

## 分布式小卫星多中心频率 SAR 实现宽域二维高分辨率成像

夏玉立<sup>①②</sup> 雷宏<sup>①</sup> 黄瑶<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 分布式小卫星 SAR 能够打破传统单星 SAR 测绘带宽和方位分辨率的矛盾。该文分析了一种沿航向排列分布式小卫星宽测绘带二维高分辨率成像技术, 每颗卫星同时发射接收不同频率的线性调频信号, 先分别在每个子带解方位多普勒模糊, 并将方位多普勒中心频率调整至零频, 然后在距离向进行子带拼接得到大带宽的线性调频信号从而得到高的距离向分辨率。此外, 这种多发多收的工作方式还增加了系统平均发射功率, 提高了信噪比。

**关键词:** 分布式小卫星 SAR; 空域滤波; 距离向子带拼接; 宽测绘带; 二维高分辨率

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)02-0501-04

## Using Multi-central Frequency Distributed Small Satellite SAR to Achieve Wide Swath and Two Dimensional High Resolution

Xia Yu-li<sup>①②</sup> Lei Hong<sup>①</sup> Huang Yao<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Distributed small satellite SAR can overcome the traditional contradiction of swath and azimuth resolution. In this paper, an algorithm to achieve both two dimensional high resolution and wide swath is proposed. Every small satellite work in the active state, they transmit and receive different frequency band signal simultaneity. First, the azimuth ambiguity is eliminated in each frequency sub-band, then the signal is rectified to zero Doppler frequency, after that this algorithm does the range spectral synthesis to achieve high range resolution. In other aspects, this active work mode can enhance the system's average transmit power, and increase the SNR.

**Key words:** Distributed small satellites SAR; Space filtering; Range sub-band synthesis; Wide swath; Two dimensional high resolution

### 1 引言

分布式小卫星是指一组小卫星雷达系统协同工作, 共同完成 SAR 的各种功能。在分布式小卫星 SAR 系统中每颗卫星沿各自的轨道绕地球飞行, 卫星间的构型保持相对稳定。系统中的每颗小卫星都可以是完全意义上的带有收发分置天线的小卫星 SAR, 也可以是只具有接收回波功能的小卫星 SAR。多颗卫星协同工作, 可以用于高分辨率成像、干涉测量、运动目标检测、宽测绘带成像等。

对于传统的单孔径星载 SAR 系统, 最小天线面积的限制使得大测绘带和高分辨率成为一对难以调和的矛盾。然而, 如果把一个大天线分割成多个小孔径天线, 并分别放置在编队飞行的小卫星平台上, 就可以解决这个矛盾, 而且小孔径的发射接收天线, 可以获得宽覆盖区域。本文提出一种能够同时实现宽测绘带及二维高分辨率的方法, 即分布式小卫星系统中的所有卫星同时发射和接收不同中心频率的线性调频信号, 在满足宽测绘带且距离向不产生模糊的条件

下, 设计较低的脉冲重复频率 PRF, 在方位向利用各小卫星的空间自由度来解决方位模糊问题<sup>[1-4]</sup>, 在距离向利用每颗卫星发射不同频带信号来进行距离向信号频带拼接, 从而达到方位向和距离向二维高分辨率的目的。同时, 这种多发多收模式相对于一发多收模式, 在相同的卫星个数情况下, 可有更多的等效相位中心, 也就是说空间自由度更大, 并且增加了系统平均发射功率, 提高了信噪比。

### 2 多发多收二维高分辨率原理分析

首先, 引入等效相位中心的概念, 假设某小卫星 SAR 发射信号, 另一雷达接收信号, 对接收信号进行相位补偿之后可等价在发射、接收天线连线的中点自发自收, 此点称为相位中心。相位补偿函数为  $\exp[j\pi D^2 / 2R_s \lambda]$ , 其中  $R_s$  为到场景中心的距离,  $D$  为两卫星间距到雷达视线垂直方向的投影<sup>[5]</sup>。在下面信号模型的讨论中, 采用等效相位中心进行分析。

假设卫星群中有 3 颗小卫星同时工作, 每颗卫星发射不同中心频率的线性调频信号, 信号带宽为  $B$ 。如图 1 所示,

每个频带回波信号各有3个等效相位中心。本文先分别对各频带回波信号解方位模糊,得出3个不同频带、且方位向不模糊的回波信号,然后对此信号进行距离向频带拼接,这样可同时实现距离向高分辨率。此情况下,各卫星的脉冲重复频率可降低为常规单孔径SAR的1/3,而距离向的分辨率可达到常规单孔径SAR的3倍。

## 2.1 分布式小卫星SAR回波信号分析

文献[3]中详细推导了分布式小卫星的回波信号模型,本文针对沿航向排列构型系统进行分析推导。假设在飞行过程中卫星群编队构型保持不变,并设第1颗小卫星位置为原点 $O$ ,以飞行方向为 $y$ 轴,场景的垂直方向为 $z$ 轴,建立右手坐标系,如图2所示。地面场景某散射点坐标为 $(x_n, y_n, z_n)$ ,假设小卫星群共有 $M$ 颗小卫星,且沿方位向均匀排列,记第 $m$ 颗小卫星坐标为 $(0, Y_m, 0)$ 。

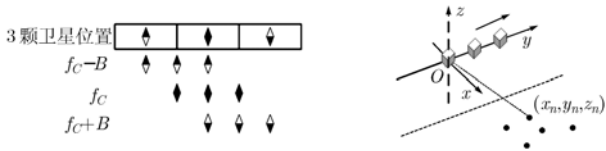


图1 多发多收等效相位中心示意图 图2 分布式小卫星几何模型

假设第1颗卫星发射中心频率为 $f_1$ 的线性调频信号,双程等效相位中心分别为 $(0, 0, 0), (0, d_{12}, 0), (0, d_{13}, 0)$ ,其中 $d_{12} = Y_2/2, d_{13} = Y_3/2$ 。同理,第2颗卫星发射中心频率为 $f_2$ 的线性调频信号,双程等效相位中心分别为 $(0, d_{21}, 0), (0, d_{22}, 0), (0, d_{23}, 0)$ ,其中 $d_{21} = Y_2/2, d_{22} = Y_2, d_{23} = (Y_2 + Y_3)/2$ ;第3颗卫星发射中心频率为 $f_3$ 的线性调频信号,双程等效相位中心为 $(0, d_{31}, 0), (0, d_{32}, 0), (0, d_{33}, 0)$ ,其中 $d_{31} = Y_3/2, d_{32} = (Y_2 + Y_3)/2, d_{33} = Y_3$ 。

以 $f_1$ 频带为例,假设发射信号为 $p(\tau, t)$ ,带宽为 $B$ ,时宽为 $T_p$ , $\tau$ 为距离时间, $t$ 为方位时间。假设地面近似为平面,卫星高度为 $h$ ,第 $n$ 个散射点到第 $q$ 个相位中心的距离为

$$R_q(t, n) = \sqrt{x_n^2 + (y_n - d_{1q} - vt)^2 + h^2} \quad (1)$$

其中 $v$ 为卫星飞行速度。则第 $q$ 个相位中心接收的信号为

$$s_{1q}(\tau, t) = \sum_n \sigma_n p_1 \left( \tau - \frac{2R_q(t, n)}{c}, t \right) \quad (2)$$

将回波信号变换到波数域:

$$S_{1q}(k_r, k_a) = P_1(k_r) \sum_n \sigma_n \frac{\exp(-j\pi/4)}{\sqrt{k_r^2 - k_a^2}} \cdot \exp \left[ -j\sqrt{k_r^2 - k_a^2} \sqrt{x_n^2 + h^2} - jk_a(y_n - d_{1q}) \right] \quad (3)$$

当 $d_{1q}$ 为0时,即原点 $O$ 的接收波数谱信号为

$$G(k_r, k_a) = \sum_n \sigma_n \frac{\exp(-j\pi/4)}{\sqrt{k_r^2 - k_a^2}} \cdot \exp \left[ -j\sqrt{k_r^2 - k_a^2} \sqrt{x_n^2 + h^2} - jk_a y_n \right] \quad (4)$$

可见回波信号又可写为

$$S_{1q} = P_1(k_r) G(k_r, k_a) \exp(jk_a d_{1q}) \quad (5)$$

同理,其他频带回波信号模型为

$$S_{2q} = P_2(k_r) G(k_r, k_a) \exp(jk_a d_{2q}) \quad (6)$$

$$S_{3q} = P_3(k_r) G(k_r, k_a) \exp(jk_a d_{3q}) \quad (7)$$

## 2.2 方位向解模糊原理

由上节分析可知,由于相位中心空间位置不同附加的相位项:

$$Z_{iq}(f_a) = \exp \left( j \frac{2\pi f_a d_{iq}}{v} \right) \quad (8)$$

将第 $i$ 个频带的 $Q$ 个相位中心接收的差异部分写成矢量形式,称为导向矢量

$$\mathbf{Z}_i(f_a) = [Z_{i1}(f_a), Z_{i2}(f_a), \dots, Z_{iq}(f_a), \dots, Z_{iQ}(f_a)]^T \quad (9)$$

假设有 $L$ 个多普勒模糊,设接收信号的重复频率为PRF,则各模糊的频率中心为

$$\mathbf{f} = \text{PRF} \left[ -(L-1)/2, -(L-1)/2 + 1, \dots, (L-1)/2 - 1, (L-1)/2 \right]^T \quad (10)$$

则对多普勒频带内任一频率点 $f_a$ ,各模糊频率组成矢量为

$$\mathbf{f}_a = \mathbf{f} + f_a \quad (11)$$

假设用下列空域滤波权矢量对某一多普勒频率点的一组模糊数值中提取所需要的值 $\mathbf{W}_l = [w_1, w_2, \dots, w_q, \dots, w_Q]^T$ ,即其相应为所需多普勒点 $l$ 输出为1,其他输出为零,即

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{Z}^T(\mathbf{f}_a(i)) \mathbf{W}_l &= 1, & i = l \\ \mathbf{Z}^T(\mathbf{f}_a(i)) \mathbf{W}_l &= 0, & i \neq l \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

$\mathbf{W}_l$ 的求解由多种方法,可以直接通过求伪逆的方法,也可以用自适应Capon方法<sup>[1,2,4]</sup>。由于各相位中心接收信号为所有模糊多普勒信号之和,所以第 $i$ 频带第 $q$ 个相位中心接收信号可写为

$$S_{iq} = \sum_{l=1}^L P_l(k_r) G(k_r, k_a(l)) \exp(jk_a(l) d_{iq}) \quad (13)$$

将各相位中心接收的信号写成矢量形式

$$\mathbf{S}_i(k_r, k_a) = [S_{i1}(k_r, k_a), \dots, S_{iQ}(k_r, k_a)]^T \quad (14)$$

则经过空域滤波之后信号为

$$\mathbf{S}_i(k_r, k_a)^T \mathbf{W}_l = P_l(k_r) G(k_r, k_a(l)) \quad (15)$$

将各模糊频率点的多普勒信号逐个取出然后进行方位拼接就可得到一个全多普勒频率的回波信号,方位向分辨率相应得到提高,如图3所示。根据阵列信号处理理论, $Q$ 个相位中心最多只能形成一个约束方向, $Q-1$ 个零点,因此为了有效滤除多普勒模糊分量,相位中心数目必须大于多普勒模糊数目,即 $Q > L$ 。

利用分布式小卫星空间自由度解决方位模糊问题对阵

列构型有一定的要求,要求各阵元在一个脉冲重复周期的卫星行程  $v$ PRT 之内。由于空域采样是非时变的,合成孔径时间所用的等效阵元序列只与阵元的空间位置有关,而与时间无关。因此形成阵列并不一定要用同一时刻的数据形成一次快拍,而可将后续各卫星接收到的序列在时间上前移  $n_q$  PRT,相当于将原阵列的基线从  $d_q$  缩短为  $d_q - n_q$  PRT,因此可以取适当的  $n_q$  值得使得阵列构型满足要求。

图4是方位向多普勒频谱拼接前后的方位向点目标响应图。卫星群由3颗卫星组成,各卫星沿方位向排列,3颗卫星位置分别为(0,0,0), (0,186,0), (0,372,0)卫星高度为400km,卫星飞行速度为7600m/s,方位向多普勒带宽为2533.3Hz,设定PRF为844Hz,则方位多普勒有3次模糊,图4实线是解多普勒模糊并且多普勒拼接之后方位向压缩后图形,虚线是解模糊之后部分孔径多普勒信号方位压缩后波形,可看出全孔径多普勒信号方位向分辨率大大提高。

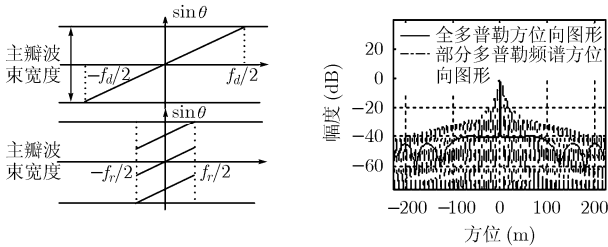


图3 多普勒模糊示意图

图4 全多普勒与部分多普勒点目标方位向响应对比

### 2.3 距离向时域子带拼接方法

由第2节可知,方位导向矢量是以位于坐标原点的卫星接收信号为基准得到的,因此经过方位解模糊之后相当于将所有方位向多普勒中心频率都移至零频。方位向解模糊之后,距离向可直接用时域拼接的方法合成为宽带线性调频信号。

假设第  $n$  颗小卫星发射的信号

$$s_{nt}(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T_{pn}}\right) \exp\{j2\pi f_{nc}\tau + j\pi k_r \tau^2\} \quad (16)$$

其中  $f_{nc} = f_c + \Delta f_n$ ,  $\Delta f_n = \left(n + \frac{1-N}{2}\right)B$ ,  $B$  为子带拼接前信号带宽。

第  $n$  颗小卫星接收的基带回波信号可表示为

$$s_{nr}(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau - \tau_0}{T_{pn}}\right) \exp\{-j2\pi f_{nc}\tau_0 + j\pi k_r (\tau - \tau_0)^2\} \quad (17)$$

时域子带拼接方法是通过将此信号与理想的宽带信号比较而推导出的<sup>[6,7]</sup>。

假设用  $N$  个带宽为  $B$ , 时宽为  $T$  的子脉冲来合成理想宽带信号,要求  $B = B_w/N, T = T_w/N$ 。由图5可见宽带信号可看作  $N$  个子脉冲串的相参叠加,表达式为

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - \Delta t_n}{T}\right) \cdot \exp\left(j2\pi f_c t + j\pi k_r t^2\right), \Delta t_n = \left(n + \frac{1-N}{2}\right)T \quad (18)$$

解调后的回波信号为

$$m(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \text{rect}\left(\frac{t - \Delta t_n - \tau_0}{T}\right) \cdot \exp\left[-j2\pi f_c \tau_0 + j\pi k_r (t - \tau_0)^2\right] \quad (19)$$

将式(17)与式(19)相比较可以得到距离向信号拼接的方法。

第1步 将第  $n$  颗小卫星的接收信号时域移动  $\Delta \tau_n$ ,

$\Delta \tau_n$  与理想宽带信号中的  $\Delta t_n$  相同;

第2步 将时移后的信号进行频移,时域乘以  $\exp\{j2\pi k_r \Delta \tau_n \tau\}$ ;

第3步 进行相位幅度校正,乘以  $\exp\{-j\pi k_r \Delta \tau_n^2\}$ ;

最后,将各信号进行相位幅度叠加。即可得出宽带线性调频信号。

图6是距离向仿真结果,将上节解方位模糊之后的3个频带信号进行拼接,拼接后中心频率为9.6GHz,单个线性调频信号带宽为10MHz,子带拼接后带宽展宽为30MHz。

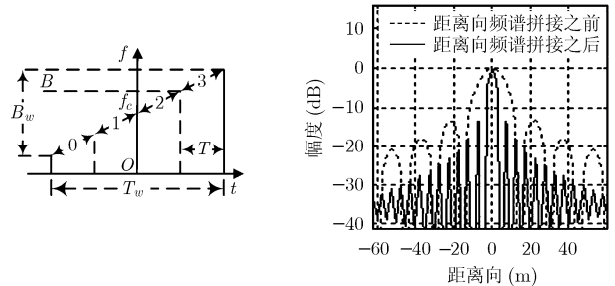


图5 宽带线性调频信号时频分割关系

图6 频谱展宽前后点目标距离向响应对比图

综上,该二维高分辨率宽测绘带成像方法可归纳为图7:根据方位向和距离向仿真时采用的参数,对5个坐标分

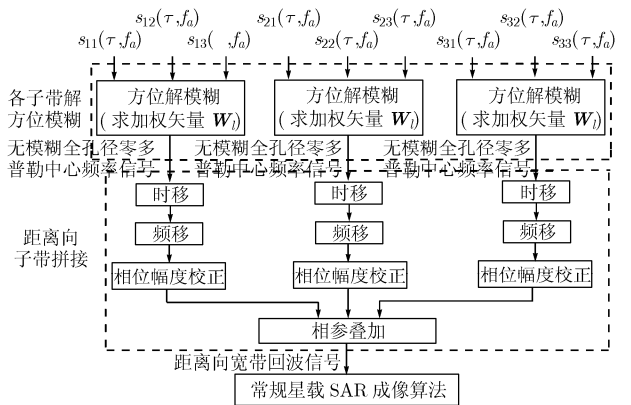


图7 宽测绘带二维高分辨率成像方法

别为(0,0,0), (0,-110,0), (0,110,0), (-110,0,0), (110,0,0) 的点目标进行成像, 结果如图 8 所示:

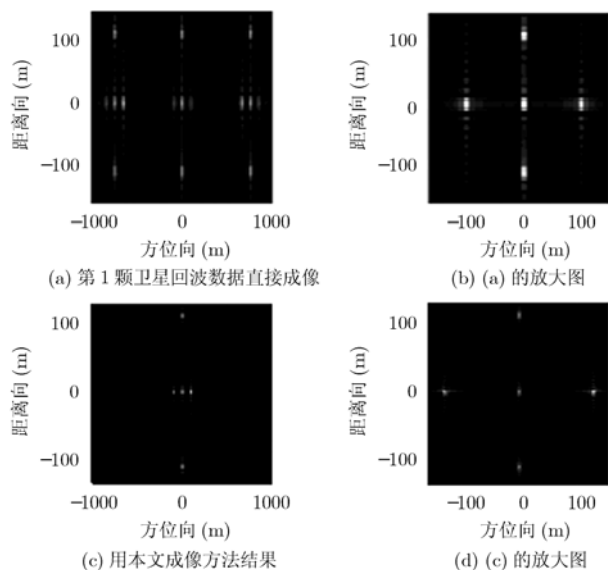


图 8

### 3 结束语

本文提出了一种能够实现宽测绘带二维高分辨率的分布式小卫星多中心频率 SAR 系统, 讨论了在小卫星沿航向排列情况下的回波信号模型及成像方法, 仿真结果证明该方法可行。同时, 该多发多收工作方式也可以增加系统平均发射功率, 提高系统信噪比。

### 参考文献

- [1] Li Z F, Bao Z, Wang H Y, and Liao G S. Performance improvement for constellation SAR using signal processing techniques. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2): 436-452.
- [2] Li Z F and Bao Z. A novel approach for wide-swath and high-resolution SAR image generation from distributed small spaceborne SAR systems. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(5): 1015-1033.
- [3] Xing M D, Li Z F, Bao Z, and Liao G S. Doppler ambiguity resolving in distributed microsatellites radar imaging. *Chinese of Journal Electronics*, 2005, 14(4): 721-726.
- [4] Li Z F, Wang H Y, Tao S, and Bao Z. Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82-86.
- [5] 闫鸿慧, 王岩飞, 于海锋, 李俐, 一种基于距离补偿的分布式小卫星双基 SAR 成像方法. *电子与信息学报*, 2005, 27(5): 771-774.
- [6] Lord R T and Inggs M R. High range resolution SAR processing using stepped-frequencies. Proc. IEEE Geoscience Remote Sensing Symp., IGARSS'97, Singapore, August 1997, 1: 490-492.
- [7] Lord R T and Inggs M R. High range resolution radar using narrowband linear chirps offset in frequency. Proc. IEEE South Africa Symp. on Communications and Signal Processing, COMSIG'97, Grahamstown,, September 1997: 9-12.
- [8] Yan H H, Wang Y F, Yu H F, and Li L. Distributed satellites SAR high resolution imaging via spectral synthesis. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(5): 771-774.

夏玉立: 女, 1982 年生, 博士生, 研究方向为分布式小卫星合成孔径雷达系统设计及信号处理。

雷 宏: 男, 1963 年生, 研究员, 主要研究方向为星载和机载合成孔径雷达研究。

黄 瑶: 女, 1981 年生, 博士生, 研究方向为机载 SAR 动目标检测及成像理论研究。