



光ディスクにおけるアイパターンのジッター解析 V*

ジッターの波面収差依存性

久保田 重夫

ソニー(株) MIPS 事業本部ディスク開発部 〒141 東京都品川区北品川 6-7-35

(1985年3月23日受理)

An Analysis of Eye Diagram Phase Jitter in Optical Disk Systems V

The Quadratic Dependency of Phase Jitter on Wavefront Aberration

Shigeo KUBOTA

Disk Development Div., MIPS Group, Sony Corporation,
6-7-35, Kitashinagawa, Shinagawa-ku, Tokyo 141

Eye diagram phase jitter is related to distortion in the waveform of the readout signal, which in turn has a quadratic relation to wavefront aberration in optical disk system. We have approximated the transfer function of an optical disk system using the optical transfer function of an incoherent system, and calculated the waveform distortion caused by the wavefront aberrations of 0.07 RMS λ . Relative values of the obtained waveform distortion caused by tangential coma, spherical aberration with optimized defocus, defocus and radial coma were 1, 0.7, 0.6 and 0.4, respectively, which agreed well with the measured jitter values. Although in theory astigmatism should not effect the readout signal waveform when optimum defocus is applied, phase jitter in fact increases because of the cross talk from the adjacent tracks when there is a large degree of astigmatism.

1. はじめに

光ディスクに記録されたデジタル信号を再生し、そのビットクロックに同期をかけオシロスコープに表示したものがアイパターンである。アイパターンの0と1の変換点は原信号の変換点と時間軸上で一致するのが理想であるが、実際には以下の理由で進み・遅れが生ずる。これをジッターとよぶ。ジッターは発生原因により3種類に分類できる。

- (1) 伝送路の帯域制限に起因するもの(符号間干渉)
 - (2) 伝送路のひずみ特性に起因するもの(波形ひずみ)
 - (3) 伝送路の外乱に起因するもの
- 光ディスクの記録から再生までの過程も一つの信号の

伝送路とみなせるから、上記の分類に対応して、

- (1) 回折により再生スポットが有限な大きさをもつことによるジッター
- (2) 再生光学系の収差・apodizationによるジッター
- (3) レーザーノイズやチャンネル間のクロストーク等の外乱によるジッター

が存在する。

ところで、光ディスクシステムには一定の規格を満足した低ノイズのレーザーダイオードが使用されている。また、ビット列の間隔は再生スポットの直径程度に選ばれているので、再生光学系の収差が十分小さければ、通常トラック間のクロストークの影響は問題にならない。したがって、観測されるジッターは、おもに(1),(2)に起因する。

著者らは光ディスクにおけるアイパターンのジッターを解析し、報告してきた¹⁻⁵⁾。光ディスク光学系に発生

* 前報: 文献5) 参照。

する典型的な収差, (1)球面収差 (Fig. 1), (2)コマ (Fig. 2, 3), (3)非点収差 (Fig. 4), (4)デフォーカス (Fig. 5) がジッターに及ぼす影響を調べ, ジッターは波面収差係数に quadratic に依存するという実験結果を得ている. 最初に光ディスク伝送路の伝達関数が再生光学系の OTF で近似できるという仮定に立って, ジッターの波面収差依存性を解析的に説明する.

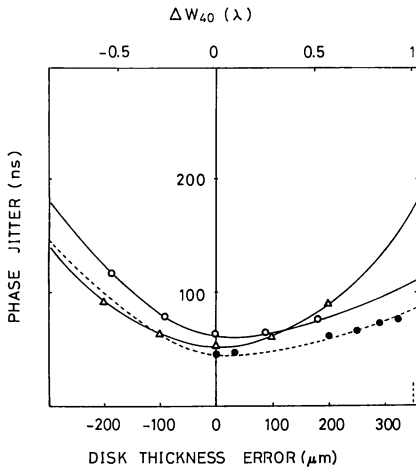


Fig. 1 Phase jitter as a function of spherical aberration caused by disk thickness error. Calculated jitter without additional aberration (Δ), jitter with additional spherical aberration of a higher order (\circ) and measured jitter (\bullet).

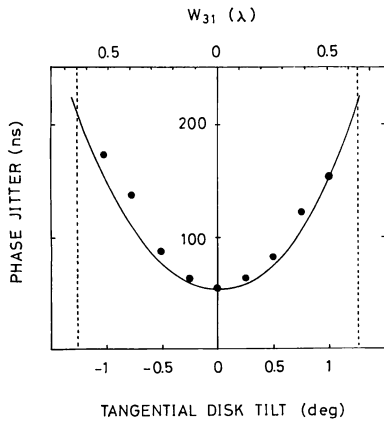


Fig. 2 Phase jitter as a function of tangential coma. Simulated jitter is shown by a solid line, measured jitter by (\bullet) and wavefront aberration which corresponds to the Marèchal criterion by a broken line.

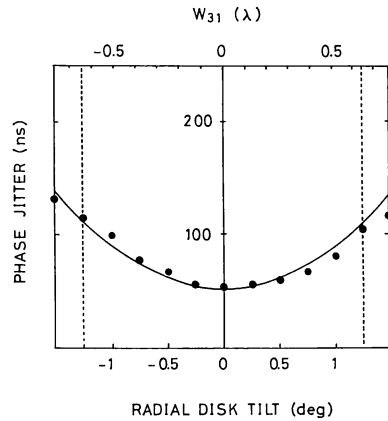


Fig. 3 Phase jitter as a function of radial coma.

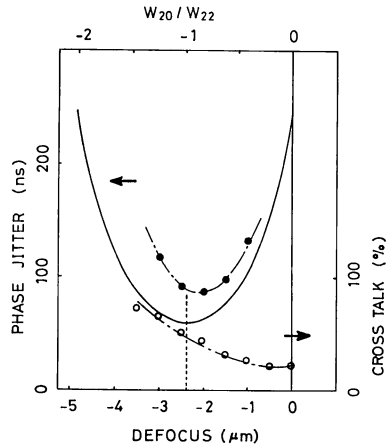


Fig. 4 Phase jitter as a function of defocus with astigmatism of $w_{22}=0.36\lambda$ of a gain-guided laser diode.

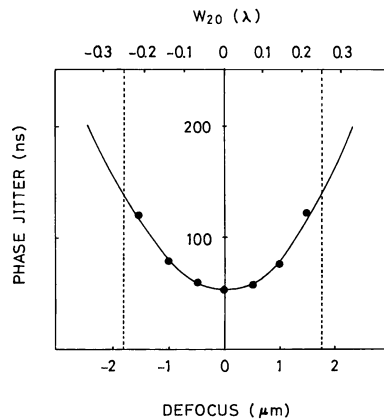


Fig. 5 Phase jitter as a function of defocus.

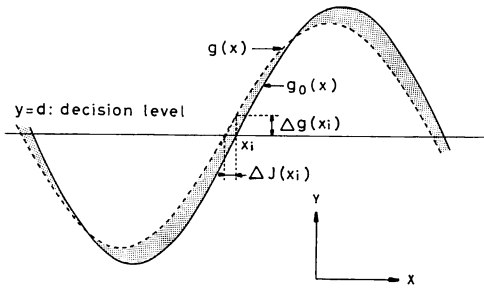


Fig. 6 Phase jitter increase of ΔJ and waveform distortion of readout signal of Δg .

2. ジッターの波面収差依存性

光ディスク伝送路の伝達関数を $D(s)$ とする。ここで、 $s = \nu\lambda/NA$ で、 ν は空間周波数、 λ は波長、 NA はレンズの開口数である。入力信号のスペクトラムを $F(s)$ とすると再生信号は、

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(s)D(s)\exp(-i2\pi sx)ds \quad (1)$$

とかけると、(1)式で、とくに光学系が無収差であるときの伝達関数を $D_0(s)$ 、再生信号を $g_0(x)$ とするとき、 $\Delta g(x) \equiv g(x) - g_0(x)$ は光学系の収差により生じた波形ひずみである。波形ひずみ $\Delta g(x)$ とジッターの増加量 ΔJ の関係を Fig. 6 に示す。図で y 軸は信号の変調度を表わし、直線 $y=d$ は信号の 0, 1 を判定するレベルである。 $g_0(x)=d$ の根を x_i とすると、ジッターの増加量は、

$$\Delta J(x_i) = -\frac{\Delta g(x_i)}{g_0'(x_i)} \quad (2)$$

で近似できる。定義により波形ひずみは、

$$\Delta g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(s)D_0(s) \left\{ \frac{D(s)}{D_0(s)} - 1 \right\} \times \exp(-i2\pi sx)ds \quad (3)$$

である。

ここで、光ディスク伝送系の伝達関数が、再生光学系を [incoherent system] として扱ったときの optical transfer function (OTF) で近似できると仮定する。一般には OTF には方向依存性があるのでピット列の方向を x 軸とする基準座標系に対して、光学系のなす方位角を ϕ とするとき、OTF のピット列方向成分を $D(s, \phi)$ で表わす。光学系の波面収差関数を $W(x, y)$ とするとき、

$$V(x, y; s, \phi) = (1/s) \{ W(x+s/2, y) - W(x-s/2, y) \} \quad (4)$$

を波面収差の差関数とよぶが、これより OTF は、

$$D(s, \phi) = \frac{1}{S_0} \iint_S \exp\left[i\frac{2\pi s}{\lambda} V(x, y; s, \phi) \right] dx dy \quad (5)$$

で定義される。 S_0 は瞳の面積で、 S は二つの単位円： $(x \pm s/2)^2 + y^2 = 1$ の共通領域とその面積を表わす。又、 $dS = dx dy / S$ とおくことにする。

定義により、

$$\begin{aligned} D(s, \phi) / D_0(s, \phi) &= \iint_S \exp\left[i\frac{2\pi s}{\lambda} V(x, y; s, \phi) \right] dS \quad (6) \\ &= \exp\left[i\frac{2\pi s}{\lambda} \bar{V}(s, \phi) \right] \\ &\quad \times \iint_S \exp\left[i\frac{2\pi s}{\lambda} \{ V(x, y; s, \phi) - \bar{V}(s, \phi) \} \right] dS \quad (7) \end{aligned}$$

である。ここで、

$$\bar{V}(s, \phi) = \iint_S V(x, y; s, \phi) dS \quad (8)$$

とおいた。 $\theta(s, \phi) = (2\pi s/\lambda) \bar{V}(s, \phi)$ は phase transfer function (PTF) と呼ばれ非対称収差があるとき生ずる。 $|D(s, \phi)|$ は modulation transfer function (MTF) である。収差が小さく、relative modulation: $M(s, \phi) \equiv |D(s, \phi)/D_0(s, \phi)|$ について $M(s, \phi) \geq 0.8$ が成りたつとき、(7)式は以下のように展開される^{6,7)}。

$$\begin{aligned} D(s, \phi) / D_0(s, \phi) &= \exp\left[i\frac{2\pi s}{\lambda} \bar{V} \right] \iint_S \left\{ 1 + i\frac{2\pi s}{\lambda} (V - \bar{V}) \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi s}{\lambda} \right)^2 (V - \bar{V})^2 \right\} dS \quad (9) \\ &= \exp\left[i\frac{2\pi s}{\lambda} \bar{V} \right] \left[1 - \frac{2\pi^2 s^2}{\lambda^2} K \right] \end{aligned}$$

ここで、

$$\begin{aligned} K(s, \phi) &= \iint_S V^2(x, y; s, \phi) dS \\ &\quad - \left\{ \iint_S V(x, y; s, \phi) dS \right\}^2 \quad (10) \end{aligned}$$

は波面収差の差関数の variance と呼ばれる。

波面収差の差関数 V は定義により波面収差係数について一次形式で記述されるから、 \bar{V} も同様である。一方、 K は(10)式より波面収差係数の二次形式で記述される。

3. $K(s, \phi)$, $\bar{V}(s, \phi)$ の数値計算

光ディスクでは球面収差・コマ・非点収差・デフォーカスの primary aberration がおもに問題になる。これらの収差が存在するときの K, \bar{V} を具体的に求め結果を

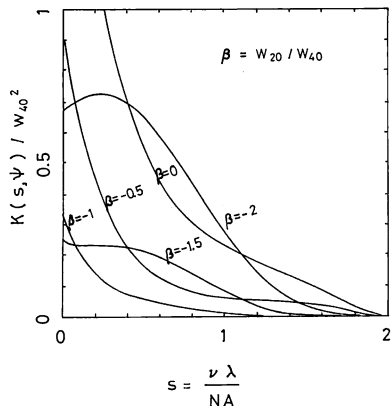


Fig. 7 Variance of difference function of wavefront aberration $K(s, \psi)$ when spherical aberration and defocus exists, and as a function of reduced spatial frequency s and the angle between the saggital direction of the optical system and the scanning direction of pits ψ .

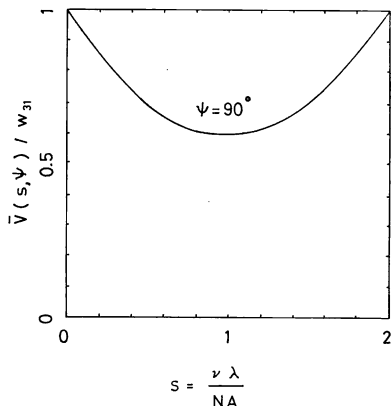


Fig. 9 Mean value of difference function of wavefront aberration $\bar{V}(s, \psi)$ when coma exists.

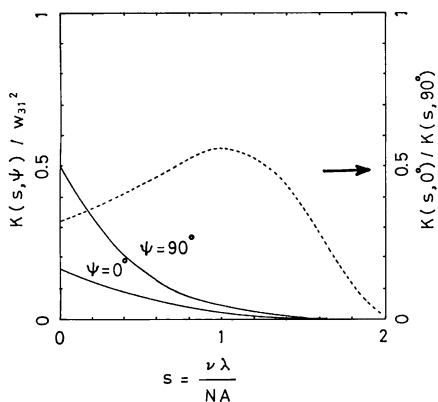


Fig. 8 Variance of difference function of wavefront aberration $K(s, \psi)$ when coma exists.

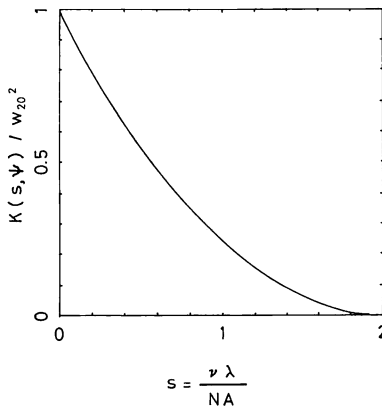


Fig. 10 Variance of difference function of wavefront aberration $K(s, \psi)$ when defocus exists.

図示する。ここで、補助関数

$$H_{k,i}(s) = \iint_S x^k y^i dS \quad (11)$$

を用いる。

3.1 球面収差 (Fig. 7)

$$\begin{aligned} K(s, \psi) / w_{40}^2 = & 4H_{2,0}(s)\beta^2 \\ & + \{16[H_{4,0}(s) + H_{2,2}(s)] + 4H_{2,0}(s)s^2\} \beta \\ & + \{16[H_{6,0}(s) + 2H_{4,2}(s) + H_{2,4}(s)] \\ & + 8[H_{4,0}(s) + H_{2,2}(s)]s^2 \\ & + H_{2,0}(s)s^4\} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 $\beta = w_{20} / w_{40}$.

3.2 コマ (Fig. 8, 9)

$$\begin{aligned} K(s, \psi) / w_{31}^2 = & \{9H_{4,0}(s) + 6H_{2,2}(s) + H_{0,4}(s) \\ & - [3H_{2,0}(s) + H_{0,2}(s)]^2\} \sin^2 \psi \\ & + 4H_{2,2}(s) \cos^2 \psi \end{aligned} \quad (13)$$

$$\bar{V}(s, \psi) / w_{31} = \{s^2/4 + 3H_{2,0}(s) + H_{0,2}(s)\} \sin \psi \quad (14)$$

3.3 非点収差

$$\begin{aligned} K(s, \psi) / w_{22}^2 = & 4H_{2,0}(s)\beta^2 + H_{0,2}(s)\sin^2 2\psi \\ & + 4H_{2,0}(s)\sin^4 \psi + 8H_{2,0}(s)\sin^2 \psi \beta \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 $\beta = w_{20} / w_{22}$.

3.4 テフォーカス (Fig. 10)

$$K(s, \psi) / w_{20}^2 = 4H_{2,0}(s) \quad (16)$$

4. 波形ひずみの RMS 値

波形ひずみにもとづくジッターの評価式を導入する。

(3)式に Parseval の定理を適用して、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Delta g^2(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} |F(s)D_0(s, \phi) \{D(s, \phi)/D_0(s, \phi) - 1\}|^2 ds \quad (17)$$

$$\leq |F(s)|_{\max}^2 \sigma^2 \quad (18)$$

をうる。ここで、

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} D_0(s, \phi)^2 \left[\left\{ \frac{2\pi s}{\lambda} \bar{V}(s, \phi) \right\}^2 + \left\{ \frac{2\pi^2 s^2}{\lambda^2} K(s, \phi) \right\}^2 \right] ds \quad (19)$$

で、 σ^2 は収差による OTF の劣化を表わす。[] 内の第 1 項は PTF (Fig. 11) による劣化、第 2 項は MTF の劣化 (Fig. 12) である。

波形ひずみの 2 乗積分 $G = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta g^2(x) dx$ は、十分長い区間にわたる波形ひずみの 2 乗平均 $\overline{\Delta g^2}$ に比例する。

次にジッターについて考える。波形ひずみとジッターの関係は(2)式である。 $g_0'(x_i)$ は無収差光学系による再生信号の変換点における勾配で、収差による波形ひずみと統計的に独立だから、いまジッターの 2 乗平均 $\overline{\Delta J^2}$ を考えると、 $\overline{\Delta J^2} = \overline{\Delta g^2} \cdot (\overline{g_0'})^{-2}$ で、波形ひずみの 2 乗平均に比例する。よって、 σ を計算すれば収差による波形ひずみにもとづくジッターの RMS 値を評価できる。そこで、 σ を ‘波形ひずみの RMS 値’ と呼ぶことにする。 σ は波面収差係数に quadratic に依存する。

光ディスク・システムの収差許容値の基準としてしばしば Maréchal criterion が引用される。これに相当する $0.07 \text{RMS } \lambda$ の波面収差を与え σ を計算した。このとき $M(s, \phi) \geq 0.8$ である。ピット列方向にコマの対称軸が向くとき σ は最大になる (タンジェンシャル・コマ, $\phi=90^\circ$)。これを 1 とすると、 σ は球面収差で 0.71, デフォーカスで 0.57, ラジアル・コマ ($\phi=0^\circ$) で 0.42 になる。コマが存在する場合だけ PTF による波形ひずみが生ずるが、 $\phi=90^\circ$ のとき、MTF の劣化による波形ひずみの約 60% になる。ただし、像シフト分を除き、位相ひずみのみ考慮した。Table 1 に波形ひずみの RMS 値 σ とシミュレーションより求めたジッターの増加量 ΔJ (ただし、p-p 値で表示) を対照させた。相対値で比較すると両者はよく一致している。非点収差が存在しても、デフォーカスを最適に選べば σ は増加しない。シミュレーションでも同様であるが、一方、実験によれば収差が大きいき隣接トラックからのクロストークという外乱によってジッターが増加する。

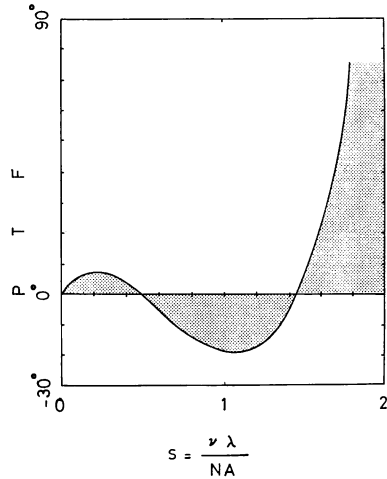


Fig. 11 Phase transfer function (PTF).

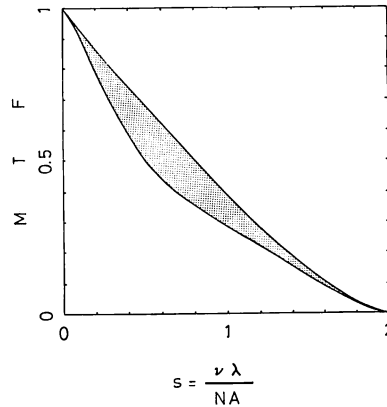


Fig. 12 Modulation transfer function (MTF) with and without aberration.

Table 1 Wavefront aberration, RMS waveform distortion and simulated jitter increase.

Wavefront aberration	σ_{rel}	ΔJ_{p-p}	$(\Delta J_{p-p})_{rel}$
W_{40}	0.7	125	0.74
$W_{31}(\tan)$	1	170	1
(rad)	0.4	60	0.35
W_{22}	0	—	—
W_{20}	0.6	85	0.5

5. Partial coherent 理論による取扱いとの関係

ところで、Hopkins は光ディスク光学系を partial coherent system として扱い再生信号を計算した⁸⁾。一方、本報告は光ディスクシステムの伝達関数が inco-

herent system の OTF で近似できるという前提に立っている。ここで、両者の関係を考えてみたい。

Hopkins によれば再生信号は、

$$I(u, v) = \sum_m \sum_n \sum_{m'} \sum_{n'} \exp \left\{ -i2\pi \left[\frac{m-m'}{p} u + \frac{n-n'}{q} v \right] \right\} \times R(m, n) R^*(m', n') D(m, n; m', n') \quad (20)$$

で記述される。ここで、光ディスクの複素反射係数 $R_0(u', v')$ は周期 p, q で二重周期関数であると仮定し、そのフーリエスペクトラムを

$$R(m, n) = \frac{1}{pq} \int_{-p/2}^{p/2} \int_{-q/2}^{q/2} R_0(u', v') \times \exp \left\{ -i2\pi \left[\frac{m}{p} u' + \frac{n}{q} v' \right] \right\} du' dv' \quad (21)$$

とおいている。さらに

$$D(m, n; m', n') = \iint_S \gamma(x, y) f(x-m/p, y-n/q) \times f^*(x-m'/p, y-n'/q) dx dy \quad (22)$$

は transmission cross-coefficient (以下 TCC と略す) と呼ばれる。 $\gamma(x, y)$ は effective source⁹⁾ で、光ディスク光学系の場合 $\gamma(x, y) = 1$ である。 $f(x, y)$ は瞳関数、 S は三つの単位円: $x^2 + y^2 = 1$, $(x-m/p)^2 + (y-n/q)^2 = 1$, $(x-m'/p)^2 + (y-n'/q)^2 = 1$ の共通領域をあらわす。

一方、本報告では再生信号を

$$g(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(s) D(s) \exp(-i2\pi s x) dx \quad (1)$$

で近似した。比較すると両者の対応関係は、

$$F(s) \leftrightarrow R(m, n) R^*(m', n')$$

$$D(s) \leftrightarrow D(m, n; m', n')$$

になっている。したがって、(1)式は(20)式を一次元化 ($n=n'=0$) した上で、TCC を partial coherent system の OTF で近似したものに相当している。すなわち、(22)式では回折光のうち0次光と±1次光の干渉項のみ考える。partial coherent system の OTF は、 $\gamma(x, y) = 1$ のとき incoherent system の OTF に一致する^{10,11)}。

しかし、(20)式を実際の波形ひずみの計算に適用するのは以下の理由で困難である。(20)式は $1/p, 1/q$ を基本周波数とする無限フーリエ級数であるが、TCC: D は三つの単位円の共通領域 S 上で定義されているから、実際に級数に関与する $(m, n), (m', n')$ は S の存在条件

$$(m/p)^2 + (n/q)^2 < 4 \quad (23)$$

$$(m'/p)^2 + (n'/q)^2 < 4 \quad (24)$$

$$[(m-m')/p]^2 + [(n-n')/q]^2 < 4 \quad (25)$$

を満足するものに限定される。前述のように p, q は光ディスクの複素反射率関数に二重周期性を仮定したときの周期で、 λ/NA で換算されている。

ところで、デジタル信号を記録した光ディスクでは、一般にビットとその間隔は離散長をとり、かつその配列がほぼランダムになるような変調方式が用いられるため、二重周期構造の単位胞の大きさ p が非常に大きくなる。そのため、存在条件(23)~(25)式を満たすスペクトラム $(m, n), (m', n')$ の数が膨大になり、厳密な(20)式の数値計算は不可能になる。本報告の方法は、(20)式を一次元化した上で、TCC を partial coherent system の OTF で近似するもので、単純であるが十分実験結果を説明するに足るものである。

6. 考 察

信号の変換点の位置の誤差: ジッターを、信号の一般的な波形ひずみと結びつけて考え、波面収差との関連性を理論的に明らかにした。波面収差が摂動として作用し、伝達関数 $D_0(s, \phi)$ が劣化するため波形ひずみが生ずる。ところで、摂動が小さいとき OTF の相対変化 $|D(s, \phi)/D_0(s, \phi) - 1|^2$ は波面収差の差関数の平均値: $\bar{V}(s, \phi)$ と variance: $K(s, \phi)$ の2乗和で近似できる。よって、波形ひずみは波面収差係数に quadratic に依存する。

したがって、波形ひずみの大きさを定量的に測定すれば、逆に光学性能を精密に評価できる。アイパターンでのジッター測定は、再生信号より原信号を再現し、変換点の位置の誤差分布より波形ひずみの大きさを算出する。他に、光ディスクに単一周波数の信号をゾーンを変えていくつかの周波数で記録しておき、その再生信号の変調度を比較することにより、MTF を直接測定する方法がある。これと比較してジッター測定では、PTF の評価もできるという本質的な相違以外に、1) デジタル信号のビット誤り率に直結した評価量が、2) 高精度で、3) 短時間に得られるという特質がある。たとえば Fig. 2 では、コマを $0.01 \text{ RMS} \lambda$ の精度で測定できている。

ところで、たとえば Strehl intensity のような、光学系の結像性能に関する評価関数の多くは、 $M(s, \phi)$ を s, ϕ について積分した形式をとっている¹²⁾。上述のように波形ひずみも光学性能に関する評価関数としての意味をもっているが、その2乗積分を規定する σ^2 は $\bar{V}(s, \phi)$

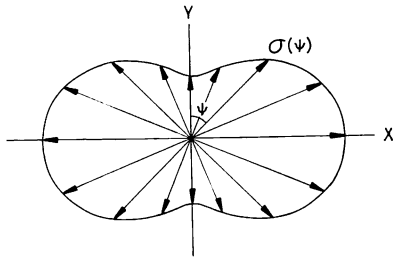


Fig. 13 RMS wavefront distortion $\sigma(\phi)$ as a function of ϕ when coma exists.

と $K(s, \phi)$ の 2 乗和に $D_0(s)^2$ を乗じて 1 軸方向に積分したものであり、非対称収差が存在するとき、収差の方向に依存する。Fig. 13 はコマの対称軸の方位角を ϕ とするとき、ベクトル $\sigma(\phi)$ で波形ひずみの RMS 値を表わしたものである。コマがあるとき、

$$K(s, \phi) = K(s, 90^\circ) \sin^2 \phi + K(s, 0^\circ) \cos^2 \phi \quad (26)$$

$$\bar{V}(s, \phi) = \bar{V}(s, 90^\circ) \sin \phi.$$

これを(19)式に代入し、

$$\sigma^2(\phi) = \alpha^2 \sin^4 \phi + \beta^2 \cos^4 \phi + 2\gamma^2 \sin^2 \phi \cos^2 \phi + \delta^2 \sin^2 \phi \quad (27)$$

を得た。ただし、

$$\alpha^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [D_0(s, \phi)(2\pi^2 s^2 / \lambda^2) K(s, 90^\circ)]^2 ds \quad (28)$$

$$\beta^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [D_0(s, \phi)(2\pi^2 s^2 / \lambda^2) K(s, 0^\circ)]^2 ds \quad (29)$$

$$\gamma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [D_0(s, \phi) 2\pi^2 s^2 / \lambda^2]^2 K(s, 90^\circ) K(s, 0^\circ) ds \quad (30)$$

$$\delta^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [D_0(s, \phi)(2\pi s / \lambda) \bar{V}(s, 90^\circ)]^2 ds \quad (31)$$

である。

7. 結 論

光学系の収差に起因する再生信号の波形ひずみが波面収差係数に quadratic に依存することを示した。

実際に Maréchal criterion に相当する波面収差が存在するときの波形ひずみの RMS 値を各収差について求め比較した。波形ひずみの RMS 値はタンジェンシャルコマ(コマの対称軸がピット列方向を向く)があるとき最大で、これを 1 とすると、球面収差では 0.7、デフォーカスでは 0.6、ラディアルコマ(コマの対称軸がピット列垂直方向を向く)では 0.4 になる。非点収差が存在しても、スポットの焦線がピット列に垂直になるようにデフォーカスを調整すれば、本近似の範囲の波形ひずみは増加しない。

波形ひずみにもとづくアイパターンのジッターに関して、光学系に球面収差・コマ・非点収差・デフォーカスが存在する場合について、シミュレーションと測定を行ない、報告してきた。今回計算した波形ひずみの RMS 値は、これらの結果とよく対応する。ただし、非点収差に関しては、収差が大きくなると隣接トラックからのクロストークが無視できなくなり、その外乱によってジッターが増加する。

おわりにあたり、本研究の機会を与えていただきましたソニー(株) MIPS 事業本部 宮岡千里 事業本部長と、ご指導賜りました東京大学生産技術研究所小倉磐夫教授と黒田和男助教授に感謝いたします。

文 献

- 1) S. Kubota: Oral presentation at CLEO '82, Phoenix, Arizona, FU-5 (1982).
- 2) 久保田重夫: 光学, **12** (1983) 437.
- 3) 久保田重夫, 岡美智雄, 大里 潔: 光学, **14** (1985) 137.
- 4) 久保田重夫, 佐藤邦宏, 福本 敦: 光学, **14** (1985) 140.
- 5) 久保田重夫, 大里 潔, 渡辺俊夫: 光学, **14** (1985) 219.
- 6) H. H. Hopkins: Proc. Phys. Soc., **B70** (1957) 449.
- 7) H. H. Hopkins: Opt. Acta, **13** (1966) 343.
- 8) H. H. Hopkins: J. Opt. Soc. Am., **69** (1979) 4.
- 9) H. H. Hopkins: Proc. R. Soc. London, Ser. A, **217** (1953) 409.
- 10) 小瀬輝次: フーリエ結像論 (共立出版, 東京, 1979), p. 65.
- 11) 辻内順平: 機械試験所報告, No. 40 (1961) 12.
- 12) Y. Itoh: J. Opt. Soc. Am., **61** (1970) 302.