

无线紫外光非直视通信信道容量估算与分析

赵太飞^{1,2} 金丹¹ 宋鹏^{1,3}

¹西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

²电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 610054

³西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710048

摘要 无线紫外光非直视通信中, 大气散射和收发角度是影响紫外光通信系统性能的重要因素。在无线紫外光非直视通信单次散射模型的基础上, 提出了一种适合于紫外光非直视通信的信噪比和信道容量估算方法, 并将该方法与量子极限法进行对比计算, 验证了无线紫外光通信信道容量估算法的正确性。利用计算机仿真了收发端角度对紫外光通信中路径损耗、信道容量的影响, 并分析了不同背景噪声环境下的信道容量。仿真结果表明, 发送、接收仰角及接收视场角对紫外光通信中的路径损耗、信道容量影响较大, 而发散角对其影响不大, 且信道容量随背景噪声的增大而减小。

关键词 光通信; 紫外光散射; 非直视; 信道容量

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0605001

Channel Capacity Estimation and Analysis of Wireless Ultraviolet Non-Line-of-Sight Communication

Zhao Taifei^{1,2} Jin Dan¹ Song Peng^{1,3}

¹Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

²Key Laboratory of Fiber Sensing and Communications of Ministry of Education, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China

³School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract In the field of wireless ultraviolet non-line-of-sight communication, atmospheric scattering and the angle of transceiver are important factors that affect the ultraviolet (UV) communication system performance. Based on the single scattering model of UV non-line-of-sight (NLOS) communication, a signal noise ratio (SNR) and channel capacity estimation method of UV NLOS communication is proposed. Then the estimated SNR and quantum-limited SNR as well as their channel capacities are calculated respectively. Comparing between two simulation results, the correctness of the method is verified. In addition, the path loss and channel capacity of UV NLOS communication under different angles of transmitter and receiver are simulated by using computer. Channel capacity under different background noise conditions is also analyzed. The simulation results show that transmitter elevation angle, receiver elevation angle and receiver field of view angle (FOV) have a great influence on the path loss and channel capacity of UV communication. Conversely, transmitter beam divergence angle has little impact on them, and channel capacity decreases as background noise increases.

Key words optical communications; ultraviolet scattering; non-line-of-sight; channel capacity

OCIS codes 060.2605; 060.4510; 260.7190; 010.1310

收稿日期: 2014-12-31; 收到修改稿日期: 2015-01-27

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 (U1433110)、陕西省科技计划工业公关项目 (2014K05-18)、陕西省教育厅产业化培育项目 (2013JC09)、陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目 (2013JC2-15)、西安市科学计划项目 (CX1435(4))、西安市碑林区科技计划项目 (GX1302)

作者简介: 赵太飞 (1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事紫外光通信和物联网方面的研究。E-mail: zhaotaifei@163.com

1 引 言

无线紫外光(UV)通信通常采用波长为 200~280 nm 的波段,由于该波段的紫外辐射被臭氧分子强烈吸收,使得这一波段的紫外光辐射在近地平面附近几乎衰减为零,因而该波段被称为“日盲区”^[1]。紫外光通信利用大气中的粒子、气溶胶、灰尘等微粒对紫外光的散射进行信息传递,这种散射特性使无线紫外光通信系统能以非视距(NLOS)的方式传输信号,克服了自由空间光通信必须以视距方式工作的弱点,从而能适应复杂的地形环境^[2],且具有保密性高、抗干扰能力强、全天候工作等优点,因而无线紫外光通信得到了广泛的应用^[3-5]。

紫外光信号在传输过程中,受到大气的强烈吸收和散射作用,这使得光信号快速的弥散和畸变,影响了紫外光通信系统的整体性能,因此,需要对紫外光在大气中的传输特性进行分析。文献[6]详细推导了一种路径损耗公式,但其结构与参数都比较复杂,不便于计算。文献[7-8]均提出了路径损耗的简化计算公式,而文献[8-9]给出了对应此简化公式的部分参数,但都没有进一步研究紫外光通信的信道容量。文献[10]利用信道脉冲响应推导出了紫外光通信的带宽公式,但此公式中的参数不容易确定。文献[11]给出了无线紫外光视距(LOS)通信时的信噪比(SNR)公式,但没有研究非视距通信时的信噪比。为了研究无线紫外光非视距通信的系统性能,本文基于单次散射通信模型,提出了一种适合于紫外光非视距通信的信噪比估算方法,并在此基础上估算了信道容量,利用仿真结果验证了此估算方法的合理性,同时研究了发送端、接收端的角度对紫外光通信中路径损耗、信道容量的影响,以及不同背景噪声环境下的信道容量。

2 无线紫外光非视距通信模型

非视距通信是指传输的光信号可以绕过通信两端之间障碍物的通信模式,日盲紫外光 NLOS 链路主要是利用紫外光在大气中的传输过程存在较大散射的特性来实现的。根据光轴和水平轴之间的夹角,紫外光非视距通信可以分为如图 1 所示的 NLOS(a类)、NLOS(b类)、NLOS(c类)三种通信方式^[12],图中 Tx,Rx 分别为发送端和接收端。在 a 类方式下,发送端和接收端仰角均为 90°,发送端、接收端都朝天,即全向发送全向接收;在 b 类方式下,发送端仰角小于 90°,接收端仰角为 90°,即定向发送全向接收;在 c 类方式下,发送端仰角小于 90°,接收端仰角小于 90°,即定向发送定向接收。本文主要对 c 类通信方式进行研究。

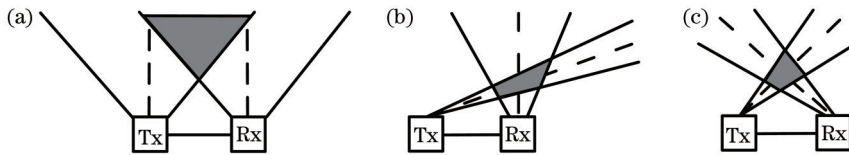


图1 紫外光 NLOS 通信的三种方式。(a) a类方式;(b) b类方式;(c) c类方式
Fig.1 Three types of UV NLOS communication. (a) Type a; (b) type b; (c) type c

无线紫外光 NLOS 通信的单次散射模型如图 2 所示, ϕ_1 为发散角, ϕ_2 为接收视场角, θ_1 为发送仰角, θ_2 为接收仰角, V 为有效散射体区域, r 是发送端到接收端的基线距离, r_1 和 r_2 分别为发送端和接收端到有效散射体的距离。Tx 以 ϕ_1 和 θ_1 向空间发射光信号,光信号在有效散射体内散射后,Rx 以 ϕ_2 和 θ_2 进行光信号接收^[13]。

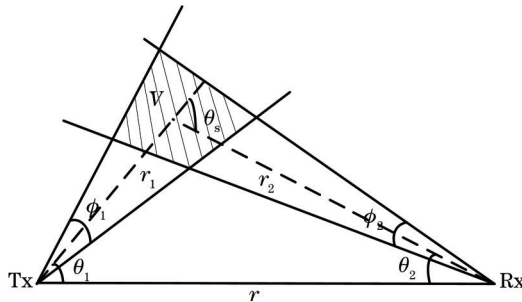


图2 无线紫外光 NLOS 通信单次散射模型
Fig.2 Wireless UV NLOS single scattering communication model

3 无线紫外光 NLOS 通信信道容量分析

3.1 无线紫外光通信路径损耗分析

无线紫外光非视距通信的单次散射过程可以分为三个部分:1) 无线紫外光信号从发送端到有效散射体的传输路径 r_1 可视为 LOS 链路;2) 无线紫外光信号在有效散射体内进行散射;3) 信号从散射体到接收端路径 r_2 也可以作为 LOS 链路处理。紫外光非视距单次散射通信接收端接收光功率为^[11]

$$P_r = \frac{P_t A_r K_s P_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 r \sin \theta_1 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2}\right)} \cdot \exp\left[-\frac{K_c r (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}\right], \quad (1)$$

式中 P_t 是发送功率, A_r 是接收孔径面积, K_s 是散射系数, P_s 是散射角 θ_s 的相函数, r 是通信距离, $K_c = K_a + K_s$, 是大气信道衰减系数, K_a 是吸收系数。(1)式仅适用于有效散射体体积较小的情况^[11]。

在紫外光 NLOS 通信中路径损耗是指发送功率与接收功率的比值,因而紫外光 NLOS 通信的路径损耗可由(1)式表示为

$$L = \frac{P_t}{P_r} = \frac{32\pi^3 r \sin \theta_1 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2}\right)}{A_r K_s P_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \cdot \exp\left[-\frac{K_c r (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}\right]}. \quad (2)$$

对有效散射体的平面分析如图 3 所示,当发送仰角 θ_1 为 65° 时,发散角 ϕ_1 ($\angle CAE$) 为 20° ,接收仰角 θ_2 ($\angle ABH$) 为 90° ,接收视场角 ϕ_2 ($\angle FBD$) 为 30° , AC 和 BD 平行,有效散射体 V 的体积趋近于无穷大^[14]。因此,发送端和接收端的仰角较大时,(2)式不适用于分析紫外光散射通信。

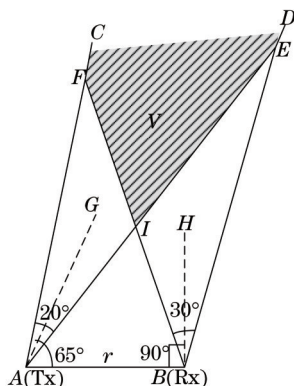


图 3 有效散射体的平面分析

Fig.3 Analyzing of effective scattering volume

发送端和接收端的仰角较小时,可利用(2)式计算路径损耗,但发送端和接收端的仰角较大时此公式不适用,而在实际应用中一般采用其简化公式^[7]

$$L = \xi r^\alpha, \quad (3)$$

式中 α 为路径损耗指数因子, ξ 为路径损耗因子,文献[8]中给出了紫外光通信中不同发送接收仰角对应的 α 和 ξ 的部分取值。

3.2 无线紫外光 NLOS 通信信道容量估算方法

实际中紫外光通信是多次散射的,但以第一次散射为主。紫外光非视距通信中基于单次散射模型的近似信道脉冲响应为^[15]

$$h(t) = \frac{K_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \exp(-K_c ct)}{32\pi^3 r \sin \theta_1 \left(1 - \cos \frac{\phi_1}{2}\right)}, \quad (4)$$

式中 c 表示光速。对信道脉冲响应 $h(t)$ 进行傅里叶变换得到信道的幅频响应,信道的带宽可以用幅频函数的 3 dB 截止频率表示为^[15]

$$B = \frac{K_c c}{2\pi} \quad (5)$$

从(5)式可以看出信道带宽受衰减系数的影响,即带宽受物理大气特性影响,不同天气状况下大气衰减系数 K_c 相差很大^[6],信道带宽受天气影响很大。

信噪比是研究通信性能的关键,由于紫外光通信中背景噪声的影响相对比较大,因而本文只考虑背景噪声,忽略系统中暗电流的影响。紫外光通信中在量子极限条件下的信噪比为^[17]

$$R_{SN} = \frac{\eta_i \eta_d P_i \lambda}{2hcBL} \quad (6)$$

式中 η_i 和 η_d 分别表示滤光片透射率和光电倍增管的探测效率, λ 为波长, h 为普朗克常数, B 为信道带宽。

信噪比的定义式为 $R_{SN} = 10 \lg \frac{P_{si}}{P_n}$,其中 P_{si} 和 P_n 分别代表信号功率和噪声功率。由于波长相同,单个光子所携带的能量相同,为 hc/λ ,接收端在单位脉冲内收到的信号功率和噪声功率分别为 $P_{si} = N_s hc/\lambda T_p$, $P_n = N_n hc/\lambda T_p$, N_s 和 N_n 分别表示单位脉冲内接收端探测到的信号光子数和噪声光子数, T_p 为脉冲宽度,因而在紫外光通信中信噪比也可以表示为

$$R_{SN} = 10 \lg \frac{N_s}{N_n} \quad (7)$$

(7)式即为紫外光NLOS通信的信噪比估算公式, $N_s = \frac{\eta_i \eta_d P_i \lambda}{hcRL}$ ^[7], R 为信息传输速率。由实测数据可知,接收端探测到的噪声光子数 N_n 近似服从泊松分布^[18],因而在仿真分析中,可利用泊松分布随机产生噪声光子数,从而分析紫外光通信的信噪比和信道容量。而噪声光子数随大气环境变化而变化,在晴天中午时噪声光子数最大,高达十几个,而上午和下午的光子数仅为中午的一半,晚上或阴雨天气时噪声光子数更小,这说明紫外光通信时背景噪声变化较大。

基于上述理论,计算出信道带宽与接收端的信噪比,即可利用香农公式计算紫外光NLOS通信的信道容量。

4 仿真结果及分析

4.1 紫外光通信路径损耗分析

基于第3节的理论分析,仿真模拟了系统模型参数对紫外光NLOS通信的路径损耗的影响,仿真过程中,部分系统参数取值如表1所示。

表1 部分系统仿真参数

Table 1 Part of the system simulation parameters

Parameter	Value
Receiving aperture area A_r	1.77 cm ²
Tx average power P_i	43 mW
Optical filter efficiency η_i	0.3
PMT detection efficiency η_d	0.2
Information rate R	64 kb/s
Wavelength λ	250 nm

利用(3)式计算路径损耗时,其发散角和接收视场角为定值,即 $\phi_1 = 10^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$,在此条件下仿真了发送、接收仰角和通信距离对路径损耗的影响,如图4所示。图4(a)中 $\theta_2 = 20^\circ$,从图中可以看出,在相同通信距离下,路径损耗随发送仰角 θ_1 的增大而增大, θ_1 从 10° 增加到 70° 时路径损耗增加了近20 dB,由此可知紫外光NLOS通信的路径损耗随发送仰角的变化很大。图4(b)中 $\theta_1 = 20^\circ$, θ_2 从 10° 增加到 70° 时路径损耗增加了大约20 dB,由此可知紫外光NLOS通信的路径损耗随接收仰角的变化非常大。从图4还可以看出,随着通信距离 r 的增加,路径损耗急剧增大,通信距离从10 m增加到200 m时路径损耗增大25 dB左右。

利用(3)式计算路径损耗时,其发散角和接收视场角为定值,因而利用(2)式计算不同发散角和接收视场角时的路径损耗,如图5所示。由于(2)式仅适用于发送、接收仰角较小的情况,故取 $\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$ 。图5(a)中

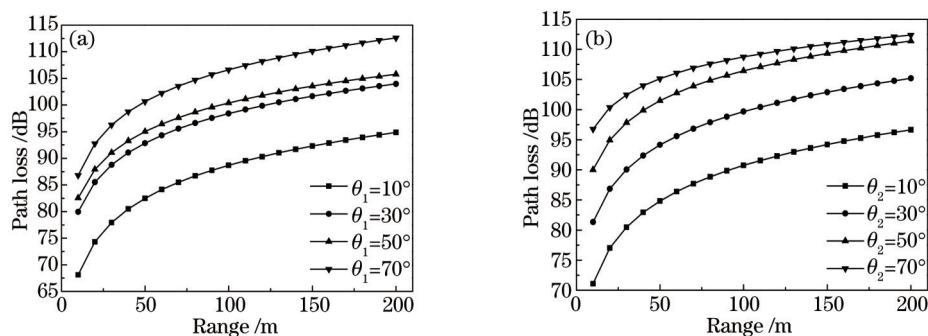


图4 (a)发送、(b)接收仰角对路径损耗的影响

Fig.4 Path loss versus distance for varying (a) Tx elevation angle and (b) Rx elevation angle

$\phi_2 = 30^\circ$, 从图中可以看出, 增大发送端的发散角对路径损耗几乎没有影响。图 5(b)中 $\phi_1 = 10^\circ$, 随着接收视场角的增加, 路径损耗降低了 6 dB 左右, 因此可以通过适当的增加视场角来减小紫外光通信的路径损耗。

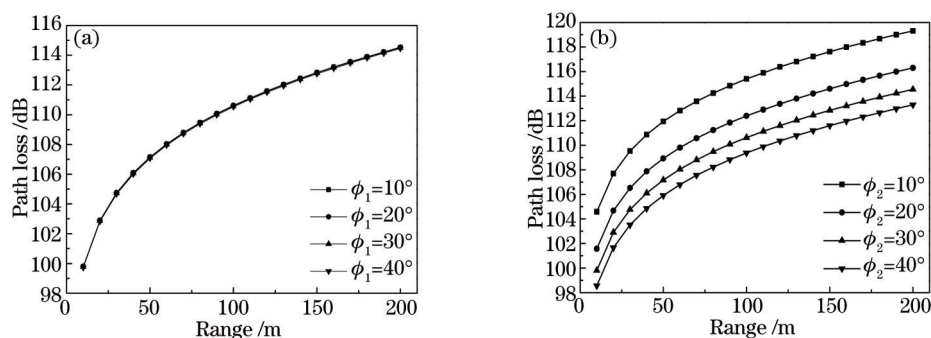


图5 (a)发散角、(b)接收视场角对路径损耗的影响

Fig.5 Path loss versus distance for varying (a) divergence angle and (b) field of view angle

图 5(a)中 4 条曲线几乎重合, 体现不出结果的细微差异, 为了体现其区分度, 将图中的部分数据绘制成表格, 如表 2 所示。从表中可以看出, 当发散角相同时, 路径损耗随着通信距离的增大而增大, 当通信距离相同时, 路径损耗随发散角增大而减小, 但变化很小。

表2 发散角对路径损耗的影响

Table 2 Influence of divergence angle on path loss

Path loss /dB	$r=50$ m	$r=100$ m	$r=150$ m	$r=200$ m
$\phi_1 = 10^\circ$	107.1629	110.6264	112.8404	114.5430
$\phi_1 = 20^\circ$	107.1546	110.6181	112.8321	114.5347
$\phi_1 = 30^\circ$	107.1215	110.5850	112.7990	114.5016
$\phi_1 = 40^\circ$	107.0662	110.5297	112.7437	114.4463

4.2 信道容量估算法的正确性验证

利用(6)式、(7)式计算信噪比和信道容量分别称为量子极限法和估算法, 分别用这两种方法计算紫外光 NLOS 通信的信噪比, 两者的仿真结果对比如图 6 所示, 其中发送接收仰角取相同值, $\phi_1 = 10^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$ 。从图中可以看出在相同的几何角度下, 随着距离的增加信噪比降低, 且发送接收仰角越大, 信噪比越低, 当仰角大于 30° 且通信距离大于 50 m 时信噪比为负值。因此, 发送接收仰角越小通信性能越高, 且进一步说明紫外光适合短距离通信。由实测数据可知, 在晴天中午时单位脉冲内噪声光子数服从均值为 2.9 的泊松分布^[18]。图 6(a)和图 6(b)分别是用量子极限法和估算法计算信噪比的结果, 在相同条件下当 $N_n = 2$ 时利用两种方法计算出的信噪比相差不到 1 dB, 说明估算法计算信噪比简单合理。

在量子极限法和估算法两种计算信噪比的方法的基础上, 仿真了紫外光 NLOS 通信的信道容量, 两者的仿真结果对比如图 7 所示, 其中发送和接收仰角取相同值, $\phi_1 = 10^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$ 。从图中可以看出在相同的几何角度下, 随着距离的增加信道容量降低, 且发送接收仰角越大, 信道容量越低。短距离通信时, 当发送接

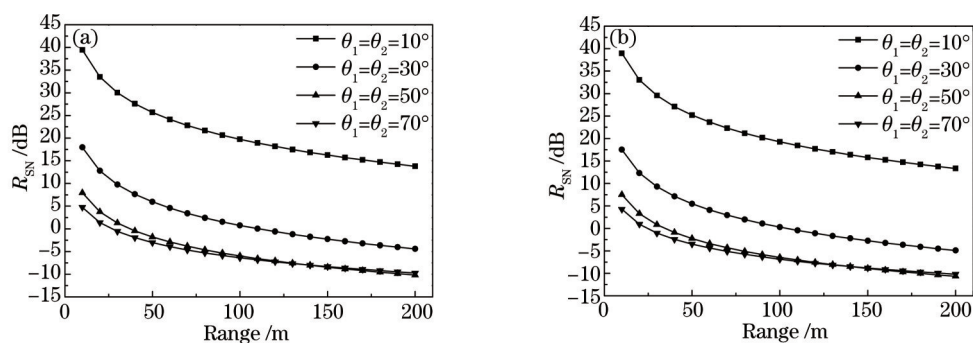


图6 用两种计算方法得到的信噪比。(a)量子极限法;(b)估算法

Fig.6 SNR calculated by two methods. (a) Method under quantum limit condition; (b) estimate method

收仰角为 10° 时,信道容量可以达到 10^5 b/s量级;而当角度大于 30° 时,通信容量降低为 10^4 b/s量级,甚至更小。因此,发送接收仰角越小通信性能越高,进一步说明紫外光适合短距离通信。图7(a)和图7(b)是分别是在两种计算信噪比的方法的基础上仿真出的信道容量,可以看出在相同条件下利用两种方法仿真出的信道容量相差很小,再次验证估算法计算信噪比和信道容量的方法简单合理。

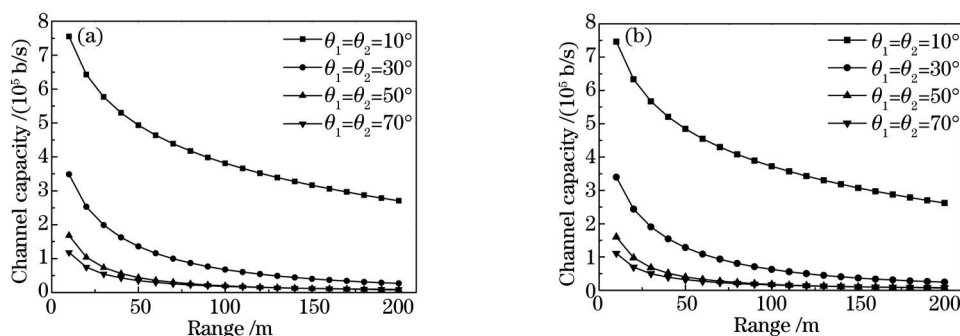


图7 用两种方法得到的信道容量。(a)量子极限法;(b)估算法

Fig.7 Channel capacity calculated by two methods. (a) Method under quantum limit condition; (b) estimate method

4.3 紫外光通信信道容量的影响因素

发送、接收装置、大气环境等诸多因素都会紫外光NLOS通信的信道容量,而相同天气条件下背景噪声环境基本不变,研究了相同天气条件下 $N_n = 3$ 时发送、接收端的角度对紫外光通信信道容量的影响。

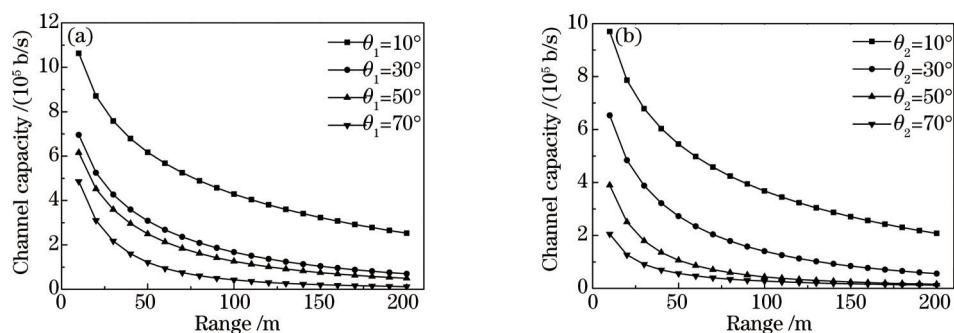


图8 (a)发送、(b)接收仰角对信道容量的影响

Fig.8 Channel capacity versus distance for varying (a) Tx elevation angle and (b) Rx elevation angle

图8为 $\phi_1 = 10^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$ 时信道容量随发送、接收仰角和通信距离的变化情况。从图中可以看出,随着通信距离 r 的增加,信道容量急剧下降,当通信距离从10 m增加到200 m时,信道容量大约降低了一个数量级。图8(a)中 $\theta_2 = 20^\circ$,从图中可以看出,在相同通信距离下,信道容量随发送仰角的增大而降低,且发送仰角大于 30° 时信道容量变化较小。图8(b)中 $\theta_1 = 20^\circ$,由图可知紫外光NLOS通信的信道容量随接收仰角的变化也非常大,且当接收仰角大于 50° 时信道容量降低得比较小。

图9是 $\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$ 时, 紫外光通信的信道容量随发散角、接收视场角的变化情况。图9(a)中, $\phi_2 = 30^\circ$, 从图中可以看出, 增大发送端的发散角对信道容量几乎没有影响。图9(b)中, $\phi_1 = 30^\circ$, 随着接收视场角的增加, 信道容量提高了一个数量级, 因此可以通过适当的增加视场角来提高紫外光通信的信道容量。

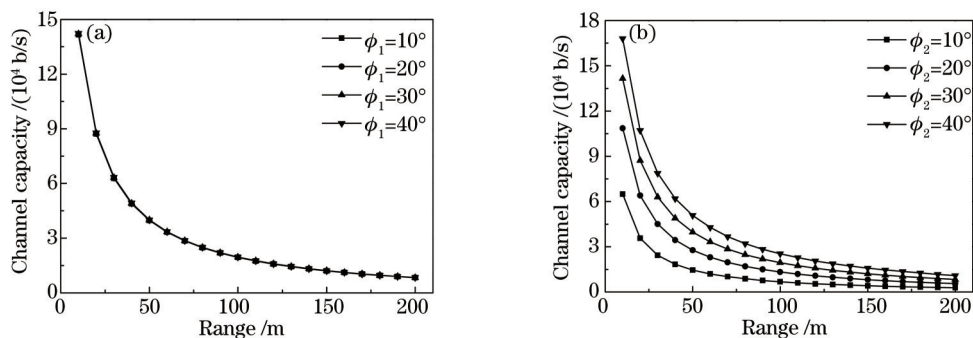


图9 (a)发散角、(b)接收视场角对信道容量的影响

Fig.9 Channel capacity versus distance for varying (a) divergence angle and (b) field of view

图9(a)中4条曲线几乎重合, 体现不出结果的细微差异, 为了体现其区分度, 将图中的部分数据绘制成表格, 如表3所示。从表中可以看出, 当发散角相同时, 信道容量随着通信距离的增大而减小。当通信距离相同时, 信道容量随发散角增大而增大, 但变化不明显。

表3 发散角对信道容量的影响

Table 3 Influence of divergence angle on channel capacity

	Channel capacity / (b/s)			
	$r=50$ m	$r=100$ m	$r=150$ m	$r=200$ m
$\phi_1 = 10^\circ$	3.9736×10^4	1.9442×10^4	1.2064×10^4	8.3067×10^3
$\phi_1 = 20^\circ$	3.9802×10^4	1.9476×10^4	1.2086×10^4	8.3221×10^3
$\phi_1 = 30^\circ$	3.9912×10^4	1.9534×10^4	1.2123×10^4	8.3478×10^3
$\phi_1 = 40^\circ$	4.0066×10^4	1.9615×10^4	1.2175×10^4	8.3839×10^3

不同天气条件下, 背景噪声环境不同, 图10是 $\phi_1 = 10^\circ$, $\phi_2 = 30^\circ$, $\theta_1 = \theta_2 = 20^\circ$ 时, 紫外光通信的信道容量随背景噪声光子数的变化情况。由图可知, 随噪声光子数增加, 信道容量降低。而相同背景噪声时, 信道容量随着通信距离增加而降低。

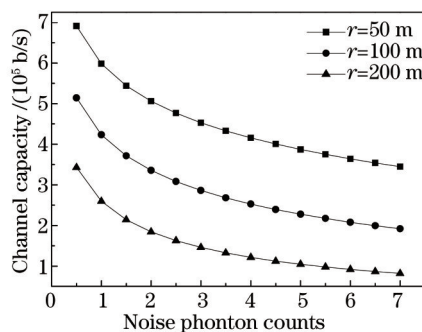


图10 噪声光子数对信道容量的影响

Fig.10 Channel capacity versus noise photon counts

5 结 论

分析了无线紫外光非视距通信单次散射模型, 在此模型基础上分析了紫外光通信的路径损耗, 描述了紫外光通信的带宽和量子极限信噪比, 并以信噪比的定义为基础提出了适合于紫外光 NLOS 通信的信噪比估算方法。计算了两种信噪比及其对应的信道容量, 并研究了收发角度对紫外光通信中路径损耗、信道容量的影响, 及不同背景噪声环境下的信道容量。结果表明, 估算法信噪比与量子极限信噪比相差不到 1 dB, 而对应的信道容量在同一数量级内, 验证了无线紫外光通信信道容量估算法的正确性。同时表明, 发送、接

收仰角及接收视场角对紫外光通信影响较大,而发散角对紫外光通信影响不大,且信道容量随背景噪声的增大而减小。所得结果为继续研究紫外光通信的性能提供了一定的参考。

参 考 文 献

- 1 Menglong Wu, Dahai Han, Xiang Zhang, *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 Hailiang Zhang, Hongwei Yin, Honghui Jia, *et al.*. Study of effects of obstacle on non-line-of-sight ultraviolet communication links[J]. *Optics Express*, 2011, 19(22): 21216–21226.
- 3 Zhao Taifei, Li Qiong, Wang Yidan, *et al.*. Fast channel allocation method in wireless ultraviolet network based on particle swarm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0106002.
赵太飞, 李 琼, 王一丹, 等. 基于粒子群的无线紫外光网络快速信道分配方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0106002.
- 4 Li Jibo, Liu Xiguo, Wang Hongxing, *et al.*. Improved ultraviolet communication time division multiplexing network method[J]. *Chinese J 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.
- 5 Qiang Ruoxin, Zhao Shanghong, Wang Xiang, *et al.*. Ultraviolet multipath scattering link model under the influence of high altitude turbulence[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0605002.
强若馨, 赵尚弘, 王 翔, 等. 高空湍流影响下紫外光多径散射链路模型[J]. *中国激光*, 2014, 41(6): 0605002.
- 6 Yong Zuo, Houfei Xiao, Jian Wu, *et al.*. Closed-form path loss model of non-line-of-sight ultraviolet single-scatter propagation[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(12): 2116–2118.
- 7 Gang Chen, Zhengyuan Xu, Haipeng Ding, *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 Qunfeng He, Brian M Sadler, Zhengyuan Xu. Modulation and coding tradeoffs for non-line-of-sight ultraviolet communications[C]. *SPIE*, 2009, 7464: 74640H.
- 9 Qunfeng He, Zhengyuan Xu, Brian M Sadler. Performance of short-range non-line-of-sight LED-based ultraviolet communication receivers[J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12226–12238.
- 10 Haipeng Ding, Gang Chen, Arun K Majumdar, *et al.*. A parametric single scattering channel model for non-line-of-sight ultraviolet communications[C]. *SPIE*, 2008, 7091: 70910M.
- 11 Zhengyuan Xu. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2007, III 577–III 580.
- 12 Shaw G A, Siegel A M, Mode J. Recent progress in short-range ultraviolet communication[C]. *SPIE*, 2005, 5796: 214–225.
- 13 Zhao Taifei, Wang Xiaorui, Ke Xizheng. Research on multi-channel access technology in wireless UV scattering communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0306001.
赵太飞, 王小瑞, 柯熙政. 无线紫外光散射通信中多信道接入技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0306001.
- 14 Zhao Taifei, Zhang Aili, Jin Dan, *et al.*. Research on the inter-link interference model in wireless ultraviolet NLOS communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706023.
赵太飞, 张爱利, 金 丹, 等. 无线紫外光非视距通信中链路间干扰模型研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706023.
- 15 Luo Chang. The Study of Signal Processing and Design of Base Band System for Non-Line-of-Sight Optical Communication[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, 2011.
罗 畅. 非视距光通信信号处理研究与基带系统设计[D]. 北京: 中国科学院空间科学与应用研究中心, 2011.
- 16 Zhang Liquan. Simulation of ultraviolet atmospheric propagation characteristics[J]. *Journal of Jilin University (Information Science Edition)*, 2012, 30(5): 534–539.
张里荃. 紫外光大气传输特性的模拟研究[J]. *吉林大学学报(信息科学版)*, 2012, 30(5): 534–539.
- 17 Joseph C Palais. *Fiber Optic Communications*[M]. 5th edition. New Jersey: Prentice Hall, 2005: 362–378.
- 18 Gang Chen, Feras Abou-Galala, Zhengyuan Xu, *et al.*. Experimental evaluation of LED-based solar blind NLOS communication links[J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 15059–15068.

栏目编辑: 史 敏