



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115189777 B

(45) 授权公告日 2024. 11. 08

(21) 申请号 202210800162.8

(22) 申请日 2022.07.08

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 115189777 A

(43) 申请公布日 2022.10.14

(73) 专利权人 聊城大学  
地址 252000 山东省聊城市东昌府区文化  
路34号聊城大学西校区综合实验楼

(72) 发明人 许恒迎 毕岩峰 秦鹏 高红兵  
白成林 孙伟斌 杨立山 赵如清  
周唐磊 李保堃 王志国 杨帆  
齐琪

(74) 专利代理机构 北京正华智诚专利代理事务  
所(普通合伙) 11870  
专利代理师 李梦蝶

(51) Int. Cl.

H04B 10/61 (2013.01)

H04L 27/26 (2006.01)

H04L 25/02 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 101437005 A, 2009.05.20

US 7570684 B2, 2009.08.04

审查员 蔡世君

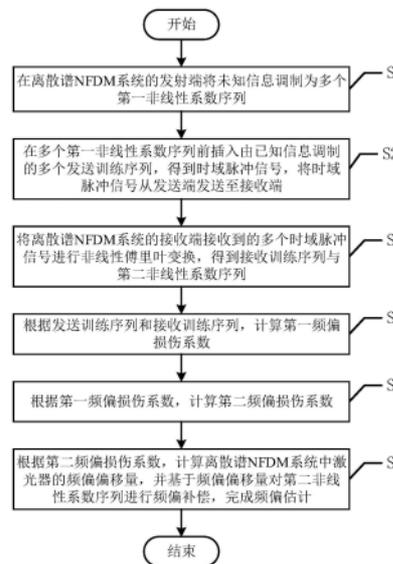
权利要求书2页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

一种用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法

(57) 摘要

本发明公开了一种用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法,包括以下步骤:在发射端将未知信息调制为多个第一非线性系数序列;在多个第一非线性系数序列前插入由已知信息调制的多个发送训练序列,得到时域脉冲信号,将时域脉冲信号从发送端发送至接收端;将离散谱NFDM系统的接收端接收到的多个时域脉冲信号进行非线性傅里叶变换,得到接收训练序列与第二非线性系数序列;根据发送训练序列和接收训练序列,计算第一频偏损伤系数;根据第一频偏损伤系数,计算第二频偏损伤系数;根据第二频偏损伤系数,计算离散谱NFDM系统中激光器的频偏偏移量,并基于频偏偏移量对第二非线性系数序列进行频偏补偿,完成频偏估计;本发明解决了现有频偏估计方法存在频偏估计的精度较低、稳定性差和计算复杂度较高的问题。



1. 一种用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、在离散谱NFDM系统的发射端将未知信息调制为多个第一非线性系数序列 $b_i(\lambda)'$ ;

S2、在多个第一非线性系数序列前插入由已知信息调制的多个发送训练序列 $b_k(\lambda)$ ,得到时域脉冲信号,将时域脉冲信号从发送端发送至接收端;

S3、将离散谱NFDM系统的接收端接收到的多个时域脉冲信号进行非线性傅里叶变换,得到接收训练序列 $b'_k(\lambda)$ 与第二非线性系数序列 $b_i(\lambda)''$ ;

S4、根据发送训练序列 $b_k(\lambda)$ 和接收训练序列 $b'_k(\lambda)$ ,计算第一频偏损伤系数 $Y_k$ ;

所述步骤S4包括以下分步骤:

S41、根据接收训练序列 $b'_k(\lambda)$ ,计算频偏损伤因子 $X_k$ ;

所述步骤S41中计算频偏损伤因子的公式为:

$$X_k = \frac{A_k \cdot [b_k(\lambda)]^* \cdot e^{j(\frac{2\pi k \Delta f}{R_s} - \phi_k)}}{|b'_k(\lambda)|^2}, k = 1, 2, \dots, L$$

其中, $X_k$ 为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的频偏损伤因子, $A_k$ 为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的离散谱NFDM系统中放大器自发辐射噪声引起的幅度变化, $[ ]^*$ 为共轭运算符, $b_k(\lambda)$ 为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的发送的训练序列, $\Delta f$ 为离散谱NFDM系统的激光器的频偏偏移量, $\phi_k$ 为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的离散谱NFDM系统中放大器自发辐射噪声与激光器线宽共同引起的相位偏移角, $b'_k(\lambda)$ 为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的接收的训练序列, $| |$ 为绝对值运算, $L$ 为接收端接收到的训练序列对应的时域脉冲信号数量, $j$ 为虚数单位, $R_s$ 为传输NFDM信号的波特率;

S42、根据频偏损伤因子 $X_k$ 和发送训练序列 $b_k(\lambda)$ ,计算第一频偏损伤系数 $Y_k$ ;

所述步骤S42中计算第一频偏损伤系数的公式为:

$$Y_k = X_k \cdot b_k(\lambda)$$

其中, $Y_k$ 为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的第一频偏损伤系数, $X_k$ 为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的频偏损伤因子, $b_k(\lambda)$ 为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的发送训练序列;

S5、根据第一频偏损伤系数 $Y_k$ ,计算第二频偏损伤系数 $U_k$ ;

S6、根据第二频偏损伤系数 $U_k$ ,计算离散谱NFDM系统中激光器的频偏偏移量 $\Delta f$ ,并基于频偏偏移量 $\Delta f$ 对第二非线性系数序列 $b_i(\lambda)''$ 进行频偏补偿,完成频偏估计。

2. 根据权利要求1所述的用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法,其特征在于,所述步骤S3中时域脉冲信号的表达式为:

$$Q_m(t) = [q_m(t - mT_p) + \gamma_m] e^{j2\pi(f_0 + \Delta f)t} e^{j\Phi}, m = 1, 2, \dots, L + N$$

其中, $Q_m(t)$ 为第 $m$ 个接收的时域脉冲信号, $q_m(t - mT_p)$ 为第 $m$ 个发送的时域脉冲信号, $T_p$ 为时间窗口, $t$ 为时间变量, $\gamma_m$ 为第 $m$ 个时域脉冲信号所对应的离散谱NFDM系统中放大器的自发辐射噪声, $f_0$ 为离散谱NFDM系统的中心载波频率, $\Delta f$ 为离散谱NFDM系统的激光器的频偏偏移量, $\Phi$ 为离散谱NFDM系统的激光器线宽带来的相位噪声, $j$ 为虚数单位, $L+N$ 为接收端接收到的时域脉冲信号总数量, $L$ 为接收训练序列对应的时域脉冲数量, $N$ 为第二非线性系数序列对应的时域脉冲数量。

3. 根据权利要求1所述的用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法,其特征在于,所述步

骤S3中接收训练序列的表达式为:

$$b'_k(\lambda) = A_k \cdot b_k(\lambda) \cdot e^{j(\phi_k - \frac{2\pi k \Delta f}{R_s})}, k = 1, 2, \dots, L$$

其中,  $b'_k(\lambda)$  为第k个时域脉冲信号对应的接收的训练序列,  $b_k(\lambda)$  为第k个时域脉冲信号对应的发送的训练序列,  $A_k$  为第k个时域脉冲信号对应的离散谱NFDM系统中放大器自发辐射噪声引起的幅度变化,  $\phi_k$  为第k个时域脉冲信号对应的离散谱NFDM系统中放大器自发辐射噪声与激光器线宽共同引起的相位偏移角,  $\Delta f$  为离散谱NFDM系统的激光器的频偏偏移量,  $R_s$  为传输NFDM信号的波特率,  $L$  为接收端接收到的训练序列对应的时域脉冲信号数量,  $j$  为虚数单位,  $\lambda$  为离散特征值。

4. 根据权利要求1所述的用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法, 其特征在于, 所述步骤S5中计算频偏损伤量的公式为:

$$U_k = Y_{k-1}^* \cdot Y_k$$

其中,  $U_k$  为第k个时域脉冲信号对应的第二频偏损伤系数,  $Y_{k-1}^*$  为第k-1个时域脉冲信号对应的第一频偏损伤系数的共轭,  $Y_k$  为第k个时域脉冲信号对应的第一频偏损伤系数。

5. 根据权利要求1所述的用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法, 其特征在于, 所述步骤S6中计算离散谱NFDM系统中激光器的频偏偏移量  $\Delta f$  的公式为:

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \arg\left\{ \frac{1}{L-1} \sum_{k=2}^L U_k \right\} \cdot R_s$$

其中,  $\arg\{\}$  为取幅角运算,  $R_s$  为传输NFDM信号的波特率,  $U_k$  为第k个时域脉冲信号对应的第二频偏损伤系数,  $K$  为接收端接收到的训练序列对应的时域脉冲信号数量,  $R_s$  为传输NFDM信号的波特率。

6. 根据权利要求1所述的用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法, 其特征在于, 所述步骤S6中对第二非线性系数序列  $b_i(\lambda)''$  进行频偏补偿的公式为:

$$b'_i(\lambda)'' = b_i(\lambda)'' e^{j \frac{2\pi i \Delta f}{R_s}}, i = 1, 2, \dots, N$$

其中,  $b'_i(\lambda)''$  为频偏补偿后的第i个时域脉冲信号对应的第二非线性系数序列,  $j$  为虚数单位,  $N$  为接收端接收到的第二非线性系数对应的时域脉冲信号数量,  $R_s$  为传输NFDM信号的波特率,  $\Delta f$  为离散谱NFDM系统的激光器的频偏偏移量。

## 一种用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及光纤通信技术领域,具体涉及一种用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法。

### 背景技术

[0002] 由于各种新应用和服务对容量快速增长的需求,光纤通信系统正面临着严峻的挑战。人们充分认识到,Kerr非线性效应限制了现代光纤通信的频谱效率和传输范围。因此,非线性补偿被广泛认为是提高未来光网络传输容量的重要因素。最近,人们应用一种强大的数学工具非线性傅里叶变换(Nonlinear Fourier Transform,NFT)来开发一种全新的光纤传输理论框架,即非线性频分复用(Nonlinear Frequency Division Multiplexing,NFDM)传输系统。在这个框架中,Kerr效应引起的光纤非线性可以作为一个系统构造因素而不是损伤破坏因素。

[0003] 针对离散谱NFDM传输系统,激光器固有的频偏(Frequency Offset,F0)将会导致接收端的NFDM时域脉冲畸变,其离散特征值 $\lambda$ 的位置发生随机偏移,非线性系数 $b(\lambda)$ 也会发生随机的相位旋转,这都会直接导致NFT的错误计算与信息的误判。目前,针对离散谱NFDM系统中的频偏估计问题,国内外已提出的方案可以分为三类:第一类是采用经典相干光通信系统频偏估计方案,例如前馈式M次方频偏估计方案,该方案计算复杂度较低,但该方案频偏估计范围受限于 $\frac{R_s}{2m}$ ,其中 $R_s$ 为传输信号的波特率,m为调制格式的阶数,这无法满足实际系统的频偏估计及补偿要求;第二类是数字导频方案,该方案是利用训练时域脉冲在NFDM接收端分离后,经过线性傅立叶变换后在线性频域内进行频偏估计,该方案的优点是频偏估计范围较大,进行线性傅立叶变换的点数直接与其估计精度、计算复杂度有关,频偏估计的精度较低,稳定性差;第三类是角度搜索方案,该方案的思想类似于载波盲相位搜索算法,需要把可能的频偏角度进行划分,并根据误差函数逐一进行判决得到最佳的频偏估计值,为了达到较高的估计精度,这类方案需要较多的划分角度数目,通常为4096个,这直接导致了较高的计算复杂度。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术中的上述不足,本发明提供的一种用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法解决了现有频偏估计方法存在频偏估计的精度较低、稳定性差和计算复杂度较高的问题。

[0005] 为了达到上述发明目的,本发明采用的技术方案为:一种用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法,包括以下步骤:

[0006] S1、在离散谱NFDM系统的发射端将未知信息调制为多个第一非线性系数序列 $b_i(\lambda)'$ ;

[0007] S2、在多个第一非线性系数序列前插入由已知信息调制的多个发送训练序列 $b_k$

( $\lambda$ ), 得到时域脉冲信号, 将时域脉冲信号从发送端发送至接收端;

[0008] S3、将离散谱NFDM系统的接收端接收到的多个时域脉冲信号进行非线性傅里叶变换, 得到接收训练序列 $b'_k(\lambda)$ 与第二非线性系数序列 $b_i(\lambda)$ ”;

[0009] S4、根据发送训练序列 $b_k(\lambda)$ 和接收训练序列 $b'_k(\lambda)$ , 计算第一频偏损伤系数 $Y_k$ ;

[0010] S5、根据第一频偏损伤系数 $Y_k$ , 计算第二频偏损伤系数 $U_k$ ;

[0011] S6、根据第二频偏损伤系数 $U_k$ , 计算离散谱NFDM系统中激光器的频偏偏移量 $\Delta f$ , 并基于频偏偏移量 $\Delta f$ 对第二非线性系数序列 $b_i(\lambda)$ ”进行频偏补偿, 完成频偏估计。

[0012] 进一步地, 所述步骤S3中时域脉冲信号的表达式为:

$$[0013] \quad Q_m(t) = [q_m(t - mT_p) + \gamma_m] e^{j2\pi(f_0 + \Delta f)t} e^{j\Phi}, m = 1, 2, \dots, L + N$$

[0014] 其中,  $Q_m(t)$  为第 $m$ 个接收的时域脉冲信号,  $q_m(t - mT_p)$  为第 $m$ 个发送的时域脉冲信号,  $T_p$  为时间窗口,  $t$  为时间变量,  $\gamma_m$  为第 $m$ 个时域脉冲信号所对应的离散谱NFDM系统中放大器的自发辐射噪声,  $f_k$  为离散谱NFDM系统的中心载波频率,  $\Delta f$  为离散谱NFDM系统的激光器的频偏偏移量,  $\Phi$  为离散谱NFDM系统的激光器线宽带来的相位噪声,  $j$  为虚数单位,  $L+N$  为接收端接收到的时域脉冲信号总数量,  $L$  为接收训练序列对应的时域脉冲数量,  $N$  为第二非线性系数序列对应的时域脉冲数量。

[0015] 进一步地, 所述步骤S3中接收训练序列的表达式为:

$$[0016] \quad b'_k(\lambda) = A_k \cdot b_k(\lambda) \cdot e^{j(\phi_k - \frac{2\pi k \Delta f}{R_s})}, k = 1, 2, \dots, L$$

[0017] 其中,  $b'_k(\lambda)$  为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的接收的训练序列,  $b_k(\lambda)$  为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的发送的训练序列,  $A_k$  为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的离散谱NFDM系统中放大器自发辐射噪声引起的幅度变化,  $\phi_k$  为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的离散谱NFDM系统中放大器自发辐射噪声与激光器线宽共同引起的相位偏移角,  $\Delta f$  为离散谱NFDM系统的激光器的频偏偏移量,  $R_s$  为传输NFDM信号的波特率,  $L$  为接收端接收到的训练序列对应的时域脉冲信号数量,  $j$  为虚数单位,  $\lambda$  为离散特征值。

[0018] 上述进一步方案的有益效果为: 训练序列 $b'_k(\lambda)$  式中考虑了幅度噪声 $A_k$ 与相位噪声 $\phi_k$ 对频偏估计的影响, 基于该表达式进行后续频偏估计步骤, 有利于提高频偏估计方法对其他噪声的容忍度。

[0019] 进一步地, 所述步骤S4包括以下分步骤:

[0020] S41、根据接收训练序列 $b'_k(\lambda)$ , 计算频偏损伤因子 $X_k$ ;

[0021] S42、根据频偏损伤因子 $X_k$ 和发送训练序列 $b_k(\lambda)$ , 计算第一频偏损伤系数 $Y_k$ 。

[0022] 进一步地, 所述步骤S41中计算频偏损伤因子的公式为:

$$[0023] \quad X_k = \frac{A_k \cdot [b_k(\lambda)]^* \cdot e^{j(\frac{2\pi k \Delta f}{R_s} - \phi_k)}}{|b'_k(\lambda)|^2}, k = 1, 2, \dots, L$$

[0024] 其中,  $X_k$  为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的频偏损伤因子,  $A_k$  为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的离散谱NFDM系统中放大器自发辐射噪声引起的幅度变化,  $[ ]^*$  为共轭运算符,  $b_k(\lambda)$  为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的发送的训练序列,  $\Delta f$  为离散谱NFDM系统的激光器的频偏偏移量,  $\phi_k$  为第 $k$ 个时域脉冲信号对应的离散谱NFDM系统中放大器自发辐射噪声与激光器线宽共

同引起的相位偏移角,  $b'_k(\lambda)$  为第k个时域脉冲信号对应的接收的训练序列,  $||$  为绝对值运算,  $L$  为接收端接收到的训练序列对应的时域脉冲信号数量,  $j$  为虚数单位,  $R_s$  为传输NFDN信号的波特率。

[0025] 进一步地, 所述步骤S42中计算第一频偏损伤系数的公式为:

$$[0026] \quad Y_k = X_k \cdot b_k(\lambda)$$

[0027] 其中,  $Y_k$  为第k个时域脉冲信号对应的第一频偏损伤系数,  $X_k$  为第k个时域脉冲信号对应的频偏损伤因子,  $b_k(\lambda)$  为第k个时域脉冲信号对应的发送训练序列。

[0028] 进一步地, 所述步骤S5中计算频偏损伤量的公式为:

$$[0029] \quad U_k = Y_{k-1}^* \cdot Y_k$$

[0030] 其中,  $U_k$  为第k个时域脉冲信号对应的第二频偏损伤系数,  $Y_{k-1}^*$  为第k-1个时域脉冲信号对应的第一频偏损伤系数的共轭,  $Y_k$  为第k个时域脉冲信号对应的第一频偏损伤系数。

[0031] 进一步地, 所述步骤S6中计算离散谱NFDN系统中激光器的频偏偏移量  $\Delta f$  的公式为:

$$[0032] \quad \Delta f = \frac{1}{2\pi} \arg\left\{ \frac{1}{L-1} \sum_{k=2}^L U_k \right\} \cdot R_s$$

[0033] 其中,  $\arg\{\}$  为取幅角运算,  $R_s$  为传输NFDN信号的波特率,  $U_k$  为第k个时域脉冲信号对应的第二频偏损伤系数,  $L$  为接收端接收到的训练序列对应的时域脉冲信号数量,  $R_s$  为传输NFDN信号的波特率。

[0034] 进一步地, 所述步骤S6中对第二非线性系数序列  $b_i(\lambda)''$  进行频偏补偿的公式为:

$$[0035] \quad b'_i(\lambda)'' = b_i(\lambda)'' e^{j \frac{2\pi i \Delta f}{R_s}}, i = 1, 2, \dots, N$$

[0036] 其中,  $b'_i(\lambda)''$  为频偏补偿后的第i个时域脉冲信号对应的第二非线性系数序列,  $j$  为虚数单位,  $N$  为接收端接收到的第二非线性系数序列对应的时域脉冲信号数量,  $R_s$  为传输NFDN信号的波特率,  $\Delta f$  为离散谱NFDN系统的激光器的频偏偏移量。

[0037] 上述进一步方案的有益效果为: 通过对第二非线性系数序列  $b_i(\lambda)''$  进行频偏补偿, 实现在非线性频域内对非线性系数完成频偏补偿, 这相比时域或者线性频域内操作有更好的频偏补偿效果。

[0038] 综上, 本发明的有益效果为:

[0039] 1、本发明方法通过结合未知信息和已知信息的非线性系数序列, 构建时域脉冲信号, 计算出频偏偏移量, 并在非线性频域内对非线性系数完成频偏补偿, 该过程计算复杂度低。

[0040] 2、本发明方法考虑放大器自发辐射噪声、激光器线宽以及频偏的综合影响, 从而使得本发明可以在长距离、较低光信噪比 (optical signal to noise ratio, OSNR) 以及激光器线宽存在的情况下实现较稳定的频偏估计, 本方法具有较强稳定性。

[0041] 3、本发明方法考虑频偏损伤在非线性频域的表现形式, 直接利用相邻训练序列进行频偏估计操作, 对相位噪声具有很好的容忍度, 提高了频偏估计的精度。

## 附图说明

[0042] 图1为一种用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法的流程图。

[0043] 图2为本发明的离散谱NFDM系统中第一非线性系数序列 $b_i(\lambda)'$ 、发送训练序列 $b_k(\lambda)$ 、接收训练序列 $b'_k(\lambda)$ 以及第二非线性系数序列 $b_i(\lambda)''$ 的发送与接收流程图。

[0044] 图3为本发明中2GBaud离散谱NFDM系统的仿真框图。

[0045] 图4为本发明中2GBaud离散谱NFDM系统光纤传输1440km条件下仿真频偏绝对估计误差曲线图。

[0046] 图5为本发明中2GBaud离散谱NFDM系统光纤在不同传输距离条件下仿真频偏绝对估计误差曲线图。

[0047] 图6为本发明中2GBaud离散谱NFDM系统光纤在不同传输距离条件下仿真误码率曲线图。

[0048] 图7为本发明中2GBaud离散谱NFDM系统背靠背传输时不同光信噪比条件下仿真频偏绝对估计误差曲线图。

[0049] 图8为本发明中2GBaud离散谱NFDM系统背靠背传输时不同光信噪比条件下仿真误码率曲线图。

## 具体实施方式

[0050] 下面对本发明的具体实施方式进行描述,以便于本技术领域的技术人员理解本发明,但应该清楚,本发明不限于具体实施方式的范围,对本技术领域的普通技术人员来讲,只要各种变化在所附的权利要求限定和确定的本发明的精神和范围内,这些变化是显而易见的,一切利用本发明构思的发明创造均在保护之列。

[0051] 针对离散谱NFDM系统中的频偏估计问题,本发明提出一种适用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法,结合使用已知非线性系数形式的训练序列(Trainingsymbol,TS)进行频偏估计。对于光纤传输条件,本方法适用于带有掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier,EDFA)的标准单模光纤(Standard single mode fiber,SSMF)传输链路,在长距离条件下能够实现稳定、准确的频偏估计。对于背靠背传输条件,本方法对于低光信噪比(OSNR)传输仍能实现较小的频偏估计绝对误差,即对强自发辐射噪声(Amplifier Spontaneous emission noise,ASE)具有鲁棒性。

[0052] 如图1所示,一种用于离散谱NFDM系统中的频偏估计方法,包括以下步骤:

[0053] S1、在离散谱NFDM系统的发射端将未知信息调制为多个第一非线性系数序列 $b_i(\lambda)'$ ;

[0054] S2、在多个第一非线性系数序列前插入由已知信息调制的多个发送训练序列 $b_k(\lambda)$ ,得到时域脉冲信号,将时域脉冲信号从发送端发送至接收端;

[0055] 如图2所示,在本实施例中,若步骤S1的第一非线性系数序列 $b_i(\lambda)'$ 的数量为N个,步骤S2中发送训练序列 $b_k(\lambda)$ 的数量为L个,将L个发送训练序列 $b_k(\lambda)$ 插入N个第一非线性系数序列 $b_i(\lambda)'$ 前,相当于将L个发送训练序列 $b_k(\lambda)$ 和L个第一非线性系数序列 $b_i(\lambda)'$ 进行拼接,得到L+N时域脉冲信号。

[0056] S3、将离散谱NFDM系统的接收端接收到的多个时域脉冲信号进行非线性傅里叶变换,得到接收训练序列 $b'_k(\lambda)$ 与第二非线性系数序列 $b_i(\lambda)''$ ;

[0057] 所述步骤S3中时域脉冲信号的表达式为:

$$[0058] \quad Q_m(t) = [q_m(t - mT_p) + \gamma_m] e^{j2\pi(f_0 + \Delta f)t} e^{j\Phi}, m = 1, 2, \dots, L + N$$

[0059] 其中,  $Q_m(t)$  为第  $m$  个接收的时域脉冲信号,  $q_m(t - mT_p)$  为第  $m$  个发送的时域脉冲信号,  $T_p$  为时间窗口,  $t$  为时间变量,  $\gamma_m$  为第  $m$  个时域脉冲信号所对应的离散谱NFDM系统中放大器的自发辐射噪声,  $f_0$  为离散谱NFDM系统的中心载波频率,  $\Delta f$  为离散谱NFDM系统的激光器的频偏偏移量,  $\Phi$  为离散谱NFDM系统的激光器线宽带来的相位噪声,  $j$  为虚数单位,  $L+N$  为接收端接收到的时域脉冲信号总数量,  $L$  为接收训练序列对应的时域脉冲数量,  $N$  为第二非线性系数序列对应的时域脉冲数量。

[0060] 在发射处将第一非线性系数序列和训练序列  $b_k(\lambda)$  拼接得到时域脉冲信号, 在接收处再经过非线性傅里叶变换又将两者分离开, 分别得到接收训练序列  $b'_k(\lambda)$  与第二非线性系数序列  $b_i(\lambda)$ 。

[0061] 接收训练序列  $b'_k(\lambda)$  与第二非线性系数序列  $b_i(\lambda)$  是通过非线性傅里叶变换同时得到的, 因为  $b'_k(\lambda)$  与  $b_i(\lambda)$  的数目都是固定已知的, 且它俩个是一个拼接的整体, 所以直接将  $L$  个  $b'_k(\lambda)$  在  $b_i(\lambda)$  的前端分离提取出来, 用于频偏估计即可。

[0062] S4、根据发送训练序列  $b_k(\lambda)$  和接收训练序列  $b'_k(\lambda)$ , 计算第一频偏损伤系数  $Y_k$ ;

[0063] 所述步骤S4包括以下分步骤:

[0064] S41、根据接收训练序列  $b'_k(\lambda)$ , 计算频偏损伤因子  $X_k$ ;

[0065] 所述步骤S41中计算频偏损伤因子的公式为:

$$[0066] \quad X_k = \frac{A_k \cdot [b_k(\lambda)]^* \cdot e^{j(\frac{2\pi k \Delta f}{R_s} - \phi_k)}}{|b'_k(\lambda)|^2}, k = 1, 2, \dots, L$$

[0067] 其中,  $X_k$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的频偏损伤因子,  $A_k$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的离散谱NFDM系统中放大器自发辐射噪声引起的幅度变化,  $[\ ]^*$  为共轭运算符,  $b_k(\lambda)$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的发送的训练序列,  $\Delta f$  为离散谱NFDM系统的激光器的频偏偏移量,  $\phi_k$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的离散谱NFDM系统中放大器自发辐射噪声与激光器线宽共同引起的相位偏移角,  $b'_k(\lambda)$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的接收的训练序列,  $|\ ]$  为绝对值运算,  $L$  为接收端接收到的训练序列对应的时域脉冲信号数量,  $j$  为虚数单位,  $R_s$  为传输NFDM信号的波特率。

[0068] S42、根据频偏损伤因子  $X_k$  和发送训练序列  $b_k(\lambda)$ , 计算第一频偏损伤系数  $Y_k$ 。所述步骤S42中计算第一频偏损伤系数的公式为:

$$[0069] \quad Y_k = X_k \cdot b_k(\lambda)$$

[0070] 其中,  $Y_k$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的第一频偏损伤系数,  $X_k$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的频偏损伤因子,  $b_k(\lambda)$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的发送训练序列。

[0071] S5、根据第一频偏损伤系数  $Y_k$ , 计算第二频偏损伤系数  $U_k$ ;

[0072] 所述步骤S5中计算频偏损伤量的公式为:

$$[0073] \quad U_k = Y_{k-1}^* \cdot Y_k$$

[0074] 其中,  $U_k$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的第二频偏损伤系数,  $Y_{k-1}^*$  为第  $k-1$  个时域脉

冲信号对应的第一频偏损伤系数的共轭,  $Y_k$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的第一频偏损伤系数。

[0075] S6、根据第二频偏损伤系数  $U_k$ , 计算离散谱NFDN系统中激光器的频偏偏移量  $\Delta f$ , 并基于频偏偏移量  $\Delta f$  对第二非线性系数序列  $b_i(\lambda)''$  进行频偏补偿, 完成频偏估计。

[0076] 所述步骤S6中计算离散谱NFDN系统中激光器的频偏偏移量  $\Delta f$  的公式为:

$$[0077] \quad \Delta f = \frac{1}{2\pi} \arg\left\{ \frac{1}{L-1} \sum_{k=2}^L U_k \right\} \cdot R_s$$

[0078] 其中,  $\arg\{\}$  为取幅角运算,  $R_s$  为传输NFDN信号的波特率,  $U_k$  为第  $k$  个时域脉冲信号对应的第二频偏损伤系数,  $L$  为接收端接收到的训练序列对应的时域脉冲信号数量,  $R_s$  为传输NFDN信号的波特率。

[0079] 所述步骤S6中对第二非线性系数序列  $b_i(\lambda)''$  进行频偏补偿的公式为:

$$[0080] \quad b'_i(\lambda)'' = b_i(\lambda)'' e^{j \frac{2\pi i \Delta f}{R_s}}, i = 1, 2, \dots, N$$

[0081] 其中,  $b'_i(\lambda)''$  为频偏补偿后的第  $i$  个时域脉冲信号对应的第二非线性系数序列,  $j$  为虚数单位,  $N$  为接收端接收到的第二非线性系数序列对应的时域脉冲信号数量,  $R_s$  为传输NFDN信号的波特率,  $\Delta f$  为离散谱NFDN系统的激光器的频偏偏移量。

[0082] 为了验证本发明的有效性, 本实施例中从仿真系统方面进行验证:

[0083] 利用光通信仿真软件VPI transmission Makers11和MATLAB联合仿真搭建了如图3所示的2GBaud离散谱NFDN传输系统, 可进行SSMF光纤信道传输与背靠背传输仿真, 详细设置如下: 单偏振发射机预发送2GBaud离散谱16QAMNFDN信号, 特征值设置为  $\lambda = 0.25j$ , 激光器及本地振荡器线宽均设置为100KHz, 发射机激光器中心波长设置为1550nm, 相干接收本地振荡器的中心频率偏移量设置范围为  $[-1\text{GHz}, +1\text{GHz}]$ , 步长为100MHz, 以验证本方法的频偏估计准确性。

[0084] 在发射机信号处理阶段, 比特信息序列通过格雷编码为16QAM符号, 再经过b调制转化为非线性系数, 得到多个第一非线性系数序列  $b_i(\lambda)'$ , 然后添加已知64个发送训练序列  $b_k(\lambda)$  到多个第一非线性系数序列  $b_i(\lambda)'$  前端, 经过非线性傅里叶逆变换及逆归一化操作后转换为时域电脉冲, 并将得到的时域脉冲信号作为一个数据帧, 最后经过IQ调制为光信号脉冲, 并通过噪声指数为6dB的掺铒光纤放大器(EDFA)及光衰减器调节入纤功率。

[0085] 光纤传输条件的参数设置如下: 采用每跨段80km的SSMF光纤, 其损耗系数为0.2dB/km, 色散系数为16.8ps/(nm·km), 非线性系数为1.3w<sup>-1</sup>/km。此后, 使用一个噪声指数为6dB的掺铒光纤放大器(EDFA)补偿光纤链路的损耗并引入ASE噪声, 并接入带宽为100GHz的光滤波器滤除部分带外噪声。

[0086] 背靠背传输条件的参数设置如下: 使用光信噪比(OSNR)设置模块引入ASE噪声, 并接入带宽为100GHz的光滤波器滤除部分带外噪声。

[0087] 传输2GBaud离散谱16QAM的NFDN信号经过相干接收后, 在接收机信号处理阶段, 经过帧同步及归一化后, 通过NFT变换为接收训练序列  $b'_k(\lambda)$  与第二非线性系数序列  $b_i(\lambda)''$ , 通过信道均衡移除非线性与色散的共同效应, 提取分离  $L = 64$  非线性系数形式的接收训练序列  $b'_k(\lambda)$  进行频偏估计操作, 并对  $N = 32768$  有用信息序列, 即对第二非线性系数序列  $b_i$

( $\lambda$ )”进行频偏补偿。然后,使用盲相位搜索算法进行载波相位恢复,最后,对 $N=32768$ 有用信息序列进行解码并计算误码率。

[0088] 本实施例中,为了评估本方法性能,定义绝对估计误差为: $FO_{error} = |FO_{real} - FO_{est}|$ ,其中 $|\cdot|$ 表示取绝对值操作, $FO_{real}$ 表示频偏真实值, $FO_{est}$ 表示本发明的频偏估计值。对于光纤信道传输条件,仿真结果如图4所示,本发明对于1440km传输的离散谱NFDM信号,加入不同的频偏偏移量,范围为 $[-1\text{GHz}, +1\text{GHz}]$ 且步长为100MHz,本发明的频偏绝对估计误差均在0.5MHz以下,且估计性能稳定;仿真结果如图5所示,本发明对于720km~1680km不同传输距离的离散谱NFDM信号,步长为80km,固定本地振荡器频偏值为650MHz,本发明的频偏绝对估计误差均在0.5MHz以下,且绝对估计误差变化较小;仿真结果如图6所示,本发明对于720km~1680km不同传输距离的离散谱NFDM信号,固定本地振荡器频偏值为650MHz,对1500km传输距离其误码率(Bit Error Rate, BER)可达到7%硬判决前向纠错阈值(7%HD-FEC,  $BER=3.8e-3$ )以下。

[0089] 本实施例中,对于背靠背传输条件,仿真结果如图7所示,光信噪比(OSNR)设置范围为13dB~23dB,步长为1dB,固定本地振荡器频偏值为650MHz,本发明的频偏绝对估计误差均在1MHz以内,且在低光信噪比即强ASE噪声条件下,本发明具有一定的鲁棒性;仿真结果如图8所示,固定本地振荡器频偏值为650MHz,本发明在光信噪比为14dB左右其BER可达到7%HD-FEC阈值以下。因此,本发明适用于离散谱NFDM系统中的频偏估计,可保证2Gbaud 16QAM离散谱NFDM信号的有效传输。

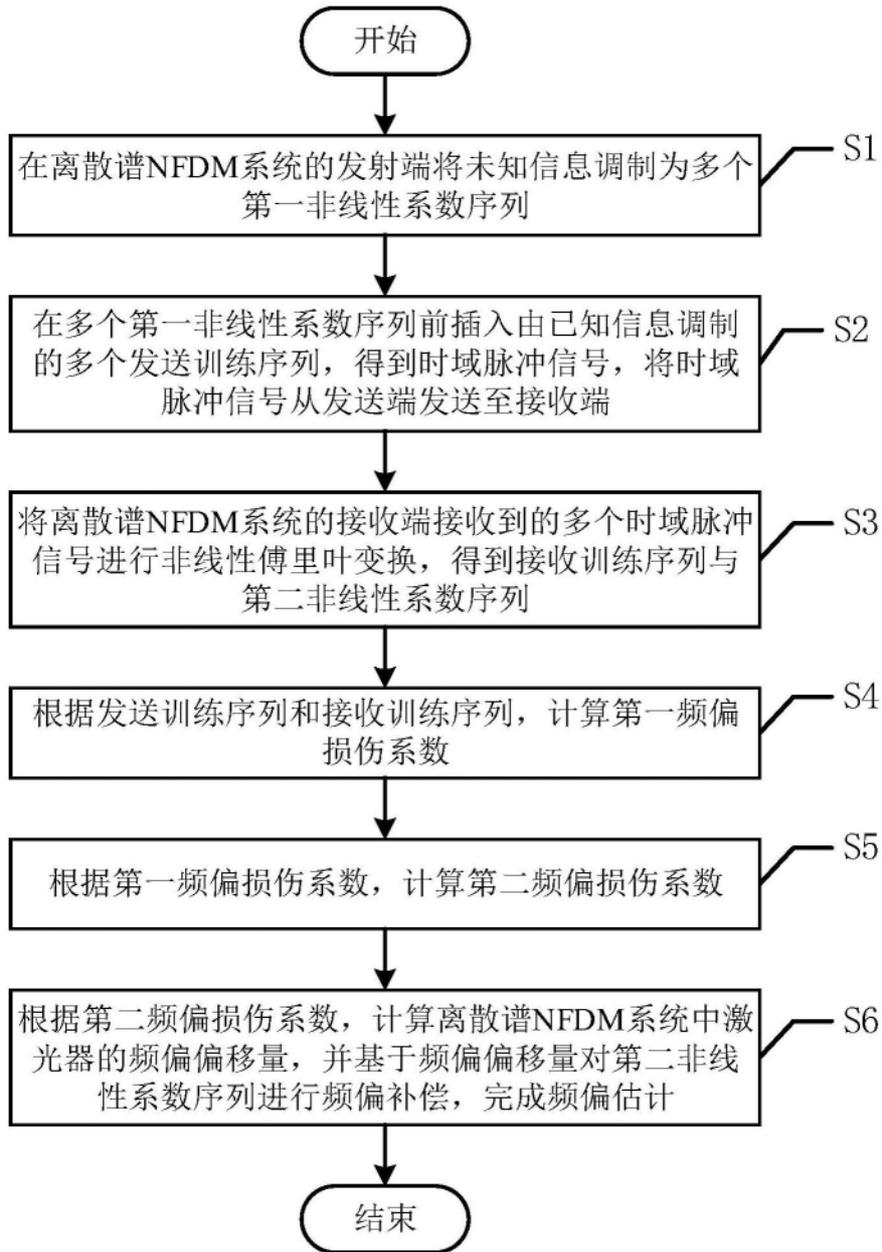


图1

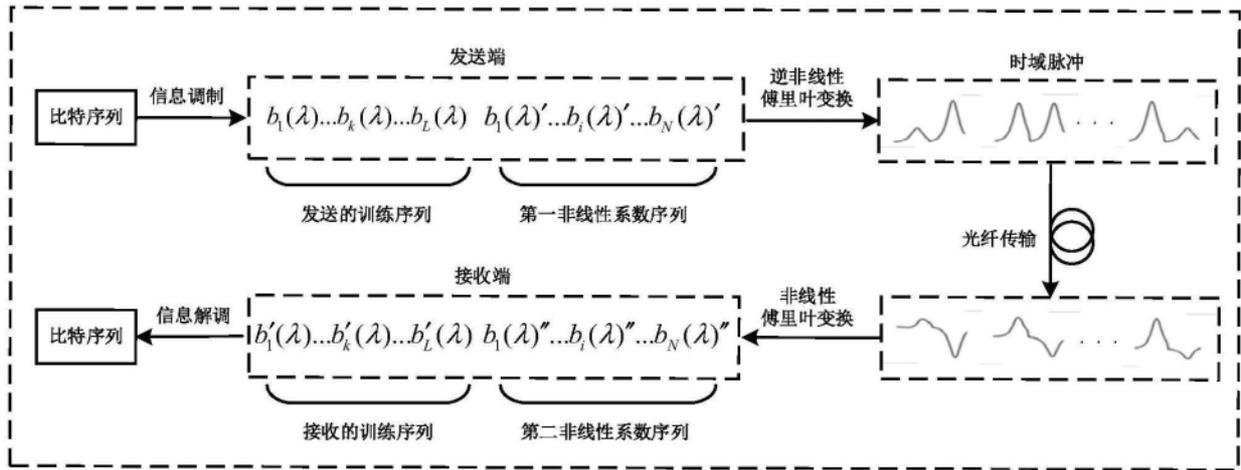


图2

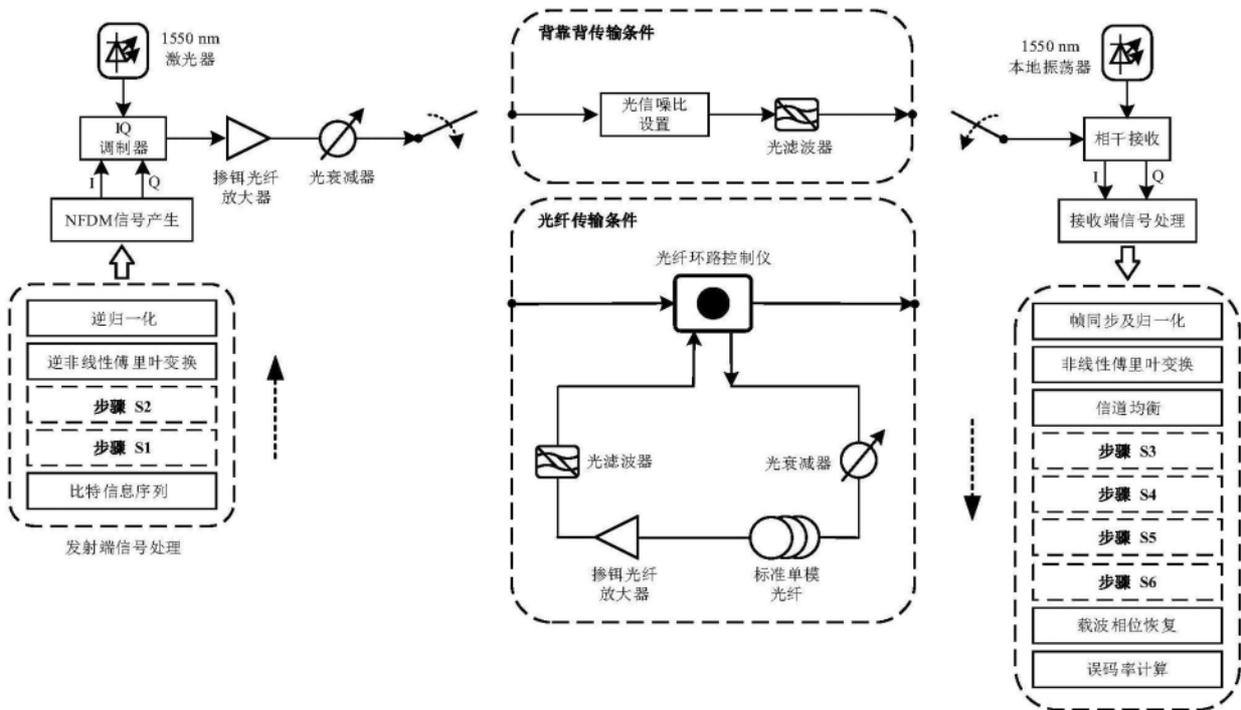


图3

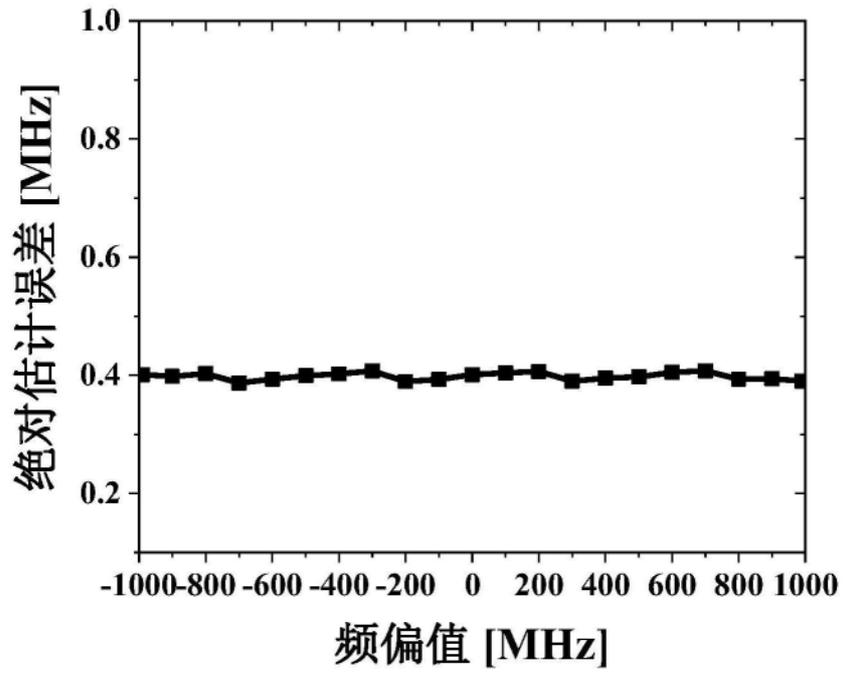


图4

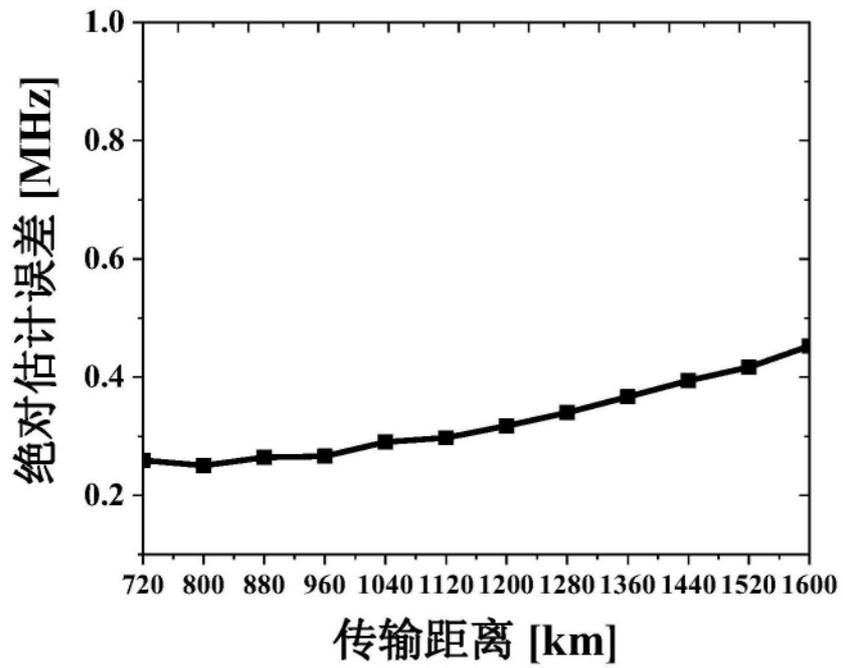


图5

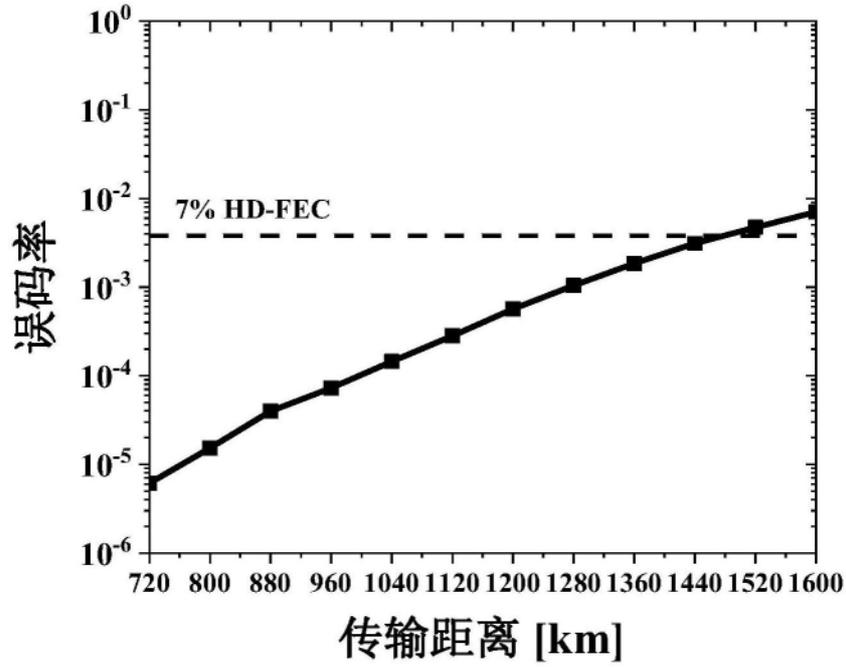


图6

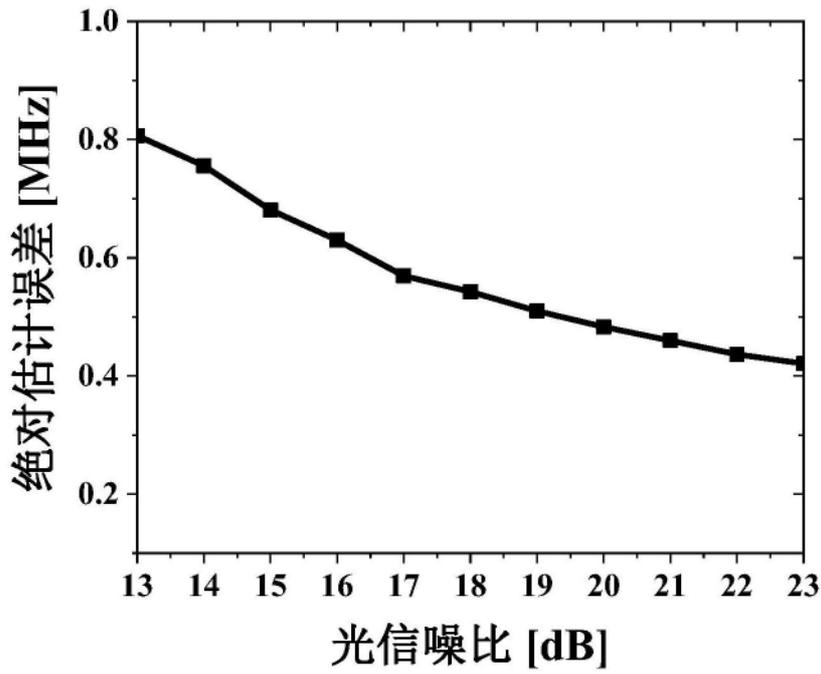


图7

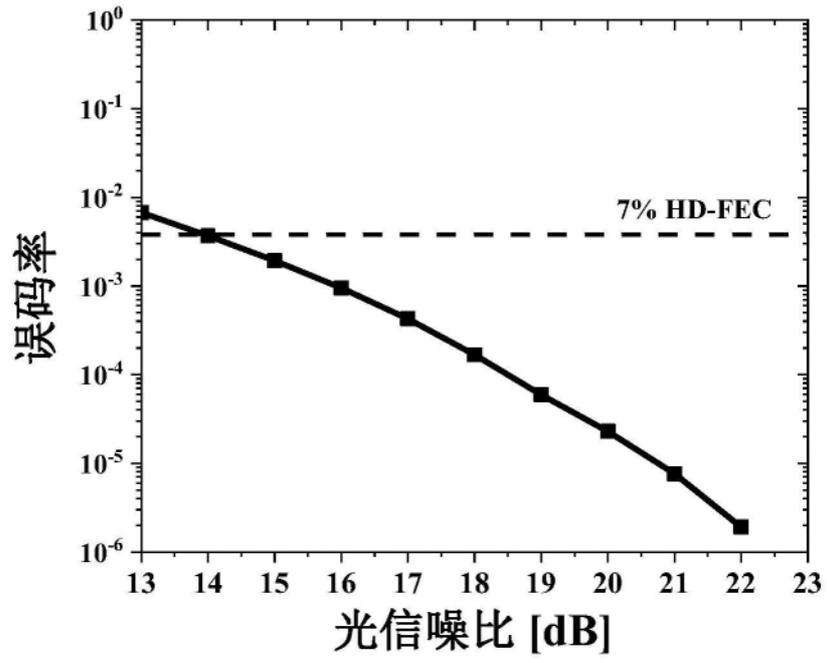


图8