

无线紫外光 MIMO 通信线性注水功率分配方法

赵太飞*, 史海泉, 梁浩, 容开新

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 将无线紫外光多输入多输出(MIMO)通信与线性注水算法相结合,首先建立基于线性注水算法的无线紫外光非直视 MIMO 通信模型,并推导出其信道容量模型,然后在信号发射端采用等功率分配和线性注水算法两种方法进行功率分配,研究在无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中采用这两种方法对通信系统中信道容量的影响,并进行仿真分析验证。仿真结果表明,在信噪比相同的情况下:当收发天线不对称时,采用线性注水算法进行功率分配相比于等功率分配算法,无线紫外光非直视 MIMO 通信信道容量得到显著提升;当收发天线对称,在信噪比较小时,利用注水算法可以明显提高信道容量,而在信噪比提高达到一定值后,采用注水算法进行功率分配的信道容量逼近等功率分配的信道容量。

关键词 光通信;多输入多输出;信道容量;紫外光散射;非直视;注水算法

中图分类号 TN929.12

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.2206002

Linear Water-Filling Power Allocation Method in Wireless MIMO Ultraviolet Communication

Zhao Taifei*, Shi Haiquan, Liang Hao, Rong Kaixin

*Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology,
Xi'an, Shaanxi 710048, China*

Abstract In this paper, wireless multiple-input multiple-output (MIMO) ultraviolet communication is combined with a linear water-filling algorithm. First, a wireless non-line-of-sight (NLOS) MIMO ultraviolet communication model based on the linear water-filling algorithm is established and its channel capacity model is derived. Then, the equal power allocation algorithm and the linear water-filling algorithm are used for power allocation at the signal transmitter. The influences of these two methods on the channel capacity of the wireless NLOS MIMO ultraviolet communication system are studied, and simulation analysis and verification are conducted. The simulation results show that at the same signal-to-noise ratio (SNR), when the transmitting and receiving antennas are asymmetrical, the channel capacity of the communication system adopting the linear water-filling algorithm in wireless NLOS MIMO communication is significantly higher than that of the system employing the equal power allocation algorithm. When the transmitting and receiving antennas are symmetrical and the SNR is small, the water-filling algorithm can significantly improve the channel capacity. When the SNR increases to a certain value, the channel capacity of power allocation obtained via the water-filling algorithm is close to that obtained via the equal power allocation algorithm.

Key words optical communications; multiple-input multiple-output; channel capacity; ultraviolet scattering; non-line-of-sight; water-filling algorithm

OCIS codes 060.4510; 060.4230; 150.1135

收稿日期: 2021-04-19; **修回日期:** 2021-05-13; **录用日期:** 2021-06-03

基金项目: 国家自然科学基金(61971345)、陕西省教育厅科研计划项目(17-JF024)、陕西省重点研发计划一般项目(2021GY-044)、西安市碑林区科技计划项目(GX1921)、榆林市科技计划项目(2019-145)、西安市科学计划项目(CXY1835(4))

通信作者: *zhaotaifei@163.com

1 引言

随着通信技术的飞速发展,移动通信向着大规模、智能化的方向发展。无线紫外光 MIMO 通信技术提供了一种更高通信覆盖率、更低通信延迟、更低功耗的通信方式^[1]。

无线紫外光 MIMO 通信采用波长为 200 ~ 280 nm 的紫外光进行通信。利用无线紫外光的“日盲”特性^[2],可以大大减小通信过程中环境噪声的影响,实现全天候工作。利用无线紫外光在大气环境下会被空气中微小粒子吸收和散射这一特性,可以绕过障碍物建立通信链路^[3],实现非直视通信。利用多个无线紫外光 LED 组成紫外 LED 阵列^[4],通过编码技术将每个 LED 进行单独编码,在降低功耗的同时实现全方位的广播信号,结合无线紫外光的非直视特性可以实现超视距通信^[5]。

采用信道功率分配技术^[6]选择信道进行信息传输,可以显著降低大规模 MIMO 通信系统中通信链路的复杂度,同时,通过剔除通信链路中不适宜传输信息的信道,可以有效地降低通信过程中的功率损耗^[7]。目前 MIMO 通信中最常用的通信信道功率分配算法是等功率分配算法^[8],不考虑通信信道的通信质量,将信号发射端的功率按照建立通信的信道个数进行平均分配。由于等功率分配不考虑信道质量,当信道中信噪比较低时,信道容量要远低于理想水平。

综上所述,本文针对无线紫外光 MIMO 通信系统中信道功率分配问题,建立一种基于线性注水算法优化^[9]的无线紫外光非直视 MIMO 通信信道选

择和功率分配方法。考虑实际 MIMO 通信系统中用户对通信信道的不同要求,建立基于无线紫外光非直视 MIMO 通信系统模型,并推导出其最大信道容量公式。仿真结果表明,相比于传统的等功率分配算法,相同条件下,在无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中采用线性注水算法对信道中的功率进行分配,能够有效提升该通信系统的信道容量,这样可在通信距离较远处仍能保持较大的信道容量,提高通信系统的稳定性和可靠性,该方法具有广泛的应用前景。

2 无线紫外光 MIMO 通信信道模型

2.1 无线紫外光非直视 MIMO 通信原理

无线紫外光 MIMO 通信可以采用直视和非直视两种通信方式进行通信,其中无线紫外光直视通信对光源的对准要求较高,在实际应用场景中,收发端的光源很难实现对准,而无线紫外光非直视通信利用无线紫外光的散射特性实现通信,解决了收发端光源对准问题^[10],可以更加灵活地适应各种复杂环境。

无线紫外光非直视 MIMO 通信中,为实现非直视通信,利用大气中微小粒子对紫外光的吸收散射作用^[11],采用紫外 LED 阵列作为信号发射端,通过光电转换,将信源信号转换成适合加载在无线紫外光上进行传输的信号,并通过光电转换,将信号加载到无线紫外光上,通过紫外 LED 阵列进行数据传输^[12]。无线紫外光非直视 MIMO 通信信道模型如图 1 所示^[13]。用户将信息上传,对信息进行调制,通过 MIMO 通信系统进行光电转换和编码,编码信

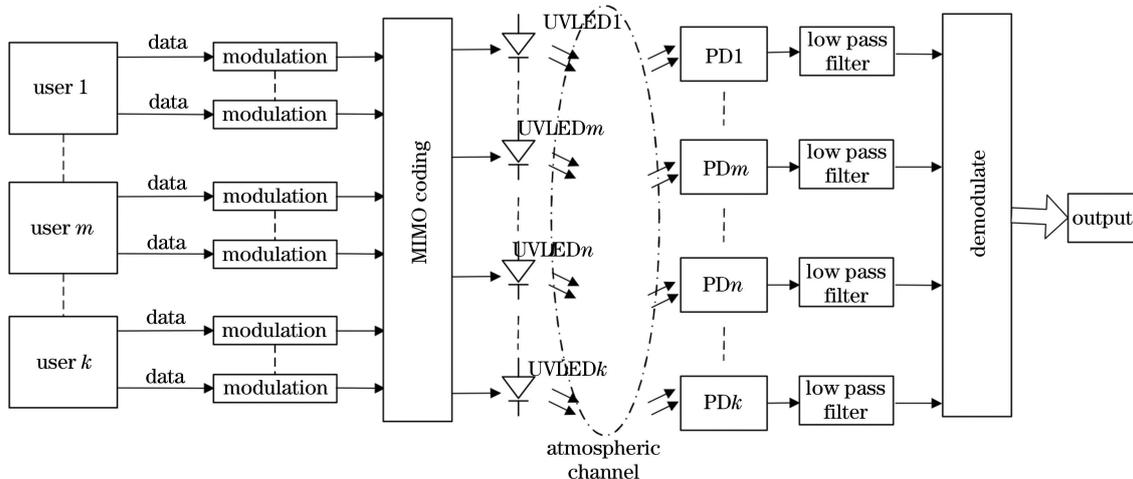


图 1 无线紫外光非直视 MIMO 通信信道模型

Fig. 1 Model of wireless ultraviolet NLOS MIMO communication channel

号被送入紫外 LED 天线进行传输,在大气信道中以非直视通信方式到达信号接收端被捕获还原为电信号,经过低通滤波和信号解码后被转换成用户发送的信息。

2.2 无线紫外光非直视 MIMO 通信信道容量计算

非直视条件下无线紫外光通信信道为近直视频率选择性衰落信道^[14],采用该信道模型可以得到无线紫外光非直视 MIMO 通信的信道容量。假设非直视通信系统中总的发射功率为 P ,信号发射端有 M 个光源,接收机有 N 个光电接收器,并假设建立了 $M \times N$ 个通信信道,则无线紫外光非直视 MIMO 通信信道矩阵^[15]可表示为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h_{M_{R1}} & h_{M_{R2}} & \cdots & h_{M_{R}N_T} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: $h_{M_{R1}}, h_{M_{R2}}, h_{M_{R}N_T}, h_{1N_T}, h_{2N_T}$ 为收发端之间子信道的衰落系数。对(1)式进行奇异值分解可得

$$\mathbf{H} = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H, \quad (2)$$

式中: \mathbf{D} 表示 $M \times N$ 维对角矩阵; \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 分别为 $M \times M$ 和 $N \times N$ 维酉矩阵,满足

$$\mathbf{U}^T\mathbf{U} = \mathbf{I}_M, \quad (3)$$

$$\mathbf{V}^T\mathbf{V} = \mathbf{I}_N, \quad (4)$$

式中: \mathbf{I}_M 和 \mathbf{I}_N 分别表示 $M \times M$ 维和 $N \times N$ 维单位矩阵; \mathbf{U}^T 和 \mathbf{V}^T 分别表示对应酉矩阵的转置矩阵。Hermite 矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征值 λ 可以表示为

$$\mathbf{H}\mathbf{H}^H\mathbf{y} = \lambda\mathbf{y}, \quad \mathbf{y} \neq 0, \quad (5)$$

式中: \mathbf{y} 是与 λ 对应的特征矢量,信道矩阵的奇异值可以用 λ 的非负平方根表示,且 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 的特征矢量可以表示为 \mathbf{U} 的列矢量, $\mathbf{H}^H\mathbf{H}$ 的特征矢量可以表示为 \mathbf{V} 的列矢量。信道矩阵 \mathbf{H} 的秩 m 为矩阵 $\mathbf{H}\mathbf{H}^H$ 中非零特征值的个数,可以表示为

$$m = \min(\mathbf{M}, \mathbf{N}). \quad (6)$$

信号从发射机发出,经过无线紫外光非直视 MIMO 通信信道传输后到达信号接收机,此时信号接收机接收到的信号^[16]可以表示为

$$\mathbf{r} = \mathbf{T}\mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{V}^H\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (7)$$

式中: \mathbf{r} 为信号接收机的接收信号矢量; \mathbf{x} 为信号发射端的发射信号矢量; \mathbf{n} 为高斯白噪声; \mathbf{T} 为无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中光电转换效率。

令 $\mathbf{r}' = \mathbf{U}^H\mathbf{r}, \mathbf{x}' = \mathbf{V}^H\mathbf{x}, \mathbf{n}' = \mathbf{U}^H\mathbf{n}$,则信号接收机接收到的信号可以等价表示为

$$\mathbf{r}' = \mathbf{T}\mathbf{D}\mathbf{x}' + \mathbf{n}'. \quad (8)$$

使用奇异值分解时,将无线紫外光非直视 MIMO 通信信道等效成 l 个独立并行传输的无线紫外光非直视 MIMO 通信子信道,因此,在信号接收机上每个无线紫外光非直视 MIMO 通信子信道中接收到的信号可以表示为

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{T}\mathbf{D}\mathbf{x}'_i + \mathbf{n}'_i \quad (i = 1, 2, \dots, l). \quad (9)$$

在(9)式中代入信道矩阵奇异值 $\sqrt{\lambda_i}$,可得

$$\mathbf{r}'_i = \mathbf{T}\sqrt{\lambda_i}\mathbf{x}'_i + \mathbf{n}'_i \quad (i = 1, 2, \dots, l). \quad (10)$$

利用(10)式推导出 $\mathbf{r}'_i, \mathbf{x}'_i, \mathbf{n}'_i$ 的协方差和迹的表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{R}_{r'r'} = \mathbf{U}^H\mathbf{R}_{rr}\mathbf{U} \\ \mathbf{R}_{x'x'} = \mathbf{V}^H\mathbf{R}_{xx}\mathbf{V}, \\ \mathbf{R}_{n'n'} = \mathbf{U}^H\mathbf{R}_{nn}\mathbf{U} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \text{tr}(\mathbf{R}_{r'r'}) = \text{tr}(\mathbf{R}_{rr}) \\ \text{tr}(\mathbf{R}_{x'x'}) = \text{tr}(\mathbf{R}_{xx}), \\ \text{tr}(\mathbf{R}_{n'n'}) = \text{tr}(\mathbf{R}_{nn}) \end{cases} \quad (12)$$

式中: \mathbf{R}_{rr} 为接收信号协方差; \mathbf{R}_{xx} 为发射信号的协方差; \mathbf{R}_{nn} 为噪声协方差。假设利用无线紫外光非直视 MIMO 通信系统实现通信过程中,信号发射机采用等功率分配的方式分配功率,当信号发射机的紫外 LED 阵列总发射功率 P 不变时,分配到每个发射天线上的功率可表示为 P/M ,信号发射机中发射信号的协方差表示为

$$\mathbf{R}_{xx} = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^H\} = \frac{P}{M}\mathbf{I}_N, \quad (13)$$

式中: E 为数学期望。由(11)和(13)式可得

$$\mathbf{R}_{x'x'} = \mathbf{V}^H\mathbf{R}_{xx}\mathbf{V} = \frac{P}{M}\mathbf{I}_N. \quad (14)$$

MIMO 通信信道容量^[17]可表示为

$$C = B \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_N + \frac{R_{xx}}{\sigma_n^2} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right], \quad (15)$$

式中: B 为无线紫外光非直视 MIMO 通信信道中可用的总带宽; σ_n^2 表示噪声功率。将(14)式代入 MIMO 通信信道容量公式[(15)式]中,可得无线紫外光非直视 MIMO 通信信道容量为

$$C' = B \log_2 \left[\det \left(1 + \frac{P}{\sigma_n^2} \mathbf{H}\mathbf{H}^H \right) \right] = B \sum_{i=1}^l \log_2 \left(1 + \frac{P}{\sigma_n^2} \mathbf{H}_i\mathbf{H}_i^H \right), \quad (16)$$

式中: \mathbf{H}_i 为第 i 个子信道矩阵。

3 无线紫外光非直视 MIMO 线性注水功率分配方法

3.1 线性注水算法原理

采用等功率分配算法实现无线紫外光非直视 MIMO 通信信道的功率分配,将信号发射端总的发射功率按实际利用的信道个数进行平均分配,每个信道中分配的功率均相等,在各个子信道的信道质量都较高的情况下可以实现数据的快速传输,提高信道容量,而当信道中子信道的信道质量差异较大时,采用等功率分配算法则会大幅度降低信道中信道容量。在实际应用中,无线紫外光非直视 MIMO 通信信道中各子信道的信道质量之间差异较大,即使是相同信道,不同用户在使用时,各子信道的通信质量也不尽相同。

采用线性注水算法对无线紫外光非直视 MIMO 通信信道中的功率进行分配,是在信号发射端总的发射功率不变的情况下,将信号发射端的发射功率按照已建立通信的信道中通信质量的高低进行分配,为通信质量较高的信道分配较高的功率,为通信质量较低的信道分配较低的功率,未达到通信水平线的信道不分配功率。与等功率分配算法相比,信道功率分配更灵活,信道的传输速率也得到提升,无线紫外光非直视 MIMO 通信系统的信道容量也得到了提升。线性注水算法原理图如图 2 所示。

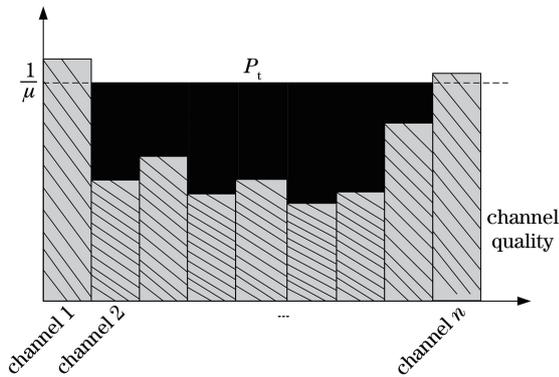


图 2 线性注水算法原理图

Fig. 2 Schematic diagram of linear water-filling algorithm

首先根据拉格朗日模型^[18]对(15)式进行求解,构造拉格朗日函数:

$$z = \sum_{i=1}^l \log_2 \left(1 + \frac{P_i \mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^T}{\sigma^2} \right) - \lambda \left(\sum_{i=1}^l P_i - P_t \right) = \sum_{i=1}^l \log_2 (1 + P_i \epsilon_i) - \lambda \left(\sum_{i=1}^l P_i - P_t \right), \quad (17)$$

式中: P_i 为子信道中分配的功率; P_t 为发送端总功

率; $\epsilon_i = \frac{\mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^T}{\sigma^2}$ 。对 z 求偏导^[19]可得

$$\frac{\partial z}{\partial P_i} = \frac{\epsilon_i}{\ln 2 (1 + \epsilon_i P_i)} - \lambda = 0. \quad (18)$$

通过求解可得

$$P_i = \frac{1}{\lambda \ln 2} - \frac{1}{\epsilon_i} = \frac{1}{\mu} - \frac{1}{\epsilon_i} (i = 1, 2, 3, \dots, l), \quad (19)$$

式中: $\mu = \lambda \ln 2$, $1/\mu$ 为线性注水算法中注水线的高度; $1/\epsilon_i$ 为信噪比的倒数, $1/\epsilon_i$ 值越大,表示该信道中分配的功率越小。

3.2 采用线性注水算法的无线紫外光非直视 MIMO 通信系统信道容量

在无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中,当信号发送端的当前信道参数(CSI)已知时,利用线性注水算法根据信道质量对信道中的发射功率进行自适应分配,进而显著提高无线紫外光非直视 MIMO 通信系统总的信道容量。

由(18)式可得无线紫外光非直视 MIMO 通信系统总的信道容量可表示为

$$\sum_{i=1}^l P_i = \sum_{i=1}^l \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\epsilon_i} \right) = \frac{l}{\mu} - \sum_{i=1}^l \frac{1}{\epsilon_i}. \quad (20)$$

在无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中分配给各信道的功率^[20]可表示为

$$P_i = \max \left(\frac{1}{\mu} - \frac{1}{\epsilon_i}, 0 \right) (i = 1, 2, 3, \dots, l), \quad (21)$$

且满足 $P_t = \sum_{i=1}^l P_i \leq P, P_i \geq 0$ 。

在无线紫外光非直视 MIMO 通信信道模型中,信号接收机子信道接收到的功率可表示为

$$P_{ri} = \max \left(\frac{\lambda_i}{\mu} - \sigma^2, 0 \right) (i = 1, 2, \dots, l). \quad (22)$$

将(22)式代入(16)式中,可得基于线性注水算法的无线紫外光非直视 MIMO 通信系统的信道容量表达式为

$$C'' = \sum_{i=1}^l \log_2 \left[1 + \frac{\max \left(\frac{\lambda_i}{\mu} - \sigma^2, 0 \right)}{\sigma^2} \right] = \sum_{i=1}^l \max \left[\log_2 \left(\frac{\lambda_i}{\mu \sigma^2} \right), 0 \right]. \quad (23)$$

4 仿真结果分析

由上述分析推导得到:无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中信道容量受天线个数、噪声环境和功率的影响严重。在大气环境中,紫外光受到空气中细小粒子散射、吸收作用明显,信号衰减严重,

无线紫外光非直视 MIMO 通信距离对功率影响严重。在天气条件相同的情况下,影响无线紫外光非直视 MIMO 通信的噪声环境相同。

为验证线性注水算法在无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中对信道容量的影响,本文选用波长为 255 nm 的 UVTOP255 型紫外 LED 作为无线紫外光非直视 MIMO 通信的光源,仿真过程中部分参数如表 1 所示,研究在相同通信环境条件下无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中的信道容量受收发天线和通信距离的影响。

表 1 无线紫外光非直视 MIMO 通信系统部分仿真参数

Table 1 Partial simulation parameters of wireless ultraviolet NLOS MIMO communication system

Parameter	Value
Typical optical power /mW	0.30
Wavelength /nm	255
Atmospheric scattering coefficient	2.399×10^{-4}
Atmospheric absorption coefficient	1×10^{-3}
Emission photon number	10^6
Detection efficiency of photomultiplier tube	0.2

图 3 仿真分析了在无线紫外光非直视 MISO 通

信系统中,增加发送天线对 MISO 通信系统中信道容量的影响,如图 3(a)所示。SISO 1X1 代表收发端采用单个收发天线;MISO 2X1 代表信号发射端采用双天线,信号接收端仅有一个天线;MISO 3X1 代表信号发射端采用三个天线,信号接收端仅有一个天线;MISO 4X1 代表信号发射端采用四个天线,信号接收端仅有一个天线。在采用等功率分配算法对无线紫外光非直视 MISO 通信系统中的信道进行功率分配时,每个信道中分配的功率相等,而接收端只有一个,因此增加发送天线的数量对信道容量的提高效果不明显。如图 3(b)所示,利用线性注水算法对无线紫外光非直视 MISO 通信系统中的信道进行功率分配,在信道质量高的信道分配更高的功率,尽管只有一个接收天线,但通信质量较高的信道分配到较高的功率,进而提高了信道容量。在 MISO 系统中信噪比(SNR)为 30 dB 时,利用线性注水算法对信道中功率进行分配相比于等功率分配算法信道容量可以提高 0.55 bit/Hz 左右。

图 4 仿真分析了在无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中,当收发天线不对称时,增加信号发送端的发送天线对 MIMO 通信系统信道容量的影响。如图 4(a)所示,在 MIMO 通信系统中,当收发天线

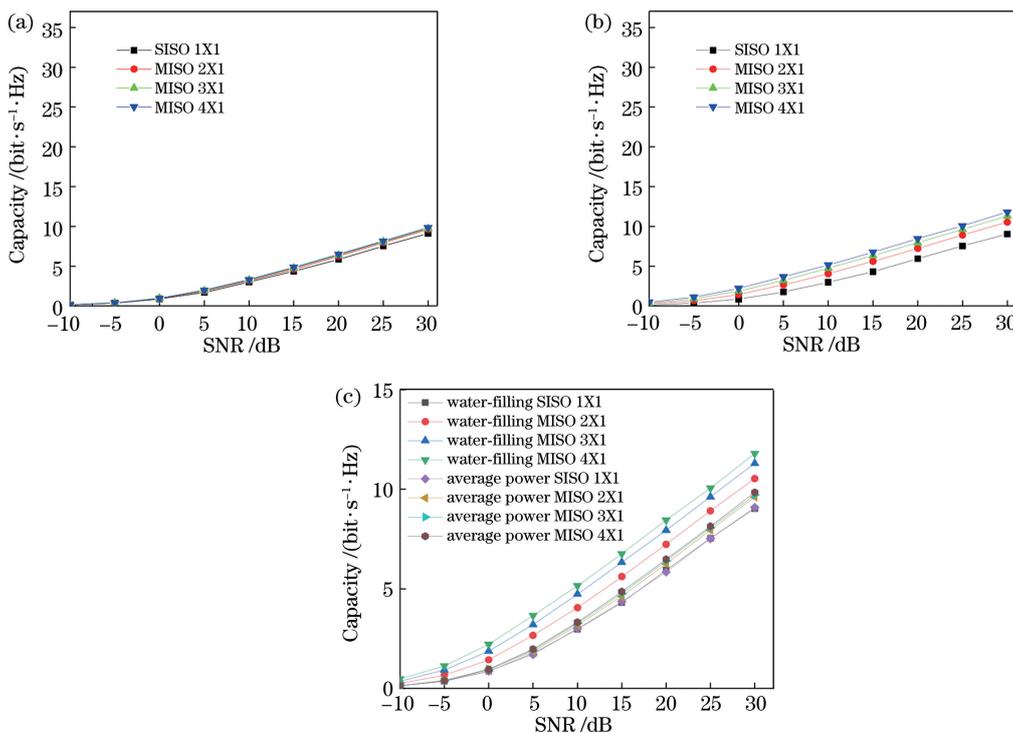


图 3 两种方法得到的无线紫外光非直视 MISO 信道容量。(a)等功率分配算法;(b)线性注水算法;(c)算法对比图

Fig. 3 Wireless ultraviolet NLOS MISO channel capacity calculated by two methods. (a) Average power allocation algorithm; (b) linear water-filling algorithm; (c) algorithm comparison chart

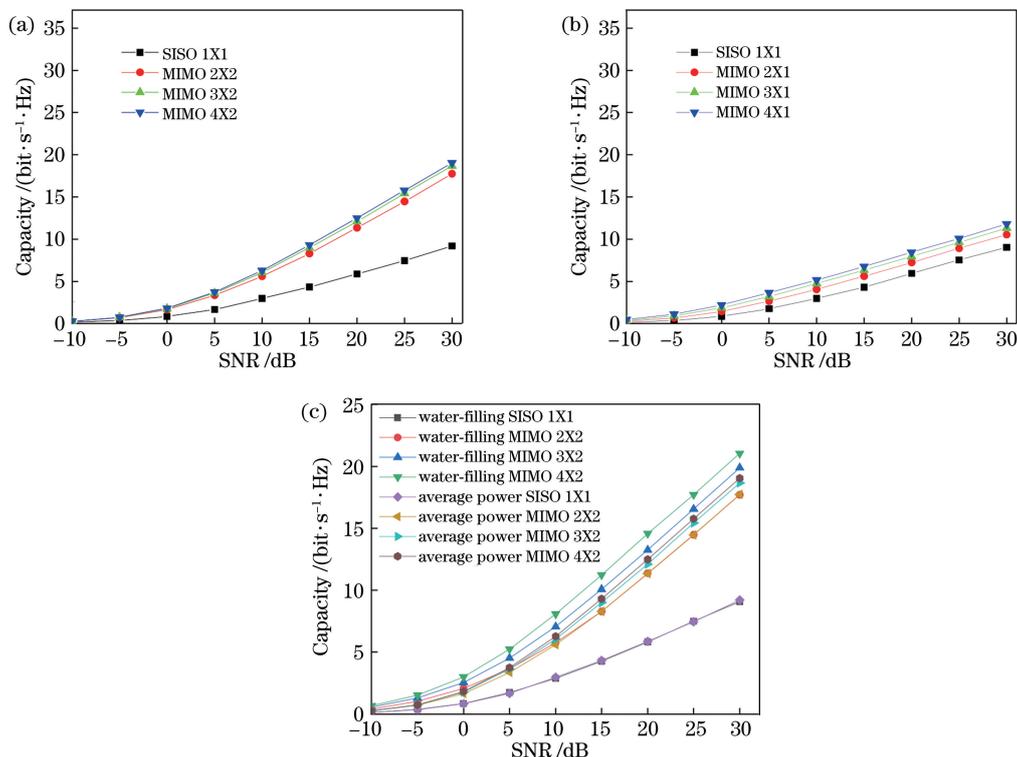


图 4 两种方法得到的非对称天线无线紫外光非直视 MIMO 通信信道容量。(a)等功率分配算法；(b)线性注水算法；(c)算法对比图

Fig. 4 Asymmetric antenna wireless ultraviolet NLOS MIMO channel capacity calculated by two methods. (a) Average power allocation algorithm; (b) linear water-filling algorithm; (c) algorithm comparison chart

不对称,采用等功率分配算法时,信道容量随着信噪比的增大而显著提高,而随着发送天线的增加,信道容量提高不明显。图 4(b)显示当收发天线不对称时,采用线性注水算法对 MIMO 通信信道中功率进行分配时,信道容量随信噪比的增大而显著提高,并且随着发送天线的增加,信道容量得到显著提高。当收发天线不对称时,在 MIMO 系统中信噪比为 30 dB 时,利用线性注水算法对信道中功率分配相比于等功率分配,信道容量可以提高 2.35 bit/Hz 左右。

图 5 仿真分析了在无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中,当收发天线对称时,同时增加收发天线对 MIMO 通信系统信道容量的影响。如图 5(a)所示,在收发天线对称时,在 MIMO 通信系统中采用等功率分配算法时,随着信噪比的增大,信道容量也在不断增加,当信噪比为 30 dB 时,每增加一对收发天线,信道容量提高约 8.25 bit/Hz。如图 5(b)所示,当收发天线对称,当信噪比在 -5 dB 到 25 dB 之间时,采用线性注水算法对 MIMO 通信信道中功率进行分配对信道容量的提升效果明显好于相同条件下采用等功率分配算法,且当信噪比为 30 dB 时,

采用线性注水算法得到的信道容量趋近于等功率算法得到的信道容量。

图 6 仿真分析了在无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中,增大收发天线之间直线距离对 MIMO 通信系统信道容量的影响。从图中可以看出,当收发天线之间的直线距离从 0 m 增加到 50 m 的时候,随着收发天线之间直线距离的增大,无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中的信道容量迅速下降,从 50 m 开始,信道容量下降的速率开始放缓。如图 6(a)所示,当采用等功率分配算法时,收发天线之间的直线距离相等的情况下,信道容量随着收发天线的减少而降低,且随着收发天线的减少,信道容量的变化较小。图 6(b)显示采用线性注水算法时,信道容量随着收发天线之间直线距离的增加而降低,但相比于等功率算法,信道容量降低的幅度较小。

5 结 论

研究了无线紫外光非直视 MIMO 通信中的信道容量,利用线性注水算法构建无线紫外光非直视 MIMO 通信信道功率分配方案,并推导了采用线性注水算法的无线紫外光非直视 MIMO 通信信道容

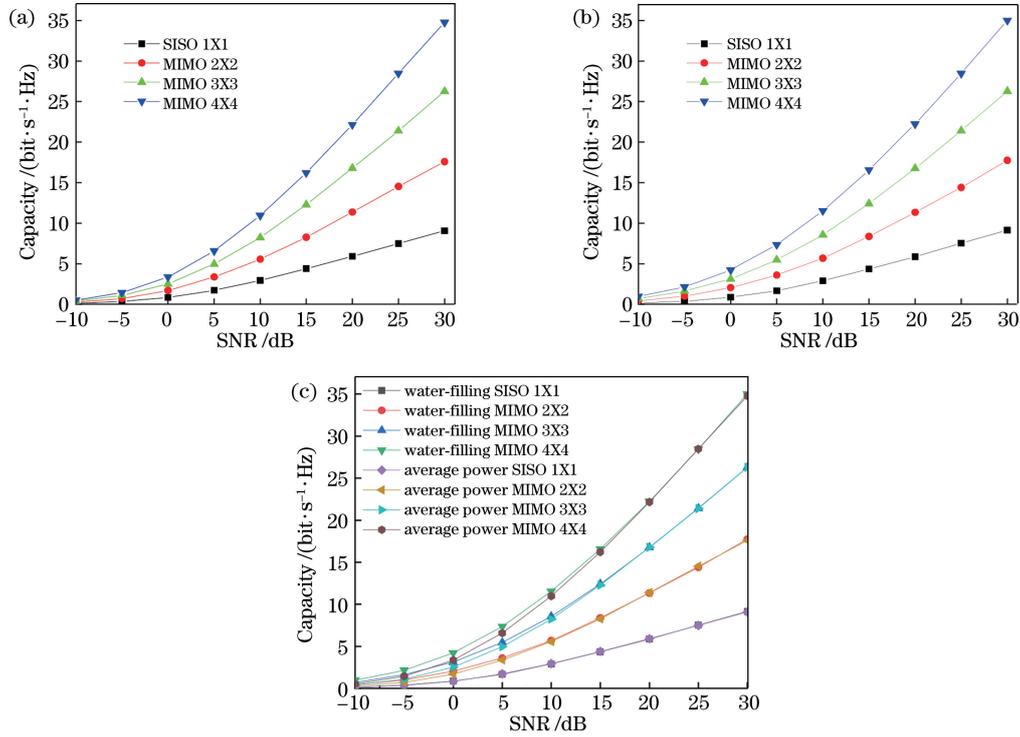


图 5 两种方法得到的对称天线无线紫外光非直视 MIMO 信道容量。(a)等功率分配算法;(b)线性注水算法;(c)算法对比图
 Fig. 5 Symmetric antenna wireless ultraviolet NLOS MIMO channel capacity calculated by two methods. (a) Average power allocation algorithm; (b) linear water-filling algorithm; (c) algorithm comparison chart

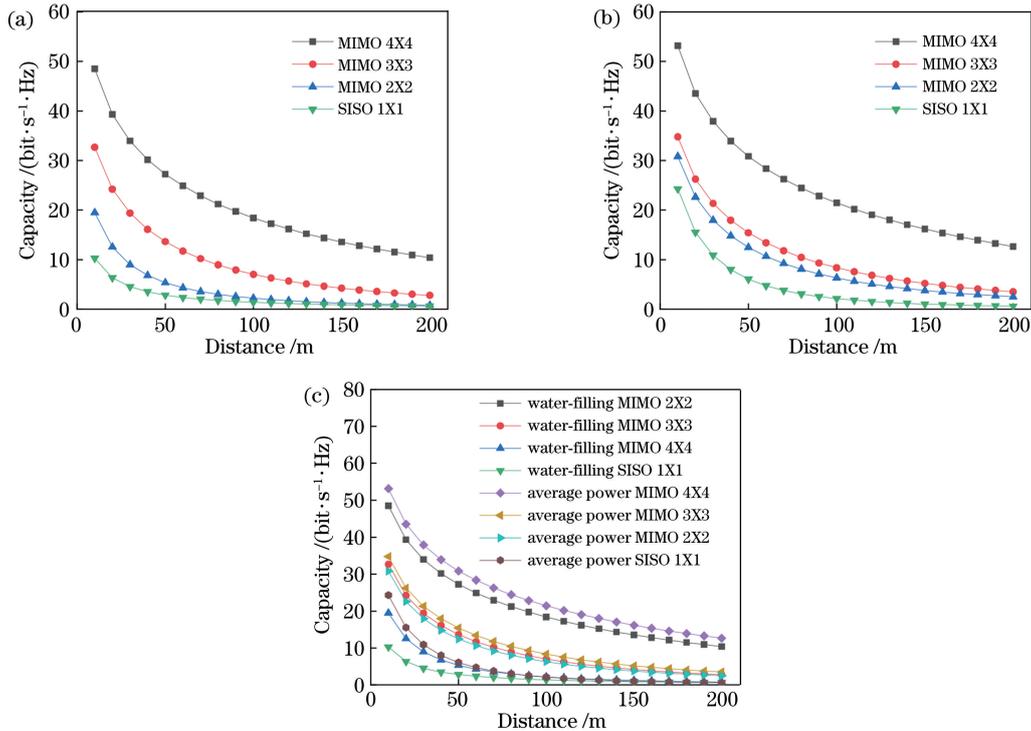


图 6 两种方法得到的收发天线之间直线距离对无线紫外光非直视 MIMO 信道容量的影响。(a)等功率分配算法;
 (b)线性注水算法;(c)算法对比图

Fig. 6 Influence of communication distance between transmitting antenna and receiving antenna on wireless ultraviolet NLOS MIMO channel capacity calculated by two methods. (a) Average power allocation algorithm; (b) linear water-filling algorithm; (c) algorithm comparison chart

量,实现信号发射端的功率分配,提升无线紫外光非直视 MIMO 通信系统的信道容量。仿真分析了等功率分配和线性注水算法,并分析了信噪比相同的情况下,利用线性注水算法可以显著提高信道容量,并且随着发送天线的增加,其对信道容量的提升效果更加明显。在收发天线对称的情况下,当信噪比较小时,线性注水算法对信道容量的提升效果明显,当信噪比较高时,采用线性注水算法的等功率分配方法对信道容量的影响不明显。在无线紫外光非直视 MIMO 通信系统中,信道容量随通信距离的增大衰减严重,利用线性注水算法可以减缓信道容量的衰减,这验证了线性注水算法对提高无线紫外光非直视 MIMO 通信系统信道容量的有效性。所得结果对研究无线紫外光非直视 MIMO 通信性能的进一步提高提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Li J B, Liu X G, Wang H X, et al. Improved ultraviolet communication time division multiplexing network method [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(11): 1105003.
李济波, 刘锡国, 王红星, 等. 改进的紫外光通信时分复用组网方法 [J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1105003.
- [2] Wu M L, Han D H, Zhang X, et al. Experimental research and comparison of LDPC and RS channel coding in ultraviolet communication systems [J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5422-5430.
- [3] Zhang H L, Yin H W, Jia H H, et al. Study of effects of obstacle on non-line-of-sight ultraviolet communication links [J]. Optics Express, 2011, 19(22): 21216-21226.
- [4] He Q F, Xu Z Y, Sadler B M. Performance of short-range non-line-of-sight LED-based ultraviolet communication receivers [J]. Optics Express, 2010, 18(12): 12226-12238.
- [5] Zou Y, Xiao S L, Li G H, et al. Study on ultraviolet wireless communication system based on LED [J]. Optoelectronic Technology, 2012, 32(3): 145-149.
邹宇, 肖沙里, 李冠华, 等. 基于 LED 的紫外无线光通信系统研究 [J]. 光电子技术, 2012, 32(3): 145-149.
- [6] Gao H Y, Su Y M, Zhang S B. Intelligent antenna selection and power allocation method for massive MIMO systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(12): 2669-2675.
高洪元, 苏雨萌, 张世铂. 大规模 MIMO 系统的智能天线选择与功率分配方法研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(12): 2669-2675.
- [7] Han L Q, Jiang H B. Performance analysis of dual-hop mixed RF/MIMO FSO amplify and forward relay communication system [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(13): 130103.
韩立强, 江红兵. 双跳混合 RF/MIMO FSO 放大转发中继通信系统性能分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(13): 130103.
- [8] Huang A P, Tao L W. Adaptive power allocation algorithm for wireless optical multiple input multiple output communication system with spatial modulation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1006001.
黄爱萍, 陶林伟. 空间调制无线光多输入多输出通信系统中自适应功率分配算法 [J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1006001.
- [9] Khakurel S, Leung C, le Ngoc T. A generalized water-filling algorithm with linear complexity and finite convergence time [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(2): 225-228.
- [10] Song P, Liu C, Zhu L, et al. Analysis of single-scatter path loss in wireless ultraviolet communication in mobile scene [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(4): 0406001.
宋鹏, 刘春, 朱磊, 等. 移动场景下无线紫外光通信单次散射路径损耗分析 [J]. 光学学报, 2020, 40(4): 0406001.
- [11] Zhao T F, Duan Y Z, Li X S, et al. Effect of soot aggregates on light scattering in ultraviolet communication channels [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1529001.
赵太飞, 段钰楨, 李星善, 等. 煤烟凝聚粒子对紫外光散射信道的影响研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1529001.
- [12] Liao L C, Drost R J, Li Z N, et al. Long-distance non-line-of-sight ultraviolet communication channel analysis: experimentation and modelling [J]. IET Optoelectronics, 2015, 9(5): 223-231.
- [13] Zhao T F, Liu P, Ma Q W. Wireless ultraviolet guided method of unmanned aerial vehicle matching terrain flight [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(2): 0206001.
赵太飞, 刘萍, 马倩文. 无人机匹配地形飞行的无线紫外光引导方法 [J]. 光学学报, 2020, 40(2): 0206001.
- [14] Zhao T F, Liu L F, Zhao S X, et al. The method of wireless UV-MIMO cooperative communication [J]. Laser Journal, 2018, 39(6): 144-147.
赵太飞, 刘龙飞, 赵诗雪, 等. 无线紫外光 MIMO 协作通信方法 [J]. 激光杂志, 2018, 39(6): 144-147.
- [15] Qin H, Zuo Y, Li F Y, et al. Analytical link

- bandwidth model based square array reception for non-line-of-sight ultraviolet communication [J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 22693-22703.
- [16] Yuksekkaya B, Toker C. Power and interference regulated water-filling for multi-tier multi-carrier interference aware uplink [J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2018, 7(4): 494-497.
- [17] Al-Hussaibi W A. A generalised antenna correlation model for accurate performance evaluation of 2D massive MIMO communication systems [J]. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2020, 17(4): 269-277.
- [18] Krongold B S, Ramchandran K, Jones D L. Computationally efficient optimal power allocation algorithms for multicarrier communication systems [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2000, 48(1): 23-27.
- [19] Jemmali A, Torabi M, Conan J. Performance analysis of MIMO schemes in 3GPP long term evolution system [J]. *Wireless Personal Communications*, 2015, 82(2): 1107-1125.
- [20] Huang A P, Tao L W, Niu Y L. Underwater wireless optical MIMO system with spatial modulation and adaptive power allocation[J]. *Optics Communications*, 2018, 412: 21-27.