

## PRF 可变的星载方位向多相位中心多波束 SAR

赵伟\*\*\* 宋红军\*

\*(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:** 方位向多相位中心多波束(DPCA)SAR 可以解决测绘带宽和分辨率之间的矛盾,但严格限制了对脉冲重复频率(PRF)的选择。该文分析了方位向信号的频谱,给出了当 PRF 偏离理想值时均匀采样方位谱的重构方法,提出了 PRF 可变的 DPCA 模式。计算机仿真验证了新模式的正确性。

**关键字:** 合成孔径雷达(SAR), 多波束, 宽测绘带, 高分辨率, 非均匀采样

**中图分类号:** TN958      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-5896(2005)06-0936-03

## Displaced Phase Centers Multibeam in Azimuth with PRF Alterable Mode of Spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR)

Zhao Wei\*\*\* Song Hong-jun\*

\*(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

\*\* (Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract** SAR with Displaced Phase Centers multibeam in Azimuth (DPCA) can solve the confliction between swath width and resolution, but this mode is one Pulse Repetition Frequency (PRF) restriction. In this paper, the spectrum of the signal in the azimuth direction is analyzed, and the reconstruction method of the uniform spectrum in azimuth is given when PRF deviated from the ideal PRF. DPCA with PRF alterable mode is introduced. The simulation of point target is used to analyze the effect of this new method.

**Key words** SAR, Multibeam, Wide swath, High resolution, Nonuniform sampling

### 1 引言

宽测绘带和高分辨率是星载 SAR 的发展趋势,而传统模式如条带式(Stripmap)、波束扫描式(ScanSAR)和聚束式(Spotlight),不能同时满足这两方面的要求。方位向多相位中心多波束(DPCA)模式<sup>[1]</sup>采用方位向一发多收形式,将方位向的实际采样率提高为脉冲重复频率(PRF)的几倍,在实现宽测绘带(对应低的 PRF)的同时,提高了方位向分辨率。

在星载条件下为避开星下点回波和发射脉冲窗口,固定 PRF 对应的地面测绘区将是不连续的,所以一般使用多个 PRF 来实现测绘带的连续覆盖。但遗憾的是,DPCA 模式严格限制了 PRF 的选择,不能实现测绘带的连续覆盖。同时,该模式下天线与 PRF 的严格对应关系严重束缚了天线尺寸及 PRF 的设计和选择。另外,系统在方位向都要求有一定的过采样率以消除方位向模糊,PRF 固定也就固定了方位向过采样率,这样,当方位向模糊比较大时,也不能通过提高 PRF 来改善方位向模糊。由此可见,如果能突破对 PRF 的严格限制,将使系统运行方式、系统设计以及系统运行的灵活性等方面得到很大的改善。

该文在对 DPCA 模式研究的基础上,提出 PRF 可变的 DPCA 模式,解决了原有模式不能实现测绘带连续覆盖的问题。

### 2 理论分析

#### 2.1 DPCA 介绍及其缺陷分析

为了突破 PRF 对测绘带宽和方位向分辨率的限制,Currie 等提出 DPCA 模式<sup>[1]</sup>。在这种模式下,整个天线在方位向是由两个或者多个子孔径天线组成的,每个子孔径天线都有一个相位中心用于接收信号。以 3 个相位中心为例,为了便于分析,按照相位中心的位置分布,把 3 个相位中心分别称为左相位中心、中相位中心和右相位中心,左、右相位中心关于中相位中心对称。

如图 1 所示,中相位中心发射一个波束,3 个相位中心同时接收。将回波信号的波束历程分为发射和接收两个部分。中相位中心的回波信号发射波束历程是从中相位中心到目标点,接收波束历程则为从目标点到中相位中心。左、右相位中心的回波信号发射波束历程与中相位中心相同,接收波束历程则分别为从目标点到各自的相位中心。

由于卫星和目标点之间的距离远大于天线尺寸,这样

左、右相位中心接收到的回波信号实际上等效于在各自的相位中心和中相位中心的中间位置发射和接收脉冲。图 2 是等效左相位中心的示意图。这样,在一个脉冲时间内,实际上相当于在左、中、右 3 个等效相位中心分别进行了采样,从而使得方位向的实际采样率为 PRF 的 3 倍,参看图 3。

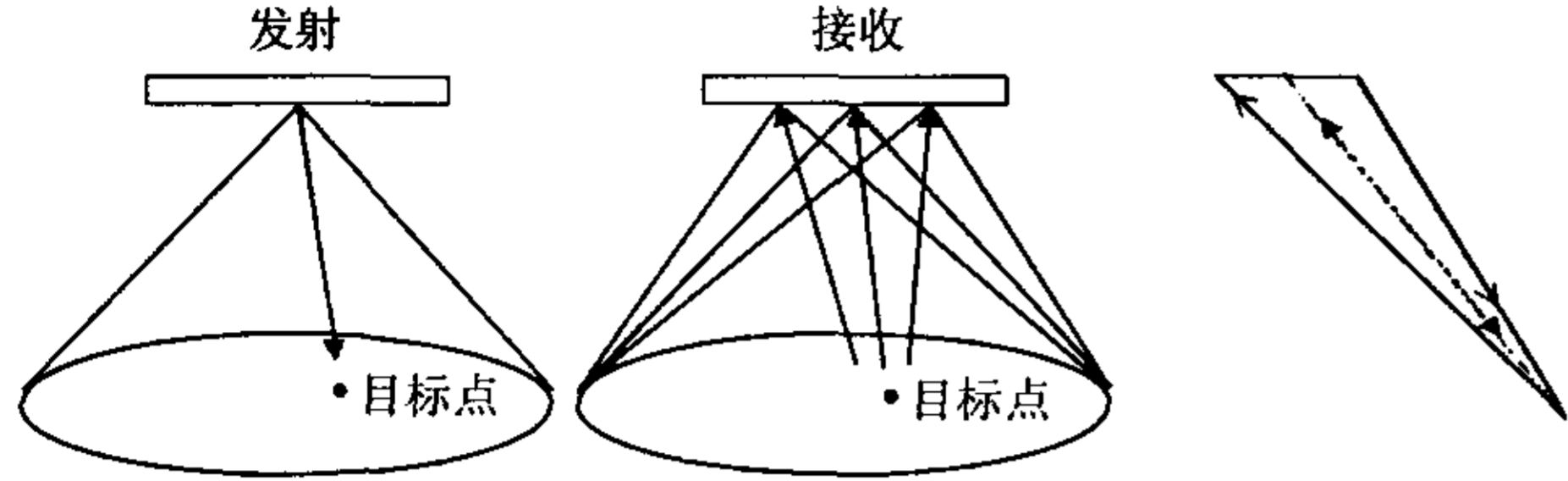


图 1 方位向 3 个相位中心发射和接收示意图

图 2 等效相位中心示意图

由于同样方位分辨率要求下, PRF 可以降至 1/3, 所以可以显著地提高测绘带宽。但遗憾的是, 其只能工作在理想的 PRF 下, 在星载条件下很难实现测绘带的连续覆盖。设天线方位向长为  $D$ , 天线相位中心分别位于  $D/6, D/2, 5D/6$  处, 由上面的分析可知, 其等效相位中心分别位于  $D/3, D/2, 2D/3$  处, 采样间隔为  $D/6$ 。当天线在一个脉冲重复频率内移动距离为  $D/2$  时, 后一位置的第一个等效相位中心与前一位置的最后一个等效相位中心的间隔也是  $D/6$ , 这时采样是均匀的, 这是一种理想情况。实际上, 对于一个已经设计好的天线, 其相位中心之间的距离是固定的, 对某一特定的卫星飞行速度  $v$ , 满足均匀采样的脉冲重复频率只有一个, 为

$$PRF_u = v/(D/2) \quad (1)$$

当 PRF 值偏离  $PRF_u$  时, 比如若取为  $v/(7D/12)$ , 如图 3 所示, 这时后一个位置的第一个等效相位中心与前一位置的最后一个等效相位中心的间隔变为  $D/4$ , 这样采样间隔的分布变为  $D/6, D/6, D/4, D/6, D/6$ , 显然已不是均匀采样了。

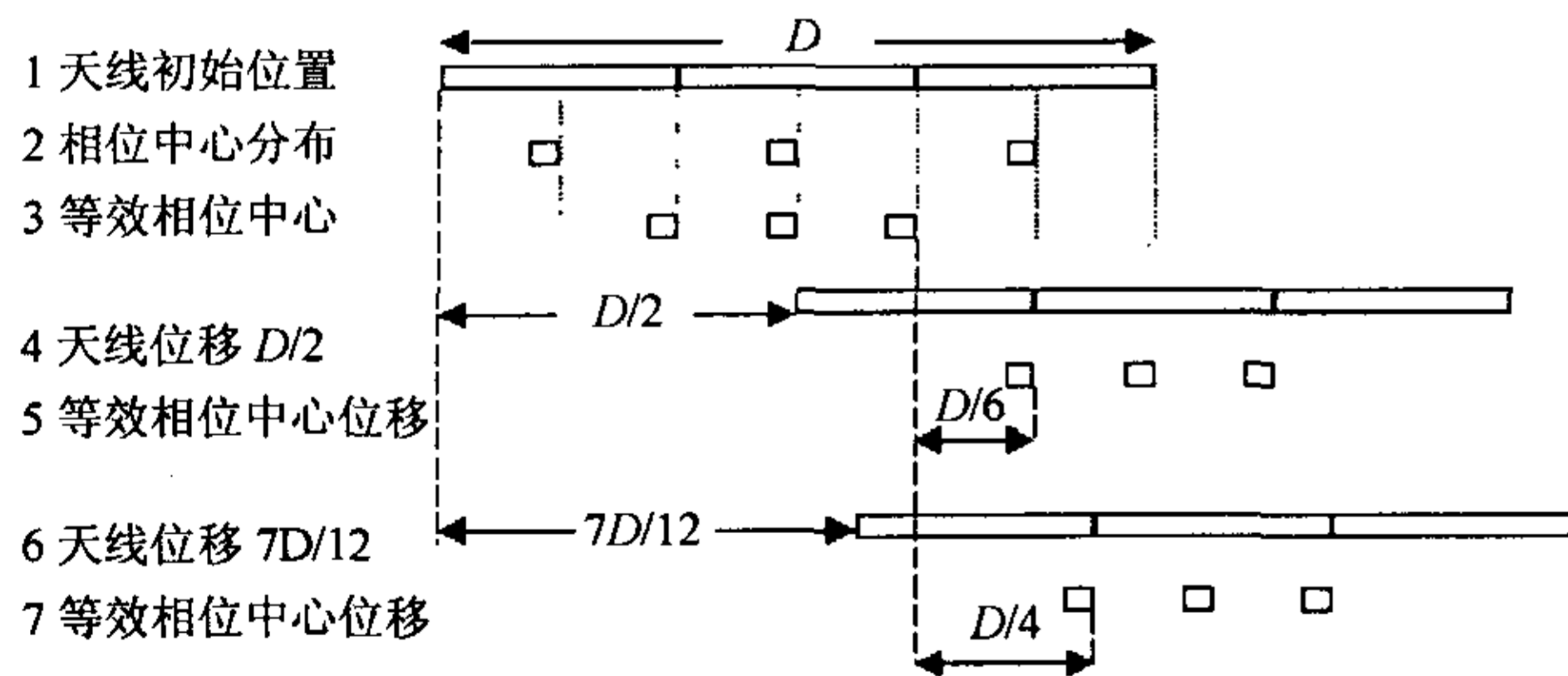


图 3 非均匀采样情况示意图

## 2.2 PRF 可变的 DPCA

DPCA 模式只有当脉冲重复频率为  $PRF_u$  时, 方位向采样才是均匀的, 当脉冲重复频率偏离  $PRF_u$  时, 方位向采样变为非均匀。如果能把方位向的非均匀采样信号重构为均匀的采样信号, 那么就可以不受 PRF 只能取理想值  $PRF_u$  的限制。

设方位向为  $M$  波束, 综合孔径时间为  $N/PRF_u$ , 当脉冲重复频率为  $PRF_n$  时, 采样点数为  $M[PRF_n \cdot N/PRF_u]$ ,  $[ ]$  表示下取整。设  $N_n = [PRF_n \cdot N/PRF_u]$ 。平均采样间隔为

$$T = 1/(M \cdot PRF_n) \quad (2)$$

采样时间信号分为  $M$  组, 每组的周期为一个脉冲发射间隔。设各组的采样起始时间为  $t_0, t_1, \dots, t_{M-1}$ , 由图 3 知:

$$t_1 - t_0 = t_3 - t_2 = \dots = t_{M-1} - t_{M-2} = 1/(M \cdot PRF_u) = T \cdot PRF_n / PRF_u \quad (3)$$

$$MT + t_0 - t_{M-1} = MT - (M-1)/(M \cdot PRF_u) = MT - (M-1)T \cdot PRF_n / PRF_u \quad (4)$$

由起始时间可以得到任意第  $m(m \leq M-1)$  组的第  $n(n \leq N_n - 1)$  点的采样时刻:

$$t_{m+nM} = t_m + nMT \quad (5)$$

分析方位向信号, 它有以下 3 个特点: (1) 频谱近似为带限的。(2) 虽然是非均匀分布, 但各点的采样时间已知。(3) 采样时间以  $1/PRF$  为周期。

对于这样的信号, 只要采样率满足奈奎斯特定律的要求, 就能够从非均匀的采样信号中重构信号频谱<sup>[2,3]</sup>。目前, 对非均匀采样信号的重构有很多方法<sup>[4-6]</sup>, 其中文献[4,5]是针对一般非均匀采样信号的, 而文献[6]是一种专门针对采样时间具有周期性的非均匀采样信号的频域重构方法。另外, 文献[4,5]是循环算法, 运算量大, 而且精度不高, 而文献[6]的算法能够得到理想带限信号的精确频率。同时, 考虑到目前的许多雷达成像算法在进行方位向处理时, 都首先进行方位向的傅里叶变换, 因此对方位向的非均匀信号处理, 文献[6]的频域重构算法是一种较理想的选择。

设点目标回波信号为  $pp(\tau, t; R)$ ,  $\tau, t, R$  分别为距离向时间、方位向时间和中心斜距, 均匀采样信号的方位向频谱为  $pP_u(\tau, f_i; R)$

$$pP_n(\tau, f_i; R) = \sum_{n=0}^{N_n M - 1} x(t_n) \exp(-j2\pi t_n) \quad (6)$$

$pP_n(\tau, f_i; R)$  与  $pP_u(\tau, f_i; R)$  的关系为<sup>[6]</sup>

$$pP_n(\tau, f_i; R) = \sum_{k=0}^{M-1} A(k) pP_u(\tau, f_i - \frac{k}{MT}; R) \quad (7)$$

$$A(k) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \exp(-jk\gamma_m \frac{2\pi}{M}) \exp(-jkm \frac{2\pi}{M}) \quad (8)$$

其中

$$\gamma_m = (t_m - mT)/T \quad (9)$$

从式(7)可知,  $pP_n(\tau, f_i; R)$  是将  $pP_u(\tau, f_i; R)$  搬到  $M$  个不同位置的频谱的叠加。由于频谱混叠系数  $A(k)$  为常数, 可以很容易地从  $pP_n(\tau, f_i; R)$  恢复  $pP_u(\tau, f_i; R)$ :

$$pPU(t, f_i; R) = A^{-1} pPN(t, f_i; R) \quad (10)$$

其中  $pPU(t, f_i; R)$  是  $M \times 1$  向量:

$$pPU(t, f_i; R) = \begin{pmatrix} pP_u(t, f_i; R) \\ pP_u(t, f_i + \frac{1}{MT}; R) \\ \vdots \\ pP_u(t, f_i + \frac{M-1}{MT}; R) \end{pmatrix} \quad (11)$$

$\mathbf{pPN}(t, f_i; R)$  是  $M \times 1$  向量:

$$\mathbf{pPN}(t, f_i; R) = \begin{pmatrix} \mathbf{pP}_n(t, f_i; R) \\ \mathbf{pP}_n(t, f_i + \frac{1}{MT}; R) \\ \vdots \\ \mathbf{pP}_n(t, f_i + \frac{M-1}{MT}; R) \end{pmatrix} \quad (12)$$

$A$  是  $M \times M$  矩阵:

$$A = \begin{pmatrix} A(0) & A(-1) & \cdots & A(1-M) \\ A(1) & A(0) & \cdots & A(2-M) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A(M-1) & A(M-2) & \cdots & A(0) \end{pmatrix} \quad (13)$$

由式(10)每次可以计算出  $M$  点的频谱, 取

$$f_i = -\frac{\pi}{T} + \frac{n}{MN_n} \frac{2\pi}{T}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (14)$$

这样就可以得出  $f_i$  在  $[-\pi/T, \pi/T]$  范围内  $MN_n$  点的均匀频谱, 实现了从方位向非均匀采样信号得到均匀频谱。

由以上分析可知, 通过对方位向非均匀采样信号的频谱重构, 可以得到方位向均匀频谱。这样, 脉冲重复频率不再只能为  $\text{PRF}_n$ , 而是可以比较自由地选择了, 实现了 PRF 可变的 DPCA。

Radarsat-2 SAR 最优模式(Ultra-fine)使用了 DPCA 模式<sup>[7]</sup>, 其方位向为两波束。在最优模式下, 分辨率能达到 3m, 但其测绘带宽仅为 20km。而且, 由于原有的 DPCA 模式 PRF 不可变, 其连续可覆盖范围也仅为 150km(侧向 400km~550km), 这一点是很遗憾的。如果使用 PRF 可变模式, 情况就不一样了。这时, 由于 PRF 可比较自由的选择, 其连续可覆盖范围也可达到和标准模式一样, 即 500km(侧向 250km~750km)。

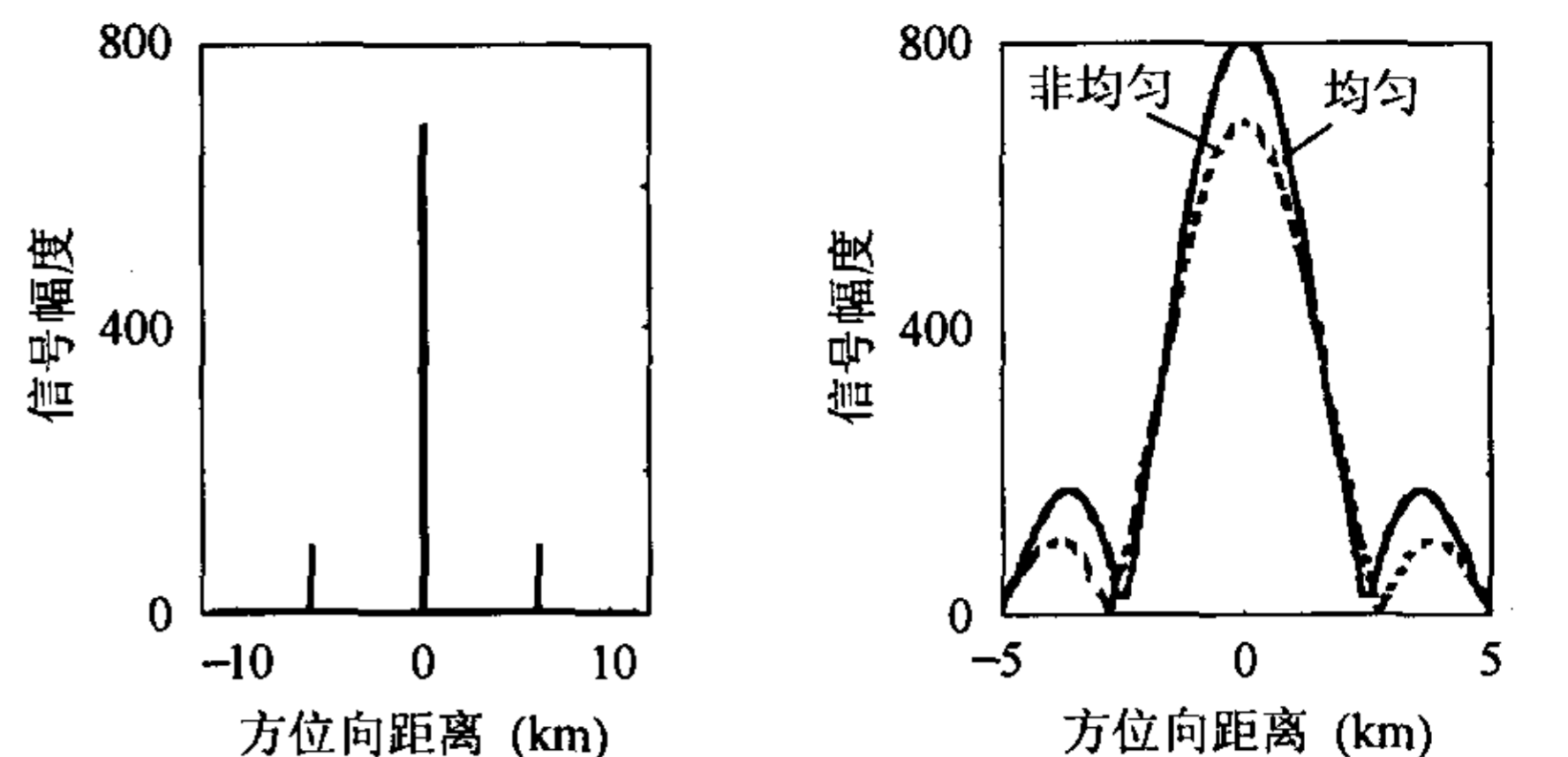
### 3 方位向多 PRF 仿真

将非均匀采样信号的频谱重构方法<sup>[6]</sup>引入 SAR 方位向多 PRF 处理, 究竟效果如何, 使用计算机仿真来说明。点目标的方位向仿真参数为: 三波束, 天线尺寸为 15m, 各相位中心均匀分布, 中心斜距  $R$  为 1000km, 方位分辨率为 2.5m, 多普勒带宽为 3000Hz, PRF 为 1000Hz 时对应均匀采样情况。

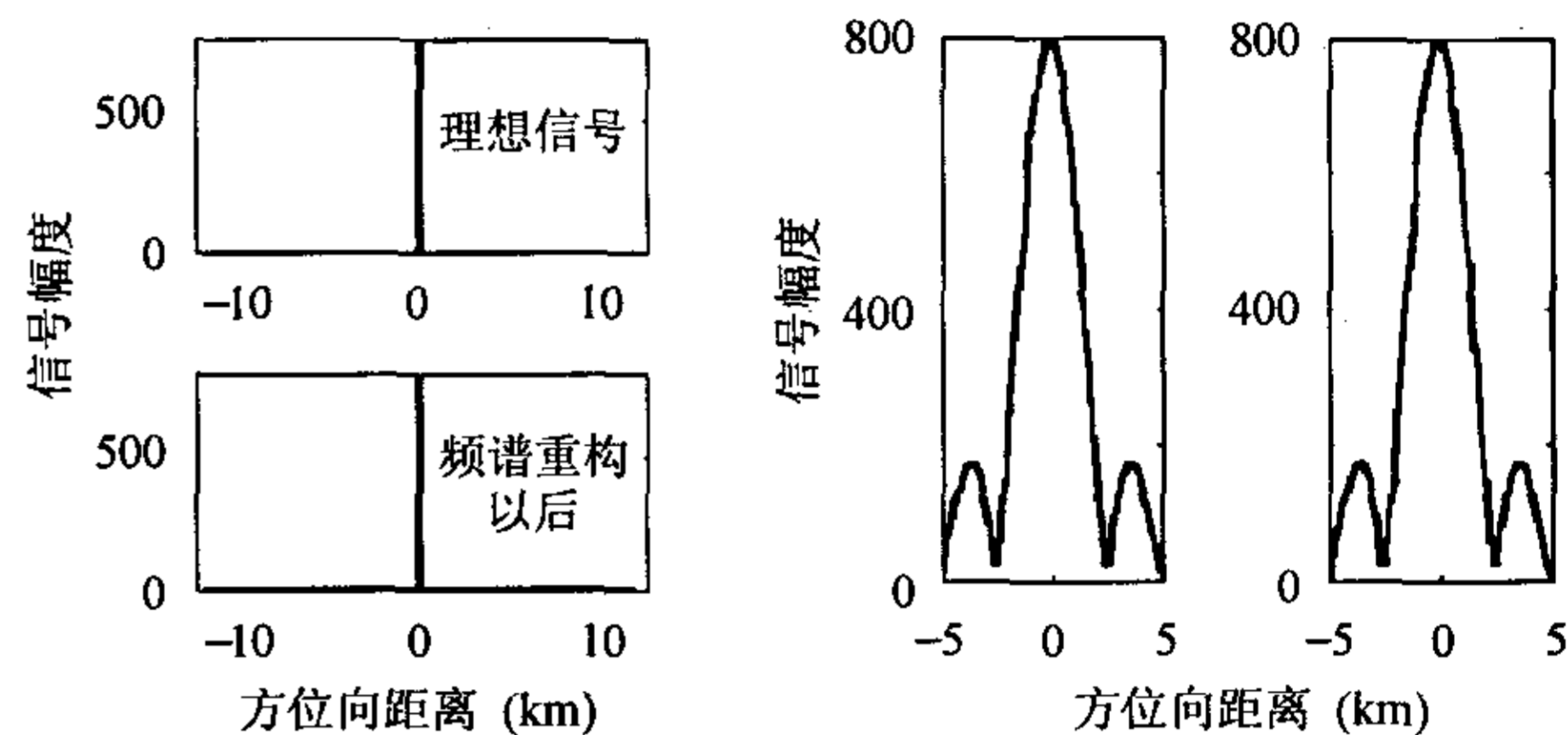
为了说明效果, PRF 取为 1600Hz。仿真结果如图 4 所示。图 4(a)显示, 在频谱重构处理之前, 不但有严重的虚假目标现象, 主瓣强度损失也达到 10%。图 4(b)显示, 进行频谱重构处理以后, 虚假目标现象完全没有了, 而主瓣强度也几乎没有什么损失, 以至于如果将两幅图叠加, 几乎是重叠的, 感觉就和一幅图一样, 所以只好分开画出, 可见频谱重构处理的效果相当理想。其实, 得到这么理想的结果是可以预见的, 因为对于有限长度的方位向信号, 其频谱非常接近为带限的, 而非均匀采样信号的频谱重构算法<sup>[6]</sup>对带限信号的频谱是精确重构的。

### 4 结束语

该文介绍了 DPCA 模式, 指出这种模式下使用固定 PRF



(a) 频谱重构之前信号



(b) 频谱重构之后信号及与理想信号比较

图 4 频谱重构处理效果比较

不能实现测绘带连续覆盖的缺点, 提出的 PRF 可变的 DPCA 模式及其方位谱重构方法可以解决传统模式在测绘带宽和分辨率之间的矛盾, 又能实现测绘带的连续覆盖。计算机仿真验证了新模式的正确性。

### 参考文献

- [1] Currie A, Brown M A. Wide-swath SAR, *IEE Proc.-F*, 1992, 139(6): 122 - 135.
- [2] Papoulis A. Generalized sampling expansion. *IEEE Trans. Circ. Syst.*, 1977, CAS-24: 652 - 654.
- [3] Yen J L. On nonuniform sampling of bandwidth-limited signals. *IRE Trans. on Circuit Theory*, 1956: 251 - 257.
- [4] Marvasti F, Analoui M, Gamshazahi M. Recovery of signals from nonuniform samples using iterative methods. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 1991, 39: 872 - 878.
- [5] Feichtiger H G, Grchöenig K, Stromer T. Efficient numerical methods in nonuniform sampling theory. *Numer. Math.*, 1995, 69(4): 423 - 440.
- [6] Jenq Y C. Perfect reconstruction of digital spectrum from nonuniformly sampled signals. *IEEE Trans. Instrum. Meas*, 1997, 46: 649 - 652.
- [7] Thompson A A, Luscombe A P, James K, Fox P. New modes and techniques of the RADARSAR-2 SAR, *IGARSS 2001, Sydney*: 485 - 487.

赵伟: 男, 1980年生, 硕士生, 从事专业为非均匀采样信号处理及雷达成像。

宋红军: 男, 1968年生, 博士, 研究员, 研究领域为 SAR 系统仿真、SAR 信号处理。