

# 紫外光通信大气信道模型研究

张静<sup>1</sup>, 廖云<sup>1</sup>, 武保剑<sup>2</sup>, 史双瑾<sup>2</sup>, 邱琪<sup>1,2</sup>

(1. 电子科技大学光电信息学院 成都 610054; 2. 电子科技大学宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室 成都 610054)

**【摘要】**紫外光通信是一种新兴的基于大气散射和吸收的无线光通信技术,系统结构参数的选择对系统性能有重要影响。该文通过利用Luettgen提出的非视距单散射模型,比较了在不同仰角、光束孔径角情况下,损耗、延时、脉冲半宽展宽的变化特征,并给出了不同传输距离下能量密度的分布情况。根据仿真计算得到了不同紫外光通信条件下的损耗、时延和脉冲展宽。

**关键词** 信道模型; 损耗; 非视距; 延时; 紫外光通信  
**中图分类号** TN929.1 **文献标识码** A

## Research on Atmospheric Channel Model of Ultraviolet Communication Systems

ZHANG Jing<sup>1</sup>, LIAO Yun<sup>1</sup>, WU Bao-jian<sup>2</sup>, SHI Shuang-jin<sup>2</sup>, QIU Qi<sup>1,2</sup>

(1. School of Optoelectronic Information, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054; 2. Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Network of Ministry of Education, Univ. of Electron. Sci. & Tech. of China Chengdu 610054)

**Abstract** Ultraviolet (UV) communication bases on atmosphere scatter and absorption. The structure parameters of system are important to UV system. The relationship between transmitter, receiver apex angle, beam divergence, and the value of loss-time delay are simulated by model developed by Luegtten. Energy distributing is elicited in the fixed angles. The value of loss and time-delay is given by simulation calculating in different conditions.

**Key words** channel model; loss; non-line-of-sight; time-delay; ultraviolet communication

紫外光通信主要采用中紫外波段光波(200 ~ 280 nm)作为传输介质,由于分子(颗粒)对这一波段的强吸收作用,使得在近地面太阳光谱中没有紫外光波段,属于日盲区,减少了对紫外发射光源干涉带来的干扰。与传统通信方式相比,紫外光通信具有以下优点:(1)数据传输的保密性高。由于大气的强吸收作用,系统辐射的紫外光通信信号强度按指数规律衰减,这种强度衰减是距离的函数。因此,可根据通信距离的要求来调整系统的辐射功率,使其在通信范围之外的辐射功率减至最小,提高传输保密性<sup>[1]</sup>。(2)系统抗干扰能力强。(3)可用于非视距通信。(4)无需ATP跟踪。目前,国内外信道模型研究主要采用Luettgen提出的非视距单散射信道模型,对特定角度下能量分布进行了分析,但没有进行信道结构参数对传输性能影响的研究。本文利用非视距单散射模型,对紫外光通信大气信道模型进行了研究。

### 1 紫外光通信大气信道理论分析

图1所示为三种不同单对单传输系统模式<sup>[2]</sup>。由

图可以看出,光信号只有通过发射仰角和接收仰角交叉部分的散射体散射后,才能到达接收机。光信号离开光源到达接收机的数量是由系统的几何结构和大气散射因子( $k_s$ )、衰减因子( $k_c$ )决定的。几何结构主要包括光束孔径角、发射机和探测接收机仰角以及传输距离等。其中,发射机和探测接收机的仰角分别为 $\beta_T, \beta_R(0 \leq \beta_T, \beta_R \leq \pi)$ ;光束孔径角为 $\theta_R, \theta_T(0 \leq \theta_R \leq \pi, 0 \leq \theta_T \leq \pi/2)$ ;传输距离为 $r$ 。

探测接收机接收到的能量是通过计算位于交叉部分经大气散射光信号的数量得出的。本文通过非视距单散射模型<sup>[3]</sup>计算探测接收机接收到的能量。假设发射机在 $t=0$ 时刻,发射脉冲能量为 $Q_T$ ;发射机固有圆锥角为 $\Omega_T=4\pi \sin^2(\theta_T/2)$ ,则探测器接收到的能量为:

$$E(\xi) = \frac{Q_T c k_s \exp(-k_c r \xi)}{2\pi \Omega_T r^2} \int_{\eta(\xi)}^{\eta_s(\xi)} \frac{2g[\phi(\xi, \eta)]P(\theta_s)}{\xi^2 - \eta^2} d\eta \quad (1)$$

式中  $\xi$ 为径向坐标;  $\eta$ 为角坐标;  $\phi$ 为方位角坐标;  $P(\theta_s)$ 为单散射相位函数;  $g[\phi(\xi, \eta)]$ 为有效散射信道容量。探测器接收到的总能量为:

$$E_R = \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} E(ct/r) dt \quad (2)$$

式中  $\xi=ct/r$ ;  $t_{\min}$ 、 $t_{\max}$  分别为到达交叉部分最小矢径、最大矢径的时间。对  $g[\phi(\xi, \eta)]$  积分, 得到交叉部分总散射体散射的能量。光源发射能量经衰减后的能量与散射体散射能量的乘积在时间范围内积分, 可得到探测器探测到的总能量。

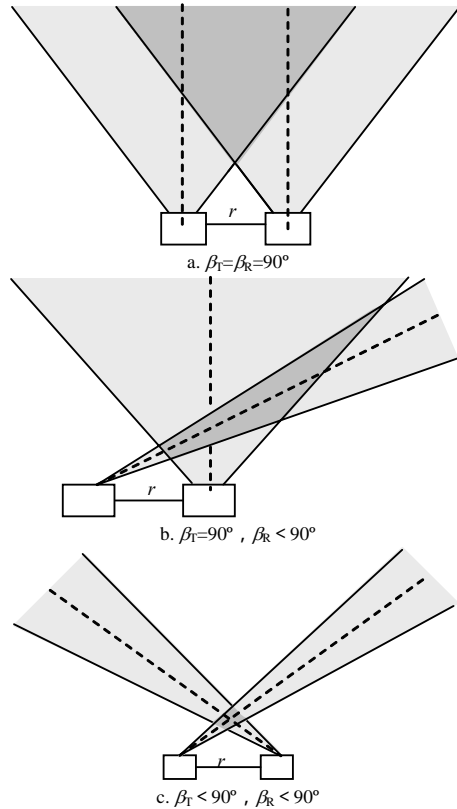


图1 非视距紫外光通信系统

## 2 仿真分析

在中紫外波段,  $\lambda=266 \text{ nm}$  时,  $k_s=0.157 \text{ km}^{-1}$ ;  $k_c=1.23 \text{ km}^{-1}$ ;  $P(\theta_s)=1$  (各向同性散射体)<sup>[4]</sup>。选取  $Q_T=1 \text{ mJ}$ ; 脉冲宽度为  $10 \text{ ns}$ ; 探测天线直径为  $0.2 \text{ m}$ 。本文通过改变系统结构参数  $\beta_T$ 、 $\beta_R$ 、 $\theta_R$ 、 $\theta_T$  和传输距离  $r$ , 研究系统结构参数对传输损耗  $L$ 、延时  $\tau$ 、脉冲半宽展宽  $W_p$  的影响。

### 2.1 对三种不同收发方式的比较

取  $\theta_T=15^\circ$ ,  $r=500 \text{ m}$ ,  $\theta_R$  在  $(1^\circ, 45^\circ)$  范围内间隔  $1^\circ$  变化。通过仿真可得出, 损耗与接收孔径角的关系如图2(与图1系统分别对应)所示。

由图2可得出: 发射孔径角固定时, 图2c中损耗最小。即斜收发情况下, 传输损耗最小, 垂直收发损耗最大。接收孔径角固定, 改变发射孔径角大小(考虑到实际系统,  $\theta_T$  一般取小于  $45^\circ$ ) 时, 得到与前

面相同的结论。 $\beta_R$ 、 $\beta_T$  取不同值时, 仍可得到同样的结论。理论上, 根据非视距单散射模型、斜收发情况下, 最小矢径高度降低, 信道容量增大, 接收能量增加, 损耗降低, 与仿真结果吻合。因此在紫外光通信系统设计过程中, 在保密通信距离内, 应采用斜收发的情况, 减少系统传输损耗, 降低对光源与探测器的要求。

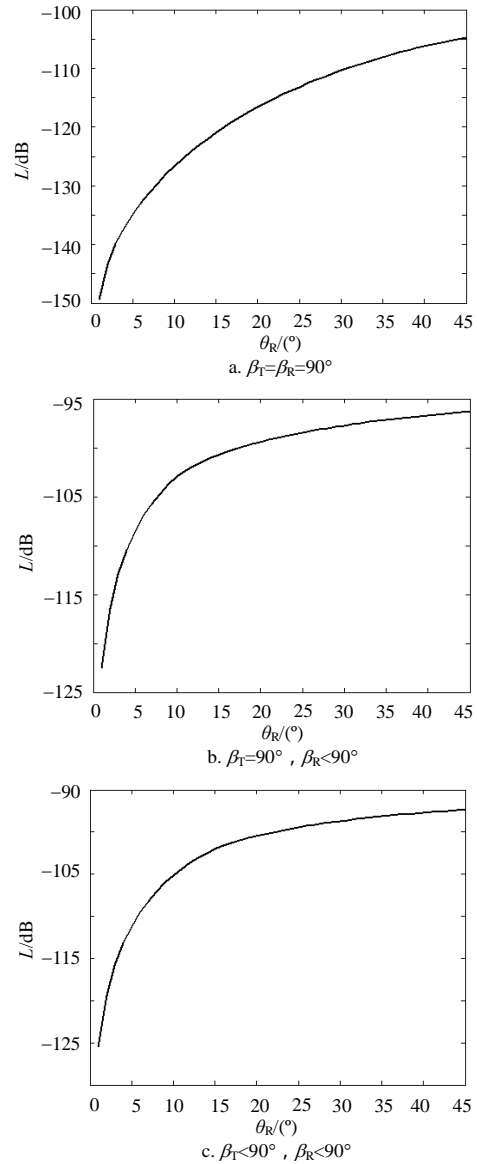


图2 损耗与  $\theta_R$  关系图

### 2.2 光束孔径角选择对系统的影响

仿真中,  $\beta_T=\beta_R=90^\circ$  时, 取  $\theta_R=15^\circ$ ,  $r=500 \text{ m}$ ,  $\theta_T$  在  $(1^\circ, 45^\circ)$  内间隔  $1^\circ$  变化。通过仿真可得出损耗延时与接收孔径角的关系如图3所示, 损耗与接收孔径角的关系如图4所示。

由图中可以得出: 接收孔径角固定, 发射孔径

角增大时, 延时、损耗都在减小。发射孔径角固定时, 接收孔径角与延时、损耗关系相同。理论上, 根据非视距单散射模型, 当发射与接收孔径角增大时, 信道容量增大, 最小矢径值减小; 信道容量增大时, 接收能量增大, 损耗减少。延时与最小矢径大小有关, 最小矢径值减小时, 延时减小, 与图3、图4的仿真结果相一致。因此, 紫外光系统设计过程中, 应选取大光束孔径进行传输, 降低传输损耗, 减小延时。

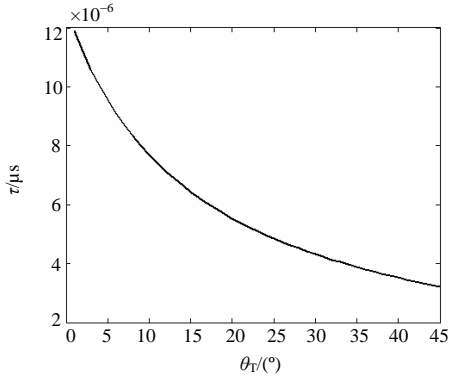


图3 时延与  $\theta_T$  关系图 ( $\theta_R=15^\circ$ )

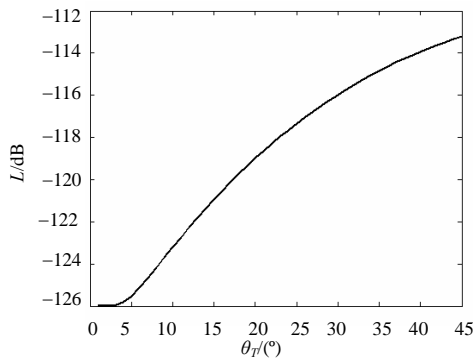
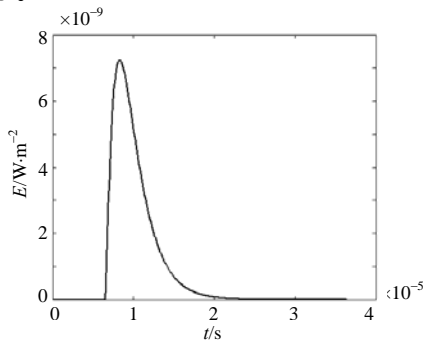


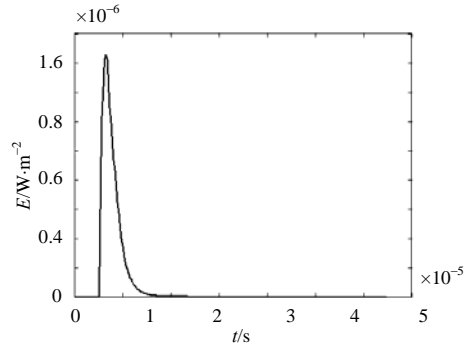
图4 损耗与  $\theta_T$  关系图 ( $\theta_R=15^\circ$ )

### 2.3 不同距离特定角度下能量分布图

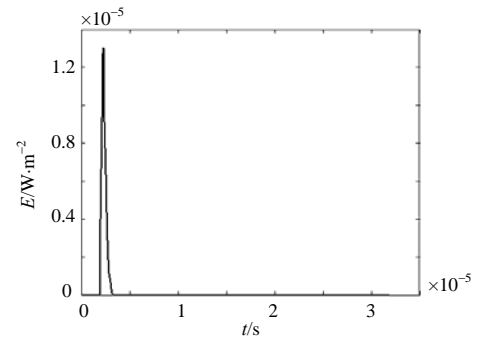
取  $\theta_R = \theta_T = 15^\circ$ , 通过仿真可以得到距离与发射接收机仰角不同情况下, 能量密度分布如图5、图6所示; 传输距离与损耗、延时、脉冲半宽展宽关系如表1所示。



a.  $\beta_T = \beta_R = 90^\circ$



b.  $\beta_T = 90^\circ, \beta_R < 90^\circ$



c.  $\beta_T < 90^\circ, \beta_R < 90^\circ$

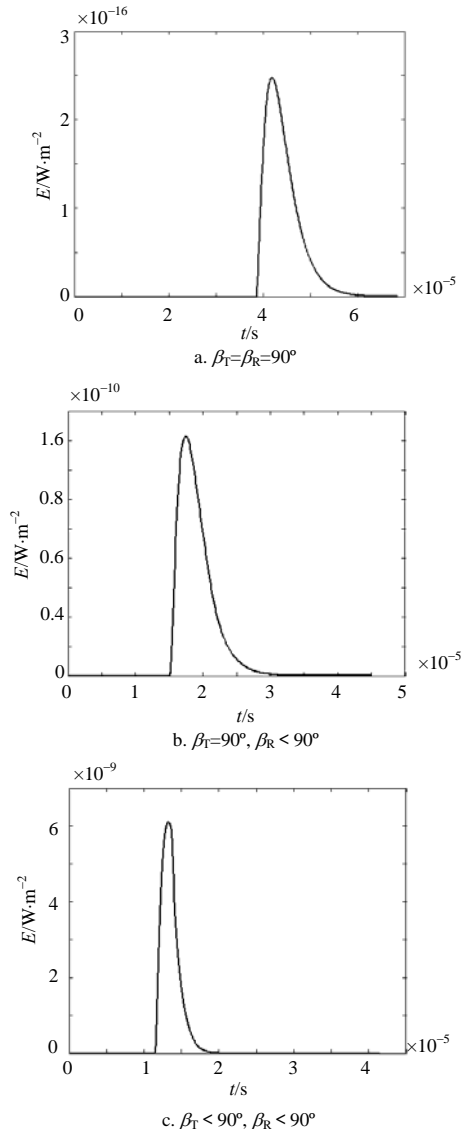
图5 能量输出图 ( $r=500$  m)

通过仿真曲线和表格数据得出: 随着传输距离的增加, 损耗、延时、脉冲半宽展宽都在增大。由式(1)可知, 随着传输距离的增大, 能量衰减增大, 最小矢径值增大。能量衰减增大时, 损耗增大; 最小矢径值增大时, 延时增大, 脉冲展宽加宽。与图5、图6和表1的仿真结果相吻合。

表1 传输距离与损耗、延时、脉冲半宽展宽关系表

距离 / km	$\beta_R = \beta_T = 90^\circ$			$\beta_T = 90^\circ, \beta_R = 45^\circ$			$\beta_R = \beta_T = 45^\circ$		
	L/dB	T/ $\mu$ s	$W_p/\mu$ s	L/dB	T/ $\mu$ s	$W_p/\mu$ s	L/dB	T/ $\mu$ s	$W_p/\mu$ s
500	-119	6.44	4.0	-100	2.53	1.4	-96	1.92	0.3
1 000	-137	12.80	5.0	-109	5.06	2.3	-103	3.85	0.8
1 500	-152	19.30	5.6	-117	7.59	3.1	-109	5.77	1.2
2 000	-166	25.70	5.9	-123	10.10	3.6	-113	7.69	1.6
2 500	-179	32.20	6.3	-129	12.60	4.2	-118	9.62	1.9
3 000	-192	38.60	6.5	-135	15.20	4.6	-123	11.5	2.2

从以上三个方面的仿真可以得出结论: 为了减小系统的传输损耗, 在系统设计过程中, 发射机和接收机应采用斜收发(仰角取值均小于  $90^\circ$ ); 光束孔径角的选择应尽可能大, 这样将减少系统传输损耗和脉冲延时, 便于探测器接收; 距离的增大, 将增加传输损耗和脉冲延时, 在实际通信过程中应根据不同的传输距离选取结构参数。

图6 能量输出图( $r=3\ 000\ m$ )

### 3 结论

紫外光通信是一种新兴的通信方式,它非常适合于近距离、地形复杂的保密通信,并且克服了无线通信易被监听的弱点,大大减少了通信设备和线路的开设及拆除时间。本文通过仿真分析,对信道模型的几个主要参数进行了研究,为实际系统的设计提供了依据:(1)系统传输损耗通常在100 dB以上,不同传输距离的通信,对应的损耗值不同,因此实际通信系统设计过程中应采用合适的结构参数达到传输目的。(2)脉冲展宽随着距离的增大也相应增宽,数值在微秒量级。对于垂直收发3 km的传输情况下,脉冲展宽约为25  $\mu s$ 。因此,采用OOK满调制时,最大码元传输速率可达40 kb/s。(3)由于紫外光通信过程中延时较大,因此通信时必须采用半双工通信方式。

### 参 考 文 献

- [1] 李霁野, 邱柯妮. 紫外光通信在军事通信系统中的应用[J]. 光学与光电技术, 2005, 3(4): 19-21.
- [2] DAVID M R, DANIEL T M, JOHN A M. Unique properties of solar blind ultraviolet communication systems for unattended ground sensor networks[J]. Proc.SPIE, 2004, 5611: 244-254.
- [3] MARK R L, JEFFREY H S, DAVID M R. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. Journal Optical Society of America, 1991, 8(12): 1964-1972.
- [4] GARY A S, MELISSA L N, MRINAL I, et al. NLOS UV communication for distributed sensor systems[J]. Proc.SPIE, 2000, 4126: 83-95.

编辑 漆蓉

(上接第181页)

### 参 考 文 献

- [1] FOSCHINI G J, GANS M J. On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas[J]. Wireless Personal Communication. 1998, 6(3): 311-335.
- [2] TELATAR I E. Capacity of multi-antenna Gaussian channels[J]. European Transaction on Telecommunication. 1999, 10(6): 585-595.
- [3] HASSIBI B, HOCKWALD B M. How much Training is Needed in Multiple-Antenna Wireless Links?[J]. IEEE Trans. Inform. Theory, 2001, 49(4): 951-963.
- [4] WONG T F, PARK B. Training sequence optimization in MIMO systems with colored noise[J]. IEEE Transaction on Communication, 2004, 52(11): 1939-1947.
- [5] RICK S. BLUM. MIMO Capacity with Interference[J]. IEEE Transaction on Selected Areas In Communication, 2003, 21(5): 793-801.
- [6] TAESANG Y, GOLDSMITH A. Capacity of fading MIMO channels with channel estimation error[C]//2004 IEEE International Conference on Communications, Paris, France: [出版者不祥], 2004.
- [7] KAY S M. Fundamental of statistical signal processing: estimation theory[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

编辑 刘文珍