

小卫星分布式 SAR 系统的信噪比研究

张振华 保 铮 邢孟道 黄军义

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘 要: 小卫星分布式合成孔径雷达(SAR)系统可以提高成像分辨率, 检测地面运动目标和进行数字高程测量。但由于小卫星接收天线面积的减小使其输入信噪比相对于主星大大降低, 这将严重影响系统的性能。该文以 JERS-1 为主星, 分析了小卫星分布式 SAR 系统的信噪比以及信噪比降低对成像、测高、检测目标等的影响。分析表明此系统的信噪比将不能满足系统对信噪比的最低需求。最后讨论了用相干或非相干处理来改善系统输出信噪比的方法。

关键词: 小卫星分布式 SAR 系统; 信噪比; 测高; 地面动目标检测

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)01-0015-04

The Analysis of SNR in Passive Distributed Microsatellites SAR System

Zhang Zhen-hua Bao Zheng Xing Meng-dao Huang Jun-yi

(National Key Lab. of Radar Signal Processing, Xidian Univ., Xi'an 710071, China)

Abstract: The passive distributed microsatellites Synthetic Aperture Radar(SAR) system has the capabilities in improving image resolution, detecting ground moving targets and computing digital elevation models. But the input Signal-to-Noise Ratio (SNR) of the system will largely reduce compared with the active spaceborne radar because of the decrease of its receiving antenna's area, which will degrade the performance of the system. This paper analyses the effect of the SNR's reduction on SAR imagery, Digital Elevation Model (DEM) and Ground Moving Target Indication (GMTI), based on the JERS-1 acted as the active satellite, and comes to a conclusion that the SNR obtained from the system would be lower than what the system required. Some methods to improve the system's output SNR by coherent or noncoherent operating are also discussed.

Key words: Microsatellites distributed SAR system; SNR; DEM; GMTI

1 引言

小卫星分布式雷达系统是指: 小卫星上装载可自主控制和操作相对独立的雷达设备, 编队小卫星之间通过连续的通信联系、协同工作、队形控制和稀疏孔径信号处理来完成多种任务。文献[1]提出一种称作干涉车轮(cartwheel)的主星伴随小卫星群体制, 其构形如图 1 所示。其中主星用来发射信号, 它既可以利用已有的 SAR 卫星, 也可以重新发射一颗 SAR 卫星; 跟随的 3 颗小卫星按照 HILL 轨道排列, 可以在主星前或后, 为了避免与主星发生碰撞它们的虚拟中心与

主星的间距为数十公里, 每颗小卫星与虚拟中心的距离为数十公里。小卫星天线面积降为主星面积的 $1/N$, 这可以减小小卫星载荷, 降低成本, 但也带来一些问题。首先, 小天线使收发天线合成方向图的峰值旁瓣比、积分旁瓣比降低。图 2 仿真了天线方向图在方位角的变化, 参数如表 1。可见, 小天线接收后的峰值旁瓣比和积分旁瓣比分别恶化 40dB 和 38dB。另外, 由于旁瓣区的能量增加, 回波信号的模糊比会增加。最糟糕的是小天线使系统的输入信噪比下降。信噪比的降低可用功率孔径积的概念来解释, 所谓功率孔径积是指发射信号的平均功率与收发天线面积的乘积。系统的功率孔径积应大于需求的最小值。假设主星工作于自发自收模式下的实际功率孔径积是最小值的 M 倍, 则小卫星分布式 SAR 系统的功率孔径积就为最小值的 M/N 倍。如果 $M/N > 1$, 说明

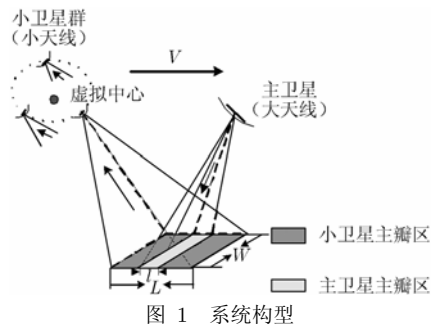


图 1 系统构型

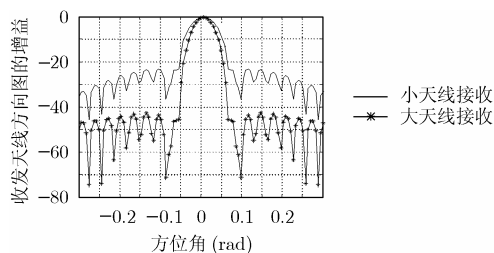


图 2 天线方向图

2005-04-18 收到, 2006-04-11 改回

微波成像技术国家重点实验室基金(51442020404DZ0102)资助课题

表 1 小卫星分布式 SAR 系统中主星的参数

轨道高度	天线尺寸	工作频率	频带宽度	视角
568km	11.9m×2.4m	1275MHz	15MHz	35°
空间分辨率	发射峰值功率	噪声等效散射系数	脉冲宽度	重复频率
18m×18m	1.3kW	$\sigma_{NE}^0 < -20.5\text{dB}$	35 μs	1500Hz

尽管小卫星的功率孔径积下降了 $1/N$, 但仍大于系统要求的最小值, 此时, 系统仍能够正常工作, 不过与信噪比相关的某些性能将会受到影响。如果 $M/N < 1$, 说明大天线发射功率的余量不能弥补小天线带来的信号增益损失, 此时系统将不能正常工作。信噪比降低将是分布式小卫星系统的致命弱点, 因此对信噪比的深入详细分析有重要的意义。本文首先推导小卫星分布式 SAR¹⁾ 系统输出信噪比的表达式, 然后分析信噪比降低对测高、地面动目标检测和高分辨成像的影响, 然后提出几种改善信噪比的方法。为了得到定量的结果, 下面的分析中暂以 JERS-1 作为主星。

2 小卫星分布式 SAR 系统的信噪比

小卫星分布式 SAR 系统由多个通道组成, 每一个通道都可以认为是一个独立的双基地 SAR 系统。双基地 SAR 的输出信噪比为^[2,3]

对点目标

$$(\text{SNR})_o = \frac{P_{av} A_R A_T \sigma_0(\theta_i, \theta_s, \phi) F_T^2 F_R^2}{8\pi \lambda R_T R_R^2 k T_0 F_n L_T L_R \delta_{az} v} \quad (1)$$

对分布目标

$$(\text{SNR})_o = \frac{P_{av} A_R A_T \rho(\theta_i, \theta_s, \phi) \delta_r F_T^2 F_R^2}{8\pi \lambda R_T R_R^2 k T_0 F_n L_T L_R v} \quad (2)$$

其中 $(\text{SNR})_o$ 表示系统输出信噪比; P_{av} 为平均功率; A_R 、 A_T 表示收发天线的有效面积; $\sigma_0(\theta_i, \theta_s, \phi)$ 为点目标的双基地雷达截面积, 分布型散射目标的双基地雷达截面积为目标的单位后向散射系数和成像分辨单元面积的乘积, 即: $\sigma(\theta_i, \theta_s, \phi) = \rho(\theta_i, \theta_s, \phi) \delta_r \delta_{az}$, δ_r , δ_{az} 为图像的距离和方位分辨率; F_T , F_R 和 L_R , L_T 分别是收发天线的方向图传播因子和损耗因子; λ 是发射信号波长; $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 表示玻尔兹曼常数, T_0 是接收机噪声温度, F_n 噪声系数, R_R , R_T 分别是收发天线到目标点的距离; v 表示雷达运动速度。

由式(1), 式(2)可知, 不管是点目标还是分布型目标, 它们的输出信噪比都与收发天线的面积和发射信号的平均功率成正比。但也有不同: 对于点目标, 输出信噪比与方位分辨率和目标截面积成正比; 而分布型目标的输出信噪比与地面散射系数成正比, 与距离分辨率成反比, 与方位分辨率无关。

下面作一个定量计算, 以 JERS-1 为主星, 相关的 JERS

¹⁾如无特别说明下文所指的小卫星分布式 SAR 系统均指主星发射多个小卫星接收的主从分布式雷达系统

参数如表 1, 系统构型如图 1。其中接收小天线的尺寸为 $2\text{m} \times 2.4\text{m}$, 虚拟中心与大卫星间距为 40km , 小卫星与虚拟中心间距为 1km 。由于小天线面积大约为大天线面积的 $1/6$, 所以小卫星分布式 SAR 的信噪比与主星相比下降约 7.8dB 。如果地面的散射系数为 -20dB (为一般耕地的散射系数, 城市的约为 -10dB , 柏油路约为 -30dB , 混凝土路面约为 -40dB)^[4], 噪声等效为 -25dB , 那么主星的信噪比为 5dB , 而小卫星系统的信噪比却只有 -2.8dB , 这时的图像质量已经很差了。

3 信噪比下降对小卫星分布式 SAR 系统的影响

3.1 信噪比对小卫星分布式 SAR 系统进行高程测量的影响

小卫星分布式 SAR 进行多基线单航过干涉测量的性能在文献[5]中有详细分析, 在主星分别为 ALOS(PALSAR, L-Band), TerraSAR-X(X-Band), ENVISAT(ASAR, C-Band), 小卫星按照 Cartwheel, Pendulum, CarPe 3 种不同的轨道构型排列时, 文中分析了系统热噪声、量化噪声、模糊噪声和几何去相关等对干涉相位的影响, 并得出测高的相对精度为: PALSAR 和 ASAR 可达到 2m 量级, TerraSAR-X 可达到 1m 量级。下文主要讨论小卫星分布式 SAR 系统信噪比下降对测高性能的影响, 其中主星和小卫星的参数如前所述。

信噪比降低使干涉图像对之间的相干性下降, 进而增加干涉相位的方差。如果忽略通道间信噪比的差异则由信噪比计算的相干系数为

$$\gamma_{\text{SNR}} = \frac{\text{SNR}}{1 + \text{SNR}} \quad (3)$$

干涉相位标准差为^[6,7]

$$\sigma_{\varphi}^{\text{SNR}} = \frac{k\pi}{\sqrt{\text{SNR}}} \quad (4)$$

对于稳定回波幅度的目标, $k = 0.54$; 对于起伏回波幅度的目标 $k = 1$ 。由式(4)可知, 干涉相位的标准差与信噪比的均方根值成反比, 当信噪比等于 0dB 时, 干涉相位的标准差已经达到 π 。图 3 给出了相干性和干涉相位标准差随信噪比的变化曲线。由图 3 可知如果小卫星的 $\text{SNR} = 2.8\text{dB}$, 干涉测量就无法正常进行了。

上面的信噪比只包含了热噪声, 其实, 噪声源除了热噪声外, 还有模糊噪声(在一阶近似时认为是加性噪声^[5])、量化噪声、设备误差噪声等。量化噪声和设备误差噪声与小卫星接收与否没有必然的关系, 但模糊噪声却与小卫星密切相关, 模糊比的增加同样使干涉相位的标准差加大。

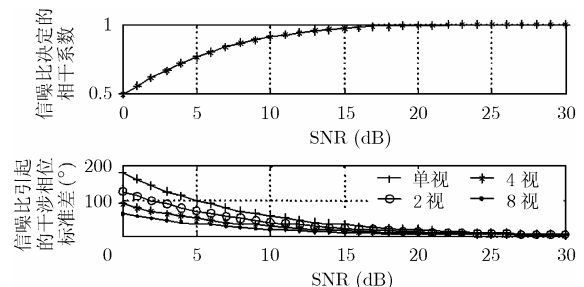


图 3 相干性和干涉相位标准差随信噪比的变化曲线图

3.2 信噪比对小卫星分布式 SAR 系统进行地面动目标检测的影响

检测地面动目标的方法有多种,这里只考虑主瓣内检测的 ATI(沿航向干涉)方法。它的处理过程类似于干涉测高,首先要获得每个通道的单视复图像。成像时为了避免运动目标在方位向散焦,一般把合成孔径长度限制在一定的范围之内,使动目标不超出聚焦深度。这时,ATI方法获得的信噪比可以按照式(1)来计算。假设杂波已被全部去除,则信噪比对检测性能的影响和普通的检测雷达一样,当虚警概率一定时,信噪比下降将使检测概率大幅下降。但对消后杂波总会有剩余,此时的信杂比对检测性能的影响如图4^[8]。其中横轴为干涉相位,纵坐标为相位的概率密度函数,每一条曲线代表了不同的信杂比(-20dB~20dB),目标为 Swerling I 模型,视数为4,相干系数等于0.98,杂波多普勒相位为0 rad,动目标多普勒相位为1.3 rad。当信杂比很小时,干涉相位概率密度函数的峰值接近于0 rad,信杂比逐渐加大,干涉相位的峰值也逐步靠近1.3 rad。

除了信噪比外,小天线使杂噪比下降后同样降低动目标的检测概率,这里的杂噪比就是 SAR 的信噪比。杂噪比决定了通道间图像对的相干性(如式(3)),而相干性又决定了杂波的对消能力。当完全相干时,能消掉所有的杂波,相消后的信杂比等于无穷,由图4可知这时能获得最大的检测概率;当完全不相干时,杂波干涉相位服从均匀分布,此时杂波和信号混在一起,无法区分,对消前后的信杂比不会有任何改善。

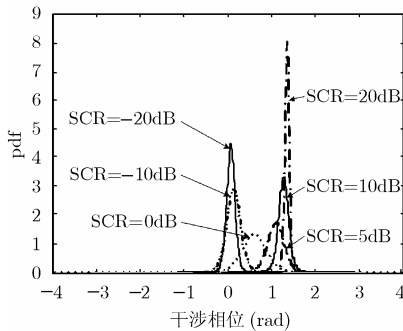


图4 不同信杂比下干涉相位的概率密度函数

3.3 信噪比对小卫星分布式 SAR 系统提高成像分辨率的影响

利用小卫星分布式 SAR 系统可以提高主星 SAR 的方位和距离分辨率,其原理如下^[1,9]:因为小卫星以不同的斜视角和俯仰角同时观察同一块地面照射区域,它们的地面反射谱在方位和距离上各不相同,如果把这些谱进行拼接,合成一个宽谱,就可以增加原来 SAR 图像的二维分辨率。这个处理过程需要多个小卫星进行相干积累,那是否可以同时改善每个小卫星 SAR 图像的信噪比呢?

首先考虑能够完全相干积累的情况:在提高方位分辨率时,假设水平基线正好等于极限基线(也就是合成孔径长度),如果把多个小卫星接收的回波看作是一个小卫星在不同时

接收的回波(即类似于 spotlight 成像模式),则多个小卫星综合处理与单个小卫星时的区别仅在于方位带宽增加了(或者说方位分辨率提高了)。由式(2)可知, SAR 成像的信噪比与最终的方位分辨率无关,所以多个小卫星综合处理得到的方位高分辨 SAR 图像和单星 SAR 图像具有相同的输出信噪比。在提高距离分辨率时,可以把多个小卫星接收的回波认为是由一颗小卫星以步进频方式接收的多次回波,其中每个小卫星接收一步。与单星接收的回波相比,多个小卫星进行综合使接收信号的时宽、带宽和距离分辨率都增加了相同的倍数。由式(2)可知,系统最终的信噪比保持不变。

实际处理中一般需要估计通道间的频移,由于单通道信噪比不高,使估计值的误差加大,通道间不能完全相干积累,进而使高分辨处理后的 SAR 图像信噪比进一步下降。

4 减小信噪比影响的信号处理方法

为了减小信噪比下降对小卫星分布式 SAR 系统的负面影响,可以从两个方面想办法:一方面,可以增加发射功率或天线面积来提高信噪比,但这会带来其它的困难,并且系统参数一经决定不易修改,故这里暂不讨论;另一方面,就是用信号处理的方法增加输出信号的相干或非相干积累次数,下面将分别讨论。

4.1 非相干处理

所谓非相干处理就是不利用相位信息,只利用幅度信息的一种处理方法。如果非相干积累 N 次,对信噪比的改善最大为 \sqrt{N} 倍^[10]。

对于不同的用途,非相干积累的方法是不同的。在 SAR 成像方面,由于小卫星分布式 SAR 系统有3颗接收卫星,故实现非相干处理有两种方法:第一,利用多通道进行非相干叠加,它不降低单通道 SAR 的图像分辨率;第二,在一个通道内利用多视处理技术进行非相干叠加,它一般是以牺牲分辨率为代价的。这两种方法的处理步骤相同,都是先进行图像对的配准然后进行幅度叠加。图5(c)给出了用3个通道非相干叠加后的结果,其中单通道图像信噪比为0dB。

对于干涉测高,信噪比下降增加了干涉相位的标准差,用多视处理技术可以减小这一影响。此方法首先对同一地域获得 n 幅多视图像对,然后对每一图像对的对应复像素作共轭相乘后再加以平均,详见文献[11]。

4.2 相干处理

小卫星分布式 SAR 系统由多个通道组成,如果每个通道的天线间距足够短,极端情况下,可以认为几个小天线组成了一个大的接收天线,此大天线面积为原来小天线面积之和,用此大天线接收回波信号就能把系统信噪比提高为单个小天线的 N 倍(假设有 N 个小天线)。但小卫星的实际间距比较大(最小也在百米量级),回波信号到达各小天线的时延各不相同,不能直接相加。如果把它们时延补偿为一致后相加,同样也可以把几个小天线等效为一个大接收天线(这里忽

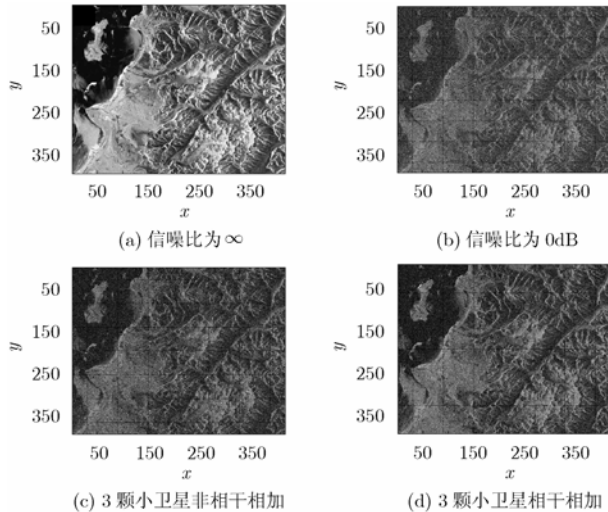


图 5 相干和非相干相加提高 SAR 图像信噪比

略了通道间的去相干)。不过需要明确一点,用这种方法提高信噪比,是以浪费接收通道为代价的,而接收通道是测高和检测地面运动目标的资源。多通道相干相加提高信噪比和前面所讲的利用多个通道相干处理提高成像分辨率不同。提高分辨率是利用通道间的不重合谱段,而它是利用通道间的重合谱段。如果不考虑通道间的去相干,利用 N 个通道相干处理可以使成像信噪比提高 N 倍。图 5(d) 给出了相干积累 3 次后 SAR 图像的结果。

用 ATI 方法进行动目标检测时,可以通过提高方位分辨率的方法来改善信噪比和信杂比,它们都与方位分辨率成正比。但动目标的相干积累时间不能很长,因为它沿距离向运动会超出聚焦深度的范围。所以对于慢速强散射(相对于地杂波)目标可以取得比较高的信噪比和信杂比,而快速目标为了获得高信噪比,需要运用专门针对动目标的成像处理方法。

5 结束语

小卫星分布式 SAR 系统将是未来星载 SAR 发展的趋势,因为它包含丰富的空时频资源,可以完成地面成像、测高、测速等多种任务。但信噪比下降是此系统面临的一大难题,由前面的分析可知,信噪比降低将严重影响系统的性能,甚至使某些任务无法完成。本文所提到的改善信噪比方法能在一定程度上减小信噪比下降对系统性能的影响,但都是以牺牲其它资源为代价的。要想得到优良的性能,在系统参数

设计阶段就应该充分考虑小天线的负面影响。

参考文献

- [1] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506–520.
- [2] [美]Merrill I.Skolnik 主编,王军等译. 雷达手册. 第二版,第 6 页,第 26 页,第 936 页,第 486 页.
- [3] 汤子跃,张守融. 双站合成孔径雷达系统原理. 北京: 科学出版社, 2003, 第 3 章.
- [4] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001. 52–55.
- [5] Krieger G, Fiedler H, Mittermayer J, Papathanassiou K, and Moreira A. Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR interferometry. *IEE Proc.-Radar Sonar Navig*, 2003, 150(3): 87–96.
- [6] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论. 北京:国防工业出版社, 2003.1, 第 8 章.
- [7] Mrstik V, VanBlaricum G, Cardillo G, and Fennell M. Terrain height measurement accuracy of interferometric synthetic aperture radars. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(1): 219–228.
- [8] Klemm R. Applications of Space-Time Adaptive Processing. London: The Institution of Electrical Engineers, 2004: 97–98.
- [9] Prati C, Rocca E, and di Milano P. Improving slant-range resolution with multiple SAR surveys. *IEEE Trans. on AES*, 1993, 29(1): 136–144.
- [10] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995 年, 第三版: 138–141.
- [11] 保铮,邢孟道,王彤编著. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005, 第 8 章.

张振华: 男, 1977 年生, 博士生, 研究方向为雷达成像和动目标检测.

保 铮: 男, 1927 年生, 教授, 中国科学院院士, 博士生导师, 研究领域为信号处理和雷达系统.

邢孟道: 男, 1975 年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为雷达成像和目标识别.

黄军义: 男, 1965 年生, 高级工程师, 研究领域为遥感与工程地质.