

·信号与信息处理·

合成孔径雷达原始信号的模拟方法

孙寒冰, 曲长文, 侯海平

(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

摘要:合成孔径雷达(SAR)原始回波模拟在系统设计及成像算法验证等方面具有重要的理论及工程实践意义,是合成孔径雷达系统研制的一个重要方面.说明了原始信号模拟系统的构成,介绍了现有的原始信号模拟方法.基于时域信号模型,对合成孔径雷达的回波进行模拟,生成了理想的点目标回波数据,用距离-多普勒算法处理得到点目标成像结果,验证了处理流程的可行性.

关键词:合成孔径雷达;回波信号;模拟;距离-多普勒算法

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2009)02-0071-04

SAR Raw Signal Simulation Method

SUN Han-bing, QU Chang-wen, HOU Hai-ping

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai, 264001, China)

Abstract:As one significant aspect of SAR development, simulation of SAR echo signal has an important practical sense in theory and project in aspects of system design and imaging algorithm verification. The component of raw signal simulation system is shown. Then, according to the time domain signal model, the echo of SAR is simulated. The perfect echo data of spot target is generated, and then the images of the spot target processed with the R-D algorithm are used to verify the feasibility of processing program.

Key words:synthetic aperture radar (SAR); echo signal; simulation; R-D algorithm

合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)分别利用脉冲压缩技术和合成孔径技术来实现雷达图像在距离向和方位向上的高分辨率.作为获取地面信息的重要手段,它具有可见光、红外等传感器所不具备的全天时、全天候工作能力以及穿透一定遮蔽物的能力,在经济、科研和军事领域得到了越来越广泛的应用.20世纪90年代,随着SAR成像基础研究的逐步完善,有大量的星载、机载SAR系统研制成功并投入使用,而且由于多频、多极化、干涉等技术的应用,SAR研究表现为更加深入和实用化的发展趋势.SAR成像原理复杂,参量繁多,成像和误差校正处理都具有一定的难度.因此,在SAR系统方案设计、成像处理算法研究、噪声和杂波抑制等场合,需要有符合特

定条件下的SAR原始回波信号,这些数据通过雷达载体飞行获得往往不太实际,而且是已有的SAR雷达系统真实数据所无法替代的,所以通过模拟来获得所需要的原始回波信号是一个重要的解决手段,有必要对原始信号的模拟展开研究.

SAR原始回波信号的仿真,国内外已有专家进行过一些研究.Julian首次建立了SAR图像仿真系统^[1],随后Kaupp^[2]利用该系统研究了雷达入射角对星载SAR图像特征的影响,对仿真技术应用于SAR系统方案设计进行了初步尝试.SAR技术的发展推动了SAR仿真技术的发展^[3,4].Giorgio Franceschetti研究了一种基于实际地面目标散射特性的原始回波信号仿真方法^[5],并给出了SAR原始

收稿日期:2009-02-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60672140)

作者简介:孙寒冰(1985-),男,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向为信号处理.

信号的定义：“在 SAR 研究体制下，模拟未经任何处理（除了超外差下变频）的信号是非常方便的，该信号称之为原始信号。”国内有关人员也提出了合成孔径雷达原始信号仿真的方法，大致可分为 2 种：一是通过模拟真实反射场景的地物结构，通过构造目标散射模型（主要是模拟雷达目标后向散射系数）来模拟雷达回波信号^[6]。二是利用雷达图像数据，通过逆向运算来获得雷达原始回波信号^[7]。这些方法虽然能够取得比较好的仿真效果，但是测试准备工作量、运算量大、处理比较繁琐，即使一些简易模拟方法在处理上仍需要大量的工作。

1 原始信号模拟系统的构成

原始信号的构成如图 1 所示。

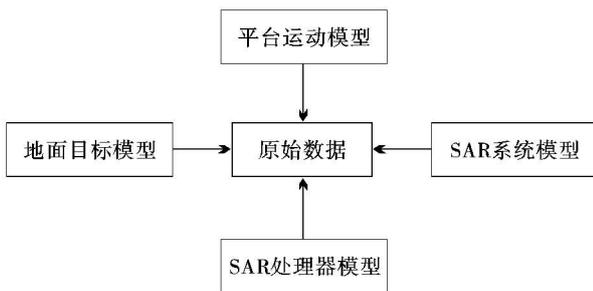


图 1 原始信号的构成

(1) 平台运动模型

为了便于分析，往往设平台运动状况是理想的。实际上平台运动状况不可能是理想的，特别是中、低空飞行的机载 SAR，由于气流的不稳定的影响，运动的不稳定性较大，如果不采取运动补偿，则录取的数据受到不稳定因素的影响会有较大的失真，从而使成像质量下降，甚至不能成像。

(2) 地面目标模型

分辨率是影响目标模型的决定性因素。目标尺寸与分辨单元相比，若很小，称之为点目标；若目标由多个可以区分的点目标组成，称之为多点目标；若很大，就称之为分布目标。SAR 目标是一种复杂的分布目标。雷达图像信息的来源大致包括 2 个方面：一是地面分布目标的散射特性及其空间起伏变化，对于丘陵、平原、海洋、树林和农作物等不同种类目标以及干燥、潮湿、粗糙、平坦等不同的自然条件，它们的散射特性都是千差万别的；二是星载雷达平台

和分布目标的交会几何关系，它在 SAR 图像中产生了诸如阴影、错位和重叠等几何失真。通过雷达电磁波与目标的相互作用，目标的散射特性及其变化成为图像中反映目标特征的主要内容。因此，建立真实反映目标散射特性的分布目标仿真模型将是 SAR 回波模拟的一个重要方面。

(3) SAR 系统模型

在 SAR 原始信号模拟中，是将 SAR 系统（包括信号源、基准频率源、发射机、收发天线、接收机、数据形成、定时及监控）看作一个整体来研究的，因此不考虑各分系统的模型。在系统模型中，主要关心的是 SAR 的系统参数，如波长、脉冲重复频率、脉冲宽度、信号带宽、采样率、天线方向图、接收机增益及图像参数等。

(4) SAR 处理器模型

为了验证原始数据模拟方法的有效性，必须通过现有的成像算法对 SAR 系统的模拟产生的 SAR 原始数据进行成像处理，分析成像结果并得出结论。

2 原始信号模拟方法

信号模拟的方法基本上可分为 2 种：一种是功能模拟，另一种是相干视频信号模拟。功能模拟只是模拟雷达目标和杂波的幅度信息；而相干视频信号模拟不仅包括幅度信息，而且也包括相位信息。SAR 系统特点决定了 SAR 原始数据模拟属于相干视频信号模拟。这里的原始信号是指 SAR 的平台接收信号，这个信号包括了地面对雷达波的散射回波和系统噪声。主要有以下 3 种方法^[8]：

(1) 采用简单的几何体模型。将目标分解为基本散射单元，对于目标在雷达波束中的不同位置，计算每一个基本散射单元的雷达截面积 (RCS)；然后计算整个目标的 RCS，加上背景信号，再考虑到平台移动后的几何关系，就可以得到 SAR 的接收信号。对此进行二维压缩，可得到该目标的 SAR 图像。这种方法得到的最终图像，是一种理想化的模型，与实际情况还有一定的差距，但对选择 SAR 系统的主要参数有一定的价值。

(2) 采用分布目标模型。分布目标是由许多小的散射单元所组成。当 SAR 发射相干波时，这些小的散射单元所反射的回波进行相干叠加，其合成的幅度和相位与天线发射和接收方向有很大关系，因此，当 SAR 的平台运动时，由于相对位置的变化，接收到的回波幅度和相位都有一定的起伏，成像时就产生了相干斑噪声。对分布目标中的每个单元的场分

布,一般都采用某种概率模型(如高斯分布、瑞利分布等).此方法得出的 SAR 图像有明显的相干斑噪声,比较接近于实际效果.

(3)利用已有的 SAR 原始数据或 SAR 图像.这种方法相对来说比较简单,因为它省略了对目标散射场的计算.在 SAR 原始回波数据的同相和正交分量加入噪声,再进行重新采样和量化,最后进行成像处理,即得到 SAR 图像.这种方法主要是给出被模拟的合成孔径雷达系统最终图像的主观视觉效果,比较接近真实情况,能直观地看到系统主要参数对最终图像质量的影响.

3 回波模型的建立

3.1 点目标回波信号模型

SAR 点目标模拟是 SAR 模拟系统设计的一个关键步骤,是多点目标和分布目标模拟的基础. SAR 工作过程可看作“stop and go”模型^[9],其坐标几何关系示于图 2. 雷达工作模式是条带式, h 是载机高度, v 是载机速度, β 是天线方位向波束角, R_0 是载机平台到目标的最近距离.

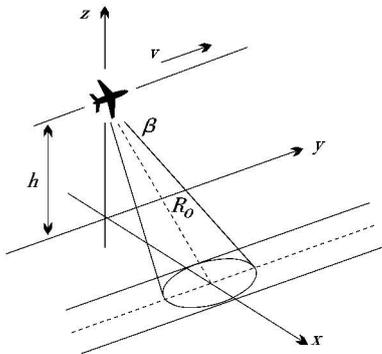


图 2 空间几何示意图

合成孔径雷达发射的信号为线性调频信号脉冲串,其表达式为^[10]

$$S_t(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} p(\tau - nT_r)$$

$$p(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_0\tau + \frac{K_r}{2}\tau^2\right)\right] \quad (1)$$

其中, $\text{rect}(\cdot)$ 为矩形窗函数, K_r 为 LFM 线性调频率, f_0 为载波频率, T 为脉冲宽度, T_r 为脉冲重复周期(PRT),则在 τ 时刻接收到的回波信号为

$$S_r(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_{r0}(\tau - nT_r)$$

$$S_{r0} = \sigma \cdot W_a\left(\tau - \frac{2r(\tau)}{C}\right) \cdot W_r\left(\tau - \frac{2r(\tau)}{C}\right) \cdot p\left(\tau - \frac{2r(\tau)}{C}\right) \quad (2)$$

其中, $W_r(\cdot)$ 为距离向天线方向图, $W_a(\cdot)$ 为方位向天线方向图, σ 为点目标后向散射系数,点目标的回波经过过去载频、正交解调之后的信号复数形式为

$$S(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} S_0(\tau - nT_r)$$

$$S_0(\tau) = S_{r0}(\tau) \cdot \exp(-j2\pi f_0 \tau) = \sigma \cdot W_a\left(\tau - \frac{2r(\tau)}{C}\right) \cdot W_r\left(\tau - \frac{2r(\tau)}{C}\right) \cdot \text{rect}\left(\tau - \frac{2r(\tau)}{C}\right) \cdot \exp\left\{j2\pi\left[\frac{K_r}{2}\left(\tau - \frac{2r(\tau)}{C}\right)^2\right]\right\} \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi r(\tau)}{\lambda}\right) \quad (3)$$

式(3)中,第一个相位项是基带发射信号的延迟,忽略脉冲宽度内距离延迟函数的变化时,它在距离向上是不变的.第二个相位项是方位向的多普勒信号.幅度项表示回波信号在方位向与距离向之间的耦合关系,形成了 SAR 回波信号所特有的距离徙动现象,这是回波信号模拟中需要模拟的一个重要现象.图 3 是单点目标距离徙动现象的示意图.方位时刻不同,则点目标与雷达平台间的距离不同,因而形成不同的回波延迟,使回波处于不同的距离门上.

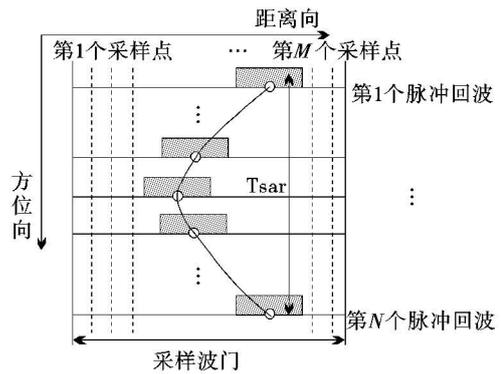


图 3 点目标距离徙动示意图

雷达接收到的信号为

$$R(\tau) = S(\tau) + C(\tau) + J(\tau) + N(\tau) \quad (4)$$

式中, $S(\tau)$ 为接收到的点反射后的回波信号; $C(\tau)$ 为杂波信号(为地杂波、气象杂波或海杂波的组合); $J(\tau)$ 为接收到的干扰信号(包括有源干扰和无源干扰); $N(\tau)$ 为噪声.这里只考虑地面杂波的影响.

$$C(\tau) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} K_{RF} \cdot \sqrt{\frac{P_t \cdot L_s}{(4\pi)^3}} \cdot \frac{g_{vt}(\theta) \cdot g_{vr}(\theta)}{r^2(\tau)} \cdot \lambda \cdot \sigma \cdot \exp\left[j\omega_c \left(\frac{r(t) - r_0}{c}\right) + j\pi\alpha \left(\frac{r(t) - r_0}{c}\right)^2\right] \cdot \text{rect}\left[\frac{r(t) - r_0}{cT}\right] \quad (5)$$

其中, K_{RF} 为射频滤波放大系数, P_t 为雷达发射机峰值功率, L_s 为雷达发射接收综合损耗, $g_{vt}(\theta)$ 与 $g_{vr}(\theta)$ 分别为在杂波单元质心方向上发射和接收的天线增益. 则最后的回波信号为

$$R(\tau) = S(\tau) + C(\tau) \quad (6)$$

利用距离—多普勒算法^[11]对点目标成像, 图 4 是其流程图, 成像结果如图 5.

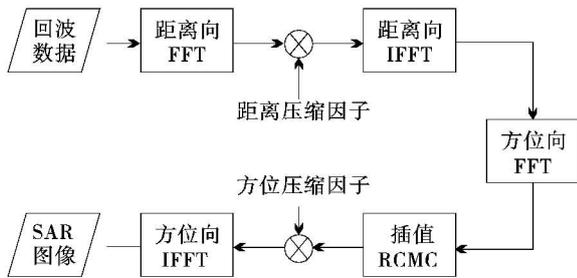
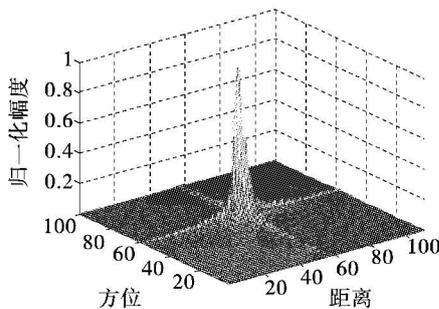
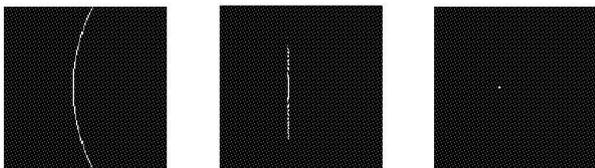


图 4 距离—多普勒算法流程



(a) 单个点目标二维成像结果



(b) 距离压缩结果 (c) 迁移校正结果 (d) 方位压缩结果

图 5 点目标回波模拟及成像结果

3.2 分布目标回波信号模型

对于分布目标, 采用小面单元模型对目标进行建

模, 分布目标由各个小面单元来代替点目标, 分布目标回波信号也就是各个小面单元回波的相干叠加.

假设 σ_{ij} 为小面单元 A_{ij} 的后向散射系数, $r_{ij}(x)$ 为 x 时刻 A_{ij} 到 SAR 的距离, $W_{aij}(x)$ 为方位向的方向图, $W_{rij}[r - r_{ij}(x)]$ 为距离向的方向图, 那么分布目标回波信号的数学表达式为

$$S(x, r) = \sum_i \sum_j \sigma_{ij} \cdot W_{aij}(x) \cdot W_{rij}(r - r_{ij}(x)) \cdot \text{rect}(r - r_{ij}(x)) \cdot \exp\left[\frac{j4\pi K_r (r - r_{ij}(x))^2}{C^2}\right] \cdot \exp\left(-\frac{4\pi r_{ij}(x)}{\lambda}\right) \quad (7)$$

4 结 论

合成孔径雷达模拟是根据建立的雷达系统模型, 复现雷达系统的动态工作过程. 具体的说, 模拟的对象是雷达系统、合成孔径雷达目标及目标环境; 模拟的方式是复现蕴含合成孔径雷达目标及目标环境信息的雷达回波信号^[12]. 对 SAR 原始数据的模拟在研究工作中占有非常重要的地位, 它不仅简化处理算法的试验、改进模式识别与特征提取技术、抑制噪声及杂波、优化 SAR 的系统参数; 同时有助于验证系统设计的正确性, 评价成像处理算法的优劣, 为 SAR 系统的应用研究提供理想的实验数据.

参考文献

- [1] Julian C. Radar Image Simulation[J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1978, 16(4):296 - 303.
- [2] Krupp V H, Waite W P, MacDonald. Incidence angle consideration for Spacecraft imaging radar [J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1982, 20(3):384 - 389.
- [3] Krupp V H, Waite W P, MacDonald. SAR Simulation [C]//. Proceedings of IGARSS'86 Symposium. Zurich, 1986:1645 - 1650.
- [4] Wessels G J, Kirbyme. SARIM-A spaceborne SAR simulation Package [C]//. Proceedings of IGARSS'86 Symposium. Zurich, 1986:1655 - 1660.
- [5] Giorgio Francescheti. SARAS: A Synthetic Aperture Radar Raw Signal Simulation [J]. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1):110 - 122.
- [6] 刘志强, 宋家骏. 星载合成孔径雷达回波信号模拟器原理和设计 [C]//. 全国第五界遥感、遥测、遥控技术年会论文集, 1995.

(下转第 84 页)

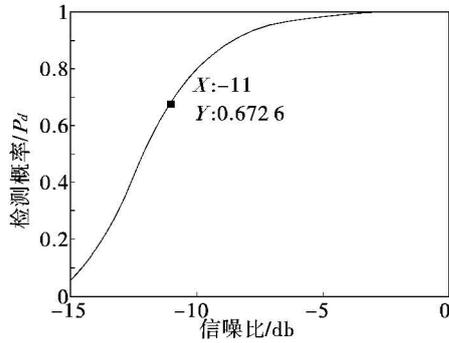


图 6 非均匀采样 LFM 信号在不同信噪比下的检测概率

5 结 束 语

提出了一种新的非均匀采样方法,在此基础上,得到了这类非均匀采样信号在分数阶 Fourier 变换域的频谱表达式,并分析了非均匀采样 LFM 信号在分数阶域的频谱性质.所提出的非均匀采样方法,与均匀采样方法相比,尽管信号在分数阶域的幅度有所降低,但是该方法既节省了存储空间,又满足了实时性要求;与传统的非均匀采样方法相比,该方法既解决了整个采样时段内由于过采样造成的数据冗余性,也消除了信号时变特征造成的局部冗余性.最后研究了该非均匀采样方法在不同信噪比条件下对 LFM 信号的检测概率,进一步验证了该方

法的有效性.

参考文献

- [1] 尉宇,孙德宝. 基于分数阶域的多分量线性调频信号能量聚集性检测[J]. 电讯技术,2004(3):139-143.
- [2] 汪安民. 基于非均匀采样的信号频率检测方法及其实现[D]. 武汉:华中科技大学,2004:1-8.
- [3] 陶然,齐林,王越. 分数阶 Fourier 变换的原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004:23-48.
- [4] 李炳照,陶然,王越. 非均匀采样信号的分数阶数字频谱研究[J]. 电子学报,2006,34(12):2146-2149.
- [5] Ozaktas H M, Kutay M A, Zalevsky Z. The fractional Fourier transform with Applications in Optics and Signal Processing[M]. New York: John Wiley & Sons, 2000: 1-45.
- [6] 潘晓峰,刘红星. 采样定理的拓展——一种新的非均匀采样规则[J]. 振动、测试与诊断,2003,23(1):14-17.
- [7] Oppenheim A V, Willsky A S, Nawab S H. 信号与系统[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2007:514-582.
- [8] 张明友,吕明. 信号检测与估计[M]. 2 版. 北京:电子工业出版社,2006:168-172.
- [9] Ran T, Bing-Zhao L, et al. Spectral Analysis and Reconstruction for Periodic Nonuniformly Sampled Signals in Fractional Fourier Domain[J]. IEEE Trans Signal Processing, 2007, 55(7): 3541-3547.

(上接第 74 页)

- [7] 李凌杰,王建国,黄顺吉. 基于真实反射场景 SAR 原始信号模拟[J]. 电子科技大学学报,1996, 25(6):566-568.
- [8] 詹学丽. 机载合成孔径雷达回波模拟器设计与实现[D]. 北京:北京理工大学,2003.
- [9] Liang Yi, Wang Hongxian, Xing Mengdao, et al. Imaging Study of High Squint SAR Based on FMCW[C]//2007 Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar,2007:6-9.
- [10] 刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1999:38-40.
- [11] 张玉玲,曲长文,何友. 调频连续波 SAR 成像算法研究[J]. 海军航空工程学院学报,2007,22(6):637-640.
- [12] 朱珍珍. 调频连续波 SAR 回波模拟研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005

欢 迎 刊 登 广 告