

基于垂直光波束选择的可见光通信物理层安全表现增强方法

丁举鹏¹,易芝玲²,赵楷¹,王丽丽³

(1.新疆大学 信息科学与工程学院,乌鲁木齐 830046;

2.中国移动通信有限公司研究院,北京 100053;3.鲁东大学 信息与电气工程学院,山东 烟台 264025)

摘要:为改善可见光链路的保密传输表现,在分析静态、动态光波束配置下的链路保密容量的基础上,提出了基于动态垂直非朗伯光波束选择的可见光通信物理层安全表现增强方法,即根据不同的发射器、保密用户及窃听者位置关系动态地选择垂直候选光波束。量化结果显示:在典型室内环境下,相比传统静态朗伯光波束配置,基于动态垂直非朗伯光波束配置的平均保密容量增益高达 $3.03 \text{ b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$,增益比例高达 86%。

关键词:物理层安全;可见光通信链路;光波束选择;保密容量;非朗伯波束

中图分类号: TN919 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)06-0029-06

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.06.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Security performance enhancement method of visible light communication physical layer based on vertical beam selection

DING Jupeng¹, I Chih-Lin², ZHAO Kai¹, WANG Lili³

(1. School of Information Science and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China; 3. School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai Shandong 264025, China)

Abstract: In order to improve the secrecy transmission performance of visible light link, based on the analysis of link secrecy capacity under static and dynamic optical beam configurations, a security performance enhancement method of visible light communication physical layer based on dynamic vertical non-Lambertian beam is proposed, which selects the vertical candidate beam dynamically according to the different emitter, secrecy user and position relationship of eavesdropper. Quantization results show that, in a typical indoor environment, compared to a conventional static Lambertian beam configuration, the average secrecy capacity gain based on dynamic vertical non-Lambertian beam configuration is up to $3.03 \text{ b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, and the gain ratio is up to 86%.

Key words: physical layer security, visible light communication link, optical beam selection, secrecy capacity, non-Lambertian beams

0 引言

作为演进中第五代移动通信技术(5G)以及未来

收稿日期:2022-02-09。

基金项目:国家自然科学基金项目(62061043)资助;新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2019D01C020)资助;新疆维吾尔自治区全职引进高层次人才项目(042419004)资助;新疆维吾尔自治区天山雪松计划项目(2020XS27)资助。

作者简介:丁举鹏(1985—),男,博士,现任教于新疆大学。研究方向为无线光通信及组网、可见光通信及定位、光与无线的融合、物理层安全、空天地海无线光通信、5G及B5G移动通信等,主持国家自然科学基金(地区基金、青年基金)、新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目、新疆维吾尔自治区全职引进高层次人才项目和自治区天池博士计划项目等多项科研项目。



6G的重要潜在候选技术,基于绿色、高效发光二极管(LED)的可见光通信(VLC)正处于持续的发展和完善之中。VLC具备频谱资源丰富、不受传统电磁干扰、潜在容量大和保密性强等优势^[1-5]。不同于传统射频无线信号,可见光信号不会穿过房间墙壁传播到室外,因而客观上具备更高的安全性。但是,由于VLC自身广播式的传输覆盖特性,对于房间内潜在的窃听行为,VLC同样需要面对保密信息被非法拦截的严峻挑战^[6-10]。为此,研究人员将物理层安全技术引入VLC研究领域,以期在物理层构筑VLC的首道信息安全屏障。截至目前,以空间迫零、人工加扰和波束成形等为代表的物理层安全技术已经展现出优良的保密传输增益特性^[11-13]。但上述技术方案仍然局限于朗伯光波束的

技术范式,对商用 LED 光源多样化的非朗伯波束特性缺少充分的考虑^[11-13]。另外,现有保密 VLC 方案高度依赖分布式光源配置,在此类配置下,根据分布式光源阵列到保密用户与窃听者之间差异化的信道增益矢量,可以为每个分布式发射器设定关联的发射权值。全部发射权值所构造的权值矢量由窃听者信道矢量的零空间组成。一般来说,只要保密用户和窃听者彼此空间位置不满足高度相邻,两者的信道矢量就会有显著差异。因此,在发射器权值配置下,窃听者所捕获的来自不同分布式发射器的保密可见光信号叠加后相互抵消,但保密用户捕获的来自不同发射器的信号叠加后仍然得到保留,从而增强保密速率。在单光源也就是单发射器场景下,原有的信道矢量被缩减至信道标量,因此无法生成所需的零空间。在该标量信道配置下,如果要使窃听者信号接收为零,就需要将权值标量设置为零。但是,该标量设置在将窃听者接收迫零(等效于不发送任何保密数据流,直到对 LED 发射器加载直流驱动点亮)的同时,也不可避免地强制保密用户接收迫零。因此,上述方案仅能适用于具有多个分布式 LED 光源发射器的场景,难以直接匹配仅有单一光源发射器的众多室内场景。

与此同时,一些研究工作已经初步探索借助光波束的多样性来弥补发射器数量的不足^[14-17]。但是,对于 VLC 物理层安全这一重要分支研究领域,关于 LED 光波束维度可提供的潜在增益特性的研究还较少。综合上述分析,不同于传统基于朗伯光波束的静态配置方案,本文提出一种包含非朗伯波束的动态光波束配置方案,以期提升保密传输表现。

1 可见光链路保密容量

本文根据朗伯及非朗伯可见光链路特性^[18],对比分析静态、动态光波束配置的链路保密容量。

1.1 静态光波束配置下链路保密容量

将整体室内场景视为独立的 VLC 覆盖小区,给安放于天花板的单一光源发射器加载电信号数据,并以广播方式将光信号数据发送给接收平面上的保密用户。为便于分析,本文假设光源发射器采用二进制脉冲幅度调制,则携带保密信息的光信号可以表示为

$$x = \alpha P_{\text{DC}} d \quad (1)$$

其中, d 为归一化数据符号, $d \in [-1, 1]$; α 为调制指数, $\alpha \in [0, 1]$; P_{DC} 为发射功率。由于朗伯 VLC 信道属于确定性高斯信道,因此保密用户 Bob 和窃听者 Eve 所接收信号可分别表示为

$$y_{\text{Bob}}^{\text{Lam}} = \alpha P_{\text{DC}} H^{(0)}(S^{\text{Lam}}, R^{\text{Bob}}) d + z_{\text{Bob}} \quad (2)$$

$$y_{\text{Eve}}^{\text{Lam}} = \alpha P_{\text{DC}} H^{(0)}(S^{\text{Lam}}, R^{\text{Eve}}) d + z_{\text{Eve}} \quad (3)$$

其中, S^{Lam} 为朗伯光源, z_{Bob} 和 z_{Eve} 分别为保密用户 Bob 和窃听者 Eve 各自光电探测器输出的高斯白噪声, $H^{(0)}(S^{\text{Lam}}, R^{\text{Bob}})$ 和 $H^{(0)}(S^{\text{Lam}}, R^{\text{Eve}})$ 分别为保密用户 Bob 和窃听者 Eve 的信道增益,其具体取值可通过式(4)计算。

$$H^{(0)}(S^{\text{Lam}}, R) = \begin{cases} \frac{A}{P_{\text{norm}} d_0^2} I_{\text{Lam}}(\varphi_0) \cos \theta_0 \frac{\pi^2}{\sin^2(\theta_{\text{FOV}})} r, & 0 \leq \theta_0 \leq \theta_{\text{FOV}} \\ 0, & \theta_0 \geq \theta_{\text{FOV}} \end{cases} \quad (4)$$

其中, P_{norm} 为功率归一化系数, $I_{\text{Lam}}(\varphi_0)$ ^[18]为朗伯光波束辐射强度, A 为接收器光电二极管(PD)探测面积, d_0 为光源与接收器之间视距成像(LOS)距离, φ_0 和 θ_0 分别为 LOS 光信号出射角和入射角, θ_{FOV} 为接收器视场角(FOV), r 为 PD 响应度。

朗伯光束配置下,保密用户 Bob 和窃听者 Eve 的信噪比可分别表示为

$$\text{SNR}_{\text{Bob}}^{\text{Lam}} = \frac{\alpha^2 P_{\text{DC}} \|H^{(0)}(S^{\text{Lam}}, R^{\text{Bob}})\|_1^2}{\delta_{\text{Bob}}^2} \quad (5)$$

$$\text{SNR}_{\text{Eve}}^{\text{Lam}} = \frac{\alpha^2 P_{\text{DC}} \|H^{(0)}(S^{\text{Lam}}, R^{\text{Eve}})\|_1^2}{\delta_{\text{Eve}}^2} \quad (6)$$

参考已有文献处理方式,假设两者噪声功率相等,即 $\delta_{\text{Bob}}^2 = \delta_{\text{Eve}}^2 = \delta^2$,在窃听者 Eve 存在情况下,保密用户 Bob 通过朗伯可见光链路的可达保密容量^[5-7]为

$$C_{\text{static}}^{\text{Lam}} = \left[\log_2(1 + \text{SNR}_{\text{Bob}}^{\text{Lam}}) - \log_2(1 + \text{SNR}_{\text{Eve}}^{\text{Lam}}) \right]^+ \quad (7)$$

式(7)中引入符号 $[\cdot]^+$,以确保保密容量非负性;

当 $\text{SNR}_{\text{Bob}}^{\text{Lam}} < \text{SNR}_{\text{Eve}}^{\text{Lam}}$ 时,可达保密容量被强制为 0。

本文采用 NSPW345CS 系列光源产品发射非朗伯光波束。参照式(7),通过非朗伯可见光链路的可达保密容量^[5-7]为

$$C_{\text{static}}^{\text{NSPW}} = \left[\log_2(1 + \text{SNR}_{\text{Bob}}^{\text{NSPW}}) - \log_2(1 + \text{SNR}_{\text{Eve}}^{\text{NSPW}}) \right]^+ \quad (8)$$

其中, $\text{SNR}_{\text{Bob}}^{\text{NSPW}}$ 和 $\text{SNR}_{\text{Eve}}^{\text{NSPW}}$ 分别代表静态非朗伯光波束配置下,保密用户 Bob 和窃听者 Eve 的信噪比。

1.2 动态垂直光波束配置下链路保密容量

不同于上述静态光波束配置,本文提出的动态垂直光波束配置方案包含 2 种候选非朗伯光波束,如图 1 所示。2 个候选非朗伯光波束的宽横截面方向彼此垂直,因此两者的初始方位角相差 90°。参照前文静态非朗伯

波束配置情况,对应单一候选非朗伯光波束 $SNR_{\text{Beam}}^{\text{NSPW}}$ 的 LOS 信道增益可以表示为

$$H^{(0)}(S_{\text{Beam}}^{\text{NSPW}}, R, \Delta\alpha_i) = \begin{cases} \frac{A}{d_0^2} I_{\text{NSPW}}(\varphi_0, \alpha_0 + \Delta\alpha_i) \cos\theta_0 \frac{n^2}{\sin^2(\theta_{\text{FOV}})} r, 0 \leq \theta_0 \leq \theta_{\text{FOV}} \\ 0, \theta_0 \geq \theta_{\text{FOV}} \end{cases} \quad (9)$$

其中, I_{NSPW} 为非朗伯光波束辐射强度, $S_{\text{Beam}}^{\text{NSPW}}$ 为非朗伯光波束, $\Delta\alpha_i$ 为第 i 束候选光波束的初始方位角。在本文中,当 $i=1$ 时, $\Delta\alpha_i=0^\circ$; 当 $i=2$ 时, $\Delta\alpha_i=90^\circ$ 。在仅使用第 i 束候选光波束时,保密用户 Bob 和窃听者 Eve 的信噪比表达式分别为

$$SNR_{\text{Bob}}^{\text{dyna}}(\Delta\alpha_i) = \frac{\alpha^2 P_{\text{DC}} \|H^{(0)}(S_{\text{Beam}}^{\text{NSPW}}, R^{\text{Bob}}, \Delta\alpha_i)\|_1^2}{\delta_{\text{Bob}}^2} \quad (10)$$

$$SNR_{\text{Eve}}^{\text{dyna}}(\Delta\alpha_i) = \frac{\alpha^2 P_{\text{DC}} \|H^{(0)}(S_{\text{Beam}}^{\text{NSPW}}, R^{\text{Eve}}, \Delta\alpha_i)\|_1^2}{\delta_{\text{Eve}}^2} \quad (11)$$

假设保密用户 Bob 和窃听者 Eve 都是 VLC 网络的注册用户,因此 VLC 发射器可以根据两者反馈较为理想地掌握 Bob 及 Eve 空间位置信息。在所提出的非朗伯动态波束配置方案中,VLC 发射器利用已掌握的候选波束辐射特性和上述空间位置信息估计出每种候选波束配置下保密用户 Bob 的可达保密容量,进而将 2 种候选波束配置下最大保密容量的关联波束选定为实际加载数据信号的光波束。这种动态垂直非朗伯光波束选择方法有利于保密用户 Bob 的光波束,从而实现可达保密容量的最大化。该方案下可达保密容量应表示为

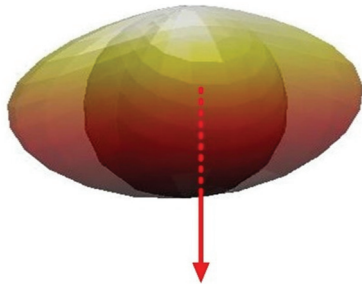


图1 包含2种动态垂直光波束的空间辐射特性图

$$C_{\text{dyna}}^{\text{NSPW}} = \max_i \left[\log_2 \left(1 + SNR_{\text{Bob}}^{\text{dyna}}(\Delta\alpha_i) \right) - \log_2 \left(1 + SNR_{\text{Eve}}^{\text{dyna}}(\Delta\alpha_i) \right) \right] \quad (12)$$

动态垂直光波束选择方法的具体流程包括:①在波束测量阶段,发射器首先将波束选择导频信号仅加载到具备水平方位波束(波束的方位角为 0°)特性的 LED 子阵列,保密用户接收器和窃听者接收器对检测到的导频光信号信噪比进行检测并缓存记录。此时,潜在窃听者尽管不具备接入下行链路中保密数据的权限,但其仍然是该 VLC 接入网络中的注册用户,因此必须按照信息安全需求,满足网络对其信道状态信息的可用性。在第二个测量时隙内,发射器将波束选择导频信号仅加载到具备垂直方位波束(波束的方位角为 90°)的 LED 子阵列,保密用户及窃听者接收器二次检测光导频信号信噪比并缓存记录。②判定反馈阶段,通过低速率射频链路或者红外上行链路,保密用户及潜在窃听者各自将测量并缓存的波束强度信息反馈至发射器。③在波束判定阶段,根据可达保密速率表达式,发射器分别估计在水平方位波束配置、垂直方位波束配置时的可达保密速率,并对这 2 项可达保密速率进行比较,将其中更高一项的关联波束选定为用于加载保密数据信息的工作波束。④在选择执行阶段,依据所选定的工作波束标识信息,通过波束选择开关,发射器将数据流切换到具备选定工作波束特性的 LED 子阵列。

基于动态垂直光波束选择的 VLC 物理层安全传输系统框图如图 2 所示,该系统由基于垂直光波束的

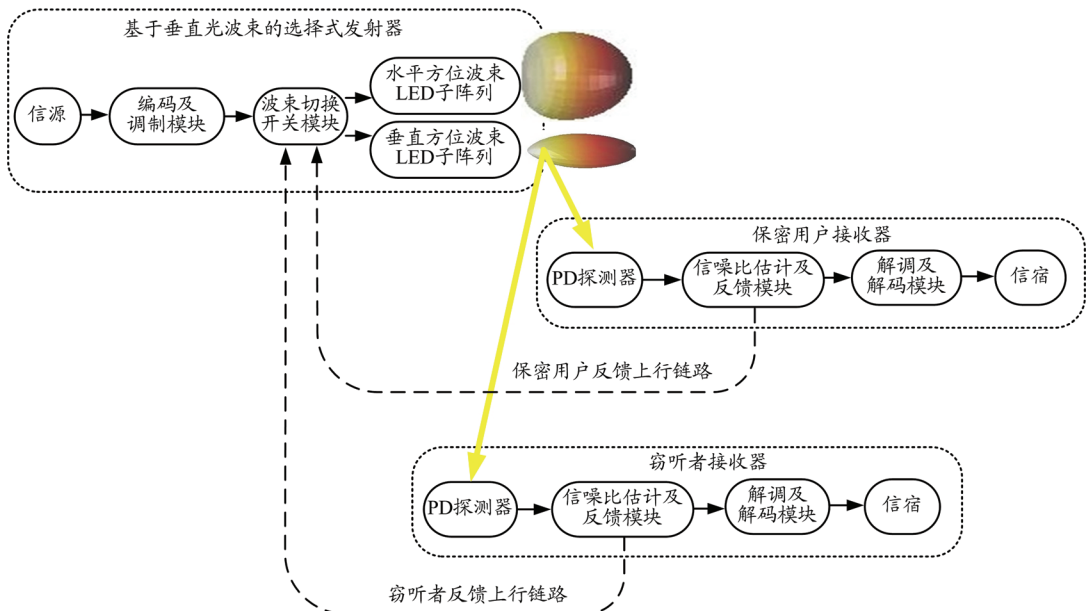


图2 基于动态垂直光波束选择的 VLC 物理层安全传输系统框图

选择式发射器、保密用户接收器和窃听者接收器三部分组成。其中, 发射器内部主要包括信源、编码及调制模块、波束切换开关模块、水平方位波束 LED 子阵列和垂直方位波束 LED 阵列; 保密用户接收器和窃听者接收器内部主要包括 PD 探测器、信噪比估计及反馈模块、解调及解码模块、信宿。

上述光波束动态选择过程仅仅改变加载到全部候选光波束上的交流分量(数据信号分量), 不改变各个候选光波束的直流分量(驱动光源稳定点亮的分量), 因而不会影响 VLC 发射器正常的通用照明功能。另外, 本文提出的方案不依赖多光源同时存在, 只要有单一光源就可以适用, 因此所提方案具备广泛的场景适用性。

2 数值仿真及分析

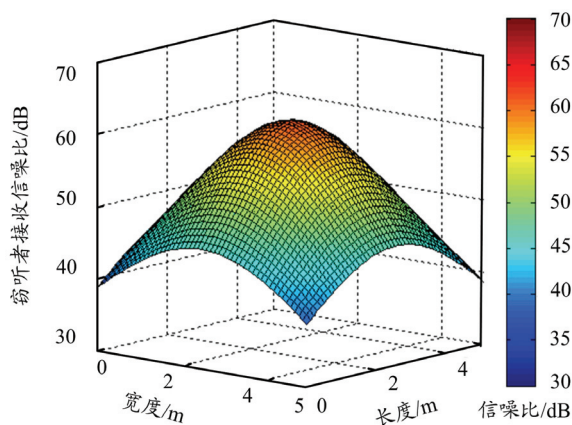
在同一典型室内场景下, 为了量化展示所提出的光波束选择方案对可见光链路保密容量的影响, 本文对静态、动态 2 种垂直波束配置下的可见光保密传输特性进行比较。为不失一般性, 与已有文献一致, 本文引入中等尺寸的室内场景, 长、宽、高分别为 5.0 m、5.0 m、3.0 m, 接收器的全部潜在接收位置距离地面高度为 0.85 m。假设所设计的光源发射器都垂直指向地面, 接收器法向在各个候选接收位置都垂直朝向房间天花板。保密用户 Bob 坐标位置为 (2.5 m, 2.5 m, 0.85 m) (接收平面中心位置)。其它主要参数设定如表 1 所示。

在所构场景中, 接收平面上任何位置都可能是窃听者 Eve 的潜在接收位置。因此, 本文首先评估静态及动态光波束配置下窃听者 Eve 的信噪比空间特性。

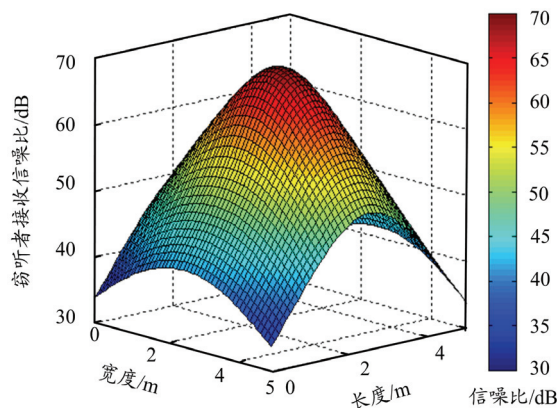
表 1 系统仿真参数

参数	取值
LED 光源朗伯指数 m_l	1
总发射光功率/W	54
光源阵列空间坐标/m	(2.5, 2.5, 3.0)
LED 光源阵列俯仰角/(°)	-180
LED 光源阵列方位角/(°)	180
接收器俯仰角/(°)	0
接收器方位角/(°)	180
接收器视场角 θ_{fov} /(°)	90
PD 探测器面积 A/cm^2	1
PD 探测器响应度 $r/(\text{mA} \cdot \text{mW}^{-1})$	0.54
窃听接收者高度/m	0.85
透镜折射指数 n	1.5
室内区域的平均噪声功率 δ^2/A^2	1.47×10^{-13}

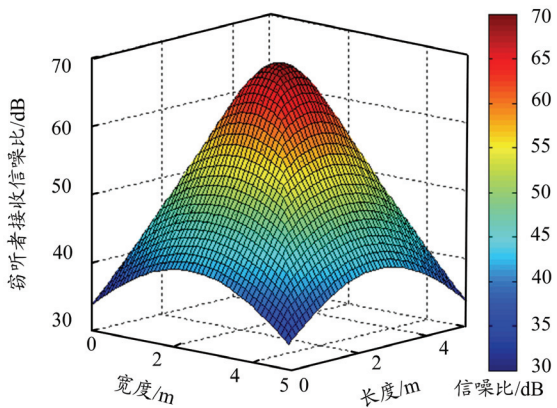
静态及动态光波束配置下窃听者 Eve 的信噪比空间分布如图 3 所示。图 3(a) 中, 在传统静态朗伯光波束配置下, 窃听者 Eve 信噪比空间分布波动相对有限, 对应波动范围为 38.68~61.43 dB, 均值信噪比为 50.76 dB。由于朗伯光波束发散性强且具有旋转对称性, 所以呈现出相对一致且对称的信噪比分布。图 3(b) 中, 在静态非



(a) 静态朗伯光波束配置



(b) 静态非朗伯光波束配置



(c) 动态垂直非朗伯光波束配置

图 3 不同光波束配置下信噪比空间分布比较

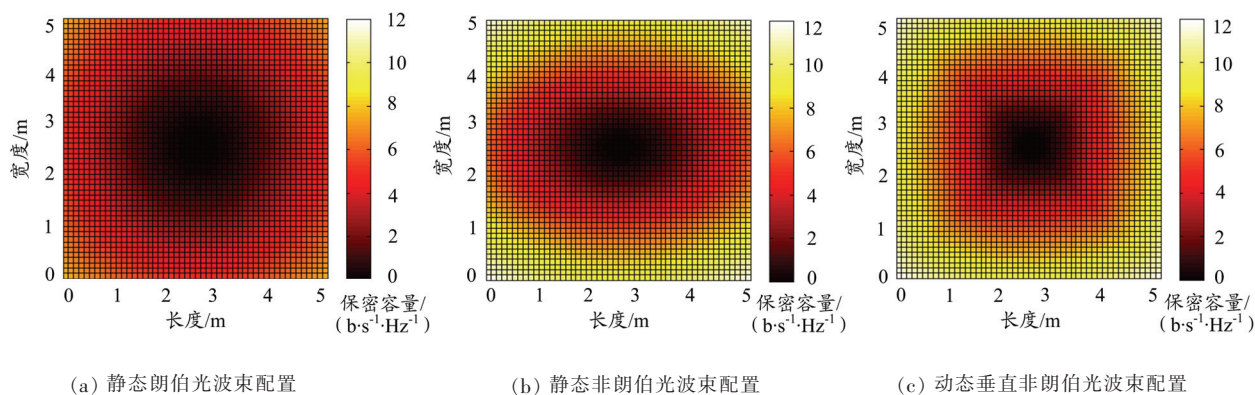


图4 不同光波束配置下保密容量空间分布比较

朗伯光波束配置条件下, 窃听者 Eve 信噪比动态范围为 33.81~69.01 dB, 均值信噪比略轻微升至 58.48 dB。此时, 由于非朗伯光波束发散性更弱且具有旋转非对称性, 所以呈现出差异性更强且非对称的信噪比分布。图 3(c) 中, 在动态垂直非朗伯光波束配置条件下, 窃听者 Eve 信噪比动态范围为 33.81~69.01 dB, 均值信噪比却降至 49.24 dB。对比图 3(b) 与图 3(c), 虽然同样是基于非朗伯光波束, 但是动态波束配置可以根据保密传输表现选择更为有利的候选光波束, 因此该配置下窃听者 Eve 信噪比呈现出对称的信噪比分布。

相应地, 本文所提出的方法倾向于选择增强保密用户接收信噪比, 同时劣化窃听者接收信噪比的候选光波束。因此, 在通常情况下, 该方案能够改善保密用户的接收信噪比, 进而改善其误码率表现。

静态及动态光波束配置下可达保密容量空间分布如图 4 所示。可以看出, 相比传统静态朗伯光波束配置情况, 静态非朗伯光波束配置将可达保密容量空间动态范围从 0~7.56 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 改善至 0~11.69 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 相应地可达平均保密容量从初始的 3.54 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 被抬升至 5.87 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$; 动态垂直光波束配置将可达保密容量空间动态范围拉伸至 0~11.70 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 平均保密容量则提升至 6.57 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 相对静态朗伯光波束配置情况, 增益高达 3.03 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 增益比例高达 86%; 动态垂直非朗伯光波束配置下可达保密容量呈现明显的对称性, 中心弱保密区域得到有效压缩, 且被限定于保密用户附近的矩形区域。

为便于直观分析, 本文通过累积分布函数对传统静态及动态垂直光波束配置的可达保密容量进行比较, 结果如图 5 所示。在静态朗伯光波束配置下, 有高达 56% 的窃听者位置能够使得保密用户获得低于 4 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的可达保密容量。而在静态非朗伯光波束配置设定下, 这一比例被降至 26.9%。在本文提出的动

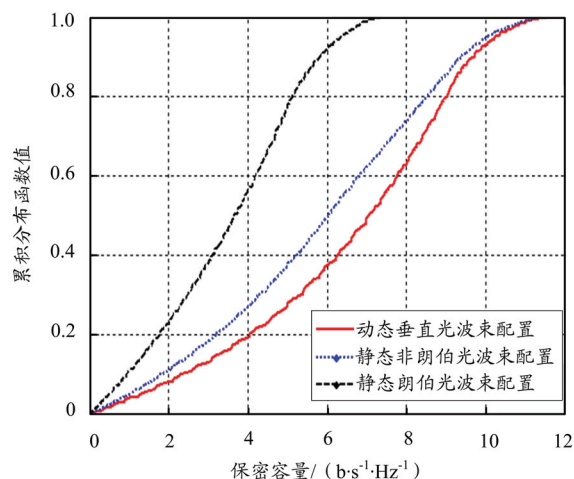


图5 静态及动态光波束配置下保密容量的累计概率分布

态垂直光波束配置条件下, 这一比例被进一步降至 19.3%, 保密相对弱覆盖表现得到有效改善。

3 结束语

针对已有保密 VLC 方案过度聚焦分布式多光源场景, 难以适用于仅有单光源场景的局限性, 本文提出了基于垂直光波束选择的 VLC 物理层安全表现增强方法。该方法能够充分利用候选光波束之间空间辐射特性的显著差异性, 根据保密用户和窃听者的空间位置信息, 将保密信息动态地加载到能为用户提供最大保密传输容量的候选光波束。在典型的单光源场景中, 与传统静态朗伯光波束配置相比, 本文提出的方法可以将平均保密容量从 3.54 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 提升至 6.57 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$, 保密容量低于 4 $\text{b} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1}$ 的空间接收位置占比从初始配置的 56% 改善至 19.3%。因此, 所提方法可以显著降低保密相对弱覆盖位置的整体占比。

参考文献:

- [1] HARALD H, LIANG Y, YUNLU W, et al. What is LiFi [J]. Journal of

Lightwave Technology, 2015, 34(6): 1533–1544.

[2] AMITAV M, ALI A, JING H, et al. Principles of physical layer security in multiuser wireless networks: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2010, 16(3): 1806–1818.

[3] MOSTAFA A, LAMPO L. Physical-layer security for MISO visible light communication channels[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(9): 1806–1818.

[4] MOSTAFA A, LAMPO L. Physical-layer security for indoor visible light communications[C]// IEEE International Conference on Communications (ICC), June 10–14, 2014, Sydney, NSW. New York: IEEE, 2014: 3342–3347.

[5] MOSTAFA A, LAMPO L. Pattern synthesis of massive LED arrays for secure visible light communication links[C]// IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW), June 8–12, 2015, London, United Kingdom. New York: IEEE, 2015: 1350–1355.

[6] MOSTAFA A, LAMPO L. Securing visible light communications via friendly jamming[C]// IEEE Globecom Workshops, December 8–12, 2014, Austin, USA. New York: IEEE, 2014: 524–529.

[7] CHEN Z, WANG X. A method for improving physical layer security in visible light communication networks [C]// IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), October 29–31, 2018, Paris, France. New York: IEEE, 2018: 1–5.

[8] SUNGHWAN C, GAOJIE C, JUSTIN P. Securing visible light communication systems by beamforming in the presence of randomly distributed eavesdroppers [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(5): 2918–2931.

[9] ASHISH K, GREGORY W. Secure transmission with multiple antennas I: the MISOME wiretap channel[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(7): 3088–3104.

[10] 张瑾. 室内可见光通信物理层安全通信方法研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2019.

[11] CHO S, CHEN G, JUSTIN P. Physical layer security in visible light communication systems with randomly located colluding eavesdroppers[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2018, 7(5): 768–771.

[12] CHO S, CHEN G, JUSTIN P. Securing visible light communication systems by beamforming in the presence of randomly distributed eavesdroppers[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(5): 2918–2931.

[13] CHO S, CHEN G, JUSTIN P. Enhancement of physical layer security with simultaneous beamforming and jamming for visible light communication systems[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2019, 14(10): 2633–2647.

[14] DING J, I C, XU Z. Indoor optical wireless channel characteristics with distinct source radiation patterns [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(1): 1–15.

[15] DING J, I C, XIE R, et al. Actual radiation patterns-oriented non-deterministic optical wireless channel characterization [C]//Springer Chinese Conference on Biometric Recognition, August 11–12, 2018, Urumchi, China. Berlin: Springer, 2018: 517–527.

[16] MORENO I, SUN H. Modeling the radiation pattern of LEDs [J]. Optics Express, 2008, 16(3): 1808–1819.

[17] TOSHIHIKO K, MASAO N. Fundamental analysis for visible light communication system using LED light[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100–107.

[18] 丁举鹏, 易芝玲, 赵楷, 等. 可见光通信非朗伯光波束发射分集技术[J]. 光通信技术, 2022, 46(1): 44–48.