

文章编号: 0258-7025(2009)10-2757-06

基于时频编码的自由空间光通信-正交频分复用系统模型

赵黎 柯熙政 王惠琴

(西安理工大学自动化与信息工程学院电子工程系, 陕西 西安 710048)

摘要 自由空间光通信(FSO)的信道是随机的,会受到灰尘、雨滴、雾等粒子散射的影响,正交频分复用(OFDM)调制方式可以很好地抵御大气散射的影响,但简单地将 OFDM 与 FSO 结合的系统复杂度较高。为了降低传统 FSO-OFDM 系统的复杂度及改善系统性能,借鉴 Alamouti 空时编码理念,设计了一种新的时频码。依据大气信道的特点,建立了信道模型。在介绍了系统模型之后,详细地陈述了时频码的编译码方法,分析了系统误码率(BER)与信道特性关系。最后通过 Monte Carlo 仿真实验进一步证明了该时频码的有效性。结果表明,以雨天为例,采用该时频编码不仅可以降低 FSO-OFDM 系统的复杂度,而且误码性能得到了显著的提高。

关键词 光通信;自由空间光通信;正交频分复用;时频码

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093610.2757

A Free Space Optical Communication-Orthogonal Frequency Devision Multiplexing Model Based on Time Frequency Code

Zhao Li Ke Xizheng Wang Huiqin

(Automation and Information School, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract The channel of free space optical communication (FSO) has to experience varied channel effects such as dust, rain, fog etc. The system which simple combined FSO with orthogonal frequency devision multiplexing (OFDM) is more complicated although OFDM can resist the influence of scatter. We proposed a new time frequency code to solve the shortcoming of the traditional FSO-OFDM system. We established the channel model according to the characters of atmospheric channel. And particular described the compilation method of time frequency code and analyzed the relation between the system's bit error rate (BER) and the channel characteristic after introducing the FSO-OFDM system model. At last, this scheme is confirmed by Monte Carlo approach. It is shown that this method not only can simplify the system but also can improve the error rate performance of the system effectively.

Key words optical communications; free space optical communication; orthogonal frequency division multiplexing; time frequency code

1 引言

自由空间光通信(FSO)是以光信号为载波,在空间实现点到点或点到多点信息传输的一种技术。该技术具有成本低、组网灵活、安装方便、无需频率许可等优点,已成为当今信息技术的一大热点,其作用和

地位已能和光纤通信、微波通信相提并论,是构筑未来世界范围通信网必不可少的一种技术。虽然自由空间光通信被人们广泛关注,但其也面临着严峻的挑战:1)光通信是一种超宽带通信方式,其带宽可达到 1 THz,但是由于光色散以及电子器件速度的限制,传

收稿日期: 2008-12-22; 收到修改稿日期: 2009-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(60977054)、国防重点实验室基金(9140C3601010701)、军队 863 创新计划(2008AAJ159)、陕西省教育厅科技专项基金(07JK332)、陕西省自然科学基金(2007F12)和广东省科技厅科技基金(2007-26)资助项目

作者简介: 赵黎(1981—),女,博士研究生,主要从事大气激光通信方面的研究。E-mail: pilly_lily@yahoo.com.cn

导师简介: 柯熙政(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事大气激光通信及信号处理等方面的研究。

E-mail: xzke@263.net

输速率常常被限制在10 Gb/s或者更低^[1]。2)自由空间光通信的信道为大气信道,大气各种成分的分子以及悬浮于大气中的固态和液态气溶胶粒子(雨、雾、沙尘等),光波在大气中传播时必然会遇到这些粒子产生散射及吸收,使得光波在大气中传输时产生衰减。文献[2,3]指出 FSO-正交频分复用(OFDM)技术不仅可以抵御光散射的影响,而且可以在不增加带宽的条件下提高码速率。文献[4]首次进行了通信速率为10 Gb/s,传输距离为2.5 km的FSO通信实验,比较了FSO-OFDM与FSO-开关键控(OOK)的性能,结果表明OFDM可以很好地抵御大气湍流、散射及吸收引起的随机衰落效应,同时指出OFDM将会成为下一代FSO系统最有效的方案,因而成为近几年的研究热点之一^[2~8]。

2006年,W. Shieh等^[2]提出了相干检测的OFDM系统(CO-OFDM)的概念,讨论了系统的误码率(BER)特性。但相干检测方法要求发射激光和接收端本地振荡激光的频率必须非常稳定,稳定度至少达到 10^{-11} 的数量级,使其实用化受到限制,国外已放慢或放弃该技术的研究,因此强度调制直接探测(IM/DD)仍是唯一可采用的光电检测方法,迫切需要研究适合于该调制方式的FSO-OFDM技术。2007年,Ivan B. Djordjevic等^[5]提出了一种适合于光通信的LDPC-Coded-OFDM IM/DD系统,当该技术用于光纤通信时,可以很好地抵御光纤通信中的残留色散及非线性的影响,而在自由空间光通信中,还可以有效抵御大气湍流的影响,但该系统在进行解码时由于采用软解调算法而增加了译码时的计算复杂度。同年,Yan Tang等^[6,7]定义了两种FSO-OFDM系统模型,其中基带模型需将OFDM信号分为实部和虚部两路电信号,分别利用马赫-曾德尔调制器(MZM)来产生光信号,这样相当于采用两套系统来完成信息的传输,浪费了硬件设备;而频带模型虽然只需要一个MZM调制器,但要求系统采用相干检测。因此OFDM与FSO这两项较成熟的技术不能进行简单的结合。文献[1,9]指出提高通信链路可靠性的一种有效手段就是为接收信号提供冗余。为此,本文针对IM/DD调制方式,通过增加信号冗余而设计了一种新的时频码,该方法通过简单的信号合并来完成接收端的信号检测,达到降低系统复杂度和提高系统可靠性的目的。

2 信道模型

信号通过大气信道后,会受到大气中灰尘、雨

滴、雾等粒子的散射影响,使得光信号强度明显衰减,根据布格(Bouguer)定律^[10],当强度为 I_0 的光通过距离为 l 的介质后,其强度可表示为

$$I = I_0 \exp\left(-\int_0^l \sigma dl\right), \quad (1)$$

其中 σ 为单次散射近似时的衰减系数,可表示为

$$\sigma = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q_e(n, \alpha) n(r) dr, \quad (2)$$

$$Q_e = Q_a + Q_s, \quad (3)$$

式中 Q_e 为根据Mie理论计算而来的衰减效率因子, Q_a 为吸收系数, Q_s 为衰减系数, r 为粒子半径, $n(r)$ 为介质的尺度分布函数,由降雨强度决定。

然而Bouguer定理的前提是假设接收机视场为 0° 。但在实际工程应用中,探测器总能检测到一部分进入接收机视场角内的散射能量,所以Bouguer定理不适合于实际工程应用。Adarsh Deepak等^[11,12]对多次散射和前向散射问题做了研究,证明在多次散射影响下,光束的前向几度范围内存在一个比较大的峰值,这种前向峰值效应使得光衰减大大降低。Adarsh Deepak等^[13]提出一个前向散射修正系数 R 的近似公式

$$R_c = R(\alpha, \theta) = [1 + J_0^2(\alpha, \theta) + J_1^2(\alpha, \theta)]/2, \quad (4)$$

式中 α 为尺度参数, θ 为散射角, $J_0(\alpha, \theta)$ 和 $J_1(\alpha, \theta)$ 为零阶和一阶第一类贝塞耳函数。同时,在 $r > \lambda$ 和 $\theta \leq 1.5^\circ$ 时,同精确公式相比误差小于2%。因此,根据该修正方案对单次散射公式进行再次修正,修正后可考虑多次散射的影响,以便于更加准确地计算。

修正后的衰减效率因子

$$Q'_e = Q_a(\alpha, n) + R_c(\alpha, \theta) Q_s(\alpha, n), \quad (5)$$

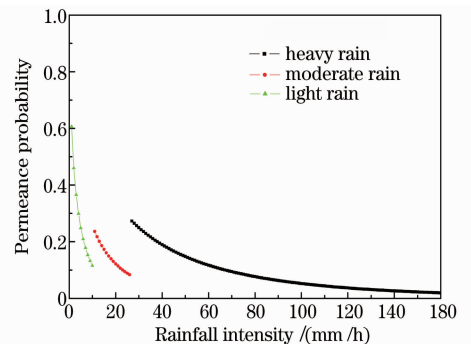


图1 波长 $\lambda=10.60 \mu\text{m}$ 的激光透过率随降雨强度的变化曲线

Fig.1 Laser permeance probability with rainfall intensity in wavelength $\lambda=10.60 \mu\text{m}$

根据我国气象部门对降雨等级分布的规定(小雨:24 h内降雨强度小于或者等于10 mm;中雨:

24 h 内降雨强度在 10~25 mm 之间;大雨:24 h 内降雨强度在 25~50 mm 之间;暴雨:24 h 内降雨强度在 50 mm 以上),结合修正后的衰减公式,计算出了波长 $\lambda=10.60 \mu\text{m}$ 的激光透过率随降雨强度的变化规律(见图 1 所示)。

3 系统模型

FSO-OFDM 系统与传统的 FSO-OOK 系统相同,都是由发射和接收两部分组成。发射部分由 OFDM 调制模块、光上变频模块、大气信道组成;接收部分由光下变频模块和 OFDM 解调模块组成。

时频编码的 FSO-OFDM 系统模型如图 2 所示,信源发送的二进制信息比特首先进行星座映射如正交幅度调制(QAM)、绝对相位调制(MPSK),对星座映射后的信号依据傅里叶变换的性质在频域进行编码,这样在发送端就只需要一个 MZM,接收端只需一对光电探测器,同时在发射和接收端不需要光带通滤波器,从而降低了系统复杂度。然后再对其进行时域编码构造出类似于 Alamouti 空时码的正交性码子,以提高信号的冗余度来改善系统的误码性能。将编码后的信号进行串并变换再进行逆傅里叶变换(IFFT)变换,得到时域信号后再对信号加载保护前缀,再进行并串变化及数模变化,用该模拟信号驱动 MZM 产生光信号发射出去,在接收端首先将信号经过一对平衡接收机进行光电转换,再根据发送部分的逆过程进行解码即可恢复出原始的

二进制信息。

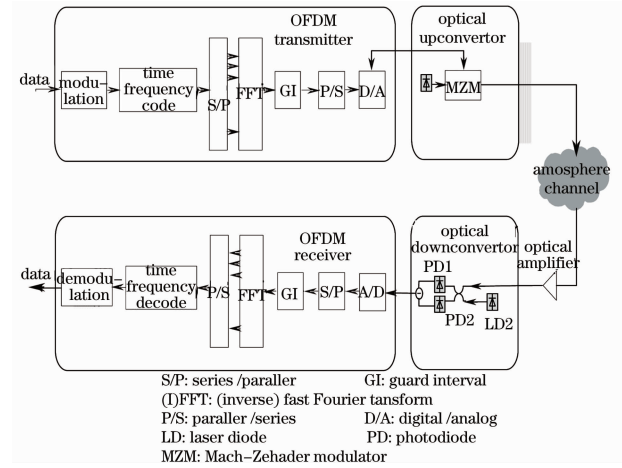


图 2 FSO-OFDM 系统模型

Fig. 2 The System Model of FSO-OFDM

4 编译码原理

4.1 频域编码原理

由于传统 OFDM 信号都是复数形式,该形式的信号在基带/频带 FSO-OFDM 系统中都不能进行简单的 IM/DD^[8,14]。对调制映射(如 QAM, MPSK)后的信息依据快速傅里叶变换(FFT)的性质在频域进行编码,则基带 OFDM 符号就是实序列,这样在接收和发送端分别使用一个 MZM 和一对光电探测器就可以完成光电转换过程,从而降低了系统的复杂度^[14]。

N 个子载波上的信号的编码规则为

$$x'(n) = \begin{cases} \text{Re}[x(1)] & n = 1 \\ \text{Im}[x(1)] & n = N/2 + 1 \\ x(n) & n = 2, 3, 4, \dots, N/2 \\ x^*(N - n + 2) & n = (N/2 + 2), (N/2 + 3), \dots, N \end{cases}, \quad (6)$$

其中 $x(n)$ 表示信号 x 的第 n 位的数值

4.2 时域编码原理

Alamouti 提出的空时编码方案最初是用于多输入多输出(MIMO)系统的,它可为信号同时提供时域和空间域冗余,从而提高 MIMO 系统的可靠性^[1,10]。本文将空时编码的思想应用于 OFDM 系统中,构造出了一种适用于 FSO-OFDM 系统的时频码。

该编码格式在频域中是以单个子载波为基本单元,在时域中是以若干个 OFDM 符号为基本单元,以最简单的时频码为例,定义两个 OFDM 符号 $x_1(n), x_2(n) \quad n = 1, 2, 3, \dots, N$,将这两个 OFDM 符号送入编码器按照公式(7)的方式进行编码,

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x'_1 & x'_2 \\ -x'_2 & x'_1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

对编码后的信号进行 IFFT 变换得

$$\mathbf{Y} = \mathcal{F}_F^{-1}[\mathbf{X}]$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x'_{1,k} \exp(j2\pi f_k t) & \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x'_{2,k} \exp(j2\pi f_k t) \\ - \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x'_{2,k} \exp(j2\pi f_k t) \right)^* & \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x'_{1,k} \exp(j2\pi f_k t) \right)^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 & y_2 \\ -y_2^* & y_1^* \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$x'_{i,k}(n)$ 为经过频域编码后的第 i 个 OFDM 符号, 第 k 个子载波上的信号。 f_k 为子载波频率。将编码后的信息定义为一超帧, 其中包含两个子帧: $\mathbf{Y}_1 = [y_1 \quad -y_2^*]$, $\mathbf{Y}_2 = [y_2 \quad y_1^*]$ 。将两个子帧的信号顺时发送。

4.3 译码原理

针对(7)式中的信号, 定义 $H_i(n)$ 为第 i 子帧在第 n 个子载波上的复信道频率响应

$$H_i(n) = \exp[j2\pi f_n t - \int_0^t \sigma_i dl], \quad i = 1, 2 \quad (9)$$

在第 i 个发送时刻第 n 个子载波上接收的信号为

$$R_1(n) = H_1(n)x'_1 + H_2(n)x'_2 + \eta_1(n), \quad (10)$$

$$R_2(n) = -H_1(n)x'_2 + H_2(n)x'_1 + \eta_2(n), \quad (11)$$

式中 $\eta_i(n)$ 为第 i 子帧的第 n 个子载波上的加性高斯噪声。对 $R_1(n)$ 和 $R_2(n)$ 进行信号合并处理, 有

$$\begin{aligned} \tilde{x}'_1(n) &= H_1^*(n)R_1(n) + H_2(n)R_2^*(n) = [|H_1(n)|^2 + |H_2(n)|^2] x'_1(n) + \\ & \quad H_1^*(n)\eta_1(n) + H_2(n)\eta_2^*(n), \\ \tilde{x}'_2(n) &= H_2^*(n)R_1(n) + H_1(n)R_2^*(n) = [|H_1(n)|^2 + |H_2(n)|^2] x'_2(n) - \\ & \quad H_1(n)\eta_2^*(n) + H_2^*(n)\eta_1(n), \end{aligned} \quad (12)$$

$\tilde{x}'_1(n)$, $\tilde{x}'_2(n)$ 是根据信道衰落系数和接收信号进行合并得到的信号。

假设系统完全同步, 并且接收端已经准确地估计出信道的衰落系数, 则接收端就可采用最大似然译码规则来检测信号。从星座中找出一对符号 $(\hat{x}_1 \quad \hat{x}_2) \in C$ (C 为所有可能发送符号的集合), 使得欧式距离最小

$$d^2(R_1, H_1\hat{x}_1 + H_2\hat{x}_2) + d^2(R_2, -H_1\hat{x}_2 + H_2\hat{x}_1) \rightarrow \min. \quad (13)$$

将(10), (11)式代入(13)式, 最大似然译码变为

$$(\hat{x}_1, \hat{x}_2) = \operatorname{argmin}(|H_1|^2 + |H_2|^2 - 1)(|\hat{x}_1|^2 + |\hat{x}_2|^2) + d^2(\tilde{x}'_1, \hat{x}_1) + d^2(\tilde{x}'_2, \hat{x}_2). \quad (14)$$

从(12)式可以看出合并信号分别是 $x'_1(n)$, $x'_2(n)$ 的函数, 并没有 $x'_1(n)$, $x'_2(n)$ 的交叉项。所以(14)式可分解为两个独立的信号分别进行译码, 即

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \operatorname{argmin}(|H_1|^2 + |H_2|^2 - 1)|\hat{x}_1|^2 + d^2(\tilde{x}'_1, \hat{x}_1), \\ \hat{x}_2 &= \operatorname{argmin}(|H_1|^2 + |H_2|^2 - 1)|\hat{x}_2|^2 + d^2(\tilde{x}'_2, \hat{x}_2). \end{aligned} \quad (15)$$

由于本系统采用四相相移键控(QPSK)调制方式, 所有星座点的功率相等 $|\hat{x}_1|^2 = |\hat{x}_2|^2$, 则(15)式可简化为

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= \operatorname{argmind}^2(\tilde{x}'_1, \hat{x}_1), \\ \hat{x}_2 &= \operatorname{argmind}^2(\tilde{x}'_2, \hat{x}_2), \end{aligned} \quad (16)$$

得到星座位置值后, 对其进行解调即可得到原始二进制数据。

5 误码性能分析

假设 $\mathbf{s}_{\text{OFDM}}(i, k)$ ($i = 1 : \infty, k = 1 : N$) 为发送端发送的一个 OFDM 符号。其中 i 表示第 i 个 OFDM 符号, k 表示某个 OFDM 符号的第 k 个子载波。

对于任一个 OFDM 符号经过信道 \mathbf{h} 后在接收端接收到的信号为

$$\mathbf{y}(i, n) = \mathbf{h}(i, n)\mathbf{s}_{\text{OFDM}}(i, n) + \boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} h(i, 0) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h(i, 1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \vdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & h(i, N-1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(i, 0) \\ s(i, 1) \\ \vdots \\ s(i, N-1) \end{bmatrix} + \boldsymbol{\eta}. \quad (17)$$

对接收到的时域信号再进行 FFT 变换,即可得到星座位置值,进而可以解调出原始二进制数据。从(17)式可以看出每个子载波上的信道响应是不同的,如果每个子载波上的信道响应值变化不大,即可近似为恒参信道 $\mathbf{h}(i)$ 时,根据 FFT 变换的线性特性有

$$\mathbf{Y}(i,n) = \mathcal{F}_F[\mathbf{h}(i)\mathbf{s}_{\text{OFDM}}(i,n) + \boldsymbol{\eta}] = \mathbf{h}(i)\mathcal{F}_F[\mathbf{s}_{\text{OFDM}}(i,n)] + \mathcal{F}_F(\boldsymbol{\eta}), \quad (18)$$

此时系统性能主要取决于加性噪声,随着信噪比的增加,加性噪声的影响就可以忽略掉;如果每个子载波上的信道响应值变化比较大时,则系统性能主要取决于乘性噪声,系统性能就会随着信号衰减的程度与衰减的方差而不同。

6 仿真实验

利用 Monte Carlo 方法对系统的误码性能分别在大雨、中雨、小雨情况下对 10^6 个 OFDM 符号进行了仿真,仿真参数设为:激光波长 $\lambda = 10.60 \mu\text{m}$,该激光波段对应的雨介质折射率 $m = 1.27 - i \times 1.96 \times 10^{-3}$,传输距离为 1 km,采用 QPSK 调制方式,循环前缀长度为子载波数的 1/10,采用(7)式中定义的最简单的时频编码方案,分别对小雨、中雨和大雨中的情况进行了仿真研究,结果如图 3~5 所示。

在小雨天单位时间内的平均降雨量为 10 mm 时系统性能如图 3 所示,小雨天散射造成的光强度衰减的方差为 2.4×10^{-2} ,即散射造成的光强衰减起伏较大,经过编码后的系统性能明显较原始系统性能有所提高,并且随着子载波数目的增加,系统性能的改善程度也大幅提高。当误码率为 10^{-5} 时,子载波数 $N=32$ 时编码后系统较原始系统性能改善了约 2 dB,子载波数 $N=128$ 时编码后系统较原始系统性能改善了约 8 dB,子载波数 $N=256$ 时编码后系统较原始系统性能改善了至少 10 dB。

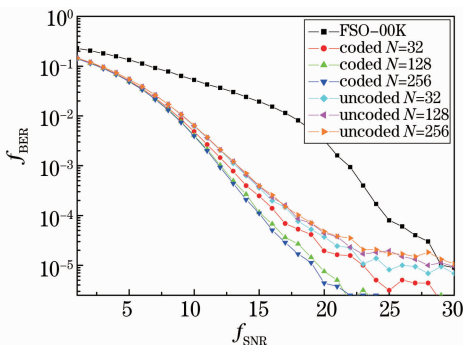


图 3 小雨天系统性能图

Fig. 3 System performance under light rain

中雨天单位时间内平均降雨量为 25 mm 时系统性能如图 4 所示,中雨天散射造成的光强度衰减的方差为 3.0441×10^{-4} ,当误码率为 10^{-5} 时,子载波数 $N=32$ 时编码后系统较原始系统性能改善了约 2 dB,子载波数 $N=128$ 时编码后系统较原始系统性能改善了约 3 dB,子载波数 $N=256$ 时编码后系统较原始系统性能改善了约 4 dB。

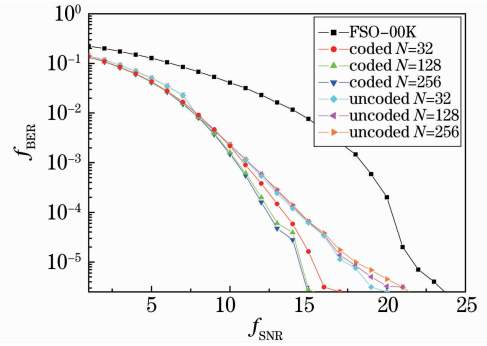


图 4 中雨天系统性能图

Fig. 4 System performance under moderate rain

在大雨天单位时间内平均降雨量为 55 mm 时系统性能如图 5 所示,大雨天散射造成的光强度衰减的方差为 8.7762×10^{-5} ,编码后的系统较原始系统性能改善不是很明显,当误码率为 10^{-5} 时,子载波数 $N=32$ 及 $N=128$ 时编码后系统较原始系统性能基本没有变化,当子载波数 $N=256$ 时编码后系统较原始系统性能仅改善了约 2 dB。这是因为在大雨时,光强的起伏方差较小,即散射对光强的影响比较平缓,此时信道为慢衰落信道,可以近似为恒参信道。

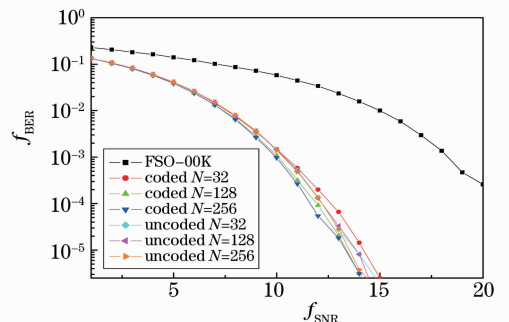


图 5 大雨天系统性能图

Fig. 5 System performance under heavy rain

由图 3~5 仿真结果可以看出,FSO-OFDM 系统的性能取决于光强度衰减系数与光强起伏方差。如图 1 所示,小雨时光衰减最小,但光强度衰减的起伏方差比较大,可见系统性能主要受光强度衰减方差的影响。中雨和大雨情况下散射造成的光强度衰减方差都比较小,但中雨天光强度衰减较大雨天的

大,因此中雨天性能不及大雨天的好。

7 结 论

针对原有 FSO-OFDM 系统的不足提出了一种基于时频编码的 FSO-OFDM 系统模型。该方法通过为接收信号提供时间域与频率域上的冗余来改善系统性能,通过简单的信号合并来降低信号检测的复杂度。仿真结果表明 FSO-OFDM 系统的性能决定于光强度衰减系数与光强起伏方差,并且当光强起伏方差较大时,本文系统较原始系统性能明显提高,但当光强起伏方差较小时,本文系统较原始系统性能改善不明显。在光强起伏方差相差不大的情况下,光强度衰减系数越小系统性能越好。

参 考 文 献

- 1 Wang Huiqin, Ke Xizheng. Free space optical communication based on vertical bell labs layered space-time[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 874~878
王惠琴,柯熙政.基于垂直分层空时码的自由空间光通信[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 874~878
- 2 W. Shieh, C. Athaudage. Coherent optical orthogonal frequency division multiplexing [J]. *Electron. Lett.*, 2006, **42**(10): 587~589
- 3 Ivan B. Djordjevic, B. Vasic. 100 Gb/s transmission using orthogonal frequency-division multiplexing [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(15): 1576~1578
- 4 Neda Cvijetic, Dayou Qian, Ting Wang. 10 Gb/s free-space optical transmission using OFDM [C]. *Conference on Optical Fiber Communication/National Fiber Optic Engineers Conference, San Diego, CA, United States, Feb.* 2008
- 5 Ivan B. Djordjevic, Bane Vasic, Mark A. Neifeld. LDPC-coded OFDM for optical communication system with direct detection [J]. *IEEE J. Sel. top. Quantum Electron.*, 2007, **13**(5): 1446~1454
- 6 Yan Tang, William Shieh, Xingwen Yi *et al.*. Optimum design for RF-to-optical up-converter in coherent optical OFDM systems [J]. *IEEE Photonol. Technol. Lett.*, 2007, **19**(7): 483~485
- 7 Y. Tang, X. Yi, W. Shieh *et al.*. Optimum design for coherent optical OFDM transmitter [C]. *ECOC, Sept.* 2007, 16~18
Optical Fiber Communication and the National Fiber Optic Engineers Conference, Anaheim, CA, United States, Mar. 2007
- 8 Zhao Li, Ke Xizheng, Liu Jian. The model of frequency domain FSO-OFDM and LS channel estimation algorithm [J]. *Laser Journal*, 2009, **30**(3): 38~39
赵黎,柯熙政,刘健.频带 FSO-OFDM 系统建模与 LS 信道估计研究[J]. *激光杂志*, 2009, **30**(3): 38~39
- 9 Wang Huiqin, Ke Xizheng. MIMO free space optical communication based on orthogonal space time block code [J]. *Science in China*, 2008, **39**(8): 896~902
王惠琴,柯熙政.基于正交空时块编码的 MIMO 自由空间光通信 [J]. *中国科学*, 2008, **39**(8): 896~902
- 10 Song Zhengfang. *The Basic of Atmospheric Optics* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1990. 11~12
宋正方. *应用大气光学基础* [M]. 北京:气象出版社, 1990. 11~12
- 11 Adarsh Deepak, Michael A. Box. Forwardscattering corrections for optical extinction measurements in aerosol media. 1: Monodispersions [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(18): 2900~2908
- 12 Adarsh Deepak, Michael A. Box. Forwardscattering corrections for optical extinction measurements in aerosol media 2: Polydispersions [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(19): 3169~3176
- 13 Adarsh Deepak, O. H. Vaughan. Extinction-sedimentation inversion technique for measuring size distribution of artificial fogs [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(3): 374~378
- 14 Zhao Li, Ke Xizheng. Improved base band domain FSO-OFDM model [J]. *Semiconductor Optoelectronics.*, 2009, **30**(2): 277~279
赵黎,柯熙政.一种改进的 FSO-OFDM 基带模型 [J]. *半导体光电*, 2009, **30**(2): 277~279