

迟楠^{1,2} 乔梁^{1,2} 赵嘉琦^{1,2} 卢星宇^{1,2}

基于可见光通信的 MIMO 技术研究现状

摘要

随着灯光与光无线通信技术的结合,基于 LED 的可见光通信(VLC)越来越受到人们的关注.本文首先探讨了可见光通信的基带处理过程.为了提高室内照明度,LED 阵列渐渐被广泛使用,基于此,可见光通信系统中基于 LED 阵列的 MIMO 技术也进入研究者的视野,因此,随后介绍了两种 VLC-MIMO 机制,并介绍了空时分组编码(STBC)在 VLC-MIMO 系统中的研究进展.作为对比,最后对 LTE 系统中的物理层处理过程和多天技术进行技术探讨,并大胆预测了可见光通信基带处理后续可能发展的方向.

关键词

空时编码技术;可见光通信;发光二极管;多输入多输出技术

中图分类号 TP929.1

文献标志码 A

收稿日期 2017-02-21

资助项目 广东省省级科技计划项目(2016B010111002)

作者简介

迟楠,女,博士,教授,博士生导师.先后获得教育部新世纪优秀人才、上海市曙光学者、上海市十大 IT 新锐等荣誉称号,为 IEEE 802.15.7 可见光通信标准组中国 2 名成员之一.nanchi@fudan.edu.cn

0 引言

随着灯光与光无线通信的结合,基于 LED 的可见光通信(Visible Light Communication, VLC)越来越受到人们的关注.可见光通信是一种利用发光二极管(LED)发射光线的强度变化来传递信息的技术^[1-2].它在照明的同时,可以提供信息的传输,这有利于降低网络接入成本,提升资源利用率.相对于传统的无线通信,VLC 具有性价比高、安全性高、无需授权频谱和抗电磁干扰等特性.因此,可见光通信被认为是 5G 移动通信室内无线网络的可供选择的补充技术之一.

可见光通信技术最早由日本学者于 2000 年提出,他们通过仿真探讨了将 LED 灯作为无线传输通信基站的可行性^[3].2004 年,日本在关西国际机场通过实验验证了 10 Mb/s 量级的可见光通信实验^[4].2006 年,德国布来梅国际大学将正交频分复用调制技术运用到了可见光通信系统,实验验证了技术的可行性^[5].之后,来自英国的研究者们研发了一种新型的 LED 用于可见光通信,将可见光通信速率提升到 10 Gb/s^[6].美国在可见光通信方面也开展了许多项目研究.例如,宾州州立大学联合佐治亚理工学院成立的 COWA 研究中心,着重于可见光通信系统与应用的创新研究.

对于高速短距离光接入系统而言,需要综合考虑系统的架构、成本和尺寸以及功耗.器件方面,代表性的研究工作是加拿大麦吉尔大学的 Chagnon 等^[7]利用 push-pull 的硅基马赫增德尔调制器,结合脉冲幅度调制(PAM)格式,实现了 112 Gb/s 的信号在单模光纤中传输 10 km.在高谱效率调制格式方面,PAM、正交频分复用(OFDM)、无载波幅相调制(CAP)等技术引起了人们广泛的关注.丹麦科技大学的研究团队结合 PAM4 和偏振复用技术在直调 VCSEL 上实现了 100 Gb/s 的信号传输^[8].英国剑桥大学研究人员利用多带 CAP 调制,在 15 GHz 的 EML 上成功实现了超 100 Gb/s 传输,并采用数字信号处理算法对系统进行了优化^[9-11].文献[12-13]利用 DMT 技术结合波分复用可以成功实现 400 Gb/s 以上的信号在单模光纤中传输 30 km.

国内关于可见光通信技术的研究一直到 2010 年才见报道.最近几年,复旦大学、解放军信息工程大学、清华大学、东南大学、北京邮电大学、中国科学院半导体研究所、华中科技大学、北京理工大学、暨南大学等都在开展相关研究,在政府资金和国家重大项目的支持下,取得了蓬勃的发展.复旦大学利用 RGBY-LED,成功实现了 8 Gb/s 信

1 电磁波信息科学教育部重点实验室,上海,200433

2 复旦大学 信息科学与工程学院,上海,200433

号传输,这是基于商用 LED 的最高传输速率^[14].

为了提高室内照明度以及保证室内灯光照明的全覆盖,接收机不可避免地出现在多个 LEDs 的照明范围内,这将降低系统性能.同时,为了提高系统性能和传输速率,多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 技术成为了最直接的技术之一.

本文先对目前可见光通信的物理层处理过程进行探讨,并介绍了目前可见光通信中 MIMO 的研究现状,随后对比介绍了无线通信中的物理层和 MIMO 技术,并对未来可见光通信系统中的物理层处理过程和 MIMO 技术提出了可实施性的技术探讨.

1 可见光通信物理层和 MIMO 技术

1.1 可见光通信物理层过程

理论传输速率高是可见光通信的显著优点之一,但是受器件带宽限制,特别是 LED 带宽的限制,传输速率一直徘徊在 100 Mb/s~1 Gb/s 量级.

将单维的数据流传输变换成多维的数据流传输,是一种直接的成倍提升系统传输容量的技术.多维多阶复用的可见光通信系统被提及,以此提高可见光高谱效率.文献[15]具体介绍了偏振分集复用 (Polarization Division Multiplexing, PDM)、波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM)、频分复用 (Frequency Division Multiplexing, OFDM) 以及成像 (imaging) 和非成像空间分集复用 (Non-imaging Space Division Multiplexing, SDM) 通信系统.

频分复用的可见光通信系统的基带处理流程如图 1 所示.

来自高层的数据流通过使用不同调制方式调制成不同的调制符号,并经过 OFDM 处理产生 OFDM 符号进行发送.

为了达到室内照明规定的标准亮度,一般采用 LED 阵列,这给系统提供了天然空间分集复用或者多输入多输出系统的硬件设施.文献[16-20]在可见光通信中引入了 MIMO 技术.

根据收发端 LED 和探测器的映射关系,可将 MIMO 可见光系统分成成像 MIMO 和非成像 MIMO.其中成像 MIMO 和非成像 MIMO 两种 MIMO 技术的区别在于,成像 MIMO 收发机需要严格对准,每个 LED 通过成像光学器件映射到指定对应的探测器上.因此,这种 MIMO 系统接收端简化了接收机数据处理的复杂度.而对于非成像 MIMO,不需要收发端严格对准,每个探测器都会接收到来自每个发射端 LED 发射的光信号,因此,在接收端需要采用相关解空分复用算法,以正确解调出信号.这种 MIMO 系统虽提高了接收端算法的复杂度,但实用性更强.

1.2 VLC-MIMO 技术

1.2.1 成像空分复用可见光通信系统

文献[21]提出了一种成像空分复用可见光通信系统,图 2 为 2x2 成像的 MIMO 实验系统.

在发射端,采用两个 RGB-LED (红光峰值波长 620 nm,绿光 520 nm,蓝光 470 nm) 作为光源,可产生 6 lm 的可见光;在接收端,采用两个 APD 作为接收机 (APD 800 nm 处的灵敏度为 0.5 A/W).LED 和 APD 的 3 dB 带宽分别为 10 和 100 MHz.在接收端 APD 前面,放置一个直径为 76 mm、焦距为 100 mm 的成像透镜,用作 LED 成像到特定的 APD 上.该实验系统采用的调制格式为 Nyquist SC-FDE,包括 QAM 映射、串并变换和训练序列的添加、预均衡、插入 CP、上采样、滤波和上载到中频等过程.

生成的 Nyquist SC-FDE 信号加载到任意波形发生器 (AWG) 中,AWG 的输出首先经过功率放大器放大,随后经过 bias tee 添加直流信号,再分别用来

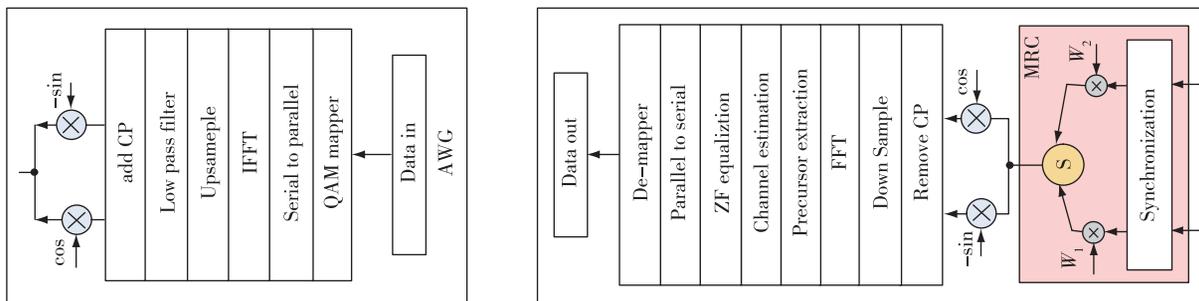


图 1 VLC 基带处理流程

Fig. 1 Baseband processing in VLC

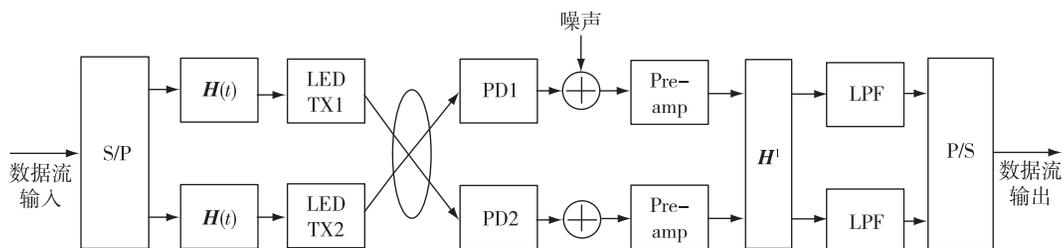


图2 2x2 成像 MIMO 可见光系统框图

Fig.2 Block diagram of 2x2 imaging VLC MIMO

驱动 3 个不同的 LED 芯片,经自由空间信道和透镜,传输到 APD 中进行光电转换,生成的电信号再由高速实时示波器进行采集,并将采集后的信号送入接收端数据处理模块进行线下处理.其中,接收流程包括同步、下变频成基带信号、串并变换、去 CP、信道估计和均衡以及并串变换等.

为了较好地对信道进行估计,文献[21]还提出了一种时分复用的训练序列用于测试两个传输链路间的串扰,如图3所示.

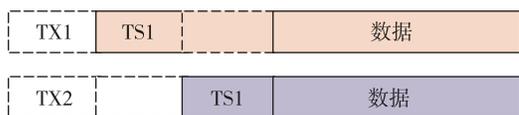


图3 时分复用的训练序列

Fig.3 Training sequence in TDM

采用时分复用的训练序列的表达式为

$$T_1 = \begin{pmatrix} T_{s_1} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad T_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ T_{s_2} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

T_1 和 T_2 分别代表在时刻 T_1 和时刻 T_2 的训练序列, T_{s_1} 和 T_{s_2} 分别代表同一个信道里的训练序列.采用这种方式,不同发射机在不同时隙发送的信息可以较好地实现正交.

假设在时刻 T_1 和时刻 T_2 ,RX1 和 RX2 接收到的信号为 $Y_{1,1}, Y_{1,2}, Y_{2,1}$ 和 $Y_{2,2}$,则信道矩阵 H 可以表示成:

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{1,1}/T_{s_1} & Y_{1,2}/T_{s_2} \\ Y_{2,1}/T_{s_1} & Y_{2,2}/T_{s_2} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

其中 H_{12} 和 H_{21} 分别表示两个信道链路中的干扰, H_{11} 和 H_{22} 分别表示各自信道的响应.由于在成像的 MIMO 系统中,不同链路间的信号干扰基本可以忽略,信道矩阵可以简化为

$$H = \begin{pmatrix} H_{11} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{1,1}/T_{s_1} \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

因此,在成像 MIMO 系统中,接收端无需采用额外的 MIMO 解调算法,就可以独立恢复出原始信号.在该系统信道响应的测试过程中,采用了频域平滑技术,结果表明,成像 MIMO 系统中空间信道间的干扰很小.

最后,将经过预均衡的 16/32QAM SC-FDE 信号加载到红、绿、蓝 3 种不同颜色的 LED 光上,红光 LED 调制的是 125-MBd 64QAM 信号,绿光和蓝光 LED 调制的都是 125-MBd 32QAM 信号,通过使用空分复用技术,红绿蓝 3 种颜色 LED 传输速率分别为 1.5、1.25 和 1.25 Gb/s,实现了速率加倍的效果.两个信道的误码率性能一致,经过 75 cm 传输后误码率都低于 3.8×10^{-3} .

1.2.2 非成像空分复用可见光通信系统

成像的 VLC-MIMO 系统的优势是,通过光学成像方式实现收发端的分集复用,但是,发射机和接收机需要一一对应,因此并不需要采用额外的数字信号处理算法进行 MIMO 的解复用.而其缺点和优点一样明显,收发端需要严格的对准,这对处于移动状态的系统来说是一大挑战,因为传输距离的改变或者角度的改变,都会导致接收端无法正确解调出数据.

非成像的 VLC-MIMO 系统无需收发端严格对准,这在一定程度上减少了系统设计的复杂度,但代价是在接收端需要采用复杂的数字信号处理算法进行 MIMO 的解复用,通过提升数字领域的复杂度来降低系统层面的复杂度,这种系统在实际应用过程中更为现实.

与成像 VLC-MIMO 系统最大的区别是,非成像 VLC-MIMO 系统中的每个接收机都可以探测到来自两个发射机的信号.为了便于验证该系统,每个 LED 上调制的是 125-MBd 4QAM Nyquist SC-FDE 信号.处理流经过自由空间传输、透镜聚光、探测器的探测以及示波器采集后的电信号处理,包括同步、下变频、

移除 CP 和频域均衡.其中 MIMO 的解复用和信道均衡通过训练序列同时完成.训练序列的设计采用式(6).

非成像 VLC-MIMO 系统中信道矩阵 \mathbf{H} 可以表示为:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \mathbf{H}_{11} \\ \mathbf{H}_{21} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{Y}_{1,1}/\mathbf{T}_{S_1} & \mathbf{Y}_{1,2}/\mathbf{T}_{S_2} \\ \mathbf{Y}_{2,1}/\mathbf{T}_{S_1} & \mathbf{Y}_{2,2}/\mathbf{T}_{S_2} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

其中 \mathbf{H}_{12} 和 \mathbf{H}_{21} 分别表示两个信道链路间的串扰, \mathbf{H}_{11} 和 \mathbf{H}_{22} 分别表示各自信道的增益.

利用获取的信道信息矩阵,可以恢复出发射的原始信号,具体恢复公式如下:

$$\mathbf{X}_1 = (\mathbf{H}_{22} \times \mathbf{Y}_1 - \mathbf{H}_{12} \times \mathbf{Y}_2) / (\mathbf{H}_{22} \times \mathbf{H}_{11} - \mathbf{H}_{12} \times \mathbf{H}_{21}), \quad (5)$$

$$\mathbf{X}_2 = (\mathbf{H}_{11} \times \mathbf{Y}_2 - \mathbf{H}_{21} \times \mathbf{Y}_1) / (\mathbf{H}_{22} \times \mathbf{H}_{11} - \mathbf{H}_{12} \times \mathbf{H}_{21}). \quad (6)$$

从恢复公式可以看出,获取的信道信息对后续的解复用和后均衡至关重要,因此采用时域平滑和频域平滑方式来获取更精准的信道信息.从频域上看,每个频点 w_k 周围的频率成分都会对其造成影响,因此可以采用长度为 $(2m + 1)$ 、左右长度各为 m 的滑动窗进行平滑,具体平滑过程如下所示:

$$\mathbf{H}_i(w_k) = \frac{1}{2m + 1} \sum_{n=k-m}^{k+m} \mathbf{H}_i(w_n), \quad (7)$$

其中 $\mathbf{H}_i(w_k)$ 表示第 i 个训练序列的估计信道, m 的大小可以根据信道噪声抖动情况来选择.另外,由于室内空间信道是一个慢变的信道,相邻的训练序列可以认为经历相同的信道,因此可以采用时域平滑来进一步提升信道的准确度.具体表示式为

$$\mathbf{H}(w_k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mathbf{H}_i(w_k). \quad (8)$$

在实验系统中,两个商用的蓝光 LED(中心波长 470 nm)作为光源,两个 APD 作为接收机.其中两个发射机的间距为 5 cm,两个接收机的间距为 10 cm,收发端中心的偏置距离为 2.5 cm.这样的设计可以打破系统的对称性,避免接收端处理的信道矩阵是

奇异矩阵,导致信号不能恢复.收发端的距离在 20 ~ 50 cm 之间变化.在 40 cm 的照度是 3.5 lx,这远小于标准的照度,说明系统的容量和传输距离可以大幅提升.非成像 MIMO 可见光系统框图如图 4 所示.

仿真结果表明,两个接收机的性能基本一致,误码率随着传输距离的增加都会下降.但是经过 40 cm 传输后误码率的性能可以低于硬判决阈值 3.8×10^{-3} .

针对 VLC-MIMO 和 VLC-SISO 的情况.其中 MIMO 情况下,每个空间链路传输 125-MBd 4QAM Nyquist SC-FDE 信号,总速率为 500 Mb/s;在 SISO 情况下,传输 125-MBd 16QAM Nyquist SC-FDE 信号,总速率也为 500 Mb/s.在相同传输速率的前提下,MIMO 的误码率性能较优.

通过合理安排收发机的位置,可以很好地验证非成像 MIMO 在可见光通信系统中的应用.这种位置的安排只需要打破系统的对称性即可,不同于成像 MIMO 系统中要求的精准.通过采用基于时分复用的训练序列结构,就可以在接收端对信号进行恢复,通过频域平滑和时域平均,可以进一步提升系统的性能.

2 基于 STBC 的 VLC MIMO 技术

文献[22]将空时分组编码(Space-Time Block Code, STBC)技术运用到了 VLC MIMO 系统中.经过 STBC 后星座图的发送端和接收端如图 5 所示.

传输信号分别经过 4QAM 和 16QAM 调制后,接收信号分别变成了 9QAM 和 49QAM.这是因为接收的信号是两个发送信号经过 STBC 编码的累和.

文献[22]使用 STBC-OFDM 编码技术提出了一种多输入单输出(Multiple Input Single Output, MISO)的 VLC 技术,通过 RGB-LEDs 上的红灯发送有用信息,并使用 OFDM 和 16QAM 调制方式用以提高数据速率.

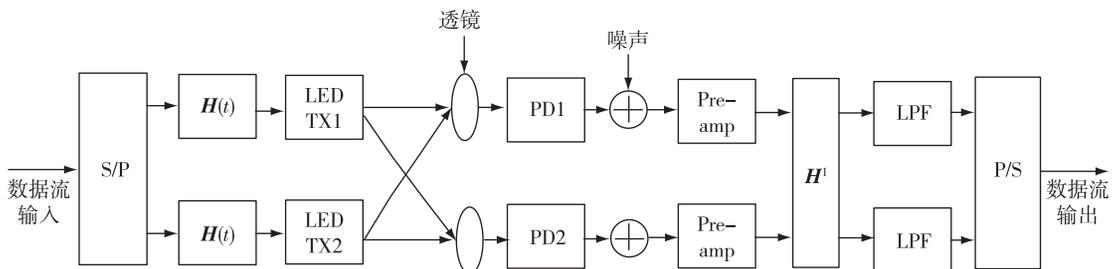


图 4 2x2 非成像 MIMO 可见光系统框图

Fig. 4 Block diagram of 2x2 non-imaging VLC MIMO

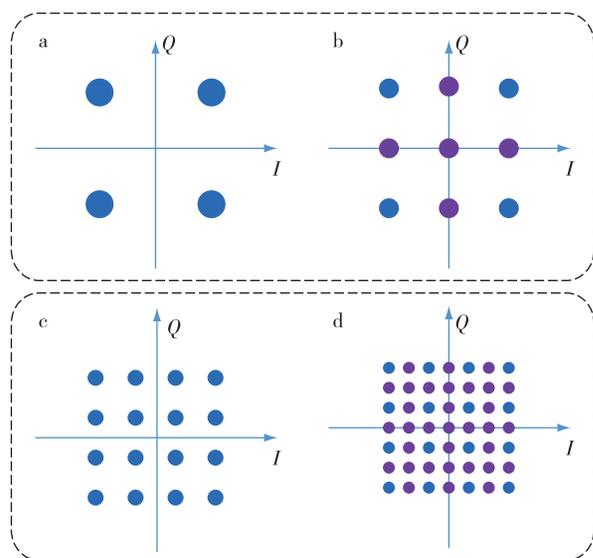


图5 发送和接收星座点

Fig. 5 Constellation diagrams of transmitted and received signals

此外,结合预均衡和后均衡技术可以较好地解决 LEDs 灯的非平坦频率响应.在 5 m 的自由空间传输系统中,传输速率达到了 500 Mb/s,误码率 (BER) 低于 1×10^{-5} .

在 MISO 系统中,Alamouti's STBC 机制^[22]被运用,其空时编码表达式为

$$\begin{bmatrix} c_1 & c_2 \\ -c_1^* & c_2^* \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中, c_1 和 c_2 是需要传输的复信号, * 表示共轭运算.不同接收机接收到的信号表达式如下:

$$\begin{aligned} y_1 &= h_1 c_1 + h_2 c_2 + n_1, \\ y_2 &= -h_1 c_2^* + h_2 c_1^* + n_2, \end{aligned} \quad (10)$$

其中, h_1 和 h_2 分别表示 LED1 和 LED2 的信道响应, n_1 和 n_2 分别表示 T1 和 T2 时刻的噪声.信号矢量的表达式如下所示:

$$\bar{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 \\ h_2^* & -h_1^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

在上述表达式中,如果信道估计较好,意味着 $\bar{h}_1 = h_1, \bar{h}_2 = h_2$, 则

$$\bar{y} = \rho c + n', \quad (12)$$

其中, ρ 表示信道响应系数, $H \cdot H^H = \rho I_{2 \times 2}, n' = H^H n$. 考虑到存在的噪声,最终表达式为

$$\hat{c} = \arg \min_{\hat{c}} \|\bar{y} - \rho \hat{c}\|^2, \quad (13)$$

\bar{y} 表示接收的信号, \hat{c} 表示解调的数据.

在 MISO 系统中,接收机接收到的最终数据是 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 的累和.

图 6 为分别采用 4QAM、16QAM 以及 9QAM 和 49QAM 调制之后 BER 和 SNR 的仿真.由图 6 可以分析看出,考虑到接收灵敏度的高要求,高阶的 QAM 调制很难在系统中应用.

具体实现流程为:驱使信号由 AWG (Tektronix AWG710) 产生并通过 Matlab 线下处理,将信号进行预均衡和放大之后,与直流电流通过 bias Tee 合并传输到 RGB-LEDs 灯上.其中,LED1 和 LED2 灯分别通过红光传输信号,蓝光和绿光关闭.在发射机的前面,通过使用高灵敏度硅 APD 合并透镜用于探测光信号.透镜用于增强捕获光的灵敏度,以提高系统的 SNR(信噪比).

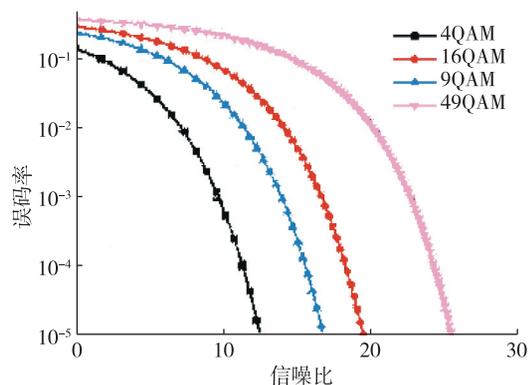


图6 BER 和 SNR 的仿真

Fig. 6 BER versus SNR for different QAM orders

传输的信号首先通过不同的调制方式变成调制符号,并经过 STBC 技术变成两路信号源,随后进行 OFDM 调制.在相距 5 m 处,16QAM 调制下,STBC-OFDM 信号占用了 125 MHz 的 128 个子载波,传输速率可达到 500 Mb/s.上采样率因子设定为 5,AWG 的采样率和数字示波器的采样率分别为 625 MS/s 和 1 GS/s,随后通过线下数字信号处理算法解调通过 OSC 采样之后的数据.

文献[23]在基于 Alamouti's STBC 技术的基础上结合基于等增益合并技术(Equal-Gain Combining, EGC),提出了一种 EGC-STBC 技术,数据在 OFDM 解调之前需要进行 EGC 处理.在发射机和接收机间距为 1.6 m 的自由空间中,使用 2×2 的 EGC-STBC 技术可以获取 1.8 Gb/s 的速率. 2×2 的 EGC-STBC 解码算法中,最终的数据也使用线性合并技术进行处理,解调的信号的表达式为

$$\hat{s} = \arg \min_{\hat{s}} \|\bar{r}_1 + \bar{r}_2 - (\rho_1 + \rho_2) \hat{s}\|^2. \quad (14)$$

图 7 为 CPU 运行时间和比特数之间的关系.

类似于文献[22]的实验处理方式,传输的信号首

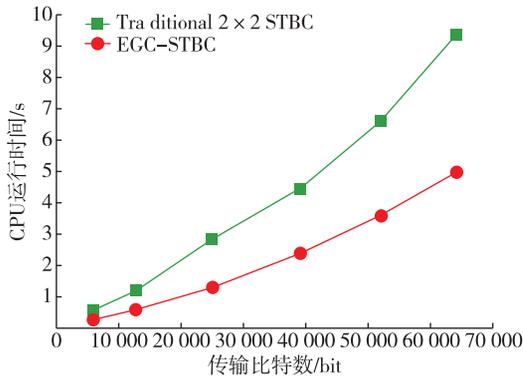


图7 运行时间和传输比特数

Fig. 7 CPU running time versus number of bits

先通过不同的调制方式变成调制符号,并经过 STBC 技术变成两路信号源,随后进行 OFDM 调制和软均衡处理.在相距 5 m 处,16QAM 调制下,STBC-OFDM 信号占用了 125 MHz 的 128 个子载波,传输速率达到了 800 Mb/s.该系统中,上采样率因子设定为 4,AWG 的采样率和数字示波器的采样率分别为 800 MS/s 和 1 GS/s,随后通过线下数字信号处理用于解调通过 OSC (OSC, Agilent 54855A) 采样的数据.分析等式 (14) 可知,2x2 的 MIMO 系统中,STBC 技术需要对发送的数据进行预处理,极大提升了系统性能.仿真结果表明,较传统的 STBC 算法,基于 EGC-STBC 算法可以在较

短的时间内获得相应比特数.

在线下处理过程中,对于 EGC-STBC 机制,接收机接收的两路数据流首先通过 EGC 处理,并在 2x1 的 STBC 解码之前进行 OFDM 解调.而在 2x2 的 STBC 机制中,接收机 1 和接收机 2 通过 OFDM 进行解调,并将解调出的数据发送至 STBC 译码器.传统 2x1 STBC、传统 2x2 STBC 和 2x2 EGC-STBC 流程如图 8 所示.

同时,文献[23]还研究了不同 LED 灯的发射功率和 BER 之间的关系.当功率比为 1 时,意味着 LED1 和 LED2 具有相同发射功率,通过 STBC 算法,可以获得更好的性能.当功率比上升或者下降时,BER 性能都会恶化.

最后,该文献还通过 BER 性能对传统的 2x2 STBC 算法和 EGC-STBC 算法进行对比.实验结果显示,传统的 2x2 STBC 算法和 EGC-STBC 算法的误码特性差不多.当调制带宽为 225 MHz, BER 低于门限值 3.8×10^{-3} 时,可以达到 1.8 Gb/s 的吞吐量.综合图 7 所示,该技术较传统的 2x2 的 STBC 技术,EGC-STBC 在计算复杂度方面具有较好的优势.

3 无线通信物理层和 MIMO 技术

目前,第五代移动通信技术正处于紧张的标准化阶段,相对于发展周期较短的可见光通信技术,可

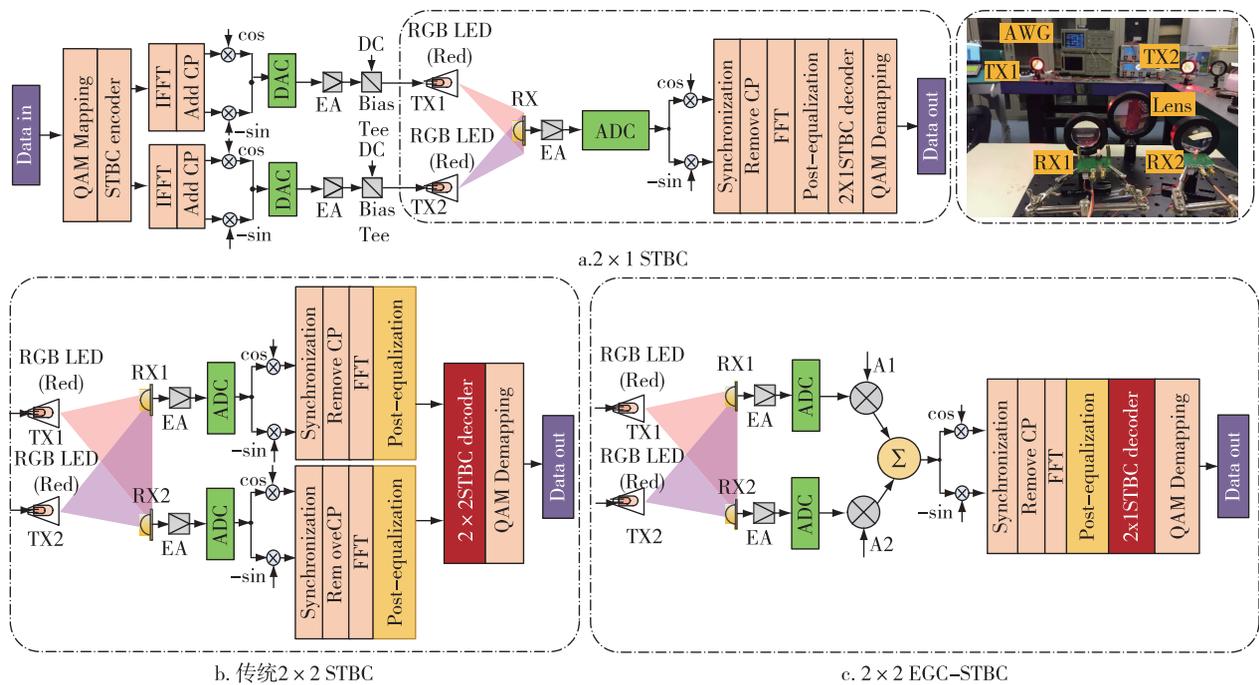


图8 STBC 实验流程

Fig.8 Block diagrams and experimental setup of STBC-OFDM VLC system

将一些无线通信系统中的技术运用到可见光通信系统中,比如无线通信系统中用于解决码字和天线端口不对应问题的“层映射”、用于获取信道状态信息的参考信号以及下行多天线技术中多用户 MIMO、波束赋形等技术。

因此本文随后对目前 LTE 系统中物理层的处理过程及下行多天线技术进行介绍和探讨。

3.1 LTE 时频资源

3.1.1 时域

LTE 系统中,为了提供一致而准确的时间,定义了一个基本的时间单位:

$$T_s = \frac{1}{15\,000 \times 2\,048} = 1/30\,720\,000 \text{ s}, \quad (15)$$

该时间单位可以看作是基于一 FFT(快速傅里叶变换)且 FFT 大于等于 2 048 的发射机/接收机所使用的采样时间。

LTE 的 OFDM 系统中,可以插入一段空白符号作为保护间隔(GI),这样做虽能消除符号间干扰(Inter Symbol Interference, ISI),但是却不能消除子载波间干扰(Inter Carrier Interference, ICI)。基于此,OFDM 系统中,引入了循环前缀的概念,通过将 OFDM 信号最后一段长度的符号取出来放在 OFDM 信号的头部,将 OFDM 符号拉长。通过引入 CP,不但可以解决 ISI 问题,还能解决 ICI 问题。

3.1.2 频域

频域中,LTE 系统的基本单位是一个子载波(subcarrier)。正常 CP 情况下,上行和下行的子载波间隔为 15 kHz,15 kHz 的子载波间隔对应每个符号内可用的符号时间为 $2\,048 \times T_s$,近似 66.7 μs 。频域上可用的所有资源称为系统带宽。

$E(k,1)$ 是 LTE 系统中的最小物理资源,它是由时间轴上的一个 OFDM 符号和频域上一个子载波组成的二维矩形区域。一个 RE 可存放一个调制符号(Modulation Symbol),该调制符号可使用 QPSK(对应一个 RE 存放 2 bit 数据)、16QAM(对应一个 RE

存放 4 bit 数据)或 64QAM(对应一个 RE 存放 6 bit 数据)调制。

3.1.3 空域

LTE 系统中,空间维度是以“层(layer)”来度量的,并通过多维度的发射机和多维度的接收机来实现。如果不进行空间维度的复用,则在相同的时频资源上,只存在单层,意味着只能传输一条数据流,即 SISO 系统。如果使用空间维度的复用技术,则在相同的视频资源上,可同时传输多跳数据流,以达到提高频谱利用率和吞吐量的目的。

3.2 物理层处理过程

LTE 系统共定义了多种物理层信道用于信号的传输。不同物理信道传输不同的数据,其中,物理层处理过程大致相同,本文主要对下行系统中的物理下行共享信道(Physical Downlink Shared Channel, PDSCH)的物理层处理过程进行分析和讨论。PDSCH 的物理层处理过程如图 9 所示。

3.2.1 加扰

来自高层的传输块在经过 CRC 插入、信道编码、速率匹配之后,得到数据流。为使传输的数据流随机化,先对来自高层的数据(如图 9 中的码字)经过加扰处理,即进行模 2 加:

$$\tilde{s}^q(i) = (s^q(i) + e^q(i)) \bmod 2. \quad (16)$$

LTE 系统中,在一个子帧中最多可传输两个码字,即 $q \in \{0,1\}$ 。

3.2.2 调制

对于每个加扰之后的数据,通过使用不同的调制方式变成调制信号。

3.2.3 层映射

如前述,LTE 系统中引入了“层”的概念,以实现空分复用的目的。如图 4 所示,经过调制后的比特流,被映射到一个或者多个层上,即被映射到 $\mathbf{x}(i) = [x^{(0)}(i), x^{(1)}(i), \dots, x^{(v-1)}(i)]^T$ 上,其中, $i = 0, 1, \dots, M_{\text{syml}}^{\text{layer}} - 1$, v 表示层的个数, $M_{\text{syml}}^{\text{layer}}$ 为每一层中的调制符号个数。

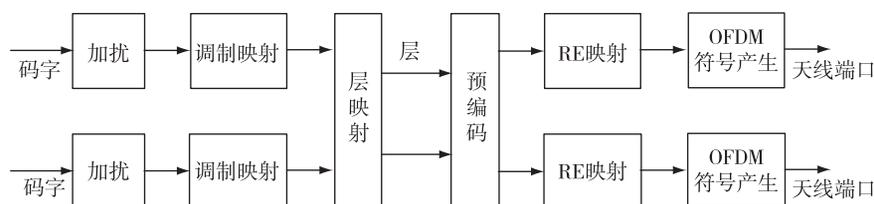


图 9 下行基带信号处理过程

Fig. 9 Physical channel processing in LTE downlink

LTE 系统中,共定义了两种类型的天线端口数:单天线端口的层映射和多天线的层映射.

对于传输分集,传输的码字 $p=1$,层的数目 v 等于信道传输的天线端口数.传输分集的层映射如表 1 所示.

对于空间复用,层的数目 v 小于或者等于传输所使用的天线端口数.空间复用的层映射图可参考文献[24].

同时,层也是一种用于解决和天线端口数不匹配的技术.在下行系统中,通过终端反馈的秩指示(Rank Indicator, RI)来确定所使用的层的数目.

表 1 传输分集的层映射

Table 1 Codeword-to-layer mapping for transmit diversity

层数目	码字数目	码字到层的映射
2	1	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(2i)$ $x^{(1)}(i) = d^{(0)}(2i+1)$ $M_{\text{syimb}}^{\text{layer}} = M_{\text{syimb}}^0/2$
4	1	$x^{(0)}(i) = d^{(0)}(4i)$ $x^{(1)}(i) = d^{(0)}(4i+1)$ $x^{(2)}(i) = d^{(0)}(4i+2)$ $x^{(3)}(i) = d^{(0)}(4i+3)$ $M_{\text{syimb}}^{\text{layer}} = M_{\text{syimb}}^0/4$

3.2.4 预编码

层映射之后的调制符号,经过预处理映射到不同的天线端口上,映射到每一个天线端口上的向量表达式为 $\mathbf{y}(i) = [y^{(0)}(i), y^{(1)}(i), \dots, y^{(p)}(i), \dots]^T$. LTE 系统共定义了多种天线端口, $p \in \{0, 4, 5\}$ 是传输所使用的单天线端口序号,此时层的数目等于天线端口数.对于分别支持 2 天线端口和 4 天线端口数的空分复用的预编码技术,可使用的天线端口序号分别为 $p \in \{0, 1\}$ 和 $p \in \{0, 1, 2, 3\}$.

预编码矩阵是 $R \times P$ 的矩阵,其中, R 为传输秩,即层的数目, v , P 为天线端口的个数.空间复用的预编码的表达式如下定义:

$$\begin{bmatrix} y^{(0)}(i) \\ \vdots \\ y^{(p-1)}(i) \end{bmatrix} = \mathbf{w}(i) \begin{bmatrix} x^{(0)}(i) \\ \vdots \\ x^{(v-1)}(i) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

预编码矩阵 $\mathbf{w}(i)$ 从基站和终端协定配置好的码本中选取.码本是有限的可用预编码矩阵的集合,终端通过选择合适的预编码矩阵进行上报.空分复用,2 天线端口所使用的码本如表 2 所示,4 天线端口所使用的码本具体可参考文献[24].

LTE 共支持两种方式的下行天线预编码:基于码本的预编码和基于非码本的预编码^[24].基于码本的预编码,基站只能从码本中选择合适的预编码矩

表 2 空间复用使用的码本

Table 2 Codebook index for spatial multiplexing

码本序号	层数目 v	
	1	2
0	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
1	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$
2	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ j \end{bmatrix}$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ j & -j \end{bmatrix}$
3	$\frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -j \end{bmatrix}$	

阵,并通过下行控制信息指示(Downlink Control Information, DCI)告诉终端对应的下行 PDSCH 传输所使用的预编码矩阵.二者的区别在于,前者使用的是小区特定参考信号进行信道估计,即公共参考信号(Common Reference Signal, CRS),后者使用的是终端特定的参考信号进行信道估计,即 DRS.

3.2.5 天线端口

天线端口是一个逻辑上的概念,一个天线端口可以是一个物理发射天线,也可以是多个物理发射天线的合并.因为每个天线端口对应一个时频资源网格,所以每个天线端口对应一种类型的参考信号(Reference Signal, RS).

对于下行,一个小区支持的天线端口集合依赖于该小区的参考信号配置.

3.3 多天线技术

针对 LTE 下行的多天线技术,目前共定义了 9 种传输模式(Transmission Mode, TM):

1) TM1 为单输入单输出系统,即 SISO.单天线端口传输中只有 1 个码字,只使用 1 层,码字直接映射到层上,且经过层映射之后的调制符号直接映射到天线端口上.

2) 支持传输分集的 TM2 模式主要用于提高数据传输的可靠性.通过在多根发射天线上发送相同的数据可以提高 SINR,但是却不能提高吞吐量.

3) TM3 又称为开环空分复用,终端无需反馈 PMI,只需反馈 RI 和 CQI 即可,是一种较为简单的下行 MIMO 技术.

4) 相比于 TM3, TM4 需要终端反馈 PMI,闭环的 TM4 需要利用信道条件信息来调整发射端发送的数据,但考虑到反馈和调整所带来的时延问题,信道变化较快的高速环境中,不适合使用 TM4.

5) TM5 支持了 MU-MIMO 的情况,但是 $v=1$,因此终端无需反馈 RI,虽只支持了 $v=1$ 的传输,但是可最多支持 2 个 UE 并行传输^[24].

6) TM6 也是使用 $v=1$ 的闭环预编码,基本支持基于码本的波束赋形,通过 CRS 进行信道估计.

7) TM7 和 TM8 分别是 Release-8 引入进来的单流波束赋形和双流波束赋形技术,其中,TM7 对提高小区平均吞吐量和边缘吞吐量以及降低小区间干扰有着至关重要的作用,TM8 则类似于波束赋形和空分复用的结合.

8) Release-9 引入的 TM9,可支持“8 流波束赋形”,设计其的目的在于减少基站间的干扰以及最大化信号的稳定性.

如今,将 MIMO 技术与可见光通信相结合,已成为下一个研究 VLC 系统的热门话题,而将“层”的概念引入到 VLC 系统中,也是一种必不可少的关键技术点,这将更有利于提升 VLC 系统的传输速率.

4 总结

本文首先分析了可见光通信系统的基带处理过程及 MIMO 技术,针对可见光通信系统中的 MIMO 技术,分析介绍了成像 VLC-MIMO 技术和非成像 VLC-MIMO 技术.随后针对非成像 VLC-MIMO 技术,分别讨论了 2×1 的传统 STBC 编码技术和 2×2 的基于 EGC-STBC 的编码技术.随后,介绍了目前无线蜂窝系统的物理层处理过程及 MIMO 技术,并着重分析了后续可见光通信可进行研究的关键技术点.

在可见光通信系统中使用 MIMO 技术,使用 LED 阵列不仅可以提高室内照明的亮度和覆盖面积,还能进一步提高 VLC 系统在室内信息传输中的可靠性,对于布局未来室内网络具有重大意义.

参考文献

References

[1] Chi N, Haas H, Kavehrad M, et al. Visible light communications: Demand factors, benefits and opportunities [J]. IEEE Wireless Communications, 2015, 22(2): 5-7

[2] Wang Y Q, Wang Y G, Chi N, et al. Demonstration of 575 Mb/s downlink and 225 Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED [J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1203-1208

[3] Tanaka Y, Haruyama S, Nakagawa M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links [J]. The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications,

2000, 2: 1325-1329

[4] Komine T, Nakagawa M. Performance evaluation of visible-light wireless communication system using white LED lightings [J]. Proceedings of the Ninth International Symposium on Computers and Communications, 2004, 2: 258-263

[5] Afgani M Z, Haas H, Elgala H. Visible light communication using OFDM [C] // 2nd International Conference on Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities, 2006: 80-85

[6] Tsonev D, Chun H, Rajbhandari S, et al. A 3 Gb/s single-LED OFDM-based wireless VLC link using a Gallium Nitride [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(7): 637-640

[7] Chagnon M, Osman M, Poulin M, et al. Experimental study of 112 Gb/s short reach transmission employing PAM formats and SiP intensity modulator at 1.3 μm [J]. Optics Express, 2014, 22(17): 21018-21036

[8] Rodes R, Estaran J, Li B M, et al. 100 Gb/s single VCSEL data transmission link [C] // Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC/NFOEC), 2012 and the National Fiber Optic Engineers Conference, 2012, DOI: 10.1364/NFOEC.2012.PDP5D.10

[9] Olmedo M I, Zuo T J, Jensen J B, et al. Towards 400 GBASE 4-lane solution using direct detection of MultiCAP signal in 14 GHz bandwidth per lane [C] // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 2013, DOI: 10.1364/NFOEC.2013.PDP5C.10

[10] Wei J L, Ingham J D, Cheng Q X, et al. Experimental demonstration of optical data links using a hybrid CAP/QAM Modulation scheme [J]. Optics Letters, 2014, 39(6): 1402-1405

[11] Olmedo M I, Zuo T, Jensen J B, et al. Multiband carrierless amplitude phase modulation for high capacity optical data links [J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(4): 798-804

[12] Tanaka T, Nishihara M, Takahara T, et al. Experimental demonstration of 448 Gb/s + DMT transmission over 30 km SMF [C] // Optical Fiber Communication Conference, 2014, DOI: 10.1364/OFC.2014.M2I.5

[13] Kai Y, Nishihara M, Tanaka T, et al. Experimental comparison of pulse amplitude modulation (PAM) and discrete multi-tone (DMT) for short-reach 400 Gb/s data communication [C] // 39th European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2013, DOI: 10.1049/ep.2013.1523

[14] Wang Y G, Tao L, Huang X X, et al. 8 Gb/s RGBY LED-based WDM VLC system employing high-order CAP modulation and hybrid post equalizer [J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(6): 1-1

[15] 迟楠, 王一光, 王源泉. 可见光通信多维复用技术研究 [J]. 光学与光电技术, 2014, 12(4): 1-6

CHI Nan, WANG Yiguang, WANG Yuanquan. Research of multi-dimensional multiplexing schemes in visible light

- communication [J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2014, 12(4):1-6
- [16] Wang Y Q, Chi N, Li R L, et al. Theoretical and simulation analysis of a novel multiple-input multiple-output scheme over multimode fiber links with dual restricted launch techniques [J]. Optical Engineering, 2012, 51(6):065002
- [17] Zeng L B, O'Brien D C, Minh H L, et al. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white led lighting [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9):1654-1662
- [18] Jivkova S, Hristov B A, Kavehrad M. Power-efficient multi spot diffuse multiple-input-multiple-output approach to broad-band optical wireless communications [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004, 53(3):882-889
- [19] Azhar A H, Tran T, O'Brien D. A Gigabit/s indoor wireless transmission using MIMO-OFDM visible-light communications[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(2):171-174
- [20] Wang Y Q, Chi N. Indoor Gigabit 2×2 imaging multiple-input multiple-output visible light communication [J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(10):100603
- [21] Chi N, Shi J Y. Investigation on overlapping interference on VLC networks consisting of multiple LEDs [J]. ICT Express, 2015, 1(2):63-66
- [22] Shi J Y, Wang Y Q, Huang X X, et al. Enhanced performance employing STBC aided coding for LED based multiple input single output visible light communication network [J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2015, 57(12):2943-2946
- [23] Shi J Y, Huang X X, Wang Y G, et al. Improved performance of a high speed 2×2 MIMO VLC network Based on EGC-STBC [C] // European Conference on Optical Communication, 2015:1-3
- [24] 3GPP. 3GPP TR 36. 211-v14. 1. 0. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 14) [S]. Europe; 3rd Generation Partnership Project Technical Specification Group Radio Access Network, 2016

Research status of MIMO in visible light communication system

CHI Nan^{1,2} QIAO Liang^{1,2} ZHAO Jiaqi^{1,2} LU Xingyu^{1,2}

¹ Key Laboratory for Information Science of Electromagnetic Waves (MoE), Shanghai 200433

² Department of Communication Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433

Abstract Visible Light Communication (VLC) attracts more and more interest since the combination of optical wireless communication with LED. LED array also becomes much popular in order to improve indoor lighting, so the VLC-MIMO based on LED array has arisen. The baseband processing of the VLC system is introduced in this paper, followed by two VLC-MIMO systems and the research progresses of Space-Time Block Code in VLC-MIMO. The physical channel processing and multiple antenna technology in long term evolution are discussed, and the future development of VLC system is predicted.

Key words space-time block code (STBC); visible light communication (VLC); LED; multiple input multiple output (MIMO)