

分布式小卫星 SAR 系统地面运动目标检测方法

李真芳, 保 铮, 王 彤

(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: 本文研究了分布式小卫星 SAR 系统的地面运动目标检测(GMTI)方法,并解决了小天线带来的距离/多普勒模糊,以及超稀疏阵带来的高旁瓣问题.本文方法的主要思想是利用空时自适应处理(STAP)把地面运动目标谱与杂波谱分离开,然后再利用 SAR 成像处理对分离开的地面运动目标谱进行聚焦.针对超稀疏阵的高旁瓣模糊问题,提出通过导向扫描空时平面来克服盲速影响.

关键词: 分布式小卫星; 合成孔径雷达(SAR); 地面运动目标检测(GMTI); 空时二维自适应处理(STAP)

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2005)09-1664-03

Ground Moving Target Indication for Distributed Small Satellite SAR Systems

LI Zhenfang, BAO Zheng, WANG Tong

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

Abstract: This paper investigates the approaches to ground moving target indication (GMTI) for distributed small satellite SAR systems. In particular, we focus on the processing approaches to resolving the range/Doppler aliasing caused by the small antennas of small SAR systems and the high sidelobes arising from the highly sparse satellite array. The key idea of this paper is to extract the space time spectra of ground moving targets from the space time plane by using a space time adaptive processing (STAP) algorithm. Then conventional SAR imaging processing can be used to fully focus the extracted space time spectra of ground moving targets. To overcome the "blind velocities" caused by the high sidelobes, an approach is suggested to scan the whole space time plane with the array steering vector is suggested.

Key words: distributed small satellites; synthetic aperture radar; ground moving target indication; space time adaptive processing

1 引言

分布式小卫星又称为编队小卫星.自从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^[1~3].

分布式小卫星 SAR 系统的目的是提高雷达对地探测的多项功能,如减小 GMTI 的最小可检测速度(MDV),提高地面高程测量精度^[1]以及获得大测绘带高分辨率 SAR 图像^[3]等.

星载 SAR 天线有最小面积的限制^[4],为得到较宽的测绘带而不产生距离模糊,雷达脉冲重复频率不能太高;为不产生多普勒模糊,天线横向孔径不能太短,通常为十多米,然而这种大孔径天线对于小卫星平台是不可行的.小卫星平台要求较小孔径的天线,如 2m×1m,这种小孔径天线不能同时保证距离和多普勒不模糊.本文采用较低脉冲重复频率,首先保证距离不模糊,然后利用分布式小卫星 SAR 的空时自由度来解多普勒模糊,从而完成对固定场景的 SAR 成像和对地面运动目标的检测.关于如何解多普勒模糊,实现大观测带、高分辨率 SAR 成像处理问题,我们在文献[3]中进行了讨论,本文进一步讨论如何在 SAR 的回波信号中同时检测地面运动目标.

分布式小卫星 SAR 的时间基线长,这对于检测低速目标是有利的一面(即可以获得很小的 MDV),然而由于卫星的空间超稀布分布以及较少卫星数目,同时也会带来过多的盲速区,如果目标速度落入这些盲速区中就很难被检测到.

本文的关键思想是首先利用空时自适应处理(STAP)把地面运动目标的空时谱从空时平面上取出来,然后再利用 SAR 成像处理对取出来的地面运动目标谱进行相干积累.为了克服超稀疏阵的高旁瓣带来的盲速问题,利用导向矢量扫描空时平面中的运动目标区.

2 回波信号特点

对于卫星 SAR 系统,地面固定杂波的多普勒频率 f_d 与方位角 θ (或锥角)关系的关系如下:

$$f_d = \frac{2v_s}{\lambda} \sin\theta \quad (1)$$

式中 v_s 为卫星速度(相对于地面).若小卫星天线的方位波束宽度为 0.015rad, $v_s = 7000\text{m/s}$, $\lambda = 3\text{cm}$ 且工作于正侧视,则主瓣地面杂波的多普勒谱被限制在 $\pm 3500\text{Hz}$ 的范围内.由于 f_d 与 $\sin\theta$ 成正比,地面杂波谱在 $f_d \sin\theta$ 二维平面(也称为空时平面)为图 1(a)中的粗斜直线所示.为了首先保证距离不模

糊, 选择较低脉冲重复频率 (PRF), 例如 $f_r = 1400\text{Hz}$. 然而, 此 PRF 导致 5 次多普勒模糊, 因此实际杂波的空时谱为图 1(b) 中的粗斜直线所示. 对于同一个多普勒频率有 5 个不同方位角处的回波相叠加.

地面运动目标的多普勒频率 f_d 与方位角 θ 有下列关系:

$$f_d = \frac{2(v_s + v_{at})}{\lambda} \sin\theta + \frac{2v_{ct} \cos\theta}{\lambda} \quad (2)$$

式中 v_{at} 和 v_{ct} 分别为地面运动目标的沿航向 (Along Track) 和垂直航向 (Cross Track) 速度. 式 (2) 说明对于任一方位角 θ , 运动目标的多普勒频率相对于固定杂波有一个附加多普勒项; 或对于某一多普勒频率 f_d 输出, 地面运动目标所在的方位角与固定杂波不同.

地面运动目标的速度可以分解成两个分量: 沿航向速度 v_{at} (沿卫星速度方向) 和垂直航向速度 v_{ct} (垂直于卫星速度方向), 即方位向速度和距离向速度. 这两种运动分量对动目标的 SAR 图像有不同的影响, 下面进行简单总结. 垂直航向运动对动目标的 SAR 成像会产生两种影响: 一是动目标自身附加的多普勒项使其在 SAR 图像中的横向位置发生偏移; 二是动目标回波信号包络的自身移动会穿越多个距离单元, 导致距离单元走动校正困难. 沿航向运动导致动目标的多普勒调频率与固定杂波的多普勒调频率不同, 因此必须精确获得沿航向速度才能对其完全聚焦.

图 1 中的细斜直线代表运动目标的空时二维谱. 从图 1 可以看出, 由于运动目标自身的多普勒项, 使其与固定杂波的二维谱分离开, 这是运动目标能够被检测的前提条件. 而且, 由于式 (2) 右边的第 2 项可以用一个常数项近似以及卫星速度远远大于地面运动目标的沿航向速度, 因此地面运动目标和固定杂波的空时谱在图 1 中的斜率几乎相同.

3 地面运动目标检测方法

前面对地面杂波和运动目标的回波特点进行了介绍. 下面介绍如何从图 1(b) 所示的存在多普勒模糊和杂波的回波中把运动目标检测出来. 由于分布式小卫星在空间超稀疏分布 (为了防止碰撞, 间距保持在百米左右), 而且数目非常有限, 因此所形成的空间波束非常细碎, 即具有高旁瓣甚至栅瓣. 图 2 是利用 9 颗

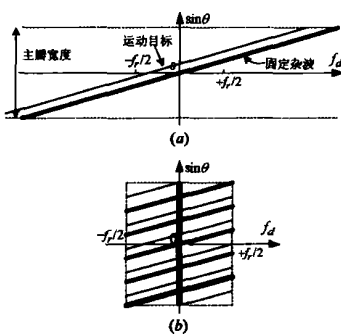


图 1 地面运动目标和固定杂波的空时二维谱

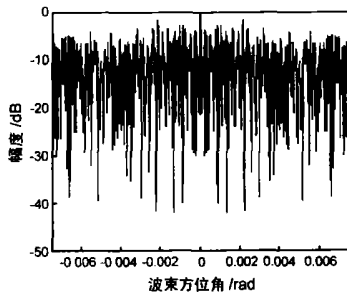


图 2 九颗分布式小卫星所形成的波束方向图

卫星所形成的波束方向图 (阵列配置在下节列出, 天线波束宽度为 0.015rad). 我们将会看到, 如果不采取措施这种细碎波束会给 GMTI 带来很多盲速.

本文 GMTI 处理步骤: 首先, 利用 FFT 把每一卫星的接收回波信号在多普勒域分成很多小段 (多普勒通道), 例如图 1(b) 中的阴影部分. 对于每一多普勒通道输出, 5 个杂波谱分量和 5 个目标谱分量在空间方位角 θ 上就可以很好地分离开, 而且每一谱分量都被限制在很小的角度范围内. 对每一多普勒通道输出再利用空间处理取出所有目标谱分量, 即利用空间自由度形成主波束对准目标谱分量方向, 而在 5 个杂波谱分量方向形成零点, 至于在其它方向的波束形状我们并不关心, 即只要保证这 6 个方向 (1 个目标方向和 5 个杂波方向) 的波束形状就可以了. 而且, 对于图 1(b) 所示的回波信号 6 颗小卫星就够了. 当图 1(b) 中的所有目标谱分量利用上述方法分别取出来后, 再把所有取出来的目标谱分量拼接成宽多普勒谱, 如图 1(a) 中的细斜直线所示. 接下来, 再利用传统的 SAR 成像方法对分离出来的地面运动目标宽谱信号进行相干积累, 即进行距离徙动校正、距离压缩、方位压缩等处理, 最终得到地面运动目标的 SAR 图像. 最后再利用 CFAR (恒虚警) 检测技术对地面运动目标进行检测.

下面从数学角度给出描述.

为了简化分析, 假定所有小卫星都沿航向直线分布且各自收发 (单发多收可以等效为各自收发^[3]). 假定各小卫星的沿航向位置为 $d_m (m = 1, 2, \dots, M, M$ 为卫星数目, $d_1 = 0)$, 并且第 1 颗小卫星在时间 t 接收的某一距离单元处的回波信号为

$$s_1(t) = s_c(t) + s_t(t) + n_1 \quad (3)$$

式中 $s_c(t)$ 和 $s_t(t)$ 分别为杂波和地面运动目标的回波, n_1 为加性噪声. 在理想条件下, 第 m 颗小卫星的接收回波信号可以写为

$$s_m(t) = s_c \left(t - \frac{d_m}{v_s} \right) + s_t \left(t - \frac{d_m}{v_s + v_{at}} \right) \exp \left\{ j \frac{4\pi v_{ct} d_m}{\lambda (v_s + v_{at})} \right\} + n_m \quad (4)$$

把上式变换到多普勒域, 得到

$$\begin{aligned} S_m(f_d) &= S_c(f_d) \exp \left\{ -j 2\pi f_d \frac{d_m}{v_s} \right\} + S_t(f_d) \exp \left\{ j \frac{4\pi v_{ct} d_m}{\lambda (v_s + v_{at})} \right\} \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j 2\pi f_d \frac{d_m}{(v_s + v_{at})} \right\} + n_m \\ &\approx S_c(f_d) \exp \left\{ -j \frac{4\pi d_m \sin\theta_c(f_d)}{\lambda} \right\} + S_t(f_d) \\ &\quad \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi d_m \sin\theta_t(f_d)}{\lambda} \right\} + n_m \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $\theta_c(f_d)$ 和 $\theta_t(f_d)$ 分别为杂波和目标对应多普勒通道 f_d 的方位角, 它们的关系如下:

$$\sin\theta_c(f_d) \approx \sin\theta_t(f_d) + v_{ct}/v_s \quad (6)$$

从式 (5) 可以看出, 固定杂波和运动目标所在的方位角不同. 式 (5) 中的相位项是下面进行空间处理的基础.

不失一般性, 仍以图 1(b) 为例. 多普勒通道 f_d 中的 5 个杂波谱分量和 5 个目标谱分量的方位角分别表示为 $\theta_{c,i}(f_d)$ 和 $\theta_{t,i}(f_d) (i = -2, -1, 0, 1, 2)$, 且具有如下关系:

$$f_d + i \cdot f_r = \frac{2v_s}{\lambda} \sin\theta_{c,i}(f_d) \quad (7)$$

$$f_d + i \cdot f_r = \frac{2(v_s + v_{at})}{\lambda} \sin \theta_{i,i}(f_d) + \frac{2v_a \cos \theta_{i,i}(f_d)}{\lambda} \quad (8)$$

式中 $f_r (-f_r/2 \leq f_d < f_r/2)$ 为脉冲重复频率. 我们利用空间波束形成技术来取出运动目标的谱分量, 例如第 i 谱分量, 其阵列权矢量 $w_i(f_d)$ 需要满足下面的约束:

$$\begin{aligned} w_i^H(f_d) a_{i,i}(f_d) &= 1 \\ \min_w w_i^H(f_d) R(f_d) w_i(f_d) \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} a_{i,i}(f_d) &= [1, \exp\{-j \frac{4\pi d_2 \sin \theta_{i,i}(f_d)}{\lambda}\}, \dots, \\ &\exp\{-j \frac{4\pi d_M \sin \theta_{i,i}(f_d)}{\lambda}\}]^T \end{aligned} \quad (10)$$

$$R(f_d) = E\{s(f_d) s^H(f_d)\} \quad (11)$$

$$s(f_d) = [S_1(f_d), S_2(f_d), \dots, S_M(f_d)]^T \quad (12)$$

$a_{i,i}(f_d)$ 为运动目标的第 i 谱分量的阵列导向矢量, $R(f_d)$ 为杂波+噪声协方差矩阵, $E\{\}$ 代表统计平均, $s(f_d)$ 为从多普勒通道 f_d 输出的阵列矢量. 实际中, 我们利用样本来估计 $R(f_d)$, 样本可以从距离单元中获得. 样本协方差矩阵 $R(f_d)$ 由下式计算

$$R(f_d) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L s(f_d, l) s^H(f_d, l) \quad (13)$$

式中 $s(f_d, l)$ 为从距离-多普勒单元 $l-f_d$ 输出的阵列矢量, $L (L \geq 2M-1)$ 为样本数目. 在式(9)约束下, 最优自适应解 $w_i(f_d)$ 为

$$w_i(f_d) = R^{-1}(f_d) a_{i,i}(f_d) \quad (14)$$

上式权矢量的一个最大优点就是能够保留所有取出来的谱分量的幅相信息.

前面计算阵列权矢量时, 要求知道运动目标谱分量的导向矢量 $a_{i,i}(f_d)$. 然而, 实际中运动目标的导向矢量通常是未知的(由于速度未知). 如果不能对目标方向很好地导向约束, 则运动目标谱很可能会落入超稀疏阵的波束的过多零点中, 即产生很多盲速. 如何有效地减少盲速是必须要解决的问题. 运动目标的空时谱会落入空时平面(如图1(b)所示)中的任何位置(由速度决定). 因此, 如果我们用导向矢量(即阵列主波束)来扫描整个空时平面, 就可以对所有运动目标充分导向约束, 从而避免或大大减少由超稀疏阵列的细碎波束带来的盲速. 当然, 这会大大增加运算量.

4 仿真结果

下面利用仿真结果验证本文方法. 本文主要作原理性的讨论. 假定9颗小卫星随机超稀疏分布在沿航向的直线上(位置分别为0, 110.3969, 185.4925, 256.7482, 332.8217, 598.5139, 688.5359, 748.9194, 799.9340m). 其中一颗小卫星既发射也接收, 其它所有小卫星只接收回波. 主要仿真参数如表1所示. 我们利用一幅真实SAR图像(即SAR图像中的每一像素幅度作为对应地面单元的散射系数)作为地面场景(方位长度为几十公里, 而距离宽度只有几百米)来产生杂波回波. 在地面场景中放置一个运动目标并接收其回波. SAR图像中的杂噪比为45dB, 信杂比为0dB.

表1 编队小卫星SAR仿真参数

卫星高度	下视角	天线尺寸	发射带宽	脉冲宽度	重复频率	波长	卫星速度
750 km	45°	2m × 1m (方位 × 高度)	200 MHz	20 us	1496 Hz	3 cm	7482 m/s

利用本文方法获得的信杂噪比改善因子

(输出信杂噪比与输入信杂噪比之比)随速度(垂直航向)的变化曲线(又称为速度响应)如图3所示, 其中实线为固定导向矢量结果, 而虚线

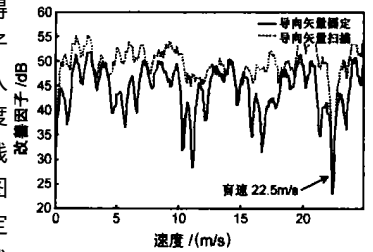


图3 信杂噪比改善因子的速度响应

为扫描整个空时平面结果. 可见, 如果导向矢量扫描整个空时平面, 可以获得很好的速度响应. 当地面运动目标的速度达到 22.5m/s 时会产生一个盲速, 此时地面运动目标与杂波的空时谱完全重合, STAP 技术无法分离.

5 结论

本文讨论了分布式小卫星在 SAR 模式下的地面运动目标检测方法. 利用 STAP 技术把所有空时谱分量分别取出来并拼接成宽谱信号(包括无模糊的杂波宽谱和运动目标宽谱), 然后再进行 SAR 成像处理, 可以同时完成对地面场景的大观测带、高分辨率 SAR 成像和 GMTI.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 林来兴. 小卫星围绕空间站飞行动力学和控制研究[J]. 中国空间科学技术, 1999, 12(6): 1-6.
- [3] 李真芳, 保铮, 等. 分布式小卫星 SAR 提高横向分辨率的信号处理[J]. 电子学报, 2003, 31(12): 1800-1803.
LI Zhenfang, et al. Distributed small satellites SAR signal processing for achieving full azimuth resolution[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(12): 1800-1803. (Chinese Source)
- [4] Cantafio L J. Space based Radar Handbook [M]. Boston: Artech House, 1989. 127-132.

作者简介:



李真芳 男, 1977 年 11 月出生于山东寿光, 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: 地面运动目标检测(GMTI)和合成孔径雷达成像(SAR).

E-mail: lzf@xidian.edu.cn.