

# 云散射模型与信道传输特性分析

宋 超 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** 提出地对地链路的云散射模型,用于分析不同类型云对给定波长信号光的信道传输特性。通过模型仿真,定量分析不同通信几何结构条件下,三种云的路径损耗预测,分析了发送、接收仰角、发送光束束散角等因素对路径损耗的影响。结果表明,当接收视场角固定时,最佳通信距离随着发送、接收仰角的增大而减小;当发送光束束散角很小( $1^\circ$ 以下)时,需要调整发送仰角使得信号光源在云层下界形成的光斑位于探测器垂直上方,以达到接收能量的最大值;当发送光束束散角较大时,应调整发送、接收仰角使一次有效散射体积最大,使得接收能量最大。通过实验测量云散射链路的路径损耗,验证了结论的正确性。结论与波长相关,选用 620 nm 和 808 nm 两种波长激光二极管作为实验及仿真的光源。

**关键词** 大气光学;云散射;地对地链路;相函数;蒙特卡罗仿真;路径损耗

**中图分类号** TN929.12 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0213001

## Cloud-Scattering Model and Channel Transmission Characteristics Analysis

Song Chao Xu Zhiyong Wang Jingyuan

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

**Abstract** The cloud-channel transmission characteristics of given wavelength signal are analyzed by setting up a new ground-to-ground cloud-scattering model. By simulation, the predicted path loss of three typical clouds under given transmission configurations are expatiated theoretically and quantitatively. Furthermore, the effects of the path loss caused by elevation angles and transmitting beam width divergence are analyzed independently. The results show that the best communication range decreases when the elevation angles increase on the condition that field of view is fixed. When small transmitting beam width divergence is considered (less than  $1^\circ$ ), the transmitting elevation angle must be adjusted so as to the facula on the bottom of cloud produced by the transmitting source light locating on the top of the receiver, but when transmitting beam width divergence is large relatively, elevation angles should be adjusted in order to make the first effective scattering volume maximal. The field cloud-scattering path losses on the communication range of 11.7 km under different receiving elevation angles were obtained by experiments carried in Nanjing, and the above analysis was validated by data. The conclusions obtained in this paper are wavelength-relevant, laser diode with 808 nm and 620 nm are chosen as the transmitting source light.

**Key words** atmospheric optics; cloud-scattering channel; ground-to-ground link; phase function; Monte Carlo simulation; path loss

**OCIS codes** 010.1290; 010.1300; 010.1310

## 1 引 言

随着频谱资源不断被开发和利用,无线微波通信出现频带拥挤、资源缺乏的现象,已越来越不能满

足日益增大的数据传输速率要求。半导体光源和光检测器技术的不断进步使得无线光通信技术得到了越来越广泛的关注<sup>[1,2]</sup>。Moncur 等<sup>[3~5]</sup>近年来对大

收稿日期: 2011-08-29; 收到修改稿日期: 2011-10-20

基金项目: 江苏省科技支撑计划(BE2011177)和解放军理工大学预先研究基金(2009TX02)资助课题。

作者简介: 宋 超(1985—),男,硕士研究生,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: sniper10@126.com

导师简介: 徐智勇(1972—),男,博士,副教授,主要从事无线光通信方面的研究。E-mail: njzy@163.com

气无线光通信可行性的理论研究和相关实验,为大气无线光通信更广范围的应用奠定了基础。其中,自由空间光通信(FSOC)在提供大带宽、高数据传输速率方面的可行性已经逐步被认可并得到实现。FSOC的最主要缺陷是受大气光传输信道影响明显,受云、雾、雨、雪、风等天气条件影响,易出现发送机和检测器无法对准、接收信号幅度衰减以及脉冲展宽等现象,最终导致视距链路的性能下降直至不可用。大气散射光通信可以克服天气条件变化对信道传输特性造成的影响,可成为FSOC的替代通信方式。Moncur等<sup>[3]</sup>更是成功实现了288 km距离上基于云散射无线光通信链路的建立,进一步验证了大气无线光通信的可行性和广泛的应用前景。如果采用处于不可见光波段红外半导体激光器(LD)或发光二极管(LED)作为信号光源,使得其保密性能好,应用前景更广泛。

本文通过多散媒介(云)粒子尺度的谱分布特性,借助米散射理论,得到云散射链路对给定波长信号光的信道传输特性;基于概率分析理论建立云散射信道理论分析模型,通过模型仿真,得到确定参数条件下,三种类型云(积云1,积云2,层积云)的地对地云散射链路的路径损耗随通信距离的变化关系;分析了不同发送、接收的几何结构对接收信号能量和最佳通信距离 $r_{bc}$ 的影响;通过实地实验测得不同几何结构条件下的云散射路径损耗值,验证了上述分析的正确性。文中结论与波长相关,实验和仿真中采用808 nm和620 nm两种波长光源作为信号光

源,同时对于由于大气湍流等因素对信道传输特性产生的影响不予考虑。

## 2 云散射链路路径损耗模型

由尘埃、烟粒、微生物等构成的云滴粒子形状和成分复杂,为了便于分析,将其视为球形水滴粒子,水滴对620 nm和808 nm两种波长光源的复折射系数分别为 $m_1 = 1.3333585 + i1.36 \times 10^{-8}$ 和 $m_2 = 1.3294012 + i1.25 \times 10^{-7}$ ,在此将其作为仿真中云滴粒子的平均复折射系数<sup>[6]</sup>;大气物理学中通常采用龙格谱分布和广义的伽马分布来描述云滴粒子的尺度谱分布特性<sup>[7,8]</sup>,本文采用广义的伽马分布来作为云滴粒子的尺度谱分布函数<sup>[7,8]</sup>,其表达式为

$$n(r)dr = ar^\alpha \exp(-br^\gamma)dr, \quad (1)$$

式中 $a, \alpha, b, \gamma$ 为模型参数, $r$ 为粒子半径。云滴粒子的尺度变化范围通常在 $0.1 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间<sup>[7]</sup>。根据米散射理论,当相邻散射体之间的距离大于3倍粒子半径时,满足独立散射条件,在此条件下,单位体积内的粒子总散射强度为各个粒子散射强度之和,因而得到云滴粒子的衰减系数的表达式为

$$k = \int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 Q(r, \lambda, m) n(r) dr, \quad (2)$$

式中 $Q(r, \lambda, m)$ 代表散射效率 $Q_{sc}(r, \lambda, m)$ 和吸收效率 $Q_{ab}(r, \lambda, m)$ ,相应的 $k$ 代表散射系数 $k_{sc}$ 和吸收系数 $k_{ab}$ <sup>[3]</sup>。三种典型云粒子尺度谱分布的典型参数<sup>[4]</sup>以及衰减系数的理论计算值如表1所示。

表1 三种类型云粒子谱分布的典型参数以及衰减系数的理论计算值

Table 1 Typical theoretically parameters for cloud droplet size distribution and attenuation coefficient

Cloud type	$a$	$\alpha$	$\nu$	$b$	$m_1 = 1.3333585 + i1.36 \times 10^{-8} (\lambda = 620 \text{ nm})$		$m_2 = 1.3294012 + i1.25 \times 10^{-7} (\lambda = 808 \text{ nm})$	
					$k_s/\text{km}^{-1}$	$k_a/\text{km}^{-1}$	$k_s/\text{km}^{-1}$	$k_a/\text{km}^{-1}$
Cumulus 1	2.373	6	1	1.5	17.7	$1.2 \times 10^{-5}$	16.9	$2.22 \times 10^{-4}$
Cumulus 2	2.604	3	1	0.5	127.4	$1.79 \times 10^{-4}$	132.4	$3.04 \times 10^{-3}$
Stratocumulus	52.734	2	1	0.75	35.8	$6.78 \times 10^{-5}$	36.3	$5.05 \times 10^{-4}$

由于瑞利散射强度与波长的四次方成反比,对于采用长波长光源的云散射链路来说,由于瑞利散射造成的信号衰减可以忽略,影响传输信号强度的因素主要是信号光子与大量云滴粒子间的米散射事件。由于云滴粒子的随机分布特性,对于以多次散射方式到达检测器的光子来说,其散射点的位置也是随机的,并且相邻散射事件之间相互独立,散射点位置坐标可以通过光子的迁移轨迹向量 $\mathbf{S}_i(r_i, \theta_i, \phi_i)$ 确定。其中, $\mathbf{S}_i$ 为第 $i$ 个散射点, $r_i$ 为相邻散射体间的距离, $\theta_i$ 为散射角, $\phi_i$ 为空间方位角。某一光

子以多次散射的方式到达检测器,其在空间中的所有散射点的位置坐标 $\mathbf{S}_1, \dots, \mathbf{S}_n$ 共同构成了该光子的迁移轨迹,通过计算所有散射点的位置坐标,就可以得到光子以该路径到达检测器的概率,进而得到总的接收信号能量,为此,首先得到三个变量( $r_i, \theta_i, \phi_i$ )的概率密度函数。根据文献<sup>[5,6]</sup>,其概率密度函数分别为

$$\begin{cases} f_r(r_i) = k_e \exp(-k_e r_i) \\ f_\theta(\theta_i) = p(\theta_i) \sin \theta_i / 2, \\ f_\phi(\phi_i) = 1 / (2\pi) \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $p(\theta_i)$  为散射相函数。

设云层下界距地面高度为  $H_0$ 、云层厚  $h_0$ ，发送光源为点光源，并且以脉冲的形式发射光子，其光束散角为  $\alpha_1$ ，接收视场角为  $\alpha_2$ ，发送、接收仰角分别为  $\beta_1$  和  $\beta_2$ ，如图 1 所示。同时认为散射事件为弹性碰撞，过程中不发生能量损失，光子下一步迁移距离、散射角度和空间方位角度的取值仍然服从(3)式的表达。

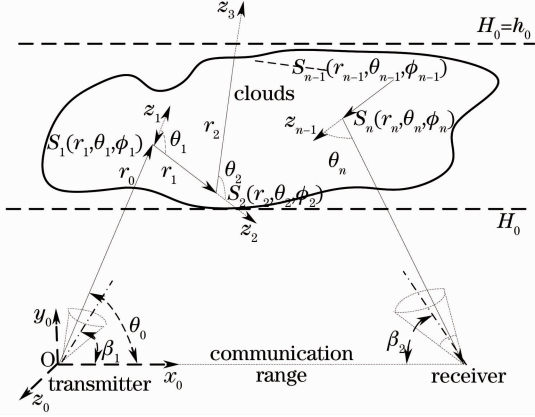


图 1 云散射仿真示意图

Fig. 1 Cloud-scattering simulation diagram

由于散射事件的发生，光子到达每个散射点后 will 改变迁移方向，以光源位置  $O$  为原点建立初始坐标系。某一光子以初始角度  $(\theta, \phi) = (\theta_0, \phi_0)$  被发射出去，迁移距离  $r_0 + H_0/\sin \theta_0$  后到达第一个散射点  $S_1$  后发生散射的概率为<sup>[9,10]</sup>

$$dp_1 = \exp(-k_a r_0) f_r(r_0) \sin \theta_0 \times d\theta_0 d\phi_0 dr_0 / \{2\pi[1 - \cos(\alpha_1/2)]\}, \quad (4)$$

式中  $\sin \theta_0 d\theta_0 d\phi_0$  为立体角的微元。之后，第  $i$  ( $2 \leq i \leq n-1$ ) 次散射可以等效为光子以  $S_{i-1}$  为次一级光源初始点，以角度  $(\theta_{i-1}, \phi_{i-1})$  为方向在媒介中继续迁移，直到到达下一散射点  $S_i$ ，这期间光子迁移距离  $r_{i-1}$  的概率为

$$dp_i = \exp(-k_a r_i) f_r(r_{i-1}) f_\theta(\theta_{i-1}) f_\phi(\phi_{i-1}) \times \sin \theta_{i-1} d\theta_{i-1} d\phi_{i-1} dr_{i-1}, \quad (5)$$

光子在云中迁移过程中重复发生上述过程，直到该光子被吸收，或者从云边界逃逸。由图 1 可知，接收视场角的取值范围为  $[\beta_2 - \alpha_2/2, \beta_2 + \alpha_2/2]$ ，定义  $\psi_n$  为第  $n$  次散射路径与发送、接收轴线的夹角，只有当  $\beta_2 - \alpha_2/2 \leq \psi_n \leq \beta_2 + \alpha_2/2$  且  $H_0 \leq S_i(y) \leq H_0 + h_0$  满足时 [ $S_i(y)$  为散射点纵坐标]，该光子才能被检测器接收到。定义函数  $H_\psi$ ，当上述条件满足时其值为 1，否则为 0，那么，一个光子经过第  $n$  次散射后迁移距离  $r_n$  到达检测器的概率为

$$dp_n = H_\psi \exp(-k_a r_n) f_\theta(\theta_n) f_\phi(\phi_n) \sin \theta_n d\theta_n d\phi_n, \quad (6)$$

所以经历  $n$  次散射的光子被检测器接收的概率为<sup>[11]</sup>

$$p_n = \int \cdots \int_{3n+2} dp_0 \times dp_1 \times \cdots dp_n, \quad (7)$$

进一步，检测器接收到的所有散射光子的能量为

$$E_r = E_t \sum_{i=1}^n p_i, \quad (8)$$

因此云散射链路的路径损耗为

$$L_n = E_t/E_r = 1 / \sum_{i=1}^n p_i. \quad (9)$$

### 3 仿真结果及分析

仿真参数见表 1，采用蒙特卡罗方法对(9)式近似求解<sup>[12~15]</sup>。其中信号光源波长为 620 nm 和 808 nm，主要考虑在该波长范围内大气的衰减很小，水气、臭氧、二氧化碳等造成的衰减可以忽略，并且该波段的光源技术成熟，便于后续发送机的制作和实验验证；此外，仿真过程中不考虑光子的极化状态，这是因为从相函数的计算过程得知，理论相函数为两个相互垂直方向上的加权平均，而仿真的目的是希望得到多散媒介中的能量辐射传输过程，在光子经历的多次散射迁移过程中，极化方向的改变为随机的，因此对能量传输的影响可以不予考虑。

#### 3.1 路径损耗与通信距离

图 2 为  $\alpha_1 = 10^\circ, \alpha_2 = 15^\circ, \beta_1 = \beta_2 = 25^\circ$  时，表 1 中给出的三种类型云的接收信号能量比随通信距离的变化关系。可以看出，当发送和接收仰角固定时，接收信号能量并不随通信距离的增大而减小，而是存在一个最佳的通信距离  $r_{be}$ 。当通信距离小于  $r_{be}$  时，随着通信距离的增大，接收信号能量逐渐增大；当通信距离大于  $r_{be}$  时，接收信号能量随着通信距离增大而逐渐减小。

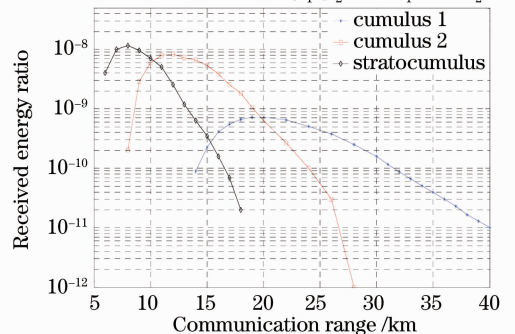


图 2 三种典型云的接收信号能量比

Fig. 2 Received energy ratio for three typical clouds

的增大而逐渐减小。对应三种云的最佳通信距离  $r_{be}$  的值约为 20, 12, 8 km, 当  $r = r_{be}$  时, 对应的三种云的路径损耗与  $r' = 2r_{be}$  距离处的路径损耗相比, 分别相差 42.70, 44.25, 42.79 dB。这是因为一阶散射能量占总的接收信号能量的大部, 如图 3 所示为积云 1 的 1 至 4 阶散射能量的对比。在粒子浓度固定的条件下, 一阶散射能量又由一次有效散射体体积和散射相函数决定。当  $r = r_{be}$  条件满足时, 使得一次有效散射体体积最大, 因而接收信号能量最强。

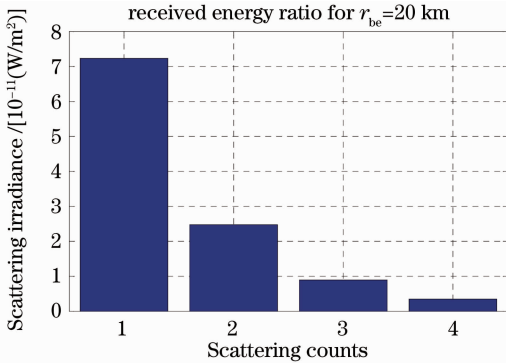


图 3 积云 1 中 1 至 4 阶散射能量比

Fig. 3 Received energy ratio of scattering orders from 1<sup>st</sup> to 4<sup>th</sup> in cumulus1

### 3.2 路径损耗与发送、接收仰角

图 4 和图 5 给出了积云 1 存在时, 不同发送、接收仰角情况下的接收信号能量比。可以看出, 当云的典型参数固定 [云高  $H_0$ 、云厚  $h_0$ 、粒子尺度分布特性  $n(r)$ ] 时, 最佳通信距离  $r_{be}$  随发送、接收仰角的变化而明显变化。具体体现在固定发送、接收仰角中的任意一个,  $r_{be}$  随着另一个仰角的增大而减小, 对应图 4、图 5, 当  $\beta_2$  固定为  $25^\circ$ ,  $\beta_1$  由  $25^\circ$  增大到  $40^\circ$  时,  $r_{be}$  相应的由 20 km 减小到 16 km; 当  $\beta_1$  固定为  $25^\circ$ ,  $\beta_2$  由  $25^\circ$  增大到  $40^\circ$  时,  $r_{be}$  相应的由 20 km 减小

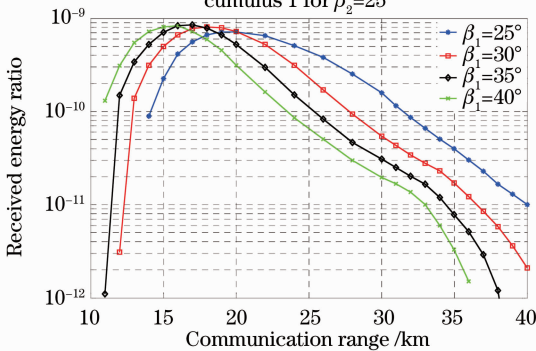


图 4 积云 1 不同发送仰角情况下的接收信号能量比

Fig. 4 Received energy ratio under different transmitting elevation angles in cumulus1

到 14 km, 改变仰角对最佳通信距离的影响趋势基本一致; 这同样是由于一阶散射能量对总的接收能量的影响造成的。当  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$  均固定不变的情况下, 调整发送接收仰角实质上是改变一次散射体体积  $V_1$ , 当  $V_1$  达到最大值时, 接收信号能量最大。

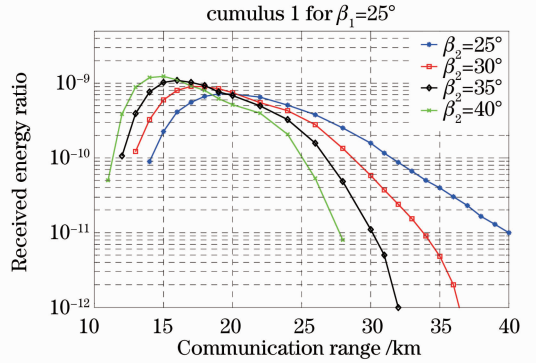


图 5 积云 1 不同接收仰角情况下的接收信号能量比  
Fig. 5 Received energy ratio under different receiving elevation angles in cumulus1

### 3.3 路径损耗与发送光束束散角、接收视场角

当  $\alpha_1$  值很小并且对于  $\alpha_2$  来说光源投射到云层下界的光斑总能被  $\alpha_2$  全部包括时, 应改变  $\beta_1$  使得光斑与检测器之间的距离尽可能地达到最小, 即在光斑位于检测器垂直上方时, 路径损耗最小。这是由能量传输的逆二次方定律决定的, 对于发送光束束散角较小的光源, 其信号在大气中传输时能量的衰减很小, 因而在信号光到达云层之前的路径损耗可以忽略, 与此同时, 等同于在云层下界形成一个次一级的面光源, 因此光斑与检测器间的距离越近, 根据逆二次方定律其能量损失越小, 如图 6 所示。当  $\alpha_1$  值较大时,  $\alpha_2$  并不能在任何情况下都将光源形成的光斑包括在内, 此时根据 3.1 节的分析, 接收信号

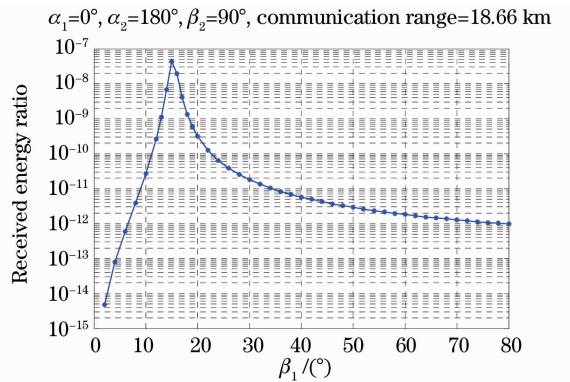


图 6 积云 1 在  $\alpha_1 = 0^\circ$  时不同发送仰角情况下的接收信号能量比

Fig. 6 Received energy ratio under different transmitting elevation angles for  $\alpha_1 = 0^\circ$



能量由一次散射体体积和散射相函数共同决定,因此应调整发送、接收仰角,使得一次有效散射体的体积最大。

$\alpha_2$  对总的接收信号能量的影响是显而易见的,当  $\alpha_2$  没有将所有信号光在云层下界形成的二次光源光斑包括在内,即一次有效散射体体积没有达到最大时,由于一阶散射能量占总的散射能量的绝大部分,这时在其余发送几何结构参数不变的情况下,随着  $\alpha_2$  的增大,接收信号能量逐步增大;当  $\alpha_2$  增大到使得一次有效散射体体积最大时,继续增大,则总的接收信号能量基本保持在一个稳定值,不会随着  $\alpha_2$  的增大而继续增大,此时改变的主要是多次散射能量的接收,对总的接收信号能量影响较小。

## 4 实验验证

第一次云散射实验于 2011 年 3 月 14 日 21:00 进行,地点为南京通院综合楼顶(高度 100 m)和紫金山天文台(高度 448 m),利用测云仪实测云高 900 m,大气能见度约为 4 km。其基本的参数设置如下: $P_t = 1.58$  dBW,  $\alpha_1 = 8^\circ$ ,  $\alpha_2 = 2^\circ$ ,  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为调整参数。第二次实验于 2011 年 9 月 18 日 22:00 进行,地点为综合楼顶和翠屏山(高度 75 m),两地相距 11.7 km,实测云高 367 m,大气能见度约 8 km,其基本参数为: $P_t = 13$  dBW,  $\alpha_1 = 0.15^\circ$ ,  $\alpha_2 = 0.65^\circ$ ,

表 2 第一次云散射实验数据

Table 2 Data of the first cloud-scattering experiment

Experiment content	Experiment step 1										
	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
Received elevation angle /( $^\circ$ )	10	20	30	40	50	60	70	80	90		
Atmosphere molecule scattering /(dBW)	-102.0	-101.4	-99.0	-99.5	-100.1	-100.4	-102.0	-102.9	-105.0		
Received elevation angle /( $^\circ$ )	70	72	74	76	78	80	82	84	86	88	90
Cloud scattering /(dBW)	-102.0	-101.8	-101.6	-101.4	-101.2	-97.8	-96.0	-93.6	-93.8	-98.0	-98.9

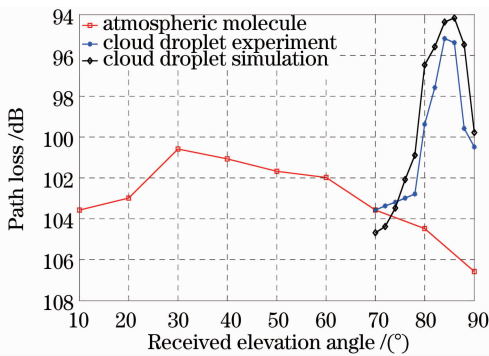


图 7 本地云散射实验

Fig. 7 Local cloud-scattering experiment

第二部分为云的前向散射实验。通信距离为 11.7 km,发送信号光源为 808 nm 的 LD。实验所

$\beta_1 = 2^\circ$ ,  $\beta_2$  为调整参数。

实验共分两个部分,第一部分为大气分子散射以及本地云散射实验,其中发送端与检测器相距 100 m,中间相隔通院 100 m 高综合楼,光源垂直向上朝向云层发送,检测器沿发送光束经过的路径寻找信号光,该实验的目的主要是验证大气分子散射对 620 nm 信号光和云大角度散射信号的强弱,测得的实验数据如表 2 和图 7 所示(彩图见电子版),其中红色实线为晴朗天气条件下的大气分子散射能量随接收仰角的变化关系,绿色实线为模型仿真得到的本地云散射接收信号能量随接收仰角的变化关系,与其对比的蓝色实线为实验测得的实际值。实验中可以发现,当  $\alpha_2$  沿发送光束迁移路径向上寻找信号光,在未达到光源在云层下界形成的光斑位置之前,也就是云散射的一次有效散射体体积为 0,接收信号能量均来自于大气分子散射时,接收光功率保持在约 -102 dBW 附近范围较小波动;当  $\alpha_2$  到达光斑位置后,接收信号光功率迅速增大,达到约 -93.6 dBW;当一次有效散射体体积最大时达到最大值;此后继续移动  $\alpha_2$  则接收信号光功率又迅速减小,实验数据与模型仿真值的贴切吻合验证了该模型的正确性。该实验在验证云散射的同时说明,针对于 620 nm 的信号光源,相比较于云散射信号的强弱,大气分子对信号光的散射作用可以忽略。

得数据如表 3 所示。实验发现,当  $\beta_1$  固定为  $2^\circ$ ,  $\beta_2$  从  $10^\circ$  变化到  $21^\circ$  的过程中,路径损耗在 90 dB 附近波动,变化值小于 1 dB;随着接收仰角  $\beta_2$  从  $22^\circ$  继续变化到  $30^\circ$  的过程中,路径损耗迅速减小,在  $23^\circ$  和  $24^\circ$  位置达到最小值 87.6 dB;随着  $\beta_2$  从  $31^\circ$  继续增大,路径损耗再次迅速增大,于  $50^\circ$  达到最大值 94.9 dB,如图 8 所示。这是由于当发送光束束散角较小时,信号光在大气中传输直到到达云层下界的过程中衰减较小,接收仰角  $\beta_2$  从  $10^\circ$  变化到  $20^\circ$  的过程中,接收信号功率主要来自于大气气溶胶粒子的微弱散射,此时来自于云滴粒子的一次散射功率值为 0;理论上随着  $\beta_2$  从  $20^\circ$  继续变化到  $30^\circ$  的过程中一次有效散射体  $V_1$  逐渐增大,接收信号功率逐渐

增大,但之所以接收信号功率在 20°到 30°之间近似保持一个稳定值,这是由于此时的云层厚度较薄(约 100 m),因此  $V_1$  并未显著增大,所以路径损耗保持在 87 dB 附近。随着接收仰角的进一步增大,一次散射功率逐渐减小直至为 0,多次散射对总的接收

信号功率影响较小,并且云滴粒子的米散射特性明显,随着角度的增大,散射强度进一步减小,这与实验测量值相吻合,这一实验进一步验证了云散射链路的可行性。

表 3 第二次 11.7 km 云散射实验数据

Table 3 Data of the second 11.7 km cloud-scattering experiment

Experiment content		Experiment step 2									
Received elevation angle / (°)		10	12	14	16	18	20	21	22	23	24
Path Loss /dB	Experiment	88.9	90.2	90.2	90.7	90.9	90.9	90.9	88.3	87.7	87.7
	Simulation	91.2	91.2	91.0	91.0	89.9	85.6	85.0	84.4	84.2	84.0
Received elevation angle / (°)		25	26	28	30	32	34	38	42	46	50
Path Loss /dB	Experiment	88.3	88.3	88.9	88.3	90.2	90.2	91.7	93.2	93.7	95.0
	Simulation	84.4	84.8	85.3	86.0	86.7	87.9	92.1	94.4	98.2	100.5

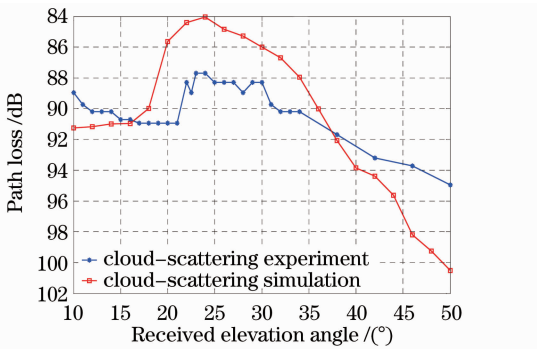


图 8 11.7 km 云散射实验

Fig. 8 Cloud-scattering experiment of 11.7 km

## 5 结 论

通过建立仿真模型,分析了云散射链路的路径损耗特性,得到基于云散射的地对地链路的可用性;借助于云的粒子分布特性和散射相函数,得到云这一多散射媒介对给定波长信号的传输特性,进而分析了在三种典型云的条件下,信道的路径损耗特性和影响因素,发现发送光束束散角以及发送、接收仰角对云散射的路径损耗影响明显,进而决定了其最佳的通信距离。通过实验,实地测量了在本地和 11.7 km 距离处的云散射接收信号光功率,并与仿真结果进行对比,验证了该仿真模型在预测非视距云散射链路路径损耗的正确性。借助于该模型,可以得到在给定的发送、接收结构的条件下,信道的路径损耗预测值和最佳的通信距离。

## 参 考 文 献

1 Wei Wei, Zhang Xiaohui, Rao Tonghui. Study on computing the receiving optical power in underwater optical wireless communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(9): 0905002  
魏 巍, 张晓晖, 饶炯辉. 水下无线光通信接收光功率的计算研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(9): 0905002

2 Wu Yunyun, Li Xinyang. Research and simulation about effects of adaptive optics on atmospheric optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100212  
武云云, 李新阳. 自适应光学对大气激光通信质量的影响研究与仿真[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100212  
3 Rex Moncur, Paul Edwards, Le Nguyen Binh *et al.*. Non-line-of-sight cloud-scatter communication[C]. OSA Technical Digest, paper CMO1, 2009  
4 Binbin Wu, Zeinab Hajarian, Mohsen Kavehrad. Free space optical communications through clouds: analysis of signal characteristics[J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(10): 3168~3176  
5 Binbin Wu, Brian Marchant, Mohsen Kavehrad. Channel modeling of light signals propagating through a battlefield environment: analysis of channel spatial, angular, and temporal dispersion[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(25): 6442~6448  
6 Sheng Peixuan, Mao Jietai. *Atmospheric Physics*[M]. Beijing: Beijing University Press, 2003. 455~458  
盛裴轩, 毛节泰. *大气物理学*[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003. 455~458  
7 H. C. van de Hulst. *Light Scattering by Small Particles*[M]. Dover: Dover Publications, 1981. 220~228  
8 Adrian C. Selden. Attenuation and impulse response for multiple scattering of light in atmospheric clouds and aerosols[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(13): 3144~3151  
9 Haipeng Ding, Zhengyuan Xu, Brian M. Sadler. A path loss model for non-line-of-sight ultraviolet multiple scattering channels [J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2010, **598572**: 572~578  
10 Haipeng Ding, Gang Chen, Brian M. Sadler *et al.*. Correction to "modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication [J]. *IEEE J. Sele. Area. Commun.*, 2011, **29**(1): 250  
11 Haipeng Ding, Gang Chen, Arun K. Majumdar. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication [J]. *IEEE J. Sele. Area Commun.*, 2009, **27**(9): 1535~1544  
12 S. A. Prah, M. Keijzer, S. L. Jacques *et al.*. A Monte Carlo model of light propagation in tissue[C]. *SPIE*, 1989, **15**(5): 102~111  
13 Valiollah Pourrajab. Aerosol Particles Effects in FSOC: Analysis of physical properties, dispersion and a simple model [C]. International Conference on Signal Acquisition and Processing, 2009: 158~162  
14 Song Chao, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan. Multiple scattering model and simulation for non-line-of-sight communication [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(7): 070102  
宋 超, 徐智勇, 汪开源. 非视距多次散射信道仿真分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2011, **48**(7): 070102  
15 Daniel T. Gillespie. Stochastic-analytic approach to the calculation of multiply scattered lidar returns [J]. *Opt. Soc. Am.*, 1985, **2**(8): 1307~1324

栏目编辑: 谢 婧