

# 基于遍历微小单元法非直视非共面紫外光通信信道容量分析

宋鹏<sup>1</sup>, 苏彩霞<sup>1</sup>, 赵太飞<sup>2</sup>, 陈锦妮<sup>1</sup>, 朱磊<sup>1</sup>, 张晓丹<sup>1</sup>

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048; 2. 西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 信道容量反映了系统无差错传输信息的能力。基于遍历微小单元法求出系统的路径损耗和脉冲响应, 然后对脉冲响应采样序列进行离散傅里叶变换, 得到系统的频率响应, 计算出系统的 3 dB 带宽。考虑信号光引起的散粒噪声, 根据量子极限法求出系统的信噪比, 进而用香农公式仿真分析非直视非共面紫外光通信系统信道容量和收发端几何参数之间的关系。结果表明, 信道容量随着接收端偏轴角和通信距离的增大而减小, 当收发仰角小于 40° 时, 随着收发仰角增大, 信道容量快速减小, 并且发射端仰角对信道容量的影响更显著; 当发散角增大时, 系统信道容量几乎不变; 而当视场角增大时, 系统信道容量增大。

**关键词:** 光通信; 紫外光散射; 非直视; 遍历微小单元方法; 信道容量

**中图分类号:** TN929.12

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.1000-436x.2019103

## Channel capacity analysis of non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry based on traversing tiny unit method

SONG Peng<sup>1</sup>, SU Caixia<sup>1</sup>, ZHAO Taifei<sup>2</sup>, CHEN Jinni<sup>1</sup>, ZHU Lei<sup>1</sup>, ZHANG Xiaodan<sup>1</sup>

1. School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China

2. Department of Electronics Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

**Abstract:** Channel capacity reflects the ability of the system to transmit information without errors. The path loss and impulse response of the system were calculated based on traversing tiny unit method, and then the frequency response of the system was obtained by the discrete Fourier transform of the impulse response sampling sequence, and the 3 dB bandwidth of the system was calculated. Considering the shot noise caused by signal light, the signal-to-noise ratio of the system was obtained according to the quantum limit method, and then the relationship between the channel capacity and the geometric parameters of transmitter and receiver in non-line-of-sight noncoplanar ultraviolet communication system were simulated and analyzed by Shannon formula. The results show that the channel capacity decreases with the increase of the off axis angle and the communication distance. When the elevation angles of transmitter and receiver are less than 40°, the channel capacity decreases rapidly with the increase of the elevation angles of transmitter and receiver, and the transmitter elevation angle has a great influence on the channel capacity. The system channel capacity is almost constant with the increase of divergence angle, and the larger the receiver field of view angle, the greater the system channel capacity.

**Key words:** optical communication, ultraviolet scattering, non-line-of-sight, traversing tiny unit method, channel capacity

收稿日期: 2018-08-08; 修回日期: 2019-04-02

**基金项目:** 国家自然科学基金委员会-中国民航局民航联合研究基金资助项目 (No.U1433110); 陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划基金资助项目 (No.2018JQ4016); 西安市科技局科技指导基金资助项目 (No.201805030YD8CG14-9); 西安工程大学博士科研启动基金资助项目 (No.BS201810)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China-Joint Research Funding of Civil Aviation Administration (No.U1433110), Shaanxi Natural Science Basic Research Project of Shaanxi Science and Technology Office (No.2018JQ4016), Science and Technology Project of Xi'an Science and Technology Bureau (No.201805030YD8CG14-9), Doctor's Research Start-up Fund of Xi'an Polytechnic University (No.BS201810)

## 1 引言

非直视紫外光 (UV, ultraviolet) 通信是通过 200~280 nm “日盲”波段紫外光在大气中的散射来进行信息传输的一种新型无线光通信方式<sup>[1-3]</sup>。与传统的通信方式相比,紫外光通信具有保密性好、抗干扰能力强、全方位性、非直视通信<sup>[4]</sup>等优点,可应用于近距离保密通信,尤其适用于“电磁静默”条件下的装甲集群或舰船间的无线保密通信,在国防信息化建设中具有广阔的应用前景。

建立紫外光通信系统的信道传输模型是研究信道容量的基础。1979年,美国麻省理工学院 Reilly 等<sup>[5]</sup>基于椭球坐标系建立了经典 UV 单次散射信道传输模型。随后,文献[6]在文献[5]的基础上对公共散射体进行分区域积分,建立了紫外光共面单次散射通信模型。文献[7-8]提出了紫外光共面单次散射经验路径损耗模型,并给出了经验路径损耗计算的部分参数。文献[9]根据紫外光单次散射传输模型,分析了大气中紫外光散射效应对脉冲响应信号展宽的影响和脉冲响应序列串扰对通信速率的限制。文献[10]搭建了紫外光非直视通信实验平台,给出了共面条件下脉冲宽度的不同计算方法,并研究了脉冲响应信号与收发端几何参数之间的关系,得出了脉冲展宽与发散角关系不大的结论。文献[11]利用伽玛函数模拟了信道脉冲响应,给出了带宽计算式,不足之处是不容易确定带宽计算式中的参数。文献[12]建立了非直视紫外光链路带宽的解析模型。文献[13]给出了紫外光直视通信系统的信噪比计算式。文献[14]基于非直视紫外光单次散射传输模型,提出了接收端信噪比估算方法,给出了系统信道容量,并对共面情况下紫外光通信系统的信道容量进行了研究,而在实际的通信过程中,紫外光的发射端与接收端通常是非共面的,因此研究非直视非共面紫外光通信系统的信道容量是十分必要的。

文献[15]基于球面坐标系建立了紫外光非共面单次散射路径损耗模型,但是非共面公共散射体的边界较为复杂,需要对三重积分的上下限进行更细致的划分。文献[16-17]给出了紫外光非共面情况下路径损耗的近似闭合解,但是只适用于发散角和视场角很小的紫外光通信系统。文献[18]给出了收发端任意指向的遍历微小单元法路径损耗模型,该模型精度高、运算简便,能较好地适用于紫外光非共面单次散射通信系统。

本文根据文献[18]中的遍历微小单元法研究非直视非共面紫外光单次散射通信系统的信道容量。首先,基于球坐标系建立非直视非共面紫外光单次散射传输模型;其次,用遍历微小单元法计算接收端接收的能量,由接收能量推导出紫外光信道脉冲响应采样序列数学表达式;再次,通过对脉冲响应采样序列进行离散傅里叶变换得到系统的频率响应,求出系统的 3 dB 带宽,根据量子极限法求出系统的信噪比,进而用香农公式求出系统的信道容量;最后,仿真分析了系统带宽和信道容量与收发端仰角、视场角、通信距离、接收端偏轴角之间的关系,并给出结论。

## 2 遍历微小单元法紫外光非共面单次散射传输模型

传统的基于椭球坐标系的 UV 非直视非共面单次散射信道传输模型,由于公共散射体是不规则的多面体,因此对公共散射体进行三重积分上下限的取值不易确定,UV 通信系统路径损耗的计算较复杂<sup>[15,19]</sup>。遍历微小单元法通过把不规则的公共散射体分割为大量的边界规则的微小的六面体,把复杂的积分运算转化为简单运算之和,能快速计算收发端任意指向的非直视非共面紫外光通信系统的路径损耗,便于嵌入式紫外光通信系统应用。

非直视非共面紫外光单次散射传播模型<sup>[20]</sup>如图 1 所示,其中,  $C_t$  和  $C_r$  分别为发射光束锥体和接收视场锥体, T 和 R 分别为发射端和接收端, TE 和 RF 分别为发射锥体的中轴线和接收锥体的中轴线, TE' 和 RF' 分别为 TE 在  $x-y$  平面的投影和 RF 在  $x-y$  平面的投影,  $\phi_t$  和  $\phi_r$  分别为发射端发散角半角和接收端视场角半角,  $\theta_t$  和  $\theta_r$  分别为发射端仰角和接收端仰角,  $\alpha_t$  和  $\alpha_r$  分别为发射端偏轴角和接收端偏轴角,  $d$  为发射端与接收端之间的通信距离。

假设发射锥体与接收锥体的公共部分为  $V$ , 即图 1 粗线所圈定的范围,光子经过  $V$  中任意散射点 S 的散射到达 R。在球面坐标系中,用  $(\theta, \alpha, r)$  表示 S 的坐标,  $\theta$ 、 $\alpha$  和  $r$  分别为顶角、方位角和径向距离。 $\zeta$  为 S 与 R 的连线与接收视场锥体中心轴的夹角,散射角  $\beta_s$  为 S 处光子的入射方向与经 S 点散射后光子的出射方向的夹角,  $r_1$  为 S 到 R 的距离。

遍历微小单元法的基本思想是基于球坐标系,选定包含公共散射体的尽可能小的边界规则的封闭区域,然后把封闭区域分成多个边界规则的微小

单元。遍历封闭区域中全部的微小单元，对中心点包含在公共散射体内的每个微小单元进行三重积分，即求出 T 发出的紫外光经过每个微小单元散射到达 R 的能量，并对该能量累加求和，最终得到紫外光经单次散射到达接收端的总能量。

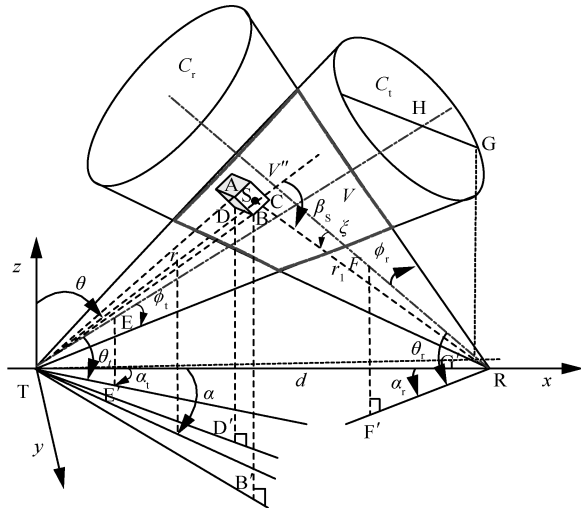


图 1 非直视非共面紫外光单次散射传播模型

根据遍历微小单元法基本思想和图 1，包含图 1 中公共散射体 V 的非直视共面紫外光单次散射传播模型如图 2 所示。图 2 中，边框 ULOW 粗虚线圈定的范围为闭合区域 V'；边框 UMOW 粗实线圈定的范围为公共散射体 V；闭合区域 V' 被分割成大量的微小单元 V''，‘×’是微小单元 V'' 的中心；TP 是发射锥体的中轴线；RQ 是接收视场锥体的中轴线；P、Q 点在 x-y 平面的投影为 P'、Q'。

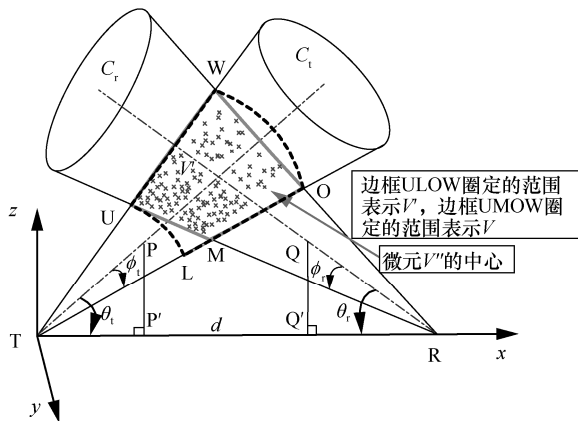


图 2 非直视共面紫外光单次散射传播模型

闭合区域 V' 被分割成 M<sup>3</sup> 个微小单元 V''，根据文献[18]中遍历微小单元法的误差与分割次数的关系，本文选取分割次数 M=60。当被分割的微小单

元的中心点在公共散射体 V 内时，经微小单元 V'' 散射的能量才能被接收端接收，此时接收端接收的经一个微小单元散射的能量可以表示为<sup>[18]</sup>（以中心为 S 点的微小单元 V'' 为例）

$$E_{V''} = \int_{r_B}^{r_C} \int_{\alpha_D}^{\alpha_B} \int_{\theta_A}^{\theta_B} \sin \theta e^{-k_e(r+r_1)} \delta \theta \delta \alpha \delta r \cdot \frac{E_t A_r k_s P(\cos \beta_s) \cos \zeta}{4\pi \Omega_t r_1^2} = \frac{E_t A_r k_s P(\cos \beta_s) \cos \zeta}{4\pi \Omega_t r_1^2 k_e e^{k_e(r_1+r_B+r_C)}} (\cos \theta_B - \cos \theta_A) \cdot (\alpha_B - \alpha_D) (e^{k_e r_B} - e^{k_e r_C}) \quad (1)$$

其中， $\zeta = \angle SRF$ ； $r_1 = |\overline{SR}|$ ； $E_t$  为发射端发射的能量； $A_r$  为接收端的有效面积； $k_s$  为大气散射系数，等于瑞利散射系数与米氏散射系数之和，即  $k_s = k_s^R + k_s^M$ ； $k_e$  为大气消光系数，等于大气吸收系数和散射系数之和，即  $k_e = k_s + k_a$ ； $P(\cos \beta_s)$  是散射相函数； $\Omega_t = 2\pi(1 - \cos \phi_t)$  为发射端的立体角； $\theta_A$  和  $\theta_B$  分别为图 1 中点 A 和点 B 的顶角； $\alpha_B$  和  $\alpha_D$  分别为点 B 和点 D 的方位角； $r_B$  和  $r_C$  分别为点 B 和点 C 的径向距离。

因为微小单元 V'' 非常小，所以 V'' 内散射点的散射角可以用 V'' 中心散射点 S 的散射角近似表示，可计算为

$$\beta_s = \pi - \angle TSR = \cos^{-1} \left( \frac{|\overline{TS} \overline{SR}|}{|\overline{TS}| |\overline{SR}|} \right) \quad (2)$$

其中， $|\overline{TS}| = [x_s, y_s, z_s]$ ,  $|\overline{SR}| = [d - x_s, -y_s, -z_s]$ 。

对所有经过微小单元散射被接收端接收到的能量进行累加求和，可得到接收端接收的总能量为

$$E_r = \sum_{S_{(i,j,k)} \in V} E_{V''_{(i,j,k)}} \quad (3)$$

其中， $E_{V''_{(i,j,k)}}$  可由式(1)求得。

根据遍历微小单元法，紫外光非直视通信系统的路径损耗为

$$L = 10 \lg \left( \frac{E_t}{E_r} \right) = 10 \lg \left( \frac{E_t}{\sum_{S_{(i,j,k)} \in V} E_{V''_{(i,j,k)}}} \right) \quad (4)$$

### 3 非直视紫外光通信系统的系统带宽与信道容量分析

#### 3.1 用遍历微小单元法计算脉冲响应

设 T 发出一个能量为 1 J 的窄脉冲，如果一个

光子从 T 出发经  $V''$  散射到达 R 的时间  $t_s$  在  $\left[ t_n - \frac{\Delta t}{2}, t_n + \frac{\Delta t}{2} \right]$  ( $\Delta t$  为定义的时间区间)内, 则  $t_s$  近似为  $t_n$ 。  $t_n$  上的脉冲响应为经  $V'$  中每个  $V''$  的散射到达 R 的时间为  $t_n$  的光子能量之和, 由文献[18]可知, 其计算式为

$$h(t_n) = \sum_{(S_{(i,j,k)} \in V) \cap (t_{\min} < t_s < t_{\max})} \frac{E_{V''_{(i,j,k)}}}{\Delta t} \quad (5)$$

其中,  $t_s = \frac{r+r_1}{c}$ ,  $c$  为光速;  $t_{n\min}$  和  $t_{n\max}$  分别表示  $t_n - \frac{\Delta t}{2}$  和  $t_n + \frac{\Delta t}{2}$ ;  $s_{(i,j,k)} \in V$  表示遍历所有中心在公共散射体  $V$  中的微小单元  $V''$ ,  $E_{V''_{(i,j,k)}}$  可由式(1)求得。

### 3.2 系统带宽与信道容量

#### 3.2.1 系统带宽

由式(5)可以求出系统的脉冲响应采样序列, 采样间隔为  $\Delta t$ 。对脉冲响应采样序列进行离散傅里叶变换, 可表示为<sup>[21]</sup>

$$X_k = \text{DFT}[h(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (6)$$

其中,  $h(n)$  是系统的脉冲响应采样序列,  $N$  是脉冲响应采样点数,  $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ , 由式(6)求得频谱的频率分辨率为

$$\Delta f = \frac{1}{N\Delta t} \quad (7)$$

系统 3 dB 带宽  $B$  可以根据式(6)求得系统的脉冲响应采样序列频谱图得到。

#### 3.2.2 信道容量

紫外光通信系统中接收端的噪声主要包括信号光、背景光和暗电流引起的散粒噪声以及负载和放大器的热噪声。紫外光通信选择波长为 255 nm 的“日盲”波段紫外光, 因为大气分子特别是臭氧的强吸收作用, 使“日盲”波段紫外光在地球表面的强度非常弱, 加之接收端的滤光片会进一步滤除无用光, 所以本文中忽略背景光噪声的影响。本文实验和仿真中选用滨松光子的 R7154 光电倍增管, 环境温度 25°C, 光电倍增管的阳极暗电流典型值为 1 nA, 比较小, 因此忽略光电倍增管暗电流引起的散粒噪声。由于 R7154 光电倍增管增益为  $10^7$ , 增益非常高, 因此本文忽略器件热噪声的影响。本文只考虑信号光引起的散粒噪声, 使用光电倍增管的直接检测系统趋近于检测极限, 接收系统的信噪比可以用

量子极限信噪比表示为<sup>[22]</sup>

$$\text{SNR} = \frac{\eta_r \eta_d G P_r \lambda}{2hcB} \quad (8)$$

其中,  $\lambda$  为波长;  $\eta_d$  为光电倍增管的探测效率;  $\eta_r$  为滤光片透射率;  $h$  为普朗克常数;  $G=10^7$  为光电倍增管增益;  $c$  为光速;  $B$  为系统带宽;  $P_r = \frac{P_t}{10^{10}}$  为平均接收功率, 其中  $P_t$  为紫外光发射功率,  $L$  为路径损耗 (单位为 dB)。

综合分析, 本文只考虑信号光引起的散粒噪声, 系统的信道容量可以用香农公式<sup>[23]</sup>计算, 如式(9)所示。

$$C = B \log(1 + \text{SNR}) \quad (9)$$

其中, SNR 为信噪比, 可由式(8)求得。

## 4 仿真结果分析

仿真条件: 发送端发送能量为 1 J 的单脉冲信号, 每个脉冲信号的脉冲宽度设为 3 ns, 起始时刻为 0, 如不做特殊说明, 系统仿真参数和收发端几何参数分别如表 1 和表 2 所示。

表 1 部分系统仿真参数

参数	值
波长 $\lambda$ /nm	266
瑞利散射系数 $k_s^R$ / $\text{m}^{-1}$	$0.24 \times 10^{-3}$
瑞利散射相函数参数 $\gamma$	0.017
米氏散射系数 $k_s^M$ / $\text{m}^{-1}$	$0.25 \times 10^{-3}$
米氏不对称相函数参数 $g$	0.72
吸收系数 $k_a$ / $\text{m}^{-1}$	$0.74 \times 10^{-3}$
接收孔径面积 $A_r$ / $\text{cm}^2$	1.92
米氏相函数参数 $f$	0.5
遍历微小单元法分割次数 $M$	60
滤光片透射率 $\eta_r$	0.3
光电倍增管的探测效率 $\eta_d$	0.2
普朗克常数 $h$ /(J·s)	$6.62 \times 10^{-34}$
光速 $c$ /( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$3 \times 10^8$

表 2 收发端几何参数

参数	值
发射端仰角 $\theta_t$	30°
发散角半角 $\phi_t$	5°
收发端偏轴角 $\alpha_t$ 和 $\alpha_r$	0°
收端仰角 $\theta_r$	30°
视场角半角 $\phi_r$	15°
通信距离 $d$ / m	100

### 4.1 系统带宽

发送端脉冲宽度设为 3 ns，脉冲响应采样点数  $N=100$ ，采样间隔  $\Delta t=0.03$  ns， $\theta_t=10^\circ$ ，其他仿真参数如表 1 和表 2 所示。依据式(5)，接收端脉冲响应采样序列仿真曲线如图 3 所示。依据式(6)，可求得脉冲响应采样序列的幅度频谱如图 4 所示。依据式(7)，可求得谱分辨率  $\Delta f=4\times 10^6$  Hz。系统 3 dB 带宽可以用脉冲响应 5%最大值宽度的倒数表示<sup>[10]</sup>。

由图 3 可知，系统 3 dB 带宽约为  $\frac{1}{27.5}=36.4\times 10^6$  Hz，

由图 4 可知，系统 3 dB 带宽约为  $40\times 10^6$  Hz，两者比较接近，均包括约 10 个  $\Delta f$ 。为了提高精度，根据系统的脉冲响应采样序列的幅度频谱图求出本文系统 3 dB 带宽。

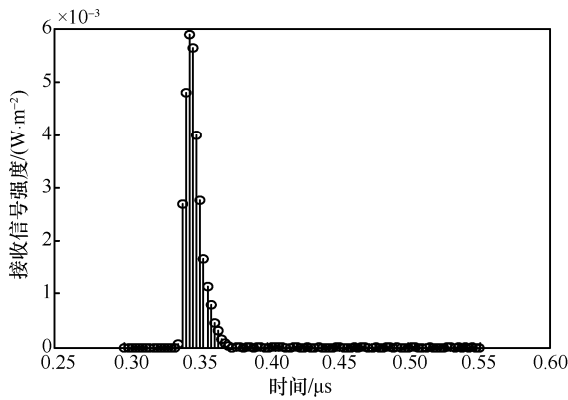


图 3 脉冲宽度为 3 ns 时接收端脉冲响应采样序列

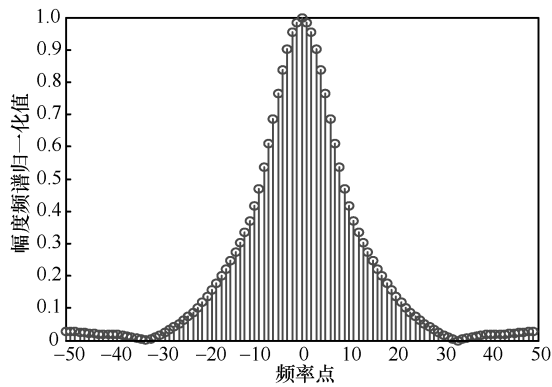


图 4 脉冲宽度为 3 ns 时脉冲响应采样序列的幅度频谱

在非直视非共面紫外光通信系统中，随着通信距离的增大，系统的脉冲响应宽度变化较大，因而系统带宽变化较大。研究系统带宽与通信距离的关系是研究系统信道容量与通信距离关系的前提。

图 5 为系统带宽与通信距离的关系曲线，仿真参数如表 1 和表 2 所示。从图 5 可知，系统带宽随着通信距离的增大逐渐减小。当通信距离从 10 m

增大到 50 m 时，系统带宽快速减小，当通信距离从 50 m 增大到 200 m 时，系统带宽缓慢减小。

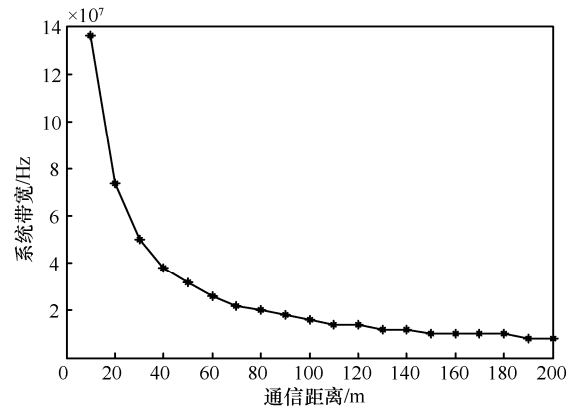


图 5 系统带宽与通信距离的关系曲线

### 4.2 系统脉冲响应的实验验证

#### 4.2.1 脉冲宽度为 50 μs 时的脉冲响应仿真与分析

遍历微小单元法脉冲响应的仿真波形如图 6 所示。仿真参数设置为：发射端发射单个脉冲信号，每个脉冲信号能量为 1 J，起始时刻为 0，为了便于与实验结果进行对比，脉冲宽度设为 50 μs，发射端与接收端的仰角均为 10°，发散角为 6°，接收端视场角为 80°，通信距离为 20 m。从图 6 可知，脉冲响应的上升沿宽度为 4 μs，下降沿宽度为 8 μs，半最大值宽度为 48 μs。

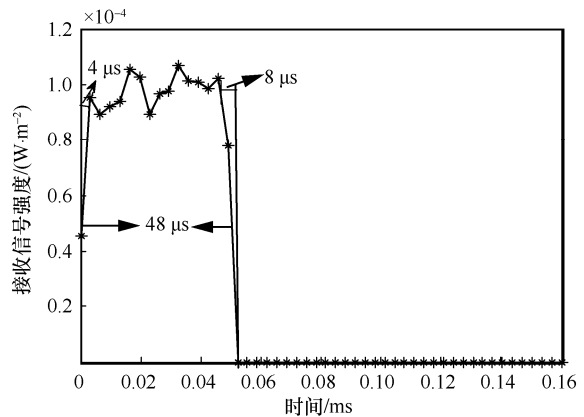


图 6 脉冲宽度为 50 μs 时接收端脉冲响应仿真波形

#### 4.2.2 实验验证

本文搭建的紫外光通信实验平台<sup>[24]</sup>如图 7 所示。接收机采用高灵敏度光电倍增管（滨松光子 R7154）；发射机采用中心波长 255 nm “日盲”紫外 LED（美国 SET 公司生产的 UVTOP 系列）。实验时间为 2017 年 1 月 23 日 20:00—23:00，实验地点为西安工程大学金花校区田径场，实验天气晴

朗。具体的实验条件与参数如表 3 所示。



图 7 非直视紫外光通信装置

表 3 实验条件与参数

参数	值
实验温度/ $^{\circ}\text{C}$	1
风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	1.5
气压/kPa	102.8
能见度/km	10
相对湿度	51%
发射信号	占空比为 50% 的方波信号
发射频率/kHz	10
发射光功率/mW	0.6

利用图 7 所示的紫外光通信实验平台得到的发射频率为 10 kHz 方波（脉冲宽度为 50  $\mu\text{s}$ ）时接收端示波器输出信号波形如图 8 所示。图 8 的仿真参数与图 6 的仿真参数一致，通信距离为 20 m，发射端与接收端仰角均为 10 $^{\circ}$ ，发散角为 6 $^{\circ}$ ，接收端视场角为 80 $^{\circ}$ ，其他实验条件与参数如表 3 所示。从图 8 可知，脉冲响应信号的上升沿宽度为 5  $\mu\text{s}$ ，下降沿宽度为 10  $\mu\text{s}$ ，半最大值宽度为 50  $\mu\text{s}$ 。

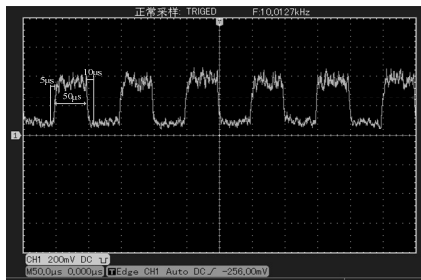


图 8 发射频率为 10 kHz（脉冲宽度为 50  $\mu\text{s}$ ）方波时接收端示波器输出信号波形

相比实验结果，仿真结果的上升沿小 1  $\mu\text{s}$ ，下降沿小 2  $\mu\text{s}$ ，半峰全宽小 2  $\mu\text{s}$ ，即仿真结果与实验结果能较好地拟合，这验证了用遍历微小单元法仿真系统脉冲响应的有效性。仿真与实验略有差别是因为实际实验环境比较复杂，光电倍增管的响应波长有一定的范围。

### 4.3 信道容量

UV 系统通信距离、收发端仰角、发散角、视场角及收发端偏轴角会显著影响系统的路径损耗和脉冲响应，进而影响系统的信道容量。本节利用遍历微小单元法仿真分析非共面情况下，紫外光通信系统收发端几何参数对系统带宽以及接收端信噪比的影响，进而利用香农公式给出系统信道容量与收发端几何参数和通信距离的关系。

#### 4.3.1 收发端仰角对系统信道容量的影响

收发端仰角对系统信道容量的影响如图 9 所示。图 9(a)的仿真条件为：发射功率为 50 mW， $\theta_t$  以 20 $^{\circ}$  的步长从 10 $^{\circ}$  增加到 70 $^{\circ}$ ， $\theta_r = 45^{\circ}$ ，对于特定的  $\theta_t$ ， $d$  以 20 m 的步长从 20 m 增加到 200 m，其他仿真参数如表 1 和表 2 所示。由图 9(a)可知，信道容量随着  $d$  的增大而逐渐减小， $d=60$  m 是信道容量变化的拐点，当  $d < 60$  m 时，信道容量快速减小，当  $d > 60$  m 时，信道容量缓慢减小。当  $\theta_t$  较小时，信道容量随着  $\theta_t$  的增大而快速减小，当  $\theta_t$  较大时，信道容量随着  $\theta_t$  的增大而缓慢减小，例如， $\theta_t$  为 50 $^{\circ}$  和 70 $^{\circ}$  时的信道容量几乎相同。当  $\theta_t = 10^{\circ}$ ， $\theta_r = 45^{\circ}$  时， $d=20$  m 处的信道容量是  $d=200$  m 处信道容量的 10 倍。

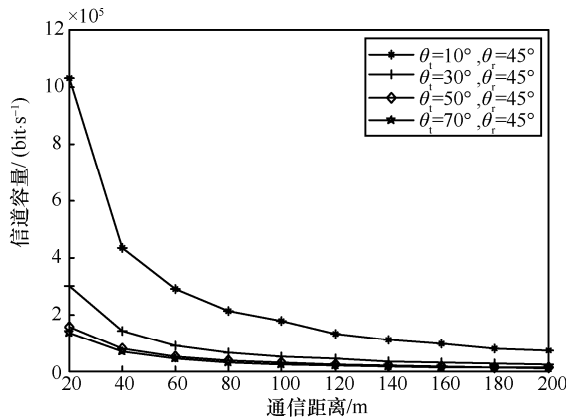
图 9(b)的仿真条件为： $\theta_t = 45^{\circ}$ ， $\theta_r$  以 20 $^{\circ}$  的步长从 10 $^{\circ}$  增加到 70 $^{\circ}$ ，对于特定的  $\theta_r$ ， $d$  以 20 m 的步长从 20 m 增加到 200 m，其他仿真参数如表 1 和表 2 所示。由图 9(b)可知，系统信道容量随着  $\theta_r$  的增大而逐渐减小。当  $\theta_r > 50^{\circ}$  时， $\theta_r$  对系统信道容量的影响很小，例如  $\theta_r$  为 50 $^{\circ}$  和 70 $^{\circ}$  时的系统信道容量基本一致。对比图 9(b)与图 9(a)可得，当  $\theta_t$  和  $\theta_r$  均较小时，相比  $\theta_t$ ， $\theta_r$  的变化对信道容量的影响更显著。

图 9(c)为收发端仰角同时变化时信道容量的仿真结果。仿真条件为： $\theta_t$  以 20 $^{\circ}$  的步长从 10 $^{\circ}$  增加到 90 $^{\circ}$ ， $\theta_r$  以 20 $^{\circ}$  的步长从 10 $^{\circ}$  增加到 70 $^{\circ}$ ，其他仿真参数如表 1 和表 2 所示。由图 9(c)可知，当  $\theta_t$  和  $\theta_r$  均大于 40 $^{\circ}$  时，信道容量最小；当  $\theta_t$  和  $\theta_r$  中至少有一个大于 40 $^{\circ}$  时， $\theta_t$  和  $\theta_r$  的变化对系统信道容量影响很小，系统信道容量几乎为恒值，约为 10<sup>5</sup> bit/s；当  $\theta_t$  和  $\theta_r$  均小于 40 $^{\circ}$  时，系统信道容量较大。

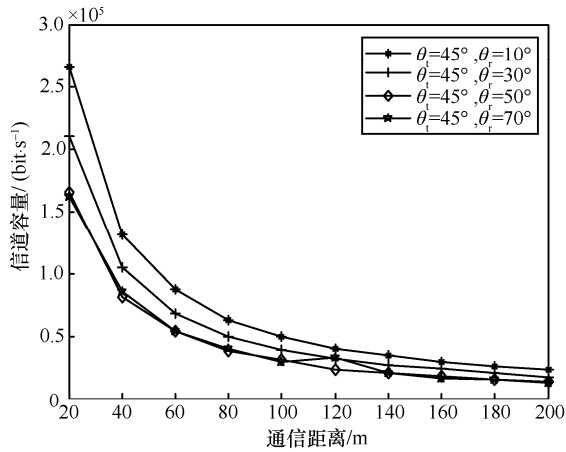
#### 4.3.2 发散角和视场角对系统信道容量的影响

发散角和视场角对系统信道容量的影响如图 10 所示。图 10(a)的仿真条件为： $\theta_t$  和  $\theta_r$  均为 45 $^{\circ}$ ， $\phi$  以 5 $^{\circ}$  的步长 5 $^{\circ}$  增加到 20 $^{\circ}$ ， $d$  以 20 m 的步长从 20 m 增加到 200 m，其他仿真参数如表 1 和表 2 所示。

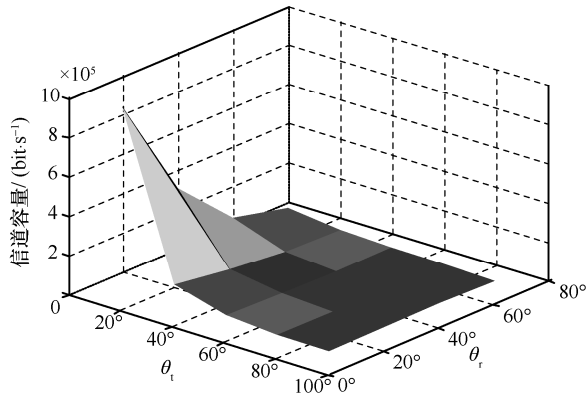
由图 10(a)可知，信道容量随着  $\phi_t$  的增加变化较小；当  $\phi_t < \phi_r$  时， $\phi_t$  对信道容量的影响更小；当  $\phi_t > \phi_r$  时，信道容量随着  $\phi_t$  的增加而略微减小，原因是发射光锥大于接收光锥，T 发射的光子有少量未进入接收光锥，因此 R 接收到的光子数变少，引起系统的路径损耗增大、信噪比减小，进而导致系统信道容量减小。



(a) 发射仰角与系统信道容量



(b) 接收仰角与系统信道容量

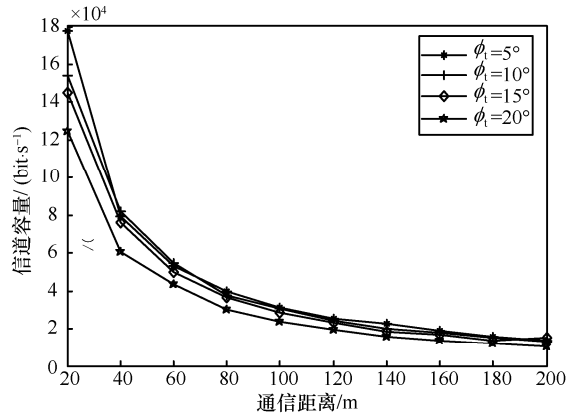


(c) 收发端仰角与系统信道容量

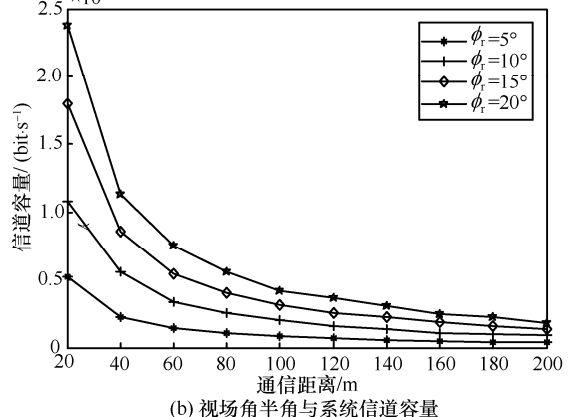
图 9 收发端仰角对系统信道容量的影响

图 10(b)为视场角半角与系统信道容量的关系。

仿真条件为： $\theta_t$  和  $\theta_r$  均为  $45^\circ$ ， $\phi_t$  以  $5^\circ$  的步长从  $5^\circ$  增加到  $20^\circ$ ， $d$  以  $20\text{ m}$  的步长从  $20\text{ m}$  增加到  $200\text{ m}$ ，其他仿真参数如表 1 和表 2 所示。由图 10(b)可知，信道容量随着  $\phi_t$  的增大而逐渐增大；由仿真条件可知， $\phi_t$  始终小于  $\phi_r$ ，则发射光锥始终小于接收光锥；随着  $\phi_t$  的增大，公共散射体  $V$  增大，则接收端接收到光子的概率增大、脉冲展宽增大、路径损耗和系统带宽减小、信噪比增大。由香农公式可知，相比系统带宽，信噪比对信道容量的影响更显著，因此系统信道容量随着  $\phi_t$  的增大而增大。



(a) 发散角半角与系统信道容量



(b) 视场角半角与系统信道容量

图 10 发散角和视场角对系统信道容量的影响

### 4.3.3 接收端偏轴角对系统信道容量的影响

接收端偏轴角对系统信道容量的影响如图 11 所示。仿真条件为： $\theta_t$  和  $\theta_r$  均为  $45^\circ$ ， $\alpha_r$  以  $5^\circ$  的步长从  $5^\circ$  增加到  $25^\circ$ ， $d$  以  $20\text{ m}$  的步长从  $20\text{ m}$  增加到  $200\text{ m}$ ，其他仿真参数如表 1 和表 2 所示。由图 11 可知，系统信道容量随着  $\alpha_r$  的增大而逐渐减小。当  $\alpha_r < 15^\circ$  时，系统信道容量随着  $\alpha_r$  的增加而缓慢减小，当  $\alpha_r > 15^\circ$  时，系统信道容量随着  $\alpha_r$  的增大而快速减小。原因是  $\alpha_r$  的增大将导致公共散射体  $V$  减小，进而使路径损耗增大和信噪比减小。由文献[25]

的研究结论可知,  $\alpha_r$  的增大将会使系统的脉冲响应展宽增大、系统带宽减小; 根据香农公式可知, 信噪比和系统带宽的同时减小将会使信道容量变小, 因此系统信道容量随着  $\alpha_r$  的增大而减小。

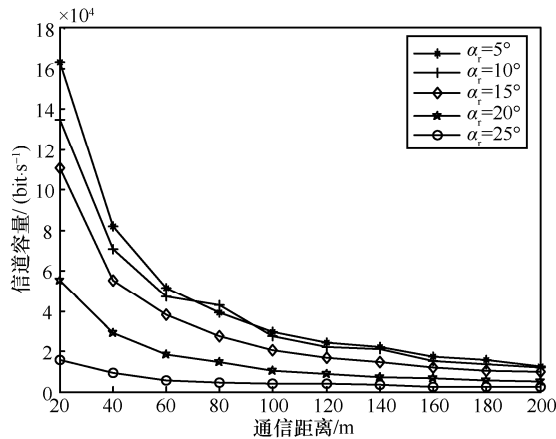


图 11 收端偏轴角对系统信道容量的影响

## 5 结束语

本文基于高精度、简便运算的遍历微小单元法研究了非共面情况下紫外光通信系统的信道容量。仿真分析了系统带宽与通信距离, 信道容量与发射端仰角、接收端仰角、发散角、视场角、偏轴角、通信距离之间的关系。结果表明: 1) 系统带宽随着通信距离的增大而逐渐减小, 且减小的速率也逐渐减小; 2) 信道容量随着发射端仰角与接收端仰角的增大而减小, 当发射端仰角和接收端仰角均较小时, 相比接收端仰角, 发射端仰角的变化对系统信道容量的影响更显著, 当发射端仰角和接收端仰角均小于  $40^\circ$  时, 系统信道容量较大; 3) 信道容量随着视场角的增大而增大, 而信道容量随着发散角的增大而略微减小; 4) 信道容量随着偏轴角的增大而减小。下一步, 计划对运动中的紫外光通信系统信道传输特性和链路间干扰展开研究。

## 参考文献:

[1] 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.

[2] WANG G C, WANG K, GONG C, et al. A 1 Mbit/s real-time NLOS UV scattering communication system with receiver diversity over 1 km[J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(2): 1-13.

[3] 陈冲, 宋鹏, 李云红, 等. 紫外光自组网按需多径距离矢量路由算法[J]. 西安工程大学学报, 2019, 33(1): 74-80.

CHEN C, SONG P, LI Y H, et al. Routing algorithm of UV Ad Hoc network on-demand multipath distance vector[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2019, 33(1): 74-80.

[4] YUAN R Z, MA J S. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. China Communications, 2016, 13(6): 63-75.

[5] REILLY D M, WARDE C. Temporal characteristics of single-scatter radiation[J]. Journal of the Optical Society of America, 1979, 69(3): 464-470.

[6] LUETTGEN M R, SHAPIRO J H, REILLY D M. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1991, 8(12): 1964-1972.

[7] CHEN G, XU Z Y, DING H P, et al. Path loss modeling and performance trade-off study for short-range non-line-of-sight ultraviolet communications[J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3929-3940.

[8] 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.

[9] 强若馨, 赵尚弘, 刘韵. 脉冲展宽对紫外光通信误码率的影响[J]. 红外与激光, 2015, 45(5): 559-563.

QIANG R X, ZHAO S H, LIU Y. Influence of pulse broadening on bit error rate of ultraviolet communication[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(5): 559-563.

[10] CHEN G, XU Z Y, SADLER B M. Experimental demonstration of ultraviolet pulse broadening in short-range non-line-of-sight communication channels[J]. Optics Express, 2010, 18(10): 10500-10509.

[11] DING H P, CHEN G, MAJUMDAR A K, et al. A parametric single scattering channel model for non-line-of-sight ultraviolet communications[C]//SPIE Conference on Free-space Laser Communications. 2008: 1-6.

[12] 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.

[13] XU Z Y. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]//2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. IEEE, 2007: 3001-3004.

[14] 赵太飞, 金丹, 宋鹏. 无线紫外光非直视通信信道容量估算与分析[J]. 中国激光, 2015, 42(6): 152-159.

ZHAO T F, JIN D, SONG P. Channel capacity estimation and analysis of wireless ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(6): 152-159.

[15] ZUO Y, XIAO H F, WU J, et al. A single-scatter path loss model for non-line-of-sight ultraviolet channels[J]. Optics Express, 2012, 20(9): 10359-10369.

[16] WANG L J, XU Z Y, SADLER B M. An approximate closed-form link loss model for non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry[J]. Optics Letters, 2011, 36(7): 1224-1226.

[17] ZUO Y, XIAO H F, WU J, et al. Closed-form path loss model of non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation[J]. Optics Letters, 2013, 38(12): 2116-2118.

[18] SONG P, ZHOU X L, SONG F, et al. Riemann sum method for non-line-of-sight ultraviolet communication in noncoplanar geometry

try[J]. Optics Communications, 2017, 405:400-405.

- [19] ELSHIMY M A, HRANILOVIC S. Non-line-of-sight single-scatter propagation model for noncoplanar geometries[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2011, 28(3):420-428.
- [20] 柯熙政. 紫外光自组织网络理论[M]. 北京: 科学出版社, 2011.  
KE X Z. Ultraviolet self-organizing network theory[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [21] 戴军, 卓士谦. 用离散傅里叶变换方法实现 $n$ 路移频键控调制解调[J]. 通信学报, 1989, 10(1): 74-78.  
DAI J, ZHUO S Q. An implementation method of  $n$ -channel FSK modem with DFT[J]. Journal on Communications, 1989, 10(1): 74-78.
- [22] 强若馨, 赵尚弘, 刘韵. 高空紫外光通信信道特性[J]. 半导体光电, 2015, 36(2): 259-262.  
QIANG R X, ZHAO S H, LIU Y. Characteristics of ultraviolet communication channel in high atmosphere[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(2): 259-262.
- [23] 靳蕃. 非高斯信道中传信率的计算分析[J]. 通信学报, 1984, 5(4): 85-89, 99.  
JIN F. An investigation on transinformation in non-gaussian channels[J]. Journal on Communications, 1984, 5(4): 85-89, 99.
- [24] 宋鹏. 无线紫外光移动自组网信道传输特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.  
SONG P. Research on channel transmission characteristics of wireless ultraviolet mobile Ad Hoc networks[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [25] 宋鹏, 柯熙政, 熊扬宇, 等. 非直视紫外光在非共面通信系统中的脉冲展宽效应[J]. 光学学报, 2016, 36(11): 48-57.  
SONG P, KE X Z, XIONG Y Y, et al. Pulse broadening effect of non-line-of-sight ultraviolet in noncoplanar communication system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 48-57.

### [作者简介]



宋鹏(1976-), 男, 陕西大荔人, 博士, 西安工程大学副教授, 主要研究方向为无线光通信、光信号接收与处理、嵌入式技术等。



苏彩霞(1989-), 女, 河南西华人, 西安工程大学硕士生, 主要研究方向为紫外光通信、移动自组网定位。

赵太飞(1978-), 男, 河南浚县人, 博士, 西安理工大学教授, 主要研究方向为紫外光通信技术、路由技术、网络抗毁性技术、物联网技术等。

陈锦妮(1980-), 女, 陕西西安人, 博士, 西安工程大学讲师, 主要研究方向为大气激光通信技术。

朱磊(1979-), 男, 四川绵阳人, 博士, 西安工程大学教授, 主要研究方向为信号与信息处理、检测技术、控制工程、嵌入式系统应用。

张晓丹(1981-), 女, 辽宁葫芦岛人, 博士, 西安工程大学副教授, 主要研究方向为波动信号处理及成像、图像处理。