

基于声光效应的光束偏转控制理论研究*

付琼¹, 金韬¹, 周詮²

(1 浙江大学 信息与电子工程学系, 杭州 310027)

(2 航天科技集团 504 所 空间微波技术国家重点实验室, 西安 710000)

摘 要:基于参量互作用观点及声光互作用原理, 构建了入射光为高斯光并且存在声波吸收情况下的声光偏转器模型. 基于此模型研究了超声波频率、声波功率和光束入射角对衍射光的影响. 对比了有声波吸收和无声波吸收两种情况下上述三个参量对衍射光产生的不同影响. 计算结果表明, 同无声光吸收时相比, 当存在声波吸收时, 偏转器的衍射效率将减小, 导致衍射波形畸变, 光强峰值位置发生偏移.

关键词:声光偏转器; 声衰减(声吸收); 卫星光通信

中图分类号: TN929.13

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)06-1083-5

0 引言

传统的光束方向机械调节方式已不能适用于高频振动环境下的卫星光通信终端, 必须采用新的方式来提高光束方向调节机构的响应带宽. 文献[1-3]提出了一种基于电光效应的星间相干检测跟踪技术, 但电光效应产生的光束偏转角比较小. 而声光晶体 TeO₂ 相对于电光晶体 LiNbO₃ 可以使光波产生更大的偏转角度. 文献[4]研究了 TeO₂ 声光偏转器, 构建了平面光和高斯光情况下的数学模型. 文献[5]报道了采用 TeO₂ 声光偏转器完成了卫星光通信中的细瞄和跟踪实验, 但其构建的声光偏转器数学模型基于理想情况, 没有考虑声光晶体对声波的衰减, 会影响控制准确度, 并不完全适用于卫星光通信这一特殊应用场合. 考虑实际情况, TeO₂ 对声波的衰减比较大, 这会使衍射效率减小, 衍射波形发生畸变, 光强的峰值位置产生偏移. 在卫星光通信终端中, 光束方向检测器一般采用 CCD 或 QD, 然后利用质心法确定成像光斑的位置. 这种光束方向检测方法在成像光斑是中心对称的情况下是精确的, 但声光偏转器对声波的吸收导致的衍射光畸变将产生定向误差. 本文的目的就是要研究存在声波吸收时的声光偏转器衍射性能, 分析超声波频率、声波功率和入射角对其性能的影响, 据此修正光束方向检测器的光斑定位算法模型, 提高光束定向准确度.

1 理论分析

1.1 无声衰减时的耦合波方程

首先, 从参量互作用的角度分析声光互作用过

程. 记入射光的圆频率和波矢量分别为 ω_0 和 \mathbf{k}_0 , 超声波的圆频率和波矢量分别为 Ω 和 \mathbf{K} , k_0 和 K 分别为波矢量 \mathbf{k}_0 和 \mathbf{K} 的模, 计算时选择光波波长 λ_0 为 632.8 nm. 入射光波和介质中的超声波相互作用产生一系列极化波. 假设极化波的圆频率为 ω_m , 波向量为 \mathbf{k}'_m , 它们的关系为^[6-7]

$$\omega_m = \omega_0 + m\Omega \quad (1)$$

$$\mathbf{k}'_m = \mathbf{k}_0 + m\mathbf{K} \quad (m = \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (2)$$

这些极化波转而激发具有不同复合频率的光辐射, 即各级衍射光, m 表示衍射光级次.

包含入射光和各级衍射光在内的总电场 $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$ 可表示为

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \hat{e}_m E_m(x, z) \cdot \exp[i(\omega_m t - \mathbf{k}'_m \cdot \mathbf{r})] \quad (3)$$

式中 \hat{e}_m 表示第 m 级衍射光的单位向量.

假设超声波为一单一频率的平面波, 其振幅可表示为

$$\mathbf{S}(\mathbf{r}, t) = \hat{s} \text{Scos}(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) = \frac{1}{2} \hat{s} S \{ \exp[i(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})] + \exp[-i(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})] \} \quad (4)$$

式中 \hat{s} 为单位应变张量; S 为声波的幅度, 它与声波功率 P_0 有如下关系^[4]

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho V_s(\theta_a)^2 LHS^2 \quad (5)$$

式中 ρ 为密度; $V_s(\theta_a)$ 为超声波与 [110] 轴夹角为 θ_a 时的声速; L 和 H 分别为换能器的宽度和长度, 其中 L 为超声换能器沿光传播方向的长度. P_0 是影响衍射光强度的主要因素之一.

由声光互作用引起的非线性极化波矢量为^[8]

$$\mathbf{P}^{(NL)} = \epsilon_0 \boldsymbol{\chi} : \mathbf{S} \cdot \mathbf{E} \quad (6)$$

式中四阶张量 $\boldsymbol{\chi}$ 为声致非线性极化率, 二阶张量 \mathbf{S} 为连续介质中的应变张量.

非线性波动方程的基本方程为^[8]

* 国家自然科学基金(60307005)资助

Tel: 0571-87951699 Email: lovefangqiong65@163.com

收稿日期: 2006-08-18

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{E}'' = \frac{1}{c^2 \epsilon_0} \mathbf{P}^{(\text{NL})''} \quad (7)$$

式中 \mathbf{E}'' 和 $\mathbf{P}^{(\text{NL})''}$ 分别表示 \mathbf{E} 和 $\mathbf{P}^{(\text{NL})}$ 对时间 t 的二阶导数. 把式(3)、(4)和(6)代入式(7), 可得声光互作用耦合波方程为

$$\begin{aligned} & - \left(\frac{\partial^2 E_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E_m}{\partial z^2} \right) + 2ik'_{mx} \frac{\partial E_m}{\partial x} + 2ik'_{mz} \frac{\partial E_m}{\partial z} + \\ & (k'^2_{mx} + k'^2_{mz} - k_m^2) E_m = \frac{k_m^2}{21} pS [-n_{m-1}^2 E_{m-1} + \\ & n_{m+1}^2 E_{m+1}] \end{aligned} \quad (8)$$

因为光波波矢量的模 k'_m 很大, 式(3)中的指数因子随 x, z 的变化远快于 $E_m(x, z)$ 随 x, z 的变化^[6-7], 所以式(8)中的 $\frac{\partial^2 E_m}{\partial x^2}$ 和 $\frac{\partial^2 E_m}{\partial z^2}$ 可以忽略.

因为入射光方向的改变会引起动量失配, 所以引入动态失配量 Δk_m ^[7]

$$\Delta k'_m = k'_m - k_m = k_0 + m\mathbf{K} - k_m \quad (9)$$

限制 Δk_m 的方向沿 Z 轴, 如图1. 本文中声光偏转器工作在离轴型反常布拉格衍射模式下, 超声波的方向 \mathbf{K} 与 X 轴 $[110]$ (晶轴)的夹角为 θ_a , 称为离轴角, 在此取 $\theta_a = 5^\circ$; 入射光以一定的角度进入偏转器, 入射光 \mathbf{K}_0 与 Z 轴 $[001]$ (光轴)之间的夹角为 θ_i , 衍射光 \mathbf{K}_1 与 Z 轴的夹角为 θ_d .

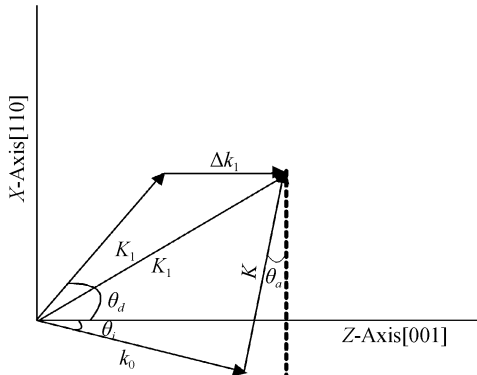


图1 包含动量失配的声光偏转器波矢量几何关系

Fig. 1 Schematic wave vector diagram of acousto-optic deflector for momentum mismatch condition

当满足 Δk_m 接近于 0 时, 第 m 级衍射光的光强最强, 其它级衍射可忽略, 只需要 1 级衍射, 因此实验时要尽可能使 Δk_1 接近于零.

考虑 $m=0, 1$ 时的情况, 即 0 级和 1 级衍射, 得到的耦合波方程组(忽略二阶偏微分)为

$$\begin{cases} 2ik'_{0x} \frac{\partial E_0}{\partial x} + 2ik'_{0z} \frac{\partial E_0}{\partial z} + (k'^2_{0x} + k'^2_{0z} - k_0^2) E_0 = \\ - \frac{k_0^2}{2} pSn_1^2 E_1 \\ 2ik'_{1x} \frac{\partial E_1}{\partial x} + 2ik'_{1z} \frac{\partial E_1}{\partial z} + (k'^2_{1x} + k'^2_{1z} - k_1^2) E_1 = \\ - \frac{k_1^2}{2} pSn_1^2 E_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中波矢量的模及其分量可以由图1的几何关系得出, 很明显方程中各系数都是恒定的.

1.2 有声衰减时的耦合波方程

当存在声衰减时, 超声波不再是单纯的单频平面波, 此时超声波振幅改写为

$$\begin{aligned} \mathbf{S}(\mathbf{r}, t) &= \hat{s} S \times 10^{-\alpha/40} \cos(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r}) = \\ & \frac{1}{2} \hat{s} S \times 10^{-\alpha/40} [e^{i(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})} + e^{-i(\Omega t - \mathbf{K} \cdot \mathbf{r})}] \end{aligned} \quad (11)$$

式中 $\alpha = \alpha_0 \frac{x}{\nu_s} f_s^2$, x 为声传播的距离, α_0 为晶体的声衰减常量. 当超声波沿与 X 轴成 θ_a 的方向传播时, 取 $\alpha_0 = 290(\text{dB}/\text{cm} \cdot \text{GHz}^2)$ ^[6].

同样, 可由参量互作用方程(7)得出存在声衰减时的声光互作用耦合波方程组(忽略二阶偏微分)

$$\begin{cases} 2ik'_{0x} \frac{\partial E_0}{\partial x} + 2ik'_{0z} \frac{\partial E_0}{\partial z} + (k'^2_{0x} + k'^2_{0z} - k_0^2) E_0 = \\ - \frac{k_0^2}{2} pSn_1^2 E_1 \times 10^{-\alpha/40} \\ 2ik'_{1x} \frac{\partial E_1}{\partial x} + 2ik'_{1z} \frac{\partial E_1}{\partial z} + (k'^2_{1x} + k'^2_{1z} - k_1^2) E_1 = \\ - \frac{k_1^2}{2} pSn_1^2 E_0 \times 10^{-\alpha/40} \end{cases} \quad (12)$$

与式(10)相比, 式(12)的右边多了一项系数 $10^{-\alpha/40}$, 它为超声波振幅的衰减系数, 这是有声衰减时衍射光光强发生变化的原因, 在下面的仿真中将看到声衰减对衍射光光强产生的影响.

2 仿真结果及分析

2.1 声衰减对衍射光强的影响

设高斯入射光的束腰半径 w_i 为 0.65 mm, 到达声光偏转器入射面时的光束宽度为 2 mm. 由于反常声光互作用会改变入射光的偏振方向, 设入射光为线偏振 e 光, 则衍射光就为 o 光. 换能器长度和宽度分别选为 $H=5$ mm 和 $L=2$ mm, 超声波频率为 80 MHz, 超声波功率定为 400 mW, 使 Δk_1 接近于零的入射角为 8.3° . 入射光可表示为^[9]

$$E(x, 0) = \exp\left(-\frac{x^2}{w_i^2}\right) \exp(-ik_x x) \quad (13)$$

入射光、无声衰减时及有声衰减时一级衍射光的光强分布见图2, 图中曲线1为入射光, 2为无声吸收时衍射光, 3为有声吸收时衍射光. 如图所示, 入射光的峰值在横坐标零点. 没有声衰减时, 由于衍射角与入射角不同, 衍射光的出射位置有所偏移, 峰值点偏离零点 0.257 mm, 峰值只有很小的衰减, 衍射效率接近 100%; 而存在声衰减时, 晶体内各点的超声波强度不同, 每一点的衍射效率也不同, 衍射光强度分布将发生变化, 导致衍射波形发生畸变.

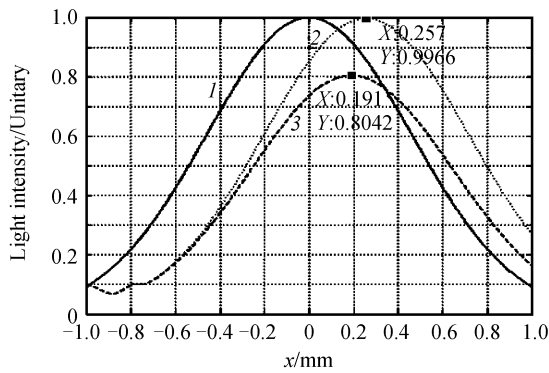


图 2 入射光、无声衰减时及有声衰减时 1 级衍射光光强的比较

Fig. 2 Light intensity distribution on the crystal axis

2.2 超声频率对衍射光光强的影响

当超声波频率改变时,要使 1 级衍射光最强必须满足 Δk_1 接近于零.由图 1 和式(10)、(12)可见,超声波频率改变时,超声波波矢量的模也要改变,因此必须改变入射角的大小,才能满足要求.很显然偏离最佳超声波频率时,衍射效率肯定会减小,下面分析在两种不同超声波频率下衍射光的变化.

选取两个超声波频率 75 MHz 和 85 MHz,分别观察有、无声衰减两种情况下衍射光光强的变化,见图 3(a)、(b),图中曲线 1 为入射光,2 为无声吸收时衍射光,3 为有声吸收时衍射光.

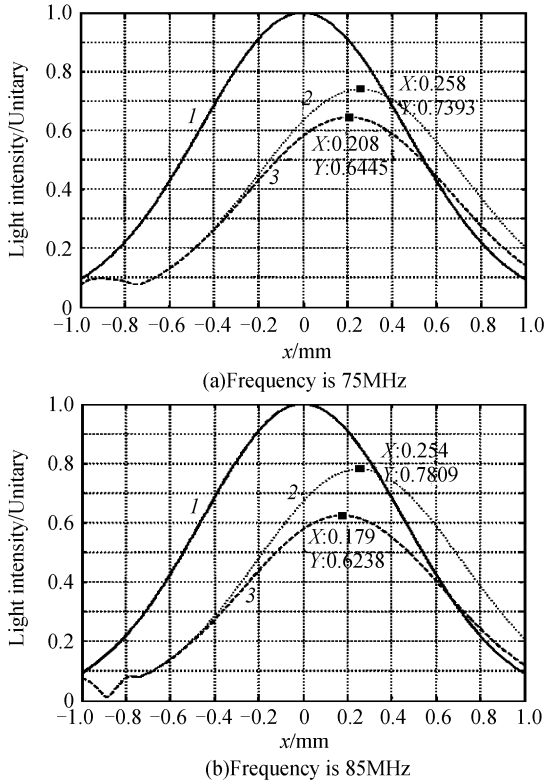


图 3 入射光、有无声衰减时的衍射光光强分布
Fig. 3 Light intensity distribution on the crystal axis for an different ultrasonic frequency

由图 3(a)、(b)可见,当超声波频率改变时,衍

射光发生了不同程度的畸变.在无声衰减时,光强幅度变化较之峰值位置变化更为明显.在有声衰减的情况下,不仅幅度变化明显,峰值位置的偏移也很明显.频率为 75 MHz 时,中心位置在 0.208 mm 处,频率为 85 MHz 时,中心位置在 0.179 mm 处,比 80 MHz 时的 0.191 mm 分别偏移了 0.017 mm 和 0.012 mm.

2.3 超声波功率对衍射光光强的影响

2.3.1 忽略声衰减时超声波功率对衍射光的影响

设超声波功率在 0~1 W 之间变化,其它条件不变, $Z=2$ mm 时 X 轴上衍射光强的分布见图 4.

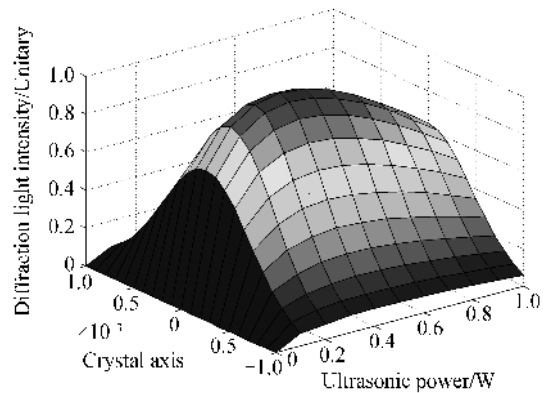


图 4 无声衰减时超声波功率对衍射光光强的影响

Fig. 4 Dependence of diffraction light intensity on ultrasonic power when sound-attenuation is neglected

由图 4 可见,随着声波功率的增大,衍射光强先增大后减小.即为获得最大的衍射效率,有一个最佳的声波功率 P .

2.3.2 考虑声衰减时超声功率对衍射光的影响

设超声波功率在 0~2.2 W 之间变化,其它条件不变, $Z=2$ mm 时 X 轴上衍射光强的分布见图 5.很明显,衍射光光强也是随着声波功率的增加先增加后减小.只是与忽略声衰减的情况相比,出现最高衍射效率时的声波功率变大了.

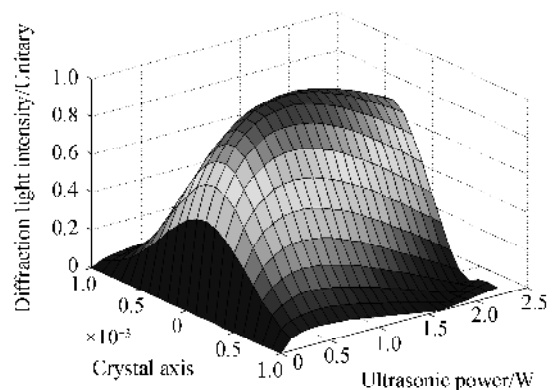


图 5 有声衰减时超声波功率对衍射光光强的影响

Fig. 5 Dependence of diffraction light intensity on ultrasonic power when sound-attenuation is considered

2.4 光束入射角对衍射光光强的影响

光束入射角的改变也会对衍射光光强产生影

响.假设入射光角度偏转范围是 $2.5\text{ mrad}(0.1432^\circ)$,其它参量保持不变,观察入射角取极小值($8.3^\circ - 0.1432^\circ$)和极大值($8.3^\circ + 0.1432^\circ$)时衍射光光强的变化,如图6(a)、(b).图中曲线1为入射光,2为无声吸收时衍射光,3为有声吸收时衍射光.

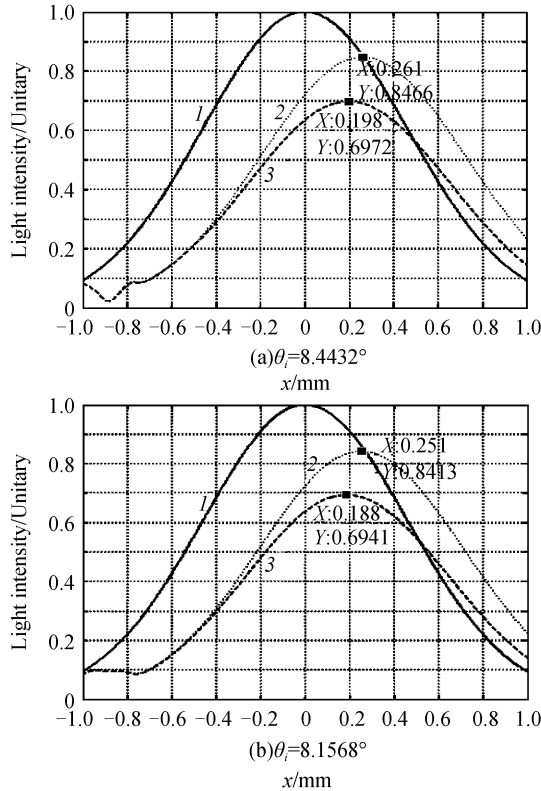


图6 入射光、无声衰减时及有声衰减时1级衍射光光强的比较

Fig. 6 Light intensity distribution on the crystal axis for an different optical incidence angle

比较图6(a)、(b)可见,当入射角取两个极值时,虽然光强幅值减小了,但无论是无声衰减时的光衍射还是有声衰减时的光衍射,最高点的衍射效率都大于50%.由于入射角的改变会影响到衍射角的大小,从而使得衍射光出射位置发生改变,从图中可以看出峰值位置都有少许的偏移.

3 结论

为了适应卫星光通信的需求,提高声光偏转器的控制准确度,本文构建了晶体对声波有吸收情况下的声光偏转器模型,分析了有声波衰减时超声波频率、功率和入射角对衍射光的影响,并同无声波吸

收时的情况进行了对比.计算结果表明,同无声光吸收时相比,当存在声波吸收时,偏转器的衍射效率将减小,导致衍射波形畸变,光强峰值位置发生偏移.一种正在构建的卫星光通信终端实验系统中,将使用声光偏转技术进行光束方向控制,并拟采用直接频率合成技术实现对超声波频率的快速改变,以解决快速补偿的问题.同时将根据本文构建的数学模型对CCD和QD的定位算法进行修正,提高检测器的定向准确度.

参考文献

- [1] JIN Tao. Coherent detection technology based on electro-optic effect for inter-satellite tracking[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10):1185-1188.
金韬.基于电光效应的相干检测星间跟踪技术[J].光子学报, 2003, **32**(10):1185-1188.
- [2] PAN Hu-di, JIN Tao. Optimization of coherent detection technology for inter-satellite tracking[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5):694-696.
潘湖迪,金韬.相干检测星间跟踪技术方案的优化设计[J].光子学报, 2005, **34**(5):694-696.
- [3] LIU Jin, JIN Tao. Influence of transmission characteristics of beam deflector on orienting accuracy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12):1885-1888.
刘劲,金韬.光束偏转器传输特性对系统定向准确度的影响[J].光子学报, 2005, **34**(12):1885-1888.
- [4] MAAK P, JAKAB L, BAROCSI A, *et al.* Improved design method for acousto-optic light deflectors [J]. *Optics Communications*, 1999, **172**(1-6):297-324.
- [5] NIKULIN V, KHANDEKAR R, SOFKA J. Performance of a laser communication system with acousto-optic tracking: An experimental study[C]. *SPIE*, 2006, **6105**:61050C.
- [6] XU Jie-ping. *Acousto-optic devices-principles, design and applications*[M]. Beijing: Science Press, 1982:1-61, 112-151.
徐介平.声光器件的原理、设计和应用[M].北京:科学出版社, 1982:1-61, 112-151.
- [7] Xu Jie-ping, STROUD R. *Acousto-optic devices-principles, design and applications*[M]. USA: Malloy Lithographing, Inc. 1992:47-100, 315-392.
- [8] QIAN Shi-xiong, WANG Gong-ming. *Nonlinear optical property-principles and development*[M]. Shanghai: Fu Dan University Press, 2002:19-23, 53-57.
钱士雄,王恭明.非线性光学-原理与进展[M].上海:复旦大学出版社, 2002:19-23, 53-57.
- [9] KARPEL A. *Acousto-optics*[M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 1996:169-171.

Research of the Beam Steering Theory Based on Acousto-optic Effect

FU Qiong¹, JIN Tao¹, ZHOU Quan²

(1 *Department of Information & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

(2 *State Key Laboratory of Space Microwave Technology, Institute No. 504 of China Aerospace Science & Technology Corporation, Xi'an 710000, China*)

Received date: 2006-08-18

Abstract: An acousto-optic deflector model considering sound attenuation and Gaussian optical field is presented based on acousto-optic effect and parametric interaction. According to the model, the effects of ultrasonic frequency, sound power and the light incidence angle on the diffraction light are studied. Besides, the different effects of the three factors above are compared when there is sound attenuation and not. The computer simulation results shows that diffraction efficiency of deflector decreases when sound attenuation exists, which leads to the aberration of diffraction wave and position excursion of peak value of diffraction light intensity.

Key words: Acousto-optic deflector; Sound attenuation (sound-absord); Satellite optical communications



FU Qiong was born in Shandong Province, China, on Dec. 9, 1983. She received the B. S. degree in Shandong Architecture University in 2005. In the same year, she began her research for her M. S. degree in electromagnetics and microwave. Her research work focuses on new technology for free space laser communications.