

# 紫外光通信中基于大气散射理论的传输模型

刘 晔 徐智勇 汪井源

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

**摘要** 在研究单次散射模型的基础上, 针对单次散射模型不能对天气变化对紫外光信号造成的影响做出模拟的不足, 结合大气散射理论构建了紫外光传输的二次散射模型。研究了瑞利散射和米氏(Mie)散射在四种典型天气条件下的散射相函数, 仿真得出了紫外光被大气中的粒子散射后的能量分布情况, 将其引入二次散射模型, 并确定了各种天气条件下的散射粒子浓度后对紫外光通信系统做出性能仿真。计算结果表明, 二次散射模型可以仿真不同的天气条件下的紫外光通信系统的性能, 从仿真结果上验证了非直视通信的可实现性。并得出, 在雨、雾天气下, 紫外光信号衰减剧烈, 接收仰角不可过大; 在天气晴好时, 能更好的实现紫外光非直视通信, 接收仰角可达到  $180^\circ$ 。长距离通信时, 天气状况变化对通信性能影响更大。

**关键词** 紫外光通信; 二次散射模型; 散射相函数; 传输特性;

**中图分类号** TN929 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0062

## Study on The Transport Model Based on Atmosphere Scattering Theory in Ultraviolet Communication

Liu Ye Xu Zhiyong Wang Jingyuan

(*Institute of Communications Engineering, PLA University of Science and Technology,*  
*Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

**Abstract** Aiming at the single scattering model cannot figure how the ultraviolet communication was affected by different weather. Twice scattering model was put forward combined with the atmosphere scattering theory after studying the single scattering model. Phase function for Rayleigh and Mie scattering was studied in several weather conditions. After being scattered by particles, UV's energy density distribution was simulated, and then the performance of ultraviolet communication system was simulated combining with particle's thickness effectively. Simulation results indicate that non-line sight of communication is realizable, and twice scattering model can be used in different weather condition. Furthermore, the attenuation of UV signal is very sharp in rain and fog, which restricts the receiver apex angle comparatively, and that it is appropriate to UV communication in good weather, under which the receiver apex angle can reach  $180^\circ$ . Weather factor is more important in long-distance communication.

**Key words** ultraviolet communication; twice scattering model; scattering phase function; propagation performance

## 1 引 言

紫外光信号经过大气散射可以绕过障碍物实现非直视(non-line of sight)通信, 通信时无需进行光学对准便可进行。这一特性使其在具有红外自由空间光通信方式优点的同时, 可以适应复杂的地形环境, 具有更加广泛的应用范围。

紫外光被大气散射是一个十分复杂的过程。为了研究紫外光大气传输性能, 需建立大气散射模型。

Mark R. Luetttgen 和 Jeffrey H. Shapiro 提出了“非视线单次散射模型”<sup>[1]</sup>, 在模型中假设紫外光从光源到检测器的非直视传输只经过一次散射<sup>[2]</sup>。利用单散模型可以在良好天气条件下模拟紫外光信号的冲击响应、延时、衰减等特性, 但是对于多变天气条件, 及远距离传输的模拟则与实际情况很难相符。本文在研究单散模型的基础上对其进行了改进, 建立了可以模拟不同天气条件下紫外光传输特性的二

**作者简介:** 刘 晔(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事紫外光通信方面的研究。E-mail: hotener@yahoo.cn

**导师简介:** 徐智勇(1972-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事无线光通信、OCDMA、WiMAX 方面的研究。

E-mail: xzy123@sina.com

次散射模型,模拟了常见天气、霾天气、雨天和雾天气 4 种情况下紫外光传输特性,分析了远距离传输时各种天气对通信系统的影响。

## 2 二次散射模型的建立

在单散模型中,Mark R. Luetggen 和 Jeffrey H. Shapiro 提出了长球面坐标系,很巧妙的对散射范围进行了界定并实现了对散射体的积分,从而可以利用单散模型来模拟天线展开角、收发仰角、距离等参数的变化对通信性能的影响。在此基础上,本文依据大气散射理论,更深入的研究了粒子对紫外光的散射情况,建立了二次散射模型。

### 2.1 初次散射

利用单次散射模型的长球面坐标系<sup>[1]</sup>,可以建立初次散射模型。

如图 1 所示,经调制后的信号光由发送端发出,被处于传输路径上的粒子 A 散射,粒子在长球面坐标系中的坐标为  $(\xi, \eta, \Phi)$ 。粒子 A 接收到的能量为

$$Q_1 = \frac{\pi r^2}{R_1} \frac{Q}{\Omega_T} \exp(-K_a R_1), \quad (1)$$

式中  $Q$  为一个光脉冲的能量,  $\Omega_T$  为发射角的球面度,  $r$  为粒子半径,  $R_1$  为光源到粒子的距离,  $K_a$  为大气吸收系数,  $Q_1$  为单个粒子接收到的能量。

根据散射理论,粒子接收到能量后会作为一个二次源将能量散射出去,且波长不变,于是,有下式

$$Q_i = \frac{Q_1 K_s}{4\pi} P(\cos \theta), \quad (2)$$

$K_s$  为散射系数,  $P(\cos \theta)$  为散射相函数,  $\theta$  为散射光线与入射到粒子的光线的夹角,  $Q_i$  为散射光在  $\theta$  角处单位球面度上的能量。

根据大气散射理论,被粒子散射后的光能量主要集中在前向和后向的一定角度内,为了计算方便,

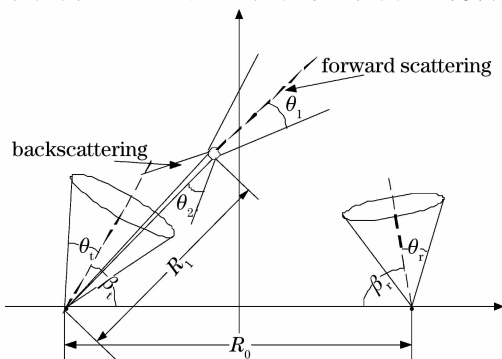


图 1 初次散射

Fig. 1 First scattering

在研究传输模型的时候,只考虑这两个角度内的光。设前向散射集中角为  $\theta_1$ , 后向散射集中角为  $\theta_2$  ( $\theta_1$  和  $\theta_2$  的取值与天气情况有关系), 然后进行第二次散射的计算。

### 2.2 粒子的前向散射模型

前向散射就是主轴与入射光方向一致的那一部分光,可以根据不同的天气条件下的散射相函数来确定其能量的集中角(在文章的第三部分有论述)。假设经粒子散射后的光再经一次散射便会进入接收端,这样便可以建立第二次散射模型,如图 2 所示。

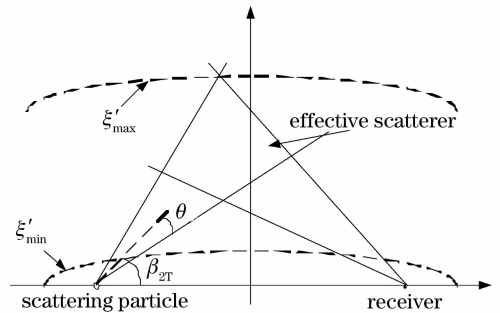


图 2 前向散射

Fig. 2 Forward scattering

以散射粒子 A 和接收端为焦点建立长球面坐标系,如图 3 所示。

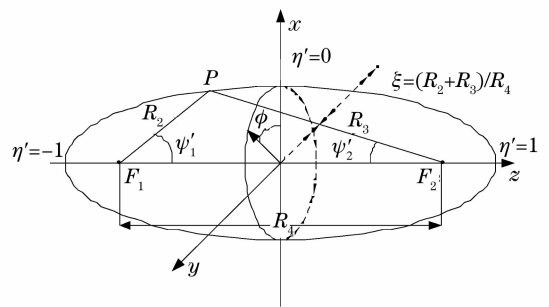


图 3 长球面坐标系

Fig. 3 Prolate-spheroidal coordinates

在有效散射体内有一点  $P$ , 坐标为  $(\xi', \eta', \varphi')$ , 与粒子 A 的距离为  $R_2$ , 则达到  $P$  点的能量表示为

$$H_p = Q_i R_2^2 \exp(-K_a R_2). \quad (3)$$

围绕  $P$  点, 在一个可积分体积范围内, 光能量被散射, 这可以作为一个三次源来求散射后重新发射出的能量

$$\delta Q_p = H_p K_s \delta V, \quad (4)$$

上式中  $\delta V = (R_4^3/8)(\xi'^2 - \eta'^2)\delta\xi'\delta\eta'\delta\varphi'$ ,  $R_4$  为粒子到接收端之间的距离。在单位球面度上的散射能量表示为

$$\delta R_p = \delta Q_p P(\cos \theta')/4\pi. \quad (5)$$

( $\cos \theta'$ ) 为在质点  $P$  处的散射相函数。则在接收端, 单位面积上的能量为

$$\delta H_s = \delta R_p \cos \zeta \exp(-K_a R_3) / R_3^2, \quad (6)$$

式中  $R_3$  为  $P$  点到接收端的距离,  $\zeta$  为接收展开角的角平分线与接收点到散射点的向量之间的夹角。到此, 推算出了二次散射模型中由发射端发送一个能量为  $Q$  的脉冲时, 接收端单位面积上接收到的能量式。

前面假设了信号光第一次遇到散射粒子, 然后被散射作为二次源重新发出。在实际情况中散射粒子并不是没有空隙的紧密的排列, 而是在单位体积中有一定的密度。因此, 应该考虑大气中的粒子浓度。整理后应为

$$\delta H_{Rf} = \delta R_p \delta V_1 n(r) \cos \zeta \exp(-K_a R_3) / R_3^3, \quad (7)$$

式中  $\delta V_1 = (R_0^3/8)(\xi^2 - \eta^2) \delta \xi \delta \eta \delta \varphi$ ,  $n(r)$  为半径为  $r$  的粒子在大气中的浓度。

将上述一系列关系式代入到(7)式中整理时, 可以利用一下关系

$$R_1 = \frac{(\xi + \eta)R_0}{2}, R_2 = \frac{(\xi + \eta)R_4}{2},$$

$$R_3 = \frac{(\xi - \eta)R_4}{2}, R_4 = \frac{(\xi - \eta)R_0}{2},$$

$$\varphi'_1(\xi, \eta) = -\varphi_1(\xi, \eta), \varphi_2(\xi, \eta) = -\varphi_1(\xi, \eta)$$

$$\varphi'_2(\xi, \eta) = \arccos\left(\frac{\cos \theta_R - \cos \beta_R \cos \varphi'_1}{\sin \beta_R \sin \varphi'_1}\right)$$

$$\varphi_2(\xi, \eta) = \arccos\left(\frac{\cos \theta_R - \cos \beta_R \cos \varphi_1}{\sin \beta_R \sin \varphi_1}\right), \quad (8)$$

另外, 在长球面坐标系中有:  $\delta \xi = \frac{c \delta t}{r}$ , 因此可将(7)

式简化为功率值  $\delta E$ , 最终得到如下积分式

$$E(\xi, \xi) = \frac{r^2 K_s^2 c^2 Q}{256 \pi \Omega_T} \int_{\eta_1(\xi)}^{\eta_2(\xi)} \int_{\varphi_1(\xi)}^{\varphi_2(\xi)} p(\cos \theta) \times p(\cos \theta') f(\xi, \eta, \xi, \eta) d\eta d\eta', \quad (9)$$

式中

$$f(\xi, \eta, \xi, \eta) = \exp[(\xi + \eta)R_0/2 + \xi(\xi - \eta)R_0/2] \times \frac{g[\varphi'_2(\xi, \eta)] \varphi_2(\xi, \eta) (\xi + \eta)^2 (\xi - \eta)}{(\xi + \eta)^2}, \quad (10)$$

$$g[\varphi'_2(\xi, \eta)] = \varphi'_2(\xi', \eta') \cos \beta_R \cos \varphi'_1 + \sin \beta_R \sin \varphi'_1 \sin[\varphi'_2(\xi', \eta')]. \quad (11)$$

然后, 根据收发天线展开角、仰角确定  $\xi$  和  $\xi'$ , 通过积分

$$H_{Rf} = \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \int_{\xi'_{\min}}^{\xi'_{\max}} E(\xi, \xi') d\xi d\xi', \quad (12)$$

可以得到前向散射到达接收端的能量。

### 2.3 粒子的后向散射模型

除了前向散射外, 粒子还可以将入射光逆向散

射。逆向散射的光也有一部分会到达接收端。与前向散射相比, 后向散射的能量集中角和能量密度会有所不同。但同样可以建立模型来求得其到达接收端的能量。

如图 4 所示, 建立后向散射模型。同前向散射的计算方法相同, 利用式(12)可以得出接收端接收到的粒子的后向散射能量  $H_{Rb}$ 。最后接收端接收到的能量为前、后向散射能量之和:  $H_R = H_{Rf} + H_{Rb}$ 。

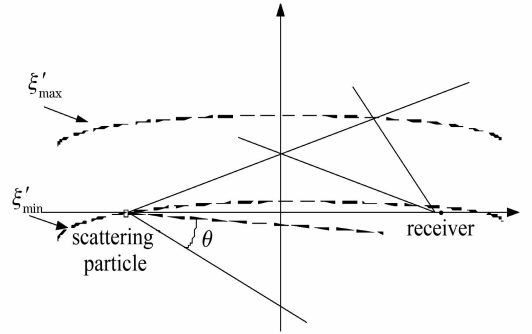


图 4 后向散射

Fig. 4 Backward scattering

### 3 散射相函数

散射相函数是指对于特定波长的光, 在某个给定方向上单位立体角中散射能量和在所有方向上平均的单位立体角中的散射能量之比<sup>[3]</sup>。它反映了一束光经粒子散射后围绕粒子的能量分布情况, 因此在特定天气情况下选取合适的相函数, 对于传输模型仿真的准确性非常重要。

根据大气散射理论, 紫外光在大气中传输, 主要会发生两种散射, 即瑞利散射和米氏(Mie)散射。这两种散射都是弹性散射, 即散射光与入射光波长相同, 散射过程中没有能量交换。根据粒子尺寸与光波长的关系, 粒子半径远小于波长时, 用瑞利散射理论解释。当粒子的尺度和激光波长相比不能忽略时, 用 Mie 散射理论解释(一般将直径大于波长 0.03 倍的粒子造成的散射称为 Mie 散射<sup>[3]</sup>)。

瑞利散射主要是由大气分子引起的, 前向和后向散射的能量呈对称分布, 如图 5 所示。

由图 5 可见, 对于瑞利散射, 前向散射和后向散射相等, 随角度变化作对称分布, 在  $0^\circ$  和  $180^\circ$  角时的散射能量达到极大值, 在  $90^\circ$  时散射能量最小。

对于紫外光通信, 当天气晴好, 能见度比较高时, 空气中的气溶胶和悬浮微粒比较少, 其作用的散射体主要为大气分子, 在这种情况下紫外光传输以瑞利散射为主。在散射模型的计算中, 选取的相函

数为  $P(\cos\theta) = 0.7269(1 + 0.932\cos^2\theta)$  [4]，其取值随角度变化曲线如图 5(b) 所示。

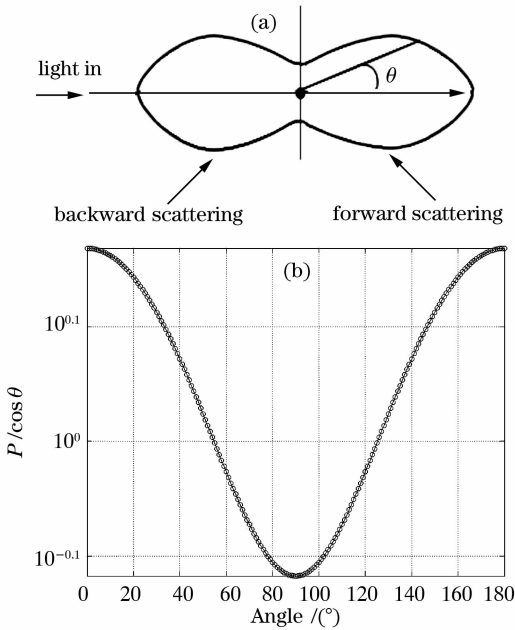


图 5 瑞利散射. (a) 角谱图; (b) 散射相函数

Fig. 5 Rayleigh scattering

(a) Angle spectrogram; (b) Scattering phase function

对于 Mie 散射, 情况则要复杂的多。它主要是由大气中的气溶胶引起, 其散射强度比瑞利散射大得多。散射过程中, 粒子将入射光向周围空间散射并不均匀, 粒子尺度越大, 前向散射愈强, 后向散射愈弱[5]。如云、雾对紫外光的散射主要表现为 Mie 散射[6]。

图 6(a) 为粒子 Mie 散射光能量分布的模拟图, 随角度变化会出现很多极大值和极小值, 与瑞利散射有明显不同[7]。此图比较直观的反映了 Mie 散射的特点, 但其散射函数式非常复杂, 为方便计算, 在散射模型的计算时选取经验公式 Henyey-Greenstein 函数作为散射相函数[8]

$$P_{HG}(\theta, g) = \frac{1 - g^2}{(1 + g^2 - 2g\cos\theta)^{3/2}}, \quad (13)$$

式中  $\theta$  为散射方向角,  $g$  为退偏因子, 天气状况决定了  $g$  的取值。根据大气传输理论, 得到不同天气条件下的参数  $g$ , 可仿真出各种 Mie 散射相函数曲线。如图 6(b) 所示, 分别仿真了常见天气状况 ( $g=0.7$ ), 霾天 ( $g=0.8$ ), 雾天 ( $g=0.9$ ) 和雨天 ( $g=0.93$ ) 的 Mie 散射相函数。利用图示分析: 在四种典型天气中, 雨天的前向散射较后向散射的比值最大, 而且前向散射的能量集中角最小, 在  $0^\circ$  时的能量峰值最大。在常见天气模型中, 相函数曲线比较平滑, 其后向散射比其它天气模型下要大。

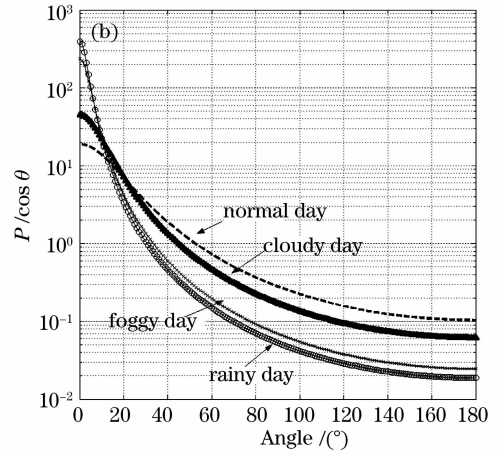
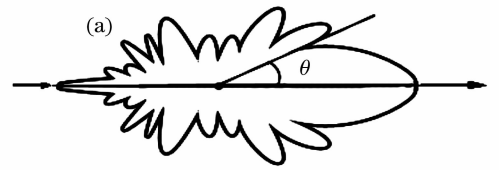


图 6 Mie 散射. (a) 角谱图; (b) 散射相函数

Fig. 6 Mie scattering

(a) Angle spectrogram; (b) Scattering phase function

表 1 大气中的主要粒子半径和浓度

Table 1 Particle radius and thickness in atmosphere

Particle type	Radius/ $\mu\text{m}$	Thickness/ $\text{cm}^{-3}$
air molecule	$10^{-4}$	$10^{19}$
Aitken nucleus	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^{-4} \sim 10^3$
Haze particle	$10^{-2} \sim 1$	$10^3 \sim 10$
Droplet	$1 \sim 10$	$100 \sim 10$
Cloud drop	$1 \sim 10$	$300 \sim 10$
Rain drop	$10^2 \sim 10^4$	$10^{-2} \sim 10^{-5}$

根据以上分析, 在利用散射模型进行紫外光模拟时, 不同的天气条件会有不同的散射相函数和散射粒子分布。大气主要成分为分子和气溶胶微粒。在地面和低空, 以气溶胶散射为主, 此时利用 Mie 散射来分析紫外光传输。随高度增加, 分子散射会越来越多, 此时利用瑞利散射来分析。表 1 为大气中主要粒子的半径和一般情况下的粒子浓度[9]。

## 4 多散模型下的紫外光大气传输性能分析

### 4.1 与单散模型冲击响应对比

图 7(a) 是单散模型的冲击响应, 图 7(b) 是多散模型的冲击响应。在模拟时, 两次散射都取瑞利散射相函数, 主要参数如表 2[4,10] 所示。

表 2 参数表  
Table 2 Parameters

Q	$R_0$	$\lambda$	$r$	$N(r)$	$Ka, Ks$
1 J	25 m	274 nm	$10^{-2} \mu\text{m}$	$10^{-3} \text{cm}^3$	$2.6 \text{km}^{-1}$
$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_i$	$\theta_r$	$\beta_i$	$\beta_r$
$30^\circ$	$30^\circ$	$30^\circ$	$30^\circ$	$45^\circ$	$45^\circ$

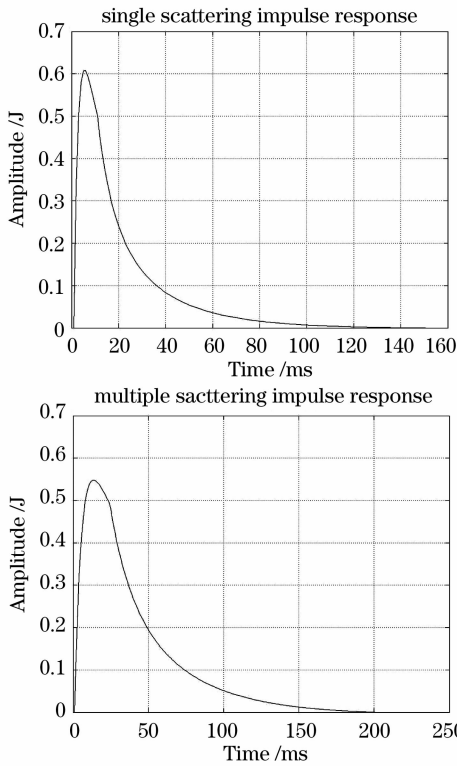


图 7 冲击响应

Fig. 7 Impulse response

从图 9 分析,与单散模型相比,多散模型的冲击响应脉冲下降延时长,接收的峰值功率小。

#### 4.2 接收端天线仰角及通信距离对通信性能的影响

设  $\theta_r = 30^\circ$ ,  $\beta_r = 45^\circ$ , 保持不变,在不同天气状况下(对应不同的散射相函数和散射粒子浓度)改变接收仰角,得到接收端接收能量随仰角的变化。

图 8 为利用多散模型,再根据不同天气状况选取相应的相函数和散射粒子浓度,仿真得出的接收光功率与接受天线仰角之间的关系曲线。从图中可以看出,常见天气和阴霾天气时,在仰角取  $180^\circ$  时,还会接收到一定量的信号光,充分说明了紫外光通信非直视通信的可实现性。在雨天和雾天时,随仰角增大,所接收到的信号光能量衰减很剧烈,尤其是雾天下,由于大气中粒子浓度较大,在仰角为  $160^\circ$  时,就几乎接收不到能量了。可见,雨天和雾天对紫外光通信影响较大,为了得到更好的通信质量,应该

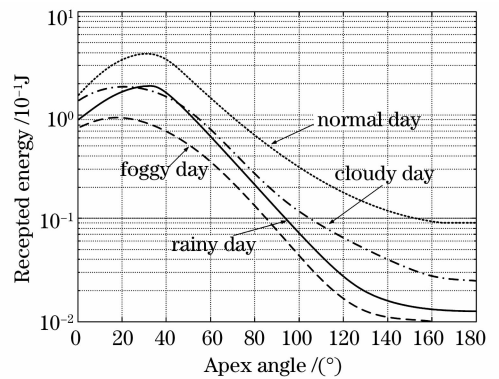


图 8 接收能量-仰角关系

Fig. 8 Relation of Apex angle and received energy

将发射仰角限制在比较小的角度以内。

在表 1 设定的条件下,其它参数不变,只改变通信距离,得到不同天气条件下随着通信距离的增加接收信号能量的衰减情况。如图 9 所示。

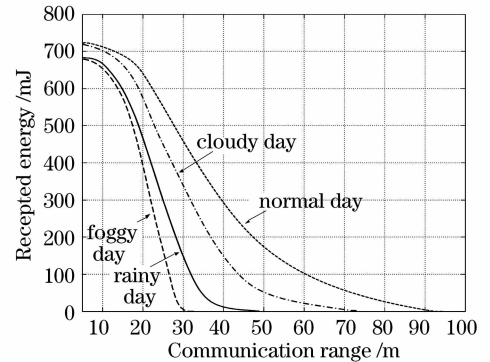


图 9 接收能量-通信距离关系

Fig. 9 Relation of communication range and received energy

在不同的天气条件下,随通信距离的增加,信号有不同的衰减情况。其中,常见天气下衰减最慢,通信距离最长,同样的发射功率可以达到雾天下 3 倍的通信距离。雨天下的紫外光信号衰减比霾天下剧烈。在通信距离比较近时,各种天气条件下的紫外光信号衰减差别不大,但通信距离增加,则差别明显。雾天下衰减最为剧烈,对长距离紫外光通信影响很大。

## 5 结 论

在分析单散模型基础上,构建了二次散射模型,并推导出了传输函数,为多次散射的研究打下了基础。结合大气散射理论,在模型中加入更加具体化的散射相函数、散射粒子密度等参数,得出两种模型的冲击响应,模拟了不同天气条件下的接收仰角和通信距离与接收光功率之间的关系,验证了紫外光

通信非直视通信的可实现性。得出结论,雾天下紫外光衰减最为剧烈,最不适宜应用紫外光通信系统,且通信距离较大时几乎不能实现紫外光非直视通信。在近距离通信时,天气情况对通信质量影响较小,当通信距离增大,天气因素对紫外光通信的影响增加,为了能够得到较好的通信质量,须增加发射光功率,减小收发天线的仰角。

### 参 考 文 献

- 1 Mark R. Luetgen, Jeffrey H. Shapiro. Non-line-of-sight single-scatter propagation model[J]. *J. Opt* ,1991
- 2 H. C Van de Hulst, Light Scattering by Small Particles. New York: Wiley, 1957
- 3 Xu Xiaojun, Lu Qisheng, Shubohong *et al.* . Back scattering model and experiment of laser illuminating[J]. *Infrared and Laser Engineering* ,2001, **30**(1):  
许晓军,陆启生,舒柏宏等.激光照明的大气后向散射理论模拟和试验研究[J]. *红外与激光工程*,2001, **30**(1):
- 4 R. Penndorf. Tables of the refractive index for standard air and the rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 $\mu$  and their application to atmospheric optics[J]. *J. Opt. Soc. Am.* ,1957, **47**:176~182
- 5 Dheng Peixuan, Mao Jietai. Physics of Atmosphere[M]. Beijing University Publishing company,2003  
盛裴轩,毛节泰. *大气物理学*[M]. 北京大学出版社,2003
- 6 McCartney E. J Optics of the Atmosphere[M]. Science Press, 1988
- 7 Ma Jinji, Cheng Jin. Using the Mie theory to calculate aerosol optical characterization[J]. *J. At. Mol. Phy.* ,2005, **22**(4):701~707  
麻金继,陈 瑾.用 Mie 散射理论计算大气气溶胶光学特性》[J]. *原子与分子物理学报*,2005, **22**(4):701~707
- 8 Zhu Menzhen, Zhang Hailiang, Jia honghui *et al.* . Study of ultraviolet scattering phase function based on Mie scattering theory[J]. *The Journal of Light Scattering* ,2007, **19**(3):225~229  
朱孟真,张海良,贾红辉等.基于 Mie 散射理论的紫外光散射相函数研究[J]. *光散射学报*,2007, **19**(3):225~229
- 9 C. N Dave, Size distribution of atmospheric particles [J]. *Journal of Aerosol Science* , 1974, **5**:293
- 10 W. E. Knowles Middleton. Random reflections on the history of atmospheric optics [J]. *Journal of the Optical Society of America* , 1960, **50** (2):97~100