

星载SAR成象数字信号处理

北京航空航天大学 周荫清 黄永红 李景文

DIGITAL SIGNAL PROCESSING TECHNIQUES FOR SPACE-BORNE SYNTHETIC APERTURE RADAR(SAR)

Beijing University of Aeronautics and Astronautics
Zhou Yinqing Huang Yonghong and Li Jingwen

摘要 星载合成孔径雷达(SAR)飞行高度高,速度快、探测距离远、测绘带宽,运行轨道偏离理想圆形,因此获取SAR图象的数字信号处理技术十分复杂。本文从上述特点出发,讨论了星载SAR的目标回波信号数学模型,成象过程中方位处理的机理和方法,以及多视处理。

关键词 合成孔径雷达、雷达成象处理、多视处理。

Abstract Space-borne SAR flies at high altitude, moves fast, has large radar detecting range and wide measuring swath, and its traveling orbit deviates from an ideal circle, so it is complex for digital signal processing technique to obtain SAR imagery. According to the properties mentioned above, the target return wave model of space-borne SAR, azimuth processing principle and method in the imaging, and multi-look processing are discussed in this paper.

Key words synthetic aperture radar, radar imaging, multi-look processing.

一、引言

透过地球上覆盖的大气层,从外层空间观测地球得到高分辨力雷达图象的最佳途径是采用合成孔径雷达(SAR)成象系统。SAR是一种新型的、全天候的环境资源遥感探测手段,具有良好的分辨力,能够提供类似于光学照片的图象。

从70年代中期开始,SAR从机载应用过渡到空间飞行器上。近年来,星载SAR技术取得了重大进展。1981年11月美国发射的第一架航天飞机哥伦比亚号,上面载有SIR-A成象雷达,工作7.5h成象地域为地球表面 10^4 km^2 ,图象分辨力为 $25 \times 25\text{ m}^2$ 。并取得诸如发现埃及古尼罗河道以及撒哈拉沙漠底下的古代地形特征等举世闻名的成就。星载SAR作为有效的地

1988年7月11日收到

球环境和资源遥感探测手段越来越受到人们的重视。

SAR成像是信号处理技术发展的产物。光学处理使SAR成像成为现实,数字信号处理使SAR进入实时成像的新阶段。从80年代初期,研究工作主要集中在星载SAR的数字处理上,特别是SAR目标回波信号模型的建立以及SAR实时成像的算法。

二、星载SAR目标回波模型

设星载SAR的发射脉冲为调频脉冲串

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} p(t-nT) \quad (1)$$

式中 $p(t) = a(t)\cos[\omega_0 t + \varphi(t)]$

在相干系统中,从距SAR为 $r_1(t)$ 的地面点目标反射的回波信号为

$$e(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma W_a(t-r_1(t)/c) p(t-nT-2r_1(t)/c) \quad (2)$$

式中, σ 是点目标的雷达散射系数, $W_a(t-r_1(t)/c)$ 是对应于点目标的天线方向性图。雷达与目标平面的几何关系如图1所示。

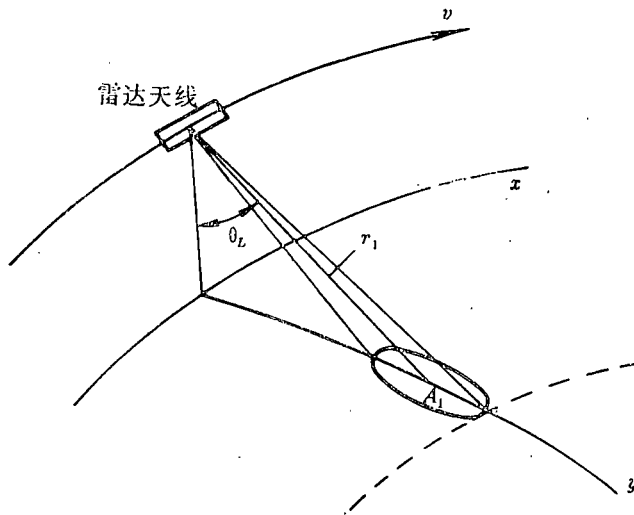


图1 SAR与目标域几何关系

经过正交通道解调后的信号为

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma W_a(t-r_1(t)/c) a[t-nT-2r_1(t)/c] \exp\left\{-j\left(4\pi r_1(t)/\lambda\right) - j\phi(t-nT-2r_1(t)/c)\right\} \quad (3)$$

式中 λ 为发射波长。

由于天线方向性函数 $W_a(t-r_1(t)/c)$ 和距离 $r_1(t)$ 在脉冲重复周期 T 内均可视为慢变化函数,故

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma W_a(nT) a[t-nT-2r_1(nT)/c] \times \exp\{-j(4\pi r_1(nT)/\lambda) - j\phi(t-nT-2r_1(nT)/c)\} \quad (4)$$

设SAR在 $t=0$ 时刻发射脉冲,在 $t=kT+\tau$ 时刻接收到脉冲,则

$$s(k, \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma W_a(nT) \exp\{-j(4\pi r_1(nT)/\lambda)\} a(kT+\tau - nT - 2r_1(nT)/c) \exp\{-j\phi[kT+\tau - nT - 2r_1(nT)/c]\} \quad (5)$$

由于窗函数 $a(t)$ 仅当 $k=n$ 时为非零,故得

$$s(k, \tau) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma W_a(nT) \exp\{-j4\pi r_1(nT)/\lambda\} \delta(kT-nT) \times a(\tau - 2r_1(kT)/c) \exp\{-j\phi(\tau - 2r_1(kT)/c)\} \quad (6)$$

令 $x=kTv$, $r=c\tau/2$,其中 v 为雷达平台运动速度,则有

$$s(x, r) = \left\{ \sigma W_a\left(\frac{x}{v}\right) \exp\left[-j4\pi r_1\left(\frac{x}{v}\right)/\lambda\right] \delta\left[\frac{2}{c}(r - r_1(x))\right] \right\} \otimes \left\{ a\left(\frac{2r}{c}\right) \delta\left(\frac{x}{v}\right) \exp\left[-j\phi\left(\frac{2r}{c}\right)\right] \right\} \quad (7)$$

对于面目标,令 $\sigma = \sigma(x, r)$,则

$$s(x, r) = \{\sigma(x, r) W_r(r)\} \otimes h(x, r) \quad (8)$$

其中

$$h(x, r) = h_1(x, r) \otimes h_2(x, r) = W_a(x) \exp\{-j4\pi r_1(x)/\lambda\} a[r - r_1(x)] \times \exp\{-j\phi[r - r_1(x)]\} \quad (9)$$

而 $W_r(r)$ 是SAR天线在距离维的照射函数。

目标 $\sigma(x, r)$ 的回波信号为

$$s(x, r) = \iint \sigma(x-x', r-r') W_r(r-r') h(x', r') dx' dr' = \iint \sigma(x-x', r-r') W_r(r-r') W_a(x') \exp\{-j4\pi r_1(x')/\lambda\} \times \frac{cv}{2} a[r' - r_1(x')] \exp\{-j\phi[r' - r_1(x')]\} dx' dr' \quad (10)$$

式中 $x' = nTv$ 。

由式 (8)、式 (9) 看出，星载 SAR 的回波信息具有二维卷积形式。信号处理的任务就是对目标的冲激响应 $h_1(x, r)$, $h_2(x, r)$ 相继地进行匹配滤波。通常对 $h_2(x, r)$ 的匹配滤波称为距离维处理，对 $h_1(x, r)$ 的匹配滤波称为方位维处理。

三、星载 SAR 成像处理方法

设卫星处在理想飞行状态下 (不考虑运动补偿)，并假定回波信号已完成距离维相关处理。现采用频谱分析法 (Specan) 完成方位维相关处理。

Specan 法的机理如图 2 所示。图 2(a) 是目标多普勒历程，图 2(b) 是参考函数。选择参考函数的频率斜率与点目标的频率斜率相反而绝对值相等。图 2(a) 与图 2(b) 相乘可得图 2(c)。于是利用梳状滤波器图 2(d) 将它们分开，从而提取到每个目标回波的信息。

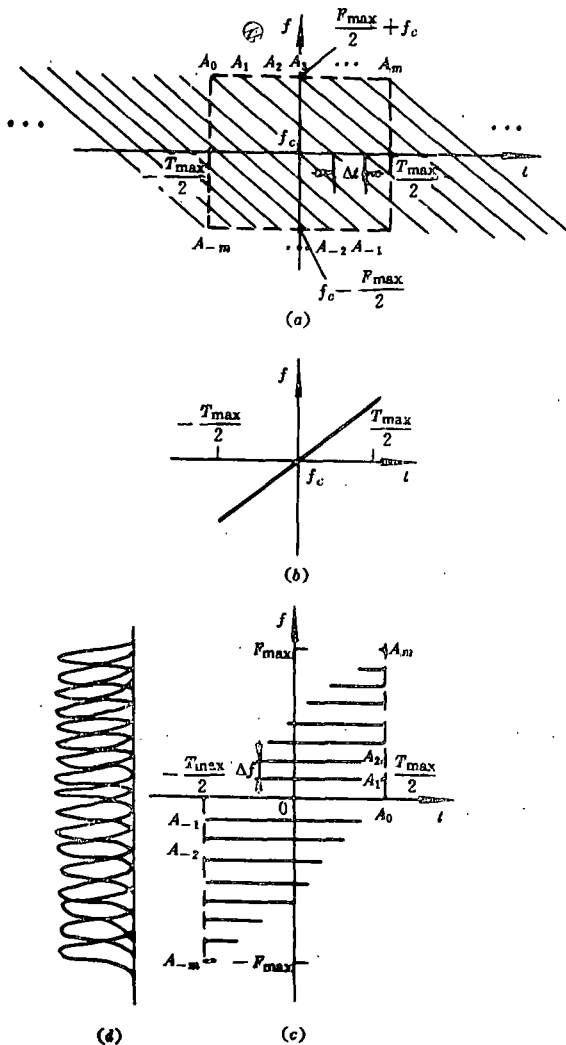


图 2 Specan 算法原理

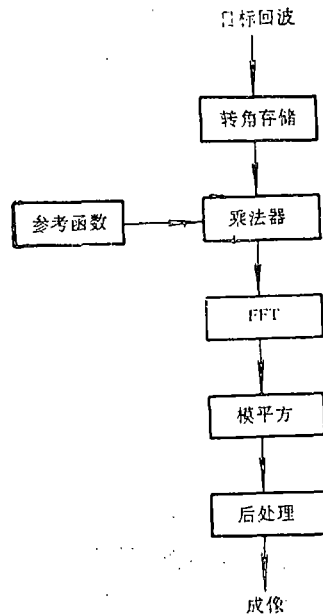


图 3 Specan 图算法实现框图

图是3Specan算法的实现框图。原理上这种方法十分简洁，但实际上在完成FFT时应注意点数及脉冲重复频率的选择，这是它的局限性。不过Specan法是一种高效算法，因此有着广阔的前景。

四、多视处理

由于对随机相位数据组进行相位相干处理运算，引起图象内出现斑纹，因此要采用多视处理消除“斑点效应”。

多视处理是将一个长孔径分成若干个短孔径进行序贯处理。这种处理方式的距离徙动效应小，聚焦深度浅、点数少。要求对一个观测区做 N 次处理，一般取 $N=4$ ，如图4所示。

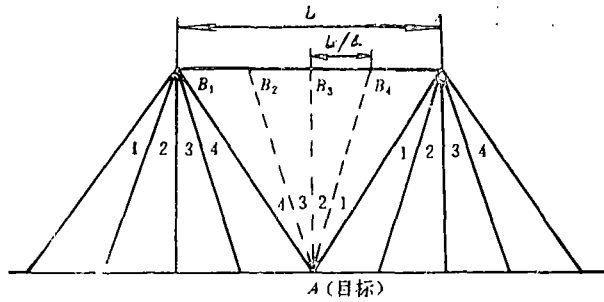


图 4 四视处理

设地面某点 A 是强反射目标，其余为弱反射目标，于是从 $B_1 \sim B_2$ 域接收到的回波场强为

$$E = \sigma_A \exp\left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 + \frac{v^2}{2R_0} t^2 \right) \right\} \quad -\frac{L}{2v} < t < -\frac{L}{4v} \quad (11)$$

在下一个 $1/4$ 孔径内，接收到的回波场强为

$$\begin{aligned} E' &= \sigma_A \exp\left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \left[R_0 + \frac{v^2}{2R_0} \left(t + \frac{L}{4v} \right)^2 \right] \right\} \\ &= E \exp\left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{vL}{4R_0} t + \frac{L^2}{32R_0} \right] \right\} \end{aligned}$$

同理，类推得

$$\begin{aligned} E'' &= E \exp\left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{vL}{2R_0} t + \frac{L^2}{8R_0} \right] \right\} \\ E''' &= E \exp\left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \left[\frac{vL}{R_0} t + \frac{L^2}{2R_0} \right] \right\} \end{aligned}$$

四视处理时，先对各视分别进行处理，然后将每视处理结果在频域分别移动 ΔF ， $2\Delta F$ 和 $3\Delta F$ 之后相加。相加结果经IFFT变换成时域数据，即得到四视处理后的最终结果。

五、计算机模拟

星载SAR回波信号模拟：

设地球是规则球体，卫星运行轨道是规则圆轨道，并设地面目标是一系列点散射体的集合，每个点散射体的后向散射系数为

$$\sigma(i, j) = \sigma e^{j\phi(i, j)}$$

若雷达天线是等增益的，则在任意时刻 t ，每个散射体的回波信号为

$$s(t) = \sigma(i, j) e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(i, j, t)} \quad (12)$$

假定在每一时刻, SAR的回波在距离上进行分割, 那么任一散射体所处的距离门为

$$l = (R(i, j) - R_0) / \Delta r$$

其中 Δr 为在斜距上的距离分辨率。

这样, 在 $t=t_k$ 时刻, SAR回波信号为

$$s(k, l) = \sum_{i, j \in \Omega} \sigma(i, j) e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} R(i, j, t_k)} \quad (13)$$

式中, $k=0, 1, 2, \dots, K-1$, $l=0, 1, 2, \dots, L-1$

通过计算SAR在每个时刻与每个点散射体的斜距, 就可以完成SAR回波信号的模拟。

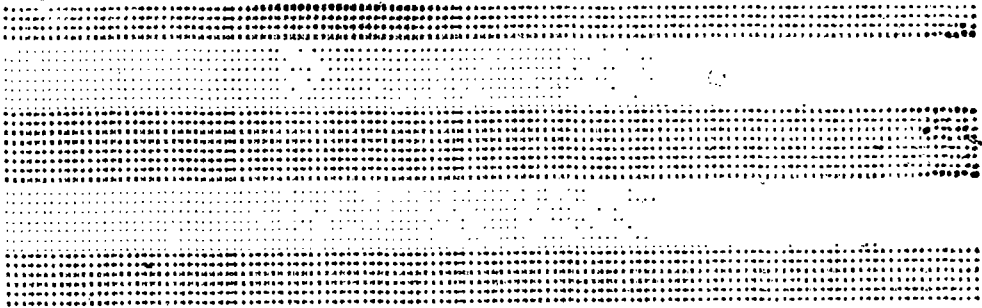
星载SAR成像过程模拟步骤:

1. 建立地面目标回波模型, 形成原始图象, 将原始图象存贮于矩阵 $A(i, j)$ 中;
2. 模拟SAR的回波信号, 并存入矩阵 $B(k, l)$ 中, 称它为转角存贮矩阵;
3. 采用Speccan算法进行方位压缩, 并完成距离徙动校正。同时构造方位压缩所需的参考函数, 然后进行方位处理;
4. 将压缩后的数据取模平方, 形成SAR图象。

模拟试验:

设原始图级矩阵 $A(i, j)$ 的大小为 256×64 , 即在方位维20km内放置256个点目标, 在距离维1.6km内放置64个点目标, 假设斜距是以15m为距离分辨单元, 试验结果方位分辨率可达200m, 距离分辨率可达50m左右。

模拟试验一: 图5(a)为原始图象, 它是一个沿方位向的条带图形。图5(b)是采用Speccan方法进行方法处理后的图象。处理过程中没有进行距离徙动校正, 因此处理后的图象条带发生了弯曲。这种弯曲是由于距离游走和地球表面的曲率引起的。



(a)

模拟试验二: 图6(a)为原始图象, 它是一个沿距离向分布的一系列条带。图6(b)是采用Speccan方法进行方法处理后的图象。可以看出, 处理后的图象成像效果良好。

从图5(b)和图6(b)看出, 采用Speccan算法, 在方位压缩前可以不进行距离徙动校正, 仍然可以成像, 这是因为Speccan算法是用频谱关系得到的。而且Speccan算法只需要一次

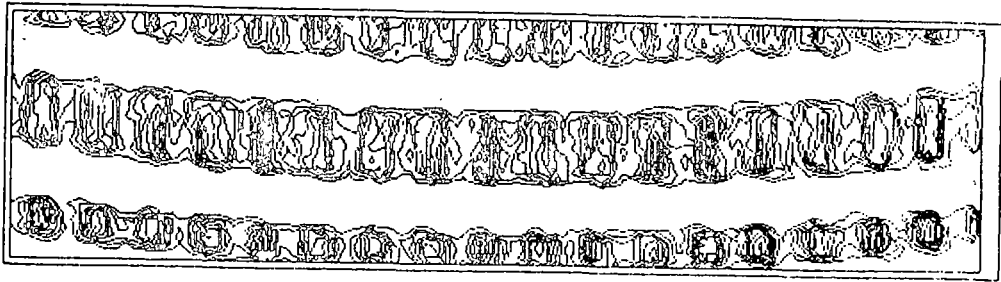


图 5 (a) 原始图象; (b) 处理后图象。

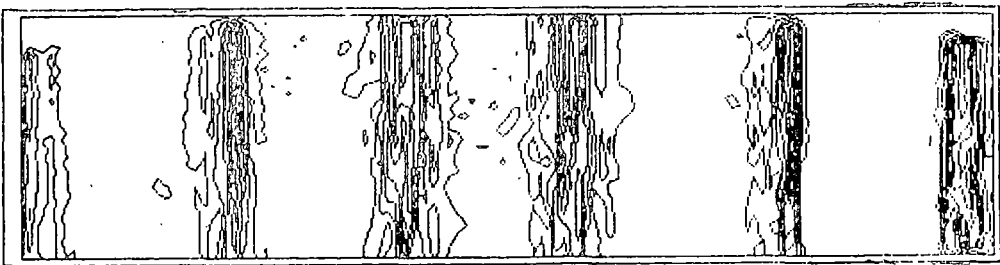
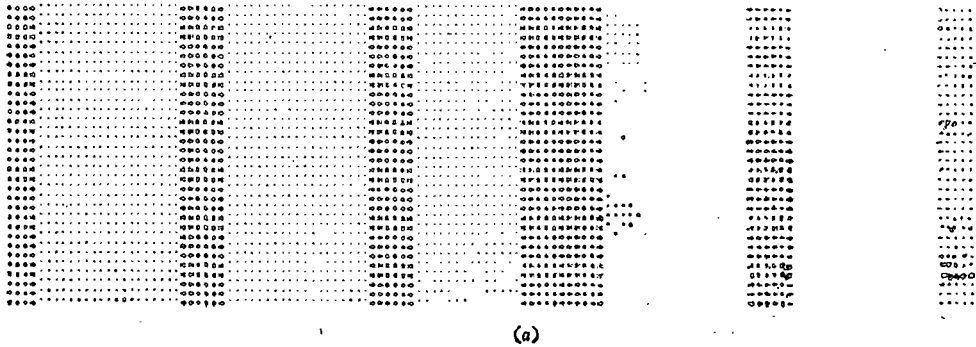


图 6 (a) 原始图象; (b) 处理后图象。

FFT 就可成象, 其运算量小, 运行时间比时域相关法短。

六、结束语

本文从星载SAR特点出发, 推导了理想的目标回波模型, 导出了回波信息具有二维卷积形式, 从而得出了星载SAR距离维和方位维相关处理的数学基础, 同时讨论了在理想飞行状态下星载SAR成象处理Specan算法。计算机模拟结果表明这种算法是有效的。

目前星载SAR的成象处理时间较长, 有待改善, 因此需要研制SAR高效专用信号处理硬件。SAR信号处理高效算法是制作专用硬件的基础, 因此进一步开展星载SAR信号处理高效算法及其结构的研究是十分必要的。

参 考 文 献

- 1 Bennett J R. Cumming I G. The Digital Processing of SEASAT SAR Data. IEEE Intl. Radar Conference, 1980:168
- 2 Chzalin Wu. A Digital Fast Correlation Approach to Produce SEASET SAR Imagery. IEEE Intl Radar Conference, 1980