



专题：可见光通信

基于可见光的通信定位一体化技术研究

王玮, 王建萍, 冯莉芳, 金建力

(北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083)

摘要: 可见光无线技术通过可见光传递信息, 利用发光二极管(LED)光源在照明的同时实现通信和定位。可见光通信定位一体化(VLCP)技术是未来大规模物联网(IoT)应用的关键支撑技术之一。采用正交频分复用(OFDM)技术可将不同的频谱资源分别分配给可见光通信(VLC)和可见光定位(VLP)系统, 同时实现通信和定位功能。资源分配是提升VLCP系统效率、拓展VLCP系统适用范围的关键所在。提出了一种基于误差矢量幅度(EVM)的新型资源分配方法, 利用EVM分配VLCP系统中用于定位和通信的子载波, 依据信道参数动态调整通信与定位性能, 保证系统服务质量(QoS), 提升系统信道利用率。实验结果表明, 在 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的室内环境下, 提出的资源分配算法比固定资源分配算法至少可提高19.5%的信道利用率, 在与采用信噪比(SNR)进行资源分配的算法性能相当的前提下, 可大大节省系统资源, 易于实际应用。

关键词: 可见光通信定位; 子载波分配; 信道利用率; 误差矢量幅度

中图分类号: TN929.12

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023114

Research on integrated communication and positioning technology based on visible light

WANG Wei, WANG Jianping, FENG Lifang, JIN Jianli

School of Computer & Communication Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China

Abstract: Visible light wireless technology transmits information through visible light, utilizing light-emitting diode (LED) light sources to achieve communication and positioning while illuminating. Visible light communication positioning integration (VLCP) technology is one of the key supporting technologies for future large-scale Internet of things (IoT) applications. Orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) technology can be used to allocate different spectral resources to visible light communication (VLC) and visible light positioning (VLP) systems, while achieving communication and positioning functions. Resource allocation is the key to improving the efficiency of VLCP systems and expanding their applicability. A new resource allocation method based on error vector magnitude

收稿日期: 2023-04-17; 修回日期: 2023-05-13

通信作者: 冯莉芳, lffeng@ustb.edu.cn

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(No.2021B1515120086, No.2022A1515110770, No.2022A1515110154); 北京科技大学青年教师学科交叉研究项目(中央高校基本科研业务费专项资金)资助项目(No.FRF-IDRY-21-019)

Foundation Items: Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No.2021B1515120086, No.2022A1515110770, No.2022A1515110154); Interdisciplinary Research Project for Young Teachers of USTB (Fundamental Research Funds for the Central Universities) (No.FRF-IDRY-21-019)



(EVM) was proposed. EVM was utilized to allocate subcarriers for positioning and communication in VLCP systems, communication and positioning performance was dynamically adjusted based on channel parameters, system quality of service (QoS) was ensured, and system channel utilization was improved. The experimental results indicate that at 1.5 m×1.5 m×1.5 m indoor environment, the proposed resource allocation algorithm can improve channel utilization by at least 19.5% compared to fixed resource allocation algorithms. Under the premise of comparable performance to algorithms that use signal-to-noise ratio (SNR) for resource allocation, it greatly saves system resources and is easy to apply in practice.

Key words: visible light communication positioning, subcarrier allocation, channel utilization, error vector magnitude

0 引言

随着 5G 广泛部署和落地,无线通信网络演进的方向转至 6G。可见光无线技术通过可见光传递信息,利用发光二极管(LED)在照明的同时实现通信和定位,其由于低成本、低功耗、高抗干扰能力等优势成为无线通信研究的热点之一^[1-3]。可见光通信(VLC)系统和可见光定位(VLP)系统具有类似的物理层结构,将通信和定位功能相融合,构建在同一物理架构上,可有效降低系统布设成本^[4]。可见光通信定位一体化(VLCP)技术是未来大规模物联网(IoT)应用的关键支撑技术之一^[5-7]。正交频分复用(OFDM)技术可将频谱资源划分为若干片,将不同片的频谱资源分别分配给 VLC 和 VLP 系统,同时实现通信和定位功能。可见光 OFDM 通信方式包括直流偏置光正交频分复用(DCO-OFDM)和非对称剪切光正交频分复用(ACO-OFDM)技术,本文系统采用 DCO-OFDM 调制方式^[8-9]。

VLCP 系统通过对系统资源的合理分配实现通信性能和定位性能的优化。2017 年,Xu 等^[10]利用 OFDM 在同一频段实现了可见光通信和定位,使用数据序列的功率作为度量来估计传输距离,从而减小了定位误差。2019 年,Yang 等^[11]提出了一种低复杂度次优子载波方法,并利用序列二次规划(SQP)方法解决非线性功率分配问题,可以有效提高 VLCP 系统的速率和定位精度。之后,Yang 等^[12]又在 5G 网络中集成 VLC 和 VLP

技术,提出了一种多层网络架构,证明了可见光技术在物联网应用中具有较大的优势。同年,He 等^[13]提出了一种基于 VLC 技术的车辆定位方案,采用 CMOS 摄像头作为接收器,所提出的方案在倾斜角度为 9°和 15.5°时分别可以实现 0.128 m 和 0.13 m 的定位精度。2022 年,北京科技大学的 Chen 等^[14]提出了一种集成了 VLC 和 VLP 系统的码分多址(CDMA)系统,在 4 用户的实时 VLCP-CDMA 系统中可以达到 1.8×10^{-3} 的误码率和 1.50 cm 的定位精度。同年,Jin 等^[15]提出了一种新的基于自适应反馈阈值(AFT)的移动 VLCP 系统解调方法。结果表明,利用所提出的基于 AFT 的解调方法,可以实现移动集成甚低频通信系统的高可靠性通信和高精度定位。同年,Celik 等^[16]将 VLC 和 VLP 技术集成在一起,利用获得的定位数据提高通信链路的性能。经过评估获得了可观的信噪比(SNR)增益。这些工作的重点主要集中在优化 VLC 系统和 VLP 系统的资源分配上,没有关注信道估计的合理性,从而导致提升效果有限。洪文昕等^[17]提出针对可见光 OFDM 通信系统的资源分配算法主要对信道利用率进行优化。

本文提出一种基于误差矢量幅度(EVM)的子载波分配方法,根据接收符号的 EVM 对信道进行估计,把信道状态作为一个影响因素加入资源分配的优化目标问题中,可得到更合理的分配结果。与直接采用 SNR 作为影响因素相比,所提出的算法可以在保证系统性能不受较大影响的情况下大幅降低系统资源占用率,易于硬件实现。在定位方面,采用

根据新型分配算法得出的最优子载波传输定位信息,采用多光源定位算法^[18]进行位置信息的计算。

1 可见光通信一体化系统模型

1.1 VLCP 系统结构

可见光通信定位一体化系统考虑多光源单光电二极管(PD)通信定位场景,可见光通信定位一体化系统结构如图1所示。天花板上均匀分布4个大功率LED作为发射光源,在接收端采用PD作为接收装置。

在发送端,首先采用固定的调制方案进行分配,经过一个分配周期的数据采集并计算得出下一分配周期的调制方案。根据资源分配算法得到的分配方案,通信信息和定位信息分别调制到相应的子载波上,然后经过厄米特对称^[19]、逆傅里叶变换(IFFT)、数模转换、直流偏置等过程,最后驱动LED发送可见光信号。在接收端,经过光电转换、同步及均衡、傅里叶变换(FFT)等操作后^[20],将数据进行EVM计算,得到下一周期的定位子载波和通信子载波的资源分配方案并反馈给发送端。同时,提取出通信信息和定位信息,

分别发送到解码逆映射模块和定位算法模块,实现可见光通信和可见光定位。

1.2 EVM 定义

EVM 定义为信号星座图上测量信号与理想信号之间的误差,是数字通信中最常用来表征调制质量的量度。它表示一个星座点距离其理论位置的偏差,通常用百分比或者 dB 表示^[21]。EVM 通常是测量符号和理想符号集合之间差的均方根值,用 EVM_{RMS} 表示,在大量的接收数据上进行平均,从而更直观、准确地表征信号的接收情况。由文献[21]得出:

$$EVM_{RMS} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |S_n - S_{0,n}|^2}{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |S_{0,n}|^2} \quad (1)$$

其中, S_n 是测量符号中归一化后第 n 个符号, $S_{0,n}$ 是第 n 个符号的理想标准化星座点, N 是星座图中唯一符号的数量。

2 基于 EVM 的 VLCP 系统资源分配算法设计

本文提出的算法目标是在满足服务质量要求

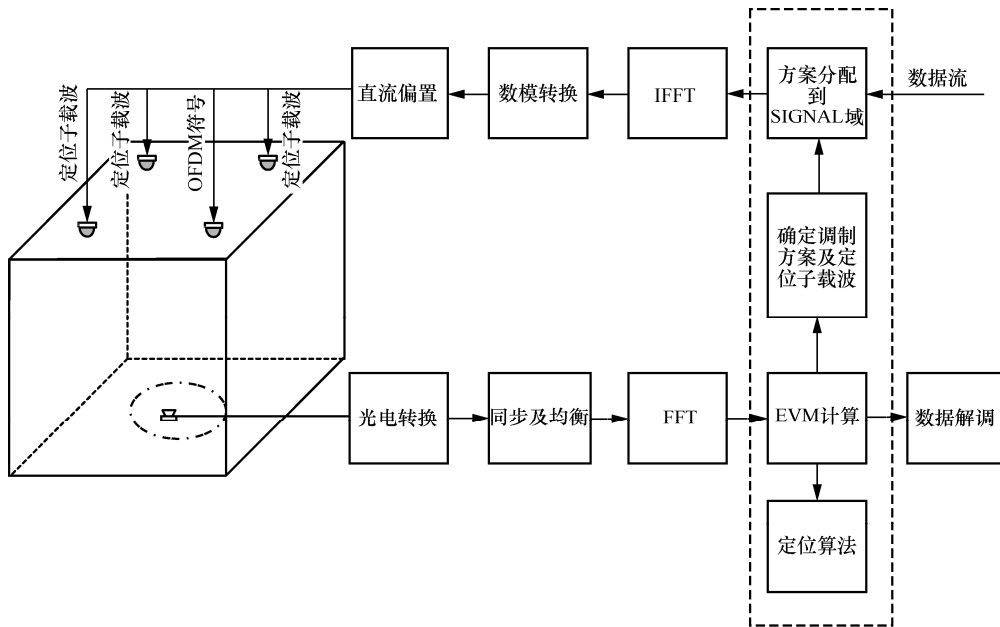


图1 可见光通信定位一体化系统结构



的前提下,最大限度地提升系统信道利用率和定位精度。为了满足系统的服务质量,根据 EVM 和误码率 (BER) 之间的转换关系,在满足系统 BER 的情况下,根据不同的调制方式确定 EVM 的门限值 (用百分比表示), 得出分配表格。

误码率 BER 与 EVM 之间的转换关系由文献[21]已知:

$$P_b \approx \frac{2\left(1 - \frac{1}{L}\right)}{\ln L} Q\left[\sqrt{\frac{3\ln L}{L^2 - 1}} \frac{2}{\text{EVM}_{\text{RMS}}^2 \ln M_{\text{EVM}}}\right] \quad (2)$$

其中, L 为 M_{EVM} 进制调制方式中每个维度的电平数。 $Q[\cdot]$ 为高斯共误差函数, 被表示为:

$$Q(x) = \int_x^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy \quad (3)$$

取 $\text{BER}=3.8 \times 10^{-3}$, 计算出不同 M_{EVM} 阶调制下的 EVM 门限值 EVM_{th} , QAM 分配见表 1。

表 1 QAM 分配

M	EVM_{th}
不调制	$\text{EVM}_{\text{th}} > 35.51\%$
4	$20.52\% < \text{EVM}_{\text{th}} \leq 35.51\%$
8	$15.89\% < \text{EVM}_{\text{th}} \leq 20.52\%$
16	$9.86\% < \text{EVM}_{\text{th}} \leq 15.89\%$
32	$7.75\% < \text{EVM}_{\text{th}} \leq 9.86\%$
64	$4.88\% < \text{EVM}_{\text{th}} \leq 7.75\%$
128	$\text{EVM}_{\text{th}} \leq 4.88\%$

EVM 是接收符号和理想符号集合之间差的均方根值, 为了使得到的 EVM 值能够准确反映信道情况, 必须保证计算 EVM 的数据集合足够大。针对此问题, 本文采用了分块子载波和跨周期判

决思想: 按照子载波顺序对子载波进行分块处理, 对同一块内的符号采用相同的调制方式并计算 EVM 值, 同时每隔多个接收周期进行分配方案的更新。由于 OFDM 中相邻子载波具有相似的信道特性^[22], 分块方法可以保证分配算法的有效性, 并大大降低计算量。对于 VLC 和 VLP 系统之间的资源分配, 为了尽可能提高系统的定位精度, 根据每组的 EVM 计算情况, 选取 EVM 情况最优的子载波块进行定位子载波分配, 由于可见光信道的低通特性, 频率较高的子载波衰减快, 选取相应子载波块的最低频率子载波进行定位算法的计算。算法步骤如下。

步骤 1 子载波数和分块参数确定, 首先确定 DCO-OFDM 系统中可用子载波总数 K , 每个块子载波数 b , 可以得出每个 OFDM 符号的总块数 $N_b = K/b$ (若不为整数, 则向上取整), 按照频率从低到高的顺序对子载波进行分块, 子载波参数如图 2 所示。

步骤 2 确定 EVM-QAM 分配表格, 根据目标 BER, 以式 (2) 为依据, 确定 EVM 网格表作为 QAM 分配的标准, 见表 1。所有子载波采用 4QAM 方式。

步骤 3 计算 EVM 值, 为了扩大计算 EVM 的符号集合, 在接收端每接收 Num 个 OFDM 符号进行 EVM 计算, 计算得到每组的 EVM 情况。(Num 大于 1 000, 可以视情况扩大。) 此时每个块内计算 EVM 的符号集合数为:

$$\text{EVM}_{\text{num}} = b \times \text{Num} \quad (4)$$

步骤 4 调制方案及分配方案确定, 根据每个子载波块的 EVM 情况和已确定的 QAM 表格进行

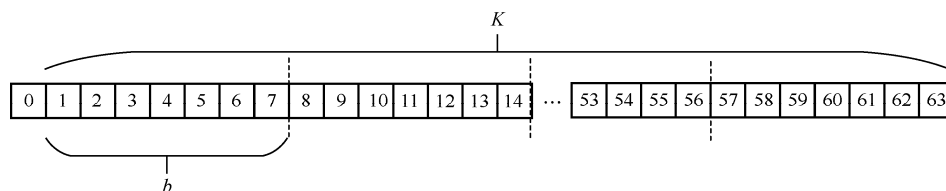


图 2 子载波参数

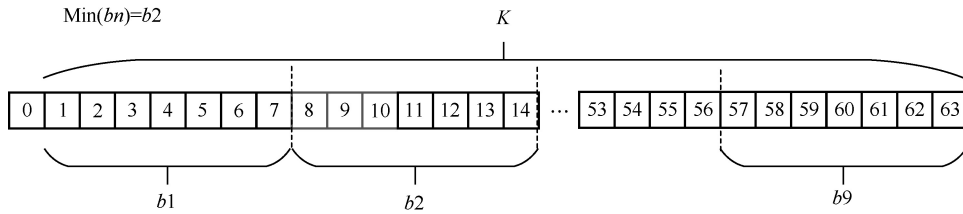


图3 定位子载波确定

QAM 分配,同时取 EVM 情况最优子载波块内的最低频率子载波分配给定位算法进行计算。定位子载波确定如图 3 所示,若子载波块 b_2 的值最小,则选择第 8、9、10 个子载波作为定位子载波。

步骤 5 将选取的定位子载波和确定的 QAM 情况反馈给发送端作为下一周期分配的参考。之后重复步骤 3。

3 通定一体化系统实现及性能分析

3.1 系统实现

VLCP 系统硬件框架如图 4 所示,包括 4 个光源和 1 个接收端。在发送端,通过 FPGA 产生用于驱动 LED 的定位信号和通信信号。3 个用于定位的 LED 分别用不同频率的方波驱动,用于通信的 LED 发送经过设计的 OFDM 符号。VLCP 系统场景为 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$,LED 发射光功率为 10 W,接收端采用多 PD 结构。VLCP 系统场景如图 5 所示。

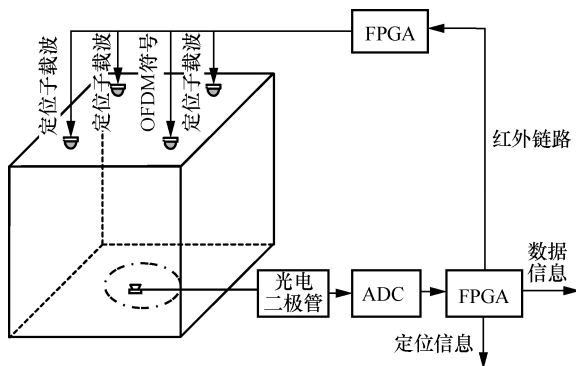


图4 VLCP 系统硬件框架

在本系统中,采用 3 个灯发送定位信号,1 个灯发送通信信息。为了在接收时进行 EVM 的计算并提高 EVM 质量,需在 DCO-OFDM 系统中进行符号同步及信道均衡等操作,为此设计了特殊的前导结构。DCO-OFDM 符号的帧结构如图 6 所示。



图5 VLCP 系统场景

前导结构由 8 个重复的短训练序列和 2 个重复的长训练序列组成。短训练序列用于在接收端进行帧检测及符号同步。长训练序列主要用于在 EVM 计算之前进行信道补偿,纠正可见光链路传输过程中的相位和幅度偏差,从而使得信道的通信性能更加优异。训练序列后紧跟一个 OFDM 符号长度的 SIGNAL 域,里面包含着当前周期的 QAM 方式和定位子载波的选取方案。SIGNAL 后为传输的数据信息。

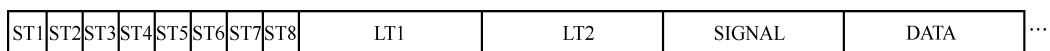


图6 DCO-OFDM 符号的帧结构



在接收端,通过 PD 采集空间中的可见光信息,经过 A/D 转换输入 FPGA 芯片进行信号处理。位置信息的解调无须同步,将信息直接输入 FFT 核进行变换,提取定位信号强度,输入定位算法模块进行位置信息的计算。通信信息需要经过帧检测、符号同步等过程找到通信数据起始点,提取相应子载波的数据进行信道均衡和解调。经过同步和解调后的信号进行 EVM 计算,根据 EVM 结果确定下一周期调制方案及定位子载波选取方案,反馈信息可以通过红外通信方式发送到接收端,接收端据此确定定位子载波频率及数据信息的调制方式。并在发送端调制到 SIGNAL 域作为下一周期的调制方案发送,指示接收端正确解调及计算位置信息。

实验系统参数见表 2。

表 2 实验系统参数

参数	参数值
通道数	128
BER	3.8×10^{-3}
空间长度/m	1.5
空间宽度/m	1.5
空间高度/m	1.5
光滤波器增益	1
聚光器增益	1
视场角	80°
绝对温度/K	295
探测器响应/(A·W ⁻¹)	0.53
暗电流/mA	0.62
LED 噪声带宽因子	0.562
探测器噪声带宽因子	0.868
探测器面积/cm ²	1.5
开环电压增益	10
跨导/(m·s ⁻¹)	30
LED 功率/W	10
探测器单位面积固定电容/(pF·cm ⁻²)	112

3.2 通信性能分析

本文采用的 DCO-OFDM 系统子载波数 K 设为 128,由于第一个子载波为直流信号,不携带信息,且前一半子载波与后一半子载波为共轭对称

关系,有效携带信息的子载波个数为 63 个。将 63 个子载波分成 9 个子块,每个块内包括 7 个子载波,由分配算法得出的收发端不同距离下每个块内的 EVM 值和 QAM 情况如图 7 所示。

由图 7 可知,随着接收端和发送端距离的增大,相同信道的 EVM 值逐渐增大,子载波块采用的 QAM 阶数不断降低,表明信道的情况不断恶化。横向来看,由于可见光信道特性的影响,随着频率的提升 EVM 呈增大趋势,低频子载波相较于高频子载波总能采用较高阶数的调制方式,这表明分配算法可以有效适应信道环境的变化,根据信道情况的变化实时改变信道的调制方式。

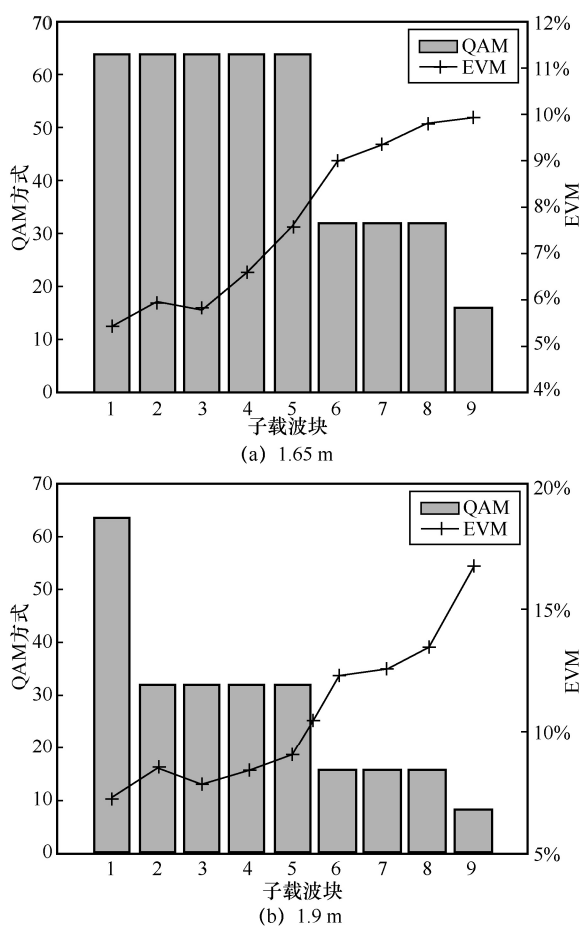
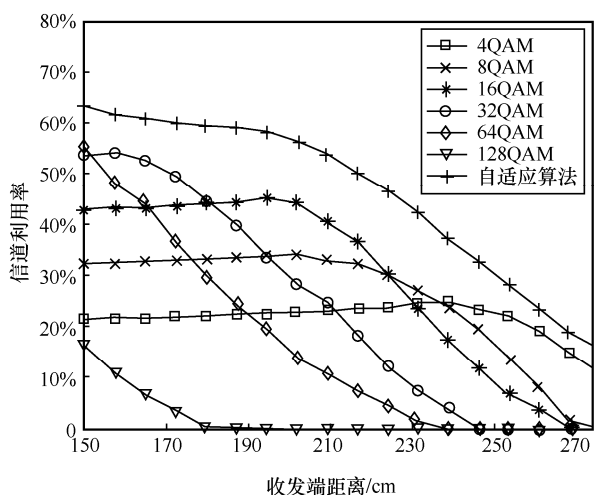


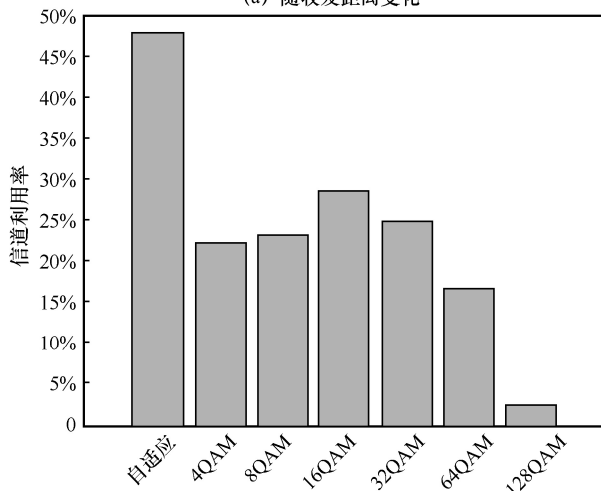
图 7 收发端不同距离下每个块内的 EVM 值和 QAM 情况

信道利用率比较如图 8 所示。图 8 (a) 为在收发距离不同的情况下自适应算法与采用固

定调制方式时系统信道利用率的对比。为了保证系统的误码率在给定值以下,若信道的 EVM 值超过了表格所确定的最小调制方式的门限值,则不进行数据分配。从图 8(a) 可以看出,随着收发端距离的增大,采用固定调制方式算法的信道利用率不断降低,并逐渐趋近于 0,表明此时的信道状况已经非常糟糕,不能保证给定服务质量下的数据传输。



(a) 随收发距离变化



(b) 平均信道利用率

图 8 信道利用率比较

相比于固定调制方式,自适应子载波分配算法由于可以根据信道情况调整相应的 QAM 方式,一直保持较高的信道利用率。如图 8(a) 所示,在 $BER=3.8 \times 10^{-3}$ 时,自适应算法的信道利用率呈

现缓慢下降,并没有出现像固定调制算法那样急剧下降的情况。并且在任何情况下都优于固定调制方式。

图 8(b) 对自适应算法与固定调制算法在所有收发端距离的信道利用率的期望值进行了分析。从图 8(b) 可以看出,自适应算法的平均信道利用率达到了 48%,而固定调制算法中性能最好的 16QAM 方式的平均利用率仅为 28.5%,采用 128QAM 方式下的平均信道利用率仅为 2.2%。自适应算法与两者相比分别提高了 19.5% 和 45.8%。由此可见,自适应算法可以有效提升室内可见光 DCO-OFDM 系统的信道利用率,验证了该算法的有效性。

同时,笔者对经典的采用 SNR 方式进行资源分配的算法进行了仿真比较,自适应算法与 SNR 算法信道利用率对比如图 9 所示。

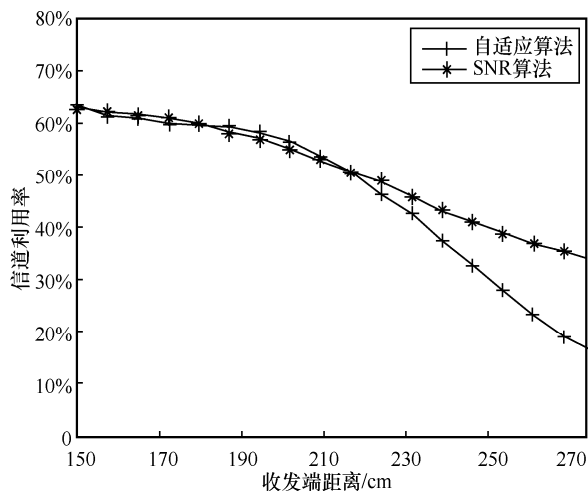


图 9 自适应算法与 SNR 算法信道利用率对比

基于 SNR 的资源分配算法针对每个子载波进行 SNR 计算,根据计算结果确定每个子载波的调制方式。从图 9 可以看出,在通信距离较近,即信道质量更好时,经典算法与本文所提算法的信道利用率不相上下;在通信距离较远,即信道质量较差时,经典算法的信道利用率比本文所提算法稍高。这是因为本文所提算法考虑了实际的情况,其一,本文所提算法采用了分块子载波的思



想,在进行 EVM 和 SNR 计算的数据集大小相同的情况下,新型算法可以节约 6/7 的存储空间。这大大降低了对接收端的性能要求并且也有益于系统的小型化及集成。其二,虽然在 OFDM 系统中计算 EVM 需要进行同步和均衡等操作,但这也是 OFDM 解调的必备步骤,只需在均衡后的模块中加入 EVM 计算即可。而 SNR 计算则需要复杂的外围电路进行辅助,实现较为复杂。综上所述,在实际应用中,本文所提新型分配算法具有较大的优势。

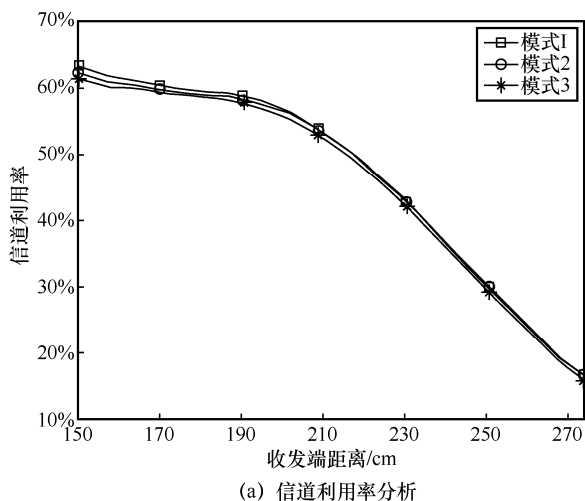
3.3 定位性能分析

本文采用多光源单 PD 的定位方法。相关定位算法已经比较成熟,因此不赘述。为了更合理地平衡通信和定位之间的资源分配,本文对比了定位子载波 3 种不同选取方式下通信系统利用率和定位误差情况。模式 1 为选取 EVM 值最小子载波块中最低频率子载波作为定位子载波,即本文选定的方式;模式 2 为选取 EVM 值处于中间位置子载波块中的中间子载波;模式 3 为选取 EVM 值最大子载波块中最高频率子载波。采用 3 种模式的系统信道利用率和平均定位误差性能分析如图 10 所示。

由图 10 可以看出,定位子载波对于系统整体的通信性能影响有限,3 种不同定位子载波选取方式下的信道利用率差别很小,几乎可以忽略不计。而对于定位性能而言,定位子载波的选取对其有非常大的影响。可见光低通信道的影响,导致频率较高的子载波相比较低频率子载波 EVM 值下降很大,使得定位误差大幅增加。由此得出,为了保证系统的整体性能,模式 1 是合适的分配方案。

根据分配算法确定定位子载波的选取,提取相应子载波的信号强度输入定位算法进行接收端位置信息的确定。实验结果表明,在实验场景中选取性能优异的光源器件,在驱动端适当加大功率,可提高定位性能,定位误差分布如图 11 所示。该

系统的最大误差为 4.72 cm,最小误差为 1.02 cm,平均定位误差 3.35 cm,表明了新型资源分配算法定位子载波选取更合理。



(a) 信道利用率分析

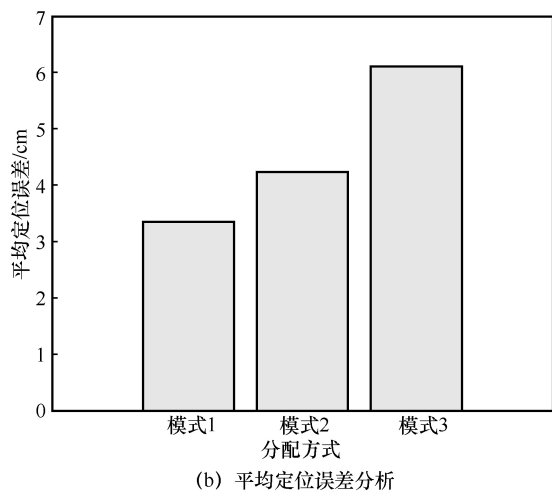


图 10 采用 3 种模式的系统信道利用率和平均定位误差性能分析

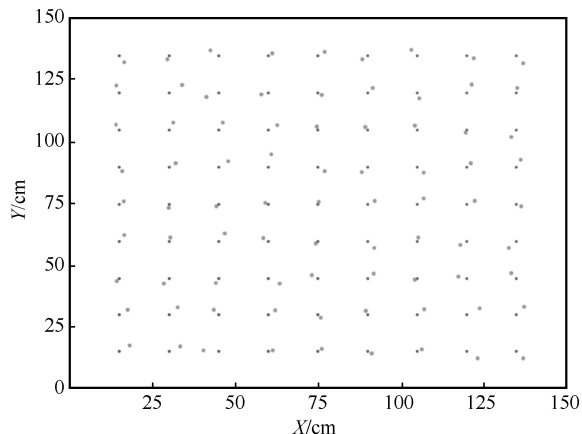


图 11 定位误差分布

4 结束语

本文针对 VLCP 系统中资源分配问题进行研究,提出了基于 EVM 的资源分配方法,采用对子载波分块的方法进一步提升 EVM 准确度并减少计算复杂度。与固定调制算法相比,该算法可以大幅提高 DCO-OFDM 系统信道利用率。与目前使用 SNR 进行资源分配的算法相比,该算法可以在性能相当的情况下大幅降低硬件系统的资源占用,实现复杂度及难度小,具有较大的优势。本文搭建了 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的实验环境,对通信定位一体化系统进行验证。实验结果表明,与固定调制算法相比,本文算法可以随信道环境变化及时调整通信和定位分配方案,至少可以提高 19.5% 的信道利用率,在 $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 的室内环境中有效区域的平均定位误差保持在 3 cm 左右。本文算法为 VLCP 系统中资源分配问题提供了一个新的解决思路。

参考文献:

- [1] NAKAGAWA M. Visible light communication[J]. International Journal of Computer Trends & Technology, 2013, 4(3): 1337-1338.
- [2] DAWOOD M A, SALEH S S, EL-BADAWY E S A, et al. A comparative analysis of localization algorithms for visible light communication[J]. Optical and Quantum Electronics, 2021, 53(2): 108.
- [3] AFZALAN M, JAZIZADEH F. Indoor positioning based on visible light communication: a performance-based survey of real-world prototypes[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2019, 52(2): 1-36.
- [4] 赵大明, 王欣. 基于 VLC 的室内定位技术研究[J]. 电信科学, 2019, 35(3): 122-6.
ZHAO D M, WANG X. Research on indoor positioning algorithm based on visible light communication[J]. Telecommunication Science, 2019, 35(3): 122-6.
- [5] LIN B, XUAN T, GHASSEMLOOY Z, et al. Experimental demonstration of an indoor VLC positioning system based on OFDMA[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1-9.
- [6] MAHEEPALA M, KOUZANI A Z, JOORDENS M A. Light-based indoor positioning systems: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(8): 3971-3995.
- [7] 吴兴邦, 文尚胜, 华琨. 基于蚁群算法的室内可见光高精度三维定位系统[J]. 光子学报, 2017, 46(12): 1206004.
WU X B, WEN S S, HUA J. High precision 3D positioning system design using visible light communication based on ant colony algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(12): 1206004.
- [8] CARRUTHERS J B, KAHN J M. Multiple-subcarrier modulation for nondirected wireless infrared communication[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(3): 538-546.
- [9] GONZALEZ O, PEREZ-JIMENEZ R, RODRIGUEZ S, et al. OFDM over indoor wireless optical channel[J]. IEE Proceedings - Optoelectronics, 2005, 152(4): 199-204.
- [10] XU Y, WANG Z, LIU P, et al. Accuracy analysis and improvement of visible light positioning based on VLC system using orthogonal frequency division multiple access[J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32618-32630.
- [11] YANG H L, CHEN C, ZHONG W D, et al. Resource allocation for multi-user integrated visible light communication and positioning systems[C]//Proceedings of ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-6.
- [12] YANG H L, ZHONG W D, CHEN C, et al. Integration of visible light communication and positioning within 5G networks for Internet of things[J]. IEEE Network, 2020, 34(5): 134-140.
- [13] HE J, ZHOU B. Vehicle positioning scheme based on visible light communication using a CMOS camera[J]. Optics Express, 2021, 29(17): 27278-27290.
- [14] CHEN D Y, FAN K, WANG J P, et al. Integrated visible light communication and positioning CDMA system employing modified ZCZ and Walsh code[J]. Optics Express, 2022, 30(22): 40455-40469.
- [15] JIN J L, LU H M, WANG J P, et al. Adaptive feedback threshold based demodulation for mobile visible light communication and positioning integrated system[J]. Optics Express, 2022, 30(8): 13331-13344.
- [16] CELIK Y. Indoor visible light communication and positioning with pan-tilt receiver[C]//Proceedings of 2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-5.
- [17] 洪文昕, 李天屿, 陈建飞. 可见光通信 DCO-OFDM 系统资源分配算法研究[J]. 光通信研究, 2021(6): 19-22, 44.
HONG W X, LI T Y, CHEN J F. Research on resource allocation algorithm of visible light communication DCO-OFDM system[J]. Study on Optical Communications, 2021(6): 19-22, 44.
- [18] MOUSA F I K, ALMAADEED N, BUSAWON K, et al. Indoor visible light communication localization system utilizing received signal strength indication technique and trilateration method[J]. Optical Engineering, 2018, 57(1): 016107.
- [19] YE J, YAN L S, PAN W, et al. A Hermitian symmetry based OFDM signal transmitter for digitized radio-over-fiber transmission[C]//Proceedings of 9th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies:



Subdiffraction-limited Plasmonic Lithography and Innovative Manufacturing Technology. SPIE, 2019.

- [20] MARDANIKORANI S, DENG X, LINNARTZ J P M. Sub-carrier loading strategies for DCO-OFDM LED communication[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 68(2): 1101-1117.
- [21] SHAFIK R A, RAHMAN M S, ISLAM A R. On the extended relationships among EVM, BER and SNR as performance metrics[C]//Proceedings of 2006 International Conference on Electrical and Computer Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2007: 408-411.
- [22] CARRUTHERS J B, KAHN J M. Modeling of nondirected wireless infrared channels[C]//Proceedings of ICC/ SUPER-COMM'96 - International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2002: 1227-1231.

[作者简介]



王玮（1996-），男，北京科技大学硕士生，主要研究方向为可见光通信和定位关键技术。



王建萍（1974-），女，北京科技大学教授、博士生导师，主要研究方向为可见光通信和定位理论及关键技术。



冯莉芳（1980-），女，北京科技大学副教授、硕士生导师，主要研究方向为可见光通信和定位理论及关键技术。



金建立（1992-），男，北京科技大学在站博士后，主要研究方向为可见光通信和定位理论及关键技术。