

混沌与湍流大气中的光通信

冒添逸 陈钱 何伟基 庄佳衍 邹云浩 戴慧东 顾国华

Optical communication in turbid and turbulent atmosphere

Mao Tian-Yi Chen Qian He Wei-Ji Zhuang Jia-Yan Zou Yun-Hao Dai Hui-Dong Gu Guo-Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 084207 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.084207

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084207>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

100Gb/s 归零码信号的 2R 再生

A study of 100 Gb/s 2R regeneration for return-to-zero code signal

物理学报.2016, 65(5): 054208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.054208>

基于太赫兹光非对称解复用器结构的低开关能量、高线性度全光采样门实验研究

Experimental study on a low switching energy and high-linearity all-optical sampler based on terahertz optical asymmetric demultiplexer

物理学报.2015, 64(15): 154213 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.154213>

复合抛物面聚光器作为可见光通信光学天线的设计研究与性能分析

Design research and performance analysis of compound parabolic concentrators as optical antennas in visible light communication

物理学报.2015, 64(12): 124212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124212>

基于注入锁定法布里-珀罗激光器的光学双稳态及光存储研究

Optical bistability and optical storage based on injection locked Fabry-Perot semiconductor laser

物理学报.2015, 64(4): 044204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.044204>

结构参数对串联微环谐振腔编解码器性能的影响

Study of structure parameters effect on performance of optical en/decoder based on parallel-cascaded microring resonators

物理学报.2015, 64(3): 034218 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.034218>

混沌与湍流大气中的光通信*

冒添逸¹⁾ 陈钱^{1)†} 何伟基²⁾ 庄佳衍¹⁾ 邹云浩¹⁾ 戴慧东¹⁾ 顾国华¹⁾

1) (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2) (南京理工大学, 江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 南京 210094)

(2015年11月4日收到; 2015年12月28日收到修改稿)

目前, 光无线通信的质量主要受到大气信道环境的制约, 大气信道中混沌介质与湍流的强烈扰动使得通信质量很差, 甚至通信中断. 提出了一种面到点的光无线通信机理: 利用面阵各单元的光信号在混沌介质中传输通道的空间非相干性, 通过桶探测器收集通过混沌介质的光信号的能量和, 平均各传输通道的交叉干扰, 降低混沌介质对光无线通信的影响; 利用随机噪声与随机编码的空间非相干性, 经过二阶相关运算, 构建新的信号传输方程, 减弱大气湍流及背景光对信号解码的干扰, 使得接收端并不需要窄带光学滤波器. 数值仿真和演示实验表明, 该光无线通信机理在混沌与湍流大气中的误码率为 10^{-4} — 10^{-2} , 能够实现复杂大气环境中的光通信, 在军事、抢险救援等方面具有重要应用价值.

关键词: 光无线通信, 混沌介质, 二阶关联, 压缩感知

PACS: 42.79.Sz, 42.25.Dd

DOI: 10.7498/aps.65.084207

1 引言

光无线通信, 包括自由空间光通信 (free space optical-communication, FSO) 和可见光通信 (visible light communication, VLC), 具有频谱宽、传输速率高、无须频谱认证、抗电磁干扰、保密性强、易于部署等优点, 在军事和商业领域都得到了广泛的应用和关注^[1-4]. 目前, 光无线通信主要是点对点的传输方式, 即发射端由单一端口的光电转换模块发射经过编码的光脉冲, 接收端桶探测器通过望远系统获得该脉冲, 并通过后端计算模块解码实现通信. 光无线通信的传输质量主要受限于传输信道中的吸收、散射、湍流以及噪声 (包括背景噪声和器件噪声). 对于大气混沌介质 (例如云、雾、雾霾等), 弹道光子和蛇形光子的数量极少, 在大量散射光子、大气湍流 (光强闪烁、抖动) 和噪声的影响下, 光无线通信链接往往会中断 (误码率过高). 研究人员提出了多种方式来降低这些影响, 包括孔径平均、自

适应光学、纠错编码和轨道角动量法等, 但这些方法主要针对较弱的信道干扰或实现成本高昂, 并不利于无线通信的实际应用^[5-9].

针对上述情况, 本文提出了一种面到点的光无线通信机理 (array-to-point optical communication, APOC). APOC 能够实现在混沌与湍流大气这一强干扰信道中的光无线通信, 且接收端并不需要窄带光学滤波器. 同时, 面阵空间光调制设备和高速桶探测器的大规模商业化、小型化大幅度降低了 APOC 设备的制造成本, 有助于大规模部署.

2 面到点的光无线通信机理

2.1 面到点的光无线通信结构

如图 1 所示, 本文提出的光无线通信结构主要由激光器、扩束镜、光阑、分光棱镜、空间光调制器、望远系统、桶探测器和计算机组成. 激光器发出合适波长的激光脉冲 (一般大气中为红外光), 经扩束镜和光阑整形后, 通过分光棱镜将空间光调制器上

* 国家自然科学基金 (批准号: 61271332, 61101196) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenqian@njust.edu.cn

的二维图案发射出去. 由于一般待传输信号是一维的, 可以通过一定的排列方式将一维信号转化为二维信号, 即待传输信号图案. 空间光调制器上的发射图案是用随机散斑图案对待传输信号图案进行编码, 编码规则为

$$V(i, j) = H(i, j) \times I(i, j) \quad (1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N), \quad (1)$$

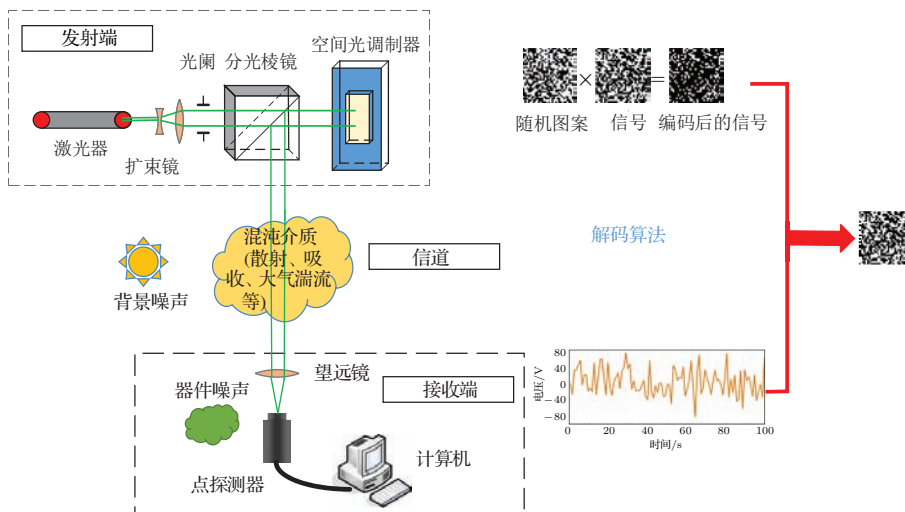


图1 面到点的无线通信结构

Fig. 1. The structure of array-to-point optical communication.

2.2 混沌与湍流大气中的传输特性

光在混沌与湍流大气中的传输主要表现为混沌介质中各种大小不一的粒子与光子的吸收与碰撞, 大气湍流引起的光强闪烁、抖动等. 但对于某一时刻或者短曝光时间内, 混沌介质的吸收和散射可以表现为传输矩阵 $\mathbf{K}$, 而大气湍流可以认为是探测器端的随机噪声 [10–13]. 传输矩阵 $\mathbf{K}^{s \times n}$ 是一个圆高斯复矩阵, 矩阵中元素 k_{ij} , $i = 1, 2, \dots, s, j = 1, 2, \dots, n$ 为输入光场的第 j 个输入通道到输出光场的第 i 个输出通道的复传输系数. 对于发射端光场 $\mathbf{E}$, 经过混沌介质中的吸收与碰撞, 得到一个新的光场 $\mathbf{E}'$, 该过程在短曝光时间内可以认为是传输矩阵 $\mathbf{K}^{s \times n}$ 对光场 $\mathbf{E}$ 的线性变换, 即

$$\mathbf{E}' = \mathbf{K}\mathbf{E}. \quad (2)$$

令大气湍流引起的随机噪声为 e_0 , 那么接收端桶探测器表面的光强为

$$I^{\text{out}} = \sum_{i=1}^s I_i^{\text{out}} + e_0 = \sum_{i=1}^s \left| \sum_{j=1}^n k_{ij} E_j \right|^2 + e_0. \quad (3)$$

其中 $\mathbf{H} \in M \times N$ 和 $\mathbf{I} \in M \times N$ 分别是随机散斑图案和待传输信号图案, M, N 分别是空间光调制器的横轴和纵轴方向的像素数.

发射图案在经过混沌与湍流大气的强烈扰动后, 被望远系统接收, 桶探测器 (例如光电二极管、光电雪崩二极管等) 将光信号转换为电信号, 计算机根据事先已知的随机图案和接收端的电信号幅值, 通过一定的解码算法, 恢复出传输信号.

经过一定的计算与变形, (3) 式可以写为

$$I^{\text{out}} = \underbrace{\sum_{j=1}^n T_1 |E_j|^2}_{\text{function 1}} + \underbrace{\sum_{j=1}^n \sum_{j'=1, j' \neq j}^n T_2 E_j E_{j'}^*}_{\text{function 2}} + e_0, \quad (4)$$

其中, $T_1 = \sum_s |k_{ij}|^2$ 和 $T_2 = \sum_s k_{ij} k_{ij'}$ 分别是自相关项 function 1 和互相关项 function 2 的系数. 由于光子在混沌介质中的吸收、散射是随机的, 则第 j 个输入通道到第 i 个输出通道与第 j' 个输入通道到第 i 个输出通道是相互独立的, 那么互相关项是不同输入通道在桶探测器表面的平均. 而每个输入通道对所有输出通道影响的和是近似相同的, 所以互相关项相对于自相关项是可以忽略的, 而自相关系数 T_1 可以近似为常数 λ , 即

$$I^{\text{out}} = \lambda \sum_{j=1}^n |E_j|^2 + e_0. \quad (5)$$

(5) 式表明, 对于任意一个输入光场, 在通过混沌与湍流大气后, 输出光场强度和与输入光场强度之间是线性关系. 一般而言, 由于吸收作用, 常数

$0 < \lambda < 1$.

2.3 传输方程与解码算法

对于每一幅待传输信号图案 $\mathbf{I} \in M \times N$, 都通过 r 个随机散斑图案 $\mathbf{H} \in M \times N$ 对其进行编码 ($r < n$). 这样, 对于每一幅待传输信号图案, 都有 r 个输出信号 $\mathbf{y} \in r \times 1$ 和 r 个随机散斑图案与之相对应. 在通过混沌与湍流大气的强干扰信道后, 结合 (5) 式, 传输方程为

$$\mathbf{y} = \lambda \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{e}, \quad (6)$$

其中, $\mathbf{x} \in n \times 1$ 是信号图案 $\mathbf{I} \in M \times N$ 的一维排列, $n = M \times N$; $\mathbf{A} \in r \times n$ 是 r 个随机散斑图案对应的矩阵, 称为采样矩阵, $\mathbf{A}$ 中每一行是对应随机散斑图案的一维线性排列 (与信号图案的一维线性排列方式相同); $\mathbf{e} \in n \times 1$ 是随机噪声, 包括通过混沌介质中大气湍流产生的噪声、太阳光的背景噪声以及桶探测器的暗噪声和读出噪声等.

由于随机噪声 $\mathbf{e}$ 与采样矩阵 $\mathbf{A}$ 是相互独立的, 对 (6) 式进行二阶相关变换 [14], 得到新的传输方程为

$$\Delta = \lambda \Phi \mathbf{x}, \quad (7)$$

其中, $\Delta \in n \times 1$ 是二阶相关变换的值, 矩阵 Φ 是 $\mathbf{A}$ 的协方差矩阵 (证明见附录 A).

关于求解方程 (7), 研究人员提出了多种算法, 包括压缩感知、计算关联、伪逆求解 [15–20] 等. 其中, 压缩感知利用信号在某些希尔伯特基变换下的稀疏性, 可以在采样次数较少的情况下恢复出高质量的信号. 而文中随机散斑图案的数量对应的是采样次数, 即压缩感知可以在随机散斑图案较少的情况下解码恢复出信号图案. 根据压缩感知理论, 解码过程为

$$\arg \min \|\hat{\mathbf{x}}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \|\Psi \hat{\mathbf{x}} - \Delta\|_2 < \varepsilon, \quad (8)$$

其中 α 是在希尔伯特基 Ψ 下的稀疏基, $(\bullet)$ 是解码信号的估计.

3 仿真与实验

3.1 数值仿真

本文在 MATLAB 2010b 上搭建如图 1 所示的实验平台. 为了更为直观地表达本文所提出的光

无线通信机理通过混沌与湍流大气的能力, 仿真实验选取随机信号图案, 二值汉字图案“中”和八位灰度图案 phantom 作为待传输信号, 信号长度均为 4096, 在空间光调制器上表现为 64×64 分辨率的图案 (如图 2 (a), 图 3 (b), 图 4 (a)), 分辨率为 64×64 随机散斑图案与信号图案相对应. 随机散斑图案中数值由泊松随机数发生器生成. 传输矩阵是由高斯随机数发生器生成的圆复高斯随机矩阵. 噪声 $\mathbf{e}$ 由两部分组成, 一部分是由于太阳等引起的背景光噪声, 强度较大但波动较小; 另一部分是由大气湍流, 器件暗噪声、读出噪声等引起的噪声, 强度小但波动较大. 仿真中噪声都由高斯随机数发生器生成, 具体参数分别为均值 0.01, 方差 50 和均值 50, 方差 0.01. 仿真实验中采样率为 20%, 信号传输实验重复 1000 次. 重建算法为 TVAL3 [21], 选取的空间光调制器为数字微反射镜 (digital micro-mirror device, DMD), 其调制频率为 40 kHz [22]. 对于 DMD 的二值模式, 本文用误码率作为评价传输性能的标准, 误码率定义如下:

$$\text{误码率} = \frac{\text{传输中的误码}}{\text{所传输的总码数}}. \quad (9)$$

而对于 DMD 的 8 位灰度模式, 本文用峰值信噪比 (peak signal to noise ratio, PSNR) 作为评价传输性能的标准, PSNR 定义如下

$$\text{PSNR} = 20 \lg \left(\frac{I_{\max}}{\sqrt{\text{MSE}}} \right), \quad (10)$$

其中,

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (p_{i,j} - q_{i,j})^2}{M \times N},$$

$I_{\max}$ 是重建信号中的最大灰度值, $p_{i,j}$ 和 $q_{i,j}$ 分别是重建信号和待传输信号的灰度值, $M \times N$ 是信号长度.

本文用比特率 (单位时间传输的信息量) 作为评价传输速率的标准, 其大小往往与发射端的调制频率、接收端的采样频率以及纠错码的设计有关. APOC 的比特率为

$$r = \frac{M \times N \times f}{M \times N \times \eta} = \frac{f}{\eta} \text{ bit/s}. \quad (11)$$

其中, f 是数字微反射镜的调制频率, η 是采样率. 从 (11) 式可以看出, 比特率与数字微反射镜的调制频率成正比, 与桶探测器采样率成反比. 根据仿真实验设定的数值, APOC 的通信速率为 200 kb/s.

图2(b)和图2(c)分别是随机信号图案在无混沌与湍流大气中的解码结果和在混沌与湍流大气中的解码结果. 其中, 在无混沌与湍流大气的情况下, 误码率为0; 而在存在混沌与湍流大气的情况下, 误码率为0.2%. 1000次重复传输实验的结果显示, 在存在混沌与湍流大气的情况下, 随机图案传输的误码率为 10^{-4} — 10^{-3} 数量级.

图3(b)和图3(c)分别是二值汉字图案“中”在无混沌与湍流大气中的解码结果和在混沌与湍流大气中的解码结果. 其中, 在无混沌与湍流大气的情况下, 误码率为0; 而在存在混沌与湍流大气的情况下, 误码率为0.3%. 1000次重复传输实验的结果

显示, 在存在混沌与湍流大气的情况下, 二值汉字图案“中”传输的误码率为 10^{-4} — 10^{-3} 数量级.

图4(b)和图4(c)分别是八位灰度信号图案phantom在无混沌与湍流大气中的解码结果和在混沌与湍流大气中的解码结果. 在无混沌与湍流大气的情况下, PSNR为49.76; 而在存在混沌与湍流大气的情况下, PSNR为31.03. 1000次重复传输实验的结果显示, 在存在混沌与湍流大气的情况下, 八位灰度信号图案的传输PSNR在29—32之间. 在图像处理理论中, 当PSNR在30左右时, 已经可以较好地反映图像所含有的轮廓、灰度等信息.

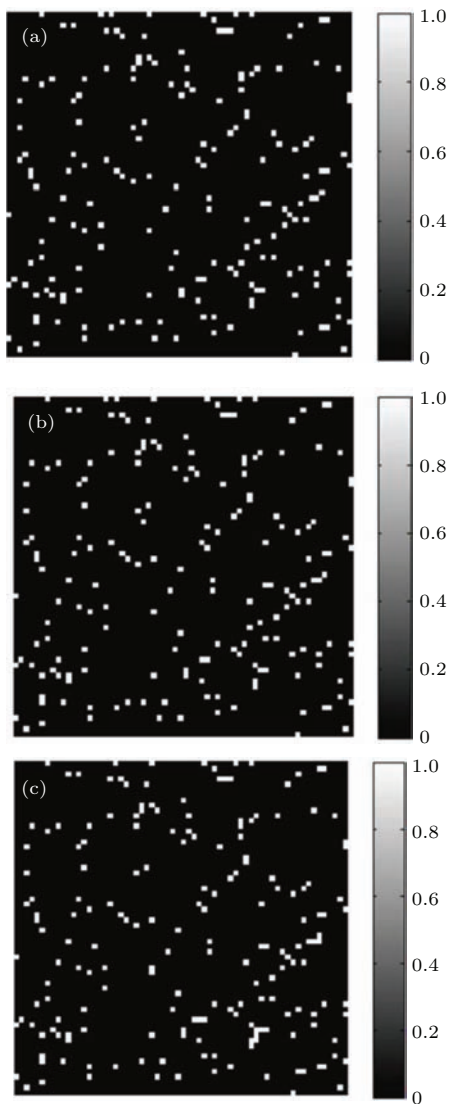


图2 (a) 随机信号图案; (b) 无混沌与湍流大气的解码结果; (c) 存在混沌与湍流大气的解码结果

Fig. 2. (a) Random signal; (b) demodulation without turbid media and noise; (c) demodulation with turbid media and noise.

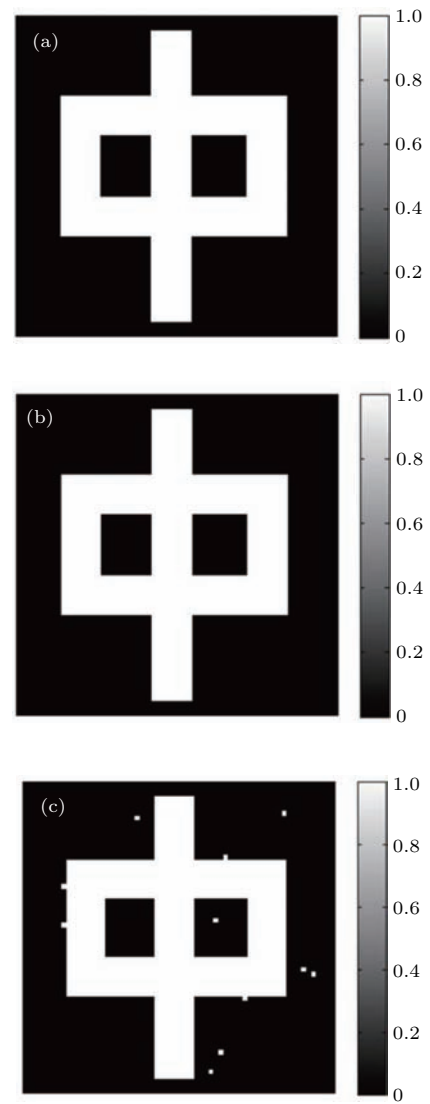


图3 (a) 二值汉字图案“中”; (b) 无混沌与湍流大气的解码结果; (c) 存在混沌与湍流大气的解码结果

Fig. 3. (a) Binary signal; (b) demodulation without turbid media and noise; (c) demodulation with turbid media and noise.

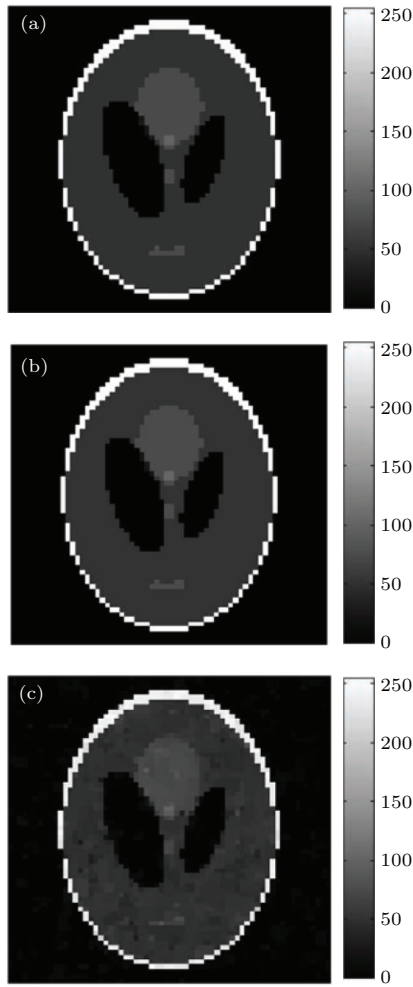


图4 (a) 八位灰度信号图案 phantom; (b) 无混沌与湍流大气的解码结果; (c) 存在混沌与湍流大气的解码结果
Fig. 4. (a) Gray signal; (b) demodulation without turbid media and noise; (c) demodulation with turbid media and noise.

3.2 实验

本文搭建如图1所示的实验平台. 由于实验室演示的传输距离较短, 采用扩展卤素灯(MI-150, Edmund)作为光源. 空间光调制器采用商业级的DMD(V-4100, ViALUX), 最大频率为22 kHz. 桶探测器为高速光电探测器(DET100 A/M, Thorlabs), 上升沿为43 ns. 分光棱镜分光比为9:1, 混沌介质采用1500 砂的毛玻璃(DG100 × 100-1500, Thorlabs). 实验中采样率为20%, DMD 频率设定为20 kHz. 信号传输实验重复100次, 重建算法为TVAL3. 由于八位灰度模式下, DMD的工作并不稳定, 选取随机信号图案和二进制字母图案IL作为待传输信号, 信号长度为4096, 在DMD上显示为64 × 64分辨率的图像(如图5(a), 图5(c)). 分辨率为64 × 64随机散斑图案与信号图案相对应. 随机

散斑图案中数值由0-1随机数发生器生成, 根据(1)式进行编码生成新的图案并显示在DMD上. 实验中, 采用日光灯光源摆放于传输信道旁模拟大气湍流和背景噪声.

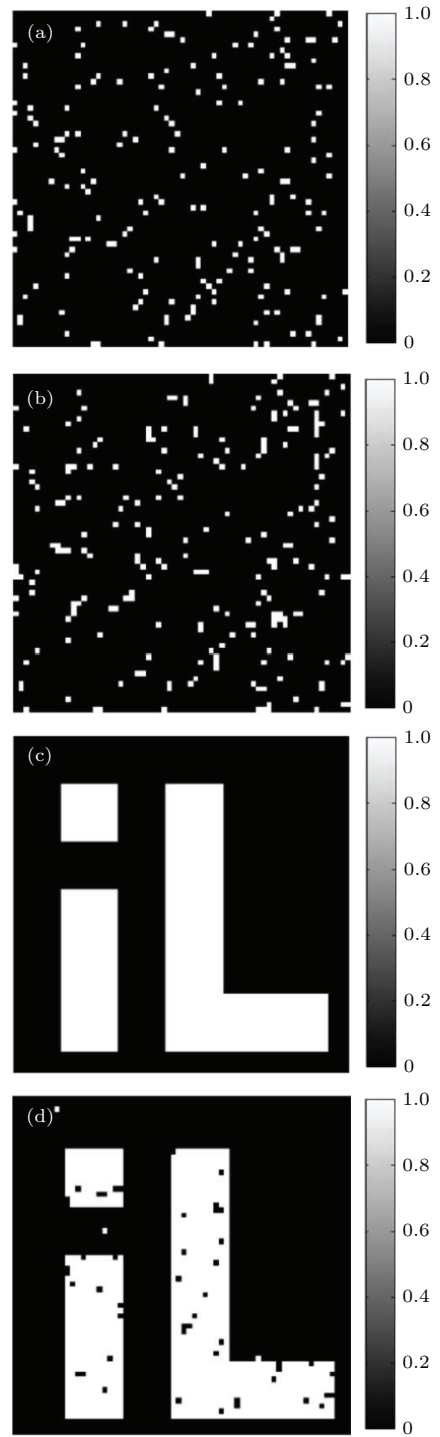


图5 (a) 随机信号图案; (b) 随机信号图案在存在混沌与湍流大气的解码结果; (c) 二进制字母图案 IL; (d) 二进制字母图案 IL 在存在混沌与湍流大气的解码结果

Fig. 5. (a) Random signal; (b) demodulation of random signal without turbid media and noise; (c) binary signal IL; (d) demodulation of binary signal IL without turbid media and noise.

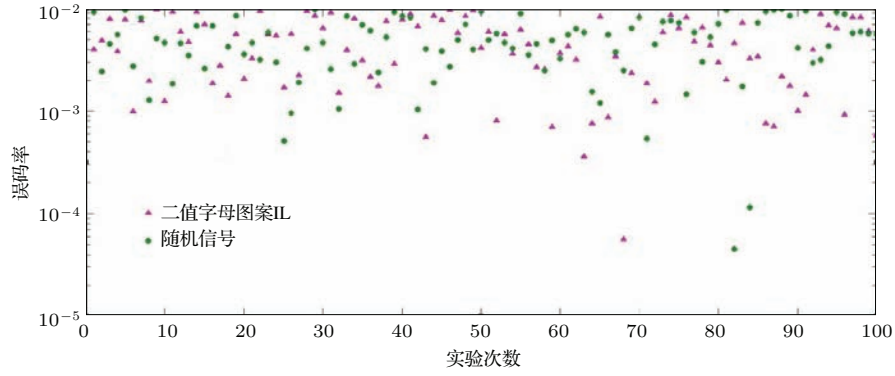


图6 APOC的误码率

Fig. 6. The bit error rate of APOC.

图5(b)和图5(d)分别是随机信号图案和二值字母图案IL在混沌与湍流大气中的解码结果. 其中, 随机信号图案的误码率为1.2%, 二值字母图案IL的误码率为2.5%, 通信速率约为100 kb/s. 100次重复传输实验的误码率如图6所示. 实验结果显示, 在存在混沌与湍流大气的情况下, 无论是随机信号图案还是二值字母图案IL的误码率都是在 10^{-3} — 10^{-2} 左右. 从图像传输的角度来看, 在经过混沌介质和噪声的强烈干扰之后, 接收端恢复的图像仍然可以较为清晰地辨认图像的轮廓和细节; 而从信号误码率的角度看, 10^{-3} — 10^{-2} 的误码率能够满足基本的通信要求, 特别是在强烈干扰的信道中.

4 讨论与总结

本文通过混沌介质中各传输通道间的空间非相干性, 提出了一种面到点的光无线通信机理, 提高了混沌与湍流大气中的光无线通信能力. 通过噪声与采样矩阵的空间非相干性, 降低噪声对压缩感知解码的影响, 在接收端并不需要任何光学窄带滤波器. 本文从数值仿真和演示实验两方面证明了面到点的光无线通信方式在混沌与湍流大气中传输的可行性. 在数值仿真中, 二值模式的误码率在 10^{-4} — 10^{-3} 之间, 八位灰度模式的PSNR在29—32之间; 而在演示实验中, 二值模式的误码率在 10^{-3} — 10^{-2} 之间, 相比于数值仿真高了一个数量级. 图3—图5的实验表明, 经过混沌与湍流大气的剧烈干扰, APOC的解调结果仍然很清晰地辨别出传输的图像信号的轮廓和灰度. 虽然无论是数值仿真还是演示实验, 都无法达到正常通信 10^{-9} —

10^{-6} 的低误码率, 但在混沌与湍流大气这一特殊环境中, 误码率为 10^{-4} — 10^{-2} 的通信质量是可以接受的. 而APOC的通信速率主要受限于数字微反射镜的调制速率和接收端的采样率. 目前, 商业级数字微反射镜的调制速率可以达到40 kHz并在不断调高, 接收端采样率可以降低至5%左右, 以及波分复用技术的发展, 都使得APOC的通信速率有很大的提升空间, 这也是我们下一步研究的重点. 同时, 由于DMD器件和组件的结构较小, 工作波长范围大, 且接收端不需要任何光学窄带滤波器, APOC可以实现快速部署, 在军事、抢险救援等领域具有巨大的应用前景.

附录A

记矩阵 $\mathbf{A}$ 中每一列为矩阵 $\mathbf{a}_z \in r \times 1$, $r = 1, 2, \dots, n$. 噪声 e 与矩阵 $\mathbf{A}$ 非相关的, 则 e 可以表示为一个与 $\mathbf{A}$ 非相关的随机矩阵 $\mathbf{B}$ 与信号 x 的乘积, 即 $e = \mathbf{B}x$. 那么对于式 $y = \lambda \mathbf{A}x + e$ 的第 k 维二阶相关的结果为

$$\begin{aligned} \Delta(k) &= \langle y(k), \mathbf{A}(k) \rangle - \langle y(k) \rangle \langle \mathbf{A}(k) \rangle \\ &= \langle \lambda \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}x(k), \mathbf{A}(k) \rangle \\ &\quad - \langle \lambda \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}x(k) \rangle \langle \mathbf{A}(k) \rangle \\ &= \langle \lambda \mathbf{A}x(k), \mathbf{A}(k) \rangle - \langle \lambda \mathbf{A}x(k) \rangle \langle \mathbf{A}(k) \rangle \\ &\quad + \langle \mathbf{B}x(k), \mathbf{A}(k) \rangle - \langle \mathbf{B}x(k) \rangle \langle \mathbf{A}(k) \rangle \\ &= \frac{\lambda r \sum_{j=1}^n (a_k \cdot a_j) x_j - \lambda \sum_{i=1}^r a_{ik} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j}{r^2} \\ &\quad + \frac{r \sum_{j=1}^n (a_k \cdot b_j) x_j - \sum_{i=1}^r a_{ik} \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^n b_{ij} x_j}{r^2}. \quad (\text{A1}) \end{aligned}$$

根据概率分布与数理统计的相关知识, 有

$$a_k \cdot a_j = r (\mu_k \mu_j + \text{cov}(a_k, a_j)), \quad (\text{A2})$$

$$\sum_{i=1}^M a_{ik} \sum_{i=1}^M a_{ij} = r^2 \mu_k \mu_j, \quad (\text{A3})$$

$$a_k \cdot b_j = r (\mu_k \mu'_j + \text{cov}(a_k, b_j)), \quad (\text{A4})$$

$$\sum_{i=1}^M a_{ik} \sum_{i=1}^M b_{ij} = r^2 \mu_k \mu'_j, \quad (\text{A5})$$

μ_k, μ_j 和 μ'_j 分别是 a_k, a_j 和 b_j 的均值; $\text{cov}(\bullet)$ 表示协方差. 将 (A2)—(A5) 式代入 (A1) 式, 则有

$$\Delta(k) = \lambda \sum_{j=1}^n \text{cov}(a_k, a_j) x_j + \sum_{j=1}^n \text{cov}(a_k, b_j) x_j. \quad (\text{A6})$$

由于矩阵 $\mathbf{A}$ 和矩阵 $\mathbf{B}$ 是非相关的, 则相对于 $\sum_{j=1}^n \text{cov}(a_k, a_j) x_j$ 项, $\sum_{j=1}^n \text{cov}(a_k, b_j) x_j$ 项是可以忽略的, 即 $\sum_{j=1}^n \text{cov}(a_k, b_j) x_j \approx 0$. 将 (A5) 式写成矩阵形式, 即

$$\Delta = \lambda \Phi x, \quad (\text{A7})$$

其中, $\Delta \in n \times 1$ 是二阶相关变换的值, 矩阵 Φ 是 $\mathbf{A}$ 的协方差矩阵.

参考文献

- [1] Ying C L, Lu H H, Li C Y, Cheng C J, Peng P C, Ho W J 2015 *Opt. Lett.* **40** 3276
- [2] Chan V W 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 4750
- [3] Henniger H, Wilfert O 2010 *Radioengineering* **19** 203
- [4] Mo Q Y, Zhao Y L 2015 *Acta Phys. Sin.* **60** 072902 (in Chinese) [莫秋燕, 赵彦立 2011 物理学报 **60** 072902]
- [5] Andrews L C 1992 *JOSA A* **9** 597
- [6] Zocchi F E 2005 *Opt. Commun.* **248** 395
- [7] Tyson R 2010 *Principles of Adaptive Optics* (Boca Raton, London, New York: CRC Press)
- [8] Chatzidiamantis N D, Karagiannidis G K, Uysal M 2010 *Commun. IEEE Trans. on.* **58** 3381
- [9] Alzubi J A, Alzubi O A, Chen T M 2014 *Forward Error Correction Based On Algebraic-Geometric Theory* (New York: Springer)
- [10] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, Fink M, Boccarda A C, Gigan S 2010 *Phys. Rev. Lett.* **104** 100601
- [11] Mosk A P, Lagendijk A, Lerosey G, Fink M 2012 *Nature Photon* **6** 283
- [12] Aulbach J, Gjonaj B, Johnson P M, Mosk A P, Lagendijk A 2011 *Phys. Rev. Lett.* **106** 103901
- [13] McCabe D J, Tajalli A, Austin D R, Bondareff P, Walmesley I A, Gigan S, Chatel B 2011 *Nat. Commun.* **2** 447
- [14] Mandel L, Wolf E 1995 *Optical Coherence and Quantum Optics* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [15] Ning F L, He B J, Wei J 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 174212 (in Chinese) [宁方立, 何碧静, 韦娟 2013 物理学报 **62** 174212]
- [16] Li G M, Lü S X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 160502 (in Chinese) [李广明, 吕善翔 2015 物理学报 **64** 160502]
- [17] Donoho D L 2006 *IEEE Trans. Inform. Theory* **52** 1289
- [18] Shapiro J H 2008 *Phys. Rev. A* **78** 61802
- [19] Gong W 2015 *Photon. Res.* **3** 234
- [20] Zhang C, Guo S, Cao J, Guan J, Gao F 2014 *Opt. Express* **22** 30063
- [21] Li C, Yin W, Zhang Y 2009 *CAAM Report*
- [22] Dudley D, Duncan W M, Slaughter J 2003 *Conference on MOEMS Display and Imaging Systems* San Jose, USA, January 28–29, 2003 pp14–25

Optical communication in turbid and turbulent atmosphere*

Mao Tian-Yi¹⁾ Chen Qian^{1)†} He Wei-Ji²⁾ Zhuang Jia-Yan¹⁾ Zou Yun-Hao¹⁾
Dai Hui-Dong¹⁾ Gu Guo-Hua¹⁾

1) (School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

2) (Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging and Intelligent Sense, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(Received 4 November 2015; revised manuscript received 28 December 2015)

Abstract

Free space optical-communication (FSO) has gained significant importance due to its unique features: large bandwidth, license free spectrum, high data rate, easy and quick deployability, less power and low mass requirement. However, the performance of FSO is degraded in the turbid and turbulent atmosphere, dramatically. Various techniques are proposed to cope with the turbid media and turbulence in atmosphere, e. g. aperture averaging, diversity, adaptive optics, modulation and coding and orbital angular momentum. However, in the above systems with point-to-point optical communication structure, there exist obvious drawbacks or they are complex and expensive, and thus difficult to use in practice. In this article, array-to-point optical communication (APOC) with good performance in turbid and turbulent atmosphere is demonstrated. The strongly disturbed communication channel can be expressed as a circular complex Gaussian transmission matrix, and the transmitted field is described as a linear combination of the fields coming from different and independent segments of the digital micro-mirror device (DMD), so that the cross terms are averaged on the surface of bucket detector. Instead, the contributions of all segments for each light field nearly becomes equally weighted. Turbulence and other noises are reduced for the incoherence with sampling matrix based on the second-order correlation which has widely been used in ghost imaging and LIDAR. Consequently, narrow-band optical filter is not required at the receiver. The decoding algorithm is a new signal processing strategy from information technology, compressed sensing, which discards low frequency components in sampling process and recovers the signal by conducting convex optimization. Numerical simulations and experiments with binary and multi-bits level signals are demonstrated to show that the bit error rate of the proposed method APOC is approximately 10^{-4} – 10^{-2} , which is feasible for the optical communication in such complex communication channels. The communication rate, limited by the frequency of the DMD and the sampling rate of the receiver, could reach hundreds of kbit/s, and with improved technology a rate of Mbit/s should be attainable. This proposed APOC could realize optical communication in turbid and turbulent atmosphere and thus offers a very effective approach to promoting the implementation in military and rescue.

Keywords: optical communication, turbid media, second-order correlation, compressed sensing

PACS: 42.79.Sz, 42.25.Dd

DOI: 10.7498/aps.65.084207

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61271332, 61101196).

† Corresponding author. E-mail: chenqian@njust.edu.cn