

doi: 10.3788/gzxb20124109.1047

大气信道紫外光通信系统通信距离的增程方法

丁莹, 范静涛, 佟首峰, 姜会林, 董科研

(长春理工大学 空间光电技术研究所 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要:介绍了紫外光大气传输理论和非直视单散射模型. 在此模型基础上, 针对紫外光通信系统的结构设计对信道能量损耗的影响进行了理论上的定性分析. 对不同天气、不同通信模式、不同几何结构参量条件下, 大气信道所产生的能量损耗进行了定量仿真. 仿真结果表明: 能量衰减随通信距离的增加而增大; 不同能见度条件下, 能量衰减随通信距离的递增程度不同, 能见度越高能量衰减越小, 可实现的通信距离越远; 通信距离随发射仰角的减小而增加, 随接收仰角的减小而增加, 且发射仰角对通信距离的影响程度大于接收仰角; 通信距离随发射束散角的增加而增加, 随接收视场角的减小而增加, 且接收视场角对通信距离的影响程度远大于发射束散角.

关键词:光通信; 紫外光; 大气信道; 能量衰减; 通信距离

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)09-1047-6

0 引言

紫外光通信是基于大气散射, 利用日盲紫外线进行信息传输的一种通信模式, 作为常规通信的重要补充, 因其具有保密传输、抗干扰能力强、非直视通信等优点, 而成为现代战争中不可或缺的一种通信新方式^[1-3]. 采用紫外光通信既克服了有线通信需要铺设电缆的缺点, 节省了通信设备和线路开设及拆除所需的时间, 又解决了无线通信易被监听和受限于障碍物遮挡的弱点. 紫外光通信可应用于无人监管的地面传感系统中, 每个传感器节点处都配有收发器, 光脉冲发射后经大气颗粒和分子的散射完成通信. 由于分子的强吸收作用, 使得在通信范围之外, 紫外光信号能量衰减为 0, 使通信很难被侦听、拦截. 因此, 紫外光通信可以为短距离传感系统内部节点间通信提供可靠的保密传输.

1939 年, 美国就开始了海军通信用紫外光源、探测器等相关技术的探讨; 20 世纪 70 年代中后期, Waren S Ross 等人对紫外光在大气中的传输特性以及散射通信的可行性等技术内容进行了理论研究; Michael E Neer 等人研制了一台紫外音频通信用试验样机, 并进行了大量试验; 1985 年, 美国人 M Geller 研制了一套紫外日盲型短距离通信系统, 通信速率 1 200 bps, 通信距离 0.75 km, 可正常工作一年. 美国在紫外光通信方面开展了大量研究, 但具体情况和技术细节均处于保密状态. 国内起步较晚,

中科院空间科学与应用研究中心开展了相关的研究工作. 在紫外光通信研究中, 大气信道模型研究是难点问题之一, 国内外学者对紫外光通信大气信道模型的研究都是基于 1990 年 Luegtten 等人提出的非直视单散射信道模型展开的^[4], 且多数只停留在特定角度、距离情况下的能量分布分析问题上. 而根据目前发射系统发射功率和接收系统探测灵敏度的实际情况要求链路损耗在 100~120 dB 之间, 因此, 根据实际应用情况, 可以通过改善工作方式来提高通信距离和传输速率.

本文介绍了紫外光大气传输理论和非直视单散射模型. 针对紫外光通信系统的结构设计对信道能量损耗的影响进行了理论上的定性分析. 通过对不同天气、不同通信距离、不同系统结构参量条件下, 大气信道所产生的能量损耗的定量仿真实验, 分析比较了不同结构参量情况下, 紫外光在大气信道传输的能量损耗的变化特征. 仿真结果在提高紫外光通信系统的通信距离方面, 为系统设计提供理论依据.

1 紫外光大气传输理论

紫外光通信以自由大气为传输介质, 其传输性能与传输范围内大气的品质密切相关. 大气中的臭氧浓度会影响紫外光的辐射强度; 大气中散射粒子的浓度、大小、均匀性、几何尺寸等都可影响紫外光的传输特性^[4-7].

基金项目: 国家高技术研究发展计划

第一作者: 丁莹(1983—), 女, 助理研究员, 博士, 主要研究方向为计算机仿真、图像处理. Email: dingying@cust.edu.cn

收稿日期: 2012-02-09; **修回日期:** 2012-04-17

1.1 大气的吸收作用

紫外光通信主要采用日盲紫外线(200~280 nm),对这部分紫外光吸收能力最强的是臭氧,一个地区的臭氧浓度直接影响紫外光通信信号的强度.臭氧浓度越高,其传输损耗就越大.臭氧的这种吸收作用一方面减少了传输距离,另一方面又为紫外光通信隐密传输提供了基础.正是由于这种吸收作用,导致紫外光在大气传输中有较大的衰减因子,使得在传输范围以外的信号很难被截收.

1.2 大气的散射作用

紫外辐射的散射特性是紫外光通信的基础.大气分子和浮质对紫外光辐射的散射,使得向高空发射的光信号改变方向,从而被探测器接收.一般来说,与紫外光波长越接近的大气粒子对其散射强度越大.大气中主要的散射体来自大气分子和悬浮颗粒,由于大小的差异,它们具有不同的散射特性.分子大小比紫外光波长小得多,是典型的瑞利散射;而悬浮颗粒比紫外光波长大得多,是米氏散射.研究表明,分子的散射作用明显大于悬浮颗粒的散射,因此,在理论计算中,通常只考虑瑞利散射,而忽略悬浮颗粒的散射作用^[8].

大气散射和吸收的能力表现为散射因子 k_s 、吸收因子 k_a 、衰减因子 k_e ,且 $k_e = k_a + k_s$.紫外光大气传输理论和散射模型及仿真系统的建立是紫外光无线通信关键问题之一.国内大多集中在可见光与红外辐射及其大气传输特性的研究上,而对紫外传输特性的研究相对较少.目前研究主要采用的是美国空军地球物理实验室(AFGL)基于大气吸收、瑞利散射和气溶胶微观物理模型等提出的LOWTRAN模型,对紫外光无线通信具有实际指导意义.

2 非直视单散射模型

NLOS紫外光通信模型^[9-15]如图1.假设发射光轴和接收轴相交于同一平面,后面的讨论都基于这一假设. T_x 为发射机光锥, R_x 为接收机视锥, V 为两圆锥相交的体积,发射机和接收机的仰角分别为 β_t 、 β_r ,发射束散角和接收视场角分别为 θ_t 、 θ_r (本文

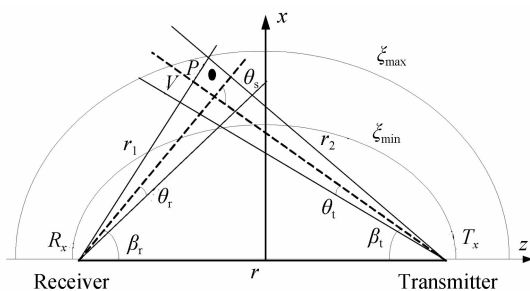


图1 非直视紫外光通信系统示意图

Fig. 1 Diagram of NLOS UV communication system

使用半角),通信距离为 r , V 中任意一点到达接收机和发射机的距离分别为 r_1 和 r_2 , $\theta_s = \beta_t + \beta_r$.光信号由发射仰角和接收仰角交叉部分(有效散射区域)的散射体散射后到达接收机,从而完成通信.通过计算有效散射区域经大气散射光信号的数量,得出探测接收机接收到的能量.到达接收机的光信号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_e)等决定的.几何结构主要包括发射机束散角、接收机视场角、发射机仰角、接收机仰角以及传输距离等.

假设 $t=0$ 时刻,一个能量为 E_t 的脉冲经发射圆锥角 T_x 发射后,经各向同性介质散射和吸收后到达距发射机距离为 r_2 的 V 内一点 P ,当 P 位于发射圆锥角内,那么经 $t=r_2/c$ (c 代表波速)时间传输后, P 点处的能量为: $H_P = \frac{E_t \exp(-k_e r_2)}{\Omega_t(r_2^2)}$,其中, $\Omega_t = 4\pi \sin^2(\theta_t)$ 指发射固有圆锥角, k_e 为衰减因子.

将微分体积元 δV 包围点 P 看作一个二级光源,其能量为

$$\delta Q_P = k_s H_P \delta V = \frac{k_s E_t \exp(-k_e r_2)}{\Omega_t(r_2^2)} \delta V \quad (1)$$

二级光源单位圆锥角发射的能量是散射角 θ_s 的函数,其表达式为 $\delta R_P = \delta q_P(P(\mu))$,其中, $\mu = \cos(\theta_s)$, $P(\mu)$ 为单散射相位函数可由式(2)计算得到.

$$P(\mu) = \frac{k_s^{\text{Ray}}}{k_s} p^{\text{Ray}}(\mu) + \frac{k_s^{\text{Mie}}}{k_s} p^{\text{Mie}}(\mu) \quad (2)$$

式中, $p^{\text{Ray}}(\mu)$ 和 $p^{\text{Mie}}(\mu)$ 分别为瑞利散射相位函数和米氏散射相位函数^[12],且

$$\begin{cases} p^{\text{Ray}}(\mu) = \frac{3[1+3\gamma+(1-\gamma)\mu^2]}{16\pi(1+2\gamma)} \\ p^{\text{Mie}}(\mu) = \frac{1-g^2}{4\pi} \left[\frac{1}{(1+g^2-2g\mu)^{3/2}} + f \frac{0.5(3\mu^2-1)}{(1+g^2)^{3/2}} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中, γ 、 g 、 f 是模型参量.

能量 R_P 传递到距离为 r_1 的接收机上,接收机探测器每单位面积元接收到的能量为

$$\delta E_r = \frac{E_t k_s P(\mu) \delta V \cos(\zeta) \exp(-k_e(r_1+r_2))}{\Omega_t r_1^2 r_2^2} \quad (4)$$

式中, ζ 是接收机、微分体积元连线矢量与接收轴的夹角, $\cos(\zeta)$ 用来求接收机探测到的有效面积.

t 时刻接收总能量 E_r 可以通过对 δE_r 的积分求得,在椭球坐标系中, $t = (r_1+r_2)/c$, $\xi = ct/r$ ($\xi_{\min} < \xi < \xi_{\max}$).则能量衰减定义为: $\eta = 10 \lg(E_r/E_t)$.

3 仿真结果与分析

由理论推导分析可见:在相同大气条件下,紫外

光通信系统的几何结构直接影响到接收机的光信号数量. 因此, 本文分别将发射光束散角、接收机视场角、发射机仰角、接收机仰角以及传输距离等几何结构参量对大气信道能量衰减的影响进行了仿真. 为详细地分析仿真结果, 按系统几何结构参量的不同将通信模式进一步细分为常见的三种: 图 2(a) 为第一种通信模式, 垂直全向发射垂直全向接收模式,

即 $\beta_t = \beta_r = 90^\circ, \theta_t = \theta_r = 45^\circ$; 图 2(b) 为第二种通信模式, 斜非全向发射垂直全向接收模式, 即 $0 \leq \beta_t < 90^\circ, \beta_r = 90^\circ$, 发射机的束散角 $0 \leq \theta_t < 45^\circ$, 接收机的束散角 $\theta_r = 45^\circ$; 图 2(c) 为第三种通信模式, 斜非全向发射斜非全向接收模式, 即发射机的仰角 $0 \leq \beta_t < 90^\circ$, 接收机的仰角 $0 \leq \beta_r \leq 90^\circ$, 发射机的束散角 $0 \leq \theta_t < 45^\circ$, 接收机的束散角 $0 \leq \theta_r < 45^\circ$.

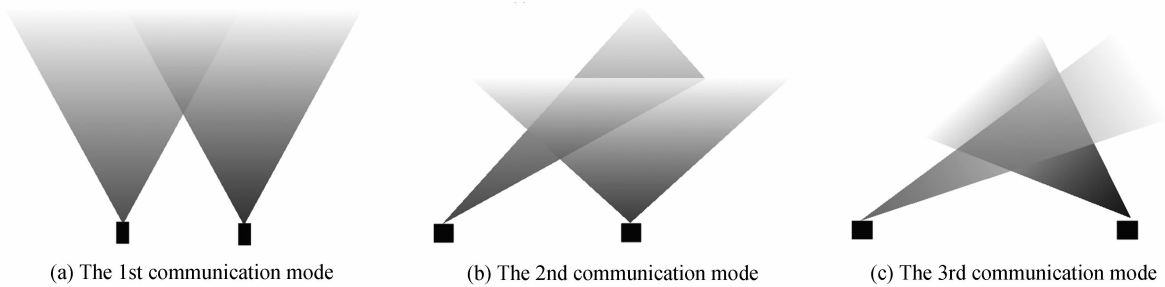


图 2 紫外光两节点通信系统工作模型
Fig. 2 Different modes of UV communication system

3.1 通信距离对能量衰减的影响

通信距离的长短直接影响通信链路的能量损耗大小, 因此, 通过能量衰减随通信距离的变化曲线可以计算出各种情况下的最远通信距离. 针对紫外光通信系统常见的三种不同工作模式, 本文对不同天气条件下, 通信距离对能量损耗的影响进行了仿真, 仿真结果如图 3. 图中 A、B、C 分别表示能见度为 20 km、10 km 和 5 km.

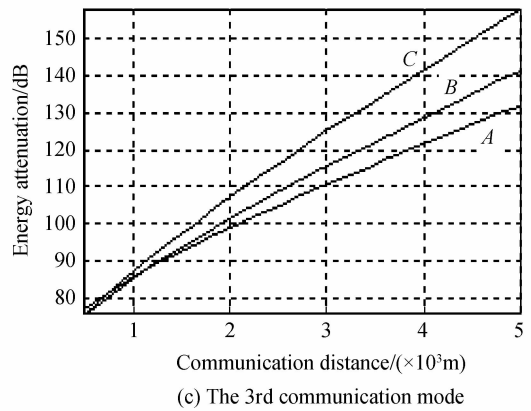
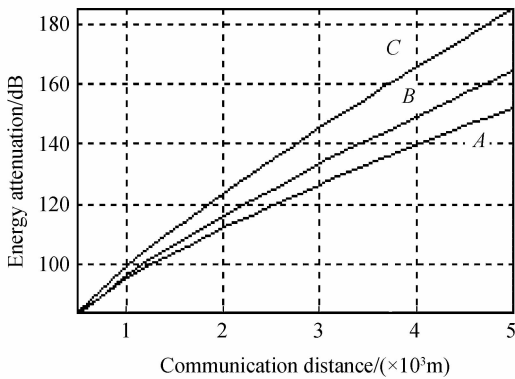
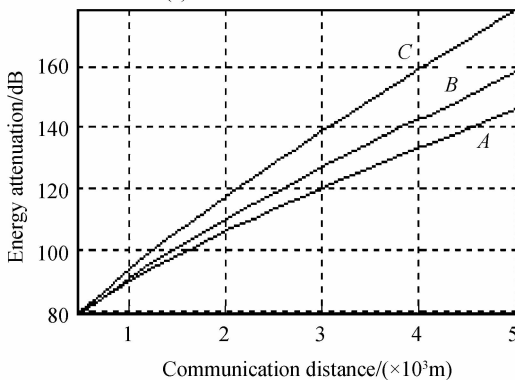


图 3 能量衰减随通信距离的变化曲线
Fig. 3 The curves of attenuation with different transmission distances



(a) The 1st communication mode



(b) The 2nd communication mode

由图 3 可见: 1) 能量衰减随通信距离的增加而迅速增大, 通信距离增加 1 km, 能量衰减增加近 20 dB; 2) 不同能见度条件下, 能量衰减随通信距离的递增程度不同, 相同通信距离情况下, 能见度越低能量衰减越大; 3) 随通信距离的增加, 能见度不同的三条统计曲线间的差距逐渐增大, 即通信距离越远, 能见度对能量衰减的影响越严重; 4) 三种不同通信模式下的统计曲线趋势相同, 但能量衰减程度不同, 相同能见度条件下, 相同能量衰减时, 可通信的最远距离不同; 如能见度 10 km, 能量衰减 100 dB 时, 第一种通信模式最远通信距离约 1.1 km, 第二种通信模式最远通信距离约 1.5 km, 第三种通信模式最远通信距离约 2 km; 5) 在能见度较好情况下, 即使第三种模式, 通信距离大于 2 km 时, 能量衰减也要大于 100 dB, 可见紫外光散射通信只适合近距离通

信,特别常用于1 km以内的集群通信,而通过改变通信模式可以适当提高通信距离。

3.2 发射接收仰角对能量衰减的影响

仿真条件:波长为254 nm,大气能见度为20 km,通信距离1 km.三种通信模式下,能量衰减随发射、接收仰角变化的仿真结果如图4.由图可见:1)三种通信模式的统计曲线变化趋势相同,能量衰减均随发射仰角的增加而增加,随接收仰角的增加而增加;2)三条能量衰减随发射仰角曲线变化的

幅度不相同,当发射仰角从45°变到90°时,第一种模式的能量衰减增加约8 dB,第二种模式的能量衰减增加约14 dB,第三种模式的能量衰减增加约17 dB,因此,发射仰角对第三种通信模式的通信系统的影响最大;3)从三条能量衰减随接收仰角曲线变化的幅度可见,当发射仰角从45°变到90°时,第一种模式的能量衰减增加约8 dB,第二种模式的能量衰减增加约5 dB,第三种模式的能量衰减增加约6 dB,因此,接收仰角对三种通信模式的通信系统的

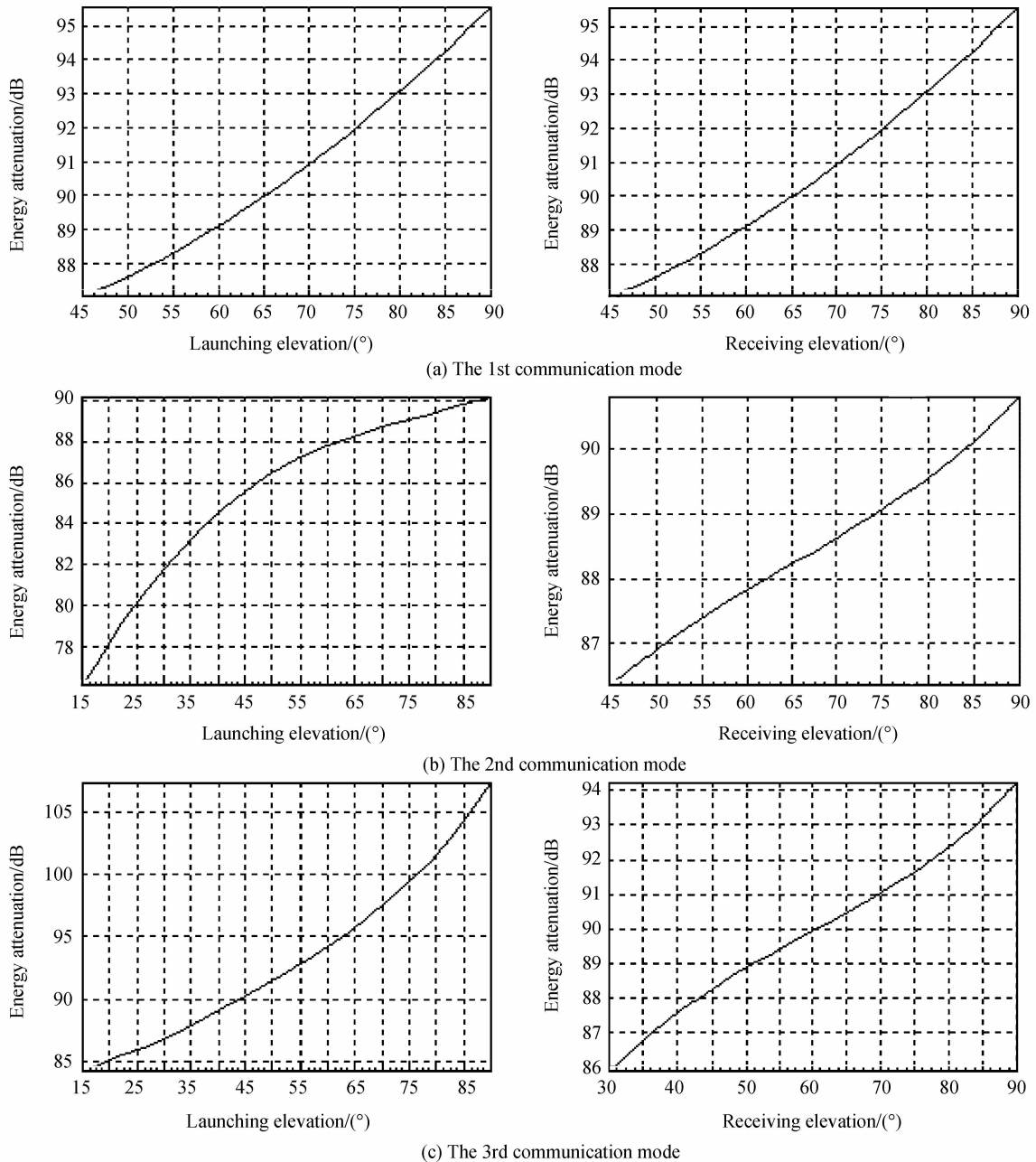


图4 能量衰减随发收仰角的变化曲线

Fig. 4 The curves of attenuation with different launching and receiving elevations

影响程度近似;4)第一种模式中,发射仰角和接收仰角对能量衰减的影响程度相近;而第二、三种模式中,发射仰角对能量衰减的影响程度远大于接收仰角.综上,为提高链路的通信距离,在紫外光通信系

统设计时,应尽量降低系统的发射仰角和接收仰角.

3.3 发射束散角和接收视场角对能量衰减的影响

仿真条件:波长为254 nm,大气能见度为20 km,通信距离1 km.三种通信模式下,能量衰减

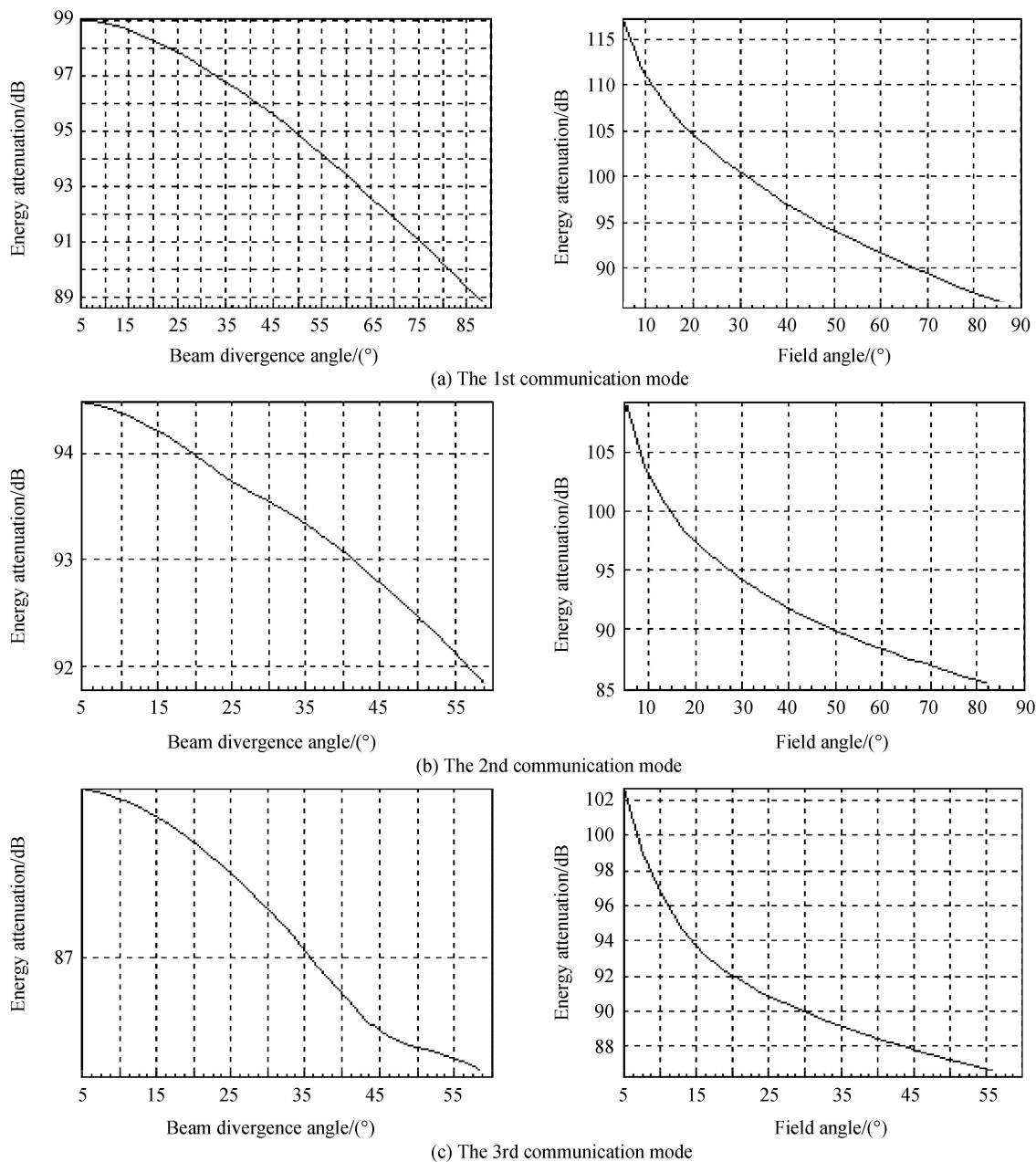


图5 能量衰减随发射束散角、接收视场角的变化曲线

Fig. 5 The curves of attenuation with different beam divergence angles and field angles

随发射束散角、接收视场角变化的仿真结果如图5。由图可见:1)三种通信模式的统计曲线变化趋势相似,能量衰减均随发射束散角的增加而减少,随接收视场角的增加而减少;2)三条能量衰减随发射束散角曲线变化的幅度不相同,当发射束散角从 5° 变到 60° 时,第一种模式的能量衰减降低约6 dB,第二种模式的能量衰减降低约3 dB,第三种模式的能量衰减降低约1.5 dB,因此,发射束散角对通信系统的通信性能的影响均不大,其中,对第一种通信模式的影响最大,对第三种模式的影响很小;3)从三条能量衰减随接收视场角曲线变化的幅度可见,当接收视场角从 5° 变到 60° 时,第一种模式的能量衰减降低约25 dB,第二种模式的能量衰减降低约16 dB,第三种模式的能量衰减降低约15 dB,因此,接收视场

角对通信系统的通信性能的影响均较大,其中,对第一种通信模式的影响程度最大,另外两种相近;4)通过比较发射束散角和接收视场角对能量衰减的影响程度可知,接收视场角对能量衰减的影响程度远大于发射束散角;综上,为提高链路的通信距离,在紫外光通信系统设计时,应尽量增加系统的发射束散角和接收视场角,其中,增加发射束散角改善不明显,增加接收视场角虽改善效果明显,但同时需要考虑背景光的影响。

4 结论

本文介绍了紫外光大气传输理论和非直视单散射模型。在此模型基础上,针对紫外光通信系统的结构设计对信道能量损耗的影响进行了理论上的定性

分析. 对不同天气, 不同通信距离, 不同系统结构参数条件下, 大气信道所产生的能量损耗进行了定量仿真实验. 通过对仿真结果的分析, 得出:

1) 能量衰减随通信距离的增加而迅速增大; 不同能见度条件下, 能量衰减随通信距离的递增程度不同, 能见度越低能量衰减越大; 通信距离越远, 能见度对能量衰减的影响越严重; 因此, 紫外光散射通信适用于近距离通信.

2) 能量衰减随发射仰角的增加而增加, 随接收仰角的增加而增加; 发射仰角对能量衰减的影响程度大于接收仰角; 因此, 为提高链路的通信距离, 在紫外光通信系统设计时, 应尽量降低系统的发射仰角和接收仰角.

3) 能量衰减随发射束散角的增加而减少, 随接收视场角的增加而减少; 接收视场角对能量衰减的影响程度远大于发射束散角; 因此, 为提高链路的通信距离, 在紫外光通信系统设计时, 应尽量增大系统的发射束散角和接收视场角, 尤其是接收视场角.

本文的结论是针对紫外光通信系统在大气信道中的能量损耗而言的, 若考虑到通信的速率, 还需进一步对系统的时间延迟和脉冲展宽等指标进行仿真分析.

参考文献

- [1] LI Ji-ye, QIU Ke-ni. Military application of UV communication [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, **3**(4): 19-21.
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] DI Ying, TONG Shou-feng, DONG Ke-yan, et al. Study and simulation of atmospheric UV communication performance with vertical transmitter-receiver[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1851-1856.
丁莹, 佟首峰, 董科研, 等. 大气信道对垂直收发模式紫外光散射通信性能影响的仿真研究[J]. *光子学报*, 2010, **39**(10): 1851-1856.
- [3] CAO Fu-yun, XU Jun, ZHU Gui-fang, et al. Regional ultraviolet laser secret communication and application [J]. *Optical Communication Technology*, 2006, **5**: 59-61.
曹付允, 徐军, 朱桂芳, 等. 区域紫外激光保密通信及其应

- [4] LAN Tian, NI Guo-qiang. Simulation research on ultraviolet atmospheric transmission in UV communication [J]. *Transactions of BEIJING Institute of Technology*, 2003, **23**(4): 419-423.
蓝天, 倪国强. 紫外通信的大气传输特性模拟研究[J]. *北京理工大学学报*, 2003, **23**(4): 419-423.
- [5] CHEN Jun-hong, YANG Xiao-li. Research of the atmospheric factors of solar blind ultraviolet communication [J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(4): 38-39.
陈君洪, 杨小丽. 非视线“日盲”紫外通信的大气因素研究[J]. *激光杂志*, 2008, **29**(4): 38-39.
- [6] 张静. 非直视紫外光通信大气信道模型研究及编解码设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2007: 18-28.
- [7] JIN Wei-qi, HE Yu-qing, WANG Ling-xue, et al. Analysis of atmospheric ultraviolet transmission by computer simulation [J]. *Acta Armamentarii*, 2001, **22**(1): 48-52.
金伟其, 何玉青, 王岭雪, 等. 大气紫外传输特性的计算机仿真分析[J]. *兵工学报*, 2001, **22**(1): 48-52.
- [8] SHAW G A, NISCHAN M, IYENGAR M, et al. NLOS UV communication for distributed sensor systems [C]. *SPIE*, 2000, **4126**: 83-87.
- [9] JIA Hong-hui, CHANG Sheng-li, YANG Jian-kun, et al. Monte Carlo simulation of atmospheric transmission characteristics in Non-Line-of-Sight ultraviolet communication [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 955-960.
贾红辉, 常胜利, 杨建坤, 等. 非视线紫外通信大气传输特性的蒙特卡罗模拟[J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 955-960.
- [10] SHAW G A, SIEGEL A M, MODEL J, et al. Field testing and evaluation of a solar-blind UV communication link for unattended ground sensors [C]. *SPIE*, 2004, **5417**: 250-261.
- [11] SHAW GRAY A, SIEGEL A M, MODEL J, et al. Recent progress in short-range ultraviolet communication [C]. *SPIE*, 2004, **5796**: 214-225.
- [12] SIEGEL A M, SHAW G A, MODEL J, et al. Short-range communication with ultraviolet LEDs [C]. *SPIE*, 2004, **5530**: 182-193.
- [13] REILLY D M, MORIARTY D T, MAYNARD J A. Unique properties of solar blind ultraviolet communication systems for unattended ground sensor networks [C]. *SPIE*, 2004, **5611**: 244-254.
- [14] SHAW G A, NISCHAN M, IYENGAR M, et al. NLOS UV communication for distributed sensor systems [C]. *SPIE Integrated Command Environments*, 2000, **4126**: 83-96.
- [15] XU Zheng-yuan, DING Hai-peng, SADLER B M, et al. Analytical performance study of solar blind non-line-of sight ultraviolet short-range communication links [J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(16): 1860-1862.

Approach of Distance Improving of Atmospheric UV Communication

DING Ying, FAN Jing-tao, TONG Shou-feng, JIANG Hui-lin, DONG Ke-yan

(Key Laboratory of Technology of Photo-Electronic Measure-Control and Laser Transfers (Ministry of Education), Changchun University of Science & Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The UV atmospheric transmission theory and the non-line of sight single scattering channel model were introduced. According to the model, the transmission loss caused by atmospheric channel under different structure design was quantitatively analyzed. Attenuation was quantitatively simulated under different atmospheres, communication patterns and structure parameters. Experimental results show that attenuation increases with increasing transmission distance; under different visibility, attenuation increasing different, and the higher visibility, the less attenuation, the far transmission distance; transmission distance increases with decreasing launching elevation and receiving elevation, and influence degree of launching elevation is more series than receiving elevation; transmission distance increases with increasing beam divergence angle and decreasing field angle, and influence degree of field angle is more series than beam divergence angle.

Key words: Optical communications; Ultraviolet; Atmospheric channel; Transmission loss; Communication distance