

智能LiFi实验室
Lab of Intelligent LiFi



重庆大学
CHONGQING UNIVERSITY



重庆大学
微电子与通信工程学院
CHONGQING UNIVERSITY
SCHOOL OF MICROELECTRONICS AND COMMUNICATION ENGINEERING

“面向6G的基于VCSEL阵列的室内大容量无线光通信系统”

曾志宏 博士
重庆大学 微电子与通信工程学院
弘深青年教师-特别资助



曾志宏

2017年获爱丁堡大学学士学位

2021年获爱丁堡大学博士学位 - 导师Harald Haas教授 - PureLiFi 企业奖学金

2022年联合创办深圳宝星博联科技有限公司

2023年11月加入重庆大学微电子与通信工程学院 - 合作导师：陈晨

科研成就：

- 长期从事面向6G和物联网的智能无线光通信LiFi技术理论与实验研究
- 在IEEE Transactions on Communications等光通信主流学术期刊和IEEE ICC等光通信主流国际学术会议共发表论文10余篇
- 申请美国专利一项，并成功在英国pureLiFi公司进行技术转化

企业与社会经历：

- 深圳宝星博联科技有限公司 联合创始人
- 博士联盟 主席
- 前英国PureLiFi公司通信算法研究员
- 华茂能联、等公司战略顾问
- 重庆市侨青会副会长

- 公司迅速获得上千万元天使投资
- 搭建博士联盟国际创新创业中心，成功协助墨影科技、华茂能联等十余家博士创业公司进行技术转化并获得融资
- 带领博士联盟推动深圳和爱丁堡成为友好城市
- 协助重庆、浙江、福建等地区的政府进行海外人才引进工作。



A VCSEL Array Transmission System With Novel Beam Activation Mechanisms

Zhihong Zeng, Mohammad Dehghani Soltani, Majid Safari, Harald Haas



6G关键技术 - 无线光通信LiFi (基于光波的WiFi, 包含可见光、红外和紫外波段)

频谱资源丰富(RF的1万倍)
免费使用且不受限制

基于已有LED照明设施
建设成本低、能耗低

利用光载波通信
无电磁干扰影响

LOS视距传输
天然物理层安全和私密性

基于光波的信息与能量同传
为终端充电续航

6G总体愿景与潜在关键技术 白皮书



IMT-2030 (6G) 推进组
2021年6月

四 6G潜在关键技术

智能全息无线电基于微波光子天线阵列的相干光上变频, 可实现信号的超高相干性和高并行性, 有利于信号直接在光域进行处理和计算, 解决智能全息无线电系统的功耗和时延挑战。

智能全息无线电在射频全息成像和感知等领域已有一定程度的研究, 但在无线通信领域的应用仍面临许多挑战和难点, 主要包括智能全息无线电通信理论和模型的建立; 基于微波光子技术的连续孔径有源天线阵与高性能光计算之间的高效协同、透明融合和无缝集成等硬件及物理层设计等相关问题。

(四) 太赫兹与可见光通信技术

1. 太赫兹通信技术

太赫兹频段(0.1~10THz)位于微波与光波之间, 频谱资源极为丰富, 具有传输速率高、抗干扰能力强和易于实现通信探测一体化等特点, 重点满足Tbps量级大容量、超高传输速率的系统需求。

太赫兹通信可作为现有空口传输方式的有益补充, 将主要应用在全息通信、微小尺寸通信(片间通信及纳米通信)、超大容量数据回传、短距超高速传输等潜在应用场景。同时, 借助太赫兹通信信号进行高精度定位和高分辨率感知也是重要应用方向。

太赫兹通信需要解决的关键核心技术及难点主要包括以下几个方面。收发架构设计方面, 目前太赫兹通信系统有三类典型的收发架构, 包括基于全固态混频调

制的太赫兹系统、基于直接调制的太赫兹系统和基于光电结合的太赫兹系统, 小型化、低成本、高效率的太赫兹收发架构是亟待解决的技术问题。射频器件方面, 太赫兹通信系统中的主要射频器件包括太赫兹变频电路、太赫兹混频器、太赫兹倍频器和太赫兹放大器等。当前太赫兹器件的工作点和输出功率仍然难以满足低功耗、高效率、长寿命等商用需求, 需要探索基于锗化硅、磷化铟等新型半导体材料的射频器件。基带信号处理方面, 太赫兹通信系统需要实时处理Tbps量级的传输速率, 突破低复杂度、低功耗的先进高速基带信号处理技术是太赫兹商用的前提。太赫兹天线方面, 目前高增益天线主要采用大尺寸的反射面天线, 需要突破小型化和阵列化的太赫兹超大规模天线技术。此外, 为了实现信道表征和度量, 还需要针对太赫兹通信不同场景进行信道测量与建模, 建立精确实用化的信道模型。

2. 可见光通信技术

可见光通信指利用频率400THz到800THz的超宽频谱的高速通信方式, 具有无需授权、高保密、绿色和无电磁辐射的特点。

可见光通信比较适合室内的应用场景, 可作为室内网络覆盖的有效补充, 此外, 也可应用于水下通信、空间通信等特殊场景以及医院、加油站、地下矿场等电磁敏感场景。

当前大部分无线通信中的调制编码方式、复用方式、信号处理技术等都可应用

发展无线光通信技术符合网络强国和6G新基建国家战略

6G总体愿景与潜在关键技术白皮书, 中国信通院IMT-2030(6G)推进组, 2021年6月6日.



基于VCSEL阵列的大容量室内无线光通信系统

Why VCSEL? Why not LED/LD?

- 商用照明LED调制带宽仅在10-100MHz，难以支持高速率传输，难以真正实现照明和高速通信兼顾，VCSEL具有**高调制带宽** > 1GHz
- VCSEL具有**高功率转换效率**
- VCSEL**易于制造、测试**
- VCSEL可以**制成二维阵列**
- 可不考虑照明，使用红外波段

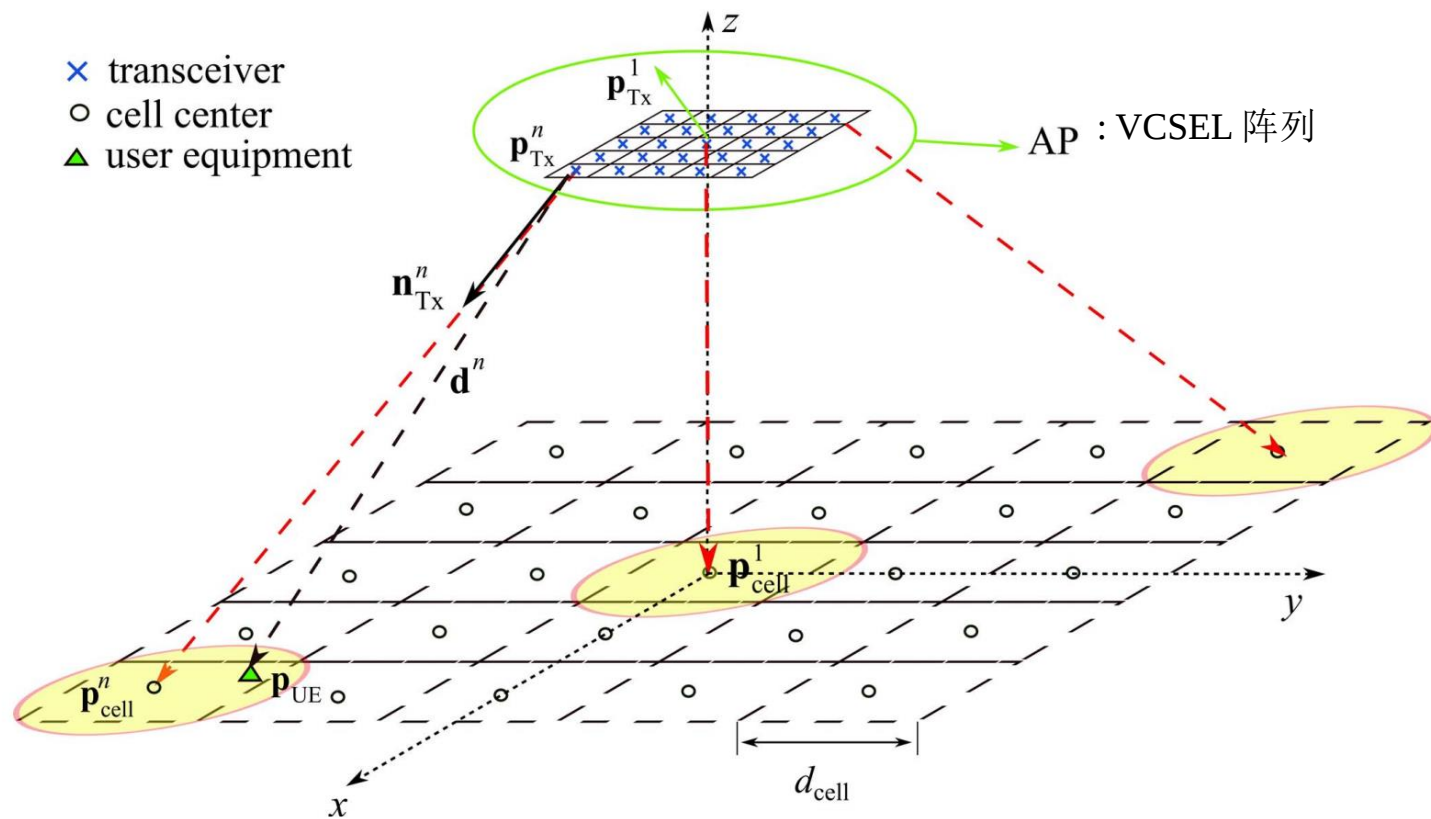


图1. VCSEL阵列的系统模型



单模高斯VCSEL光束

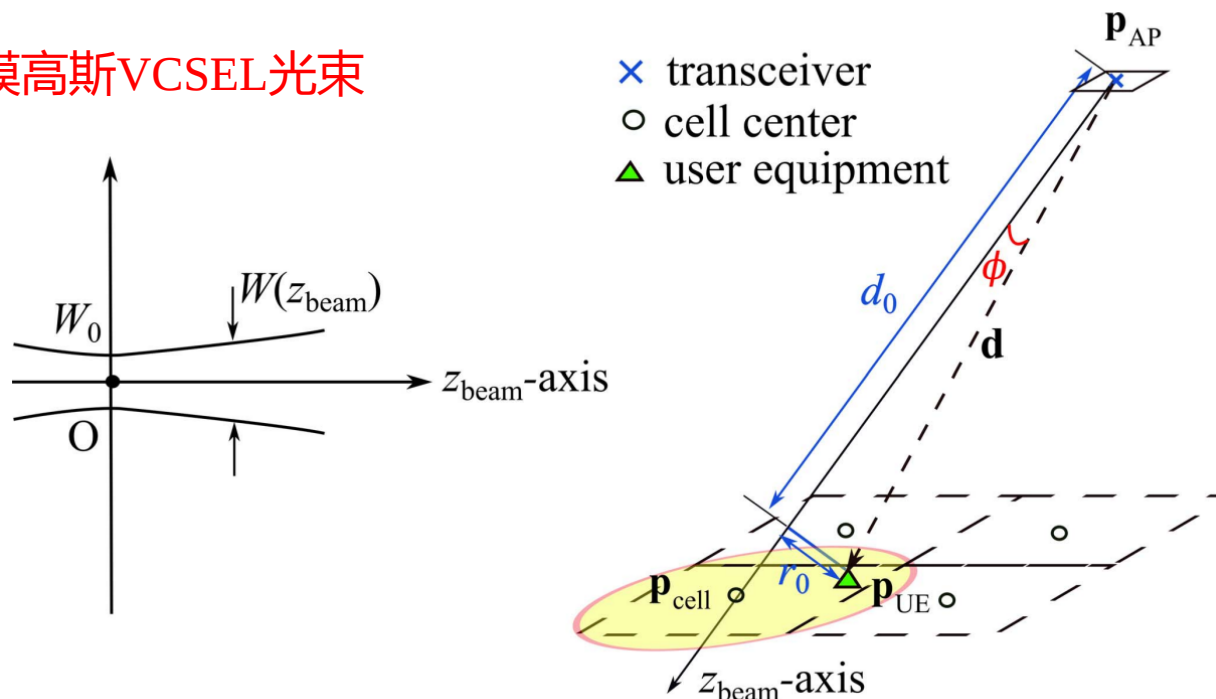


图2. Gaussian 波束的模型

$$I(r_0, d_0) = \frac{2P_{\text{tx,opt}}}{\pi W^2(d_0)} \exp\left(-\frac{2r_0^2}{W^2(d_0)}\right) \quad I(d, \phi) = \frac{2P_{\text{tx,opt}}}{\pi W^2(d \cos \phi)} \exp\left(-\frac{2d^2 \sin^2 \phi}{W^2(d \cos \phi)}\right)$$

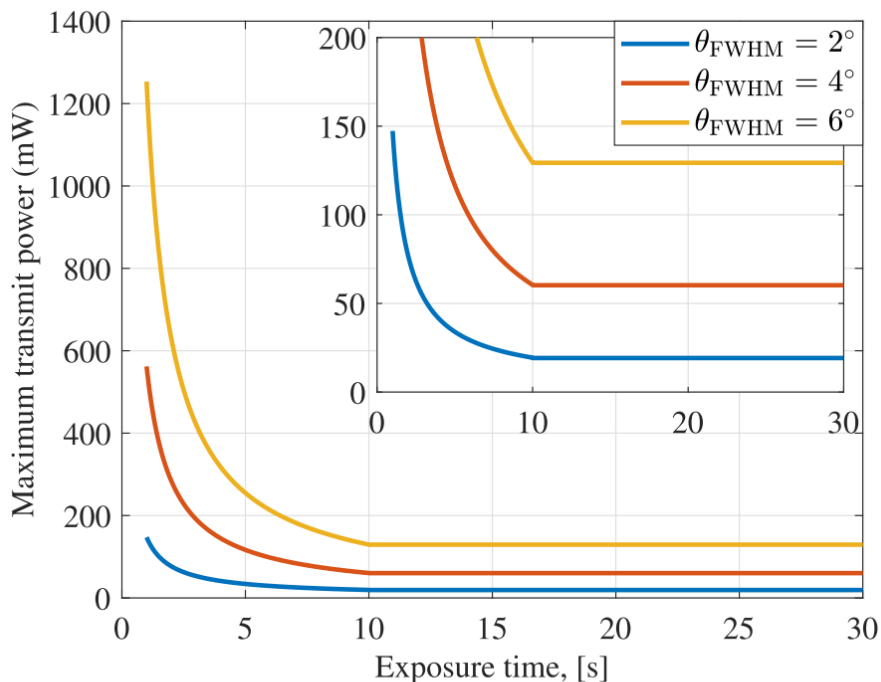
其中, $W(d_0) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda d_0}{\pi W_0^2}\right)^2}$, $W_0 = \frac{\lambda}{\pi \theta_{\text{beam}}}$, θ_{beam} 是divergence angle



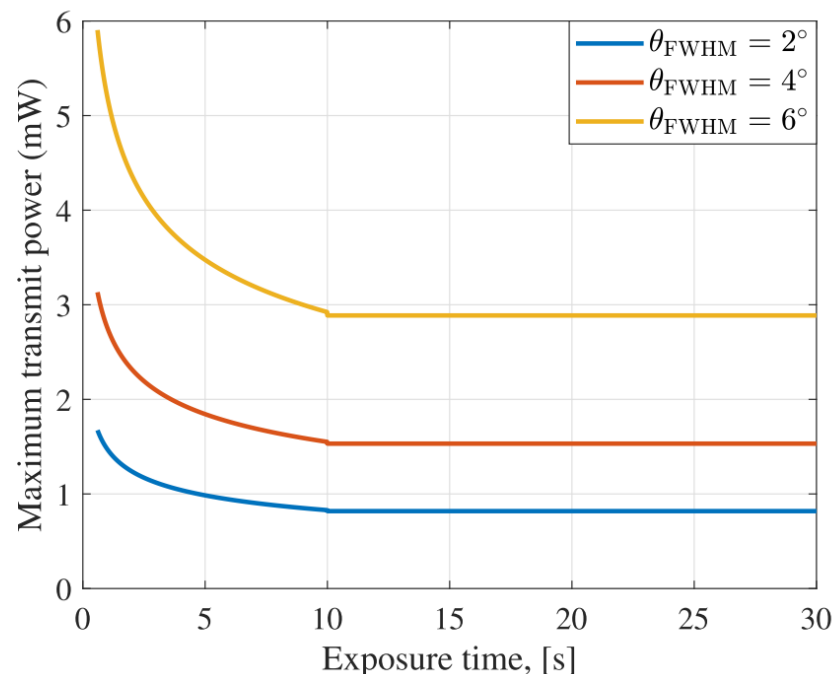
激光器的使用应当符合IEC 60825-1:2014 标准，以保证眼部安全。

PARAMETERS FOR EYE SAFETY

	$\lambda = 1550 \text{ nm}$		$\lambda = 850 \text{ nm}$	
Exposure duration, t_{exp} (s)	0.35 to 10	10 to 10^3	10^{-3} to 10	10 to 10^3
MPE, E_{mpe} ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	$10^4/t_{\text{exp}}$	1000	$18t_{\text{exp}}^{0.75}C_4/t_{\text{exp}}$	$10C_4C_7$
Aperture stop (mm) d_a	$1.5t_{\text{exp}}^{3/8}$	3.5	7	7
C_4	-	-	$10^{0.002(\lambda-700)}$	$10^{0.002(\lambda-700)}$
C_7	-	-	1	1



(a) 1550 nm



(b) 850 nm

图3. 确保用眼安全下VCSEL的最大传输功率

$\lambda=1550\text{nm}$

$\theta_{FWHM}=2^\circ$, $P_{tx,max}=19\text{ mW}$; $\theta_{FWHM}=4^\circ$, $P_{tx,max}=60\text{ mW}$; $\theta_{FWHM}=6^\circ$, $P_{tx,max}=129\text{ mW}$

$\lambda=850\text{nm}$

$\theta_{FWHM}=2^\circ$, $P_{tx,max}=1\text{mW}$; $\theta_{FWHM}=4^\circ$, $P_{tx,max}=1.6\text{ mW}$; $\theta_{FWHM}=6^\circ$, $P_{tx,max}=3\text{ mW}$



对于垂直腔面发射激光器（VCSEL）阵列系统来说，确定应该激活哪个光束来服务用户以优化系统性能是非常重要的。

本研究考虑的光束选择策略是信号强度策略（SSS），该策略用户仅接入提供最高接收功率的光束。

这要求系统对用户的位置进行估计。由于VCSEL的窄波束特性，每个波束对应的cell很小。因此需要精确的定位用户位置。对于移动用户设备（UE），用户跟踪系统需要能够快速且频繁地更新UE的位置信息。



基于普通无线电技术的室内定位方法，例如Wi-Fi、蓝牙（Bluetooth）、超宽带（UWB）和射频识别（RFID），由于它们的精度较低、延迟较高以及硬件成本较高，并不是合适的选择。这些技术在某些应用场景下可能表现良好，但在需要高精度和低延迟的特定环境中，它们无法满足研究的要求。

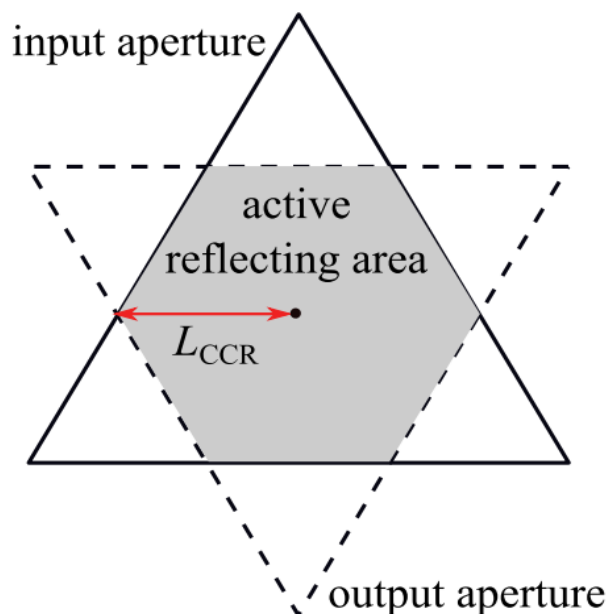
基于可见光通信（VLC）的可见光定位（VLP）技术可以轻松实现亚米级的定位精度。然而，大多数VLP定位技术利用VLC系统的下行传输，这就需要为所提出的基于VCSEL阵列的系统额外设置LED光源。此外，位置信息需要被处理并发送回中心控制器，这会导致实时光束激活系统产生额外的延迟。

本研究提出两种高精度，低延时以及低能耗的光束激活机制：

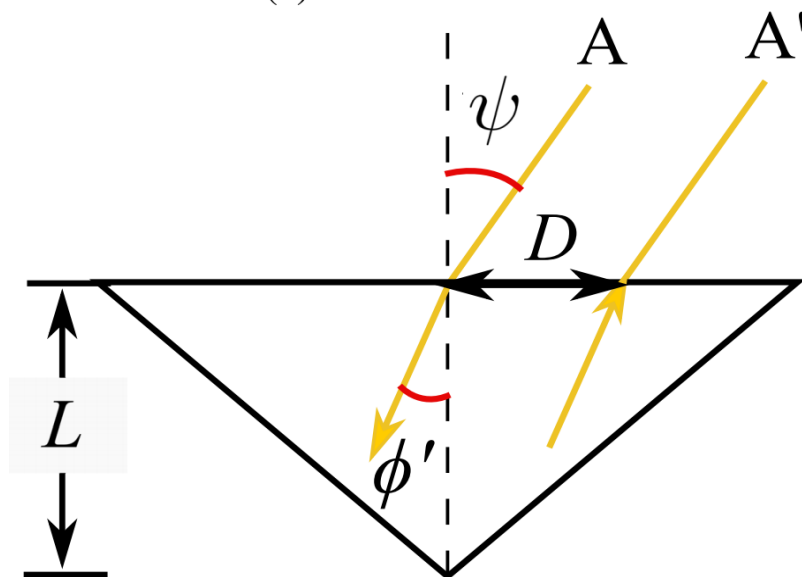
- 基于全反射镜（CCR）的波束激活机制
- 基于上行全向传输器（ODTx）的波束激活机制



基于全反射镜（CCR）的波束激活机制 - passive beam activation



(a) X-Y view



(b) X-Z view

图4. 全反射器的结构

当考虑到用户设备的方向时，可在不同方向上安装多个接收器（Rx）和CCR组合。这种做法可以确保无论用户设备如何旋转或移动，都能保持有效的通信连接和波束激活。



通过用产生唯一信号频率的液晶显示器（LCD）覆盖在CCR的前表面，可以调制反射光。用以将活跃UE与环境中的全反射镜或CCR区分开，并且在多用户场景下，可以通过以不同方式调制反射光来区分不同UE。

通过在透明和不透明状态之间转换，LCD快门可以在低调制频率下近似产生方波信号。此外，LCD及其驱动电路的功耗仅在数十微瓦的量级。

S. Shao, A. Khreishah, and I. Khalil, “RETRO: Retroreflector based visible light indoor localization for real-time tracking of IoT devices,” in Proc. INFOCOM, Apr. 2018, pp. 1025–1033.

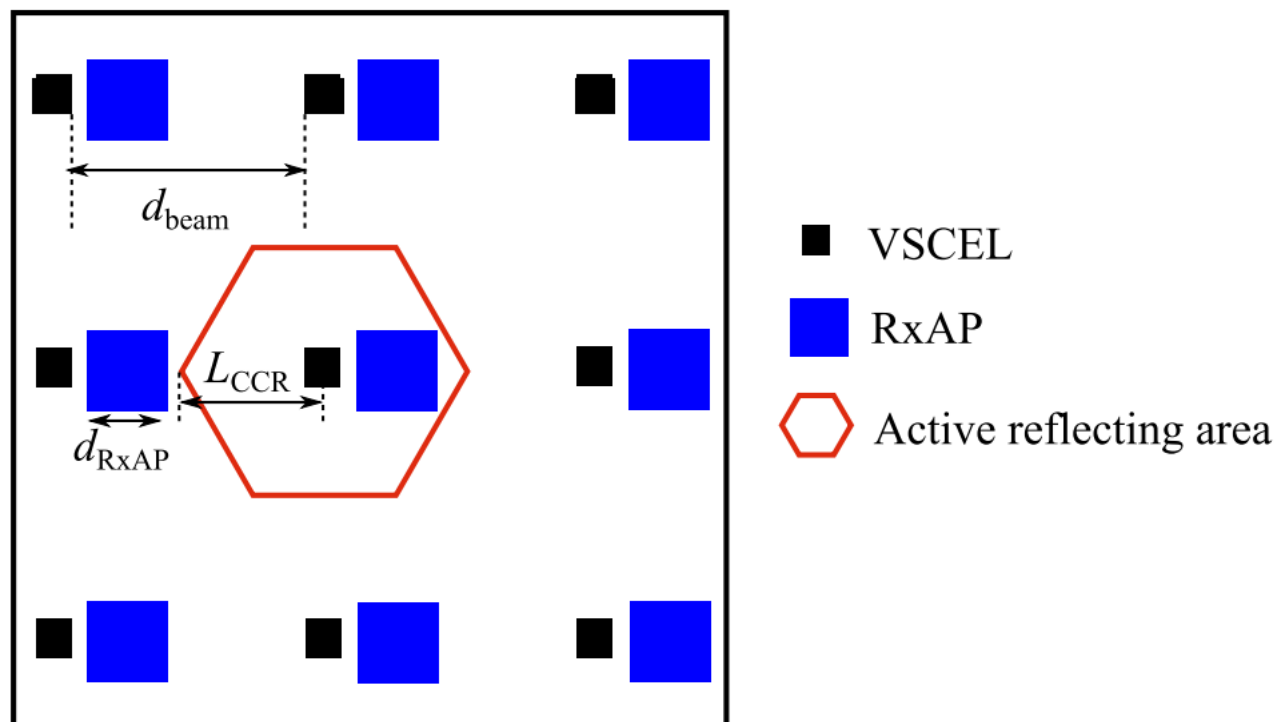


图5. 基于CCR下的VCSEL阵列及RxAP的结构

需要确保被CCR反射的光束只被位于发射波束旁的Rx接受，因此，相邻两个VCSEL的距离： $d_{\text{beam}} \geq L_{\text{CCR}} + d_{\text{RxAP}}$

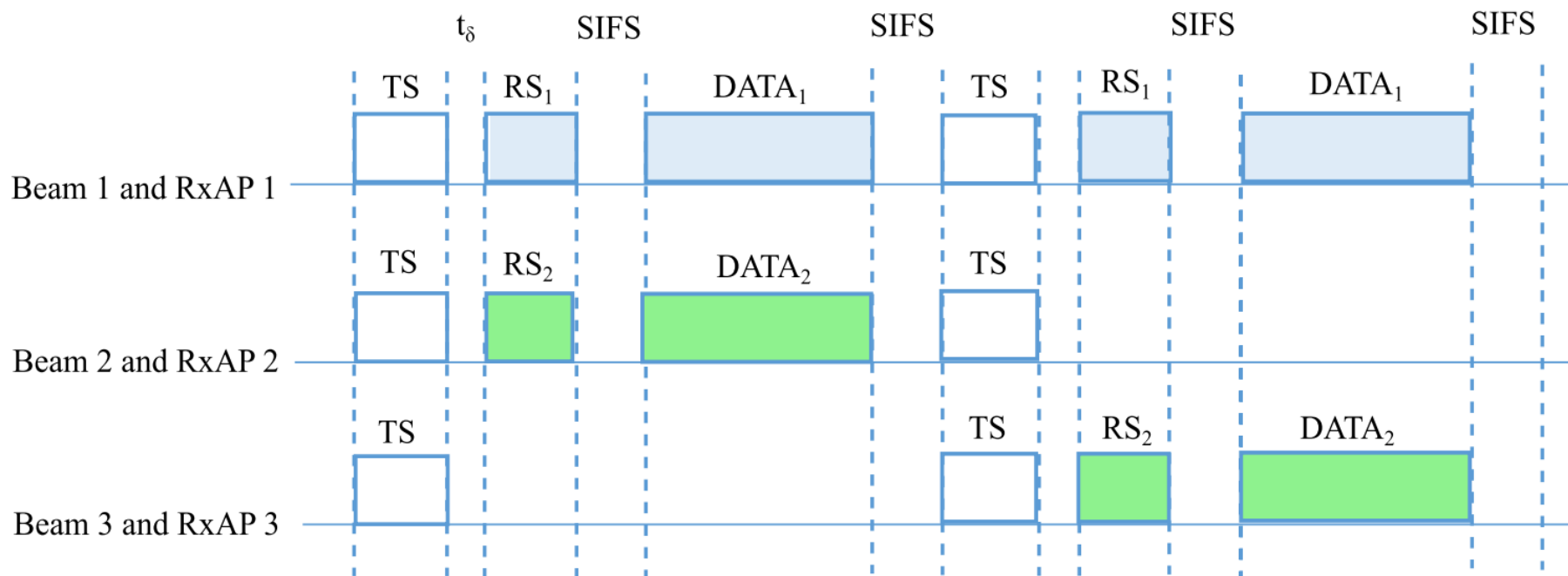


图6. 基于CCR的波束激活机制

TS: test signal

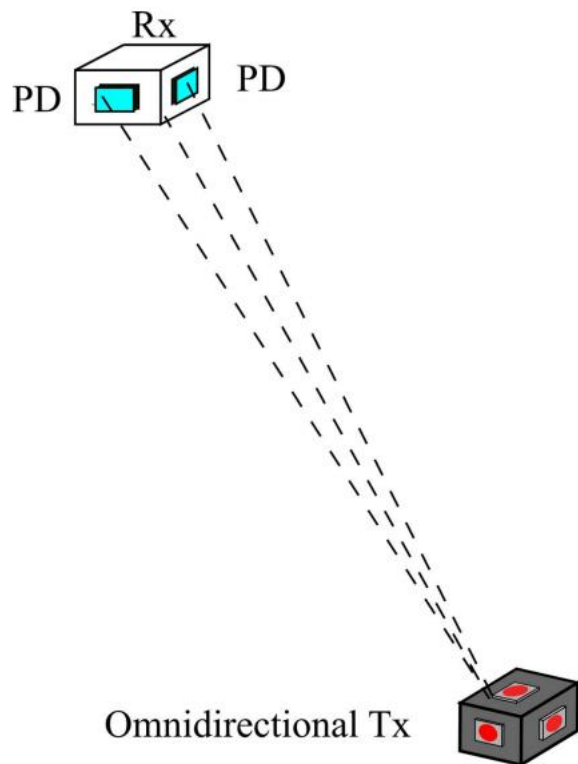
RS: reflected signal

SIFS: short inter-frame space

对于具有超低功耗和无计算能力的UE，可以实现几乎零延迟的实时UE跟踪和实时激光束激活。此外，具有CCR的波束激活机制不需要先对UE的位置进行估计。



提出一种基于全向传输器（ODTx）进行无线红外上行传输的光束激活方案。



PD 接收到的来自ODTx的信号强度：

$$P_{rx,OD} = \begin{cases} \frac{(m+1)P_{tx,OD}A_{OD}n_{ref}^2 \cos(\psi_{OD})}{2\pi d^2 \sin^2(\Psi_{OD})}, & \psi_{OD} \leq \Psi_{OD} \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

- 接收信号强度与UE方向无关
- 接受端有多个不同朝向的PD，基于接收端的信号强度矩阵，通过ANN对VCSEL阵列的激活波束进行估计。
- 可同时实现红外上行传输和VCSEL波束激活

图7. 基于全向传输器的波束激活

C. Chen, R. Bian, and H. Haas, “Omnidirectional transmitter and receiver design for wireless infrared uplink transmission in LiFi,” in Proc. IEEE ICC, May 2018, pp. 1–6.

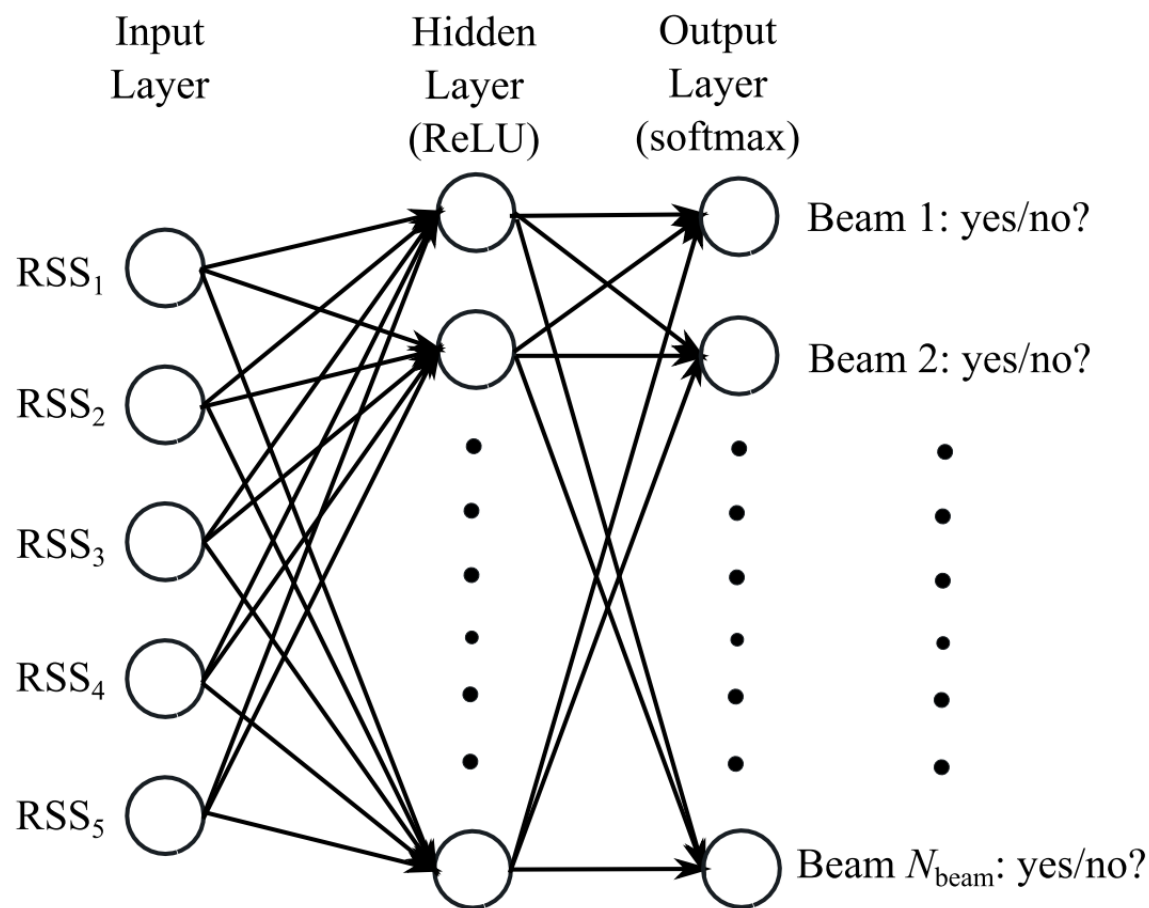


图8. 神经网络架构

可分为两个步骤：人工神经网络的离线训练，然后是光束的在线激活。
在实现上行通行创



TABLE I
APD PARAMETERS

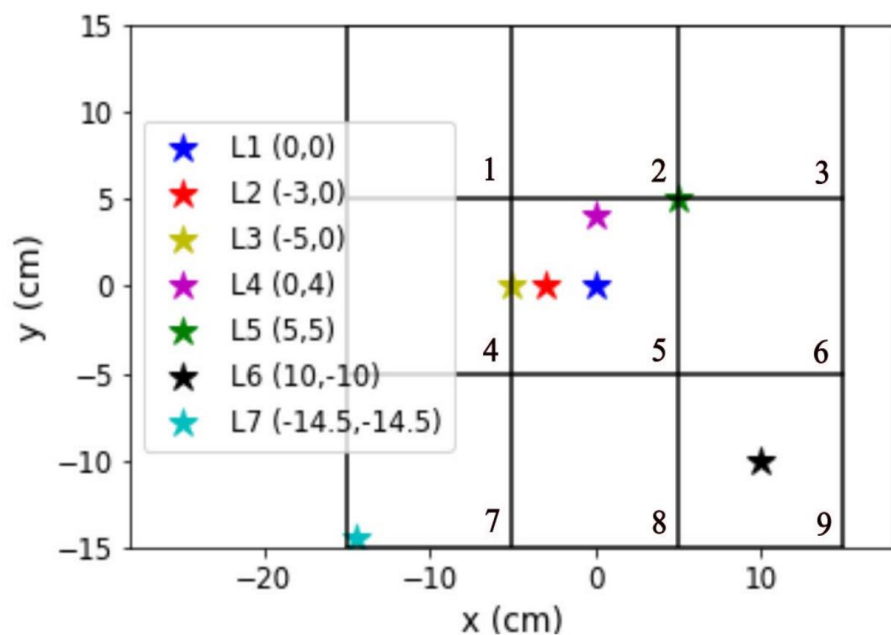
Parameter	Symbol	Value
Bandwidth	B_L	1.5 GHz
Spectral response range	-	950 to 1700 nm
Peak sensitivity wavelength	-	1550 nm
Effective area of APD	A_{eff}	$\pi \times 0.25 \times 0.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Receiver FOV	Ψ_c	60°
Gain of APD	G_{APD}	30
Responsivity	R_{APD}	0.9 A/W
Laser noise	RIN	-155 dB/Hz

TABLE II
PARAMETERS OF BEAM ACTIVATION MECHANISM

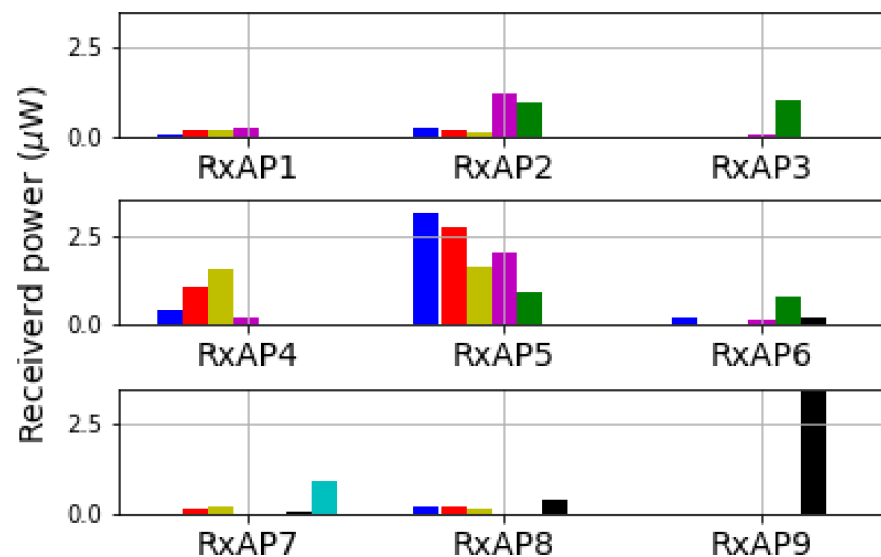
Parameter	Symbol	Value
Test signal time	t_{TS}	0.3 micro-seconds
Reflected signal time	t_{RS}	0.3 micro-seconds
Average length of data packet [32]	L_{Data}	64 Kbytes
Mean propagation delay [33]	t_δ	3 ns
SIFS [32]	SIFS	2 micro-seconds



通过Zemax仿真，验证基于CCR的波束激活机制的精确度

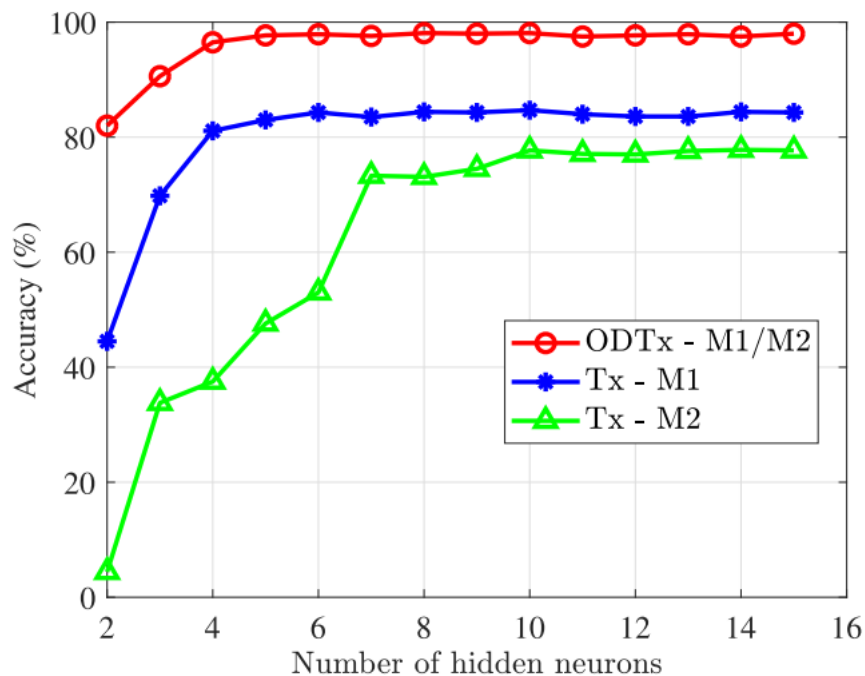


(a) UE locations

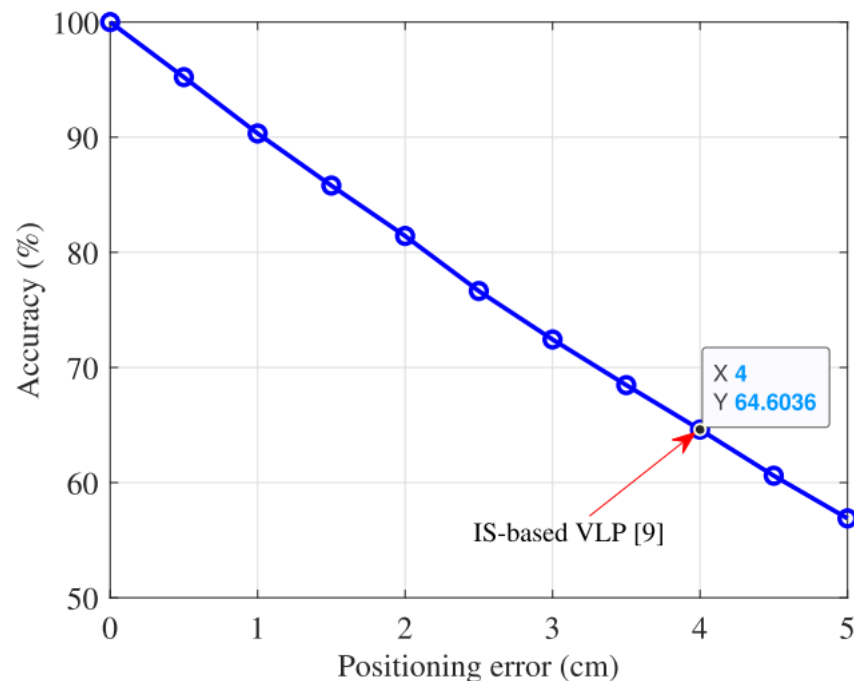


(b) Received optical power from CCR the array of RxAPs

图9. 用户位置和接收信号强度矩阵

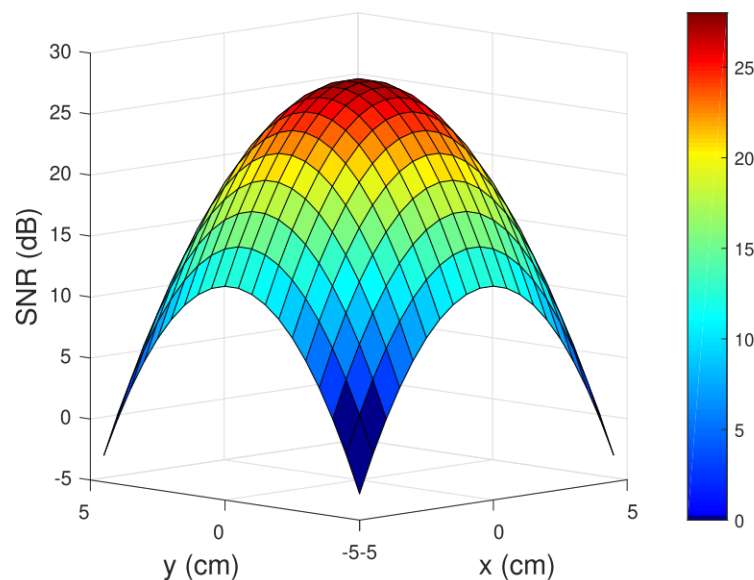


(a) Accuracy against number of hidden neurons

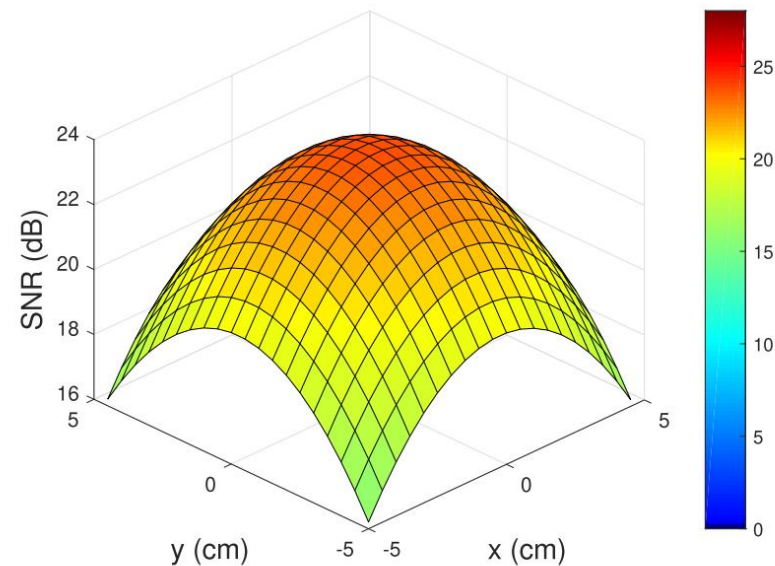


(b) Accuracy against different level of positioning error

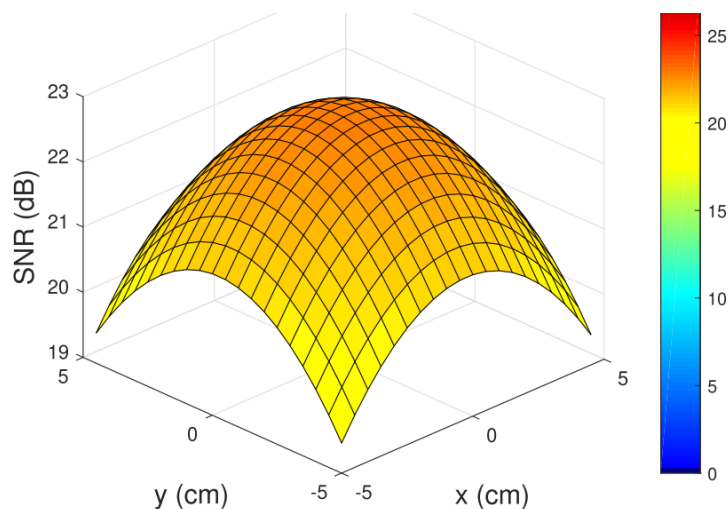
图10. 考虑不同用户方向性模型M1和M2情况下的波束激活精确度



(a) The central cell ($\theta_{\text{FWHM}} = 2^\circ$).



(b) The central cell ($\theta_{\text{FWHM}} = 4^\circ$).



(c) The central cell ($\theta_{\text{FWHM}} = 6^\circ$).

$$\begin{aligned}\theta_{\text{FWHM}}=2^\circ, & P_{\text{tx,max}} = 19 \text{ mW}; \\ \theta_{\text{FWHM}}=4^\circ, & P_{\text{tx,max}} = 60 \text{ mW}; \\ \theta_{\text{FWHM}}=6^\circ, & P_{\text{tx,max}} = 129 \text{ mW}\end{aligned}$$

图11. 不同 θ_{FWHM} 情况下, 中心区域的
SNR分布

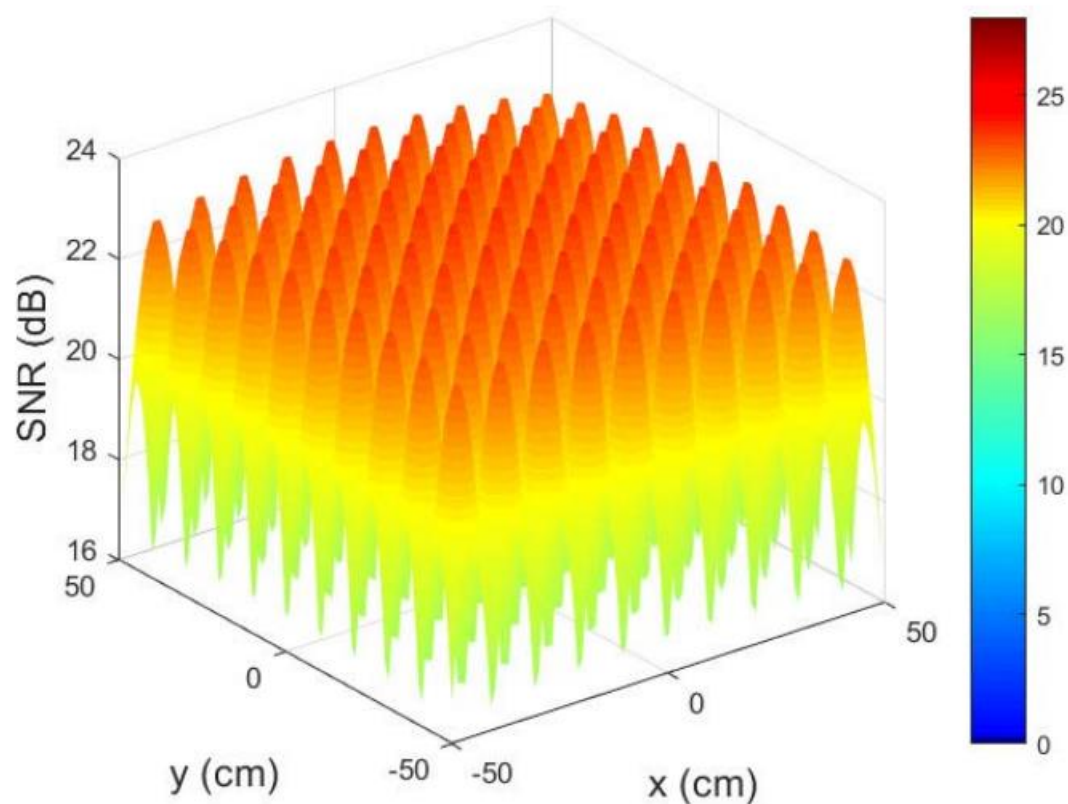
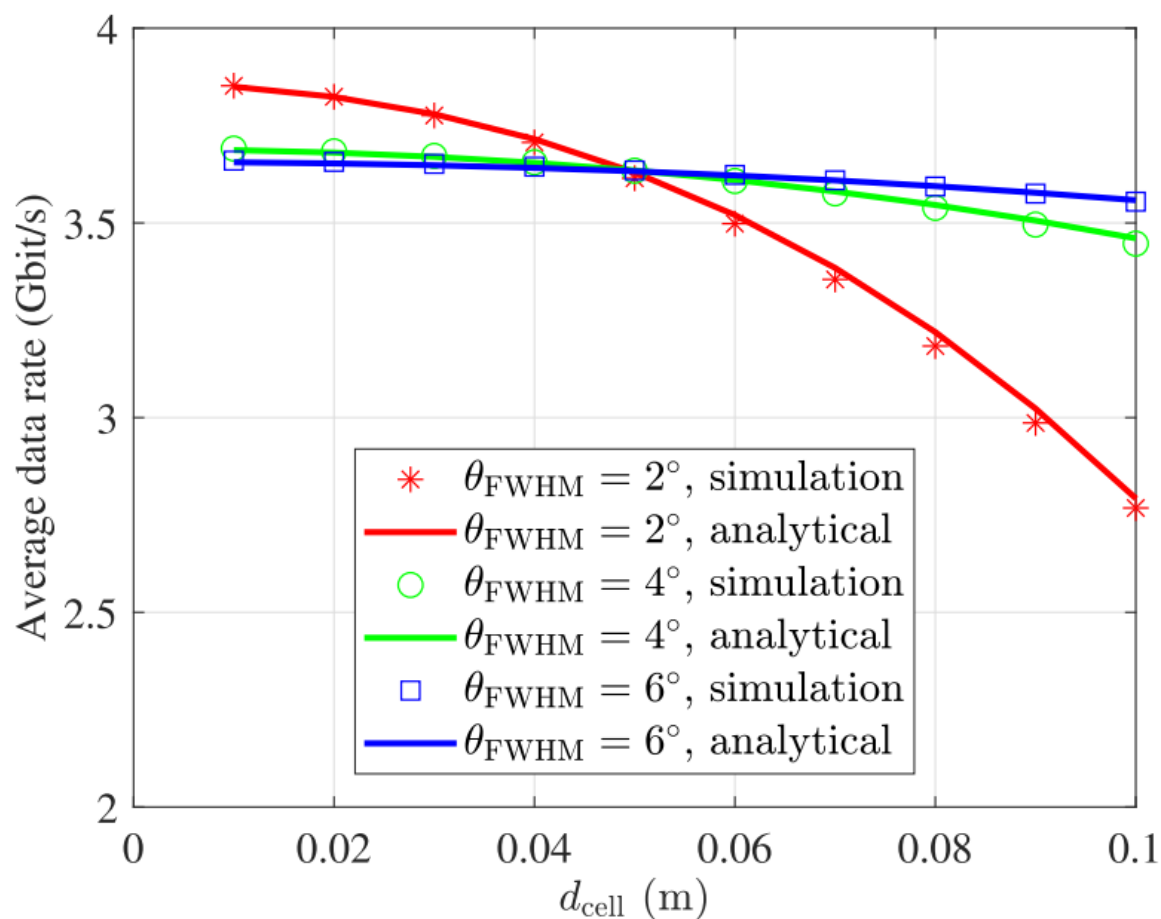
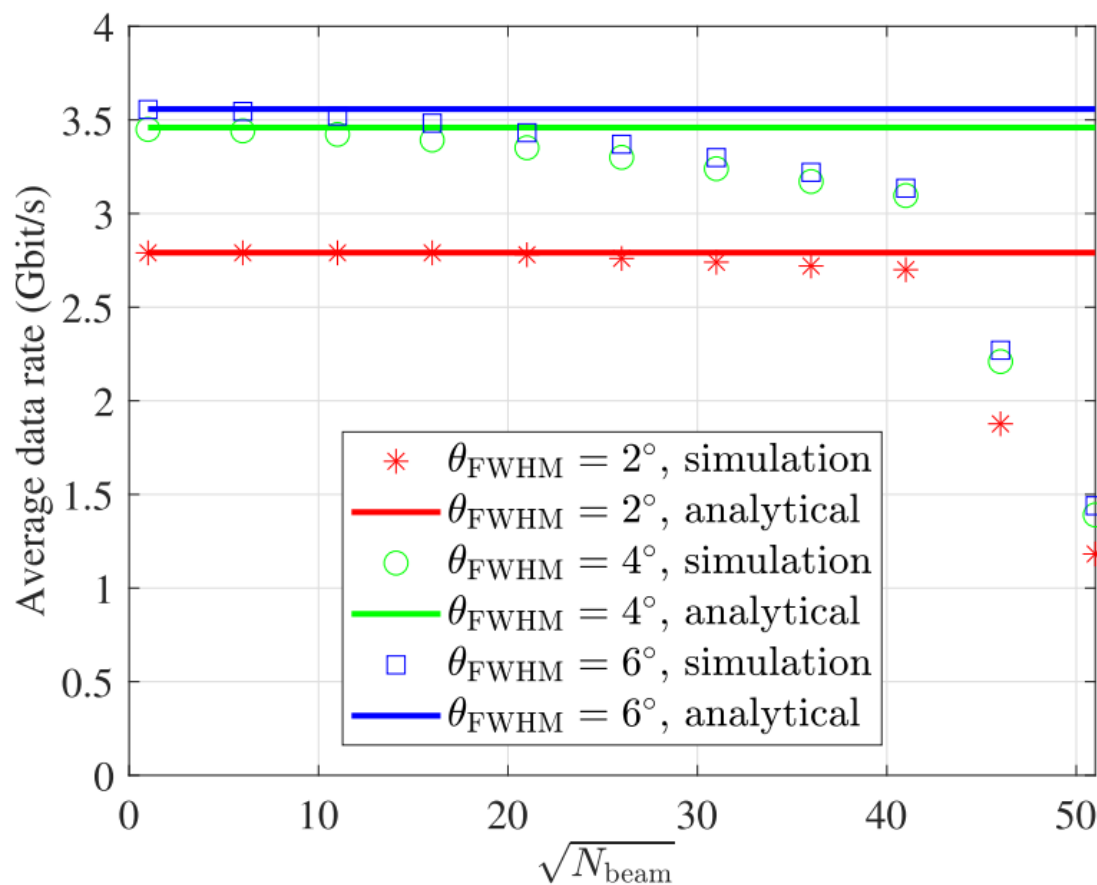


图12. 单用户情况下VCSEL阵列系统的SNR分布, $\theta_{\text{FWHM}}=4^\circ$,
10x10cell



(a) Average data rate for the central cell with different cell size.

图13. 单用户情况下VCSEL阵列系统的用户平均数据率



(b) Average data rate for the VCSEL array system with $\sqrt{N_{\text{beam}}} \times \sqrt{N_{\text{beam}}}$ cells. ($d_{\text{cell}} = 10$ cm)

图13. 单用户情况下VCSEL阵列系统的用户平均数据率

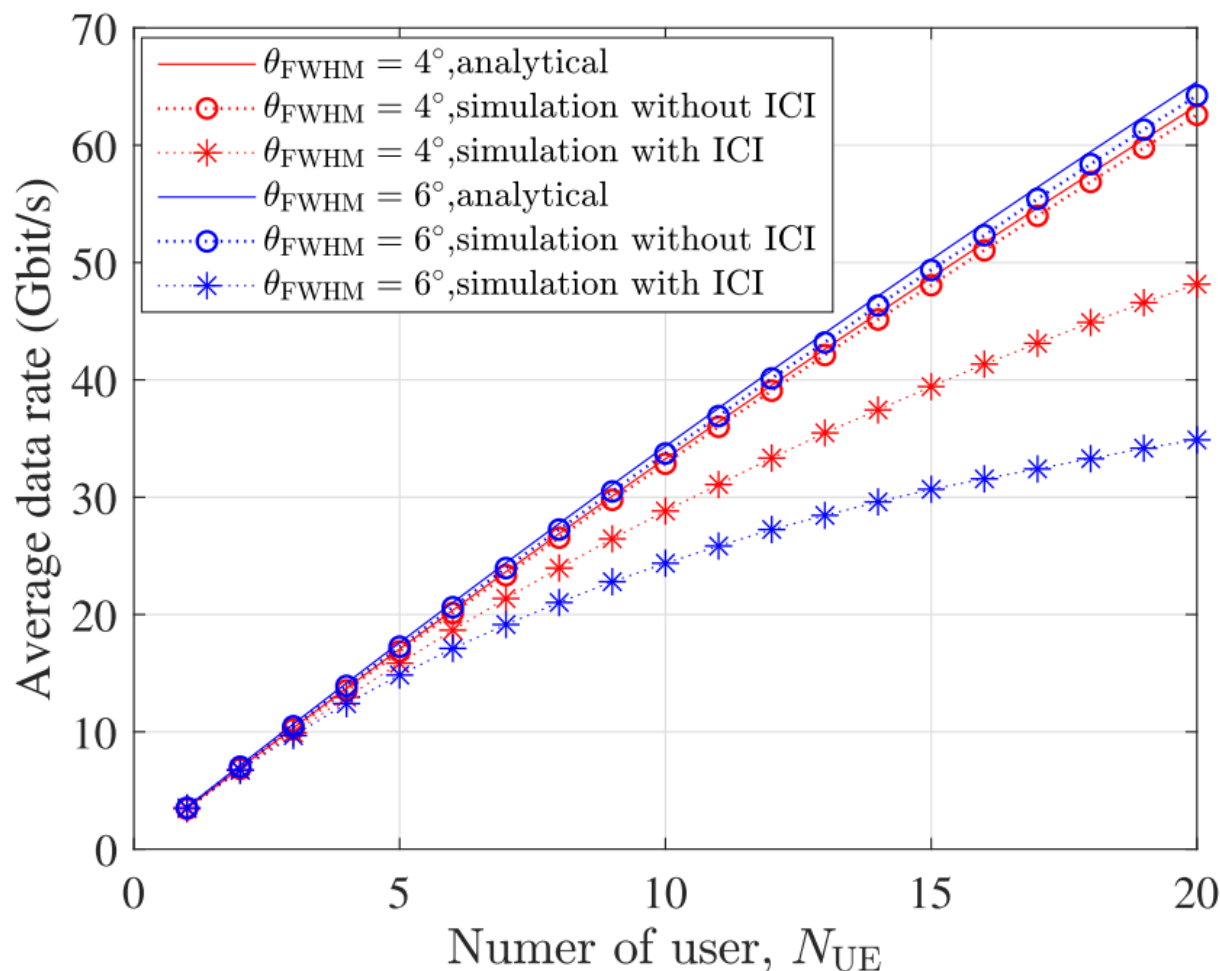


图14. 多用户情况下VCSEL阵列系统的用户平均数据率

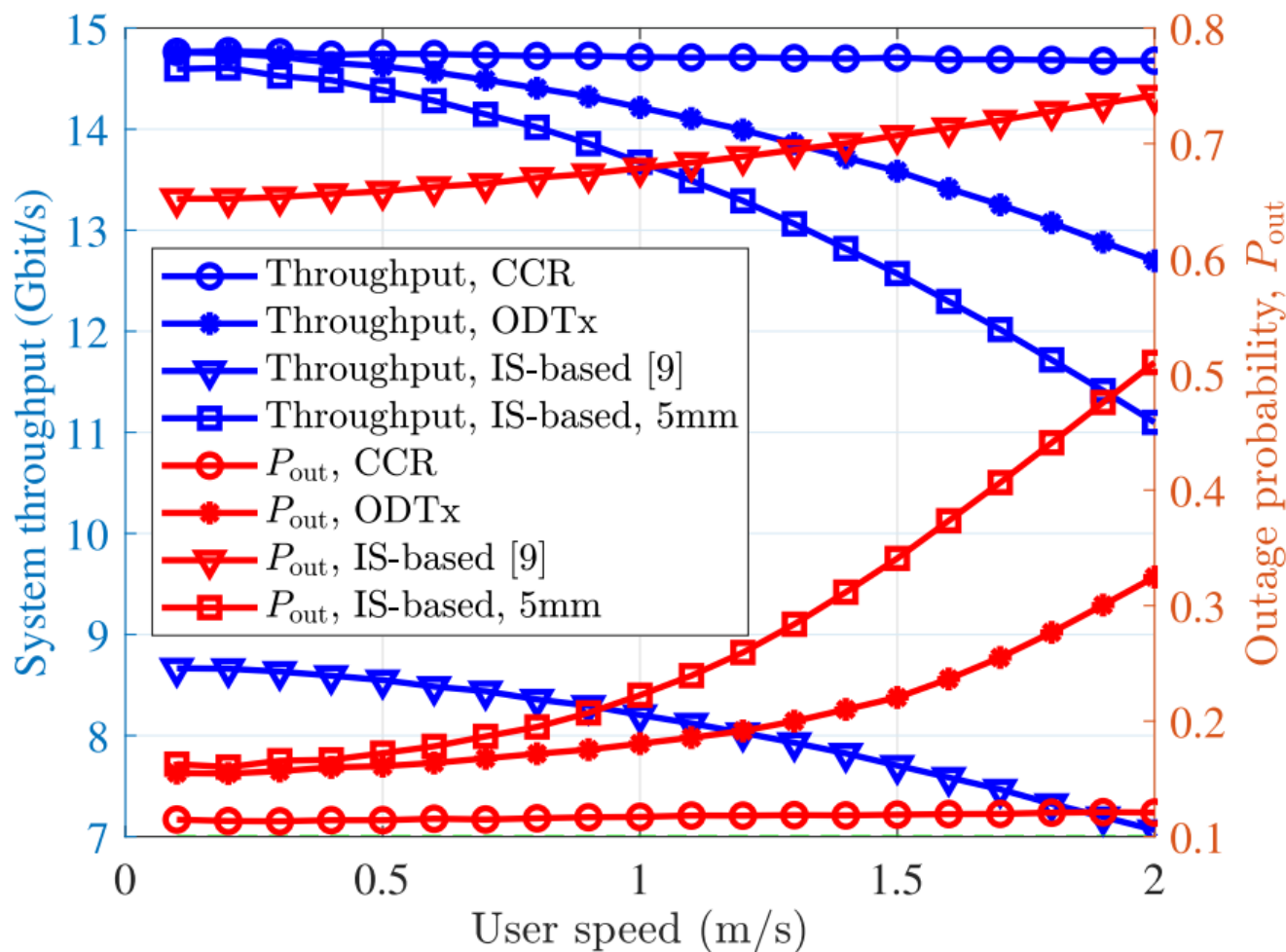


图15. 评估用户速度对系统吞吐量和Outage probability的影响。



在这项研究中，提出了一种新型的VCSEL阵列系统，该系统支持高数据速率、低延迟和多用户接入，而无需昂贵/复杂的硬件。

此外，为了支持移动用户，提出了两种光束激活方法。

基于CCR的光束激活可以实现低功耗和几乎零延迟，允许对高速用户进行实时光束激活。

基于ODTx的机制适用于低速用户，并且对随机方向非常鲁棒。



未来研究方向

谢谢各位领导和专家!

敬请大家批评指正!

主讲人：曾志宏

