

周期性非均匀采样实现星载 SAR 高分辨宽测绘带成像

吴玉峰* 孙光才 杨军 邢孟道 周峰
(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

摘要: 针对单通道星载 SAR 系统高分辨与宽测绘带之间的矛盾, 该文提出了一种周期性非均匀采样的解决方法。该方法利用非均匀的方位采样, 避开距离盲区的重叠, 使得相同距离单元的盲区最多出现在一个采样通道内; 然后利用方位采样的周期性, 构造出等效的多通道数据, 通过多通道解模糊的方法实现方位信号频谱恢复。文中还详细分析了非均匀采样的优化设计方法。最后仿真实验验证了该文方法的有效性。

关键词: 星载合成孔径雷达; 高分辨宽测绘带; 周期性非均匀采样; 解模糊; 单通道

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)02-0279-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00498

High-resolution Wide-swath Imaging for Spaceborne SAR Based on Periodic Non-uniform Sampling

Wu Yu-feng Sun Guang-cai Yang Jun Xing Meng-dao Zhou Feng
(National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In order to solve the contradiction between high-resolution and wide-swath for the spaceborne single-channel SAR system, this paper proposes a new method based on periodic non-uniform sampling. The method uses the non-uniform sampling to avoid the overlap of blind ranges, making the blind from the same range unit appears in one sampling channel mostly; The method uses the periodic sampling to construct the equivalent multi-channel data, and uses the multi-channel unambiguous reconstruction method to reconstruct the signal's spectrum. The paper also analyzes the optimal design of non-uniform sampling method in detail. Finally, simulation results verify the effectiveness of the method.

Key words: Spaceborne SAR; High-resolution wide-swath; Periodic non-uniform sampling; Ambiguity reduction; Single-channel

1 引言

相对机载SAR而言, 星载SAR要提供全球覆盖的观测区域, 为了缩短对场景的再访时间以及获得场景的细节特征, 对地面进行高分辨宽测绘带的成像显得尤为重要。星载SAR由于受最小天线面积的限制^[1], 高分辨与宽测绘带构成一对矛盾, 现有的不同SAR成像模式仅在某一方面取其所长。采用聚束模式和发射宽频带信号可以获得方位和距离高分辨率, 但是其观测带不连续; ScanSAR利用不同脉冲时间控制波束指向照射不同子测绘带以此获得超宽地面观测带, 然而它是以牺牲方位分辨率为代价的; 条带SAR则在两者之间折中只能得到中等的分辨率和测绘带宽度。

为了解决高分辨与宽测绘带之间的矛盾, 国内外学者提出了很多方法。文献[2]提出高 PRF 采样回波信号, 利用距离维多个子孔径进行波束形成解距离模糊, 然而该方法得到的宽测绘带存在盲区。文献[3]利用低 PRF 采样, 方位向多个子孔径满足偏置相位中心(DPC)条件实现高分辨宽测绘带成像, 然而其工作条件要求苛刻, 条件不满足时系统性能损失严重。在 DPC 条件不满足的情况下, 文献[4]通过空域滤波方法解多普勒模糊实现高分辨宽测绘带成像。文献[5-7]考虑了宽测绘带回波信噪比问题, 通过多维波形编码及数字波束形成技术控制各子测绘带子脉冲的时间宽度和带宽, 从而得到灵活的能量分配和多距离分辨的特性。文献[8-10]利用频域子频带合成提高距离向分辨率, 并通过方位多波束实现宽测绘带成像。以上方法都是基于多通道的高分辨宽测绘带成像方法。然而, 多通道 SAR 系统本身面临着一些问题: (1)系统复杂度, 多通道 SAR 系

2011-05-25 收到, 2011-10-19 改回

国家科学基金重大项目(60890072)和国家 973 计划项目(2010CB731903)资助课题

*通信作者: 吴玉峰 wyf1176@163.com

统通过 Q 个通道最多可解 Q 次模糊, 当模糊数增加时就需要更多的天线通道, 这将大大增加系统的复杂度; (2) 通道间距, 常规多通道 SAR 系统若采用分布式小卫星则其间距是不可控的, 即使采用精确的测量技术其误差也不容忽略, 若采用天线阵列则其天线系统将显得很复杂, 实现较难; (3) 通道一致性, 由于模拟器件及其电路的种种原因导致各个通道频率响应特性不一致, 需要进行额外的通道均衡方法来抑制其不利影响。

相对多通道 SAR 系统而言, 单通道 SAR 系统就不存在这些问题, 但是目前对星载单通道高分辨宽测绘带成像方法的研究还比较少。文献[11]论述了一种基于多调制方式的宽测绘带方法, 但其数据处理复杂且未考虑方位模糊的问题。文献[12]通过连续变化的 PRF 使距离盲区出现在不同的距离单元内, 实现单通道宽测绘带成像, 然而其方位分辨率受限并且也未考虑方位模糊的问题。

本文提出了一种利用方位周期性非均匀采样实现单通道高分辨宽测绘带成像的方法。通过非均匀采样序列的优化设计, 避开距离盲区重叠的现象, 使得相同距离单元的盲区最多出现在一个采样通道内; 然后利用方位采样的周期性, 构造出等效的多通道数据, 利用多通道解模糊的方法实现方位频谱恢复。文章的结构如下: 第 2 节简要分析星载 SAR 的信号模型以及采用单通道实现高分辨宽测绘带成像时存在的问题; 第 3 节针对上述问题给出解决方法; 第 4 节详细论述非均匀采样序列的优化设计方法, 并给出信号的处理流程; 第 5 节给出仿真结果, 验证本文方法的可行性; 第 6 节对全文进行了总结。

2 信号分析

如图 1 所示为星载 SAR 工作几何示意图, 卫星平台到场景中心的距离为 R_s , 平台等效速度为 V ,

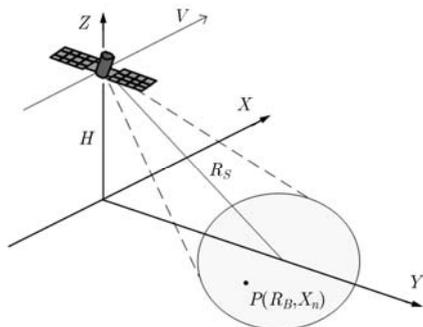


图 1 星载 SAR 工作几何关系

高度为 H , 以平台运动方向为 X 轴建立如图所示的坐标系。星载平台收发不在同一位置, 可以利用等效相位中心原理表示雷达的采样位置。

假设雷达采用脉冲体制, 斜距平面内存在任意点目标 $P(R_B, X_n)$, R_B 为目标到雷达航迹的最近距离, X_n 为方位位置。则雷达接收到的回波信号经脉冲压缩后在距离频域可以表示为

$$S(f_r, t_m) = \text{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) R(t_m; R_B)\right) \quad (1)$$

其中 f_r 为距离频率, B 为发射信号带宽, c 为光速, f_c 为雷达载频, t_m 为方位慢时间, $R(t_m; R_B)$ 为点目标 P 到雷达的瞬时斜距, $\text{rect}(f_r/B)$ 为发射信号在频域的窗函数表示形式。本文的重点集中于采用单通道实现高分辨宽测绘带成像, 并介绍相应的信号处理方法。对于单个通道而言, 如果采用常规的方位均匀采样方式录取回波信号, 不可避免会出现距离或方位模糊。

传统的单通道星载 SAR 如果要实现宽测绘带成像, 必须要求采用较小的 PRF 以避免距离出现盲区 and 模糊; 而若要实现高分辨成像, 又必须采用较大的 PRF 以保证多普勒不模糊。因此, 采用常规的单通道 SAR 系统实现高分辨宽测绘带成像必然会出现距离模糊或方位模糊的问题, 或两者同时存在。方位模糊的雷达回波信号可以表示为

$$\begin{aligned} S_a(f_r, f_a) &= \sum_{k=-(M-1)/2}^{k=(M-1)/2} S(f_r, f_a + k \times \text{PRF}) \\ &= \text{rect}\left(\frac{f_r}{B}\right) \sum_{k=-(M-1)/2}^{k=(M-1)/2} \exp\left(-j \frac{4\pi}{c} (f_c + f_r) \right. \\ &\quad \left. \cdot R(f_a + k \times \text{PRF}; R_B, X_n)\right) \quad (2) \end{aligned}$$

其中 $S(f_r, f_a)$ 为信号在两维频域中表示形式, $f_a \in [-\text{PRF}/2 : \text{PRF}/2]$ 为方位频率, M 为方位模糊数。式(2)以方位奇数次模糊为例。

3 解模糊方法

3.1 雷达工作体制

本文雷达采用常规的单通道体制, 不同的是本文采用方位周期性非均匀采样的方式录取数据。如图 2 所示为雷达方位周期性非均匀采样的示意图。其中同种线型的 ‘×’ 表示重复频率为 PRF 的发射位置, 其间隔为 V/PRF 。一个 V/PRF 间隔内, 不同种线型的 ‘×’ 表示非均匀的采样位置, 图中以 4 个非均匀采样点为例。4 种线型的 ‘×’ 相对于实

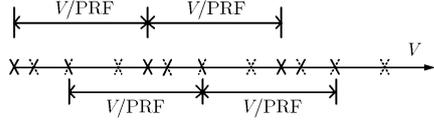


图2 周期性非均匀采样示意图

线型‘×’的距离记为 d_i ($i = 0, 1, 2, 3$), 其中 $d_0 = 0$ 。雷达在‘×’时刻发射设计好的宽带信号, 在不发射信号时始终处于接收状态。将接收的回波信号进行重新排列, 不同发射点对应的回波构成的二维数据记为 S_i , 这些数据可以认为是4个通道的数据。

3.2 距离解模糊

对于宽测绘带成像, 本文采用较小的脉冲重复频率 PRF, 保证距离向无盲区 and 模糊。然而 PRF 间隔内天线还需要发射信号, 其相应位置会因为发射遮挡出现盲区, 距离盲区的形成如图3所示。

从图中可以看出, 实线型‘×’发射点的回波在接收过程中, 天线必须发射信号, 对于同一个收

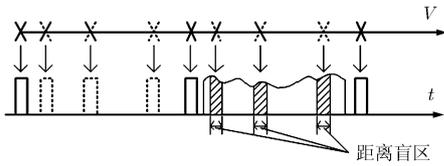


图3 距离盲区形成示意图

$$S_{N1} = \begin{bmatrix} \sum_{k=-(M-1)/2}^{k=(M-1)/2} S(f_r, f_a + k \times \text{PRF}) \exp\left(-j2\pi(f_a + k \times \text{PRF}) \frac{d_0}{V}\right) \\ \sum_{k=-(M-1)/2}^{k=(M-1)/2} S(f_r, f_a + k \times \text{PRF}) \exp\left(-j2\pi(f_a + k \times \text{PRF}) \frac{d_1}{V}\right) \\ \vdots \\ \sum_{k=-(M-1)/2}^{k=(M-1)/2} S(f_r, f_a + k \times \text{PRF}) \exp\left(-j2\pi(f_a + k \times \text{PRF}) \frac{d_{N-1}}{V}\right) \end{bmatrix} = \mathbf{A}_{NM} \mathbf{S}_{M1} \quad (3)$$

其中 $\mathbf{A}_{NM} = \left[\exp\left(-j2\pi(f_a + m \times \text{PRF}) \frac{d_n}{V}\right) \right]$ 为导向矢量矩阵, $\mathbf{S}_{M1} = [S(f_r, f_a + m \times \text{PRF})]$ 为信号相互模糊多普勒单元构成的向量。当系统设计完成时, \mathbf{A}_{NM} 是完全确定且没有幅度和相位误差的; \mathbf{S}_{M1} 是我们需要得到的信号。如果 $N = M$, 可以直接对式(3)两边左乘以 \mathbf{A}_{NM} 的逆矩阵。通常 $N > M$, 则上述方程是超定的, 此时可以对某个 m_0 多普勒分量进行恢复

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{w}_{m_0}^T \mathbf{A}_{Nm_0} &= 1 \\ \mathbf{w}_{m_0}^T \mathbf{A}_{Nj} &= 0, \quad j \neq m_0 \\ \min(\mathbf{w}_{m_0}^T \mathbf{R} \mathbf{w}_{m_0}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中 \mathbf{R} 为方位多普勒数据构成的协方差矩阵。式(4)

发天线而言, 天线处于发射状态时不能接收回波信号, 因此数据录取时会出现距离盲区问题, 图中阴影部分即为实线型‘×’发射脉冲回波包络内由于发射遮挡导致的3个距离盲区。通过非均匀采样序列的设计, 可以保证同一距离单元的盲区只出现在一个通道中, 具体的设计将在后面作细致分析。同时还可以看出, 不同线型发射脉冲的回波将重叠在一起, 对于这一问题, 可以采用发射正交多波形的方法解决。

3.3 方位解模糊^[13]

对于不同的通道而言, 其数据方位向是模糊的, 然而 PRF 内的非均匀采样提供了足够的信息来消除模糊。根据文献[4,13]的讨论, 如果通道数 N 满足 $N \geq M$, 那么可以利用方位的多个偏置通道解方位模糊。由于本体系中的多个通道实际上是单个传感器通过方位非均匀采样来实现的, 它构成的多通道系统比常规的多通道系统存在很多的优势, 比如通道一致性好、通道间距可控、测绘带宽度不会对硬件产生很大的要求等等, 因此该体制将为系统设计以及信号恢复提供很大的便利。

假设 N 个通道的数据可以排列成向量的形式

中第1个式子体现了采样系统对多普勒分量 $f_a + m_0 \times \text{PRF}$ 的增益为1, 第2个式子表示系统对其它模糊分量具有抑制作用, 第3个式子是指在空间自由度足够满足上面两个式子后, 对副瓣的抑制作用。

对某个距离单元, 若第 n_0 个通道存在距离盲区, 那么去掉该通道的导向矢量, \mathbf{A}_{NM} 改写为 $\mathbf{A}_{N'M}$, 其中 $N' = N - 1$, 同样可以利用上面的式子恢复信号。

4 应用分析

4.1 重复频率设计

方位重复频率 PRF 要满足距离无盲区的要求, 并且保证发射信号不会对自身采样通道的回波构成

距离盲区，可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \frac{2(R_s - W_r/2)}{c} &\geq \frac{m_r}{\text{PRF}} + T_p \\ \frac{2(R_s + W_r/2)}{c} &\leq \frac{m_r + 1}{\text{PRF}} - T_p \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 W_r 为场景的斜距幅宽， m_r 为临近的自身采样通道发射脉冲个数。

4.2 采样序列设计

在 PRF 满足式(5)的基础上，采样点间距 d_i 的设计对于避开距离盲区的重叠和信号占空比都非常重要，可以用图 4 说明。假设方位向有 3 组非均匀采样点，图中第 1 行表示发射信号时序，第 2 行为雷达接收到的回波，由于在不发射信号时雷达始终处于接收状态，因此除了由发射遮挡导致的距离盲区(图中阴影部分所示)外，其他时间都存在回波信号。第 3 至 5 行分别表示等效通道 1 至通道 3 的接收回波，其中粗实线对应同一 PRF。可以看出，距离盲区的存在将原始回波数据分成了 3 段。为了使各通道回波数据起始采样时刻对齐后距离盲区不重叠，必须设计好非均匀采样点的位置。图 4 中的第 3 至 5 行可以看作 3 个线段的循环移位，因此采样点的设计实质上可以看作是 3 个线段长度的设计。每一行中只有两个距离盲区，其位置可以通过累加操作求得。

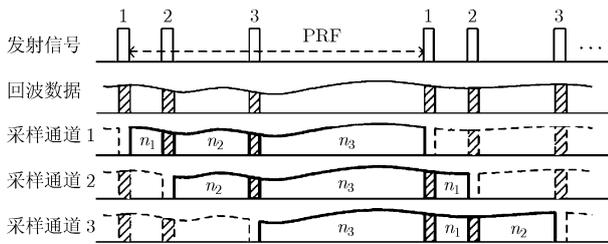


图 4 采样通道与距离盲区关系

因此对于一般的非均匀采样而言，存在序列向量 $\mathbf{l} = [n_1, n_2, \dots, n_N]^T$ 较优的组合，满足

$$\max_l (\min(\text{vect})), \|\mathbf{l}\|_1 = N(N-1) + 1 \quad (6)$$

其中 $\text{vect} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{\text{sum}} \\ \mathbf{M}_{\text{sum}} \mathbf{M}_{\text{shift}} \\ \vdots \\ \mathbf{M}_{\text{sum}} \mathbf{M}_{\text{shift}}^{N-1} \end{bmatrix} \mathbf{l}$ 。 \mathbf{M}_{sum} 为元素累加

矩阵， $\mathbf{M}_{\text{shift}}$ 为循环移位矩阵， \mathbf{D} 为差分矩阵， $\|\cdot\|_1$ 表示 1-范数。式(6)的含义就是寻找图 4 中所有距离

盲区中最近的间距，通过设计使其最大化。采用遍历的方法，该式子求解的计算量为 $O(N^N)$ 。我们提供另一种简单的求解方法。图 4 中各采样通道回波数据起始采样时刻对齐后，将距离盲区叠放到一起，得到如图 5 所示的结果。图 5 中距离盲区将整个回波数据分为 7 部分，我们期望 7 部分是均匀分布的，因此采样设计转化为整数序列的设计

$$\left. \begin{aligned} \min(\text{vect}) &= 1 \\ \|\mathbf{l}\|_1 &= N(N-1) + 1 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

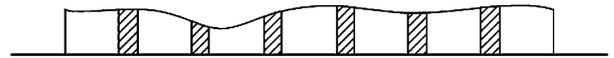


图 5 距离盲区叠加

由于序列移位累加点对线段进行均分，因此其累加必须充满整个区域。从而可以得到如下规律：数 1 必须包含在内以保证第 1 段的存在；数 2 必须包含在内以保证第 2 段的存在；如果数 2 与数 1 相连，则第 3 段被它们组合，那么数 4 肯定存在，如果数 2 与数 1 不相连，数 3 存在，等等……。上面的规律带有递归性质，可以通过递归结构来实现。

通过递归结构可以得到 N 为不同值时的序列组，如表 1 所示。

表 1 非均匀采样序列举例

| N | 序列 |
|-----|---|
| 2 | 1,2; |
| 3 | 1,2,4; 1,4,2; |
| 4 | 1,2,6,4; 1,3,2,7; 1,7,2,3; 1,4,6,2; |
| 5 | 1,5,2,10,3; 1,3,10,2,5; |
| 6 | 1,2,5,4,6,13; 1,2,7,4,12,5; 1,3,2,7,8,10; 1,3,6,2,5,14; 1,14,5,2,6,3; 1,10,8,7,2,3; 1,5,12,4,7,2; 1,13,6,4,5,2; |
| 7 | NULL |
| 8 | 1,2,10,19,4,7,9,5; 1,4,2,10,18,3,11,8; 1,3,8,2,16,7,15,5; 1,3,5,11,2,12,17,6; 1,6,17,12,2,11,5,3; 1,5,15,7,16,2,8,3; 1,8,11,3,18,10,2,4; 1,5,9,7,4,19,10,2; |
| 9 | 1,2,4,8,16,5,18,9,10; 1,10,9,18,5,16,8,4,2; |
| 10 | 1,4,3,10,2,9,14,16,6,26; 1,26,6,16,14,9,2,10,3,4; |

以表 1 中序列 {1,2,5,4,6,13} 为例，通过循环移位及累加，可以得到如图 6 所示的结果，可以看出， $6 \times 5 + 1 = 31$ 被均匀地充满了，且间距为 1。此时可以得到发射信号脉冲宽度的上限为 $1/(2\text{PRF}) [1/(N(N-1) + 1)]$ ，就可以避开距离盲区的重叠。

实际系统中由于存在发射信号的延迟抖动，可能会导致序列不能严格按照表 1 所给的比例，此时

是否会造成距离盲区重叠呢？答案是否定的，考虑到延迟抖动，假设上述序列变为{1.08,1.84,5.13,4.26,5.87,12.81}，此时序列循环移位及累加结果如图7，虽然不是均匀分布，但各通道的盲区依然相互分开，只要采用合适的发射信号宽度就可以避免距离盲区的重叠。由于发射信号的延迟是通过数字计数器实现的，其延迟抖动也已知，因此不会对方位解模糊产生影响。

4.3 数据处理流程

通过上述非均匀采样序列的优化设计，可以避免各个通道距离盲区的重叠。将回波数据按照距离门延迟及发射脉冲延迟重新排列，得到等效的多通道数据后，就可以进行后续的处理。

图8为本文方法的数据处理流程，图中假设方位向有4组非均匀采样点。接收到的回波数据重新排列后可以形成4个等效通道的数据。各通道数据按各自的发射波形完成距离向匹配滤波后，变换到方位频率域，此时方位频谱存在模糊。根据发射脉冲时序可以计算出距离盲区的位置，若某距离单元全部通道都不存在盲区，则采用全部通道进行方位解模糊；若某一通道存在距离盲区，则去掉该通道的数据，采用剩余的其他通道解方位模糊。方位解模糊完成后，将所有距离向数据合成可以得到完整的且方位不模糊的数据。此时距离向补偿回一个与

发射信号相同时宽和带宽的线性调频信号，恢复距离向匹配滤波前的数据，就可以采用CS算法实现距离脉冲压缩、二次距离脉冲压缩及距离单元徙动(RCM)校正。最后通过方位脉冲压缩就可以得到无模糊的SAR图像。

5 仿真结果

为了验证本文提出的高分辨宽测绘带成像方法，本节给出了仿真数据处理结果。雷达工作方式采用本文提出的周期性非均匀采样方式，并且通过发射正交多波形、方位解模糊失效及方位脉压失配解决距离模糊的问题。仿真时考虑方位模糊数为3，为了解决距离盲区内的模糊问题，非均匀采样点至少为4个。考虑到效率，仿真中采用的雷达发射波形为如图9所示的4种近似正交波形。实际应用中可以选择其他更加优化的波形，如正交的离散频率编码波形(DFCW)^[4]作为发射波形。经过分析可知，图中所示信号的自相关峰值旁瓣约为-13.3 dB，而互相关系数约为-25 dB，由于方位脉冲压缩失配，将导致距离模糊信号的幅度进一步降低，达到约-30 dB，可以认为不会对成像结果造成影响。

仿真所用参数如表2所示。根据参数的分析，方位信号带宽为3000 Hz，模糊了3次，因此非均

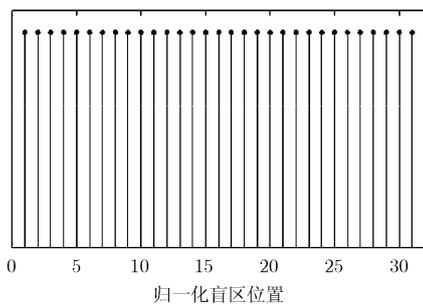


图6 序列循环移位及累加结果

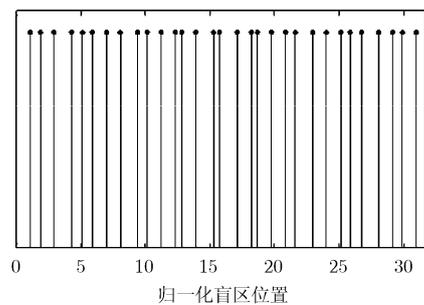


图7 考虑延迟抖动后移位累加结果

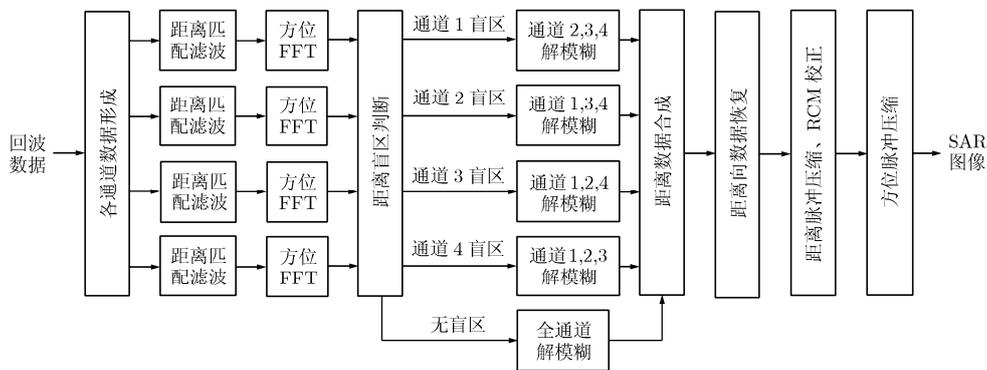


图8 数据处理流程

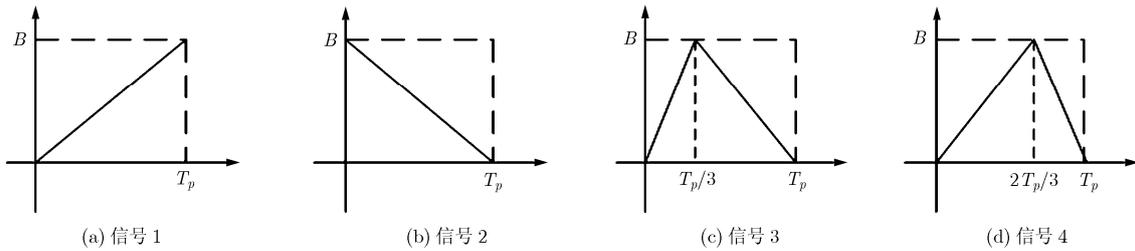


图 9 近似正交波形图

表 2 仿真参数

| | | | |
|------|------------|------|----------|
| 载频 | 10 GHz | 方位孔径 | 4.8 m |
| 脉冲宽度 | 20 μ s | PRF | 1090 Hz |
| 信号带宽 | 80 MHz | 有效速度 | 7200 m/s |
| 采样频率 | 100 MHz | 中心斜距 | 760 km |

均匀采样序列采用表 1 中的{1,7,2,3}, 对应的采样点位置为 $d_i = \{0,1,8,10\} / 13 \times V / PRF$, 该采样点序列可以有效避免距离盲区的重叠, 使得相同距离单元的盲区最多出现在一个通道内。

仿真时距离向场景宽度设置为 96 km, 均匀布置了 65 个点, 点的间距为 1.5 km。为了更加有效地验证本文方法对方位点的有效性, 方位坐标值随机分布在(-1000,1000)内。图 10 为仿真产生的原始数据图(为了便于显示, 距离向进行了 8 抽 1 处理), 可以看出, 每个采样通道都存在距离盲区, 但是相同距离单元的盲区只出现在一个通道内, 这样使得我们可以最大限度的利用方位采样点的资源。



图 10 仿真原始数据图(距离向 8 抽 1)

完成方位解模糊及成像处理后, 部分点目标成像结果如图 11 所示, 其中水平方向为距离向, 垂直方向为方位向。从图中可以看出, 场景中的点目标

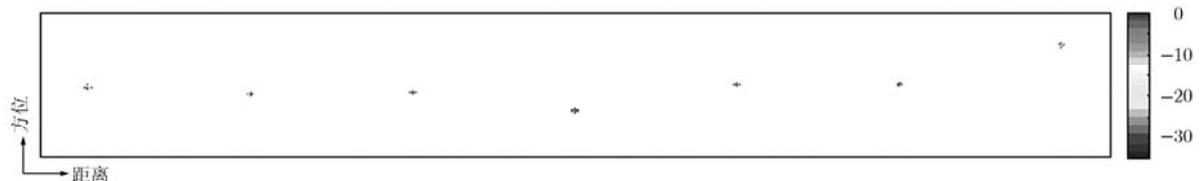


图 11 场景点目标成像结果(部分)

聚焦良好。

进一步取各个模糊区域内点目标成像结果进行分析, 如图 12 所示, 其中图 12(a)~12(e)分别对应图 10 距离带 1~5 内点目标成像结果的幅度图及方位剖面图。从图中可以看出, 无论有无盲区及哪个采样通道距离盲区内的点目标通过方位解模糊之后, 模糊信号基本都在-40 dB 以下, 因此不会对成像结果产生影响。表 3 给出了上述 5 个点目标方位向的成像性能分析, 其中 PSLR 为峰值旁瓣比, ISLR 为积峰旁瓣比。可以看出方位向 PSLR 均在-13.01 dB 以下, ISLR 均在-9.63 dB 以下, 成像分辨率也与理论值接近, 因此成像结果较为理想。

表 3 各点目标方位向成像性能分析

| 区域 | PSLR (dB) | ISLR (dB) | 理论分辨率 (m) | 实际分辨率 (m) |
|----|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1 | -13.21 | -9.84 | 2.4 | 2.4125 |
| 2 | -13.20 | -9.85 | 2.4 | 2.4139 |
| 3 | -13.22 | -9.85 | 2.4 | 2.4145 |
| 4 | -13.01 | -9.63 | 2.4 | 2.4169 |
| 5 | -13.25 | -9.86 | 2.4 | 2.4146 |

6 结论

本文针对传统星载单通道 SAR 系统高分辨与宽测绘带之间的矛盾, 提出了一种方位周期性非均匀采样的解决方法。该方法通过对非均匀采样序列的优化设计, 避免了距离盲区的重叠, 使得相同距离单元的盲区只出现在一个采样通道内。利用方位采样的周期性, 构造出等效的多通道数据, 通过多通道解模糊的方法实现方位信号频谱恢复。该方法可以实现星载单通道 SAR 系统高分辨宽测绘带成像, 且不存在距离盲区问题。仿真实验验证了本文方法的有效性。

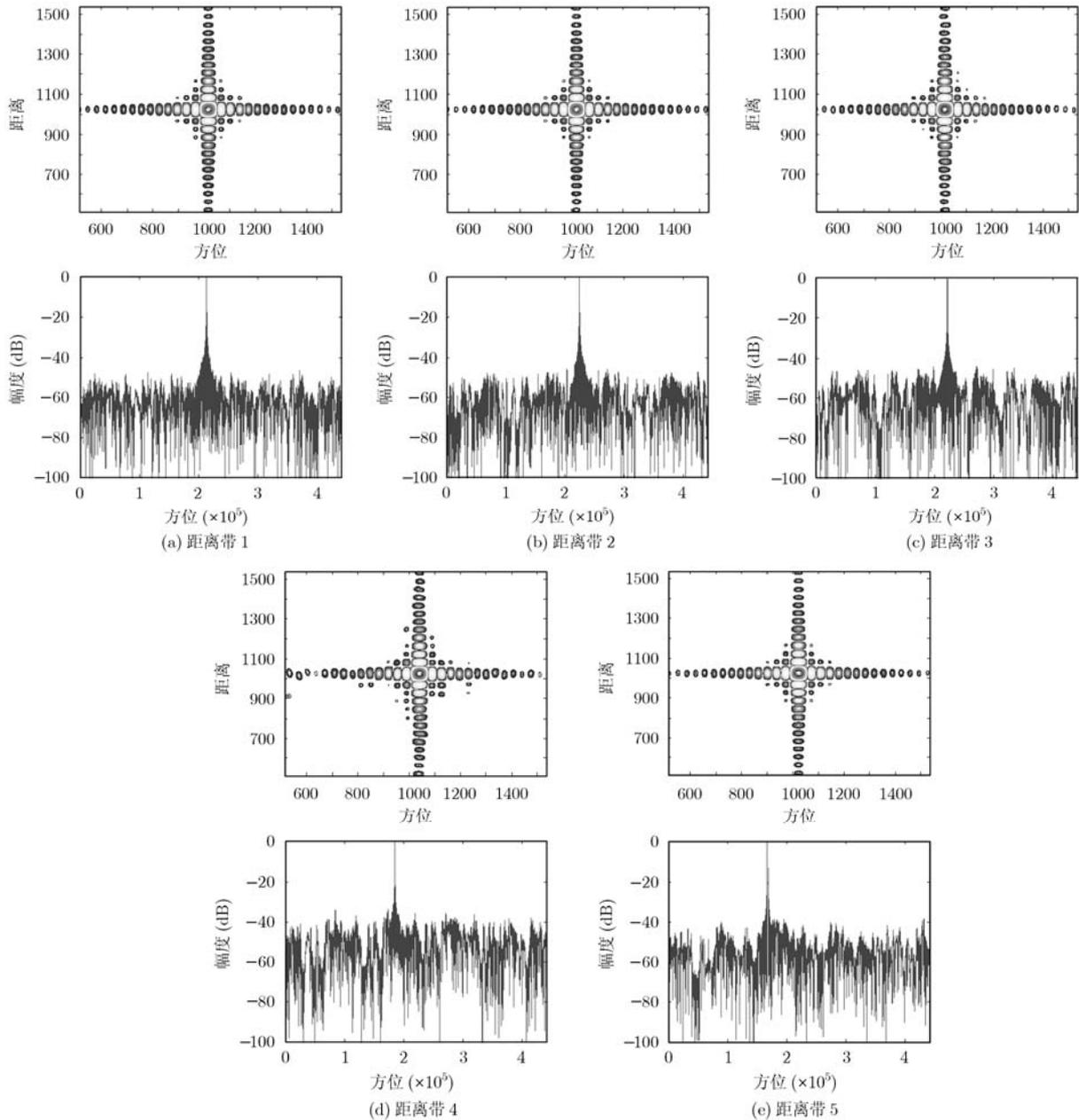


图 12 不同通道盲区内的点目标成像结果及方位剖面图

参 考 文 献

[1] Freeman A, Johnson W T K, 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.

[2] Callaghan G D and Longstaff I D. Wide-swath space-borne SAR and range ambiguity [C]. *Radar 97*, Edinburgh, UK, October 14-16, 1997: 248-252.

[3] Currie A and Brown M A. Wide-swath SAR [J]. *IEE Proceedings-Radar, Sonar, Navigation*, 1992, 139(2): 122-135.

[4] 邢孟道, 李真芳, 保铮, 等. 分布式小卫星雷达空时频成像方法研究[J]. *宇航学报*, 2005, 26(增刊 1): 70-76.

Xing Meng-dao, Li Zhen-fang, Bao Zheng, *et al.* Study of distributed microsatellites radar space-time-frequency imaging method [J]. *Journal of Astronautics*, 2005, 26(Suppl.1): 70-76.

[5] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Multidimensional waveform encoding: a new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(1): 31-46.

[6] Krieger G, Younis M, Gebert N, *et al.* Advanced concepts for high-resolution wide-swath SAR imaging [C]. *EUSAR 2010*,

- Aachen, Germany, June 7-10, 2010: 524-527.
- [7] 齐维孔, 禹卫东, 祁海明. 星载 MIMO-SAR 与距离向 DBF 相结合系统研究[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2251-2257.
Qi Wei-kong, Yu Wei-dong, and Qi Hai-ming. Study of the system combining spaceborne MIMO-SAR and elevation DBF [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(10): 2251-2257.
- [8] Zaugg E, Long D, Edwards M, *et al.* Coherent multi-frequency-band resolution enhancement for synthetic aperture radar [C]. IGARSS 2009, Cape Town, South Africa, July 12-17, 2009: I-56-I-59.
- [9] 邓云凯, 陈倩, 祁海明, 等. 一种基于频域子带合成的多发多收高分辨率 SAR 成像算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(5): 1082-1087.
Deng Yun-kai, Chen Qian, Qi Hai-ming, *et al.* A high-resolution imaging algorithm for MIMO SAR based on the sub-band synthesis in frequency domain[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(5): 1082-1087.
- [10] 黄平平, 邓云凯, 徐伟, 等. 基于频域合成方法的多发多收 SAR 技术研究[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 401-406.
Huang Ping-ping, Deng Yun-kai, Xu Wei, *et al.* The research of multiple-input and multiple-output SAR based on frequency synthetic [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(2): 401-406.
- [11] 王小青, 朱敏慧. 一种宽测绘带新方法的探讨[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(10): 1425-1429.
Wang Xiao-qing and Zhu Min-hui. A discussion on a new method of wide swath SAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(10): 1425-1429.
- [12] Gebert N and Krieger G. Ultra-wide swath SAR imaging with continuous PRF variation [C]. EUSAR 2010, Aachen, Germany, June 7-10, 2010: 966-969.
- [13] Li Zhen-fang, Wang Hong-yang, Su Tao, *et al.* Generation of wide-swath and high-resolution SAR images from multichannel small spaceborne SAR systems [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(1): 82-86.
- [14] Deng Hai. Discrete frequency-coding waveform design for netted radar systems [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2004, 11(2): 179-182.
- 吴玉峰: 男, 1985年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、运动补偿.
- 孙光才: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、动目标检测等.
- 杨 军: 男, 1984年生, 博士生, 研究方向为SAR成像、电子侦察.
- 邢孟道: 男, 1975年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达成像和目标识别等.
- 周 峰: 男, 1980年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电子对抗和雷达成像.