

白光信息处理的现代进展

F. T. S. Yu*

(*Electrical Engineering Department, Pennsylvania State University*)

庄松林**

母国光**

(上海光学仪器研究所)

(南开大学物理系)

提 要

本文讨论了作者所提出的白光信息处理系统的基本概念,以及用它在进行复数滤波、信号综合及平行光学处理诸方面的若干研究成果。这种方法既消除了相干系统中不可避免的相干噪声,又保持了相干系统所具有的运算能力。值得指出的是,它还具有相干系统所不具有的独特优点,即由于光源本身的相当广阔范围的光谱分布,对多色信号及彩色图象的处理十分有利和相当有效。它为光学信息处理展示了一个新的具有良好前景的方向。

一、引 言

对相干光学信息处理系统已经进行了较充分的研究,但是成功的应用却并不太多,其中一个主要原因是由于不可避免的相干噪声,限制了它对信号的处理能力;另一方面,由于相干光的单色性,利用相干系统来处理多色信号,或者是不易实现,或者是变得十分复杂。而实际上,对多色信号的处理,却又愈来愈变得普遍和必要,所以白光信号处理系统开始引起人们的重视,并且已有了不少成功的研究。由我们的研究^[1~8]表明,相干光能进行处理的对象,在原则上用白光亦可以进行处理,而且还有不存在相干噪声、易于处理彩色信号、设备简单等优点。必须指出,以前对白光的这种能力,并没有多少认识,而是在相干处理系统的启发下,回过头来才发现,用白光也可做类似的工作。

我们所提出的白光信息处理技术与某些非相干信息处理^[4,5]有非常明显的不同。非相干信息处理基于采用单色光源(例如光谱灯),而用光学传递函数来表示系统的频率透过特性。描写光辐射场通过处理系统的基本物理量是光辐射强度的空间分布,这样就产生了两个基本的困难之处,即:(1)脉冲响应必定是非负的实数;(2)没有明显的频率空间,而依靠改变光瞳函数来改变系统的脉冲响应(它等于光瞳函数自相关的傅里叶变换)。所以在应用这种系统时,必须与较复杂的电子学系统配合作混合处理。而在我们的系统中采用具有连续分布光谱的白光光源或在足够广的光谱范围中有足够多谱线的光源。这是因为一方面采用微小的光源尺寸来提高其空间相干性;另一方面在输入平面上引入光栅来提高其时间相干性。此时,描写光辐射场的基本物理量是相互强度(或互相干函数)。当相干度足够高

收稿日期:1980年6月16日

* 杨振寰

** 现在 Pennsylvania State University 访问研究

时,系统的性质实际上接近于相干处理系统。它不但具有一个真正的空间频谱平面,而且由于光栅的衍射,在各种波长上都可以得到信号的空间频谱分布。这样,既消除了相干系统中不可避免的相干噪声,又保持了相干系统所具有的运算能力。特别是光源本身范围相当宽广的光谱分布,对多色信号及彩色图象的处理变得十分有利和相当有效,对某些特殊处理甚至可以说它提供了新的途径。

本文讨论了我们所研究的白光信息处理系统的基本概念,以及用它在进行复数滤波、信号综合、平行光学处理诸方面的若干研究成果。虽然白光信息处理还存在着能量损失较大等缺点,但从已得到的效果来看,毫无疑问,它已在光学信息处理的研究中,展示了一个新的、具有良好前景的方向。

二、白光信息处理系统

这一节首先研究我们所提出的白光处理系统的一般性质。系统的示意图如图1所示,其中 W_s 为白光点光源(或由辅助照明系统在该处形成的白光光源的象点), G_r 为光栅, L_1 为准直物镜, L_2 、 L_3 为消色差傅里叶变换物镜, (x, y) 、 (α, β) 分别为输入平面及频谱平面。为方便起见,输出平面坐标系统也以 (x, y) 表示(即假定系统具有单位放大率)。这个系统本质上是在部分相干光情况下进行工作,所以我们用部分相干理论^[6]中的相互强度函数来进行分析。这个函数描写了在标量波场中,复解析信号在空间任意两点间的关联性质。为了便于分析,我们把光源看成为无数多个沿 x_0 方向分布的点光源的合成,即

$$\gamma(x_0, y_0) = \left\{ \sum_{n=-N}^N \delta(x_0 - ns) \right\} \delta(y_0), \quad (1)$$

这里 (x_0, y_0) 是光源平面的坐标系统, s 是相邻两点光源的距离,所考虑的点光源个数为 $2N+1$ 个。显然,当 $s \rightarrow 0$ 及 $N \rightarrow \infty$ 时, $2Ns = l$, l 即为线光源的长度。

此时
$$\gamma(x_0, y_0) = \text{rect}\left(\frac{x_0}{2Ns}\right) \cdot \delta(y_0). \quad (2)$$

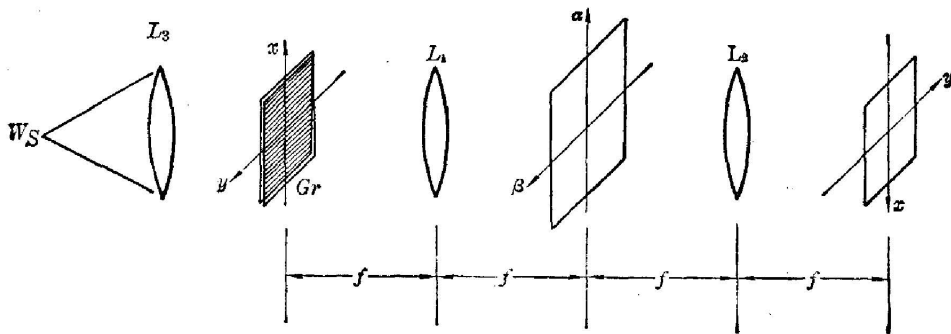


图1 白光信息处理系统

按照部分相干理论,我们可以得到透镜后焦面的相互强度函数是其前焦面相互强度函数的傅里叶变换。所以对某一个波长 λ ,上述照明条件在输入平面上引起的相互强度为

$$\begin{aligned}
 J(x_1, y_1, x_2, y_2; \lambda) &= \iint \gamma(x_0, y_0) \exp \left\{ -i \frac{2\pi}{\lambda f} [x_0(x_1 - x_2) - y_0(y_1 - y_2)] \right\} dx_0 dy_0 \\
 &= \sum_{n=-N}^N \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda f} ns(x_1 - x_2) \right], \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中 (x_1, y_1) 及 (x_2, y_2) 表示 (x, y) 平面上不同的两点。在这里, 我们略去了常数比例因子。

若在输入平面上的透射信号复振幅分布为 $t(x, y)$, 而在它前面紧贴着一个用来进行空间载波的一维衍射光栅, 光栅的角频率为 p_0 , 这样单色输入信号为

$$\begin{aligned}
 J'(x_1, y_1; x_2, y_2; \lambda) &= J(x_1, y_1; x_2, y_2; \lambda) t(x_1, y_1) t^*(x_2, y_2) \\
 &\quad \times (1 + \cos p_0 x_1) (1 + \cos p_0 x_2), \quad (4)
 \end{aligned}$$

这里符号“*”表示复数共轭, 而在频谱平面上的多色相互强度函数是

$$\begin{aligned}
 J(p_1, q_1; p_2, q_2) &= \iiint \iiint J'(x_1, y_1; x_2, y_2; \lambda) \exp \\
 &\quad \times \{ -i(x_1 p_1 + y_1 q_1 - x_2 p_2 - y_2 q_2) \} dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 d\lambda, \quad (5)
 \end{aligned}$$

这里 (p, q) 是规格化频谱面坐标, 它和实际坐标 (α, β) 有关: $p = [(2\pi)/(\lambda f)] \alpha$, $q = [(2\pi)/(\lambda f)] \beta$, 而 (p_1, q_1) 及 (p_2, q_2) 分别表示该平面上不同的两点。

为简便起见, 我们不妨只研究某一给定波长 λ 的情况, 这样

$$\begin{aligned}
 J(p_1, q_1; p_2, q_2; \lambda) &= \iiint \iiint J'(x_1, y_1; x_2, y_2; \lambda) \exp \\
 &\quad \times \{ -i(x_1 p_1 + y_1 q_1 - x_2 p_2 - y_2 q_2) \} dx_1 dy_1 dx_2 dy_2 \\
 &= \sum_n \iint t(x_1, y_1) (1 + \cos p_0 x_1) \exp \left\{ -i \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda f} ns + p_1 \right) x_1 + y_1 q_1 \right] \right\} dx_1 dy_1 \\
 &\quad \times \iint t^*(x_2, y_2) (1 + \cos p_0 x_2) \exp \left\{ i \left[\left(\frac{2\pi}{\lambda f} ns + p_2 \right) x_2 + y_2 q_2 \right] \right\} dx_2 dy_2 \\
 &= \sum_n \left[C_1 T \left(p_1 + \frac{2\pi}{\lambda f} ns, q_1 \right) + C_2 T \left(p_1 + \frac{2\pi}{\lambda f} ns - p_0, q_1 \right) \right. \\
 &\quad \left. + C_3 T \left(p_1 + \frac{2\pi}{\lambda f} ns + p_0, q_1 \right) \right] \left[C_1^* T^* \left(-p_2 - \frac{2\pi}{\lambda f} ns, q_2 \right) \right. \\
 &\quad \left. + C_2^* T^* \left(-p_2 - \frac{2\pi}{\lambda f} ns - p_0, q_2 \right) + C_3^* T^* \left(-p_2 - \frac{2\pi}{\lambda f} ns + p_0, q_2 \right) \right], \quad (6)
 \end{aligned}$$

其中 $T(p, q)$ 是 $t(x, y)$ 的傅里叶变换, 由上面的方程我们可以看到, 输入信号 $t(x, y)$ 的频谱沿着 p 轴被衍射到光轴及对光轴对称的两点 $p = \pm p_0$ 处的近旁, 而每一个谱项又是两种卷积的重迭。一种是因光源的线度 (ns) 形成的同一种波长时信号谱的卷积; 另一种是对不同波长傅里叶谱所形成的彩虹。当光源的线度足够小, 即当 $ns \ll p_0$ 时, 由(6)式, 在傅里叶平面上的强度分布(即当 $p_1 = p_2 = p$, $q_1 = q_2 = q$ 时的相互强度)退化成为

$$\begin{aligned}
 I(p, q) &= [C_1 T(p, q) + C_2 T(p - p_0, q) + C_3 T(p + p_0, q)] \\
 &\quad \times [C_1^* T^*(p, q) + C_2^* T^*(p - p_0, q) + C_3^* T^*(p + p_0, q)]^*, \quad (7)
 \end{aligned}$$

即其复振幅分布为:

$$E(p, q; \lambda) = C_1 T(p, q) + C_2 T(p - p_0, q) + C_3 T(p + p_0, q). \quad (8)$$

在频谱面上总的光辐射强度的空间分布为

$$I(p, q) = \int I(p, q; \lambda) d\lambda. \quad (9)$$

另一方面, 如果输入信号的空间频率带宽为 Δp , 则由此所引起的波长重迭范围近似为^[4]

$$\Delta\lambda \sim \frac{4\Delta p}{p_0} \lambda_n, \quad (10)$$

其中 λ_n 是中心波长, 所以当 $p_0 \gg \Delta p$ 时可以使波长的重迭范围相当地小。

由(8)式可以看到, 由于在输入平面上引入了衍射光栅, 一方面可以在频谱面上得到时间相干性增加后的信号, 另一方面把同一信号的谱运载到空间不同的位置上去, 这样就大大地增强了我们的系统在傅里叶平面上对信号进行处理的能力及灵活性。

三、复数空间滤波

当采用足够小尺寸的光源及长焦距的准直照明系统, 可以在输入平面上获得有相当高的空间相干性的光辐射场。在极限情形下, 当 $ns \rightarrow 0$ 时, 得到频谱面上的单色光复振幅分布, 如(8)式所示。如果在离轴项处, 置以适当的滤波器, 就可以实现各种复数空间滤波, 如对比反转、信号检测、模糊象的复元等等。

1. 对比反转

将一个 π 位相滤波器覆盖在空间频谱分布的直流成分上, 就可以使输入信号的对比反转。在我们的白光处理系统中同样可以实现这种运算。为了清楚地看到对比反转的效果, 我们以 Ranchi 光栅作为物体, 经过调制光栅的衍射后[如(8)式所示], 在频谱面上得到与光轴对称的两个 Ranchi 光栅的谱分布, 并且按波长的不同形成彩虹状分布。若在一个级次上置以绿色滤色片, 并在相应的直流部分置以 π 位相滤波器, 而在另一级次上置以红色滤色片(如图 2 所示), 则通过正级次的信号就发生对比反转。这样在输出平面上就得到了红、绿相间的 Ranchi 光栅象(如图 3)(见插页彩图)。虽然对比反转是一个较简单的实验, 但它说明了在我们的白光处理系统中可以进行复数运算。在下一节我们还将看到由这个方法还可以得到很好的实际应用。

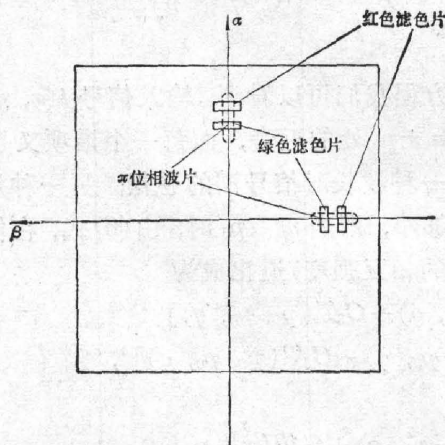


图 2 对比反转实验的频谱面

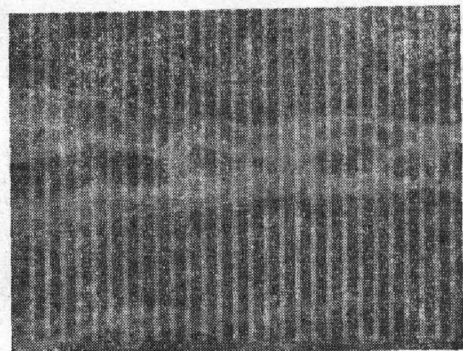


图 3 红绿相间的 Ranchi 光栅

2. 复解析信号的相关检测

在分析复滤波的问题中, 我们可以假定一系列随 λ_n 而变的复空间滤波器的振幅透过率为

$$H(p_n, q_n) = k_1 + k_2 + k |T(p_n, q_n) \cos[\beta_0 q_n + \phi(p_n, q_n)]| \quad (n=1, 2 \dots N), \quad (11)$$

其中 $p_n = \frac{2\pi}{\lambda_n f} \alpha$, $q_n = \frac{2\pi}{\lambda_n f} \beta$, β_0 是在 q_n 方向上的空间频率, k_1, k_2, k 是有关的常数。如果将上述空间滤波器放在某一个衍射级上, 则在频谱面上的复振幅分布是

$$E(p, q; \lambda) = T(p - p_0, q) \cdot \sum_{n=1}^N H(p_n - p_0, q_n). \quad (12)$$

在输出平面上的强度分布为

$$I'(x, y) = \int \left| \int \int T(p - p_0, q) \sum_{n=1}^N H(p_n - p_0, q_n) \exp[i(px + qy)] dp dq \right|^2 d\lambda. \quad (13)$$

如果载波空间频率 p_0 足够高, 而每一个 $H(p_n, q_n)$ 所占的波长范围足够小的话, 则对波长的积分可近似地用求和表示。另一方面, 由于不同波长之间是非相干的, 所以在(13)式中所有的交叉项都不应存在, 这样(13)式成为

$$\begin{aligned} I'(x, y) &= \sum_{n=1}^N \Delta\lambda_n \left| \int \int T(p - p_0, q) H(p_n - p_0, q_n) \exp[i(px + qy)] dp dq \right|^2 \\ &= \sum_{n=1}^N \Delta\lambda_n |t_n(x, y) \exp(ip_0 x) + t_n(x, y) \exp(ip_0 x) \otimes t_n(x, y) \exp(ip_0 x) \\ &\quad \otimes t_n^*(x, y) \exp(ip_0 x) + t_n(x, y) \exp(ip_0 x) \otimes t_n(x, y + \beta_0) \exp(ip_0 x) \\ &\quad + t_n(x, y) \exp(ip_0 x) \otimes t_n^*(-x, -y + \beta_0) \exp(ip_0 x)|^2, \end{aligned} \quad (14)$$

其中符号 \otimes 表示卷积运算。在上述方程中, 前两项是零级项, 它在光轴近旁, 而第三及第四项分别是卷积项及相关项, 它们分别被衍射到 $(0, -\beta_0)$ 及 $(0, \beta_0)$ 的近旁。这样就可以实现信号的相关检测。

3. 模糊图象的复原

这是一个在相干光学信息处理中的相当重要的应用。下面我们可以看到, 利用非相干光同样可以得到复原的图象。为了便于分析, 假定象模糊的原因是由于物体的线性运动所致。我们可以用若干种方法合成逆滤波器^[7, 8], 其振幅透过率为

$$H(q) = A(q)B(q) = \frac{1}{2} A(q) + \frac{1}{4} [F(q) \exp(i\beta_0 q) + F^*(q) \exp(-i\beta_0 q)], \quad (15)$$

这里 $A(q)$ 是如图 4 所示的振幅滤波器, β_0 是适当选择的常数, 而

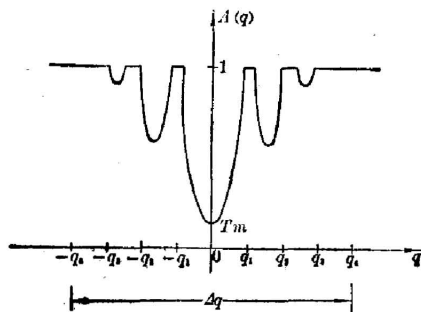


图 4 振幅滤波器

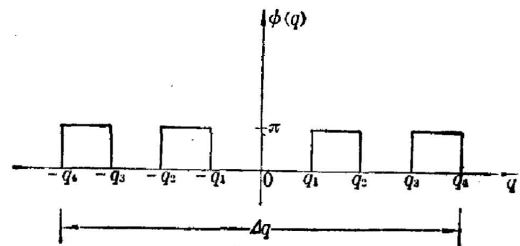


图 5 位相滤波器

$$B(q) = \frac{1}{2} \{1 + \cos[\phi(q) + \beta_0 q]\}, \quad (16)$$

这里 $\phi(q)$ 是位相滤波器(图 5), $F(q) = A(q) \exp[i\phi(q)]$ 是复去模糊函数。

该逆滤波器放在频谱面上的某一个离轴的衍射级次上。如果将模糊图象放在输入平面上, 其线性运动所引起的模糊长度为 Δy , 线扩散函数为 $D(q) = \Delta y \sin(q\Delta y/2) / (q\Delta y/2)$, 则通过滤波器时的光场分布为

$$E(p, q) = \int E(p, q; \lambda) d\lambda \simeq \frac{1}{2} \Delta\lambda T(p - p_0, q) A(q) + \frac{1}{4} \Delta\lambda [T(p - p_0, q) H(q) \exp(i\beta_0 q) + T(p - p_0, q) H^*(q) \exp(-i\beta_0 q)]. \quad (17)$$

由分析可以知道^[3], 当中心波长为 6000 \AA , 半宽 $\Delta\lambda/2$ 小于 300 \AA 时, 上述近似并不引起很大的误差。 $T(p, q)$ 是模糊图象 $t(x, y)$ 的谱。以 $t'(x, y)$ 表示复原后象的振幅分布, 它与 $t(x, y)$ 的谱有关系:

$$t'(x, y) = \iint T(p, q) H(q) \exp[-i(px + qy)] dp dq. \quad (18)$$

由 $E(p, q)$ 的傅里叶变换就得到输出平面上的复振幅分布。在这里, 我们记为 $f(x, y)$ 。考虑到(18)式, 可以得到

$$f(x, y) = \frac{1}{2} \Delta\lambda \left\{ t(x, y) \exp(ip_0 x) \otimes a(y) + \frac{1}{4} \exp(ip_0 x) [t'(x, y + \beta_0) + t'(x, y - \beta_0)] \right\}, \quad (19)$$

式中 $a(y)$ 是 $A(q)$ 的傅里叶变换。由(19)式可见, 在沿 y 轴的 $\pm\beta_0$ 处可以得到两个复原后的象。实验表明, 用非相干光得到的复原象明显地消除了噪音^[22]。

四、光学信号的综合

对光学象的加工, 综合是光学信息处理中的一个相当重要的方面, 在这一节, 我们将给出利用白光处理系统所得到的两个很有兴趣的方面。

1. 黑白图象的假彩色化

普通人类视觉所能同时分辨的灰度最多不过 15 到 20 个层次(级), 而且对光度差异的记忆力更是有限^[9], 然而人类对彩色的辨认能力却是敏锐的, 甚至可以辨认出数以千计的不同颜色。将图象假彩色化就是以不同的颜色加诸不同灰度或空间频率的一种技术, 目前在遥感及治疗图象等的判读中有相当重要的作用。虽然已经有若干种方法^[10~12] 用来实现这个目的, 但有的因使用全息方法而存在相干噪声, 有的因使用半色调屏而使象的分辨率降低, 并且都不易做到实时处理。我们用白光处理系统克服了上述诸项缺点^[13, 14]。

(i) 等密度编码假彩色

在白光处理系统的频谱面上选择两个相互垂直的衍射级次, 在不同的衍射级上各选择两个窄的不同的波长范围让其通过(例如红色及绿色), 而在一种波长物谱的直流成分上放置一个 π 位相滤波器(如图 2 所示), 这样通过傅里叶平面的光辐射场的复振幅分布为

$$E(p, q) = T_r(p - p_0, q) + T_r(p, q - q_0) + T_g(p - p_0, q)H(q) + T_g(p, q - q_0)H(q), \quad (20)$$

其中 T_r 及 T_g 为所选择的色信号谱, 且

$$H(q) = \begin{cases} -1, & 0_- < q < 0_+ \\ 1, & \text{其余} \end{cases} \quad \text{及} \quad H(p) = \begin{cases} -1, & 0_- < p < 0_+, \\ 1, & \text{其余} \end{cases}. \quad (21)$$

由 $E(p, q)$ 的傅里叶变换得到输出平面的复振幅分布为

$$\begin{aligned} t'(x, y) &= \iiint [T_r(p - p_0, q) + T_r(p, q - q_0)] \exp[i(px + qy)] dx dy d\lambda \\ &\quad + \iiint [T_g(p - p_0, q)H(q) + T_g(p, q - q_0)H(p)] \exp[i(px + qy)] dx dy d\lambda \\ &\cong \Delta\lambda_r [\exp(ip_0x) + \exp(iq_0y)] t_r(x, y) + \Delta\lambda_g [\exp(ip_0x) + \exp(iq_0y)] t_{gn}(x, y), \end{aligned} \quad (22)$$

其中 $t_{gn}(x, y)$ 是对比反转后的象, 如果以 $\langle t_g(x, y) \rangle$ 表示象的平均亮度, 则

$$t_{gn}(x, y) = t_g(x, y) - 2\langle t_g(x, y) \rangle. \quad (23)$$

由于两种波长之间的非相干性质, 在输出平面上的强度分布为

$$I(x, y) = (\Delta\lambda_r)^2 I_r(x, y) + (\Delta\lambda_g)^2 I_{gn}(x, y). \quad (24)$$

从这里我们可以看到正象是一种颜色, 负象是另一种颜色, 两者迭加的结果就形成了等密度编码的假彩色象。图 6 (见插页彩图) 是用这种方法对 X 线照片假彩色化的结果, 红色向绿色过渡表示密度由大到小的变化。

(ii) 等空间频率编码假彩色

类似于在等密度编码时的方法, 在频谱面上加上适当的空间滤波器, 可以实现等频率编码假彩色。所不同的是在某一种颜色时让物谱的低频通过, 而对另一种颜色则让高频通过 (图 7), 这样

$$\begin{aligned} E(p, q) &= T_r(p - p_0, q)H_1(q) \\ &\quad + T_r(p, q - q_0)H_1(p) \\ &\quad + T_b(p + p_0, q)H_2(q) \\ &\quad + T_b(p, q + q_0)H_2(p), \end{aligned} \quad (25)$$

式中 H_1 及 H_2 分别是一维的高通及低通滤波器。在输出平面上就得到

$$\begin{aligned} t'(x, y) &= \iiint E(p, q) \exp[i(px + qy)] dp dq d\lambda \\ &\cong \Delta\lambda_r [\exp(ip_0x)T_r(x, y) \otimes h_1(y) + \exp(iq_0y)T_r(x, y) \otimes h_1(x)] \\ &\quad + \Delta\lambda_b [\exp(-ip_0x)T_b(x, y) \otimes h_2(y) \\ &\quad + \exp(-iq_0y)T_b(x, y) \otimes h_2(x)], \end{aligned} \quad (26)$$

其中 h_1, h_2 分别是 H_1 及 H_2 的傅里叶变换, 这样就得到了按空间频率编码的假彩色输出。图 8 (见插页彩图) 是一个假彩色的用侧视雷达所拍摄的地形图, 在这里, 我们让高频为红色, 低频为蓝色。事实上, 我们还可以采用各种带通滤波器让不同的颜色通过, 以便得到色彩更为丰富的假彩色图象。

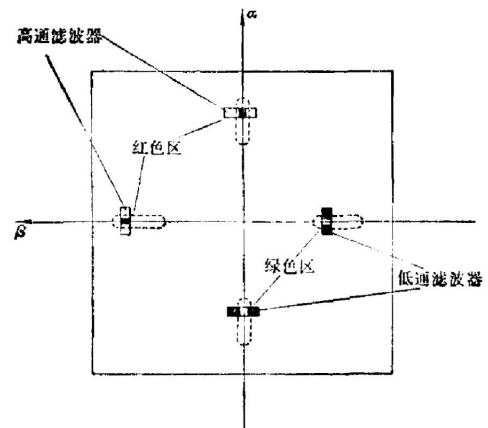


图 7 等空间频率编码假彩色

2. 图象的相加及相减

在应用上, 常常希望将两张图象进行加或减的运算, 来实现比较、信号探测等等。在白光信息处理系统中, 可以将待处理的信号 t_1 及 t_2 放在输入平面上, 并使它们相距为 $2\beta_0$, 即是 $t_1(x, y - \beta_0)$ 及 $t_2(x, y + \beta_0)$ 。对给定的波长 λ , 在频谱面上就得到如下的光复振幅分布

$$\begin{aligned} E(p, q; \lambda) = & T_1(p, q) \exp(-i\beta_0 q) + T_2(p, q) \exp(i\beta_0 q) \\ & + T_1(p - p_0, q) \exp(-i\beta_0 q) + T_2(p - p_0, q) \exp(i\beta_0 q) \\ & + T_1(p + p_0, q) \exp(-i\beta_0 q) + T_2(p + p_0, q) \exp(i\beta_0 q)。 \end{aligned} \quad (27)$$

在 $p = p_0$ 的衍射级上, 我们引入一个角频率为 β_0 的衍射光栅, 其方位角与 q 轴垂直, 即

$$H(q) = 1 + \cos \beta_0 q。 \quad (28)$$

这样在一个窄的波长范围 $\Delta\lambda$ 中, 通过频谱面的复振幅分布为

$$\begin{aligned} E(p, q) \simeq & \Delta\lambda [T_1(p - p_0, q) \exp(-i\beta_0 q) + T_2(p - p_0, q) \exp(i\beta_0 q)] H(q) \\ = & \Delta\lambda \left\{ T_1(p - p_0, q) \exp(-i\beta_0 q) + T_2(p - p_0, q) \exp(i\beta_0 q) \right. \\ & + \frac{1}{2} \left[T_1(p - p_0, q) \exp(-i2\beta_0 q) + T_1(p - p_0, q) + T_2(p - p_0, q) \right. \\ & \left. \left. + T_2(p - p_0, q) \exp(i2\beta_0 q) \right] \right\}。 \end{aligned} \quad (29)$$

在输出平面上得到

$$\begin{aligned} t'(x, y) = & \Delta\lambda \left\{ t_1(x, y - \beta_0) + t_2(x, y + \beta_0) + \frac{1}{2} \left[t_1(x, y - 2\beta_0) \right. \right. \\ & \left. \left. + t_1(x, y) + t_2(x, y) + t_2(x, y + 2\beta_0) \right] \right\} \exp(ip_0 x)。 \end{aligned} \quad (30)$$

上式表示在光轴中心得到了两个图象相加后的输出。同样, 如果让频谱面上的光栅移动四分之一周期, 即

$$H(q) = 1 + \sin \beta_0 q, \quad (31)$$

则

$$\begin{aligned} t'(x, y) = & \Delta\lambda \left\{ t_1(x, y - \beta_0) + t_2(x, y + \beta_0) + \frac{1}{2} \left[t_1(x, y - 2\beta_0) \right. \right. \\ & \left. \left. + t_1(x, y) - t_2(x, y) + t_2(x, y + 2\beta_0) \right] \right\} \exp(ip_0 x)。 \end{aligned} \quad (32)$$

这样就得到了两个图象相减后的输出。

五、光学信息的平行处理

在我们的白光处理系统中, 如果采用多重 (N 重) 光栅调制, 则在频谱面上可以进行多通道的空间滤波, 这样就使通常的相干处理系统的处理能力提高了 $2N$ 倍。另一方面, 由于采用了白光系统, 其平行处理信息的能力也比单色光平行处理系统来得强。

1. 多重象的解卷积^[15]

多重象的意思是在输出平面上能得到按一定要求的方式排列的、多个输入信号的再现。这在不少的实际问题中(如集成电路掩模板的制造)都会有重要的应用。

在(8)式中的某一个衍射级上引入一系列正弦光栅(如图9所示), 即

$$H_n(q_n) = \frac{1}{2} [1 + \cos(\beta_n q_n)] \quad (n=1, 2, \dots, N), \quad (33)$$

这里 $q_n = \frac{\lambda_n f}{2\pi} q$, β_n 是按一定要求选择的空频率, 若每一个频率为 β_n 的光栅所占据的波长范围 $\Delta\lambda_n$ 足够地小, 则通过光栅后光辐场分布为

$$E(p, q) \simeq \sum_{n=1}^N \frac{\Delta\lambda_n}{2} \left[T(p_n - p_0, q_n) + \frac{1}{2} T(p_n - p_0, q_n) \exp(-i\beta_n q_n) + \frac{1}{2} T(p_n - p_0, q_n) \exp(i\beta_n q_n) \right]. \quad (34)$$

在输出平面上就可以得到

$$t'(x, y) = \sum_{n=1}^N \frac{\Delta\lambda_n}{2} \left[t_n(x, y) + \frac{1}{2} t_n(x, y + \beta_n) \exp(ip_0 x) + \frac{1}{2} t_n(x, y - \beta_n) \exp(ip_0 x) \right], \quad (35)$$

其中 $t_n(x, y)$ 表示输入信号 $t(x, y)$ 的第 n 次再现。由于不同波长的辐射是非相干的, 所以得到输出强度分布为

$$I(x, y) = \sum_{n=1}^N \left(\frac{\Delta\lambda_n}{2} \right)^2 \left[t_n^2(x, y) + \frac{1}{4} t_n^2(x, y + \beta_n) + \frac{1}{4} t_n^2(x, y - \beta_n) \right]. \quad (36)$$

如果令 $\beta_n = 2nq_0$ (q_0 是最小的光栅频率) 及 $\beta_1 \geq 2\Delta y$ (Δy 是象的最大尺寸), 则上述方程表示可以在沿 y 轴方向得到一系列间隔相等且不重叠的重复的象。图 10 是我们的一个简单的实验结果。必须指出, 如果在输入平面上使用两个以上的调制光栅, 并在频谱面上使用更多的衍射级次, 经过适当的安排, 很容易在输出平面上得到二维的多重象的再现。

2. 彩色图象的多重编码及再现

彩色图象的保存, 长期以来一直没有得到解决, 其主要原因是由于染料的褪色。虽然用傅里叶全息方法^[16]及一步彩虹全息^[17]进行了彩色保存的研究, 但相干噪声总不能完全避免。最近, 我们利用白光平行处理系统在彩色保存方面已得到了较好的效果^[18]。

我们首先将彩色图象在黑白底片上进行空间彩色编码, 如图 11 (见插页彩图) 所示, 即利用三个基色滤色片将被处理图象与密度型光栅一起, 依次记录在黑白底片上。对于不同的基色, 光栅具有不同的方位角。例如第一次曝光用红色, 光栅方位角为零度; 第二及第三次曝光分别用蓝色及绿色滤色片, 而对应的光栅方位角分别为 60° 及 120° 。这样, 我们就得到了多色空间调制的黑白透射物, 相应的强度透过率为

$$I_n(x, y) = k_1 \{ t_r(x, y) [1 + \operatorname{sgn}(\cos p_0 x)] + t_b(x, y) [1 + \operatorname{sgn}(\cos p_0 x')] + t_g(x, y) [1 + \operatorname{sgn}(\cos p_0 x'')] \}^{-\gamma n}, \quad (37)$$

其中

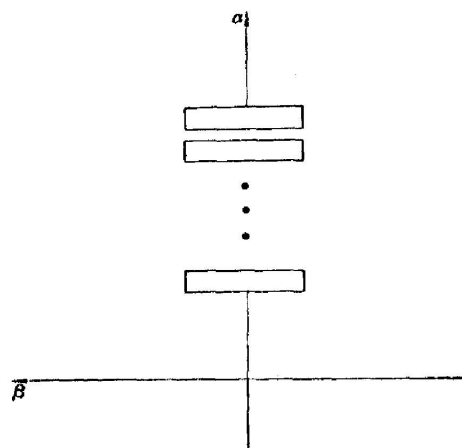


图 9 不同频带的多重象解卷积滤波器

$$\text{sgn}(\cos p_0 x) \triangleq \begin{cases} 1 & \cos(p_0 x) \geq 0, \\ -1 & \cos(p_0 x) < 0, \end{cases} \quad (38)$$

t_r 、 t_b 、及 t_g 是相应的记录在底片上的、红、蓝、绿的象的强度，而 (x, y) 、 (x', y') 及 (x'', y'') 是相对于 0° 、 60° 及 120° 光栅位置的坐标系。 γ_{n1} 是底片的伽玛值， k_1 是比例常数。用接触曝光处理可以得到适用于光学处理的正片。这样，空间编码后的正片的透射率为

$$I_p(x, y) = k_2 \{ t_r(x, y) [1 + \text{sgn}(\cos p_0 x)] + t_b(x, y) [1 + \text{sgn}(\cos p_0 x')] + t_g(x'', y'') [1 + \text{sgn}(\cos p_0 x'')] \}^{\gamma_{n1} \gamma_{n2}}, \quad (39)$$

这里 k_2 为比例常数， γ_{n2} 是第二张底片的伽玛值，如果让 $\gamma_{n1} \gamma_{n2} = 2$ ，则相应的振幅透过率为

$$t_p(x, y) = k_2 \{ t_r(x, y) [1 + \text{sgn}(\cos p_0 x)] + t_b(x', y') [1 + \text{sgn}(\cos p_0 x')] + t_g(x'', y'') [1 + \text{sgn}(\cos p_0 x'')] \}, \quad (40)$$

即 $t_p(x, y)$ 是 t_r 、 t_b 及 t_g 的线性函数。

在频谱面上可以得到

$$E(p, q; \lambda) = T_r(p, q) + T_b(p', q') + T_g(p'', q'') + \frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} a_n [T_r(p \pm n p_0, q) + T_b(p' \pm p_0, q') + T_g(p'' \pm p_0, q'')], \quad (41)$$

这里 (p, q) 、 (p', q') 及 (p'', q'') 是垂直于三个光栅方位角的频率域坐标系统。在空间解码过程中，我们在三个一级衍射谱上分别放置红、蓝、绿三种滤色片。这样，滤波后的光场分布可以写成

$$E(p, q) = T_r(p - p_0, q) + T_b(p' - p_0, q') + T_g(p'' - p_0, q''). \quad (42)$$

我们立刻可以得到输出平面上的复振幅分布为

$$t'(x, y) = t_r(x, y) e^{i x p_0} + t_b(x, y) e^{i x p_0} + t_g(x, y) e^{i x p_0}. \quad (43)$$

由于三种颜色相互不相干，所以输出强度分布为

$$I(x, y) = t_r^2(x, y) + t_b^2(x, y) + t_g^2(x, y). \quad (44)$$

这样，我们就得到了解码以后的彩色象。在理论上，它可以使编码信息得到真实的复原，而且并不损失分辨率。图 11 及图 12 (见插图彩图) 分别是原始的彩色象及解码以后所得到的象。可以看到，虽然我们的系统并不是专门设计的，但解码后的彩色象已经有了较好的效果。还必须指出，由于在频谱面上能分别对三基色的谱项进行强度的增减以及可以在编码时适当调整三基色曝光量的比例，从而可以改变原来已褪色图象的彩色特性，即通过白光处理系统可以在一定程度上改善褪色图象的色度进行彩色增强。



图 10 由白光处理系统得到的多重象

3. 多特征识别^[19]

如果我们在输入平面上引入 N 重方位不同的光栅(为简单起见，我们假定它们具有相同的空间频率)，则输入平面上的复振幅分布为

$$\bar{t}(x, y) = t(x, y) \left[1 + \frac{1}{n} \sum_{n=1}^N \cos p_0 x_n \right], \quad (45)$$

其中 x_n 表示相应于第 n 个光栅的坐标。类似于三重光栅的情况, 在频谱面上

$$E(p, q) = T(p, q) + \frac{1}{2n} \sum_{n=1}^N T(p_n \pm p_0, q_n), \quad (46)$$

式中 $p_n = \frac{2\pi}{\lambda f} \alpha_n$, $q_n = \frac{2\pi}{\lambda f} \beta_n$, 而 (α_n, β_n) 是相应垂直于第 n 个光栅的坐标系统。(46)式说明在频率域上, 我们得到了 $2N$ 个 $t(x, y)$ 的相同的信息。这样就允许同时对它进行各种处理。如果该输入信号有 m 个特征 ($m < 2N$), 则我们可以在频谱面上的 m 个衍射级次上相对于这 m 个特征, 依次放置复空间滤波器, 这样就实现了信号的多特征识别。

还必须指出, 用 N 重光栅调制, 会导致在频谱面上信号的每一个频谱分布的能量很小, 这或许会给空间滤波处理带来困难。但是如果 N 并不太大, 并且用衍射效率较高的特殊明胶来制造光栅^[20], 则可以使这个方法实用化。

六、结 论

我们所提出的白光信息处理系统既消除了相干处理系统中不可避免的相干噪声, 又保持了相干系统所具有的运算能力。特别是光源本身的相当广阔范围的光谱分布, 对多色信号及彩色图象的处理十分有利和相当有效^[21], 我们已经利用这种白光处理系统在复数滤波、信号综合、平行光学处理诸方面得到了若干实际的成果。虽然这种方法还存在某些不足之处, 但从已得到的效果来看, 它已在光学信息处理领域中展示了一个新的、具有良好前景的方向。

参 考 文 献

- [1] F. T. S. Yu; *Opt. Commun.*, 1978, **27**, No. 1 (Oct), 23.
- [2] F. T. S. Yu; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 22 (15 Nov), 3571.
- [3] F. T. S. Yu, A. Tai; *Appl. Opt.*, 1979, **18**, No. 15 (1 Aug), 2705.
- [4] A. W. Lohmann, W. T. Rhodes; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 7 (1 Aug), 1141.
- [5] W. Stoner; *Appl. Opt.*, 1978, **17**, No. 16 (15 Aug), 2454.
- [6] M. Born, E. Wolf; "*Principles of Optics*" 4th ed., Pergaman Press
- [7] G. W. Stroke, R. G. Zech; *Phys. Lett. (A)*, 1967, **25A**, No. 2 (31 Jul), 89.
- [8] R. M. Vasu, G. L. Rogers; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 3 (1 Feb), 469.
- [9] J. J. Sheppard; *Arch. Amer. Acad. Optometer.*, 1969 **46**, 735.
- [10] H. K. Liu, J. W. Goodman; *Nouv. Rev. Opt.*, 1976, **7**, No. 5 (Sep-Oct), 285.
- [11] A. Tai, F. T. S. Yu *et al.*; *Opt. Lett.*, 1978, **3**, No. 5 (Nov), 190.
- [12] J. Santamaria, M. Gea *et al.*; *J. Opt.*, 1979, **10**, No. 3 (May-Jun), 151.
- [13] T. H. Chao, S. L. Zhuang *et al.*; *Opt. Lett.*, 1980, **5**, No.6 (Jun), 230.
- [14] F. T. S. Yu, S. L. Zhuang *et al.*; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 17 (Sep), 2986.
- [15] F. T. S. Yu, S. L. Zhuang *et al.*; *Opt. Commun.*, 1980, **34**, No.1 (Jul), 11.
- [16] C. S. Ih; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, No. 2 (Feb), 438.
- [17] F. T. S. Yu, A. Tai *et al.*; *Opt. Commun.*, 1978, **27**, No. 3 (Dec), 307.
- [18] F. T. S. Yu; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 14 (15 Jul), 2457.
- [19] F. T. S. Yu, M. S. Dymek 已寄往 *Appl. Opt.*,
- [20] S. K. Case, R. Alferness; *Appl. Phys.*, 1976, **10**, No. 1 (May), 41.
- [21] F. T. S. Yu, T. H. Chao *et al.*; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 12 (15 Jun), 1837.
- [22] S. L. Zhuang, T. H. Chao and F. T. S. Yu; *Opt. Lett.*, (即将发表)。

Recent advancement in white light optical information processing

F. T. S. Yu

(Electrical Engineering Department, Pennsylvania State University)

ZHUANG SONGLIN

(Shanghai Institute of Optical Instruments)

MU GUOQUANG

(Department of Physics, Nankai University, Tianjin)

(Received 16 June 1980)

Abstract

We will describe a technique of white light optical information processing with diffraction grating method and some of their applications. This white light technique enables the signal processing to be carried out in complex amplitude rather than in intensity. The basic advantage of this white light processing technique is the elimination of the coherent artifact noise that frequently plagues the coherent optical system. We note that this white light processing technique is capable of processing many complex signals that a coherent processor may offer. The application may range from complex signal addition, subtraction, to complicated optical parallel processing. Because of the use of spectral broadband light source, this technique is very suitable for color-image processing, enhancement, and restoration. Experimental demonstrations of this white-light processing technique as applied to archival storage of color films, multi-image regeneration, spatial frequency and density pseudocolor encoding, smeared image restoration, etc. will be included.