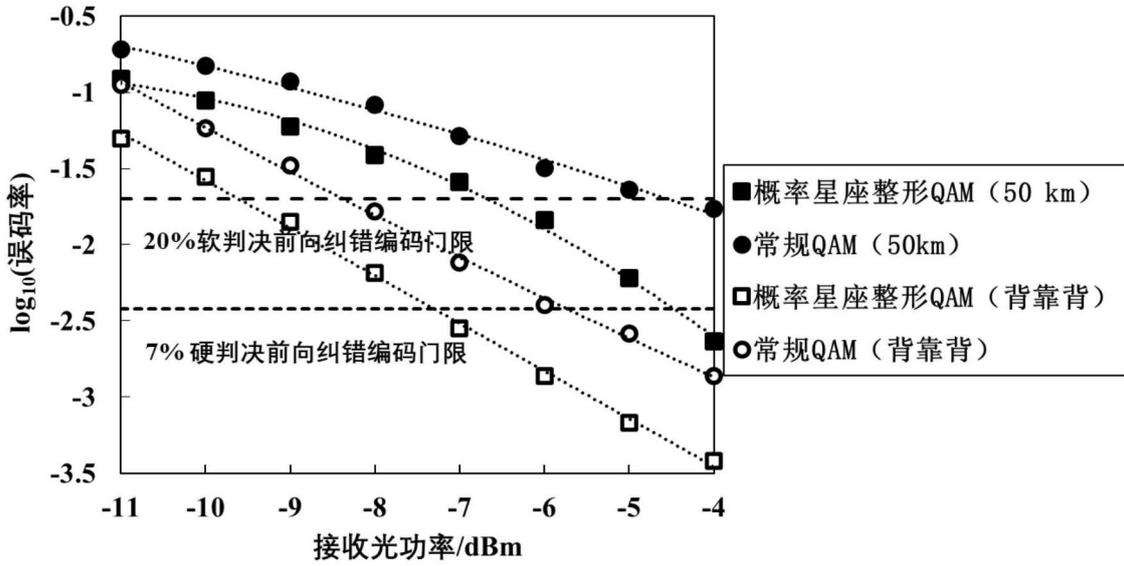


图8