

分布式小卫星 SAR 实现全孔径分辨率的信号处理

李真芳,邢孟道,王彤,保铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,陕西西安 710071)

摘要: 利用一组小卫星进行编队飞行,它们之间协同工作来完成某一特定任务,其功能和可靠性远远超过一颗单独的大卫星,因而具有高的性能/价格比.对于单颗卫星 SAR,其横向分辨率与测绘带宽相矛盾,而采用分布式小卫星 SAR,可使这一矛盾得到解决.本文主要研究如何通过信号处理化解多普勒模糊,实现理论最高分辨率的问题.

关键词: 分布式小卫星; SAR; 雷达分辨率; 波束置零

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12-1800-04

Distributed Small Satellites SAR Signal Processing for Achieving Full Azimuth Resolution

LI Zhen-fang, XING Meng-dao, WANG Tong, BAO Zheng

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

Abstract: The distributed satellites are clusters of small satellites that cooperate to perform multiple space mission functions, and its functions and reliability are well beyond a larger, single satellite. Since the concept was formulated, there are several research efforts looking for the possibility of using a group of small satellites to do mission functions. Beam nulling is used for resolving Doppler aliasing and achieving full-resolution SAR imaging. Simulation results prove this method preferable.

Key words: distributed small satellites; synthetic aperture radar; radar resolution; beam nulling

1 引言

随着小卫星技术的迅速发展,小卫星具有重量轻、体积小、研制周期短、成本低、发射灵活、启用速度快、抗毁性强、性能好等一系列优点,而且还可以形成批量生产,因此用小卫星组成星座的成本与可靠性会优于一颗大卫星,而且其整体功能也会远远超过一颗大卫星.自从 90 年代中期编队小卫星这一概念的提出,便引起了国内外的广泛重视,人们开始探索利用多颗小卫星进行编队飞行的可行性及其潜在的应用领域^[1-4].众所周知,SAR 具有全天时/全天候工作能力,可以提供高分辨率的地面图像,因此利用 SAR 作为小卫星的有效载荷是其研究的一个重要领域.

传统的 SAR 卫星很大,因此其天线尺寸可以做得比较大(比如 10 米),以在距离模糊和方位模糊(方位分辨率和观测条带)之间进行折衷.这种大天线尺寸 SAR,在条带模式下工作就不可能得到高分辨率的地面图像(例如 1 米),如果在聚束模式下^[6]工作就需要昂贵的相控阵天线,而且不可能大面积成像.然而,对于小卫星平台就不可能把天线做得象传统 SAR 卫星的那么大,因此小卫星 SAR 如何在方位模糊和距离模糊以及观察条带之间进行折中考虑是其要解决的一个关键

问题,而且小天线尺寸(如 2 米)带来更大的方位观察视角,理论上可以得到很高的地面分辨率(例如 1 米),这就是小卫星 SAR 所面临的困难和机遇,也正是本文所要解决的问题.

2 小卫星 SAR 特点分析

随着小卫星平台技术及 SAR 硬件技术的飞速发展,以及可以形成批量生产等优点,组成编队飞行的小卫星 SAR 的成本和可靠性会远远超过单颗传统的 SAR 卫星.编队小卫星 SAR 可以提供更多的空间信息,因此可以在单航过模式下同时完成地面三维测绘(IFSAR)和地面运动目标检测(GMTI),这是编队小卫星 SAR 的重要功能之一,本文主要讨论其应用于 SAR 方面的问题.

本文编队小卫星 SAR 的仿真参数如表 1 所示.本文主要作原理性的讨论,为简单起见,将星座构形加以简化,即利用一颗发射小卫星,9 颗接收小卫星同时接收回波数据,并以不等间隔高稀布分布在沿航向的直线上,发射卫星置于接收卫星群的中间.

根据 L J Cantafio^[5]文献,星载 SAR 有最小天线面积的要求,其最小天线面积可表示为下式:

$$A_{\min} = \frac{4R}{c} \tan \phi \quad (1)$$

表 1 编队小卫星 SAR 仿真参数

卫星高度	下视角	天线尺寸(方位距离)(m)	发射带宽	波 长	卫星数目	编队构形	构形范围(km)
750km	20°~60°	2 × 1	60MHz	3cm	9	沿航向直线	0.1~2

其中 $v = \sqrt{(3.986005 \times 10^{14} / (6371.23 \times 10^3 + \text{SatHeight}))}$ 为卫星速度, R 为目标与雷达的斜距, ϕ_0 为目标处的入射角, λ 为波长, c 为光速。

把表 1 的参数带入式(1)可得到要求的最小天线面积约为 10 平方米,显然表 1 的天线面积远远不能满足要求的最小天线面积。由于小卫星平台,天线的尺寸不可能做得过大,因此无论脉冲重复频率如何选择,都会引起方位多普勒或距离模糊。这是小卫星 SAR 不同于传统大卫星 SAR 的一个主要特点。

本文选择脉冲重复频率的策略是首先保证不发生距离模糊。按表 1 的参数计算可得,当选择脉冲重复频率为 $f_r = 1500\text{Hz}$ 时,就保证了距离不发生模糊(观测条带可达 100km),然而主瓣多普勒谱却模糊了 5 次。图 1 为天线主波束内的方位-多普勒二维分布图。从图 1 可以看到,多普勒在主波束(宽度为 0.86°)内模糊了 5 次。

距离徙动校正一般在多普勒域内进行,徙动校正只对非模糊多普勒谱区(图 1 方位角中间一段对应的多普勒谱)匹配而模糊过来的多普勒谱不能被正确的徙动校正(本例中,最大走动 10 个距离单元),因而能量会在距离上散开。然而这些模糊过来的多普勒谱如果不采取措施,仍然会严重影响成像的质量。

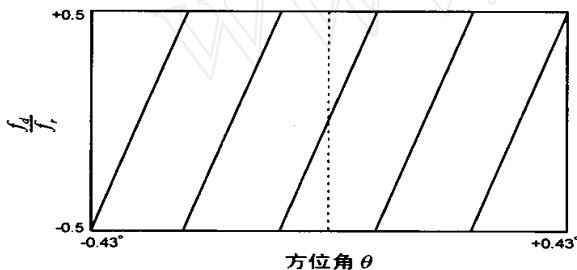


图 1 方位-多普勒二维分布图

3 多普勒模糊抑制

如 2 节分析,为了保证距离不模糊,选择的脉冲重复频率导致多普勒谱发生多次模糊。要得到好的成像质量,必须抑制掉这些模糊过来的多普勒谱。

多普勒模糊抑制方法如下:

(a) 首先把每一卫星的接收回波信号利用 FFT 在方位多普勒域上分开;

(b) 对于每一卫星的同一多普勒通道输出,现在只有 4 个模糊过来的多普勒谱分量,然后利用空间波束置零方法把这 4 个不同方向过来的多普勒谱分量抑制掉。从图 1 可知,多普勒不同,所需“置零”的波束方位角是不同的,为此须对多普勒单元分别做波束形成处理,这是一个空时二维处理问题;

(c) 对所有多普勒通道都经过相同处理后,再在多普勒域完成距离徙动校正及距离压缩;

(d) 最后完成方位压缩。

利用上述方法保留图 1 中 5 条杂波谱中间的 1 条,而将其余 4 条抑制掉,可以得到高质量的、部分波束(本例为 $1/s$ 波束)方位分辨率的 SAR 图像。本例中得到的方位分辨率为 5 米。图 2 为多普勒模糊抑制前后的成像结果比较。从图 2 可以看到由于远区模糊过来的图像污染了近区的图像,经过多普勒模糊抑制后,远区模糊过来的图像就被抑制掉了,图像就变得清晰了。由此可以看出进行多普勒模糊抑制是小卫星 SAR 首要处理。然而,用此方法是否同时完成对所有的方位点目标模糊谱抑制,下面需要证明。此外,将多普勒的模糊分量弃而不用是对方位谱资源的浪费。这一问题将在下一节里进一步讨论。

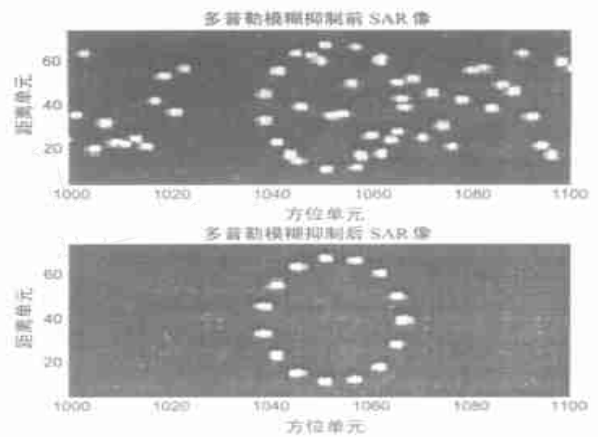


图 2 模糊多普勒谱抑制前后的图像对比

3.1 原理证明

经过方位 FFT 后,平行于航线的一定垂距上的所有的方位点目标在多普勒域重合在了一起,它们之间只差一个线性相位。如果只有一个方位点目标,这种多普勒模糊抑制方法不难理解。把多普勒分开后,在相差整数个 PRF 的多普勒对应的方位上形成零点。当多个方位目标同时存在时,这种波束置零方法是否会对其方位目标产生影响,是否同时完成对所有的方位目标进行多普勒模糊抑制?

暂且假定平面波近似和发射接收星在同一位置(下节再详细讨论实际问题),则卫星 n 接收的某一多普勒频率 f_d 的回波信号为:

$$s_n(f_d) = \sum_{i=-}^{i=+} A_i \left[a_0(f_d, 0) \exp \left[j \frac{4}{\lambda} d_n \sin \theta_0 \right] + a_1(f_d, 1) \exp \left[j \frac{4}{\lambda} d_n \sin \theta_1 \right] + a_2(f_d, 2) \exp \left[j \frac{4}{\lambda} d_n \sin \theta_2 \right] + a_{-1}(f_d, -1) \exp \left[j \frac{4}{\lambda} d_n \sin \theta_{-1} \right] + a_{-2}(f_d, -2) \exp \left[j \frac{4}{\lambda} d_n \sin \theta_{-2} \right] \right] \exp(-j2\pi f_d t) \quad (2)$$

其中, i 表示第 i 个方位点目标, i 表示第 i 个方位点目标的时间延迟, A_i 表示第 i 个方位点目标的初始相位和幅度, d_n 表示接收卫星 n 的位置, θ_0 为非模糊多普勒谱对应的方位角, 而 $\theta_{-1}, \theta_{+1}, \theta_{-2}, \theta_{+2}$ 为模糊多普勒谱对应的方位角, 这些方位角与多普勒谱的对应关系为下式所示.

$$\sin \theta_k = \frac{(f_d + kf_r)}{2v}, \quad k=0, \pm 1, \pm 2 \quad (3)$$

不妨假定只有卫星 0 和卫星 1, 而且只有 θ_1 方向来的模糊多普勒谱, 则模糊多普勒谱可按如下的干涉对消方法来抑制:

$$s_0(f_d) - \exp\left[-j \frac{4(d_1 - d_0) \sin \theta_1}{\lambda}\right] s_1(f_d) = \sum_{i=+} A_i a_0(f_d, \theta_0) \exp\left[j \frac{4 d_0 \sin \theta_0}{\lambda}\right] \left[1 - \exp\left[j \frac{4(d_0 - d_1) \sin \theta_1}{\lambda}\right]\right] \exp(-j 2 f_d d_i) \quad (4)$$

由式(4)可以看到, 经过上述方法抑制多普勒模糊谱后, 所有方位点对应的同样模糊谱也同时都被抑制掉了, 而且各方位点在多普勒谱域上仍然只相差一个线性相位项(即方位时间上是分开的). 再在多普勒域上经过距离徙动校正、距离压缩和方位压缩后就得到了分开的方位点图像.

类似可以推广到抑制多个方位模糊多普勒谱的情况, 因此利用此多普勒模糊谱抑制方法能够同时完成对所有方位点目标的模糊谱抑制, 即无论接收的回波脉冲数多少(1 个或多个全孔径时间), 经过方位 FFT 后, 就可以同时完成对所有的方位点目标进行模糊谱抑制.

3.2 波束置零方法

如前节所述, 方位模糊的抑制方法是在多普勒分开后经过空间波束置零方法来完成的. 波束置零方法可以利用自适应方法实现, 如果参数精确已知的话也可以利用非自适应方法(例如式(4))来实现.

在 3.1 节的证明中式(2)假定了发射和接收在同一位置, 实际上只有一个发射星而多个接收星, 发射和接收并不在同一位置. 因此当按式(2)的信号模型进行波束置零时, 会严重影响模糊谱抑制效果. 然而可以证明, 当对每一卫星的接收信号作一相

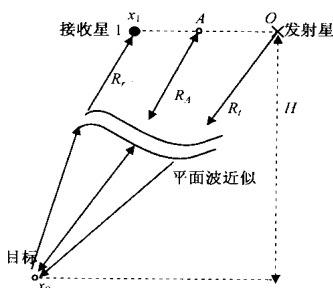


图 3 发射和接收等效相位中心

位补偿后, 可以等效为在同一位置(即所谓等效相位中心)发射和接收信号, 即式(2)的模型成立. 图 3 表示发射和接收在不同空间位置的情况, 及其等效的相位中心 A .

发射星、接收星和中心 A 点到目标的距离分别为 R_t 、 R_r 和 R_A , 则它们之间的关系为:

$$R_t + R_r - 2R_A = \sqrt{x_0^2 + H^2} + \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + H^2} - 2 \sqrt{\left(x_0 - \frac{x_1}{2}\right)^2 + H^2} - \frac{x_1^2}{4H} \quad (5)$$

由式(5)得出, 它们之间只差一个与发射星和接收星相对

位置有关的固定常数, 而与目标的位置无关, 因此只要对每一接收卫星的回波信号按式(6)进行补偿后, 就等价于收发同星.

$$s_n(t) = s_n(t) \exp\left[j 2 \frac{(d_n)^2}{4H}\right] \quad (6)$$

其中 $s_n(t)$ 为第 n 个接收卫星的回波信号, d_n 为接收的卫星的位置(假定发射星的位置为 0).

自适应波束置零方法要求满足如下式(7)条件的方程解作为自适应权矢量 w .

$$\begin{aligned} w^H a_0(f_d, \theta_0) &= 1 \\ w^H a_{\theta_0}(f_d, \theta_0) &= 0 \\ \min_w w^H R w \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $a_0(f_d, \theta_0)$ 为导向矢量, $a_{\theta_0}(f_d, \theta_0)$ 是 $a_0(f_d, \theta_0)$ 的导数, R 为协方差矩阵. 式(7)中第一个方程保证导向方向的增益不变, 第二个方程保证导向方向增益比较平坦, 而第三个方程是使总输出功率最小即在其它模糊谱方向上形成零点. 对每一个多普勒通道进行完模糊谱抑制后, 还要用多普勒域去模糊后的数据进行方位压缩, 因此必须保证导向方向的信号相位不要发生变化.

如果参数能够准确测知, 非自适应方法具有运算量小、实现简单和相位保持容易等优点. 非自适应实现方法很多, 本文用到的一种方法类似于金字塔式结构: 第一级利用式(4)两两卫星对消掉(类似 MTI 中的两脉冲相消)来自 θ_1 方向的模糊, 第一级的子阵输出已经没有 θ_1 方向的模糊谱, 然后再用其子阵输出两两对消掉 θ_2 方向的模糊谱, 依次类推, 当把所有的多普勒模糊谱都对消掉后, 再对最后的子阵输出利用波束形成方法在 θ_0 方向上形成增益. 为了防止方位压缩时产生幅度调制, 因此所有的多普勒通道的 θ_0 方向的增益必须进行补偿以保持增益不变. 仿真结果表明利用这种方法当编队卫星的随机稀布达到两公里时仍然可以把模糊谱降低到 40dB 以下, 而且仿真结果也表明当沿航向卫星间随随机误差达到 10cm 时仍然可以得到比较好的结果.

无论是自适应方法还是非自适应方法, 都必须保证两点: (1) 各多普勒通道上的增益保持不变; (2) 各多普勒通道上的相位保持不变.

应当指出, 通过上述处理, 所形成的空时二维 (f_d, θ) 波束, 对不同的 f_d 波束形状也不同. 如果星座构形固定, 则该二维波束也是时不变的; 如果星座构形有变化, 则二维波束也应随之改变.

4 全孔径分辨率实现方法

前面在讨论模糊谱抑制问题时, 只保留了非模糊多普勒谱部分而把其它部分给抑制掉了, 因此得到的方位分辨率只能是部分波束的(即部分信号历程). 实际上把模糊多普勒谱抑制掉是对方位谱资源的一种浪费, 即使不是为了分辨率的要求也应该用来进行多视处理以抑制 SAR 图像中的相干斑噪声.

这一节里我们充分利用方位谱资源, 把所有的多普勒谱分量都分别取出来, 并把它们重新排列起来得到相当于一个

多普勒发生模糊前的信号带宽,或相当于提高了采样频率。

其实现步骤类似于第 3 节,但在多普勒通道分开后,不是只取 ω_0 方向谱而是把所有的谱分量都取出来,即先取 ω_2 方向谱而把 ω_{-1} 、 ω_0 、 ω_1 和 ω_2 方向谱抑制掉;然后再取 ω_{-1} 方向谱而把 ω_{-2} 、 ω_0 、 ω_1 和 ω_2 方向谱抑制掉,依次类推把所有的方向谱都分别取出来并对应到模糊前的多普勒频率上排列好。所有的多普勒频率都排列好后,再统一进行距离徙动(走动+弯曲)校正和距离压缩,最后按全孔径参考函数进行方位匹配压缩形成 SAR 图像。

图 4 为把所有多普勒谱分量都取出来并展宽后所得的方位分辨率与只取某一分量所得的方位分辨率比较结果。由图 4 可以看出,当多普勒带宽展宽后方位分辨率可以大大提高(本例,提高到非模糊多普勒谱分辨率结果的 5 倍),而且旁瓣也大大降低。为了进一步验证此方法是否可以达到理论的最高方位分辨率 $D_a/2$ (D_a 为天线的方位孔径长度),我们在同一距离单元设置 3 个点目标,其两两方位间隔为 2.5m。本仿真参数中 $D_a=2m$,因此理论可达到的方位分辨率为 1m。图 5 为 3 个方位点目标在带宽展宽前后成像结果比较。

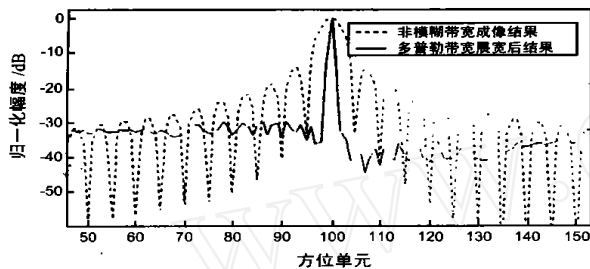


图 4 多普勒带宽展开后与非模糊多普勒谱点目标方位像比较

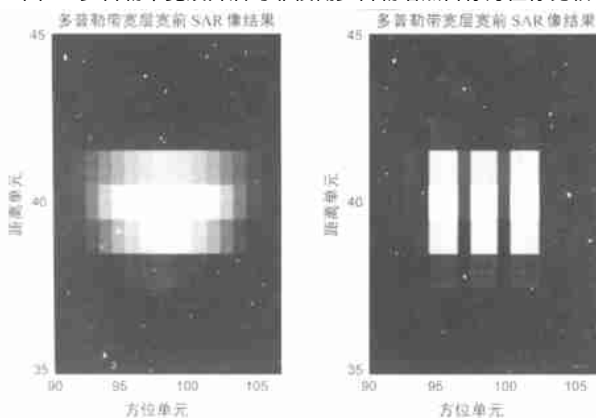


图 5 三个方位点目标 SAR 成像结果比较

从图 5 可以看出,经过多普勒带宽拼接展宽后,其方位分辨率大大提高,基本上满足 1m 的方位分辨率(注意:间隔为 2.5m)。

5 结论

小卫星 SAR 由于天线面积小,存在多普勒或距离模糊。在保证距离不模糊的情况下,利用编队稀疏卫星,把多普勒分开后进行波束置零以抑制模糊部分的多普勒谱,进而可以把所有的多普勒谱分量分别抽出来并拼接起来,以得到全孔径方位分辨率的 SAR 图像。仿真结果验证了本文方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] Kim Luu, et al. University nanosatellite distributed satellite capabilities to support TechSat21[A]. 13th AIAA/USU Conference on Small Satellites (SSC99-III-3) [C]. USA: AIAA, 1999. 1 - 9.
- [2] S Ramongasie, L Phalippou, E Thouvenot, D Massonnet. Preliminary design of the payload for the interferometric carWheel[A]. Proc of F-GARSS[C]. Honolulu: IGARSS, 2000. 24 - 28.
- [3] D Massonnet. The interferometric cartwheel: a constellation of passive satellites to produce radar images to be coherently combined[J]. Int J Remote Sensing, 2001, 22(12): 2413 - 2430.
- [4] 林来兴. 小卫星编队飞行及其轨道构成[J]. 中国空间科学技术, 2001, 21(1): 23 - 28.
- [5] Cantafio L J. Space-Based Radar Handbook [M]. Boston: Artech House, 1989.
- [6] 袁运能,等. 聚束 SAR 的快速卷积反投影成像算法[J]. 电子学报, 2002, 30(6): 864 - 867.

作者简介:



李真芳 男,1977 年 11 月生于山东寿光市,1999 年本科毕业于西安电子科技大学,同年免试推荐为该校雷达信号处理重点实验室硕博连读生。主要研究方向:地面动目标检测(GMTI)和综合孔径雷达成像(SAR)。



邢孟道 男,1975 年 11 月生于浙江,1997 年 7 月在西安电子科技大学电子工程学院获工学学士学位,同年免试推荐为该校雷达信号处理重点实验室硕博连读生,2002 年 5 月获西安电子科技大学信号与信息处理专业工学博士学位,同年被破格提升为副教授,研究方向主要为雷达成像和目标识别。