

DOI:10.11918/202108068

基于 SLIPT 的混合可见光/射频协作通信系统性能分析

张智宣¹, 李 强¹, 彭辉杰¹, 葛晓虎¹, 张继良²

(1. 华中科技大学 电子信息与通信学院, 武汉 430074; 2. 谢菲尔德大学 电气与电子工程系, 谢菲尔德 S10 2TN)

摘 要: 传统无线通信传输和网络接入依赖射频通信技术。随着海量移动设备涌入, 频谱资源匮乏、移动设备电能受限等问题对新一代物联网的可持续发展提出了严峻挑战。本文通过融合传统无线射频通信技术与新型可见光通信技术, 构建一种基于可见光信息能量同传(simultaneous lightwave information and power transfer, SLIPT)的混合可见光/射频协作通信系统。为了建立可见光信源与远距离目的端之间的有效通信连接, 考虑在光源的覆盖范围内存在一个随机移动的离网中继; 通过中继转发, 可将端到端链路分为可见光通信链路和射频通信链路两部分。在第一跳可见光链路中, 中继将接收的光信号分离为用于信息解码的交流成分和用于能量收集的直流成分; 在第二跳射频链路中, 中继利用收集的能量将解码信号以射频方式转发至目的端。考虑可见光信源受到平均功率与峰值功率的双重约束条件, 本文通过综合考虑两跳传输之间差异化信道状态、中继位置、中继信号处理、中继能量收集等不同因素, 得到了系统端到端中断概率、数据吞吐量和能量效率的精确闭合表达式。仿真实验结果表明, 通过选择合适的参数配置以平衡两跳传输之间的性能, 本文所提方案能够有效促进复杂系统内部能量流和信息流的匹配, 从而显著提升可靠性、吞吐量和能量效率等关键性能指标。

关键词: 物联网; 可见光通信; 可见光信息能量同传(SLIPT); 协作中继; 端到端中断概率

中图分类号: TN92

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2022)05-0034-09

Performance analysis of a hybrid VLC/RF cooperative communication system based on SLIPT

ZHANG Zhixuan¹, LI Qiang¹, PENG Huijie¹, GE Xiaohu¹, ZHANG Jiliang²

(1. School of Electronic Information and Communications, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Department of Electronic and Electrical Engineering, The University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, UK)

Abstract: Traditional wireless communication transmission and network access rely on radio frequency (RF) communication technologies. With the influx of massive mobile devices into the network, the problems such as spectrum scarcity and energy constraint pose challenges to the sustainable development of the new generation Internet-of-Things (IoT). Through the integration of traditional RF communication technology and emerging visible light communication (VLC) technology, an efficient and robust hybrid VLC/RF cooperative communication system with simultaneous lightwave information and power transfer (SLIPT) was proposed. To bridge the light-emitting diode (LED) source and the destination far away, an off-the-grid relay that can move randomly within source coverage was introduced. The end-to-end link could be divided into two hops (i. e. VLC link and RF link) through relay forwarding. Specifically, in the 1st hop, the optical signal received at the relay was separated into alternating current and direct current components for information decoding and energy harvesting respectively. Then, the harvested energy was used to forward the decoded source information to the destination by using RF in the 2nd hop. Considering the constraints imposed by the average power and peak power on the LED source, the distinct channel conditions across the two hops, the relay location, signal processing, and the energy harvested by the relay were taken into account in this study. On this basis, the end-to-end outage probability, data throughput, and energy efficiency of the system were analytically derived in closed-form expressions. Simulation results demonstrate that with proper parameter configurations, a balance could be reached between the transmission performances of the two hops. The proposed method could effectively promote the matching between the information flow and the energy flow in the system, thus significantly improving the reliability, throughput, and energy efficiency of the system.

Keywords: Internet-of-Things (IoT); visible light communications (VLC); simultaneous lightwave information and power transfer (SLIPT); cooperative relay; end-to-end outage probability

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: 国家自然科学基金(61971461);

湖北省重点研发项目(2020BAA002, 2021BAA015)

作者简介: 张智宣(1996—), 男, 硕士研究生

通信作者: 李 强,qli_patrick@hust.edu.cn

传统的移动设备通常采用无线射频(radio frequency, RF)传输技术接入网络。随着物联网的快速发展, 海量移动设备涌入网络, 导致无线频谱资

源匮乏问题日益加剧。可见光通信(visible light communication, VLC)具有宽频带、低开销、抗电磁干扰等独特优势,被公认为未来无线通信网络发展的关键使能技术之一^[1-3]。此外,统计显示物联网中有96%的数据是在室内环境下产生和使用的^[4]。随着“通信-照明一体化”的发展,这为室内环境下基于VLC的物联网应用提供了巨大的发展空间。

在实际场景中,将VLC技术应用于物联网系统也将面临一些关键问题。一方面,文献[5]指出可见光源所产生的光束一般只能覆盖有限的锥形区域,并且VLC依赖于视线(line-of-sight, LOS)传输,无法穿透障碍物,从而导致通信中断。为扩大VLC的覆盖范围、提升可靠性,研究者们构建了不同的VLC/RF混合通信系统。文献[5]考虑了工作于VLC/RF模式下的中继设备,通过VLC将信源信息发送到中继,进而通过RF将信息转发至信宿,能够显著扩展VLC系统的有效通信范围;文献[6]将可重构智能表面技术和VLC/RF通信技术结合,提出了一种利用室内可重构智能表面辅助的两跳VLC/RF系统;文献[7]提出一种由多个VLC/RF接入点构成的混合通信系统;文献[8]考虑了多用户室内VLC通信场景,发现与单一VLC模式相比混合RF/VLC网络的干扰抑制效果较好。

另一方面,当前的物联网设备大都通过容量有限的电池进行供电,因此基于VLC的物联网系统也将面临移动设备电能受限这一关键问题^[9]。为了延长移动设备的电池寿命,文献[10]提出了可见光信息与能量同传(simultaneous lightwave information and power transfer, SLIPT),SLIPT利用光波为载体,在传输信息的同时携带能量,从而显著提升VLC系统传输效率;文献[11]研究了点对点SLIPT-VLC系统的最小化发射功率和最大化最小速率问题;文献[12]考虑了典型的基于室内SLIPT的VLC系统,并分别分析了系统的保密中断概率和平均保密容量。

如上所述,研究者们提出不同的VLC/RF混合通信系统模型,并从不同角度对系统性能进行了分析,如可达速率、吞吐量、信息-能量折衷等,但这些工作均存在一些局限性。如文献[5-6]考虑的均为中继位置固定条件下的多跳VLC/RF系统,无法适用于中继移动的情况;文献[7-8]虽然考虑了类似的混合VLC/RF系统,但并未考虑中继处的电能约束,也未引入可见光信息能量同传技术;而文献[9-12]虽然考虑了可见光信息能量同传,但是仅局限于VLC系统内部,未考虑通过VLC/RF的融合

以扩大通信范围。为了缓解新一代物联网发展过程中面临的无线频谱资源瓶颈和移动设备电能瓶颈,本文通过有机融合VLC、RF、协作中继和SLIPT等关键技术,构建了一类基于SLIPT的双跳混合VLC/RF协作通信系统模型。

该模型有助于同时获取VLC和RF的技术优势,可广泛应用于室内定位/导航、室内/室外通信等典型场景。具体地,中继R对应移动用户设备,如手推车、购物车、车辆、轮椅等,能够接收来自LED光源S发射的可见光信号并从中提取位置信息;然后,这些信息通过射频信号传输到位于较远位置或室外的后台管理系统D;最后,通过收集和处理来自不同用户设备的信息,该后台管理系统D能够为用户提供智能定制的增值服务^[13]。

虽然在我们的前期工作中^[14-17]提出了类似的VLC/RF协作通信系统模型,但是为了便于分析,这些工作忽略了中继R的随机移动特性对第二跳传输带来的影响。相比之下,本文通过综合考虑中继的随机移动特性、中继的信息解码状态、中继的能量收集状态以及由于中继的随机移动特性所导致的两跳传输过程中复杂的信道波动特性,得到了系统端到端中断概率的精确闭合表达式。仿真实验结果表明,通过选择合适的参数配置以平衡VLC和RF两跳传输之间的性能,能够有效促进信息流与能量流的匹配,从而显著提升系统的可靠性、吞吐量和能量效率。

1 可见光/射频混合通信系统模型

本文提出的基于SLIPT的混合VLC/RF协作通信系统模型由室内的发光二极管(light-emitting diode, LED)信源S、在S覆盖范围内随机移动的离网中继R以及远距离(可能部署于室外)的目的用户D(如基站、接入点等)构成,见图1。考虑到光束是以辐射状从光源S发出,可以认为S的覆盖区域为圆锥形。假设中继R在以O为圆心、 r_0 为半径的圆锥形底面上移动。这里的中继R是一个包含光电探测器(photo detector, PD)的用户移动设备,如超市中的手推车、停车场中的车辆等^[13]。由于D不在S的有效覆盖范围之内,因此S和D之间不存在直接通信链路^[18],需要借助中继R进行信息的接收与转发。当后台管理系统D为用户设备R提供增值服务时,还需考虑D-R下行传输。这一过程超出了本文的讨论范围,将在未来的工作中进行研究。

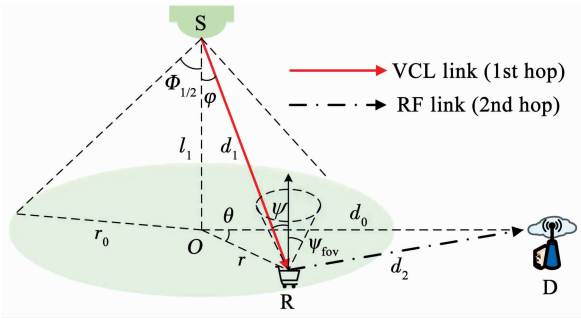


图 1 基于 SLIPT 的两跳混合 VLC/RF 协作通信系统模型
Fig. 1 Dual-hop hybrid VLC/RF cooperative communication system model based on SLIPT

1.1 第一跳 VLC 信号传输

在一般的室内场景下,最弱的 LOS 分量比最强的漫反射成分至少高 7 dB^[19]。为了便于分析,本文忽略 VLC 信道中的多径反射,只考虑信源 S 与中继 R 之间的 LOS 传输链路。第一跳 S→R 的信道增益可以表示为^[10]

$$h_1 = \frac{(n+1)}{2\pi d_1^2} L_r T_s(\psi) g(\psi) \cos(\psi) \cos^n(\varphi) \quad (1)$$

式中: $n = -\ln 2 / (\ln(\cos(\Phi_{1/2})))$ 为朗伯辐射系数, $\Phi_{1/2}$ 为光源 S 的半功率角; $d_1 = \sqrt{l_1^2 + r^2}$ 为 S 到 R 直接链路的长度, l_1 为 S 到 O 的距离, r 为 O 到 R 的距离; L_r 为 PD 的有效面积; φ 为光源 S 的辐射角; ψ 为 PD 的入射角, $\varphi = \psi = \arctan(r/l_1)$; $T_s(\psi)$ 为光滤波器增益; $g(\psi) = \begin{cases} \varepsilon^2 / \sin^2(\Psi_{fov}), & 0 \leq \psi \leq \Psi_{fov} \\ 0, & \psi > \Psi_{fov} \end{cases}$ 为光集中器增益,其中 ε 为折射率, Ψ_{fov} 为视场角(field of view, FoV)。

设 $x(t)$ 为峰值幅度为 A 的已调信源信号,在用于调制 LED 光强之前,将直流偏置 B 加到 $x(t)$ 上,以确保得到的信号是非负的^[12],即 $[x(t) + B] \geq 0$ 。因此,LED 传输的光信号可以表示为

$$x_s(t) = P_{LED} [x(t) + B] \quad (2)$$

式中 P_{LED} 是电信号 $x(t) + B$ 上每单位电流的 LED 发射功率, mW/A^[10]; $x(t) \in [-A, A]$; $E[x(t)] = 0$ ^[20], $E[\cdot]$ 为期望算子。

结合实际情况,为了保证 VLC 系统的传输安全性,须同时满足平均功率和峰值功率约束^[21]:

$$E[x_s(t)] \leq P_a \Rightarrow B \leq \frac{P_a}{P_{LED}} \\ 0 \leq x_s(t) \leq P_{max} \Rightarrow A \leq \min \left\{ B, \frac{P_{max}}{P_{LED}} - B \right\} \quad (3)$$

式中 P_a 和 P_{max} 分别为 LED 信源允许的最大平均功率和峰值功率。

1.2 中继信号处理

基于上述定义,中继 R 接收到的 VLC 信号可以

表示为

$$y_r(t) = \rho h_1 x_s(t) + n_1(t) = \\ \rho h_1 P_{LED} x(t) + \rho h_1 P_{LED} B + n_1(t) = \\ y_{ac}(t) + y_{dc} + n_1(t) \quad (4)$$

式中: ρ 为 PD 的响应度, $y_{ac}(t) = \rho h_1 P_{LED} x(t)$ 为交流成分, $y_{dc} = \rho h_1 P_{LED} B$ 为直流成分。中继 R 在接收来自光源 S 的 LOS 信号的同时,还将接收到其他光源发出的环境光。环境光经过充分的反射、折射和散射后,将通过不同的路径到达 R,从而具有不同的到达角度、不同的延迟或相位、不同的振幅。换句话说,环境光的噪声是大量统计上独立的随机变量的叠加。然后根据中心极限定理,设 $n_1(t)$ 为环境可见光、背景镜头噪声和热噪声所叠加产生的总噪声,且 $n_1(t) \sim C_{CN}(0, \sigma_1^2)$ ^[22]。

中继 R 通过采用信号分量分割将接收到的光电流分割为两部分:用于信息解码(information decoding, ID)的交流成分和用于能量收集(energy harvesting, EH)的直流成分^[23]。其中收集的能量可以表示为^[24]

$$E_R = f y_{dc} V_{oc} = \\ f \rho h_1 P_{LED} B V_t \ln \left(1 + \frac{\rho h_1 P_{LED} B}{I_0} \right) \approx \\ \frac{f V_t (\rho P_{LED} B)^2 \gamma_1}{I_0} \quad (5)$$

式中填充因子 f 介于 0.7 ~ 0.8 之间, PD 的开路电压 $V_{oc} = V_t \ln(1 + \frac{y_{dc}}{I_0})$, I_0 为 PD 的饱和暗电流。

式(5)是利用当 $\frac{\rho h_1 P_{LED} B}{I_0} \rightarrow 0$ 时, $\ln \left(1 + \frac{\rho h_1 P_{LED} B}{I_0} \right) \approx \frac{\rho h_1 P_{LED} B}{I_0}$ 得到的近似表达式。令 $\gamma_1 = |h_1|^2$, 可得

$$\gamma_1 = \frac{[(n+1)k l_1^{n+1}]^2}{(r^2 + l_1^2)^{n+3}} \quad (6)$$

式中 $k = \frac{1}{2\pi} L_r T_s(\psi) g(\psi)$ 是一个常数。

另一方面,中继 R 将尝试从交流分量 $y_{ac}(t)$ 中恢复出信源信号 $x(t)$ 。如果 R 能够成功解码信源信号 $x(t)$,则利用从直流成分 y_{dc} 所收集到的能量将已解码信号转发至目的用户 D;反之,则通信中断。

1.3 第二跳 RF 信号传输

假设第二跳 RF 信道 R→D 服从瑞利衰落模型,那么信道系数可以记为 $h_2 \sim C_{CN}(0, d_2^{-\nu})$,其中 d_2 为中继 R 和目的端 D 的距离,而 ν 为路径损耗系数。定义 d_0 为覆盖圆面圆心 O 与 D 之间的距离,由于中继 R 在光源 S 覆盖区域的底面圆内随机移动,导致 d_2 随中继位置的变化而变化,则由余弦定

理可以得到

$$d_2 = \sqrt{r^2 + d_0^2 - 2rd_0 \cos \theta} \tag{7}$$

式中 θ 为 $\overline{OR}$ 和 $\overline{OD}$ 之间的夹角, 且 $\theta \in [-\pi, \pi]$ 。相比于文献[14 – 17]中忽略中继 R 的移动性对第二跳传输的影响, 并简单的假设 $d_2 = d_0$, 本文考虑了由于中继 R 的移动性导致的 d_2 随机变化的实际情况, 并对其进行了精确的性能分析。

若中继 R 在第一跳成功解码了信源信号 $x(t)$, 那么相应的 D 在第二跳的接收信号为

$$y_d(t) = \sqrt{P_R} h_2 \frac{x(t)}{(A/\sqrt{2})} + n_2(t) \tag{8}$$

式中 P_R 为中继 R 的发射功率, $n_2(t) \sim C_{CN}(0, \sigma_2^2)$ 。分母中的 $A/\sqrt{2}$ 用于对信号 $x(t)$ 进行功率归一化处理, 其中 $E[|x(t)|^2] = A^2/2$ 。

本文涉及的符号参数及其默认取值见表 1。

表 1 系统参数及默认值

Tab. 1 System parameters and default values		
参数	含义	默认值
$\Phi_{1/2}/(^{\circ})$	光源 S 的半功率角	60 ^[24]
n	朗伯辐射系数	1 ^[24]
r_0/m	底面半径	3 ^[14]
$l_1, r/\text{m}$	S 到 O、O 到 R 的距离	2, [0, 3] ^[14]
$d_1, d_0/\text{m}$	S 到 R、O 到 D 的距离	[2, $\sqrt{13}$], 25 ^[14]
θ	$\overline{OR}$ 和 $\overline{OD}$ 之间的夹角	$[-\pi, \pi]$ ^[24]
$\varphi, \psi/(^{\circ})$	光源 S 的辐射角, PD 的入射角	$[0, \arctan(3/2)]$ ^[25]
L_r/cm^2	PD 的表面面积	1 ^[10]
$T_s(\psi)$	光滤波器增益	1 ^[19, 25]
$g(\psi)$	光集中器增益	3 ^[19, 25]
ε	折射率	1.5 ^[19, 25]
$\Psi_{\text{fov}}/(^{\circ})$	视场角	45 ^[19, 25]
A/mA	信号的峰值振幅	5 ^[10, 24]
B/mA	直流偏置	7.5 ^[10, 24]
$P_{\text{LED}}/(\text{mW} \cdot \text{A}^{-1})$	LED 的功率	100 ^[10, 24]
$P_a, P_{\text{max}}/\text{mW}$	平均功率, 峰值功率	3, 4 ^[17]
$\rho/(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	PD 的响应度	0.6 ^[15]
f	填充因子	0.75 ^[24]
V_t/mV	热电压	25 ^[24]
I_0/A	PD 的饱和暗电流	10 ⁻⁹ ^[24]
V_{oc}/mV	PD 的开路电压	$V_t \ln(1 + y_{\text{dc}}/I_0)$ ^[21]
ν	路径损耗系数	2 ^[15]
σ_1^2/W	VLC 链路加性高斯白噪声	10 ⁻²⁰ ^[21]
σ_2^2/W	RF 链路加性高斯白噪声	10 ⁻¹⁶ ^[21]
$R_t/[\text{bit} \cdot (\text{slot} \cdot \text{Hz})^{-1}]$	预定义的目标速率	2 ^[25]

2 端到端系统性能分析

基于 SLIPT 的混合可见光/射频协作通信系统端到端解析性能评估框架。为了便于分析, 假设第一跳和第二跳时长相同, 那么第一跳 VLC 链路的信道容量可以近似为^[21]

$$C_1 \approx \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\rho^2 P_{\text{LED}} A^2 \gamma_1}{2\pi e \sigma_1^2} \right) \tag{9}$$

假设发射端以预定义的目标速率 R_t 将信号 $x(t)$ 发送到 R^[24], 那么第一跳传输的中断概率为^[26]

$$O_p^{(1)} = P\{C_1 < R_t\} \tag{10}$$

式中 $O_p^{(1)}$ 的详细表达式及分析过程见定理 1。

如果 $x(t)$ 被中继 R 成功解码并在第二跳转发给 D, 则由式(8)可推导出第二跳 RF 信道的可达速率为

$$R_2 = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_R \gamma_2}{\sigma_2^2} \right) \tag{11}$$

式中 $\gamma_2 = |h_2|^2$ 服从指数分布, 其概率密度函数 (probability density function, PDF) 为 $f_{\gamma_2}(\gamma_2) = d_2^n e^{-d_2 \gamma_2}$ 且 $\gamma_2 > 0$ 。那么, 第一跳传输成功同时第二跳传输中断的联合概率为

$$O_p^{(2)} = P\{\{C_1 \geq R_t\} \cap \{R_2 < R_t\}\} \tag{12}$$

式中 $O_p^{(2)}$ 的详细表达式及分析过程见定理 2。

在式(10)和式(12)中, 由于事件 $\{C_1 < R_t\}$ 和 $\{C_1 \geq R_t\} \cap \{R_2 < R_t\}$ 是互斥的, 因此系统端到端的中断概率 O_p 为

$$O_p = O_p^{(1)} + O_p^{(2)} \tag{13}$$

式中 O_p 的详细表达式见定理 3。

2.1 第一跳中断概率解析分析

由于中继 R 在光源 S 覆盖区域的底面圆内随机移动, 一般地, 中继 R 离圆心 O 越近 (即 r 越小), 则信道容量 C_1 越大, 反之亦然。

定义 1 为了描述中继 R 处的解码状态, 本文在底面圆内定义一个中继解码距离阈值 $r_{1,\text{th}}$ 。即, 若 $r \leq r_{1,\text{th}}$, 则中继 R 可以成功解码出信源信号 $x(t)$, 即 $C_1 \geq R_t$; 否则, 若 $r > r_{1,\text{th}}$, 则 $C_1 < R_t$ 。

根据以上定义, 由式(9), 相应的中继解码距离阈值 $r_{1,\text{th}}$ 为

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{\gamma_1 \rho^2 P_{\text{LED}} A^2}{2\pi e \sigma_1^2} \right) \geq R_t \Rightarrow \\ \frac{[(n+1)kl_1^{n+1}]^2}{(r^2 + l_1^2)^{n+3}} \geq \frac{2\pi e \sigma_1^2 (2^{2R_t} - 1)}{\rho^2 P_{\text{LED}} A^2} \Rightarrow \\ r \leq r_{1,\text{th}} = \left\{ \left(\frac{[\rho P_{\text{LED}} A (n+1)kl_1^{n+1}]^2}{2\pi e \sigma_1^2 (2^{2R_t} - 1)} \right)^{\frac{1}{n+3}} - l_1^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \end{aligned} \tag{14}$$

由式(14)可以看出,中继解码距离阈值 $r_{1,\text{th}}$ 与多个重要参数相关,如预定义目标速率 R_t 、LED 发射功率 P_{LED} 、峰值幅度 A 等。接下来通过仿真实验评估这些参数对系统性能的影响。

定理 1 考虑到中继 R 的随机移动性,第一跳传输的平均中断概率 $O_p^{(1)}$ 为

$$O_p^{(1)} = 1 - \frac{r_{1,\text{th}}^2}{r_0^2} \quad (15)$$

证明 由于中继 R 随机均匀地位于覆盖区域的底面圆内,则 r 的概率密度函数为 $f_r(r) = \frac{2r}{r_0^2}$, 其中 $0 \leq r \leq r_0$ 。且由定义 1 可得

$$P\{C_1 < R_t\} = \begin{cases} 0, & 0 \leq r \leq r_{1,\text{th}} \\ 1, & r_{1,\text{th}} < r \leq r_0 \end{cases} \quad (16)$$

因此,由式(10)和式(16),第一跳传输的平均中断概率可以进一步为

$$O_p^{(1)} = P\{C_1 < R_t\} = P\{r_{1,\text{th}} < r \leq r_0\} = \int_{r_{1,\text{th}}}^{r_0} f_r(r) dr = 1 - \frac{r_{1,\text{th}}^2}{r_0^2} \quad (17)$$

2.2 系统端到端性能分析

定理 2 在第一跳成功解码的情况下,中继 R 采用尽力而为(best-effort)的传输方案,即 $P_R = E_R$ 。由式(12),第二跳的中断概率 $O_p^{(2)}$ 为

$$O_p^{(2)} = \frac{2\beta}{r_0^2} \sum_{i=0}^m \binom{m}{i}^2 d_0^{2i} l_1^{2(n+3)} r_{1,\text{th}}^{2(m-i+1)} B(2(m-i+1), 1) \cdot {}_3F_2\left(-n-3, m-i+1, m-i+\frac{3}{2}; m-i+\frac{3}{2}, m-i+2; -\frac{r_{1,\text{th}}^2}{l_1^2}\right) \quad (18)$$

证明 采取一种尽力而为的中继传输方案。在中继 R 成功解码出信号 $x(t)$ 后, R 将利用所收集的全部能量将解码信号转发至目的用户 D, 即 $P_R = E_R$ 。

根据式(12)和式(16),可以将 $O_p^{(2)}$ 进一步表示为

$$O_p^{(2)} = P\{(0 \leq r \leq r_{1,\text{th}}) \cap (R_2 < R_t)\} \quad (19)$$

结合式(7)和式(11),可得

$$\begin{aligned} \Pr\{R_2 < R_t\} &= P\left\{\gamma_2 < \frac{(2^{2R_t} - 1)\sigma_2^2}{E_R}\right\} = 1 - \\ &\exp\left(-\frac{d_2^2(2^{2R_t} - 1)\sigma_2^2}{E_R}\right) = 1 - \\ &\exp\left(-\frac{(r^2 + d_0^2 - 2rd_0\cos\theta)^{\frac{v}{2}}(2^{2R_t} - 1)\sigma_2^2}{E_R}\right) \end{aligned} \quad (20)$$

将式(20)和 $f_r(r) = \frac{2r}{r_0^2}$ 代入式(19),第二跳中

断概率可以进一步表示为

$$O_p^{(2)} = P\{0 \leq r \leq r_{1,\text{th}}\} P\{(R_2 < R_t) | (0 \leq r \leq r_{1,\text{th}})\} = \frac{r_{1,\text{th}}^2}{r_0^2} E\left(1 - \exp\left(-\frac{(r^2 + d_0^2 - 2rd_0\cos\theta)^{\frac{v}{2}}(2^{2R_t} - 1)\sigma_2^2}{E_R}\right) | (0 \leq r \leq r_{1,\text{th}}, 0 \leq \theta \leq 2\pi)\right) \quad (21)$$

由于中继 R 在圆形区域内随机且均匀分布, θ 的概率密度函数为 $f_\theta(\theta) = \frac{1}{2\pi}$ 。在 R 位于半径为 $r_{1,\text{th}}$ 的圆内的前提条件下, R 距离圆心的距离 r 的概率密度函数为 $f_{r_{1,\text{th}}}(r) = \frac{2r}{r_{1,\text{th}}^2}$ 。则将 $f_\theta(\theta)$ 和 $f_{r_{1,\text{th}}}(r)$

代入式(21),并令 $\beta = \frac{(2^{2R_t} - 1)\sigma_2^2 I_0}{f_{V_t}(\rho P_{\text{LED}} B)^2 [(n+1)kl_1^{n+1}]^2}$, 可得

$$O_p^{(2)} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{1,\text{th}}} r [1 - \exp(-\beta(r^2 + d_0^2 - 2rd_0\cos\theta)^{\frac{v}{2}}(r^2 + l_1^2)^{n+3})] dr d\theta \quad (22)$$

代入系统参数典型的默认值,可以得到 $\beta(r^2 + d_0^2 - 2rd_0\cos\theta)^{\frac{v}{2}}(r^2 + l_1^2)^{n+3} \rightarrow 0$, 则有下式成立^[27]

$$\exp(-\beta(r^2 + d_0^2 - 2rd_0\cos\theta)^{\frac{v}{2}}(r^2 + l_1^2)^{n+3}) \approx 1 - \beta(r^2 + d_0^2 - 2rd_0\cos\theta)^{\frac{v}{2}}(r^2 + l_1^2)^{n+3} \quad (23)$$

则 $O_p^{(2)}$ 可以精确近似为

$$O_p^{(2)} \approx \frac{\beta}{\pi r_0^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{r_{1,\text{th}}} r (r^2 + d_0^2 - 2rd_0\cos\theta)^{\frac{v}{2}} (r^2 + l_1^2)^{n+3} dr d\theta \quad (24)$$

为进一步化简,在工程应用上通常将实数进行取整^[28]。因此本文取 $m = \lfloor \frac{v}{2} \rfloor$, 即 m 为不超过 $\frac{v}{2}$ 的最大整数。

将以下恒等式^[27]

$$\int_0^\pi (1 - 2a\cos x + a^2)^n dx = \pi \sum_{k=0}^n \binom{n}{k}^2 a^{2k} \quad (25)$$

和

$$\begin{aligned} \int_0^\pi x^{\lambda-1} (u-x)^{\mu-1} (x^2 + \beta^2)^v dx &= \beta^{2v} u^{\lambda+\mu-1} B(\lambda, \mu) \cdot \\ {}_3F_2\left(-v, \frac{\lambda}{2}, \frac{\lambda+1}{2}; \frac{\lambda+\mu}{2}, \frac{\lambda+\mu+1}{2}; -\frac{u^2}{\beta^2}\right) \end{aligned} \quad (26)$$

代入式(24),则 $O_p^{(2)}$ 进一步化简为

$$\begin{aligned} O_p^{(2)} &\approx \frac{2\beta}{r_0^2} \int_0^{r_{1,\text{th}}} r^{2m+1} (r^2 + l_1^2)^{n+3} \sum_{i=0}^m \binom{m}{i}^2 \left(\frac{d_0}{r}\right)^{2i} dr = \\ \frac{2\beta}{r_0^2} \sum_{i=0}^m \binom{m}{i}^2 d_0^{2i} l_1^{2(n+3)} r_{1,\text{th}}^{2(m-i+1)} B(2(m-i+1), 1) \cdot \\ {}_3F_2\left(-n-3, m-i+1, m-i+\frac{3}{2}; m-i+\frac{3}{2}, m-i+2; -\frac{r_{1,\text{th}}^2}{l_1^2}\right) \end{aligned}$$

$$m-i+2; -\frac{r_{1,\text{th}}^2}{l_1^2}) \quad (27)$$

其中 $B(x, y) = \int_0^1 t^{x-1} (1-t)^{y-1} dt$ 为贝塔函数^[27],

$${}_pF_q(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q; z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(\alpha_1)_k (\alpha_2)_k \dots (\alpha_p)_k}{(\beta_1)_k (\beta_2)_k \dots (\beta_q)_k} \frac{z^k}{k!}$$

为广义超几何级数^[27]。

2.3 第二跳中断概率解析分析

定理3 将式(15)和式(18)代入式(13),则系统端到端的中断概率 O_p 为

$$O_p = O_p^{(1)} + O_p^{(2)} = 1 - \frac{r_{1,\text{th}}^2}{r_0^2} + \frac{2\beta}{r_0^2} \sum_{i=0}^m \binom{m}{i} d_0^{2i} l_1^{2(n+3)} r_{1,\text{th}}^{2(m-i+1)} \cdot B(2(m-i+1), 1) \cdot {}_3F_2(-n-3, m-i+1, m-i+\frac{3}{2}; m-i+\frac{3}{2}, m-i+2; -\frac{r_{1,\text{th}}^2}{l_1^2}) \quad (28)$$

为了更好地评估系统性能,本文将每时隙成功传输的比特数定义为系统平均吞吐量^[23]。由式(28),平均吞吐量为

$$T_p = (1 - O_p) R_i \quad (29)$$

在此基础上,本文将成功交付的数据比特数和LED信源发射功耗之间的比值定义为系统的能量效率^[22]。由式(2)和式(29),能量效率为

$$\eta_E = \frac{T_p}{E[x_s(t)]/2} \quad (30)$$

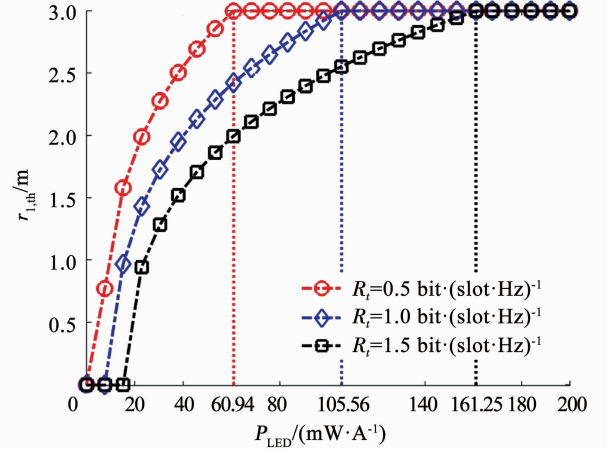
3 数值结果与分析

对基于 SLIPT 的混合 VLC/RF 协作通信系统开展解析与仿真性能评估。与现有关于混合 VLC/RF 通信系统的研究工作不同,本文综合考虑了中继 R 的随机移动特性、R 的信息解码状态、R 的能量收集状态,以及由 R 的随机移动性所导致的两跳传输过程中信道的复杂波动特性。由于无法在现有文献中找到与本文完全相同的系统模型,因此无法进行与现有工作的直接性能对比。除非另有说明,本节仿真实验中采用的主要参数默认值见表1。

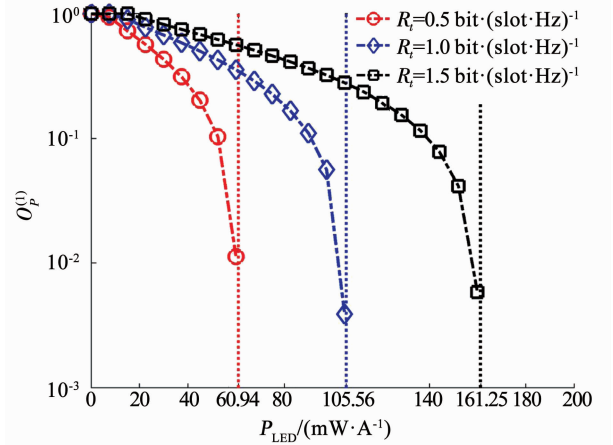
为了验证本文性能分析结果的正确性,在图2~4中同时给出了数学解析和蒙特卡洛仿真结果,分别用线和标记表示。

图2是在给定3组不同目标速率 R_i 的情况下,LED传输功率 P_{LED} 对第一跳 VLC 传输过程中中继解码距离阈值 $r_{1,\text{th}}$ 和平均中断概率 $O_p^{(1)}$ 的影响。由图2(a),一般地,较小的 R_i 将带来较大的 $r_{1,\text{th}}$ 。而中继在圆内随机移动,这意味着中继 R 能够以更高的概率成功解码信源信息,则 $O_p^{(1)}$ 越小,见

图2(b)。另一方面,当 P_{LED} 较小时,即便中继 R 位于信源 S 覆盖区域中心,也无法成功解码信源信息。由图2(a),此时可得 $r_{1,\text{th}} = 0$,由式(17)可得等效的 $O_p^{(1)} = 1$,见图2(b)。随着 P_{LED} 的增加,第一跳传输可靠性显著改善。由图2(a),在给定 $R_i = 0.5, 1.0, 1.5 \text{ bit} \cdot (\text{slot} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 的情况下,分别当 $P_{\text{LED}} \rightarrow 60.94, 105.56, 161.25 \text{ mW/A}$ 时,即便中继 R 位于覆盖区域边缘,也能成功解码信源信息。此时可得 $r_{1,\text{th}} = r_0 = 3 \text{ m}$,或由式(17)可得等效的 $O_p^{(1)} = 0$,见图2(b)。



(a) P_{LED} 对 $r_{1,\text{th}}$ 的影响



(b) P_{LED} 对 $O_p^{(1)}$ 的影响

图2 传输功率 P_{LED} 对第一跳 VLC 传输中继距离阈值 $r_{1,\text{th}}$ 和平均中断概率 $O_p^{(1)}$ 的影响

Fig. 2 Influence of transmission power P_{LED} on relay distance threshold $r_{1,\text{th}}$ and 1st-hop outage probability $O_p^{(1)}$

图3是在给定3组不同目标速率 R_i 的情况下,峰值幅值 A 对第一跳 VLC 传输过程中中继解码距离阈值 $r_{1,\text{th}}$ 和平均中断概率 $O_p^{(1)}$ 的影响。类似地,由图3(a),当 A 较小时,即便中继 R 位于信源 S 覆盖区域中心,也无法成功解码信源信息。此时可得 $r_{1,\text{th}} = 0$,或由式(17)可得等效的 $O_p^{(1)} = 1$,见图3(b)。随着 A 的增加,第一跳传输可靠性显著改

善。由图 3(a), 在给定 $R_t = 0.5、1.0、1.5 \text{ bit} \cdot (\text{slot} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 的情况下, 分别当 $A \rightarrow 3.04、5.27、8.06 \text{ mA}$ 时, 即便中继 R 位于覆盖区域边缘, 也能成功解码信源信息。此时可得 $r_{1,\text{th}} = r_0 = 3 \text{ m}$, 或由式 (17) 可得等效的 $O_p^{(1)} = 0$, 见图 3(b)。

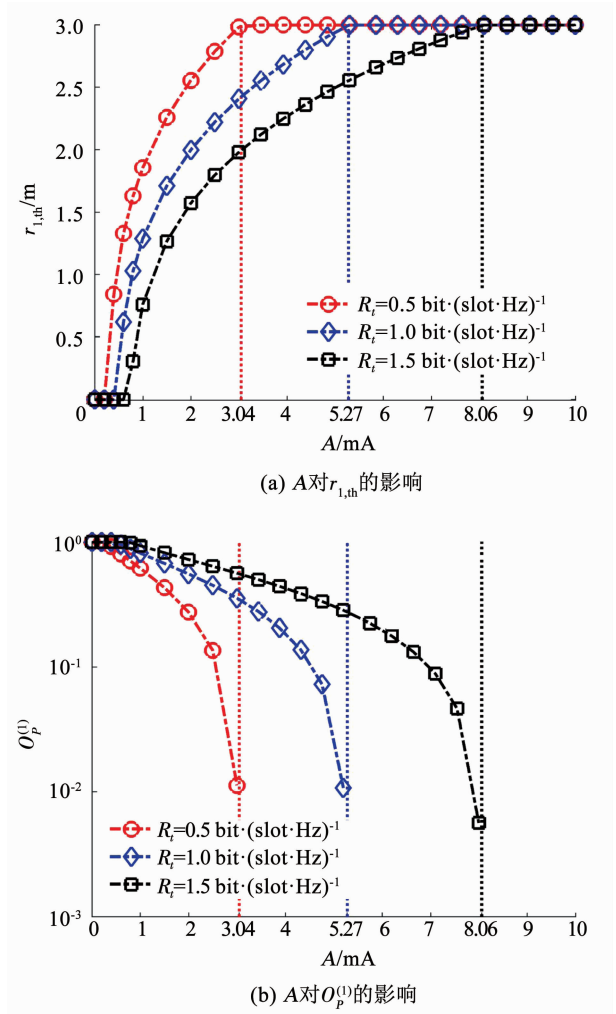


图 3 峰值幅度 A 对第一跳 VLC 传输中继距离阈值 $r_{1,\text{th}}$ 和平均中断概率 $O_p^{(1)}$ 的影响

Fig. 3 Influence of peak amplitude A on relay distance threshold $r_{1,\text{th}}$ and 1st-hop outage probability $O_p^{(1)}$

图 4 是关键参数 $P_{\text{LED}}、A、B$ 对系统端到端中断概率 O_p 的影响。由图 4(a), O_p 随着 P_{LED} 的增加急剧下降, 但是当 P_{LED} 到达某个临界点之后, O_p 的下降变缓。这是由于当 P_{LED} 值较小时, 增加 P_{LED} 不仅能够显著改进第一跳的中断性能, 也会促使中继 R 收集更多的能量 E_R , 从而提高第二跳的中断性能; 而当 $P_{\text{LED}} \rightarrow 60.94、105.56、161.25 \text{ mW/A}$ 时, 见图 2(b), 此时第一跳传输总是成功, 因此继续增加 P_{LED} 带来的性能增益将放缓。相比之下, A 对 O_p 的影响与 P_{LED} 不同。

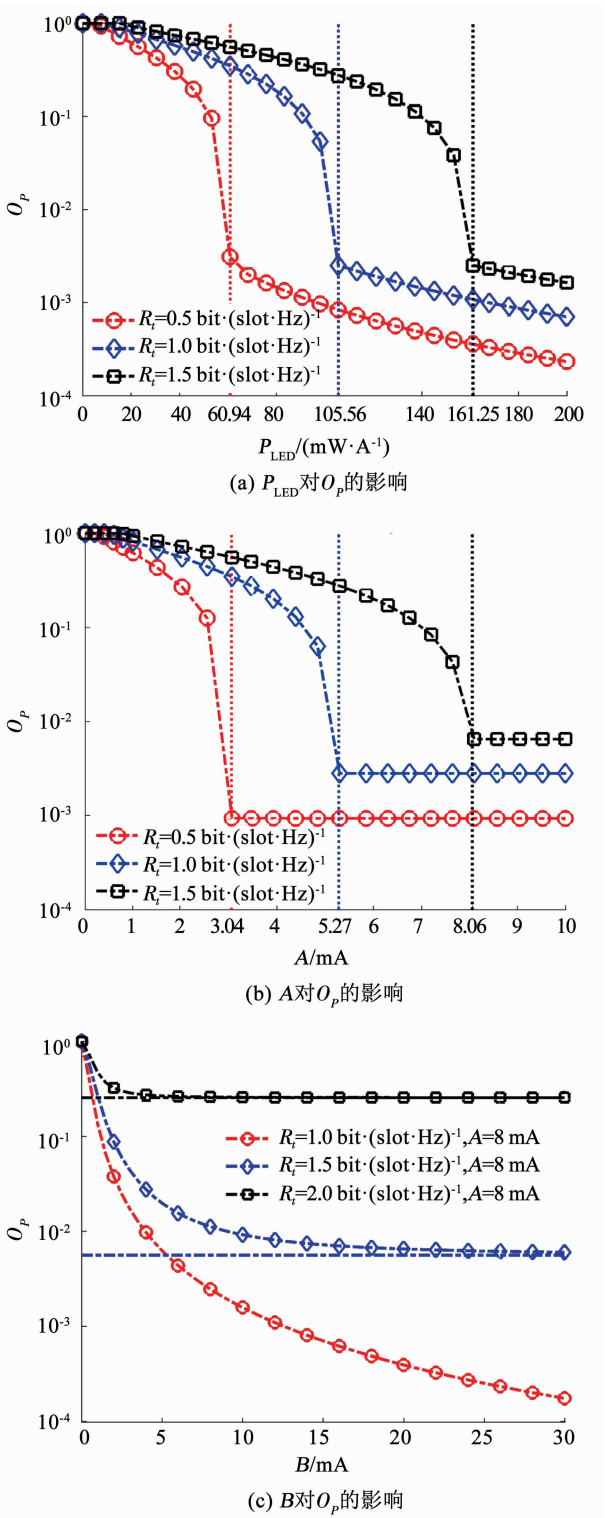


图 4 关键参数 $P_{\text{LED}}、A、B$ 对系统端到端中断概率 O_p 的影响

Fig. 4 Influence of parameters P_{LED}, A , and B on end-to-end outage probability O_p

由图 4(b), O_p 随着 A 的增加急剧下降, 但是当 A 到达某个临界点之后, O_p 无法继续下降。这是由于峰值振幅 A 仅影响第一跳 VLC 传输中的交流信号, 增加 A 能够使中继 R 以更高的概率成功解码信源信号; 但是当 $A \rightarrow 3.04、5.27、8.06 \text{ mA}$ 时, 见

图 3(b), 此时第一跳传输总是成功, 因此继续增加 A 将无法带来性能增益。直流分量 B 对系统端到端性能的影响与 A 类似。

由图 4(c), 随着 B 的增加, 由于中继 R 可以收集到更多的能量, 因此促进了整个系统端到端中断概率 O_p 的降低。对于 $R_t = 1.0 \text{ bit} \cdot (\text{slot} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 的情况, 见图 3(b), 当 $A = 8 \text{ mA}$ 时可以得到第一跳传输 $O_p^{(1)} = 0$, 因此 O_p 将随着 B 的增加不断下降。然而对于 $R_t = 1.5, 2 \text{ bit} \cdot (\text{slot} \cdot \text{Hz})^{-1}$ 的情况, 由于当 $A = 8 \text{ mA}$ 时 $O_p^{(1)} \neq 0$, 因此当 B 增加到某个临界点之后, O_p 无法继续下降。这是由于随着 B 的增加, 虽然能够实现近乎完美的第二跳传输, 但是系统端到端中断概率仍然受制于第一跳传输的中断概率, 此时 $O_p^{(2)} \rightarrow 0, O_p \rightarrow O_p^{(1)}$ 。因此, 给定目标速率 R_t , 在式(3)的约束下, 通过合理的配置 P_{LED}, A 和 B 等关键参数, 可以平衡两跳传输之间的性能, 从而显著降低系统端到端中断概率 O_p 。

图 5 是系统的吞吐量 T_p 与能量效率 η_E 与不同参数之间的关系。由图 5(a), T_p 随着 P_{LED} 的增加而增加; 而随着 R_t 的增加, T_p 先增加、到达峰值、然后减小。这是因为当 R_t 较小时, 虽然端到端中断概率很低, 但传输的数据量较小; 另一方面, 当 R_t 较大时, 虽然传输的数据量较大, 但是系统吞吐量会受制于较高的端到端中断概率。这意味着为了提高数据吞吐量, 在实际的系统中需要选择合适的目标速率 R_t 。相比之下, 为了提高系统能量效率, 除了选择合适的 R_t , 还需要为其匹配合适的 P_{LED} , 见图 5(b)。一般地, 当 R_t 较小时, 选择较低的 P_{LED} 将获得更大的性能增益; 而当 R_t 较大时, 选择较高的 P_{LED} 将获得更大的性能增益。

4 结 论

针对新一代物联网面临的频谱资源匮乏和移动设备电能紧缺两个关键问题, 通过融合传统的无线射频通信技术与新型的可见光通信技术, 提出了一种基于可见光信息与能量同传 (SLIPT) 的混合可见光/射频 (VLC/RF) 协作通信系统, 并推导了系统端到端中断概率的精确闭合表达式。综合考虑中继的随机移动性、中继的译码结果及其所收集的能量等因素, 分别分析了可见光信道与无线射频信道的差异化信道特性和信号传输性能。数值结果表明, 通过对系统参数进行优化配置, 本文所提出的混合可见光/射频协作通信能够促进信息流和能量流的匹配, 有效提升物联网系统的可靠性、吞吐量和能量效率。

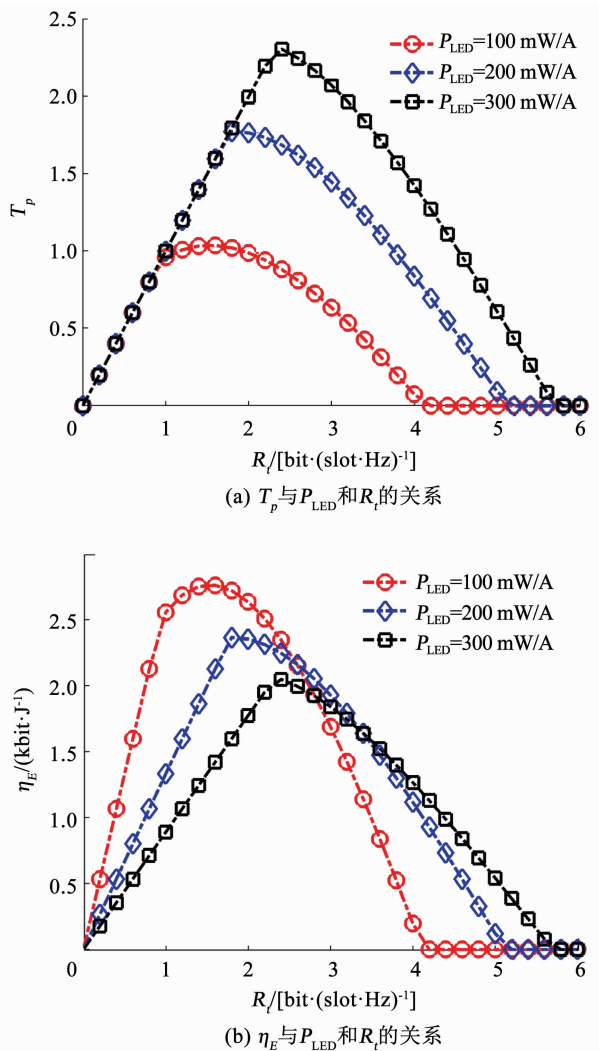


图 5 系统数据吞吐量 T_p 与能量效率 η_E

Fig. 5 System throughput T_p and energy efficiency η_E

参考文献

- [1] 赵亚军, 郁光辉, 徐汉青. 6G 移动通信网络: 愿景、挑战与关键技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2019, 49(8): 963
ZHAO Yajun, YU Guanghui, XU Hanqing. 6G mobile communication networks: vision, challenges, and key technologies [J]. Scientia Sinica Information Sciences, 2019, 49(8): 963. DOI: 10.1360/N112019-00033
- [2] 迟楠, 陈慧. 高速可见光通信的前沿研究进展[J]. 光电工程, 2020, 47(3): 6
CHI Nan, CHEN Hui. Progress and prospect of high-speed visible light communication [J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(3): 6. DOI: 10.12086/oee.2020.190687
- [3] 贾科军, 杨博然, 曹明华, 等. 可见光通信自适应 O-OFDM 符号分解串行传输系统设计与研究[J]. 通信学报, 2020, 41(9): 179
JIA Kejun, YANG Boran, CAO Minghua, et al. Design and research of adaptive O-OFDM symbol decomposing with serial transmission system in visible light communication [J]. Journal on Communications, 2020, 41(9): 179. DOI: 10.11959/j.issn.1000-436x.2020179
- [4] YANG Helin, ZHONG Wende, CHEN Chen, et al. QoS-driven

- optimized design-based integrated visible light communication and positioning for indoor IoT networks [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(1): 269. DOI: 10.1109/IJOT.2019.2951396
- [5] RAKIA T, YANG Hongchuan, GEBALI F, et al. Dual-hop VLC/RF transmission system with energy harvesting relay under delay constraint [C]//Proceedings of 2016 IEEE Globecom Workshops. Washington: IEEE, 2016: 1. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2016.7848882
- [6] YANG Liang, YAN Xiaoqin, DA COSTA D B, et al. Indoor mixed dual-hop VLC/RF systems through reconfigurable intelligent surfaces [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(11): 1995. DOI: 10.1109/LWC.2020.3010809
- [7] 王俊珺. 结合射频系统和多个 VLC 的混合通信方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(2): 115
WANG Junjun. Hybrid communication method combining RF system and multiple VLC [J]. Journal of CAET, 2018, 13(2): 115. DOI: 10.3969/j.issn.1673-5692.2018.02.001
- [8] ABDALLA I, RAHAIM M B, LITTLE T D C. Interference mitigation through user association and receiver field of view optimization in a multi-user indoor hybrid RF/VLC illuminance-constrained network [J]. IEEE Access, 2020, 8: 228779. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3045929
- [9] 宋志群, 刘玉涛, 吕玉静, 等. 无线携能通信时隙与功率联合优化算法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(5): 35
SONG Zhiqun, LIU Yutao, LÜ Yujing, et al. Research on joint optimization algorithm for time slot and power in SWIPT [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(5): 35. DOI: 10.11918/201902073
- [10] DIAMANTOULAKIS P D, KARAGIANNIDIS G K, DING Zhiguo. Simultaneous lightwave information and power transfer (SLIPT) [J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2018, 2(3): 764. DOI: 10.1109/TGCN.2018.2818325
- [11] MA Shuai, ZHANG Fan, LI Hang, et al. Simultaneous lightwave information and power transfer in visible light communication systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(12): 5818. DOI: 10.1109/TWC.2019.2939242
- [12] WANG Jinyuan, LIN Shenghong, QIU Yu, et al. Tradeoff between secrecy capacity and harvested energy for secure visible light communications with SWIPT [J]. IEEE Access, 2019, 7: 29543. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2902570
- [13] LUO Junhai, FAN Liying, LI Husheng. Indoor positioning systems based on visible light communication: State of the art [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(4): 2871. DOI: 10.1109/COMST.2017.2743228
- [14] PENG Huijie, LI Qiang, PANDHARIPANDE A, et al. Performance analysis of a SLIPT-based hybrid VLC/RF system [C]//Proceedings of 2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Chongqing: IEEE, 2020: 360. DOI: 10.1109/ICCC49849.2020.9238830
- [15] PENG Huijie, LI Qiang, PANDHARIPANDE A, et al. End-to-end performance optimization of a dual-hop hybrid VLC/RF IoT system based on SLIPT [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021: 1. DOI: 10.1109/IJOT.2021.3080518
- [16] 彭辉杰. 面向物联网的可见光/射频混合协作通信系统性能分析与优化[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021
- PENG Huijie. Research on performance analysis and optimization of hybrid cooperative visible light communication/radio frequency communication system for Internet of Things [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021
- [17] ZHANG Zhixuan, LI Qiang, PENG Huijie, et al. A SLIPT-based hybrid VLC/RF cooperative communication system with relay selection [C]//Proceedings of 2021 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Xiamen: IEEE, 2021: 277. DOI: 10.1109/ICCC52777.2021.9580232
- [18] ZHOU Xiaotian, LI Shanshan, ZHANG Haixia, et al. Cooperative NOMA based VLC/RF system with simultaneous wireless information and power transfer [C]//Proceedings of 2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Beijing: IEEE, 2018: 101. DOI: 10.1109/ICCCChina.2018.8641243
- [19] PAN Gaofeng, YE Jia, DING Zhiguo. On secure VLC systems with spatially random terminals [J]. IEEE Communications Letters, 2017, 21(3): 492. DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2643632
- [20] LI Yiran, HUANG Nuo, WANG Jinyuan, et al. Sum rate maximization for VLC systems with simultaneous wireless information and power transfer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(6): 531. DOI: 10.1109/LPT.2017.2663441
- [21] LAPIDOTH A, MOSER S M, WIGGER M A. On the capacity of free-space optical intensity channels [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2009, 55(10): 4449. DOI: 10.1109/TIT.2009.2027522
- [22] WANG Junbo, HU Qingsong, WANG Jiangzhou, et al. Tight bounds on channel capacity for dimmable visible light communications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(23): 3771. DOI: 10.1109/JLT.2013.2286088
- [23] PAN Gaofeng, DIAMANTOULAKIS P D, MA Zheng, et al. Simultaneous lightwave information and power transfer: Policies, techniques, and future directions [J]. IEEE Access, 2019, 7: 28252. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2901855
- [24] RAKIA T, YANG Hongchuan, GEBALI F, et al. Optimal design of dual-hop VLC/RF communication system with energy harvesting [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(10): 1980. DOI: 10.1109/LCOMM.2016.2595561
- [25] YIN Liang, POPOOLA W O, WU Xiping, et al. Performance evaluation of non-orthogonal multiple access in visible light communication [J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(12): 5162. DOI: 10.1109/TCOMM.2016.2612195
- [26] 国强, 孙嘉遥, 项建弘. 非对称双向中继信道中断概率分析与功率分配策略[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(5): 131
GUO Qiang, SUN Jiayao, XIANG Jianhong. Outage probability analysis and power allocation strategy for asymmetric two-way relay channel [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(5): 131. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201608044
- [27] ZWILLINGER D, JEFFREY A. Table of integrals, series, and products [M]. 6th. New York: Academic Press, 2000
- [28] GONZÁLEZ F, USPENSKIY V. On homomorphisms of groups of integer-valued functions [J]. Extracta Mathematicae, 1999, 14(1): 19