

星载大斜视聚束SAR变PRI成像技术研究

王沛^{*①②} 徐伟^① 李宁^③ 禹卫东^①

^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 100049)

^③(河南大学计算机与信息工程学院 开封 475004)

摘要: 星载SAR大斜视聚束可以实现高分辨率宽覆盖成像和目标多方位信息获取,但斜视情况下大距离徙动会造成回波数据获取效率下降、波位选择困难等问题。变PRI技术可以跟踪聚束成像过程中目标斜距变化,提高数据获取效率、降低波位选择难度。该文对星载大斜视聚束SAR的变PRI工作机理进行了研究,提出了一种PRI变化序列迭代设计方法和波位选择策略,研究了样条插值和NUFFT两种非周期非均匀采样重建方法,并首次通过机载飞行试验对所提出的变PRI的SAR系统工作体制进行了验证。

关键词: 合成孔径雷达; 变PRI技术; 大斜视聚束; 星载; 机载

中图分类号: TN959.74

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2470-08

DOI: 10.11999/JEIT180049

Investigation on PRI Variation for High Squint Spaceborn Spotlight SAR

WANG Pei^{*①②} XU Wei^① LI Ning^③ YU Weidong^①

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

^②(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

^③(School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: High squint spotlight mode of spaceborne SAR can be used to achieve high resolution and wide swath, and also can be used to acquire information of target from multi-azimuth. However, the considerable range migration can result in efficiency decreasing in data acquisition, and dilemma in system design. This problem can be solved by the technology named PRI (Pulse Repetition Interval) variation which can track the slant range variation of the target during data acquisition. In this paper, the principle of PRI variation is studied, and methods of PRI sequence iterative design and system parameter selection are proposed. Two approaches to reconstruct the nonequal spaced and nonperiod data in azimuth sampling are compared. Finally, the first results of PRI variation mode of airborne SAR experiment with high slant spotlight mode are presented.

Key words: SAR; Pulse Repetition Interval (PRI) variation; High squint spotlight; Spaceborne; Airborne

1 引言

星载合成孔径雷达(SAR)由于不受天气、气候的影响,能全天时、全天候、高分辨率、大区域对地观测^[1],已经成为空间对地观测的重要手段。高分辨率宽覆盖对地观测和多方位角信息获取是未来星载SAR发展的重要方向^[2,3]。在多种实现高分辨5率宽覆盖的技术中^[3-7],Mosaic^[3,5,6]模式利用天线2维大角度波束扫描实现不同子区域的高分辨率斜

视聚束成像,再通过拼接处理得到大幅宽的图像,斜视波束扫描能力越大可获得的分辨率越高、幅宽越大;另一方面具有大方位角波束扫描能力的斜视聚束也是实现多方位信息获取的有效途径,可获得信息量的大幅提升^[3]。因此对于未来的星载SAR,大斜视聚束工作模式是一个重要研究内容。

星载大斜视聚束工作模式中存在的项主要问题是距离徙动带来的数据获取长度的增加,也就是说雷达要将测绘带宽和距离徙动相叠加的回波数据长度全部采集,才能够得到完整的测绘带宽,这将采集大量的冗余数据,同时过长的回波窗也造成波位选择困难。相反,如果保持采样窗长度不变,则必须减小测绘带宽。采用变PRI(Pulse Repetition

收稿日期: 2018-01-15; 改回日期: 2018-06-28; 网络出版: 2018-07-30

*通信作者: 王沛 vanpei@163.com

基金项目: 国家部委基金

Foundation Item: The National Ministries Foundation

Interval)技术跟踪聚束成像过程中目标斜距变化,有效缓解采样窗长度与脉冲重复周期之间的矛盾。

文献[8]最早提出变PRI概念,随后文献[9~12]进一步细化了该工作模式,并称其为Staggered SAR,但并非用于聚束模式成像,而是在条带模式下利用脉冲重复频率的变化来回避发射脉冲的固定遮挡,同时采用数字波束形成技术(Digital Beam Forming, DBF)抑制星下点回波,有效拓展了雷达系统的测绘带宽度。因为在变PRI的过程中会丢失约5%~10%的脉冲^[10],本质上讲,该方法是以牺牲点目标成像质量为代价来换取测绘带宽度的增加^[3]。接着文献[5,13]将变PRI技术用于大斜视条带和高分辨率宽测绘带聚束成像,给出了连续变PRI的概念,文献[7]探讨了斜视聚束SAR的变PRI策略,并使用改进的BPA算法进行了点目标成像仿真。

本文针对星载大斜视聚束SAR的变PRI工作机理开展了进一步研究,以连续变化为例给出了一种PRI变化序列迭代设计方法和波位选择策略。对样条插值和非均匀傅里叶变换两种方位向非周期非均匀采样重建方法进行了探讨。最后采用高重复频率在机载SAR系统中设计了隔脉冲接收回波、分段离散变PRI的工作时序,首次通过飞行试验对大斜视聚束变PRI的SAR系统工作方式和处理方法进行了验证。

2 星载斜视聚束SAR

2.1 成像几何

星载斜视聚束SAR的成像几何关系如图1所示,假设卫星轨道为太阳同步近圆轨道,地球半径为RE,轨道高度为H,卫星速度为 V_s ,雷达对地面目标A点进行斜视聚束成像,设聚束起始时刻卫星位于S点,方位时间 $t_a=0$,C点为卫星瞬时位置,E点为卫星聚束扫描结束位置,P点卫星处于对目标正侧视状态,对应最短斜距 R_0 ,此时雷达下视角为 α_0 。聚束起始斜视角为 θ_s ,对应成像最大斜距

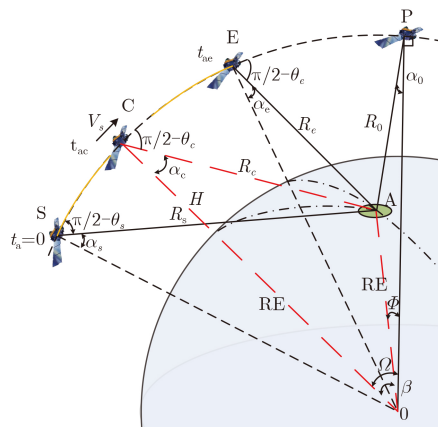


图1 星载斜视聚束SAR成像几何

R_s ; 终止斜视角为 θ_e ,对应成像最小斜距 R_e ;瞬时斜视角为 θ_c ,对应瞬时斜距 R_c 。根据图1中的几何关系:

$$R_c = \sqrt{RE^2 + (RE + H)^2 - 2RE(RE + H)\cos\Omega\cos\Phi} \quad (1)$$

其中, Φ 为卫星在正侧视位置时目标A对应的地心张角, Ω 为卫星瞬时位置相对于正侧视位置在轨道面内的转动张角。根据卫星速度 V_s 和方位向时间 t_a 可得,其中 Ω_s 为聚束开始时刻的初始转动张角。

$$\Omega = \Omega_s - V_s \cdot t_a / (RE + H) \quad (2)$$

得到 R_c 后,根据式(3)进一步求得雷达瞬时下视角 α_c 。

$$\alpha_c = a \cos \left(\frac{R_c^2 + (RE + H)^2 - RE^2}{2R_c(RE + H)} \right) \quad (3)$$

在已知瞬时斜距 R_c 、转动张角 Ω 和正侧视地心角 Φ 时,可求得雷达瞬时斜视角 θ_c 如式(4)^[14]。

$$\sin \theta_c = RE \cos \Phi \sin \Omega / R_c \quad (4)$$

在已知雷达瞬时斜视角 θ_c 和正侧视地心角 Φ 时,可求得转动张角 Ω 如式(5):

$$\cos \Omega = \frac{\sin^2 \theta_c (RE + H) + \left[\cos^2 \Phi \cdot RE^2 - \sin^2 \theta_c \cos^2 \theta_c (RE + H)^2 - \sin^2 \theta_c \cdot RE^2 \right]^{1/2}}{RE \cos \Phi} \quad (5)$$

2.2 距离徙动

星载SAR的距离徙动较大,尤其是在大斜视聚束情况下。SAR系统通常采用固定采集窗口(合成孔径时间内PRF和采样起始时间不变)的数据获取方式,采集数据窗口对应的斜距(或时延)是固定不变的,由于距离徙动的存在,采集数据对应的斜距宽度扣除距离徙动后才有效的成像带宽度。这种数据采集方式采集大量无效数据,导致数据率显著增大。当距离徙动导致采集数据窗口过长,也会出现选不到波位的情况。图2是固定PRI数据采集示

意图,可以看出由于发射盲区的限制,最大连续可观带宽 $W_d < C(PRI - 2T_p) / 2$,数据采集窗为 W_s ,由于距离徙动的存在,有效测绘带宽为 W_r 只占据回波采集到数据的一小部分,其余的斜线阴影部分全是无效数据。下面通过仿真给出星载大斜视聚束的距离徙动对成像带宽和波位选择的影响分析,仿真参数如表1所示。

通过仿真,在固定PRF=1850 Hz情况下,在斜视角45°时,0.5 m和0.1 m分辨率对应的距离徙动分别为60 km和350 km;0.5 m和0.1 m分辨率分

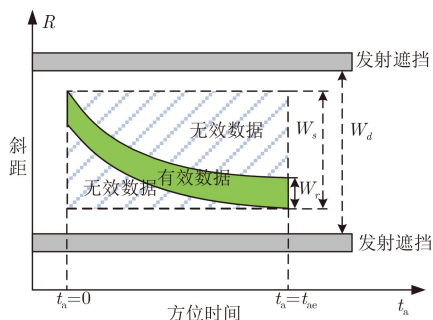


图2 固定PRI数据采集示意图

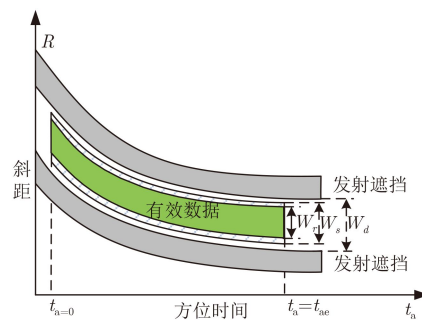


图4 变PRF数据采集示意图

表1 星载SAR仿真参数

参数名称	符号	取值
中心频率	f_c	9600 MHz
卫星高度	H	800 km
卫星速度	V_s	7486 m/s
雷达下视角	α_0	30°
发射脉宽	T_p	20 μ s
天线长度	L_a	10 m
天线高度	L_r	2 m

别在中心斜视角45°时和20°时,有效测绘带宽已经减小到零。大斜视聚束时固定PRI在波位选择时存在的问题如图3所示。在给定聚束起始斜视角 $\theta_s=35^\circ$ 、结束斜视角 $\theta_e=30^\circ$ 下,固定PRF=1850 Hz时,距离徙动对应的雷达等效下视角变化范围将跨越发射或星下点盲区,导致无法选出波位。

3 变PRI设计方法

采用变PRI技术可以有效解决大距离徙动带来的上述问题。这种方法在成像过程中通过调整PRI的值,跟踪有效成像区的斜距(或延时时间)变化,使发射脉冲遮挡区始终沿着有效回波走向进行数据采集,如图4变PRI数据采集所示,等效于拓展了有效测绘带宽和波位选择余地。下面从PRI变化序列设计和斑马图波位选择两方面介绍星载斜视聚束SAR系统变PRI设计方法。另外,由于成像处理过程中会进行去斜(Deramp)处理,所以波位设

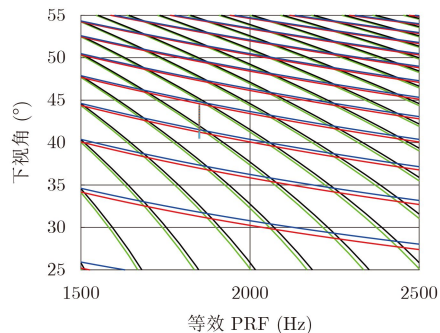


图3 固定PRI波位选择存在的问题

计时PRF的选择只要大于方位场景内波束照射斜视角差引起的多普勒带宽即可。

3.1 PRI变化序列设计

PRI变化序列设计是变PRI体制SAR的核心内容,依据不同的设计原则可以得到不同的变化序列设计结果。按PRI变化规律的不同可分为连续变化、分段连续变化、分段离散变化等;按回波位置不同可分为固定采样起始和不固定采样起始方式。固定采样起始的连续变化方式可以最大限度地消除距离徙动的影响,本文以此为例,给出了一种PRI变化序列的迭代设计方法,该方法也可用于PRI分段连续变化和分段离散变化的情况。

图5示意了变PRI情况下雷达发射、接收、回波延时时间、采样起始时间及各PRI之间的时间关系。上面一串为发射脉冲, N 在合成孔径时间内共发射 N 个脉冲,下面一串为接收脉冲。 $t=0$ 时刻雷达位于起始最大斜距 R_s 处,并发射第1个脉冲,在第 m 个脉冲后收到回波,图中 $\tau_d \approx 2R_s/C$ 为第1个发射脉冲回波信号的延迟时间,由3部分组成。

$$\tau_d = \Delta T_m + T_p + \Delta t \quad (6)$$

其中, ΔT_m 为PRI(1)至PRI($m-1$)之和,对应整周期数时间, T_p 为发射脉宽, Δt 为采样起始。可以得到

$$2R_s/C = \text{PRI}(1) + \text{PRI}(2) + \dots + \text{PRI}(m-1) + T_p + \Delta t \quad (7)$$

同样地,第 k 个发射脉冲应经过 $m-1$ 个PRI后收到,即在第 $k+m-1$ 个发射脉冲后收到回波,并假设第 k 个发射脉冲对应的斜距为 $R_c(k)$,可以得到式(8),其中 $k=1,2,\dots,N-m+1$ 。

$$2R_c(k)/C = \text{PRI}(k) + \text{PRI}(k+1) + \dots + \text{PRI}(k+m-2) + T_p + \Delta t \quad (8)$$

设 $\text{PRI}_m(k)$ 为式(8)中 $m-1$ 个PRI的平均值,则式(8)可写为

$$\text{PRI}_m(k) \cdot (m-1) = 2R_c(k)/C - T_p - \Delta t \quad (9)$$

实际中连续变化的步进非常小,可以认为 $\text{PRI}(k) \approx \text{PRI}_m(k)$,因此可以得到PRI(k)与瞬时斜距的关

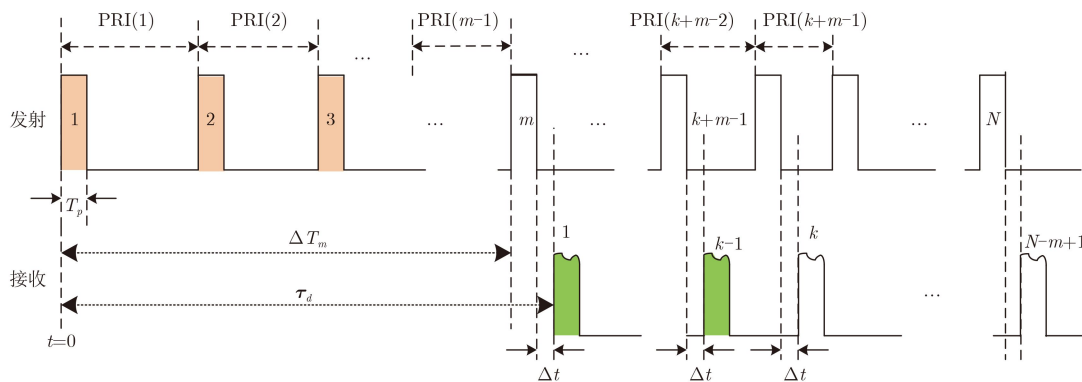


图5 变PRI信号收发时序关系示意图

系如式(10)，也就是说只要知道瞬时斜距 $R_c(k)$ 就可以求得对应的序列值 $PRI(k)$ 。

$$PRI(k) = \frac{2R_c(k)/C - T_p - \Delta t}{m - 1} \quad (10)$$

但实际情况中无法直接确定第 k 个发射脉冲对应的斜距 $R_c(k)$ ，需要采用迭代的方法求解。假设初始的 $PRI(1) = PRI_{ini}$ 是已知的(第3.2节将介绍如何确定初始 PRI_{ini})，求解过程中每次根据上一步求得各PRI值，可以得到当前发射脉冲的发射时间 $t_a(k)$ ，将发射时间代入式(2)即可求得此刻转动张角 Ω ，再将 Ω 代入式(1)即可求得斜距 $R_c(k)$ ，进而可按式(10)求解得到 $PRI(k)$ 的值。其迭代求解步骤如式(11)：

$$\left. \begin{aligned} PRI(2) &= \frac{2R_c(2)/C - T_p - \Delta t}{m - 1}, \\ t_a(2) &= PRI(1) \\ PRI(3) &= \frac{2R_c(3)/C - T_p - \Delta t}{m - 1}, \\ t_a(3) &= PRI(2) + PRI(1) \\ &\vdots \\ PRI(k) &= \frac{2R_c(k)/C - T_p - \Delta t}{m - 1}, \\ t_a(k) &= \sum_{i=1}^{k-1} PRI(i) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

3.2 斑马图波位选择

本节介绍如何确定 PRI_{ini} 以及在斑马图中选择波位，思路是这样的：根据方位向测绘带宽和方位模糊AASR确定最低重频 PRI_{min} ，根据给定的测绘带宽和距离模糊RASR确定最高重频 PRI_{max} 。根据聚束起始和结束斜视角确定雷达等效下视角变化范围(对应距离徙动范围)，按聚束起始等效下视角选择波位，也就是确定初始 PRI_{ini} ，然后按3.1节设计PRI变化序列。并要求设计得到序列的最大 $PRI_{max} < 1/PRI_{min}$ ，最小 $PRI_{min} > 1/PRI_{max}$ 。具体步骤如图6所示。

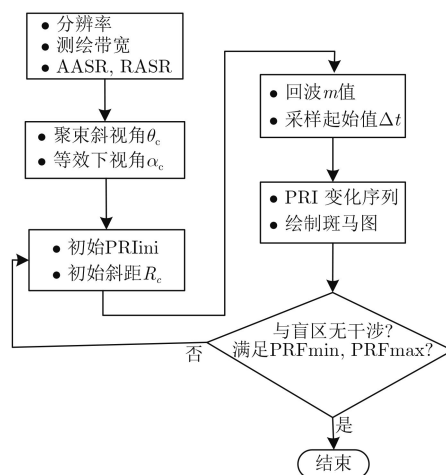


图6 变PRI斑马图设计步骤

根据上述方法设计的波位在斑马图中的表示如图7所示，图中粗黑线的高度代表测绘带宽，PRI的变化用等效PRF表示。设计参数仍如表1，设聚束起始斜视角 $\theta_s=35^\circ$ 、结束斜视角 $\theta_e=30^\circ$ ，计算得距离徙动对应下视角的变化范围为 $44.5^\circ \sim 40.5^\circ$ ，由式(11)得等效PRF变化范围为 $1850 \sim 1985$ Hz。与图3比较，通过变PRI有效解决了波位选择和数据采集效率问题。

如果SAR系统的分辨率要求进一步提高或斜视角进一步增大，距离徙动量有可能超过斑马图菱形

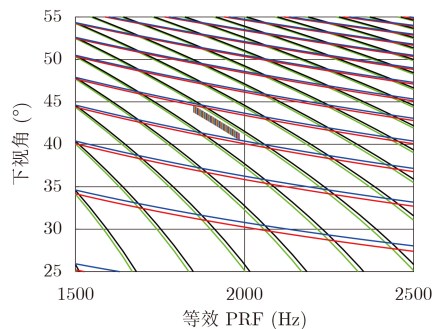


图7 斜视聚束变PRI波位设计

框的最长边, 这样在PRI连续变化的时候仍将无法选到可用波位, 这时可采用分段连续变化的方式设计波位, 如图8所示, 将PRI分为两个连续变化段, 第1段等效PRF从1850 Hz变化到1985 Hz, 第2段等效PRF从1840 Hz变化到1945 Hz, 从而避免了盲区的影响。但这种PRI非连续的跳变将使第1段的最后 m 个脉冲的回波接收出现问题, 可能出现丢脉冲的现象, 丢失数量小于 m 个(m 数量非常小), 可在非均匀采样重建时予以恢复; 还有第1段与第2段的采样起始位置可能不一致, 需要在处理时进行时延补偿。

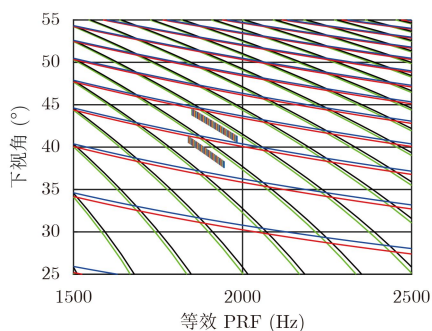


图8 PRI分段连续波位设计

另外, 还可以采用PRI分段离散变化设计, 即将总的PRI变化量分成离散的若干段, 每段内PRI保持恒定, 段与段之间PRI变化, 是对连续变化的一种近似。这样可以降低系统时序设计复杂度和后续数据处理难度。其本质是在数据采集效率与系统复杂度之间折中。在第5节讲到的机载飞行验证中采用的就是这种PRI变化原则。

4 方位非均匀采样的重建

由于方位向回波数据采用变PRI进行采样, 从上面的分析可以看出, 它是一种非周期的非均匀采样。直接利用经典FFT对其进行脉冲压缩结果会出现严重散焦, 如图9所示。传统的针对周期非均的多通道重建方法不再适用^[15]。本文针对连续变PRI序列的特点, 研究了样条插值和非均匀快速傅里叶变换(Non-Uniform Fast Fourier Transform NUFFT)重建方法。仿真基本参数如表1所示, 设起始PRI为540 μ s, 聚束斜视角从起始35°变化到结束25°过程中, 对应PRI从540 μ s变化到476 μ s; 等效PRF从1850 Hz变化到2100 Hz, 多普勒带宽为1490 Hz。

4.1 样条插值重建

样条插值重构算法的基本思路是基于有限的非均匀采样点使用样条函数对被采样信号进行逼近, 然后对逼近函数重采样得到理想的均匀采样信号,

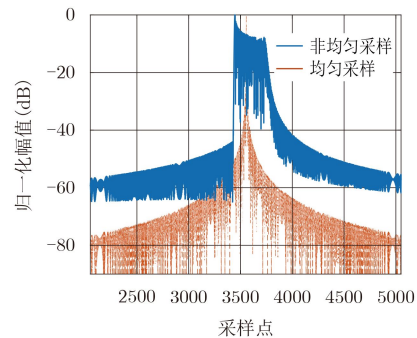


图9 直接FFT处理结果

完成重构。样条函数是指具有一定光滑性的分段多项式, 常用的一类样条函数是3次样条函数, 它在每个子区间内为3次多项式^[16]。

下面给出通过3次样条插值重建的信号频谱和脉冲压缩结果, 如图10所示, 可以看出非均匀采样插值重建后, 对脉冲压缩远端旁瓣影响较大, 有明显集中抬高, 对主瓣和近端旁瓣影响较小, 使主瓣稍微展宽, 近端旁瓣较理想值降低。总之, 插值的重建的精度并不太高, 重建后的信号存在明显的旁瓣误差。

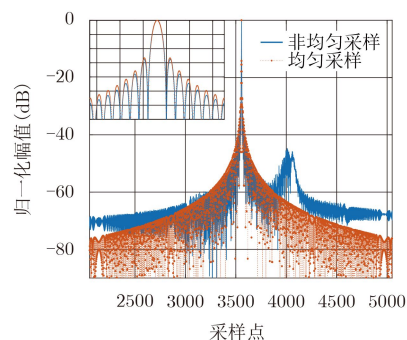


图10 3次样条插值重建结果

4.2 非均匀傅里叶变换

非均匀离散傅里叶变换(Non-Uniform-DFT)可用于处理非均匀采样问题。根据处理问题的不同, 文献^[17]将其可分为5类进行研究, 连续变PRI非均匀采样问题可以归入第1类问题, 即从非均匀采样的时域数据变换到均匀采样的频域数据。其变换公式如下^[17,18]:

$$S(m) = \sum_{n=1}^N s_n \exp\left(\frac{-j2\pi m}{T} t_n\right),$$

$$m = -\frac{M}{2}, -\frac{M}{2} + 1, \dots, +\frac{M}{2} \quad (12)$$

其中, t_n 是非均匀采样点时间位置, s_n 是对应的采样值, T 是采样持续时间, N 是非均匀采样点个数, M 是频域均匀采样点个数, $S(m)$ 是变换得到

的频域信号。式(16)的计算量很大,为 $O(NM)$,因此人们针对该问题发展出了非均匀快速傅里叶变换(NUFFT)。文献[19~21]对多种非均匀快速傅里叶变换的实现方法进行了阐述。利用NUFFT可以很好地解决插值重建中计算量和精度的矛盾。非均匀采样经NUFFT重建后的结果如图11所示,可以看出,NUFFT重建后脉冲压缩主瓣近端和远端均与理想脉冲压缩波形吻合,具有良好的重建效果。

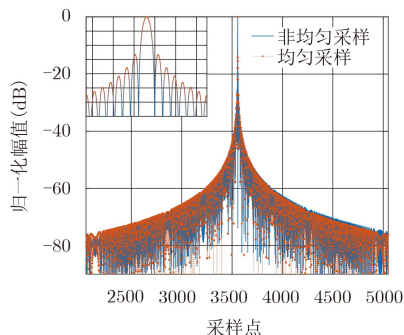


图 11 非均采样NUFFT重建结果

将3次样条插值和NUFFT重建的脉冲压缩指标和时域波形重建均方误差汇总如表2所示。从表2中可以看出NUFFT重建的均方误差比样条插值重建小一个数量级,主瓣展宽、峰值旁瓣比和积分旁瓣比的指标也非常接近理想。

表 2 两种重建方法性能比较

	均匀采样	样条插值重建	NUFFT重建
主瓣展宽比ML	1.00	1.01	1.00
峰值旁瓣比PSLR (dB)	-13.27	-13.82	-13.26
积分旁瓣比ISLR (dB)	-9.72	-10.67	-9.72
均方误差(%)	0.00	0.26	0.0119

综上以上分析可以看出,NUFFT非常适合非均匀采样信号的重建,和比传统的插值方法比具有更高的重建精度,由于采用了快速算法,因此在计算速度上也同样满足要求。

5 机载飞行验证

本节介绍机载飞行试验情况并给出试验结果,这是首次高重频下对大斜视变PRI技术的机载飞行试验验证,获取了变PRI采样的回波数据并完成了数据处理。

5.1 机载工作模式设计

为了验证星载大斜视变PRI的工作模式,设计了机载试验系统。工作频率X波段,信号带宽600 MHz,天线具有2维大扫描能力,聚束角范围 $\pm 45^\circ$,采用3.2节讲到的PRI分段离散变化原则,设计PRI变化

序列,对应等效PRF变化范围11104~13810 Hz,共分为9段变化。选择高重频的目的是模拟大斜视星载信号收发时序关系。从两个方面实现了对星载的模拟:一方面是对大距离徙动下回波超出最大连续可观测带的模拟;另一方面是对星载隔脉冲接收回波工作方式的模拟。

根据机载设计参数,固定PRI回波斜距历程和变PRI后的回波特征对比如图12所示,可以看到经过变PRI采样,数据采集所需窗口宽度明显减小,冗余数据量明显减少。由于PRI分段离散变化,所以回波在每一个子块内仍有距离徙动现象,造成时间不连续,呈现锯齿状,这需要在处理时补偿。

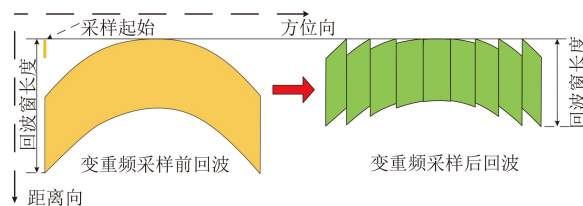


图 12 机载9块变PRI回波数据采集示意图

5.2 试验结果

机载系统通过地面暗室闭环测试获取了系统的参考函数,用于误差系统补偿。变PRI机载飞行试验结果如图13所示。图13(a)为接收机采集的 $\pm 45^\circ$ 回波数据,可以看到经过变PRI采样,数据采集所需的回波窗宽度较回波总历程时间明显减小,冗余数据量降低。由于PRI分段离散变化,所以回波在每一个子块内仍有距离徙动现象,造成时间不连续,呈现锯齿状,这需要在处理时补偿。图13(b)为扫描角度 $17^\circ \sim 23^\circ$ 的回波跳变细节,对应PRI由13289 Hz跳变到12393 Hz。图13(c)为跳变时延校正后的回波信号,可以看到校正后回波变化恢复连续。图13(d)为未进行跳变延迟校正和方位向非均匀采样重建的处理结果,图像存在较严重散焦现象。图13(e)为经过距离校正和方位向非均匀采样NUFFT重建后的处理结果,可以看到图像得到了良好聚焦。上述结果表明,SAR系统的变PRI设计方法合理,获得的试验数据有效,数据处理算法得到验证。

6 结束语

星载大斜视聚束SAR中大距离徙动带来的回波数据采集及波位选择难题可以通过变PRI技术来解决,本文根据星载成像几何,提出了一种PRI连续变化序列设计方法和波位设计方法。根据PRI变化序列非周期非均匀采样的特点,比较了样条插值和NUFFT两种方位向信号重建方法,NUFFT方法具

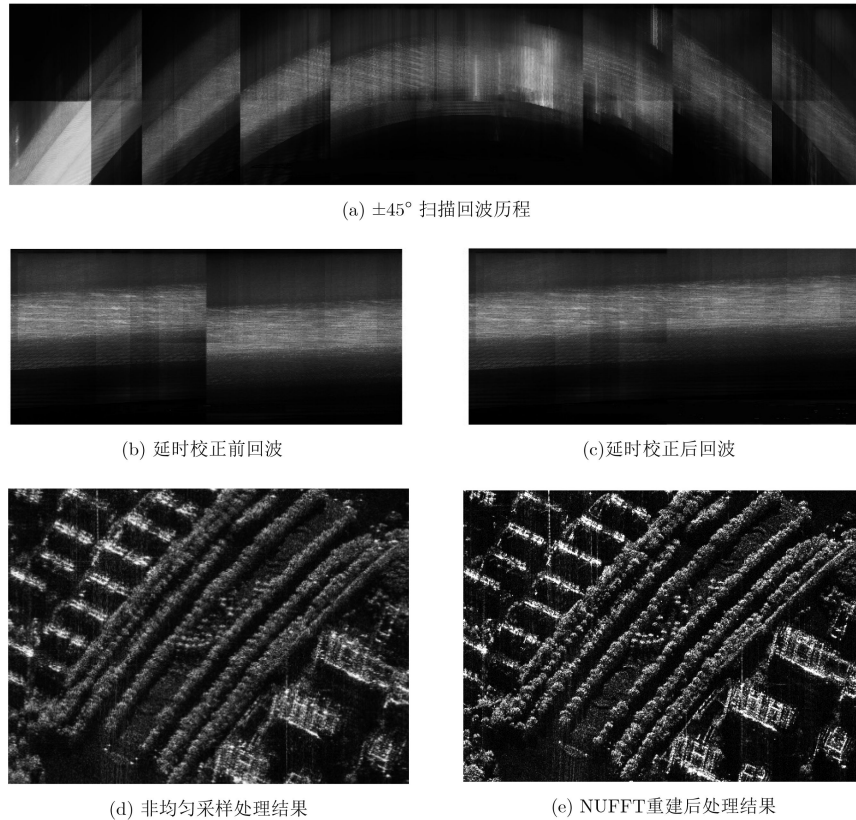


图 13 变PRI机载飞行试验结果
(数据来源: 中国科学院电子学研究所航天微波遥感系统部)

有较高的精度。最后给出了机载飞行试验的验证结果, 首次获得了机载SAR隔脉冲接收回波的变PRI数据, 对其工作模式及数据处理方法进行了验证, 表明了变PRI技术的可行性和有效性。后续进一步的研究工作包括, 分析变PRI序列定时误差对SAR系统的影响, 开展连续变PRI情况的机载试验及处理算法研究。

参考文献

- [1] 袁孝康. 星载合成孔径雷达导论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 157–163.
YUAN Xiaokang. Introduce to the Spaceborne Synthetic Aperture Radar[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003: 157–163.
- [2] 邓云凯, 赵凤军, 王宇. 星载SAR技术的发展趋势及应用浅析[J]. 雷达学报, 2012, 1(1): 1–10. doi: [10.3724/SP.J.1300.2012.20015](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20015).
DENG Yunkai, ZHAO Fengjun, and WANG Yu. Brief analysis on the development and application of spaceborne SAR[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(1): 1–10. doi: [10.3724/SP.J.1300.2012.20015](https://doi.org/10.3724/SP.J.1300.2012.20015).
- [3] 李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载SAR技术的现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 229–240. doi: [10.11999/JEIT151116](https://doi.org/10.11999/JEIT151116).
LI Chunsheng, WANG Weijie, WANG Pengbo, *et al.* Current situation and development trends of spaceborne SAR technology[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2016, 38(1): 229–240. doi: [10.11999/JEIT151116](https://doi.org/10.11999/JEIT151116).
- [4] CARRARA W G, GOODMAN R S, and MAJEWSKI R M. Spotlight synthetic aperture radar: Signal processing Algorithms[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial physics*, 1995, 59(5): 597–598.
- [5] WANG Pengbo, LIU Wei, CHEN Jie, *et al.* A raster scan SAR system for ultra-wide swath imaging[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(9): 833–842. doi: [10.1080/2150704X.2014.971904](https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.971904).
- [6] NAFTALY U and NATHANSOHN R L. Overview of the TECSAR satellite hardware and Mosaic mode[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 423–426. doi: [10.1109/LGRS.2008.915926](https://doi.org/10.1109/LGRS.2008.915926).
- [7] 罗绣莲, 徐伟, 郭磊. 捷变PRF技术在斜视聚束SAR中的应用[J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 70–77. doi: [10.12000/JR14149](https://doi.org/10.12000/JR14149).
LUO Xiulian, XU Wei, and GUO Lei. The application of PRF variation to squint spotlight SAR[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 70–77. doi: [10.12000/JR14149](https://doi.org/10.12000/JR14149).
- [8] GEBERT N and KRIEGER G. Ultra-wide swath SAR imaging with continuous PRF variation[C]. European

- Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Aachen, Germany, 2010: 966–969.
- [9] ALMEIDA F, YOUNIS M, KRIEGER G, *et al.* Multichannel staggered SAR azimuth processing[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 5(56): 2772–2788. doi: [10.1109/TGRS.2017.2783444](https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2783444).
- [10] VILLANO M, KRIEGER G, and MOREIRA A. Staggered-SAR: A new concept for high-resolution wide-swath imaging[C]. IEEE Gold Remote Sensing Conference, Rome, Italy, 2012: 1–3.
- [11] VILLANO M, KRIEGER G, and MOREIRA A. Staggered-SAR for high resolution wide-swath imaging[C]. IET International Conference on Radar Systems, Glasgow, UK, 2012: 1–6. doi: [10.1049/cp.2012.1600](https://doi.org/10.1049/cp.2012.1600).
- [12] VILLANO M, KRIEGER G, and MOREIRA A. Staggered SAR: Highresolution wide-swath imaging by continuous PRI variation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4462–4479. doi: [10.1109/TGRS.2013.2282192](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2282192).
- [13] ZENG H, CHEN Jie, YANG Wei, *et al.* Image formation algorithm for highly-squint strip-map SAR onboard high-speed platform using continuous PRF variation[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Quebec City, Canada, 2014: 1117–1120. doi: [10.1109/IGARSS.2014.6946625](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946625).
- [14] 高祥武. 星载聚束模式合成孔径雷达系统研究[D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2004: 13–18, 26–30.
GAO Xiangwu. Study on spaceborne spotlight synthetic aperture radar system[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 13–18, 26–30.
- [15] 齐伟孔. 基于数字波束形成和多发多收的星载合成孔径雷达系统及其信号处理研究[D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2010: 77–83.
QI Weikong. Study on spaceborne synthetic aperture radar system and signal processing based on digital beamforming and multiple-input multiple-output[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics Chinese Academy of Sciences, 2010: 77–83.
- [16] 连剑. 非均匀采样信号重构技术及应用研究[D]. [硕士论文], 哈尔滨工业大学, 2011: 28–37.
LIAN Jian. Research on reconstruction and application of nonuniformly sampled signals[D]. [Master dissertation], Harbin Institute of Technology, 2011: 28–37.
- [17] GREENGARD L and LEE J. Accelerating the nonuniform fast fourier transform[J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2004, 46(3): 443–454.
- [18] SUBIZA B, GIMENO-NIEVES E, and LOPEZ-SANCHEZ J M. An approach to SAR imaging by means of non-uniform FFT's[C]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003: 4089–4091. doi: [10.1109/IGARSS.2003.1295371](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2003.1295371).
- [19] HWANG J, CHO S, MOON J, *et al.* Nonuniform DFT based on nonequispaced sampling[C]. Wseas International Conference on Signal, Corfu, Greece, 2005: 11–16.
- [20] FESSLER JA and SUTTON BP. Nonuniform fast fourier transforms using min-max interpolation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2003, 51(2): 560–574. doi: [10.1109/TSP.2002.807005](https://doi.org/10.1109/TSP.2002.807005).
- [21] SOUMEKH M. Band-limited interpolation from unevenly spaced sampled data[J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1988, 36(1): 110–122. doi: [10.1109/29.1497](https://doi.org/10.1109/29.1497).
- 王 沛: 男, 1977年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为合成孔径雷达系统及其信号产生。
徐 伟: 男, 1984年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为新体制合成孔径雷达系统设计及信号处理。
李 宁: 男, 1987年生, 教授, 研究方向为多模式SAR信号处理。
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信号处理技术。