

文章编号: 0258-7025(2008)06-0874-05

基于垂直分层空时编码的自由空间光通信

王惠琴 柯熙政

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 垂直分层空时编码(V-BLAST)是一种将空间复用和空间分集相结合的技术,它具有极高的频谱利用效率和传输速率,因此将垂直分层空时编码技术应用于自由空间光通信。在研究了大气信道的特性之后,提出了一种基于垂直分层空时编码的自由空间光通信系统的信道模型。介绍了垂直分层空时编码的编码原理,并分析了该系统的信道容量。利用仿真实验比较了采用垂直分层空时编码前后系统信道容量及误码性能的变化。结果表明,当接收天线数大于或等于发送天线数时,系统的信道容量与发送天线数成正比例增长,误码性能被有效改善。说明该系统具有垂直分层空时编码所提供的信道容量和良好的误码性能,且能有效克服大气湍流所产生的闪烁效应。

关键词 光通信;自由空间光通信;多输入多输出;垂直分层空时编码

中图分类号 TN 929.12 **文献标识码** A

Free Space Optical Communication Based on Vertical Bell Labs Layered Space-Time

Wang Huiqin Ke Xizheng

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

Abstract Vertical bell labs layered space-time (V-BLAST) is a technology combining space multiplexing with space diversity. It has the high spectrum efficiency and the transmission speed, so the technology is applied to free space optical communication. In this paper, after researching the characteristic of atmosphere channel, a free space optical communication channel model based on V-BLAST is proposed. Code principle of V-BLAST is introduced, and channel capacity of this system is analyzed. The difference of the channel capacity and error rate of the system with and without V-BLAST structure is compared through simulation experiment. As a result, when receiving antenna number is larger than the transmitting antenna number, the channel capacity is improved directly proportional with transmitting antenna number, and the error code performance of system coded V-BLAST is improved effectively. It shows that the system has channel capacity supplied by V-BLAST structure and well error code characteristic, and the scintillation effect caused by atmosphere turbulence is effectively overcome.

Key words optical communication; free space optical communication; multi-input multi-output; vertical bell labs layered space-time

1 引言

随着半导体激光器和光电探测器件的日益完善以及光通信技术的发展,自由空间光通信技术已被人们广泛应用。由于它结合了光纤通信以及微波等传统无线通信的优势,具有低成本、安装方便快捷、

通信安全保密、无需频率许可等优点,因而成为一种新兴的宽带无线接入方式而受到人们的广泛关注。但在实际使用中,虽然光信号的带宽很宽可以超过 1 THz,但是,由于光色散^[1]以及电子器件速度的限制,传输速率常常被限制到 10 Gbit/s 或者更低^[2]。

收稿日期: 2007-09-10; **收到修改稿日期:** 2007-11-30

基金项目: 国防重点实验室基金(9140C3601010701)、陕西省教育厅科技专项基金(07JK332)、陕西省自然科学基金(2007F12)和广东省交通厅科技计划(2007-26)资助项目。

作者简介: 王惠琴(1972—),女,甘肃人,副教授,博士研究生,主要从事多输入多输出自由空间光通信方面的研究。

E-mail: whq1222@lut. cn

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

E-mail: xzke@xaut. edu. cn

因此,采用不同的技术来提高系统的传输速率,例如波分复用(WDM)^[3]、偏振复用(PDM)^[4]、成像通信^[2]及多输入多输出(MIMO)传输系统^[5,6]等技术相继出现。垂直分层空时编码(V-BLAST)最早是贝尔实验室研制的一种具有代表性的多输入多输出分层结构^[7],因此本文将垂直分层空时编码技术应用于自由空间光通信,提出了一种适合于自由空间光通信的垂直分层空时编码。该系统具有原有垂直分层空时编码所具有的较高的信道容量和良好的可靠性。

2 大气无线光信道

大气无线光信道中有各种的链路功率损耗,如自由空间损耗、大气衰减和光强闪烁等。激光在大气中传播时,会受到气体分子、气溶胶以及悬浮粒子的吸收和散射,使得光能量损失,光斑的光强分布被改变。另外,在恶劣天气下,诸如雨、雾和云等会通过分子吸收和散射严重削弱传输光,甚至无法通信。大气的吸收和散射的共同影响表现为大气衰减,用大气透射率来度量。单色波的波长为 λ 时,大气透射率 $\tau(\lambda)$ 可表示为^[8]: $\tau(\lambda) = \exp[-\int_0^z \alpha(\lambda) dr]$,式中 r 为传输距离, $\alpha(\lambda)$ 为总的衰减系数, $\alpha(\lambda) = \alpha_m + \alpha_s$,其中 α_m 为散射系数, α_s 为吸收系数。

大气湍流会造成局部大气温度和折射率的随机变化,从而使接收端的光强产生随机起伏。对强度调制直接检测系统而言,其接收光功率 $P_r(t)$ 可以表

示为^[9]

$$P_r(t) = A(t)P_s(t) + P_n(t), \quad (1)$$

式中 $P_s(t)$ 为在没有闪烁衰减情况下的接收光功率,由大气传输损耗和发射功率的大小决定; $P_n(t)$ 为噪声功率; $A(t)$ 为光强闪烁衰减指数,就弱闪烁而言,其近似服从对数正态分布^[10],即

$$f_A(a) = \frac{1}{(2\pi\sigma_x^2)^{1/2}a} \exp\left[-\frac{(\ln a - \mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right], \quad a > 0 \quad (2)$$

式中 μ_x 为均值, σ_x^2 为方差,且 $\mu_x = -\sigma_x^2$ 。在强起伏湍流大气中,若传输距离、接收孔径和发射镜之间距离满足一定条件,随着光束数目的增加,大气闪烁也将趋于对数正态分布^[11]。然而,在对数正态分布中,采用闪烁因子S. I. = $e^{4\sigma_x^2} - 1$ 来表示光强衰落的大小,其典型值为S. I. $\in [0.4 \sim 1.0]$ ^[12]。

3 系统模型

基于垂直分层空时编码的多输入多输出自由空间光通信的基本原理是:把高速的数据业务分接为 M 个低速数据业务,通过普通的并行信道编码器编码后,对其进行分层空时编码。再将电信号转换成光信号,分别由 M 副天线同时、同频发送出去。在接收端,用 N 副天线进行分集接收并将其转换成电信号进行处理。由于分层空时码的译码需要用到信道传输特性,因此进行信道估计。经线性判决反馈均衡器抵消干扰后,进行分层空时译码和信道译码,即可恢复原始信号。系统模型如图1所示。

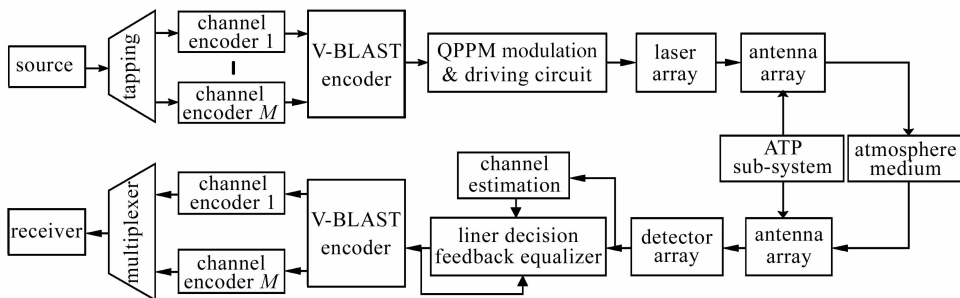


图1 基于垂直分层空时编码的自由空间光通信系统模型

Fig. 1 System model of free space optical communication based on V-BLAST

3.1 信道模型

对于一个有 M 副发送天线(发送天线数和激光器数目相同)和 N 副接收天线(接收天线数和探测器数相同)的多输入多输出系统($M \leq N$),总发送功率为 E_s ,每副发射天线的发射功率都等于发射机总功率的 $1/M$ 。接收端 N 副接收天线,在同一频带内接收信号,每副接收天线都将接收来自 M 副发射

天线的信号。该系统采用多进制脉冲相位(QPPM)调制。设 T 为字符周期,被分为 Q 个时隙,时隙长度为 T_s 。假设在 T 时间内信道的特性保持不变,且各信号之间是相互独立的。为了保证各发送信号之间是相互独立的,且能被接收端探测器探测到,要求任意两个激光发射器间的距离 d 满足 $\sqrt{\lambda L} < d < \theta L$,其中 θ 为光束的发散角, λ 为采用的光波长, L 为

传输的距离。假设字符是等概率发送的,每个字符表示 $\text{lb } Q$ 比特信息。

依据大气信道的特性和光信号的特点,在强度调制式的无线光通信中,接收端第 j 探测器的光电流 $y_j(t)$ 可表示为

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^M R a_{ji}^2(t) \otimes x_i(t) + n_j(t), \quad (3)$$

式中 $x_i(t)$ 表示第 i 个激光器发射的信号; $n_j(t)$ 表示第 j 个探测器上的噪声,包括各种背景辐射引起的闪烁噪声、暗电流和电路噪声等,服从高斯分布。 a_{ji} 表示第 i 个激光器到第 j 个探测器之间的信道增益,近似服从对数正态分布。在多进制脉冲相位调制的光通信中, x_i, y_j 和 n_j 均为 $1 \times Q$ 的行向量。光探测器转换效率 R 可表示为

$$R = \eta T_0 \frac{e\lambda}{hc}, \quad (4)$$

式中 η 为光电转换器的量子效率; e 为电子电荷; h 为普朗克常数; c 为光速; T_0 表示探测器的积分区间,假设其小于每个比特之间的时间间隔。

假设信道为窄带平坦衰落信道,并用矩阵形式表示,则为

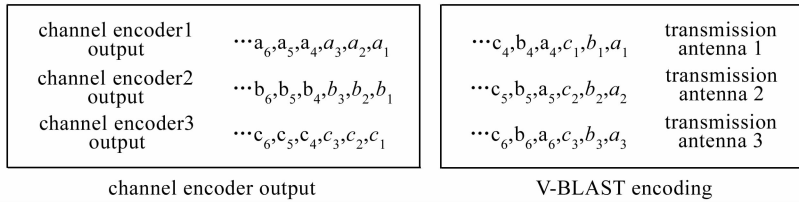


图 2 垂直分层空时编码原理

Fig. 2 Encoding principle of V-BLAST

在垂直分层空时编码接收算法中,最大似然接收机的性能最优^[12],但它的复杂度也最高,特别是随着收发天线数的增加,复杂度呈指数增长。在实际应用中难以实现而不采用,常把它作为一个性能界,用以衡量其他译码算法的性能。本文采用最小均方误差线性译码算法(MMSE)^[13]。最小均方误差线性译码方法就是根据接收端的接收信号 y 和估计的信道矩阵响应 \mathbf{A} 来寻找一个具体的加权矩阵 $\mathbf{W} = [\omega_1, \omega_2, \cdots, \omega_N]^T$,从而利用加权矩阵和接收信号得到发送信号的估计值 \hat{x} ,即 $\hat{x} = \mathbf{W}y$ 。

在最小均方误差线性译码算法中,要求加权矩阵满足关系

$$\epsilon^2 = E[\|x - \hat{x}\|^2] = E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^H] = E[(x - \mathbf{W}y)(x - \mathbf{W}y)^H], \quad \epsilon \rightarrow \min, \quad (6)$$

根据文献[13]可得

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{R}\mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{N}(t), \quad (5)$$

式中 $\mathbf{X}(t) = [x_1(t), x_2(t), \cdots, x_M(t)]^T$ 表示输入信号矩阵; $\mathbf{Y}(t) = [y_1(t), y_2(t), \cdots, y_N(t)]^T$ 表示输出信号矩阵; $\mathbf{N}(t) = (n_1(t), n_2(t), \cdots, n_N(t))^T$ 表示噪声矩阵,其各分量之间互相统计独立,且均为零均值、方差是 N_0 的白高斯噪声。 \mathbf{A} 为信道增益矩阵,即

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11}^2 & a_{12}^2 & \cdots & a_{1M}^2 \\ a_{21}^2 & a_{22}^2 & \cdots & a_{2M}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{N1}^2 & a_{N2}^2 & \cdots & a_{NM}^2 \end{bmatrix}.$$

3.2 垂直分层空时编码编译码原理

分层空时编码是将信源信息分成几部分,然后直接利用不同天线发送,接收端则利用各子信道因多径衰落而产生的不同特性来提取信息^[12]。垂直分层空时编码就是将并行信道编码器的输出按垂直方向进行空间编码,其编码原理如图 2 所示。由图 2 可知,信道编码器 1 开始输出的 M 个码元排列在第一列,信道编码器 2 开始输出的 M 个码元排列在第二列。一般来说,信道编码器 i 输出的第 j 批 M 个码元排列在第 $i + j - 1$ 列。编码后的码元按列由 M 副天线同时发送到信道中。

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = \mathbf{A}^H(\mathbf{A}^H\mathbf{A} + N_0\mathbf{I}_M)^+, \quad (7)$$

考虑到光电转换效应的影响,根据(5)式对其进行修正。可得

$$\mathbf{W}_{\text{MMSE}} = \mathbf{R}\mathbf{A}^H(\mathbf{R}^2\mathbf{A}^H\mathbf{A} + N_0\mathbf{I}_M)^+, \quad (8)$$

该式为基于最小均方误差线性准则的接收天线加权矩阵 \mathbf{W} 满足的条件。其中, \mathbf{A}^H 表示矩阵 \mathbf{A} 的共轭转置。 $+$ 表示矩阵的广义逆。 N_0 表示噪声方差。

4 信道容量

由(5)式,根据信息论^[14],多输入多输出系统的信道容量定义为

$$C = \max_{p(\mathbf{x})} I(\mathbf{x}; \mathbf{y}), \quad (9)$$

式中 $p(\mathbf{x})$ 是矢量 \mathbf{x} 的概率密度函数, $I(\mathbf{x}; \mathbf{y})$ 是矢量 \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 之间的互信息量。

$$I(\mathbf{x}; \mathbf{y}) = H(\mathbf{y}) - H(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = H(\mathbf{y}) - H(\mathbf{n}), \quad (10)$$

式中 $H(\mathbf{y})$ 和 $H(\mathbf{n})$ 分别是接收信号矢量 \mathbf{y} 和噪声矢量 \mathbf{n} 的熵, $H(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ 是在给定发送信号为 \mathbf{x} 的条件下接收到光电流信号为 \mathbf{y} 的条件熵。

根据无线光通信的信道模型(5)式, 可得无线光通信中多输入多输出的信道容量为

$$C = \max_{\mathbf{R}_{\text{xx}}, \text{tr}(\mathbf{R}_{\text{xx}}) = M} \text{lb det} \left[\mathbf{I}_N + \left(\frac{R^2 E_s^2}{MN_0} \right) \mathbf{A} \mathbf{R}_{\text{xx}} \mathbf{A}^H \right], \quad (11)$$

其中 $\text{det}(\cdot)$ 表示矩阵行列式; \mathbf{R}_{xx} 为发送信号矩阵 \mathbf{x} 的协方差矩阵, $\text{tr}(\mathbf{R}_{\text{xx}})$ 为 \mathbf{R}_{xx} 的迹; \mathbf{I}_N 为 N 阶的单位阵。对于垂直分层空时编码而言, 具有 $\mathbf{R}_{\text{xx}} = \mathbf{I}_M$ 。则(11)式可简化为

$$C = \text{lb det} \left[\mathbf{I}_N + \left(\frac{R^2 E_s^2}{MN_0} \right) \mathbf{A} \mathbf{A}^H \right]. \quad (12)$$

由奇异值分解理论, 信道矩阵 \mathbf{A} 的奇异值分解为 $\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{V}^H$, \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 分别为 $N \times N$ 和 $M \times M$ 的正交矩阵, 即 $\mathbf{U} \mathbf{U}^H = \mathbf{I}$, $\mathbf{V} \mathbf{V}^H = \mathbf{I}$, \mathbf{D} 为 $M \times M$ 的非负对角矩阵, 其对角元素 λ_i 为矩阵 $\mathbf{A} \mathbf{A}^H$ 的正特征值。并利用矩阵的性质 $\text{det}(\mathbf{I} + \mathbf{U} \mathbf{D} \mathbf{U}^H) = \text{det}(\mathbf{I} + \mathbf{D})$, 可得信道容量

$$C = \sum_{i=1}^M \text{lb} \left(\mathbf{I}_N + \frac{R^2 E_s^2}{MN_0} \lambda_i \right), \quad (13)$$

对于实际的无线衰落环境, 由于多径效应和信道的时变性等因素的影响, 信道增益不再是确定的, 而是一个随机变量, 因而信道容量 C 也是一个随机变量, 所以采用平均容量 C_{avg} 来衡量系统整体意义上的信道容量性能, 即

$$C_{\text{avg}} = E_A[C], \quad (14)$$

式中 $E_A[\cdot]$ 表示瞬时信道容量 C 关于信道增益 \mathbf{A} 求平均。

5 仿真实验及结果

为了具体分析采用垂直分层空时编码后的无线光通信系统的特性, 本文采用蒙特卡罗 (Monte Carlo) 方法进行系统仿真, 分别分析了收发天线数、噪声及大气闪烁对信道容量和误码率的影响, 并和未编码(即 1×1) 的无线光通信系统进行了比较。仿真条件为: 1) 设总发送功率 E_s 不变, 取 $E_s = 1$ (归一化值); 2) 设信道特性和噪声能够被准确估计; 3) 光电转换效率 $R = 0.8$; 4) 光强闪烁服从对数正态分布, 闪烁因子 $S. I. = 0.6, 0.9$; 5) 设信号完全同步; 6) 系统采用多进制脉冲相位调制, $Q = 4$ 。7) 取天线数分别为 $1 \times 1, 1 \times 2, 1 \times 4, 2 \times 2, 2 \times 3, 4 \times 4$ 和 4×5 的系统为例。

为了分析收发天线数、噪声及大气闪烁对系统信道容量的影响, 根据(14)式仿真了闪烁因子为 0.6 时, 系统平均信道容量随信噪比的变化曲线, 如图 3 所示。从图中看出: 1) 在接收天线数大于或等于发送天线数的情况下, 按照发送天线数为 1 到 2, 再到 4 的顺序, 系统的信道容量几乎随发送天线数成倍增长, 体现了发端采用复用技术的效果。2) 在发送天线数不变的情况下, 按照天线数为 $1 \times 1, 1 \times 2$ 和 1×4 的顺序, 2×2 和 2×3 的顺序, 4×4 和 4×5 的顺序, 信道容量随接收天线数的增加而增加。说明增加探测器数目, 有利于提高系统的信道容量。总之, 随天线数目的增加, 系统的信道容量逐渐增大, 尤其是当接收天线数大于或等于发送天线数时, 系统容量随发送天线数几乎成正比例增长。

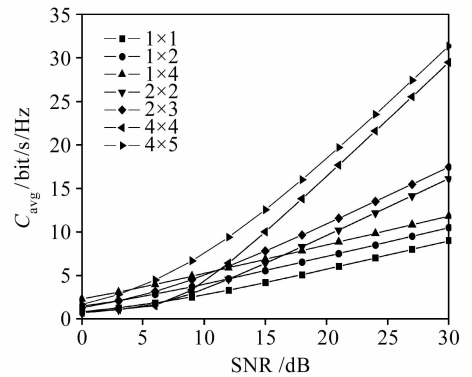


图 3 S. I. = 0.6 时信道容量与信噪比的变化曲线
Fig. 3 When S. I. = 0.6, curves of channel capacity versus SNR

为了分析收发天线数、噪声及大气闪烁对系统误码率 (BER) 的影响, 分别仿真了闪烁因子为 0.6, 0.9 时, 系统误码率随信噪比的变化曲线, 如图 4, 5 所示。由图中可看出: 1) 在闪烁因子为 0.6, 0.9 时, 系统的误码率均被明显改善, 说明该系统能有效克服大气湍流所引起的闪烁效应。2) 当激光器数目不变时, 系统的误码率随探测器数目的增加而减小, 且误码改善效果十分明显。在闪烁因子为 0.6 的情况下, 当误码率为 10^{-3} 时, 1×4 和 1×2 系统相比较, 信噪比改善了约 12 dB。当误码率为 10^{-2} 时, 4×5 和 2×3 系统相比较, 信噪比改善了约 1 dB。3) 按照天线数为 $1 \times 1, 2 \times 2$ 和 4×4 的顺序, 系统的误码率随天线数的增加而减小, 但改善效果不明显, 这是因为在发端采用了复用技术的缘故。

另外, 从图 4, 图 5 中也可看到, 当信噪比小于 20 dB 时, 2×2 和 4×4 系统的性能明显好于 1×1 系统。但当信噪比接近 30 dB 时, 2×2 和 4×4 系统

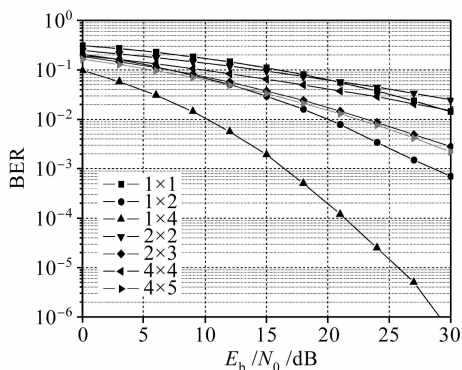


图4 S. I. = 0.6 时误码率与信噪比的曲线

Fig. 4 When S. I. = 0.6, curves of BER versus SNR

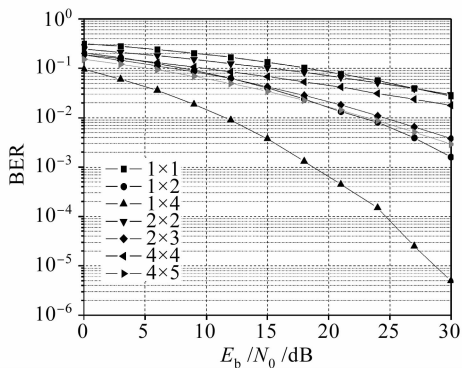


图5 S. I. = 0.9 时误码率与信噪比的曲线

Fig. 5 When S. I. = 0.9, curves of BER versus SNR

的性能非常接近于 1×1 系统。说明最小均方误差线性译码算法在低信噪比时,性能稍好一些;但是在高信噪比时,多天线系统和单天线系统的性能近乎一致,甚至有时会变得稍差,故最小均方误差线性译码算法更适合于低信噪比的情况。

6 结 论

将垂直分层空时编码技术应用于自由空间光通信中,提出了一种基于垂直分层空时编码的多输入多输出自由空间光通信系统,并分析了该系统的信道容量及误码性能。仿真结果表明:随天线数目的增加,系统的信道容量增大,误码率减小。尤其是当接收天线数大于或等于发送天线数时,系统容量随发送天线数成正比例增长,误码性能的改善量更大,而且能有效克服大气湍流所引起的闪烁效应。对于垂直分层空时编码而言,接收端选用的译码算法对系统性能至关重要,译码算法的好坏直接影响信号的恢复。最小均方误差线性检测算法由于考虑了噪

声对信号的影响,故特别适用于小信噪比的情况,对大信噪比的信号而言效果并不是十分理想,因此,检测算法有待进一步改进。

参 考 文 献

- Ren Jianhua, Yu Chongxiu, Wang Kuiru. Analytic resolution of waveguide dispersion in single mode fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(11):1301~1304
任建华,余重秀,王葵如. 单模光纤色散的解析形式[J]. *光学学报*, 2001, **21**(11):1301~1304
- Pan Weiqing, Liu Liren, Liu Ximin. System and code/decode scheme for imaging optical communication [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):213~220
潘卫清,刘立人,刘锡民. 成像光通信系统及编解码方案[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):213~220
- P. F. Szajowski, G. Nykolak, J. J. Auburn *et al.*. Key elements of high-speed WDM terrestrial free-space optical communications systems [C]. *SPIE*, 2000, **3932**:2~14
- E. Korevaar, J. Schuster, P. Adhikari *et al.*. Description of STRV-2 lasercom experimental operations [C]. *SPIE*, 1997, **2990**:60~69
- S. M. Haas, J. H. Shapiro. Capacity of wireless optical communication [J]. *IEEE J. Sel. Area Commun.*, 2003, **21**(8):1346~1357
- Motti Gabay, Shlomi Arnon. Quantum key distribution by a free-space MIMO system [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(8):3114~3120
- P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden *et al.*. V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel [C]. *URSI International symposium on signals, systems and electronics. ISSSE 98. PISA, ITALY*: ISSSE, 1998, 295~300
- Yang Chenhua, Mei Suisheng, Lin Junting *et al.*. *Laser and Infra-red Technology Handbook* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1990. 44~47
杨臣华,梅遂生,林钧挺等. *激光和红外技术手册*[M]. 北京:国防工业出版社, 1990. 44~47
- Chen Jun, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua. Analysis of free space system based on twofold turbo code [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11):1532~1536
陈俊,黄德修,元秀华. 基于双模 turbo 码的自由空间光通信系统特性分析[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11):1532~1536
- Zhang Yixin. *Optical Wave Propagation and Imaging in Random Medium* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 211~228
张逸新. *随机介质中光的传输与成像*[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 211~228
- I. I. Kim, H. Hakakha, P. Adhikari. Scintillation reduction using multiple transmitters [C]. *SPIE*, 1997, **2990**:102~113
- S. G. Wilson, M. Brandt-Pearce, Q. Cao *et al.*. Free-space optical MIMO transmission with Q-ary PPM [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2005, **53**(8):1402~1412
- Mohinder Jankiraman. *Space-Time Codes and MIMO Systems* [M]. Artech House, 2004. 137~140
- Tao Chuncan, Tao Chunkuang. *Information Theory of Optics* [M]. Beijing: Science Press, 1999. 35~36
陶纯堪,陶纯匡. *光学信息论*[M]. 北京:科学出版社, 1999. 35~36