

星载 SAR 系统设计与仿真

赵淑清^① 周志鑫^② 李绍滨^③

^①(北京化工大学信息工程系 北京 100029)

^②(北京遥感信息研究所 北京 100011)

^③(哈尔滨工业大学电子与通信工程系 哈尔滨 150001)

摘要 以星载 SAR 为应用背景, 研制了星载 SAR 系统设计与仿真软件 SARSIMS。SARSIMS 可以完成不同波段 SAR 系统的总体参数设计、总体参数分析、回波仿真, 条带、聚束和扫描成像模式的成像以及 SAR 系统的仿真。SAR 系统设计的可视化是 SARSIMS 的主要特点, 斑马图交互设计减少了设计难度和设计工作量, 提高了设计效率, 保证了 SAR 系统设计可以满足不同的要求。

关键词 SAR 系统, 系统仿真, SAR 成像, 回波仿真

中图分类号: TN955

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)08-1468-04

The System Design and Simulation on Spaceborne SAR

Zhao Shu-qing^① Zhou Zhi-xin^② Li Shao-bin^③

^①(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

^②(Beijing Remote Sensing Information Institute, Beijing 100011, China)

^③(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract An application program, SARSIMS, is developed for spaceborne SAR. SARSIMS can be used in designing system parameters, and SARSIMS also performs analysis of system parameters, echo generating, SAR image formation, and system simulation. The design of system parameters and swath selection is completed by interactive operation. Visualization is an important characteristic of SARSIMS. Because of visualization in design procedures, SARSIMS provides an efficient method and is capable of satisfying user requirements.

Key words SAR system, System simulation, SAR imaging, Echo generating

1 引言

在研制合成孔径雷达(SAR)的过程中, 最基本的步骤是系统的仿真, 包括从发射脉冲到图像输出全过程。通过仿真可以把 SAR 的图像与具体的雷达参数有机地联系起来, 给定不同的 SAR 系统参数便得到不同质量的 SAR 图像。通过仿真还可以对成像算法的优劣进行检验, 尤其是新研究或改进的算法对不同环境适应性的检验。

SARSIMS 作为开发研制星载合成孔径雷达系统的辅助工具, 一方面可以用软件仿真来取代部分实物仿真, 节省大量的人力和物力; 另一方面, 可以用 SARSIMS 来验证所设计的 SAR 系统的技术参数, 为用户对产品进行验收、检查、跟踪提供方便。此外, SARSIMS 还可以作为一种培训手段, 培养、训练从事 SAR 工作的科研人员。

2 SARSIMS 系统功能

SARSIMS 具有 SAR 系统总体参数设计^[1,2]、SAR 系统总体参数分析、目标仿真、多种模式^[1-4]成像以及 SAR 系统仿真等功能。

星载 SAR 系统仿真软件 SARSIMS 包括 7 个子系统: 系统设计子系统、回波产生子系统、成像子系统、图像质量评估子系统、系统仿真子系统、演示子系统、帮助。图 1 为 SARSIMS 系统功能框图, 图 1 中系统设计、回波产生、SAR 成像、图像质量评估、系统仿真 5 个子系统是 SARSIMS 的核心。

系统设计子系统包括频率选择、轨道参数、几何参数、雷达参数、信噪比 5 个模块。以条带 SAR 系统设计为例, 首先选择工作频段, 频段包括 L, S, C, X, 再选择频率或波长。轨道参数设计完成计算太阳同步圆轨道参数及计算每日轨道数、试算回归周期两个辅助功能。在轨道设计完成后, 计算

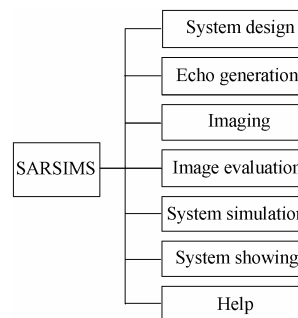


图 1 SARSIMS 系统功能框图

Fig.1 Functional block diagram of SARSIMS

相应的几何参数。雷达参数设计是最复杂的一个功能, 所有参数设计都要在这个模块中完成。雷达参数设计采用斑马图交互设计, 只要根据限制性参数在斑马图上点击鼠标就能设计出相应的雷达参数。信噪比模块确定信噪比/峰值发射功率和辐射分辨率、 $NE\sigma^0$ 。根据设计的参数, 由峰值发射功率确定信噪比和辐射分辨率、 $NE\sigma^0$, 也可由信噪比确定峰值发射功率。所有设计完成后, 经系统仿真判定是否满足总体指标要求。

SAR 系统参数设计完成后, 还必须对系统参数进行检验。一般要求对点目标和面目标的图像进行评估, 因此根据要求产生各种目标回波是回波产生子系统的任务。在产生的 SAR 原始回波中, 目标的类型包括点目标、面目标和任意排列点阵目标, 其中任意排列点阵目标可利用鼠标在测绘带上任意位置上设置, 或用键盘输入多个点目标位置、点目标散射强度及相位。产生回波时, 可以选择对产生的原始回波进行数据压缩。回波数据可以设置为 8 位字长及 4 位字长, 数据压缩格式包括 1~4 位 BAQ 压缩。

在雷达参数设计并产生了所需要的原始回波之后, 对产生的 SAR 回波进行成像操作。条带 SAR 成像包括 3 种算法: RD 算法、修正 RD 算法和 CS 算法, 聚束 SAR 成像利用 PF 算法, 扫描 SAR 成像则使用 SPECAN 算法。

成像时可分别选择不同的距离处理加权和方位处理加权。若回波曾经进行过压缩, 首先对压缩的回波进行相应的解压缩处理。

成像后可以在对话框中显示所成的图像, 并对选择的矩形区域进行放大。还可以在对话框中显示点目标的距离冲激响应函数和方位冲激响应函数(图 2)。SAR 图像输出包括两种格式, 原始图像数据和 BMP 图像数据。

成像子系统除了对产生的回波成像, 还可以对实际 SAR 数据进行成像, 目前 SARSIMS 包括 RADARSAT 原始回波数据接口。

对系统参数进行检验, 就需要对点目标和面目标进行图像质量评估, 图像质量评估子系统正是为了完成这一目的设

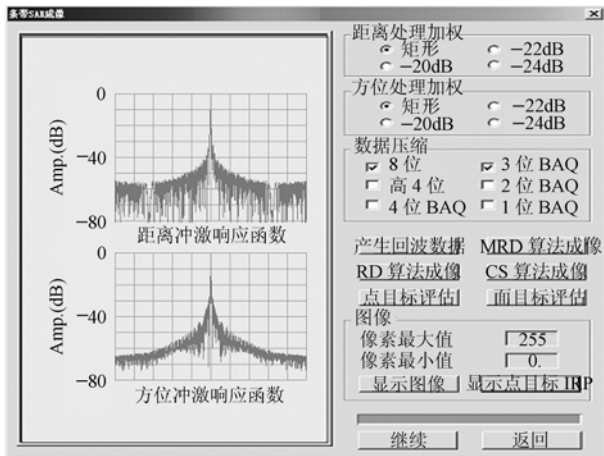


图2 SAR 成像子系统

Fig.2 SAR imaging subsystem

置的。

点目标评估是根据设计参数对成像的点目标计算方位向和距离向的峰值旁瓣比、积分旁瓣比、实际分辨率及方位模糊比, 并可以根据给定的不同插值倍数计算、显示方位向和距离向点扩散函数。

面目标评估则是根据设计参数对 SAR 图像计算面目标图像质量参数, 包括最大值、最小值、均值、方差、均方值、动态范围、对比度、等效视数、辐射分辨率等。面目标图像质量参数可以在鼠标所选的任意矩形区域内进行。

检验 SAR 系统参数的另一项内容是对系统的各种误差进行仿真。仿真误差包括: 系统幅度误差、相位误差; IQ 幅度误差、IQ 相位误差; 天线误差; 多普勒参数误差; 卫星姿态误差等。仿真时既可以选择单项误差, 也可以同时选择多项误差。仿真还包括回波数据误差, 如误码率及 A/D 字长所带来的影响。回波字长对应 A/D 转换的位数, 可在 8 位之内任意选择。

由于 SAR 的几何定位精度与沿航迹位置误差、垂直航迹位置误差、径向位置误差、回波时延误差、传输时延误差、时钟误差、高度误差、多普勒频率误差等有关, 输入这些误差可计算出所有误差对几何定位精度的贡献。

3 SARSIMS 的主要特点

SARSIMS 将多种工作模式、多种成像算法集成在同一软件中。SARSIMS 包括 3 种工作模式、多种成像算法, 系统的设计兼顾到了 4 个频段和不同分辨率及不同的成像模式, 4 个频段的频率范围从 1GHz 到 10GHz, 分辨率兼顾高、中、低模式, 数据率根据不同模式及不同参数有非常大的变化。

SAR 系统设计的可视化是 SARSIMS 的一个鲜明特点, 斑马图交互设计为设计过程可视化提供了可能, 并最大程度地减小了设计难度。在 SAR 系统设计中, 很多参数设计并不是可以一次完成的。由于很多系统参数相互制约, 如果按常规设计方法, 需要多次反复修正, 最后才能确定所设计的全部系统参数。因为距离向模糊和方位向模糊取决于脉冲重复频率(PRF)的选择和测绘带的位置。较低的 PRF 会增加方位向模糊; 较高的 PRF 会增加距离向模糊, 或者限制测绘带宽度。当卫星轨道较高时, 不仅有多观测区域的回波信号同时在空间传播, 还有多个星下点回波信号同时在空间传播。因此必须使测绘带和 PRF 的选择避开发射信号和星下点信号的干扰。

斑马图设计基于图 3 所示的几何关系。若卫星的下视角用 α 表示, 则

$$\alpha = \sin^{-1}[\sin(\pi - \theta)R_e / (R_e + h)] \quad (1)$$

式中 h 为卫星距地面的垂直高度, θ 为入射角, 那么地心角 $\gamma = \theta - \alpha$ 对应的地距 R_g 为

$$R_g = R_e \cdot \gamma \quad (2)$$

雷达到目标的斜距 R_s 为

$$R_s = \sqrt{(R_e + h)^2 + R_e^2 - 2(R_e + h)R_e \cos(\gamma)} = R_e [\sin(\gamma) / \sin(\alpha)] \quad (3)$$

目标回波时间 T_e

$$T_e = 2R_s / c \quad (4)$$

对应测绘带的最小和最大地距与最小和最大入射角有关

$$R_{g \min} = R_e \left\{ \theta_{\min} - \sin^{-1} \left[\sin(\pi - \theta_{\min}) R_e / (R_e + h) \right] \right\} \quad (5)$$

$$R_{g \max} = R_e \left\{ \theta_{\max} - \sin^{-1} \left[\sin(\pi - \theta_{\max}) R_e / (R_e + h) \right] \right\} \quad (6)$$

如果保护时间带用 T_g 表示, 星下点回波起始时间则为

$$T_{nad} = 2h / c - T_g \quad (7)$$

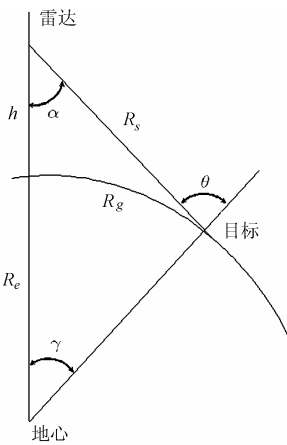


图3 卫星与目标的几何关系

Fig.3 Geometry of satellite and target

分别计算发射信号干扰带的前后沿回波时间以及星下点信号干扰带的前后沿回波时间, 就可以根据所得数据画出斑马图^[1]。

SAR 系统设计需要计算大量的参数, SARSIMS 将 SAR 系统参数分为轨道参数、几何参数和雷达参数, 并通过斑马图将这些参数有机地联系在一起。SARSIMS 把多个参数设计都集中在斑马图交互设计上, 在频段选择和轨道设计(或利用已知轨道参数)之后, 只要在斑马图上相应的位置点击鼠标画线, 就相当于选择了斑马图上的 PRF 等参数, 由此设计出所需的几何参数和雷达参数, 并根据可视化设计过程及时修正设计。斑马图交互设计减少了设计工作量, 提高了设计效率。

斑马图分为地距斑马图和入射角斑马图, 前者是脉冲重复频率与地距的关系曲线, 后者则是脉冲重复频率与入射角的关系曲线。图 4 给出了地距斑马图的例子。在地距斑马图上可以用鼠标动态选择地距、PRF 及测绘带宽度, 同时动态计算出在该参数条件下的近端和远端地距、斜距、地速、入射角、视角、地心角、信号带宽、采样率、回波窗宽度、数据率以及一些限制性参数, 并给出时间灵敏度曲线及入射角、视角和斜距的关系曲线。入射角斑马图的功能与地距斑马图相同, 不同的是测绘带以距离向波束宽度画在斑马图上, 更适于考察入射角及距离向波束宽度的影响。对于聚束 SAR 系统设计, 除了以上参数外, 还给出斜地距等参数。

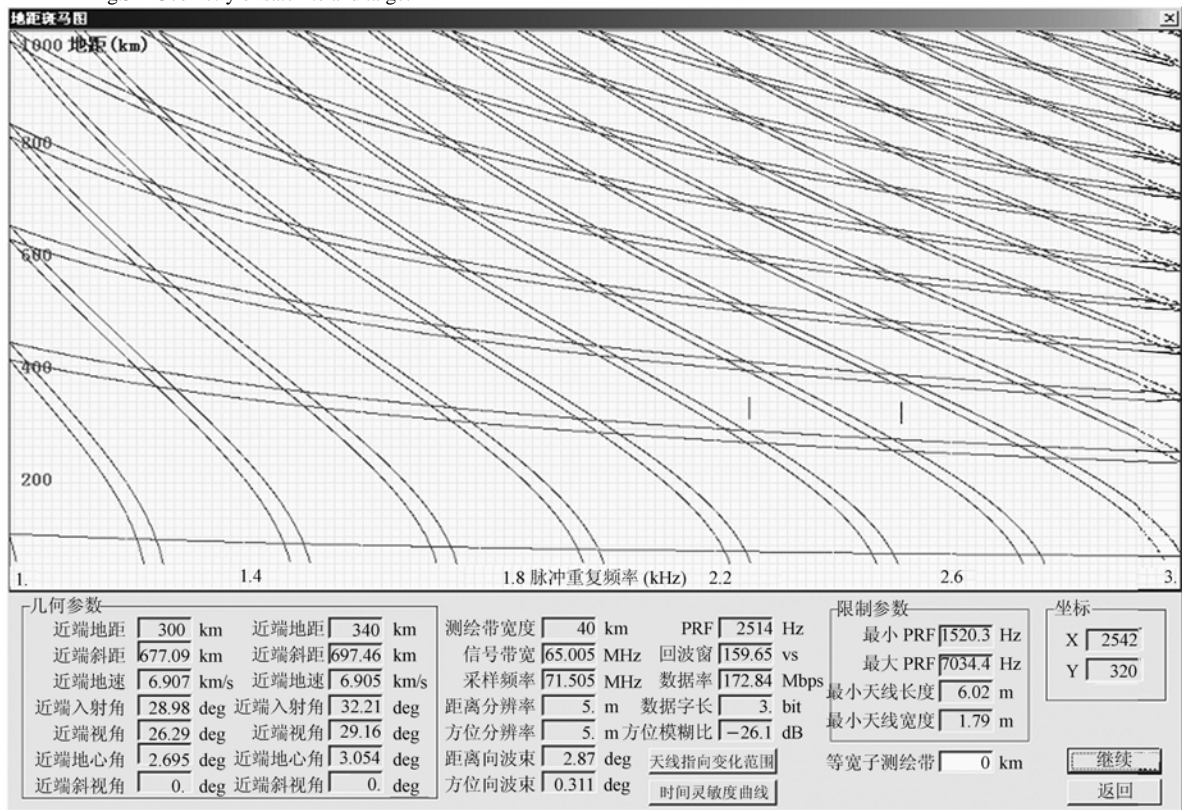


图 4 地距斑马图

Fig.4 Diamond diagram about ground range

此外, SARSIMS 为波位设计提供可能, 在斑马图上很容易根据地距或入射角选择满足一定条件的一组波位, 既可以用来设计条带 SAR 的多波位, 也可以用来设计 ScanSAR 测绘带的波位。波位设计的可视化保证了设计过程的快速和准确。

对于大量的SAR系统参数, 除了将它们分类, 还要根据不同需求方便地调整参数设计方向。SARSIMS采用了智能参数设计, 整个设计过程既充分考虑到不同用途又考虑到操作方便, 因此几乎所有参数设计过程都提供了智能参数设计方向。一般来讲, 系统设计和系统分析的参数计算方向往往是不同的, 而技术及工艺对系统参数的限制也是不同的。以信噪比计算为例, 有两种输入模式: 输入峰值发射功率或信噪比。当限制发射机功率时, 输入峰值发射功率、发射天线增益、接收天线增益、 σ^0 、噪声系数、各种损失时, 可以计算出信噪比、辐射分辨率、 $NE\sigma^0$ 、距离模糊比。反之当输入信噪比、发射天线增益、接收天线增益、 σ^0 、噪声系数及各种损失时, 则可计算峰值发射功率、辐射分辨率、 $NE\sigma^0$ 、距离模糊比。

SARSIMS 为使用者提供了丰富的参考图表, 最大程度地降低了设计的复杂性。在系统设计时, 几乎每个设计步骤都可以借助参考图表, 选择所需参数进行设计。

SARSIMS 经过多个实际 SAR 系统和设计系统的检验, 运行实践证实了 SARSIMS 的系统参数设计正确, 操作方便, 运行效率高、可靠性强。

4 结束语

SARSIMS 的设计和仿真的特点是兼顾到了 4 个频段及不同的成像模式, 分辨率兼顾高、中、低模式, 数据率则兼容很大的变化范围。

斑马图交互设计是 SARSIMS 的主要特点。在 SAR 系统设计中, 很多参数设计并不是可以一次完成的。SARSIMS 把多个设计参数都集中在斑马图交互设计上, 在频段选择和轨道设计之后, 只要在斑马图上点击鼠标就能设计出所需的几何参数和雷达参数。斑马图交互设计减少了设计难度和设计工作量, 提高了设计效率。

SARSIMS 采用了智能参数设计, 整个设计过程充分考虑到操作方便, 几乎所有参数设计过程都提供了智能参数设计方向。经过实际 SAR 系统和设计系统的检验, 证实了 SARSIMS 的系统设计正确, 操作方便, 运行效率高、可靠性强。

参考文献

- [1] 刘永坦等著. 雷达成像技术. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999, 第三章和第五章.
- [2] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing. New York: John Wiley & Sons, INC, 1991, Chapter 6 & Chapter 9.
- [3] Cimmino S, Franceschetti G, Iodice A, *et al.* Efficient spotlight SAR raw signal simulation of extended scenes. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2329–2337.
- [4] Holzner J, Bamler R. Burst-mode and Scan SAR interferometry. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2002, 40(9): 1917–1934.

赵淑清: 女, 1956年生, 教授, 从事 SAR 成像、图像融合与分类、空域信号处理等方向的研究。

周志鑫: 男, 1965年生, 研究员, 从事遥感信息处理、图像处理等方向的研究。

李绍滨: 男, 1948年生, 教授, 从事 SAR 信号处理、图像处理、数据压缩等方向的研究。