

星载合成孔径雷达系统模拟研究

向敬成 韩春林 王意青 陈 进

(电子科技大学,成都 610054)

摘要 本文描述了星载合成孔径雷达(SAR)系统的数学模型及其计算机模拟;给出了距离迁移效应、距离迁移校正、方位加权、信号产生和处理的模拟结果。这些结果较逼真地复现了星载合成孔径雷达系统的动态工作过程;可用于进行星载 SAR 系统信号处理研究,评价系统性能,为系统优化设计提供依据。

关键词 星载合成孔径雷达;模拟;数字信号处理

一、引 言

合成孔径雷达(SAR)在距离向采用脉冲压缩技术,方位向利用天线平台相对目标运动,产生多普勒频率线性变化,进行方位压缩,以同时获得二维高分辨力。在星载情况下,与机载相比其飞行轨道、地面形状和空间几何关系都有很大差异,加之地球自旋影响明显,因而星载 SAR 具有一个十分突出的特征,即距离迁移效应的存在。这使其目标响应成为二维响应,成像处理过程更为复杂,增大了数字信号处理的难度。

本文描述了我们近年来所做的星载 SAR 系统模拟研究工作。星载 SAR 系统的计算机模拟能够检验和比较各种不同的处理算法;开展多普勒质心估计、运动补偿和信号处理算法研究。在目前国内尚未获得星载 SAR 实测数据的情况下,此项工作就更有意义。该项工作与现有文献^[1-4]相比有如下特点:

(1) 几何模型逼真,能够精确地模拟距离迁移效应。在模拟中通过适当选取控制参数便可选择简化或完整模型。可根据完整模型的要求,由轨道参数和系统参数精确地计算出距离迁移常数 a_1, a_2 ;也可由简单模型给出其近似值。

(2) 数学模型简洁、逼真、灵活性强。如对点目标、多个孤立目标和分布目标的回波信号,可通过选择不同的输入参数由同一模型产生。

(3) 模拟软件采用结构化程序设计思想,易于扩充完善。系统中每个单元在程序中都有相应的模块,可通过选择控制参数确定所研究系统的结构,选择进行研究的系统单元。

二、数学模型

1. 一般描述

设 SAR 发射一串脉冲信号 $f(t)$:

$$\begin{aligned} f(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} P(t - nT) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \text{rect}(t - nT) \exp[\omega(t - nT) - \phi(t - nT)] \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $P(t)$ 为单个脉冲信号函数, $\text{rect}(t)$ 为矩形函数, $\phi(t)$ 为瞬时相位, 通常采用线性调频或相位编码信号, ω 为载频, T 为脉冲重复周期。

在无反射的背景上, 点目标的回波 $s(t)$ 可写成(经解调去载频后):

$$\begin{aligned} s(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sigma \cdot W_a[t - a(t)/c] \cdot \text{rect}[t - nT - 2a(t)/c] \\ &\quad \times \exp\{-j[4\pi a(t)/\lambda] - j\phi[t - nT - 2a(t)/c]\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 σ 是点目标的雷达散射截面; c 为光速; $a(t)$ 为在方位时刻 t 点目标到雷达天线的瞬时斜距; W_a 是在方位时刻 t 处的天线增益; λ 是工作波长。

若将自变量 t , nT 换成相应的方位位置 x 和距离 r , 再引入 SAR 天线在距离向的天线增益 $W_r(t)$, 经过一系列变换之后(详见文献[6]), 可得如下回波表达式 $s(x, r)$:

$$s(x, r) = [\sigma(x, r) \cdot W_r(r) \otimes h_1(x, r)] \otimes h_2(x, r) \quad (3)$$

式中 \otimes 表示二维卷积, 且有

$$h_1(x, r) = W_a(x) \exp[-j4\pi \cdot a(x)/\lambda] \cdot \delta[r - a(x)] \quad (4)$$

$$h_2(x, r) = (2/cv) \cdot \delta(x) \cdot \text{rect}(r) \cdot \exp[-j\phi(r)] \quad (5)$$

其中 v 是天线平台的方位飞行速度(相对于地面)。

2. 斜距多项式和距离迁移效应

在星载情况下, 由于其空间几何关系复杂和地球自旋等因素, 瞬时斜距 $a(t)$ 的变化必须用一个复杂的多项式来表示:

$$a(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots \quad (6)$$

式中 a_0 是雷达至目标的最近距离 ($t=0$ 时刻), a_1 是雷达至目标的斜距变化率, a_2 是雷达至目标的斜距变化加速度。通常定义距离迁移量为:

$$a_m \triangleq a(t) - a_0 = a_1 t + a_2 t^2$$

当 a_m 在一个合成孔径时间内大于距离分辨单元的一半时, 就必须考虑 a_m 的影响。线性项 $a_1 t$ 称为距离走动, 二次项 $a_2 t^2$ 称为距离弯曲。由于距离迁移的存在, $h_1(x, r)$ 是二维的, 即 x, r 互有关联。在解调过程中, 必须按照其二维变化进行处理。这是星载 SAR 最重要的信号特点和处理难点之一。而 $h_2(x, r)$ 则是一维的, 可采用简单的一维线性调频脉压解调处理。

距离迁移是卫星与地球之间的复杂运动和空间几何关系所确定的。利用轨道空间关系与几何微分法导出的 a_1, a_2 精确表达式为^[4]:

$$a_1 = (\dot{r}_0/a_0)(r_0 - R_e \cdot \cos \theta_e) - (r_0 \cdot R/a_0) \cdot \theta_0 \cdot \sin \theta_e \cdot \sin \sigma_0 - (R_e \cdot r_0/a_0) \cdot \zeta \cdot \sin \theta_e \cdot \cos \Psi_0 \cdot \cos(\gamma_0 + \sigma_0) \quad (7)$$

$$a_2 = [(\dot{r}_0 - 2\dot{r}_0^2/r_0)/2a_0](r_0 - R_e \cdot \cos \theta_e) + (\dot{r}_0^2 - a_1^2)/(2a_0) + \dot{r}_0 a_1/r_0 - [R_e r_0/(2a_0)]\{-\dot{\theta}_0^2 - \cos \dot{\theta}_e + \theta_0 \cdot \sin \theta_e \sin \sigma_0 + 2\zeta \cdot \dot{\theta}_0[\sin \gamma_0 \cdot \cos \phi_0 \cos(\Phi_0 - \varphi_0) - \cos \gamma_0 \cdot \cos \Psi_0 \cdot \sin \phi_0 \sin(\Phi_0 - \varphi_0)] - \zeta^2 \cdot \cos \Psi_0 \cdot \cos \phi_0 \cdot \cos(\Phi_0 - \varphi_0)\} \quad (8)$$

式中 Ψ_0 和 Φ_0 分别是卫星地面投影在 $t=0$ 时的纬度和经度, ϕ_0 和 φ_0 分别是 $t=0$ 时目标的纬度和经度, R_e 是地球半径, r_0 是 $t=0$ 时天线到地心的距离, θ_e 是卫星与点目标所夹的地心角, γ_0 是卫星航向当地的指向角 ($t=0$), θ_0 是 $t=0$ 时的瞬时真近点角, ζ 是地球的自旋速度, σ_0 是雷达的斜视角。

对于圆形轨道, 静止地球和零斜视角的情况, a_2 可简化为:

$$a_2 = v(1 - h/r_0) \cos \theta_0 / (2a_0) \quad (9)$$

式中 h 是卫星距地面的高度, v 是卫星的轨道速度。由于 θ_0 通常较小 (2° 至 3°), 且 $h \approx r_0/10$, 因此 a_2 可进一步简化为 $a_2 = v^2/(2a_0)$ 。我们用 $a_1 = -2$ (走动量 $|_{\max}$)/ T_a 来近似计算距离走动常数, 其中 T_a 是合成孔径时间。

3. 地物目标的回波信号模型

通常地形可分为两种类型的散射体: 离散目标和分布目标。离散的或点目标通常代表孤立的物体, 一般象汽车, 建筑物等人造物, 或是那种强度较大的反射器。分布目标或均匀散射体, 一般指象森林, 农田这类较大的面目标。

分布目标模型通常由 m 个离散目标叠加起来表示。此时天线收到的瞬时回波电压为:

$$V_a = V \exp(j\theta) = \sum_{l=1}^m V_l \exp(j\phi_l) \quad (10)$$

式中 V 是天线收到的最终瞬时电压幅度, θ 是瞬时回波电压的相位, V_l, ϕ_l 分别是第 l 个离散目标回波的电压幅度和相位

每一时刻总的回波电压 V_a 还可以表示成实部或虚部电压:

$$V_a = V_R + jV_I \quad (11)$$

其中

$$V_R = \sum_{l=1}^m V_l \cos \phi_l \quad (12)$$

$$V_I = \sum_{l=1}^m V_l \sin \phi_l \quad (13)$$

当离散目标数目 m 足够大且无一个起主导作用时, 回波电压的实部或虚部将变成具有高斯概率密度分布的随机变量, 回波电压 $V_a = \sqrt{V_R^2 + V_I^2}$ 和相位 $\theta = \arctg(V_I/V_R)$ 分别是一个具有瑞利和均匀分布的随机变量。

表示地形单元的雷达截面积 σ 与回波电压 V_a 的关系由下式给出:

$$|V_a|^2 = K\sigma \quad (14)$$

K 为比例常数。

第 l 个离散目标的回波信号经距离压缩后为

$$s_l(i, j) = \sum_j^{n_1} \sum_i^{n_2} a_l \cdot G \cdot \text{sinc} \left(\frac{\pi B_w}{f_s} K'_{ij} \right) \cdot \exp[j(\phi_{ij} + \theta_l)] \quad (15)$$

m 个目标总的回波信号经距离压缩后为

$$V_a = s(i, j) = \sum_{l=1}^m s_l(i, j) = V_R + jV_I \quad (16)$$

式中

$$\begin{aligned} V_R &= \sum_{l=1}^m V_l \cos \phi_l \\ &= \sum_{l=1}^m \sum_j^{n_1} \sum_i^{n_2} a_l \cdot G \cdot \text{sinc} \left(\frac{\pi B_w}{f_s} K'_{ij} \right) \cos(\phi_{ij} + \theta_l) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} V_I &= \sum_{l=1}^m V_l \sin \phi_l \\ &= \sum_{l=1}^m \sum_j^{n_1} \sum_i^{n_2} a_l \cdot G \cdot \text{sinc} \left(\frac{\pi B_w}{f_s} K'_{ij} \right) \sin(\phi_{ij} + \theta_l) \end{aligned} \quad (18)$$

其中 n_1 是合成孔径总积累脉冲数; n_2 是选定的观察距离单元数; ϕ_{ij} 是第 l 个目标在第 i 个距离单元和第 j 个脉冲处的多普勒相位; G 是天线在目标方向的增益; $a_l = \sqrt{B^2 + C^2}$, $\theta_l = \arctg(C/B)$, B, C 为服从同一分布的独立高斯随机数 $N(\mu, V)$, μ 和 V 是由地形特性确定的均值和方差; K'_{ij} 是第 l 个目标距离迁移后所在的距离单元数, 即在原来的第 K_{ij} 距离单元上的目标迁移 ΔK_{ij} 后, 其距离响应的峰值处在 $K_{ij} + \Delta K_{ij} = K'_{ij}$ 距离单元上。

4. 方位信号处理

回波信号经过距离压缩和距离迁移校正后进行方位处理, 方位参考函数以零多普勒频率处为焦点产生。显然距离处理与方位处理实际上是相似的, 都是线性调频信号处理, 只是各自的调频率不同而已。

方位参考函数由下式给出:

$$h(t) = \text{rect}(t/T_a) \exp(j\pi K_a t^2) \quad (19)$$

式中, 方位调频率为:

$$K_a = -\frac{2v^2}{\lambda R_l} \quad (20)$$

式中 R_l 是第 l 个目标与雷达间的斜距, λ 是发射信号波长, v 是天线平台相对于地面的飞行速度。

在模拟中, 我们采用频域相关技术进行方位信号处理。为此定义输入信号和方位参

考函数的傅氏变换分别为

$$\left. \begin{aligned} S(\omega) &= F[s(t)] \\ H(\omega) &= F[h(t)] \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

并设 $S_0(\omega)$ 为输出信号的频谱, $M(\omega)$ 为方位加权函数, 则输出信号的时域表达式为

$$s_0(t) = F^{-1}[S(\omega) \cdot H(\omega) \cdot M(\omega)] \quad (22)$$

三、计算机模拟结果

模拟程序用 FORTRAN 77 编写, 在 SIEMENS-7570C 上调试运行. 模拟程序共涉及以下系统单元: 地物目标的产生(包括目标与雷达的几何关系, 平台位置和姿态), 发射机, 天线, 接收机, 距离处理, 数据转置, 距离迁移校正, 方位处理(单视和多视)以及副瓣抑制等.

在模拟实验中选用了较为简化的几何模型. 首先产生了经距离压缩带有距离迁移的星载 SAR 目标回波信号, 然后对所产生的信号进行距离迁移校正和方位处理. 方位处理采用频域相关; 迁移校正方法选用了 Wu 方法和逐点内插方法^[4]

本研究以美国公布的 SEASAT-A 的系统参数为例进行了以下模拟实验(模拟参数略), 结果如下:

1. 信号产生(直接产生经距离压缩后的信号)

(1) 未含距离迁移效应的信号 当观察距离单元取 96 个, 方位积累脉冲数为 64, 单点目标的坐标为(0,0)时(目标处于第 48 个距离单元和第 32 个方位脉冲处), 产生的不含距离迁移效应的信号见图 1. 当观察距离单元取 40 个, 方位积累脉冲数为 256, 输入 4 个点目标, 坐标为(64,10), (64,-10), (-64,10), (-64,-10)时, 产生的不含距离迁移的多目标信号见图 2. 结果表明信号产生软件能逼真地模拟出不含距离迁移效应的点和多点目标的信号.

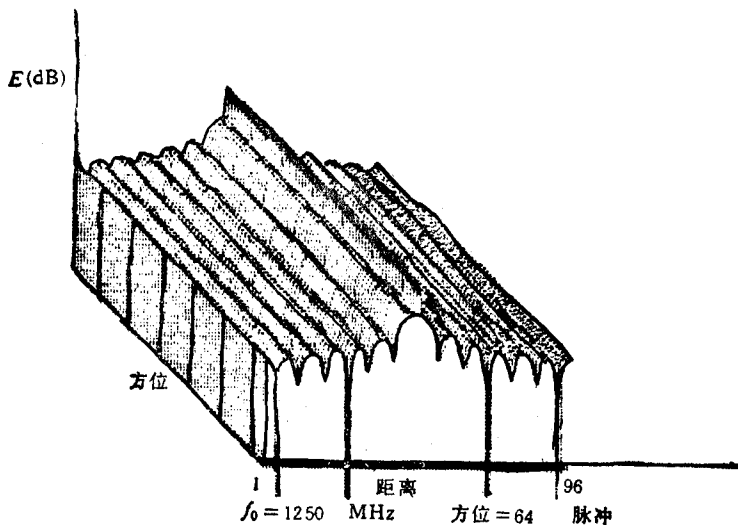


图 1 不含距离迁移效应、经距离压缩后的 SAR 单点目标信号

(2) 含距离迁移效应的信号 若选取最大走动量为 9 个距离单元, 方位积累脉冲数为 64, 观察距离单元数取 75, 输入坐标为(0,0)时, 含距离迁移的单点目标信号见图 3. 当观察的距离单元数为 40, 方位积累脉冲数为 256, 输入 4 个目标, 其坐标同图 2, 含距离迁移的多点目标信号见图 4.

2. 方位信号处理和距离迁移校正

观察的距离单元数为 20, 总累积脉冲数为 256, 输入单点目标的坐标为(0,0)时, 不含距离迁移效应的信号经方位处理后的结果见图 5. 含距离迁移的信号未经距离迁移校正

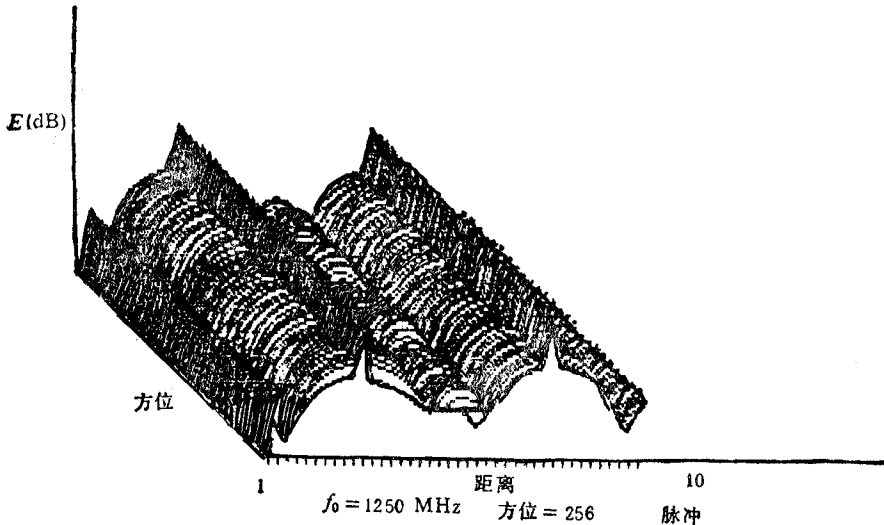


图 2 不含距离迁移效应, 经距离压缩后的 SAR 4 点目标信号(横坐标的 10 应为 40)

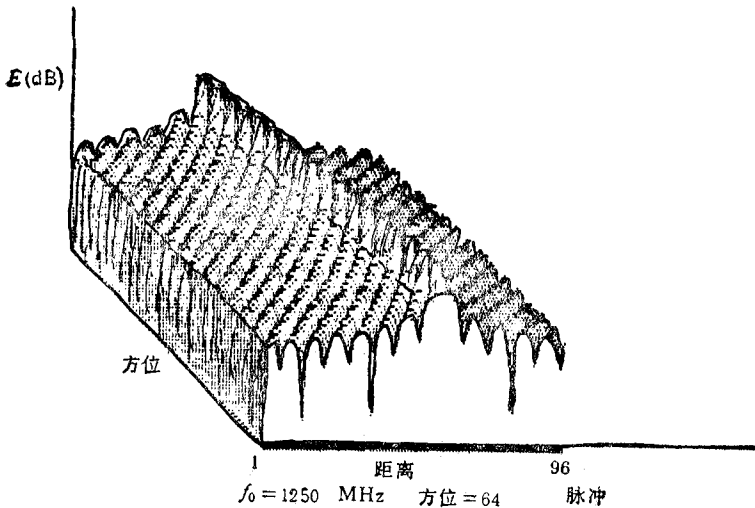


图 3 含距离迁移效应、经距离压缩后的 SAR 单点目标信号

直接进行方位处理的结果见图 6. 图 6 清楚地表明该信号若不经距离迁移校正所获得的单点目标 SAR 图象十分差, 不能有效分辨目标, 说明对含距离迁移效应的信号, 距离迁移校正必不可少. 含距离迁移效应的信号分别经 Wu 方法 (分段内插法)和逐点内

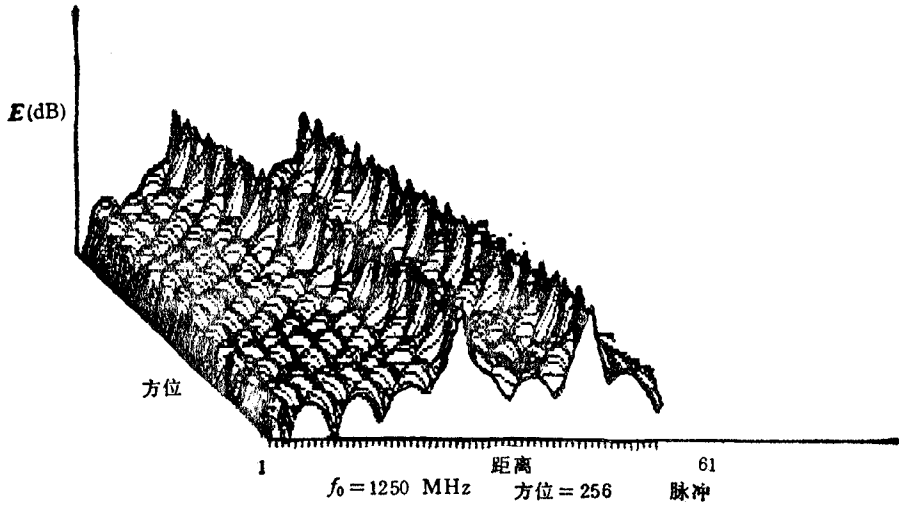


图4 含距离迁移效应、经距离压缩后的 SAR 4点目标信号

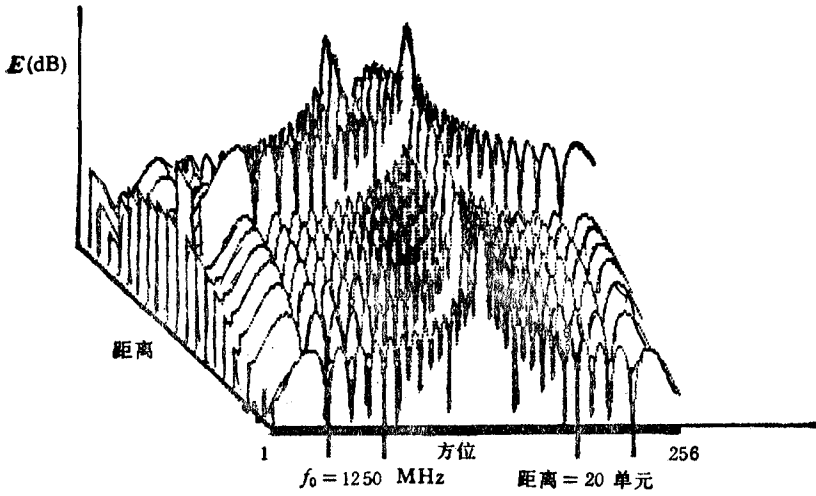


图5 不含距离迁移的 SAR 单点目标信号经距离、方位处理后的结果

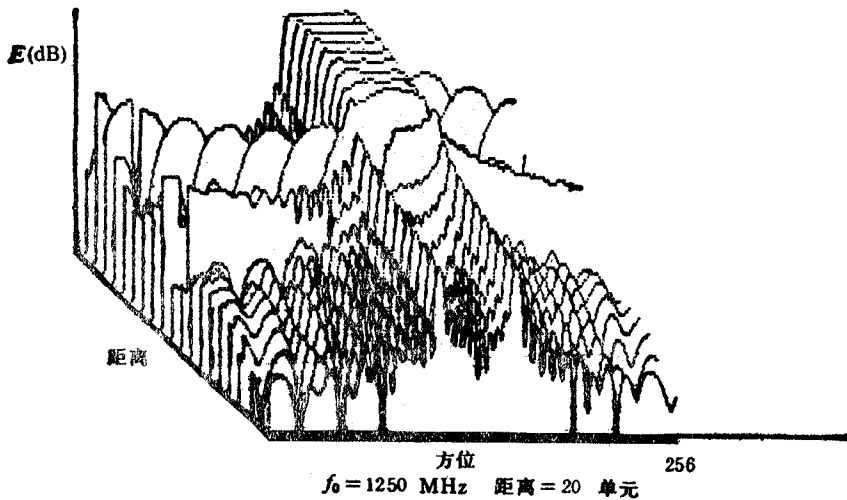


图6 含距离迁移效应、未经距离迁移校正的 SAR 单点目标信号经距离、方位处理后的结果

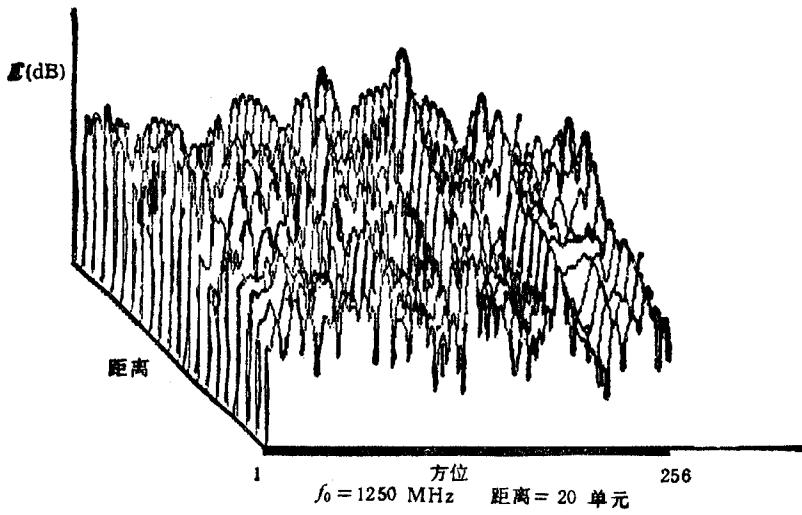


图7 含距离迁移效应、经 Wu 方法校正的 SAR 单点目标信号经距离、方位处理后的结果

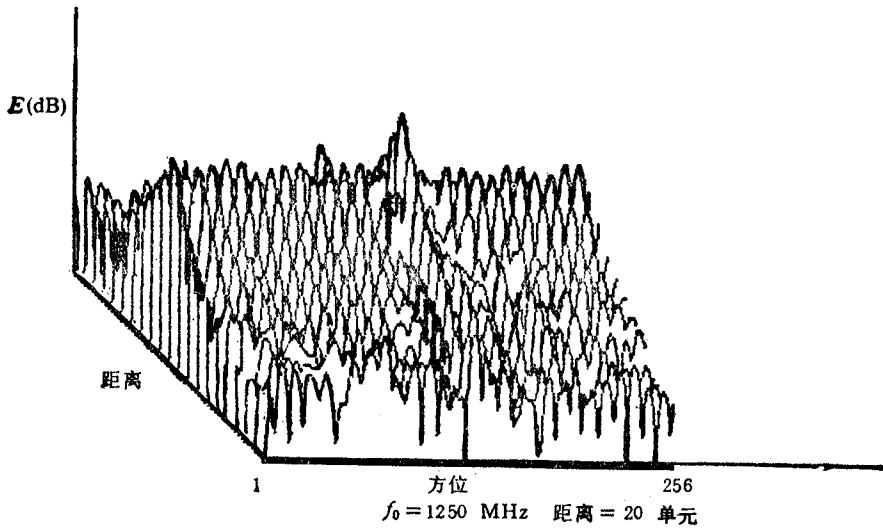


图8 含距离迁移效应、经内插方法校正的 SAR 单点目标信号经距离、方位处理后的结果

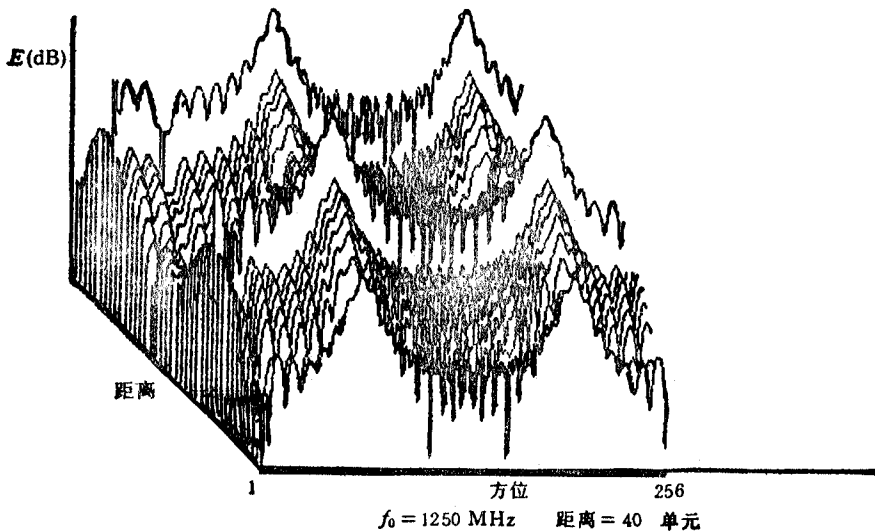


图9 不含距离迁移效应的 SAR 4点目标信号经距离、方位处理后的结果

插法校正后进行方位处理的结果见图 7 和图 8。图 7 和图 8 表明 Wu 方法和逐点内插法是校正距离迁移的有效方法。图中的结果与图 6 相比, 图象显然得到了极大的改善, 峰值出现的位置与输入目标位置是一致的。

当产生的目标回波信号如图 2, 经方位处理后的结果见图 9。引入方位汉明加权后的结果见图 10。两图表明多目标信号可采用与处理单点目标信号相同的方位参考函数来处理, 结果十分理想, 4 个响应峰值与输入目标位置一一对应。引入方位加权后, 图象就更清晰。

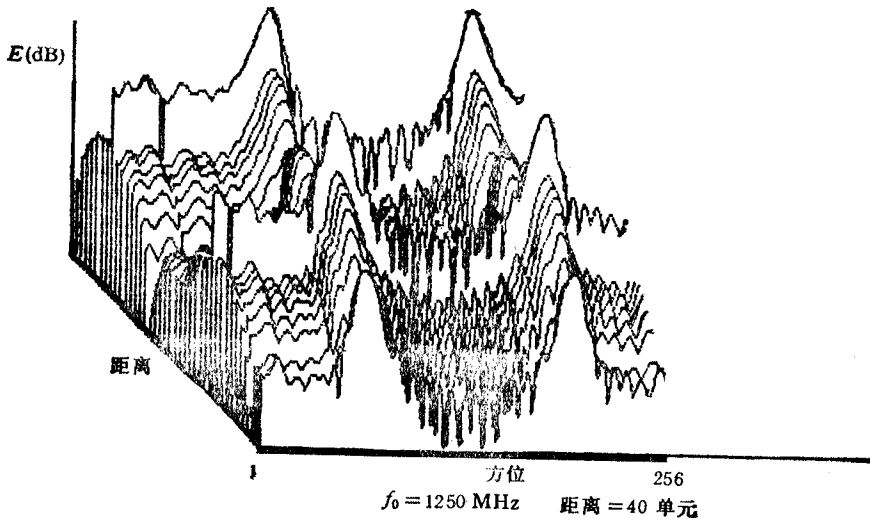


图 10 不含距离迁移效应的 SAR 4 点目标信号经距离、方位处理、方位加权后的结果

四、结 论

通过进行的各项模拟实验证明, 本文所述信号产生和信号处理系统模拟程序, 选用模型正确, 能够精确地模拟距离迁移效应, 较逼真地复现星载 SAR 的工作过程。模拟结果证明, 该模拟程序可以用来进行星载 SAR 的信号处理算法研究, 评价系统参数对系统性能的影响。该模拟软件经过扩充, 还可以进一步模拟系统各种随机因素的影响, 从而更接近真实的系统。

参 考 文 献

- [1] V. H. Kaupp, W. P. Waite et al., SAR Simulation, N87-18213, (1987).
- [2] G. J. Wessels, M. E. Kirby, SARSIM—A Space-borne SAR Simulation Package, N87-18215, (1987).
- [3] A. D. Goidfinger, Digital Simulation of A Synthetic Aperture Radar, AD-A011831, (1978).
- [4] H. W. Martinson et al., Advanced Digital SAR Processing Study, Final Report, N82-26524, (1982).
- [5] B. C. Barber, Theory of Digital Imaging from Orbital Synthetic Aperture Radar, AD-A141152, (1983).
- [6] C. Wu, K. Y. Liu et al., IEEE Trans. on AES, AES-18(1982)5, 563—574.
- [7] 黄顺吉等, 星载合成孔径雷达的运动补偿及实时信号处理, 电子科技大学电子工程系, 1990 年 863 计划年度科技报告, 成都, 1991 年 1 月。
- [8] 向敬成等, 星载 SAR 计算机模拟研究, 电子科技大学电子工程系研究报告, 成都, 1991 年 1 月。

ON STUDY OF SPACEBORNE SAR SYSTEMS BY SIMULATIONS

Xiang Jingcheng Han Chunlin Wang Yiqin Chen Jin

(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract The mathematical model of spaceborne SAR systems and its computer simulations are described. Results of computer simulations about range migration, range migration correction, azimuth weighting and azimuth signal generation/processing are given. This software can be used to simulate the dynamical process in spaceborne SAR system, to develop new signal processing technique and to evaluate the performance of the designed system.

Key words Spaceborne SAR system; Simulation; Digital signal processing