合成孔径雷达的点目标模拟研究*

赵志钦** 王建国 黄顺吉
(电子科技大学电子工程系 成都 610054)

【摘要】 在探讨星载SAR成像机理的基础上，讨论了系统参数的选取；结合这些参数，给出了点目标模拟的方法，得到了点目标的模拟数据；并采用通常的R-D算法，对该数据进行了成像处理，得到了点目标的成像结果。

关 键 词 合成孔径雷达； 点目标； 成像； 压缩
中图分类号 TN957.52

合成孔径雷达（Synthetic Aperture Radar—SAR)是一种全天候的微波遥感系统，它具有高分辨力、强透射性及全天候等优点，已被广泛地应用于民用和军事领域。从目前国际上该领域的发展状况来看，SAR正朝多分辨力、多模式、多极化方面发展，其分辨力也较以前有较大提高，机载分辨力可达0.3 m，星载SAR的分辨力也可达到5 m以内。目前，在该领域的研究中，大多注重于算法的研究。为了确保系统设计成功，对SAR系统的模拟是必不可少的。在模拟中，其关键的问题就是点目标的模拟。有了点目标的模拟，就可以得到不同姿态和参数下点目标的成像结果，并能以此为依据对平台的姿态及系统的关键参数加以设定。因此在SAR系统的设计中，点目标的模拟是必不可少的。

本文对SAR成像模型进行了探讨；然后结合SEASAT-SAR的系统参数，讨论了一些关键参数的选取问题；并利用该参数对目标进行了模拟研究，利用标准的R-D算法对该点目标进行了成像处理研究，得到了预期的结果。

1 SAR回波的理论模型[1,2]

成像是指从回波信号中提取地表的雷达后向反射系数σ，通常用x表方位向，r表距离向，因此可用$\sigma(x,r)$表示σ，整个成像过程可表示为

$$\hat{\sigma}(x,r)=s(t)*h_s(t) \tag{1}$$

式中 $h_s(t)$为系统的响应函数；$*$为卷积。为模拟需要，下面先讨论SAR的回波信号$s(t)$。

SAR距离向的高分辨力来自距离向的脉压，因此，雷达发射一线性调频信号，考虑SAR的接收通常采用正交双通道，发射信号$f(t)$可表示为

$$f(t)=\sum_{n=-\infty}^{+\infty}P(t-nT_r)=\sum_{n=-\infty}^{+\infty}\mathrm{rect}(t-nT_r)\exp\{\mathrm{j}[2\pi f_c(t-nT_r)+\pi\alpha(t-nT_r)-\phi(t-nT_r)]\} \tag{2}$$

式中 rect( )为矩形窗函数；τ为脉宽；f_c为载频；α为发射脉冲的线性调频率；ϕ( )为脉内相位编码，一般采用LFM chirp编码；T_r为脉冲重复周期。

SAR在t时刻接收到的回波为

$$s(t)=\iint_D\sigma(x-x\ ,r-r)W_a(x)W_r(r-r)f(t-\frac{2R(x\ ,r)}{c})\mathrm{d}x\mathrm{d}r \tag{3}$$

1998年12月6日收稿
* 电子部预研基金资助项目
** 男 30岁 博士 副教授

式中 D 为波束照射区域；$\sigma(x,r)$ 为点 (x,r) 的雷达后向反射系数；$W_a()$ 为方位向的天线增益函数；$W_r()$ 为距离向的天线增益函数；$R(x,r)$ 为平台到目标 (x,r) 的距离。

实际上 t 包含了时间的快变化（脉内时间变化）和慢变化（脉间时间变化），分别由 r 、x 决定，因此可将 $s(t)$ 改写为 $s(x,r)$ ，并将式(2)代入式(3)中得

$$s(x,r)=\iint_D \sigma(x-x\ ,r-r)W_a(x)W_r(r-r)\mathrm{rect}[t-\frac{2R(x\ ,r)}{c}]\times$$

$$\exp\{\mathrm{j}2\pi f_c[t-\frac{2R(x\ ,r)}{c}]+\mathrm{j}\pi\alpha[t-\frac{2R(x\ ,r)}{c}]^2\}\mathrm{d}x\mathrm{d}r \tag{4}$$

式中 令 $t=2r'/c$ 。由于在脉冲宽度的时间间隔内，可认为平台是相对静止的，因此，$R(x\ ,r)$ 可简化为 $R(x)$ ，所以将式(4)改写为

$$s(x,r)=\iint_D \sigma(x-x\ ,r-r)W_a(x)W_r(r-r)\mathrm{rect}\{\frac{2}{c}[r-R(x)]\}\times$$

$$\exp\{\mathrm{j}\frac{4\pi}{\lambda}[r-R(x)]+\mathrm{j}\frac{4\pi\alpha}{c^2}[r-R(x)]^2\}\mathrm{d}x\mathrm{d}r \tag{5}$$

因此，$s(x,r)$ 可表示为

$$s(x,r)=\sigma(x,r)\otimes h(x,r) \tag{6}$$

式中 $\otimes$ 为二维卷积。系统函数 $h(x,r)$ 为

$$h(x,r)=W_a(x)W_r(r)\mathrm{rect}\{\frac{2}{c}[r-R(x)]\}\exp\{\mathrm{j}\frac{4\pi}{\lambda}[r-R(x)]\}\exp\{\mathrm{j}\frac{4\pi\alpha}{c^2}[r-R(x)]^2\} \tag{7}$$

由于 r 是时间的快变化，x 是时间的慢变化，则 $h(x,r)$ 可近似为

$$h(x,r)=h_r(x,r)*h_a(x,r) \tag{8}$$

式中

$$h_a(x,r)=W_a(x)\exp[\mathrm{j}\frac{4\pi}{\lambda}R(x)]\delta[r-R(x)] \tag{9a}$$

$$h_r(x,r)=\mathrm{rect}(\frac{2r}{c})W_r(r)\exp[\mathrm{j}\frac{4\pi\alpha}{c^2}r^2]\delta(x) \tag{9b}$$

则式(1)可表示为

$$\hat{\sigma}(x,r)=\sigma(x,r)\otimes h(x,r)*h_s(t) \tag{10}$$

根据最佳信号检测的理论，$h_s(t)$ 为

$$h_s(t)=h^{-1}(x,r)=h_a^{-1}(x,r)*h_r^{-1}(x,r) \tag{11}$$

则

$$\hat{\sigma}(x,r)=\sigma(x,r)\otimes[h_a(x,r)*h_a^{-1}(x,r)]\otimes[h_r(x,r)*h_r^{-1}(x,r)] \tag{12}$$

式(12)反映了 SAR 成像的过程。其中，$h_a^{-1}(x,r)$ 为方位向的参考函数，$h_r^{-1}(x,r)$ 为距离向的参考函数。

2 点目标的模拟研究[3]

上述对 SAR 回波信号进行了分析。要对点目标进行模拟，还必须结合具体的 SAR 系统进行参数确定。

2.1 系统参数的确定[4-6]

要设计一个 SAR 系统，首先应当确定波段、天线尺寸、分辨力、卫星高度、投射角等参数。在本文的模拟中，我们结合 SEASAT 的参数，波段为 L 波段，波长 $\lambda = 0.235$ m，卫星高度为 600 km，飞行速度 $V_g = 7450$ m/s，投射角为 30°~60°。方位向天线长度为 12 m，距离向的天线长度为 3 m，分辨力要求为 7 m×5 m。要使距离向的分辨力为 5 m，则发射信号的带宽应为 B_r =30 MHz，假设信号脉宽为 60 μs，则线性调频率 α 应为 5×10^{11} Hz/s，考虑到 50%的余地，距离向的采样频率选为 45 MHz。

另一重要参数是 PRF 的设定。PRF 受式(13)制约

$$kB_a \le PRF \le \frac{1}{k} PRF_{\max} \tag{13}$$

式中　k 为常数，通常取 $k = 1.2$；B_a 为方位向信号的频谱；$PRF_{\max}$ 为由测绘带宽所决定的最大不模糊的频率。

根据 SAR 平台与目标的几何位置关系，B_a 可表示为

$$B_a = \frac{2V_g}{\lambda}\cos(\beta_0)\theta_0 \tag{14}$$

式中　β_0 为投射角，在本次模拟中取 $\beta_0 = 45°$；θ_0 为方位向的波束宽度。因此，考虑到天线旁瓣所引入的模糊的可能性，PRF 选为 1 600 Hz。

2.2 点目标的模拟

式(5)给出了信号的回波模型，但其针对面目标；若针对点目标，则为

$$s(t) = W_a(t)W_r(t)\exp[2\pi(f_c t + \frac{1}{2}\alpha t^2) + \phi] \tag{15}$$

式中　f_c 为发射信号的载频；α 为发射信号的线形调频率；ϕ 是由于距离不同所引入的不同相位，由于雷达信号采用分距离波门的形式接收信号，因此可以认为 $t = [r(t) - r_0]/c$，$\phi = 2\pi 2[r(t) - r_0]/\lambda$，$r(t)$ 是某时刻雷达平台到目标的距离，r_0 是平台完全正侧视目标时，点目标到平台的距离。由于点目标的位置一旦设定，其对应的距离向的天线方向图的值的大小就可确定，因此在做点目标模拟时，$W_r(t)$ 可设为定值，所以式(15)可改写为

$$s(t) = W_a(t)W_r \exp\{2\pi\{\frac{f_c[r(t) - r_0]}{c} + \frac{\alpha[r(t) - r_0]^2}{2c^2} + \frac{2[r(t) - r_0]}{\lambda}\}\} \tag{16}$$

式中　$t = (m/f_r) + (n/PRF)$；f_r 为距离向的采样率；PRF 为方位向的脉冲重复频率；m 为距离向的采样点数；n 为方位向的采样点数。考虑到离散形式的表达式，模拟所得的原始数据场为

$$s(m,n) = W_a(n)W_r \exp\{2\pi\{\frac{f_c[r(m,n) - r_0]}{c} + \frac{\alpha[r(m,n) - r_0]^2}{2c^2} + \frac{2[r(m,n) - r_0]}{\lambda}\}\} \tag{17}$$

为了检验所得数据的正确性，我们对所得数据进行了成像实验。采用的距离向的参考函数为

$$h_r^{-1}(t) = \exp[j2\pi(f_0 t - \frac{1}{2}\alpha t^2)] \tag{18}$$

距离压缩时采用 4 096 点 FFT，其中 f_0 是信号混频至中频后信号的中心频率。

图 1 是经距离压缩、并经走动校正之后的结果。该目标有 12 个距离单元的弯曲，这与根据平台位置和孔径大小计算出的理论值完全吻合。

由于地球自转的影响，星载 SAR 的方位向的 f_{DC} 往往不为零，通常存在严重的距离迁移效应，因此必须加以校正。距离迁移包括距离走动和距离弯曲，距离走动在距离压缩之后的数据的转置中加以校正，而距离弯曲则通常在方位压缩前加以校正。

方位压缩所采用的参考函数为

$$h_a^{-1}(t)=\exp[\mathrm{j}2\pi(f_{DC}t-\frac{1}{2}f_{dr}t^2)] \tag{19}$$

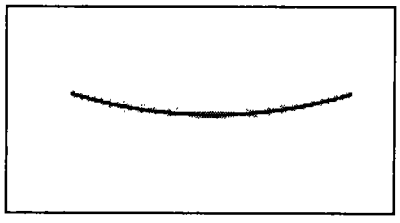


图 1 距离压缩后的结果

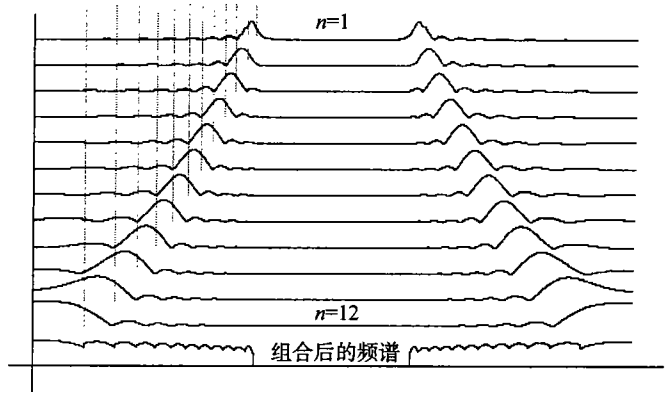
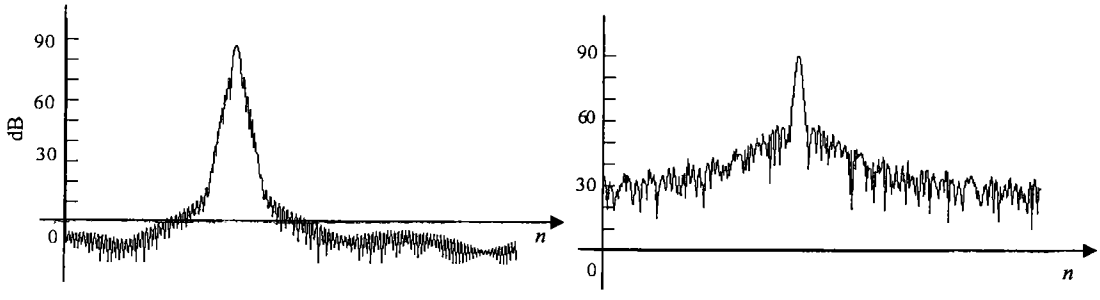


图 2 方位上的频谱

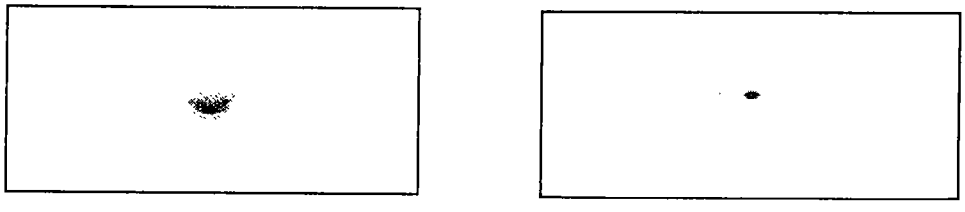
根据平台和地面的几何位置关系，在该参数下有 12 个距离单元的弯曲，如图 2 中 n=1~12 表示相邻的 12 条方位线的频谱。由图可知，利用其中任何一条来作方位压缩，其多普勒历程都不完整，因此必须进行弯曲校正，图 2 给出了弯曲校正之后的频谱，其频谱有很大程度的改进。

图 3a 为未经弯曲校正的方位压缩之后的结果，图 3b 为经弯曲校正的方位压缩之后的结果。



(a) 未经弯曲校正的方位压缩之后的结果 (b) 经弯曲校正的方位压缩之后的结果

图 3 校正前后方位压缩之后的结果



(a) 未经弯曲校正的点目标成像之后的结果 (b) 经弯曲校正的点目标成像之后的结果

图 4 校正前后点目标成像之后的结果

图 4a 为未经弯曲校正的点目标成像后的结果，图 4b 为经弯曲校正的点目标成像后的结果。

从图 3、图 4 的比较可以发现，无论在主瓣宽度、高度还是在峰值旁瓣比上，弯曲校正后的结果有较大的提高。

3 结 束 语

本文给出了点目标模拟的方法，并通过成像实验加以了验证，得到了点目标的成像结果，模拟结果与理论值基本相符。根据式(17)，模拟信号方位向的多普勒历程由 $r(t)$ 决定，如果平台是匀速直线运动，则 $r(t)$ 的变化就可确定。但在通常情况下，平台总要受气流等诸多因素的影响，因此，平台就会不可避免地产生扰动，这会对成像的质量产生较大的影响。实际上平台的扰动可以反映在对 $r(t)$ 的影响上，因此在点目标模拟研究的基础上，我们可以通过上述的成像实验得到在有扰动时的点目标成像结果，从而确定平台控制精度。所以，点目标的模拟研究对 SAR 的系统设计有重要的作用。

参 考 文 献

1 Wehner D R. High resolution radar. Norwood, MA: Artech House, 1987

2 Jin M Y, Wu C. A SAR correlation algorithm which accomendates large range migrate. IEEE Trans on GRS, 1984,22:592~597

3 王建国，赵志钦，黄顺吉. 卫星扰动与 SAR 成像研究. 电子科技大学学报, 1997，26(增刊):197~202

4 Li F, Held D N, Curlander J C, *et al*. Doppler parameter estimation for spaceborne SAR. IEEE Trans on GRS, 1985,23(1):47~55

5 Casey D, Way J B. Orbit selection for EOS mission and its system implications. IEEE Trans on GRS, 1991,29(6):822~835

6 David D, Freeman A, White R G, *et al*. The prediction fo Geometric distortions in airborne SAR imaging from autofocus measurements. IEEE Trans on GRS, 1987,25(6):375~382

Research of Simulation of Synthetic Aperture Radar

Zhao Zhiqin　　Wang Jianguo　　Huang Shunji

(Dept. Of Eletr. Eng., UEST of China　Chengdu　610054)

Abstract　The simulation of point target is a very important step in SAR(Synthetic Aperture Radar) system design. Based on the analysis of the theories of SAR image processing, this paper discusses how to choose some parameters of SAR system. The method of point target simulation is also given . By using this simulated data and the R-D algorithm, the image of the point target is obtained.

Key words　synthetic aperture radar;　point target;　image processing;　compression