

成像光谱图像实时无损压缩方法研究

朱振宇 林侃[√] 王建宇

(中国科学院上海技术物理研究所, 上海, 200083)

TP751

摘要 在分析成像光谱图像信息量和冗余度的基础上,提出了几种多维图像实时无损压缩的算法,并对不同算法的软件模拟结果进行了评价.

关键词 图像压缩, 图像分析, 实时处理, Hilbert 曲线.

成像光谱

遥感

引言

随着遥感仪器的快速发展,特别是光谱分辨率的成倍提高,研制成了成像光谱仪,而光谱维信息的剧增也使得成像光谱的数据分析成为多维图像处理技术的典型应用.

高分辨率成像光谱技术中的关键问题是对大量图像数据的实时记录(或传输)和应用传递.中科院上海技术物理所的成像光谱仪机上记录的数据率是 3.84Mbps,一次飞行试验采集的有效数据以 TB 计.美国 NASA EOS 计划中的 HIRS 传输数据率是 512Mbps,大大超过了 EOS 总传输率 300 Mbps.如此庞大的数据率和数据量给记录和传输设备造成巨大压力,进行有效的数据压缩成为必须.

目前的图像压缩技术主要分有损压缩和无损压缩两类.由于成像光谱仪是遥感应用的信息源,采用不能完全恢复原始数据的有损压缩方法会导致后续应用中的不可预料的误差,而且有损压缩方法,如变换编码(DCT, KL)的计算复杂度一般都很高,所以在实时应用中多采用无损压缩的方法,如 AVIRIS 的数据压缩采用的是线性预测的自适应 DPCM 方法,有损方法必须结合应用的要求,并有待进一步研究.

无损压缩的无失真、易于实现的优势,使其在实时应用中得到广泛采用.但提高压缩率一直是这一方法的难点,各种无损压缩大都基于挖掘信息源内的相关性,如相邻相关(DPCM)、字串重复(游程编码, LZW)等.成像光谱仪的高光谱分辨率及光谱维连续,形成图像在光谱维的高度相关,这一相关的程度和如何利用这一相关一直是成像光谱图像压缩的研究热点.另外如何结合新技术方法在系统各个环节挖掘信息相关,也是提高压缩率的努力方向,作者在信息抽取上利用Hilbert扫描技术增加信息相邻相关方面也做了一些尝试.

1 多维信息源分析

我们先对光谱维的信息量进行分析.成像光谱图像数据可描述为三维随机场函数 $M(x, y, \lambda)$, 表示在空间坐标 (x, y) 上在第 λ 光谱波段上采集到的光谱能量,反映到图像上即

为像素的灰度. 由于地物的稳定性, 我们可以假定这个信息源是一个广义的静态源, 即在空间和光谱维其一阶和二阶统计值基本不变.

图像的相关性一般由两个标准来衡量, 第一是图像的一阶熵和条件熵, 这也是 Thomas M. Chen^[1]使用的方法. 信息熵为

$$H(X) = - \sum P_i \cdot \log P_i,$$

这里 P_i 表示信源 X 中信息 $x(j)$ 出现的概率. 熵表示图像中某灰度出现的平均不确定性, 即为确定图像中某灰度出现所需的平均信息量, 它是离散无记忆信源进行无损编码的基本极限. 条件熵和平均互信息量为

$$H(x|y) = - \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n P(a_j, b_k) \log P(a_j, b_k) \quad (1a)$$

$$I(X;Y) = H(X) - H(X|Y). \quad (1b)$$

条件熵 $H(X|Y)$ 表示用 Y 预测 X 所需的最低 bit 数, 平均互信息量 $I(X;Y)$ 表示了随机变量 Y (编码符号) 对 X 所提供的平均信息量.

我们以一幅 MAIS 1995 年在东海嵎洒群岛的可见光图像进行分析, 图像大小 512×512 , 共 32 个波段, 见图 1. 首先计算空间维的信息, 结果见图 2. 表明在空间维存在相当的相关性, 在 X 方向的条件熵约为 2.91, Y 方向为 2.99, Y 方向比 X 方向高, 可能是由于仪器在行方向扫描有一定的重叠率引起的.

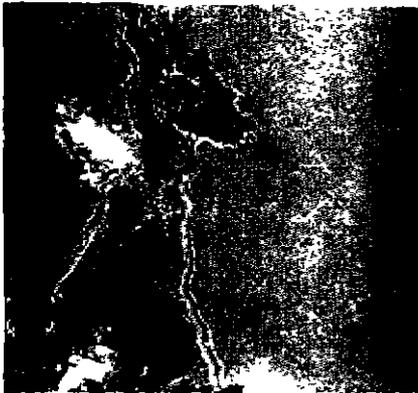


图1 MAIS 32 波段可见光图像
Fig. 1 MAIS image with 32 visual bands

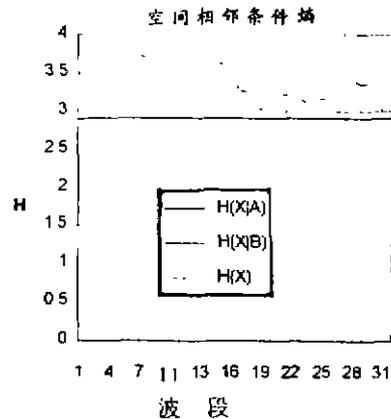


图2 空间维条件熵
Fig. 2 Conditional entropy in spatial dimension

光谱维的计算结果见图 3. 很明显, 这一维的相关高于空间维的任一方向, 条件熵大多分布在 1~2, 平均约为 2.00, 大大低于空间两维. 这充分说明了成像光谱图像的多维相关.

图像的相关性另一个衡量标准是自相关系数, 图像在光谱维和空间维的自相关系数的计算公式见表 1. 计算结果如图 4. 从中可以看出: (1) 相邻空间、相邻波段的相关性很高, 均在 0.9 以上, 这给图像的压缩带来了可能. (2) 在间隔较小时, 光谱维的相关性要大于空间维, 因此应尽量利用光谱维的冗余度. (3) Y 方向, 即飞行方向的相关性大于 X 方向, 这和仪器在 Y 方向的扫描重叠率有关.

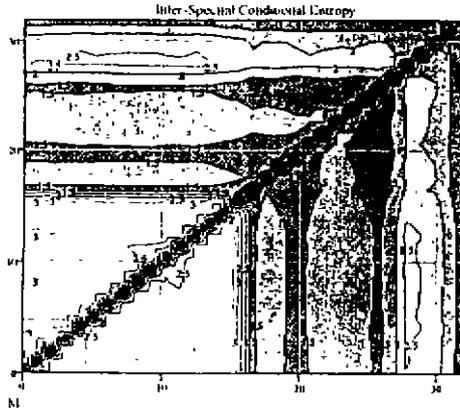


图 3 光谱维条件熵
Fig. 3 Conditional entropy in spectral dimension

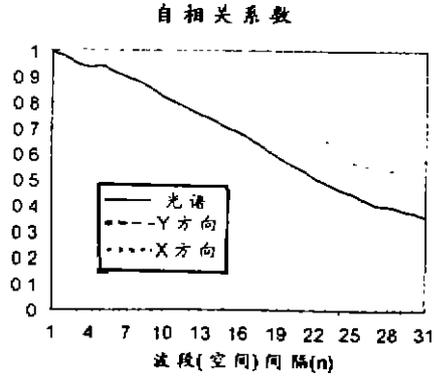


图 4 空间、光谱维自相关系数
Fig. 4 Autocorrelation coefficients in spatial and spectral dimensions

2 无损压缩方法

2.1 HILBERT 扫描和行扫描

无损压缩方法的缺点在于压缩率比较低,为了尽可能地提高效率,必须尽量在系统的各个环节上,在保证信息量无损的前提下提高信息的相关性.在信息抽取时,进行信息的重排或聚集,以提高信息的相邻相关性,为以后的去相关提供更多的冗余,这一方法为提高无损压缩率提供了一条新思路,对这一环节的研究过去常常忽略.

Hilbert 曲线,又称 Peano 曲线,是一种常用的描述扫描路径的空间填充曲线.它抽取图像信息的方式是挨个重复地扫描图像内的四方体,并且在扫描完当前四方体内所有象素后才去扫描下一个四方体.典型的两维 16×16 Hilbert 曲线如图 5.可以看出,它的优势在于充分兼顾了各个方向上的相邻相关,而一般的行扫则只考虑了一个方向.

为了证明 Hilbert 扫描的聚集特性,作者对一幅 MAIS 图像进行如下分析:图 6 是一幅 512×512 空间单波段原始图像,图 7 是 Hilbert 扫描后的聚集图像.很明显,图中大量灰度一致的条带代表了相关象素的聚集.作者计算了以前图像一维行扫 DPCM 和 Hilbert 扫描后再进行一维 DPCM 后所得图像的熵,前者为 2.53,后者为 2.01,可见 Hilbert 扫描的优势.图 8 是前图的 32×32 多波段图像,水平方向是 32 个光谱(Z)波段,垂直方向是 32 个穿轨(X)方向像素.图 9 是在 X-Z 平面的 2D HILBERT 扫描图像,这两幅图像经一维 DPCM 后的图像熵分别为 3.22 和 2.84,省了 0.38bit/pixel.

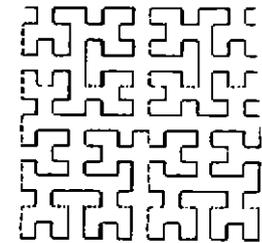


图 5 16×16 Hilbert 曲线
Fig. 5 16×16 Hilbert curve

Hilbert 扫描的另一优势在于特别易于实时实现.图 10 是 Hilbert 曲线二维和三维的硬件实现.

对于二维 Hilbert 扫描,只需一个 $1 \times M$ (M 是图像大小的阶数,如 $512 \times 512, M=9$) 计数器及 M 个算术逻辑单元 $T[i]$.对于每一个 $T[i]$ 有两个输入,一个是从计数器输出的 2 个

bit, $2iT$ $2i-1$, 另一个是从上一个 $T[i+1]$ 输出的 2 个 bit, 而 $T[i]$ 的两个输出是: 为下一个 $T[i-1]$ 输出的 2bit 及扫描地址第 i 个 2bit $Z[i], Z[i]=x[i]y[i]$.

令 $z[i]$ 的 2 个 bit 分别为 $z1[i]$ 和 $z0[i], s[i]$ 的 2 个 bit 分别为 $s1[i]$ 和 $s0[i]$, 有

$$s0[i-1] = s0[i] \oplus (2i-1) \oplus (2i),$$

$$s1[i-1] = s1[i] \oplus ((2i-1) \cdot (2i)),$$

则对 $T[i]$, 有

$$z0[i] = (((((2i-1) \oplus (2i)) \cdot \overline{s0[i]}) + ((2i) \cdot s0[i])) \oplus s1[i],$$

$$z1[i] = (((((2i-1) \oplus (2i)) \cdot s0[i]) + ((2i) \cdot \overline{s0[i]})) \oplus s1[i],$$

即 $y[i]=z1[i], x[i]=z0[i]$, 由此获得扫描地址为 $X=\langle x[m-1], \dots, x[i], \dots, x[1], x[0] \rangle,$
 $Y=\langle y[m-1], \dots, y[i], \dots, y[1], y[0] \rangle.$

三维的硬件结构同二维非常类似, 也只需一个 $3 \times M$ (M 是图像大小的阶数, 如 $512 \times 512, M=9$) 计数器及 M 个算术逻辑单元 $T[i]$. 这里不再重复.



图 6 单波段图像
Fig. 6 Single band image

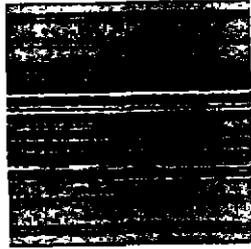


图 7 2D Hilbert 扫描图像
Fig. 7 2D Hilbert scanning image



图 8 光谱维-X 维图像
Fig. 8 Spectral-horizantal image

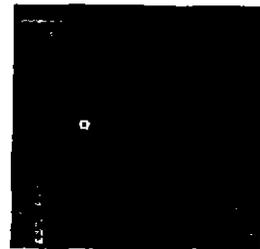


图 9 ZX Hilbert 扫描图像
Fig. 9 ZX Hilbert scanning image

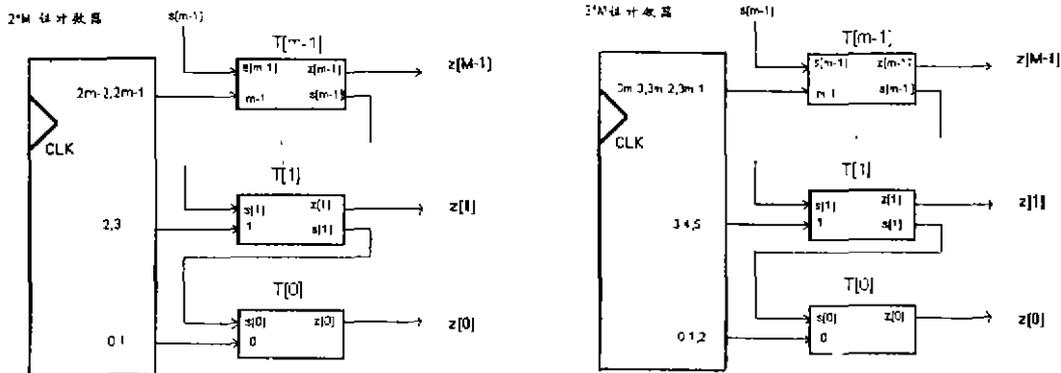


图 10 二维和三维 Hilbert 硬件框图
Fig. 10 Block diagram of 2D and 3D Hilbert hardwares

2.2 多维去相关

对于一般信号如语音信号, 只在时间一维上相关; 就图像信号而言, 则不仅在水平方向

相关,在垂直方向也是相关的;对于我们的成像光谱图像,则又多了一维光谱维的相关性.在上一节,我们已对成像光谱图像进行了信源分析,证明了光谱维的相关性很大且易于利用.我们针对这一优势,用 DPCM 方法加以实现,框图见图 11.

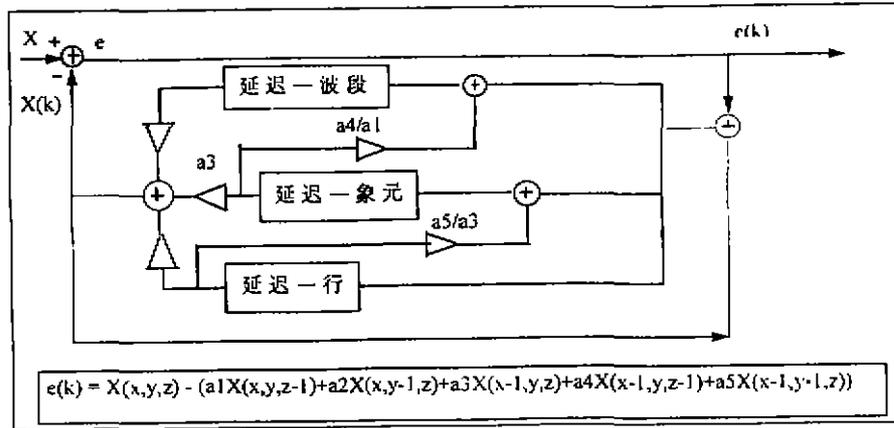


图 11 二维 DPCM 原理图

Fig. 11 The principle scheme of two-dimension DPCM

2.3 编码方法

编码过程将已去相关的图像数据根据信息论原理,转化成较少的代码,从而最终实现数据量的减少.无损压缩的编码方法分两类:基于信息熵编码和基于字典的编码.作者对 Huffman 编码、算术编码、游程编码和 LZW 方法进行了分析比较.注意,鉴于研究的实时性目的,除游程编码外,所有编码算法均采用自适应模式设计.例如对一幅典型的 MAILI512×512×32 可见光图像光谱维去相关后的数据进行编码比较,结果见图 12.由图可以看出:(1) 自适应算术编码的效率最高.(2) 游程编码的效率最低,甚至有膨胀现象,这是因为游程编码效率取决于数据流中重复数据出现次数和平均游程长度.这两个参数在自然图像,特别是当地物不规则或纹理丰富时都很低.(3) 目前流行的 LZW 方法应用到图像上,效果不如熵编码.作者分析原因如下:LZW 方法是基于字典的方法,它利用的是数据出现的频率冗余度、重复性和高使用率模式冗余度,即图像的规则性,而去相关后的图像仍保留轮廓结构,仍不规则,但其总的灰度出现概率分布范围缩小,更适于熵编码.

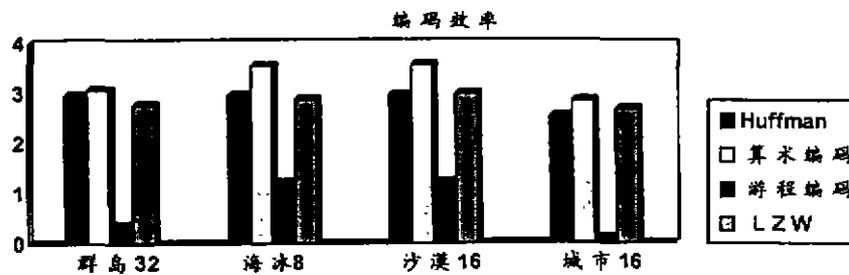


图 12 图像光谱维去相关前后数据编码比较

Fig. 12 Comparison of data coding before and after spectral decorrelation of image

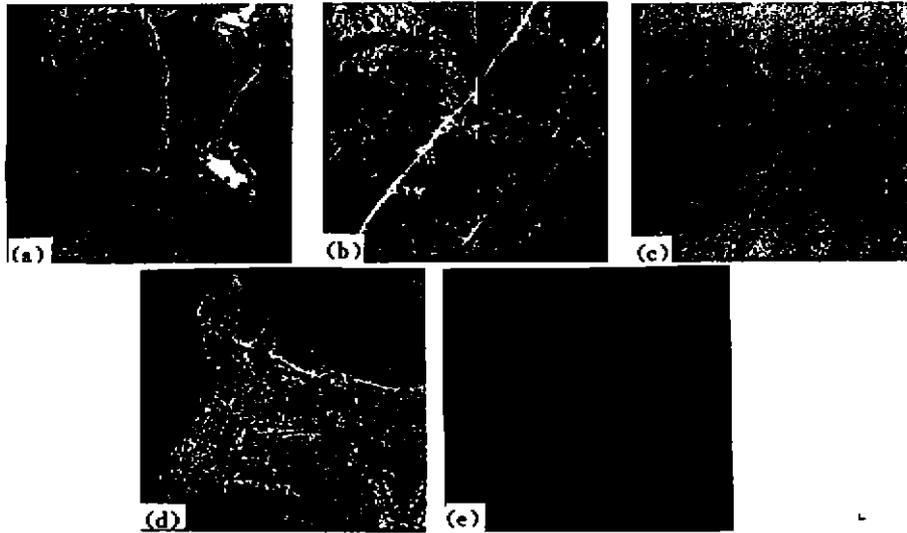


图 13 MAIS 几种典型图像 (a)嵯泗列岛,(b)澳大利亚 Marble Bar 矿区,
(c)新疆塔里木沙漠,(d)澳大利亚达尔文市,(e)唐山地区

Fig. 13 Some typical images of MAIS (a)Island of Shengsi, (b)Marble Bar Miner Area
in Australia, (c)Desert of Talimu, (d)Darwin in Australia, (e)The Infrared Image of Tangshan

3 算法试验结果及分析

根据以上分析,作者对所论及的各种算法用图 13 中 MAIS 的几幅典型图像进行了软件模拟.图像分别为:(a)嵯泗列岛 32 波段可见光海岛图像,(b)澳大利亚 Marble Bar 地矿区 16 波段短波红外地质图像,(c)新疆塔里木盆地 16 波段可见光沙漠图像,(d)澳大利亚 Darwin 市 16 波段短波红外城市图像,(e)唐山地区 8 波段热红外图像.由于成像光谱仪以 BIP 方式采集图像数据,即图像以光谱-穿轨迹(X)-沿轨迹(Y)顺序输入.所以最有利实时实现的压缩算法依次为:(1) DPCM: 光谱维 Z 方向 DPCM- \rightarrow X 方向 DPCM- \rightarrow Y 方向 DPCM;(2) HILBERT 扫描: $X+Z$ 2 维 HILBERT- \rightarrow $X+Y$ 2 维 HILBERT- \rightarrow 3 维 HILBERT.试验结果见表 1.

表 2 典型图像的软件模拟结果

Table 1 The software simulation results for some typical images

压缩率	RAW	DPCM						HILBERT+DPCM					
		Z	X	Y	ZX	ZY	XY	ZXY	ZX+Y	XY	XY+Z	ZXY	
1	1.99	3.51	2.80	2.95	4.11	4.13	2.88	4.32	3.57	4.20	4.51	2.73	
2	1.87	2.93	2.52	2.74	3.40	3.55	2.74	3.51	3.04	3.78	4.12	2.49	
3	2.35	3.41	2.95	3.13	3.98	4.66	3.24	4.77	3.50	4.79	5.07	3.24	
4	1.53	2.55	2.38	2.44	3.11	3.14	2.74	3.24	2.54	3.28	3.55	2.40	
5	2.23	3.13	2.89	2.83	3.79	3.87	2.99	4.01	3.22	3.98	4.12	2.88	
AVG	1.99	3.11	2.71	2.82	3.68	3.87	2.92	3.97	3.17	4.01	4.27	2.75	

* 以上算法均采用自适应算术编码器.

由表 1,可以看出:(1) 光谱维(Z)-维 DPCM 的压缩率比空间维 X, Y 方向要高.这是因为成像光谱图像光谱维信息相关性比空间维高的缘故.(2) 含光谱维(Z)的两维 DPCM 的

压缩率比不含光谱维的两维 DPCM(XY)要高,原因同上。(3) 含沿轨迹(Y)方向的 DPCM 的压缩率比不含 Y 方向的 DPCM 要高,这可能是因为地物的方向性和仪器的光学扫描系统的原因。(4) DPCM 阶数越高,压缩率越高,但增加幅度逐渐衰减。(5) HILBERT 扫描后经 DPCM 去相关的压缩率普遍比行扫描高。空间两维(XY)Hilbert 扫描经一维 DPCM 后,再经光谱维 DPCM 去相关(XY+Z)。(6) 编码效率最高,可达 4.3 倍。

4 结论

从以上对成像光谱图像信息和算法的分析可以看到:在光谱维,图像存在着充分的且易于实时利用的冗余,这冗余甚至比空间维还高。在信号抽取方式上,Hilbert 扫描对图像多维的相邻相关性予以聚集,使得后续的去相关更加有效。在对自然景物图像的编码时,自适应的算术编码效率最高,且适于实时应用。由此结合起来的整套压缩系统,对成像光谱图像的压缩率可达 4.3 倍,这对于无损压缩来讲,已相当可观。

REFERENCES

- 1 Chen T M, Staelin D H, Arps R B. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1987, GE-25(4):499~501
- 2 Seiichiro Kamata, Richard O. Eason, Eiji Kawaguchi. *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, 1993, E76-D(4):420~433
- 3 Richard L. Baker and Yi Tong Tse. *SPIE Applications of Digital Image Processing XI*, 1988, 974:255~270
- 4 Ansari A X, Gertner I, Zeevi Y Y. *SPIE*, 1992, 1699:308~320
- 5 GUO Y P, Forster B C. *Journal of Infrared and Millimeter Waves* (郭一平, B C Forster. *红外与毫米波学报*), 1993, 12(6):409
- 6 GAO W. *Multimedia data compression technique*, Beijing: Electronic Industry publishing House(高文. *多媒体数据压缩技术*, 北京:电子工业出版社), 1994

REAL-TIME LOSSLESS COMPRESSION OF N-DIMENSION IMAGES*

ZHU Zhen-Yu LIN Kan WANG Jian-Yu

(Airborne Remote Sensing Laboratory, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract Based on the information content and redundancy of the imaging spectral images, several real-time lossless compression algorithms were proposed in this paper and all the algorithms were evaluated and compared.

Key words image compression, n-dimension image analysis, real-time processing, Hilbert curve.

* The project supported by the National Hi-Tech 863 Plan Foundation of China
Received 1997-07-08

学 术 会 议 消 息

由中国光学学会主办的国际光学委员会专题学术会议“信息高速公路中的光学”(Optics for Information Infrastructure)将于1998年8月3~6日在天津南开大学举行。会议内容为:

(1) 光纤光学与器件; (2) 信息基础设施用的新光学元件和新系统; (3) 光通讯; (4) 光显示、元件、系统和应用; (5) 光学信息处理和光计算; (6) 光学传感与控制; (7) 光存储、材料和应用; (8) 光电子学与光互连; (9) 雷达和光雷达信号处理; (10) 固体激光器与器件; (11) 信息基础设施中的新技术; (12) 现代全息术与应用。

第二轮会议征文通知已印出,摘要的截稿时间为1998年1月15日。请尽快与会议秘书组联系。

秘书组的通信地址为:

天津 南开大学 现代光学研究所 OII '98 秘书组
邮编:300071 电话:(022)2350 5503

OII '98 Topical Meeting of the International Commission for Optics (ICO)

“Optics for Information Infrastructure”

Second Announcement and Call for Paper

Organized by

Chinese Optical Society for International Commission for Optics

August 3 — 6, 1998

Nankai University, Tianjin 300071, China

TOPICS TO BE INCLUDED

The topics of the meeting included, but not restricted to:

(1) Fiber optics and devices, (2) New optical components and system used in information infrastructure, (3) Optics communication, (4) Optics display, components, system and applications, (5) Optics information processing and optical computing, (6) Optics sensors and control, (7) Optics storage, materials and application, (8) Optoelectronics and interconnections, (9) Radar / Lidar processing, (10) Solid state lasers and devices, (11) Novel techniques applied to information infrastructure, (12) Modern Holography and applications