

光盘系统的信噪比、象差容限及伺服误差

巩马理

潘龙法 金国藩

(西南技术物理研究所, 成都)

(清华大学精密仪器系, 北京)

摘要: 采用脉冲响应函数方法, 分析光盘存储系统中光学头存在各种象差及伺服误差时, 对读出信号信噪比的影响, 从而导出了各类光学头的象差容限及伺服要求。

Signal-to-noise ratio, aberration tolerance and servo-error of optical storage

Gong Mali

(Southwest Institute of Technical Physics)

Pan Longfa, Jin Guofan

(Department of Precision Instrument, Tsinghua University)

Abstract: By using the impulse response function, the effects of aberration of optical head and the servo-error of the optical storage system on SNR of the read-out signal are discussed. The aberration tolerance and the servo-requirement for various optical head are presented.

一、引 言

对光盘系统的读出特性进行分析, 十分有助于对光盘存储光学系统、记录介质、编解码及信号处理的设计与评价。J. Braat利用相干扫描方法, 分析光盘系统, 从信号的空间频率特性来考察光学系统的象差影响^[1]; V. B. Jipson等人则以二维傅里叶变换的方法, 分析

[3] Lomheim T S, DeShazer L G. Opt Commun, 1978; 24 (1); 89

[4] Weber M J. Phys Rev, 1967; 157 (2); 262

[5] Phys Stat Sol (a), 1983; 75; K111

[6] Богасаров X С, Порожкин П М. Квант Электр, 1983; 10 (8); 1645~1650

作者简介: 张秀荣, 女, 1943年出生。工程师。从事激光晶体的光谱和激光的研究。

收稿日期: 1990年6月21日。 收到修改稿日期: 1991年3月15日。

光盘系统从记录介质读出信号的特征^[2]，利用“齐明”条件确定读出信号“网眼”跳动的研究工作，则是由S. Kubota完成的^[3]。而我们用脉冲响应方法，以分析光盘读出信号的信噪比为基础，研究光学系统的各种象差、伺服误差的影响，从而导出了各类光学头（包括只读及可写读型）的象差容限及伺服要求。

二、光盘系统的数学描述

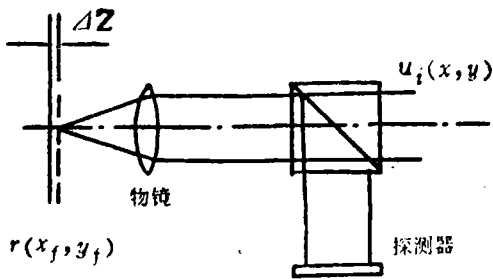


图1 光盘光学系统的简化光路

在光盘信息存储中，信息的写入和读出都是通过光学头实现的，其光路可简化成为如图1所示。对于功率为 P ，高斯参数为 a 的入射光

$$u_i(x, y) = \frac{\sqrt{P}}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2a^2}\right) \quad (1)$$

在物镜焦面附近与介质的作用，当物镜的数值孔径不太大时（例如 $NA < 0.65$ ）可以用标量衍射理论来描述。在以物镜口径归一化的坐标系中，物镜焦面附近光盘介质表面的光场为：

$$u_f(x_f, y_f) = c \frac{\sqrt{P}}{a} \iint u_i(x, y) e^{-i2\pi[W(x, y) - (xx_f + yy_f)]} dx dy \quad (2)$$

$$(x, y) < 1$$

式中， $x_f = \frac{x_i^\circ}{\lambda/NA}$ ， $y_f = \frac{y_i^\circ}{\lambda/NA}$ ； x_i° ， y_i° 是光盘上的空间坐标， $W(x, y)$ 是光学系统的波象差函数，在极坐标系中与象差系数的关系为：

$$W(r, \phi) = W_{4,0}r^4 + W_{3,1}r^3 \cos(\phi - \phi_1) + W_{2,2}r^2 \cos^2(\phi - \phi_2) + W_{2,0}r^2 \quad (3)$$

$W_{4,0}$ ， $W_{2,2}$ 分别是球差和象散系数； $W_{3,1}$ 是慧差系数，由光束向光盘斜入射引起的，对于厚度为 d 的保护层（ $d = 1.2\text{mm}$ ），慧差系数为：

$$W_{3,1} = \frac{(n^2 - 1)}{2n^3} d(NA)^3 \alpha \quad (4)$$

式中， n 是光盘保护层的折射率（ $n = 1.5 \sim 1.55$ ）； α 是光束入射的倾斜角； $W_{2,0}$ 是用波象差描述离焦 ΔZ 的参数：

$$W_{2,0} = \frac{\Delta Z(NA)^2}{\lambda} \quad (5)$$

光盘系统是线性系统，存在着脉冲响应函数^[4]：

$$h(t) = 0.2 \int_{-\infty}^{+\infty} I(x_f, y_f) \text{circ1} \left[\frac{\sqrt{(x_f - \Delta x_f)^2 + (y_f - \frac{\lambda}{NA} v_f)^2}}{RB} \right] dx_f dy_f \quad (6)$$

式中， $I(x_f, y_f) = u_f(x_f, y_f)u_f^*(x_f, y_f)$ ，是光盘表面处的读出光斑的光强分布， Δx_f 是读出光斑相对于信息轨迹的偏离量（即跟踪误差）， RB 是对应于脉冲响应函数的脉斑，在理想记录过程中， $RB = 0.4\mu\text{m}$ 。从光学头读出的模拟信号是脉冲响应函数 $h(t)$ 与输入

信号 $Q(t)$ 的卷积,

$$S(t) = h(t) * Q(t) \quad (7)$$

读出信号的平均功率为:

$$AS = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} S(t)S^*(t)dt \quad (8)$$

在光盘系统中, 输出信号 $Q(t)$ 是以 T 为时钟单位, 由 $3T$ 、 $4T$ …… $11T$ 为编码长度的二进制时间码, 对数字光盘系统, $T = 0.29\text{ms}$ 。

实际上, 光盘光学头的读出信号中有大量的直流分量 DS , 是由于光被光盘周期性沟槽结构衍射, 零级与 ± 1 级干涉叠加的结果。光盘槽宽为 $0.8\mu\text{m}$, 周期为 $1.6\mu\text{m}$; 光盘盘体和沟槽内的未记录信息部分的等效光强反射率分别为20%和10%。直流分量 DS 则可用下式描述^[4]:

$$DS = \int_{-\infty}^{+\infty} I_f(x_f, y_f) \left\{ 0.2 - 0.1 \sum_n \text{rect} \left[\frac{x_f - \Delta x_f - np}{p} \right] \right\} dx_f dy_f \quad (9)$$

式中, p 是归一化周期, $p = 1.6/(\lambda/\text{NA})$ 。由此便得到如下定义的信号调制度:

$$\xi = \frac{AS}{DS + AS} \quad (10)$$

由上述分析可知, 光盘光学头中存在的象差和伺服误差(包括离焦和跟踪误差), 将影响读出信号的平均功率 AS , 同时也影响直流分量 DS 。但是, 由于光盘的等效反射率存在这样的关系: 信息斑点反射率 $>$ 盘体反射率 $>$ 沟槽反射率, 读出信号的总平均功率 $DS + AS$, 受各因素的影响不大, 受影响的主要是信号的调制度 ξ 。

三、光盘读出信号的信噪分析

光盘光学头从光盘表面读出的光信号, 经探测器和前置放大器成为模拟电信号, 该信号又经比较解码后还原成原始信号。光盘信号的主要信噪特性由读出模拟信号决定, 通常用信噪比描述:

$$\text{SNR} = \overline{V(t)^2} / \overline{n(t)^2} \quad (11)$$

式中, $\overline{V(t)^2}$ 和 $\overline{n(t)^2}$ 分别是信号电压的均方值和噪声电压的均方值。

为了获得较大的响应带宽和较小的噪声, 光电探测器的前置放大器一般选用如图2所示的互阻抗放大器^[6]。功率为 P_0 , 调制度为 ξ 的光信号 $P(t) = P_0 [1 + \xi m(t)]$ ($m(t)$ 是具有单位峰值和零平均值的消息函数)经放大器后输出的信号电压为

$$V(t) = \eta R P_0 \xi m(t) \quad (12)$$

式中, 忽略了直项, η 是探测器灵敏度。信号电压均方值为:

$$\overline{V(t)^2} = \eta^2 R P_0^2 \xi^2 \quad (13)$$

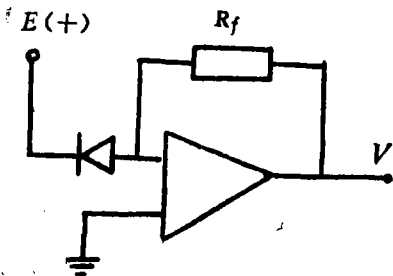


图2 互阻抗放大器

光盘系统噪声的主要来源是盘片噪声、激光噪声、探测器噪声和放大器噪声，所有噪声功率的总和，在一定的入射光功率下是常数^[7]。这样，调制度 ζ 变化所引起的信噪比变化，可用下式描述

$$\Delta \text{SNR} = -20 \lg \frac{\zeta_0}{\zeta} \quad (14)$$

式中， ζ 是理想情况的调制度。该式表明，光学象差，伺服误差等因素对信噪比的影响，可用其对调制度 ζ 的影响来描述。

这样，利用上述各式就能确定光学象差、伺服误差等因素对于信噪比的影响，具体分析中可利用数值分析方法实现。另外，当考虑到诸因素对记录过程的影响后，还可分析读写共用光盘系统中诸因素的影响。

图3~图6是各种情况下的信噪比变化情况。

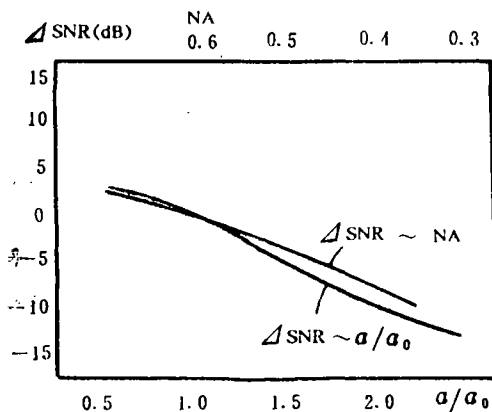


图3 数值孔径NA高斯参数a对信噪比的影响

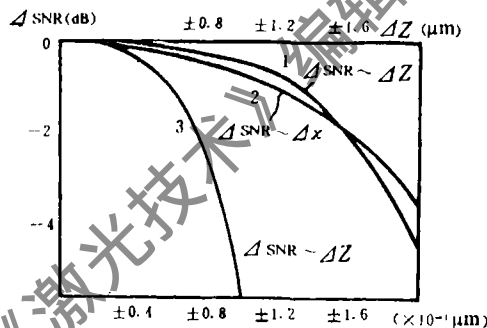


图4 伺服误差对信噪比的影响

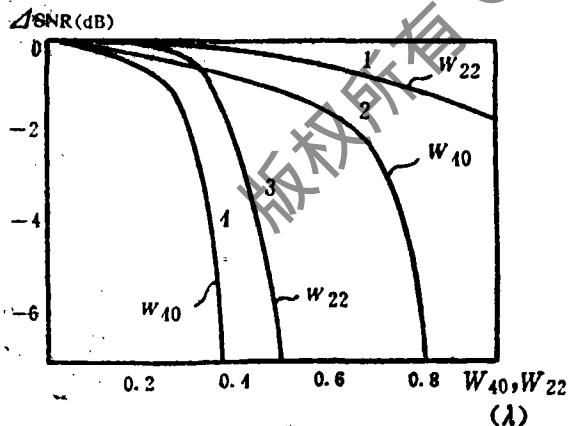


图5 球差象散对信噪比的影响

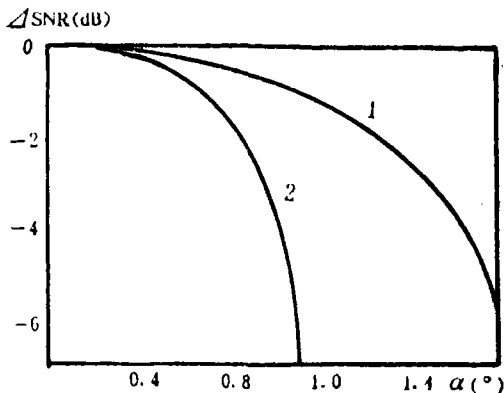


图6 慧差对信噪比的影响

增大物镜的数值孔径，使读出聚焦光斑变小，能量分布集中，从而使信号功率 ΔS 增加，直流分量 DS 降低，提高调制度，改善信噪比。高斯光束参数较大时，使信噪比降低。离焦时聚焦光斑弥散开来，同样使信噪比降低。存在跟踪误差时，光斑偏离信息轨迹，自然使信噪比大大降低。光学系统的球差影响与离焦类似。象散及慧差，破坏光斑分布的圆对称

性,实际分析表明,沿不同方向对信噪比的影响大致相同,而对读出系统的响应频率的影响差别则较大^[1],图中给出的是沿象差方向即 $\phi=0$ 时;象差及慧差对信噪比的影响。

比较只读光学头和写读光学头及双光束头,我们注意到:只读时,伺服误差和象差的影响较小(图4中的1,4;图5中的1,2及图6中的1),而在双光束光学头及WORM型写读光学头中,写入和读出共用同一光学系统和同一伺服系统,伺服误差和象差对写入过程及读出过程都有影响,因而对信噪比的影响较大(图4中的3,图5中的3,4及图6中的2)。图5和图6给出的是象散及慧差的影响是沿象差方向的($\phi=0$)。

以信噪比下降1dB为限,得到光学头的伺服要求和象差容限,如表1所示,与文献〔7〕所给出的要求相近。

表1 光学头伺服误差要求与象差容限

	$\Delta Z(\mu\text{m})$	$\Delta x(\mu\text{m})$	$W_{40}(\lambda)$	$W_{31}(\lambda)$	$W_{22}(\lambda)$
只读头	± 1.2	± 0.12	0.5	1.1	0.78
WORM头 双光束头	± 0.6	± 0.06	0.28	0.7	0.37

四、结 束 语

光盘存储技术自70年代诞生以来,已经成为现代大容量信息存储的必须手段,信噪比要求高($>54\text{dB}$)、误码率低(纠错后 $<10^{-12}$),其核心部件光学头是集光机电于一体的高精度部件,更要求优良的光学质量以及精密的自动调焦伺服和自动跟踪伺服。本文以脉冲响应函数方法分析了光盘存储系统的信噪特征,以及受各种光学象差及伺服误差的影响,从而导出了各类光盘系统光学头的光学象差容限和伺服误差要求,对于指导实际光学头光学设计和伺服控制系统设计,具有重要意义。

参 考 文 献

- 〔1〕 Braat J M, Bouwhuis. Appl Opt, 1978; 17 (13); 2022
- 〔2〕 Jipson V B, Williams C C. Appl Opt, 1983; 22 (14); 2202
- 〔3〕 Kubota S. Appl Opt, 1987; 26 (18); 3961
- 〔4〕 巩马理,清华大学博士学位论文,北京,1989
- 〔5〕 David T, Bloomberg D S. Opt Engng, 1986; 25 (7); 881
- 〔6〕 Personick S D. Optical fiber transmission systems. New York, Plenum Press, 1981
- 〔7〕 Finkestein B I, Williams W C. Appl Opt, 1988; 27 (4); 703

收稿日期:1990年9月11日。 收到修改稿日期:1991年1月15日。