

文章编号 1004-924X(2003)02-0207-05

基于信息理论的采样成像系统评价方法

迟学芬^{1,2}, 韩昌元¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130022;

2. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130012)

摘要: 论述了基于信息理论的采样成像系统评价的理论基础, 讨论了光学系统信息量、图像信息量的处理方法。提出了采样成像系统中基于信息理论的光电一体化系统设计方法。通过实现光学成像系统与 CCD 探测系统的匹配设计, 减小了欠采样噪声, 改善了成像质量。

关键词: 信息率; 保真度; 端到端评价; CCD; 欠采样噪声

中图分类号: O438 **文献标识码:** A

Assessment of sampled imaging system based on information-theory

CHI Xue-fen^{1,2}, HAN Chang-yuan¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130021; China;

2. Telecommunication engineering college, JiLin university, Changchun, 130012; China)

Abstract: The theoretical basis for assessment of a sampled imaging system based on information theory is discussed, and the optical and image information processing methods are examined. The integrated optical and electronic designs of the sampled imaging system are proposed. The confusion in images is reduced and the quality of image is improved by matching an optical imagery system with a CCD detection system.

Key words: information rate; fidelity; end-to-end assessment; CCD; aliasing noise

1 引言

对于采样成像系统, 在景物反射(或说发射)的光信号到达图像采集系统的那一刻起, 信息传递、图像处理就开始了, 直到系统获得的视频信息到达人的神经系统, 信息传递、图像处理过程结束。半个世纪以来, 人们一直在研究成像系统, 数字技术和计算机技术诞生后, 综合光电技术、模拟和数字技术的采样成像技术得到更大发展。基于信息理论的采样成像系统的分析方法、评价方法和光电一体化优化设计方法研究属于跨学科的科

学研究, 他把广泛应用于现代通信领域的信息理论和光电成像技术结合在一起研究采样成像系统。他用新的思想方法、分析方法, 新的评价指标进行系统评价, 因而, 提出和解决了若干用传统理论无法解释和处理的问题, 为系统光电一体化设计、模拟/数字接口处理、数字信号处理等问题, 提供了新的研究思路。基于信息理论的采样成像系统研究始于 50 年代, 近几年随着信息技术的迅猛发展, 在国际上这种研究呈爆炸性趋势。最活跃的研究机构是美国航空航天局(NASA), 国内少见报道。

2 基于信息理论的采样成像系统评价的基本思想

信息论是现代通信系统的基本理论。当面向输入输出信号研究通信系统时,通信系统的基本问题可视为信源与信宿之间最大的一致性,亦即无失真传输。从信息论角度分析,通信的基本问

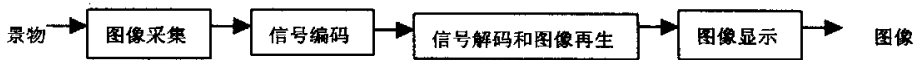


图 1 采样成像系统模型

Fig. 1 Model of sampled imaging system

题是把图像采集和图像恢复结合在一起分析时,采样成像系统呈现通信信道特性^[1]。香农(Shannon)的信息理论是基于信息理论的采样成像系统研究方法的理论基础。把采样成像系统视为信息信道,信源是景物的光强分布,接收到的信号被存储为离散数字阵列,这个阵列将被处理和显示。系统设计目标归结为使景物和图像之间的互信息量最大^[2]。

根据信息理论,图像重建过程可视为接收到的信息再现入射辐射场信息的过程,图像的衰减代表信息的丢失。因此在基于信息理论的采样成像系统评价方法中,用信息率评价采样成像系统和各个子系统。信息率高的系统设计是优化设计,能保证好的图像质量。

不同的采样成像系统具有不同的系统设计参数,借助于信息理论可方便地进行系统评价,如果用实验的方法做这种评价就困难多了。

3 系统评价中的主要问题

基于信息理论的采样成像系统评价的主要问题包括系统建模、评价指标和评价方法。

3.1 采样成像系统分析模型

对采样成像系统的数学分析和计算机仿真都建立在建模基础上。如果分析模型本身不严密、不完善,则系统评价结果不准确。有三种采样成像系统分析模型

(1) 连续输入/连续输出模型(C/C 模型)

题是追求输出信号中包含最大的输入信号的信息量,即信息的无损传递。

采样成像系统模型如图 1 所示。它的基本问题是物与像的最大一致性,亦即,图像保真度。可见,当忽略系统物理结构,面向输入输出信号研究系统时,采样成像系统和通信系统面临的基本问题是一致的。

这是早期采样成像系统分析模型,主要用于感光照像系统的性能分析,这种分析模型允许多次滤波,任一次滤波后的图像的数学表示都是连续空间频率的函数。它不能用离散的空间频率表示图像,因此早期的 C/C 模型不适于当代以阵列探测器为标志的采样成像系统。

(2) 离散输入/离散输出模型(D/D 模型)

数字计算机问世以后,采样成像系统的建模开始向数字化方向发展。离散输入、离散输出模型成为 70 年代采样成像系统分析模型的主流。70 年代的许多图像处理文献,把成像系统的成像性能分析归结为矩阵理论的应用问题。相对数据采样过程而言 D/D 模型似乎是完美的,但是从实质上分析,它不过是 C/C 模型的离散化版本。它用离散输入图像和离散卷积代替了实际上的连续输入图像和连续卷积,与实际物理设备的采样过程相差很大。

(3) 连续输入/离散处理/连续输出模型(C/D/C 模型)

连续输入/离散处理/连续输出模型(C/D/C 模型)是对采样成像系统进行综合分析的更为完善的模型。它综合考虑了现代采样成像系统中采样前的光学成像系统的低通滤波效应,数字图像采集效应,数字滤波效应、附加噪声引起的遮盖效应(masking effects),还有欠采样噪声效应(aliasing effect)。

3.2 采样成像系统评价指标

(1) 均方差评价

用输入输出信号之间的均方差评价采样成像系统端到端的成像质量,是最常用的传统的系统评价方法。这种评价方法被长期使用,一是因为它在数学上有明确定义的计算公式,再者,也因为,过去很长时间内没有发现更好的评价指标。

(2) 保真度评价

端到端的系统保真度是评价采样成像系统的另一个指标。均方差的数学期望代表图像的保真度。这种评价方法使用随机信号和噪声模型,任意信号和噪声都可作为系统的输入。图像保真度和图像保真度损失两个指标用于系统评价。

(3) 基于信息理论的系统评价

Shannon 的理论是基于信息理论的系统评价方法的基础。Shannon 引入了在噪声信道中信息传输率的概念。因而,基于信息理论的系统评价中,把系统和子系统端到端的信息率作为评价指标。当把人的视觉响应也考虑在系统模型之中时,基于信息理论的系统评价显示出更大的优势。

3.3 系统分析方法

系统分析方法分为基于元件的分析方法和端到端的分析方法。好的元件特性不一定保证好的系统特性,图像的视觉质量受从图像采集到图像显示的整个图像处理过程中的信息衰减水平影响。系统端到端的信息率的增益(或衰减)与最终图像的分辨率、尖锐性和清晰度密切相关。端到端的研究方法是现代采样成像研究的基本特色。

4 基于信息理论的光电一体化设计的基本思想

采样成像系统综合了光、电系统和模拟、数字技术。过去,为分析方便,相互关联的信息传递、图像处理过程被分为分立的几个步骤:图像采集、编码、恢复、显示和人的诠释。然而,如果这些步骤被当作不相关的任务,彼此独立的对他们进行优化处理,则不论每一步的优化做得多么好,都不能保证端到端的系统性能。

当用端到端的方法研究系统时,自然会对传统的系统设计思想进行反思。比如,传递函数特性好的光学系统是否一定带来好的系统端到端特性;光电系统的焦平面是否一定和光学焦面吻合;模拟和数字处理谁更好;硬件逻辑与算法哪个更有效。香农(Shannon)的信息理论,提供了用端到

端方法评价系统,进行系统优化设计的理论依据。

5 国外研究状况

信息理论的采样成像系统研究始于 50 年代,从 80 年代中期开始,这个领域的研究越来越活跃。到上世纪末,国际上这个领域的研究呈爆炸性趋势。国际上最活跃的研究群体是以 F. O. Huck 为代表的研究组。国内这方面的研究少见报道。

1948 年美国科学家 C. E. Shannon 发表了著名论文《通信中的数学理论》,从而奠定了信息理论基础。从信息论创立之日起,世界上光学界的先驱者便致力于把信息论引入光学领域。1955 年 G. Toraldo di Francia 教授首先把自由度的概念引入光学领域,用像面和物面自由度的变化评价光学成像系统信息量的变化。此后人们对他的论述有争议。然而,到 1969 年,他把 Slepian、Pollak 和 Landau 发展的回转椭圆波函数引入光学,创立了光学本征理论,完善的解决了在相干条件下无像差光学系统传递信息量问题,从而确定了光学信息论在光学领域的地位。旋转椭圆波最重要的性质就是他在有限区域和无限区域都正交,因而利用回转椭圆波函数族可以方便的分析在空间和空间频域均受限的实际光学图像。

信息论的基础之一是概率论与随机过程,B. Frieden 首先把概率的概念引入光学成像。他把光学成像过程视为处于微观运动状态变化的一个体系,把光学中可测量的任一点的光强分布与概率论中的概率联系起来,并用严格的数学推导证明物面上一个面元发出光子的概率等于该点的光强,可以定量计算光学图像的熵,进而,还可计算光学成像系统的信息量。利用信息量可以对光学成像的物体和图像的精细程度做科学的、定量的描述,从而,为定量的评价光学系统提供了依据。

1975 年 Huck 和 Park 把香农的信息理论扩展到图像采集系统^[1],他们根据三个限制参数(光学响应、采样通带、灵敏度)推导采集信号的信息密度公式。

1984 年 Fales、Huck 和 Samms 用信息论研究具有线扫描和阵列传感器的采样成像系统^[2],讨论系统优化设计,讨论透镜衍射效应、传输阴影效应、离焦模糊效应。

1985 年 Huck 等把信息率和保真度的概念用于研究图像采集和处理^[3]。Huck 等推导公式,把光学设计和图像形成及边缘探测算法联系在一起。Huck 等的研究指出,当基于信息率对图像采集系统进行优化设计时,Wiener 再现的保真度最好,但同时,对于各种图像,Wiener 再现的不确定性也最大。他们指出,当且只当正确处理图像采集过程和有效抑制图像显示的衰减时,才可以把图像采集视为通信信道。

1986 年 I. J. Cox 等研究光学系统的信息容量和分辨率^[4]。讨论了信息量不变的概念。并讨论了显微镜中获得超级分辨率的方法。

1988 年, F. O. Huck 等研究图像采集系统设计中的信息量和保真度^[5],他们指出,把图像采集和图像重建结合在一起分析时,系统呈现光学成像系统特性,基于信息理论的图像采集系统优化设计不能保证重建图像的最佳保真度。而当把图像采集和图像再现结合在一起分析时,系统呈现通信信道特性,基于信息理论的图像采集系统优化设计能保证再现图像从像面到边缘的最佳保真度。

1990 年 Sarah John 等指出^[6],单纯的把图像采集系统和编码系统模拟成通信信道,只考虑信息密度是不够的,还必须考虑图像恢复滤波器的优化。基于数学公式的滤波器不能产生最佳视觉图像。Sarah John 等指出,只有充分的考虑采样成像中的模拟/数字转换和数字/模拟转换效应,Wiener 恢复才能获得最佳的分辨率、尖锐度和保真度。

1992 年,R. Torroba 等用熵的概念研究光波动^[7]。R. Torroba 等指出,熵的概念与热力动力学和信息理论一样,可用于定位相干波动平面。如果光强度恒定,则熵恒定。Gaussian 光束腰就是熵最稳定的地方。

1994 年,L. Carretero A. Fimia 等研究全息光

学元件中基于熵的图像质量评价^[8],应用熵的概念得到全息光学元件的最佳像面。他们把这种方法应用于具有不同球差的全息光学元件,试验结果表明,对于大像差元件,根据熵的概念得到的最佳像面与最小像差平面不同。

1999 年,Huck、Fales 等基于信息理论评价采样成像系统^[9]。研究结果表明,对图像采集系统,从辐射场传递到观察者的信息率与再现图像的保真度、清晰度、尖锐性紧密相关。理论上的最小信息率与传输所需的最小信息率一致。

2000 年,W. C. Chou 等研究基于信息论的二值成像器光学设计^[10]。W. C. Chou 等用互信息评价了 Fresnel 波动和相干成像。用信息空间的概念研究相干 4f 系统中数值孔径和像束数之间的关系。

2001 年,Johnson 等根据互信息量研究遥感成像系统中的图像分辨率^[11]。

以上介绍了各个年代有代表性的研究成果。从上世纪末,本领域的研究更为活跃、研究成果更丰富。科学工作者在光电一体化设计、欠采样噪声处理等方面做了大量开拓性研究工作^[12-21]。

6 研究发展方向

(1) 建立更加科学、完善的采样成像系统性能评价模型。研究从采样景物到人视觉接收的端到端成像过程。

(2) 基于信息理论的光学系统设计。

(3) 光电一体化设计,模拟、数字综合设计。基于信息理论解决的模拟/数字接口的模糊问题、光电系统匹配等技术难题。

(4) 成像系统中的算法研究。基于信息理论和端到端性能评价算法。

(5) 光学元件向数字集成系统发展的研究。这种研究中信息论将发挥重要作用。

参考文献:

- [1] HUCK F O, PARK S K. Optical-mechanical line-scan imaging process: Its information capacity and efficiency[J]. *Applied Optics*, 1975, 14(10): 2508-2520.
- [2] FALES C L, HUCK F O, SAMMS R W. Imaging design for improved information capacity[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(6): 872-888.
- [3] HUCK F O, FALES C L. Image gathering and processing: information and fidelity[J]. *Journal of Optical Society of America A*, 1985, 2(10): 1644-1666.

- [4] COX I J, SHEPPARD C J R. Information capacity and resolution in an optical system[J]. *Journal of Optical Society of America A*, 1986, 3(8): 1152-1158.
- [5] HUCK F O, FALES C L, MCCORMICK J A, et al. Image-gathering system design for information and fidelity[J]. *J Opt Soc Am*, 1988, 5(3): 285-299.
- [6] JONE S, RAHMAN Z, HUCK F O, et al. Information theoretical assessment of digital image system[J]. *Optical Engineering*, 1990, 1309:53-66.
- [7] TORRIBA R, RABAL H, RUIZ B. An entropy approach to light propagation[J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, 39(9):1939-1946.
- [8] CARRETER PL, FIMIA A. Entropy-based study of imaging quality holographic optical element[J]. *Optical Society of Am*, 1994, 19(17): 1355-1357.
- [9] HUCK F O, FALES C L, GARTENBERG R L, et al. Information-theoretical assessment of sampled imaging systems [J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(5):742-762.
- [10] CHOU W CH, NEIFELD M A. Information-based optical design for binary-valued imagery[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(11): 1731-1742.
- [11] JOHNSON K, COLE RHODS A, MOIGNEJ L, et al. Multi-resolution image resolution of remotely sensed imagery using Mutual information[J]. *SPIE*, 2001, 4391:330-339.
- [12] 李佳列,丁国清,颜国正,等.采用 CCD的非接触测量中提高精度的一种方法[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(3):281-284.
- LI J L, DING G Q, YAN G ZH, et al. Method for improving precision in noncontact measurement by linear CCD[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2002, 10(3):281-284.
- [13] 丁延卫,刘剑,卢铿.空间环境对光学成像传感器尺寸稳定性的影响[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(1): 106-109.
- DING Y W, LIU J, LU E. Effect of space environment on the dimension stability of optical remote sensor[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2002, 10(1):106-109.
- [14] 张明慧,徐为,张尧禹,等.航空照片的图像增强研究[J]. *光学精密工程*, 2002, 10(2):194-200.
- ZANG M H, XU W, ZHANG Y Y, et al. Research on image enhancing for aerial photographs[J]. *Optical and Precision Engineering*, 2002, 10(2):194-200.
- [15] 迟学芬,韩昌元.采样目标统计特性与 CCD 探测系统设计[J]. *吉林大学学报*, 2002, 20(4):23-26.
- CHI X F, HAN CH Y. The design methods of CCD detection system and the statistical characteristics of sampled targets [J]. *Journal of Jilin University*, 2002, 20(4):23-36.
- [16] 迟学芬,石文孝,韩昌元,等.基于信息理论的采样成像系统优化设计[J]. *通信学报*, 2002, 23(9): 88-93.
- CHI X F, SHI W X, HAN CH Y, et al. Information-theory based optimizing design methods in sampled-imaging system [J]. *Journal of China Institute of Communications*, 2002, 23(9):88-93.
- [17] PARK S K, RAHMAN Z. Fidelity analysis of sampled imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(5):786-800.
- [18] VOLLMERHAUSEN R, DRIGGERS R G, O'KANE B L. Influence of sampling on target recognition and identification[J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(5): 763-772.
- [19] PARK S K, RAHMAN Z. Fidelity analysis of sampled imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(5):786-800.
- [20] BRADY D, NEIFELD M A. Information theory in optoelectronic systems: introduction to the feature[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(11):1679-1680.
- [21] AL TER- GARTENBERG R. Information metric as a design tool for optoelectronic imaging system[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(11):1743-1760.

作者简介:迟学芬(1962-),女,吉林长春人,吉林大学通信工程学院副教授,中国科学院长春光学精密机械与物理研究所博士研究生,主要从事信息处理、采样成像技术和宽带通信技术研究。