

基于方位向多通道的星载 SAR Mosaic 模式研究

禹卫东^① 熊名男*^{①②} 田雨润^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100039)

摘 要: Mosaic 模式是聚束和 ScanSAR 的混合模式,能同时实现高分辨率和大场景成像。该文提出一种基于方位向多通道的 Mosaic 模式,将成像场景沿距离向和方位向划分为若干子成像块,各块采用滑动聚束模式独立成像后再进行 2 维拼接。利用短发射子孔径使系统扫描角显著减小,进而降低系统设计难度,同时也使各子成像块距离徙动量减小;方位向多通道接收能提高系统信噪比,利用空间采样降低脉冲重复频率,更有利于波位选择。

关键词: 合成孔径雷达; Mosaic 模式; 方位向多通道; 脉冲重复频率

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)12-2994-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.02031

Study on Space-borne SAR Mosaic Mode Based on Azimuth Multichannel

Yu Wei-dong^① Xiong Ming-nan^{①②} Tian Yu-run^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The Mosaic mode is a hybrid mode of spotlight and ScanSAR, which can obtain SAR images with a large coverage and a high resolution. In this paper, a new Mosaic mode is proposed. The image scene is divided into several sub imaging blocks along the range and azimuth direction. Each block is imaged by sliding spotlight and then pieced together. Short transmit sub-aperture makes the scanning angle decrease significantly, which reduces the difficulty of system design. It also makes the range migration of each block smaller. Azimuth multichannel is helpful to improve the system Signal to Noise Ratio (SNR). PRF (Pulse Repetition Frequency) can be reduced by space sampling, which is constructive to select the proper PRF in the timing diagram.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Mosaic mode; Azimuth multichannel; Pulse Repetition Frequency (PRF)

1 引言

合成孔径雷达(SAR)能够全天候、全天时地对地进行大面积成像,广泛应用于资源勘探、地面和海洋交通监测等重要领域^[1]。受天线最小面积限制,SAR 的分辨率和成像范围无法同时提高^[2]。聚束和滑动聚束模式通过控制波束指向实现高分辨率,但会失去方位向连续成像的能力^[3]。ScanSAR 和 TOPSAR 通过波束在距离向的切换实现大场景覆盖,但会牺牲图像分辨率^[4,5]。

Mosaic 模式是聚束和 ScanSAR 的混合模式,已成功应用于 TECSAR 卫星,在 25 km×25 km 的范围内实现 1.8 m 的分辨率^[6,7]。TECSAR Mosaic 模式通过方位向波束正向扫描提高方位向分辨率,距离向波束在不同的子测绘带之间循环切换增大测绘带宽度。但是 TECSAR Mosaic 模式存在两点不

足:首先,与 ScanSAR 类似,不连续的成像方式会导致“扇贝效应”^[8,9];其次,为了图像的连续性,Burst 图像的方位向长度都必须小于一个波束地面足印长度,当成像场景较大和方位向分辨率要求较高时会导致大量的 Burst 图像拼接,严重降低成像效率。针对上述不足,本文提出一种基于方位向多通道的星载 SAR Mosaic 模式。接下来详细讨论该模式的原理,实现方法以及成像处理方法。

2 Mosaic 模式原理与实现方法

图 1 为 Mosaic 模式原理示意图,将成像场景沿距离向和方位向划分为若干子成像块,SAR 行进过程中依次对各子成像块进行滑动聚束模式成像,最后再将各块成像结果进行 2 维拼接得到整个场景图像。各子成像块的方位向长度可以远大于波束地面足印长度,因此能够避免大量的图像拼接从而提高成像效率。此外,由于各子成像块内采用滑动聚束模式,目标被完整的天线方向图加权,能够有效避

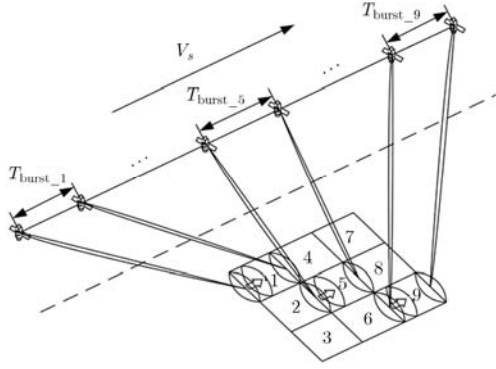


图 1 Mosaic 模式原理示意图

免“扇贝效应”。利用方位向短发射子孔径能使系统扫描角显著减小，进而降低系统设计难度，同时也使子成像块距离徙动量减小；方位向多通道接收有助于提高系统信噪比，利用空间采样降低 PRF，更有利于波位选择。

根据沿距离向和方位向分块数的奇偶性，图 2 给出 4 种可能的 Mosaic 分块结构。其中阴影块对应中间子成像块，其余对应非中间子成像块。子成像块参数设计需从阴影块开始，逐渐向边缘递推直至完成所有子成像块的参数设计。下面分两小节讨论中间子成像块和非中间子成像块的参数设计方法。

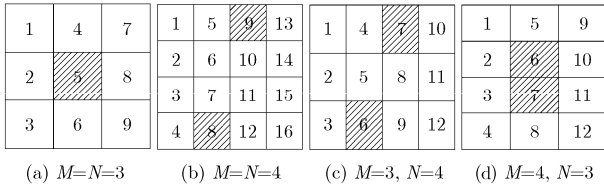


图 2 Mosaic 分块结构示意图

2.1 中间子成像块

根据中间子成像块的个数和位置分布，可分为 3 种情况：(1) MN 为奇数，如图 2(a)；(2) MN 为偶数，位于不同方位列，如图 2(b), 2(c)；(3) MN 为偶数，位于相同方位列，如图 2(d)。下面重点分析第 1 种情况下的子块参数设计方法，其余情况可类似进行，在此不一一赘述。

如图 2(a)所示，第 $n = (MN + 1)/2$ 块为中间子成像块。根据 Mosaic 模式的对称性，该块的中心斜视角 θ_{c_n} 为零。

$$\theta_{c_n} = 0, \quad n = (MN + 1)/2 \quad (1)$$

子成像块的中心斜视角 θ_{c_n} 是该块成像中间时刻波束中心所对应的斜视角。方位向中心点目标的多普勒调频率为^[10]

$$K_{a_n} = (2V_{r_n}^2 \cos^3 \theta_{c_n}) / (\lambda R_{0_n}), \quad n = (MN + 1)/2 \quad (2)$$

式中 V_{r_n} 表示第 n 子成像块的等效速度， R_{0_n} 分别表示第 n 子成像块的最近斜距， λ 为载波波长。根据脉冲压缩原理和与成像几何，可得波束地面行进速度 V_{f_n} 为

$$V_{f_n} = \frac{2\rho_a V_{r_n} \cos(\theta_{c_n})}{L_a}, \quad n = \frac{MN + 1}{2} \quad (3)$$

式中 L_a 为 SAR 发射子孔径长度， ρ_a 为方位向分辨率。进一步可得子成像块的成像时间 T_{burst_n} 为

$$T_{burst_n} = \frac{W_a + \lambda R_{0_n} / (L_a \cos^2 \theta_{c_n})}{V_{f_n}}, \quad n = (MN + 1)/2 \quad (4)$$

式中 W_a 为子成像块方位向长度。根据成像时间 T_{burst_n} 和子成像块的方位向长度 W_a ，并考虑到边缘点的完全分辨率，可得起始扫描角 θ_{start_n} 和终止扫描角 θ_{end_n} ：

$$\theta_{start_n} = \tan^{-1} \left(\frac{-W_a/2 + V_{r_n} T_{burst_n}/2}{R_{0_n}} \right) - 0.886 \frac{\lambda}{2L_a}, \quad n = \frac{MN + 1}{2} \quad (5)$$

$$\theta_{end_n} = \tan^{-1} \left(\frac{W_a/2 - V_{r_n} T_{burst_n}/2}{R_{0_n}} \right) + 0.886 \frac{\lambda}{2L_a}, \quad n = \frac{MN + 1}{2} \quad (6)$$

最后可得波束旋转角速度 k_{w_n} 为

$$k_{w_n} = \frac{\theta_{end_n} - \theta_{start_n}}{T_{burst_n}}, \quad n = \frac{MN + 1}{2} \quad (7)$$

2.2 非中间子成像块

非中间子成像块按其成像时间可以分为两类：成像时间在中间子成像块成像时间之前和之后。根据中间子成像块的系统参数和成像场景几何，向前递推直至第 $n = 1$ 块即可完成第 1 类子成像块的参数设计。同理，向后递推直至第 $n = MN$ 子成像块即可完成第 2 类子成像块的参数设计。

至此便完成所有子成像块的参数设计，包括各个子成像块的起始扫描角 θ_{start_n} ，中心斜视角 θ_{c_n} ，终止扫描角 θ_{end_n} ，波束旋转角速度 k_{w_n} 和成像时间 T_{burst_n} 。

3 成像处理方法

对于某些子成像块而言会使系统脉冲重复频率 (PRF) 偏离理想 PRF，从而导致方位向非均匀采样，本节提出一种基于方位向多通道的滑动聚束模式信

号重建算法。传统条带模式的多通道重建算法将各通道数据经过重构滤波器后直接叠加,使等效 PRF 稍大于场景的多普勒带宽^[11,12]。而滑动聚束模式的波束主动扫描导致其场景多普勒带宽远大于瞬时多普勒带宽,若直接采用条带模式的重建算法会出现频谱混叠^[13]。因此在重建算法之前必须进行 Deramping 操作,使场景多普勒带宽压缩至瞬时多普勒带宽,最后再经过频域补零和 Ramping 操作恢复出原始回波频谱^[14]。

图 3 为某一成像块的斜视几何, θ_{a_c} 为该块的中心斜视角, $t_a = 0$ 对应中心斜视角时刻。O 为场景内任一点目标,在 $t_{a_c_o}$ 时刻,波束中心扫描至点目标 O 且斜视角为 $\theta_{a_c_o}$,图 3 中虚线表示波束中心指向,两侧实线对应其波束宽度。 $t_{a_c_o}$ 时刻 SAR 与点目标 O 的距离 R_{c_o} 为

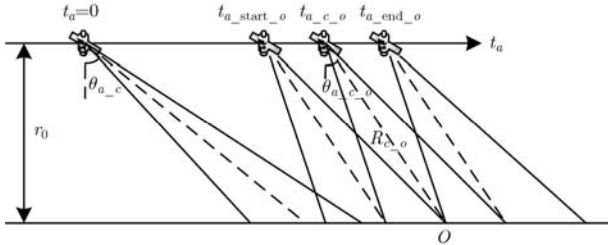


图 3 成像场景斜视几何关系示意图

$$R_{c_o} = \frac{r_0}{\cos \theta_{a_c_o}} \quad (8)$$

$$\theta_{a_c_o} = \theta_{a_c} + k_w t_{a_o} \quad (9)$$

其中, r_0 为最短斜距。根据余弦定理,在 $t_{a_start_o}$ 到 $t_{a_end_o}$ 内,点目标 O 与 SAR 发射/接收子孔径的相位中心的距离为

$$\begin{aligned} R_{tx}(t) &= \left(R_{c_o}^2 + V_r^2 (t - t_{a_c_o})^2 \right. \\ &\quad \left. - 2V_r (t - t_{a_c_o}) R_{c_o} \sin \theta_{a_c_o} \right)^{1/2} \\ &\approx R_{c_o} + \frac{V_r^2 (t - t_{a_c_o})^2}{2R_{c_o}} \\ &\quad - V_r (t - t_{a_c_o}) \sin \theta_{a_c_o} \quad (10) \end{aligned}$$

同理, O 到 SAR 第 j 接收子孔径相位中心的距离为

$$\begin{aligned} R_{rx_j}(t) &\approx R_{c_o} + \frac{[V_r (t - t_{a_c_o}) - \Delta x_j]^2}{2R_{c_o}} \\ &\quad - [V_r (t - t_{a_c_o}) - \Delta x_j] \sin \theta_{a_c_o} \quad (11) \end{aligned}$$

其中, Δx_j 为第 j 接收子孔径相位中心与发射/接收子孔径相位中心的相对距离。进一步可得第 j 接收子孔径的方位向信号为

$$\begin{aligned} s_j(t) &\approx \exp \left[-j \frac{2\pi}{\lambda} [R_{tx}(t) + R_{rx_j}(t)] \right] \\ &= \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_{c_o} \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[-j \frac{2\pi V_r^2 (t - \Delta x_j / (2V_r) - t_{a_c_o})^2}{\lambda R_{c_o}} \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[j \frac{4\pi V_r (t - \Delta x_j / (2V_r) - t_{a_c_o}) \sin \theta_{a_c_o}}{\lambda} \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[-j \frac{\pi \Delta x_j^2}{2\lambda R_{c_o}} \right] \quad (12) \end{aligned}$$

由于波束的主动扫描,波束中心所对应的多普勒频率为

$$\begin{aligned} f_{dc}(t) &= \frac{2V_r}{\lambda} \sin(\theta_{a_c} + k_w t) \approx \frac{2V_r}{\lambda} \sin \theta_{a_c} \\ &\quad + \frac{2V_r k_w \cos \theta_{a_c}}{\lambda} t = f_{nc} + k_{rot} t \quad (13) \end{aligned}$$

其中, f_{nc} 为中心斜视角时刻波束中心所对应的多普勒频率, k_{rot} 为多普勒中心频率的调频率。Deramping 操作作用于消除多普勒中心随时间的变化,故需在各通道方位时域乘上以下因子:

$$\begin{aligned} s_{ref_j}(t) &= \exp \left[-j 2\pi f_{nc} \left(t - \frac{\Delta x_j}{2V_r} \right) \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[-j \pi k_{rot} \left(t - \frac{\Delta x_j}{2V_r} \right)^2 \right] \quad (14) \end{aligned}$$

经过 Deramping 操作后,各通道方位向信号为

$$s_{deramp_j}(t) = s_{deramp} \left(t - \frac{\Delta x_j}{2V_r} \right) \exp \left[-j \frac{\pi \Delta x_j^2}{2\lambda R_{c_o}} \right] \quad (15)$$

其中, $s_{deramp}(t)$ 为发射/接收子孔径经过 Deramping 操作后的方位向信号。对式(15)两边进行傅里叶变换,可得第 j 通道相对于发射/接收子孔径的传递函数。

$$H_j(f_a) = \exp \left[-j 2\pi f_a \frac{\Delta x_j}{2V_r} \right] \exp \left[-j \frac{\pi \Delta x_j^2}{2\lambda R_{c_o}} \right] \quad (16)$$

其中, f_a 为方位向频率,根据重构滤波器理论,经过 Deramping 操作之后的多通道滑动聚束系统可以用矩阵 $\mathbf{H}(f_a)$ 表示。

$\mathbf{H}(f_a)$

$$\mathbf{H}(f_a) = \begin{bmatrix} H_1(f_a) & \cdots & H_N(f_a) \\ H_1(f_a + \text{PRF}) & \cdots & H_N(f_a + \text{PRF}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ H_1(f_a + (N-1)\text{PRF}) & \cdots & H_N(f_a + (N-1)\text{PRF}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, N 为通道个数, $f_a \in \left[-\frac{N}{2} \text{PRF}, \right.$

$-\frac{(N-2)}{2}\text{PRF}$)。重构滤波器可以通过对 $\mathbf{H}(f_a)$ 求逆得到。

$$\mathbf{P}(f_a) = \mathbf{H}^{-1}(f_a) = [\mathbf{P}_1(f_a); \mathbf{P}_2(f_a); \dots; \mathbf{P}_N(f_a)]^T \quad (18)$$

其中, $\mathbf{P}_j(f_a)$ 表示第 j 通道的重构滤波器, 经过重构滤波器后重建的方位向信号表达式为

$$\begin{aligned} s_{\text{recon}}(t) = & \exp\left[-j\frac{4\pi R_{c-o}}{\lambda}\right] \exp\left[-j\frac{2\pi V_r^2(t-t_{a-c-o})^2}{\lambda R_{c-o}}\right] \\ & \cdot \exp\left[j\frac{4\pi V_r(t-t_{a-c-o})\sin\theta_{a-c-o}}{\lambda}\right] \\ & \cdot \exp[-j2\pi f_{\text{nc}}t] \exp[-j\pi k_{\text{rot}}t^2] \end{aligned} \quad (19)$$

式 (19) 并非点目标 O 的真实频谱, 而是 Deramping 操作后压缩至瞬时多普勒带宽内的频谱。成像算法之前需恢复真实频谱, 然而真实频谱的带宽远大于瞬时多普勒带宽, 可通过在频域补零以减小时域采样间隔, 使其能够无混叠地表示真实回波信号。最后在方位时域乘上 Ramping 因子, 来抵消 Deramping 操作的作用。

$$s_{\text{ramping}}(t) = \exp(j2\pi f_{\text{nc}}t) \exp(j\pi k_{\text{rot}}t^2) \quad (20)$$

经过频域补零和 Ramping 操作之后, 可得无混叠的场景回波时域信号为

$$\begin{aligned} s_{\text{out}}(t) = & \exp\left[-j\frac{4\pi R_{c-o}}{\lambda}\right] \exp\left[-j\frac{2\pi V_r^2(t-t_{a-c-o})^2}{\lambda R_{c-o}}\right] \\ & \cdot \exp\left[j\frac{4\pi V_r(t-t_{a-c-o})\sin\theta_{a-c-o}}{\lambda}\right] \end{aligned} \quad (21)$$

图 4 给出了多通道 Mosaic 模式子成像块的信号处理流程图。

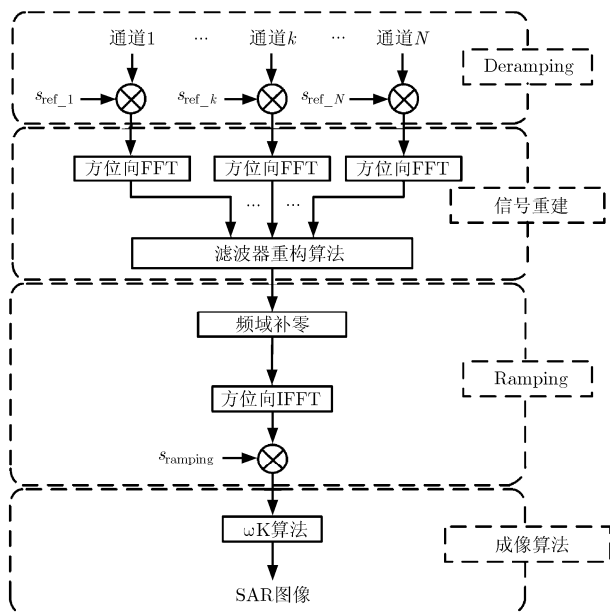


图 4 多通道信号处理流程图

4 分析与仿真

本节设计一个 X 波段的 Mosaic 模式 SAR 系统, 轨道平均高度为 675 km, 需要在 $80 \text{ km} \times 80 \text{ km}$ 范围内实现 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的分辨率, 设计需求参数如表 1 所示。

表 1 需求参数表

参数	数值
载波波长(m)	0.0311
轨道平均高度(km)	675
成像场景大小(km)	80(range) \times 80(azimuth)
分辨率(m)	1(range) \times 1(azimuth)
AASR(dB)	≤ -20
RASR(dB)	≤ -20
NESZ(dB)	≤ -20

4.1 系统设计

首先由覆盖范围要求, 将成像场景分为 9 个子成像块, 如图 1 所示。各个子成像块的大小为 28 km (距离向) \times 28.5 km (方位向)。方位向上相邻各块之间有 2.75 km 的重叠区域便于图像拼接, 重叠度为 9.6%; 距离向上相邻各块之间有 2 km 的重叠区, 重叠度为 7.1%。方位向采用 1 发 5 收, 其中中间通道为发射/接收子孔径, 其长度 L_a 为 4 m , 各接收子孔径的相位中心间距 d_{az} 为 3.33 m , 方位向相邻子天线间的重叠部分长度 w 为 0.7 m , 系统方位向过采样率 μ 为 1.2, 方位向天线总长度为 17.3 m 。具体的天线方位向尺寸如图 5 所示。

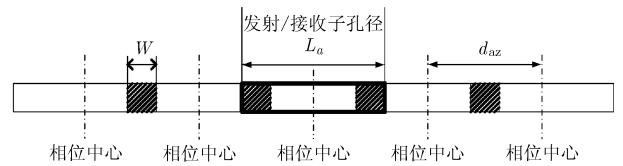


图 5 方位向天线示意图

为得到方位向均匀采样数据, 系统 PRF 需要工作在理想 PRF 附近。

$$\text{PRF}_{\text{uni}} = \frac{2V_s\mu}{NL_a} = 902.5 \text{ Hz} \quad (22)$$

为了使回波多普勒频谱不混叠, 系统等效 PRF 需大于系统瞬时多普勒带宽, 故系统的 PRF 需满足:

$$\text{PRF} > \frac{4V_r}{N\lambda} \sin\left(\frac{0.886\lambda}{2L_a}\right) = 666 \text{ Hz} \quad (23)$$

图 6 为 PRF 选取结果, 其中回波散布范围用竖直黑色线段表示, 数字代表子成像块编号, 星载 SAR

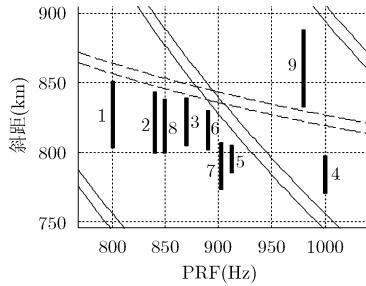


图 6 系统设计斑马图

数据的接收时间需要回避发射信号干扰(实线)和星下点回波干扰(虚线)。9 个子成像块所选择的 PRF 都能满足式(22)和式(23)的要求。详细的波位信息见表 2, 完整的系统设计参数见表 3。

在以上实例的分辨率要求、Mosaic 分块结构和 SAR 轨道参数基础上, 若使用传统的单通道 SAR 则会选不到合适的波位。当天线方位向长度较短时, 例如选取 $L_a = 6$ m 时, 瞬时多普勒带宽为 2500 Hz,

表 2 波位及相应参数表

成像块	PRF(Hz)	成像时间(s)	波束扫描速度(°/s)	起始扫描角(°)	中心斜视角(°)	结束扫描角(°)
1	800	11.58	-0.2507	21.5429	20.0914	18.6399
2	840	11.14	-0.2470	15.7471	14.3707	12.9943
3	870	10.90	-0.2537	10.1264	8.7451	7.3637
4	1000	10.71	-0.2578	6.9933	5.6119	4.2305
5	912	10.68	-0.2626	1.4027	0	-1.4027
6	890	10.78	-0.2469	-4.0754	-5.4067	-6.7380
7	902	10.82	-0.2653	-7.6840	-9.1204	-10.5569
8	850	11.14	-0.2452	-13.0093	-14.3757	-15.7421
9	980	11.60	-0.2426	-17.9543	-19.3607	-20.7671

表 3 系统设计参数表

载波波长(m)	0.0311
轨道平均高度(km)	675
下视角(°)	30
卫星速度(m/s)	7521.4
发射信号带宽(MHz)	275
系统噪声温度(K)	300
系统损耗(dB)	4
天线效率(%)	70
峰值发射功率(W)	40000
脉冲宽度(μs)	40
发射/接收天线长度(m)	4
子孔径相位中心间距(m)	3.33
通道个数	5
方位向过采样	1.2
天线单元个数	200
天线总长度(m)	17.3
天线高度(m)	1
PRF 变化范围(Hz)	800~1000
最大方位向扫描角(°)	21.54
成像场景大小(km)	80(range)×80(azimuth)
子成像块大小(km)	28(range)×28.5(azimuth)
分辨率(m)	1(range)×1(azimuth)
最差 AASR(dB)	-24.6
最差 RASR(dB)	-43.1
最差 NESZ(dB)	-22.8

计算可得边缘子成像块回波距离跨度约为 90 km, 而 PRI 需小于 $400 \mu\text{s}$, 故回波窗口无法容纳完整回波; 当天线方位向长度较长时, 例如选取 $L_a = 10$ m 时, 瞬时多普勒带宽为 1500 Hz, 计算可得边缘子成像块斜视角达到近 50° , 系统设计难度太大, 同时大斜视角导致这两个子成像块回波距离跨度达到 200 km, 回波窗口也无法容纳完整回波。传统单通道模式中方位向分辨率和成像场景大小之间的矛盾导致其无法同时满足高分辨率和大成像场景, 故引入方位向多通道技术用于实现本文提出的 Mosaic 模式。

4.2 性能分析

成像过程中, 波束扫描导致地面各点目标经历不同的天线方向图, 从而导致性能参数沿方位向起伏, 性能参数不能按照传统条带模式的方法进行计算^[15]。NESZ 需要考虑方位向损耗因子和多通道处理中的 SNR 因子 ϕ_{bf} ^[16], AASR 需要考虑 Deramping 操作对频谱的压缩以及多通道重构滤波器对模糊信号能量的影响^[17], RASR 与传统条带模式一样进行计算。

图 7 为第 4 子成像块的性能指标仿真结果图, 图 7(a)为 AASR 随方位向位置的分布图, 图 7(b)为 RASR 随下视角的分布图, 图 7(c)为 NESZ 的 2 维分布图。对剩余 8 个子成像块进行仿真分析, 可得整个成像场景内的最差 AASR 为 -24.6 dB, 最差

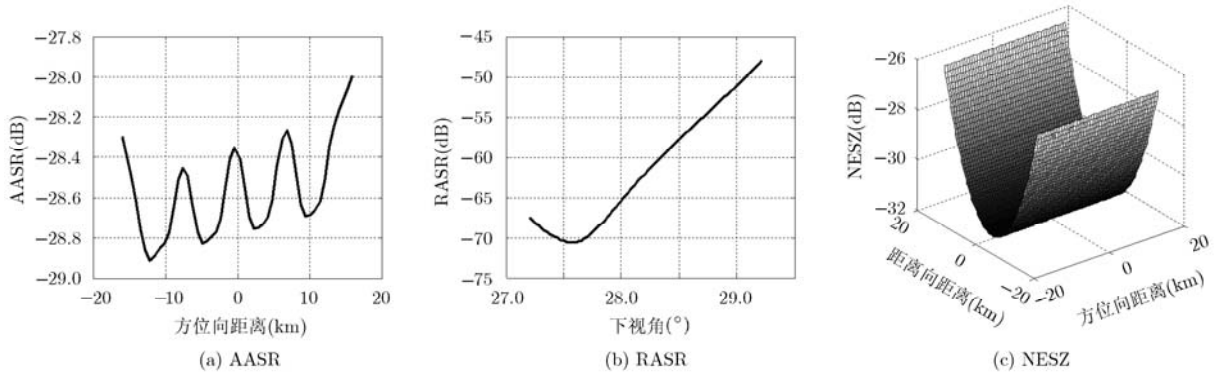


图 7 第 4 子成像块性能参数示意图

RASR 为-43.1 dB，最差 NESZ 为-22.8 dB，能满足大多数 SAR 应用，也验证了本文提出的 Mosaic 模式的有效性。

4.3 成像处理

本小节对第 4 子成像块场景中心点目标进行成像仿真验证，图 8(a)为 Deramping 操作后多通道重建的距离多普勒域，信号频谱压缩至等效 PRF 内，图 8(b)为点目标真实 2 维频域，图 8(c)为经过 ωK 算法后点目标的升采样结果，图 8(d)和图 8(e)为点目标的距离向和方位向升采样结果。经分析，点目标距离向分辨率为 1.02 m，方位向分辨率为 1.01 m，PSLR 为-13.26 dB，ISLR 为-9.8 dB，和理论值十分接近，验证了第 3 节所提算法的有效性。

5 结束语

本文提出了一种基于方位向多通道的 Mosaic 模式，将成像场景沿距离向和方位向划分为若干子成像块，每个子成像块采用滑动聚束成像方式，各块独立成像后再进行 2 维拼接。并对其原理与实现方法，成像处理方法进行了深入详细的讨论，最后通过一个设计实例验证了该模式的可行性。文中成像算法的研究是基于理想的双曲模型，未考虑卫星轨道弯曲的影响，性能参数计算时没有考虑到信噪比标定因子、多通道的幅相一致性等因素，同时各子成像块独立成像后需要精确的 2 维拼接，这些是进一步研究的方向。

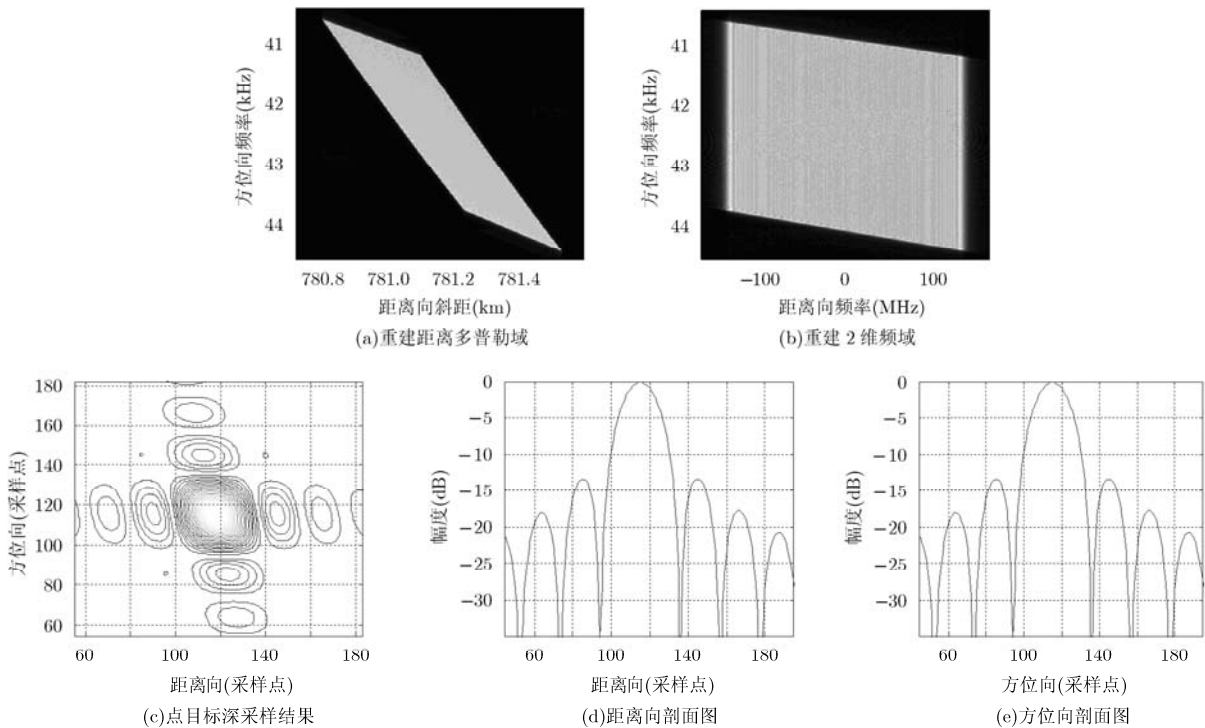


图 8 点目标多通道重建示意图

参 考 文 献

- [1] Wiley W A. Synthetic aperture radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, 1995, 21(3): 440-443.
- [2] Freeman A, Johnson W, Huneycutt B, *et al.* The myth of the minimum SAR antenna area constraint[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(1): 320-324.
- [3] An D X, Huang X T, Jin T, *et al.* Extended two-step focusing approach for squinted spotlight SAR imaging[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(7): 2889-2900.
- [4] Francesco D Z and Andrea M G. TOPSAR: terrain observation by progressive scans[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(9): 2352-2360.
- [5] Chen Q, Huang H F, He F, *et al.* Using TOPSAR for district observation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(2): 406-410.
- [6] Ury Naftaly and Ronit Levy-Nashansohn. Overview of the TECSAR satellite hardware and mosaic mode[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 423-426.
- [7] Ury Naftaly and Ori Oron. TECSAR: TECSAR-program status[C]. 2013 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronics Systems(COMCAS), Tel Aviv, Israel, 2013: 1-4.
- [8] 韩晓磊, 李世强. 基于敏捷卫星平台的星载 SAR Mosaic 模式研究[J]. *宇航学报*, 2013, 34(7): 971-979.
Han Xiao-lei and Li Shi-qiang. A study on space-borne SAR Mosaic mode for an agile satellite[J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(7): 971-979.
- [9] 刘光炎, 孟喆. 合成孔径雷达 Mosaic 模式系统性能分析研究[J]. *微波学报*, 2011, 27(3): 88-92.
Liu Guangyan and Meng Zhe. Performance analysis of Mosaic mode for SAR system[J]. *Journal of Microwaves*, 2011, 27(3): 88-92.
- [10] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Norwood, MA: Artech House, 2005: 95-105.
- [11] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 260-264.
- [12] Delphine Cerutti-Maori and Ishuwa Sikaneta. A generalization of DPCA processing for multichannel SAR/GMTI radars[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(1): 560-572.
- [13] Gao Can-guan, Wang R, Deng Yun-kai, *et al.* Large-scene sliding spotlight SAR using multiple channels in azimuth[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(5): 1006-1010.
- [14] Xu Wei, Huang Ping-ping, Wang R, *et al.* Processing of multichannel sliding spotlight and TOPS synthetic aperture radar data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(8): 4417-4429.
- [15] Han Xiao-dong, Xu Wei, and Han Xiao-lei. Performance analysis of azimuth electronic beam steering mode spaceborne SAR[J]. *Journal of Electronics (China)*, 2013, 30(3): 213-221.
- [16] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Multichannel azimuth processing in ScanSAR and TOPS mode operation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2994-3008.
- [17] Chen Q, Deng Y K, Wang R, *et al.* Investigation of multichannel sliding spotlight SAR for ultrahigh resolution and wide-swath imaging[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(6): 1339-1343.
- 禹卫东: 男, 1969 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达系统设计及信号处理。
- 熊名男: 男, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为星载高 SAR 新体制设计与信号处理。
- 田雨润: 男, 1988 年生, 硕士生, 研究方向为地球同步轨道 SAR。