

文章编号: 0258-7025(2009)03-0564-05

# 光通信中天线表面颗粒污染与激光波长的关系

乌大琨<sup>1,2</sup> 周彦平<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学航天学院 黑龙江, 哈尔滨 150041; <sup>2</sup> 哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江, 哈尔滨 150001)

**摘要** 空间光通信系统天线表面的颗粒污染能够导致光通信系统光学性能的变化。利用时域有限差分法(FDTD)建立了空间光通信系统天线表面污染模型,考虑到空间光通信远场发射、远场接收的特点,在直接利用FDTD法得到近场光强分布的基础上,进行了近场-远场变换。实例计算表明,对于一定直径的微粒,当颗粒间距达到某一值时,近场光强分布为具有一定数值的直线。然后以此光强分布为参考,计算了微粒直径相同、入射波长不同时所对应的颗粒间距最大值。结果表明, $r \gg \lambda$ 时,波长越长,对应的颗粒间距越大。在进行空间光通信系统的防护设计时,如果载波波长较长,应尽量减少光学表面大颗粒的形成。

**关键词** 光通信; 光强分布; 时域有限差分法; 颗粒污染

中图分类号 V443+.1; TN929.12 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093603.0564

## Relationship between Antenna Contamination and Laser Wavelength in Optical Communication

Wu Dakun<sup>1,2</sup> Zhou Yanping<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> School of Astronautic, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, 150041, China)  
(<sup>2</sup> Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang, 150001, China)

**Abstract** Surface-deposited particles can impact on the optical performance of space optical communication. A model of antenna surface contamination is set up by finite-difference time-domain(FDTD) method. Transformation from near field to far field is made, basing on the near-field light intensity distribution calculated by FDTD for emission and receiving are all from far field. It is remarkable that distribution of near-field transmitted light intensity reaches a certain value, when distance between certain radius particles reaches a value, and the distribution is regarded as a reference. The relevant maximum distance between particles is obtained, with the same particles size and different wavelength. The results show that for a certain distribution of light intensity, the longer the laser wavelength is, the greater the relevant distance between particles is on the condition that the particle size is much larger than the wavelength. While designing the defence of space optical system, the big particles forming on the optical surface should be reduced for longer carrier wavelength.

**Key words** optical communication; distribution of light intensity; finite-difference time-domain method; particle contamination

## 1 引言

近些年来,自由空间光通信系统(FSO)得到了广泛的应用<sup>[1~6]</sup>。但是,大气中的分子、雾、雨、尘埃、雪、烟(气溶胶粒子的直径大约在 $0.002 \mu\text{m} < d < 100 \mu\text{m}$ )<sup>[7]</sup>及航天器材料自身的放气会以随机方

式沉积在光学系统表面等冷的裸露表面,从而影响空间光通信系统的传输性能。研究表明,分子污染会使 $0.4 \sim 18 \mu\text{m}$ 可见光及红外光透过率降低<sup>[8]</sup>。Chou等<sup>[9]</sup>指出在红外波段粒子的散射特性不可忽略。屈晓超等<sup>[10]</sup>回顾了各种不同尺寸和形状的金

收稿日期: 2008-07-07; 收到修改稿日期: 2008-11-24

作者简介: 乌大琨(1970—),女,高级工程师,博士研究生,主要从事空间光电信息技术方面的研究。

E-mail: wu.dk@hit.edu.cn

导师简介: 周彦平(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事空间环境与光电信息技术等方面的研究。

E-mail: ypzhou@hit.edu.cn

纳米微粒(Mie 散射区)的光学特性。本文则采用时域有限差分法(FDTD)、理想匹配层(PML)和理想磁导体(PMC)吸收边界条件(ABC)研究波长为 $\lambda = 0.193 \mu\text{m}, 0.830 \mu\text{m}, 1.55 \mu\text{m}, 10.6 \mu\text{m}$ 的高斯光束经沾染于光学表面的不同粒径大小的粒子层( $r \gg \lambda$ )后,透射光强分布的变化。

## 2 空间光通信系统的沾染模型

Kahnert<sup>[11]</sup>较详细地介绍了各种计算气溶胶粒子引起的散射和吸收的数值方法。但至今没有真正具有实用价值的方法。在这些方法中,虽然时域有限差分法<sup>[12,13]</sup>需要的计算机内存较大,但由于它能灵活运用于非均匀、各向异性、任意形状<sup>[14]</sup>、带电或不带电粒子的散射受到了青睐,被广泛用于衍射光学器件<sup>[15]</sup>、微带线和光波导的分析<sup>[16]</sup>、光子晶体的传输<sup>[17]</sup>、弱导光器件的仿真<sup>[18]</sup>、细胞的光散射<sup>[19~22]</sup>、大气冰晶的散射<sup>[23]</sup>等领域。针对 FDTD 计算耗时、占用内存大的缺点,Stavros V. Georgakopoulos 等<sup>[24]</sup>提出时间取二阶精度、空间取四阶精度的 FDTD(2, 4) 与子网格采用 FDTD(2, 2)相结合的方法降低了存储量,减少了计算时间。一些研究者则致力于用 FDTD 解决电学大尺寸目标或物体的问题,Yang 等<sup>[25]</sup>采用 FDTD 法计算无限长圆柱体在特定方向的二维散射时,尺度参数达到 60,Sun 等<sup>[26]</sup>做三维散射的计算时,尺度参数达到 40。而 Maxim A. Yurkin 等<sup>[27]</sup>在用 FDTD 计算时,尺度参数达到 80。基于 Yee 网格但采用 alternative direction implicit 技术使 FDTD 的时间步长不再受算法稳定性和精度的限制,而且比传统 FDTD 方法的速度至少快 1.55 倍<sup>[28]</sup>。

本文采用 FDTD 方法建立空间光通信系统的沾染模型。所研究的散射介质是有损耗的介质,其介电常数为复数。由于问题具有对称性,为节省计算机内存,可采用二维 FDTD 进行计算,并可采用 PMC 边界条件缩小计算区域。空间光通信系统是远场成像,在用 FDTD 法直接得到近场光强分布后,还需进行近场-远场变换。

### 2.1 基本理论与公式

1966 年,K. S. Yee 提出时域有限差分法。这种方法是直接用有限差分式代替麦克斯韦时域场旋度方程中的微分式,得到关于场分量的有限差分式。

光在自由空间传播所遵从的麦克斯韦方程的微分形式是

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}, \quad (1a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}. \quad (1b)$$

其时谐场形式为

$$\mathbf{E}(x, y, z, t) = \mathbf{E}(x, y, z) \exp(-i\omega t), \quad (2a)$$

$$\mathbf{H}(x, y, z, t) = \mathbf{H}(x, y, z) \exp(-i\omega t), \quad (2b)$$

这里  $\omega = kc$ ,  $k$  和  $c$  分别是自由空间中电磁波波数和波速。

对于有损耗的介质,方程(1b)中的  $\epsilon$  为复数,并且可以表示成  $\epsilon = \epsilon_r + i\epsilon_i$ 。由于光学折射率  $m = \sqrt{\epsilon\mu} = m_r + im_i$ ,对于非铁磁介质有  $\epsilon_r = m_r^2 - m_i^2$ ,  $\epsilon_i = 2m_r m_i$ ,于是

$$\nabla \times \mathbf{H}(x, y, z) = \omega(\epsilon_i - i\epsilon_r)\mathbf{E}(x, y, z), \quad (3)$$

(3)式乘以  $\exp(-i\omega t)$ ,利用(2)式可得

$$\nabla \times \mathbf{H}(x, y, z, t) = \omega \epsilon_i \mathbf{E}(x, y, z, t) + \epsilon_r \frac{\partial \mathbf{E}(x, y, z, t)}{\partial t}, \quad (4)$$

进一步简化可以得到

$$\frac{\partial [\exp(\tau t)\mathbf{E}(x, y, z, t)]}{\partial t} = \frac{\exp(\tau t)}{\epsilon_r} \nabla \times \mathbf{H}(x, y, z, t), \quad (5)$$

这里  $\tau = (\omega \epsilon_i / \epsilon_r)$ 。

考虑到在时间上  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{H}$  有半个时间步的变化,对于二维 TE 模,有

$$E_y^N(i, k) = E_y^{N-1}(i, k) + \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta z} \left[ H_x^{N-\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) - H_x^{N-\frac{1}{2}}\left(i, k - \frac{1}{2}\right) \right] - \frac{\Delta t}{\epsilon \Delta x} \left[ H_z^{N-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) - H_z^{N-\frac{1}{2}}\left(i - \frac{1}{2}, k\right) \right], \quad (6)$$

$$H_x^{N+1}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) = H_x^{N-\frac{1}{2}}\left(i, k + \frac{1}{2}\right) + \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} \cdot [E_y^N(i, k + 1) - E_y^N(i, k)], \quad (7)$$

$$H_z^{N+\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) = H_z^{N-\frac{1}{2}}\left(i + \frac{1}{2}, k\right) - \frac{\Delta t}{\mu_0 \Delta x} \cdot [E_y^N(i + 1, k) - E_y^N(i, k)], \quad (8)$$

式中  $\Delta t$  是时间步长,  $N$  为时间步数。由(6)~(8)式即可算出近场光强分布。

这里需要注意的是,为了保证解的稳定性,步长  $\Delta t$  必须满足

$$c\Delta t \leq \left( \frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-\frac{1}{2}}, \quad (9)$$

$c$  为工作模的最大相速值。

## 2.2 边界条件

实际采用 FDTD 方法计算时首先要解决的是有限计算空间的无反射截断问题,目前应用最广、效果最好的是 Berenger 提出的理想匹配层吸收边界条件。本文所选取的边界条件为:计算域的左右两侧为理想匹配层(PML)吸收边界条件,上下两边为理想磁导体(PMC)吸收边界条件<sup>[29]</sup>。

PMC 是令边界处磁场的切向分量为零,可以看作 Bloch 边界条件(周期边界条件)的特殊情况。对于轴对称光波入射到对称结构的问题,在进行二维 TE 模模拟时,与波的传播方向平行的边界用 PMC 边界条件可以减小需要计算的尺度范围。

## 2.3 近场-远场变换

由于空间光通信系统满足远场条件,基于 Fraunhofer 衍射理论由近场的计算结果得到远场光强分布

$$F(x_0, z_0) = \int f(x) e^{-jn \frac{2\pi x_0 x}{\lambda z_0}} dx, \quad (10)$$

这里  $f(x)$  为近场计算结果,  $x$  是近场平面的位置坐标,  $x_0$  为远场观察面的坐标,  $z_0$  为近场平面与远场观察面的距离,  $\lambda$  为计算域处的波长,  $n$  为介质的折射系数。

## 3 实例计算

Halil T. Eyyuboglu 等所做的一系列研究<sup>[30~35]</sup>已经表明:  $\cos$ -Gaussian, Hermite-cosine-Gaussian, Hermite-cosh-Gaussian, cosh-Gaussian, higher-order annular Gaussian, Hermite-sine-Gaussian 和 Hermite-sinh-Gaussian 光束经过湍流大气之后都会收敛为高斯光束,因此所作的高斯光束的分析对接收天线来说具有相对普遍的意义。这里假设光源为场振幅沿径向作高斯函数衰减变化的高斯光束(如图 1 所示)。

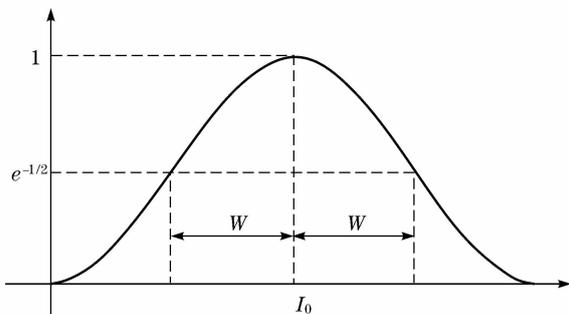


图 1 高斯光束

Fig. 1 Gauss beam

计算所用波长  $\lambda = 830 \text{ nm}$ , 高斯分布半宽度  $W = 3 \text{ mm}$ 。

考虑到所研究的对象具有对称性,为节省计算机内存,采用二维 FDTD 进行计算。

图 2, 3 分别为颗粒半径  $r = 0.0375 \text{ mm}$ , 颗粒间距为  $0.25 \text{ mm}$  及颗粒半径  $r = 0.72 \text{ mm}$ , 颗粒间距为  $1.922 \text{ mm}$  时远场光强分布的计算结果,横坐标为光通信系统接收面处的径向网格编号,纵坐标为光强。

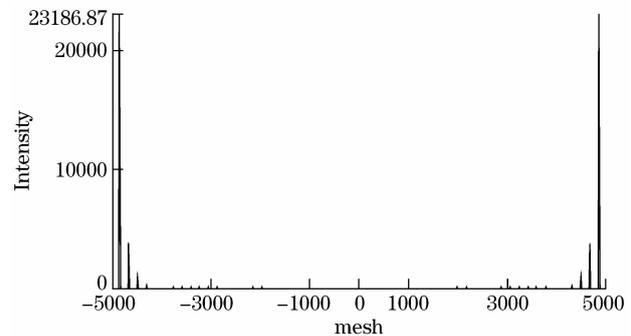


图 2 污染物颗粒半径  $r = 0.0375 \text{ mm}$ 、颗粒间距为  $0.25 \text{ mm}$  时的计算结果

Fig. 2 Calculation result with particle radius of  $0.0375 \text{ mm}$  and distance between particles of  $0.25 \text{ mm}$

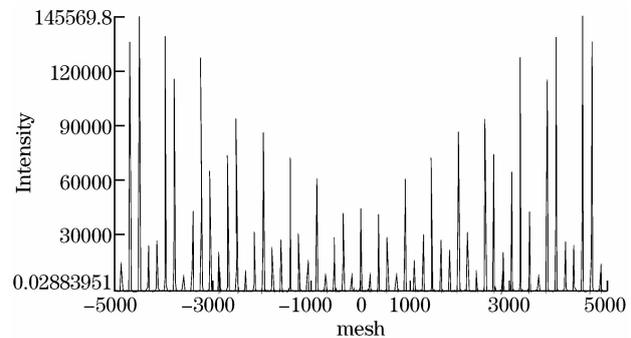


图 3 污染物颗粒半径  $r = 0.72 \text{ mm}$ , 颗粒间距为  $1.922 \text{ mm}$  时的计算结果

Fig. 3 Calculation result with particle radius of  $0.72 \text{ mm}$  and distance between particles of  $1.922 \text{ mm}$

## 4 微粒污染与激光波长的关系

为研究微粒污染与空间光通信用激光波长的关系,需要找到一个参考光强分布。当不同波长的光通过粒径相同的微粒层之后透射光强分布与该参考光强一致时,比较不同波长所对应的微粒间距。为此,对不同颗粒大小、不同颗粒间距的情况进行了大量计算,注意到在入射光波长和颗粒大小一定的情况下,当微粒间距达到一定值时,近场光强分布为具有一定数值的直线。于是,以此作为参考值,针对激

光器常用波长  $\lambda = 0.193 \mu\text{m}, 0.830 \mu\text{m}, 1.55 \mu\text{m}, 10.6 \mu\text{m}$ , 利用 FDTD 计算了颗粒直径相同、近场光强分布与该参考光强一致时微粒间距的最大值, 如表 1 所示。

表 1 颗粒半径为  $0.0375 \text{ mm}$  时, 激光波长与微粒间距最大值的

Table 1 Relationship between wavelength and maximum particles' distance with particle radius of  $0.0375 \text{ mm}$

| Radius of particles/mm | Wavelength/ $\mu\text{m}$ | Maximum space between particles when transmitted light reaches the reference value/mm |
|------------------------|---------------------------|---|
| 0.0375                 | 0.193                     | 75  |
|                        | 0.83                      | 839   |
|                        | 1.55                      | 1259  |
|                        | 10.6                      | 1259  |

从表 1 可以看出, 颗粒半径相同情况下, 除  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$  情况外, 入射光波长越长, 透射光强达到该参考值时微粒间距最大值越大。对于  $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$ , 应该注意到此时粒径尺度参数  $\alpha = 2\pi r/\lambda \approx 22$ , 接近 Mie 散射区, 已有很多研究工作者<sup>[36,37]</sup>对 Mie 散射进行了研究, 不再讨论。为研究大颗粒沾染对空间光通信系统的危害, 进一步将颗粒半径增加为  $r = 0.75 \text{ mm}$ , 再做上述计算, 所得结果如表 2。

表 2 颗粒半径为  $0.75 \text{ mm}$  时, 激光波长与微粒间距最大值的

Table 2 Relationship between wavelength and maximum particles' distance with particle radius of  $0.75 \text{ mm}$

| Radius of particles/mm | Wavelength/ $\mu\text{m}$ | Maximum space between particles when transmitted light reaches the reference value/mm |
|------------------------|---------------------------|---|
| 0.75                   | 1.55                      | 2749  |
|                        | 10.6                      | 2822  |

可以看出, 对于颗粒尺寸与入射光波长相比较大的透射问题, 颗粒尺寸相同的情况下, 入射光波长越长, 透射光强达到该参考值时微粒间距最大值越大。张立文等<sup>[38]</sup>在对不同条件空气中自导光丝产生的超连续辐射后向散射特性进行研究时, 也指出前向散射具有明显的波长依赖关系。

## 5 结 论

通过采用 FDTD 方法对天线表面受到不同微粒间距的颗粒沾染后透射光的光强分布的计算, 观察到当微粒间距达到一定值时, 近场光强分布为具有一定数值的直线, 说明多个污染物颗粒衍射叠加

的结果使近场光强对比度下降, 最恶劣时几乎为零。于是, 以此光强分布为参考, 分别对波长为  $\lambda = 0.193 \mu\text{m}, 0.830 \mu\text{m}, 1.55 \mu\text{m}, 10.6 \mu\text{m}$  的激光入射到被颗粒直径为  $r = 0.0375 \text{ mm}$  的微粒沾染的空间光通信系统天线表面后的透射光强分布进行计算, 除了  $10.6 \mu\text{m}$  激光情况外, 波长越短, 达到参考值的颗粒间距越小。而对于  $10.6 \mu\text{m}$  激光, 半径为  $r = 0.0375 \text{ mm}$  的微粒散射接近 Mie 散射区。进一步加大颗粒直径, 使  $r = 0.75 \text{ mm}$ , 仍然得到波长越短, 达到参考值的颗粒间距越小的结论。

空间光通信波长的选择是复杂的问题<sup>[39~42]</sup>。根据研究, 对于吸收光的能力较强的、同样大小的大颗粒污染物来说, 如果载波波长比较长, 只要少量的污染物即可使透过的光强降得很低。因此进行空间光通信系统的防护设计时, 如果载波波长较长, 光学表面大颗粒的干扰应予以足够重视。

## 参 考 文 献

- 1 J. M. Kahn, R. H. Katz, K. S. J. Pister. Mobile networking for smart dust[C]. *Proc. of ACM/IEEE Intl. ConMYM on Mobile Computing and Networking (MobiCom 99)*, Seattle, WA, August 1999, 17~19
- 2 P. B. Chu, N. R. Lo, E. Berg *et al.*. Optical communication using micro corner cuber reflectors[C]. *Proc. of IEEE MEMS Workshop*, Nagoya, Japan, 1997, 1:26~30, 350~55
- 3 T. H. Carbonneau, D. R. Wisely. Opportunities and challenges for optical wireless; the competitive advantage of free-space telecommunications links in today's crowded marketplace[C]. *SPIE*, 1997, **3232**:119~128
- 4 M. M. Ibrahim, A. M. Ibrahim. Performance analysis of optical receivers with space diversity reception[J]. *IEE Proc. - Commun.*, 1996, **143**(6):369~372
- 5 H. Willebrand, B. S. Ghuman. Free Space Optics: Enabling Optical Connectivity in Today's Networks[M]. Indianapolis, IN: Sams, 2002
- 6 L. Andrews, R. L. Phillips, C. Y. Hopen. Laser Beam Scintillation With Applications[M]. Philadelphia, PA: SPIE Press, 2001
- 7 Arun K. Majumdar, Jennifer C. Ricklin. Effects of the atmospheric channel on free-space laser communications[C]. *SPIE*, 2005, **5892**:58920K
- 8 Da Daoan, Li Wangkui. Vacuum Technology in Space[M]. Beijing: China Aerospace Press, 1995. 375~377  
达道安, 李旺奎. 空间真空技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1995. 375~377
- 9 M. D. Chou, K. T. Lee, S. C. Tsay *et al.*. Parameterization of cloud longwave scattering for use in atmospheric models[J]. *J. Climate*, 1999, **12**:129~169
- 10 Qu Xiaochao, Liang Jiaming, Yao Cuiping *et al.*. Optical properties of gold nanoparticle and its application in biological imaging and photothermal therapy[J]. *Chinese. J. Laser*, 2007, **34**(11):1459~1465  
屈晓超, 梁佳明, 姚翠萍等. 金纳米微粒的光学性质及其在生物成像和光热疗法中的应用[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1459~1465
- 11 F. M. Kahnert. Numerical methods in electromagnetic

- scattering theory[J]. *JQSRT*, 2003, **79**~**80**(1):775~824
- 12 A. Taflove, M. E. Brodwin. Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell's equations [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technol.* 1975, **MTT-23**, 623~630
  - 13 A. Taflove. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method[M]. 2nd ed., Artech House, Norwood, 2000
  - 14 Wenbo Sun. Light scattering by nonspherical particles: numerical simulation and applications[D]. PhD dissertation, 2000
  - 15 Feng Di, Yan Yingbai, Jin Guofan *et al.*. Rigorous vector analysis of diffractive micro-cylindrical lenses' characteristics of focal depth and focal shift[J]. *Chinese. J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1045~1049  
冯迪, 严瑛白, 金国藩等. 衍射微柱透镜轴向光强分布特性的严格电磁分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9):1045~1049
  - 16 He Xiaodong, Zhao Anping, Yu Rongjin *et al.*. Analysis of microstrip line and optical waveguide with the two-dimensional finite difference time domain method[J]. *J. Opto electronics · Laser*, 1998, **9**(5):392~395  
何晓东, 赵安平, 于荣金等. 用二维时域有限差分法分析微带线和光波导[J]. *光电子·激光*, 1998, **9**(5):392~395
  - 17 Zhu Zhihong, Ye Weimin, Yuan Xiaodong *et al.*. Study of transmission characteristics of 2-D photonic crystals by the finite-difference time-domain method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5):522~525  
朱志宏, 叶卫民, 袁晓东等. 用时域有限差分法研究二维光子晶体传输特性[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5):522~525
  - 18 Kong Fanmin, Li Kang, Liu Xin *et al.*. Application of the scalar PML-FDTD method for simulation of weakly guiding optical devices[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4):417~420  
孔繁敏, 李康, 刘新等. 标量 PML-2FDTD 算法在弱导光器件仿真中的应用[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):417~420
  - 19 A. Dunn, R. Richards-Kortum. Three-dimensional computation of light scattering from cells[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron*, 1996, **2**:898~905
  - 20 A. Dunn, C. Smithpeter, A. Welch *et al.*. Finite-difference time-domain simulation of light scattering from single Cell[J]. *J. Biomed. Opt.*, 1997, **2**:262~266
  - 21 R. Drezek R, A. Dunn, R. Richards-Kortum. Light scattering from cell; finite-difference time-domain simulations and goniometric measurements[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**:3651~3661
  - 22 R. A. Drezek, A. K. Dunn, R. R. Richards-Kortum. A pulsed finite-difference time-domain(FDTD) method for calculating light scattering from biological cells over broad wavelength ranges[J]. *Opt. Express*, 2000, **6**:147~157
  - 23 P. Yang, K. N. Liou. Finite-difference time domain method for light scattering by small ice crystals in three-dimensional space [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**:2072~2085
  - 24 V. Stavros, Georgakopoulos, A. Rosemary *et al.*. A Hybrid fourth-order FDTD utilizing a second-order FDTD subgrid[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2001, **11**(11):462~464
  - 25 P. Yang, K. N. Liou. Light scattering by hexagonal ice crystals: comparison of finite-difference time domain and geometric optics models[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**:162~176
  - 26 W. Sun, Q. Fu. Finite-difference time domain solution of light scattering by dielectric particles with a perfectly matched layer absorbing boundary condition[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**:3141~3151
  - 27 A. Maxim, Yurkin, Alfons G. Hoekstra, R. Scott Brock *et al.*. Systematic comparison of the discrete dipole approximation and the finite difference time domain method for large dielectric scatterers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(26):17902~17911
  - 28 Zheng Fenghua, Chen Zhizhang, Zhang Jiazong. A finite-difference time-domain method without the Courant stability conditions[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1999, **9**(11):441~443
  - 29 K. S. Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equation in isotropic media[J]. *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, 1966, **14**(3):302~307
  - 30 T. Halil, Eyyubolu, Yahya Baykal. Analysis of reciprocity of cos-Gaussian and cosh-Gaussian laser beams in a turbulent atmosphere[J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(20):4659~4674
  - 31 Halil Tanyer Eyyubolu. Hermite-cosine-Gaussian laser beam and its propagation characteristics in turbulent atmosphere[J]. *JOSA A*, 2005, **22**(8):1527~1535
  - 32 Halil Tanyer Eyyubolu. Propagation of Hermite-cosh-Gaussian laser beams in turbulent atmosphere[J]. *Opti. Commun.*, 2005, **245**(1~6, 17):37~47
  - 33 T. Halil, Eyyubolu. Serap Altay, Yahya Baykal. Propagation characteristics of higher-order annular Gaussian beams in atmospheric turbulence[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **264**(1):25~34
  - 34 H. T. Eyyubolu, Y. Baykal. Hermite-sine-Gaussian and Hermite-sinh-Gaussian laser beams in turbulent atmosphere[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**:2709~2718
  - 35 T. Halil, Eyyubolu, Yahya Baykal, Emre Sermutlu. Convergence of general beams into Gaussian intensity profiles after propagation in turbulent atmosphere[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **265**:399~405
  - 36 Yang Ruike, Ma Chunlin, Li Liangchao. Influence of multiple scattering on laser pulse propagation through sand and dust storm [J]. *Chinese. J. Laser*, 2007, **34**(10):1393~1397  
杨瑞科, 马春林, 李良超. 沙尘暴多重散射对激光脉冲传输的影响[J]. *中国激光*, 2007, **34**(10):1393~1397
  - 37 Wang Yingli, Liu Xiaodong, Dai Jingmin. Analysis of smog total obscure power on visible light based on laser transmission model [J]. *Chinese. J. Laser*, 2008, **35**(9):1415~1418  
王英立, 刘晓东, 戴景民. 基于激光透射模型的烟雾对可见光遮蔽能力分析[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9):1415~1418
  - 38 Zhang Liwen, Lin Chen, Xin Li *et al.*. Back scattering enhanced characteristics of super continuum emission from a self-guided filament in air[J]. *Chin. J. Lasers*, 2008, **35**(4):519~523  
张立文, 林晨, 辛立等. 空气中自导光丝超连续辐射后向散射增强特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):519~523
  - 39 Kamran Shaik, Hainid Hemmati. Wavelength selection criteria for laser communications[C]. *SPIE*, 1995, **2381**:342~357
  - 40 Ma Jing, Tan Liying, Wu Dianhong. Relationship between volume of transmitting antenna and wavelength of intersatellite optical communications, remote test and remote control[J]. *J. Telemetry, Tracking and Command*, 1996, **17**(6):45~47  
马晶, 谭立英, 吴殿鸿. 卫星间光通讯中发射天线体积与采用的光波长的关系[J]. *遥测遥控*, 1996, **17**(6):45~47
  - 41 Tan Liying, Ma Jin, Qin Ruhu *et al.*. Choice of wavelength of intersatellite optical communications[J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 1994, **26**(3):24~27  
谭立英, 马晶, 秦汝虎等. 卫星间光学通讯波长的选择[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1994, **26**(3):24~27
  - 42 R. M. Lerner. The VUV as a wavelength region for optical intersatellite communications[J]. *AIAA*, 1974, 74~499