

文章编号: 1672-2892(2012)02-0138-05

星载距离向多波束 SAR 的系统模糊特性

刘军鹰, 蔡竟业, 王文钦

(电子科技大学 通信与信息工程学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 介绍距离向多波束合成孔径雷达(SAR)系统的基本原理, 分析距离向多波束星载 SAR 的模糊特性, 与常规 SAR 进行对比, 并提出了距离向多波束 SAR 距离模糊的计算方法。仿真结果表明距离向多波束 SAR 系统在实现高分辨率宽测绘带的基础上, 能够有效地减小距离模糊, 提高成像质量。

关键词: 合成孔径雷达; 星载合成孔径雷达; 宽测绘带; 距离向多波束

中图分类号: TN958

文献标识码: A

Ambiguity characteristics of space-borne range multi-beam SAR systems

LIU Jun-ying, CAI Jing-ye, WANG Wen-qin

(College of Communication and Information Engineering, UESTC, Chengdu Sichuan 611731, China)

Abstract: After introducing the principle of range multi-beam Synthetic Aperture Radar(SAR) and analyzing its ambiguity characteristics by through the comparison with conventional single-beam SAR, this paper presents an efficient algorithm to calculate the ambiguities of space-borne range multi-beam SAR systems. Simulation results show that the range multi-beam SAR provides an effective way to high-resolution and wide-swath imaging.

Key words: Synthetic Aperture Radar; space-borne Synthetic Aperture Radar; wide-swath; range multi-beam

高分辨率宽测绘带是星载合成孔径雷达(SAR)的一个重要发展方向。宽测绘带能够在短时间内完成对全球的监测或者对某个特定的区域进行重复监测^[1]。但是对于常规 SAR 而言, 距离向宽测绘带与方位向高分辨率是一对矛盾^[2]。目前已有较多文献探讨解决宽测绘带与方位向高分辨率这对矛盾的方法, 文献[3]提出距离向多波束的方法, 也就是天线在接收时形成 K 个波束, 分别对应 K 个子测绘带, 这种方法的缺陷是很难解决相邻波束之间的旁瓣干扰。文献[4]提出用零点控制来实现宽测绘带的想法, 它包括距离向和方位向的零点控制, 只需控制天线的零点, 使得某个时刻成像点的模糊区域处于天线的零点区域。文献[5]提出在方位向使用多相位中心多波束方法扩展测绘带宽, 距离向使用多个子天线接收回波信号来补偿因距离向接收波束展宽而降低的增益, 从而抑制距离向模糊。实际上, 模糊分析是 SAR 系统设计中的重要内容, 文献[6]给出了常规星载 SAR 模糊特性的计算方法。但是与常规 SAR 系统相比, 距离多波束 SAR 系统的模糊特性有其自身的特殊性。为此, 本文在简要介绍距离向多波束 SAR 系统原理的基础上, 深入分析了距离向多波束 SAR 系统模糊信号的来源, 提出了距离多波束 SAR 距离模糊的计算方法, 并将通过此方法计算得出的距离向多波束 SAR 距离模糊特性曲线与常规 SAR 进行了比较。

1 距离向多波束 SAR 系统原理

假设测绘带内的斜距 R 范围为:

$$\left(\frac{n}{PRF} + \Delta T + T_p\right) \frac{c}{2} < R < \left(\frac{n+N}{PRF} - T_p\right) \frac{c}{2} \quad (1)$$

式中: n 为某整数; PRF(Pulse Repetition Frequency)即脉冲重复频率, 为方位向的采样频率; ΔT 为雷达收发切换时间; T_p 为脉冲重复周期; c 为光速; N 为子测绘带个数, 整个测绘带内包含 N 个子测绘带。

收稿日期: 2011-04-13; 修回日期: 2011-05-26

$$\left(\frac{n+i}{PRF} + \Delta T + T_p\right) \frac{c}{2} < R_i < \left(\frac{n+i+1}{PRF} - T_p\right) \frac{c}{2}, 0 \leq i \leq N-1 \quad (2)$$

式中: i 为某一整数; R_i 为第 $i+1$ 个子测绘带内的斜距。

显然,同时到达天线的将会是 N 个子测绘带回波的混叠信号。例如对于时刻 τ (从发射脉冲开始计算的时间),采样信号将是斜距分别为 $\frac{c}{2}\left(\tau + \frac{n}{PRF}\right)$, $\frac{c}{2}\left(\tau + \frac{n+1}{PRF}\right)$, $\dots$, $\frac{c}{2}\left(\tau + \frac{n+N-1}{PRF}\right)$ 的分辨单元的信号叠加。因此只要能分离出各个子测绘带的信号,就能实现宽测绘带的目标。

距离向多波束 SAR 系统^[7]原理见图 1,天线在距离向上分为 N 个子天线,从上到下依次记为 $A_0, A_1, \dots, A_{N-1}$ 。这 N 个天线的相位中心以 D 为距离等距排列,每个天线的宽度也是 D 。发射信号时由 1 个子天线发射(也可以 N 个天线一起发射),覆盖整个测绘带,接收时由各个子天线分别接收。

假设这 N 个斜距分辨单元到天线连线与天线法线的夹角分别为 $\alpha_0(r), \alpha_1(r), \dots, \alpha_{N-1}(r)$ (其中 r 为斜距分

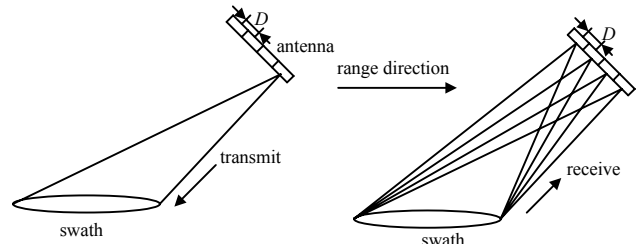


Fig.1 Range multi-beam SAR systems diagram
图 1 距离向多波束 SAR 系统原理图

辨单元到天线连线的长度),则第 1 个分辨单元信号在各个子天线上的相移为 $0, \frac{2\pi D \sin \alpha_0(r)}{\lambda}, \dots, \frac{2\pi(N-1)D \sin \alpha_0(r)}{\lambda}$ (λ 为发射信号波长);第 2 个分辨单元在各个子天线上的相移为 $0, \frac{2\pi D \sin \alpha_1(r)}{\lambda}, \dots, \frac{2\pi(N-1)D \sin \alpha_1(r)}{\lambda}$;这样依次可写出其他分辨单元在各个子天线上的相移。只要这 N 组天线的相移是线性无关的,就可从混叠信号中分别提取出 N 个分辨单元的信号,也就是可形成合适的方向图,使得成像点增益为 1,而模糊点增益恰好为 0。这样就能分离出各个子测绘带的信号,实现宽测绘带的目的。在文献[7]中对这种方法有很详细的描述。

2 星载 SAR 的距离模糊特性分析

由于地球曲率的影响,在距离向方向图中,任何一个旁瓣回波信号的传输时延与观测信号经主瓣传输的时延之差是脉冲重复周期整数倍的区域,其前后相邻的发射脉冲回波就会与观测带有用回波信号同时到达接收机,造成在观测带录取窗口内的各种回波相互混叠,产生模糊。

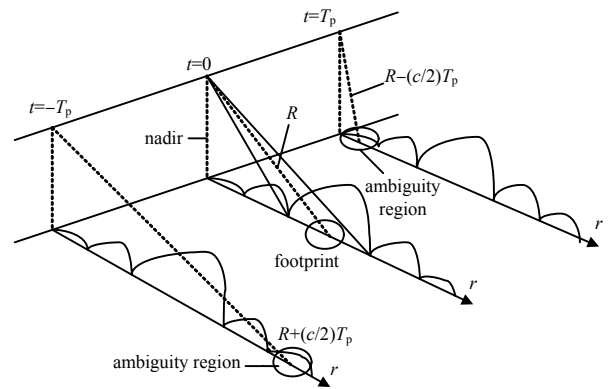
如果目标的斜距为 R ,则对该目标产生距离模糊的点的斜距 R_i 为:

$$R_i = R + \frac{c}{2} \frac{i}{PRF} \quad (3)$$

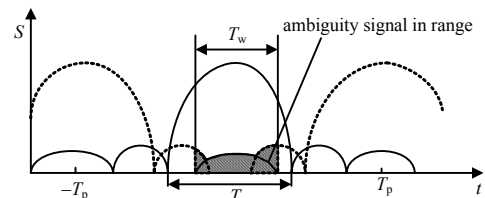
图 2 中, T_w 为回波窗口时间, T_a 为主波束照射时间。图 2 为成像区域外与成像区域时延之差成脉冲重复周期整数倍回波与成像区域回波相互混叠,产生模糊。

距离模糊特性由距离模糊比(Range Ambiguity Signal Ratio, RASR)定量描述。对于常规 SAR 系统,距离模糊比可用 2 种指标表示:分布式距离模糊比(Distributed RASR, DRASR)和平均距离模糊比(Average RASR, ARASR)^[8-11]。

DRASR 定义为距离向上与该点产生模糊的各点的回波信号能量之和与该点本身回波信号能量之比,其数学模型为:



(a) spatial location diagram



(b) time location diagram

Fig.2 Space-borne SAR ambiguity in range diagram
图 2 星载 SAR 距离模糊示意图

$$DRASR_i = \frac{\sum_{\substack{m=-n_h \\ m \neq 0}}^{n_h} \frac{\sigma_{im}^\circ G_{im}^2}{R_{im}^3 \sin \theta_{im}}}{\frac{\sigma_{i0}^\circ G_{i0}^2}{R_{i0}^3 \sin \theta_{i0}}}, \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

式中： m 为脉冲数($m=0$ 为所期望的脉冲)， $m>0$ 代表之前的干扰脉冲， $m<0$ 代表之后的干扰脉冲； σ_{im}° 和 σ_{i0}° 分别对应第 m 个模糊点和第 i 个被模糊点的地面后向散射系数； G_{im} 和 G_{i0} 分别对应第 m 个模糊点和第 i 个被模糊点的天线功率增益； R_{im} 和 R_{i0} 分别对应第 m 个模糊点和第 i 个被模糊点到天线相位中心距离； θ_{im} 和 θ_{i0} 分别对应第 m 个模糊点和第 i 个被模糊点的入射角； n_h 为对应视界的脉冲数；第 i 个被模糊点对应的 $m=0$ ，为所期望的脉冲。

DRASR 要求观测带距离向上任意一点都必须满足该指标，即测绘带内最大距离模糊比满足要求：

$$DRASR_{\text{peak}} = \max_i \frac{\sum_{\substack{m=-n_h \\ m \neq 0}}^{n_h} \frac{\sigma_{im}^\circ G_{im}^2}{R_{im}^3 \sin \theta_{im}}}{\frac{\sigma_{i0}^\circ G_{i0}^2}{R_{i0}^3 \sin \theta_{i0}}} \quad (5)$$

ARASR 定义为模糊区内的回波信号总能量与观测带内回波信号能量之比，ARASR 只要求整个观测带的平均模糊情况达到指标。ARASR 的数学模型为：

$$ARASR = \frac{\sum_{\substack{m=1 \\ m \neq 0}}^{+\infty} \int_{\theta_{mn}}^{\theta_{mf}} \frac{\sigma^\circ(\theta) G(\theta)^2}{R(\theta) \sin \theta}}{\int_{\theta_{0n}}^{\theta_{0f}} \frac{\sigma^\circ(\theta) G(\theta)^2}{R(\theta) \sin \theta}} \quad (6)$$

式中： θ 为入射角； $\sigma^\circ(\theta)$ 为地面后向散射系数； $G(\theta)$ 为天线功率增益； $R(\theta)$ 为天线相位中心与地面之间的距离； θ_{mn} 和 θ_{mf} ($m=1,2,\dots$) 表示第 m 个模糊区的近端入射角和远端入射角； θ_{0n} 和 θ_{0f} 表示观测带的近端入射角和远端入射角。

3 距离向多波束 SAR 的距离模糊特性分析

与常规 SAR 距离向的 1 个模糊点只对 1 个目标点产生模糊不同的是，宽测绘带 SAR 的 1 个模糊点会对测绘带的 N 个目标点产生模糊(分布在 N 个子测绘带里)。

假设有 2 个子测绘带，天线距离向波束覆盖的斜距范围为：

$$\frac{nc}{2PRF} < R < \frac{(n+2)c}{2PRF} \quad (7)$$

假设在距离向主瓣外某目标的斜距为 R_0 (其中 $\frac{n+2}{2PRF} < R_0 < \frac{n+3}{2PRF}$)，由公式(3)可知，对于常规 SAR 来说，这

个目标点只对 $R_0 - \frac{c}{2PRF}$ 产生模糊。但是对于方位向多波束 SAR 系统来说，这个目标将对 $R_0 - \frac{c}{2PRF}$ 和 $R_0 - \frac{c}{PRF}$ 这 2 个斜距点产生模糊。在文献[6]中，通过 N 个天线同时接收信号，利用天线与目标点之间的 1 组线性无关的相移矩阵反解出各个子测绘带中的信号。其实就是形成合适的方向图，使得成像点增益为 1，而模糊点增益恰好为 0。这种方法能有效降低子测绘带之间的干扰，需要注意的是模糊点除了受到天线方向图的影响，还要受到反解矩阵形成的方向图的影响。

如果距离向多波束 SAR 与常规 SAR 观测相同的测绘带区域，每个子孔径的 σ_{ij}^0 与 G_{ij} 近似相同。在计算距离模糊比时，第 k 个接收孔径的距离模糊比可以计算为：

$$DRASR_{ki} = \frac{\sum_{\substack{m=-n_h \\ m \neq 0}}^{n_h} \frac{\chi_{kim} \sigma_{kim}^\circ G_{kim}^2}{R_{kim}^3 \sin \theta_{kim}}}{\frac{\sigma_{ki0}^\circ G_{ki0}^2}{R_{ki0}^3 \sin \theta_{ki0}}} \quad (8)$$

式中： σ_{kim}° 、 G_{kim} 、 R_{kim} 和 θ_{kim} 分别为第 k 个子测绘带的第 m 个模糊点对应的地面后向散射系数、天线功率增益、到

天线相位中心距离和入射角; $\sigma_{ki0}^\circ, G_{ki0}, R_{ki0}$ 和 θ_{ki0} 分别为第 k 个孔径的第 i 个被模糊点对应的地面后向散射系数、天线功率增益、到天线相位中心距离和入射角; χ_{kim} 为第 k 个子测绘带的反解矩阵形成的方向图在 R_{im} 处的增益; n_{kh} 为对应视界的脉冲数; 第 i 个被模糊点对应的 $m=0$, 为所期望的脉冲。

对第 k 个子测绘带中的目标点 i 产生模糊的模糊点 j 的斜距 R_{kij} 为:

$$R_{kij} = R_{ki} + \frac{c}{2 PRF} j \quad (9)$$

式中: j 为某一整数; R_{ki} 为第 k 个子测绘带对目标点 i 的斜距。

将 N 个子孔径看作一个整体系统, 于是距离向多波束 SAR 系统距离模糊比应该满足式(10)要求:

$$DRASR_{\text{peak}} = \max_i \frac{\sum_{k=1}^N \sum_{\substack{m=n_{kh} \\ m \neq 0}}^{n_{kh}} \frac{\chi_{kim} \sigma_{kim}^\circ G_{kim}^2}{R_{kim}^3 \sin \theta_{kim}}}{\sum_{k=1}^N \frac{\sigma_{ki0}^\circ G_{ki0}^2}{R_{ki0}^3 \sin \theta_{ki0}}}, \quad 1 \leq k \leq N \quad (10)$$

4 仿真结果和分析

仿真总体参数为: 在正侧视的工作模式下, 工作频率 $f=9.6$ GHz, 卫星高度 $H=800$ km, 卫星速度为 $7\,100$ m/s, 方向图主瓣内斜距范围为 910 km~ 990 km, 采用均匀加权的天线方位图, 地面散射特性用 $\sigma = \sigma_0 \cos^2 \alpha$ 模型。

假设常规 SAR 系统用 1 个子天线进行发射和接收, $PRF=1\,500$ Hz。距离向多波束 SAR 系统用 1 个子天线进行发射, 2 个子天线进行接收, 子测绘带宽度为 50 km, $PRF=3\,000$ Hz, 子天线长度为 1.43 m。图 3 给出多子测绘带距离向分布式模糊曲线, 其中虚线为距离向多孔径接收 SAR 的距离向模糊曲线, 实线为常规 SAR 的距离向模糊曲线。可见, 距离向多孔径接收 SAR 总的距离向模糊比为 $-22.591\,7$ dB, 而常规 SAR 为 $-20.668\,5$ dB。

对比实线和虚线可以看出, 在测绘带宽相同的情况下, 距离向多孔径接收 SAR 距离模糊比常规 SAR 有所改善, 总模糊比也比常规 SAR 小, 而 PRF 可以提高 2 倍。在提高方位向分辨率的同时, 对距离向模糊也有所改善。

5 结论

本文在介绍了距离向多波束 SAR 系统的基本原理上, 深入分析了距离向多波束 SAR 系统模糊信号的来源, 提出了距离向多波束 SAR 距离模糊的计算方法, 并利用此方法计算得出的距离模糊特性曲线与常规 SAR 进行了比较。仿真结果表明, 距离向多波束 SAR 在测量相同测绘带宽的情况下, 不仅可以提高方位向分辨率, 而且对距离向模糊有所改善, 提高了成像质量。

参考文献:

- [1] 杨嵩, 蔡竟业. 线性调频连续波合成孔径雷达成像算法[J]. 信息与电子工程, 2008, 6(3): 167-171. (YANG Hao, CAI Jingye. Linear Frequency Modulated Continuous Wave-Synthetic Aperture Radar Imaging Algorithm[J]. Information and Electronic Engineering, 2008, 6(3): 167-171.)
- [2] 张澄波. 综合孔径雷达: 原理、系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989. (ZHANG Chengbo. Synthetic Aperture Radar: principle, Systems Analysis and application[M]. Beijing: Science Press, 1989.)
- [3] Currie A, Brown M A. Wide-swath SAR[J]. IEE Proceedings F-Radar and Signal Processing, 1992, 139(2): 122-135.
- [4] Callaghan G D, Longstaff I D. Wide-swath space-borne SAR using a quad-element array[J]. IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation, 1999, 146(3): 159-165.
- [5] Suess M, Grafmueller B, Zahn R. A novel high resolution, wide swath SAR system[C]// Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01. IEEE 2001 International. Sydney, NSW, Australia: [s.n.], 2001, 3: 1013-1015.

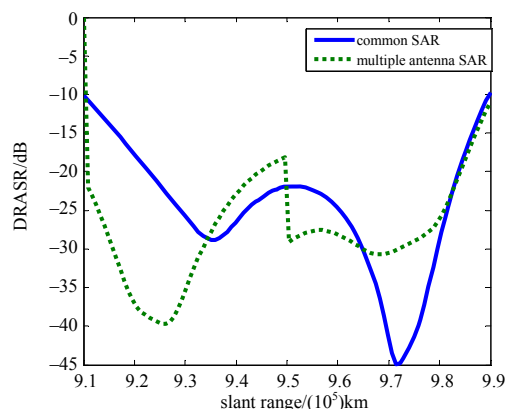


Fig.3 Multiple sub-swath band DRASR curves
图3 多子测绘带距离向分布模糊曲线

- [6] 陈元藻. 星载 SAR 模糊特性及其工程设计[J]. 上海航天, 1997(4):50-57. (CHEN Yuanzao. Ambiguous characteristics of spaceborne SAR and engineering design[J]. Aerospace Shanghai, 1997(4):50-57.)
- [7] 王小青,郭琨毅,盛新庆,等. 基于距离向多孔径接收的宽测绘带 SAR 成像方法的研究[J]. 电子与信息学报, 2004,26(5):739-745. (WANG Xiaoqing, GUO Kunyi, SHENG Xinqing, et al. A Research on the Multi-aperture Wide-Swath SAR Imaging Method[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2004,26(5):739-745.)
- [8] 王峨峨,谢亚楠. 星载合成孔径雷达模糊特性研究[J]. 上海航天, 2002(4):13-17. (WANG Ee, XIE Yanan. Ambiguities in Space Borne Synthetic Aperture Radar[J]. Aerospace Shanghai, 2002(4):13-17.)
- [9] 于泽,周荫清,陈杰,等. 星载合成孔径雷达模糊特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2006,27(z2):1362-1364. (YU Ze, ZHOU Yinqing, CHEN Jie, et al. Study on spaceborne synthetic aperture radar ambiguity performance[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006,27(z2):1362-1364.)
- [10] 吴志刚,刘光炎. 方位多波束星载 SAR 系统的模糊特性研究[J]. 空间电子技术, 2010,7(3):41-44. (WU Zhigang, LIU Guangyan. Study on Ambiguity of Space Borne SAR System Based on Digital Beamforming[J]. Space Electronic Technology, 2010,7(3):41-44.)
- [11] 于泽,周荫清,陈杰,等. 基于 LCMV 算法的星载 SAR 距离模糊抑制方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006,32(9):1035-1038. (YU Ze, ZHOU Yinqing, CHEN Jie, et al. Approach of range ambiguity suppression for spaceborne SAR based on LCMV algorithm[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006,32(9):1035-1038.)

作者简介:



刘军鹰(1988-),女,江西省万载县人,在读硕士研究生,主要研究方向为高分辨率宽测绘带 SAR 系统及成像, email: junjunljy@yahoo.com.cn.

蔡竟业(1963-),男,浙江省萧山市人,教授,博士生导师,主要研究方向为现代通信(雷达)信号处理与测试、频率合成技术和电子系统 RF 电路与系统.

王文钦(1979-),男,四川省仁寿县,副教授,主要研究方向为微波遥感、新体制雷达成像技术与通信信号处理.

(上接第 132 页)

4 结论

本文给出了基于软件无线电的高动态跟踪接收系统模拟源的设计结构以及实现方法。实际测试结果表明基于 FPGA 和 AD9957 的系统方案以及软硬件设计是正确可行的。该系统通用性强,可扩展性好,在测控通信和高速数传等应用领域具有较高的实用价值。目前,该模拟源已成功应用于某遥测系统中。

参考文献:

- [1] 王鹏,杨春,文招金,等. 高速通用数字调制器的设计与实现[J]. 信息与电子工程, 2010,8(3):247-250.
- [2] 陈大海,张健. 一种软件无线电遥测信号产生系统[J]. 信息与电子工程, 2007,5(1):66-69.
- [3] 朱明侠. 差模耦合跟踪接收机设计[J]. 现代雷达, 2004,26(1):59-61.
- [4] 宋媛媛,曾大志,曾涛. 基于三阶 DDS 的卫星信号多普勒模拟方法[J]. 北京理工大学学报, 2010,30(10):1213-1216.
- [5] 赵海龙,张健,周劼,等. 基于 FPGA 的 OFDM 系统设计与实现[J]. 通信技术, 2010,43(9):12-14.

作者简介:



石磊(1986-),男,四川省绵阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为信号处理, email: alecstone@sina.com.

杨春(1972-),男,四川省绵竹市人,研究员,从事数据采集、信号处理方面的研究.

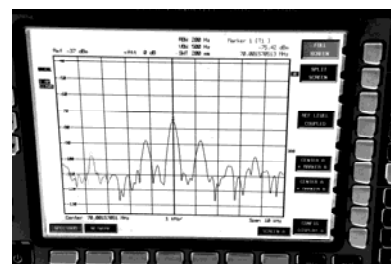


Fig.7 Signal from the satellite
图 7 真实卫星信号单音频谱