

文章编号: 1001-3806(2006)06-0631-05

## 准分子激光切削角膜与飞点扫描算法的研究

曹正林, 沈建新\*, 廖文和

(南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

**摘要:** 为提高准分子激光屈光矫正手术的精确性和安全性, 建立了单纯近视和复性近视散光、单纯远视和复性远视散光的角膜切削量模型, 并在此模型基础上给出了准分子激光切削角膜的叠加“飞点扫描”算法, 该模型和算法用于临床指导屈光手术。根据术后的跟踪调查, 89 只眼睛 (88 只近视和复性近视散光眼, 1 只复性远视散光眼) 在手术后球镜镜度、柱镜镜度减退了, 裸眼视力也明显提高了, 术后 80% 的眼睛裸眼视力  $\geq 0.8$ 。调查结果表明, 该模型和算法具有很高的精确性和安全性, 手术效果令人满意。

**关键词:** 激光技术; 飞点扫描; 准分子激光; 角膜切削

**中图分类号:** R778.2      **文献标识码:** A

## Research of excimer laser corneal surgery and flying-spot scanning algorithm

CAO Zheng-lin, SHEN Jian-xin, LIAO Wen-he

(College of Mechanical & Electrical Engineering Nanjing University of Aeronautics and Astronautics Nanjing 210016, China)

**Abstract** In order to increase the precision and safety of the corneal ablation refractive surgery, two mathematical models for corneal ablation were given: one was for spherical myopia and compound myopic astigmatism, the other was for spherical hyperopia and compound hyperopic astigmatism. Based on both the mathematical models, the flying-spot scanning algorithm was put forward. The mathematical models and the algorithm were applied to ophthalmic excimer laser system. Eighty-nine eyes underwent laser in situ keratomileusis (LASIK) using the models and algorithm, including 88 eyes with spherical myopia and compound myopic astigmatism and 1 with compound hyperopic astigmatism. The lightsight of 80% of the naked eyes increased up to 0.8. It can be concluded that the mathematical models and the algorithm are precise and safe and the laser cornea surgery is satisfactory.

**Key words** laser technique; flying-spot scanning; excimer laser; cornea ablation

### 引 言

近几十年来, 人们不断探索各种手术方法治疗人眼的屈光不正, 由于激光具有独特的生物效应, 能够极其精确地对角膜组织进行切削, 热凝, 改变角膜的形状及屈光状态, 因此, 成为眼科医生关注的热点。准分子激光治疗屈光不正的有效性和安全性已经被证实<sup>[1, 2]</sup>。国内外学者对激光切削角膜的机理都进行了一系列的研究。目前, 用波长为 193nm 的准分子激光切削角膜矫正近视、远视、散光已是一项成熟的技术<sup>[3, 4]</sup>。

作者研究了 193nm 的 ArF 准分子激光的角膜切削机理, 详细阐述了 193nm 的 ArF 准分子激光消融角

膜的叠加“飞点扫描”算法。这些研究成果都已直接应用于准分子激光眼科治疗机中, 通过实验和临床验证, 取得了满意的手术效果。

### 1 准分子激光矫治屈光不正的角膜切削机理

近年来, 运用准分子激光治疗眼屈光不正已得到广泛的认同, 并且手术具有较高的安全性和有效性<sup>[5]</sup>。屈光不正是指眼球在松弛状态下, 来自 5m 之外的平行光线, 经过眼的屈光系统后, 不能聚焦在视网膜上。屈光不正可分为近视、远视和散光 3 大类。屈光不正是人类最常见、最普遍的眼病。导致人眼屈光不正的主要原因是人眼的屈光系统与眼的轴长不匹配, 近视眼是由于眼的前后轴变长引起的, 远视眼是由于眼的前后轴变短引起的<sup>[6]</sup>。

在组成人眼屈光系统的各种屈光介质中, 角膜是人眼屈光系统的重要组成部分, 眼球的总屈光力是 +58.64D, 而角膜的屈光力为 +43.05D, 角膜的屈光度占整个屈光系统屈光度的 3/4。因此, 用准分子激光在角膜表面或基质内进行精确的定量切除, 改变角

基金项目: 江苏省“十五”高新技术研究计划资助项目 (BG2002012); “十五”国家计委产业化资助项目 (计产业 [2002] 1329)

作者简介: 曹正林 (1978), 男, 博士研究生, 主要从事计算机辅助生物医学工程、CAD/CAM 技术方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: cadat@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2005-11-07; 收到修改稿日期: 2005-12-31

膜前表面的曲率半径,从而改变人眼的屈光状态,矫治人眼的屈光不正是一种可行且有效的方法。

准分子激光角膜切削手术主要是利用光化学效应切除角膜组织的。193nm的 ArF 准分子激光是一种深紫外线光波,单光子能量达 6.4eV,而角膜组织的结合分子的碳和碳键的结合能量为 3.5eV,因此,该光子到达组织时,就可以打断组织分子之间的结合键,使组织分子气化,从而达到切削组织的目的<sup>[7]</sup>。此外,角膜对该波长吸收极强,激光穿透角膜的深度大约在 3.7μm ~ 3.9μm 之间,超过该范围的组织不会吸收到激光,由于准分子激光的脉宽为 10ns~20ns 且切削是打断组织分子之间的结合键,使组织分子气化的,所以对于被照射部位旁边的组织不产生热效应,对角膜的构造也不会产生不良的效应。准分子激光屈光矫正手术就是依靠这种准确的气化,把人眼角膜精确地切去一层,从而达到改变角膜的曲率半径,矫正人眼屈光不正的目的。

## 2 准分子激光角膜切削方式的选择

准分子激光角膜切削手术经历了放射状角膜切开术 (radial keratotomy, RK), 准分子激光屈光性角膜切削术 (photorefractive keratectomy, PRK), 准分子激光原位角膜磨镶术 (laser in situ keratomileusis LASIK) 几个发展阶段<sup>[8]</sup>, 到目前为止, LASIK 手术已具有很多优越性,如手术的安全性、有效性、稳定性、预测性好、手术时间短、病人无痛苦等。准分子激光矫正人眼屈光不正技术日渐成熟。

在准分子激光角膜切削手术的发展过程中,根据激光光斑直径的不同有两种不同的切削模式:掩模式和扫描式。激光光斑直径是指激光光束照射到组织表面时的直径大小,它与激光的能量密度密切相关。在输出能量相同的情况下,光斑面积的大小与激光能量密度成反比。因此,在角膜屈光手术中选择合适大小的光斑,对于达到切削的能量密度和手术的成功率来说是至关重要的。

传统的准分子激光是 6mm~6.5mm (最大可达 8mm) 的大光斑照射方式。因为一般人眼的角膜直径为 10mm~12mm,瞳孔的放大缩小范围为 3mm~6mm,所以 6mm~6.5mm 的光斑足够视力矫正所需。但是光斑式的切削会产生以下的一些问题:由于能量不均匀,使得切削后的角膜表面相对较为粗糙;易导致中心岛效应和角膜混浊,有时会产生眩光和光晕;治疗区域无法自由变化,对散光的治疗效果不理想。

准分子激光扫描方式可分为规则扫描和随机飞点扫描两种方式。在扫描式切削中,激光光束中的能量均匀性对切削表面的整体平整性影响很小,而扫描算

法本身也着重考虑了能量分布的均匀性。

因此,在作者的项目研究中,通过比较,采用了小光斑飞点扫描技术。所谓飞点扫描,是指每个激光光点打到角膜上的位置是随机抽取的,但所有光点叠加的结果可使光点在角膜上获得理想的分布,从而使切削表面更加光滑。飞点扫描技术克服了传统的大光斑切削方式的缺点,避免了大光斑切削中会产生的“中心岛效应”和“角膜混浊”问题,并且可以用程序控制多种扫描方式;飞点扫描能够非常精确的消融角膜,改变角膜的曲率,使切削表面更加光滑;飞点扫描可以覆盖整个切削区,进行随机非连贯性切削,可避开羽毛状雾化团,并使被击组织更好地散热。整套设备也非常小巧,使用维护也很简单。

## 3 飞点扫描算法

飞点扫描算法包括两个关键的模块,第 1 个模块是建立人眼角膜的数学模型,通过该数学模型计算出手术区域内相应位置的消融量;第 2 个模块是根据手术所需的消融量,给出特定的光斑参数下的飞点扫描算法。

### 3.1 人眼角膜的数学模型

在准分子激光矫正系统中,根据人眼屈光不正的不同类型,可分为两种情况计算所需的角膜切削量。

3.1.1 单纯近视或复性近视散光矫正时的角膜切削量 屈光手术之前初始角膜示意图如图 1 所示。

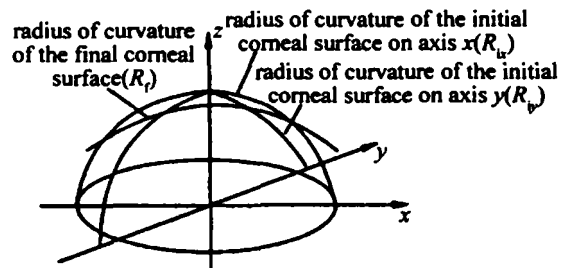


Fig 1 The schema of initial cornea

在手术范围内 (通常直径在 6.5mm~7.5mm 之间) 的初始角膜表面表示为:

$$Z_i(x, y) = \sqrt{\left[ \sqrt{R_{ix}^2 - x^2 + R_{iy}^2 - y^2} \right]^2 - y^2} + c \quad (1)$$

式中,  $R_{ix}$ ,  $R_{iy}$  为初始角膜表面两个主子午线上的曲率半径 (设为  $x$  方向和  $y$  方向)。进行屈光手术后,假设最终的角膜形状是一个球体,表示为:

$$Z_f(x, y) = \sqrt{R_f^2 - x^2 - y^2} + c \quad (2)$$

式中,  $R_f$  为最终角膜表面的曲率半径。

切削深度为:

$$\Delta Z(x, y) = Z_i(x, y) - Z_f(x, y) = \sqrt{\left[ \sqrt{R_{ix}^2 - x^2 + R_{iy}^2 - y^2} \right]^2 - y^2} - \sqrt{R_f^2 - x^2 - y^2} + c \quad (3)$$

式中,  $c$  由边界条件  $\Delta Z(X_0, 0) = \Delta Z(0, Y_0) = 0$  求得。

由 (1) 式和 (2) 式可分别求得  $c$

$$c = \sqrt{R_f^2 - X_0^2} - \sqrt{R_i^2 - X_0^2} - R_y + R_x \quad (4)$$

$$c = \sqrt{R_f^2 - Y_0^2} - \sqrt{R_i^2 - Y_0^2} \quad (5)$$

(4) 式和 (5) 式中的  $X_0, Y_0$  分别是沿着  $x, y$  轴向的长短轴, 所以 (3) 式可改写为:

$$\Delta Z(x, y) = \sqrt{\sqrt{R_i^2 - x^2 + R_y - R_x}^2 - y^2 - \sqrt{R_f^2 - x^2 - y^2} + \sqrt{R_f^2 - Y_0^2} - \sqrt{R_i^2 - Y_0^2}} \quad (6)$$

当  $x = y = 0$  即处于中心位置时, 切削量最大:

$$H_{max} = \Delta Z(0, 0) =$$

$$R_y - R_f + \sqrt{R_f^2 - Y_0^2} - \sqrt{R_i^2 - Y_0^2} \quad (7)$$

3.1.2 单纯远视或复性远视散光矫正时的角膜切削量 在屈光手术前, 初始角膜表面表示为:

$$Z_i(x, y) = \sqrt{\sqrt{R_i^2 - x^2 + R_y - R_x}^2 - y^2} - R_y \quad (8)$$

在屈光手术之后, 假设最终的角膜形状是一个球体, 表示为:

$$Z_f(x, y) = \sqrt{R_f^2 - x^2 - y^2} - R_f \quad (9)$$

则切削深度为:

$$\Delta Z(x, y) = Z_i(x, y) - Z_f(x, y) = \sqrt{\sqrt{R_i^2 - x^2 + R_y - R_x}^2 - y^2} - \sqrt{R_f^2 - x^2 - y^2} + R_f - R_y \quad (10)$$

### 3.2 小光斑飞点扫描算法的实现

飞点扫描是在计算机控制下, 让到达角膜的激光光斑在设定区域内按照程序设计的方式进行移动以达到调节各部位激光照射剂量的扫描方式。激光的蚀除深度与入射激光强度的关系表达式为<sup>[9]</sup>:

$$d = \ln(E_0/E_{th})/\alpha \quad (11)$$

式中,  $d$  为蚀除深度 ( $\mu\text{m}$ ),  $E_0$  为入射激光能量密度 ( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ ),  $E_{th}$  为临界消融能量密度 (阈值),  $\alpha$  为角膜能量吸收系数 ( $\mu\text{m}^{-1}$ )。

本项目采用的 OP<sub>tex</sub> 型准分子激光器实际衰减后激光到达角膜的每个脉冲的能量为  $2\text{mJ} \sim 3\text{mJ}$  光斑边长为  $1.2\text{mm}$  的正方形, 因此, 能量密度  $E_0 = 130\text{mJ}/\text{cm}^2 \sim 200\text{mJ}/\text{cm}^2$ , 角膜的吸收系数介于  $3.7\mu\text{m}^{-1} \sim 3.99\mu\text{m}^{-1}$  之间, 临界消融能量密度为  $40\text{mJ}/\text{cm}^2 \sim 60\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。根据 (11) 式可以得到, 单个激光脉冲角膜消融量应为  $0.18\mu\text{m} \sim 0.43\mu\text{m}$ , 经过实验, 所采用的激光器的单个激光脉冲角膜消融量为  $0.22\mu\text{m}$ 。

小光斑飞点扫描算法过程可简单概括为: 分层切削, 层内叠加, 错层叠加, 边界随机, 取点随机。

如图 2 所示, 以矫正近视为例来说明飞点扫描的算法过程: 在手术区域内, 将角膜表面消融成正常曲率半径, 将屈光度大的 (曲率半径小) 消融成屈光度小的

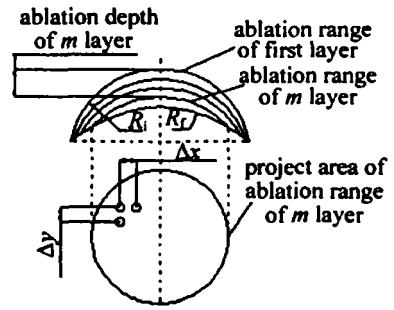


Fig 2 The schem a of flying-spot scanning

(曲率半径大), 图中  $R_f > R_1$ 。

飞点扫描有直线扫描和螺旋式扫描两种, 本项目中主要采用直线扫描方式。准分子激光器发射的激光经光学系统变换后到达角膜表面的光斑为边长  $1.2\text{mm}$  正方形光斑, 光斑行间距  $\Delta x$  和列间距  $\Delta y$  都为  $0.4\text{mm}$ , 则每层扫描后准分子激光对同一位置消融了 9 次 ( $(1.2/0.4)^2$ ), 由于每一激光脉冲切削深度为  $0.22\mu\text{m}$ , 则每层扫描后实际消融的角膜厚度为  $0.22 \times 9 = 2\mu\text{m}$ 。光斑扫描叠加后就可达到每层的切削深度要求, 这就是所谓的层内叠加。

根据 (7) 式可计算出所需的最大角膜切削深度, 然后按照由上而下的分层顺序, 每层切削深度为  $2\mu\text{m}$ , 用最大切削深度  $H_{max}$  除以 2 可得到总的切削层数, 这就是分层切削。

由于准分子激光每个脉冲的切削区域为中央深外周浅的形式, 故在层与层之间, 需要将切削深度的谷峰与谷底错开, 使得叠加效果均匀, 此为所谓的错层叠加。

如果扫描时直接从手术边界区域开始扫描, 则在边界处的叠加次数将达不到 9 次, 因而导致边界处的切削量不足, 所以需要在边界区域外开始进行直线扫描。在本项目中取扫描间距的一半 ( $0.2\text{mm}$ ) 开始到边界之间随机确定直线扫描的起点, 从而保证临近边界区的切削量, 此为所谓的边界随机。

在完成上述过程后, 由上而下记录下了所有的激光需要扫描的点的位置, 可以确定需要扫描的总点数以及每个消融点的坐标位置, 准备好了这些参数, 就可以采用随机取点算法进行扫描。随机取点扫描算法就是将计算出来的切削点的次序完全打乱, 重新排列, 得到新的数组, 根据新的数组进行逐点扫描切削, 这就是所谓的随机取点。

为了防止准分子激光能量过于集中, 以及便于散热和切削排出, 可以将切削点数组分为  $N$  个数组, 本项目的程序中  $N$  取为 10。假设上述步骤中在数组中记录了要扫描的点有 4009 个, 则将该点数组分成 10 个数组, 每个数组中选点规则为: 从第 1 个元素开始, 每个数组中选定一个点后, 再间隔 10 个点选下一个元素。具体每个数组中点的顺序为:

数组 1: 0 10 20 30 40 50 60 70 ... , 3990 4000  
 数组 2: 1 11 21 31 41 51 61 71, ..., 3991, 4001  
 ...  
 数组 10: 9 19 29 39 49 59 69 79 ... , 3999, 4009

准分子激光在扫描时则是一个一个数组扫描, 扫描完一个数组后再扫描另外一个数组, 扫描点的顺序相当于 0 10 20 30 ... , 3990 4000 1, 11, 21, 31 ... , 3991, 4001, 2 12 22 32 ... , 3999, 4009。这样就能保证激光能量不会过于集中, 使切削后的角膜表面比较光滑。

4 临床应用结果

作者所介绍的角膜切削量模型和飞点扫描算法都

已经应用于准分子激光矫正系统中, 用于临床指导眼屈光性手术。在统计了 89 例应用了该技术的 LASK 手术后发现, 手术的效果很好, 医生和患者的反映良好。进行手术的 89 只眼睛在手术前进行了常规裂隙灯及眼底检查, 散瞳后检影及电脑验光, 测量角膜地形图, 超声角膜厚度测量, 眼压检查, 获得最佳矫正视力。手术后一天和一月分别检查了屈光状态 (散瞳后电脑验光及裸眼视力检查)。在统计的 89 只眼睛中, 有 88 只近视眼睛 (45 只单纯近视和 43 只复性近视散光眼) 和 1 只复性远视散光眼。统计结果见表 1, 表 2 和表 3。

由表 1 可以看出, 手术后眼睛的球镜镜度大大减退了。手术前, 有 53.4% 的眼睛球镜镜度小于 -5D,

Table 1 The sphere of the eyes before surgery and one day after surgery

number of the eyes	the sphere before surgery D				total number	percent age
	-15.0 < D < -8.0	-8.0 ≤ D < -5.0	-5.0 ≤ D < -3.5	-3.5 ≤ D < -2.0		
the sphere after surgery D						
-2.0 ≤ D < -1.5	1	1	0	0	2	2.3%
-1.5 ≤ D < -1.0	1	2	1	1	5	5.7%
-1.0 ≤ D < -0.5	1	4	1	1	7	7.9%
-0.5 ≤ D < 0	6	7	6	3	22	25%
0 ≤ D ≤ 0.5	4	6	12	14	36	40.9%
0.5 < D ≤ 1.0	4	10	1	1	16	18.2%
total number	17	30	21	20	88	
percentage	19.3%	34.1%	23.9%	22.7%		

Table 2 The cylinder of the eyes before surgery and one day after surgery

number of the eyes	the cylinder before surgery D				total number	percent age
	-3.0 < D < -1.5	-1.5 ≤ D < -1.0	-1.0 ≤ D < -0.5	-0.5 ≤ D < -0		
the cylinder after surgery D						
-1.5 ≤ D < -1.0	2	2	1	2	7	7.9%
-1.0 ≤ D < -0.5	0	8	12	10	30	34.1%
-0.5 ≤ D < 0	2	7	3	13	25	28.4%
0 ≤ D ≤ 0.5	0	1	3	14	18	20.5%
0.5 < D ≤ 1.0	0	1	2	5	8	9.1%
total number	4	19	21	44	88	
percentage	4.5%	21.6%	23.9%	50%		

Table 3 The uncorrected visual acuity before surgery and one day after surgery

number of the eyes	uncorrected visual acuity before surgery				total number	percent age
	0 < D ≤ 0.05	0.05 < D ≤ 0.1	0.1 < D ≤ 0.2	0.2 < D ≤ 0.3		
uncorrected visual acuity after surgery						
0.4 ≤ < 0.6	3	3	0	0	6	6.8%
0.6 ≤ D < 0.8	3	6	2	0	11	12.5%
0.8 ≤ D < 1.0	10	15	7	1	33	37.5%
1.0 ≤ D < 1.2	5	5	12	3	25	28.4%
1.2 ≤ D < 1.5	2	2	5	1	10	11.4%
1.5 ≤ D < 2.0	0	0	2	1	3	3.4%
total number	23	31	28	6	88	
percentage	26.2%	35.2%	31.8%	6.8%		

77.3% 的眼睛球镜镜度小于  $-3.5D$ ; 手术后, 92% 的眼睛球镜镜度在  $-1.0D$  到  $1.0D$  之间, 65.9% 在  $-0.5D$  到  $+0.5D$  之间, 所有眼睛球镜镜度都在  $-2.0D$  到  $1.0D$  之间。

由表 2 可以看出, 在柱镜镜度  $\leq -1.0D$  时, 手术后柱镜镜度明显减退了。术前有 23 只眼睛柱镜镜度  $\leq -1.0D$ , 术后这 23 只眼睛中有 19 只柱镜镜度在  $-1.0D$  到  $1.0D$  之间, 占 82.6% (19/23)。而在  $-1.0D$  和  $0D$  之间时, 柱镜镜度无显著减退。术后 92.1% 的眼睛柱镜镜度在  $-1.0D$  到  $+1.0D$  之间, 48.9% 的眼睛柱镜镜度在  $-0.5D$  到  $+0.5D$  之间。

表 3 中统计了手术前后的裸眼视力, 视力测量时采用的是国际标准视力表。从表 3 可以看出, 手术后裸眼视力大大提高了。手术前裸眼视力均为  $0.01 \sim 0.3$  有 93.2% 的眼睛裸眼视力  $\leq 0.2$  手术后 80.7% 的眼睛裸眼视力  $\geq 0.8$  术前有 54 只眼睛的裸眼视力  $\leq 0.1$ , 术后这些眼睛中有 39 只眼睛裸眼视力  $\geq 0.8$  占 72.2% (39/54); 术后 14.8% 的眼睛裸眼视力  $\geq 1.2$ 。

一只远视眼术前散瞳后电脑验光情况为:  $+5.50D_s$  和  $+1.75D_c \times 105^\circ$ , 术后一天的验光情况为:  $+0.53D_s$  和  $-1.08D_c \times 10^\circ$ 。可以看出球镜镜度大大减退了, 柱镜镜度也有所减退。

88 只近视眼术后一个月散瞳电脑验光结果为: 78.4% 的眼睛裸眼视力  $\geq 0.8$  13.6% 的眼睛裸眼视力  $\geq 1.2$ 。同术后第 1 天的屈光情况相比, 手术效果有些回退。效果回退涉及到很多方面的因素, 可以通过在术前改善激光光斑的形状, 从而提高角膜切削表面的光滑度, 以及留有安全的术后角膜厚度和术后点用激素类药水来预防。

## 5 结论

研究了 193 nm 的 ArF 准分子激光的角膜切削

机理, 详细阐述了单纯近视和复性近视散光的角膜切削量模型, 单纯远视和复性远视散光的角膜切削量模型, 并在此基础上介绍了准分子激光角膜消融的叠加“飞点扫描”算法以及本项目中采用的间隔  $N$  点扫描算法。这些研究成果都已直接应用于准分子激光眼科治疗机中, 通过实验和临床验证, 取得了比较好的效果, 现已应用到屈光矫正手术中, 根据手术后的跟踪调查分析, 取得了满意的手术效果。

## 参 考 文 献

- [1] FARAH S, AZAR D, WONG J *et al*. Laser in situ keratomileusis literature review of a developing technique [J]. Journal of Cataract Refractive Surgery, 1998, 24(6): 989~1006.
- [2] SALAH T, WARING G O, MAGHARBYA E L *et al*. Excimer laser in situ keratomileusis under a corneal flap formypopia of 2 to 20 dipters [J]. American Journal of Ophthalmology, 1996, 121(3): 143~155.
- [3] ZHANG Y H, SHEN J X, LIAO W H. Use of excimer to correct compound myopic astigmatism [J]. Optics and Precision Engineering 2003, 11(3): 291~295 (in Chinese).
- [4] ZHANG Y H, SHEN J X, HU L G *et al*. Mathematical models for laser in situ keratomileusis and photorefractive keratectomy [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering 2003, 22(4): 289~295 (in Chinese).
- [5] ARTURO S, MAGALLANES R, MONTES M *et al*. Laser in situ keratomileusis for simple myopic, mixed, and simple hyperopic astigmatism [J]. Journal of Refractive Surgery, 1998, 14(2): 175~177.
- [6] LU W X. Excimer laser refractive corneal surgery [M]. Beijing Scientific and Technical Documents Publishing House 2000, 46~52 (in Chinese).
- [7] LIN Zh N, SHEN J X, LIAO W H. Research of ablation of 193nm excimer laser on cornea [J]. Laser Technology 2003, 27(6): 510~513 (in Chinese).
- [8] TROKEL S L. History and mechanism of action of excimer laser corneal surgery [A]. Corneal Laser Surgery [C]. St Louis: Mosby Year Book Inc, 1995, 1~10.
- [9] ZHANG Zh X. Laser-tissue interactions: fundamentals and applications [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Publishing House, 1999, 68~81 (in Chinese).

(上接第 630 页)

作者不但给出了这种最佳的滤波选择方案, 同时研究的结果能为估计高速 DMS 系统传输性能提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] ZHANG L N, CAI J, LONG R P *et al*. Analysis of third-order dispersion in dispersion-managed soliton system [J]. Laser Technology 2004, 28(3): 327~329 (in Chinese).
- [2] PANO U N C, M HALACHE D, MAZILU D *et al*. Dynamics of dual-frequency solitons under the influence of frequency-sliding filters: third-order dispersion and intrapulse Raman scattering [J]. IEEE JQE Selected Topics 2004, 10(5): 885~892.
- [3] MECOZZIA. Timing jitter in wavelength-division-multiplexed filtered soliton transmission [J]. JOSA, 1998, B15(1): 152~161.
- [4] MATSUMOTO M. Analysis of filter control of dispersion-managed soliton transmission [J]. JOSA, 1998, B15(12): 2831~2837.
- [5] BOVIN D, HANNA M, LACOURT P A *et al*. Influence of fixed and

sliding air-line filtering on phase jitter [A]. Lasers and ElectroOptics (CLEO) 2004 [C]. France: CLEO, 2004, 15~16.

- [6] KUMASAKO J, MATSUMOTO M. Linear stability analysis of dispersion-managed soliton controlled by filters [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2000, 8(18): 1064~1068.
- [7] GORDON JP, HAUSH A. Random walk of coherently amplified solitons in optical fiber transmission [J]. Opt Lett, 1996, 11(10): 665~667.
- [8] ANDERSON D. Variational approach to nonlinear pulse propagation in optical fibers [J]. Phys Rev, 1983, A27(6): 3135~3145.
- [9] OKAMAWARIT, MARUTA A, KODAMA Y. Reduction of Gordon-Haus jitter in a dispersion-compensated optical transmission system: analysis [J]. Opt Commun, 1998, 149: 261~266.
- [10] SUGAHARA H, KATO H, NOUET *et al*. Optimal dispersion management for a wavelength-division-multiplexed optical soliton transmission system [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1999, 17(9): 1547~1558.