

星载合成孔径雷达 (SAR) 数据的 光电实时处理技术

唐 勇

摘要: 由于在光源、空间光调制器 (SLM) 和探测器等方面的新进展, 使得实时光信号处理器的实现成为可能; 这种处理器具有成本低、能耗小、结构紧凑等优点。本文中描述了一个 SAR 实时光电处理器, 并着重强调了 SAR 成像和处理器的基本原理, 最后对处理器中的一些问题进行了讨论。

一、概 述

合成孔径雷达 (SAR) 及其数据处理技术是目前获得高分辨率地面图像的重要手段之一。自五十年代发明合成孔径雷达以来, 它成为军事侦察和地球资源考察的重要设备。由于 SAR 的数据量非常大, 经典的处理方法 (如正锥面光学处理, 斜平面光学处理等) 都难以实现实时处理, 因此有必要对 SAR 数据实时处理进行研究。目前普遍认为数字技术是实现实时处理的最好方法之一, 然而最近几年, 由于半导体激光器、阵列探测器 (如 CCD) 以及空间光调制器 (SLM) 的高速发展及实用化, 使得 SAR 的光电实时处理成为可能。光电实时处理的特点是速度快、体积小、重量轻、耗能少、可机载或星载, 因此深入研究 SAR 的光电实时处理技术是非常必要的。

二、SAR 的数据获取

合成孔径雷达的基本原理是利用雷达与目标间的相对运动, 所产生的多普勒频移, 通过对返回信号的时间累积积分来获得方位维的高分辨率, 它的斜距维分辨率是靠宽带脉冲压缩技术获得的。合成孔径雷达的数据在数学形式上与非涅尔波带片基本相同。

假设在雷达照射地面一个点目标 (x_0, y_0) 时, 发射了 n 个雷达线性调频脉冲信号, 同时雷达接收从地面反射回来的回波信号, 其积分总时间为 nt 。(其中 $1/t$ 为雷达脉冲的重复频率 PRF)

发射波前为:

$$S(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t-nt}{\tau}\right) \exp[ib(t-nt)^2] \exp(i\omega_0 t) \quad (1)$$

其中: τ 为脉冲宽度, b 为 LFM 的 Chirp 系数, ω_0 为雷达载波角频率

天线接收到的回波信号为:

$$r(t) \cong S(t - 2Rt/c) \quad R_t = [R_0^2 + (y_0 - vt)^2]^{\frac{1}{2}}$$

其中: v 为雷达的飞行速度, $R_0 = (x_0^2 + h^2)^{\frac{1}{2}}$ 由于 $R_0 \gg |y - y_0|$

则: $R_{(t)} \cong R_{(x,t)} = R_0 + (v, nt - y_0)^2 / 2R_0$ (2)

经简化得合成孔径雷达的数据:

$$r_{(t)} = \sum_n A_{(x,t)} \text{rect} \left[\frac{t - 2R_0/c - nt}{\tau} \right] \exp[ib(t - 2R_0/c - nt)^2] \exp[i\omega(v, nt - y_0)^2 / cR_0] \exp(i2\pi v, t)$$
 (3)

从上式可看出, $r(t)$ 中的位相在斜距维和方位维都是时间的二次函数, 但由于二者的Chirp系数不同, 因此组成二维不对称的非涅尔波带片。由于有这种两维坐标的可分离性, 我们能用光电处理的方法来实时地处理SAR的数据。

三、SAR数据的实时光电处理原理

SAR数据经典的处理方法是先将SAR数据记录在照相胶片上, 经显影、定影后才对其进行处理, 显然这种方法难以实现实时处理。只有将两维的SAR数据直接输入到处理器中, 输出亦是两维的图像探测器, 这样才有可能实现SAR数据的实时处理。由于目前两维的SLM的发展还未趋成熟, 我们可以利用SAR数据的两维可分离性, 使用一维的SLM对两维信号分别进行处理。通常采用的是布拉格声光元件(AOD), 将接收到的雷达返回信号输入到AOD中, 这样在AOD中传输的超声波保持了雷达返回信号的特性, 用脉冲激光照明, 发生声光衍射, 这样完成了斜距维聚焦(压缩)。为了使方位维的信息不丢失, 需将参考正弦波与雷达返回信号一同输入到AOD中, 用干涉法保留方位维信息。方位维压缩是这样完成的, 在输出平面前放置一个匹配于方位维相位历史的强度透过固定掩膜, 该掩膜与TDI型CCD紧密接触, TDI型CCD的工作形式是变换和积累型的, 这就相当于CCD探测器不动, 而掩膜在方位方向移动, 从而完成了方位维多普勒历史与掩膜的透过率函数的相关运算, 这样就实现了方位维压缩。最后在输出平面处的电荷积累形式是两维的sin c函数(即斜距维与方位维都已聚焦)。

由于CCD探测器的每一帧都输入到串行寄存器中, 因此最后输出的图像是以滚动形式出现的。见图1

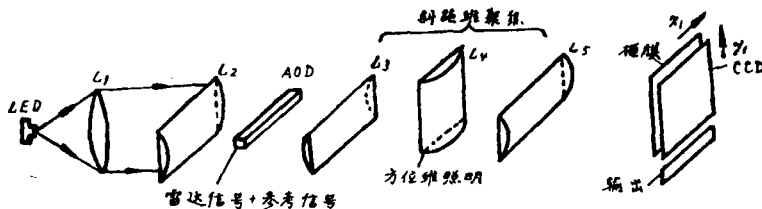


图1 AOD/CCD 光电实时处理器

最后在CCD上输出的电荷积累为:

$$Q(x_1, y_1) = \frac{1}{4} k_r \sin c \left[\frac{b\tau}{\pi v_0} \left(x_1 - \frac{2R_0 v_0}{c} \right) \right] \sin c \left[\frac{2n v_0 v_r t^2}{c \Delta y_1 R_0} \left(y_1 + y_0 \frac{\Delta y_1}{v_r t} + n \Delta y_1 \right) \right] \times \cos [2\pi v_0 x_1 + \phi] + \text{偏置项} \quad (4)$$

式中: Δy_1 是 CCD 中像素间隔, k_r 为比例系数, v_0 为超声波波速。

$$v_0 = (v_2 - v_1) / v_a \quad \phi: \text{固定位相}$$

从 (4) 式可以看出, 在输出平面的斜距维 (x_1 方向), $Q(x_1, y_1)$ 是宽度为 $\pi v_0 / b\tau$, 中心在 $x_1 = 2R_0 v_0 / c$ 处的 $\sin c$ 函数。即我们获得的是在地面位于 (x_0, y_0) 点目标在斜距维聚焦的图像。其地面斜距维分辨率为 $\sin c$ 函数在此方向的半宽度:

$$\delta_x = \frac{\pi c}{2b\tau} \quad (5)$$

式中: $b\tau/\pi$ 为雷达脉冲的带宽。典型值 $b\tau/\pi = 50\text{MHz}$, 则斜距维分辨率可达到 3m 。

在方位维 (y_1 方向), $Q(x_1, y_1)$ 是宽度为 $c\Delta y_1 R_0 / n v_0 v_r t$, 中心在 $y_1 = -y_0 \Delta y_1 / v_r t$ 处的 $\sin c$ 函数, 即我们获得了地面点目标 (x_0, y_0) 在方位维聚焦的图像, 其地面方位维分辨率为 $\sin c$ 函数在 y_1 方向的半宽度:

$$\delta_y = \frac{c R_0}{2n v_0 v_r t} = \frac{\lambda_0 R_0}{2D_s} \quad (6)$$

式中 $D_s = n v_r t$ 是雷达在积分时间 $n t$ 内所运行的距离, 即 SAR 的合成孔径长度。由于 δ_y 中只有 n 与 AOD/CCD 处理器有关, n 既是雷达发射信号的脉冲数, 又是 CCD 在变换方向 (方位维 y_1) 的象元数。因此, 方位维分辨率的大小与处理器有关。对 1000×1000 单元的 CCD, AOD/CCD 处理器的方位维分辨率为 20m (处理海洋卫星-A 的 SAR 数据)。

由于卫星与地面的相对几何关系的变化, 这时, 固定掩膜不能胜任。于是, 我们将匹配于方位维相位历史的滤波函数与参考正弦波输入到第二个 AOD 中, 该 AOD 与第一个 AOD 垂直, 用干涉方法可产生方位维参考滤波函数 (相当于固定掩膜), 这样产生了可编程的 AOD/CCD 光电实时处理器, 能很好地适应雷达与地面的相对几何关系。

四、结 论

AOD/CCD 光电实时处理器具有能耗低、重量轻、体积小、成本低的优点, 由于具有可编程性, 能实时地适应雷达——目标间几何关系的变化, 还可在处理过程中消除由于斜距走步、斜距弯曲、轨道椭圆度及目标运动带来的误差。随着 AOD/CCD 光电实时处理器中关键器件 AOD 和 CCD 的进一步发展, 这种处理器的性能将会更高。

参 考 文 献

- [1] D. Psaltis and K. Wagner, Optical Engineering 1982, 21, No. 5, p822-826
 [2] M. Haney and D. Psaltis, Applied Optics, 1988, May, 27 No. 9, p1786-1796

Real-time Optoelectronic Processing Technology for Spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) Data

Tang Yong

Abstract

Recent advances in light sources, spatial light modulators (SLM) and detectors have made it possible to implement real-time optical signal processors that are relatively compact with low power requirements and cost. In this paper a real-time optoelectronic processor for SAR is described with the emphasis on the fundamental principle of the imaging and the processor, followed by some problems in the processor.