

## 基于新型开关控编码脉冲对的异步可见光定位方法

王正海 许梦真 梅佳能 雷 恺 余礼苏\* 王玉峰  
(南昌大学信息工程学院 南昌 330031)

**摘要:** 发光二极管(LED)照明的普及为高精度室内定位提供了一种绿色低碳成本的解决方案, 作为最经济的LED调制方式, 开关控(OOK)由于开关速度、响应时间和节点间同步等的限制, 存在定位精度差等问题。该文提出一种基于新型开关控编码脉冲对的室内信标构造方法及其对应的异步可见光定位模型, 各LED仅需按所提规则进行开关控, 光电探测器(PD)端可以获得最大后验概率准则下的最优位置估计。经验证, 当信道(含LED和接收机)具有理想带宽、200 MHz和100 MHz带宽时, 在30 dB的信噪比(SNR)条件下, 终端以90%的概率使得定位精度分别可以达到6 mm, 7 mm和1 cm。在相同条件下, 与异步码分多址(CDMA)进行定位、传统OOK基于指纹进行定位以及传统OOK基于接收信号强度进行定位这3种方法相比, 该文提出的方法可以获得明显较好的定位效果。另外, 当带内信噪比从30 dB恶化至15 dB时, 终端的定位精度还能稳健地保持在厘米量级。

**关键词:** 室内定位; 异步可见光; 开关控; 编码脉冲对; 高精度

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)08-2677-09

DOI: 10.11999/JEIT211568

## An Asynchronous Visible Light Positioning Method Based on New On-Off Keying Coded Pulse-pair

WANG Zhenghai XU Mengzhen MEI Jianeng LEI Kai  
YU Lisu WANG Yuhao

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** The popularity of Light-Emitting Diode (LED) lighting provides a green and low-cost solution for high-accuracy indoor positioning. As the most economical LED modulation method, On-Off Keying (OOK) has poor positioning accuracy due to the defects of switching speed, response time, and synchronization between nodes. In this paper, an indoor positioning beacon based on the new OOK coded pulse-pair and its corresponding asynchronous visible light positioning model is proposed. Herein, each LED only needs to perform OOK according to the proposed rules, and the optimal position of the PhotoDetector (PD) terminal under the maximum posterior probability criterion can be estimated. It is verified that when the channel (including LED and receiver) has ideal bandwidth, 200 MHz, and 100 MHz bandwidth, the terminal can achieve a positioning accuracy of 6 mm, 7 mm, and 1 cm with a 90% probability under the condition of 30 dB Signal-to-Noise Ratio (SNR). Under the same conditions, compared with asynchronous Code Division Multiple Access (CDMA) positioning, traditional OOK positioning based on fingerprint and traditional OOK positioning based on received signal strength, the proposed method in this paper can get a significantly better positioning effect. In addition, when the SNR deteriorates from 30 dB to 15 dB, the positioning accuracy of the terminal can also be robustly maintained in the order of centimeters.

**Key words:** Indoor positioning; Asynchronous visible light; On-Off Keying (OOK); Coded pulse-pair; High accuracy

收稿日期: 2021-12-27; 改回日期: 2022-03-31; 网络出版: 2022-04-19

\*通信作者: 余礼苏 lisuyu@ncu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(62161023, 62061030, 62161024), 中国博士后科学基金(2021TQ0136), 计算机体系结构国家重点实验室开放课题(CARCHB202019)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (62161023, 62061030, 62161024), China Postdoctoral Science Foundation (2021TQ0136), The State Key Laboratory of Computer Architecture Project (CARCHB202019)

## 1 引言

以第5代(Fifth Generation, 5G)移动通信网络为代表的广域无线通信和各类物联网系统的商用,产生了海量的连接和信息流。其中,室内场景的流量占比高达80%,这是因为经济活动的核心参与者,比如:人、机器、装备、生产工艺线等大多在室内环境中<sup>[1,2]</sup>。位置是电子信息系统产生服务效能和经济价值的核心信息之一,当前,全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)是最主流的广域无线定位和导航系统。在室外开阔空间,常见民用多模GNSS接收机的定位精度可以达到米级的圆误差概率,采用专用的高精度定位性能增强设施,可以将定位精度提高到厘米量级或更优<sup>[3]</sup>。但是,由于传播环境复杂、GNSS信号被遮挡等原因,GNSS在室内的定位精度比较不理想。当前,普遍采用网络增强卫星定位系统(Assisting-GNSS, A-GNSS),可以在受到一定遮挡或者半开阔区域等复杂条件下,实现卫星导航定位<sup>[4]</sup>。为满足电子信息行业对定位的需求,在5G最新的第17个演进版本中,要求实现高精度的室内和室外定位,并保证室内室外全场景定位业务的可用性和及时性。该版本的5G演进标准推荐融合5G, GNSS、地面信标系统(Terrestrial Beacon Systems, TBS)、传感器(比如:气压、惯导)、无线局域网/蓝牙(WLAN/Bluetooth)等,实现室内0.2~10 m的定位精度<sup>[1]</sup>。

发光二极管(Light Emitting Diode, LED)因具备极高的发光效率,从20世纪90年代中叶开始至今,已绝对主导了室内照明系统。同时,由于LED具备的绿色、超高带宽等优势,在室内等场景中,发展基于LED的可见光通信(Visible Light Communication, VLC)系统,可以成为5G/6G的重要补充,并融合到5G/6G的网络架构<sup>[2]</sup>。另外,以LED为载体,发展室内定位系统和技术,在照明的过程中,解决前述无线定位系统在室内传播质量差、定位精度欠缺等问题,非常适合增强5G的室内定位性能,符合碳中和的迫切发展需求,也可以避免发展专用室内定位系统在安装和成本等方面的问题<sup>[2,5,6]</sup>。

基于LED的可见光定位是一个非常热门的研究主题,在基于光电二极管(Photo Diode, PD)的定位系统中,定位系统的架构分为终端侧定位和网络侧定位,定位算法主要是定位端通过测量各可见光信标的强度、时间和方向3个维度独立及联合的信息,再利用几何定位、网格剖分、深度学习等,并进一步结合线性最小二乘、非线性最小二乘、线性

回归、聚类等优化算法,实现室内可见光定位。依据场景、假设条件等的不同,据公开报道,可以获得的定位精度在0.005~2 m,明显优于5G对室内定位性能的要求<sup>[1,2,5,6]</sup>。比如:文献<sup>[7]</sup>在安装了25个LED的室内,假设在理想同步的条件下,以开关键控(On-Off Keying, OOK)调制的形式,各LED辐射长度为200或100的LED专用随机序列,配置了PD的终端接收25组随机OOK调制合成的随机序列,构建基于几何拓扑(含地面网格、覆盖区域、网格的稀疏度等)的稀疏矩阵,通过正交匹配追踪(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)算法求解信道增益,并进一步获得终端的位置估计。在35 dB的信噪比下,定位精度达到27 cm。在6个LED照亮的室内房间,6个LED通过频分复用实现定位信标正交,终端通过选择其中3个最高强度的LED可见光信号,在5 m × 5 m × 3 m室内区域,文献<sup>[8]</sup>实现了高精度的室内定位,精度达到2.3 cm。据调研,这是基于可见光信号强度的最优定位精度。在3个LED照亮的室内房间,3个LED通过频分复用实现定位信标正交,终端通过求解不同频率可见光信号的到达时间,在5 m × 5 m × 3 m室内区域,文献<sup>[9]</sup>实现了高精度的室内定位,误差达到毫米量级。据调研,这是基于可见光信号到达时间的最优定位精度。

在上述文献中,定位网络通过频分复用的组网方式,使得定位信标的发射端和接收端之间不需要保持同步关系,但是在定位系统的网络侧或终端侧,其内部的节点间仍然需要保持同步关系,以克服节点的晶振频标等的时变误差导致信标信号的时间频率误差。在定位系统的网络侧和终端侧内部同步、两侧同步或异步的条件下,在时分或频分复用的窄带系统中,文献<sup>[10,11]</sup>从理论上对比分析了基于可见光信号到达时间、强度以及二者联合的定位误差的理论限制。理论上,在1 W的LED可见光照射功率和相距5 m的条件下,基于强度的定位误差可以达到1 mm;基于时间的定位误差可以达到0.3 mm;联合时间及强度与单独基于时间的定位误差的理论界基本一致。

上述用于定位的可见光信标信号需要设计专用的信标协议,以建立信标、强度/频率/相位/时间参数与网络侧节点之间的映射关系,这通常需要LED端采用专用器件或可编程逻辑器件来实现。OOK因其通过阻容及放大器等少量的器件即可实现,是成本最低的常用LED驱动调制方式<sup>[12-14]</sup>。然而,因开关速率和响应时间的限制致使OOK调制脉冲的上升速度较慢,且在对定位系统网络侧和终端侧的

内部节点不作同步要求时，以OOK信号作为定位信标终端通常只能基于强度来完成定位，这限制了基于OOK信号的定位性能<sup>[12-14]</sup>。基于OOK调制，在不对定位系统作同步要求的条件下，本文提出一种基于新型OOK编码脉冲对的高精度可见光定位方法，该方法仅需定位系统网络侧所含的多个LED按照所提规则生成开关脉冲对，调制LED的偏置电流，定位系统的终端通过识别开关编码脉冲对，提取独立脉冲的信息，即可实现最大后验概率意义上的最优定位，该定位方法对定位系统网络侧、终端侧、以及二者内部节点间的时间偏差敏感。经验证，在5 m × 5 m × 3 m的室内，所提定位模型以90%的概率可以达到6 mm的定位精度。

## 2 系统模型

### 2.1 定位模型

如图1所示，不失一般性，考虑安装4个LED灯进行室内照明和定位的场景。在常见的室内照明环境中，4个LED由统一电网供电并控制开关。为便于安装和降低成本，本文所述照明和定位一体化系统仅在各LED的偏置电流控制端加装一个定时器（比如以555定时器为核心的电路），对LED的驱动电流进行OOK调制。除了统一的供电走线外，4个LED间无其他连接关系，定时器间不具备同步能力。本定位模型仅对各LED的偏置电流按照设计规则进行OOK调制，形成开关键控编码脉冲对形式的可见光照明信号。地面终端观测此可见光信号，作为定位信标。在定位端，该定位信标是4个LED的发射脉冲对经信道传输后的组合，该合成脉冲对的组合形式与终端的位置及4个LED的脉冲对的发射时间一一对应。基于最大后验概率检测器，本模型估计终端位置 $s$ 的最优位置估计 $\hat{s}_{\text{MAP}}$ 为

$$\begin{aligned} \hat{s}_{\text{MAP}} &= \arg \max_s p(s|\mathbf{y}) = \arg \max_s p(s|\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \mathbf{y}_3, \mathbf{y}_4) \\ &= \arg \max_s \prod_{i=1}^4 p(s|\mathbf{y}_i) \\ &= \arg \max_s \prod_{i=1}^4 \left[ \int_{\Phi_i} \frac{p(\mathbf{y}_i|\phi_i) p(\phi_i, s)}{p(\mathbf{y}_i)} d\phi_i \right] \quad (1) \end{aligned}$$

其中， $i$ 表示LED的编号， $i = 1, 2, 3, 4$ ； $\Phi_i$ 表示第 $i$ 个LED的可能发射时间集合， $\phi_i$ 表示第 $i$ 个LED的发射时间， $\phi_i \in \Phi_i$ ； $\mathbf{y}$ 表示4个LED的发射脉冲对经信道传输后的组合脉冲对； $\mathbf{y}_i$ 表示第 $i$ 个LED发射的可见光脉冲到达终端探测器接收口面上的脉冲对。

由于时间误差和终端位置分布是相互独立且服从均匀分布的随机变量，因此

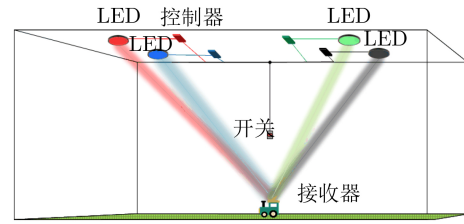


图1 定位模型布局图

$$p(\phi_i, s) = p(\phi_i)p(s) = \frac{1}{|\Phi_i|} \times \frac{1}{|S|} \quad (2)$$

其中， $|\Phi_i|$ 和 $|S|$ 分别表示时间取值集合和终端位置取值集合的势。

值得指出的是，在时域，式(1)所述定位模型主要包含3类时间误差：(1)从电源接通到电流到达各个LED的时间不一致的误差；(2)各个LED所含器件响应的误差；(3)终端估计到的脉冲到达时间存在误差。对于已经安装完成的室内照明和定位一体化系统，误差(1)是由开关到各个LED的电缆线长度差异导致的，使得控制器产生开关编码脉冲对的时间存在差异，但在4个LED间该差异是一个固定值；误差(2)是由元器件的工艺公差及材料缺陷等导致的，使得从开关编码脉冲驱动LED到LED发光的时间存在差异，同样在4个LED间该差异是一个非常小的固定值；误差(3)是由噪声引起的随机误差。前两个误差决定各个LED的发射时间集合中心值之间的偏移。第3个误差决定终端确定的各个LED发射时间集合的势，也就是时间误差的发散程度。由于来自各个LED的脉冲对在同一个终端中经受的噪声相同，在本论文模型中可以合理假设终端预估的4个LED的发射时间集合 $|\Phi_i|$ 的势相同。因此，4个LED分别利用式(2)得到的取值均相同。

将式(2)代入式(1)，式(1)可进一步简化为

$$\hat{s}_{\text{MAP}} = \arg \max_s \prod_{i=1}^4 \left[ \int_{\Phi_i} p(\mathbf{y}_i|\phi_i) d\phi_i \right] \quad (3)$$

打开电源开关后，4个LED按照下一节提出的规则，周期性地辐射开关编码脉冲对，在位置 $s$ 处，地面终端观测到的第 $k$ 组脉冲对的合成光脉冲为

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^s(k) &= \sum_{i=1}^4 \mathbf{y}_i(k) + \mathbf{n}(k) \\ &= \sum_{i=1}^4 \sqrt{P} \times \mathbf{h}_i^s \times (\mathbf{x}_i(\phi_i(k) + \tau_i^s)) + \mathbf{n}_0(k) \quad (4) \end{aligned}$$

其中， $P$ 表示LED的辐射功率； $\mathbf{x}_i$ 表示第 $i$ 个LED辐射的编码脉冲对； $\mathbf{h}_i^s$ 表示第 $i$ 个LED辐射的编码脉

冲对传播到 $s$ 处所经历的信道增益； $\phi_i(k)$ 表示第 $i$ 个LED第 $k$ 组脉冲对的辐射时间； $\tau_i^s$ 表示第 $i$ 个LED辐射的编码脉冲对传播到 $s$ 处的延迟； $\mathbf{n}_0$ 表示服从正态分布的终端噪声。

在可能的时间误差和可能的位置集合内，当4个LED对应的新型开关控制脉冲对的编码规则能够使得终端分辨出4个LED的发射脉冲时，在位置 $s$ 处，终端可以接收到来自4个LED的相互独立的脉冲，基于式(4)，可表示为

$$\mathbf{y}_i^s(k) = \sqrt{P} \times \mathbf{h}_i^s \times (\mathbf{x}_i(\phi_i(k) + \tau_i^s)) + \mathbf{n}_0(k) \quad (5)$$

其中，假设LED和终端的PD探测器水平安装，则

$$\mathbf{h}_i^s = \mathbf{h}_i^0 \left( \frac{\mathbf{d}_i^0}{\mathbf{d}_i^s} \right)^{m+3} \quad (6)$$

其中， $\mathbf{h}_i^0$ 表示第 $i$ 个LED辐射的编码脉冲对到参考位置经历的信道增益； $\mathbf{d}_i^s$ 表示第 $i$ 个LED到位置 $s$ 处的距离； $\mathbf{d}_i^0$ 表示第 $i$ 个LED到参考位置处的距离； $m$ 表示LED的朗伯辐射阶数。因此，在各LED脉冲的持续时间内

$$p(\mathbf{y}_i(k)|\phi_i(k), s) = \mathcal{N} \left( \sqrt{P \times \mathbf{w}_{\phi_i}^s(k) \times T_w \times \mathbf{h}_i^s, \sigma^2} \right) \quad (7)$$

其中， $\sigma$ 表示终端噪声的标准差； $T_w$ 表示脉冲宽度；当位于位置 $s$ 处的终端观测到第 $k$ 组脉冲对时， $\mathbf{w}_{\phi_i}^s(k)$ 表示有用信号观测时间窗口占比，即终端的预期脉冲观测窗口和实际观测窗口之间的重叠时间宽度与脉冲宽度的比值

$$\mathbf{w}_{\phi_i}^s(k) = \begin{cases} \Delta \mathbf{t}_i^s(k)/T_w, & \Delta \mathbf{t}_i^s(k) > 0 \\ 0, & \Delta \mathbf{t}_i^s(k) \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$\Delta \mathbf{t}_i^s(k) = T_w - \left| \phi_i(k) + \frac{\mathbf{d}_i^s}{c} - \mathbf{t}_i^s(k) \right|$$

其中， $c$ 表示光速， $\mathbf{t}_i^s(k)$ 表示位于位置 $s$ 处的终端观测到的第 $k$ 组脉冲对的到达时间。将式(6)—式(8)代入式(3)，再利用对数运算降低运算复杂度，并求均值，则式(3)可等效为如式(9)的优化模型

$$\hat{\mathbf{s}}_{\text{MAP}} = \max_s \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^4 \ln(p(\mathbf{y}_i(k)|\phi_i(k), s))$$

$$= \min_s \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^4 \left| \mathbf{y}_i(k) - \sqrt{P \times \mathbf{w}_{\phi_i}^s(k) \times T_w \times \mathbf{h}_i^s} \right|,$$

s.t.  $|c|\mathbf{t}_i^0(k) - \phi_i(k) - \mathbf{d}_i^0| < \varepsilon,$

eq. 式(6), 式(8)

$$\mathbf{d}_i^0 = \text{norm}([x_0^{\text{Pd}}, y_0^{\text{Pd}}, z_0^{\text{Pd}}] - [x_i^{\text{Led}}, y_i^{\text{Led}}, z_i^{\text{Led}}]),$$

$$\mathbf{d}_i^s = \text{norm}([x_s^{\text{Pd}}, y_s^{\text{Pd}}, z_s^{\text{Pd}}] - [x_i^{\text{Led}}, y_i^{\text{Led}}, z_i^{\text{Led}}]) \quad (9)$$

其中， $[x_i^{\text{Led}}, y_i^{\text{Led}}, z_i^{\text{Led}}], [x_0^{\text{Pd}}, y_0^{\text{Pd}}, z_0^{\text{Pd}}], [x_s^{\text{Pd}}, y_s^{\text{Pd}}, z_s^{\text{Pd}}]$

分别表示第 $i$ 个LED的坐标、参考位置的坐标和位置 $s$ 处终端的坐标； $\text{norm}()$ 表示求向量的1范数； $\varepsilon$ 表示位置误差容限，是很小的预设常数。

## 2.2 新型开关编码脉冲对

为简化问题描述，如图2所示，假设4个LED发射的脉冲宽度相同，并且脉冲间隔、脉冲对间隔都是脉冲宽度的整数倍，各定时器生成的开关编码脉冲对必须满足：

**条件1** 脉冲对的脉冲间隔与LED一一对应；

**条件2** 脉冲宽度大于室内的最大传播延时与最大时间误差之和；

**条件3** 脉冲间隔满足互素关系；

**条件4** 脉冲对间隔远大于脉冲间隔。

如图2所示，条件1用于保证终端通过识别脉冲对的脉冲间隔即可确定脉冲对应的LED；在可能的时间误差下，经过信道的传播后，第2, 3, 4个条件，依次分别保证终端侧接收到的4个脉冲对满足：

(1) 终端收到的各LED对应脉冲对中的第1个脉冲不与其他LED的第2个脉冲重叠；

(2) 终端收到的各LED对应脉冲对中的第2个脉冲不会重叠；

(3) 终端当前收到的脉冲是各LED在同一个脉冲对间隔内辐射出来的。

上述4个条件确保了：在可能的时间误差下，在同一个脉冲对间隔内，终端至少能够识别出各LED辐射的脉冲对中的1个完整脉冲，从而提取4个LED的脉冲信息，建立所述定位模型。

## 2.3 求解过程

所提定位模型的求解过程如表1所示。

## 3 性能分析

为了验证上述定位模型的性能，在 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的室内区域内，依据表2和表3给出的信标参数、LED数量和位置参数、信道(含LED和接收机)带宽以及信噪比等参数，验证了定位算法的性能。其中，信噪比指的是地面终端到LED在最远距离情况下，在接收机带宽内接收信标信号的信噪比，终端采样率为1 GHz。另外，在定位模型的求解过程中，位置误差容限 $\varepsilon = 0.01 \text{ m}$ ，时域搜索步进因子 $\alpha = 0.5$ ，参考位置设置在待定位区域的正中间。为验证算法的通用性，在该区域内部，将LED的数量从4个扩展到6个，也验证了所述定位模型的性能。

在LED可见光通信中，常见的带宽可以达到200 MHz, 100 MHz, 50 MHz等<sup>[15-18]</sup>；常见的发射功率为20 W<sup>[19]</sup>；常见的定位信噪比有50 dB, 30 dB, 20 dB, 15 dB等<sup>[7,20]</sup>。按照表2所述的LED坐标参数

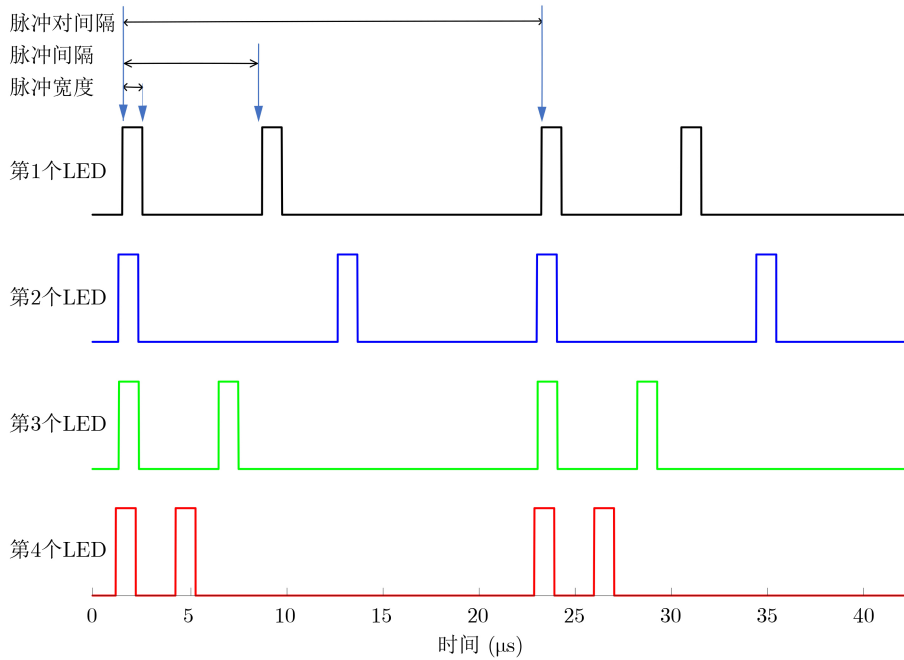


图 2 新型开关编码脉冲对模型示例

表 1 所提定位模型算法

- (1) 设置位置误差容限 $\varepsilon$ 、脉冲宽度 $T_w$ 、脉冲对间隔 $T_I$ 、LED的坐标 $(x_i^{\text{Led}}, y_i^{\text{Led}}, z_i^{\text{Led}})$ 、LED的辐射功率 $P$ 、参考位置的坐标 $(x_0^{\text{Pd}}, y_0^{\text{Pd}}, z_0^{\text{Pd}})$ 、时域搜索步进因子 $\alpha$ 。
- (2) 将终端固定在参考位置，开始检测脉冲，并对脉冲对计数 $k$ ，测量第 $i$ 个LED在第 $k$ 个脉冲对间隔内可分辨的脉冲 $y_i^0(k)$ 及脉冲到达时间 $t_i^0(k)$ ，计算距离 $d_i^0$ 及信道增益 $h_i^0$ ：
$$h_i^0 = \frac{1}{K \times \sqrt{P}} \sum_{k=0}^{K-1} y_i^0(k)$$
- (3) 计算4个LED发射第0组脉冲对的时间为：
$$\phi_i(0) = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} (t_i^0(k) - d_i^0/c - k \times T_I)$$
  
时间误差为：
$$\delta^2 = \frac{1}{K} \sum_{k=0}^{K-1} (t_i^0(k) - (d_i^0/c + \phi_i(k)))^2$$
  
4个LED的发射第 $k$ 个脉冲对的时间为：
$$\phi_i(k) = \phi_i(0) + k \times T_I$$
- (4) 计算第 $i$ 个LED可能的发射时间集合：
$$\Phi_i = \{\phi_i(k) - 3\delta : \alpha\varepsilon/c : \phi_i(k) + 3\delta\}$$
- (5) 在集合 $\Phi_i$ 中，计算似然比 $\gamma$ ：
$$\gamma = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^4 |y_i(k) - \sqrt{P \times w_{\phi_i}^s(k) \times T_w \times h_i^s}|$$
并剔除不满足式(9)约束的组合。
- (6) 找到 $\gamma$ 的最大值对应的 $\hat{\phi}_i(k)$ 和 $\hat{s}$ ，分别为满足最大后验概率准则的发射时间和终端位置的最优估计。

表 2 算法验证参数

	图3(a)、图4(a)、图4(c)	图3(b)、图4(b)、图4(d)	图5
信噪比(dB)		30	30, 20, 15
LED及终端带宽(MHz)		200, 100, 50	200, 100, 50
LED的数量	4	6	4
LED的坐标	[1.25 1.25 3; 3.75 1.25 3; 1.25 3.75 3; 3.75 3.75 3]	[1 1.5 3; 2.5 1.5 3; 4 1.5 3; 1 3.5 3; 2.5 3.5 3; 4 3.5 3]	[1.25 1.25 3; 3.75 1.25 3; 1.25 3.75 3; 3.75 3.75 3]

表 3 信标参数 (μs)

	LED 1	LED 2	LED 3	LED 4	LED 5	LED 6
脉冲间隔	7	11	5	3	13	17

和表3所述的信标参数，在保证场景中终端接收到最远LED信标的信噪比等于30 dB的情况下，在参考位置处(定位区域中心)，图3(a)和图3(b)分别给出了终端接收到的4个LED和6个LED合成信标的波形图，并且表3所述的信标参数中脉冲宽度为1 μs，

脉冲对间隔为 $21\ \mu\text{s}$ 。在2.1节所述场景中，各类时间误差之和的最大值不可能超过 $\mu\text{s}$ 。因此，如图3(a)和图3(b)所示，在1个信标的脉冲对间隔内，各LED辐射脉冲对的第1个脉冲重叠在一起，另外，由于脉冲对编码规则要求脉冲间隔远大于最大时间误差之和，并且各LED辐射脉冲对的间隔互素，因此，各LED辐射编码脉冲对的第2个脉冲相互独立。在安装4个LED的场景中，4个LED到达参考位置的距离相同，如图3(a)所示，终端接收到的第1合成脉冲的台阶式起伏和展宽与4个LED的时间误差直接相关。同理，图3(b)展示了6个LED的时间误差和到参考位置的差别。

如图4(a)—图4(d)所示，按照表2所述的参数，分别在场景内部设置4个LED和6个LED，在保证

终端接收到最远LED的信标信噪比等于50 dB和30 dB的情况下，分别在理想带宽，200 MHz，100 MHz和50 MHz信道带宽条件下，对比了所提定位模型的性能，并与基于脉冲到达时间差(Time Difference Of Arrival, TDOA)的定位模型进行了对比。值得说明的是其中所提的“理想带宽”和“信噪比”，分别指的是在LED和终端只受到1 GHz的采样率限制的理想条件下的带宽，信噪比是1 GHz的采样率限制条件下的带内信噪比。

如图4所示，在1 GHz采样率和理想带宽条件下，基于本文所提定位模型，采用4个LED和6个LED发射的基于新型OOK编码脉冲对的定位信标，以90%的概率，可以达到6 mm的定位精度。与所提方法形成对比，基于脉冲到达时间差(TDOA)的定

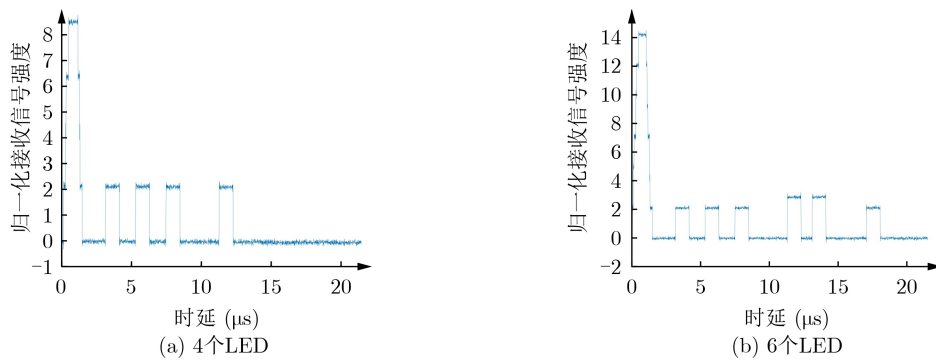


图3 参考位置处(定位区域中心)接收到的合成信标波形图

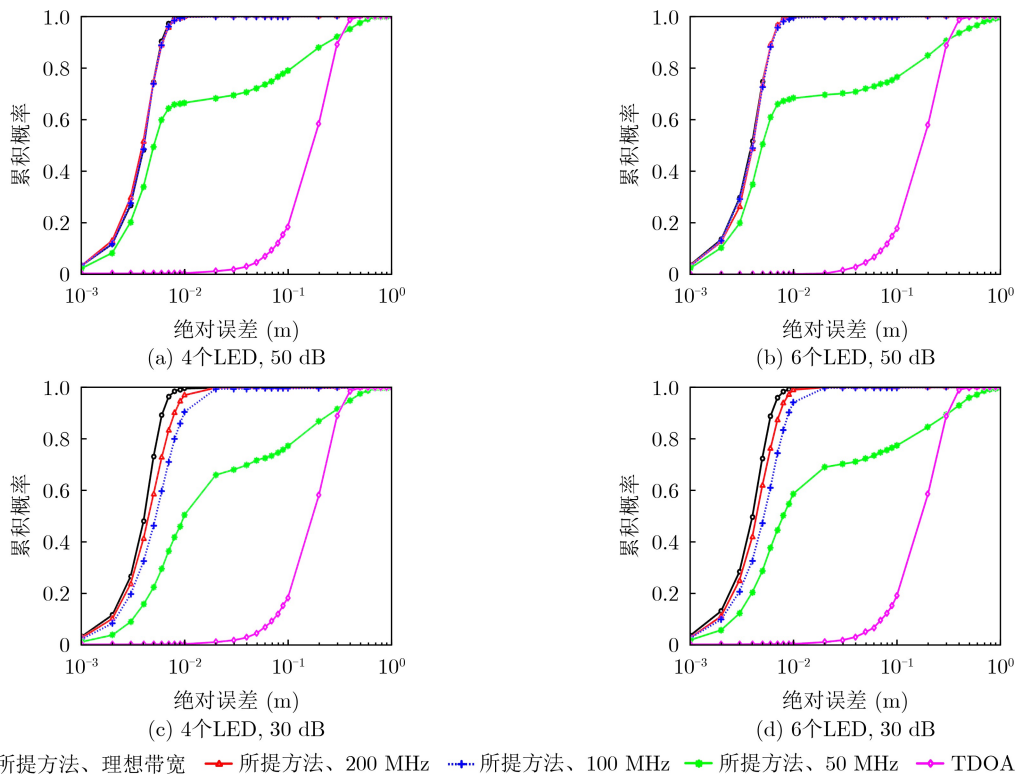


图4 不同带宽下所提定位方法的定位性能对比

位方法，以90%的概率可以达到30 cm的定位精度。因此，本文所提方法获得了明显更优的定位性能，这也证明了本文所述定位模型充分利用脉冲的时间和幅度信息来联合提高定位性能。另外，图4(a)—图4(d)都揭示了接收机带宽显著影响着OOK信标的定位性能，采用4个LED和6个LED发射的基于新型OOK编码脉冲对的定位信标，在信道带宽(含LED和接收机)分别为200 MHz和100 MHz的条件下，本文所提定位模型以90%的概率分别可以达到8 mm和1 cm的定位精度。与之对比，当信道带宽为50 MHz时，基于4个LED和6个LED的定位性能以90%的概率可以达到30 cm的定位精度。性能提升的原因在于接收机带宽的增加，同比例提高了接收机对脉冲时间的分辨能力，这证明了本文所述定位模型充分利用了脉冲的时间信息来提高定位性能。对比图4(a)和图4(c)以及图4(b)和图4(d)，当信噪比极高(50 dB)时，脉冲的幅度信息误差极小，在理想带宽、200 MHz和100 MHz带宽的接收机对脉冲时间信息的分辨能力内，本文所提定位模型的定位精度趋于一致，明显优于单纯基于TDOA的定位算法。

终端接收机采样率1 GHz，采用4个LED，在信噪比为30 dB, 20 dB, 15 dB的条件下，图5(a)—图5(c)分别验证了信道(含LED和接收机)带宽为200 MHz, 100 MHz和50 MHz时本文所提模型的性能。当信噪比为30 dB时，信道带宽为200 MHz, 100 MHz和50 MHz时，接收机分别以90%的概率可以使得定位精度达到8 mm, 1 cm和26 cm；当信噪比为20 dB时，信道带宽为200 MHz, 100 MHz和50 MHz分别以90%的概率可以使得定位精度达到1.7 cm, 2.6 cm和33 cm；当信噪比为15 dB时，信道带宽为200 MHz, 100 MHz和50 MHz分别以90%的概率可以使得定位精度达到3.7 cm, 5.8 cm和51 cm。在不同的信道带宽下，在不同的噪声水

平下，本文所提定位模型的性能非常稳定。图5也揭示了信道带宽对定位性能的影响非常显著，图6将本文所提的方法分别与基于异步CDMA<sup>[21]</sup>进行定位、传统OOK基于指纹进行定位<sup>[22]</sup>以及传统OOK基于强度进行定位<sup>[7]</sup>的性能进行了对比，其中，异步CDMA是指在传统码分多址的基础上融入频分多址概念的一种通信方式，即各路基带信号在使用不同扩频码扩频后，分别用不同频率的载波进行调制，从而抑制远近效应对系统定位性能的影响。在30 dB信噪比、理想带宽条件下，本文所提的新型OOK、异步CDMA、传统OOK基于指纹进行定位以及传统OOK基于强度进行定位的方法分别以90%的概率可以使得定位精度达到6 mm, 5 cm, 7 cm, 28 cm，证明了本文所提定位模型联合利用了OOK脉冲的时间和幅度进行定位，获得了优化的定位结果。

#### 4 结论

室内等封闭空间的位置服务是电子信息系统产生服务效能和经济价值的核心之一，5G最新的第17个演进版本要求实现高精度的室内和室外定位，并保证室内室外全场景定位业务的可用性和及时性，实现室内0.2~10 m的定位精度。基于LED可见光定位技术，由于LED具备绿色、超高带宽等优势，非常符合当前碳中和的可持续发展理念，是一个非常热门的研究主题同时也处于行业的发展前沿。本文提出一种基于新型编码开关控脉冲对的室内信标构造方法及其对应的异步可见光定位模型，仅在定位系统的网络侧所含各LED的偏置电流控制端配置一个定时器(比如以555定时器为核心的电路)，对各LED的驱动电流按所提规则进行开关键控，除了统一的供电走线外，各LED间无其他连接关系，PD端可以获得最大后验概率准则下的最优位置估计。经验证，在理想带宽条件下，当接收

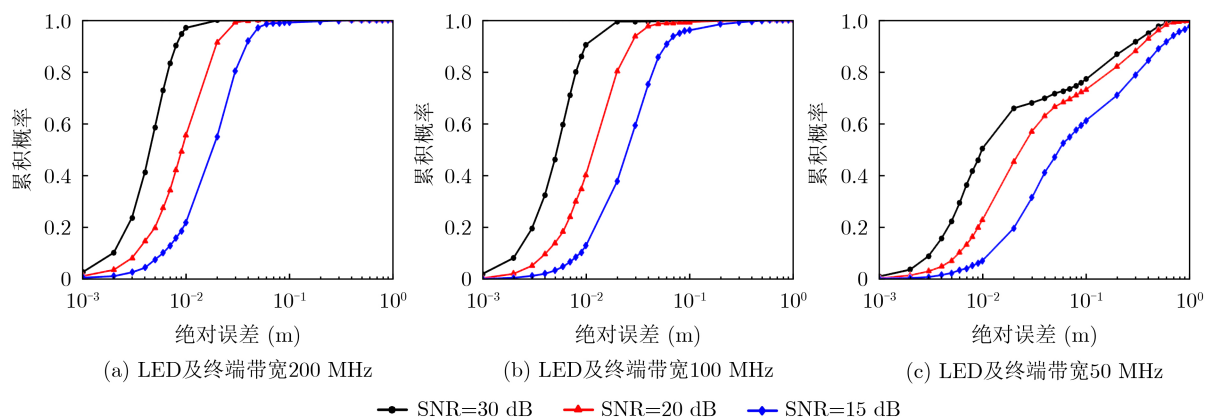


图5 在30 dB, 20 dB, 15 dB信噪比条件下，所述4个LED定位模型的性能对比

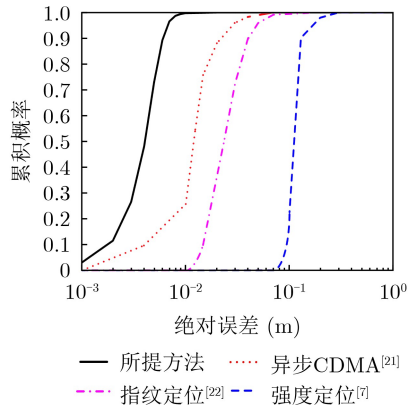


图6 在30 dB信噪比、理想带宽条件下, 所述4个LED定位模型基于不同方法的性能对比

机的采样率为1 GHz时, 终端以90%的概率可以达到6 mm的定位精度, 优于异步CDMA、传统OOK基于指纹进行定位以及传统OOK基于强度进行定位的方法。当信噪比从50 dB恶化至15 dB时, 终端的定位精度仍保持在厘米量级, 满足5G对室内定位的要求, 是非常有效的低成本室内照明和定位一体化方案。

### 参考文献

- [1] 3GPP TS 22.261 V18.4.0[EB/OL]. [https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/22\\_series/22.261/](https://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/22_series/22.261/), 2021.
- [2] CHOWDHURY M Z, HASAN M K, SHAHJALAL M K, *et al.* Optical wireless hybrid networks: Trends, opportunities, challenges, and research directions[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(2): 930–966. doi: 10.1109/COMST.2020.2966855.
- [3] 刘艳亮, 张海平, 徐彦田, 等. 全球卫星导航系统的现状与进展[J]. *导航定位学报*, 2019, 7(1): 18–21, 27. doi: 10.16547/j.cnki.10-1096.20190103.  
LIU Yanliang, ZHANG Haiping, XU Yantian, *et al.* Development status and trend of global navigation satellite system[J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2019, 7(1): 18–21, 27. doi: 10.16547/j.cnki.10-1096.20190103.
- [4] 宿晨庚, 郭树人, 刘旭楠, 等. 北斗三号基本系统空间信号质量评估[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(11): 2689–2697. doi: 10.11999/JEIT190683.  
SU Chengeng, GUO Shuren, LIU Xu'nian, *et al.* Signal quality assessment of BDS-3 preliminary system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(11): 2689–2697. doi: 10.11999/JEIT190683.
- [5] ZHUANG Yuan, HUA Luchi, QI Longning, *et al.* A survey of positioning systems using visible LED lights[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(3): 1963–1988. doi: 10.1109/COMST.2018.2806558.
- [6] KESKIN M F, SEZER A D, and GEZICI S. Localization via visible light systems[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2018, 106(6): 1063–1088. doi: 10.1109/JPROC.2018.2823500.
- [7] GLIGORIĆ K, AJMANI M, VUKOBRATOVIĆ D, *et al.* Visible light communications-based indoor positioning via compressed sensing[J]. *IEEE Communications Letters*, 2018, 22(7): 1410–1413. doi: 10.1109/LCOMM.2018.2833550.
- [8] 吴楠, 王旭东, 胡晴晴, 等. 基于多LED的高精度室内可见光定位方法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(3): 727–732. doi: 10.11999/JEIT140725.  
WU Nan, WANG Xudong, HU Qingqing, *et al.* Multiple LED based high accuracy indoor visible light positioning scheme[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(3): 727–732. doi: 10.11999/JEIT140725.
- [9] JUNG S Y, HANN S, and PARK C S. TDOA-based optical wireless indoor localization using LED ceiling lamps[J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2011, 57(4): 1592–1597. doi: 10.1109/TCE.2011.6131130.
- [10] KESKIN M F and GEZICI S. Comparative theoretical analysis of distance estimation in visible light positioning systems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(3): 854–865. doi: 10.1109/JLT.2015.2504130.
- [11] KESKIN M F, GEZICI S, and ARIKAN O. Direct and two-step positioning in visible light systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(1): 239–254. doi: 10.1109/TCOMM.2017.2757936.
- [12] DE ALBUQUERQUE V M, SOARES G M, ALONSO J M, *et al.* A simple resonant switched-capacitor led driver employed as a fast pulse-based transmitter for VLC applications[J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2021, 9(1): 111–122. doi: 10.1109/JESTPE.2020.2965505.
- [13] NAWAZ T, SEMINARA M, CAPUTO S, *et al.* IEEE 802.15. 7-compliant ultra-low latency relaying VLC system for safety-critical ITS[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(12): 12040–12051. doi: 10.1109/TVT.2019.2948041.
- [14] IEEE. IEEE Std 802.15. 7-2011 802.15. 7-2018 IEEE standard for local and metropolitan area networks--Part 15.7: Short-range optical wireless communications[S]. New York: IEEE, 2019: 1–407. doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8697198.
- [15] SHI Jinwei, CHI Kailun, WUN J M, *et al.* GaN based Cyan light-emitting diodes with GHz bandwidth[C]. 2016 IEEE Photonics Conference (IPC), Waikoloa, USA, 2016: 623–624. doi: 10.1109/IPCon.2016.7831257.
- [16] RAE B R, MCKENDRY J, GONG Zheng, *et al.* A 200MHz 300ps 0.5pJ/ns optical pulse generator array in 0.35 $\mu$ m CMOS[C]. 2010 IEEE International Solid-State Circuits



- Conference - (ISSCC), San Francisco, USA, 2010: 322–323. doi: [10.1109/ISSCC.2010.5433904](https://doi.org/10.1109/ISSCC.2010.5433904).
- [17] HUANG Beiju and CHEN Hongda. A monolithic optical receiver chip for free space visible light communication system[C]. The 2012 IEEE 11th International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Xi'an, China, 2012: 1–3. doi: [10.1109/ICSICT.2012.6467906](https://doi.org/10.1109/ICSICT.2012.6467906).
- [18] SONG Xiaoqing, WEI Youcai, ZHAO Zixu, *et al.* The influence of driving current on the LED modulation bandwidth indoor VLC[C]. 2017 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC Workshops), Qingdao, China, 2017: 1–6. doi: [10.1109/ICCChinaW.2017.8355282](https://doi.org/10.1109/ICCChinaW.2017.8355282).
- [19] ABOU-SHEHADA I M, ALMUALLIM A F, ALFAQEH A K, *et al.* Accurate indoor visible light positioning using a modified pathloss model with sparse fingerprints[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(20): 6487–6497. doi: [10.1109/JLT.2021.3098005](https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3098005).
- [20] ZHANG Ran, ZHONG Wende, QIAN Kemao, *et al.* A reversed visible light multitarget localization system via sparse matrix reconstruction[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2018, 5(5): 4223–4230. doi: [10.1109/JIOT.2018.2849375](https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2849375).
- [21] 陈旭. 基于异步码分多址的室内可见光定位系统设计[D]. [硕士学位论文], 华中科技大学, 2018. doi: [10.7666/d.D01541761](https://doi.org/10.7666/d.D01541761).  
CHEN Xu. Design of indoor visible light positioning system based on asynchronous code division multiple access[D]. [Master dissertation], Huazhong University of Science and Technology, 2018. doi: [10.7666/d.D01541761](https://doi.org/10.7666/d.D01541761).
- [22] XU Ming, XIA Weiwei, JIA Ziyang, *et al.* A VLC-based 3-D indoor positioning system using fingerprinting and K-nearest neighbor[C]. The 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference, Sydney, Australia, 2017: 1–5. doi: [10.1109/VTCSpring.2017.8108345](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2017.8108345).
- 王正海: 男, 1982年生, 教授, 研究方向为光电-射频综合传感、通信和信息智能利用。
- 许梦真: 女, 1998年生, 硕士生, 研究方向为可见光通信、室内定位。
- 梅佳能: 男, 1998年生, 硕士生, 研究方向为可见光通信、室内定位。
- 雷 恺: 男, 1998年生, 硕士生, 研究方向为可见光通信、室内定位。
- 余礼芬: 男, 1990年生, 副教授, 研究方向为无线通信技术、无人机通信、可见光通信等。
- 王玉峰: 男, 1977年生, 教授, 研究方向为无线通信技术、可见光通信、室内定位等。

责任编辑: 余 蓉