

文章编号:1001-5078(2008)04-0371-04

· 光电对抗 ·

基于信息理论的成像系统干扰效果评估

赵福才¹,胡以华¹,陶小红¹,张立²

(1.解放军电子工程学院,安徽 合肥 230037;2. 71217 部队 53 分队,山东 莱阳 265200)

摘要:把信息熵应用于成像系统中,用端到端的互信息评价图像成像系统,研究成像系统的干扰设计方法。模拟系统设计参数,计算机仿真分析了三种性质的干扰对成像系统的影响,做出了基于互信息量的干扰效果仿真曲线。这对于光电对抗装备的研制、开发和效能评估具有一定的参考价值。

关键词:互信息量;熵;成像系统;干扰效果评估

中图分类号:TN919.82 文献标识码:A

Research on the Effect Evaluation Based on Information Theory in Imaging Systems

ZHAO Fu-cai¹, HU Yi-hua¹, TAO Xiao-hong¹, ZHANG Li²

(1. Electronic Engineering Institute of PLA, Hefei 230037, China; 2. No. 71217 of PLA, Laiyang 265200, China)

Abstract: By extending information entropy to imaging system, we assess the performance of image system according to its end-to-end mutual information. The jamming methods of imaging system are studied. Assuming several sets of system design parameters we analyze the influence of three kinds jamming by the way of computer simulation. Mutual information based computer simulation of jamming effect are demonstrated. This is important for the development and the evaluation of the optoelectronic countermeasure equipment.

Key words: mutual information; entropy; imaging system; jamming effect evaluation

1 引言

成像系统模型如图 1 所示。自 1948 年香农 (Shannon) 系统地阐述信息理论以后,信息论在电信工程中获得了很大的发展,成为电信技术的重要理论基础。图像和成像系统的研究也可借助信息论这一工具,用它来指导成像系统的设计和评价。

本文首先建立了图像成像系统的应用分析模型,分析了如何用信息理论来评价光学成像系统,并给出了如何利用信息理论这一工具来评估干扰效果。通过实验仿真,我们得到不同干扰类型下的干

扰特性。当干扰表现为白噪声形式时,系统端到端的互信息量随着干扰噪声的增加而近似线性下降;当干扰使得 CCD 有效像元尺寸增加时,系统端到端的互信息量近似二次曲线下降;当干扰使得光学响应指数减小时,系统端到端的互信息量近似指数曲线下降。研究结果对于如何进行成像干扰,以及干扰效果的分析都有一定的意义。

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60672154)资助。

作者简介:赵福才(1980-),男,博士生,研究方向为信号与信息处理。E-mail: zhfc80@163.com

收稿日期:2007-10-08;修订日期:2007-11-02

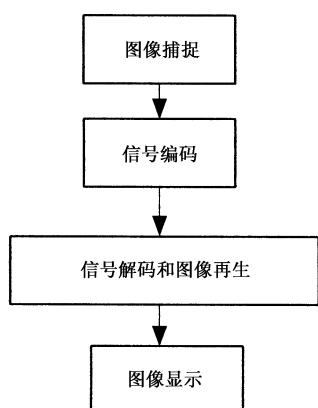


图1 成像系统模型

2 图像成像系统的数学模型

图像捕捉过程如图2所示^[1]。

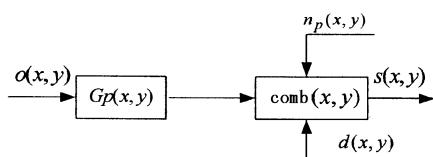


图2 图像捕捉过程

图中, G 为系统的稳态增益; $p(x,y)$ 是图像捕捉设备的空间响应函数; $n_p(x,y)$ 为光电探测器的噪声。 $\text{comb}(x,y)$ 代表采样网格函数(是二维 δ 函数的集合); $o(x,y), s(x,y)$ 分别为图像捕捉系统的输入、输出信号; $d(x,y)$ 为干扰信号。在此模型下, 输出信号可表示为:

$$s(x,y) = [G_o(x,y) \times p(x,y)] \text{comb}(x,y) + n_p(x,y) + d(x,y) \quad (1)$$

其中, $\text{comb}(x,y) = \sum_{m,n} \delta(x-m, y-n)$, 代表在直角坐标下, 采样设备的采样函数。 $s(x,y)$ 的傅里叶变换 $S(u,v)$ 为:

$$S(u,v) = [G_o(u,v) p(u,v)] \times \text{comb}(u,v) + n_p(u,v) + d(u,v) \quad (2)$$

其中, $O(u,v)$ 是输入图像 $o(x,y)$ 的傅氏变换; $P(u,v)$ 是图像捕捉设备的空间频率响应; $D(u,v)$ 为干扰信号 $d(x,y)$ 的傅氏变换, $N_p(u,v)$ 为噪声的傅氏变换。 (u,v) 为空间频率, $\text{COMB}(u,v)$ 是采样网格函数的傅氏变换, 对它进行进一步分解:

$$\begin{aligned} \text{COMB}(u,v) &= \sum_{m,n} \delta(u-m, v-n) \\ &= \delta(u,v) + \sum_{m \neq 0, n \neq 0} \delta(u-m, v-n) \\ &= \delta(u,v) + \text{COMB}_a(u,v) \end{aligned} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中有:

$$S(u,v) = [G_O(u,v) P(u,v)] + [G_O(u,v) \cdot P(u,v)] \times \text{COMB}_a(u,v) + N_p(u,v) + D(u,v) \quad (4)$$

令 $N_a(u,v) = [G_O(u,v) P(u,v)] \times \text{COMB}_a(u,v)$, $N_a(u,v)$ 即为采样成像系统广泛讨论的欠采样噪声。令 $N(u,v)$ 代表欠采样噪声、光电探测器噪声和干扰之和, 即:

$$N(u,v) = N_a(u,v) + N_p(u,v) + D(u,v) \quad (5)$$

则式(4)可写为:

$$S(u,v) = G_O(u,v) P(u,v) + N(u,v) \quad (6)$$

2 信息理论的应用

设信源 X 通过成像系统得到输出 Y (如图3所示), 根据信息论知, Y 与 X 之间的互信息量 $I(X,Y)$ 定义为^[2]:

$$I(X,Y) = H(Y) - H(Y/X) \quad (7)$$

式中, $H(Y)$ 是 Y 的熵; $H(Y/X)$ 为条件熵。

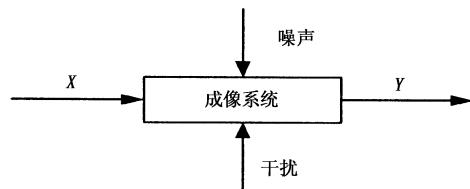


图3 成像系统

互信息熵 $I(X,Y)$ 的物理意义为在有扰信道中, 从输出 Y 中得到的关于输入 X 的平均信息量的大小。显然, $I(X,Y)$ 越大, 从 Y 中得到的关于输入 X 的信息越多。通信系统追求的是信宿与信源最大的一致性(无失真), 同样, 采样成像系统追求的是像的保真度, 可见, 二者的目标是一致的。因此, 成功应用于通信系统的信息论, 同样可应用于采样成像系统。把输入图像 $O(u,v)$ 看作信源, 我们希望输出图像 $S(u,v)$ 中包含多的关于 $O(u,v)$ 的信息, 即希望二者的互信息量尽量的大(保真)。而使输入输出二者间互信息量最大的系统设计才是最优设计。

根据互信息量的定义, $O(u,v), S(u,v)$ 之间的互信息量为:

$$I = H[S(u,v)] - H[S(u,v)/O(u,v)] \quad (8)$$

式中, 第一项是捕捉信号 $S(u,v)$ 的熵; 第二项是条件熵, 是给定输入信号 $O(u,v)$ 条件下捕捉信号 $S(u,v)$ 的熵。熵的物理意义是系统不确定性的度量。条件熵 $H[S(u,v)/O(u,v)]$ 是给定输入信号 $O(u,v)$ 条件下, 捕捉信号 $S(u,v)$ 的不确定性。这种

不确定性显然是噪声的存在造成的, $H[S(u,v)/O(u,v)]$ 可称为噪声熵。因此, 可以用噪声的熵 $H[N(u,v)]$ 替代条件熵 $H[S(u,v)/O(u,v)]$, 则式(8)可写为:

$$I = H[S(u,v)] - H[N(u,v)] \quad (9)$$

根据文献[1]和[2], I 可表示为:

$$I = \frac{1}{2} \int_b \left[\log \left(1 + \frac{\phi_0(u,v) |P(u,v)|^2}{G^{-2} \phi_n(u,v)} \right) \right] du dv \quad (10)$$

式中, $\phi_0(u,v)$ 是输入信号 $O(u,v)$ 的功率谱密度。设光电探测器噪声为白噪声, 可令光电探测器噪声的功率谱密度 $\phi_p(u,v) = \sigma_p^2$, $\phi_d(u,v)$ 是输入信号 $D(u,v)$ 的功率谱密度, 则有:

$$\phi_n(u,v) = G^2 \phi_0(u,v) |P(u,v)|^2 \times \text{COMB}_a(u,v) + \sigma_p^2 + \phi_d(u,v) \quad (11)$$

式(10)、(11)是我们讨论各种干扰方法设计及其有效性的基础。

3 信息理论用于评价成像系统

取成像质量分析中常用的自然功率谱^[3], 即:

$$\phi_0(u,v) = \frac{1}{(u^2 + v^2)} \quad (12)$$

$\phi_0(u,v)$ 如图 4 所示。

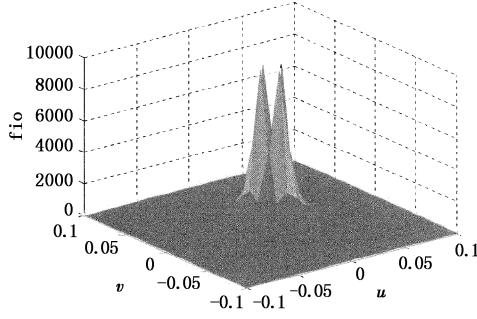


图 4 $\phi_0(u,v)$

图像捕捉设备通常包含透镜系统和光电探测器机械装置。空间频率响应函数反映图像捕捉设备系统性能。探测器响应可用 sinc 函数表示, 其他器件的响应可用函数 $\exp(-\rho^2/\xi^2)$ 表示, ξ 值的大小反映设备性能。 $P(u,v)$ 可表示为:

$$P(u,v) = \text{sinc}(\xi u) \text{sinc}(\xi v) \exp(-\rho^2/\xi^2) \quad (13)$$

式中, $\rho^2 = u^2 + v^2$; ξ 和 ζ 决定设备空间频率相应特性。

文献[4]研究了 ξ 和 ζ 的特性。文献[5]指出, ξ 越大, 光学成像系统的截止频率越高, 从而能传递更高频率的空间细节, 模糊效应小, 但欠采样噪

声的计算机仿真结果让我们看到问题的另一方面。在确定的空间采样频率下, 欠采样噪声随 ξ 的增大而增大。亦即光学成像系统的频率响应越好, 欠采样噪声越大。空间采样频率一定的条件下, 如果光学成像系统传递的空间频率超过采样频率的一半, 则采样不足, 必然有欠采样噪声。限制采样前光学成像系统的频率响应, 即减小 ξ 可以减小欠采样噪声, 但是这样处理的代价是光学成像系统模糊效应增加。因此, 采样成像系统光电一体化设计中, 必须考虑欠采样噪声与光学模糊效应的平衡。

文献[6]指出 ξ 在 0.3 附近互信息量为最大。文献[7]指出 CCD 像元尺寸 ζ 越小, 峰值互信息量对应的光学响应指数 ξ 的值越大。当 $\zeta \approx \frac{1}{3.5\xi}$ 时, 无论 CCD 像元尺寸 ζ 为何值, 互信息量均为最大。

因此, 我们选择 $\xi = 0.3$, $\zeta = 1$, 则 $P(u,v) = \text{sinc}(u) \text{sinc}(v) \exp(-\frac{(u^2 + v^2)}{0.09})$, 如图 5 所示。

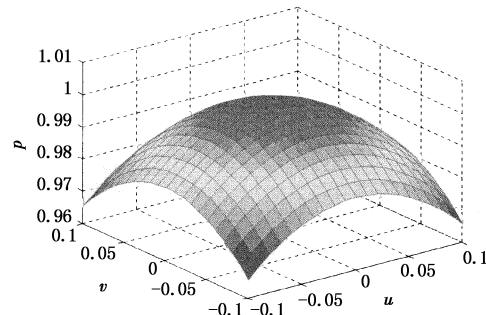


图 5 $P(u,v)$ ($\xi = 0.3, \zeta = 1$)

4 各种干扰情况下对成像系统的影响

下面, 我们研究各种情况下的成像系统输出与输入的互信息量 I 。

第一种情况为干扰相当于噪声, 对成像系统硬件本身没有影响。 $\phi_0(u,v), P(u,v)$ 的取值为上面所述, 系统稳态增益 $G = 1$, 噪声干扰功率谱范围为 0 ~ 10, 则可得到图 6。

由图 6 我们可知, 当干扰表现为白噪声干扰, 或者说只有噪声干扰时, 成像系统的互信息量随着噪声的增加成线性下降。因此, 如果我们要干扰一个参数固定的成像系统, 我们可以增加干扰噪声的功率谱密度, 使得成像系统的互信息量下降到一定的门限, 从而使其失效。

第二种情况为 CCD 探测器的有效像元宽度 ζ 与成像系统的互信息量关系。 $\phi_0(u,v), P(u,v)$

($\xi = 0.3, \zeta \in [0.2, 2]$) 的函数形式为上面所述, 系统稳态增益 $G = 1$, 噪声功率谱取 5, 则可得到图 7。

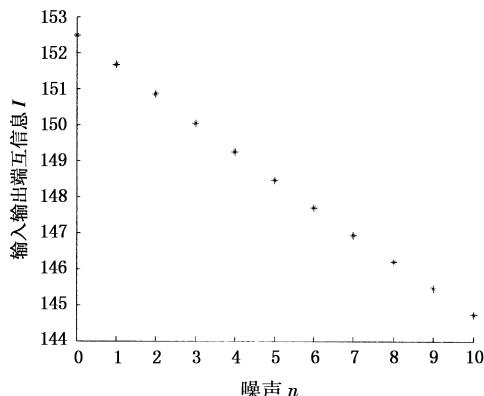


图 6 噪声和互信息量关系图

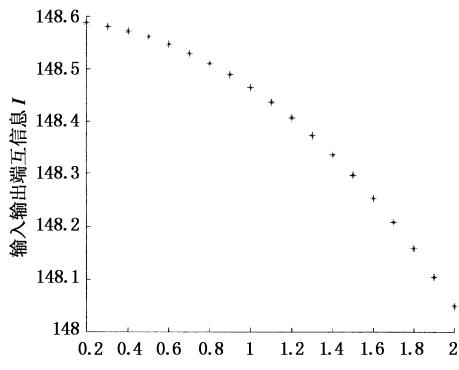


图 7 CCD 探测器的有效像元宽度和互信息量关系图

由图 7 我们可知, 当成像系统的 CCD 有效像元宽度增加时, 系统的性能成近似二次曲线下降。另外, 当干扰使得 CCD 的输出出现饱和时, 成像系统的输出互信息量减小。

第三种情况为干扰使得成像系统的硬件性能降低, 使空间频率响应函数性能降低, 如使光学响应指数 ξ 减小。 $\phi_0(u, v), P(u, v)$ ($\xi \in [0.1, 2], \zeta = 1$) 的函数形式为上面所述, 系统稳态增益 $G = 1$, 噪声功率谱取 5, 则可得到图 8。

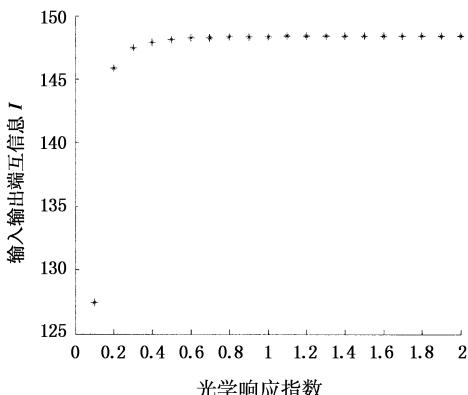


图 8 光学响应指数和互信息量关系图

由图 8 我们可知, 当干扰使得成像系统的空间频率响应函数的光学响应指数 ξ 减小时, 系统的性能成近似指数曲线下降。因此, 我们可以采样各种干扰手段使得成像系统的光学响应函数下降到一定的门限, 从而使成像系统失效。从图可知, 当 ξ 小于 0.2 时, 输入输出互信息量较小。因此, 当干扰使 ξ 下降到 0.2 时, 系统的性能开始下降。

5 结 论

成像系统端到端的互信息是 CCD 像元尺寸、光学成像系统光学响应指数、噪声和干扰噪声的函数。在某一确定干扰机理下, 往往使成像系统的某一指标下降, 从而整个成像系统性能下降。

本文研究结果说明, 当干扰表现为白噪声形式时, 系统端到端的互信息量随着干扰噪声的增加而近似线性下降; 当成像系统 CCD 有效像元尺寸增加时, 系统端到端的互信息量近似二次曲线下降; 当干扰使得光学响应指数减小时, 系统端到端的互信息量近似指数曲线下降。

参 考 文 献:

- [1] Friedrich O Huck, Carl L Fales, Rachel Alter-Gartenberg, et al. Information-theoretic assessment of sampled imaging systems [J]. Optical Engineering, 1999, 38(5): 742–762.
- [2] 王之江, 伍树东. 成像光学 [M]. 北京: 科学出版社, 1991: 40–46.
- [3] David J Field. Relations between the statistics of natural images and the response properties of cortical cells [J]. J Opt. Soc. Am, 1987, A4: 2379–2392.
- [4] Stephen K Park, Zia-ur Rahman. Fidelity analysis of sampled imaging systems [J]. Optical Engineering, 1999, 38(5): 786–800.
- [5] 迟学芬, 韩昌元, 易志栋. 基于信息理论的采样成像系统匹配设计 [J]. 光学学报, 2003, 23(3): 278–283.
- [6] 迟学芬, 于银辉, 韩昌元, 等. 采样成像系统中的欠采样噪声分析 [J]. 吉林大学学报, 2002, 20(1): 26–29.
- [7] 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方法 [J]. 通信学报, 2002, 23(9): 88–93.