

解码转发方案下混合RF-UWOC传输系统的性能分析

黎 赛¹, 陈生海¹, 杨 亮¹, 胡彦彬²

(1. 湖南大学信息科学与工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 湖南金龙智造科技股份有限公司, 湖南长沙 410100)

摘 要: 本文研究了解码转发(Decode-and-Forward, DF)方案下的混合射频/水下无线光通信(Radio Frequency-Underwater Wireless Optical Communication, RF-UWOC)系统的性能, 其中RF链路服从广义K(Generalized-K, GK)衰落, UWOC链路服从混合指数-广义Gamma(Exponential-Generalized Gamma, EGG)衰落且存在指向误差. 针对该混合RF-UWOC系统, 推导了信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)的累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)和概率密度函数(Probability Density Function, PDF). 利用这些结果, 推导出了混合RF-UWOC系统的中断概率、平均误码率和平均信道容量的精确表达式. 此外, 为了获得更多显性结果, 还给出了高信噪比情况下中断概率和平均误码率的渐近分析. 最后, 通过蒙特卡洛仿真, 验证了分析结果的准确性.

关键词: 水下光无线通信; 混合中继; 解码转发; 性能分析

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2022)02-0391-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20210165

Performance Analysis of Mixed RF-UWOC Dual-Hop Transmission Systems with the DF Protocol

LI Sai¹, CHEN Sheng-hai¹, YANG Liang¹, HU Yan-bin²

(1. College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Hunan Casting Intelligent Manufacturing Technology Co., Ltd., Changsha, Hunan 410100, China)

Abstract: This paper investigates the performance of a mixed radio frequency/underwater wireless optical communication(RF-UWOC) system with decode-and-forward(DF) relay, where the RF link experiences generalized-K fading and the UWOC link is modeled by the mixture exponential-generalized Gamma(EGG) fading with pointing errors. For this mixed RF-UWOC system, we derive the cumulative distribution function(CDF) and probability density function(PDF) of the signal-to-noise ratio(SNR). Based on these results, exact analytical expressions of the outage probability, average bit error rate(BER), and average channel capacity for the mixed RF-UWOC system are presented. In order to obtain more useful insights, we provide the asymptotic results of the outage probability and average BER in the high SNR regime. Finally, our analytical results are verified via Monte-Carlo simulation.

Key words: underwater wireless optical communication; dual-hop relaying; decode-and-forward; performance analysis

1 引言

为了满足6G典型应用场景的需求, 水下光无线通信(Underwater Wireless Optical Communication, UWOC)因其更宽的传输带宽和极高的数据传输速率引起了广泛的关注^[1,2]. 然而, UWOC受吸收、散射和水下光湍流效应的影响很大^[3], 其系统的实现仍然存在很多技术难点. 另外, UWOC的传输距离也有限, 通常限制100 m

的范围内, 阻碍了UWOC系统的广泛发展.

水下光湍流与温度波动、盐度变化以及海水中的存在的气泡相关, 这些因素的变化会影响光信号的传播. 文献[3]提出了一个混合指数-广义Gamma(Exponential-Generalized Gamma, EGG)模型, 该模型考虑了在气泡和温度梯度均存在的情况下光束辐照度波动. EGG分布可以较好地描述接收强度且其数学模型便于

分析计算. 最近, 混合射频 (Radio Frequency, RF)-UWOC 系统的性能分析受到关注. 该模型可以满足人们对海洋勘探中高带宽数据传输的需求^[4-7]. 文献[5]考虑了 RF 链路服从 Nakagami- m 衰落的混合 RF-UWOC 系统. 文献[6]研究了固定增益 AF 中继下混合 RF-UWOC 系统的性能, 其中 RF 和 UWOC 链路分别服从广义 K (Generalized-K, GK) 和 EGG 衰落, GK 分布能够同时捕获小规模和大规模衰落, 且可以近似为重要的衰落模型, 如 Nakagami- m 分布. 文献[7]研究了基于无人机的 RF-UWOC 系统.

尽管前述的一些工作对水下光湍流引起的衰落进行了详细的研究, 但在 UWOC 链路中, 海面浮标的运动引起的收发器不对准会造成严重的性能损失. 然而, 文献[5, 6]没有考虑到不对准引起的指向误差对系统性能的影响. 因此本文考虑一个混合的 RF-UWOC 系统, RF 和 UWOC 链路的信道衰落分别采用 GK 分布和具有指向误差的 EGG 分布建模. 系统同时考虑了外差检测 (Heterodyne Detection, HD) 技术和强度调制/直接检测 (Intensity Modulation/Direct Detection, IM/DD) 技术. 与文献[5]相比, 本文中 RF 链路的衰落采用更通用的 GK 分布建模. 而在文献[6]中, 由于无人机的视距传播, 其 RF 链路服从 Rician 衰落. 因此, 本文中 UWOC 链路考虑了指向误差的影响, UWOC 信道模型不同于文献[5, 6], 而 RF 链路信道模型与文献[5, 7]不同. 具体而言, 本文首先推导了端到端信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 的累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 和概率密度函数 (Probability Density Function, PDF). 利用这些结果, 推导了中断概率、平均误码率以及平均信道容量的精确表达式. 另外, 本文给出了系统高信噪比下的渐近结果. 最后, 利用蒙特卡洛仿真方法, 验证了计算结果的准确性, 讨论了不同参数下系统的性能变化. 仿真结果显示, 该 RF-UWOC 系统的分集度与 RF 链路的衰落参数、UWOC 链路的检测技术以及 UWOC 链路的指向误差有关.

2 系统与信道模型

本文考虑一个混合的 RF-UWOC 系统, 基站 S 通过具有 DF 协议的浮标中继 R 与水下目的地 D 通信. S 处的信号通过 RF 链路传输到 R, 通过电光转换后, 光信号由 UWOC 链路传输到 D. 假设 RF 链路的信道衰落服从 GK 分布, RF 链路的瞬时信噪比 γ_1 的 PDF 和 CDF 表达式为^[8]

$$f_{\gamma_1}(\gamma_1) = \frac{\eta}{\Gamma(m)\Gamma(k)} G_{0,2}^{2,0} \left(\eta \gamma_1 \left| \begin{matrix} - \\ k-1, m-1 \end{matrix} \right. \right) \quad (1)$$

$$F_{\gamma_1}(\gamma_1) = \frac{1}{\Gamma(m)\Gamma(k)} G_{1,3}^{2,1} \left(\eta \gamma_1 \left| \begin{matrix} 1 \\ k, m, 0 \end{matrix} \right. \right) \quad (2)$$

式中 $\eta = mk/\bar{\gamma}_1$, m 和 k 是信道衰落参数, $\bar{\gamma}_1$ 是 RF 链路的平均信噪比, $G_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ 是 Meijer's G 函数^[9], $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数^[9]. 假设 UWOC 链路的信道增益 I 服从具有指向误差的 EGG 分布, 其瞬时信噪比 γ_2 的 PDF 和 CDF 表达式为^[7]

$$f_{\gamma_2}(\gamma_2) = \frac{\omega \xi^2}{\gamma_2} H_{1,2}^{2,0} \left(\varpi_1 \gamma_2 \left| \begin{matrix} (\xi^2+1, r) \\ (1, r) (\xi^2, r) \end{matrix} \right. \right) + \frac{(1-\omega)\xi^2}{c\Gamma(a)\gamma_2} H_{1,2}^{2,0} \left(\varpi_2 \gamma_2 \left| \begin{matrix} \left(\frac{\xi^2}{c}+1, \frac{r}{c}\right) \\ \left(a, \frac{r}{c}\right) \left(\frac{\xi^2}{c}, \frac{r}{c}\right) \end{matrix} \right. \right) \quad (3)$$

$$F_{\gamma_2}(\gamma_2) = \omega \xi^2 r H_{2,3}^{2,1} \left(\varpi_1 \gamma_2 \left| \begin{matrix} l_1 \\ l_2 \end{matrix} \right. \right) + \frac{(1-\omega)\xi^2 r}{c^2 \Gamma(a)} H_{2,3}^{2,1} \left(\varpi_2 \gamma_2 \left| \begin{matrix} l_3 \\ l_4 \end{matrix} \right. \right) \quad (4)$$

其中 $l_1 = \{(1, r)(1 + \xi^2, r)\}$, $l_2 = \{(1, r)(\xi^2, r)(0, r)\}$,

$$l_3 = \left\{ \left(1, \frac{r}{c} \right) \left(1 + \frac{\xi^2}{c}, \frac{r}{c} \right) \right\}, \varpi_1 = 1/(\lambda^r A_o^r \rho_r),$$

$$l_4 = \left\{ \left(a, \frac{r}{c} \right) \left(\frac{\xi^2}{c}, \frac{r}{c} \right) \left(0, \frac{r}{c} \right) \right\}, \varpi_2 = 1/(b^r A_o^r \rho_r),$$

$\rho_r = \bar{\gamma}_2/E[I]^r$, $\bar{\gamma}_2$ 为 UWOC 链路平均信噪比, $E[\cdot]$ 是期望符号, r 表示检测技术类型 ($r=1$ 为 HD 技术; $r=2$ 为 IM/DD 技术), ω, λ, a, b 和 c 是 EGG 分布的衰落参数, A_o 和 ξ 是关于指向误差的参数^[10], $H_{p,q}^{m,n}(\cdot)$ 是 Fox's H 函数^[11], 文献[12]给出了实现 Fox's H 函数的仿真方法.

3 统计特性

当中继 R 工作于 DF 协议时, 接收端 D 的瞬时信噪比定义为

$$\gamma_D = \min \{\gamma_1, \gamma_2\} \quad (5)$$

3.1 累积分布函数

根据文献[7], 可得 γ_D 的 CDF 为

$$F_{\gamma_D}(\gamma) = F_{\gamma_1}(\gamma) + F_{\gamma_2}(\gamma) - F_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma) \quad (6)$$

其中 $F_{\gamma_1}(\gamma)$ 和 $F_{\gamma_2}(\gamma)$ 分别是 γ_1 和 γ_2 的 CDF, 把式(2)和式(4)代入式(6), 可得 RF-UWOC 系统的 CDF. 当 $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma} \rightarrow \infty$ 以及 $m \neq k$ 时, 根据文献[13]中的 Eq. (2.9.1) 和 (1.8.4), 可以计算出渐近的 CDF 为

$$F_{\gamma_1}^\infty(\gamma) \rightarrow \sum_{i=1}^5 \kappa_i \left(\frac{\gamma}{\bar{\gamma}} \right)^{\delta_i} \quad (7)$$

其中, κ_i 是常数项, $\delta_i = \left(m, k, \frac{1}{r}, \frac{\xi^2}{r}, \frac{ac}{r} \right)$, $ac > 1$.

3.2 概率密度函数

根据文献[7]中的 Eq. (22), γ_D 的 PDF 为

$$f_{\gamma_D}(\gamma) = f_{\gamma_1}(\gamma) + f_{\gamma_2}(\gamma) - f_{\gamma_1}(\gamma)F_{\gamma_2}(\gamma) - f_{\gamma_2}(\gamma)F_{\gamma_1}(\gamma) \quad (8)$$

4 性能分析

4.1 中断概率

当瞬时信噪比 γ 低于设定的阈值 γ_{th} 时,通信系统发生中断. 在式(6)中设置 $\gamma = \gamma_{th}$, 可得系统中断概率为 $P_{out} = F_{\gamma_D}(\gamma_{th})$, 因此, 渐近的中断概率为 $P_{out}^{\infty} \rightarrow F_{\gamma_D}^{\infty}(\gamma_{th})$, 通过式(7)可得系统的分集度为

$$G_d = \min\left(m, k, \frac{1}{r}, \frac{\zeta^2}{r}\right) \quad (9)$$

从式(9)可以发现, 本文考虑的 DF 系统的分集度取决于 RF 链路衰落参数 (m 和 k)、UWOC 链路的检测技术 r 和指向误差参数 ζ .

4.2 平均误码率

根据文献[14], 平均误码率定义为

$$P_e = \frac{q^p}{2\Gamma(p)} \int_0^{\infty} \exp(-q\gamma) \gamma^{p-1} F_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (10)$$

其中 $p=0.5$ 和 $q=1$ 为二进制相移键控 (BPSK). 由文献[7]中的 Eq. (43) 可知, DF 系统的平均误码率为

$$P_e = P_{e,SR} + P_{e,RD} - 2P_{e,SR}P_{e,RD} \quad (11)$$

其中 $P_{e,SR}$ 和 $P_{e,RD}$ 分别表示 RF 链路和 UWOC 链路的平均误码率, 通过把式(2)和(4)分别代入式(10), 并把 $\exp(-q\gamma)$ 展开为 Meijer's G 函数, 再使用文献[13] Eq. (2.9.1)、文献[11] Eq. (1.59) 和文献[15] Eq. (2.25.1), 式(11)可以表达为

$$P_{e,SR} = \frac{1}{2\Gamma(p)\Gamma(m)\Gamma(k)} G_{2,3}^{2,2} \left(\frac{\eta}{q} \left| \begin{matrix} 1, 1-p \\ k, m, 0 \end{matrix} \right. \right) + \frac{\omega\zeta^2 r}{2\Gamma(p)} H_{3,3}^{2,2} \left(\frac{\varpi_1}{q} \left| \begin{matrix} t_1, (1-p, 1) \\ t_2 \end{matrix} \right. \right) + \frac{(1-\omega)\zeta^2 r}{2\Gamma(p)\Gamma(a)c^2} H_{3,3}^{2,2} \left(\frac{\varpi_2}{q} \left| \begin{matrix} t_3, (1-p, 1) \\ t_4 \end{matrix} \right. \right) \quad (12)$$

同理, 当 $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma} \rightarrow \infty$, 可求得渐近的平均误码率为

$$P_e^{\infty} \rightarrow \sum_{i=1}^5 \varepsilon_i \bar{\gamma}^{-\delta_i} \quad (13)$$

其中 ε_i 为常数.

4.3 平均信道容量

对于 HD 和 IM/DD 两种检测方式, 统一的系统平均信道容量的表达式为^[7,14]

$$\bar{C} = \frac{1}{2\ln(2)} \int_0^{\infty} \ln(1 + \tau\gamma) f_{\gamma}(\gamma) d\gamma \quad (14)$$

其中 $\tau=1$ 为 HD 技术, $\tau=e/(2\pi)$ 表示 IM/DD^[3]. 将式(8)代入式(14), 利用文献[15] Eq. (8.4.6/5) 和(2.25.1)、文献[11] Eq. (1.59)、文献[13] Eq. (2.9.1) 和文献[16] Eq. (1.1) 和(2.3), 可以推导出 DF 系统的平均信道容

量的结果为

$$\begin{aligned} \bar{C} = & \frac{1}{2\ln(2)\Gamma(m)\Gamma(k)} G_{2,4}^{4,1} \left(\frac{\eta}{\tau} \left| \begin{matrix} 0, 1 \\ k, m, 0, 0 \end{matrix} \right. \right) + \frac{\omega\zeta^2 r}{2\ln(2)} \\ & \times H_{2,3}^{3,1} \left(\frac{\varpi_1}{\tau} \left| \begin{matrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \end{matrix} \right. \right) + \frac{(1-\omega)\zeta^2 r}{2\ln(2)\Gamma(a)c^2} H_{3,4}^{4,1} \left(\frac{\varpi_2}{\tau} \left| \begin{matrix} \zeta_3 \\ \zeta_4 \end{matrix} \right. \right) \\ & - \left[\sigma_1 H_{2,0;2,2;2,1}^{0,2;1,2;2,1} \left(\begin{matrix} (1-k; 1, 1)(1-m; 1, 1) \\ - \end{matrix} \middle| \begin{matrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{matrix} \right) \left| \begin{matrix} l_1 \\ l_2 \end{matrix} \right| \frac{\tau}{\eta}, \frac{\varpi_1}{\eta} \right) \\ & + \sigma_2 H_{2,0;2,2;2,3}^{0,2;1,2;2,1} \left(\begin{matrix} (1-k; 1, 1)(1-m; 1, 1) \\ - \end{matrix} \middle| \begin{matrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{matrix} \right) \left| \begin{matrix} l_3 \\ l_4 \end{matrix} \right| \frac{\tau}{\eta}, \frac{\varpi_2}{\eta} \right) \\ & - \left[\sigma_3 H_{2,1;2,2;1,3}^{0,2;1,2;2,1} \left(\begin{matrix} (0; r, r)(1-\zeta^2; r, r) \\ (-\zeta^2; r, r) \end{matrix} \middle| \begin{matrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{matrix} \right) \left| \begin{matrix} (1, 1) \\ l_5 \end{matrix} \right| \frac{\tau}{\varpi_1}, \frac{\eta}{\varpi_1} \right) \\ & + \sigma_4 H_{2,1;2,2;1,3}^{0,2;1,2;2,1} \left(\begin{matrix} \chi \\ (-\frac{\zeta^2}{c}; \frac{r}{c}, \frac{r}{c}) \end{matrix} \middle| \begin{matrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{matrix} \right) \left| \begin{matrix} (1, 1) \\ l_5 \end{matrix} \right| \frac{\tau}{\varpi_2}, \frac{\eta}{\varpi_2} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

其中 $H_{p_1, q_1; p_2, q_2; p_3, q_3}^{0, n_1; m_2, n_2; m_3, n_3}(\cdot, \cdot)$ 是双变量的 Fox's H 函数, 其定义式在文献[11] Eq. (2.57) 中给出. 利用 MATLAB 软件可以对双变量的 Fox's H 函数进行计算, 代码在文献[17] 中给出. $\epsilon_1 = \{(1, 1)(1, 1)\}$, $\epsilon_2 = \{(1, 1)(0, 1)\}$, $\zeta_1 = \{(0, 1)(1 + \zeta^2, r)\}$, $\zeta_2 = \{(0, r)(\zeta^2, r)(0, 1)\}$, $l_5 = \{(k, 1)(m, 1)(0, 1)\}$,

$\sigma_1 = \frac{\omega\zeta^2 r}{2\ln(2)\Gamma(m)\Gamma(k)}$, $\sigma_2 = \frac{(1-\omega)\zeta^2 r}{2\ln(2)\Gamma(m)\Gamma(k)\Gamma(a)c^2}$, $\sigma_3 = \frac{\omega\zeta^2}{2\ln(2)\Gamma(m)\Gamma(k)}$, $\sigma_4 = \frac{(1-\omega)\zeta^2}{2\ln(2)\Gamma(a)\Gamma(m)\Gamma(k)c}$, $\chi = \left\{ \left(1-a; \frac{r}{c}, \frac{r}{c} \right) \left(1 - \frac{\zeta^2}{c}; \frac{r}{c}, \frac{r}{c} \right) \right\}$, $\zeta_3 = \left\{ (0, 1) \left(1 + \frac{\zeta^2}{c}, \frac{r}{c} \right) \left(1, \frac{r}{c} \right) \right\}$, $\zeta_4 = \left\{ \left(a, \frac{r}{c} \right) \left(\frac{\zeta^2}{c}, \frac{r}{c} \right) \left(0, \frac{r}{c} \right) (0, 1) \right\}$

5 结果分析

本文采用蒙特卡洛仿真验证上述分析结果的精确性. 设置参数为 $\bar{\gamma}_1 = \bar{\gamma}_2 = \bar{\gamma}$, $\gamma_{th} = 2$ dB, UWOC 链路的相关参数详见文献[7]中表 1 和表 2, 图中符号 BL(L/min) 表示气泡水平, $\Delta T(^{\circ}\text{C} \cdot \text{cm}^{-1})$ 表示温度梯度.

图 1 为不同的 RF 链路参数下该混合系统中断概率仿真图. 从图中可以看出随着 m 和 k 值的增加, 系统中断概率减小, 原因在于 m 或 k 值越大表示衰落程度越小, 从而系统呈现出更好的性能. 从该图可以看出 HD 检测技术比 IM/DD 检测技术具有更优的中断性能, 这是因为 HD 技术能更好的克服水下光湍流效应. 在高信噪比下, 中断概率的渐近结果与精确分析结果紧密

吻合,也验证了系统中断概率的分集度是由 RF 链路衰落参数、UWOC 链路的检测技术以及 UWOC 链路的指向误差参数决定的。

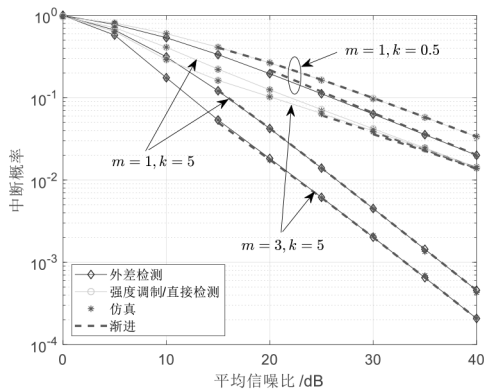


图1 中断概率随衰落及检测方式的变化情况,参数设置为 $BL = 2.4 \text{ L/min}$, $\Delta T = 0.05 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$, $\xi = 1.2707$

图2比较了系统平均误码率在不同衰落参数下的变化.假设系统使用BPSK调制方式.可以发现随着气泡水平和温度梯度的增加,水下光湍流引起的衰落变得严重,从而导致平均误码率下降.同时从图中也可以看到,气泡水平比温度波动对误码率的影响更大。

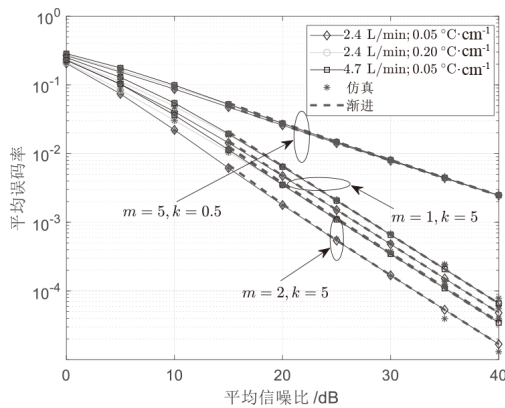


图2 平均误码率随衰落的变化情况,参数设置为 $\xi = 2.2873$

基于IM/DD检测技术,图3给出了咸水和淡水两种情况下不同气泡水平对系统平均信道容量的影响.无论何种水域情况,在气泡水平值变高的情况下,如气泡水平由4.7 L/min增加到16.5 L/min时,平均信道容量下降幅度很大.同时,可以看出盐度变化对平均信道容量也会产生影响,但其影响程度远低于气泡水平.并且,湍流强度较弱时,如 $BL = 4.7 \text{ L/min}$,水盐浓度对平均信道容量的影响可以忽略。

图4比较了不同检测方式下指向误差效应对系统平均信道容量的影响.可以看出,指向误差对HD和IM/DD系统容量都造成影响,越严重的指向误差(ξ 越小),平均信道容量越低。

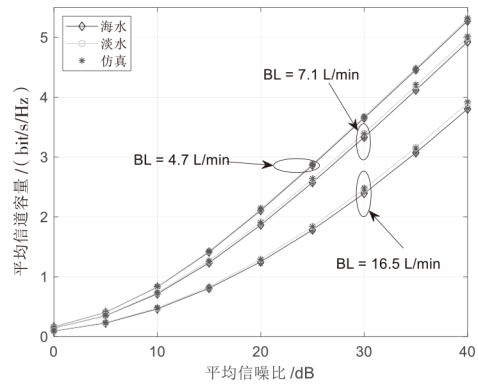


图3 水下光湍流对平均信道容量的影响,参数设置为 $m = 2, k = 5$, $\xi = 5.7183$

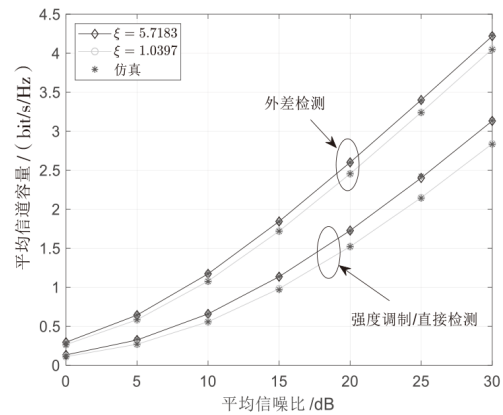


图4 指向误差对平均信道容量的影响,参数设置为 $BL = 4.7 \text{ L/min}$, $\Delta T = 0.05 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{cm}^{-1}$

6 结论

本文研究了混合RF-UWOC系统的性能,推导了该系统的中断概率、平均误码率和平均信道容量的表达式以及中断概率和平均误码率的渐近表达式.结果表明,低气泡水平和低温度梯度时系统性能较好,水盐浓度变化会对系统性能产生一定影响,但其影响程度远低于气泡水平.另外,指向误差会对系统性能造成明显的损失.最后,分析和仿真结果表明本文提出的系统的分集度取决于RF链路的衰落参数、UWOC链路所采用的检测技术以及指向误差参数。

参考文献

[1] SAXENA P, BHATNAGAR M R. A simplified form of beam spread function in underwater wireless optical communication and its applications[J]. IEEE Access, 2019, 7: 105298-105313.
 [2] POMPILI D, AKYILDIZ I F. Overview of networking protocols for underwater wireless communications[J]. IEEE Communications Magazine, 2009, 47(1): 97-102.

- [3] ZEDINI E, OUBEI H M, KAMMOUN A, et al. Unified statistical channel model for turbulence-induced fading in underwater wireless optical communication systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(4): 2893-2907.
- [4] ILLI E, BOUANANI F E, COSTA D B D, et al. Dual-hop mixed RF-UOW communication system: A PHY security analysis[J]. IEEE Access, 2018, 6: 55345-55360.
- [5] LEI H, ZHANG Y, PARK K, et al. Performance analysis of dual-hop RF-UWOC systems[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 2(12): 1-15.
- [6] LI S, YANG L, COSTA D B D, et al. Performance analysis of mixed RF-UWOC dual-hop transmission systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 14043-14048.
- [7] LI S, YANG L, COSTA D B D, YU S. Performance analysis of UAV-based mixed RF-UWOC transmission systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 2021, 69(8): 5559-5572.
- [8] LEI H, GAO C, ANSARI I S, et al. On physical-layer security over SIMO generalized-K fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(9): 7780-7785.
- [9] GRADSHTEYN I S, RYZHIC I M. Table of Integrals, Series, and Products(7th ed)[M]. CA, USA: Academic Press, 2007.
- [10] GAPPMAIR W. Further results on the capacity of free-space optical channels in turbulent atmosphere[J]. IET Communications, 2011, 5(9): 1262-1267.
- [11] MATHAI A M, SAXENA R K, HAUBOLD H J. The H-Function: Theory and Applications[M]. NY, USA: Springer, 2010.
- [12] YILMAZ F, ALOUINI M S. Product of the powers of generalized nakagami-m variates and performance of cascaded fading channels[C]//Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2009: 1-9.
- [13] KILBAS A, SAIGO M. H-Transforms: Theory and Applications[M]. FL, USA: CRC Press, 2004.
- [14] 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.
- [15] PRUDNIKOV A P, BRYCHKOV Y A, MARICHEV O I. Integrals and Series Volume 3 More Special Functions [M]. NY, USA: CRC Press, 1992.
- [16] MITTAL P K, GUPTA K C. An integral involving generalized function of two variables[J]. Proceedings of the Indian Academy of Sciences Section-A, 1972, 75(3): 117-123.
- [17] ILLI E, BOUANANI F E, AYOUB F. A performance study of a hybrid 5G RF/FSO transmission system[C]// Proceedings of the International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications. Morocco: IEEE, 2017: 1-7.

作者简介

黎 赛 女,1996年生于湖南长沙.现为湖南大学信息科学与工程学院博士生,主要研究方向为光无线通信性能分析.

陈生海 男,1989年生于湖南怀化.现为湖南大学信息科学与工程学院博士生,主要研究方向为协作通信性能分析.

杨 亮(通讯作者) 男,1977年生于湖南邵阳.现为湖南大学信息科学与工程学院教授,主要研究方向为无线通信、光无线通信、无人机通信、物理层安全.

E-mail: liangy@hnu.edu.cn

胡彦彬 男,1983年生于湖南衡阳.现为湖南金龙智造科技股份有限公司工业设计中心副主任、工程师,主要研究方向为无线通信.