

## 星载 SAR DPCMAB 技术的方位向非均匀采样研究

范强 吕晓德 张平 许猛  
(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要** 在星载SAR分离相位中心方位多波束(DPCMAB)系统中,发射脉冲盲区 and 星下点回波盲区的存在会引起方位向非均匀采样,从而在方位向冲激响应的主瓣两侧产生不期望的尖峰。该文采用Spectral-Fit法和时域重构法在不影响图像性能的基础上,消除了非均匀采样带来的影响。最后通过对两者运算量的分析,指出时域重构法优于Spectral-Fit法。

**关键词** 星载 SAR, 分离相位中心方位多波束, 方位向非均匀采样, Spectral-Fit 法, 时域重构法  
**中图分类号:** TN959.74 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2006)01-0031-05

## Study of Nonuniform Azimuth Sampling of DPCMAB Technique in Spaceborne SAR

Fan Qiang Lü Xiao-De Zhang Ping Xu Meng  
(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** In the system of Displaced Phase Centre Multiple Azimuth Beams (DPCMAB) of spaceborne SAR, the transmitter blinding and nadir echo eclipsing events can lead to nonuniform azimuth sampling that results in the appearance of unexpected peaks on the both sides of mainlobe of azimuth impulse response. In this paper, the Spectral-Fit method and the reconstruction in time domain method are adopted to eliminate the effect due to azimuth nonuniform sampling with the quality of image being unaffected. Contrasting the number of arithmetic operations of the above two methods, it is shown that the reconstruction in time domain method is superior to the Spectral-Fit method.

**Key words** Spaceborne SAR, DPCMAB, Nonuniform azimuth sampling, Spectral-Fit method, Reconstruction in time domain method

### 1 引言

业已证明,星载 SAR 系统是军、民用极为有效的监视工具。它能够以米级的空间分辨率,全天时、全天候地覆盖地球表面。在某些应用尤其是军事目标的侦察中,星载 SAR 需要对观测区域具有较短的重访时间和对观测目标具有较强的检测能力。这就要求它在保持宽测绘带成像的同时还要具有高的空间分辨率。但是对于常规星载 SAR 系统(条带模式)来说,宽测绘带与高方位分辨率之间的矛盾是非常尖锐的<sup>[1]</sup>,无法获得连续条带的宽测绘带、高分辨率图像。

由于相控阵系统在波束的产生和控制上具有高度的灵活性,因此随着相控阵天线的出现,多种同时实现高分辨率、宽测绘带成像的多波束技术<sup>[2]</sup>被提出。这主要包括距离向多波束(MEB)、单相位中心方位多波束(SPCMAB)和分离相位中心方位多波束(DPCMAB)3种。MEB技术利用不同的天线

仰角波束识别每一条测绘带,从而合成一宽测绘带。SPCMAB技术是设法产生若干个邻接的具有共同相位中心的非重叠方位波束。几个波束相连横跨一个可以满足所选分辨率的多普勒带宽,波束间有适当的隔离,每个子波束只需按照各自较小的奈奎斯特率采样。DPCMAB技术是在方位向不同位置上放置多个子天线,其中一个子天线发射所有子天线接收。由于各子天线位置不同,所以发射一次可以获得多个独立的样本。表1给出了3种不同技术实现高分辨率、宽测绘带成像的性能比较。

从表1中可以看出,尽管DPCMAB系统较为复杂,但从系统能耗和成像质量方面考虑采用DPCMAB技术具有较大的优势。而对于能量较为紧张的星载SAR来说,低能耗无疑具有更大的吸引力。所以综合考虑,DPCMAB技术将是星载SAR实现高分辨率、宽测绘带成像的一种较为理想的方式。

表1 不同模式多波束技术比较

	MEB	SPCMAB	DPCMAB
方位模糊度	正常	高	正常
距离模糊度	高	正常	正常
脉冲重复频率	高	较低	最低
平均功率	高	较低	最低
系统复杂度	高	低	高

## 2 方位向非均匀采样的产生及影响

DPCMAB 技术的基本思想是以方位向空间采样率的增加来换取时间采样率的降低,即在一低的脉冲重复频率(PRF)下获得方位向高的等效采样率(满足 Nyquist 准则),而同时低的 PRF 又能获得测绘带宽度的增加。

图1为两相位中心两方位波束系统示意图。图中A为发射/接收子天线的相位中心,B为接收子天线的相位中心,C为相位中心A,B的中点。接收通道B的回波信号模拟的是常规 SAR 在位置C的回波信号,两者之间由于传播路径差  $\Delta R = (R_1 + R_2) - 2R_3$  而引起的相位差  $\Delta\phi = (2\pi/\lambda)\Delta R \approx \pi d^2 / (2R_0\lambda)$ 。成像时可据此对通道B进行相位补偿。

当子天线相位中心间隔d满足

$$d = 2V_{st} / (N \times f_{prf}) \quad (1)$$

时(N为子天线数,  $f_{prf}$  为系统PRF,该实例中  $N = 2$ ),将各通道的回波信号依次合并,该DPCMAB系统将等效于天线长度等于DPCMAB子天线长度,方位向采样间隔为  $V_{st} / (N \times f_{prf})$  的常规SAR<sup>[2,3]</sup>,成像算法亦完全相同。

对于某一确定的星载DPCMAB系统来说,子天线的相位中心间距d是固定不变的,而且在确定的位置载体的速度  $V_{st}$  也是固定的。所以此时系统要等效为方位向采样间隔为  $V_{st} / N \times f_{prf}$  的常规SAR,由式(1)可知其PRF必须是某一固定值。

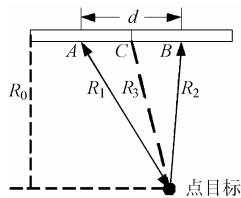


图1 两相位中心方位两波束系统示意图

假定一星载两波束系统基本参数如下:

载波频率 5.4GHz,方位分辨率 3m,子天线长度 6m,相位中心间距为 5m(本文所有仿真均参照上述参数)。当载体至星下点距离为 500km 时,其测绘带覆盖范围如图2所示。此时系统所确定的均匀采样的 PRF 应为 1522.52Hz。从图中可以看出,当  $f_{prf} = 1522.52\text{Hz}$  时,由于发射信号盲区和星下

点回波的影响,系统会产生成像盲区。另外回波时刻同发射信号盲区和星下点回波盲区会随着载体的速度及其距星下点高度的变化而变化,式(1)也将不能得到满足。综上所述,对于星载 SAR,式(1)将不能得到满足,即必然会产生方位向非均匀采样。

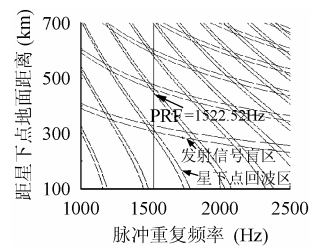


图2 测绘带覆盖范围图

下面假定载体速度一定,仿真由于系统PRF改变引起的方位向非均匀采样对点目标成像的影响(成像仿真中假定卫星轨道为圆形,并忽略地球自转影响)。图3给出了对方位向非均匀采样数据不经过处理,直接用FFT求其频谱(本文称此为直接FFT法)时,几个典型PRF时点目标的方位向冲激响应(这里假定天线增益恒为1)。从图3可以看出:方位向的非均匀采样会在目标主瓣两侧产生较高的尖峰,若在此处的真实目标回波强度低于该尖峰时,那么在SAR图像中就会产生伪目标。因此必须找到一种切实可行的方案减弱甚至消除非均匀采样的影响。

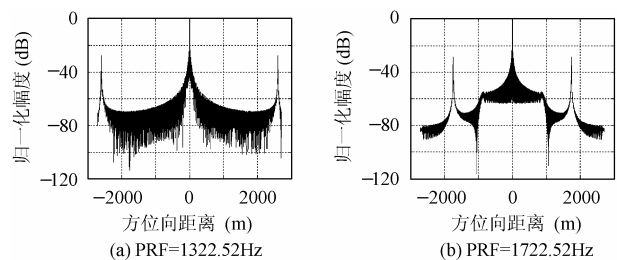


图3 不同PRF时的点目标方位向冲激响应

## 3 解决方案

从上面的分析中可以看出,消除非均匀采样的影响是星载DPCMAB系统必须解决的一项关键技术。基于此,本文分别将Spectral-Fit算法<sup>[4]</sup>和时域重构算法<sup>[5-7]</sup>应用到成像中,抑制DPCMAB系统中由于方位向非均匀采样所产生的影响。

### 3.1 Spectral-Fit 算法

该方法首先是选取一组  $M$  点频率值  $\{f_m\}$ , 然后在此基础上寻找相应的傅里叶系数的集合  $\{Y_m\}$ , 以便对其应用 IDFT 后所得的数据点与在给定的非均匀采样时间点集合  $\{t_n\}$  上采样所得的原始数据点集合  $\{y_n\}$  具有最小方差, 即寻找方程:

$$\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{Y} \quad (2)$$

的最小二乘解  $\mathbf{X}$ 。其中  $\mathbf{A} = \{A_{n,m} = \exp(-j2\pi f_m t_n)\} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ ,  $\mathbf{X} = \{Y_m\} \in \mathbb{C}^M$ ,  $\mathbf{Y} = \{y_n\} \in \mathbb{C}^N$ 。文献[4]指出通常应选取一组使得  $\mathbf{A}$  的秩小于  $N$  的频率集合, 即所选取的频率点数应小于数据点数目也就是  $M < N$ 。从而式(2)成为一无任何严格解的超定方程。求解满足该超定方程最小二乘解的方法较多, 基于鲁棒性考虑这里采用 SVD 法<sup>[8]</sup>求  $\mathbf{A}$  的广义逆矩阵  $\mathbf{B} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ , 从而得到

$$\mathbf{X} = \mathbf{B}\mathbf{Y} \quad (3)$$

对于方位向非均匀采样的 DPCMAB 系统, 将各通道的回波数据合并, 等效成常规 SAR 之后, 应用 Spectral-Fit 算法消除非均匀采样影响, 处理步骤如下:

- (1) 确定等效的方位向非均匀采样的时间点的集合  $\{t_n\}$ 。
- (2) 确定方位向应选取的多普勒频率的集合  $\{f_m\}$ , 其间隔为合成孔径时间的倒数, 取值区间为  $[-f_d/2, f_d/2]$ 。其中  $f_d$  应大于系统多普勒带宽, 小于等效的 PRF。
- (3) 根据  $\{t_n\}$ ,  $\{f_m\}$  计算  $\mathbf{A}$ , 利用 SVD 法求出  $\mathbf{A}$  的广义逆矩阵  $\mathbf{B}$ 。
- (4) 将回波数据的方位向频谱的计算用式(3)替代。

图 4 给出了采用 Spectral-Fit 算法得到了 PRF=1322.52Hz 和 PRF=1722.52Hz 时点目标的方位向冲激响应。可以看出 Spectral-Fit 算法消除了由于非均匀采样而产生的尖峰。

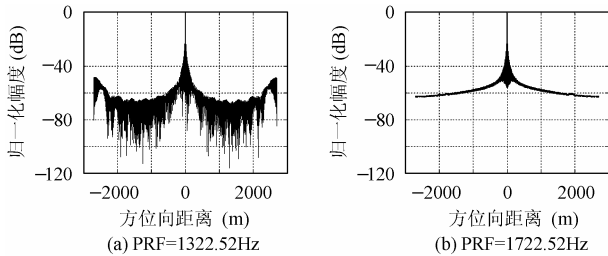


图 4 采用 Spectral-Fit 法的点目标方位向冲激响应

### 3.2 时域重构算法

图 5 以两波束为例给出了 DPCMAB 系统方位向非均匀采样点的分布情况。A, B 分别为通道 A, B 所对应的等效采样点,  $T_r$  为系统的脉冲重复周期。从图 5 中可看出, 方位向的样本可分为每组有两点的许多组, 各组有一个  $T_r$  的重复周期。因此该分布满足文献[7]所定义的“周期的非均匀采样”。

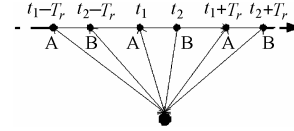


图 5 两波束时方位向非均匀采样点分布

对于周期的非均匀采样, 有如下定理<sup>[7]</sup>: 设  $s(t)$  为一带限信号, 其最高频率为  $W$ , 则  $s(t)$  可以由一组在周期非均匀采样点  $t = \tau_{pm} = t_p + mN/(2W)$ ,  $p = 1, 2, \dots, N$ ,  $m = \dots, -1, 0, 1, \dots$  上的采样值所唯一确定。其重构公式为

$$s(t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{p=1}^N s(\tau_{pm}) \Psi_{pm}(t) \quad (4)$$

$$\Psi_{pm}(t) = \frac{\prod_{q=1, q \neq p}^N \sin \frac{2\pi W}{N} (t - t_q)}{\prod_{q=1, q \neq p}^N \sin \frac{2\pi W}{N} (t_p - t_q)} \cdot \frac{(-1)^{mN}}{\frac{2\pi W}{N} \left( t - t_p - \frac{mN}{2W} \right)} \quad (5)$$

将这一定理应用于方位向非均匀采样的 DPCMAB 系统, 其脉冲重复周期  $T_r$  相对于定理中的  $N/(2W)$ 。计算时应用有限项和代替定理中的无限项和, 可得到如下近似表达式:

$$s(t) \approx \sum_{m=-M}^M \sum_{p=1}^N s(\tau_{pm}) \Psi_{pm}(t) \quad (6)$$

将各通道的回波数据合并, 等效成常规 SAR 之后, 应用时域重构法消除伪目标处理步骤如下:

- (1) 确定等效的方位向非均匀采样的时间点的集合  $\{\tau_{pm}\}$  及重构后的信号  $s(t)$  的新采样间隔(满足采样定理)。
- (2) 运用重构公式计算出新的采样间隔下每一方位向的信号。
- (3) 对重构后的回波数据按照通常成像流程处理。

需要注意的是: 新采样点不能选择在与任一非均匀采样点间隔  $T_r$  整数倍的时间点上, 因为这些点上  $\Psi_{pm}$  成为  $\delta$  函数将无法求出  $s(t)$  的值。图 6 给出了采用时域重构算法得到的 PRF=1322.52Hz 和 PRF=1722.52Hz 时点目标的方位向冲激响应, 可以看出该算法消除了由于非均匀采样而产生的尖峰。

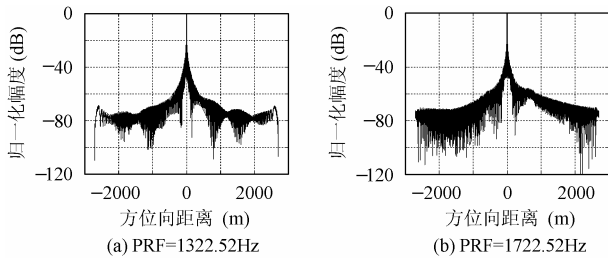


图 6 采用时域重构法的点目标方位向冲激响应

3.3 算法性能分析

衡量任何与 SAR 成像相关的算法优劣的首要标准是图像性能指标, 主要包括主瓣宽度、峰值旁瓣比、积分旁瓣比等。表 2 以点目标为例, 给出了在 PRF 偏离不同程度时, Spectral-Fit 法与时域重构法对图像性能的影响, 并与直接 FFT 法进行了对比。从表 2 中可以看出, 当 PRF 偏离理想的 PRF(即非均匀采样)时, 直接 FFT 法产生的伪目标强度会随着偏离程度的增加而增大, 而 Spectral-Fit 法和时域重构法在消除伪目标的同时, 均保持了良好的图像性能。

衡量算法优劣的另一个指标就是运算量。假定非均匀采样的点数为  $N$ , 分别经过 Spectral-Fit 法与时域重构法获得的频谱的样本数为  $M$ 。对于确定的 DPCMAB SAR 系统来说, 其方位向的非均匀采样时间点应该是确定的。因此对于 Spectral-Fit 法, 通过 SVD 获得的广义逆矩阵  $\mathbf{B}$  可被预先得到并存储, 所以在考虑运算量的时候忽略求得矩阵  $\mathbf{B}$  的运算。同样对于时域重构法来说, 确定了重构后均匀的时间点之后,  $\Psi_{pm}(t)$  的也可以被预先求得和存储, 也同样不考虑其运算量。这样通过 Spectral-Fit 法得到方位向频谱需  $MN$  次复数乘法和  $M(N-1)$  次复数加法即  $4MN$  次实数乘法和  $2M(2N-1)$  次实数加法。时域重构法重构出  $M$  点均匀采样时间信号需要  $2MN$  次实数乘法和  $2M(N-1)$  次实数加法, 而由  $M$  点时间信号通过 FFT 计算出相应的频谱需要  $(M/2)\log_2 M$  次复数乘法, 因此总的运算量应为  $2M(N+\log_2 M)$  次实数乘法和  $M(2(N-1)+\log_2 M)$  次实数加法。由于  $M, N$  比较接近, 而且一般情况下均为  $10^3$  量级, 因此  $\log_2 M \ll N$ 。所以相同条件下时域重构法所需运算量

表 2 不同算法的点目标图像性能

PRF (Hz)	PRF 偏离 (Hz)	直接 FFT 法				Spectral-Fit 法				时域重构法			
		ML	PSLR	ISLR	伪目标强度	ML	PSLR	ISLR	伪目标强度	ML	PSLR	ISLR	伪目标强度
1522.52	0	2.65	- 13.2 7	- 9.5 7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1497.52	- 25	2.65	- 13.2 7	- 9.5 9	- 46.6 1	2.65	- 13.2 5	- 9.5 9	-	2.66	- 13.2 3	- 9.5 4	-
1472.52	- 50	2.66	- 13.2 6	- 9.5 4	- 40.4 0	2.65	- 13.2 5	- 9.4 6	-	2.66	- 13.2 2	- 9.4 9	-
1412.52	- 110	2.65	- 13.2 9	- 9.5 4	- 33.4 1	2.65	- 13.2 5	- 9.6 6	-	2.65	- 13.2 3	- 9.4 9	-
1367.52	- 155	2.65	- 13.3 2	- 9.4 7	- 30.2 9	2.65	- 13.2 5	- 9.6 7	-	2.66	- 13.2 2	- 9.4 9	-
1322.52	- 200	2.66	- 13.3 7	- 9.3 6	- 27.9 3	2.65	- 13.1 9	- 9.6 6	-	2.65	- 13.2 4	- 9.7 1	-
1547.52	25	2.65	- 13.2 6	- 9.5 3	- 46.4 3	2.65	- 13.2 4	- 9.6 6	-	2.65	- 13.2 3	- 9.5 4	-
1572.52	50	2.65	- 13.2 6	- 9.5 7	- 40.5 2	2.65	- 13.2 4	- 9.6 6	-	2.65	- 13.2 3	- 9.5 3	-
1632.52	110	2.66	- 13.2	- 9.5	- 33.7	2.65	- 13.2	- 9.5	-	2.66	- 13.2	- 9.5	-

			8	4	5		5	6			3	3	
1677.52	155	2.66	- 13.3 0	- 9.4 4	- 30.8 8	2.65	- 13.2 5	- 9.5 6	-	2.66	- 13.2 3	- 9.5 3	-
1722.52	200	2.66	- 13.2 2	- 9.3 8	- 28.7 0	2.65	- 13.2 5	- 9.5 4	-	2.66	- 13.2 3	- 9.5 3	-

注: 表中的各项指标均是指方位向的。ML 表示主瓣宽度, 单位为米; PS LR 表示峰值旁瓣比, 单位为分贝; IS LR 为积分旁瓣比, 单位为分贝; 伪目标强度, 实际上表示伪目标最大强度与真实目标强度比, 单位为分贝。PRF 无偏离时, Spectral-Fit 法和时域重构法对于成像性能不予考虑; 伪目标幅度非常小时也不予考虑, 两者均用“-”表示。

要大大低于 Spectral-Fit 法。

#### 4 结束语

DPCMAB 系统是以方位向空间采样率的增加来换取时间采样率的降低, 从而以较低的 PRF 获得了方位向的高分辨率, 因而可以同时实现高分辨率、宽测绘带成像。而较低的 PRF 使得其相对于同样分辨率的常规 SAR 消耗更少的能量, 这对于星载 SAR 来说尤为有意义。但是当 DPCMAB 系统确定之后, 其方位向空间采样间隔将相应确定。因此在星载 SAR 中由于发射脉冲盲区和星下点回波盲区的存在必然会带来方位向的非均匀采样, 其后果就是在方位向上产生伪目标。Spectral-Fit 法和时域重构法在不影响图像性能的基础上, 可以消除伪目标。通过运算量的比较, 发现时域重构法优于 Spectral-Fit 法。

#### 参 考 文 献

- [1] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing. New York: Wiley, 1991: 20 - 21.
- [2] Currie A, Brown M A. Wide-swath SAR. IEE Proc-F, 1992, 139(2): 122 - 135.
- [3] Meisl P, Thompson A, Luscombe A. RADARSAT-2 Mission:

Overview and development status, EUSAR 2000, Munich, 2000, 5: 373 - 376.

- [4] House M G, Mountcastle P D. Technique for frequency analysis of unevenly sampled radar data. IEEE Radar Conference, California, 2002, 4, 63 - 67.
- [5] 屠亚兰. 非均匀采样信号重构技术及其在 PD 雷达 HPRF 信号处理中的应用. 现代雷达, 1997, 4: 84 - 87.
- [6] 李衍达, 常迥. 信号重构理论及应用. 北京: 清华大学出版社, 1991: 19 - 20.
- [7] Yen J L. On nonuniform sampling of bandwidth-limited signals. IRE Trans. on Circuit Theory, 1956, 3(4): 251 - 257.
- [8] Golub G H, Van Loan C F. 著, 袁亚湘等译. 矩阵计算. 北京: 科学出版社, 2001: 520 - 530.

范 强: 男, 1976 年生, 博士生, 研究方向为新体制 SAR 系统技术.

吕晓德: 男, 1969 年生, 副研究员, 研究方向为计算电磁学、天线理论与设计、新体制 SAR 系统及电磁兼容应用技术.

张 平: 男, 1949 年生, 研究员, 研究方向为成像雷达系统测控技术.

许 猛: 男, 1978 年生, 博士生, 研究方向为高分辨率雷达成像.