

抽样成像系统的混淆效应评价

张 保 民
(华东工学院)

提 要

本文根据积分抽样理论模型,摆脱传统光学传递函数的束缚,利用变带宽带限连续空间频谱标准输入情况下的输出复频谱分析,准确完整地评价抽样成像系统。文中给出了定量评价抽样成像系统混淆效应的方法与数据处理的理论依据。

一、引 言

对于具有离散特征的抽样成像系统,传统的光学传递函数评价技术已不再适用,因为只要发生图像的抽样传递过程,则无论抽样方式是凝视型还是扫描型,就必定会引入假频;同时,只要输入图像的空间频谱与成像系统的抽样结构(列阵单元中心距或扫描间距)之间不满足尼奎斯特条件,假频成分就会混入真频区而产生混淆效应。Pinson曾推荐一组参数用来定量评价抽样成像系统的混淆效应^[1],但这组参数虽对系统设计者有理论意义,却难以在实际评价工作中应用。Wittenstein等人给出了一种与实验技术结合的抽样成像质量评价方法,建议利用调制传递函数的测试数据,按文中给出的公式计算混淆量^[2]。然而,不无遗憾,这种方法不足之处也正在于它仍旧未能摆脱传统光学传递函数或调制传递函数概念的束缚。为此,根据积分抽样理论模型^[3],本文首先论述了图像空间抽样结构的作用,而后重点阐明了为定量评价抽样成像系统的混淆效应,需要在选定的特征方向上以确定的相位利用连续空间频谱带限输入图案,并按照尼奎斯特条件,通过分析不同输入带宽情况下系统给出的输出复频谱,计算混淆量。文中同时给出了数据处理的理论依据。

二、抽 样 结 构

按照文献[3],只要假定 $f(\mathbf{r}) \otimes w_{e1,1a}(\mathbf{r})$ 是 f_e 一带限函数($|f_1| \leq f_{1c}, |f_2| \leq f_{2c}$),并且满足 $2f_{1c} \leq |b_1^*|$ 和 $2f_{2c} \leq |b_2^*|$ 的尼奎斯特条件,混淆效应就不会发生。可见,图像的空间抽样结构对混淆效应是否存在,以及若有混淆量存在,其大小如何,有着重要的影响。从避免和减弱混淆效应考虑,希望单元窗口的傅里叶谱 $W_{e1,1a}(\mathbf{f})$ 随空间频率增加而衰降的速率大。这意味着单元窗口的面积应当尽可能地大,但另一方面,由于 b_1 和 b_2 与 b_1^* 和 b_2^* 之间互为倒易矢量,根据尼奎斯特条件,却又希望 $|b_1|$ 和 $|b_2|$ 小,即空间抽样周期要小。为此,若 b_1^* 和 b_2^* 所允许的最小模值为 $|b^*|_{\min}$,则如果在空间频率平面上有 $(b_1^*, b_2^*) = (\pi/3)$,且 $|b_1^*| = |b_2^*| = |b^*|_{\min}$,由于与之相应的抽样结构能实现直径为 $|b^*|_{\min}$ 的圆的最紧密堆集,

松弛了抽样结构基矢 \mathbf{b}_1 和 \mathbf{b}_2 对单元窗口 $w_{cl,ls}(\mathbf{r})$ 的约束,而被视作最佳。此时,

$$(\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2) = (2\pi/3), |\mathbf{b}_1| = |\mathbf{b}_2| = (2/\sqrt{3})|\mathbf{b}^*|_{\min},$$

并进而可确知能够获得最大面积的单元窗口形式为内切圆直径与基矢的模相等的正六边形。这正是凝视抽样中的六角形蜂房结构。

在空间频率域基矢满足预定要求的前提下,希望单元窗口面积尽可能大的抽样结构准则,其合理性还表现在单元窗口所具有的二次滤波作用上。这次滤波的低通性质,与一次滤波一样,会使图像的真频成分有所损失,但却不论有无混淆效应发生,均使抽样引入的高空间频率的假频干扰受到显著抑制。

在凝视抽样中,在单元间距相等的条件下,蜂房式结构比正方形结构不仅有较小的假频干扰,而且有稍高一些的真频传递能力。

三、变带宽复频谱分析

人们至今仍在沿用基于光学传递函数理论发展起来的仪器测量抽样系统的成像质量。但事实上,此时光学传递函数或调制传递函数仪给出的实测结果已不再代表通常含义下的光学传递函数或调制传递函数,而只是给定目标和测试条件下系统输出图像频谱的具体量度。并且,最关键的一点是所采用的狭缝具有无限带宽的空间频谱,这意味着混淆效应不可避免。光学传递函数测定仪给出的“调制传递函数”实测曲线实际上必定包含有假响应。

对于抽样成像系统,就空间频率域的区段划分而言,在没有混淆效应发生的情况下,宽度等于厄奎斯特频率值的第一布里渊区为真频区,其它均属假频区。当有混淆效应发生时,特别是若有 $f_c \rightarrow \infty$, 则原则上在一切空间频率上都既有真频成分又同时有假频成分。但第一布里渊区的边界仍旧是有明确实际意义的基本界限。边界以内,真频为主;边界以外,假频为主。此外,由于第一布里渊区以外毕竟属于高频范围,单元窗口的二次低通滤波将使其受到极大的削弱。因此,无论从哪方面说,空间频率域中的第一布里渊区都是非常重要的特征频率区。然而,评价抽样系统的成像质量,即使只关心空间频率域中的第一布里渊区,显然亦应当包括真频传递能力与混淆效应两大方面。同时,典型评价必须在抽样结构某一选定的特征方向上进行,此外还要注意输入图像与抽样结构之间的相对位置及其本身频谱组成中的相位状况。

设抽样系统对应于连续谱输入图像 $f(s)$ 的输出图像,它们的傅里叶谱分别为 $FT_f(f_s)$ 和 $FT_g(f_s)$ 且 $f(s)$ 为带限函数

$$FT_f(f_s) = FT_g(f_s) \cdot \text{rect}(f_s/2f_c), \quad (1)$$

选择无混淆临界状态 $f_c = (1/2b)$ 和典型的有混淆状态 $f_c = (1/b)$, 分别给系统工作以标记

$$[FT_f(f_s)]_{f_c=1/2b} \rightarrow [FT_g(f_s)]_{f_c=1/2b}, \quad (2)$$

$$[FT_f(f_s)]_{f_c=1/b} \rightarrow [FT_g(f_s)]_{f_c=1/b}. \quad (3)$$

为了定量评价混淆效应,可以只考察空间频率域中最重要的第一布里渊区。 $[FT_g(f_s)]_{f_c=1/b}$ 实际包含真频(T)与假频(S)两种成分

$$[FT_g(f_s)]_{f_c=1/b} = [FT_T(f_s)]_{f_c=1/b} + [FT_S(f_s)]_{f_c=1/b}, \quad (4)$$

$[FT_o(f_s)]_{f_c=1/b}$ 与 $[FT_o(f_s)]_{f_c=1/2b}$ 均直接可测, 从而可以通过如下处理分别获得真频 $[FT_o(f_s)]_{f_c=1/b}^T$ 和假频 $[FT_o(f_s)]_{f_c=1/b}^S$, 这就使抽样成像系统摆脱传统光学传递函数概念, 直接实现混淆效应的客观定量评价成为可能。例如, 输入给定的三角形频谱时, 由一条光纤传像未测得的输出空间频谱, 如图 1 所示。

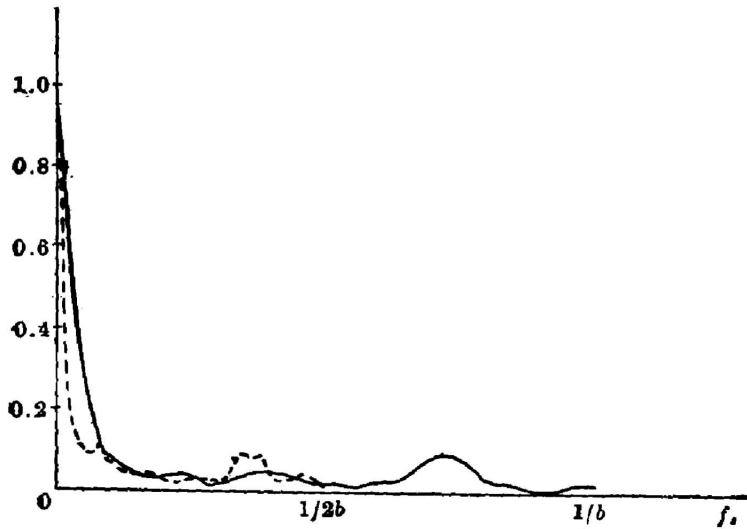


Fig. 1 Measured output space frequency spectra of an optical fiber bundle with a given triangle input spectrum ($d=14.6\mu\text{m}$, $b=17.3\mu\text{m}$, $l=1.25\text{m}$; normalized $A_0=0.21$, $\beta=0.46$)

— $|[FT_o(f_s)]_{f_c=1/b}|$ with aliasing — $|[FT_o(f_s)]_{f_c=1/2b}|$ without aliasing

在空间域中将 $[(f_s)]_{f_c=1/2b}$ 缩小一倍, 即得到 $[(f_s)]_{f_c=1/b}$, 因此

$$[FT_o(f_s)]_{f_c=1/b}^T = [FT_o(f_s/2)]_{f_c=1/2b}, \quad (5)$$

$$[FT_o(f_s)]_{f_c=1/b}^S = [FT_o(f_s)]_{f_c=1/b} - [FT_o(f_s/2)]_{f_c=1/2b}. \quad (6)$$

为了方便地进行统一比较, 可规定带限矩形空间连续谱图案作为假想规范化输入。所谓假想, 指的是它并非可以实际实现, 因为任何负的光学辐射强度客观上均不存在。我们给矩形谱情况以附加标记“□”, 于是可求得

$$[FT_o(f_s)]_{f_c=1/2b}^{\square} = [FT_o(f_s)]_{f_c=1/b}^{\square T} = [FT_o(f_s)]_{f_c=1/2b} / [FT_o(f_s)]_{f_c=1/2b}, \quad (7)$$

$$[FT_o(f_s)]_{f_c=1/2b}^{\square S} = \{[FT_o(f_s)]_{f_c=1/b} - [FT_o(f_s/2)]_{f_c=1/2b}\} / [FT_o(f_s - 1/b)]_{f_c=1/b}. \quad (8)$$

由于 $[FT_o(f_s)]_{f_c=1/2b}^{\square T}$ 和 $[FT_o(f_s)]_{f_c=1/b}^{\square S}$ 是抽样成像系统在空间频率域第一布里渊区中真频与假频响应的客观量度, 它们就准确地分别给出了系统真频传递能力与混淆效应的定量评价, 并立即可按文献[3]的(21)和(23)式直接计算出真频量 A_0 与混淆量 β 。

最后应当指出, 任一函数都不可能在空间上和空间频谱上同时受限, 因而带限函数 $f(s)$ 亦只能近似实现。但幸运的是实际上它可以被控制在足可允许的精度范围之内。

四、结 束 语

(1) 对抽样成像系统应摆脱传统光学传递函数概念的束缚, 而运用空间复频谱分析;

- (2) 抽样结构对混淆效应有重要影响;
- (3) 测度混淆效应的示性指标应能反映抽样成像系统假频掺入量与真频传递量之间的相互对比状况;
- (4) 利用变带宽空间连续谱标准输入图案, 可依据尼奎斯特条件实现对抽样成像系统真频传递能力与混淆效应强度的客观定量评价。

参 考 文 献

- [1] L. J. Pinsky; *IEEE Trans. Syst. Man & Cybernetics*, 1978, **SMC-8**, No. 10 (Oct), 774.
- [2] W. Wittenstein *et al.*; *Opt. Acta*, 1982, **29**, No. 1 (Jan), 41.
- [3] 张保良;《光学学报》, 1985, **5**, No. 9 (Sep), 812.

Evaluation of aliasing for sampled imaging systems

ZHANG BAOMIN

(East China Institute of Technology, Nanjing)

(Received 6 August 1985; revised 4 February 1986)

Abstract

Based on the model of integral sampling theory, an important fact about sampled imaging systems is presented in this paper. Instead of the traditional OTF, the complex frequency analysis of the output image with a normal input of bandlimited continuous space spectrum of variable-bandwidth should be used to evaluate the sampled imaging systems accurately and completely. An evaluation method of aliasing for sampled imaging systems and the theoretical basis of data processing are also presented.