

非视距大气散射光通信最优化链路分析与设计

宋 超 徐智勇 汪井源 韦毅梅

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 提出平均散射相函数, 更为准确地反映了云滴粒子的角散射强度分布特性; 基于概率论和随机迁移理论, 以马尔可夫数据链的形式建立多次散射随机分析模型, 借助蒙特卡罗仿真得到给定通信几何构架下的非视距大气光散射链路路径损耗特性; 针对大气链路中有无云存在两种实际, 从大气气溶胶散射和云散射两个方面分析非视距大气光散射链路的最优化通信构架设计; 通过模型仿真结果与实地实验数据的对比验证了分析的合理性。结论与波长相关, 实验及仿真均采用 808 nm 波长的激光二极管(LD)作为光源。

关键词 大气光学; 非视距链路; 气溶胶散射; 云散射; 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/CJL201239.0913003

Optimization of Link Analysis and Design for Long-Range Non-Line-of-Sight Atmospheric Scattering Communication

Song Chao Xu Zhiyong Wang Jingyuan Wei Yimei

(*Institute of Communication Engineering, People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China*)

Abstract The average scattering phase function is proposed, to present the angular scattering properties of cloud droplets more accurately than Henyey-Greenstein (H-G) phase function. The theoretically multiple scattering model is founded in the form of Markov chains, which is based on probabilistic theory and stochastically migrating theory. The characteristics of path loss under given communication configurations are obtained by Monte Carlo simulation algorithm. The best communication configurations for non-line-of-sight (NLOS) atmospheric aerosols scattering and cloud-droplets scattering are analyzed, considering whether there are clouds suspending in the atmosphere. The rationality of analysis is validated by the consistency between experimental data and simulation results. The conclusions referred in this paper are wavelength-dependent, and laser diode (LD) with wavelength 808 nm is chosen as the source light of experiment and simulation.

Key words atmospheric optics; non-line-of-sight link; atmospheric aerosols scattering; cloud-droplets scattering; phase function; Monte Carlo simulation; path loss

OCIS codes 010.1290; 010.1300; 010.1310

1 引 言

非视距(NLOS)散射光通信系统可有效地解决因无线电资源被严重占用所带来的通信频谱限制问题, 具有潜在的应用前景^[1~3]。与近距离紫外散射光通信不同^[4,5], 本文主要对更长距离上的非视距大气散射光通信系统的可行性和信道传输特性进行分析, 所采用的实验及仿真光源均基于 808 nm 的

激光二极管(LD)。基于长波长光源(红光至红外波段)的非视距大气散射信道具有诸多典型特性, 例如, 大气分子的传输衰减损耗可以忽略^[6,7], 保证了信号经过更长距离的路径损耗之后仍在探测器灵敏度允许范围之内; 同时, 大气气溶胶以及云滴等尺度较大粒子有较强的米散射特性, 在保证非视距散射链路建立可行性的同时, 其明显的散射方向性、传输

收稿日期: 2012-05-09; 收到修改稿日期: 2012-05-29

基金项目: 解放军理工大学预先研究基金(2009TX02)和江苏省科技支撑计划(BE2011177)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: njzzy@163.com

信号光的抗电磁干扰以及难以识别的特性,可确保通信链路的安全性和保密性,军事应用前景广泛。

大气中广泛分布的粒子(气溶胶粒子、水滴以及云滴等)是引起非视距大气散射光通信链路路径损耗的主要因素^[8,9],而信号光子与各种粒子间的散射作用是非视距链路建立的机理和依赖方式。在实际应用中,发送信号光功率受到光器件本身、航空及人眼和皮肤安全限制,检测器也由于散粒噪声的影响使其灵敏度不能无限提高,因此路径损耗开销预测是非视距大气散射光通信链路建立的关键。本文依据文献[9]建立的多次散射随机分析方法,考虑实际系统中发送光束强度分布和接收天线增益的影响,以马尔可夫数据链的形式建立全新的多次散射随机分析模型,通过模型仿真,针对链路中有无云存在两种情况,从非视距大气气溶胶粒子散射和非视距云滴粒子散射两个部分分析了通信构架中的各个几何参量对路径损耗的影响,得到了上述两种链路的最优化链路构架;通过模型仿真结果与实验数据的对比,验证了上述理论分析的合理性。借助该马尔可夫链模型中的时间信息提取,得到了非视距大气光散射信道的冲激响应函数,进而判断接收信号的码间串扰和信道可用的通信带宽信息,为实际链路的建立提供理论指导。

2 散射相函数优化

根据米散射理论,散射相函数反映了在某一方向上的散射强度与平均散射强度的比,定义为

$$p(\theta, \phi) = \frac{4\pi\sigma_1(\theta, \phi)}{\sigma_{sc}} = \frac{1}{\sum_{n=1}^{\infty} [(2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2)]} \times \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2n+1}{n(n+1)} (a_n \pi_n \cos \theta + b_n \tau_n \cos \theta) \right]^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2n+1}{n(n+1)} (b_n \pi_n \cos \theta + a_n \tau_n \cos \theta) \right]^2 \right\}, (1)$$

式中 $\sigma_1(\theta, \phi)$ 为散射函数, θ 为散射角, ϕ 为空间方位角, σ_{sc} 为散射截面, a_n, b_n, π_n, τ_n 均为米散射参数^[6]。通常采用(Henyey-Greenstein)(H-G)及修正的H-G系列理论相函数来代替实际散射相函数以简化计算,参见文献[10~13]。但是,H-G系列相函数虽然可以大体上反应气溶胶粒子但是无法准确地反应各种类型云滴粒子的角散射强度分布特性,为此,构造新的平均散射相函数 $p_{av}(\theta)$ 以代替云滴粒子的

散射相函数,其表达为

$$p_{av}(\theta) = \xi \exp[-\kappa(\theta - \omega_0)] + \sum_{i=1}^n b_i \exp[\beta_i(\theta - \omega_i)], \quad (2)$$

式中 $\xi, \kappa, \omega_0, b_i, \beta_i, \omega_i$ 为模型参数,对于层积云其模型参数的典型值如表1所示。图1为H-G系列相函数、 $p_{av}(\theta)$ 、大气气溶胶散射相函数和几种典型云(积云、层积云、卷云)的散射相函数对比,计算中分别取大气气溶胶和云滴对808 nm波长信号光的复折射系数 $m_1 = 1.405 + i0.004$ 和 $m_2 = 1.329 + i1.25 \times 10^{-7}$ ^[14~16],各类微粒的尺度谱分布函数参见文献[9]中的表述。从图1可以看出,H-G系列相函数可以大体上反应气溶胶粒子的角散射强度分布特性,但不能准确地反应层积云等云滴粒子的角散射强度分布细节,尤其是 $[0^\circ, 5^\circ]$ 范围的前向散射峰和 $[110^\circ, 130^\circ]$ 范围的次级散射峰,以及 180° 附近的后向散射峰,其散射强度差值达到2个数量级以上。而 $p_{av}(\theta)$ 则与上述几种典型云的散射相函数变化趋势基本一致。由于实际中各种典型云的散射相函数变化趋势基本一致,仅在幅值上有所差异,因此,调整 $p_{av}(\theta)$ 中的参数值,即可针对不同的大气信道环境进行模型仿真设置,提高路径损耗分析的准确性。

表1 层积云的平均散射相函数典型参数值

Table 1 Typical parameters for $p_{av}(\theta)$ of stratocumulus

Parameter	ξ	κ	ω_0	b_i	β_i	ω_i
$i=1$				1744.00	1200.0	0
$i=2$				0.17	75.0	2.5
$i=3$	37.7	3.9	0	0.30	4826.0	π
$i=4$				0.20	50.0	π
$i=5$				0.15	1.0	π

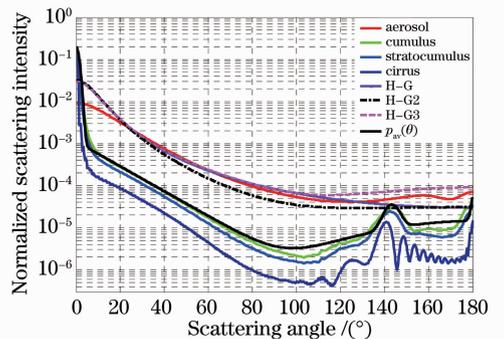


图1 $p_{av}(\theta)$ 与H-G相函数和云滴粒子群散射相函数对比

Fig. 1 Comparison between $p_{av}(\theta)$, H-G and practical scattering phase functions of cloud-droplets

3 理论算法推导

以文献[9]中建立的多次散射随机分析模型为基础,定义如下概率:

1) $p_1(n, u_{n-1})du_{n-1}$: 0 时刻被光源发射的某一光子,经历 n 次散射事件后被检测器接收到,并且其前 $n-1$ 次散射事件的累积迁移距离位于无限小的区间 $[u_{n-1}, u_{n-1} + du_{n-1}]$ 之内的概率。其中, $u_n =$

$$\sum_{i=0}^n r_i, du_n = \prod_{i=0}^n dr_i;$$

2) $p_2(\mathbf{r}_n | n, u_{n-1})d\Omega_n$: 满足 1) 中事件条件的情况下,该光子在立体角微元 $d\Omega_n = \sin(\theta_n)d\theta_n d\phi_n$ 内以 \mathbf{r}_n 为方向自第 n 个散射事件点朝向检测器光敏面迁移并最终被接收,期间不再发生碰撞事件的概率;

3) $p_3(t | \mathbf{r}_n, n, u_{n-1})dt$: 满足 1) 和 2) 中事件条件的情况下,该光子在无限小的时间间隔 $[t, t + dt]$ 内到达检测器光敏面并被接收的概率。

同时,认为信号光子在初始发送光束立体角范

围之内服从参量为 (μ, σ) 的高斯分布,由于散射空间方位角 ϕ 与散射角 θ 为相互独立的随机变量,那么,某一光子自光源以 (θ_0, ϕ_0) 为初始角度被发射出去的概率为

$$p_T(\theta_0, \phi_0) = H(0 < \theta_0 \leq \alpha_1) \times \int_0^{\theta_0} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\theta - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] d\theta, \quad (3)$$

式中 α_1 为发送光束发散角半角。

接收端的示意图如图 2 所示。考虑接收天线的增益,定义 k_e, k_s 分别为散射媒介的大气衰减系数和散射系数, $\varphi_n = \arccos\left(\frac{\mathbf{r}_{n-1} \cdot \mathbf{r}_n}{\|\mathbf{r}_{n-1}\| \times \|\mathbf{r}_n\|}\right)$ 为光子迁移轨迹矢量 \mathbf{r}_{n-1} 与 \mathbf{r}_n 之间的夹角($\|\cdot\|$ 为矢量的欧几里得模数),所有满足 $\varphi_n - \frac{\omega_n}{2} \leq \theta_n \leq \varphi_n + \frac{\omega_n}{2}$ 的散射角 θ_n 均可以被检测器接收到,进而得到经历 n 次散射的光子最终在 t 时刻被检测器接收的概率为

$$p(n, t) = p_T(\theta_0, \phi_0) \times \int_{u_{n-1}, \Omega_n} p_1(n, u_{n-1}) p_2(\mathbf{r}_n | n, u_{n-1}) p_3(t | \mathbf{r}_n, n, u_{n-1}) du_{n-1} d\Omega_n dt = H(0 < \theta_0 \leq \alpha_1) H(0 \leq \phi_n \leq \alpha_2) \exp(-k_e r_n) \frac{\sin \theta_0}{2\pi(1 - \cos \alpha_T)} \left(\frac{k_s}{k_e}\right)^n \times \int_{u_{n-1}} [\exp(-k_e u_{n-1}) \prod_{m=1}^{n-1} f_\theta(\theta_m)] du_{n-1} \int_{\varphi_n - \omega_n/2}^{\varphi_n + \omega_n/2} f_\theta(\theta_n) d\Omega_n \int_t \delta[t - (u_{n-1} + r_n)/c] dt, \quad (4)$$

式中 α_2 为接收视场角(FOV)半角, $f_\theta(\theta_i)$ 为第 i 次散射事件的散射角服从的概率密度函数, δ 为冲激函数, c 为光速。

定义 ϵ 为单光子携带能量, N_0 代表发送光源一个光脉冲内所包含的光子数目。进一步的,非视距大气散射光通信链路的路径损耗(以 dB 为单位)为

$$P = -10 \lg\left(\frac{E_R}{E_T}\right) = -10 \lg\left[\frac{\epsilon \times N_0 \int_0^{T_0} \sum_{i=1}^n p(n, t) dt}{\epsilon \times N_0}\right] = -10 \lg\left[\int_0^{T_0} \sum_{i=1}^n p(n, t) dt\right], \quad (5)$$

式中 E_R 为发送光信号能量, E_T 为接收光信号能量, T_0 为脉冲持续时间。

根据(4)式所建立的概率模型,仿真过程中需要记录没有被大气微粒吸收的光子的迁移轨迹参量 (r_i, θ_i, ϕ_i) 以及散射事件点 S_i 在整体坐标系下的坐标 $[x_i, y_i, z_i]$ 。每次散射事件中的 (r_i, θ_i, ϕ_i) 根据其各自遵循的概率密度函数产生^[17,18],进而得到 S_i 的坐标。具体地,记 ξ 为 $[0, 1]$ 之间的随机数,对于散射角 θ 的累积分布函数(CDF),有

$$P_r(\theta_i < \xi) = P_r(\cos \theta_i > \cos \xi) = P_r(\cos \phi \sin \theta_{i-1} \sin \theta_i < \cos \theta_{i-1} \cos \theta_i - \cos \xi) = P_r\left[\phi > \arccos\left(\frac{\cos \theta_{i-1} \cos \theta_i - \cos \xi}{\sin \theta_{i-1} \sin \theta_i}\right)\right] = \int_0^\pi f_\theta(\theta) \int_{\arccos\left(\frac{\cos \theta_{i-1} \cos \theta - \cos \xi}{\sin \theta_{i-1} \sin \theta}\right)}^{2\pi} f_\phi(\phi) d\theta d\phi, \quad (6)$$

式中 $f_\phi(\phi)$ 为散射空间方位角 ϕ 服从的概率密度函数。借助其 CDF,通过产生随机数抽样的方法,就可以得到符合散射角 θ 分布的采样值。同时,光子的散射点 S_n 在整体坐标系下的位置坐标满足^[19]:

$$[x_n^n \quad y_n^n \quad z_n^n]' = r_{n-1} \prod_{i=1}^{n-2} \begin{bmatrix} \cos \theta_i \cos \phi_i & -\sin \phi_i & \sin \theta_i \cos \phi_i \\ \cos \theta_i \sin \phi_i & \cos \phi_i & \sin \theta_i \sin \phi_i \\ -\sin \theta_i & 0 & \cos \theta_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta_{n-1} \cos \phi_{n-1} \\ \sin \theta_{n-1} \sin \phi_{n-1} \\ \cos \theta_{n-1} \end{bmatrix} + [x_1^{n-1} \quad y_1^{n-1} \quad z_1^{n-1}]'. \quad (7)$$

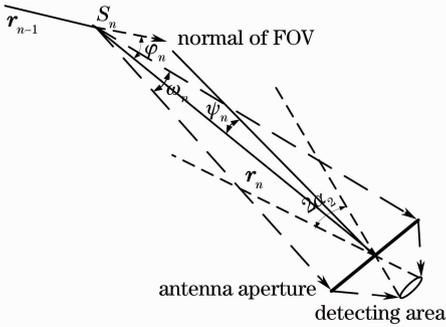


图 2 经历 n 次散射光子被检测器接收示意图

Fig. 2 Sketch map for photons suffering n th scattering received by the detector

4 最优化通信构架分析设计

针对大气链路中无云存在两种情况,从大气气溶胶散射和云散射两个方面,结合实验中的通信构架参量设置,对两次实地实验环境下的长距离非视距散射光通信链路最优化通信几何构架设计进行分析。针对大气气溶胶散射,实地实验 I 于 2011-11-03 和 2011-11-16 夜间进行,实验地点为发送端位于南京翠屏山海拔 75 m 位置,接收端位于通信工程学院综合楼顶(海拔 95 m),大气能见度 8 km,发送光功率 13 dBm,发送光束束散角半角 $\alpha_1 = 0.15^\circ$,接收 FOV 半角 $\alpha_2 = 0.65^\circ$,发送仰角 $\beta_1 = 1^\circ$,两地的直线通信距离为 11.7 km;针对云散射,实地实验 II 于 2011-09-18 夜间进行,实验地点不变,测云仪实测层积云高度 $H_0 = 367$ m,大气能见度为 9 km,发送仰角 $\beta_1 = 2^\circ$,其余通信构架参量与实验 I 相一致。仿真过程中认为近地面的大气气溶胶粒子和层积云粒子的分布与高度无关,两种微粒的大气传输衰减系数取值如表 2 所示。

表 2 非视距散射光通信仿真参数设置

Table 2 Parameters for simulations of NLOS optical scattering communication

Type of particles	Extinction coefficient k_e/km^{-1}	Scattering coefficient k_s/km^{-1}	Height H_0/m	Thickness h_0/m
Atmospheric aerosols	41.4663	40.2699	—	—
Stratocumulus droplets	36.3791	36.3792	367	200

针对链路中无云存在时的大气气溶胶散射, β_1, β_2 (β_2 表示接收仰角)、 α_2 3 个参量对路径损耗的影响是确定的,即 β_1 和 β_2 越小、 α_2 越大,则接收信号能量越大。在 β_1 和 β_2 保持不变的前提下, α_2 越大,意味着检测器可以接收到更多的散射光信号,因此接收信号能量越大; β_1 和 β_2 对接收信号能量的影响原因主要有两个方面:一是信号光子与气溶胶粒子之间的米散射事件,决定了接收信号光能量在小的散射角度范围内具有较强分布。这一点从图 1 中气溶胶粒子的散射相函数的强度分布特性可以看出。相比较于其他角度, $[0^\circ, 20^\circ]$ 范围内的前向散射强度比其余角度大 1 至 2 个数量级,也就是说散射角度越小,则沿该散射方向传输的信号光能量越大;二是 Beer-Lambert 定律决定了信号光子的迁移距离越长,其最终被检测器接收时的能量衰减就越大。根据文献[9]中的分析,一次散射占总接收信号功率大部分,高阶散射对接收信号功率影响很小,而(发送或接收)仰角的增大就意味着经历一次散射的光子需要经历更长的迁移距离才能最终到达检测器。上述两个因素决定了接收信号功率随仰角的增大呈负指数规律衰减。

图 3 和表 3 为实验 I 测得的实验数据与仿真结果的对比,可以看出两者较为吻合。图中路径损耗先是随着仰角的增大而减小,在 1° 附近达到极值,之后随着仰角的进一步增大而增大。 1° 附近的路径损耗极小值是由于初始地面对发送光束的限制造成的。因此,在地面不对发送光束和接收视场构成束

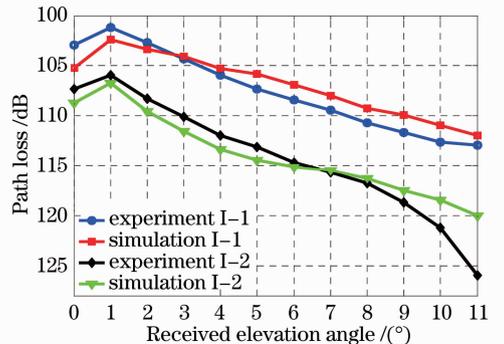


图 3 实验 I 的实验数据与仿真结果的对比

Fig. 3 Comparison between simulation results and experimental data for experiment I

缚的前提下,仰角越大,非视距大气气溶胶散射的路径损耗越大,所以,其最优化链路设计应采用较小的发送和接收仰角。

表3 11.7 km 非视距大气气溶胶散射实验数据与仿真结果(实验 I)

Table 3 Simulation results and experimental data for NLOS atmospheric aerosol scattering on the range of 11.7 km (experiment I)

Received elevation angle / (°)		0	1	2	3	4	5	6
Path loss /dB	experiment I-1	102.95	101.19	102.67	104.29	105.96	107.30	108.42
	simulation I-1	105.24	102.38	103.36	104.07	105.26	105.81	106.90
	experiment I-2	107.30	105.96	108.30	110.12	111.98	113.09	114.71
	simulation I-2	108.73	106.74	109.58	111.53	113.36	114.43	115.12
Received elevation angle / (°)		7	8	9	10	11	12	13
Path loss /dB	experiment I-1	109.42	110.73	111.70	112.67	112.95	114.29	114.71
	simulation I-1	107.97	109.29	109.91	110.96	112.01	112.50	113.76
	experiment I-2	115.68	116.75	118.69	121.19	125.96	—	—
	simulation I-2	115.50	116.24	117.46	118.45	120.01	—	—

针对链路中有云存在时的非视距云散射,首先,存在最佳通信距离 R_{best} ,通信距离 r 小于 R_{best} 时,路径损耗随 r 的增大而减小,在 $r=R_{best}$ 处达到极小值,之后随着 r 的进一步增大而增大。影响 R_{best} 的主要因素为发送、接收仰角和云的高度。发送和接收仰角越小,同时云的高度越低,则 R_{best} 的值越大。与实验 II 中的发送仰角相一致,图 4 给出了 11.7 km 距离上的云散射接收信号能量随接收仰角和云的高度的变化关系。从图中可以看出,发送仰角固定为 2° 时,接收仰角越小,同时云层高度越低,则检测器接收信号能量越大。

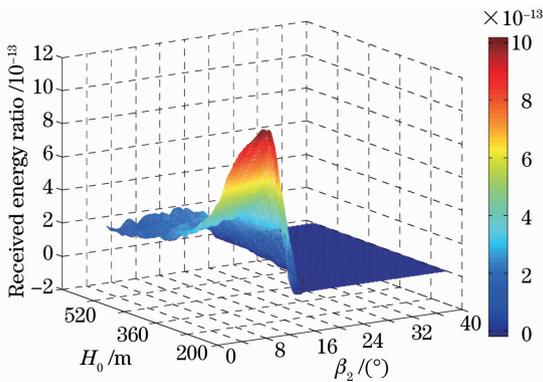


图4 11.7 km 距离上的云散射接收信号能量随接收仰角和云层高度的变化关系

Fig. 4 Received power variation with elevation angle and cloud height performance of cloud-scattering on the range of 11.7 km

其次,当云层高度固定时,决定云散射路径损耗大小的因素为发送和接收仰角,为此,从不考虑 FOV 半角 ($\alpha_2 = 90^\circ$) 和小的 FOV 半角 ($\alpha_2 = 0.65^\circ$) 两种情况分析链路损耗随发送和接收仰角的变化关系,得到非视距云散射的最佳链路构架。当 $\alpha_2 = 90^\circ$

时,如文献[9]中所述,此时可以将发送光束在云层下界形成的光斑视为次一级的面光源,影响云散射链路损耗的主要因素是次一级面光源与检测器之间的距离,距离越近则损耗越小,因而此时的最佳链路构架为发送光束朝向检测器正上方的云层发送光信号,同时检测器垂直向上接收散射光信号,如图 5(a)所示。

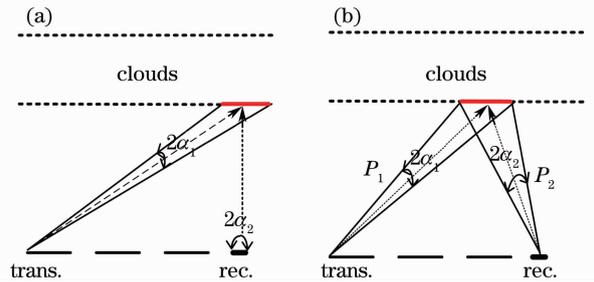


图5 非视距云散射链路最优化通信构架

Fig. 5 Optimization of communication configurations for NLOS cloud-scattering

实际的接收端机制作过程中,考虑 FOV 越大则接收到的散射光信号的时延越大,同时背景光噪声对接收信号信噪比的影响越大,检测器需要采用较小的 FOV 以提高信噪比。在这种情况下,由于 FOV 对散射光信号的接收限制,图 5(a)不再为最佳通信构架,此时应考虑云散射的较强前向散射特性,调整发送和接收仰角,使得在较小的发送、接收仰角情况下,一次有效散射体体积最大,如图 5(b)所示。

图 6 给出了实地实验 II 中云高 367 m 的条件下,接收信号能量随仰角的变化关系,通过仿真得到最佳发送和接收仰角 $(\beta_{1bc}, \beta_{2bc}) = (2.25^\circ, 24^\circ)$ 。其中,最佳发送仰角明显小于最佳接收仰角,如图 5(b)所示,这是因为非视距云散射的路径损耗 $P = P_1 + P_2$,由于发送光束束散角的约束 P_1 的贡

献较小,而光子自次一级面光源继续朝向检测器迁移的过程中的空间多样性更为明显,也就是 P_2 为路径损耗的主要因素,同时,散射相函数决定了仰角越小,可接收到的前向散射能量越大,这两者共同作用决定了在地面不对发送光束产生约束的前提下,发送仰角要尽量的小,以减小 P_2 对整个链路损耗的影响,同时需综合考虑次一级面光源与检测器的距离和接收仰角,使得检测器接收到更多的前向散射光信号。

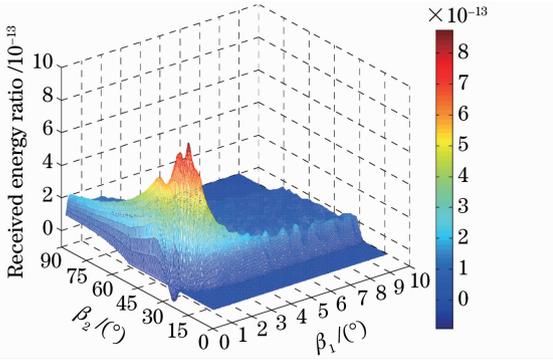


图 6 11.7 km 距离上的云散射接收信号能量随仰角的变化关系

Fig. 6 Received power variation with elevation angles performance of cloud-scattering on the range of 11.7 km

图 7 和表 4 为实验 II 测量的实验数据与仿真结果的对比。实验发现,对于 808 nm 的信号光源,其非视距大气散射链路的接收光信号呈现明显的两个散射峰,即由大气气溶胶粒子散射贡献的第一个散射峰和由云滴粒子散射贡献的第二个散射峰。图 7 中方块实线为实验 II 所测得的实验数据,星号实线为仅考虑大气气溶胶散射的仿真结果,菱形块实线为仅考虑云散射的仿真结果,圆点实线为考虑上述两种散射同时存在时的仿真结果。

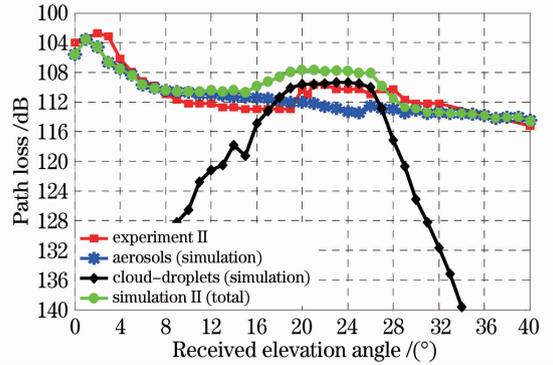


图 7 实验 II 的实验数据与仿真结果的对比

Fig. 7 Comparison between simulation results and experimental data for experiment II

表 4 11.7 km 非视距大气光散射实验数据与仿真结果(实验 II)

Table 4 Simulation results and experimental data for NLOS atmospheric scattering on the range of 11.7 km (experiment II)

Received elevation angle / (°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
experiment II	103.96	103.41	102.71	103.17	106.18	107.94	109.19	109.81	110.95	111.74	112.20	112.19
aerosols (simulation)	105.56	103.55	104.53	106.68	107.54	108.32	109.72	110.09	110.41	110.65	110.70	110.91
cloud droplets (simulation)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	128.21	126.57	122.74
Received elevation angle / (°)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	20.5	21	22
experiment II	112.19	112.71	112.71	112.93	112.93	112.93	112.92	112.92	110.28	110.95	109.70	109.69
aerosols (simulation)	110.92	111.10	111.29	111.33	111.45	111.52	111.79	112.00	112.06	112.10	112.19	112.60
cloud droplets (simulation)	121.19	120.51	117.79	119.25	114.89	113.21	111.38	110.10	109.61	109.60	109.57	109.56
Received elevation angle / (°)	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	36	40
experiment II	110.28	110.28	110.29	110.95	110.28	110.28	111.74	112.20	112.20	112.20	113.68	115.21
aerosols (simulation)	112.87	113.28	113.50	112.54	112.88	112.93	113.42	113.15	113.56	113.43	113.77	114.47
cloud droplets (simulation)	109.39	109.33	109.51	110.02	112.90	117.17	120.70	125.12	128.22	131.64	145.76	149.91

实验中,当发送仰角固定为 2° 时,接收仰角从 0° 逐步增大到 15° ,此时FOV与由发送光源投射在云层下界形成的次一级面光源没有交集,接收信号中来自于云滴粒子的一次散射功率贡献为0,并且由于云滴粒子的多次散射贡献相对较小,因而接收信号功率主要来自于大气气溶胶粒子散射的贡献。根据散射相函数和能量传输的逆二次方定律,接收信号功率随接收仰角的增大呈负指数规律衰减,因为发送和接收仰角变大意味着光子需要经历更长的迁移距离后才能被检测器接收到,也就是说传输光信号的能量损失变大,这就意味着小的发送、接收仰角对于散射光信号的接收更为有利。这是信号接收的第一部分,即由大气气溶胶粒子散射贡献的接收信号。

当接收仰角进一步从 15° 变化到 30° 的过程中,也就是FOV与由发送光源投射在云层下界形成的次一级面光源出现交集并逐步增大,路径损耗迅速减小,在 $\alpha_2 = 21^\circ$ 和 22° 位置达到最小值109.7 dB;接收仰角从 31° 继续增大,路径损耗再次迅速增大,于 $\alpha_2 = 40^\circ$ 处达到最大值115.2 dB。理论上随着仰角从 20° 继续变化到 30° 的过程中一次有效散射体逐渐增大,但同时接收仰角的增大导致检测器接收到的粒子前向散射功率减小,两者共同作用使得接收信号功率在 20° 到 30° 之间近似保持一个稳定值。此外,由于实验过程中云的不断变化,也导致了接收信号功率的测量值稍有波动,但路径损耗保持在110 dB附近,与理论分析结果相一致。

随着接收仰角的进一步增大,FOV与次一级面光源的交集逐步减小至0,由云滴粒子一次散射贡献的接收信号功率逐渐减小直至为0。同时,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,此时接收信号功率再次主要来自于大气气溶胶粒子散射,随着角度的增大,大气气溶胶粒子散射的接收信号功率随仰角的增大而呈负指数规律衰减的特性决定了总的接收信号的强度值进一步减小。

5 结 论

针对经典的H-G系列理论相函数与云滴粒子群的实际角散射强度分布之间存在较大差异的实际情况,提出平均散射相函数以更好地反应云滴粒子的角散射强度分布特性;通过马可洛夫链建立多次散射随机分析模型,从大气气溶胶粒子散射和云散射两个方面分析了长距离非视距散射光通信链路的

路径损耗特性;通过模型仿真分析得到两种通信链路下的最佳通信几何构架,并通过实地实验数据与仿真结果的对比,验证分析的可信性。

参 考 文 献

- 1 Z. Xu, G. Chen, F. Abou-Galala *et al.*. Experimental performance evaluation of non-line-of-sight ultraviolet communication systems[C]. *SPIE*, 2007, **6709**: 67090Y
- 2 H. Yin, J. Yang, S. Chang *et al.*. Analysis of several factors influencing range of non-line-of-sight UV transmission [C]. *SPIE*, 2007, **6783**: 67833E
- 3 R. Moncur, P. Edwards, L. N. Binh *et al.*. Non-line-of-sight cloud-scatter communication[C]. *IEEE Lasers & Electro-Opt.*, 2009
- 4 Zhengyuan Xu, Haipeng Ding, B. M. Sadler. Analytical performance study of solar blind non-line-of-sight ultraviolet short-range communication links[J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(16): 1860~1862
- 5 Zhengyuan Xu. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]. *ICASSP*, 2007. III 577~III 580
- 6 Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo. Atmospheric Physics [M]. Beijing: Beijing University Press, 2003. 416~433
盛裴轩,毛节泰,李建国.大气物理学[M].北京:北京大学出版社,2003.416~433
- 7 H. C. Hulst. Light Scattering by Small Particles[M]. New York: Dover Publications, 1981. 330~350
- 8 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,汪井源.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
- 9 Song Chao, Xu Zhiyong, Wang Jingyuan. Cloud-scattering model and channel transmission characteristics analysis[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0213001
宋超,徐智勇,汪井源.云散射模型与信道传输特性分析[J].中国激光,2012, **39**(2): 0213001
- 10 B. Wu, Z. Hajarian, M. Kavehrad. Free space optical communications through clouds: analysis of signal characteristics [J]. *Appl. Opt.*, 2008, **47**(17): 3168~3176
- 11 B. Wu, B. Marchant, M. 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
- 12 H. Ding, Z. Xu, B. 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
- 13 Liu Min, Wang Hongxing, Wang Qian *et al.*. A revision model of the calculation of atmospheric attenuation in water fogs weather [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1005002
刘敏,王红星,王倩等.雨雾共存天气下大气衰减计算的修正模型[J].中国激光,2011, **38**(10): 1005002
- 14 Zhang Chengchang, Zhou Wenxian. Atmospheric Aerosol Tutorial [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1995. 210~233
章澄昌,周文贤.大气气溶胶教程[M].北京:气象出版社,1995.210~233
- 15 Hao Zengzhou, Gong Fang, Pan Delu *et al.*. Scattering and polarization characteristics of dust aerosol particles [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0101002
郝增周,龚芳,潘德炉等.沙尘气溶胶粒子群的散射和偏振特性[J].光学学报,2012, **32**(1): 0101002
- 16 Wei Xiaodong, Zhang Hua. Analysis of optical properties of non

- spherical dust aerosols[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(5): 0501002
- 卫晓东, 张 华. 非球形沙尘气溶胶光学特性的分析[J]. *光学学报*, 2011, **31**(5): 0501002
- 17 H. Ding, G. Chen, A. K. Majumdar. Modeling of non-line-of-sight ultraviolet scattering channels for communication[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2009, **27**(9): 1535~1544
- 18 S. A. Prah, M. Keijzer, S. L. Jacques *et al.*. A Monte Carlo model of light propagation in tissue[C]. *SPIE*, 1989, **1S**(5): 102~111
- 19 B. Wu. Free-Space Optical Communications Through the Scattering Medium: Analysis of Signal Characteristics [D]. Pennsylvania: Pennsylvania State University, 2007. 29~38

栏目编辑: 王晓球