MIMO 大气激光通信及其关键技术

王惠琴[1,2],柯熙政[1]
1.西安理工大学 自动化与信息工程学院,西安 710048;
2.兰州理工大学 计算机与通信学院,兰州 730050

提要:多输入多输出(MIMO)系统在不增加频谱资源和发射功率的情况下,能够成倍提高现有系统信道容量的特点,本文将 MIMO 技术应用于大气激光通信。提出了基于 MIMO 的大气激光通信并建立了系统模型,详细的阐述了涉及到的关键技术。最后分析了该系统的信道容量变化情况,并通过仿真实验说明了信道容量及误字率与天线数量之间的关系。结果表明:随着天线数量的增加系统的信道容量增大,误码率减小,而且能有效克服大气湍流所产生的闪烁效应。同时在天线数量乘积相同的情况下,接收分集的效果要比发送分集的效果明显。

关键词:MIMO;大气激光通信;分集
中图分类号:TN248.1 **文献标识码**:A **文章编号**:0253-2743(2008)03-0052-02

Atmosphere laser communication in MIMO channels and its key techniques

WANG Hui-qin[1,2], KE Xi-zheng[1]
1. School of Automation & Information Engineering, Xi'an University of Techndogy, Xi'an 710048, China;
2. School of Compute & Communication, Lanzhou Univrersity of Techndogy, Lanzhou 730050, China

Abstract: Multiple-input multiple-output (MIMO) system can raise the channel capacity of existing communication system by times without using more spectrum resource and emission power. So in this paper MIMO technology is applied to atmosphere laser communication. The notion of atmosphere laser communication based on MIMO is put forward. The system model is constructed, and the critical technique is expatiated in detail. Then the channel capacity is analyzed, and the simulation results explains the relation between channel capacity and the number of the antennas, and the relation between character error rate and the number of the antennas. As a result, with the augment of antenna number, system channel capacity increases, the error rate is improved effectively, and flicker effect which is come into being by atmosphere turbulence is gotten over. While antenna number product is equivalent, receiver diversity is more visible than delivery diversity.

Key words: MIMO; atmosphere laser communication; diversity

大气激光通信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,因而受到人们的广泛关注。目前,大气激光通信面临的挑战是:①由于光信号的吸收和散射而产生的衰减,即使在晴朗天空也会存在衰减。②大气的湍流运动会引起光斑的漂移和闪烁。特别是在强湍流情况下,光信号受到严重干扰甚至脱靶,造成较大的误码率和短时间通信中断,严重影响激光通信的稳定性和可靠性。③在实际使用中,由于光色散或电子器件速度的限制,传输速率常常被限制到 10Gb/s 或者更低。因此,提出采用分集技术来解决这些问题,即采用多个激光器和多个探测器(MIMO)。

MIMO 是多输入多输出无线传输技术[1],它在无线链路两端均采用多天线,分别同时发射与接收,能够充分开发空间资源[2]。它能够在不增加频谱资源和发射功率的情况下,成倍提高现有系统的信道容量,并且还具有更强的抗干扰和抗衰落能力,是高速数据传输的优选技术之一。近年来是射频通信中的一个研究热点。而将 MIMO 技术应用于光无线通信中的技术国外已有研究[3]。因此,本文将 MIMO 技术应用于大气激光通信,提出了 MIMO 大气激光通信并建立了系统模型,详细地阐述了其实现的关键技术。该方法既能扩大信道容量,又能有效克服大气湍流所引起的闪烁效应[4]。

1 系统模型及其关键技术

M1MO 大气激光通信系统是将 MIMO 技术的思想应用于激光通信,联合考虑信道编码、调制、发送和接收分集,并将它们有机结合。其主要由空时编码、调制及驱动电路、激光器阵列、光学收发系统、探测器阵列、解调及信号处理、ATP 子系统等部分组成,系统模型如图 1 所示。

该系统的基本原理是:对信源发送的二进制比特数据进行分组,然后把分组后的多个数据送入空时编码器进行编码,得到一个正交的空时码字矩阵。实际上,原始数据经过空时编码后已被分解为多路子数据流。再将多路子数据流转换成多路光信号,分别由多个天线同时、同频发送出去。在接收端用多个天线将光信号接收并转换成电信号,再经解码后将子数据流进行合并,从而得到发送的原信号。该系统本质上是利用多天线同时发送和接收而形成的多个并行的独立数据子流来提高系统的信道容量和抗衰落能力。

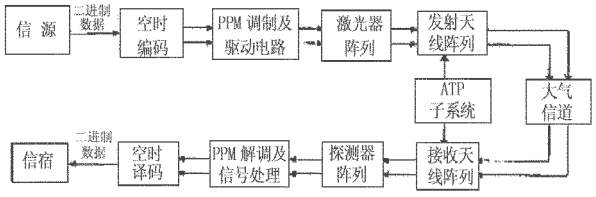

图 1 MIMO 大气激光通信系统模型

1.1 空时编码

空时编码就是将空间域上的发射分集和时间域上的信道编码相结合的联合编码技术[5]。空间域上的编码可以利用空间冗余度实现分集,以克服信道衰落,提高系统性能。空时编码可分为空时格码、空时 Turbo 码、空时分组码、差分/酉空时调制和空频码。空时格码和空时 Turbo 码是将发射分集分别与网格编码调制、Turbo 码相结合的联合编码方式。所获得的编码方案在不牺牲系统带宽的情况下获得满分集增益及高编码增益,进而提高传输质量。但由于它们解码复杂度都很高,妨碍了它们的实用化。空时分组码是利用正交设计的原理分配各发射天线上的发射信号格式,实际上是一种空间域和时间域联合的正交分组编码方式。空时分组码正是由于其编码矩阵列与列之间的正交性,人为造成了天线发送信号的正交,从而使得接收端可以用最大似然检测译码,大大降低了译码复杂度,而且仍然能得到最大的发送分集增益,因此在该系统中选用空时分组码。

1.2 激光器阵列及探测器阵列

为了实现高速的数据传输及克服闪烁效应,在该系统中采用发送分集和接收分集技术,即采用多个激光器和多个探测器传输信号。为了避免发生光的干涉现象,每个发射孔径

收稿日期:2008-02-10
基金项目:国家科技支撑计划(2006BAF01A21)、国防重点实验室基金项目(9140C3601010701)、陕西省教育厅科技专项基金(07JK332)、陕西省自然科学基金资助(2007F12)和广东省交通厅科技计划资助 2007-26)。
作者简介:王惠琴(1972-),女,甘肃渭源人,副教授,在读博士,研究方向:大气激光通信。

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

间距离的选择是一个重要的设计参数。任意两个发射孔径间的距离 r 应满足 $\sqrt{\lambda L} < r < \theta L$。其中 θ 是光束的发散角,λ 是采用的光波长,L 是传输的距离。当 $\lambda = 1550\text{nm}$,$L = 1\text{Km}$ 时,则 $r = 4\text{cm}$。也就是说只要探测器间的距离 $r \geq 4\text{cm}$ 就可实现非相干传输,即信息的传输就可以被看成是多个相互独立的子信 道的传输。探测器阵列的放置及结构应与激光器阵列的放置及结构完全一致。如果存在反馈信道,可根据接收信号的信息,根据文献[6]提出的一种适用于多通道并行传输算法来调整激光器的位置和改变阵列形式,使得该系统的信道容量尽可能的接近信道容量的理论值。而且激光器数目越多,克服闪烁效应的能力就越强,系统性能的改善效果越明显。对于阵列中的激光器和探测器可按传统的单输入单输出(SISO)系统中的原则选择。

1.3　光学收发天线

光学天线系统是大气激光通信的重要组成部分,该系统包括发射天线阵列和接收阵列天线。发射天线阵列的主要功能是压缩光束发散角,对光束进行准直和扩束。接收天线阵列的作用是接收微弱光信号并汇集到检测器表面,增大检测器的有效接收面积。天线阵根据天线单元的排列情况有很多种,如线阵、圆阵、二维平面阵等。线阵的方向性较好,能在一定的方向上形成较窄的主瓣。但无法在 360°范围内保持性能一致,并且在较大范围内存在相位模糊的问题[7]。均匀圆阵是由均匀分布在一个圆周上或多个同心圆周上的天线单元构成,其水平结构如图 2 所示。相对于线阵,圆阵能提供俯仰角估计,实现方位角 360°覆盖。相对于二维平面阵,圆阵形成的波束赋形虽然不如二维平面阵,但所需天线单元少,处理方法也比较简单。均匀圆阵具有圆对称性,其方向图在阵列平面上电磁旋转扫描时波束的形状不会有太大改变,这使得它便于安装。且中心阵元对阵列方向图的性能改善作用较大,尤其在阵元数为奇数时,这种改善的作用更加明显[8]。在图 3、图 4 和图 5 中分别给出了阵元数为 3、4 和 8 的圆阵简图。均匀圆阵列天线优越的结构特点和良好的测向性能,使其在军用和民用方面引起了人们的关注。但圆阵的阵列流形比均匀线阵的阵列流形复杂,且其体积较大。

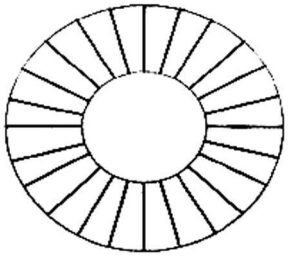

图 2　圆阵天线的水平结构

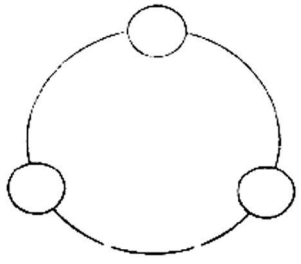

图 3　3 元圆阵阵列简图

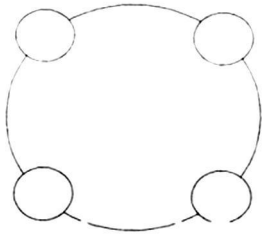

图 4　4 元圆阵阵列简图

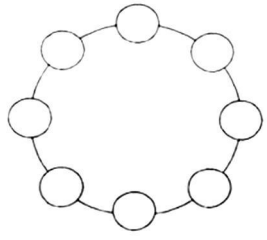

图 5　8 元圆阵阵列简图

1.4　调制技术

高效、可靠的调制、解调技术是高传输速率和低误码率的保证。调制就是把信号叠加到载波上。适合于激光通信的调制技术有两大类:一类适合于直接检测,如 OOK、PAM、PPM、PIM、和 PPK 等;另一类适合于相关检测,如 FSK、PSK、QAM。目前激光通信系统大多采用强度调制/直接检测(IM/DD)方式。OOK 是 IM/DD 系统中最容易实现的一种调制方式。但这种调制方式传输效率太低,且在背景光比较强时,或者进行高速率通信时,无法满足高速率的传输要求。而 PPM 调制是一种具有更高光功率利用率的调制方式,它能够满足高速率的通信,与 OOK 技术相比较受到外界噪声和多径发散的影响较小。所以,PPM 调制更适合于该系统。

1.5　ATP 子系统

ATP(Acquisition,Tracking and Pointing)是大气激光通信系统的关键技术之一,它通常由三部分组成,即捕获、跟踪和瞄准。空间捕获就是把天线指向到达场的方向,将天线表面积上的法线矢量调整到与光束的到达角一致。捕获范围可达 ±1°至±20°或更大。光束的跟踪和瞄准就是精跟踪系统,它主要功能是在完成目标捕获后,对目标进行瞄准和实时跟踪。为了确保通信成功,传统式的激光通信对 ATP 系统跟瞄精度的要求是非常高的。在点对点的实际系统中,跟踪精度要求小于 2 微弧度,瞄准精度要求小于 1 微弧度。这样高的跟瞄精度,加上复杂的工作环境以及可靠性的要求,决定了 ATP 系统的设计和实现在传统方式的激光通信系统中是一项难度极大的工程技术。而在该系统中,采用阵列技术相当于增大了接收孔径。ATP 子系统在完成捕获以后,对跟瞄系统的要求不需要那样高的精度。也就是说只需保证探测器阵列处于接收光场内即可。它是一种端到端的通信方式,即它只需激光器和阵列探测器中的任意一个对准即可。阵列技术的采用降低了对精跟踪系统的要求,也就大大降低了技术实现的复杂度。

2　信道容量

在 MIMO 系统中,对于一个有 M 副发送天线和 N 副接收天线的 MIMO 系统而言,其信道模型如图 6 所示。

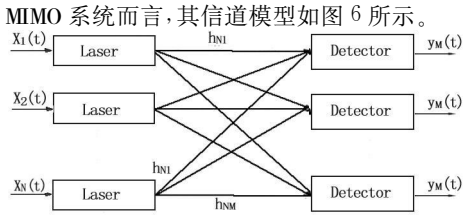

图 6　MIMO 系统信道模型

假设该系统信道衰减系数确定。设输入信号矩阵为 $x(t)=(x_1(t),x_2(t),\cdots,x_N(t))^T \in C^{N\times 1}$,$x(t)$ 中 x_i 为第 i 副天线发送的信号。输出信号矩阵为 $y(t)=(y_1(t),y_2(t),\cdots y_M(t))^T \in C^{M\times 1}$,$y(t)$ 中 y_j 为第 j 副天线收到的信号。则该系统满足:

$$y(t) = \eta H x(t) + n(t) \tag{1}$$

$$H = \begin{pmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,N} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ h_{M,1} & h_{M,2} & \cdots & h_{M,N} \end{pmatrix} \in C^{M\times N} \tag{2}$$

(2) 式中,$h_{j,i}$ 表示第 i 副发送天线到第 j 副接收天线之间的信道衰减系数。η 为光电转换效率,是常数。噪声矩阵为 $n(t)=(n_1(t),n_2(t),\cdots,n_M(t))^T \in C^{M\times 1}$,其各分量之间互相统计独立,且均为零均值、方差为 σ^2 的白高斯噪声[9,10] 假设接收端已准确获得信道衰减系数矩阵,则 MIMO 信道的容量定义为[10,11,12]

$$C = \max_{p(x)} I(x;y) \tag{3}$$

其中 $p(x)$ 是矢量 x 的概率密度函数,$I(x;y)$ 是矢量 x

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

和 y 之间的互信息量。

$$I(x;y)=H(y)-H(y|x)=H(y)-H(n) \quad (4)$$

其中 $H(y)$和 $H(n)$分别是接收信号矢量 y 和噪声矢量 n 的熵,$H(y/x)$是在给定发送信号为 x 的条件下接收到信号为 y 的条件熵。这样,量大化 $I(x;y)$就简化为最大化 $H(y)$,接收信号 y 的协方差矩阵为:

$$R_{yy}=E(yy^*)=\frac{\eta^2E_s^2}{N}HR_{xx}H^*+\sigma^2I_M \quad (5)$$

其中,y^* 表示复数变量 y 的复共轭,H^* 表示矩阵 H 的共轭转置,R_{xx}和 R_{yy}分别为发送信号矩阵 x 和接收信号矩阵 y 的协方差矩阵,I_M 是 M 阶的单位阵。

根据信息论,对于一个给定协方差矩阵的变量,在该变量满足零均值循环对称复高斯分布时,其熵达到最大化[12]。因此,当 x 和 y 是零均值循环对称复高斯变量时,信道容量可达到最大,此时变量 y 和 n 的熵分别为

$$H(y)=\log_2[\det(\pi eR_{yy})] \quad (6)$$

$$H(y)=\log_2[\det(\pi e\sigma^2I_M)] \quad (7)$$

将(6)、(7)式代入(4)式,可得互信息量[10,11]:

$$I(x,y)=\log_2\det[(\frac{\eta^2E_N^2}{N\sigma^2})(HR_{xx}H^*] \quad (8)$$

其中 E_s 为发送天线上的总功率,det(·) 表示矩阵行列式。再将(8)式代入(3)式,可得 MIMO 系统的信道容量为:

$$C=\max_{R_{xx},tr(R_{xx})=N}I(x,y)=\max_{R_{xx},tr(R_{xx})=N}\log_2\det[(\frac{\eta^2E_s^2}{N\sigma^2})HR_{xx}H^*] \quad (9)$$

其中 $tr(R_{xx})$为 R_{xx}的迹,且满足 $tr(R_{xx}=E(xx^*)\leq N$。(9)式的信道容量 C 为 MIMO 系统链路无差错传输的频谱效率或者单位带宽上的数据速率。若给定的带宽为 B 赫兹,则 MIMO 系统的最大传输速率就为每秒 BC 比特。

3 仿真结果

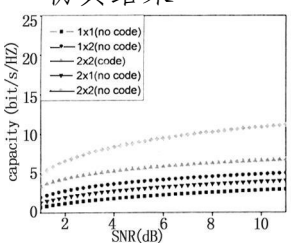

图 7 SI=0.4,M=2 时信道容量与信噪比间关系

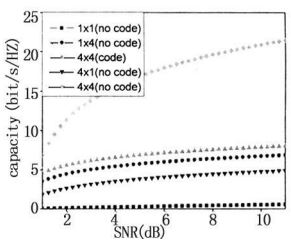

图 8 SI=0.8,M=4 时信道容量与信噪比间关系

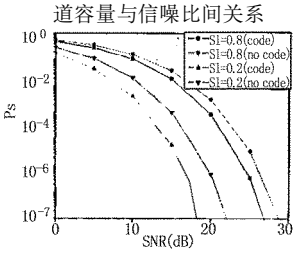

图 9 Ps 与信噪比间关系

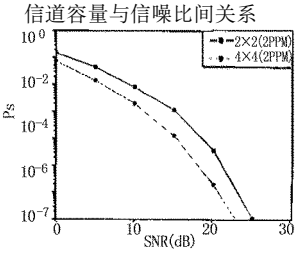

图 10 Ps 与信噪比间关系

在总发送功率不变,信道衰减系数确定,且发送端不知信道状态的条件下,利用 Monte Carlo 方法对信道容量及误码性能进行了仿真,结果如图 7、8、9、10 所示。在仿真实验中,以STBC 编码和 4PPM 调制技术为例。有关STBC 技术在光通信中的编译码方法已在另外一篇文章写出[13]。设 $\eta=0.8$。图 7 为闪烁因子 $SI=0.4$,噪声 $N_0=0.1$,发送天线数 $M=2$ 时,系统的信道容量与信噪比间关系。图 8 为闪烁因子 $SI=0.8$,噪声 $N_0=0.1$,发送天线数 $M=4$ 时,系统的信道容量与信噪比间关系。图 9 为天线数 2×2,噪声 $N_0=0.1$ 时,不同闪烁条件下编码前后误字率与信噪比间的变化关系。图 10 为采用 2PPM 调制,$N_0=0.5$ 时,天线数为 2×2 和 4×4 的误字率与信噪比间变化关系。结果表明了信道容量随信噪比和天线数的增加而增大;即使在强湍流影响下,信道容量也随天线数量的增加而增大,且效果非常显著。发送分集和接收分集具有相同的作用。当天线数量的乘积相同时,接收分集的效果要比发送分集的效果更明显。天线数量的增多,使得系统的误码性能也得到改善,且能有效克服大气湍流所引起的闪烁效应。同时也可看到,采用 STBC 编码技术以后,相对于编码前系统的误码性能得到良好的改善,但其信道容量有所下降。综合上述,MIMO 系统在信道容量上比 SISO(单输入单输出)系统确实有显著的提高。这些增加的信道容量可以用来提高信息传输速率;也可以在保持信息传输速率不变的情况下,通过增加信息冗余度来提高系统的可靠性。

4 结论

大气激光通信将成为未来一种可行且非常具有吸引力的通信手段,它的发展是与高质量大功率激光器、精密光学元件、高灵敏度光学探测器及快速精密的光、电等综合技术的研究和发展是密不可分的,而且也和通信中新技术、新器件的不断出现息息相关。本文提出的 MIMO 大气激光通信是提高通信速率的一种有效措施。它在不增加频谱资源和发射功率的情况下,成倍提高现有系统的信道容量,而且还可以有效抑制由大气湍流所引起的闪烁效应。但有关该系统的误码率封闭式还需进一步研究。

参 考 文 献

〔1〕 S. M. Haas, et al. Capacity of wireless optical communication〔J〕. IEEE J. Select. Area in Comm., 2003,21(8):1346—1357.

〔2〕 Y Kim, et al. Beyond 3G: Vision. Requirements, and Enabling Technologies〔J〕. IEEE Comm. Magazine, 2003, 5:120—124.

〔3〕 S. M. Haas. et al. Capacity of wireless optical communication〔J〕. IEEE J. Select. Area in Comm., 2003,21(8): 1346—1357.

〔4〕 I.I.Kim, et al. Scintillation reduction using multiple transmitters〔C〕. Proc. SP1E, 1997, 2990:102—113.

〔5〕 V. Tarokh, N. Seshadri and A.R. Calderbank. Space—time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction〔J〕. IEEE Trans. on I.T., 1998, 44(2): 744—765.

〔6〕 Satoslii Miyauchi, Toshihiko Komine. Analysis of LED—allocation algorithm far high—speed parallel wireless optical communication system〔J〕. IEEE, 2006, WE1A—5, 191—194.

〔7〕 马凉. 无线通信中的智能天线——IS95 和第三代 CDMA 应用〔M〕. 北京:机械工业出版社,2002.

〔8〕 黄浩学,吴嗣亮. 基于均匀圆阵的信号源 DOA 和多普勒频率估计算法〔J〕. 电子学报,2001,29(5):619—621.

〔9〕 朴大志,邹传云. 白高斯噪声下取样 PPM 信号的最大似然检测〔J〕. 桂林电子工业学院学报,2002,22(3):5—8.

〔10〕 陶纯堪,陶纯匡. 光学信息论〔M〕. 北京:科学出版社,1999,35～36.

〔11〕 I.E. Telatar. Capacity of Multi—Antenna Gaussian Channels〔J〕. European Transactions on Telecommunications, 1999, 10 (6):585—595.

〔12〕 Arogyaswami Paulraj, Rohit Nabar. Dhananiay Gore. Introduction to Space—Time Wireless Communications〔M〕. Now York: Cambridge University Press, 2003.

〔13〕 Wang Huiqin, Ke Xizheng. Application of STBC Atmosphere Laser Communication〔C〕. Proceedings of 2007 8th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2007, IV: 4—630—4—633.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net