



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 114629552 B

(45) 授权公告日 2023. 07. 18

(21) 申请号 202210248243.1

H04B 10/079 (2013.01)

(22) 申请日 2022.03.14

H04B 17/391 (2015.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 114629552 A

(56) 对比文件

KR 20220013336 A, 2022.02.04

CN 107070517 A, 2017.08.18

WO 2016181327 A1, 2016.11.17

CN 113098652 A, 2021.07.09

CN 111885732 A, 2020.11.03

(43) 申请公布日 2022.06.14

(73) 专利权人 西安电子科技大学

地址 710071 陕西省西安市雁塔区太白南路2号

审查员 张娟娟

(72) 发明人 王平 车惠 李刚刚 杨婷

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

专利代理师 姚咏华

(51) Int. Cl.

H04B 10/116 (2013.01)

H04B 10/85 (2013.01)

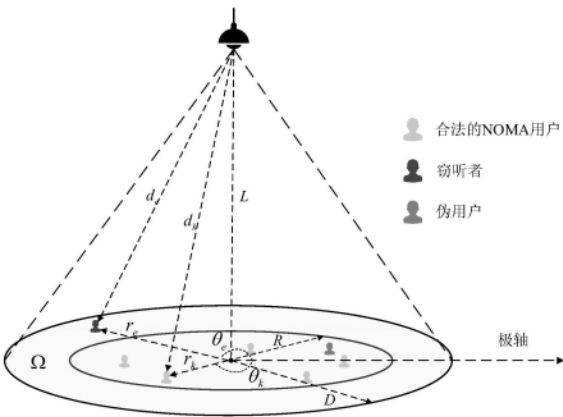
权利要求书8页 说明书11页 附图5页

(54) 发明名称

一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法

(57) 摘要

本发明公开了一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法,包括建立多用户的室内NOMA-VLC通信系统信道模型,推导出合法用户的接收信干噪比;推导出其解码特定用户时的接收信干噪比,得到相应的概率密度函数和累积分布函数;推导出NOMA-VLC通信系统的安全中断概率及安全吞吐量,并通过蒙特卡洛方法进行仿真验证;通过主动引入干扰的方法,抑制了窃听者的窃听能力;该方法有效的综合考虑了多种影响系统性能的因素,进一步提升系统的安全通信性能,降低了NOMA-VLC通信系统的安全中断概率的同时提高了安全吞吐量。



1. 一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法,其特征在于,包括下述步骤:

1) 基于朗伯模型,考虑到窃听者的存在,建立多用户的室内NOMA-VLC通信系统信道模型,并推导出合法用户的接收信干噪比表达式;

考虑窃听者在保护域之外的环形区域服从RWP-CB运动模型,推导出其解码特定用户时的接收信干噪比表达式,并进一步得到相应的概率密度函数和累积分布函数闭合表达式;

所述步骤1)中,建立多用户的室内NOMA-VLC通信系统信道模型,假设LED采用广义朗伯辐射模式,由于合法用户和窃听者的位置服从随机移动和随机分布,则其分布半径为变量,且接收方向为常量,得到VLC视距链路的直流信道增益;

推导出NOMA-VLC通信系统中合法用户的接收信干噪比表达式和窃听者解码特定用户时的接收信干噪比表达式,通过下述步骤实现:

1a) 给出合法用户在圆形拓扑中的稳态位置分布和窃听者水平半径的概率密度函数;

1b) 给出OOK调制下,LED发送端实际传送的光信号;

1c) 得到合法用户k和窃听者的接收信号;

1d) 得到合法用户k和窃听者解码特定用户时的信干噪比;

1e) 根据步骤1a)公式中得到的窃听者位置的概率密度函数和步骤1d)公式中得到的窃听者信干噪比,得到窃听者的概率密度函数闭合表达式,进而得到累积分布函数闭合表达式;

2) 推导出NOMA-VLC通信系统的安全中断概率及安全吞吐量表达式,并通过蒙特卡洛方法进行仿真验证;

所述步骤2)推导出的NOMA-VLC通信系统的安全中断概率及安全吞吐量表达式NOMA-VLC通信系统的安全中断概率及安全吞吐量表达式,是通过下述方法得到的:

2a) 基于安全中断概率的定义并结合步骤1e)得到窃听者的累积分布函数得到NOMA-VLC通信系统的安全中断概率;

2b) 基于安全吞吐量的定义并结合步骤2a)得到的安全中断概率得到NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量;

3) 向NOMA-VLC通信系统中加入一个伪用户,通过主动引入干扰的方法,抑制窃听者的窃听能力;

所述步骤3)推导出引入伪用户情况下,NOMA-VLC通信系统中窃听者解码特定用户时的安全中断概率和安全吞吐量,通过以下步骤得到:

3a) 得到引入伪用户情况下,得到窃听者解码特定用户时的信干噪比;

3b) 根据步骤1a)公式中得到的窃听者位置的概率密度函数和步骤3a)得到的窃听者信干噪比,得到引入伪用户情况下,窃听者的概率密度函数闭合表达式,进而得到引入伪用户情况下,累积分布函数闭合表达式;

3c) 根据步骤2a)得到的安全中断概率的定义并结合步骤3b)得到引入伪用户情况下,窃听者的累积分布函数得到引入伪用户情况下,NOMA-VLC通信系统的安全中断概率;

3d) 根据步骤2b)得到的安全吞吐量的定义并结合步骤3c)得到引入伪用户情况下,NOMA-VLC通信系统的安全中断概率得到NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量;

4) 将不同的合法NOMA用户数、LED灯高度和半功率角参数代入安全中断概率及安全吞吐量表达式中,得到合法NOMA用户数、LED灯高度和半功率角对系统安全通信性能的影响。

2. 根据权利要求1所述的一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法,其特征在于,所述步骤1)中,建立多用户的室内NOMA-VLC通信系统信道模型如下:

假设LED采用广义朗伯辐射模式,LED灯和接收用户k之间的信道衰减系数 h_k 定义如下:

$$h_k = A_{PD} \frac{(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\theta) \cos(\psi) T_s(\psi) \times G(\psi) \text{rect}\left(\frac{\psi}{FOV}\right) \quad (1)$$

其中, A_{PD} 是接收器的有效区域, d 是发射器到接收器的距离, m 表示朗伯发射系数, θ 表示LED端的出射角, ψ 表示PD端的入射角, $T_s(\psi)$ 表示光学滤波器增益, $G(\psi)$ 表示光学集中器增益, FOV 是接收器的视场角, $\text{rect}()$ 表示矩形函数;

公式(1)可以整合为:

$$h_k = C(L^2 + r_k^2)^{-\frac{1}{2\alpha}} \quad (2)$$

式中, α 为关于 m 的函数, C 为关于 A_{PD} , m , L , $T_s(\psi)$, $G(\psi)$ 的函数, L 为LED灯距离接收平面的距离, r_k 为用户k的水平半径。

3. 根据权利要求1所述的一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法,其特征在于,所述步骤1)中,推导出NOMA-VLC通信系统中合法用户的接收信干噪比表达式和窃听者解码特定用户时的接收信干噪比表达式,通过下述步骤实现:

1a) 给出窃听者水平半径的概率密度函数 $f(r_e)$ 如下:

$$f(r_e) = \frac{4r_e}{D^2 - R^2} - \frac{4r_e^3}{D^4 - R^4}, \quad R \leq r_e \leq D \quad (3)$$

其中, r_e 代表窃听者的水平半径; D 为LED灯的照射覆盖范围的半径; R 为保护区域的半径;

1b) 给出OOK调制下,LED发送端实际传送的光信号 x 如下:

$$x = \sum_{i=1}^N a_i \sqrt{P_E} s_i + I_{dc} \quad (4)$$

其中, a_i 为第 i 个用户的电功率分配系数, P_E 代表总的调制电功率, s_i 为传送给第 i 个用户的符号且均值为零, I_{dc} 表示直流偏置;

1c) 得到用户 k 和窃听者的接收信号 y_k , $1 \leq k \leq N$

$$y_k = \eta h_k \sum_{i=1}^N a_i \sqrt{P_E} s_i + n_k \quad (5)$$

其中, η 表示光电二极管的响应度, h_k 为LED灯和接收用户 k 之间的信道衰减系数, n_k 表示第 k 个用户处的加性高斯白噪声;

窃听者接收到的信号 y_e 表示为:

$$y_e = \eta h_e \sum_{i=1}^N a_i \sqrt{P_E} s_i + n_e \quad (6)$$

其中, h_e 为LED灯和窃听者之间的信道衰减系数, n_e 表示进行光电转换后的AWGN;

1d) 合法用户的接收信干噪比 Γ_k 为:

$$\Gamma_k = \frac{\eta^2 |h_k|^2 a_k^2 P_E}{\sum_{i=k+1}^N \eta^2 |h_k|^2 a_i^2 P_E + \sigma_n^2} \quad (7)$$

式中, a_k 为第 k 个用户的电功率分配系数, σ_n^2 为方差;

将VLC视距链路的直流信道增益 h_k 带入到公式 (7) 中可得:

$$\Gamma_k = \frac{A_k \rho C^2 (L^2 + r_k^2)^{-\frac{1}{\alpha}}}{1 + B_k \rho C^2 (L^2 + r_k^2)^{-\frac{1}{\alpha}}} \quad (8)$$

其中 A_k 为 a_k 的函数, B_k 为 a_i 的函数, ρ 为平均电信噪比;

窃听者在解码 s_k 时对应的信干噪比 Γ_{ek} 表示如下:

$$\Gamma_{ek} = \frac{A_k \rho C^2 (L^2 + r_e^2)^{-\frac{1}{\alpha}}}{1 + B_k \rho C^2 (L^2 + r_e^2)^{-\frac{1}{\alpha}}} \quad (9)。$$

4. 根据权利要求3所述的一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法,其特征在于,所述步骤1)中,推导出NOAM-VLC系统下窃听者的概率密度函数和累积分布函数如下:

根据得到的窃听者在环形拓扑中运动时的水平半径概率密度函数 $f(r_e)$ 和窃听者在解码 s_k 时对应的信干噪比 Γ_{ek} , 推导窃听者的概率密度函数 $f_{\Gamma_{ek}}(\Gamma)$ 闭合表达式如下:

$$f_{\Gamma_{ek}}(\Gamma) = \begin{cases} \frac{2\alpha\Gamma^{-\alpha-1} A_k \rho C^2}{(D^2 - R^2)(A_k \rho C^2 - \Gamma B_k \rho C^2)^{1-\alpha}} - \frac{2\alpha\Gamma^{-\alpha-1} A_k \rho C^2}{(D^4 - R^4)(A_k \rho C^2 - \Gamma B_k \rho C^2)^{1-\alpha}} & \Gamma_{ek \min} \leq \Gamma \leq \Gamma_{ek \max} \\ \times \left[\left(\frac{\Gamma}{A_k \rho C^2 - \Gamma B_k \rho C^2} \right)^{-\alpha} - L^2 \right], & \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中, Γ 是信干噪比变量, $\Gamma_{ek \min}$ 是信干噪比变量的最小值, $\Gamma_{ek \max}$ 是信干噪比变量的最大值;

进而推导得到累积分布函数 $F_{\Gamma_{ek}}(\Gamma)$ 闭合表达式:

$$F_{\Gamma_{ek}}(\Gamma) = \left\{ \frac{\left[\Gamma^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma B_k \rho C^2)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} - \frac{2\Gamma^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma B_k \rho C^2)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \\ - \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} - \frac{2\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\}, \Gamma_{ek \min} \leq \Gamma \leq \Gamma_{ek \max} \quad (11)。$$

5. 根据权利要求4所述的一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法,其特征在于,所述步骤2)推导出NOMA-VLC通信系统的安全中断概率表达式,通过下述步骤实现:

2a) 给出合法用户的安全中断概率 P_{outk} :

$$P_{outk} = P \left\{ \frac{1}{2} \log_2 (1 + \Gamma_k) - \frac{1}{2} \log_2 (1 + \Gamma_{ek}) \leq R_{th} \right\} \\ = 1 - F_{\Gamma_{ek}} \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) \quad (12)$$

式中, R_{th} 是目标通信速率, $P(\cdot)$ 表示概率;

并结合步骤1e) 公式(11)中得到窃听者的累积分布函数 $f_{\Gamma_{ek}}(\Gamma)$ 得到NOMA-VLC通信系统的合法用户的安全中断概率 P_{outk} :

$$P_{outk} = 1 - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} - \frac{2 \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \\ - \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} - \frac{2\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \quad (13)$$

NOMA-VLC通信系统的安全中断概率 P_{out} 如下:

$$\begin{aligned}
P_{out} &= 1 - P\{\text{用户1未发生中断, 用户2未发生中断, } \dots, \text{用户N未发生中断}\} \\
&= 1 - F_{\Gamma_{ek}} \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) \\
&= 1 - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
&\quad \left. - \frac{2 \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \\
&\quad - \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} - \frac{2 \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \\
&\quad (14)
\end{aligned}$$

其中, Γ_{\min} 表示用户得到最小信干噪比。

6. 根据权利要求5所述的一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法, 其特征在于, 所述步骤2) 推导出NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量表达式, 通过下述步骤实现:

2b) 给出系统的安全吞吐量的ST定义, 如下:

$$ST = R_{th} \times (1 - P_{out}) \quad (15)$$

并结合得到的整个系统的安全中断概率 P_{out} 得到听者移动场景下的NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量ST表达式:

$$\begin{aligned}
ST &= R_{th} \times \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
&\quad \left. - \frac{2 \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} - \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
&\quad \left. - \frac{2 \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \quad (16)
\end{aligned}$$

7. 根据权利要求1所述的一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法, 其特征在于, 所述步骤3) 推导出引入伪用户情况下, NOMA-VLC通信系统中窃听者解码特定用户时的安全中断概率和安全吞吐量, 包括:

3a) 得到引入伪用户情况下, 得到窃听者解码特定用户时的信干噪比 Γ_{dek} ;

3b) 根据得到的窃听者在环形拓扑中运动时的水平半径概率密度函数 $f(r_e)$ 和得到的窃听者在解码 s_k 时对应的信干噪比 Γ_{dek} ,推导出引入伪用户情况下,窃听者的概率密度函数 $f_{\Gamma_{dek}}(\Gamma)$ 闭合表达式;

3c) 结合给出的合法用户的安全中断概率 P_{outk} 的定义和得到引入伪用户情况下,窃听者的累积分布函数 $F_{\Gamma_{dek}}(\Gamma)$ 得到引入伪用户情况下,NOMA-VLC通信系统的合法用户的安全中断概率 P_{doutk} ;

3d) 结合给出的安全吞吐量ST的定义并结合得到的引入伪用户情况下,整个系统的安全中断概率 P_{dout} 得到引入伪用户情况下,NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量dST表达式。

8. 根据权利要求7所述的一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法,其特征在于,引入伪用户的情况下,窃听者解码特定用户时的信干噪比 Γ_{dek} 为:

$$\Gamma_{dek} = \frac{A_k \rho C^2 (L^2 + r_e^2)^{\frac{1}{\alpha}}}{1 + B_k \rho C^2 (L^2 + r_e^2)^{\frac{1}{\alpha}} + M \rho C^2 (L^2 + r_e^2)^{\frac{1}{\alpha}}} \quad (17)$$

其中, A_k 为 a_k 的函数, B_k 为 a_1 的函数, ρ 为平均电信噪比, M 为控制变量, C 为关于 $A_{pd}, m, L, T_S(\psi), G(\psi)$ 的函数, L 为LED灯距离接收平面的距离, r_e 为窃听者的水平半径, α 为关于 m 的函数。

9. 根据权利要求8所述的一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法,其特征在于,引入伪用户情况下,窃听者的概率密度函数 $f_{\Gamma_{dek}}(\Gamma)$ 闭合表达式如下:

$$f_{\Gamma_{dek}}(\Gamma) = \begin{cases} \frac{2\alpha\Gamma^{-\alpha-1} A_k \rho C^2}{[A_k \rho C^2 - \Gamma(B_k + M) \rho C^2]^{1-\alpha}} \times \left[\frac{1}{D^2 - R^2} - \frac{1}{D^4 - R^4} \times \left[\left(\frac{\Gamma}{A_k \rho C^2 - \Gamma(B_k + M) \rho C^2} \right)^{-\alpha} - L^2 \right] \right], & \Gamma_{ek \min} \leq \Gamma \leq \Gamma_{ek \max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中, L 为LED灯距离接收平面的距离, Γ 是信干噪比变量, $\Gamma_{ek \min}$ 是信干噪比变量的最小值, $\Gamma_{ek \max}$ 是信干噪比变量的最大值, D 为LED灯的照射覆盖范围的半径; R 为保护区域的半径;

引入伪用户情况下,累积分布函数 $F_{\Gamma_{dek}}(\Gamma)$ 闭合表达式:

$$F_{\Gamma_{dek}}(\Gamma) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{\left[\Gamma^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma(B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \\ - \frac{2\Gamma^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma(B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \\ - \frac{2\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \end{array} \right\}, \Gamma_{ek \min} \leq \Gamma \leq \Gamma_{ek \max} \quad (19).$$

10. 根据权利要求9所述的一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法, 其特征在于, NOMA-VLC通信系统的合法用户的安全中断概率 P_{doutk} 如下:

$$P_{\text{doutk}} = 1 - \left\{ \begin{array}{l} \frac{\left[\left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \\ - \frac{2 \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \\ - \frac{2\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \end{array} \right\} \quad (20)$$

其中, R_{th} 是目标通信速率;

引入伪用户情况下, NOMA-VLC通信系统的安全中断概率 P_{dout} 如下:

$$\begin{aligned}
P_{dout} &= 1 - \mathbf{P}\{\text{用户1未发生中断, 用户2未发生中断, } \dots, \text{用户N未发生中断}\} \\
&= 1 - F_{\Gamma_{ek}} \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) \\
&= 1 - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
&\quad \left. - \frac{2 \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \\
&\quad - \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
&\quad \left. - \frac{2 \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \tag{21}
\end{aligned}$$

其中, Γ_{\min} 表示用户得到最小信干噪比

NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量dST表达式:

$$\text{dST} = R_{th} \times \left\{ \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \right. \\
\left. \left. - \frac{2 \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \right. \tag{22} \\
\left. \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \right. \\
\left. \left. - \frac{2 \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \right\}$$

一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法

技术领域

[0001] 本发明属于室内可见光通信技术领域,具体为一种存在窃听者移动场景下,引入一个伪用户,推导窃听者的概率密度函数和累积分布函数,对安全中断概率和安全吞吐量性能进行理论和仿真研究的一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法。

背景技术

[0002] 可见光通信(Visible Light Communication,VLC)技术是在白光发光二极管(LED)技术的基础上发展起来的一种无线光通信技术。与其他无线通信技术相比,VLC技术具有成本效率高、带宽高、固有安全性好、无需许可证操作、无电磁干扰等优点。到目前为止,VLC技术被认为是其他无线通信的补充技术,在高速通信、定位、传感和物联网(IoT)中有着广泛的应用。

[0003] VLC系统中一般存在多个同时接入的用户,为了提高系统的频谱效率和增加可同时容纳的用户数目,非正交多址接入(NOMA)技术常常被采用。近年来,VLC技术不断创新,调制方式越来越多样化,其传输速率也越来越快。但是,人们在享受VLC给生活带来方便快捷的同时,有关其通信安全的问题也逐渐地浮出了水面。因此,为了提高通信系统的安全性,科研人员提出了多种方法,目前传统的通信安全加密机制包括密钥加密和身份验证等,然而随着计算机技术的进步,加密算法很容易被破解导致信息泄露,因此研究物理层安全可以为传统安全技术做一个很好地补充。在实际的场景中,窃听用户一般处在移动状态。

[0004] 目前的问题在于:如何在窃听者移动场景下,对NOMA-VLC通信系统安全性能进行研究并进一步提升系统的安全性能。为解决这个问题,本发明搭建了窃听者在保护域之外移动场景下的NOMA辅助室内VLC系统,在此基础上,分析了合法用户和窃听者的接收信干噪比,得到了窃听者信干噪比的概率密度函数和累计密度函数的解析表达式,并以安全中断概率和安全吞吐量为指标,进一步研究了系统的安全通信性能。此外,为了进一步提升通信系统的安全性能,本发明首次提出了“伪用户”的概念,通过主动引入干扰的思想,抑制了窃听者的解码能力。

发明内容

[0005] 为解决现有技术中存在的上述缺陷,本发明的目的在于提供一种存在窃听者移动场景下,结合NOMA技术,引入一个伪用户,推导窃听者的概率密度函数和累积分布函数,对安全中断概率和安全吞吐量性能进行理论和仿真研究,进而提高室内VLC系统的安全通信性能。

[0006] 本发明是通过下述技术方案来实现的。

[0007] 本发明提供了一种提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法,包括下述步骤:

[0008] 1) 基于朗伯模型,考虑到窃听者的存在,建立多用户的室内NOMA-VLC通信系统信道模型,并推导出合法用户的接收信干噪比表达式。考虑窃听者在保护域之外的环形区域

服从RWP-CB运动模型,推导出其解码特定用户时的接收信干噪比表达式,并进一步得到相应的概率密度函数和累积分布函数闭合表达式;

[0009] 所述步骤1)中,建立多用户的室内NOMA-VLC通信系统信道模型,假设LED采用广义朗伯辐射模式,由于合法用户和窃听者的位置服从随机移动和随机分布,则其分布半径为变量,且接收方向为常量,得到VLC视距链路的直流信道增益。

[0010] 所述步骤1)中,推导出NOMA-VLC通信系统中合法用户的接收信干噪比表达式和窃听者解码特定用户时的接收信干噪比表达式,通过下述步骤实现:

[0011] 1a)给出合法用户在圆形拓扑中的稳态位置分布和窃听者水平半径的概率密度函数;

[0012] 1b)给出OOK调制下,LED发送端实际传送的光信号;

[0013] 1c)得到合法用户k和窃听者的接收信号;

[0014] 1d)得到合法用户k和窃听者解码特定用户时的信干噪比;

[0015] 1e)根据步骤1a)公式中得到的窃听者位置的概率密度函数和步骤1d)公式中得到的窃听者信干噪比,得到窃听者的概率密度函数闭合表达式,进而得到累积分布函数闭合表达式;

[0016] 2)推导出NOMA-VLC通信系统的安全中断概率及安全吞吐量表达式,并通过蒙特卡洛方法进行仿真验证;

[0017] 所述步骤2)推导出的NOMA-VLC通信系统的安全中断概率及安全吞吐量表达式NOMA-VLC通信系统的安全中断概率及安全吞吐量表达式,是通过下述方法得到的:

[0018] 2a)基于安全中断概率的定义并结合步骤1e)得到窃听者的累积分布函数得到NOMA-VLC通信系统的安全中断概率;

[0019] 2b)基于安全吞吐量的定义并结合步骤2a)得到的安全中断概率得到NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量;

[0020] 3)向NOMA-VLC通信系统中加入一个伪用户,通过主动引入干扰的方法,抑制了窃听者的窃听能力;

[0021] 所述步骤3)推导出引入伪用户情况下,NOMA-VLC通信系统中窃听者解码特定用户时的安全中断概率和安全吞吐量,通过以下步骤得到:

[0022] 3a)得到引入伪用户情况下,得到窃听者解码特定用户时的信干噪比;

[0023] 3b)根据步骤1a)公式中得到的窃听者位置的概率密度函数和步骤3a)得到的窃听者信干噪比,得到引入伪用户情况下,窃听者的概率密度函数闭合表达式,进而得到引入伪用户情况下,累积分布函数闭合表达式;

[0024] 3c)根据步骤2a)得到的安全中断概率的定义并结合步骤3b)得到引入伪用户情况下,窃听者的累积分布函数得到引入伪用户情况下,NOMA-VLC通信系统的安全中断概率;

[0025] 3d)根据步骤2b)得到的安全吞吐量的定义并结合步骤3c)得到引入伪用户情况下,NOMA-VLC通信系统的安全中断概率得到NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量;

[0026] 4)将不同的合法NOMA用户数、LED灯高度和半功率角参数代入安全中断概率及安全吞吐量表达式中,得到合法NOMA用户数、LED灯高度和半功率角对系统安全通信性能的影响。

[0027] 本发明有益效果是说明本发明由于采用了权利要求的技术方案产生的效果,即本

发明的发明点,可以表示为:

[0028] 1. 本发明基于朗伯模型,引入了NOMA技术,考虑系统中的窃听用户的运动服从RWP-CB运动模型的情况下,最终推导出了NOMA-VLC通信系统的安全中断概率及安全吞吐量表达式。

[0029] 2. 本发明引入了一个伪用户的方案,降低了NOMA-VLC通信系统的安全中断概率的同时提高了安全吞吐量,最终提升了系统的安全通信性能。

附图说明

[0030] 此处所说明的附图用来提供对本发明的进一步理解,构成本申请的一部分,并不构成对本发明的不当限定,在附图中:

[0031] 图1是NOMA辅助室内VLC系统模型;

[0032] 图2是存在伪用户下NOMA辅助室内VLC的系统模型;

[0033] 图3给出了在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下,不同用户数目对应的系统安全中断概率曲线;

[0034] 图4给出了在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下,LED灯高度对应的系统安全中断概率曲线;

[0035] 图5给出了在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下,LED灯半功率角对应的系统安全中断概率曲线;

[0036] 图6给出了在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下,不同用户数目对应的系统安全吞吐量曲线;

[0037] 图7和图8分别给出了采用等功率分配算法和距离决定的功率分配算法时,伪用户功率分配系数对应的系统的安全中断概率曲线;

[0038] 图9给出了等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下,给伪用户分配不同大小的功率时对应的系统安全吞吐量曲线。

具体实施方式

[0039] 下面将结合附图以及具体实施例来详细说明本发明,在此本发明的示意性实施例以及说明用来解释本发明,但并不作为对本发明的限定。

[0040] 本发明提供的提高NOMA辅助室内VLC系统安全通信性能的方法,包括下述步骤:

[0041] 步骤1,基于朗伯模型,考虑到窃听者的存在,建立多用户的室内NOMA-VLC通信系统信道模型:

[0042] (1) 假设LED采用广义朗伯辐射模式,LED灯和接收用户k之间的信道衰减系数 h_k 定义如下:

$$[0043] \quad h_k = A_{PD} \frac{(m+1)}{2\pi d^2} \cos^m(\theta) \cos(\psi) T_s(\psi) \times G(\psi) \text{rect}\left(\frac{\psi}{FOV}\right) \quad (1)$$

[0044] 其中, A_{PD} 是接收器的有效区域,d是发射器到接收器的距离,m表示朗伯发射系数,该系数由公式 $m = -\ln 2 / \ln[\cos(\Phi_{1/2})]$ 计算得出,其中 $\Phi_{1/2}$ 表示LED灯的半功率角。 θ 表示LED端的出射角, ψ 表示PD端的入射角,一般的 $\cos(\theta) = \cos(\psi) = L / \sqrt{L^2 + r_k^2}$,L表示

LED灯距离接收平面的距离, r_k 为用户k的水平半径。 $T_s(\psi)$ 表示光学滤波器增益, $G(\psi)$ 表示光学集中器增益, FOV是接收器的视场角, $\text{rect}()$ 表示矩形函数。

[0045] 由于合法用户和窃听者的位置服从随机移动和随机分布, 则其分布半径为变量, 且接收方向为常量, 所以公式(1)可以整合为:

$$[0046] \quad h_k = C(L^2 + r_k^2)^{-\frac{1}{2\alpha}} \quad (2)$$

[0047] 其中, α 为关于m的函数, $\alpha = \frac{1}{m+3}$, C为关于 $A_{PD}, m, L, T_s(\psi), G(\psi)$ 的函数,

$$C = \frac{A_{PD}(m+1)L^{m+1}T_s(\psi) \times G(\psi)}{2\pi}.$$

[0048] 推导出NOMA辅助室内VLC系统下合法用户的接收信干噪比表达式和窃听者解码特定用户时的接收信干噪比表达式:

[0049] 1a) 给出窃听者水平半径的概率密度函数 $f(r_e)$ 如下:

$$[0050] \quad f(r_e) = \frac{4r_e}{D^2 - R^2} - \frac{4r_e^3}{D^4 - R^4}, \quad R \leq r_e \leq D \quad (3)$$

[0051] 其中, r_e 代表窃听者的水平半径, D为LED灯的照射覆盖范围的半径; R为保护区域的半径;

[0052] 1b) 给出OOK调制下, LED发送端实际传送的光信号:

[0053] 在LED发射端, 根据NOMA的准则, N个用户的OOK调制符号将在电功率域进行叠加编码。为了保证瞬时的发送光功率为正, 必须在叠加编码信号中加入一定的直流偏置以在接收端实现正确的光电转换。因此, LED发送端实际传送的光信号x如下:

$$[0054] \quad x = \sum_{i=1}^N a_i \sqrt{P_E} s_i + I_{dc} \quad (4)$$

[0055] 其中, a_i 为第i个用户的电功率分配系数, P_E 代表总的调制电功率, s_i 为传送给第i个用户的符号且均值为零, I_{dc} 表示直流偏置。

[0056] 1c) 得到用户k和窃听者的接收信号 $y_k, 1 \leq k \leq N$

[0057] 仅考虑直射链路, 收集到的光信号通过光电探测器转换为电信号, 同时直流偏置 I_{dc} (不包含信息) 被消除。因此, 用户k ($1 \leq k \leq N$) 的接收信号 y_k 可以表示为:

$$[0058] \quad y_k = \eta h_k \sum_{i=1}^N a_i \sqrt{P_E} s_i + n_k \quad (5)$$

[0059] 其中, η 表示光电二极管的响应度, n_k 表示第k个用户处的加性高斯白噪声, 均值为零, 方差为 σ_k^2 。

[0060] 为简化问题的分析且不失一般性, 我们假设 $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_N^2 = \sigma_n^2$ 。当LED灯的高度、半功率角等参数固定时, 发射端和用户处光电探测器之间的信道衰减系数仅和用户所在位置的水平半径 r_k 有关。更通俗地说, 当用户的水平半径 r_k 越大时, 用户与LED灯的距离 d_k 越大, 两者之间的信道衰减系数 h_k 越小, 意味着相应的信道条件越差。不失一般性, 我们假

设N个用户的水平半径满足 $r_1 \geq r_2 \geq \dots \geq r_N \geq 0$, 对应其信道的衰落系数满足 $0 \leq |h_1|^2 \leq |h_2|^2 \leq \dots \leq |h_N|^2$ 。

[0061] 类似地, 窃听者接收到的信号 y_e 可以表示为:

$$[0062] \quad y_e = \eta h_e \sum_{i=1}^N a_i \sqrt{P_E} s_i + n_e \quad (6)$$

[0063] 其中 h_e 为LED灯和窃听者之间的信道衰减系数, n_e 表示进行光电转换后的加性高斯白噪声, 假设其均值为零, 方差为 $\sigma_e^2 = \sigma_n^2$ 。

[0064] 1d) 得到合法用户 k ($1 \leq k \leq N$) 和窃听者解码特定用户时的信干噪比;

[0065] 对于某一用户 k 来说, 当其得到相应的接收信号后, 将会利用串行干扰消除接收机来恢复出原始信号。具体的执行步骤为: 首先将信道条件最差的用户对应的信息解码出来, 然后删除, 接着对剩余用户中信道条件最差的用户执行此操作, 直到剩余的用户中自己本身是信道条件最差的用户。此时剩余的接收信号中将包含用户 k 自身的信息、剩余 $k-1$ 个用户的信息和加性噪声。用户 k 将其余用户的信号视为干扰, 直接对 s_k 进行解码, 此时合法用户的接收信干噪比 Γ_k 表示为:

$$[0066] \quad \Gamma_k = \frac{\eta^2 |h_k|^2 a_k^2 P_E}{\sum_{i=k+1}^N \eta^2 |h_i|^2 a_i^2 P_E + \sigma_n^2} \quad (7)$$

[0067] 式中, a_k 为第 k 个用户的电功率分配系数, σ_n^2 为方差;

[0068] 将步骤1公式(2)中得到的VLC视距链路的直流信道增益 h_k 带入到公式(8)中, 整理可得:

$$[0069] \quad \Gamma_k = \frac{A_k \rho C^2 (L^2 + r_k^2)^{-\frac{1}{\alpha}}}{1 + B_k \rho C^2 (L^2 + r_k^2)^{-\frac{1}{\alpha}}} \quad (8)$$

[0070] 其中 A_k 为 a_k 的函数, $A_k = a_k^2$, B_k 为 a_i 的函数, $B_k = \sum_{i=k+1}^N a_i^2$, ρ 为平均电信噪比, $\rho = \frac{P_E \eta^2}{\sigma_n^2}$

代表平均电信噪比。

[0071] 对于窃听者来说, 我们假设他可以准确知道串行干扰消除解码顺序和各合法用户的功率分配系数, 这意味着窃听者实际上有能力得到任意用户的接收信息, 例如当他想要获得 s_k 时, 只需要执行和第 k 个合法用户相同的操作即可, 因此窃听者在解码 s_k 时对应的信干噪比 Γ_{ek} 可以表示如下:

$$[0072] \quad \Gamma_{ek} = \frac{A_k \rho C^2 (L^2 + r_e^2)^{-\frac{1}{\alpha}}}{1 + B_k \rho C^2 (L^2 + r_e^2)^{-\frac{1}{\alpha}}} \quad (9)$$

[0073] 1e) 根据步骤1a) 公式(3)中得到的窃听者在环形拓扑中运动时的水平半径概率密度函数 $f(r_e)$ 和步骤1d) 公式(9)中得到的窃听者在解码 s_k 时对应的信干噪比 Γ_{ek} , 推导窃听

者的概率密度函数 $f_{\Gamma_{ek}}(\Gamma)$ 闭合表达式如下:

$$[0074] \quad f_{\Gamma_{ek}}(\Gamma) = \begin{cases} \frac{2\alpha\Gamma^{-\alpha-1}A_k\rho C^2}{(D^2-R^2)(A_k\rho C^2-\Gamma B_k\rho C^2)^{1-\alpha}} - \frac{2\alpha\Gamma^{-\alpha-1}A_k\rho C^2}{(D^4-R^4)(A_k\rho C^2-\Gamma B_k\rho C^2)^{1-\alpha}} \\ \times \left[\left(\frac{\Gamma}{A_k\rho C^2-\Gamma B_k\rho C^2} \right)^{-\alpha} - L^2 \right], & \Gamma_{ek\min} \leq \Gamma \leq \Gamma_{ek\max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

[0075] 式中, Γ 是信干噪比变量, $\Gamma_{ek\min}$ 是信干噪比变量的最小值, $\Gamma_{ek\max}$ 是信干噪比变量的最大值;

[0076] 进而推导得到累积分布函数 $F_{\Gamma_{ek}}(\Gamma)$ 闭合表达式:

$$[0077] \quad F_{\Gamma_{ek}}(\Gamma) = \begin{cases} \left\{ \frac{\left[\Gamma^{-\alpha} (A_k\rho C^2 - \Gamma B_k\rho C^2)^{\alpha} - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} - \frac{2\Gamma^{-\alpha} (A_k\rho C^2 - \Gamma B_k\rho C^2)^{\alpha}}{D^2 - R^2} \right\} \\ - \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek\min}^{-\alpha} (A_k\rho C^2 - \Gamma_{ek\min} B_k\rho C^2)^{\alpha} - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} - \frac{2\Gamma_{ek\min}^{-\alpha} (A_k\rho C^2 - \Gamma_{ek\min} B_k\rho C^2)^{\alpha}}{D^2 - R^2} \right\}, & \Gamma_{ek\min} \leq \Gamma \leq \Gamma_{ek\max} \end{cases} \quad (11)$$

[0078] 步骤2,推导出NOMA-VLC通信系统的安全中断概率及安全吞吐量表达式,并通过蒙特卡洛方法进行仿真验证。

[0079] 其中,NOMA-VLC通信系统的安全中断概率表达式,通过下述方法得到:

[0080] 2a)给出合法用户的安全中断概率 P_{outk} 的定义,如下:

$$P_{outk} = P \left\{ \frac{1}{2} \log_2 (1 + \Gamma_k) - \frac{1}{2} \log_2 (1 + \Gamma_{ek}) \leq R_{th} \right\}$$

[0081]

$$= 1 - F_{\Gamma_{ek}} \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) \quad (12)$$

[0082] 式中, R_{th} 是目标通信速率, $P()$ 表示概率;

[0083] 并结合步骤1e)公式(11)中得到窃听者的累积分布函数 $F_{\Gamma_{ek}}(\Gamma)$ 得到NOMA-VLC通信系统的合法用户的安全中断概率 P_{outk} :

$$\begin{aligned}
P_{outk} = 1 - & \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1+\Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1+\Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
& \left. - \frac{2 \left(\frac{1+\Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1+\Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \\
& - \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} - \frac{2 \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\}
\end{aligned} \quad (13)$$

[0085] 对于整个系统来说,考虑最差的情况,即当系统中有一个用户发生中断时,则认为整个系统中断,那么NOMA-VLC通信系统的安全中断概率 P_{out} 如下:

$$\begin{aligned}
P_{out} &= 1 - P\{\text{用户1未发生中断, 用户2未发生中断, } \dots, \text{用户N未发生中断}\} \\
&= 1 - F_{\Gamma_{ek}} \left(\frac{1+\Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) \\
&= 1 - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1+\Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1+\Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
& \quad \left. - \frac{2 \left(\frac{1+\Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1+\Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \\
& \quad - \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} - \frac{2 \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\}
\end{aligned} \quad (14)$$

[0087] 其中, F_{\min} 表示用户得到最小信干噪比。

[0088] 其中,NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量表达式,通过下述方法得到:

[0089] 2b)给出系统的安全吞吐量的ST定义,如下:

[0090] $ST = R_{th} \times (1 - P_{out})$ (15)

[0091] 并结合步骤2a)公式(14)中得到的整个系统的安全中断概率 P_{out} 得到听者移动场景下的NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量ST表达式:

$$[0092] \quad ST = R_{th} \times \left\{ \begin{array}{l} \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1+\Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1+\Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right\} - \\ - \frac{2 \left(\frac{1+\Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1+\Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) B_k \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} - \\ \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right\} - \\ - \frac{2 \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} B_k \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \quad (16)$$

[0093] 步骤3,推导出引入伪用户情况下,NOMA-VLC通信系统中窃听者解码特定用户时的安全中断概率和安全吞吐量。

[0094] 伪用户和其余真正存在并进行通信的合法用户一样,发送端并不对该伪用户做特殊处理,而是将他也看做一个合法用户,正常分配信号。但窃听者并不知道伪用户的存在,对于窃听者来说,自接收到信号开始,伪用户的信号便和噪声一起时刻存在,并影响着窃听者利用串行干扰消除解码合法用户信号的全过程。

[0095] 3a)得到引入伪用户情况下,得到窃听者解码特定用户时的信干噪比 Γ_{dek} ;

$$[0096] \quad \Gamma_{dek} = \frac{A_k \rho C^2 (L^2 + r_e^2)^{-\frac{1}{\alpha}}}{1 + B_k \rho C^2 (L^2 + r_e^2)^{-\frac{1}{\alpha}} + M \rho C^2 (L^2 + r_e^2)^{-\frac{1}{\alpha}}} \quad (17)$$

[0097] 其中 $M = a_{N+1}^2$,且 A_k 、 B_k 和 M 需要满足 $A_k + B_k + M = 1$,将 M 作为控制变量,则有 $A_k + B_k = 1 - M$ 。

[0098] 3b)根据步骤1a)公式(4)中得到的窃听者在环形拓扑中运动时的水平半径概率密度函数 $f(r_e)$ 和步骤3a)公式(17)中得到引入伪用户情况下,窃听者在解码 s_k 时对应的信干噪比 Γ_{dek} ,推导出引入伪用户情况下,窃听者的概率密度函数 $f_{\Gamma_{dek}}(\Gamma)$ 闭合表达式如下:

$$[0099] \quad f_{\Gamma_{dek}}(\Gamma) = \begin{cases} \frac{2\alpha \Gamma^{-\alpha-1} A_k \rho C^2}{\left[A_k \rho C^2 - \Gamma(B_k + M) \rho C^2 \right]^{1-\alpha}} \times \\ \left\{ \frac{1}{D^2 - R^2} - \frac{1}{D^4 - R^4} \times \right. \\ \left. \left[\left(\frac{\Gamma}{A_k \rho C^2 - \Gamma(B_k + M) \rho C^2} \right)^{-\alpha} - L^2 \right] \right\}, & \Gamma_{ek \min} \leq \Gamma \leq \Gamma_{ek \max} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

[0100] 进而推导得到引入伪用户情况下, 累积分布函数 $F_{\Gamma_{dek}}(\Gamma)$ 闭合表达式:

$$F_{\Gamma_{dek}}(\Gamma) = \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\Gamma^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma(B_k + M) \rho C^2)^\alpha - L^2}{D^4 - R^4} \right]^2 \\ & - \frac{2\Gamma^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma(B_k + M) \rho C^2)^\alpha}{D^2 - R^2} \end{aligned} \right\} - \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2)^\alpha - L^2}{D^4 - R^4} \right]^2 \\ & - \frac{2\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2)^\alpha}{D^2 - R^2} \end{aligned} \right\}, \Gamma_{ek \min} \leq \Gamma_{ek} \leq \Gamma_{ek \max}$$

[0102] 3c) 结合步骤2a) 公式 (12) 给出的合法用户的安全中断概率 P_{outk} 的定义和步骤3b) 公式 (19) 中得到引入伪用户情况下, 窃听者的累积分布函数 $F_{\Gamma_{dek}}(\Gamma)$ 得到引入伪用户情况下, NOMA-VLC通信系统的合法用户的安全中断概率 P_{doutk} :

$$P_{doutk} = 1 - \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha - L^2}{D^4 - R^4} \right]^2 \\ & - \frac{2 \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_k}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$- \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2)^\alpha - L^2}{D^4 - R^4} \right]^2 \\ & - \frac{2\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2)^\alpha}{D^2 - R^2} \end{aligned} \right\}$$

[0104] 引入伪用户情况下, NOMA-VLC通信系统的安全中断概率 P_{dout} 如下:

$$\begin{aligned}
P_{dout} &= 1 - P\{\text{用户1未发生中断, 用户2未发生中断, } \dots, \text{用户N未发生中断}\} \\
&= 1 - F_{\Gamma_{ek}} \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) \\
&= 1 - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
&\quad \left. - \frac{2 \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \\
&\quad - \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
&\quad \left. - \frac{2 \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \tag{21}
\end{aligned}$$

[0106] 3d) 结合步骤2b) 公式 (15) 给出的安全吞吐量ST的定义并结合步骤3c) 公式 (21) 中得到的引入伪用户情况下, 整个系统的安全中断概率 P_{dout} 得到引入伪用户情况下, NOMA-VLC通信系统的安全吞吐量dST表达式:

$$\begin{aligned}
dST &= R_{th} \times \left\{ \frac{\left[\left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
&\quad \left. - \frac{2 \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right)^{-\alpha} \left[A_k \rho C^2 - \left(\frac{1 + \Gamma_{\min}}{2^{2R_{th}}} - 1 \right) (B_k + M) \rho C^2 \right]^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \\
&\quad - \left\{ \frac{\left[\Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha - L^2 \right]^2}{D^4 - R^4} \right. \\
&\quad \left. - \frac{2 \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} \left(A_k \rho C^2 - \Gamma_{ek \min}^{-\alpha} (B_k + M) \rho C^2 \right)^\alpha}{D^2 - R^2} \right\} \tag{22}
\end{aligned}$$

[0108] 本发明的正确性和优点可通过以下理论结果对比进一步说明:

[0109] 本发明方法中, 通过MATLAB进行解析计算并使用蒙特卡罗仿真进行仿真验证。

[0110] 首先, 准确描述所推导的公式; 然后, 分别在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下针对不同用户数目对系统安全中断概率和安全吞吐量进行了对比; 再者, 分别在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下, 比较了不同LED灯高度、半功率角情况下的系统安全中断概率; 其次引用伪用户, 分别在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下, 研究伪用户功率分配系数对应的系统安全中断概率曲线。最后分别分析了等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下, 给伪用户分配不同大小的功率对系统安全吞吐量的变化。

[0111] 理论和仿真结果

[0112] 图1给出了NOMA辅助室内VLC的系统模型。图2给出了存在伪用户下NOMA辅助室内VLC的系统模型。图3给出了在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下,不同用户数目对应的系统安全中断概率曲线。可以看出,仿真结果与解析结果较为吻合,印证了本发明中所建立的系统模型的正确性。还可以看出,不论使用哪种功率分配算法,随着用户数目增大,系统安全中断概率随之增大。另外对于相同的保护域半径和用户数目,距离决定的功率分配算法总是优于等功率分配算法,且随着用户数目的增大,两者之间的差距逐渐增大。

[0113] 图4给出了在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下,LED灯高度对应的系统安全中断概率曲线。容易看出,对于任意高度,距离决定的功率分配算法均优于等功率分配算法。对于确定的功率分配算法,随着LED灯高度的增大,系统的安全中断概率随之增大。

[0114] 图5给出了在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下,LED灯半功率角对应的系统安全中断概率曲线。从仿真计算结果可以看出,对于任意的半功率角,距离决定的功率分配算法均优于等功率分配算法。对于确定的功率分配算法,随着半功率角的增大,系统安全中断概率随之增大。

[0115] 从图6给出了在等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下,不同用户数目对应的系统安全吞吐量曲线。从仿真计算结果可以看出,距离决定的功率分配策略明显优于等功率分配策略,在相同的用户数目下实现了更大的吞吐量。对于两种功率分配算法来说,系统安全吞吐量都是先增大后减小。

[0116] 图7和图8分别给出了采用等功率分配算法和距离决定的功率分配算法时,伪用户功率分配系数对应的系统的安全中断概率曲线。可以看出,对于这两种功率分配算法,当伪用户的功率分配系数确定时,随着保护域半径的变大,系统的安全中断概率随之减小。而当保护域半径大小不变时,随着分配给伪用户功率的增大,系统的安全中断概率急剧下降,最终变为零。通过这一结果可以看出,本发明采用的“主动引入干扰”的思想和提出的“伪用户”这一概念很好地抑制了窃听者的窃听能力,提升了系统的安全通信性能。

[0117] 图9给出了等功率分配算法和距离决定的功率分配算法下,给伪用户分配不同大小的功率时对应的系统安全吞吐量曲线。可以看出,随着伪用户功率分配系数的增大,两种算法下系统的最大安全吞吐量显著增大,且取最大值时对应的理论安全速率随之增大。

[0118] 本发明并不局限于上述实施例,在本发明公开的技术方案的基础上,本领域的技术人员根据所公开的技术内容,不需要创造性的劳动就可以对其中的一些技术特征作出一些替换和变形,这些替换和变形均在本发明的保护范围内。

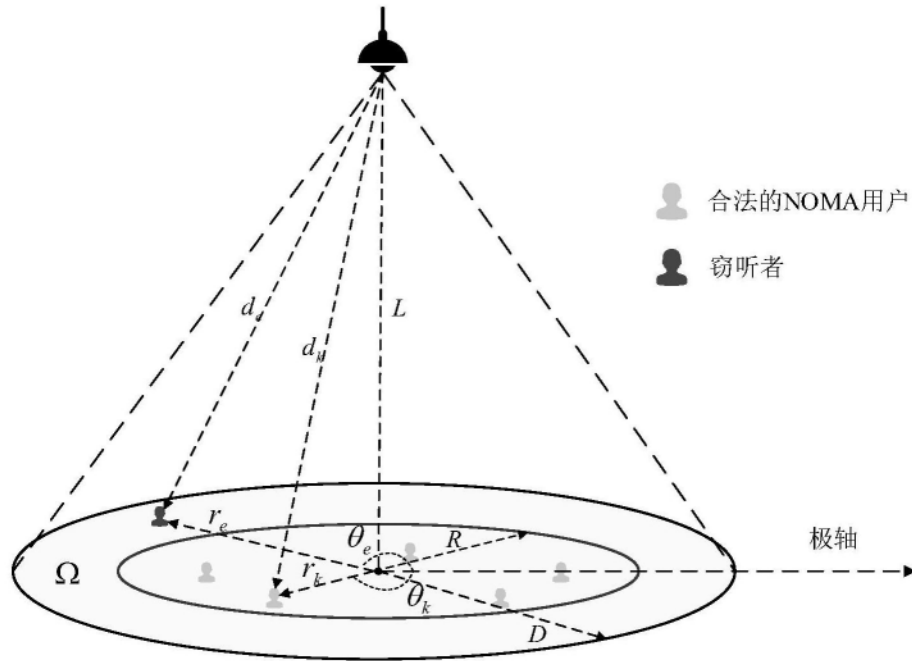


图1

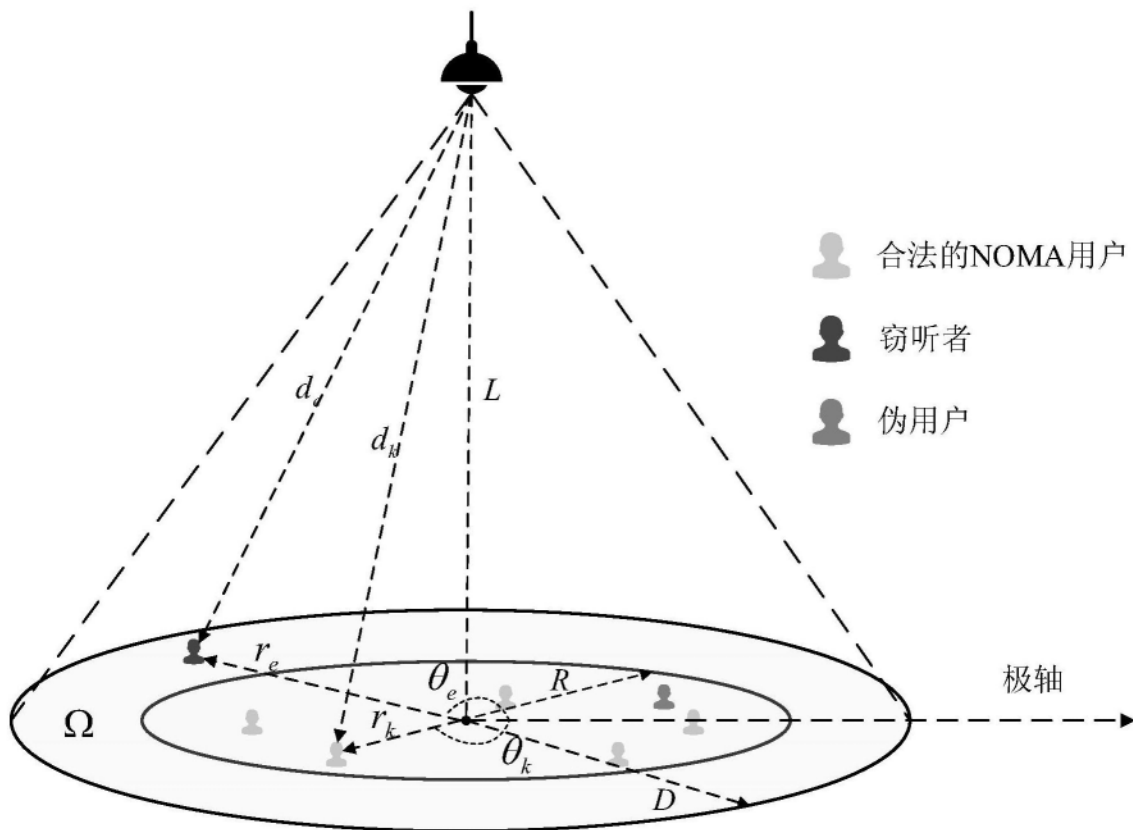


图2

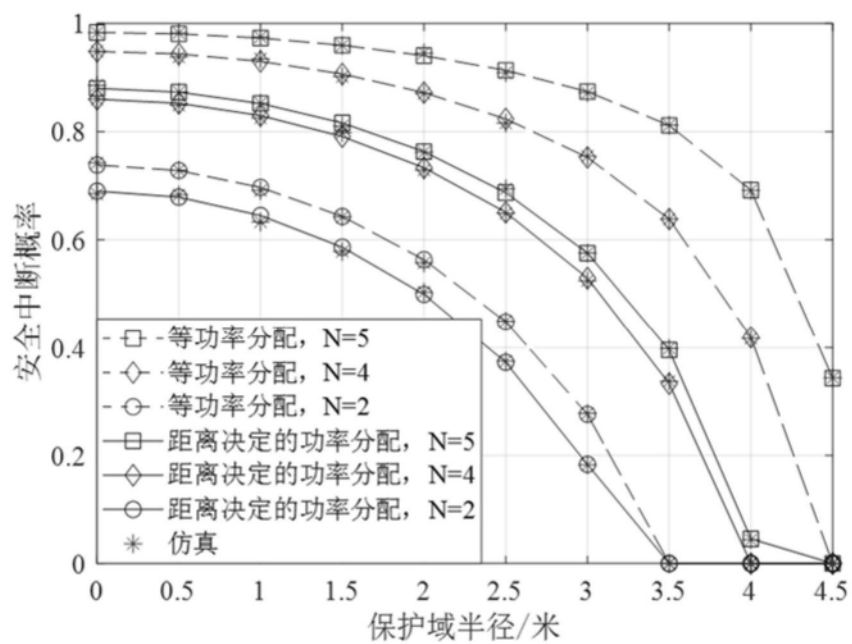


图3

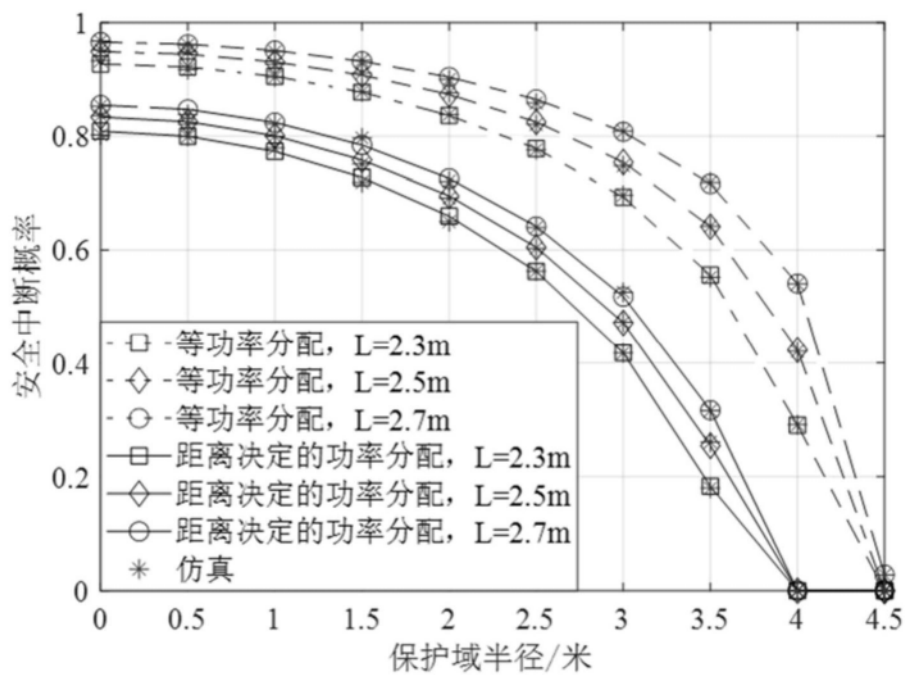


图4

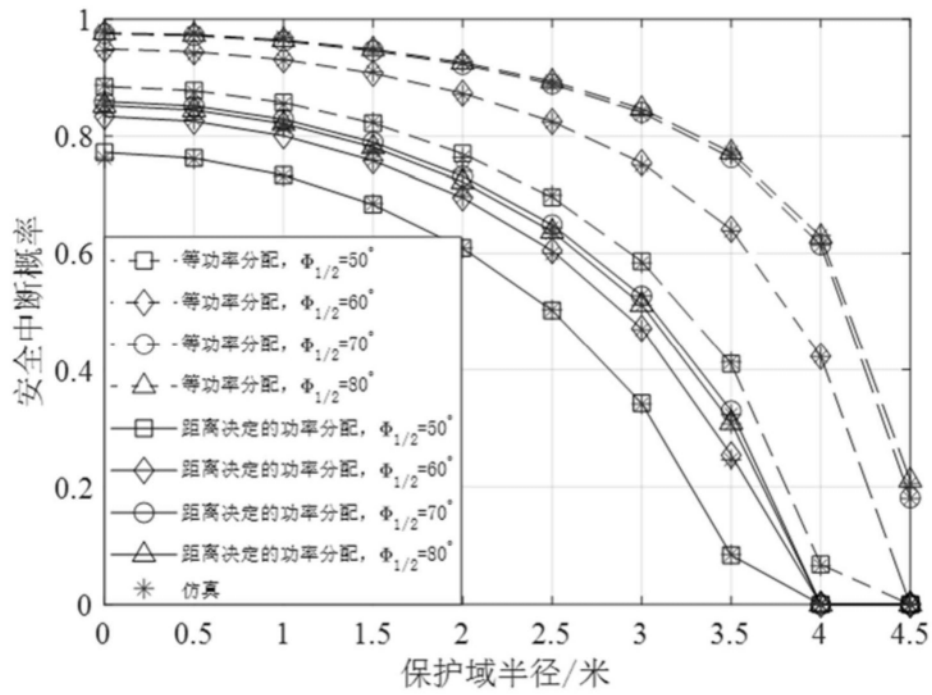


图5

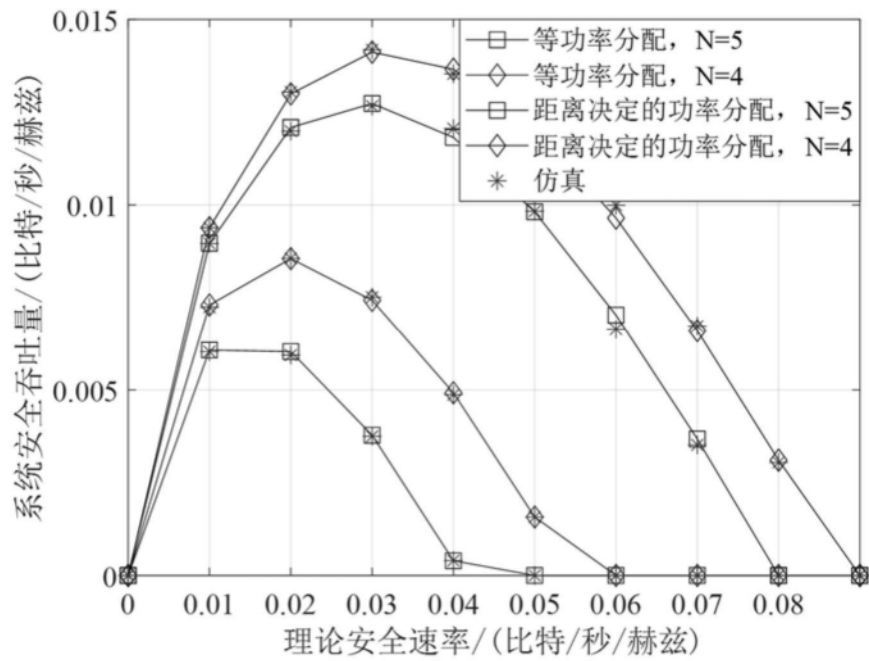


图6

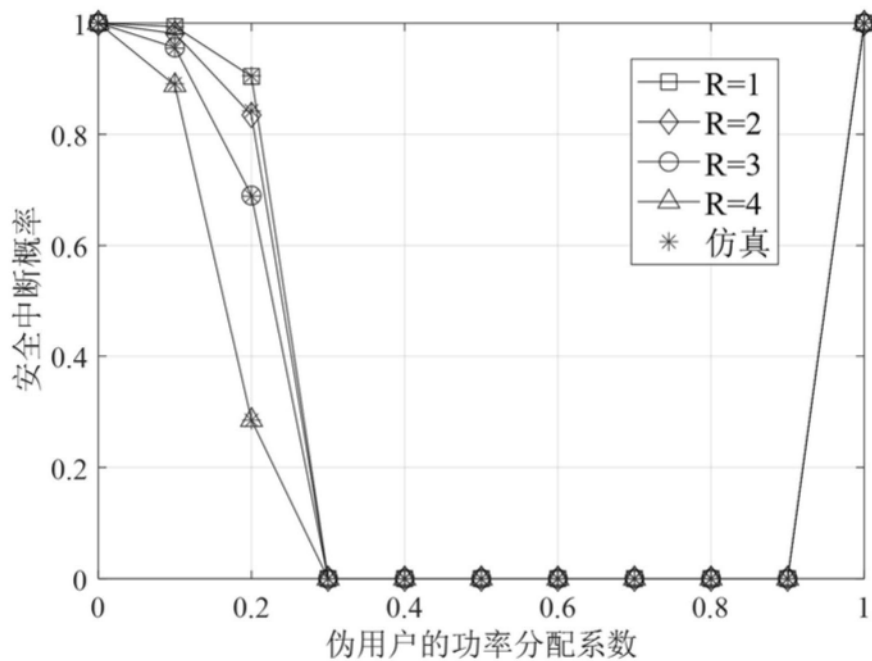


图7

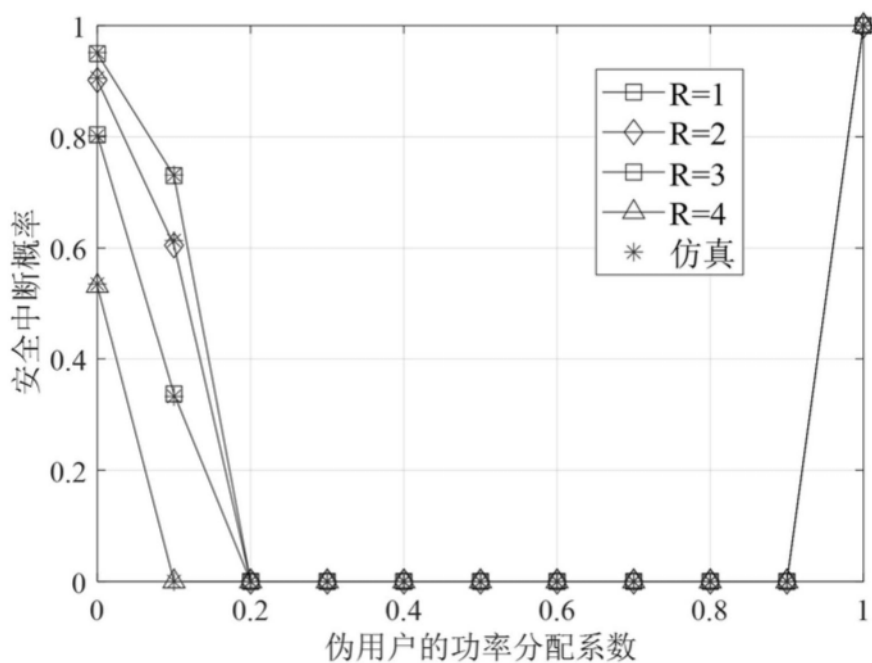


图8

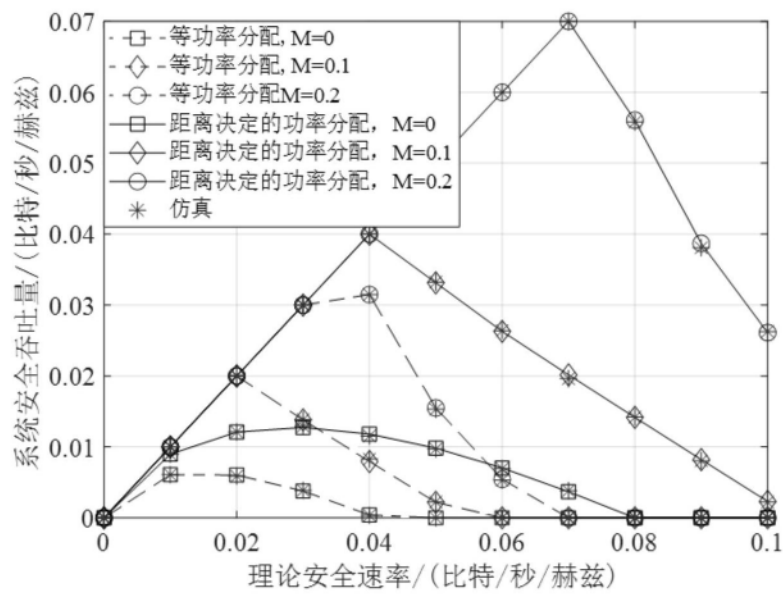


图9