

基于 MIMO 室内可见光通信系统最大化保密速率分析

张亚娟¹, 边亚红¹, 郑英昊^{2*}

(1. 中国联合网络通信有限公司 河北省分公司, 石家庄 050035; 2. 华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 可见光通信(VLC)物理层安全研究对于 VLC 的商用化和普及有着重要的作用。以一个多输入多输出(MIMO)室内 VLC 系统为模型, 先分别推导了窃听者串通和非串通情况下的保密容量下限表达式并进行分析对比, 然后针对非串通情况提出了一种最优的波束赋形方案来最大化保密速率, 最后进行了数值仿真。仿真结果表明: 非串通情况下的保密容量优于串通情况, 窃听者的数量仅对串通情况下的保密容量有影响。

关键词: 可见光通信; 多窃听者; 串通; 非串通; 保密容量

中图分类号: TN929.12 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2022)02-0051-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.02.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis of maximum security rate based on MIMO indoor visible light communication system

ZHANG Yajuan¹, BIAN Yahong¹, ZHENG Yinghao^{2*}

(1. Hebei Branch of China United Network Communications Co., Ltd., Shijiazhuang 050035, China;

2. Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: Visible light communication(VLC) physical layer security research plays an important role in the commercialization and popularization of VLC. Based on a multi-input multiple output(MIMO) indoor VLC system, the lower limit expressions of the security capacity in the case of eavesdroppers colluding and non-colluding are derived and compared. Then, an optimal beam forming scheme is proposed to maximize the security rate in the case of non-colluding. Finally, numerical simulation is carried out. The simulation results show that the confidentiality capacity in the case of non-collusion is better than that in the case of collusion, and the number of eavesdroppers only has an effect on the confidentiality capacity in the case of collusion.

Key words: visible light communication, multiple eavesdroppers, collusion, non-collusion, confidentiality capacity

0 引言

可见光通信(VLC)是一种新兴的技术, 由于其具有高速和部署成本低的优点, 在过去十年中引起了人们极大的研究兴趣。与其它无线通信技术相同, VLC 链路具有广播性、开放性和不稳定性, 再加上安全机制不完善和人们防范意识疏忽, 通信系统极易受到非法用户的攻击。物理层安全(PLS)是指借助信道的随机性, 在牺牲部分信息速率与带宽的条件下, 弱化窃

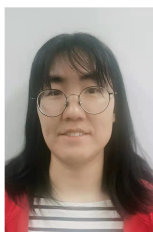
听者(Eve)作为接收端的作用, 减少 Eve 接收到的正确信息, 削弱 Eve 的正确破译能力, 从而达到安全传输的效果。因此, 如何在保密传输的同时保证较高的传输速率一直是研究者们关注的关键技术。

为了保持线性电流光强度转换和避免剪切失真^[1-3], VLC 系统对信道输入施加了振幅约束, 这使得无界输入(如高斯输入)被禁止。因此, 为射频系统开发的 PLS 方案不能直接应用于 VLC 系统。于是, 一些研究者对 PLS 技术进行扩展, 然后将其应用到 VLC 系统中。目前, 这些 PLS 扩展应用技术只考虑了单输入单输出(SISO)或多输入单输出(MISO)VLC 高斯窃听通道, 主要研究工作仍然集中在 PLS 技术, 如波束形成^[4-5]和人工噪声^[6-8], 或者是输入信号的分布^[9]。与这些研究方向不同的是, 本文将保密容量扩展到多输入多输出(MIMO)的室内 VLC 高斯窃听系统, 研究多 Eve 情况

收稿日期: 2021-12-31。

作者简介: 张亚娟(1979—), 女, 河北省蠡县人, 本科, 通信工程师, 主要从事通信技术研究及网络设备维护、通信安全保密性研究工作, 有较丰富的多输入多输出室内可见光通信安全保密和物理层安全等相关研究工作经历。

*** 通信作者:** 郑英昊(1998—), 男, 硕士研究生, 从事可见光通信相关研究工作。



下 Eve 之间的状态对 VLC 系统最大化保密速率的影响, 并提出一种最优的波束赋形方案。

1 系统模型

本文考虑一种 MIMO 室内 VLC 模型, 它包括一个配备 M 个发光二极管(LED)的发射机(Alice)、一个配备一个合法接收机(Bob)和 K 个配备光电探测器(PD)的 Eve, Alice、Bob 和 Eve 分布在同一个房间内。Alice 固定在天花板上, Bob 位于 LED 光照所能覆盖的某一固定位置, Eve 的位置对于发射机来说是未知的。通常假设 Bob 和 Eve 非常了解它们各自的瞬时信道状态信息(CSI), Alice 拥有 Bob 的瞬时 CSI, 但没有 Eve 的瞬时 CSI。在本文分析被动窃听的场景中, Alice 以固定的速率传输信号, 当保密速率低于该传输速率时, 不能保证保密传输。在 MIMO 的室内 VLC 高斯窃听信道中, Bob 和 Eve 的接收信号表示为

$$y_B = h_B w s + n_B \quad (1)$$

$$y_{E_k} = h_{E_k} w s + n_{E_k} \quad (2)$$

其中, $k \in [1, 2, \dots, K]$; h_B 、 h_{E_k} 分别表示 Alice 到 Bob 以及源到 Eve k 的信道增益矩阵, $h_B \in M_{1,M}(R^+)$, $h_{E_k} \in M_{1,M}(R^+)$; w ($|w| \leq 1$) 为 $M \times 1$ 的波束赋形因子; n_B 、 n_{E_k} 均为高斯噪声, 它们分别服从 $N(0, \sigma_B^2)$ 分布和 $N(0, \sigma_{E_k}^2)$ 分布, σ_B^2 、 $\sigma_{E_k}^2$ 分别表示 Bob、Alice 的噪声功率。 $s = [s_1, s_2, \dots, s_M]$ 表示 $M \times 1$ 的零均值传输向量, 其协方差矩阵为 $G_s = E(ss^T)$, E 表示求期望, 满足 $|s| \leq A I_M$ 和 $T_r(G_s) \leq P$, 其中 A 、 $P \in R^+$ 分别为峰值振幅和平均功率约束, T_r 表示矩阵的迹, I_M 为 $M \times M$ 的单位矩阵。定义信噪比为 LED 发光总功率与噪声总功率的比值, 由式(1)、式(2)可分别得到 Bob 和 Eve k 端的信噪比(SNR)为

$$SNR_B = \frac{(h_B w)^T G_s (h_B w)}{\sigma_B^2} \quad (3)$$

$$SNR_{E_k} = \frac{(h_{E_k} w)^T G_s (h_{E_k} w)}{\sigma_{E_k}^2} \quad (4)$$

由于 VLC 系统的保密容量不能直接用香农公式来计算, 因此本文在接下来的推导中通过信道容量的定义式来计算系统的保密容量, 并且考虑 Eve 串通和非串通 2 种情况下的保密速率。

2 可实现保密容量及保密速率

根据信道容量定义式, MIMO 室内 VLC 高斯窃听信道保密容量的下限^[10]为

$$C_s \geq [H(y_B) - H(n_B) - H(y_E) + H(n_E)]^+ \quad (5)$$

其中, $H(y_B)$ 、 $H(n_B)$ 、 $H(y_E)$ 、 $H(n_E)$ 表示分别对 y_B 、 n_B 、 y_E 、 n_E 求熵; $[a]^+$ 表示 $\max(a, 0)$ 。本文采用熵幂不等式进行计算。

2.1 合法接收者

假设随机变量 X 的熵功率 $P(X)$ 为

$$P(X) = \frac{1}{2\pi e} e^{2H(X)} \quad (6)$$

$P(X)$ 一定满足小于或等于 X 的平均功率约束 P 的条件, 当且仅当 X 符合正态分布时, 熵功率可取得最大值, 即等于平均功率约束 P 。在高斯窃听信道下, 本文根据文献[11]可得

$$H(n_B) = \frac{1}{2} \ln(2\pi e \sigma_B^2) \quad (7)$$

$$H(y_B) = H(h_B w s + n_B) \geq \frac{1}{2} \ln[(h_B w)^T (h_B w) e^{2H(s)} + 2\pi e \sigma_B^2] \quad (8)$$

其中, s_i 表示每个信道矢量的信息, $1 \leq i \leq M$ 。假设发送信号服从指数分布, 此时 s_i 的熵功率达到最大, 其熵功率表示为 $H(s_i) = 1 - \ln(\lambda)$, 代入式(8)可得

$$H(y_B) = \frac{1}{2} \ln[(h_B w)^T (h_B w) e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2] \quad (9)$$

其中, λ 为工作波长。

2.2 非串通 Eves

在非串通情况下, 此时的窃听信道^[12]满足

$$SNR_{E_k} = \max_{k \in [1, K]} SNR_{E_k} \quad (10)$$

根据熵功率的定义, $H(y_{E_k})$ 可以表示为

$$H(y_{E_k}) \leq \frac{1}{2} \ln[2\pi e \text{var}(y_{E_k})] \quad (11)$$

当且仅当接收信号符合高斯分布时等号成立。 y_{E_k} 的方差 $\text{var}(y_{E_k})$ 的计算过程如下:

$$\begin{aligned} \text{var}(y_{E_k}) &= \text{var}(h_{E_k} w s + n_{E_k}) = \\ &= \text{var}\left(\sum_{i=1}^M h_{E_k, i} w_i s_i\right) + \text{var}(n_{E_k}) = \\ &= \sum_{i=1}^M h_{E_k, i}^2 w_i^2 \text{var}(s_i) + \sigma_{E_k}^2 = h_{E_k} w^T w h_{E_k}^T P + \sigma_{E_k}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $\text{var}(s_i)$ 为信号的平均功率约束, $\text{var}(s_i) = P$ 。

$H(n_{E_k})$ 的计算与式(7)类似, 可得

$$H(n_{E_k}) = \frac{1}{2} \ln(e \pi \sigma_{E_k}^2) \quad (13)$$

因此, Eve 在非串通情况下系统的保密容量的下限表达式为

$$C_s \geq \frac{1}{2} \ln \frac{\left(h_B^T w^T w h_B e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2 \right) \sigma_{E_k}^2}{2\pi e \sigma_B^2 \left(h_{E_k}^T w^T w h_{E_k} P + \sigma_{E_k}^2 \right)} \quad (14)$$

保密容量是系统所能达到的最大保密速率, 因此可以用保密容量的下限来表示系统保密速率 R_c 。由式(14)可知, 在 Eve 非串通情况下, 系统的保密容量与 Eve 的数量无关, 仅与系统中信道容量最大的窃听信道对应的窃听节点有关。

2.3 串通 Eves

当多个 Eve 串通时, 它们可以对组合接收到的信号进行信息拦截^[13], 窃听信道的 SNR 满足

$$SNR_E = \sum_{k=1}^K SNR_{E_k} = \sum_{k=1}^K \frac{(h_{E_k} w)^T G_s (h_{E_k} w)}{\sigma_{E_k}^2} \quad (15)$$

此时, $\text{var}(y_{E_k})$ 可以表示为

$$\begin{aligned} \text{var}(y_{E_k}) &= \text{var} \left[\sum_{k=1}^K \left(h_{E_k}^T w s + n_{E_k} \right) \right] = \\ &= \sum_{k=1}^K \left[\text{var} \left(\sum_{i=1}^M h_{E_k, i} w_i s_i \right) + \text{var}(n_{E_k}) \right] = \\ &= \sum_{k=1}^K \left[\sum_{i=1}^M (h_{E_k, i} w_i)^2 \text{var}(s_i) + \sigma_{E_k}^2 \right] = \\ &= \sum_{k=1}^K \left((h_{E_k} w)^T (h_{E_k} w) P + \sigma_{E_k}^2 \right) \end{aligned} \quad (16)$$

将式(16)代入式(11)可得, Alice 串通时 $H(y_{E_k})$ 的表达式为

$$H(y_{E_k}) \leq \frac{1}{2} \ln \left[2\pi e \sum_{k=1}^K \left(h_{E_k}^T w^T w h_{E_k} P + \sigma_{E_k}^2 \right) \right] \quad (17)$$

同理可以获得 $H(n_{E_k})$ 的表达式为

$$H(n_{E_k}) = \frac{1}{2} \ln \left(2\pi e \sum_{k=1}^K \sigma_{E_k}^2 \right) \quad (18)$$

Eve 串通情况下不影响 Bob, 将式(7)、式(9)、式(17)和式(18)代入式(5)可得在串通情况下的保密容量表达式如下:

$$C_s \geq \frac{1}{2} \ln \frac{\left(h_B^T w^T w h_B e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2 \right) \sum_{k=1}^K \sigma_{E_k}^2}{2\pi e \sigma_B^2 \sum_{k=1}^K \left(h_{E_k}^T w^T w h_{E_k} P + \sigma_{E_k}^2 \right)} \quad (19)$$

从式(19)可知, 在 Alice 串通情况下, 系统的保密容量受限于 Alice 的数量, 并且随着 Alice 数量增加, 分母增大的速度明显高于分子, 系统的保密性能快速下降。但是, 与式(14)对比可知, Alice 在非串通情况下, 系统的保密性能更优。

3 波束赋形优化最大化保密速率

本文通过优化波束赋形因子来获得最大的保密速率 R_c , 优化问题可以描述为

$$f_1 = \max_w R_c \quad (20)$$

其中, $|w| \leq 1$ 。

一般情况下, Alice 是不串通的, 此时的 $R_c \geq \frac{1}{2} \times$

$\ln \frac{\left(h_B^T w^T w h_B e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2 \right) \sigma_{E_k}^2}{2\pi e \sigma_B^2 \left(h_{E_k}^T w^T w h_{E_k} P + \sigma_{E_k}^2 \right)}$, 可以看出, 保密速率 R_c

随 $h_B^T w^T w h_B e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2$ 单调递增, 随 $h_{E_k}^T w^T w h_{E_k} P + \sigma_{E_k}^2$ 单调递减, 因此可以将优化问题简述为

$$f_2 = \max_w \frac{h_B^T w^T w h_B e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2}{h_{E_k}^T w^T w h_{E_k} P + \sigma_{E_k}^2} \quad (21)$$

其中, $|w| \leq 1$ 。

根据文献[14]可知, 式(21)是一个非凸问题。为了解决这个问题, 本文首先进行非凸问题的拟凸性转化。引入一个辅助变量 $\eta \geq \sigma_{E_k}^2$, 式(21)则表示为

$$f_3 = \max_w \frac{h_B^T w^T w h_B e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2}{\eta} \quad (22)$$

其中, $|w| \leq 1, h_{E_k}^T w^T w h_{E_k} P + \sigma_{E_k}^2 \leq \eta$ 。

定义 $h_B^T w^T w h_B e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2$ 是 η 的函数, 可以将问

题进一步转化为

$$f_4 = \max_w \varphi(\eta) \frac{h_B^T w^T w h_B e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2}{\eta} \quad (23)$$

其中, $|w| \leq 1, |h_{E_k} w| \leq \sqrt{\frac{\eta - \sigma_{E_k}^2}{P}}$ 。

令 $\tau = \sqrt{\frac{\eta - \sigma_{E_k}^2}{P}} \geq 0$, 再定义一个扰动函数^[14] $f(\tau)$,

可得

$$f_5 = \max_w f(\tau) (h_B w) e \frac{1}{\lambda} \quad (24)$$

其中, $|w| \leq 1, |h_{E_k} w| \leq \tau$, τ 表示功率的预设阈值。

对于任意的 $\tau \geq 0$, $f(\tau)$ 均满足非递减性和非负性。根据文献[15]可以得到扰动问题是凸问题, 因此 $f(\tau)$ 是凹函数。 $f(\tau)$ 连续可导, 当 $\tau \geq 0$ 时, 其左导数 $f'_-(\tau)$ 和右导数 $f'_+(\tau)$ 均存在。下面证明式(23)中 $\varphi(\eta)$ 的凹凸性。 $\varphi(\eta) = [f(\eta)]^2 + 2\pi e \sigma_B^2$, 其中 $\eta = \tau^2 P + \sigma_{E_k}^2$, 因此其

左右导数可以表示为

$$\begin{cases} \varphi'_-(\eta) = \frac{1}{P} \frac{f(\tau)}{\tau} f'_-(\tau) \\ \varphi'_+(\eta) = \frac{1}{P} \frac{f(\tau)}{\tau} f'_+(\tau) \end{cases} \quad (25)$$

由于凹函数 $f''(\tau) \leq 0$, 可得 $f'_-(\tau) \geq f'_+(\tau)$, 因此 $\varphi'_-(\eta) \geq \varphi'_+(\eta)$ 。 $\varphi(\eta)$ 二阶可导, 其二阶导数表示为

$$\varphi''(\eta) = \frac{f(\tau)f''(\tau) + \left[f'(\tau) - \frac{f(\tau)}{\tau} \right] f'(\tau)}{2\tau^2 P^2} \quad (26)$$

由于 $f(\tau)$ 可微, 则存在 $f(\tau_0) \leq f(\tau) + f'(\tau)(\tau_0 - \tau)$ 。当 $\tau_0 = 0$ 时, 有 $f'(\tau) \leq \frac{f(\tau)}{\tau}$, 又由于 $f(\tau) \geq 0, f'(\tau) \geq$

0。定义一个新变量 $\psi \geq 0$, 令 $\psi = \frac{\tau}{f(\tau)} = \sqrt{\frac{\eta - \sigma_{E_k}^2}{P|f(\tau)|^2}}$, $f(\tau) \neq 0$, 那么此时 η 可以表示为

$$\eta = \psi^2 (h_B w_\psi)^2 e^2 \frac{1}{\lambda^2} P + \sigma_{E_k}^2 \quad (27)$$

w_ψ 定义为

$$f_\psi = w_\psi \arg \max (h_B w) \quad (28)$$

其中, $|w| \leq 1, h_B w \leq \psi |h_{E_k} w|$ 。

当 ψ 和 η 满足式(28)时, 有 $h_B w_\psi = f(\tau)$ 。式(28)是关于 ψ 的严格递增函数, $h_B w$ 是关于 ψ 的非递减函数, 将式(28)代入式(22), 则可以将优化问题重新表示为

$$f_\eta = \max_{\psi} \frac{(h_B w_\psi)^2 e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2}{\psi^2 (h_B w_\psi)^2 e^2 \frac{1}{\lambda^2} P + \sigma_{E_k}^2} \quad (29)$$

前文已证明 $\frac{\varphi(\eta)}{\eta}$ 关于 η 的拟凹性, 又因为 η 是关于 ψ 的严格递增函数, 故式(29)也是拟凹函数求最大化。

最后, 通过对 $\psi \in [\psi_{\min}, \psi_{\max}]$ 进行二分查找, 即可找到全局最优解。最优 ψ 值的搜索区间的下界被最小可行的 ψ 限制, 有

$$\psi_{\min} = \psi_{\max} \quad (30)$$

其中, $h_E w = 1, |h_B w| \leq \psi$ 。

根据 $\psi^2 (h_B w_\psi)^2 e^2 \frac{1}{\lambda^2} + \sigma_{E_k}^2 \leq (h_B w_\psi)^2 e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2$ 可以求得 ψ 的最大值为

$$\psi_{\max} = \sqrt{\frac{e^2 \frac{1}{\lambda^2} + 2\pi e \sigma_B^2 - \sigma_{E_k}^2}{P}} \quad (31)$$

此时, $h_B w_\psi = 1$ 。只有当 $\psi \leq \psi_{\max}$ 时, 才能保证系统的保密速率大于零。根据文献[16]可知, ψ 的最优值求解

过程如下:

①根据式(30)求解 $\psi_{\min}$;

②若 $\psi_{\min} \leq 10^{-10}$, 令 $\psi_{\min} = 10^{-10}$;

③初始化 $\bar{\psi} = 20 \lg \psi_{\max}, \underline{\psi} = 20 \lg \psi_{\min}$;

④给定收敛精度 ε_ψ , 设置一个正整数 A_ψ , 使其满足 $0 < 20 \lg A_\psi < \varepsilon_\psi$;

⑤当 $\bar{\psi} - \underline{\psi} \geq \varepsilon_\psi$, 执行 $\psi = \frac{(\bar{\psi} + \underline{\psi})}{2}$, 将其代入式(28)

求解 w_ψ , 计算式(29)中目标优化问题记为 $f(\psi)$, 将 $\psi + A_\psi$ 代入式(28)求解 $w_{\psi+A_\psi}$, 然后代入式(29)求 $f(\psi + A_\psi)$, 若 $f(\psi + A_\psi) - f(\psi) > 0, \underline{\psi} = \psi$, 否则 $\bar{\psi} = \psi$;

⑥跳出循环, 返回最优值 $\psi^* = \psi$ 。

4 数值仿真

本文考虑一个大小为 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的室内场景, 地板中心位于 $(2.5 \text{ m}, 2.5 \text{ m}, 0)$ 。Alice 有 $M=5$ 个 LEDs 位于房间的天花板, 分别位于 $(1.25 \text{ m}, 1.25 \text{ m}, 3 \text{ m})$ 、 $(1.25 \text{ m}, 3.75 \text{ m}, 3 \text{ m})$ 、 $(2.5 \text{ m}, 2.5 \text{ m}, 3 \text{ m})$ 、 $(3.75 \text{ m}, 1.25 \text{ m}, 3 \text{ m})$ 和 $(3.75 \text{ m}, 3.75 \text{ m}, 3 \text{ m})$ 。Bob 位于房间的中心, Bob 和 Eve 都在相同的高度 (0.85 m) 。假设有 $K=3$ 个 Eve, 分别位于 $(1 \text{ m}, 1 \text{ m}, 0.85 \text{ m})$ 、 $(3 \text{ m}, 3.5 \text{ m}, 0.85 \text{ m})$ 和 $(4 \text{ m}, 4 \text{ m}, 0.85 \text{ m})$ 。对于 VLC 信道, 参照文献[17]分别设置峰值振幅 $A=0.14$ 、平均功率约束 $P=1 \text{ W}$ 、噪声功率均 $\sigma_B^2 = \sigma_E^2 = -120 \text{ dBm}$ 和收敛精度为 $\varepsilon_\psi = 0.1 \text{ dB}$ 。

本文在保证系统安全传输的条件下, 考虑了 Eve 数量对 VLC 系统的保密速率的影响, 得到保密速率随 Eve 数量变化的曲线如图 1 所示。可以看出, 与 Eve 非

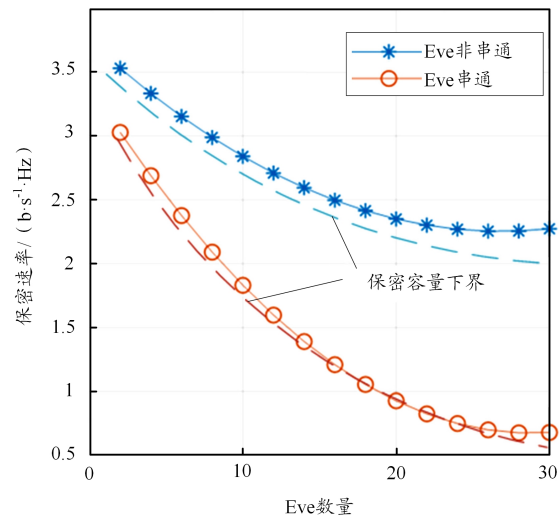


图 1 保密速率随 Eve 数量变化 (指数分布参数为 0.5)

串通相比, 在 Eve 协作时的保密速率更低, 这与本文理论计算的结果吻合。随着 Eve 数量的不断增加, 非串通窃听时的保密速率趋于平稳, 接近于 $2.35 \text{ b}/(\text{s} \cdot \text{Hz}^{-1})$, 这是因为该情况下的保密速率是由离发送端最近的 Eve 决定的; 而串通窃听情况下保密速率受 Eve 数量影响较大, 呈现单调递减的趋势。

图 2 展示了不同幅值振幅与噪声功率之比时对应迫零波束赋形方案和本文提出的波束赋形方案下的保密速率。可以看出, 随幅值振幅与噪声功率之比增长, 保密性能增加, 但迫零波束赋形方案始终比本文提出的波束赋形方案的速率低一些。在工程应用中, 迫零波束赋形方案的复杂度要比本文提出的波束赋形方案简单很多。这是由于受信号的动态范围限制, 本文提出的波束赋形设计问题是非凸的, 需要将非凸问题先转换为拟凸问题, 并使用线性搜索算法进行求解。

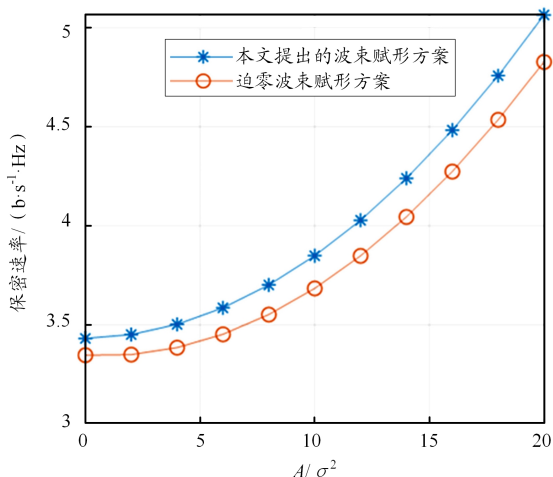


图 2 迫零波束赋形方案和本文提出的波束赋形方案下的保密速率

5 结束语

本文分析和考虑了在 VLC 系统中存在多个 Eve、Eve 之间是否独立情况下的 Eve 数量对保密速率的影响, 得到非串通情况下保密性能优于串通情况且受其数量干扰小; 又通过设计最优的波束赋形方案对非串通情况下保密速率进行了最大化。仿真结果表明: 本文提出的波束赋形方案性能优于迫零波束赋形方案, 但复杂度高于迫零波束赋形方案, 能满足更加严格的保密要求。

参考文献:

- [1] YOUNUS S H, AL-HAMEED A A, ALHARTOMI M, et al. Massive MIMO for indoor VLC systems[EB/OL]. [2021-12-31]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9203471>.
- [2] SHAO S, KHREISHAH A, KHALIL I. Joint link scheduling and brightness control for greening VLC-based indoor access networks [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(3): 148-161.
- [3] 田丁卉. 基于人工噪声和 OFDM 的可见光通信物理层安全研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [4] YING K, QIAN H, BAXLEY R J, et al. MIMO transceiver design in dynamic-range-limited VLC systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 28(22): 2593-2596.
- [5] QIU Y, WANG J, LIN S, et al. Secrecy outage probability analysis for visible light communications with SWIPT and random terminals [C]//11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing, October 23-25, 2019, Xi'an, China. Xi'an: IEEE, 2019: 1-6.
- [6] NLOM S M, NDJONGUE A R, OUAHADA K. Cascaded PLC-VLC channel: an indoor measurements campaign [J]. IEEE Access, 2018 (6): 25230-25239.
- [7] ARFAOUI M A, GHAYEB A, ASSI C. On the achievable secrecy rate of the MIMO VLC Gaussian wiretap channel [C]//28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Oct. 8-13, 2017, Montreal, Canada. Montreal: IEEE, 2017: 1-5.
- [8] CHEN C, ZHONG W, YANG H, et al. On the performance of MIMO-NOMA-based visible light communication systems [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(4): 307-310.
- [9] 杭程. 室内 MIMO 可见光通信系统信道相关性和信道间干扰研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [10] 肖志强. 衰落信道下的可见光通信系统分析 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [11] 孙宇. 面向用户移动的可见光通信物理层安全研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
- [12] 葛虹. 室内可见光通信系统的安全性及实际可行性方案分析 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [13] 黄博. 室内可见光通信系统容量及物理层安全性能的研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [14] 丁举鹏, 易芝玲, 王劲涛, 等. 可见光通信物理链路的基准保密容量比较研究 [J]. 信息安全, 2020, 20(5): 65-71.
- [15] 张瑾. 室内可见光通信物理层安全通信方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [16] 黄宝莹. 基于人工噪声辅助的 VLC 物理层安全技术研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [17] 邓震宇. 可见光通信的物理层安全分析优化及加密 [D]. 南昌: 南昌大学, 2019.