

大气光通信中应用最优选择分集

吴长奇,潘继敏,于荣金

(燕山大学 信息科学工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:针对大气光通信中湍流对接收端误码率的影响,提出利用空间分集技术,通过对多发射器、多接收器最优选择来改善信噪比,降低误码率。仿真结果表明,当湍流较强时,多发射多接收比单发射单接收对系统的性能有更明显的改善。同时表明,在对数正态分布的光信道上,最优选择的效果与在瑞利衰落的无线信道上的效果基本相同。

关键词:大气光通信; 湍流; 空间分集; 最优选择

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)01-114-04

Atmospheric optical communication with optimal selection diversity

WU Chang-qi, PAN Ji-min, YU Rong-jin

(School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Space diversity technology is used to overcome the influence of turbulence on BER of receiving terminal in atmospheric optical communication. Optimal transmitters or/and receivers are selected from multiple transmitters and receivers to improve SNR and decrease BER. Simulation results show that when the turbulence is strong, considerable improvement in average BER by means of multiple transmitters or/and receivers than with the system of a transmitter and a receiver is achieved. The result also shows that the effect of the optimal selection is the same significance in atmospheric optical channel of log-normal distribution as in wireless channel of Rayleigh fading.

Key words: Atmospheric optical communication; Turbulence; Space diversity; Optima selection

0 引言

大气光通信的原理和技术与电通信的很相似,只是信息的载体不同,这里是利用光作为载体^[1]。在大气光通信中,光信号的传输受大气湍流的严重影响。这些影响包括光束的抖动、离散等,这些都会使接收

端的光场强度产生衰落,从而使接收机的误码率增加。为了对抗衰落,常用分集技术。分集技术可以分为发射分集与接收分集以及它们的结合。当多个发射器与接收器之间的信道弱相关或独立衰落时,这几种分集都可以提供明显的增益。

对于无线光通信中应用空间分集技术,参考文献

收稿日期:2004-01-07; 修订日期:2004-03-02

作者简介:吴长奇(1955-),男,黑龙江齐齐哈尔人,教授,主要研究领域是通信信号处理和无线通信技术,已发表论文 30 余篇,获省、部级科技进步二、三等奖各一次。

[2]讨论了不同的合并方式对误码率性能的影响,参考文献 [3] 讨论了角度分集对室内无线红外通信的影响。

当考虑发射分集或同时考虑发射与接收分集时,需要使用多个光发射器。在总功率恒定的条件下,每个光发射器均分总发送功率。由于不同发射器指向的误差,会使接收端接收到的总的光强度(即单位面积上的光功率)降低,它会降低光功率的利用效率,从而造成接收端误码率的增加。因此,提出一种收发器选择式的分集方案,可以在获得分集增益的同时,克服对光发射器发送功率分散的不足。

1 系统的组成与模型

简化的系统组成如图 1 所示。包括 M 个光发射器, N 个光探测器,光发射器与光探测器之间为考虑大气湍流的光信道。

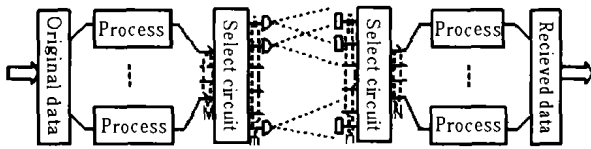


图1 系统模型

Fig.1 System model

光探测器转换效率可表示为:

$$R = \eta T_0 \frac{e\lambda}{hc} \quad (1)$$

式中 η 是光电转换器的量子效率; e 是电子电荷; λ 是信号波长; h 是普朗克常数; c 是光速; T_0 是探测器的积分区间,假设小于每个比特之间的间隔。

接收端第 j 个探测器的光电流表示为:

$$y_j(t) = \sum_i R x_i(t) \otimes h_{ij}(t) + n_j(t) \quad (2)$$

式中 $x_i(t)$ 为第 i 个发射器发射的瞬时光功率; $n_j(t)$ 为第 j 个探测器的总噪声,包括各种背景光引起的闪烁噪声、处理电路的热噪声等,可以认为是白高斯噪声; $h_{ij}(t)$ 为信道的脉冲响应; \otimes 代表卷积运算。对于在光通信中广泛采用的强度调制、直接检测(IM/DD)传输方式, $h_{ij}(t) \geq 0$ 。而且,当数据率远小于光信道的带宽时, $h_{ij}(t)$ 可以近似为理想的冲击函数,公式(2)

可以简化为:

$$y_j(t) = \sum_i R x_i(t) h_{ij} + n_j(t), \quad j=1,2,\dots,n \quad (3)$$

为了简洁,公式(3)可改写为:

$$Y(t) = RH^T X(t) + N(t) \quad (4)$$

式中 $Y(t) = [y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)]^T$ 为接收向量; $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t)]^T$ 为发射向量; $N(t) = [n_1(t), n_2(t), \dots, n_n(t)]^T$ 为噪声向量; $H = [h_{ij}]_{m \times n}$, 为信道传输矩阵, H^T 为 H 的转置矩阵,当光信号通过有湍流的大气时,信道 h_{ij} 是服从对数正态分布的随机变量^[3]。

考虑到接收端是对电信号进行的数据判决,所以分析探测器输出信号的信噪比。为了简化分析,这里考虑利用等增益合并方式,则接收端各个探测器输出总和的信噪比为:

$$\gamma = \gamma_0 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2 \quad (5)$$

式中 $\gamma_0 = \frac{1}{N} \frac{(RE_s)^2}{N_0}$, E_s 为发射端光信号总的发射功率; N_0 为噪声功率; i 为发射器标识; j 为接收器标识。

由公式(5)可见,在一定的信道条件下,增加发射器的数量和总发射功率都可以增大接收信噪比。但随着发射接收器数量的增加,所需的处理电路也随之增加。而且在总功率恒定的条件下,每个光发射器均分总发送功率。当光发射器的数量较多时,会使每个光发射器的发送功率减小,发光强度降低,降低光功率的利用效率。本文提出的收发器选择式的分集方案,可以在获得分集增益的同时,降低对光发射器发送功率控制精度的要求。具体的方法是,测定每个收发器之间光信道的传输衰减,并据此对发射器与探测器进行最优选择。

2 发射器与探测器最优选择

在进行发射器与接收器最优选择时,处理电路的个数小于发射接收器的个数,根据信道的条件选择出信噪比较大的信道进行通信,参考文献[4]中讨论了在确知信道参数和统计特性两种情况下,无线通信中最优天线选择对系统误码率的影响。本文将参考文献[5]的这种思路应用到具有大气湍流的大气光信道上。

此方法是从 M 个发射器与 N 个接收器中选出 m 个发射器和 n 个接收器进行通信, 并且使 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2$ 在每个瞬时具有最大值, 从而增加了信噪比。下面分别从发射器、接收器选择两方面来讨论, 当然也可以在发射和接收两端同时进行选择。

2.1 发射器选择

对于不在发射端进行选择的系统 ($m=M$), 每个数据流的信噪比为:

$$\gamma_t = \gamma_0 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2 = \gamma_0 \sum_{i=1}^m a_i \quad (6)$$

式中 $a_i = \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2 (1 \leq i \leq M)$, 代表第 i 个发射器到所有 n 个接收器的路径增益之平方和, 即为信道矩阵 H^T 的各列的 Frobenius 范数。

假设发送端的发射器个数为 M , 相应的处理电路数为 m , 接收端的探测器个数和处理电路的个数相同为 n , 对发射器的选择是从 M 行中选出 m 行, 使得

$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2$ 最大。进行选择后的信噪比为:

$$\gamma_s = \gamma_0 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2 = \gamma_0 \sum_{i=1}^m A_i \quad (7)$$

式中 $A_i = \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2 (1 \leq i \leq M)$ 是经过排序后的信道矩阵 H^T 各列的 Frobenius 范数, 并且 $A_1 \geq A_2 \geq \dots \geq A_m \geq \dots \geq A_M$ 。

M 越大, 供选择的路径增益越多, 所以, $\sum_{i=1}^m A_i \geq \sum_{i=1}^m a_i$, 从而有 $\gamma_s \geq \gamma_t$ 。

$\dots \geq A_M$ 。

2.2 接收器选择

对于不在接收端进行选择的系统 ($n=N$), 每个数据流的信噪比可表示为:

$$\gamma_t = \gamma_0 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2 = \gamma_0 \sum_{j=1}^n b_j \quad (8)$$

式中 $b_j = \sum_{i=1}^m |h_{ij}|^2 (1 \leq j \leq n)$, 表示所有 m 个发射器到第 j 个接收器的信道增益的平方和, 是未经排序的 H 各列的 Frobenius 范数。

假设发射器的数目和处理电路的数目相同, 都为

m , 接收端的探测器的个数为 N , 相应的处理电路数为 n , 并且 $n \leq N$, 接收器选择就是从 N 中选出 n 个探测器进行接收, 并且使 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2$ 最大, 也就是从 H 中选择出 n 个 Frobenius 范数最大的列。这时, 每个数据流的信噪比为:

$$\gamma_s = \gamma_0 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2 = \gamma_0 \sum_{j=1}^n B_j \quad (9)$$

式中 $B_j = \sum_{i=1}^m |h_{ij}|^2 (1 \leq i \leq M)$, 是经过排序后 H 各列的 Frobenius 范数, 并且有 $B_1 \geq B_2 \geq \dots \geq B_n \geq \dots \geq B_N$, N 值越大, 可供选择的路径增益越多, 所以 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2$ 越大, 从而有 $\sum_{j=1}^n B_j \geq \sum_{j=1}^n b_j$ 。

通过上述分析可以看出, 经过发射器或接收器的选择, 不但使系统得到简化而且使系统的信噪比增加, 误码率减小。

通过上述分析可以看出, 经过发射器或接收器的选择, 不但使系统得到简化而且使系统的信噪比增加, 误码率减小。

通过上述分析可以看出, 经过发射器或接收器的选择, 不但使系统得到简化而且使系统的信噪比增加, 误码率减小。

3 探测器间距离

在大气光通信中, 光束传输一段距离后, 分成许多小单元的非涅耳区, 小单元的直径称为菲涅耳尺寸:

$$\rho_r = \sqrt{\lambda L} \quad (10)$$

式中 λ 是采用的光波长; L 是传输的距离。

为了使接收端接收到的信号满足非相关的条件, 光电探测器之间的距离 r 应满足^[2]:

$$\sqrt{\lambda L} < r < \theta L \quad (11)$$

式中 θ 是光束的发散角。当 $\lambda=850 \text{ nm}$, $L=1000 \text{ m}$, $\theta=50 \text{ } \mu\text{rad}$ 时, 探测器间距离 $3 \text{ cm} \leq r \leq 5 \text{ cm}$, 实际工作中这是容易实现的。

4 数值分析

用蒙特卡罗仿真方法分析了发射端选择的误码率特性, 可以用相同的方法得到接收端选择的误码率特性。

这里考虑在大气中传输时,光束主要受湍流的影响,关于大气湍流对光束的影响,参考文献[6]有详细的描述。参考文献[5]中给出了光场强度 I 经过湍流后为对数正态分布:

$$f(I) = \frac{1}{2I} \frac{1}{(2\pi\sigma_x^2)^{1/2}} \exp[-(\ln I - \ln I')^2 / 8\sigma_x^2] \quad (12)$$

式中 σ_x 是对数振幅的方差,描述了大气湍流的强弱:

$$\sigma_x = 0.56 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^{7/6} \int_0^L C_n^2(z) (L-x)^{5/6} dx \quad (13)$$

式中 $C_n(z)$ 是和高度有关的波束谱结构参数, z 是大气湍流的高度,这里假设为常数; L 为传输距离。

仿真中,接收端使用两个光探测器,采用等增益合并方式,传输距离选择 1 km。图 2 和图 3 描述了在不同湍流强度下一发一收、两发两收、四发两收以及用两个接收器对发射器作四选二选择发送四种情况下的误码率与信噪比的关系。由图可见,当信噪比较高时,多发多收的误码率明显低于无分集的情况,在发射器和接收器个数相同的条件下,通过从多个发射器中选择出信道条件较好的进行通信可使误码率明显降低。

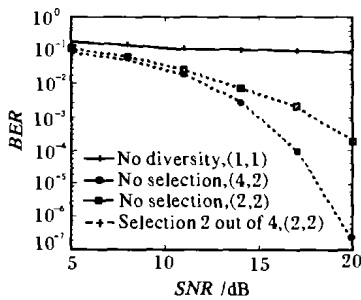


图 2 信噪比与误码率的关系, $\sigma_x=0.25$

Fig.2 Relationship of SNR and BER, $\sigma_x=0.25$

由图 2 可以看出,在 $\sigma_x=0.25$ 时,从四个发射器中选出两个和四个发射器同时进行发射,在相同信噪比条件下,误码率几乎相同,但是,有选择的两个发射两个接收比无选择的两个发射两个接收,误码率明显降低,当信噪比大到一定程度 ($SNR \geq 17$ dB),相同发射接收器条件下,有选择比无选择,误码率低一个数量级以上。

图 2 与图 3 相比,当信噪比 $SNR > 14$ dB 时,从四个中选择出两个比四个同时进行发射误码率要低,而且随着信噪比的增加,两者的差值也在增加。从这两幅图可以看出, σ_x 越大,也就是随着湍流的增强,进行发射器选择的效果越好。

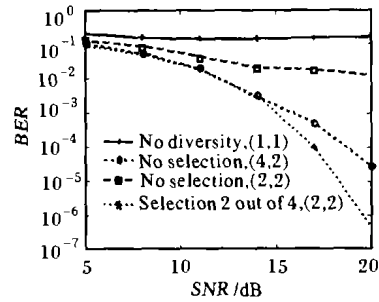


图 3 信噪比与误码率的关系, $\sigma_x=0.4$

Fig.3 Relationship of SNR and BER, $\sigma_x=0.4$

图 4 和图 5 对比了对数正态分布和瑞利分布两种信道衰落性能。从图 4 可以看出,对数正态分布情况下,当信噪比 $SNR > 14$ dB 时,进行选择后的两个

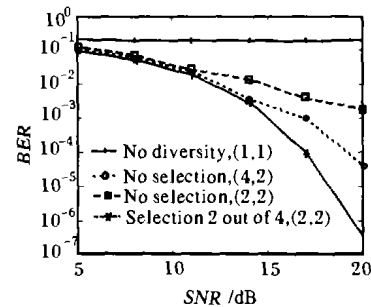


图 4 对数正态信道

Fig.4 Channel of log-normal

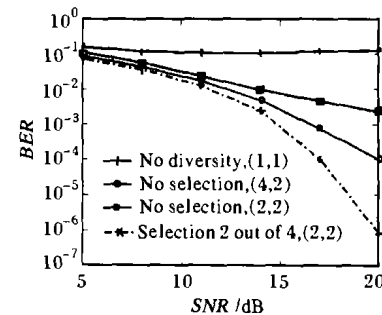


图 5 瑞利衰落信道

Fig.5 Channel of Rayleigh fading

发射两个接收的误码率明显低于四个同时进行发射,但是在 $SNR < 14$ dB 时,两者几乎没有差别。而图 5 在瑞利信道条件下,当 $SNR < 14$ dB 时,进行选择比四个发射器都用的误码率略低, (下转第 126 页)

纹比对并将比对结果通过串口输出;基于 IP2022 网络处理器的网络接入模块,能够通过 HUB 等网络设

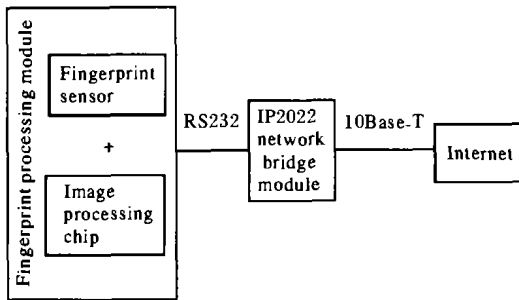


图 7 指纹考勤系统

Fig.7 Fingerprint time attendance

备接入以太网,当从以太网口接收到远程计算机命令时,将命令解包转化为串口数据流,通过 RS232 串口发给指纹处理模块;当从串口接收到指纹模块的处理结果时,将其转化为以太网数据帧,通过以太网传到互联网上的后台计算机,由后台 PC 上的应用程序对结果进行处理,实现远程信息传输和智能终端控制。

实际应用表明:该方案可行、设计简单、成本低廉,而且能避免在嵌入式处理器上进行数据库分析与管理,给复杂应用软件的开发带来了极大的方便。

参考文献:

- [1] 谢希仁.计算机网络[M].大连:大连理工大学出版社,1996.
- [2] 黎明.精选实用电子设计 100 例;Webchip 智能 Internet 网络接口芯片及其应用[M].北京:电子产品世界杂志社出版,2000.89-99.
- [3] Ubicom, Inc.IP2022 Internet Processor User's Manual[M].CA: Mountain View, 2002.
- [4] Ubicom, Inc.IP2022 Datasheet[M].CA: Mountain View,2002.
- [5] Ubicom, Inc.IP2022 Internet Processor Universal Device Networking Kit User's Guide[M].CA:Mountain View,2002.
- [6] Ubicom, Inc.IP2022 Internet Processor Connectivity Kit User's Guide[M].CA: Mountain View,2002.

(上接第 117 页)

随着信噪比的增加,两者的差值也在增加。由此可见,对数正态分布信道下的发射器选择也是可行的,尽管其性能稍逊于瑞利信道。相同信噪比条件下,两种信道误码率差别很小。

5 结论

提出了将最优选择发射分集技术应用于存在湍流的大气光通信系统中。要选出最优的信道,可以在进行通信前先通过信标光进行发射,接收端通过处理后选择出信噪比高的反馈给发射端,最后决定由哪几路进行本次通信,即在进行数据传输前通过一个预处理过程。具体的实现还有待进一步研究。

文中分析了最优选择发射分集方法的信噪比和误码率性能。数值分析的结果表明,多发射多接收器的最优选择可以在简化系统组成的同时,获得分集增益,但是比在瑞利信道条件下应用效果略差。

参考文献:

- [1] 王海先.大气中激光通信技术[J].红外与激光工程,2001,30(2): 123-127.
- [2] Lbrahim M M, Lbrahim A M. Performance analysis of optical receivers with space diversity reception[J].IEE Proc Comm,1996, 143(6): 369-372.
- [3] Joseph M Kahn, John R Barry. Wireless infrared communications [J].Proceedings of the IEEE,1997,85(2): 265-298.
- [4] Zhu Xiaoming, Joseph M Kahn.Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels[J].IEEE Transactions on Communications,2002,50(8):1293-1299.
- [5] Dhanajay A Gore,Arogyaswami J Paulraj.MIMO antenna subset selection with space-time coding[J]. IEEE Trans Comm,2002, 50 (10):2580-2587.
- [6] [美]欣克利 E D.大气激光检测[M].北京:科学出版社,1984.