

模拟合成孔径雷达数据片波差的测量和胶片、波差的容限

金 友

(中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学实验室)

提 要

本文介绍一种用马赫-陈德干涉系统测量模拟合成孔径雷达数据片波差的方法。该法能把两种原因产生的波差区分开来,即把通过胶片变形的波面与平面参考波面比较,求出胶片厚度不平产生的波差;把合成孔径雷达数据片的一级衍射波面与两个半径不等的参考球面波比较,分别求出由模拟装置产生的方位维和斜距维波差。本文给出一些实验结果和分析。这种方法还可以用于测量真实合成孔径雷达数据片的波差。

由胶片厚度变化产生的波差可以用液体门补偿。但是,在实际中使用液体门是很繁复的,有时也没有必要。因此,我们从瑞利准则出发导出合成孔径雷达数据片胶片厚度变化产生的波差的容限,以此作为判断是否要用液体门的依据。

关键词: 模拟合成孔径雷达数据片,波差,波差容限。

一、引 言

理想的模拟点目标合成孔径雷达数据片[简称模拟片,是用光学方法(或电子计算机)制作的合成孔径雷达数据片^[1]]。当用垂直于模拟片的均匀平行相干光照明时,在模拟片平面透过的零级光和正一级衍射光可表为

$$g(x, r) = \left\{ A + B \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta\right) \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \left(-\frac{x^2}{2f_x} + \frac{r^2}{2f_r}\right)\right] \right\} \text{rect}\left(\frac{x}{b_x}\right) \text{rect}\left(\frac{r}{b_r}\right), \quad (1)$$

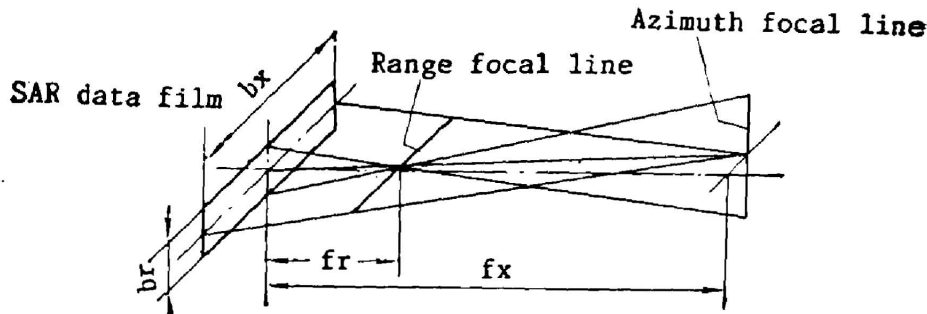


Fig. 1 Characteristic numbers of SAR data film of one point target

式中 A, B 为两个常数。第一项表示平面波(零级光);第二项表示像散波振面(衍射光)。衍射光束的中心相对零级光的倾角为 θ 。随着光的传播衍射光将会聚成两条正交的直线,两线距模拟片的距离分别为方位焦距 f_a 和斜距焦距 f_r , b_a 为模拟片的数据长度, b_r 为数据宽度。如图 1 所示。

实际模拟片是有像差的,它的波差主要来自两个方面:模拟装置产生的波差 δ_s 和胶片片基及乳剂厚度不平产生的波差 δ_d (简称胶片波差)。带有波差的模拟片可表为

$$g'(x, r) = \left\{ A + B \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta\right) \cdot \exp\left[i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2}{-2f_a} + \frac{r^2}{-2f_r}\right) - i \frac{2\pi}{\lambda} \delta_s(x, r)\right] \right\} \cdot \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda} \delta_d(x, r)\right] \text{rect}\left(\frac{x}{b_a}\right) \text{rect}\left(\frac{r}{b_r}\right). \quad (2)$$

本文介绍的方法,不仅能测模拟片的波差,而且还能把两种不同因素产生的波差区分开来,以便分别处理。且可以检测真实合成孔径雷达数据片的波差,包括胶片波差和合成孔径雷达运算产生的波差。胶片波差可以用液体门补偿^[2],因此,总能做出波差很小的合乎标准的模拟片,供合成孔径雷达光学处理器检测使用^[3]。

在合成孔径雷达光学处理器工作状态下,使用液体门补偿胶片波差是很繁复的。那么,是否可以不用液体门?本文从瑞利准则出发,导出合成孔径雷达数据片的胶片波差容限,以说明可以不用液体门的前题条件。

二、波差的测量

1. 测量装置

为了测量模拟片的波差,且能把胶片波差和模拟装置产生的波差分开,作者采用图 2 所示的马赫-陈德干涉装置。激光扩束后被分成两束:一束参考光束(1);另一束测试光束(2)。在测试光束中放两个焦距相等的球透镜 L_1 和 L_2 , 构成一倍的望远系统。被检测的模拟片和液体门放在 I 处,在 I' 处进行记录, I 和 I' 是共轭的。在两透镜公共焦平面 F 处放一个光阑。在比较光路中放一个质量较好的球透镜 L_c , 要求 L_c 的轴上波差小于 $\lambda/10$ 。

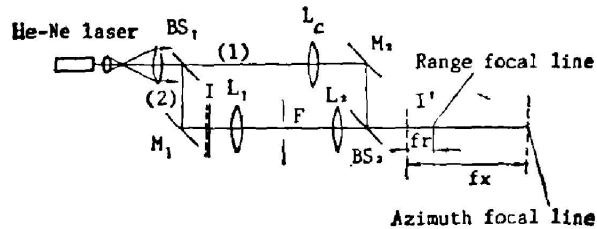


Fig. 2 Schematic of a Mach-Zehnder interferometer used for measuring wavefront aberration

首先要对测量装置进行调整。在光路中先不放 L_c 、模拟片和液体门。调整两路光在 I' 处重叠,并且使 I' 处的干涉场呈现零级条纹,至少装置本身在 I' 处的波差不应大于。

2. 胶片波差的测量

装置调好后,把模拟片(不加液体门)放到 I 处,调整下处光阑只让零级光通过,则 I' 处记录的干涉条纹照片如图 3(a)所示(“+”表示高干涉级,“-”表示低干涉级)。由于 F 处光阑挡住了一级衍射光($B=0$),并且参考光路中没放球透镜 L_c ,因此,干涉场的干涉条纹是由通过模拟片的零级光与平面参考光干涉产生的,其光强分布为

$$I_d = C^2 + A^2 + 2AC \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} \delta_d(x, r) \right] \text{rect} \left(\frac{x}{b_x} \right) \text{rect} \left(\frac{r}{b_r} \right). \quad (3)$$

胶片波差 $\delta_d(x, r)$ 与图 3(a) 干涉条纹级差 $\Delta m_d(x, r)$ 间的关系为

$$\delta_d(x, r) = \Delta m_d(x, r) \lambda. \quad (4)$$

为了方便, 一般把模拟片的波差分解成方位维 x 波差和斜距维 r 波差*。由图 3(a) 沿 x 轴测得的方位维胶片波差 $\delta_d(x, r=0)$ 曲线示于图 3(b); 沿 r 轴测得的斜距维胶片波差 $\delta_d(x=0, r)$ 曲线示于图 3(c)。

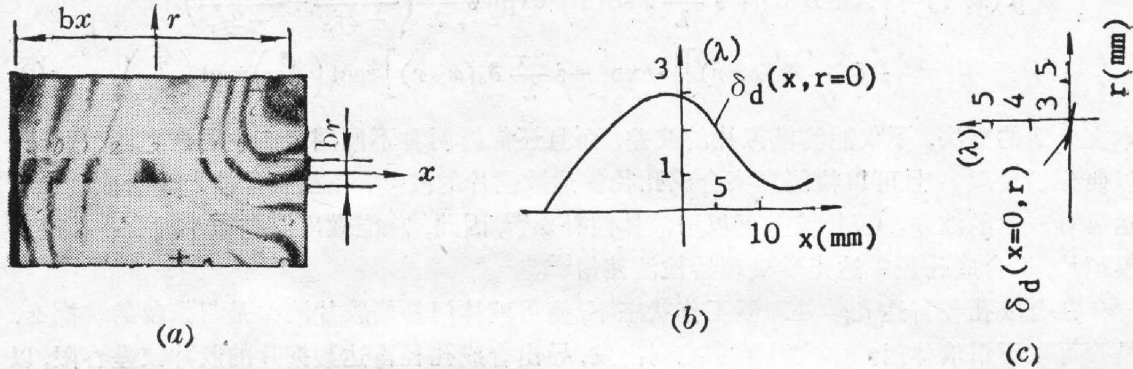


Fig. 3

- (a) The wavefront aberrations from the film thickness variations;
- (b) The $\delta_d(x, r=0)$ curve for the azimuth dimension;
- (c) The $\delta_d(x=0, r)$ curve for the ranse dimension

3. 模拟装置产生的波差的测量

把模拟片加上液体门放到图 1 的 I 处, 调整 F 处光阑挡住模拟片的零级光, 只让正一级衍射光通过; 在比较光路中放入 L_c 。为分别测得模拟片的方位维和斜距维的波差, 移动透镜 L_c 使它的焦点先与模拟片的方位焦线重合, 然后再与斜距焦线重合, 在 I' 处依次记录的照片, 如图 4(a)、图 4(b) 所示。由于模拟片的零级光被挡掉 ($A=0$), 用液体门补偿了胶片波差 ($\delta_d=0$)。从 (2) 式可以看出, 测试光路来的光可用下式表达:

$$g'_1(x, r) = B \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta \right) \exp \left\{ i \frac{2\pi}{\lambda} \left[\frac{x^2}{-2f_x} + \frac{r^2}{-2f_r} - \delta_e(x, r) \right] \right\} \times \text{rect} \left(\frac{x}{b_x} \right) \cdot \text{rect} \left(\frac{r}{b_r} \right). \quad (5)$$

这时由比较光路来的光为倾斜的标准球面波:

$$f(x, r) = C \exp \left(i \frac{2\pi}{\lambda} x \sin \theta \right) \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2 + r^2}{-2f_e} \right) \right], \quad (6)$$

式中 θ 角是由横向移动 L_c 导入, f_e 为 L_c 的焦点到 I' 面的距离。两路光在 I' 面干涉光强分布为

$$I_e = C^2 + B^2 + 2BC \cos \left[\frac{x^2 + r^2}{-2f_e} - \frac{x^2}{-2f_x} - \frac{r^2}{-2f_r} + \delta_e(x, r) \right] \times \text{rect} \left(\frac{x}{b_x} \right) \text{rect} \left(\frac{r}{b_r} \right). \quad (7)$$

* 坐标系原点设在模拟片像的中心, 两坐标轴 (x, r) 分别平行于数据片的方位维 (x) 和斜距维 (r)。

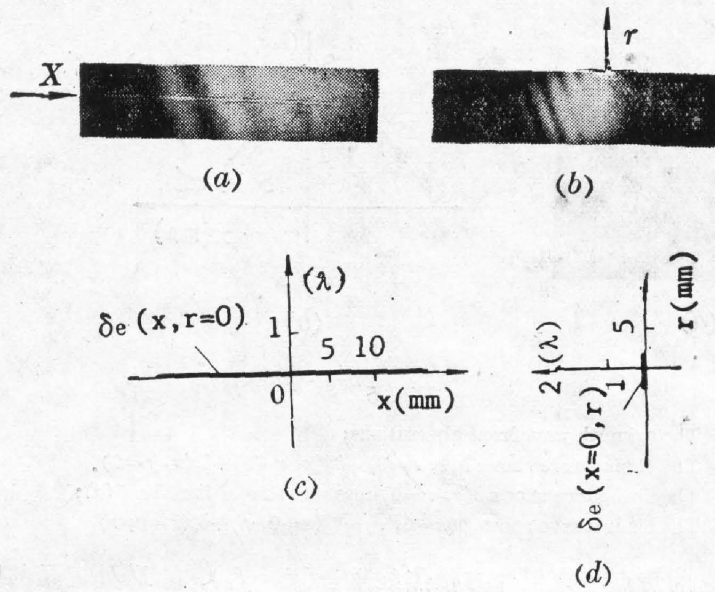


Fig. 4

- (a) The azimuth wavefront aberrations from the simulated apparatus;
- (b) The range wavefront aberrations from the simulated apparatus;
- (c) The wavefront aberration curve $\delta_e(x=0, r)$ of the azimuth dimension;
- (d) The wavefront aberration curve $\delta_e(x=0, r)$ of the range dimension

对于 L_c 的焦点和模拟片方位焦线重合的情况, 有 $f_e = f_a$, 这时模拟片的衍射波与标准球面波在 I' 处相切, 两波面间的程差与图 4(a) 干涉级差 Δm_e 有如下关系:

$$r^2 \left(\frac{1}{-2f_e} - \frac{1}{-2f_r} \right) + \delta_e(x, r) = \Delta m_e(x, r) \quad (8)$$

(8) 式中令 $r=0$ 可以求出由模拟装置产生的模拟片方位维波差 $\delta_e(x, r=0)$ 为

$$\delta_e(x, r=0) = \Delta m_e(x, r=0) \lambda_0 \quad (9)$$

$\delta_e(x, r=0)$ 曲线如图 4(b) 所示。

对于 L_c 的焦点和模拟片斜距焦线重合的情况 ($f_e = f_r$), 类似的分析处理可以得到由模拟装置产生的模拟片斜距维波差 $\delta_e(x=0, r)$ 为

$$\delta_e(x=0, r) = \Delta m_e(x=0, r) \lambda_0 \quad (10)$$

$\delta_e(x=0, r)$ 曲线如图 4(c) 所示。

从图 4 可以看出, 被检模拟片的 $\delta_e(x, r=0) \rightarrow 0, \delta_e(x=0, r) \rightarrow 0$, 即由模拟装置产生的模拟片的波差近似为零。

4. 模拟片总波差的测量

模拟片的总波差可以用模拟装置产生的波差加胶片波差来求, 即模拟片的方位维总波差 $\delta(x, r=0)$ 和斜距维总波差 $\delta(x=0, r)$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} \delta(x, r=0) &= \delta_a(x, r=0) + \delta_e(x, r=0), \\ \delta(x=0, r) &= \delta_a(x=0, r) + \delta_e(x=0, r). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

对应的曲线分别如图 5(b) 和图 5(c) 虚线所示。

模拟片的总波差也可以用图 2 装置按上面测 δ_e 的方法来测。把模拟片上的液体门去掉

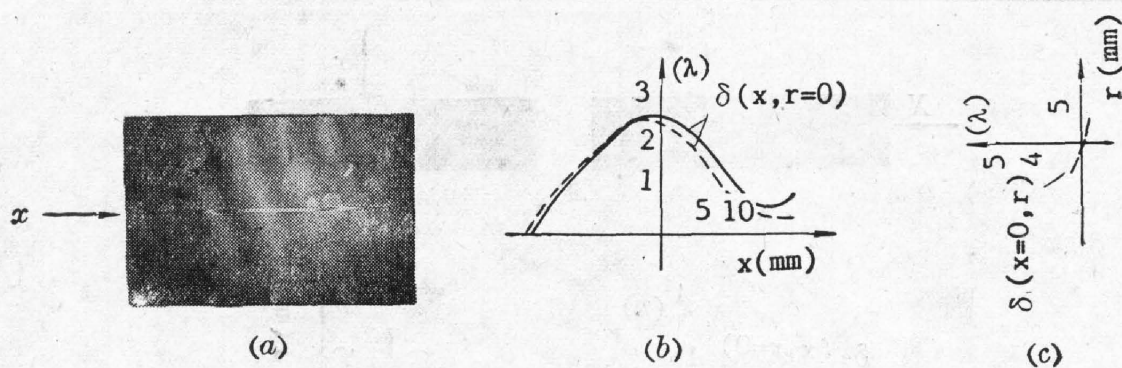


Fig. 5

- (a) The azimuth wavefront aberrations;
 (b) The chain curve shows $\delta(x, r=0) = \delta_a(x, r=0) + \delta_e(x, r=0)$.
 The full curve shows $\delta(x, r=0)$ measured from the Fig. 5(a);
 (c) The chain curve shows $\delta(x=0, r) = \delta_a(x=0, r) + \delta_e(x=0, r)$

($\delta_a \neq 0$), 移动 L_c 使它的焦点与模拟片方位焦线重合 ($f_e = f_x$), 在 I' 处记录的照片如图 5(a) 所示, 由图片可测得方位维总波差 $\delta(x, r=0)$, $\delta(x, r=0)$ 曲线如图 5(b) 实线所示; 为求斜距维总波差 $\delta(x=0, r)$, 必须移动 L_c 使它的焦点与模拟片斜距焦线重合, 方法与上面类似, 这里从略。

从实验结果可以看出, 模拟片的总波差等于模拟装置产生的波差与胶片波差之和。如果用模拟装置的办法来解决; 胶片波差可以用液体门补偿。因此, 总是能够做出合乎标准的模拟片来。

三、胶片波差容限

合成孔径雷达的数据要用胶片记录, 就必然存在胶片波差, 自然还会有合成孔径雷达运算的波差。这里只考虑胶片波差。

把合成孔径雷达数据片和合成孔径雷达光学处理器看作一个系统, 于是数据片的通光口径可看作是这个系统的入瞳, 每个点目标合成孔径雷达数据片的口径 $b_x \times b_r$ 就可以看作是整个入瞳的一个“入瞳”。假设合成孔径雷达光学处理器是理想的, 合成孔径雷达数据片存在胶片波差 $\delta_a(x, r)$, 那么这个系统出瞳处波差完全是由这个胶片波差造成的。如果合成孔径雷达光学处理器的纵向放大率为 M , 则入瞳波差和出瞳波差 Δ_e 有如下关系

$$\delta_a(x, r) = \frac{\Delta_e}{M}, \quad |x| \leq b_x, \quad |r| \leq b_r. \quad (12)$$

对于纵横比为 K 的合成孔径雷达数据片, 由于合成孔径雷达光学处理器的两维放大率不相等, 其方位维纵向放大率为 $(1/K^2)$; 斜距维纵向放大率一般为 1。按瑞利准则系统出瞳处的波差不应大于 $(\lambda/4)$, 于是对于胶片方位维波差和斜距维波差容限分别为

$$\left. \begin{aligned} \delta_a(x, r=0) &\leq \frac{\lambda}{4} K^2, & |x| &\leq b_x, \\ \delta_a(x=0, r) &\leq \frac{\lambda}{4}, & |r| &\leq b_r. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

换算成单位长度上胶片波差容限 $u(\lambda/\text{mm})$ 分别为

$$\left. \begin{aligned} u &= [\delta_d(x, r=0)/b_s] \leq \left(\frac{\lambda}{4} K^2/b_s\right), \\ u &= [\delta_d(x=0, r)/b_r] \leq \left(\frac{\lambda}{4}/b_r\right). \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

显然,是否要用液体门补偿,不仅与合成孔径雷达数据片的胶片波差 δ_d 有关,还与其分辨率 (b_s, b_r)、纵横比 (K 值) 以及是否采用雷达预脉冲压缩 (是否 $b_r \rightarrow 0$) 等有关。

我们初步用实验测得天津 I 型全息干板 $\bar{u} \approx 0.2(\lambda/\text{mm})$, 航微 II 胶片的 $\bar{u} \approx 0.05(\lambda/\text{mm})$, 记录合成孔径雷达数据的胶片比上述胶片平度还要好些。因此,对于纵横比 $K (\approx 10)$ 较大,分辨率不高 ($b_s \leq 100 \text{ mm}$), 并且有雷达预脉冲压缩 ($b_r \approx 0$) 的合成孔径雷达数据片,没有要用液体门。

参加本实验工作的还有蒲泽民同志。

参 考 文 献

- [1] 金 友, 周玉斌等; 《物理》, 1981, 10, No. 7 (Jul), 433~436.
- [2] J. W. Goodman; 《Introduction to Fourier Optics》, (McGraw-Hill Book Company, New York, 1968), 154.
- [3] E. H. Osburn; 1973, AD-759512.

Measurement of wavefront aberration of simulated SAR data film and tolerance of wavefront aberration of the film

JIN YOU

(*Applied Optics Laboratory, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 19 March 1987; revised November 1987)

Abstract

Simulated synthetic aperture radar (SAR) data films free from error of the SAR operation, but there still are aberrations introduced by the both film thickness variations and simulated apparatus. In this paper we present a method that wavefront aberrations of simulated SAR data film can be measured by Mach-Zehnder interferometer. The method can be used separately for measuring the wavefront aberrations introduced by two different reasons. The wavefront aberration introduced by the film thickness variations is measured as compared the wavefront through the film with the reference plane wavefront. And as compared separately the diffraction wavefront from the film with two reference spherical wavefronts of different radii we obtained separately the azimuth wavefront aberration and the range wavefront aberration introduced by the simulated apparatus. In this paper some experimental results and analyses are presented. The method is also suitable for measuring wavefront aberrations of true SAR data film.

The wavefront aberration introduced by the film thickness variations may be removed by a liquid gate. A tolerance of the wavefront aberration introduced by the film thickness variations is deduced from the Rayleigh criterion. From the tolerance we can judge whether or not the liquid gate is necessary.

Key words: simulated SAR data film; wavefront aberration; tolerance of the wavefront aberration.