

全息分路器的二维像差平衡和 相位补偿函数的计算

徐大雄 徐 左 王 本 傅子平
(北京邮电学院)

提 要

本文用像差平衡的方法求出优化的全息分路器光路结构参量。在这一方法中, 波长移动产生的波像差达到最小值。通过光路追迹求出了点光源点的像点尺寸。为了减小像点尺寸, 我们找到了一种相位补偿函数, 通过计算全息实现相位补偿, 并求出补偿后的像点尺寸。

一、引 言

过去二十年中全息技术与全息光学元件^[1](英文缩写为 HOE)——一种薄膜色散元件得到了迅速发展。光通信中全息波分复用分路器(英文缩写为 HWD)的主要功能是应用全息光学元件色散的特点把不同波长的光在空域中分开^[2,3]。本文对全息波分复用分路器的下述特性进行了讨论和计算。

(1) 考虑了由于波长移动所造成的像差, 并用像差平衡的方法, 求出优化的光路结构, 使像差达到最小值。

(2) 对所设计的全息波分复用分路器的光路进行光线追迹, 得到了用均方根(RMS)表示的几何像差的大小。

(3) 为了减小像差, 特别是垂直像差平衡方向的球差, 我们在优化的光路结构中引入补偿相位, 得到了优化的补偿相位多项式。补偿相位可通过计算全息产生^[4]。

二、波长移动产生的像差及像差平衡

设全息波分复用分路器的记录点光源和再现点光源在一个平面内。各个像差系数可用下面式子表示:

$$\left. \begin{aligned} S &= (1/R_c^2) - (1/R_r^2) + \mu [(1/R_c^2) - (1/R_r^2)], \\ C &= (\sin \alpha_c / R_c^2) - (\sin \alpha_r / R_r^2) + \mu [(\sin \alpha_c / R_c^2) - (\sin \alpha_r / R_r^2)], \\ A &= (\sin^2 \alpha_c / R_c) - (\sin^2 \alpha_r / R_r) + \mu [(\sin^2 \alpha_c / R_c) - (\sin^2 \alpha_r / R_r)]. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

为了消像差, 令球差的最大值等于像散的最大值的负值且慧差为零, 即

$$|\Delta S|_{\max} = -|\Delta A|_{\max}, \quad \Delta C = 0. \quad (2)$$

这就是 Latta 引入的像差平衡条件^[5,6]。在像差平衡中, 为了提高全息波分复用分路器

的耦合效率,使经过原点的再现光满足布拉格条件。经过计算,得到了优化的全息波分复用分路器光路结构

$$\begin{aligned} R_C &= -2.03 \text{ cm}, R_I = 3.47 \text{ cm}, R_O = 4.51 \text{ cm}, \\ R_R &= 4.43 \text{ cm}, \rho_0 = 0.5 \text{ cm}, \\ \alpha_C &= 6.86^\circ, \alpha_I = 24.52^\circ, \alpha_O = 33.00^\circ, \alpha_R = 13.75^\circ, \\ \mu &= 0.85/0.488. \end{aligned}$$

像差平衡的结果如图 1 所示。沿消像差方向,由于像差平衡,最大的剩余像差发生在归一化孔径的 $(\sqrt{2}/2)$ 处,值为 2λ 。在垂直于消像差方向,由于无像差平衡,最大孔径处的像差为 8λ 。

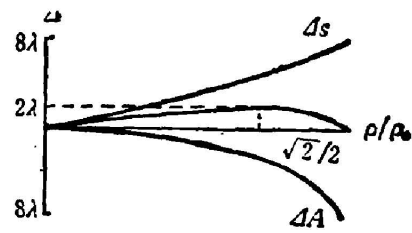


Fig. 1 Wavefront aberrations after aberration balancing

三、全息波分复用分路器光路的光线追迹

以上我们求得了用波像差表示的像差平衡结构。为了更直观地表述,用光线追迹可求出在像平面上的几何像差。光线追迹可采用如下方程

$$\left. \begin{aligned} \phi_I &= \phi_C + \mu(\phi_O - \phi_R), L_I = L_C + \mu(L_O - L_R), \\ M_I &= M_C \mu(M_O - M_R), N_I = \sqrt{1 - L_I^2 - M_I^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中脚标 I, C, O, R 分别表示像波,再现波,物波及参考波; L, M, N 代表 X, Y, Z 方向的方向余弦, $\mu = (\lambda_C/\lambda_O)$ 是再现波长与记录波长之比。 L, M, N 同 ϕ 之间的关系是

$$L = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial x}, M = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial y}, N = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial z}. \quad (4)$$

由于离轴,像平面应垂直于主光线,才能得到较小的光斑。若离轴角为 α , 则像面坐标 x'_n, y'_n 为

$$\left. \begin{aligned} x'_n &= [x_n + (L_I Z_I / N_I) - Z_I \text{tg } \alpha] \cos \alpha, \\ y'_n &= y_n + (M_I Z_I / N_I), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中 Z_I 为像距在 Z 轴上的投影; x_n, y_n 为全息图孔径上的坐标。

用均方根表征几何像差的大小。均方根定义为

$$\left. \begin{aligned} \text{RMS} &= \sqrt{(1/K) \sum_{j=1}^K a_j^2}, \\ a_j^2 &= (1/N) \sum_{n=1}^N [(x'_n - \langle x'_n \rangle)^2 + (y'_n - \langle y'_n \rangle)^2], \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中 a_j^2 表示某一波长的均方根平方; K 表示所要分路的路数。

对前述像差平衡的光路结构进行光线追迹,结果见表 1。

Table 1 Geometrical aberration after aberration balancing

Wavelength (μm)	RMS (μm)	Wavelength (μm)	RMS (μm)
0.80	346	0.85	100
0.81	283	0.86	141
0.82	224	0.87	200
0.83	173	0.88	224
0.84	141	0.89	283

四、引入补偿相位,进一步消像差

在设计全息波分复用分路器时,为计算方便起见,考虑记录点光源和再现点光源在一个平面内的像差平衡。这时在垂直于像差平衡方向,球差值较大。在参考光中加入补偿相位可使球差值大大减小。补偿相位可由计算全息产生。

设补偿相位的位相 $\Delta(x, y)$ 和参考光波的位相 $\phi'_R(x, y)$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \Delta(x, y) &= C_1x^2 + C_2y^2 + C_3x^2y^2 + C_4x^4y^4, \\ \phi'_R(x, y) &= \phi_R(x, y) + \Delta(x, y), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中 $\phi_R(x, y)$ 为原参考光位相。对光路追迹求出均方根,经过优化,得到多项式 $\Delta(x, y)$ 的系数。如果将各个通道同时进行优化,可使各个通道的像差分配比较均匀。经过计算,当

$$C_1 = 0.10\lambda, C_2 = -1.87\lambda, C_3 = 1.46\lambda, C_4 = -6.92\lambda \quad (8)$$

时,得到表 2 所示的结果。和表 1 的结果比较,像差进一步减小。

Table 2 Geometrical aberration after phase compensation

Wavelength (μm)	RMS (μm)	Wavelength (μm)	RMS (μm)
0.80	336	0.85	59
0.81	270	0.86	87
0.82	206	0.87	143
0.83	144	0.88	207
0.84	88	0.89	265

五、结 束 语

本文研究了消全息波分复用分路器波长移动的像差。像差的大小直接影响到全息波分复用分路器的可行性。我们用像差平衡技术及补偿位相概念消像差,得出了较为满意的结果,为全息波分复用分路器的设计及实际应用,指明了方向,提供了依据。

参 考 文 献

- [1] D. H. Close; *Optical Engineering*, 1975, **14**, No. 5 (Sep-Oct), 408.
- [2] W. J. Tomlinson; *Applied Optics*, 1977, **16**, No. 8 (Aug), 2180.
- [3] J. L. Horner and J. E. Ludman; *Applied Optics*, 1981, **20**, No. 10 (May), 1845.
- [4] W. H. Lee; *Progress In Optics*, (E. Wolf, Amsterdam, North Holland), 1978, 121.
- [5] J. N. Latta; *Applied Optics*, 1971, **10**, No. 3 (May), 599.
- [6] J. N. Latta; *Applied Optics*, 1971, **10**, No. 3 (May), 609.

Two-dimensional aberration-balancing and computation of phase compensation function for holographic wavelength demultiplexer

XU DAXIONG, XU ZUO, WANG BEN AND FU ZHIPING

(Beijing Institute of Posts and Telecommunication)

(Received 12 September 1985)

Abstract

Optimized parameters of the optical configuration of holographic wavelength demultiplexer (HWD) have been obtained with aberration balancing. The wavefront aberration caused by wavelength shift has been minimized. The image size of a point source formed by HWD was determined by ray tracing. To reduce the size of the image, we propose a phase compensation function to calculate the image size. The phase compensation could be achieved by Computer-Generated Hologram (CGH).