

Correlador transformada conjunta aberrado: muestra centrada y objeto centrado o no

S. A. Comastri

Laboratorio de Optica, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria,
Buenos Aires, Argentina

Abstract

A joint transform correlator such that the optical system of the first step (CTC1) has primary aberrations and that of the second step (CTC2) is free from aberrations is considered. The CTC1 consists in a structure (target and scene) placed between two centred optical systems: A (converging) and B (diverging and optionally used to obtain teleobjective effects and compensate aberrations). The target is a fringe of unit transmittance centred at the upper display with a height equal to one third of that of the display and the scene is a similar fringe at the lower display and can be centred or not. For zero aberration at the upper display and for a certain primary aberration at the lower one, the displacement of the object introduces other aberrations. Plots of the correlation signal, obtained numerically, for the cases in which the difference between the wavefront aberrations in the scene and target is equal to and greater than the Rayleigh limit are shown.

Resumen

Se considera un correlador de transformada conjunta tal que el sistema óptico de la primera etapa (CTC1) tiene aberraciones primarias y el de la segunda etapa (CTC2) es libre de aberraciones. El CTC1 está compuesto por una estructura (objeto y muestra) ubicada entre dos sistemas ópticos centrados: A (convergente) y B (divergente y opcionalmente usado para obtener efectos de teleobjetivo y compensar aberraciones). La muestra es una franja de transmitancia unitaria centrada en el display superior con una altura igual a un tercio de la de dicho display y el objeto es una franja similar en el display inferior y puede estar centrada o desplazada. Para aberración nula en el display superior y para una dada aberración primaria en el inferior se obtiene que el desplazamiento del objeto introduce otras aberraciones. Se muestran los gráficos de la señal de correlación obtenidos numéricamente para los casos en que la diferencia de aberraciones entre objeto y muestra sean iguales y superiores al límite de Rayleigh.

I. INTRODUCCIÓN

El correlador de transformada conjunta (CTC) [1] es un procesador óptico que realiza la correlación entre dos patrones en dos etapas y puede utilizarse, por ejemplo, en biología, geología, industria y comercio para reconocer patrones o ubicar un objeto en escenas de muchos objetos. La detección de un patrón determinado se realiza verificando a la salida la presencia de un pico de correlación característico y las aberraciones presentes en el sistema óptico alteran la ubicación y/o altura de este pico.

En un trabajo previo [2] se diseñó un CTC compacto compensando las aberraciones del CTC1 hasta que fueran inferiores al límite de Rayleigh. En otro trabajo [3] se extendieron los criterios de Rayleigh y Marechal [4] al CTC y se desarrolló un método numérico para obtener la señal de correlación calculando numéricamente las transformadas y antitransformadas de Fourier [5] [6].

En el presente trabajo se analiza como se deterioran las señales a la salida del CTC1 y del CTC2 en presencia de aberraciones primarias en el CTC1 (consideradas una por vez) pero no se optimiza el correlador. Dada la complejidad del problema de expresar estas señales de modo exacto, se usan expresiones aproximadas [3] ya que en el

CTC1 se le asigna la misma aberración a todas las frecuencias espaciales presentes y el CTC2 se supone libre de aberraciones. Se estudia el caso en que la muestra y el objeto son franjas de transmitancia unitaria y altura igual a un tercio de la de los displays, la franja muestra está centrada en el display superior y la objeto está centrada o desplazada en el display inferior. Se halla analíticamente cuales son las aberraciones introducidas al desplazar la franja, se corrobora numéricamente este resultado y se ve como se deteriora la señal de correlación.

II. EXPRESIONES PARA LAS SEÑALES A LA SALIDA DEL CTC ABERRADO

II.1 Primera etapa del correlador (CTC1)

En el CTC1 la estructura (objeto y muestra) se coloca entre los sistemas ópticos A y B (ver Fig.1). Cada frecuencia espacial presente en la estructura es tal que

$$f_x = \frac{\xi'}{\lambda M D} \quad f_y = \frac{\eta'}{\lambda M D} \quad (1)$$

donde M es el aumento lateral de B, λ la longitud de onda y (ξ', η') las coordenadas a la salida del CTC1. Las coordenadas en la estructura (el subíndice i corresponde al display inferior y el s al superior) verifican [3]

$$\tilde{X}_i = x_1 + h_i \quad \tilde{X}_s = x_1 - h_s \quad \tilde{Y}_i = \tilde{Y}_s = y_1 \quad (2) \quad \text{III. CONDICIONES Y CONSIDERACIONES}$$

En el CTC1, para el *display inferior* (análogamente el superior) se tiene que si el sistema es libre de aberraciones, la *transmitancia* es $t_{i0}(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i)$ y si es aberrado, la función aberración del frente de ondas depende de la frecuencia espacial. Asignamos a todas las frecuencias la aberración que corresponde a la frecuencia $(f_{x,c}, f_{y,c})$ que da la máxima diferencia entre las aberraciones en ambos displays [3]. Luego la función aberración que consideramos es independiente de la frecuencia y la llamamos $W_i(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i)$. Hacemos consideraciones análogas para el *display superior* y, usando la ec.(2), la *transmitancia total estimada*, $\bar{t}(x_1, y_1)$, es:

$$\bar{t}(x_1, y_1) = \bar{t}_i(x_1 + h_i, y_1) + \bar{t}_s(x_1 - h_s, y_1) \quad (3)$$

Definimos, para el *display inferior* (análogamente el superior), la transformada de Fourier [5]

$$\bar{T}(f_x, f_y) = \mathcal{F}\{\bar{t}_i(x_1, y_1)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{t}_i(x_1, y_1) e^{-j2\pi(f_x x_1 + f_y y_1)} dx_1 dy_1 \quad (4)$$

A la salida del CTC1 la *distribución de campo total estimada* es $\bar{U}_1(\xi', \eta') = G_1 \mathcal{F}\{\bar{t}(x_1, y_1)\}$ y la *intensidad luminosa estimada* es $\bar{I}_1(\xi', \eta') = |\bar{U}_1(\xi', \eta')|^2$.

En el plano (ξ', η') se coloca un ccd que registra intensidad y esta información se transfiere como transmitancia a un tercer display entonces se tiene

$$\bar{T}(\xi', \eta') = G_3 \bar{I}_1(\xi', \eta') \quad (5)$$

donde G_k ($k = 1, 2, 3, 4$) son constantes.

II.2 Segunda etapa del correlador (CTC2)

En el CTC2 (ver Fig.2) se tiene que la distribución de campo en el plano de correlación es la transformada de Fourier de $\bar{T}(\xi', \eta')$ que es la transmitancia del display \mathcal{D} . Considerar esta transformada y coordenadas x'_1, y'_1 equivale a considerar la transformada inversa y coordenadas x''_1, y''_1 tales que $x''_1 = -x'_1, y''_1 = -y'_1$ [3]. Entonces la *perturbación estimada* \bar{U}_2 a la salida del CTC2 es

$$\bar{U}_2(x'_1, y'_1) = G_4 \mathcal{F}_{x''_1, y''_1}\{\bar{T}(f_x, f_y)\} = G_4 [\bar{A}_1 + \bar{A}_2 + \bar{A}_3 + \bar{A}_4] \quad (6)$$

con [3]

$$\begin{aligned} \bar{A}_1 &= (\bar{t}_i \odot \bar{t}_i)[-x'_1, -y'_1] \\ \bar{A}_2 &= (\bar{t}_s \odot \bar{t}_s)[-x'_1, -y'_1] \\ \bar{A}_3 &= (\bar{t}_i \odot \bar{t}_s)[-x'_1 + (h_i + h_s), -y'_1] \\ \bar{A}_4 &= (\bar{t}_s \odot \bar{t}_i)[-x'_1 - (h_i + h_s), -y'_1] \end{aligned} \quad (7)$$

Las zonas J_c, J_s y J_i de la Fig.2 son los máximos *soportes* posibles para A_1 y A_2, A_3 y A_4 , respectivamente y el par ordenado entre corchetes en la ec.(7) es igual a cero en el centro de los correspondientes soportes. Consideramos el caso limite para que no haya superposición de correlaciones que es $h_i = h_s = 2v_x$.

i) El CTC1 es no centrado ni simétrico [3] y las aberraciones son introducidas por los sistemas A y B y por los dos displays. Suponemos que el CTC2 es libre de aberraciones.

ii) Asignamos a todas las frecuencias espaciales presentes en objeto y muestra la aberración que corresponde a una frecuencia $(f_{x,c}, f_{y,c})$ que da la máxima diferencia entre las aberraciones de ambos displays de modo que estimamos una señal de correlación que está más deteriorada que la verdadera [3].

iii) Por simplicidad aproximamos la diferencia de aberración máxima a la correspondiente a $(f_{x,c}, 0)$ [3].

iv) El desarrollo que consideramos para la función aberración del display inferior es

$$W_i(X_i, Y_i) = W_{i0} + b_i (X_i^2 + Y_i^2)^2 + f_i (X_i^2 + Y_i^2) + a_i (3X_i^2 + Y_i^2) + c_i (X_i^2 + Y_i^2) X_i + d_i X_i \quad (8)$$

donde $W_{i0}, b_i, f_i, a_i, c_i$ y d_i , son coeficientes que corresponden a un término constante, aberración esférica, curvatura de campo, astigmatismo, coma, y distorsión respectivamente y $X_i = \tilde{X}_i/v, Y_i = \tilde{Y}_i/v$ son coordenadas normalizadas con $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

v) Consideramos una sola aberración por vez y le asignamos en el centro del display valor cero y en la esquina valor λ (o $\lambda/4$) si la aberración es simétrica y $\lambda/2$ (o $\lambda/8$) si es antisimétrica. Si la aberración es λ (simétrica) o $\lambda/2$ (antisimétrica) los coeficientes son

$$b_i = \lambda \quad f_i = \lambda \quad a_i = \left(\frac{25}{43}\right)\lambda \quad c_i = \left(\frac{5}{6}\right)\lambda \quad d_i = \left(\frac{5}{6}\right)\lambda \quad (9)$$

vi) Solo evaluamos la correlación \bar{A}_3 (las otras son análogas) la cual está dada por [3]

$$\bar{A}_3 = \mathcal{F}_{x''_1, y''_1}^{-1}\{\bar{T}_i(f_x, f_y) \bar{T}_s^*(f_x, f_y) e^{j2\pi f_x(h_i + h_s)}\} \quad (10)$$

En el caso de muestra y objeto centrados en los correspondientes displays tenemos que para el correlador libre de aberraciones, el pico de \bar{A}_3 , que denotamos con $\bar{A}_{3p,o}$, se obtiene en el punto $(x'_1, y'_1) = (h_i + h_s, 0)$. En presencia de aberraciones la señal de correlación en el punto $(x'_1, y'_1) = (h_i + h_s, 0)$ es

$$\bar{A}_{3p} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{t}_{i0}(\xi, \eta) \bar{t}_{s0}(\xi, \eta) e^{j2\pi[W_i(\xi, \eta) - W_s(\xi, \eta)]} d\xi d\eta \quad (11)$$

de modo que solo depende de la *diferencia entre aberraciones* de objeto y muestra.

vii) Los criterios que usamos para estudiar si las aberraciones son tolerables [3] son:

el criterio de Rayleigh:

$$|W_i(\xi, \eta) - W_s(\xi, \eta)| < \begin{cases} \lambda/4 \text{ simétricas} \\ \lambda/8 \text{ antisimétricas} \end{cases} \quad (12)$$

y el criterio de Maréchal:

$$\frac{|\bar{A}_{3p}|^2}{|\bar{A}_{3p,0}|^2} > 0,8 \quad (13)$$

donde el subíndice p indica que se considera el valor de la correlación en el lugar donde está el pico en ausencia de aberraciones (en caso de objeto y muestra centrados en los displays está en $(x'_1, y'_1) = (h_i + h_s, 0)$ pero en otros casos está en otro lugar).

viii) Estudiamos el caso en que la muestra está centrada en el display superior y es libre de aberraciones y el objeto es una franja centrada o desplazada hacia abajo en el display inferior con una función aberración positiva que es igual o cuatro veces superior al límite de Rayleigh.

ix) Hallamos numéricamente las transformadas $|\bar{T}_i|$ y $|\bar{T}_s|$ y la correlación \bar{A}_3 . Las fórmulas que se usan son las ecs.(4) y (10).

IV. DISPLAY INFERIOR: FRANJA CENTRADA

IV.1 Cálculos analíticos

En la esquina de la franja centrada en el display se tiene $\frac{\bar{X}_i}{v} = \frac{1}{5}$ y $\frac{\bar{Y}_i}{v} = \frac{4}{5}$. Si el subíndice FC indica "en la esquina de la franja centrada", de ecs.(8) y (9) resulta

$$\begin{aligned} W_{bi,FC} &= \frac{\lambda}{2.16} & W_{fi,FC} &= \frac{\lambda}{1.47} & W_{ai,FC} &= \frac{\lambda}{2.26} \\ W_{ci,FC} &= \frac{\lambda}{8.82} & W_{di,FC} &= \frac{\lambda}{6} \end{aligned} \quad (14)$$

IV.2 Resultados numéricos

i. $|\bar{T}_i|$ vs f_x

De la Fig.3 se ve que para el sistema libre de aberraciones (Fig.(a)) se tiene que en el pico $|\bar{T}_i(0,0)| = 161 \text{ mm}^2$. La aberración esférica (Fig.(b)) baja un poco el pico sin correrlo. La curvatura de campo (Fig.(c)) baja mucho el pico sin correrlo. El astigmatismo (Fig.(d)) baja el pico (casi como en aberración esférica) sin correrlo. La coma (Fig.(e)) baja muy poco el pico y lo corre hacia la derecha levemente. La distorsión (Fig.(f)) no modifica la altura del pico y lo corre hacia la derecha.

ii. $|\bar{A}_3|^2$ vs x'_1

De la Fig.4 se obtiene que el sistema libre de aberraciones es tal que el pico de correlación está en $x'_1 = h_i + h_s = 38.1 \text{ mm}$ y $|\bar{A}_{3p,0}|^2 = 25998 \text{ mm}^4$. En el límite de Rayleigh se tiene $|\bar{A}_{3p}|^2 / |\bar{A}_{3p,0}|^2 = 0.91$ para curvatura de campo y este cociente es mayor para las demás aberraciones de modo que se cumple el criterio de Marechal.

Cuando la aberración es cuatro veces mayor al límite de Rayleigh la aberración que mas deterioro causa es la curvatura de campo.

V. DISPLAY INFERIOR: FRANJA DESPLAZADA

V.1 Cálculos analíticos

Para estudiar porque aparecen aberraciones al correr la franja consideramos las coordenadas de la Fig.5, llamamos $\alpha = 2v_x/3$ y tenemos $\bar{X}_i = \bar{X}'_i \pm \alpha$, $\bar{Y}_i = \bar{Y}'_i$ donde el signo superior corresponde a franja desplazada hacia arriba y el inferior hacia abajo. Para el display considerado acá tenemos $v_x/v_y = 3/4$, $v = v_x \cdot 5/3$ de modo que $\alpha/v = 2/5$ y se tiene:

• Aberración esférica

$$W_{bi}(\bar{X}_i, \bar{Y}_i) = \frac{b_i}{v^4} (\bar{X}_i^2 + \bar{Y}_i^2)^2 \quad (15)$$

que escrita en función de (\bar{X}'_i, \bar{Y}'_i) es

$$\begin{aligned} W_{bi}(\bar{X}'_i, \bar{Y}'_i) &= b_i \left[\frac{(\bar{X}'_i{}^2 + \bar{Y}'_i{}^2)^2}{v^4} + \right. \\ &2\left(\frac{\alpha}{v}\right)^2 \frac{(3\bar{X}'_i{}^2 + \bar{Y}'_i{}^2)}{v^2} \pm 4\left(\frac{\alpha}{v}\right) (\bar{X}'_i{}^2 + \bar{Y}'_i{}^2) \frac{\bar{X}'_i}{v^3} \\ &\left. \pm 4\left(\frac{\alpha}{v}\right)^3 \frac{\bar{X}'_i}{v} + \left(\frac{\alpha}{v}\right)^4 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

de modo que las aberraciones introducidas debido a que la franja está desplazada son:

Astigmatismo: (segundo término) baja la curva respecto de la centrada; tiene signo positivo para franja desplazada hacia arriba o hacia abajo.

Coma: (tercer término) baja levemente la curva y la corre; tiene signo positivo o negativo para franja desplazada hacia arriba o abajo respectivamente.

Distorsión: (cuarto término) corre la curva sin deformarla; tiene signo positivo o negativo para franja desplazada hacia arriba o abajo respectivamente.

Término constante: (último) no altera la curva y a partir de acá no lo consideramos.

• Curvatura de campo

$$W_{fi}(\bar{X}_i, \bar{Y}_i) = \frac{f_i}{v^2} (\bar{X}_i^2 + \bar{Y}_i^2) \quad (17)$$

que escrita en función de (\bar{X}'_i, \bar{Y}'_i) es

$$\begin{aligned} W_{fi}(\bar{X}'_i, \bar{Y}'_i) &= f_i \left[\frac{(\bar{X}'_i{}^2 + \bar{Y}'_i{}^2)}{v^2} \right. \\ &\left. \pm 2\left(\frac{\alpha}{v}\right) \frac{\bar{X}'_i}{v} + \left(\frac{\alpha}{v}\right)^2 \right] \end{aligned} \quad (18)$$

Se agrega:

Distorsión: (segundo término) corre la curva sin deformarla respecto de la centrada; tiene signo positivo o negativo para franja desplazada hacia arriba o abajo respectivamente.

• Astigmatismo

$$W_{ai}(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i) = \frac{a_i}{v^2} (3\tilde{X}_i^2 + \tilde{Y}_i^2) \quad (19)$$

que escrita en función de $(\tilde{X}'_i, \tilde{Y}'_i)$ es

$$W_{ai}(\tilde{X}'_i, \tilde{Y}'_i) = a_i \left[\frac{(3\tilde{X}'_i{}^2 + \tilde{Y}'_i{}^2)}{v^2} \pm 6\left(\frac{\alpha}{v}\right) \frac{\tilde{X}'_i}{v} + 3\left(\frac{\alpha}{v}\right)^2 \right] \quad (20)$$

Se agrega:

Distorsión: es tres veces mayor que en el caso anterior, corre la curva sin deformarla respecto de la centrada y tiene signo positivo o negativo para franja desplazada hacia arriba o abajo respectivamente.

• Coma

$$W_{ci}(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i) = \frac{c_i}{v^3} (\tilde{X}_i^2 + \tilde{Y}_i^2)\tilde{X}_i \quad (21)$$

que escrita en función de $(\tilde{X}'_i, \tilde{Y}'_i)$ es

$$W_{ci}(\tilde{X}'_i, \tilde{Y}'_i) = c_i \left[\pm \left(\frac{\alpha}{v}\right) \frac{(3\tilde{X}'_i{}^2 + \tilde{Y}'_i{}^2)}{v^2} + (\tilde{X}'_i{}^2 + \tilde{Y}'_i{}^2) \frac{\tilde{X}'_i}{v^3} + 3\left(\frac{\alpha}{v}\right)^2 \frac{\tilde{X}'_i}{v} \pm \left(\frac{\alpha}{v}\right)^3 \right] \quad (22)$$

Se agrega:

Astigmatismo: (primer término) baja la curva respecto de la centrada; tiene signo positivo o negativo para franja desplazada hacia arriba o abajo respectivamente.

Distorsión: (tercer término) corre la curva hacia la derecha tanto para franja desplazada hacia abajo o hacia arriba en el display.

• Distorsión

$$W_{di}(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i) = \frac{d_i}{v} \tilde{X}_i \quad (23)$$

que escrita en función de $(\tilde{X}'_i, \tilde{Y}'_i)$ es

$$W_{di}(\tilde{X}'_i, \tilde{Y}'_i) = d_i \left[\frac{\tilde{X}'_i}{v} \pm \left(\frac{\alpha}{v}\right) \right] \quad (24)$$

La distorsión no introduce otras aberraciones.

V.2 Resultados numéricos

i. $|\bar{T}_i|$ vs f_x

Cuando la franja se desplaza hacia abajo obtenemos la Fig.6. Para el sistema *libre de aberraciones* (Fig.(a)) en el pico tenemos $|\bar{T}_i(0,0)|=161 \text{ mm}^2$. La *aberración esférica* (Fig.(b)) hace que se agregue astigmatismo (baja el pico respecto al de franja centrada) y coma y distorsión negativas (corren el pico hacia la izquierda). La *curvatura de campo* (Fig.(c)) hace que se agregue distorsión negativa que corre la curva hacia la izquierda sin cambiar la altura del pico respecto del de la franja centrada. El *astigmatismo* (Fig.(d)) hace que se agregue distorsión negativa tres veces mayor que en el caso anterior la cual corre la curva hacia la izquierda sin cambiar la altura del pico. La *coma* (Fig.(e)) hace que se agregue astigmatismo (que baja el pico respecto del de franja centrada) y distorsión positiva (que corre el pico hacia la derecha). La *distorsión* (Fig.(f)) es tal que las curvas son idénticas a las de la franja centrada.

ii. $|\bar{A}_3|^2$ vs x'_1

De la Fig.7 se obtiene que el sistema *libre de aberraciones* es tal que el pico de $|\bar{A}_3|^2$ está en $x'_1=h_i+h_s+\frac{2v_x}{3}=44.45 \text{ mm}$ y $|\bar{A}_{3p,0}|^2=25998 \text{ mm}^4$ (como en Sección IV para franja objeto centrada). En el límite de Rayleigh se obtiene $|\bar{A}_{3p}|^2/|\bar{A}_{3p,0}|^2=0.89$ para la curvatura de campo (que es menor que para franja objeto centrada) y para las demás aberraciones este cociente es mayor de modo que se cumple el criterio de Marechal. Cuando la *aberración es cuatro veces mayor al límite de Rayleigh* las aberraciones que más daño causan son la curvatura de campo, el astigmatismo y la aberración esférica (en este orden) y la correlación está mas deteriorada que para franja centrada (ver Sección IV) lo cual se debe fundamentalmente a que se agregan a las aberraciones presentes en la franja centrada, las aberraciones antisimétricas (coma y distorsión) que en la primera etapa corren la transformada $|\bar{T}_i|$ y, por lo tanto, en la segunda etapa dañan la correlación.

I. CONCLUSIONES

En el display superior consideramos una franja centrada (muestra) y en el inferior una franja centrada o desplazada hacia abajo (objeto). Cuando, en el display inferior, la franja está centrada tenemos que en su esquina la mayor función aberración corresponde a curvatura de campo y es esta aberración la que más deteriora la señal de correlación. Cuando la franja está desplazada tenemos que para una dada aberración, salvo para distorsión, se agregan otras. O sea, para *aberración esférica* se agrega astigmatismo, coma y distorsión; para *curvatura de campo* se agrega distorsión; para *astigmatismo* se agrega distorsión y para *coma* se agrega astigmatismo y distorsión. Las aberraciones que más daño

causan son la curvatura de campo, el astigmatismo y la aberración esférica (en este orden). La correlación está mas deteriorada para franja desplazada que para centrada (excepto para distorsión que es igual).

Agradecimientos: Parte de este trabajo está contenido en la Tesis de Licenciatura (dirigida por la Dra S.A.Comastri, 1996) del Lic. Fabian Fucci a quien se agradece su colaboración en la obtención de los resultados numéricos presentados aquí.

Este trabajo fue realizado con subsidio de CONICET y de UBA.

-
- [1] Weaver, C. S. y Goodman, J. W. "A Technique for Optically Convolver Two Functions." *Applied Physics*, Vol. 5, No. 7, 1966.
 - [2] Comastri, Silvia A. y Simon, Juan M. "Design of a Joint Transform Correlator." Proceedings de la Segunda Reunión Iberoamericana de Optica, SPIE, Vol. 2730, 1995.
 - [3] Comastri, S. A.; Simon J.M. and Fúcci F. "Joint transform correlator: aberrations in the joint spectrum and their influence on the correlation peak." *Pure Appl. Opt.*,6, 1997
 - [4] Born, M. y Wolf, B. *Principles of Optics*. Pergamon Press, Gran Bretaña, 1987.
 - [5] Goodman, Joseph W. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill, 1968.
 - [6] Press, William H.; Teukolsky, Saul A.; Vetterling, William T. y Flannery, Brian P. *Numerical Recipes in FORTRAN*. Cambridge University Press, 1992.

Ref. 6.0.1 FIGURAS: Correlador transformada conjunta aberrado: muestra.. S.A.Comastri

Figura 1: Esquema del CTC₁: P : fuente puntual axial monocromática; A : sistema óptico centrado convergente (introduce aberración esférica); B : sistema óptico centrado divergente (opcional, teleobjetivo y compensa aberraciones); z : eje óptico de A y B ; ST : estructura que consiste en dos displays rectangulares, superior (muestra) e inferior (objeto) centrados en O_s y O_i , que actúan como diafragma de apertura; O : punto axial de ST ; x_1, y_1 : coordenadas en la estructura con origen en O ; $2v_x$ y $2v_y$: altura y longitud de cada display (en Resultados $2v_x=19\text{mm}$; $2v_y=25.4\text{mm}$); h_s y h_i : distancias de O a O_s y O_i ; $(\tilde{X}_s, \tilde{Y}_s)$ y $(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i)$: coordenadas ortogonales con origen en O_s y O_i ; P_A : imagen geométrica intermedia de P dada por el sistema A ; D : distancia de O a P_A ; P' : imagen geométrica de P_A dada por el sistema B ; Q_A y Q' : imagen debida a difracción en planos imagen intermedio y final; M : aumento lateral de B para los planos conjugados que contienen a P_A y P' ; (ξ', η') : coordenadas con origen en P' en el plano espectral.

Figura 2: Esquema del CTC₂: P : fuente puntual axial; D : display con transmitancia $\tilde{T}(\xi', \eta')$ y que también actúa como diafragma de apertura; (ξ', η') : coordenadas ortogonales en el plano del diafragma de apertura; τ : sistema óptico convergente libre de aberraciones; P'' : imagen del punto P ; (x'_1, y'_1) : coordenadas ortogonales con origen en P'' en el plano de correlación.

Figura 3: $|\tilde{T}_i|$ vs f_x para objeto centrado: (a) libre de aberraciones, (b) aberración esférica, (c) curvatura de campo, (d) astigmatismo, (e) coma, (f) distorsión

Figura 4: $|\tilde{A}_3|^2$ vs x'_1 para objeto centrado: (a) libre de aberraciones, (b) aberración esférica, (c) curvatura de campo, (d) astigmatismo, (e) coma, (f) distorsión

Figura 5: Coordenadas en el display inferior: $(\tilde{X}_i, \tilde{Y}_i)$: coordenadas con origen en O_i ; $(\tilde{X}'_i, \tilde{Y}'_i)$: coordenadas con origen en el centro de la franja desplazada: (a) hacia arriba, (b) hacia abajo.

Figura 6: $|\tilde{T}_i|$ vs f_x para objeto desplazado: (a) libre de aberraciones, (b) aberración esférica, (c) curvatura de campo, (d) astigmatismo, (e) coma, (f) distorsión

Figura 7: $|\tilde{A}_3|^2$ vs x'_1 para objeto desplazado: (a) libre de aberraciones, (b) aberración esférica, (c) curvatura de campo, (d) astigmatismo, (e) coma, (f) distorsión

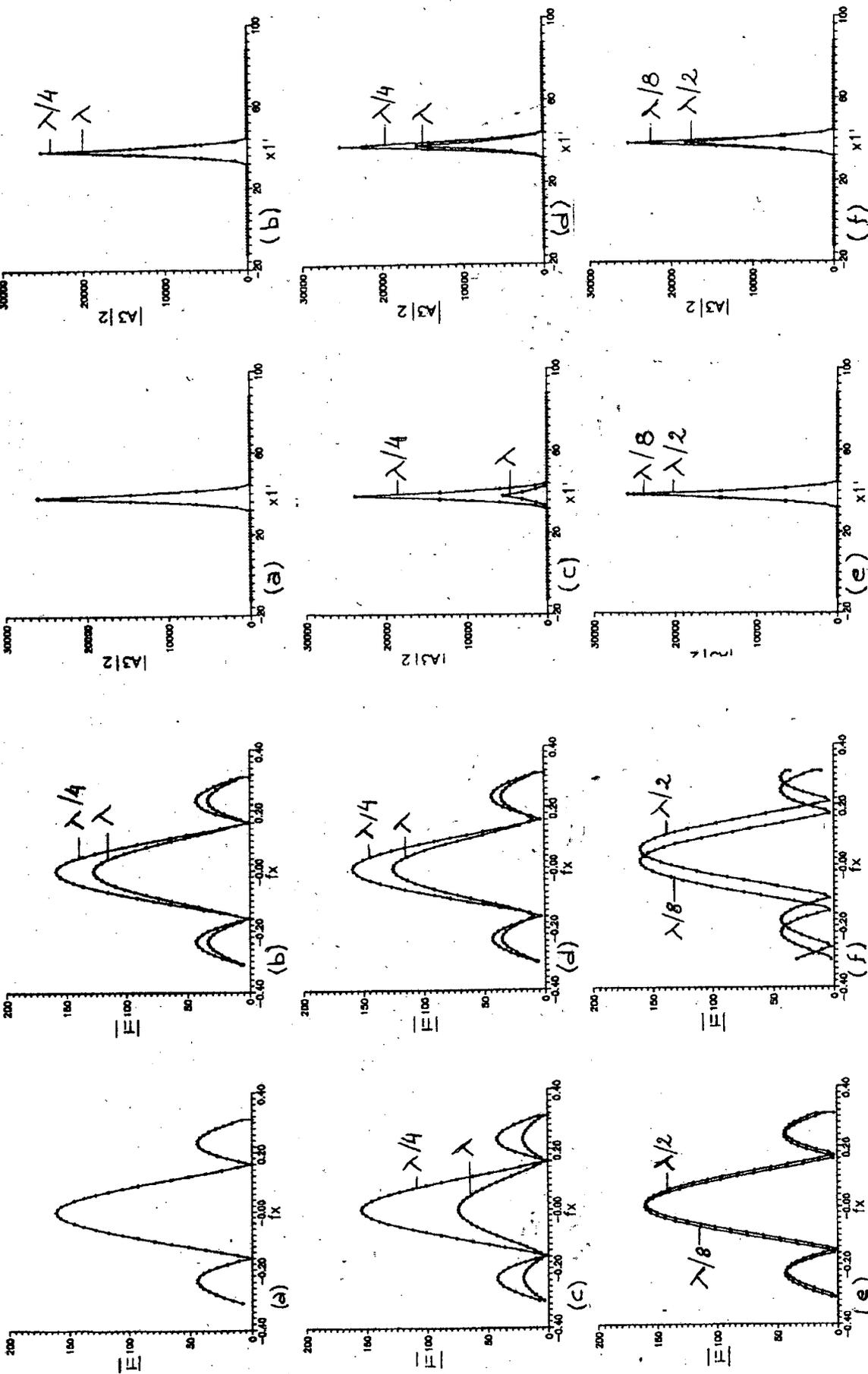


Figura 4

Figura 3

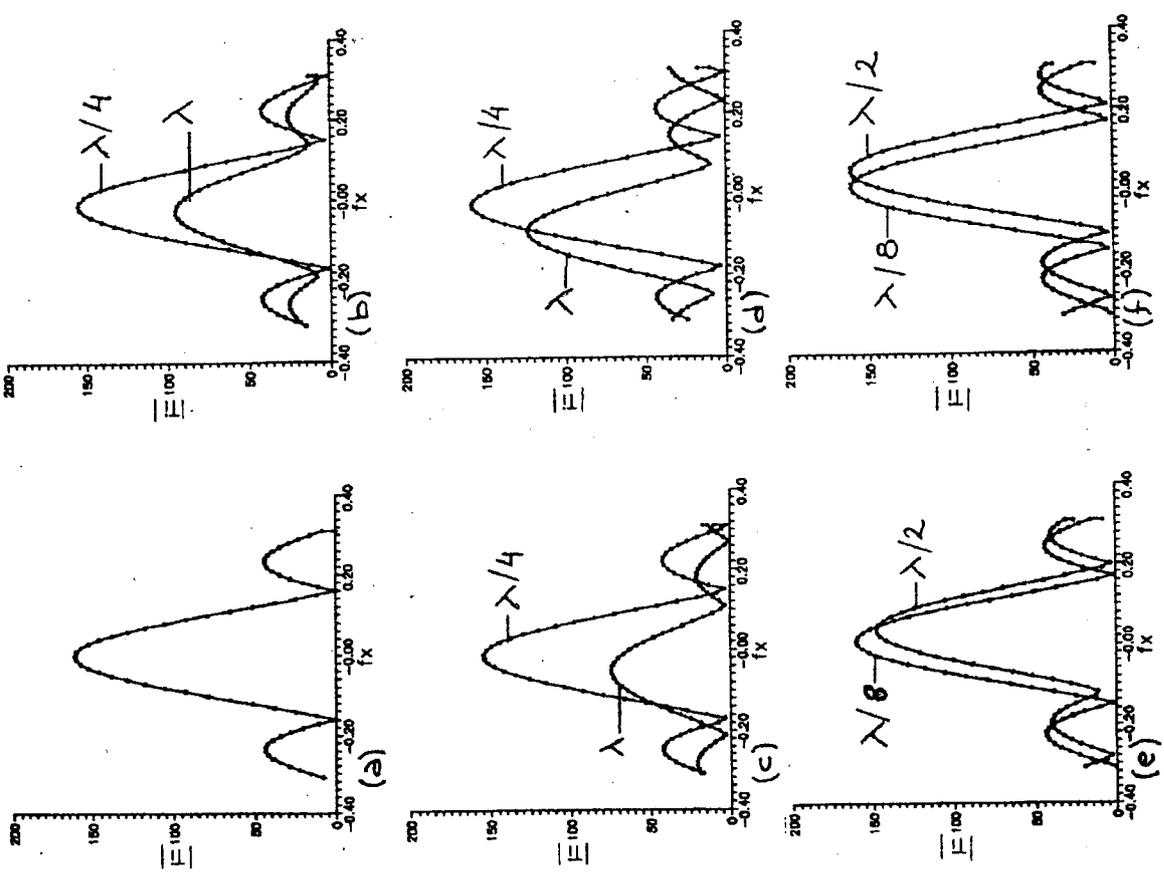
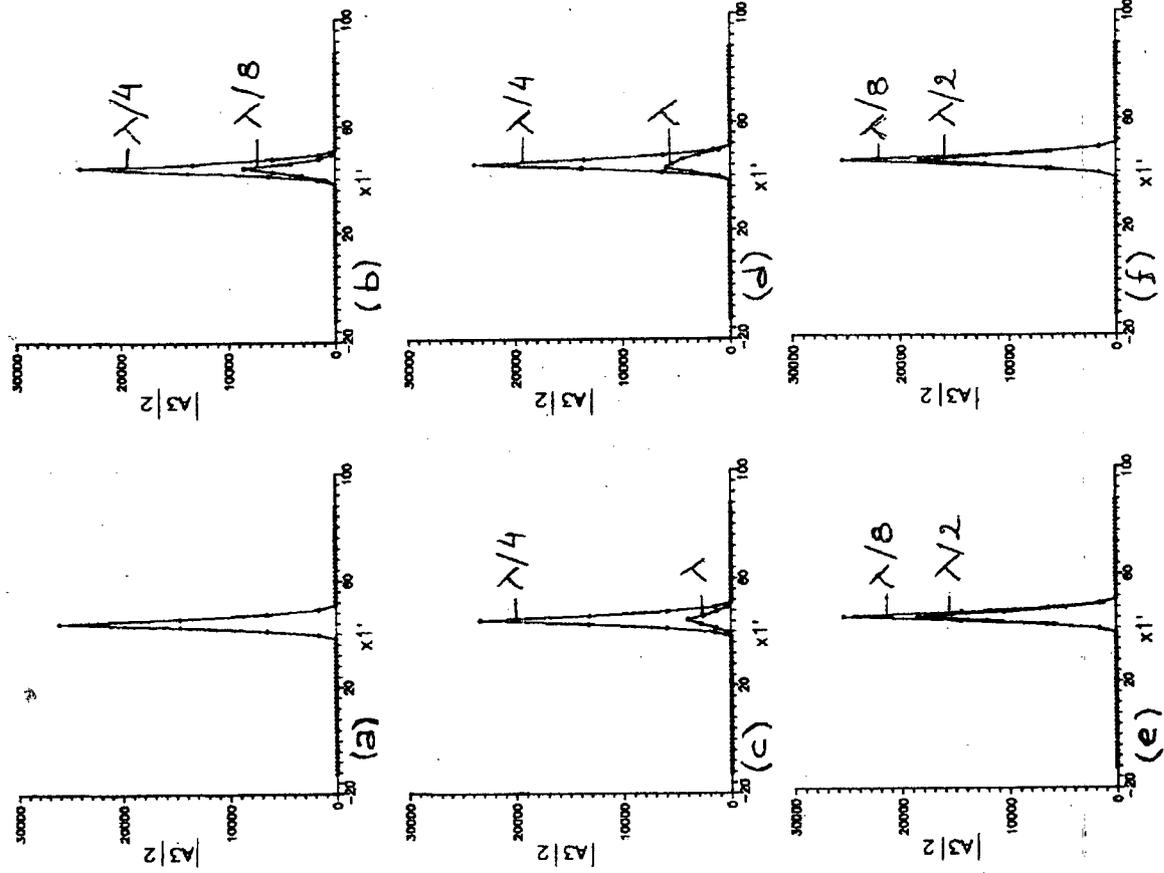


Figura 7

Figura 6