

大气对近地面无线激光通信链路的影响*

邓代竹, 荣 健

(西南交通大学应用物理系, 四川成都 610031)

摘要:由于无线光通信有通信容量大, 保密性好, 抗电磁干扰, 结构简单等优点, 近年来随着适合无线光通信应用的先进通信电子设备等技术的成熟, 又掀起了对其研究的热潮, 无线光通信被视为下一代光通信的发展方向之一。首先指出了无线光通信的技术优势并回顾了其发展史, 阐述了大气对近地面无线激光通信系统链路的影响, 重点研究了大气的衰减和大气湍流效应中的光强(大气)闪烁、光束弯曲和漂移及光束展宽, 并对大气闪烁进行了仿真。最后对近地面无线光通信进行了展望。

关键词:无线光通信; 大气衰减; 湍流效应

中图分类号: TN929.121 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2004)03-0243-05

Atmospheric effects on the link near the earth of optical wireless communication*

DENG Dai-zhu, RONG Jian

(Department of Applied Physics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Optical wireless communication has several advantages. It has become a viable tool to solve "last-mile" and been considered one of development direction of the next generation optical communication. The history of the development of the optical wireless communication is reviewed firstly, and then, the atmospheric effects to the laser wireless communication link near the earth are elaborated and the emphasis is the atmospheric degradations and turbidity effects. Finally, the scintillation is simulated and the future is forecasted.

Key words: Optical wireless communication; Atmospheric degradation; Turbidity effect

0 大气效应对光通信的影响

光通信技术是指一种以光波作为传输载体的通信技术。随着科学与社会的进步, 它已成为当今社会信息传播最常用的手段。然而按照传输介质的不同,

光通信系统可以分为光纤通信、自由空间光通信和 underwater 光通信。其中自由空间光通信又称为无线光通信, 是指以光波为载体, 在真空或大气中传递信息的通信技术。而根据通信链路的不同, 无线光通信的通信方式又可以是地面链路、地面对空间链路、空间对空间链路, 或者空间对水下链路。近地面无线激光通信则

收稿日期: 2003-07-02; 修订日期: 2003-11-08

* 基金项目: 西南交通大学基础科学研究基金资助(2001B14)

作者简介: 邓代竹(1981-), 男, 安徽安庆人, 硕士, 研究方向为无线光通信。

是指在地面附近,对流层以下(一般是 0~5 km)所建立的地面链路通信方式,它的通信信道是近地面的对流层大气。因为它以光波作为信息载体,频率非常高,其潜在的通信容量及其他优势是传统的电通信与光纤通信所无法比拟的。与其他通信手段相比,近地面无线激光通信的优点是:通信容量大,可以用于宽带接入解决最后 1000 m 的瓶颈问题;保密性好,可用于需要严格保密的场合,尤其是军事场所;抗电磁干扰;组网方便灵活、无需申请频带许可,适用于不宜采用无线电通信的地方及地形地貌不适合敷设光纤的地区;可用于移动通信基站间的互连。

1 近地面无线激光通信

1.1 发展历史

科学技术的发展总是与人类文明的发展历史紧密相关的。可以认为,人类早期的长途通信手段——烽火台报警通信就是一种无线光通信。它是现代接力通信的雏形,每个烽火台就是一个通信中继站。但是由于各种原因直到 1880 年,美国著名的发明家 Alexander Graham Bell 才通过他的新发明——光电话(Photophone),首次实现了现代意义的无线光通信,其通信距离是 182.88 m。但由于它易受外界噪声干扰,可靠性不如电缆传输而最终没投入商用。

此后,由于光源的频谱、方向性等技术满足不了要求,大气光通信的发展较为缓慢。到了 1960 年 7 月,随着世界上第一台红宝石固态激光器的出现,光源的频谱、方向角得到改进,从而大大改善了大气光通信的传输性能,大气光通信研究开始起步,并在 20 世纪 60 年代中期掀起研究热潮。从 1961~1970 年,光通信的研究主要集中于利用大气作为传输媒介的光传输实验。我国在 1963 年就开始研究大气激光通信,但由于大气光通信受气候变化的影响十分严重,使应用受到很大限制。到 90 年代,随着各种与其相适应的技术的发展与成熟,大气信道的研究也逐渐成熟,无线光通信技术开始进入民用领域。近几年来,随着掺铒光纤放大器(EDFA)、波分复用(WDMA),尤其是自适应光学(AO)技术的发展很好地解决了大气湍流问题,大气光通信在传输距离、传输容量、可靠性等方面都得到了很大改善,适用面也越来越广。

1.2 大气的影响

对近地面无线激光通信,由于它的传输介质选择的是大气层信道,所以当激光在大气中传输时,由于大气层的参数随机变化,损耗和折射是影响通信系统的两个重要问题。前者影响目标接收光功率,而后者影响光束的传输途径,进而影响光束与目标的位置指向。同时,二者又有一定联系,通常由大气折射引起的光束传输途径的改变导致光束在大气传输中的损耗^[1]。此外,大气信道的背景辐射及器件的自身性能也会对通信系统产生影响。

大气层可分为三种情况:透明空气、云和雨。透明空气为最佳信道,其特征是长距离能见度、晴天和相对低的衰减。然而透明空气仍然包含有涡流和温度梯度(透明空气的扰动),它可以引起投射场的折射率变化,从而会聚或改变光束的传播方向。云大气层条件包含湿气、雾和浓云,其特征为增加的水蒸气积聚和更高的衰减。雨表示大尺度水珠,它可以产生最严重的影响。所以大气对通信系统的影响可概括为大气衰减和大气折射率随空间和时间变化引起的大气湍流效应。

1.2.1 大气衰减

当激光在大气中传播时,由于大气中存在着各种气体分子和微粒,如尘埃、烟雾以及刮风下雨下雪等气象变化,使部分光辐射能量被吸收而转变为其他形式的能量(如热能等),部分能量被散射而偏离原来的传播方向(即辐射能量空间重新分配)。吸收和散射的总效果是传输光辐射强度衰减。其表达式为^[2]:

$$T_{\lambda} = I/I_0 = \exp(-\beta_{\lambda}L)$$

式中 I_0 为通过大气前的光强; I 为通过大气后的光强; T_{λ} 为波长为 λ 的光在大气中传输 R 的透过率; β_{λ} 为波长为 λ 的光的衰减系数; L 为传输距离。

(1) 大气分子的吸收

当光波在大气中传输时,大气分子在光波电场的作用下产生极化,并以入射光的频率作受迫振动。所以为了克服大气分子内部阻力要消耗能量,表现为大气吸收。当入射光的频率等于大气分子的固有频率时发生共振吸收,大气分子吸收出现最大值。所以大气分子的吸收特性强烈依赖于光波的频率,而且不同大气分子对光波的吸收也不一样。在近地面的大气

激光通信系统中,激光波长一般在近红外区,在此范围内, H_2O 和 CO_2 分子是最主要的吸收分子,是晴天大气光学衰减的重要因素。由它们的吸收谱线可知,对一些特定波长的光波,它们表现出极为强烈的吸收,光波几乎无法通过,而对某些区段(大气窗口)呈现弱吸收。满足大气传输的低损耗窗口约为 $0.8\sim 1.6\mu m$ 的近红外波段。近地面无线光通信系统大多用半导体激光器($0.85, 1.3, 1.55\mu m$)或半导体泵浦的Nd:YAG($810\mu m$)固体激光器作信号光。

(2) 大气分子的散射

由于大气密度的起伏破坏了大气的光学均匀性,当光波在大气中传输时,次波的相干性遭到破坏;另外,大气分子使光波的传播方向发生改变,导致光在各个方向的散射。在通信窗口,波长远大于大气分子线度,根据散射理论,此时的散射为瑞利散射。

由瑞利散射定律^[3]:

$$\sigma = 0.827 \times N \times A^3 / \lambda^4$$

式中 σ 为瑞利散射系数(cm^{-1}); N 为单位体积中的分子数(cm^{-3}); A 为分子的散射截面(cm^2); λ 为光波波长(cm)。

由上式得知:分子散射系数与波长的四次方成反比,即波长越长,散射越弱;波长越短,散射越强烈。

1.2.2 大气湍流效应

由于实际中大气一直处于运动(湍流)状态,所以大气的折射率也一直随时间和空间作无规则运动。折射率的这种随机变化使光波参量在传输过程中随机改变,光束质量受到严重影响。表现为^[3]:光束截面内的强度闪烁;光束的弯曲和漂移(方向抖动);光束的展宽等,统称为大气湍流效应。其强度大小通常用 Rytov 变量度量^[4]:

$$\sigma_1^2 = 1.23 C_n^2 k^{7/6} L^{11/6}$$

式中 C_n 为折射率结构常数; k 为波数($2\pi/\lambda$); L 为传播距离。

当 $\sigma_1^2 < 1$ 时为弱湍流; $\sigma_1^2 \sim 1$ 时为中湍流; $\sigma_1^2 \gg 1$ 时为强湍流。大气湍流漩涡尺寸范围从 $l_0 \sim L_0$, l_0 为湍流漩涡的内尺度, L_0 为外尺度。在近地面附近, l_0 通常是毫米量级, L_0 则是观察点离地面的高度。

(1) 光强闪烁(大气闪烁)

大气闪烁是由于空气折射率的随机细微变化引起的。当光束通过湍流漩涡时,折射率的变化引起波前失真,造成接收相位的随机变化。当光束直径 d_B 大于湍流直径 l 时,光束直径内包含许多个湍流漩涡,每个漩涡各自对光束形成独立的散射和衍射,而造成光束强度在时间和空间上的随机起伏,光强忽大忽小,即光强闪烁。

(2) 光束弯曲和漂移

当传播的光束直径 d_B 小于湍流直径 l 时,光束直径包含在一个湍流漩涡内,湍流的作用主要使光束整体发生随机偏折。所以在接收平面上,光束中心(光斑)以某个统计平均位置为中心,发生快速随机性跳动,即光束弯曲,数值上可用漂移量表示。若将光束视为整体,其平均方向会明显发生变化,称为光束弯曲。由折射定律,在水平传输情况下,光束曲率为^[3]:

$$c = -(79/T)(dP/dh) + (79P/T^2)(dT/dh)$$

式中 P 为大气压强; T 为大气温度; h 为垂直高度。

在水平距离 L 处,光斑位置偏离原始位置的距离: $l = 0.5cL^2$, ($L \gg l$)。

(3) 光束展宽

光束展宽是指接收到的光斑半径或面积的变化,是由衍射和湍流漩涡的扩展引起的。当光束直径 d_B 大于湍流漩涡直径 l 时,引起湍流漩涡的扩展,造成中心轴的接收光强有一常量衰减,光斑半径增大。

由于湍流尺寸 l 在 l_0 和 L_0 间连续分布,光束直径在传播过程中又不断变化,上述湍流效应总是同时发生。而理论和试验均表明,以上湍流效应都有饱和效应,即当其增大到一定值时就不再增加,而略有减小呈现饱和。

2 系统仿真

对于研究人员来说,预先知道光强的概率分布和大气闪烁的大小比较重要。根据理论与实验分析近似得出闪烁的概率分布满足对数正态调制拉卡分布规律^[5]:

$$P(I) = \frac{(1+\varphi)e^{-\varphi}}{\sqrt{2\pi\sigma_z}} \int_0^\infty \frac{dz}{z^2} I_0 \left\{ 2 \left[\frac{(1+\varphi)\varphi I}{z} \right]^{1/2} \right\} \times$$

$$\exp\left[-\frac{1+\varphi}{z}I - \frac{1}{2\sigma_z^2}\left(\ln z + \frac{1}{2}\sigma_z^2\right)^2\right]$$

式中 φ 为相干参数; σ_z^2 为对数正态调制因子方差; z 为传播距离。

在弱湍流区, 上式简化为对数正态分布:

$$P(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2}I} \exp\left[-\frac{1}{2\sigma_z^2}\left(\ln I + \frac{1}{2}\sigma_z^2\right)^2\right]$$

$$\sigma_z^2 = \ln \langle I^2 \rangle$$

在强湍流区, 上式简化为对数正态调制负指数分布:

$$P(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_z^2}} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{I}{z} - \frac{1}{2\sigma_z^2}\left(\ln z + \frac{1}{2}\sigma_z^2\right)^2\right] \frac{dz}{z^2}$$

$$\sigma_z = \ln\left(\frac{1}{2} \langle I^2 \rangle\right)$$

大气闪烁(光强起伏)的大小可用对数振幅方差 σ_I^2 表示^[6]。

在弱湍流情况下:

$$\sigma_I^2 = 0.252\sigma_1^2 = 0.31C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (\text{平面波})$$

$$\sigma_I^2 = 0.0954\sigma_1^2 = 0.125C_n^2 k^{7/6} L^{11/6} \quad (\text{球面波})$$

在强湍流情况下:

$$\sigma_I^2 = 1 + 0.86(\sigma_1^2)^{-2/5} = 1 + 1.0578(C_n^2 k^{7/6} L^{11/6})^{-2/5} \quad (\text{平面波})$$

$$\sigma_I^2 = 1 + 2.8(\sigma_1^2)^{-2/5} = 1 + 3.444(C_n^2 k^{7/6} L^{11/6})^{-2/5} \quad (\text{球面波})$$

图 1 为弱湍流时, 当 σ_z 取不同值 ($\sigma_z = 0.1, 0.3, 0.5, 1$) 时, 接收光强 I 的概率分布。随着 σ_z 的增大, I 的分布范围越广, 与对数正态分布的近似效果越差。当 $\sigma_z < 0.5$ 时, $P(I)$ 与对数正态分布有很好的近似。另外, 由表达式可求得: 当 $I = \exp\left(-\frac{3}{2}\sigma_z^2\right)$ 时, $P(I)$ 取最大值。在强湍流、通信距离为 2400 m 时, 不同 σ_z 所对应的光强 I 的概率分布, 如图 2 所示。在这种情况下, $P(I)$ 随波长的增大而呈负指数减小。 σ_z 越大, $P(I)$ 衰减越慢。

图 3 表示在通信距离为 2400 m 时, 弱湍流 ($C_n^2 = 9 \times 10^{-17} \text{ m}^{-2/3}$) 情况下, 平面波与球面波的大气闪烁大小 σ_I^2 与波长 λ 的关系。其中实线为平面波的闪烁随波长的变化曲线, 虚线为球面波随波长的变化曲线。此时, 闪烁大小随波长的增加而减小, 且平面波闪烁大于球面波。

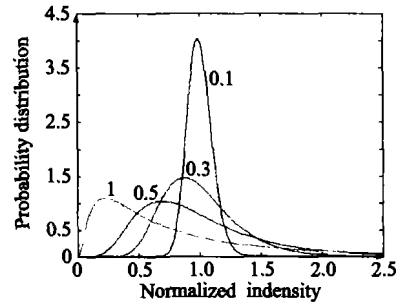


图 1 弱湍流时光强分布

Fig. 1 Intensity distribution in weak turbulence

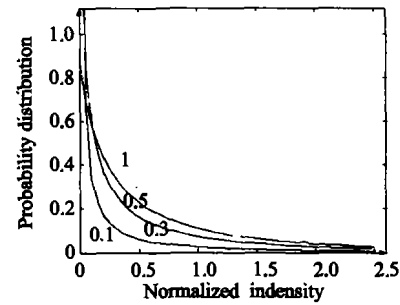


图 2 强湍流时光强分布

Fig. 2 Intensity distribution in strong turbulence

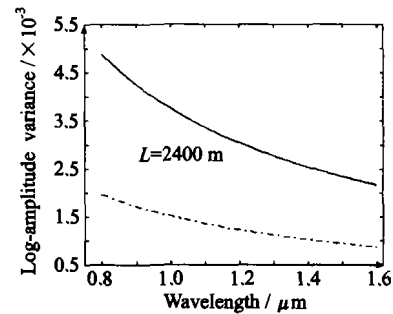


图 3 弱湍流时大气闪烁随波长的变化

Fig. 3 Atmospheric scintillation as a function of wavelength in weak turbulence

图 4 表示在通信距离为 2400 m 时, 强湍流 ($C_n^2 = 9 \times 10^{-11} \text{ m}^{-2/3}$) 情况下, 平面波与球面波的大气闪烁大小 σ_I^2 与波长 λ 的关系。其中实线为平面波的闪烁随波长的变化曲线, 虚线为球面波随波长的变化曲线。此时, 闪烁大小随波长的增加而增加, 而球面波闪烁大于平面波。

3 展望

由于近地面无线激光通信技术所利用的信道是

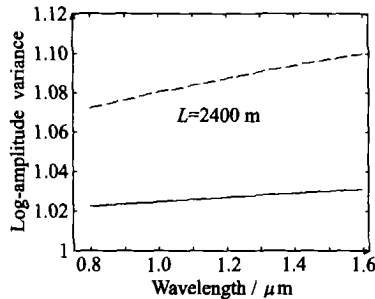


图4 强湍流时大气闪烁随波长的变化

Fig. 4 Atmospheric scintillation as a function of wavelength in strong turbulence

近地面的对流层大气,它受大气的衰减与湍流的影响比较大。但系统结构简单,使用及安装方便,适用面广。另外,微波系统将作为光无线通信系统的备用设备以克服空间光通信受大气因素影响大的缺点。当大气情况过于恶劣以至无法通信时,自动启动微波通信系统,大大提高了无线光通信系统的可靠性。只要很好地解决大气衰减与湍流效应,近地面无线激光

通信技术在未来几十年将有较好的发展前景。

参考文献:

- [1] 李正东. 激光在大气传输中的损耗和折射[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 73-77.
- [2] Shaik K S. Atmospheric propagation effects relevant to optical communication[R]. TDA Progress Report 42-49, N89-10201, 1988. 180-188.
- [3] 安毓英, 刘继芳, 李庆辉. 光电子技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002. 36-43.
- [4] Nuber R M, Shanmugan K S. Modeling the atmosphere as an unguided optical communications channel[A]. Proc IEEE[C]. 1989 ICC, 3. 1480-1484.
- [5] 张逸新, 迟泽英. 光波在大气中的传输与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [6] Isaac I Kim, Mary Mitchell, Eric Korevaar. Measurement of scintillation for free-space laser communication at 785 nm and 1550 nm[A]. Proc SPIE[C]. 1999, 3850. 54-59.

2004年全国光电技术学术交流会征文通知

中国宇航学会光电技术专业委员会联合各协办单位将于2004年10月下旬在厦门召开2004年全国光电技术学术交流会。

征文内容: 1. 国内外光电技术研究动态及发展方向综述; 2. 光电技术在国防及民用等领域的应用; 3. 光电系统测试及可靠性技术研究; 4. 光电探测、制导及对抗技术研究; 5. 光电信息处理技术(图像分析和处理、目标识别与特征提取、模式识别与智能控制等); 6. 光电成像传感器和系统; 7. 新型光学材料, 光学系统设计、加工、测试技术; 8. 光学薄膜技术、红外头罩技术; 9. 激光技术、激光材料和新激光器的应用研究; 10. 稳定随动系统和光学陀螺技术及其应用; 11. 空间遥感和成像光谱仪技术; 12. 大气传输和目标建模及系统仿真技术; 13. 光通信技术、全光网络技术。

征稿要求: 1. 内容重点突出, 文字通顺, 数据准确, 符号、单位规范。 2. 全文4000字左右, 文摘约200字, 关键词4~6个。 3. 投稿格式: 1) 用Word格式, A4纸, 页边距: 上边距2.5cm, 下边距2.5cm, 左边距3cm, 右边距2.5cm。 2) 中文标题为宋体三号加黑; 作者姓名、单位、邮编、文摘、关键词为楷体五号; 正文为宋体五号; 文中一级标题为宋体小四号加黑, 二级标题为宋体五号加黑; 图字、表字为宋体小五号加黑; 参考文献为宋体小五号加黑; 公式字母全部为斜体, 公式中字母的上下角标为正体; 矩阵和矢量为黑斜体; 行距为单倍行距。 4. 投稿时请注明“会议稿件”字样。 5. 已在国内外正式出版物上发表的论文不予录用, 请勿一稿两投。 6. 会议投稿请作者自行进行非密处理。 7. 请作者提供详细的联系地址、邮编、电话、e-mail地址。 8. 欢迎使用电子信箱投稿, e-mail: office9info@vip.sina.com。 投稿截止日期为7月30日。

联系地址: 天津市225信箱32分箱(300192) 联系电话: (022)23669275, (022)23363000 转3083

联系人: 李瑾 强斌 刘艳 杨明 传真: (022)23666400

中国宇航学会光电技术专业委员会
2004年6月