



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 107395274 A

(43)申请公布日 2017. 11. 24

(21)申请号 201710442726.4

(22)申请日 2017.06.13

(71)申请人 东南大学

地址 210096 江苏省南京市四牌楼2号

(72)发明人 陈明 韩晓青 管瑞

(74)专利代理机构 南京苏高专利商标事务所

(普通合伙) 32204

代理人 冯艳芬

(51) Int. Cl.

H04B 10/116(2013.01)

H04L 27/26(2006.01)

权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

一种DCO-OFDM可见光通信传输系统的实现方法

(57)摘要

本发明公开了一种DCO-OFDM可见光通信传输系统的实现方法。本发明在采用DCO-OFDM系统新型传输方案的基础上,通过求解优化问题,给出了信号转换形式函数中的斜率和直流点参数的最优取值,再根据最优取值建立传输系统。本发明中给出所有变量的初始点和初始罚因子,然后求解线性约束问题,利用最速下降法得到极大值点,经过几次迭代计算之后最终得到优化问题的最优取值。与现有技术相比,本发明更具有理论完整性,并提出了复杂度较低的实现方案。

1. 一种DCO-OFDM可见光通信传输系统的实现方法,其特征在于该方法包括:

(1) 建立DCO-OFDM可见光通信传输系统中发射端直流偏置前信号 $x(n)$ 和接收端逆变换后信号 $y(n)$ 之间的关系式为:

$$y(n) = Kx(n) + z(n)$$

式中, K 为衰减因子, $K = Q\left(\frac{I_L - b'}{a_2\sigma}\right) - Q\left(\frac{I_H - b'}{a_1\sigma}\right)$, $Q(\cdot)$ 为高斯Q函数, I_L 和 I_H 分别表示

LED驱动电流的最小值和最大值, σ 为时域OFDM信号的标准差, b' 为直流点, a_1 和 a_2 为斜率,且 b' , a_1 , a_2 为未知参数, $z(n)$ 为包含AWGN和限幅噪声的总噪声,且和 $x(n)$ 无关;

(2) 建立 $y(n)$ 的信噪比表达式为:

$$\text{SNR}_{\text{elec}} = \frac{K^2\sigma^2}{G_B\sigma_z^2 \log_2 M}$$

式中, G_B 为带宽利用率因子, σ_z^2 为噪声 $z(n)$ 的方差, M 为QAM调制阶数;

(3) 建立优化目标函数为:

$$\max_{a_1, a_2, b'} \text{SNR}_{\text{elec}} \geq 0$$

s. t.

$$E[x_t(n)] = \eta$$

$$a_1 \geq 0; a_2 \geq 0$$

$$I_H \geq b' \geq I_L$$

式中, η 所需要的光功率, $x_t(n)$ 为 $x(n)$ 经过直流偏置及限幅转换后得到的信号,且

$$x_t(n) = \begin{cases} I_H, & x(n) \geq \frac{I_H - b'}{a_1} \\ a_1 x(n) + b', & 0 \leq x(n) < \frac{I_H - b'}{a_1} \\ a_2 x(n) + b', & \frac{I_L - b'}{a_2} \leq x(n) < 0 \\ I_L, & x(n) < \frac{I_L - b'}{a_2} \end{cases}$$

(4) 按照以下步骤求解步骤(3)的最优解:

A: 给定斜率初始点 $a_1^{(0)}=0.35$ 、 $a_2^{(0)}=0.35$ 、 $b'^{(0)}=1$,初始罚因子 $\xi_1=20$,放大系数 $c>1$,允许误差 $\varepsilon>0$,迭代次数 $k=1$;

B: 以 $a_1^{(k-1)}$ 、 $a_2^{(k-1)}$ 、 $b'^{(k-1)}$ 为初点,求解线性约束问题 $\max_{a_1, a_2, b'} \text{SNR}_{\text{elec}} - \xi_k \{E[x_t^{(k)}(n)] - \eta\}^2$,约束条件为 $a_1 \geq 0; a_2 \geq 0; I_H \geq b' \geq I_L$,利用最速下降法求得极大值点为 $a_1^{(k)}$ 、 $a_2^{(k)}$ 、 $b'^{(k)}$;

C: 令 $f(a_1, a_2, b') = \xi_k \{E[x_t^{(k)}(n)] - \eta\}^2$,若 $f(a_1, a_2, b') < \varepsilon$,则停止计算,将 $a_1^{(k)}$ 、 $a_2^{(k)}$ 、 $b'^{(k)}$ 作为 a_1, a_2, b' 的值;否则,令 $\xi_{k+1} = c\xi_k$,置 $k=k+1$,并返回步骤B;

(5) 根据求解得到的 a_1, a_2, b' 的值,建立DCO-OFDM可见光通信传输系统模型,其中,

$$y(n) = \begin{cases} \frac{I_H + w(n) - b'}{a_1}, & x(n) \geq \frac{I_H - b'}{a_1} \\ x(n) + \frac{w(n)}{a_1}, & 0 \leq x(n) < \frac{I_H - b'}{a_1} \\ x(n) + \frac{w(n)}{a_2}, & \frac{I_L - b'}{a_2} \leq x(n) < 0 \\ \frac{I_L + w(n) - b'}{a_2}, & x(n) < \frac{I_L - b'}{a_2} \end{cases}$$

式中, $w(n)$ 表示加性高斯白噪声。

一种DCO-OFDM可见光通信传输系统的实现方法

技术领域

[0001] 本发明涉及可见光通信技术领域,尤其涉及一种DCO-OFDM可见光通信传输系统的实现方法。

背景技术

[0002] 因为可见光通信系统采用强度调制,只能传输实非负信号,因此传统的OFDM需要做出调整才可以应用到可见光通信系统中。在可见光通信系统中,光正交频分复用(O-OFDM)方案拥有很高的传输速率和高性价比的均衡,因此成为了可见光通信高速通信中很好的调制方案。很多光OFDM方案已经被提出了,如直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)、非对称限幅光正交频分复用(ACO-OFDM)。

[0003] DCO-OFDM方案在1996年就被提出,当时是针对红外通信系统设计的,主要是为了解决在强度调制系统中使用多载波技术的问题。DCO-OFDM系统是通过添加直流偏置的方式把负值波形抬高,从而保证了信号的正实性,优点是结构简单,缺点是功率开销较大。虽然DCO-OFDM系统为了保证子载波共轭对称,会损失一半的频谱效率,但是只需要进行加直流偏置操作,就可以获得和其他方案相同的频谱效率,例如增强型单极性OFDM(eU-OFDM)、分层型ACO-OFDM。同时DCO-OFDM系统复杂度不高,因此被广泛使用。

[0004] 可见光通信系统的功能通常包含照明和通信,因此在调光控制的场景下经常会出现相对较高或较低的亮度等级,也就是光功率等级。而对于DCO-OFDM来说,在很高或很低的光功率等级下,会产生严重的性能衰落,从而限制它的效率,因此需要对系统实现方案进行优化。

[0005] 现有的方案中有一种同时传输ACO-OFDM信号和DCO-OFDM信号的系统,称为ADO-OFDM系统。也有将DCO-OFDM信号和PAM-DMT信号相结合的系统PDO-OFDM。这些系统的复杂度都比较高,求解难度较大,尤其是对于接收端而言。

发明内容

[0006] 发明目的:本发明针对现有技术存在的问题,提供一种DCO-OFDM可见光通信传输系统的实现方法,其通过求解优化问题,给出了信号转换形式函数中的斜率和直流点参数的最优取值。

[0007] 技术方案:本发明所述的DCO-OFDM可见光通信传输系统的实现方法包括:

[0008] (1) 建立DCO-OFDM可见光通信传输系统中发射端直流偏置前信号 $x(n)$ 和接收端逆变换后信号 $y(n)$ 之间的关系式为:

[0009] $y(n) = Kx(n) + z(n)$

[0010] 式中, K 为衰减因子, $K = Q\left(\frac{I_L - b'}{a_2\sigma}\right) - Q\left(\frac{I_H - b'}{a_1\sigma}\right)$, $Q(\cdot)$ 为高斯Q函数, I_L 和 I_H 分别

表示LED驱动电流的最小值和最大值, σ 为时域OFDM信号的标准差, b' 为直流点, a_1 和 a_2 为斜率,且 b' , a_1 , a_2 为未知参数, $z(n)$ 为包含AWGN和限幅噪声的总噪声,且和 $x(n)$ 无关;

[0011] (2) 建立 $y(n)$ 的信噪比表达式为:

$$[0012] \quad \text{SNR}_{\text{elec}} = \frac{K^2 \sigma^2}{G_B \sigma_z^2 \log_2 M}$$

[0013] 式中, G_B 为带宽利用率因子, σ_z^2 为噪声 $z(n)$ 的方差, M 为QAM调制阶数;

[0014] (3) 建立优化目标函数为:

$$[0015] \quad \max_{a_1, a_2, b'} \text{SNR}_{\text{elec}} \geq 0$$

[0016] s. t.

$$[0017] \quad E|x_t(n)| = \eta$$

$$[0018] \quad a_1 \geq 0; a_2 \geq 0$$

$$[0019] \quad I_H \geq b' \geq I_L$$

[0020] 式中, η 所需要的光功率, $x_t(n)$ 为 $x(n)$ 经过直流偏置及限幅转换后得到的信号,且

$$[0021] \quad x_t(n) = \begin{cases} I_H, & x(n) \geq \frac{I_H - b'}{a_1} \\ a_1 x(n) + b', & 0 \leq x(n) < \frac{I_H - b'}{a_1} \\ a_2 x(n) + b', & \frac{I_L - b'}{a_2} \leq x(n) < 0 \\ I_L, & x(n) < \frac{I_L - b'}{a_2} \end{cases}$$

[0022] (4) 按照以下步骤求解步骤(3)的最优解:

[0023] A: 给定斜率初始点 $a_1^{(0)}=0.35$ 、 $a_2^{(0)}=0.35$ 、 $b'^{(0)}=1$,初始罚因子 $\xi_1=20$,放大系数 $c>1$,允许误差 $\varepsilon>0$,迭代次数 $k=1$;

[0024] B: 以 $a_1^{(k-1)}$ 、 $a_2^{(k-1)}$ 、 $b'^{(k-1)}$ 为初点,求解线性约束问题 $\max_{a_1, a_2, b'} \text{SNR}_{\text{elec}} - \xi_k \{E[x_t^{(k)}(n)] - \eta\}^2$,约束条件为 $a_1 \geq 0; a_2 \geq 0; I_H \geq b' \geq I_L$,利用最速下降法求得极大值点为 $a_1^{(k)}$ 、 $a_2^{(k)}$ 、 $b'^{(k)}$;

[0025] C: 令 $f(a_1, a_2, b') = \xi_k \{E[x_t^{(k)}(n)] - \eta\}^2$,若 $f(a_1, a_2, b') < \varepsilon$,则停止计算,将 $a_1^{(k)}$ 、 $a_2^{(k)}$ 、 $b'^{(k)}$ 作为 a_1, a_2, b' 的值;否则,令 $\xi_{k+1} = c\xi_k$,置 $k=k+1$,并返回步骤B;

[0026] (5) 根据求解得到的 a_1, a_2, b' 的值,建立DCO-OFDM可见光通信传输系统模型,其中,

$$y(n) = \begin{cases} \frac{I_H + w(n) - b'}{a_1}, & x(n) \geq \frac{I_H - b'}{a_1} \\ x(n) + \frac{w(n)}{a_1}, & 0 \leq x(n) < \frac{I_H - b'}{a_1} \\ x(n) + \frac{w(n)}{a_2}, & \frac{I_L - b'}{a_2} \leq x(n) < 0 \\ \frac{I_L + w(n) - b'}{a_2}, & x(n) < \frac{I_L - b'}{a_2} \end{cases}$$

[0027] 式中, $w(n)$ 表示加性高斯白噪声。

[0028] 有益效果：本发明与现有技术相比，其显著优点是：本发明提出了一种基于DCO-OFDM可见光通信传输系统的实现方法，该方法在采用DCO-OFDM系统新型传输方案的基础上，通过求解优化问题，给出了信号转换形式函数中的斜率和直流点参数的最优取值，该方案的复杂度较低，易于实现，有效地提高了系统的BER性能。

附图说明

[0029] 图1是本发明所适用的DCO-OFDM系统模型图；

[0030] 图2是信号转换图；

[0031] 图3是本发明实施例的BER性能图。

具体实施方式

[0032] 一、技术问题

[0033] 本实施例的场景如下，如图1所示，DCO-OFDM系统模型中， $x(n)$ 经过直流偏置及限幅转换成 $x_t(n)$ ，信号转换的形式采用了分段函数的方式，其中斜率是自适应的，具体 $x_t(n)$ 函数形式表示为

$$[0034] \quad x_t(n) = \begin{cases} I_H, & x(n) \geq \frac{I_H - b'}{a_1} \\ a_1 x(n) + b', & 0 \leq x(n) < \frac{I_H - b'}{a_1} \\ a_2 x(n) + b', & \frac{I_L - b'}{a_2} \leq x(n) < 0 \\ I_L, & x(n) < \frac{I_L - b'}{a_2} \end{cases} \quad (1)$$

[0035] 式中 a_1 和 a_2 为两个变化的斜率， b' 为直流点。参数 b' 用来控制 $x_t(n)$ 的光功率，而参数 a_1 和 a_2 可以用来降低限幅失真。信号转换图如图2所示。

[0036] $x_t(n)$ 的期望值需要满足光功率的限制

$$[0037] \quad E[x_t(n)] = \int_{\frac{I_H - b'}{a_1}}^{+\infty} I_H \frac{1}{\sigma} p\left(\frac{x}{\sigma}\right) dx + \int_0^{\frac{I_H - b'}{a_1}} (a_1 x + b') \frac{1}{\sigma} p\left(\frac{x}{\sigma}\right) dx \\ + \int_{\frac{I_L - b'}{a_2}}^0 (a_2 x + b') \frac{1}{\sigma} p\left(\frac{x}{\sigma}\right) dx + \int_{-\infty}^{\frac{I_L - b'}{a_2}} I_L \frac{1}{\sigma} p\left(\frac{x}{\sigma}\right) dx = \eta \quad (2)$$

[0038] 式中 η 为所需要的光功率， $p(\cdot)$ 表示一个标准高斯随机变量的概率密度函数(PDF)， σ 为时域OFDM信号的标准差。

[0039] 在接收端，逆变换的输出表示为

$$\begin{aligned}
 [0040] \quad y(n) &= \begin{cases} \frac{r(n) - b'}{a_1}, & r(n) \geq b' \\ \frac{r(n) - b'}{a_2}, & r(n) < b' \end{cases} \\
 &= \begin{cases} \frac{x_i(n) - b'}{a_1} + \frac{w(n)}{a_1}, & r(n) \geq b' \\ \frac{x_i(n) - b'}{a_2} + \frac{w(n)}{a_2}, & r(n) < b' \end{cases} \quad (3)
 \end{aligned}$$

[0041] 式中 $w(n)$ 表示AWGN。当 a_1 和 a_2 两个斜率值太小的时候,会极大地扩大系统的AWGN。同时,当斜率过大时,分段函数也会产生严重的限幅噪声。于是,我们需要对EDCO-OFDM系统的性能进行分析,获取最优的参数 a_1, a_2 和 b' ,从而平衡AWGN和限幅噪声。

[0042] 二、技术方案

[0043] 针对以上问题,本实施例提供的DCO-OFDM可见光通信传输系统的实现方法包括以下步骤:

[0044] (1) 建立DCO-OFDM可见光通信传输系统中发射端直流偏置前信号 $x(n)$ 和接收端逆变换后信号 $y(n)$ 之间的关系式为:

$$[0045] \quad y(n) = Kx(n) + z(n) \quad (4)$$

[0046] 式中, K 为衰减因子, $K = Q\left(\frac{I_L - b'}{a_2\sigma}\right) - Q\left(\frac{I_H - b'}{a_1\sigma}\right)$, $Q(\cdot)$ 为高斯Q函数, I_L 和 I_H 分别表示LED驱动电流的最小值和最大值, σ 为时域OFDM信号的标准差, b' 为直流点, a_1 和 a_2 为斜率,且 b', a_1, a_2 为未知参数, $z(n)$ 为包含AWGN和限幅噪声的总噪声,且和 $x(n)$ 无关。

[0047] 其中, K 的表达式获取步骤为:

[0048] 衰减因子的定义为

$$[0049] \quad K = \frac{\text{Cov}[x(n), y(n)]}{\sigma^2} \quad (5)$$

[0050] 将 $y(n)$ 表示成与 $x(n)$ 相关的函数为

$$[0051] \quad y(n) = \begin{cases} \frac{I_H + w(n) - b'}{a_1}, & x(n) \geq \frac{I_H - b'}{a_1} \\ x(n) + \frac{w(n)}{a_1}, & 0 \leq x(n) < \frac{I_H - b'}{a_1} \\ x(n) + \frac{w(n)}{a_2}, & \frac{I_L - b'}{a_2} \leq x(n) < 0 \\ \frac{I_L + w(n) - b'}{a_2}, & x(n) < \frac{I_L - b'}{a_2} \end{cases} \quad (6)$$

[0052] 结合式(5)和式(6),可以得到衰减因子 K 的表达式。

[0053] (2) 建立 $y(n)$ 的信噪比表达式为:

$$[0054] \quad \text{SNR}_{\text{elec}} = \frac{K^2 \sigma^2}{G_b \sigma_z^2 \log_2 M} \quad (7)$$

[0055] 式中, M 为QAM调制阶数, σ_z^2 为噪声 $z(n)$ 的方差,且

$$\begin{aligned} \sigma_z^2 &= E\left[\{y(n) - Kx(n)\}^2\right] - E\left[y(n) - Kx(n)\right]^2 \\ [0056] \quad &= E\left[y^2(n)\right] - K^2\sigma^2 - E\left[y(n)\right]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

[0057] G_B 为带宽利用率因子,因为第0个子载波和第 $N/2-1$ 个子载波不携带任何信息,所以 $G_B = (N-2)/N$ 。那么, M -QAM调制的可见光OFDM系统理论的BER表达式为

$$\begin{aligned} \text{BER} &= \frac{4(\sqrt{M}-1)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q\left(\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} \text{SNR}_{\text{elec}}}\right) \\ [0058] \quad &+ \frac{4(\sqrt{M}-2)}{\sqrt{M} \log_2 M} Q\left(3\sqrt{\frac{3 \log_2 M}{M-1} \text{SNR}_{\text{elec}}}\right) \end{aligned} \quad (9)$$

[0059] (3) 建立优化目标函数为:

$$\max_{a_1, a_2, b'} \text{SNR}_{\text{elec}} \geq 0$$

s.t.

$$\begin{aligned} [0060] \quad E[x_i(n)] &= \eta \\ a_1 &\geq 0; a_2 \geq 0 \\ I_H &\geq b' \geq I_L \end{aligned}$$

[0061] (4) 按照以下步骤求解步骤(3)的最优解:

[0062] A: 给定斜率初始点 $a_1^{(0)}=0.35$ 、 $a_2^{(0)}=0.35$ 、 $b'^{(0)}=1$, 初始罚因子 $\xi_1=20$, 放大系数 $c>1$, 允许误差 $\varepsilon>0$, 迭代次数 $k=1$;

[0063] B: 以 $a_1^{(k-1)}$ 、 $a_2^{(k-1)}$ 、 $b'^{(k-1)}$ 为初点, 求解线性约束问题 $\max_{a_1, a_2, b'} \text{SNR}_{\text{elec}} - \xi_k \{E[x_i^{(k)}(n)] - \eta\}^2$, 约束条件为 $a_1 \geq 0; a_2 \geq 0; I_H \geq b' \geq I_L$, 利用最速下降法求得极大值点为 $a_1^{(k)}$ 、 $a_2^{(k)}$ 、 $b'^{(k)}$;

[0064] C: 令 $f(a_1, a_2, b') = \xi_k \{E[x_i^{(k)}(n)] - \eta\}^2$, 若 $f(a_1, a_2, b') < \varepsilon$, 则停止计算, 将 $a_1^{(k)}$ 、 $a_2^{(k)}$ 、 $b'^{(k)}$ 作为 a_1, a_2, b' 的值; 否则, 令 $\xi_{k+1} = c\xi_k$, 置 $k=k+1$, 并返回步骤B;

[0065] (5) 根据求解得到的 a_1, a_2, b' 的值, 建立DCO-OFDM可见光通信传输系统模型。式中, $w(n)$ 表示加性高斯白噪声。

[0066] 为了验证本实施例的性能, 对其进行仿真验证, 为了便于描述, 首先对光功率(照亮度)进行归一化处理为

$$[0067] \quad \eta_{\text{eq}} = \frac{\eta - I_L}{I_H - I_L}$$

[0068] 采用的系统参数: 在DCO-OFDM可见光通信系统中, 调制方式为16QAM, FFT大小为512, 有效子载波数为200, OFDM块数为1000, 电流 $I_L \sim I_H$ 为0~2。

[0069] 在不同 η_{eq} 的取值情况下, 仿真分析比较新型传输方案和原始DCO-OFDM方案的BER性能, 结果如图3所示。可以发现, 新型传输方案的性能总是要好于DCO-OFDM, 这是因为它对

于任意的 η_{eq} 和信噪比取值,总是在AWGN和限幅噪声之间达到最优的折中。

[0070] 以上所揭露的仅为本发明一种较佳实施例而已,不能以此来限定本发明之权利范围,因此依本发明权利要求所作的等同变化,仍属本发明所涵盖的范围。

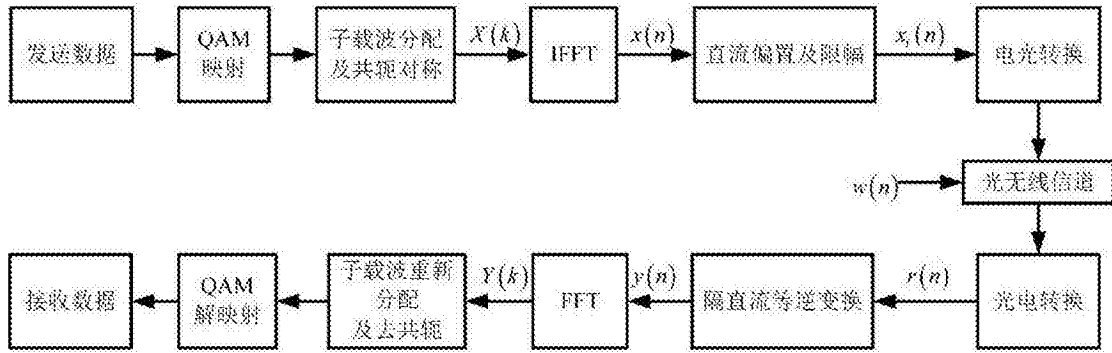


图1

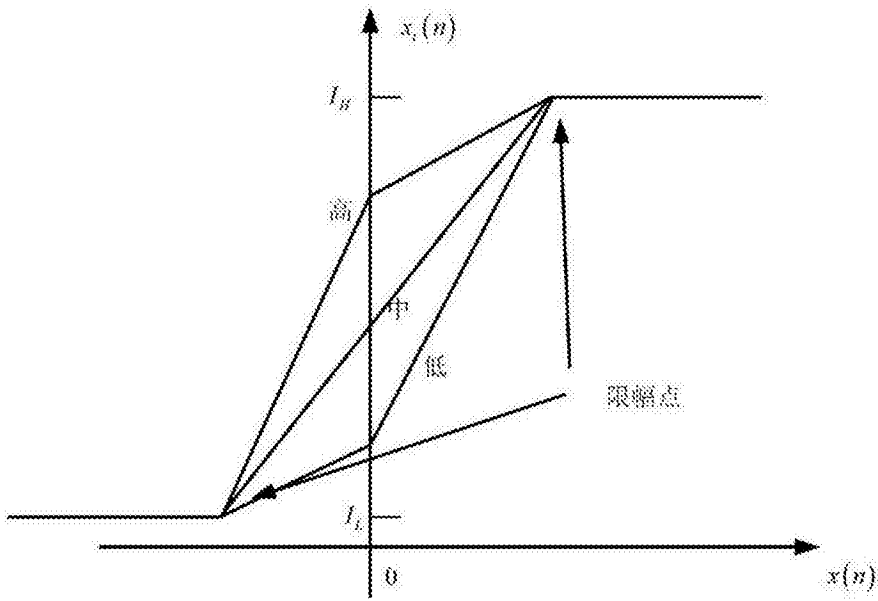


图2

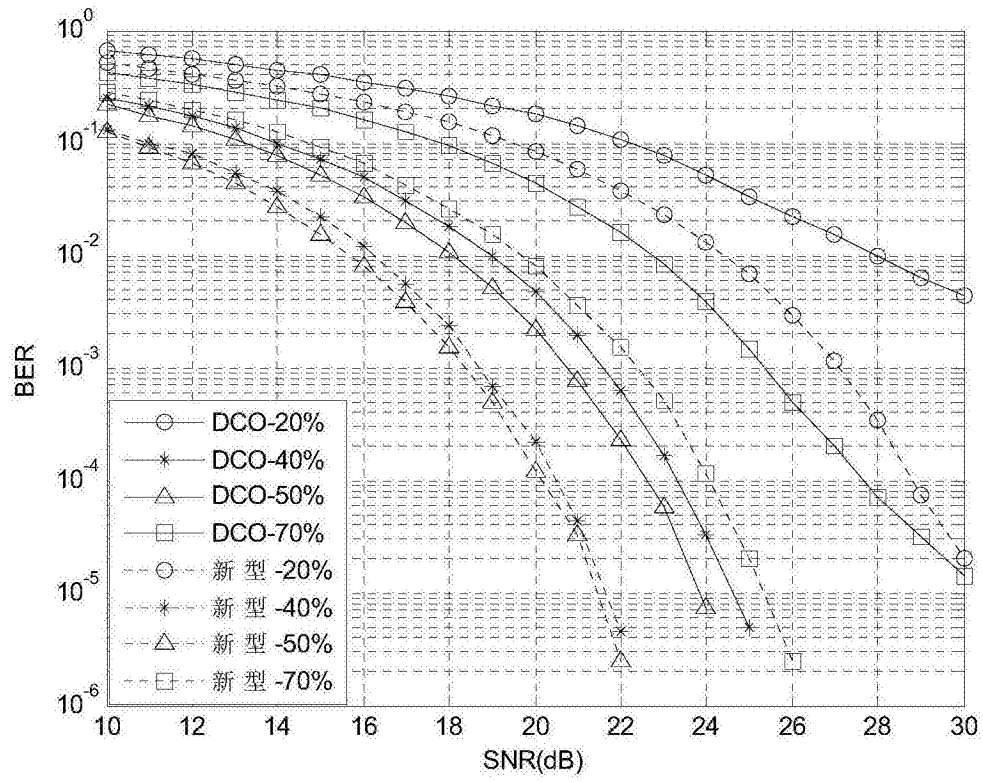


图3