

单相位中心多波束合成孔径雷达方位信号处理研究

李世强^{***} 杨汝良^{*}

^{*}(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^{**}(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 采用单相位中心多波束(SPCMB)技术是实现高分辨率宽测绘带合成孔径雷达系统的一种技术途径。该文介绍了 SPCMB 技术的原理,给出了这种模式的系统模型和信号特征,提出了方位向信号处理的方法,并利用星载点目标仿真和机载原始数据模拟的方法验证了该信号处理方法的可行性。

关键词: 信号处理, 星载合成孔径雷达(SAR), 高分辨率宽测绘带, 单相位中心多波束(SPCMB)

中图分类号: TN957.51 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2005)07-1073-04

Study on Azimuth Signal Processing of Single Phase Center Multiple Beams Synthetic Aperture Radar

Li Shi-qiang^{***} Yang Ru-liang^{*}

^{*}(Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^{**}(Graduate School, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Single Phase Center Multiple Beams(SPCMB) technique is one of solutions to implement high resolution wide swath spaceborne synthetic aperture radar systems. The system model and signal characteristics are described based on the introduction to the principle of single phase center multiple beams technique in the paper. A method of azimuth signal processing is presented, and is proved by spaceborne point-target simulation and airborne raw data simulation.

Key words Signal processing, Spaceborne Synthetic Aperture Radar(SAR), High resolution wide swath, Single Phase Center Multiple Beams(SPCMB)

1 引言

合成孔径雷达(SAR)能够全天候全天时地实现对地球表面的观测,获得地面目标的高分辨率图像,因而成为军用及民用领域有效的监视手段。星载合成孔径雷达系统设计中的一个基本限制是测绘带宽和方位分辨率之间的矛盾,在常规单波束星载合成孔径雷达的系统设计中,需要在测绘带宽与方位分辨率之间折中^[1]。

如果既要在距离向获得较宽的测绘带,又要在方位向获得较高的分辨率,就要考虑采用非常规的工作方式。一种思路是在不提高系统脉冲重复频率的情况下,获得比常规 SAR 更宽的方位带宽,同时又确保回波信号具有适当的采样率。基于这种思路,可采用单相位中心多波束(SPCMB)SAR 的概念^[2,3]。本文在介绍 SPCMB SAR 概念的基础上,给出了这种模式的系统模型,分析了它的信号特性,提出了其方位向信号处理方法,并利用星载点目标模拟和机载原始数据仿真的方法验证了该信号处理方法的可行性,为工程设计提供了参考。

2 SPCMB SAR 的系统模型与信号特征

SPCMB 技术的基本原理是在雷达天线的方位向产生多个具有共同相位中心的相邻子波束(以 N_B 表示子波束数),这些子波束具有不同的斜视角,利用 N_B 个独立的接收通道接收回波。对每一发射脉冲有 N_B 组回波,这 N_B 组回波数据按照雷达的瞬时方位位置的先后顺序排列,相当于按瞬时多普勒频率排列,由于各子波束的相对斜视角是预先已知的,可据此计算得到各子波束的多普勒中心频率。

回波信号的采样只要满足各子波束对应的 Nyquist 率即可,虽然每个子波束的回波信号经方位向采样后其频谱会折叠到零多普勒频率附近,但利用已知的各子波束的实际多普勒中心频率,可在数据处理过程中将回波数据恢复到其实际频谱位置。经频率校正后,各子波束回波数据可进行合成得到较每个子波束扩大 N_B 倍的多普勒带宽。利用合成后的回波数据进行方位压缩,可使方位分辨率提高 N_B 倍。因此采用多个方位波束,在不提高系统工作脉冲重复频率的前提

下,可使方位分辨率提高一个约等于波束数的倍数^[2-4]。图1示出了 SPCMB SAR 工作的示意图。

为了考察各波束的距离历程,进而研究各波束回波信号特征,图2给出了 SPCMB SAR 的距离模型。以三波束情况为例,中间波束为正侧视波束,左侧波束为前斜视波束,右侧波束为后斜视波束,斜视角均为 θ ^[5],各波束彼此邻接意味着相邻波束的半功率点在同一方向上。对于长为 D 的天线,中间波束的宽度为 λ/D ,两侧波束宽度为 $\lambda/(D\cos\theta)$ 。

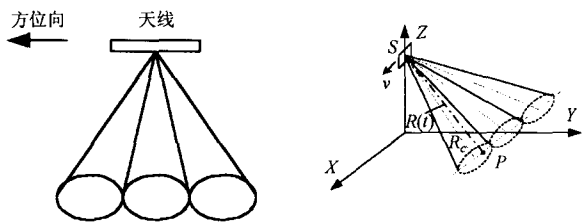


图1 SPCMB SAR 示意图

图2 SPCMB SAR 距离模型

以左波束为例说明 SPCMB SAR 的距离方程。图2中在左波束照射区有一点目标 P , 设 $t=0$ 时刻该点目标位于波束中心, 则该点目标到雷达的斜距可表示成^[4]:

$$R(t) = \sqrt{R_c^2 + v_{st}^2 t^2 - 2R_c v_{st} t \sin\theta} \approx R_c - v_{st} t \sin\theta + \frac{v_{st}^2 t^2 \cos^2\theta}{2R_c} \quad (1)$$

其中 R_c 为 $t=0$ 时点目标到雷达斜距, v_{st} 为卫星相对于地面点目标的运动速度。回波信号的瞬时多普勒频率为

$$f_d(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left[-\frac{4\pi}{\lambda} R(t) \right] = \frac{2}{\lambda} \left(v_{st} \sin\theta - \frac{v_{st}^2 \cos^2\theta}{R_c} t \right) \quad (2)$$

其中 λ 为雷达工作波长。左波束回波信号的多普勒中心和多普勒斜率分别为

$$f_{dcL} = \frac{2}{\lambda} v_{st} \sin\theta, \quad f_{drL} = -\frac{2}{\lambda R_c} v_{st}^2 \cos^2\theta \quad (3)$$

相应地左波束回波多普勒带宽为

$$B_{aL} = 2v_{st} \cos\theta / D \quad (4)$$

改变斜视角 θ 的值可分别得到中间波束和右侧波束的回波信号特性:

中间波束

$$f_{dcM} = 0, \quad f_{drM} = -\frac{2v_{st}^2}{\lambda R_c}, \quad B_{aM} = \frac{2v_{st}}{D} \quad (5)$$

右波束

$$f_{dcR} = -\frac{2}{\lambda} v_{st} \sin\theta, \quad f_{drR} = -\frac{2}{\lambda R_c} v_{st}^2 \cos^2\theta, \quad B_{aR} = \frac{2v_{st} \cos\theta}{D} \quad (6)$$

由于斜视角一般都很小, 有: $f_{drL} \approx f_{drM} \approx f_{drR}$, $B_{aL} \approx B_{aM} \approx B_{aR}$, 并且 $f_{dcL} - f_{dcM} = f_{dcM} - f_{dcR} \approx B_{aM}$, 即相邻波束多普勒中心

之差约为每一子波束的多普勒带宽。各波束回波信号的瞬时多普勒频率与信号频谱分布如图3所示。

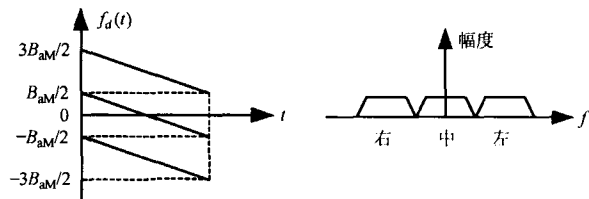


图3 SPCMB SAR 各波束瞬时多普勒频率及频谱分布

3 SPCMB SAR 方位信号处理

由 SPCMB SAR 的工作原理可知, 距离向回波与常规单波束系统的一样, 在成像处理前无需特殊处理; 而方位向回波在成像处理前, 需首先将各子波束回波数据合成, 形成多普勒带宽展宽 N_B (波束数) 倍的回波数据。

在卫星平台飞行过程中, SPCMB SAR 系统的各子波束同时接收回波, 由于各子波束斜视角的不同, 得到的方位向回波信号在频谱上也分别处于不同位置。对于星载 SAR 来说, 由于地球自转效应的影响, 即使对于中间正侧视波束, 其回波的方位多普勒中心也不为 0^[6,7]。

各子波束的方位频谱经 PRF 采样后周期延拓, 使它们在频率轴上彼此部分重叠, 为了得到较高的方位分辨率, 在方位压缩前必须将各子波束频谱拼接起来形成较宽的方位谱, 同时为了保证方位回波信号得到正确采样, 方位向采样频率也应提高 N_B 倍, 这可通过信号处理的方法实现^[8]。

仍以三波束情况为例说明这一信号处理过程。

方位信号处理需要在频域进行。假设卫星运行轨道倾角大于 90° 时, 天线右侧视情况下北半球回波多普勒中心为负。多普勒中心频率可由卫星位置、地面点目标位置以及卫星飞行速度等参数根据下式求得^[6]:

$$f_{dc} = [-2/(\lambda R_c)] [V \cdot (R_s - R_t) + \omega_e \cdot (R_s \times R_t)] \quad (7)$$

其中 R_c 为雷达到地面点目标的最近斜距, V 为卫星速度矢量, R_s 为惯性坐标系下卫星位置矢量, R_t 为地面点目标位置矢量, ω_e 为地球自转角速度矢量。左、中、右 3 个波束方位频谱的实际位置分别如图 4(a) 中的单斜线阴影部分, 经 PRF 在方位向采样后周期延拓。要合成获得方位高分辨率所需的宽频谱, 可采用带通滤波器选出各子波束的实际方位频谱成分而后直接相加即可, 即 3 个子波束回波数据合成的处理过程可在频域进行。为了提高处理速度, 可利用 FFT 处理, 注意到 FFT 计算的直接结果是信号位于零频和采样频率之间的频谱, 因此 3 个波束回波数据合成的处理过程就是利用 $0 \sim N_B \cdot \text{PRF}$ 之间的各波束频谱拼成合成波束的 $0 \sim N_B \cdot \text{PRF}$ 之间的

频谱。这一处理过程的步骤如下：

首先将各波束回波数据进行方位向 FFT 变换，得到各波束回波的 0~PRF 之间的频谱，经一系列移频、滤波等处理后合成为展宽后的方位频谱如图 4(b)所示，将合成后的方位频谱进行 IFFT 变换得到一个距离门内的合成后的时域方位回波数据。对每一距离门的回波数据重复以上步骤，完成 3 个波束回波数据的合成。

利用以上合成后的数据就可进行压缩处理生成图像，注意构造方位参考函数时用到的脉冲重复频率为等效脉冲重复频率 $PRF_e = N_B \cdot PRF$ 。

综合以上过程可知，三波束情况下雷达系统模型如图 5 所示。

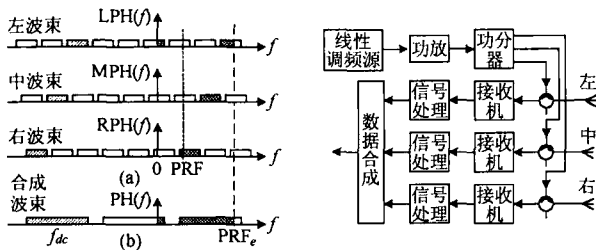


图 4 各波束合成示意图 图 5 三波束情况下雷达系统模型

4 SPCMB 方位信号处理实例

4.1 星载点目标模拟

根据以上思路首先进行星载 SAR 点目标模拟，验证本文信号处理方法的可行性。考虑三波束情况，雷达基本参数为：轨道高度 $H=450\text{km}$ ，近地点辐角为 90° ，轨道倾角为 98.55° ，升交点赤径为 89.37° ，工作频段为 S 波段，波长 $\lambda = 0.09375\text{m}$ ，天线方位向长度 $D=12\text{m}$ ，天线视角为 35° ，采用均匀加权，发射脉冲重复频率为 $PRF=1500\text{Hz}$ ，对应的等效脉冲重复频率为 $PRF_e=4500\text{Hz}$ ，利用式(7)计算多普勒中心频率为 $f_{dc} = f_{dcM} = -5966.7\text{Hz}$ 。

根据以上参数，在计算机上进行了三波束情况的模拟，左、中、右 3 个波束的方位频谱分别如图 6(a), 6(b), 6(c)所示；用前面提出的信号处理方法将 3 个波束数据合成，合成后的方位频谱如图 6(d)所示。方位压缩后得到点目标的方位响应

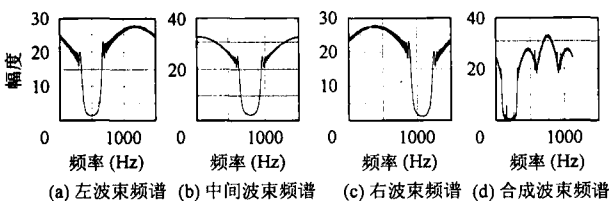


图 6 SPCMB SAR 各波束频谱及合成频谱

如图 7(a)所示，图 7(b)给出了同样天线长度的单波束方位响应，以供比较。

经过分析，三波束合成后方位响应的 4dB 主瓣宽度对应的方位距离为 2m，单波束情况下约为 6m，因而 SPCMB SAR 的方位分辨率比常规 SAR 提高了等于波束数的倍数。

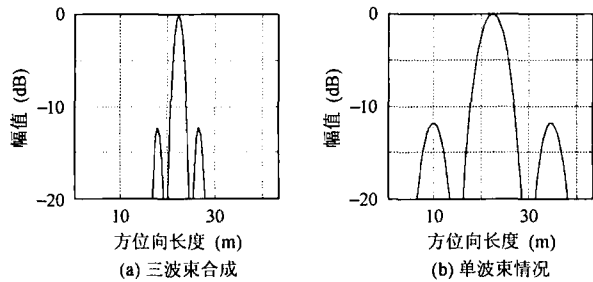


图 7 单波束及三波束合成后的点目标方位响应

4.2 机载原始数据处理实例

由于目前还没有 SPCMB SAR 系统投入实际运行，无法得到真实的 SPCMB SAR 原始数据。本文的方位信号处理方法是基于合成孔径雷达回波信号的方位频谱特性提出的，只要得到了平台运动参数和各子波束的相对斜视角，就可估计出各子波束回波的多普勒中心频率，并可利用本文的信号处理方法完成方位压缩前的信号处理，而和雷达平台是飞机或卫星没有关系。

为了验证本文提出的信号处理方法对面目标的适用性，我们利用了中国科学院电子学研究所研制的某机载常规单波束合成孔径雷达原始数据。为了避免后续频域处理引起混叠现象，首先将机载原始数据进行方位预滤波，然后将得到的数据通过 3 个带宽为方位带宽的 1/3 的带通滤波器，得到 3 组数据分别代表 3 个波束的回波数据，之后按本文的信号处理方法处理后成像。

该机载合成孔径雷达工作于 X 波段，图 8(a)为利用一个波束数据成像结果，图 8(b)是将 3 个波束数据合成后的成像结果。

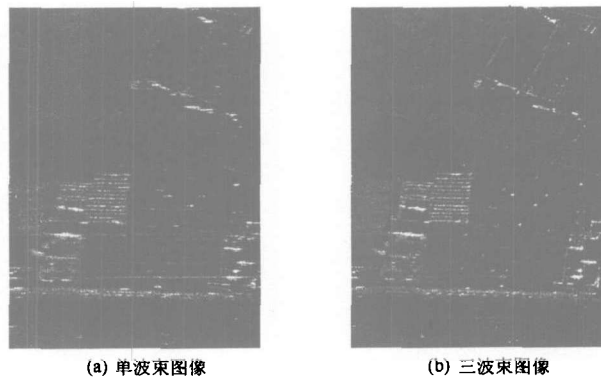


图 8 机载数据模拟仿真成像结果

为了便于比较两幅图像的质量,应使两幅图像的像素量一样多,为此在对单个波束数据成像时,在其方位多普勒带宽之外补零,方位压缩时处理的多普勒带宽与三波束合成后的带宽一样。图8中横轴为方位向,纵轴为距离向,由图8可以看出,虽然两幅图像的像素量一样,但单波束图像明显要比三波束合成后的图像模糊。在图8(a),8(b)中分别读出包含同一点目标的方位向数据,画出它们的方位向响应如图9(a),9(b)所示,由图9可以测出,三波束合成后的方位分辨率约为2.5m,而单波束情况的方位分辨率约为7.5m。

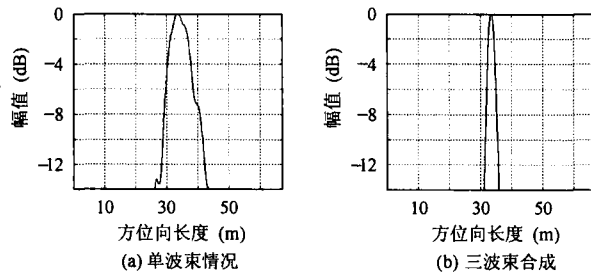


图9 图8中点目标的方位响应

5 结束语

采用单相位中心多波束技术,在方位向采用多个子波束,可在不提高系统工作脉冲重复频率的条件下,增加方位多普勒带宽,获得方位向高分辨率,是实现高分辨率宽测绘带星载合成孔径雷达的一种新思路。本文在介绍单相位中心多波束原理的基础上,提出了单相位中心多波束合成孔径雷达方位向信号处理方法,星载点目标模拟和机载原始数据仿真的结果证明该信号处理方法是可行的。

参考文献

- [1] Freeman A, Johnson W T K, Huneycutt B, *et al.*. The "Myth" of the minimum SAR antenna area constraint. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 2000, 38(1): 320 – 324.
- [2] Currie A, Hall C D. A synthetic aperture radar technique for the simultaneous provision of high-resolution wide-swath coverage. *Conf. Proc. Military Microwaves'90. Microwave Exhibitions & Publishers Ltd., London, July, 1990: 539 – 544.*
- [3] Currie A, Brown M A. Wide-swath SAR. *IEE Proc.-F*. 1992, 139(2): 122 – 135.
- [4] [日]藤坂贵彦著,王淑兰译.方位向高分辨力宽测绘带的多波束合成孔径雷达. *空载雷达*, 2000, (4): 36 – 44.
- [5] Davidson G W, Cumming I. Signal properties of spaceborne squint-mode SAR. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sensing*, 1997, 35(3): 611 – 617.
- [6] Curlander J C, McDonough R N. *Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing*. New York, John Wiley & Sons, Inc. 1991: 565 – 590.
- [7] 陈芳允,贾乃华. *卫星测控手册*. 北京: 科学出版社, 1992: 89 – 96.
- [8] 禹卫东. 用分布式小卫星提高星载 SAR 的方位向分辨率. *系统工程与电子技术*, 2002, 24(7): 43 – 45, 122.

李世强: 男, 1967年生, 博士生, 研究方向为高分辨率宽测绘带合成孔径雷达。

杨汝良: 男, 1943年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为星载、机载合成孔径雷达系统。