

文章编号: 0253-2239(2010)08-2229-07

“日盲”紫外光通信网络中节点覆盖范围研究

赵太飞 冯艳玲* 柯熙政 何 华

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要 Ad Hoc 网络技术可以大大扩展紫外光散射通信的有效范围,对通信节点覆盖范围模型的研究非常重要;针对“日盲”波段(200~280 nm)紫外光通信的特点及 Ad Hoc 网络中固有的一些特性,研究了非视距(non-line-of-sight)紫外光散射通信的三种通信方式,分析了单次散射信道中大气传输衰减,有效散射体体积,接收功率;根据单次散射数学信道模型中收发仰角的不同,得到三种不同的通信模型,并在此基础上建立了“日盲”紫外光通信网络中节点覆盖范围模型,并分析计算了三种通信方式下节点通信距离和覆盖范围;给出了紫外光散射通信网络中不同通信方式下通信节点覆盖范围的具体公式和计算方法。

关键词 光通信;散射;通信覆盖范围;紫外光;日盲

中图分类号 TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103008.2229

Research on the Coverage Area of Communication in the Solar-Blind UV Communication Network

Zhao Taifei Feng Yanling Ke Xizheng He Hua

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

Abstract Ad Hoc network technology can significantly extend the effective range of ultraviolet scattering communication. So it is important to discuss the coverage of communication nodes. Based on solar-blind ultraviolet (200~280 nm) communication features and the inherent characteristics of Ad Hoc network, three types of UV non-line-of-sight (NLOS) communication system are analyzed. Atmosphere transmission attenuation, effective scattering volume and received power in single scattering channel are discussed. The node communication distance is calculated and the coverage model of a UV communication network node is established according to the different focal angles of transmitter and receiver. At last, the formulas and calculation method of the coverage area are given.

Key words optical communications; scattering; coverage area of communication; ultraviolet (UV); solar-blind

1 引 言

紫外光是一种波长在 10~400 nm 的电磁波,由于在这一波长范围内的紫外线依波长变化而表现出不同效应,所以通常把紫外光划分为近紫外(NUV, 315~400 nm),中紫外(MUV, 280~

315 nm),远紫外(FUV, 200~280 nm),超紫外(VUV, 10~200 nm)四个波段^[1]。大气对流层上部臭氧层(10~50 km)对 200~280 nm 波段紫外光强烈的吸收作用,使得这一波段的紫外辐射在海平面附近几乎衰减为零,该波段被称为“日盲区”^[2~4]。

收稿日期: 2009-10-12; 收到修改稿日期: 2009-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(60977054),中国博士后科学基金(20080441179),陕西省教育厅科技专项基金(08JK386, 07JK332)和西安市科技计划项目[CXY101212]资助课题。

作者简介: 赵太飞(1978—),男,博士研究生,讲师,主要从事通信网络、自组织网络技术等方面的研究。

E-mail: zhaotaifei@163.com

导师简介: 柯熙政(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事现代信号处理、现代通信技术、导航技术等方面的研究。

E-mail: xzke@xaut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: qiyun917@126.com

“日盲”紫外光通信主要是采用远紫外波段光波(200~280 nm)作为传输介质,利用大气中的粒子、气溶胶、灰尘等微粒对“日盲”紫外光的散射进行信息传输的一种新型通信方式。紫外光通信自身的优点包括:低窃听率;低位辩率;系统抗干扰能力强;全方位性;可用于非视距通信;无需捕获、对准和跟踪(APT);全天候工作^[1,5]。但是,紫外光通信具有发射功率低、通信覆盖范围小、大气衰减严重、存在大量单向信道等固有缺陷,而 Ad Hoc 网络具有无中心、自组织、可快速展开、可移动和多跳等特点^[6],如果将“日盲”紫外光通信和 Ad Hoc 网络技术相结合,就可以大大弥补紫外光通信的固有缺陷。研究“日盲”紫外光网络,首先必须针对紫外光节点通信覆盖范围进行研究,本文主要研究建立非视距“日盲”紫外光通信的覆盖范围模型。

2 “日盲”紫外光非视距通信方式

“日盲”紫外光在大气中传播时主要受到瑞利(Rayleigh)散射和米氏(Mie)散射的影响,衰减的非常快,但散射传播路径可绕过人造和自然障碍物,实现非视距(NLOS)通信^[7~19],“日盲”紫外光 NLOS 通信的收发示意图^[7]如图 1 所示。发射端以发散角 ϕ_1 向空间发出光信号,接收端的视场角为 ϕ_2 ,发射与接收仰角分别为 θ_1 和 θ_2 , θ_s 为散射角,发射光束与接收视场在空间重叠区域的大气形成一个收发连接的有效散射体 V 。发射光信号经过大气的衰减到达气溶胶颗粒和大气分子等散射体,各种散射体对紫外

光进行散射,接收端接收来自该散射体的光散射信号,这样就实现了光信号的非视距传送。因此,发射光束的发散角和接收视场角以及发射接收仰角等因素决定了通信节点的覆盖范围。

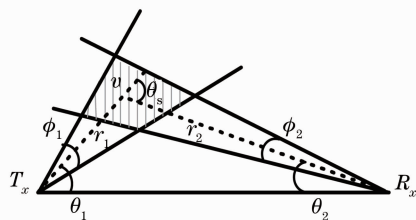


图 1 散射光通信的收发示意图

Fig. 1 Schematic diagram of scattering communication link

根据光轴和水平轴之间的夹角,紫外光 NLOS 通信可以分为 NLOS(a)、NLOS(b)和 NLOS(c)三种通信方式^[9],如图 2 所示,表 1 给出了三种通信方式的性能比较^[10]。三种通信方式可以通过调整 θ_1 和 θ_2 实现相互转换,假如工作在(a)通信方式下,减小 θ_1 和 θ_2 ,可以转化为(b)和(c)类工作方式,最终转换为视距通信(LOS)^[8]。同时,系统的工作距离由最短变为最长,通信带宽由最窄变为最宽,全方位性由最好变为最差。

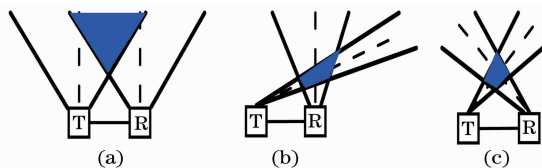


图 2 三种紫外光 NLOS 通信方式

Fig. 2 Three types of NLOS ultraviolet communication

表 1 NOLS 紫外光不同通信方式性能比较

Table 1 Comparison of NOLS ultraviolet communication in different configurations

Model	Zenith angle of the transmitter $\theta_1 / (^\circ)$	Zenith angle of the receiver $\theta_2 / (^\circ)$	Omnidirectional	Distance /km	Common volume	Bandwidth
NLOS (a)	90	90	best	1	unbounded	smallest
NLOS (b)	<90	90	better	1.5~2	bounded	medium
NLOS (c)	<90	<90	worst	2~2.5	bounded	maximum

3 “日盲”紫外光 NLOS 通信的衰减

3.1 大气的吸收

紫外光通信中的衰减主要由大气吸收和散射决定,利用 MODTRAN 仿真水平传输距离 1 km,能见度 23 km 时的大气传输衰减,如图 3 所示。从图中可以看出紫外光吸收能力最强的是臭氧,约占总衰减的 75%左右。另外,臭氧的吸收带在 200~300 nm 之间,臭氧浓度的变化将强烈影响到大气透射率,最终影响到通信的覆盖范围^[5]。

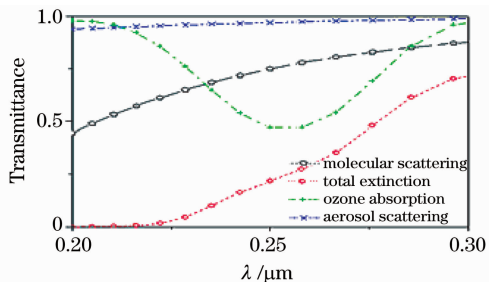


图 3 大气透射率曲线

Fig. 3 Atmospheric transmissivity

臭氧是紫外光通信中吸收衰减的主要因素, Inn 等确定了在紫外光吸收带内臭氧的吸收系数, 如在 266 nm 波长处, 臭氧的吸收系数 K_a (km^{-1})^[5] 可用下式表示为

$$K_a = 0.025d, \quad (1)$$

其中 d 表示大气中的臭氧的体积分数。图 4 是不同臭氧的体积分数对大气透射率的影响, 由图可以看出在 250 nm 波长左右臭氧的吸收最强, 波长 300 nm 以后臭氧对大气衰减几乎没有作用, 随着臭氧体积分数的增加, 透射率逐渐减小, 当体积分数为 2×10^{-7} 时, 大气透射率最低, 说明臭氧的吸收能力最强。

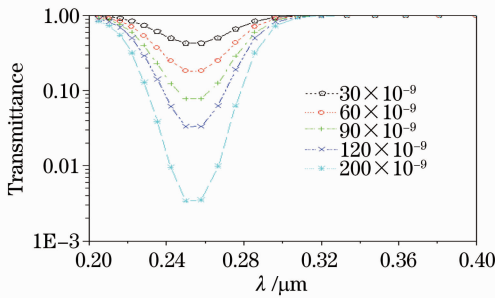


图 4 不同臭氧的体积分数下大气透射率曲线
Fig. 4 Atmospheric transmittance of different ozone volume fraction

3.2 大气的散射

大气对光束的散射可分为大气分子的散射和气溶胶微粒的散射^[14]。根据传输的紫外光波长与散射粒子大小的关系, 紫外光通信产生的散射主要分为米氏散射和瑞利散射^[11]。

散射体的尺寸大小与入射光波波长相当时为米氏散射, 散射光强^[12]为

$$I_\theta \propto \frac{1}{\lambda^N}. \quad (2)$$

图 5 是米氏散射光强的角分布图, 由图可见米氏散射的不对称性, 由于前向散射远大于后向散射, 所以在紫外光通信中, 某些情况下可以忽略后向散射和偏振光的影响。

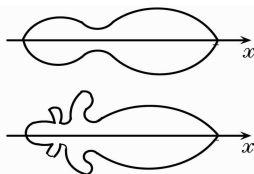


图 5 米氏散射光强分布

Fig. 5 Mie-scattering light intensity distribution

米氏散射比较复杂, 通常用 Generally Henyey-Greenstein (HG) 函数近似分析, 对其进行了修正。

其相函数表示^[13]为

$$P_m(\theta_s) = \frac{3}{2} \times \frac{1 - g^2}{2 + g^2} \frac{1 + (\cos\theta_s)^2}{(1 + g^2 - 2g\cos\theta_s)^{3/2}}, \quad (3)$$

式中 g 为非对称因子, 非对称因子 g 描述了前向和后向散射的关系。图 6 给出了米氏散射相函数, 前向散射随着非对称因子 g 的增大而逐渐增强, 可以看到图中 g 为 0.4 时前向散射最强, 后向散射最弱。

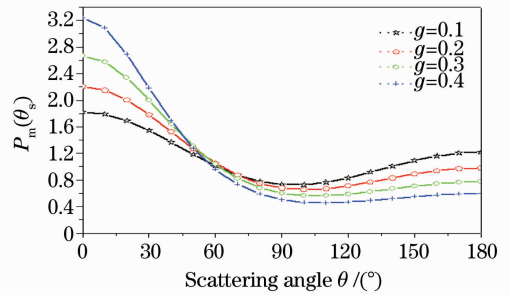


图 6 米氏散射相函数

Fig. 6 Phase function of Mie-scattering

米氏散射的散射系数^[14]为

$$K_{sM} = \frac{3.91}{R_v} \times \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^q, \quad (4)$$

式中 R_v 为能见度 (km), λ 的单位是 nm, $\lambda_0 = 550 \text{ nm}$, $q = 0.585R_v^{1/3}$ 为修正因子。

当散射体的尺寸比入射光波波长小时为瑞利散射。散射光强度与光波长的四次方成反比, 前向和后向散射能量相等, 散射光强^[13,14]为

$$I_\theta \propto \frac{1}{\lambda^4}, \quad (5)$$

图 7 为瑞利散射光强分布图^[12], 由图可见瑞利散射的对称性, 由于瑞利散射大都为大气分子散射, 在晴朗天气下, 空气中气溶胶浓度非常低, 此时紫外光通信主要考虑瑞利散射, 瑞利散射的相函数^[15]为

$$P_R(\theta_s) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2\theta_s). \quad (6)$$

图 8 是瑞利散射相函数, 其中瑞利散射相函数是关于 90° 对称, 前向和后向散射都是最强的, 90° 和 270° 时相函数最小。

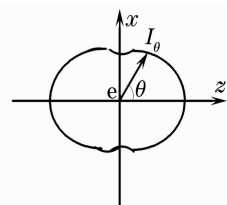


图 7 瑞利散射

Fig. 7 Rayleigh scattering light intensity distribution

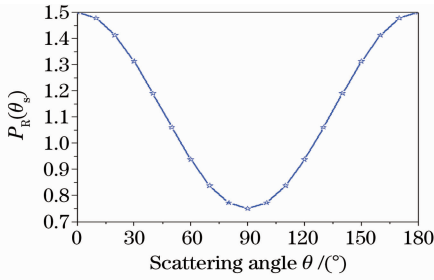


图 8 瑞利散射相函数

Fig. 8 Phase function of rayleigh-scattering

瑞利散射的散射系数为

$$K_{SR} = \frac{8\pi^3 [n(\lambda)^2 - 1]^2}{3N\lambda^4} \times \frac{6 + 3\delta}{6 - 7\delta}, \quad (7)$$

式中 N 表示散射体的数密度, $n(\lambda)$ 表示大气的折射率, δ 表示退偏振项。对于标准大气, 分子数密度 $N = 2.54743 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $\delta = 0.035$ 。

3.3 有效散射体积 V 的近似分析

图 9 给出了单次散射紫外光通信收发示意图的几何参数^[7], 过 O, P, O', P' , 分别做 $AB \perp r_1$, $CD \perp r, EF \perp r_2, GH \perp r$, 利用几何中的割补法近似计算出 V_{ABCD} 和 V_{EFGH} 的体积, 紫外光散射通信中, 为了达到更好的通信效果, 有效散射体体积 V , 取相贯体积较小的, 表示为

$$V = \min(V_{ABCD}, V_{EFGH}), \quad (8)$$

其中

$$V_{ABCD} = \frac{1}{3} \pi \tan^2 \frac{\phi_1}{2} \left\{ \left[r_1 + \frac{r_1 \tan(\phi_1/2)}{[\tan \theta_s + \tan(\phi_2/2)] \cos \theta_s} \right]^3 - \left[r_1 - \frac{r_2 \sin(\phi_2/2)}{\sin(\theta_s - \phi_2/2)} \right]^3 \right\},$$

$$V_{EFGH} = \frac{1}{3} \pi \tan^2 \frac{\phi_2}{2} \left\{ \left[r_2 + \frac{r_1 \tan(\phi_1/2)}{[\tan \theta_s + \tan(\phi_1/2)] \cos \theta_s} \right]^3 - \left[r_2 - \frac{r_1 \sin(\phi_1/2)}{\sin(\theta_s - \phi_1/2)} \right]^3 \right\}$$

图 9 中 $d \approx r_1 \phi_1$ ^[15], 通常 ϕ_2 比较小, 有效散射体的空间分布分以下三种情况:

1) $d \gg r_2 \phi_2$ 时, 如图 10(a) 所示, 有效散射体是一个相贯体, 近似为底面半径是 $r_2 \phi_2/2$, 高是 d 的圆柱, $V \approx \pi (r_2 \phi_2/2)^2 d$, 有效散射体体积小, 噪声干扰也比较小。

2) $d \ll r_2 \phi_2$ 时, 如图 10(b) 所示, 有效散射体近似为底面边长是 d , 高是 $r_2 \phi_2$ 的方柱, $V \approx r_2 \phi_2 d^2$, 有效散射体体积大, 且噪声大,

3) $d \approx r_2 \phi_2$ 时, 如图 10(c) 所示, 有效散射体体积

$V \approx r_2 \phi_2 d^2$, 相对图 10(b) 中的情况, 噪声小很多。

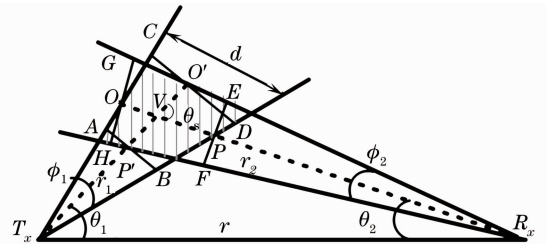


图 9 单次散射光通信的收发示意图

Fig. 9 Schematic diagram of single-scattering communication link

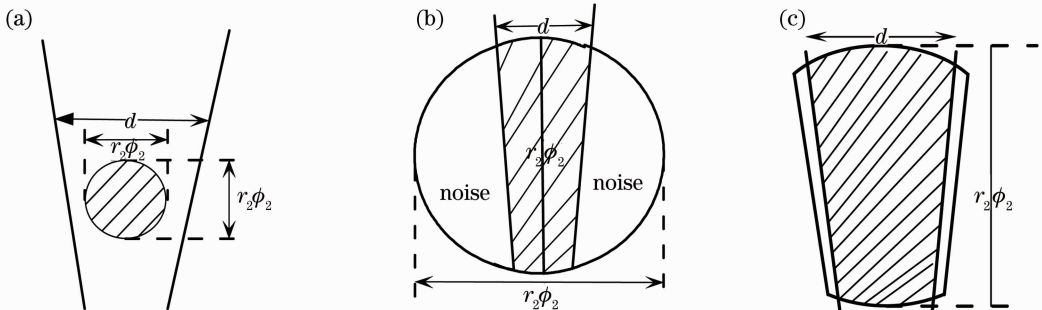


图 10 有效散射体的切面图

Fig. 10 Type of effective scattering intersections

3.4 NLOS 通信的接收功率

在单次散射 NLOS 紫外光通信中, 考虑路径损耗和衰减的作用, 发射端功率 P_t 经 r_1 传输后为 $\left(\frac{P_t}{\Omega_1 r_1^2}\right) \exp(-K_e r_1)$, 通过有效散射体散射后变为

$\left(\frac{P_t K_s}{\Omega_1 r_1^2 4\pi} P_s V\right) \exp(K_e r_1)$, 散射光束到接收端可视为 LOS 传输, 影响因素包括空间链路损耗 $(\lambda/4\pi r_2)^2$, 大气衰减 $\exp(-K_e r_2)$, 探测器的接收增益 $4\pi A_r/\lambda^2$ ^[16]。所以接收功率^[17]为

$$P_{r,NLOS} = \left(\frac{P_t}{\Omega_1}\right) \left[\frac{\exp(-K_e r_1)}{r_1^2}\right] \left(\frac{K_s P_s V}{4\pi}\right) \left(\frac{\lambda}{4\pi r_2}\right)^2 \exp(-K_e r_2) \frac{4\pi A_r}{\lambda^2}, \quad (9)$$

式中单位立体角的功率 P_t/Ω_1 , 消光系数 $K_e = K_a + K_s$, 其中 K_a 为吸收系数, K_s 为散射系数, P_s 为散射角 θ_s 的相函数, V 为有效散射体积, A_r 为接收孔径面积。

$$\begin{aligned} \Omega_1 &= 2\pi[1 - \cos(\phi_1/2)], \quad \theta_s = \theta_1 + \theta_2, \\ r_1 &= r \sin \theta_2 / \sin \theta_s, \quad r_2 = r \sin \theta_1 / \sin \theta_s, \\ V &\approx r_2 \phi_2 d^2, \end{aligned} \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式可以化简为

$$P_{r,NLOS} = \frac{P_t A_r K_s P_s \phi_2 \phi_1^2 \sin(\theta_1 + \theta_2)}{32\pi^3 r \sin(\theta_1) [1 - \cos(\phi_1/2)]} \cdot \exp\left[-\frac{K_e r (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}\right], \quad (11)$$

4 NLOS 紫外光通信节点的覆盖范围模型

根据紫外光 NLOS 通信方式不同, 依次对三种方式的覆盖范围进行分析。

1) NLOS(a)类

此类通信方式中发送端和接收端仰角均为 90° , 假定有效散射体体积有限, 发散角为 ϕ_1 , 发射端功率传输极限高度为 h , 则发送端的覆盖范围是半径为 $h \tan(\phi_1/2)$ 的圆形区域。此时发送端存在较大的后向散射, 信号传输能力差, 严重影响通信效果和传输距离, 所以此类通信方式一般很少采用。

2) NLOS(b)类

当发送端仰角小于 90° , 接收端仰角为 90° 时, 为 NLOS(b)类通信方式。图 11 中假设发射端功率 P_T , 发散角 ϕ_1 , 视场角 ϕ_2 , 发射与接收仰角分别为 θ_1 和 θ_2 , 传输距离 r 。发射端功率能量是有限的, 假设其最远传输距离是 r_1 。作以 r_1 为高, GH 为底面圆直径的圆锥在地面的投影。

计算可得:

$$\begin{aligned} AO &= \frac{r \cos(\phi_2/2)}{\cos(\theta_1 + \phi_2/2)}, \quad B'D = \frac{r \tan(\phi_1/2)}{\cot \theta_1 - \tan(\phi_2/2)}, \\ AB' &= \frac{r \cos \theta_1 \cos(\phi_2/2)}{\cos(\theta_1 + \phi_2/2)}, \end{aligned} \quad (12)$$

以 O 点为 midpoint, A 为顶点的圆锥, 在地面的覆盖范围, 如图 12 所示。

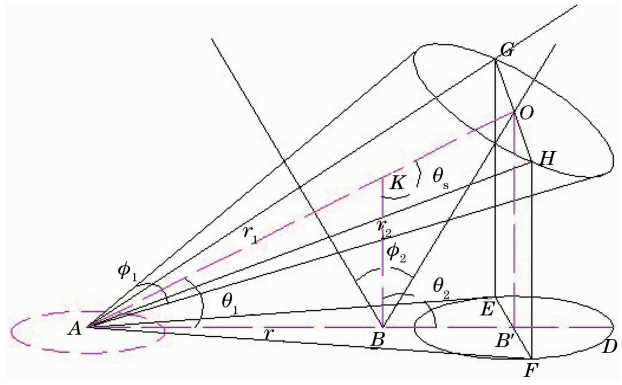


图 11 NLOS (b)类投影的立体图

Fig. 11 Three-dimensional projection of type b NLOS

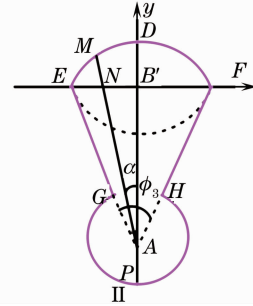


图 12 NLOS (b)类投影的平面图

Fig. 12 NLOS plane projection of type II NLOS

考虑到米氏散射前后向的不对称性, 紫外光通信主要考虑的是前向散射的覆盖范围, 但是在发射端附近存在一定的后向散射。椭圆弧 $EMDF$ 为前向散射的覆盖范围, 对后向散射采用圆弧近似修正, 圆弧的半径取前向散射椭圆弧的短半轴。为了在有效覆盖范围内对信号进行接收。在椭圆弧 $EMDF$ 上取任意一点 M , 与发射端 A 点的夹角为 α 。其中椭圆弧 $EMDF$ 满足的方程为

$$\begin{aligned} \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} &= 1, \quad a = EF/2 = \tan\left(\frac{\phi_1}{2}\right) \frac{r \cos(\phi_2/2)}{\cos(\theta_1 + \phi_2/2)}, \\ b &= B'D = \frac{r \tan(\phi_1/2)}{\cot \theta_1 - \tan(\phi_2/2)}, \end{aligned} \quad (13)$$

直线 AM 满足

$$y = kx + d, \quad k = -\cot \alpha, \quad d = -\frac{r \cos \theta_1 \cos(\phi_2/2)}{\cos(\theta_1 + \phi_2/2)}, \quad (14)$$

其中 M 点的坐标为 $M(x_0, y_0)$, A 点的坐标为 $A\left[0, -\frac{r \cos \theta_1 \cos(\phi_2/2)}{\cos(\theta_1 + \phi_2/2)}\right]$ 。 M 点的坐标表示为

$$x_0 = -r \cos \frac{\phi_2}{2} \left[\frac{\cos \theta_1 \cdot \cot \alpha \cdot \cos^2 \frac{\phi_2}{2} \cdot (\cot \theta_1 - \tan \frac{\phi_2}{2})^2}{\cos^3(\theta_1 + \frac{\phi_2}{2}) + \cos(\theta_1 + \frac{\phi_2}{2}) \cdot \cot^2 \alpha \cdot \cos^2 \frac{\phi_2}{2} \cdot (\cot \theta_1 - \tan \frac{\phi_2}{2})^2} + \sqrt{\frac{-\cos^2 \frac{\phi_2}{2} \cdot \cos^2 \theta_1 \cdot (\cot \theta_1 - \tan \frac{\phi_2}{2})^2 \cdot \cos^2(\theta_1 + \frac{\phi_2}{2}) + \tan^2 \frac{\phi_2}{2} \cos^4(\theta_1 + \frac{\phi_2}{2}) + \tan^2 \frac{\phi_2}{2} \cdot \cos^2 \frac{\phi_2}{2} \cdot \cos^2(\theta_1 + \frac{\phi_2}{2}) \cdot \cot^2 \alpha \cdot (\cot \theta_1 - \cot \frac{\phi_2}{2})^2}{\cos^3(\theta_1 + \frac{\phi_2}{2}) + \cos(\theta_1 + \frac{\phi_2}{2}) \cdot \cot^2 \alpha \cdot \cos^2 \frac{\phi_2}{2} \cdot (\cot \theta_1 - \tan \frac{\phi_2}{2})^2}} \right]$$

$$y_0 = -\cot \alpha \cdot x_0 - \frac{r \cdot \cos \theta_1 \cdot \cos \frac{\phi_2}{2}}{\cos(\theta_1 + \frac{\phi_2}{2})}$$

根据两点之间的距离公式可得

$$|AM| = \sqrt{(x_0 - 0)^2 + \left[y_0 + \frac{r \cos \theta_1 \cos(\phi_2/2)}{\cos(\theta_1 + \phi_2/2)} \right]^2}$$

|AM| 为前向散射的覆盖范围,后向散射修正圆的半径 AP 等于前向散射椭圆短半轴 B'D,所以后向的覆盖范围约为 |B'D|。为了达到较好的通信效果,接收端一定要在前向散射覆盖范围之内。

随着发送端仰角的增大前向散射弧逐渐向发射端方向缩进,而后向散射弧逐渐扩大,当仰角增大到 90°时,转化为(a)类通信方式,覆盖范围为圆形区域。

为了对分析模型进行验证,假定 r=1 km,φ₁=30°,θ₁=45°,α=30°,φ₂=60°,θ₂=90°。M(-0.6099, 0.4224),A(0,-0.63400),其中单位为 km,前向散射覆盖范围|AM|≈1.2198 km,后向散射覆盖范围|B'D|≈0.6340 km。结果中可以看出,相对前向散射,后向散射覆盖范围较小,传输能量主要集中在前向,所以在紫外光通信中,前向散射是决定通信效果的主要因素。

3) NLOS(c)类

当发送端仰角小于 90°,接收端仰角小于 90°时,为 NLOS(c)类通信方式。NLOS(b)类中逐渐减小 θ₂,即转化为(c)类。在地面投影如图 13 所示,在(b)类覆盖范围的基础上,增加了三角形覆盖区域。此时后向散射很小,可以忽略不计。当 φ₄ ≥ φ₃ 时覆盖范围为 A 点到圆弧的距离;当 φ₄ ≤ φ₃ 时覆盖范围为 A 点到直线 BN 的距离

$$|AM| = \left| \sin \frac{\phi_4}{2} \left| \frac{r \cos \theta_1 \cos(\phi_2/2)}{\cos(\theta_1 + \phi_2/2)} + \frac{r \sin \theta_1 \cos \theta_2}{\sin \theta_s} \right| \right|$$

在(c)类中,发送和接收端仰角减小到一定程度时,变为 LOS 通信,此时的覆盖范围为三角形,通信容量最大,通信距离较长,但无法发挥紫外光通信“全

方位通信”的优势。

实际通信过程中,还存在很多复杂情况有待于进一步解决,如接收和发送端的光轴可能没有交点,收发同向等。

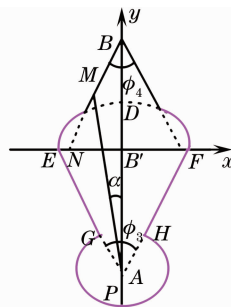


图 13 NLOS (c)类投影的平面图

Fig. 13 Plane projection of type c NLOS

5 结 论

本文在介绍“日盲”NLOS 紫外光通信基本原理的基础上,分析了分子吸收、微粒散射对大气衰减的影响。建立了 NLOS 紫外光散射通信的数学模型,讨论了系统的收发仰角、接收视场和发散角对紫外光通信覆盖范围的影响,得到了有效散射体体积和散射通信覆盖范围的近似计算模型,该通信节点覆盖范围模型在“日盲”紫外光通信实现组网的研究中具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- 1 R. E. Huffman. Atmospheric Ultraviolet Remote Sensing[M]. Boston: Academic Press, 1992, 7~12
- 2 B. Charles, B. Hughes, A. Erickson et al.. An ultraviolet laser based communication system for short range tactical applications [C]. SPIE, 1994, 2115: 79~86
- 3 Zhang Wei, Li Jiye. Video transmission in the UV communication system[J]. Microcomputer Information, 2009,

- 25(2-3): 148~149
张 炜,李霖野. 紫外光通信系统中的视频传输研究[J]. 微机信息, 2009, **25**(2-3): 148~149
- 4 K. C. Liddiard. Status of focal plane detector arrays for smart IR sensors[C]. *SPIE*, 1996, **2746**: 72~79
- 5 Chen Junhong, Yang Xiaoli. 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 P. Von Rickenbach, R. Wattenhofer, A. Zollinger. Algorithmic models of interference in wireless ad hoc and sensor networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, **17**(1): 172~185
- 7 A. S. Zachor. Aureole radiance field about a source in a scattering-absorbing medium[J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(12): 1911~1922
- 8 Yao Li, Li Jiye. Ultraviolet short range communication through atmosphere[J]. *Journal Atmospheric and Environmental Optics*, 2006, **1**(2): 136~137
姚 丽,李霖野. 大气紫外光近距离通信的研究[J]. 大气与环境光学学报, 2006, **1**(2): 136~137
- 9 G. A. Shaw, A. M. Siegel, J. Mode. Recent progress in short-range ultraviolet communication [C]. *SPIE*, 2005, **5796**: 214~225
- 10 Tang Yi, Ni Guoqiang, Zhang Lijun *et al.*. Study of single scatter model in NLOS UV communication [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(5): 759~760
唐 义,倪国强,张丽君等. 非直视紫外光通信单次散射传输模型研究[J]. 光学技术, 2007, **33**(5): 759~760
- 11 Mi Lisheng, Wang Ping, Tian Peigen *et al.*. The model in NLOS UV communication [J]. *Ship Electronic Engineering.*, 2008, **28**(2): 68~69
密立生,王 平,田培根等. 紫外光非直视通信模型[J]. 舰船电子工程, 2008, **28**(2): 68~69
- 12 H. H. Jia, J. K. Yang, S. L. Chang *et al.*. Study and design on high data rate UV communication system[C]. *SPIE*, 2005, **6021**: 440~446
- 13 U. Vogel, I. Kretzschmar, A. Hertzch *et al.*. Instrumentation for determination of scattering phase function of biological tissues [C]. *SPIE*, 1996, **2628**: 128~139
- 14 Li Xiaofeng. Satellite-ground Optical Communication theory and Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2007, 81~115
李晓峰. 星地激光通信链路原理与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2007, 81~115
- 15 D. E. Sunstein. A scatter communications link at ultraviolet frequencies. Cambridge, MA, 1968
- 16 D. M. Reilly. Atmospheric optical communications in the middle ultraviolet [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1976
- 17 Zhengyuan Xu. Approximate performance analysis of wireless ultraviolet links[C]. *ICASSP*, 2007, 15~20
- 18 Zhou Zhibin, Xiao Shali, Wang Ke *et al.*. Research of the key devices of solar blind ultraviolet communication system[J]. *J. Chongqing University*, 2006, (12): 31~33
周志斌,肖沙里,汪 科等. 日盲紫外光通信系统关键器件[J]. 重庆大学学报, 2006, (12): 31~33
- 19 Wang Huiqin, Ke Xizheng. Free space optical communication based on vertical bell labs layered space2Time[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **6**(35): 875~876
王惠琴,柯熙政. 基于垂直分层空时编码的自由空间光通信[J]. 中国激光, 2008, **6**(35): 875~876