

合成孔径雷达光学处理器输片机设计

刘伯翔 朱天贤 贾林贤 刘玉秀

摘要：介绍了四通道合成孔径雷达光学处理器输片机的基本性能及设计中的一些考虑，分析了图像分辨率有重要影响的误差因素。

一、概 述

输片系统是合成孔径雷达光学处理器的重要组成部分，它包括数据片输片机和图像片输片机。数据片输片机使雷达数据片匀速稳定运动，图像片输片机则把经光学系统处理后获得的图像连续地记录到底片上。

根据合成孔径雷达及其光学处理器的工作原理，要求数据片输片机含有下列分系统：

调速系统，保证图像有高的分辨率，低的畸变及合适的曝光；

张力控制系统，减少胶片弹性变形对图像分辨率的影响；

调焦系统，使图像清晰；

升降机构，便于处理多通道数据片；

倾斜机构，使数据片的方位焦面和斜距焦面经过光学系统后得以重合；

读出附加信息的装置。

根据上述要求，数据片输片机除需进行高精度的输片外，还需有三种动作：平移、旋转、升降。为此数据片输片机的总体布局分为四层，如图1所示：

第一层，是底座。第二层和第一层之间是直线滚动导轨，距离调焦用。第三层和第二层之间是圆弧滚动导轨，调整胶片倾角用。第四层，最上层，可沿第三层上的二立柱升降，使胶片上的各通道中心依次与光轴重合。调速系统、张力控制系统、附加信息读出装置等均在第四层上，第四层上还有片门、导轮等。

图像片输片机包含有调速系统、张力控制系统和倾斜机构，此外，还有可调狭缝、片盒、检查像面用的检焦显微镜和附加信息记录装置。

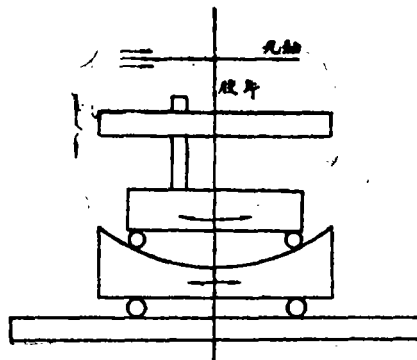


图1 数据片输片机总体示意图

两输片机的基本性能如表 1 所示。

表 1 输片机的基本性能

	数据片输片机	图像片输片机
片 宽	9.5" (241mm)	5" (127mm)或70mm
片 容 量	60m	30m
调 速 范 围	1~100mm/s	0.1~100mm/s
调 焦 范 围	200mm	
倾 角 范 围	±17°	±17°
升 降 范 围	185mm	
相对速度误差	小于0.1%	小于0.1%
输片平稳性		
横 向 跳 动	小于 4 μm	小于 4 μm
纵 向 跳 动	小于 4 μm	小于 4 μm

二、调速系统

调速系统是输片机的核心部分。输片速度的慢变化将引起图像的畸变，输片速度的瞬时变化将降低图像的分辨率。

因为数据片的缩比，方位维是斜距维的 $1/K$ ，因此光学系统需将图像在方位维压缩。为使图像片与光学系统输出的图像同步运动（这种同步称为跟踪），就要求图像片的输片速度为数据片速度的 $1/K$ 。无论哪一个输片机输片速度的误差，都引起跟踪误差，跟踪误差直接影响方位分辨率和方位畸变。

设数据片的速度为 v_1 ，则光学系统输出的图像速度为 v_1/K ，若曝光狭缝的宽度为 h ，则图像通过狭缝的时间为 $\frac{h}{v_1/K} = \frac{hK}{v_1}$ ，若图像片的速度为 v_2 ，则图像在图像片上曝光时，理想点被拉长：

$$\Delta l = \frac{hK}{v_1} \left| v_2 - \frac{v_1}{K} \right| = h \left| \frac{Kv_2 - v_1}{v_1} \right|$$

当 $v_1 = Kv_2$ 时误差为 0，当 v_1 、 v_2 和 K 有误差时，分别引起跟踪误差： $\Delta l_1 = h \frac{\Delta v_1}{v_1}$ ，

$$\Delta l_2 = h \frac{\Delta v_2}{v_2}； \Delta l_3 = h \frac{\Delta K}{K}。$$

$\Delta l_3 = h \frac{\Delta K}{K}$ 是光学系统调整误差，是系统误差，可以修正。

减小狭缝宽度，可减小跟踪误差，但需增大照明光强或降低处理速度。

为减小跟踪误差，需严格限制两输片机的速度误差。

若狭缝宽度为 1 mm，则速度误差 $\frac{\Delta v}{v}$ 应小于 0.5%。因为此时引起的跟踪误差相当于地面分辨率误差

$$\Delta\rho = h \frac{\Delta v}{v} q = 0.5\text{m} \quad (q = 10^5, \text{图像缩比}),$$

这对于 3 m 分辨率的合成孔径雷达来说是允许的。

为保证输片精度，采用了由力矩电机、高灵敏度测速机和光电编码器组成的具有复合控制的高精度、宽带锁相调速系统。

力矩电机和测速机的转子及编码器的转动光栅均装在同一转轴上。整个轴系，固定光栅端面的端面跳动小于 $1\mu\text{m}$ ，在承受胶片张力载荷的情况下，轴的径向跳动小于 $1.5\mu\text{m}$ 。

编码器装有两个读数头，即采用对径获取信号。

当编码器的输出信号锁相于信号发生器的标准信号时，相位抖动小于 $\frac{\pi}{2}$ ，此时引起的胶片切向位移误差为

$$\Delta l = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\pi d}{n},$$

$d = 30\text{mm}$ 转轴直径，

$n = 10800$ 光栅刻线数，

$\Delta l = 2\mu\text{m}$ ，相当于地面分辨率误差

$\Delta\rho = 2\text{m}$ 。

三、张力控制系统

为了使胶片在传输时不打滑，并保持平直，需对胶片施加张力。而张力控制系统的作用是使张力保持恒定，从而减小由于张力起伏引起的胶片弹性变形，保证图像质量。

在张力控制系统中，采用了光电电位计作为张力传感器，如图 2 所示。

胶片绕过隔震辊轮，隔震辊轮固定在发条轴上，发条盒装在输片机机座上，当收片（供片）力矩电机和发条对胶片施加的张力平衡时，发条轴及其上的楔形狭缝处于某一平衡位置。有了张力扰动时，楔形狭缝离开平衡位置，光信号发生变化。所以实际上，张力控制系统是一个位置伺服系统。

采用光电电位计，避免了电阻式电位计由于长期工作而磨损的缺点。

张力传感器中使用发条式蜗旋弹簧，占用空间小。若用圆柱螺旋弹簧，达到同样的张力控制精度，则弹簧需要很长。

隔震辊轮绕发条轴的转角受到限位开关的限制。根据发条参数及最大转角，可计算出胶片上张力的最大变化为 5 g。

事先标定张力和光电传感器输出电压之间的关系，然后用示波器监视光电传感器输出电压的波动，由此测得张力抖动为 3 g。

根据虎克定律，张力抖动引起的片门处胶片弹性变形的变化为

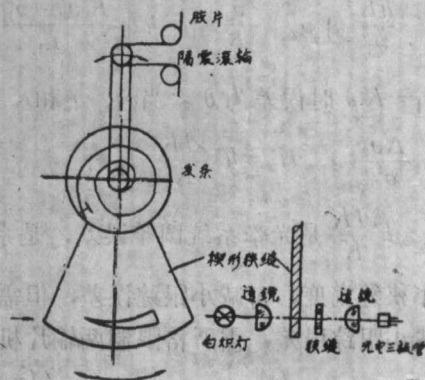


图 2 光电电位器示意图

$$\Delta l = \frac{l \Delta F}{Ebh}$$

$l = 300\text{mm}$, 胶片从传输轴到片门处的长度,

$E = 300\text{kg/mm}^2$, 胶片的弹性模量,

$b = 241\text{mm}$, 胶片宽度,

$h = 0.0635\text{mm}$, 胶片厚度,

$\Delta l = 0.3\mu\text{m}$, 相当于地面分辨率误差 $\Delta\rho = 0.3\text{m}$ 。

四、调焦系统

调焦系统是调整数据片沿光轴位置的, 其结构示意图如图 3。

有三种工作方式: 手动调焦、电动快速调焦、电动微调。

操作人员通过图像片输片机上的检焦显微镜直接观察图像的清晰程度, 同时转动多圈的参考电位器, 驱动执行电机(“微调”方式)或用按钮给电机供电(“快速”方式), 带动蜗轮蜗杆和滚珠丝杠, 实现调焦。这样一个人即可方便地进行检焦和调焦。

蜗杆螺旋线头数 $Z_1 = 4$, 蜗轮齿数 $Z_2 = 54$, 滚珠丝杠螺距 $t = 4\text{mm}$, 由此, 参考电位器每转一圈(即蜗杆转一圈), 调焦 $l = t \cdot \frac{Z_1}{Z_2} = 0.3\text{mm}$ 。调焦精度是足够的。

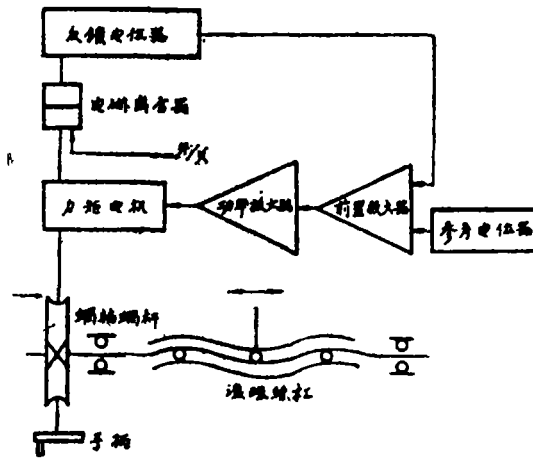


图 3 调焦系统示意图

五、输片机精度检测

使胶片在恒定张力下作匀速平稳的运动是对输片机的重要要求。

我们采用了如图 4 所示的方法检测输片机的输片精度。

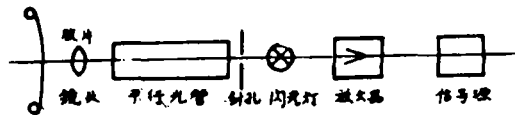


图 4 输片精度检测方法示意图

用信号源控制闪光灯闪光, 通过平行光管和镜头聚成小光点, 使小光点在连续运动的胶片上曝光, 冲洗后用万能工具显微镜测量点阵中各点间的距离及点的起伏。由此测得胶片运动时纵向跳动及横向跳动均小于 $4\mu\text{m}$ 。相对速度误差小于0.3%。

参 考 文 献

[1] D. C. Robinson et. al., Basic Plane Correlator AD-732870

The Design of Film Transport for SAR Optical Processor

Liu Boxiang Zhu Tianxian Jia Linxian Liu Yuxiu

Abstract

In this paper the design of 4 channels film transport for SAR optical processor is described, major performances of this transport are introduced, some influential factors on image resolution are analyzed.