

混合电力线-自由空间光通信系统解码 转发协议下的性能分析

张捷¹, 陈生海^{2†}, 赵闻¹, 黄友朋¹, 蒋鑫伟³, 杨亮²

(1. 广东电网有限责任公司计量中心, 广东 广州 510000;

2. 湖南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082;

3. 威胜信息技术股份有限公司, 湖南 长沙 410000)

摘要:针对电力线通信传播距离短问题, 文章提出了基于解码转发中继的电力线-自由空间光(PLC/FSO)混合通信系统, 并对其性能进行了分析. 首先建立了混合系统的数学模型, 分别采用对数正态分布和 Gamma-Gamma 分布来表征 PLC 及 FSO 信道衰落, 并考虑 FSO 链路指向误差. 其次, 对混合系统性能进行了分析, 推导出了中断概率、误码率和信道容量的闭合表达式. 最后, 利用计算机模拟仿真验证了推导结果的准确性. 研究表明: 脉冲噪声、大气湍流和指向误差会对通信系统产生一定的影响.

关键词: 电力线通信; 自由空间光通信; 解码转发; 性能分析

中图分类号: TN971

文献标志码: A

Performance Analysis of Mixed PLC/FSO Communication Systems

ZHANG Jie¹, CHEN Shenghai^{2†}, ZHAO Wen¹, HUANG Youpeng¹, JIANG Xinwei³, YANG Liang²

(1. Measurement Center of Guangdong Power grid Co Ltd, Guangzhou 510080, China;

2. College of Information Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Willfar Information Technology Co Ltd, Changsha 410205, China)

Abstract: Due to the short transmission distance of power line communication, a mixed power line and free-space optical (PLC/FSO) communication system with the decode and forward protocol is studied. First, the mathematical models for the mixed system is established by assuming the PLC and the FSO channels following the log-normal and Gamma-Gamma distributions, respectively, where the pointing error in the FSO link is also considered. Then, closed-form expressions for the outage probability, bit error rate, and the channel capacity are derived. Finally, simulation results are provided to verify our analytical results. Numerical results show that impulsive noise, turbulence, and the pointing error affect the system performance.

Key words: power line communication; free-space optical communication; decode and forward; performance analysis

* 收稿日期:2021-06-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61671160), National Natural Science Foundation of China(61671160); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20185366), Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co.Ltd(GDKJXM20185366)

作者简介:张捷(1987—),男,湖南岳阳人,广东电网高级工程师

† 通信联系人, E-mail: chenshenghai89@hnu.edu.cn

电力线通信(Power Line Communication, PLC)可以利用建筑中已有的电力线网络,不需要部署新的线路,建设成本较低,且信号传输不易受到建筑等环境因素的影响^[1].与其他通信方式相比,PLC具有覆盖范围广、连接方便等特点,从而使其成为用于室内和室外通信的新技术.文献[2]提出了一种载波信号在混合型配电网络中的信道建模方法.文献[3]研究了多跳中继宽带电力线通信网络中的OFDM跨层资源分配方法.此外,PLC已成为智能电网中主要通信技术方法之一^[4-5].由于电力线通信信道衰减较大,从而无法实现远距离通信,基于此,已有文献提出采用中继来增加PLC链路传输距离,如:PLC-PLC、PLC-无线(Radio Frequency, RF)和PLC-可见光(Visible Light Communication, VLC)中继方案^[6-8].文献[6]提出了一种解码转发(Decode-and-Forward, DF)协议下的多跳电力线通信系统,并对系统端到端的平均误码率、信道容量和中断概率进行了分析.文献[7]提出了自适应中继协议下电力线和无线双媒质通信系统,文章所提自适应中继算法在不增加系统复杂度的前提下,可以获得最佳的通信质量.文献[8]研究了在DF协议下双跳混合PLC-VLC通信系统,并对该系统的中断概率和误码率进行了理论分析和仿真验证.

近年来,自由空间光(Free Space Optical, FSO)通信系统作为一种安全和高带宽的通信技术受到了通信行业研究人员的广泛关注^[9].相比于无线射频通信,FSO具有安装便捷、功耗低、非授权频谱的独特优势.另外,PLC链路和FSO操作在不同的频段,从而不存在干扰问题.但是由于大气湍流影响,FSO只能提供短距离传输.此外,FSO通信的可靠性会受到云、雾和雪等天气条件的影响.中继通信系统可有效解决上述问题,目前关于FSO中继协作通信系统研究成果颇多^[10-13].

然而,目前尚未有文献研究PLC与FSO之间的协作通信.本文提出了在DF中继协议下的PLC/FSO混合通信系统,并对系统中断概率、误码率和信道容量进行了分析.同时仿真验证了关键参数对系统性能的影响.

1 系统模型

文章研究了一个解码转发协议下的PLC/FSO系统,包括一个源节点(S),一个带有FSO发射器的中继节点(R)和一个具有FSO探测器的目标节点(D),

具体系统模型如图1所示.信号源S在 T_1 时隙通过PLC链路将数据发送至中继R,中继R运用DF协议对接收到的数据进行解码,并使用光电探测器将电信号转换为光信号,再通过FSO发射器发送.光信号在 T_2 时隙通过FSO链路传送到带有FSO探测器的接收端D.假设S和R之间没有直接链路,并且每个收发器节点都配备了用于FSO链路发送和检测的光圈.

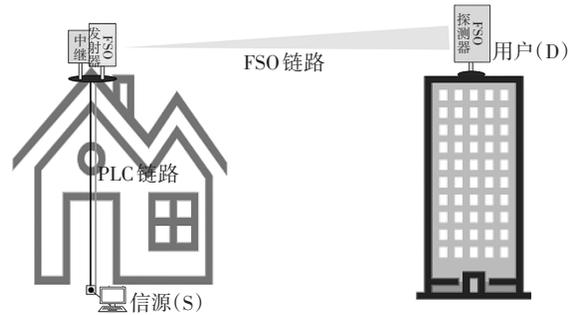


图1 PLC/FSO系统模型图

Fig.1 PLC/FSO system model

1.1 PLC链路

数据 x 经过调制后在 T_1 时隙通过电力线传送到R.因此,R处接收到的信号为 $y_{SR} = h_{SR}x + n_{SR}$,其中, h_{SR} 是信道衰落系数, n_{SR} 表示信道附加噪声.通常使用对数正态分布对 h_{SR} 进行建模,其概率密度函数(Probability Density Function, PDF)为 $f_{h_{SR}}(h_{SR}) = 1/h_{SR}\sqrt{2\pi\sigma_{SR}^2} \exp\left(-(\ln(h_{SR}) - \mu_{SR})^2/2\sigma_{SR}^2\right)$,其中 σ_{SR}^2 和 μ_{SR} 分别表示 $\ln(h_{SR})$ 的方差和均值^[14].本文考虑家庭智能设备通过低压PLC链路接入宽带网络场景,由于PLC链路中连接电缆的低功率组件和电气设备的随机瞬态切换,除了背景噪声对系统的影响外,还需考虑脉冲噪声的影响.在此情形下,采用泊松-高斯混合统计对噪声进行建模^[14].因此,PLC链路的噪声可以表示为 $n_{SR} = n_b + n_i n_p$,其中 n_b 是背景噪声,建模为均值为零和方差为 σ_b^2 的高斯白噪声. $n_i n_p$ 为脉冲噪声,其中 n_p 为每秒中脉冲出现的次数,它服从泊松分布, n_i 为均值为零且方差为 σ_i^2 的高斯白噪声.

脉冲噪声并不存在于整个 T_1 时隙内.因此,当PLC链路中只有背景噪声时,PLC链路的瞬时信噪比 $\gamma_{SR1} = E_b |h_{SR}|^2 / \sigma_b^2 = \bar{\gamma}_{SR1} |h_{SR}|^2$,其中, $\bar{\gamma}_{SR1}$ 表示仅有背景噪声时PLC链路的平均信噪比, E_b 表示信号的平均能量^[14].同样,当脉冲噪声和背景噪声同时出现在PLC链路中时,瞬时信噪比 $\gamma_{SR2} = E_b |h_{SR}|^2 / \sigma_b^2 (1 + \eta) = \bar{\gamma}_{SR2} |h_{SR}|^2$,其中, $\bar{\gamma}_{SR2}$ 表示PLC链路同时存在脉

冲噪声和背景噪声时的平均信噪比, $\eta = \sigma_i^2/\sigma_b^2$ 为脉冲噪声比参数^[14]. 结合上述两种情况, 可得 PLC 链路信噪比 $\gamma_{\text{SR}} = E_b |h_{\text{SR}}|^2 / N_{0,p}$, 其中 $N_{0,p}$ 为 σ_b^2 或 $\sigma_b^2(1 + \eta)$. 从而 γ_{SR} 的概率密度函数可以表示为^[14]

$$f_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma) = (1 - U_i) \left(\frac{m_1}{\Omega_1} \right)^{m_1} \frac{\gamma^{m_1-1}}{\Gamma(m_1)} \exp\left(-\frac{m_1}{\Omega_1} \gamma\right) + U_i \left(\frac{m_2}{\Omega_2} \right)^{m_2} \frac{\gamma^{m_2-1}}{\Gamma(m_2)} \exp\left(-\frac{m_2}{\Omega_2} \gamma\right) \quad (1)$$

其中, $U_i = \lambda Z_i$ 为脉冲噪声到达的概率, λ 是脉冲噪声到达的速率, Z_i 是脉冲噪声持续时间. m_1 和 m_2 为 Gamma 分布 PDF 中的阴影程度参数, Ω_1 和 Ω_2 为 Gamma 分布 PDF 中的阴影区域的平均功率, $\Gamma(\cdot)$ 是伽玛函数^[15]. 其中 m_1 和 m_2 的值取决于 μ_{SR} , 而 Ω_1 和 Ω_2 的值与 μ_{SR} 、 $\bar{\gamma}_{\text{SR1}}$ 和 $\bar{\gamma}_{\text{SR2}}$ 有关系.

因此, γ_{SR} 的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 为^[14]

$$F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma) = (1 - U_i) \left(\frac{1}{\Gamma(m_1)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{m_1}{\Omega_1} \gamma \middle| \frac{1}{m_1}, 0 \right] \right) + U_i \left(\frac{1}{\Gamma(m_2)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{m_2}{\Omega_2} \gamma \middle| \frac{1}{m_2}, 0 \right] \right) \quad (2)$$

其中, $G_{p,q}^{m,n}[\cdot]$ 为 Meijer-G 函数^[15].

1.2 FSO 链路

在 T_2 时隙, 中继 R 首先使用 DF 协议将信号进行解码, 再由光电探测器将数据转换为光信号后通过 FSO 发送器传送到接收端. 从而, 接收端 D 处的信号为 $y_{\text{RD}} = \sqrt{P_{\text{R}}} h_{\text{RD}} \hat{x} + n_{\text{RD}}$, 其中 P_{R} 是 D 处的平均发射功率, \hat{x} 为中继解码后的光信号, n_{RD} 表示均值为零且方差为 N 的高斯白噪声, h_{RD} 表示 FSO 信道系数. $h_{\text{RD}} = h_a h_l h_p$, 其中 h_a 表示服从 Gamma-Gamma 分布的大气湍流的影响因子, $h_l = \exp(-\sigma L)$ 是由衰减系数 σ 和激光距离 L 确定的路损常数, h_p 表示指向误差影响因子.

根据文献 [16], $h_p \approx A \exp\left(-\frac{2r^2}{w_z^2}\right)$, 其中 $A = \text{erf}^2(v)$, $v = \frac{\sqrt{\pi} a}{\sqrt{2} w}$, 为孔径半径 a 和束腰直径 w 之比, $w_z^2 = \frac{w^2 \sqrt{\pi} \text{erf}(v)}{2v \exp(-v^2)}$, r 是 D 处的径向位移. FSO 信道的瞬时信噪比 (Signal-to-Noise, SNR) 为 $\gamma_{\text{RD}} = \frac{P_{\text{R}} h_l^2 h_p^2 h_a^2}{N} = \bar{\gamma}_{\text{RD}} h_l^2 h_p^2 h_a^2$, 其中 $\bar{\gamma}_{\text{RD}}$ 表示 FSO 链路的平均

SNR. 信噪比 γ_{RD} 的 PDF 和 CDF 为^[16]

$$f_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma) = \frac{\xi^2}{2x\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{1,3}^{3,0} \left[\frac{\alpha\beta}{A} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{RD}}}} \middle| \xi^2 + 1 \right] \xi^2, \alpha, \beta \quad (3)$$

$$F_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma) = \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha\beta}{A} \sqrt{\frac{\gamma}{\bar{\gamma}_{\text{RD}}}} \middle| 1, \xi^2 + 1 \right] \xi^2, \alpha, \beta \quad (4)$$

其中, $\xi = \frac{w_z}{2\sigma_s}$ 是等效光束半径 w_z 与指向误差位移标准偏差 σ_s 之间的比值. 其中,

$$\alpha = \left[\exp \left(\frac{0.49\sigma_{\text{R}}^2}{\left(1 + 0.18\kappa^2 + 0.56\sigma_{\text{R}}^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{7}{6}}} - 1 \right) \right]^{-1},$$

$$\beta = \left[\exp \left(\frac{0.51\sigma_{\text{R}}^2 \left(1 + 0.69\sigma_{\text{R}}^{\frac{12}{5}}\right)^{-\frac{5}{6}}}{\left(1 + 0.9\kappa^2 + 0.62\kappa^2\sigma_{\text{R}}^{\frac{12}{5}}\right)^{\frac{5}{6}}} \right) - 1 \right]^{-1} \quad \text{是由大气}$$

条件决定. $\kappa^2 = k_w D_a^2 / (4L)$, $\sigma_{\text{R}}^2 = 0.5C_n^2 k_w^6 L^{\frac{11}{6}}$, $k_w = 2\pi/\lambda_w$ 为光波数, $D_a = 2a$ 是接收机孔径的直径, λ_w 是波长, C_n^2 是湍流强度决定的折射结构参数中受高度影响的系数.

2 性能分析

2.1 中断概率分析

根据式 (2) 和 (4), 系统中断概率为

$$P_{\text{out}} = \Pr(\min(\gamma_{\text{SR}}, \gamma_{\text{RD}}) < \gamma_{\text{th}}) = F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{th}}) + F_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{th}}) - F_{\gamma_{\text{SR}}}(\gamma_{\text{th}})F_{\gamma_{\text{RD}}}(\gamma_{\text{th}}) = (1 - U_i) \left(\frac{1}{\Gamma(m_1)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{m_1}{\Omega_1} \gamma_{\text{th}} \middle| \frac{1}{m_1}, 0 \right] \right) + U_i \left(\frac{1}{\Gamma(m_2)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{m_2}{\Omega_2} \gamma_{\text{th}} \middle| \frac{1}{m_2}, 0 \right] \right) + \left((1 - U_i) \left(\frac{1}{\Gamma(m_1)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{m_1}{\Omega_1} \gamma_{\text{th}} \middle| \frac{1}{m_1}, 0 \right] \right) + U_i \left(\frac{1}{\Gamma(m_2)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{m_2}{\Omega_2} \gamma_{\text{th}} \middle| \frac{1}{m_2}, 0 \right] \right) \right) * \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha\beta}{A} \sqrt{\frac{\gamma_{\text{th}}}{\bar{\gamma}_{\text{RD}}}} \middle| 1, \xi^2 + 1 \right] \xi^2, \alpha, \beta \quad (5)$$

为了更好的分析系统的中断概率性能, 进一步给出中断概率渐近分析. 在高 SNR 情况下, 式 (5) 中的最后一项可以忽略. 应用 Meijer-G 函数的渐近级

数展开[17, Eq.(07.34.06.0040.01)],如下所示:

$$G_{p,q}^{m,n} \left[z \left| \begin{matrix} a_1, \dots, a_n, a_{n+1}, \dots, a_p \\ b_1, \dots, b_m, b_{m+1}, \dots, b_q \end{matrix} \right. \right] \rightarrow \frac{\prod_{j=1}^m \Gamma(b_j - b_k) \prod_{j=1}^n \Gamma(1 - a_j + b_k)}{\prod_{j=1}^p \Gamma(a_j - b_k) \prod_{j=m+1}^q \Gamma(1 - b_j + b_k)} z^{b_k}$$

从而中断概率可以渐近成为,

$$P_{out} \approx (1 - U_i) \frac{\left(\frac{m_1 \gamma_{th}}{\Omega_1}\right)^{m_1}}{\Gamma(1 + m_1)} + U_i \frac{\left(\frac{m_2 \gamma_{th}}{\Omega_2}\right)^{m_2}}{\Gamma(1 + m_2)} + \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \times \sum_{k=1}^3 \frac{\prod_{j=1, j \neq k}^3 \Gamma(b_j - b_k) \Gamma(b_k)}{\Gamma(\xi^2 + 1 - b_k) \Gamma(1 + b_k)} \left(\frac{\alpha\beta \sqrt{\gamma_{th}}}{A \sqrt{\gamma_{RD}}}\right)^{b_k} \quad (6)$$

其中, $b_k = \{\xi^2, \alpha, \beta\}$. 由式(6)可知, 当两端的平均 SNR 均趋向于无穷时, 分集度 $d = -\lim_{\rho \rightarrow \infty} \frac{\log(P_{out})}{\log(\rho)} = \min\left\{m_1, m_2, \frac{b_k}{2}\right\} = \min\left\{m_1, m_2, \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\beta}{2}\right\}$, 说明系统分集度是由 $m_1, m_2, \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}$ 和 $\frac{\beta}{2}$ 中的最小值确定.

2.2 平均误码率分析

系统平均误码率可以写为 $P_{BER} = P_1 + P_2 - 2P_1P_2$, 其中 P_1 和 P_2 分别是 PLC 链路和 FSO 链路的平均 BER. 此外, 二进制调制的平均误码率通用表达式为 $P_b = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^\infty \exp(-q\gamma) \gamma^{q-1} F_\gamma(\gamma) d\gamma$, 其中 p 和 q 是针对具体不同调制方式而变化的参数^[14]. p 和 q 的值取决于所考虑的调制方式.

考虑使用 DBPSK 方案(即 $p = 1, q = 1$). 因此, P_1 和 P_2 分别为

$$P_1 = \frac{1}{2\Gamma(1)} \int_0^\infty \exp(-\gamma) \left[(1 - U_i) \left[\frac{1}{\Gamma(m_1)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{m_1}{\Omega_1} \gamma \left| \begin{matrix} 1 \\ m_1, 0 \end{matrix} \right. \right] \right] + U_i \left[\frac{1}{\Gamma(m_2)} G_{1,2}^{1,1} \left[\frac{m_2}{\Omega_2} \gamma \left| \begin{matrix} 1 \\ m_2, 0 \end{matrix} \right. \right] \right] \right] d\gamma = \frac{1 - U_i}{2\Gamma(m_1)} G_{2,2}^{1,2} \left[\frac{m_1}{\Omega_1} \left| \begin{matrix} 0, 1 \\ m_1, 0 \end{matrix} \right. \right] + \frac{U_i}{2\Gamma(m_2)} G_{2,2}^{1,2} \left[\frac{m_2}{\Omega_2} \left| \begin{matrix} 0, 1 \\ m_2, 0 \end{matrix} \right. \right] \quad (7)$$

$$P_2 = \frac{1}{2\Gamma(1)} \int_0^\infty \exp(-\gamma) \frac{\xi^2}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{2,4}^{3,1} \left[\frac{\alpha\beta}{A} \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_{RD}}} \left| \begin{matrix} 1, \xi^2 + 1 \\ \xi^2, \alpha, \beta \end{matrix} \right. \right] d\gamma = \frac{2^{\alpha+\beta-4} \xi^2}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} G_{5,8}^{6,3} \left[\frac{\alpha^2 \beta^2}{16A^2 \gamma_{RD}} \left| \begin{matrix} 0, \frac{1}{2}, 1, \frac{1+\xi^2}{2}, \frac{2+\xi^2}{2} \\ \rho_1 \end{matrix} \right. \right] \quad (8)$$

其中, $\rho_1 = \left\{ \frac{\xi^2}{2}, \frac{1+\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{1+\alpha}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{1+\beta}{2}, 0, \frac{1}{2} \right\}$.

由(7)、(8)可得系统平均误码率的表达式. 在高信噪比时, 系统平均误码率可渐近为 $P_{BER} \approx P_1 + P_2$.

2.3 系统容量分析

系统容量为 $C = \frac{1}{2} \min[\mathbb{E}\{C_{SR}\}, \mathbb{E}\{C_{RD}\}]$, 其中 $\mathbb{E}\{C_{SR}\}$ 和 $\mathbb{E}\{C_{RD}\}$ 分别是 PLC 链路和 FSO 链路的信道容量. 通过使用 $\ln(1 + \gamma) = G_{2,2}^{1,2} \left[\gamma \left| \begin{matrix} 1, 1 \\ 1, 0 \end{matrix} \right. \right]$ [17, Eq.(01.04.26.0003.01)] 和 $\exp(-bz) = G_{0,1}^{1,0} [bz |_0^-]$ [17, Eq.(07.34.21.0013.01)], $\mathbb{E}\{C_{SR}\}$ 和 $\mathbb{E}\{C_{RD}\}$ 的表达式分别为

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{C_{SR}\} &= \frac{1}{\ln(2)} \int_0^\infty \ln(1 + \gamma) f_{\gamma_{SR}}(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{(1 - U_i) \left(\frac{m_1}{\Omega_1}\right)^{m_1}}{\Gamma(m_1) \ln(2)} G_{2,3}^{3,1} \left[\frac{m_1}{\Omega_1} \left| \begin{matrix} -m_1, 1 - m_1 \\ 0, -m_1, -m_1 \end{matrix} \right. \right] \\ &= \frac{U_i \left(\frac{m_2}{\Omega_2}\right)^{m_2}}{\Gamma(m_2) \ln(2)} G_{2,3}^{3,1} \left[\frac{m_2}{\Omega_2} \left| \begin{matrix} -m_2, 1 - m_2 \\ 0, -m_2, -m_2 \end{matrix} \right. \right] \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{E}\{C_{RD}\} &= \frac{1}{\ln(2)} \int_0^\infty \ln(1 + \gamma) f_{\gamma_{RD}}(\gamma) d\gamma \\ &= \frac{\xi^2 2^{\alpha+\beta-3}}{\pi\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)\ln(2)} G_{3,7}^{7,1} \left[\frac{\alpha^2 \beta^2}{16A^2 \gamma_{RD}} \left| \begin{matrix} 0, 1, \frac{\xi^2 + 2}{2} \\ \rho_2 \end{matrix} \right. \right] \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $\rho_2 = \left\{ \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{1+\alpha}{2}, \frac{\beta}{2}, \frac{1+\beta}{2}, 0, 0 \right\}$. 因此, 通过将式(9)和(10)代入 $C = \frac{1}{2} \min[\mathbb{E}\{C_{SR}\}, \mathbb{E}\{C_{RD}\}]$, 可得系统信道容量.

3 数值仿真分析

在本节中, 通过具体数值分析来说明在上一节

中推导出的解析表达式. 此外, 利用蒙特卡洛仿真验证了推导结果的准确性. 根据文献[14]和[16], 系统参数设置如下: $m_1 = m_2 = 8, U_i = 0.05, \eta = 15, \sigma_{SR} = 0.23, h_l = 1, \sigma_s = 0.3, a = 2.5, \gamma_{th} = 0 \text{ dB}, \bar{\gamma}_{SR} = \bar{\gamma}_{RD} = \bar{\gamma}$.

图2为参数 (α, β, ξ) 三组不同取值(5.91, 4.32, 8.86), (4.60, 2.83, 8.02), (4.08, 1.48, 7.37)时系统的中断概率. 从图2中可以看出, 随着 α 和 β 值的增加, 系统中断概率性能得以提升. 通常用闪烁指数大小来量化由大气湍流引起的波动影响程度, 它定义为 $\sigma_I^2 = E\{I^2\}/E\{I\}^2 - 1$, 其中 I 是接收到的光波的强度, $E\{\cdot\}$ 表示期望值, σ_I^2 值越大表示波动越强. 且闪烁指数与Gamma-Gamma分布中的大尺度湍流参数 α 和小尺度湍流参数 β 的关系为 $\sigma_I^2 = (1/\alpha) + (1/\beta) + (1/\alpha\beta)^{[9]}$. 由此可见, β 的值越大, 意味着大气湍流强度越低, 从而对系统性能的影响越小. 另一方面, 图2显示渐近 P_{out} 值在高SNR时收敛于精确 P_{out} 值. 同时, 可以注意到曲线的斜率随湍流条件变化而变化, 这验证了分集度 $d = \min\left\{m_1, m_2, \frac{\xi^2}{2}, \frac{\alpha}{2}, \frac{\beta}{2}\right\}$ 的正确性.

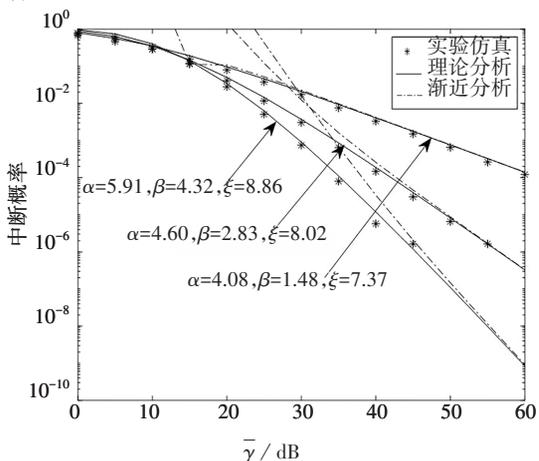


图2 参数 α, β, ξ 不同取值时的系统中断概率
Fig.2 Outage probability for different values of α, β, ξ

图3给出了双跳混合PLC/FSO系统和单一PLC系统中断概率对比图. 由图3可知, 本文提出的混合系统的中断概率性能优于单一PLC系统. 这是因为PLC通信衰减较大, 从而导致传播距离有限, 通过中继方式可有效增加系统传播距离. 同时从图3可见, 系统的中断概率随着PLC信道中脉冲概率的降低而减小.

图4比较了在不同大气湍流条件下系统的平均

BER, 即分别取参数 (α, β) 为(8.23, 6.72)(弱湍流)、(4.54, 2.76)(中度湍流)、(3.99, 1.70)(强湍流). 由图4可知, (α, β) 的取值越大, 系统的平均BER越低. 原因是, (α, β) 的值越大, 意味着大气湍流越弱, 从而对系统性能的影响就越小. 另一方面, 图4还揭示了渐近和精确的平均误码率表达式之间的收敛性.

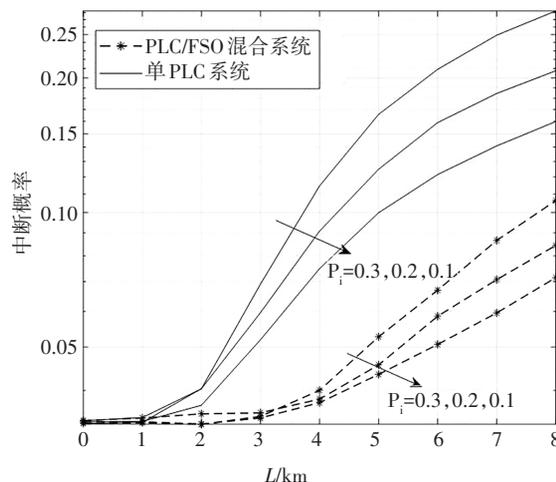


图3 PLC/FSO混合系统和单一PLC系统中断概率
Fig.3 Outage probability of mixed PLC/FSO system and single PLC system

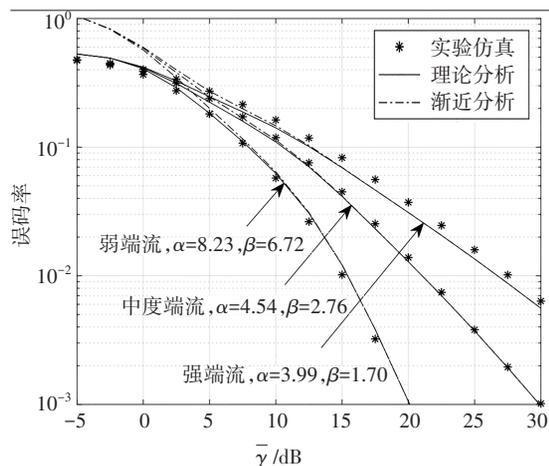


图4 不同湍流条件下系统误码率
Fig.4 BER for different turbulence conditions

图5为在不同的取值情况下系统的信道容量. PLC链路的平均信噪比 $\bar{\gamma}_{SR}$ 分别固定为20 dB、13 dB和6 dB. 可以观察到信道容量 C 随着平均信噪比 $\bar{\gamma}_{SR}$ 增大增大. 此外, 由于信道容量主要取决于PLC链路, 因此 C 在高信噪比时逐渐趋于常数. 因此, 由图5可以看出, 随着参数 U_i 或 η 的减少, 系统会有更高的信道容量.

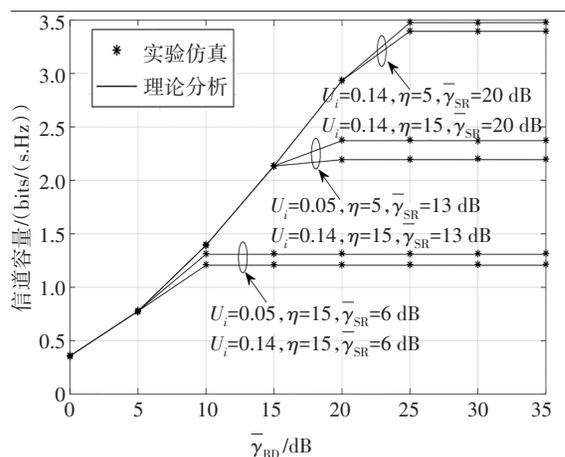


图5 参数 U_i , η , $\bar{\gamma}_{SR}$ 不同取值时的系统容量

Fig.5 Channel capacity for various values of U_i , η and $\bar{\gamma}_{SR}$

4 结论

本文研究了PLC/FSO通信系统解码转发协议下的相关性能. 得出了中断概率、平均误码率和信道容量的闭式表达式, 同时给出了中断概率和信道容量渐近分析的表达式, 并利用蒙特卡洛仿真验证了推导结果的准确性. 同时, 还分析了脉冲噪声、大气湍流强度和指向误差对系统性能的影响, 结果显示, 在信噪比为35dB时, 弱湍流条件下的中断概率为强湍流条件下1/100; 在信噪比为15dB时, 弱湍流条件下的中断概率为强湍流条件下1/10; 信道容量随着脉冲噪声的减少而增加.

参考文献

- [1] 刘晓胜, 崔莹, 徐殿国. 低压电力线通信组网性能优化方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(12): 16-21.
LIU X S, CUI Y, XU D G. Performance optimization for low voltage power line communication [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 16-21. (In Chinese)
- [2] 王艳, 王阳, 赵洪山, 等. 中压配电网电力线载波通信信道建模[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 50-57.
WANG Y, WANG Y, ZHAO H S, et al. Channel modeling of power line communication in a medium voltage distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 50-57. (In Chinese)
- [3] 史建超, 谢志远, 胡正伟, 等. 多跳中继宽带电力线通信网络中的OFDM跨层资源分配[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 58-66.
SHI J C, XIE Z Y, HU Z W, et al. OFDM cross layer resource allocation in multi-relay broadband power line communication networks [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 58-66. (In Chinese)
- [4] 宋晓健, 喻洁, 张俊芳, 等. 面向能源互联网的电力-通信联合仿真平台设计[J]. 电力工程技术, 2017, 36(3): 44-49.
SONG X J, YU J, ZHANG J F, et al. Design of power communication simulation platform for energy Internet [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(3): 44-49. (In Chinese)
- [5] 杨蓉, 曹旺斌, 尹成群. 基于自适应遗传算法的PLC信道动态子载波分配[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 111-116.
YANG R, CAO W B, YIN C Q. Dynamic subcarrier allocation of PLC channel based on adaptive genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 111-116. (In Chinese)
- [6] DUBEY A, MALLIK R K, SCHÖBER R. Performance analysis of a multi-hop power line communication system over log-normal fading in presence of impulsive noise [J]. IET Communications, 2015, 9(1): 1-9.
- [7] 史燕平, 王丽娇, 李秀彩, 等. 电力线和无线双媒质通信系统的自适应中继协议[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 171-179.
SHI Y P, WANG L J, LI X C, et al. Adaptive relay protocol for power line-wireless hybrid media communication system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 171-179. (In Chinese)
- [8] JANI M, GARG P, GUPTA A. Performance analysis of a mixed cooperative PLC - VLC system for indoor communication systems [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 469-476.
- [9] KHALIGHI M A, UYSAL M. Survey on free space optical communication: a communication theory perspective [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 2231-2258.
- [10] SIDDHARTH M, SHAH S, VISHWAKARMA N, et al. Performance analysis of adaptive combining based hybrid FSO/RF terrestrial communication [J]. IET Communications, 2020, 14(22): 4057-4068.
- [11] AL-ERYANI Y F, SALHAB A M, ZUMMO S A, et al. Two-way multiuser mixed RF/FSO relaying: performance analysis and power allocation [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2018, 10(4): 396-408.
- [12] ANEES S, BHATNAGAR M R. Performance of an amplify-and-forward dual-hop asymmetric RF - FSO communication system [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(2): 124-135.
- [13] ZEDINI E, SOURY H, ALOUINI M S. On the performance analysis of dual-hop mixed FSO/RF systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(5): 3679-3689.
- [14] JANI M, GARG P, GUPTA A. Performance analysis of a mixed cooperative PLC - VLC system for indoor communication systems [J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(1): 469-476.
- [15] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of Integrals, Series, and Products [M]. 6th ed. New York: Academic Press, 2000.
- [16] CHEN J C, YANG L, WANG W J, et al. A novel energy harvesting scheme for mixed FSO-RF relaying systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 8259-8263.
- [17] The Wolfram functions site, Available: <http://functions.wolfram.com>.