

## 基于 LFM CW 体制的分布式 SAR 高分辨率成像方法研究

李 堃<sup>\*①②</sup> 梁兴东<sup>①</sup> 陈龙永<sup>①</sup> 王 杰<sup>①</sup> 吴一戎<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘 要:** 分布式微小卫星 SAR 是实现小型化、低成本星载 SAR 系统的重要途径, 然而, 在该体制下, 如何充分利用分布式系统资源, 实现高分辨率成像是其面临的关键问题之一。该文提出一种利用 LFM CW 信号实现分布式微小卫星平台 SAR 的方法, 并基于方位向编队飞行的微小卫星构型, 对其信号模型与高分辨率成像方法进行了研究。该文方法使用多颗微小卫星同时发射与接收频分 LFM CW 信号, 利用交叉接收的构型使不同频带收发天线所形成的等效相位中心重合, 进而在距离向对信号进行频带合成以恢复全带宽信号, 从而实现高分辨率 SAR 成像。该方法实现了分布式平台信号的频带合成, 为高分辨率 LFM CW SAR 技术在微小卫星平台上的应用提供了理论支撑。仿真实验验证了理论分析的正确性以及方法的有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 分布式微小卫星; 多发多收; 线性调频连续波; 频带合成

**中图分类号:** TP722.6

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2017)02-0437-07

**DOI:** 10.11999/JEIT160274

## Signal Model and High-resolution Imaging Approach for Distributed SAR Based on LFM CW Signals

LI Kun<sup>\*①②</sup> LIANG Xingdong<sup>①</sup> CHEN Longyong<sup>①</sup> WANG Jie<sup>①</sup> WU Yirong<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(*Science and Technology on Microwave Imaging Laboratory, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

<sup>②</sup>(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

**Abstract:** Distributed micro-satellites SAR has the capabilities of substantially miniaturizing the size and lowering the cost of space-borne SAR systems. However, one of the key issues is to take full advantage of the distributed resources and achieve high-resolution images. In this paper, an approach utilizing LFM CW signal is proposed to realize distributed micro-satellites SAR system. The signal model and the high-resolution imaging method is studied on the basis of the serial formation in azimuth. LFM CW signals are transmitted simultaneously and beat-frequency division signals are received by different micro-satellites. With the use of the crossed receiving technique, different sub-band signals with superposed equivalent phase centers can be acquired by the configuration design of formation flying, and then the full-bandwidth signal is synthesized to obtain high-resolution image. The proposed method synthesizes the sub-band signals of distributed platforms, which provides theoretical support for applying high-resolution LFM CW signals in the field of distributed micro-satellites SAR. The correctness of the theoretical derivations and the effectiveness of the approach is validated by simulation results.

**Key words:** SAR; Distributed micro-satellite; MIMO; LFM CW; Sub-band synthesis

### 1 引言

分布式微小卫星合成孔径雷达(SAR)系统利用多颗微小卫星 SAR 编队飞行, 并通过通信、队形控

制和联合信号处理等手段实现协同工作, 使得微小卫星群构成一颗庞大的“虚拟卫星”, 共同完成对地观测任务, 提升系统在高分辨率宽测绘带成像、地面动目标检测、3 维成像、干涉等方面的性能<sup>[1-4]</sup>, 提高系统的生存能力与工作灵活性, 降低系统成本、缩短研制周期, 极大地提升星载 SAR 系统的总体性能, 拓宽其应用领域, 具有重要的战略意义与研究价值<sup>[5,6]</sup>。其中, 线性调频连续波(Linear Frequency Modulated Continuous Wave, LFM CW)技术既能

收稿日期: 2016-03-21; 改回日期: 2016-10-12; 网络出版: 2016-11-16

\*通信作者: 李堃 likun8999@hotmail.com

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2013AA122201), 中国科学院创新基金(CXJJ-16M217)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (2013AA122201), The Innovative Foundation for the Chinese Academy of Sciences (CXJJ-16M217)

够实现高分辨率成像, 又可以满足小型化、低成本化的要求, 将其应用于星载 SAR 将简化系统及卫星平台设计, 是实现分布式微小卫星 SAR 系统的重要基础<sup>[7]</sup>。

现阶段尚存在两方面的问题限制着 LFM CW SAR 在卫星平台上的应用: 收发隔离问题与信号正交性问题。首先, 单站 LFM CW SAR 的作用距离很短, 通常只有几百米到数公里, 这是由于单站 LFM CW SAR 收发隔离性能的制约造成的。由于 FMCW SAR 始终发射信号, 因此, 需要分置的接收天线进行回波接收, 所得回波为实际场景回波与直达波信号的叠加。根据调频连续波雷达方程<sup>[8]</sup>, 当作用距离增大时, 若要获得相同信噪比的场景回波, 则需相应地提高发射功率, 功率提升倍数与距离增长倍数的三次方成正比, 然而, 在其他条件不变的情况下, 直达波信号的增大幅度远高于回波信号的增大幅度, 这将使得回波信号被淹没在直达波信号中无法分辨。针对该问题, 目前的研究分为两种体制开展: 单站体制与多站体制。英国 Surrey 大学的 Ahmed 和 Underwood 博士提出了一种单站中断连续波 SAR 体制(Interrupted CW, ICW)SAR<sup>[9]</sup>, 该体制针对微小卫星平台设计, 通过单个天线在发射与接收模式间的切换实现信号的发射与接收, 避免了直达波信号过大的问题, 并利用三次样条插值填充回波信号孔径间隙, 实现 SAR 成像。该方法误差较大, 最大估计误差偏离其理论值约 30%。中国科学院电子学研究所的刘悦<sup>[7]</sup>在 ICW 体制的基础上, 利用近似假设对回波信号逐距离门进行方位采样迭代外推, 以获取缺失信号, 在满足假设条件时, 最大误差偏离其理论值约 2%~3%。以上基于单站体制的研究均采用外推的方法补偿由于天线接收造成的信号非连续性, 这将在一定程度上影响成像结果的精确性, 同时大大增加处理时的计算量。此外, 缩短发射时间意味着需要提高发射功率, 近似假设也将对 PRF 等参数的选择范围构成限制。多站体制将收发天线布置在不同的平台上, 有效解决了收发隔离问题的制约<sup>[10]</sup>, 适用于长距离应用, 是实现星载 LFM CW SAR 系统的可行方法。在多站体制中, 较常用的有单发多收(Single Input Multiple Output, SIMO)与多发多收(Multiple Input Multiple Output, MIMO)两种方案, 其中 MIMO 方案系统自由度高, 工作方式灵活, 生存能力强, 与 SIMO 方案相比具有显著的优势。然而, 正交信号的设计是实现上述优势的一个重要前提。由于雷达体制的差异性, 脉冲体制下的正交信号对 FMCW 体制不再适用<sup>[11]</sup>, 而对 FMCW 体制正交信号的研究近年刚刚兴起, 目前适用于 LFM CW SAR 的是经 dechirp 后形成距离频分信号的方案<sup>[12]</sup>。

基于上述 LFM CW SAR 的研究现状, 多站体

制是解决其星载应用中收发隔离问题的有效途径, 其中 MIMO 方案能够通过大幅增加的等效相位中心获取更丰富的系统自由度, 从而提高 SAR 系统的功能和性能, 具有广阔的应用前景。本文将多站体制与 MIMO 技术相结合, 突破 LFM CW SAR 收发隔离问题产生的制约, 采用 dechirp 后的距离频分信号解决多路信号间的正交问题, 并基于方位向编队飞行的微小卫星构型, 重点研究其信号模型与相干合成方法。需要说明的是, 本文是对高分辨率 LFM CW SAR 技术应用于分布式微小卫星平台的初步研究, 因此下文主要针对理想情况开展研究, 对前人已在 LFM CW SAR 方面取得的研究成果, 文中采用了理想假设以简化信号模型。

本文研究了基于 LFM CW 体制的分布式微小卫星平台 SAR 信号模型, 并提出了一种高分辨率成像方法, 该方法以 LFM CW 信号作为发射信号, 每颗卫星发射全带宽信号的一路子带信号, 使得各路信号经 dechirp 处理后在距离向频分, 通过交叉接收的方式保证每路子带形成的等效相位中心处于同一方位位置处, 进而利用频带合成的方法将其恢复为全带宽信号, 最后进行 SAR 成像。该方法通过合成多路频分发射信号提高了系统的时间带宽积, 可实现高分辨率 SAR 成像, 具有实现基于 LFM CW 体制的分布式微小卫星平台 SAR 系统的潜力。点目标与场景成像仿真实验验证了理论分析的正确性以及方法的有效性。

## 2 基于 LFM CW 体制的分布式 SAR 信号模型

假设有  $N$  颗卫星沿方位向排列, 其空间坐标分别为  $(x_1, y_1, z_1), (x_1, y_2, z_1), \dots, (x_1, y_{N-1}, z_1), (x_1, y_N, z_1)$ , 地面散射点空间坐标为  $(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), \dots, (X_p, Y_p, Z_p)$ , 如图 1 所示。

以 LFM CW 信号作为分布式微小卫星平台 SAR 的发射信号, 不同卫星发射带宽相同、中心频率不同的 LFM CW 信号, 相邻两路发射信号间频谱

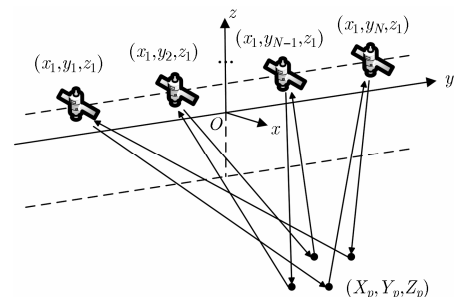


图 1 基于 FMCW 体制的分布式微小卫星平台 SAR 几何模型

部分重叠, 其时频分布曲线如图 2(a)所示。对于 FMCW SAR 而言, dechirp 处理将不可避免地造成带宽损失, 该损失正比于目标斜距与参考斜距的差值<sup>[13]</sup>。为了尽量减小带宽损失, 一般将参考斜距取为场景中心距, 则整个场景内的带宽损失最大值正比于距离向测绘带宽度的一半。通过设计各卫星信号中心频率之差与测绘带宽的关系, 可使各路信号经 dechirp 处理后在距离频域内构成频分信号, 该关系可表示为式(1), 此时信号的时频关系曲线如图 2(b)所示。

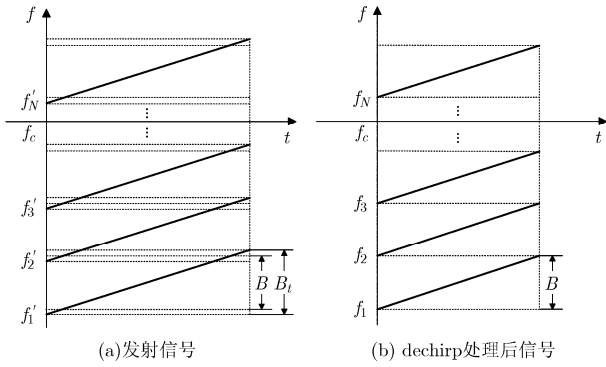


图2 信号时频分布曲线图

$$B_t = \left(1 + \frac{S_w}{2R_{\text{ref}}}\right) B \quad (1)$$

其中,  $B_t$  为发射信号带宽,  $B$  为 dechirp 处理后的接收信号带宽,  $S_w$  为距离向测绘带宽,  $R_{\text{ref}}$  为参考斜距, 取为测绘带中心。当测绘带宽较小时,  $S_w/R_{\text{ref}} \ll 1$ , 此时有  $B \approx B_t$ , dechirp 处理造成的发射信号带宽损失很小。

为了能够使图 2(b)中的频分信号能够进行全带宽信号合成, 进而实现高分辨率 SAR 成像, 须使每个频带对应的发射与接收天线形成的等效相位中心处于同一方位位置处, 这可以通过交叉接收的方式实现<sup>[14]</sup>。对于该方式, 一种可行的卫星构型如图 3 所示。

图 3 中, 卫星 1 上的发射天线  $\text{Tx}_1$  发射中心频率为  $f_1$  的信号, 接收天线  $\text{Rx}_N$  接收中心频率为  $f_N$  的回波; 卫星 2 上的发射天线  $\text{Tx}_2$  发射中心频率为  $f_2$  的信号, 接收天线  $\text{Rx}_{N-1}$  接收中心频率为  $f_{N-1}$  的回波; 以此类推。其中, 下标相同的发射与接收天线具有

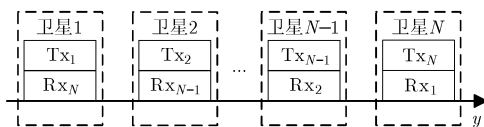


图3 分布式微小卫星平台高分辨率 SAR 系统构型

相同的中心频率, 构成一组收发对, 如  $\text{Tx}_1$  与  $\text{Rx}_1$ ,  $\text{Tx}_2$  与  $\text{Rx}_2, \dots, \text{Tx}_N$  与  $\text{Rx}_N$  等, 它们被放置于不同的卫星上, 能够利用空间传播对发射信号能量的衰减大幅降低直达波信号对接收回波的影响; 而处在同一颗卫星上的发射天线与接收天线中心频率不同, 如  $\text{Tx}_1$  与  $\text{Rx}_N, \text{Tx}_2$  与  $\text{Rx}_{N-1}, \dots, \text{Tx}_N$  与  $\text{Rx}_1$  等, 互相之间不会产生干扰。

利用相位中心近似 (Phase Center Approximation, PCA) 方法, 可将一对收发分置的相位中心等效为一个收发同置的相位中心, 该等效相位中心位于分置相位中心所构成线段的中点处。近似成立的条件为<sup>[15]</sup>

$$\frac{\Delta^2}{4R} \ll \lambda_0 \quad (2)$$

其中,  $\Delta$  表示分置的发射与接收相位中心间的距离,  $R$  表示等效相位中心与目标间的距离,  $\lambda_0$  表示雷达波长。近似后, 可将每一对构成交叉接收的卫星看作是在等效相位中心处自发自收的卫星。

因此, 通过合理设计卫星编队飞行的间隔, 交叉接收可使得  $\text{Tx}_1$  与  $\text{Rx}_1, \text{Tx}_2$  与  $\text{Rx}_2, \dots, \text{Tx}_N$  与  $\text{Rx}_N$  中每一对发射与接收天线构成的等效相位中心均处于同一方位位置, 以便将 dechirp 后构成的频分信号合成为全带宽信号。本文假设各卫星沿方位向等间隔分布, 随着卫星平台的运动, 该方法形成的天线等效相位中心在不同方位位置处均能够重合。

为简单起见, 以下推导中, 假设信号已经过双站等效单站处理与方位向重采样, 即等效为单站自发自收时引入的常数项相位误差已进行补偿, 且不同方位时刻各收发对所形成的等效相位中心均匀分布。此外, 若卫星数目  $N$  为奇数, 则第  $(N+1)/2$  颗卫星处于自发自收模式, 当发射信号峰值功率较大时, 回波信号同样面临着被直达波信号淹没的问题, 因此, 本文中均假设  $N$  为偶数。

对于 FMCW SAR 而言, 传统脉冲 SAR 中的“走-停”假设不再成立。对图 1 所示的几何模型, 其瞬时斜距为

$$R'(\hat{t}, t_m) = \sqrt{R_B^2 + v^2(\hat{t} + t_m)^2} \quad (3)$$

其中,  $v$  为卫星平台运动速度,  $\hat{t}$  为距离向快时间,  $t_m$  为方位向慢时间,  $R_B$  为目标与卫星间的最近斜距。

若第  $k$  颗卫星发射的 LFMCW 信号为

$$s_k(\hat{t}) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_r}\right) \cdot \exp\{j\pi K_1 \hat{t}^2\} \cdot \exp\{j2\pi f_c(k)\hat{t}\}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

则接收端的回波可表示为

$$s_{0,k}(\hat{t}, t_m) = \sum_{p=1}^P \sigma_p \text{rect} \left\{ \frac{\hat{t} - 2R'(\hat{t}, t_m)/c}{T_r} \right\} \cdot \exp \left\{ j\pi K_r \left( \hat{t} - \frac{2R'(\hat{t}, t_m)}{c} \right)^2 \right\} \cdot \exp \left\{ j2\pi f_c(k) \left( \hat{t} - \frac{2R'(\hat{t}, t_m)}{c} \right) \right\} \quad (5)$$

对于第  $k$  颗卫星, 假设经过 dechirp 处理后的回波信号中心频率为

$$f_c(k) = f_c + \left( k - \frac{N+1}{2} \right) B, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (6)$$

则第  $N-k+1$  颗卫星接收到来自第  $k$  颗卫星的回波经过泰勒展开近似后, 可表示为<sup>[16]</sup>

$$s_{k,N-k+1}(\hat{t}, t_m; R_B) = \sum_{p=1}^P \sigma_p \text{rect} \left\{ \frac{\hat{t} - 2R(t_m)/c}{T_r} \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_c(k) \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda(k)} \frac{v^2 t_m}{R(t_m)} \hat{t} \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi K_r \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \left( \hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ j\pi K_r \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right)^2 \right\}, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中,  $K_r$  为距离向调频率,  $T_r$  为脉冲宽度,  $\lambda(k)$  为第  $k$  颗卫星发射信号所对应的波长。

由于每对卫星构成的收发对等效相位中心重合, 因此, 对任意  $k$ ,  $R(t_m)$  均相同, 即各子带回波的距离历程相同, 这是后续全带宽信号合成的基础, 详细步骤将于第 3 节中给出。

### 3 基于 LFM CW 体制的分布式 SAR 高分辨率成像方法

在第 2 节中推导得到了基于 LFM CW 体制的分布式微小卫星平台 SAR 信号模型, 由式(7)可见, 对于同一个散射单元而言, 交叉接收时不同的收发对所得到的信号距离历程相同, 而中心频率为步进式的, 因此, 可以通过频带合成的方法恢复全带宽信号。

在式(7)中, 第 2 个相位项代表距离向快时间引入的多普勒频移项, 该项将影响频带合成过程中相邻子带间的距离相位连续性, 造成目标成像质量下降, 甚至无法成像, 必须在频带合成前予以补偿。

因此, 频带合成的步骤如下:

- (1) 进行快时间多普勒频移项校正;
- (2) 进行距离向时移;
- (3) 进行信号相加。

快时间多普勒频移项的校正可在距离-多普勒域中通过相位相乘实现, 补偿因子为

$$H_{\text{dc}}(\hat{t}, f_a) = \exp \{ -j2\pi f_a \hat{t} \} \quad (8)$$

其中,  $f_a$  为方位向多普勒频率。

补偿后的信号为

$$s_{k,N-k+1}(\hat{t}, t_m; R_B) = \sum_{p=1}^P \sigma_p \text{rect} \left\{ \frac{\hat{t} - 2R(t_m)/c}{T_r} \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_c(k) \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi K_r \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \left( \hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ j\pi K_r \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right)^2 \right\} \quad (9)$$

此时, 对各路信号进行距离向时移, 时移长度由信号中心频率决定。

$$\tau_{\text{st}}(k) = \frac{f_c(k) - f_c}{K_r} = \left( k - \frac{N+1}{2} \right) T_r, \quad k=1, 2, \dots, N \quad (10)$$

时移后, 有

$$s_{k,N-k+1}(\hat{t}, t_m; R_B) = \sum_{p=1}^P \sigma_p \text{rect} \left\{ \frac{\hat{t} - 2R(t_m)/c - \left( k - \frac{N+1}{2} \right) T_r}{T_r} \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_c \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ -j2\pi K_r \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \left( \hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \cdot \exp \left\{ j\pi K_r \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right)^2 \right\} \quad (11)$$

时移前后信号的时频关系曲线如图 4 所示, 图中双虚线和三虚线表示时移前的子带信号时频关系, 双实线和三实线表示时移后的子带信号时频关系, 可见经过时移操作后多路子带在距离向上构成的时频关系与全带宽信号时频关系相同, 通过相加操作即可实现频带合成。

信号相加后, 合成的全带宽信号为

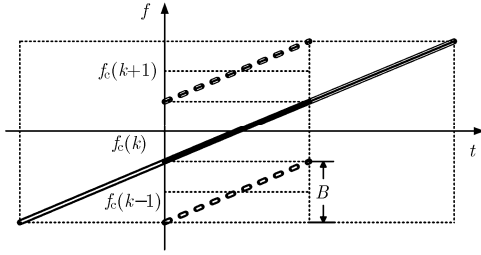


图4 时移前后信号的时频关系曲线

$$\begin{aligned}
 & s(\hat{t}, t_m; R_B) \\
 &= \sum_{k=1}^N s_{k, N-k+1}(\hat{t}, t_m; R_B) \\
 &= \sum_{p=1}^P \sigma_p \text{rect} \left( \frac{\hat{t} - 2R(t_m)/c}{NT_r} \right) \\
 & \quad \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_c \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \\
 & \quad \cdot \exp \left\{ -j2\pi K_r \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \left( \hat{t} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \\
 & \quad \cdot \exp \left\{ -j2\pi f_c \left( \frac{2R(t_m)}{c} - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \quad (12)
 \end{aligned}$$

式(12)即为经过多普勒频移项校正后的常规 LFM CW SAR 回波信号，只是带宽提升为子带信号带宽的  $N$  倍，因此，可以利用现有的成像算法进行成像。本文以频率变标(Frequency Scaling, FS)算法为例<sup>[16]</sup>，进行了仿真验证。基于 LFM CW 体制的分布式微小卫星平台 SAR 高分辨率成像流程如图 5 所示。

### 4 仿真结果

为了验证上文分析的正确性与所提方法的有效性，本节进行了点目标与场景成像仿真。点目标仿真中，共设置 9 个点目标，分别沿距离向与方位向等间隔排列，构成  $3 \times 3$  的矩阵，详细仿真参数如表 1 所示。图 6 为先进行频带合成，再对合成后信号进行多普勒频移项校正的成像结果，由图 6 可见，

由于频带合成后距离向相位不连续，点目标成像结果存在严重的散焦现象，与文中分析结果相吻合。图 7 为多普勒频移项校正后进行频带合成的成像结果，经过距离-多普勒域中的相位补偿后，频带合成时距离向相位连续，合成后的效果与直接发射全带宽信号效果相同，点目标聚焦效果理想。频带合成前后点目标的距离向切片对比如图 8 所示，经过频带合成后，距离向分辨率提高为子带分辨率的 4 倍。各点目标的成像质量指标如表 2 与表 3 所示，可见各项成像质量指标与理论值基本吻合。需要说明的是，图 6 与图 7 中为了同时显示 9 个点目标，并使插值过程中的数据量不至过于庞大，选取了与测绘带中心距离向间隔  $\pm 35$  m，方位向间隔  $\pm 15$  m 的点目标进行显示，其余参数与表 1 中相同。实际上，测绘带边缘处的点目标具有类似的结果。场景仿真中，采用实际系统 SAR 复图像作为后向散射系数，系统参数同表 1，相邻目标间隔为 0.88 m，仿真结果如图 9 所示。其中，图 9(a)为一路子带信号的成像结果，由于子带信号带宽较窄，成像结果分辨率明显降低；图 9(b)为频带合成后全带宽信号的成像结果，可见全带宽信号能够准确恢复出场景的后向散射系数。

### 5 结束语

分布式微小卫星 SAR 能够大幅降低星载 SAR 系统的成本与复杂度，并提高其生存能力与工作灵

表 1 系统仿真参数

中心频率	5.4 GHz
飞行高度	500 km
中心下视角	$50^\circ$
平台速度	7000 m/s
卫星数目	4
子带带宽	37.5 MHz
子带中心频率	(5.34375, 5.38125, 5.41875, 5.45625) GHz
频带合成前距离向理论分辨率	3.5415 m
频带合成后距离向理论分辨率	0.8854 m
距离向测绘带宽度	6 km
采样频率	3.85 MHz
方位向分辨率	1 m
多普勒带宽	6201 Hz
扫频频率	7000 Hz
点目标距离向位置	(774.877, 777.877, 780.877) km
点目标方位向位置	-2000 m, 0 m, 2000 m

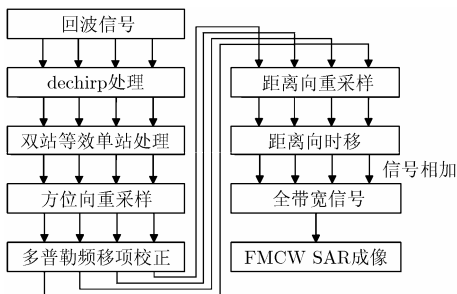


图5 基于 FMCW 体制的分布式微小卫星平台 SAR 高分辨率成像流程

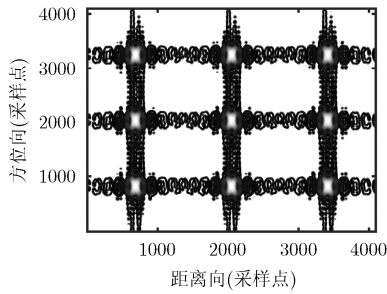


图 6 多普勒频移项校正前进行频带合成的成像结果

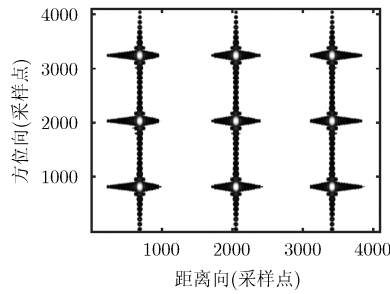


图 7 多普勒频移项校正后进行频带合成的成像结果

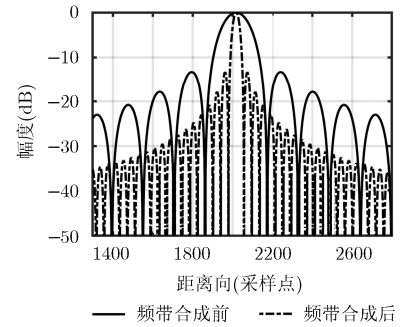
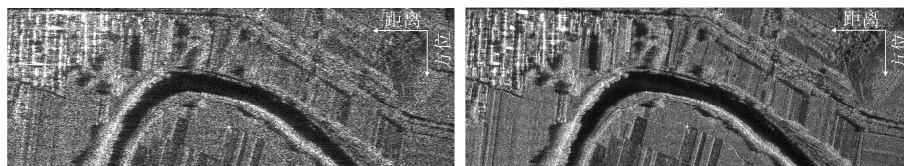


图 8 频带合成前后目标距离向切片对比图



(a)子带信号成像结果

(b)全带宽信号成像结果

图 9 场景仿真结果

表 2 点目标距离向成像质量指标

点目标距离向成像质量	方位向近端	方位向中端	方位向远端
分辨率(m)	0.8848	0.8848	0.8848
近距 峰值旁瓣比(dB)	-13.2548	-13.2548	-13.2548
积分旁瓣比(dB)	-9.8975	-9.8975	-9.8976
分辨率(m)	0.8848	0.8848	0.8848
中距 峰值旁瓣比(dB)	-13.2632	-13.2631	-13.2631
积分旁瓣比(dB)	-9.9016	-9.9016	-9.9016
分辨率(m)	0.8848	0.8848	0.8848
远距 峰值旁瓣比(dB)	-13.2539	-13.2540	-13.2539
积分旁瓣比(dB)	-9.8984	-9.8985	-9.8984

表 3 点目标方位向成像质量指标

点目标方位向成像质量	方位向近端	方位向中端	方位向远端
分辨率(m)	0.9952	0.9952	0.9952
近距 峰值旁瓣比(dB)	-13.2608	-13.2617	-13.2617
积分旁瓣比(dB)	-9.9775	-9.9782	-9.9775
分辨率(m)	0.9952	0.9952	0.9952
中距 峰值旁瓣比(dB)	-13.2612	-13.2620	-13.2615
积分旁瓣比(dB)	-9.9782	-9.9783	-9.9782
分辨率(m)	0.9952	0.9952	0.9952
远距 峰值旁瓣比(dB)	-13.2598	-13.2599	-13.2599
积分旁瓣比(dB)	-9.9782	-9.9782	-9.9782

活性。本文通过理论分析，建立了分布式星载 LFM CW SAR 回波信号模型，并详细推导了将子带信号合成为全带宽信号，进而实现高分辨率 SAR 成像的步骤。该方法将同一频带的收发天线放置于不同卫星上，能够满足长距离应用的需求；同时，利用交叉接收的方法实现了对多路子带信号的频带合成，有效解决了 MIMO 体制下 LFM CW SAR 的正交信号设计问题。点目标与场景成像仿真实验以及成像质量指标分析验证了本文方法的正确性与有效性，为高分辨率 LFM CW SAR 技术在分布式卫星平台上的应用提供了理论支撑。

参考文献

[1] MOREIRA A, PONCE O, NANNINI M, et al. Multi-baseline imaging: A vision for spaceborne SAR[C]. 16th International Radar Symposium, Dresden, Germany, 2015: 20-29. doi: 10.1109/IRS.2015.7226407.

[2] 李晨雷, 刘梅, 赵伯文, 等. 星载分布式 SAR 地面动目标精确聚焦的互谱 MUSIC 法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(8): 1905-1911. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01456.

LI Chenlei, LIU Mei, ZHAO Bowen, et al. Cross spectrum MUSIC method of finely focusing ground moving target on spaceborne distributed SAR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(8): 1905-1911. doi: 10.3724/SP.J.1146.2013.01456.

[3] 李延, 张庆君, 刘亚东, 等. 分布式天基雷达动目标检测性能分析[J]. 航天器工程, 2015, 24(3): 64-68. doi: 10.3969/j.issn.1673-8748.2015.03.011.

- LI Yan, ZHANG Qingjun, LIU Yadong, *et al.* Analysis of moving target indication based on distributed space radar[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(3): 64–68. doi: 10.3969/j.issn.1673-8748.2015.03.011.
- [4] 张奔, 郑坚, 茅宁杰, 等. 分布式卫星 InSAR 系统的 DEM 定位方法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(6): 852–856. doi: 10.14188/j.1671-8844.2015-06-021.
- ZHANG Ben, ZHENG Jian, MAO Ningjie, *et al.* Research on DEM calculation for distributed satellite InSAR system[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2015, 48(6): 852–856. doi: 10.14188/j.1671-8844.2015-06-021.
- [5] 张龙, 苏涛, 刘峥, 等. 分布式小卫星联合多普勒解模糊 SAR 成像[J]. 系统工程与电子技术, 2015, 37(3): 544–552. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.03.11.
- ZHANG Long, SU Tao, LIU Zheng, *et al.* Joint Doppler ambiguity removal SAR imaging algorithm for distributed micro-satellite[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(3): 544–552. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2015.03.11.
- [6] 陈杰, 周荫清, 李春升. 分布式 SAR 小卫星编队轨道设计方法研究[J]. 中国科学(E 辑), 2004, 34(6): 654–662. doi: 10.3321/j.issn:1006-9275.2004.06.005.
- CHEN Jie, ZHOU Yinqing, and LI Chunsheng. Research on orbit design method for the formation flying of distributed small satellites SAR[J]. *Science in China (Series E)*: 2004, 34(6): 654–662. doi: 10.3321/j.issn:1006-9275.2004.06.005.
- [7] 刘悦. FMCW SAR 新体制及信号处理方法研究[D]. [博士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2012: 153–168.
- LIU Yue. Study on FMCW SAR-configurations and signal processing[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 153–168.
- [8] 王颖, 曲长文, 苏峰. FMCW SAR 雷达方程[J]. 雷达科学与技术, 2008, 6(3): 178–181. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2008.03.005.
- WANG Ying, QU Changwen, and SU Feng. Radar equation for FMCW SAR[J]. *Radar Science and Technology*, 2008, 6(3): 178–181. doi: 10.3969/j.issn.1672-2337.2008.03.005.
- [9] AHMED N and UNDERWOOD C. Monostatic CW SAR concept for microsattellites[C]. 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Aachen, Germany, 2010: 1–4.
- [10] LI Y and O'YOUNG S. Focusing bistatic FMCW SAR signal by range migration algorithm based on Fresnel approximation[J]. *Sensors*, 2015, 15(12): 32123–32137. doi: 10.3390/s151229910.
- [11] DE WIT J J M, VAN ROSSUM W L, and DE JONG A J. Orthogonal waveforms for FMCW MIMO radar[C]. IEEE Radar Conference, Kansas City, MO, USA, 2011: 686–691. doi: 10.1109/RADAR.2011.5960625.
- [12] WANG Jie, CHEN Longyong, LIANG Xingdong, *et al.* Multi-input multi-output frequency-modulated continuous wave synthetic aperture radar system using beat-frequency division waveforms[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(7): 74016–74024. doi: 10.1088/0957-0233/24/7/074016.
- [13] 杜传红. 调频连续波 SAR 成像 R-D 及  $\omega-k$  算法研究[D]. [硕士学位论文], 哈尔滨工程大学, 2013: 24–26.
- DU Chuanhong. Research of R-D and  $\omega-k$  algorithm for frequency modulated continuous wave SAR imaging[D]. [Master dissertation], Harbin Engineering University, 2013: 24–26.
- [14] 陈龙永, 梁兴东, 丁赤飏. 基于交叉接收的空时频编码高分辨率 SAR 处理方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(7): 1668–1673. doi: 10.3724/SP.J.1146.2008.01541.
- CHEN Longyong, LIANG Xingdong, and DING Chibiao. A high resolution SAR processing method based on crossed receiving space-time-frequency coding[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(7): 1668–1673. doi: 10.3724/SP.J.1146.2008.01541.
- [15] BELLETTINI A and PINTO M A. Theoretical accuracy of synthetic aperture sonar micronavigation using a displaced phase-center antenna[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(4): 780–789. doi: 10.1109/JOE.2002.805096.
- [16] 梁毅, 王虹现, 邢孟道, 等. 调频连续波 SAR 信号分析与成像研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1017–1021. doi: 10.3724/SP.J.1146.2007.00578.
- LIANG Yi, WANG Hongxian, XING Mengdao, *et al.* The analysis of FMCW SAR signal and image study[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1017–1021. doi: 10.3724/SP.J.1146.2007.00578.
- 李 堃: 男, 1989 年生, 博士生, 研究方向为微波成像新概念、新体制、新技术.
- 梁兴东: 男, 1973 年生, 研究员, 研究方向为高分辨率合成孔径雷达系统、干涉合成孔径雷达系统、成像处理及应用、实时数字信号处理.
- 陈龙永: 男, 1979 年生, 副研究员, 研究方向为高分辨率合成孔径雷达系统、干涉合成孔径雷达系统.
- 王 杰: 男, 1986 年生, 博士后, 研究领域为微波成像新概念、新体制、新技术.
- 吴一戎: 男, 1963 年生, 研究员, 中国科学院院士, 主要研究方向为高分辨率合成孔径雷达及运动补偿技术、SAR 信号处理算法研究、遥感卫星地面处理与应用系统的体系结构、数据处理算法等.