

## 非均匀采样对偏置相位中心多波束 SAR 性能影响的分析

郜参观<sup>\*①②</sup> 邓云凯<sup>①</sup> 冯锦<sup>①</sup> 闫贺<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文从理论上推导了方位向的非均匀采样对偏置相位中心多波束 SAR 性能的影响。分析表明方位向的非均匀采样会造成脉冲压缩的主峰两侧存在虚假峰值,同时它会造成脉冲压缩主峰增益降低、主峰展宽。文中给出了峰值-假目标比及主峰增益损失的计算公式,表明了它们与不均匀性及方位向过采样率等因素之间存在定量关系。这些公式的正确性通过仿真得到了进一步验证。

**关键词:** 合成孔径雷达; 方位向多波束; 非均匀采样; 高分辨率-宽测绘带

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)06-1305-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01121

## Analysis on the Non-uniform Sampling of Displaced Phase Center Multiple-beam SAR Systems

Gao Can-guan<sup>①②</sup> Deng Yun-kai<sup>①</sup> Feng Jin<sup>①</sup> Yan He<sup>①②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** In this paper, influence of azimuth non-uniform sampling on SAR systems with multiple-receive apertures in azimuth is derived theoretically. The analysis shows that several ghosting peaks are presented around the main peak, and at the same time non-uniform sampling will cause peak gain loss and the broadening to the main beam. Formulas to calculate the Peek-to-Ghost-Ratio (PGR) and peak gain loss are given, which show that they are related to the degree of non-uniform and the azimuth oversampling ratio quantitatively. The correctness of these formulas is validated further by simulation experiments.

**Key words:** SAR; Multiple-receive apertures in azimuth; Non-uniform sampling; High-resolution and wide-swath

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)由于具有全天时、全天候的成像能力,越来越成为对地遥感的重要手段<sup>[1]</sup>。随着技术研究的深入,合成孔径雷达要求具有高分辨率和宽测绘带的能力。这种能力可以大大降低雷达的重访时间,同时不以牺牲分辨率为代价。

但需要指出的是,条带模式 SAR 的方位向分辨率与其距离向测绘带宽之间存在矛盾,即所谓的 SAR 最小天线面积约束。扫描模式和聚束模式可以部分克服最小天线面积约束,但它们以牺牲其中一个指标为代价。当在 SAR 的接收端设置多个接收波束时,理论上可以较好地克服最小天线面积约束<sup>[2-4]</sup>。其中,偏置相位中心方位向多波束 SAR 由于更易于工程实现而得到更多的关注。

但通常星载 SAR 要根据观测区域的不同切换下视角,即相应地改变脉冲重复频率(PRF)。另一方面,为了更好地抑制方位向模糊,也要能灵活改变 PRF。但对于接收天线来说,一旦其孔径间距被设定,在星上便很难改变孔径间距,因此孔径间距和 PRF 间有时会存在不一致的关系,这会带来方位向的非均匀采样问题<sup>[5,6]</sup>。

目前,已有文献提出了一些非均匀采样的重建方法。文献[5]给出了一种重建滤波器组算法,无模糊频谱由模糊频谱乘上传输矩阵的逆而获得。文献[6]提出了非自适应的空时域方法,无模糊频谱通过空时矩阵的求逆而获得。文献[7,8]系统总结了频域和时域两种重建方法。但这些文献对非均匀采样对方位向多波束 SAR 成像的影响或未有系统分析或方法不甚满意,这也正是本文的出发点。对于偏置相位中心方位向多波束 SAR 的另一重要影响因素,即通道不一致性问题,文献[9]从理论上分析了它对

成像的具体影响,文献[10]给出了一种基于子空间投影的通道均衡方法。由于本文只关心非均匀性的问题,因此将假定各通道是平衡的。

本文接下来的内容安排如下:第2节对偏置相位中心多波束 SAR 的非均匀采样的原因作简要说明;第3节分析非均匀采样的具体影响;第4节为仿真部分;最后是结束语。

## 2 偏置相位中心多波束 SAR

如图1所示,以3通道为例来阐述偏置相位中心多波束 SAR 的基本原理。不妨设中间的子孔径发射线性调频脉冲信号,接收时,3个子孔径同时接收从目标反射的回波。实子孔径相位中心用矩形来表示,实子孔径间的距离为 $d$ ;等效子孔径的相位中心用圆形来表示,它位于发射子孔径和接收子孔径连线的中心。 $R_t(\eta)$ 表示发射孔径与目标之间的距离, $R_m(\eta)$ 表示接收孔径与目标之间的距离。第 $m$ 个子孔径的接收基带信号可表示为<sup>[1,5]</sup>

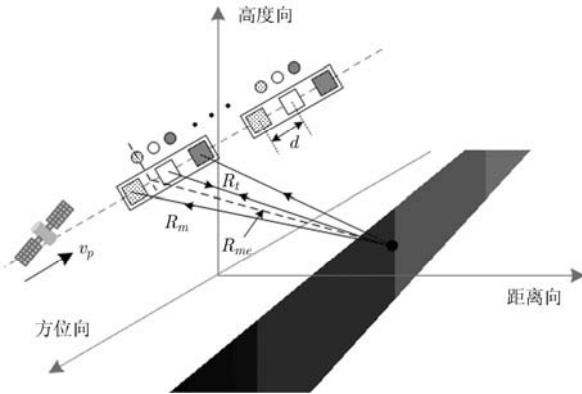


图1 偏置相位中心多波束 SAR 工作原理

$$s_m(t, \eta) = \text{rect}\left(\frac{t - 2R_{me}(\eta)/c}{T_r}\right) \exp\left\{\frac{-j\pi f_0 x^2}{2R_0 c}\right\} \cdot \exp\{-j4\pi f_0 R_{me}(\eta)/c\} \cdot \exp\{j\pi K_r (t - 2R_{me}(\eta)/c)^2\} \quad (1)$$

其中 $t$ 为快时间, $\eta$ 为慢时间, $K_r$ 为调频率, $f_0$ 为工作中心频率, $c$ 为光速, $T_r$ 为发射脉冲宽度, $\text{rect}(\bullet)$ 为矩形脉冲函数, $R_0$ 为雷达与目标间的最短斜距, $x$ 为接收子孔径相对发射子孔径的距离, $R_{me}(\eta)$ 表示等效子孔径与目标之间的距离。式(1)中的第1个指数项为相位补偿项,当 $x \ll R_0$ 时,该项可忽略。当 $M$ 个子孔径的偏置相位中心多波束 SAR 的通道特性一致且脉冲重复频率满足

$$\text{PRF}_{\text{DPC}} = 2v_p/(Md) \quad (2)$$

时,它就与以 $M \cdot \text{PRF}_{\text{DPC}}$ 为脉冲重复频率的单孔径 SAR 等效,从而达到降低脉冲重复频率提高距离向测绘带宽的目的。式(2)中, $v_p$ 为雷达速度。当脉冲重复频率不满足式(2)时,即会产生非均匀采样问题。

## 3 非均匀采样对方位向脉冲压缩的影响

因为方位向的非均匀采样并不会影响距离向的脉冲压缩,因此接下来为了简化分析只需考虑信号的方位分量,不考虑距离向信号的影响,这样问题就可以简化为1维的,同时假定方位向信号为严格的线性调频信号<sup>[1]</sup>,即

$$s(\eta) = \text{rect}(\eta/T_a) \exp\{j\pi K_a \eta^2\} \quad (3)$$

其中 $K_a$ 为方位向调频率, $T_a$ 为合成孔径时间即脉冲持续时间。

如图1所示,假设左端通道为0通道,且顺序排列到最右端的 $(M-1)$ 通道。由于 $s(\eta)$ 的带宽约为 $B_a = K_a T_a$ ,所以要对 $s(\eta)$ 的无模糊采样,必须保证有效的采样频率 $f_s > B_a$ ,即 $f_s = \alpha_s B_a$ , $\alpha_s \approx 1.1 \sim 1.4$ 为过采样率。设 $f_s$ 对应的采样周期为 $T_s$ ,则多通道采样时单个通道所对应的采样周期将为 $MT_s$ 。如图2所示,各子通道所对应的采样序列分别为 $s_0(nMT_s), s_1(nMT_s), \dots, s_{M-1}(nMT_s)$ , $n$ 对应采样点时刻。各子采样序列在时间上的偏移为 $\Delta\eta$ ,当 $\Delta\eta \neq T_s$ 时即会产生非均匀采样问题。

由于对不同信号采样时,通常默认其采样起始相同,所以实际上各子通道的采样值 $s_0(nMT_s), s_1(nMT_s), \dots, s_{M-1}(nMT_s)$ 可以看作如图3所示的过程来完成<sup>[7,8]</sup>:将信号 $s(\eta)$ 依次左移 $k\Delta\eta, k=0, 1, \dots, M-1$ ,分别得到 $s_0(\eta), s_1(\eta), \dots, s_{M-1}(\eta)$ ,再分别以 $MT_s$ 为周期采样即可得各子通道采样值。

如图2所示,再将各子通道采样序列的采样点间补上 $(M-1)$ 个零,最后将这些补零序列分别右移 $k(k=0, 1, \dots, M-1)$ 位并叠加即可得 $s(n)$ 。接下来,将根据以上过程来推导 $s(\eta)$ 的采样频谱,并据此分析非均匀采样对方位向脉冲压缩的影响。

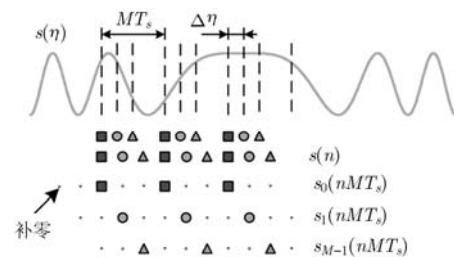


图2 方位向信号的非均匀采样

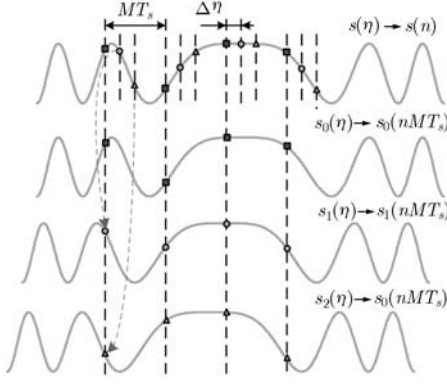


图3 信号的偏移与采样

设依次左移  $k\Delta\eta$  的信号分别为

$$\left. \begin{aligned} s_0(\eta) &= s(\eta) \\ s_1(\eta) &= s(\eta + \Delta\eta) \\ &\vdots \\ s_{M-1}(\eta) &= s(\eta + (M-1)\Delta\eta) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对应的以  $MT_s$  为周期的采样序列为

$$\left. \begin{aligned} s_0(nMT_s) &= s(nMT_s) \\ s_1(nMT_s) &= s(nMT_s + \Delta\eta) \\ &\vdots \\ s_{M-1}(nMT_s) &= s(nMT_s + (M-1)\Delta\eta) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

设式(5)的采样序列补零得到的序列分别为  $s_0^{\text{zero}}(nT_s), s_1^{\text{zero}}(nT_s), \dots, s_{M-1}^{\text{zero}}(nT_s)$ , 对式(4)作傅里叶变换可得

$$\left. \begin{aligned} S_0(f_a) &= S(f_a) \\ S_1(f_a) &= S(f_a) \exp\{j2\pi f_a \Delta\eta\} \\ &\vdots \\ S_{M-1}(f_a) &= S(f_a) \exp\{j2\pi f_a (M-1)\Delta\eta\} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中  $f_a$  为多普勒频谱变量。各补零序列的模拟表示的数字频谱分别为<sup>[9]</sup>

$$\begin{aligned} S_k^{\text{zero}}(f_a) &= \text{rect}\left(\frac{f_a}{B_a}\right) \exp\left(-j\pi \frac{f_a^2}{K_a}\right) \exp\{j2\pi f_a k \Delta\eta\} + \sum_{l=0}^1 \sum_{m=1}^{M-1} \text{rect}\left(\frac{f_a - \frac{1}{2}(mf_s/M - lf_s) - \frac{1}{4}(-1)^l(f_s - B_a)}{(-1)^{l+1}(mf_s/M - lf_s) + B_a/2 + f_s/2}\right) \\ &\cdot \exp\left\{-j\pi \frac{(f_a + lf_s - mf_s/M)^2}{K_a}\right\} \exp\{j2\pi k(f_a + lf_s - mf_s/M) \cdot \Delta\eta\} \end{aligned} \quad (7)$$

其中  $k = 0, 1, \dots, M-1$ 。根据  $s(n)$  与各补零序列的右移叠加关系可得  $s(n)$  的模拟表示的数字频谱为

$$S^d(f_a) = \sum_{k=0}^{M-1} S_k^{\text{zero}}(f_a) e^{-j2\pi f_a k T_s} \quad (8)$$

联立式(7)和式(8), 可得

$$\begin{aligned} S^d(f_a) &= \sum_{k=0}^{M-1} \text{rect}\left(\frac{f_a}{B_a}\right) \exp\left(-j\pi \frac{f_a^2}{K_a}\right) \exp\{j2\pi f_a k (\Delta\eta - T_s)\} \\ &+ \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^1 \sum_{m=1}^{M-1} \text{rect}\left(\frac{f_a - \frac{1}{2}(mf_s/M - lf_s) - \frac{1}{4}(-1)^l(f_s - B_a)}{(-1)^{l+1}(mf_s/M - lf_s) + B_a/2 + f_s/2}\right) \\ &\cdot \exp\{j2\pi k(lf_s - mf_s/M) \cdot \Delta\eta\} \exp\left\{-j\pi \frac{(f_a + lf_s - mf_s/M)^2}{K_a}\right\} \exp\{j2\pi k f_a (\Delta\eta - T_s)\} \end{aligned} \quad (9)$$

将式(9)与频域匹配滤波器

$$H(f_a) = \text{rect}(f_a/f_s) \exp(j\pi(f_a^2/K_a)) \quad (10)$$

相乘并整理, 可得

$$\begin{aligned} S^d(f_a)H(f_a) &= \sum_{k=0}^{M-1} \text{rect}\left(\frac{f_a}{B_a}\right) \exp\{j2\pi f_a k (\Delta\eta - T_s)\} + \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^1 \sum_{m=1}^{M-1} \text{rect}\left(\frac{f_a - \frac{1}{2}(mf_s/M - lf_s) - \frac{1}{4}(-1)^l(f_s - B_a)}{(-1)^{l+1}(mf_s/M - lf_s) + B_a/2 + f_s/2}\right) \\ &\cdot \exp\{j2\pi k(lf_s - mf_s/M) \cdot \Delta\eta\} \exp\left(-j\pi (lf_s - mf_s/M)^2 / K_a\right) \exp\left\{j2\pi f_a \frac{(mf_s/M - lf_s)}{K_a}\right\} \\ &\cdot \exp\{j2\pi f_a k (\Delta\eta - T_s)\} \end{aligned} \quad (11)$$

对式(11)作傅里叶反变换, 可得方位向的脉冲压缩结果为

$$S^d(f_a)H(f_a) \rightarrow \sum_{k=0}^{M-1} B_a \operatorname{sinc}\{B_a[\eta + k(\Delta\eta - T_s)]\} + \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^1 \sum_{m=1}^{M-1} \exp\{j2\pi k(lf_s - mf_s/M) \cdot \Delta\eta\} \\ \cdot \exp\left(-j\pi(lf_s - mf_s/M)^2 / K_a\right) \left[(-1)^{l+1} (mf_s/M - lf_s) + \frac{B_a + f_s}{2}\right] \\ \cdot \operatorname{sinc}\left\{\left[(-1)^{l+1} (mf_s/M - lf_s) + \frac{B_a + f_s}{2}\right] \left[\eta + \frac{mf_s/M - lf_s}{K_a} + k(\Delta\eta - T_s)\right]\right\} \\ \cdot \exp\left[j2\pi\left(\frac{1}{2}(mf_s/M - lf_s) + \frac{1}{4}(-1)^l (f_s - B_a)\right) \left[\eta + \frac{mf_s/M - lf_s}{K_a} + k(\Delta\eta - T_s)\right]\right] \quad (12)$$

式(11), 式(12)中第1部分对应脉冲压缩的主峰, 在均匀采样的情况下, 即  $\Delta\eta = T_s$  时它退化为

$$M \operatorname{rect}(f_a/B_a) \rightarrow MB_a \operatorname{sinc}(B_a\eta) \quad (13)$$

当  $\Delta\eta \neq T_s$  时, 为分析方便起见, 不失一般性的假设通道数为奇数且将  $k$  的变化范围改为  $[-(M-1)/2, (M-1)/2]$ , 这样可将式(11)的第1部分改写为

$$\sum_{k=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \operatorname{rect}\left(\frac{f_a}{B_a}\right) \exp\{j2\pi f_a k(\Delta\eta - T_s)\} \\ = \operatorname{rect}\left(\frac{f_a}{B_a}\right) \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{(M-1)/2} \cos(2\pi f_a k(\Delta\eta - T_s))\right] \quad (14)$$

比较式(13), 式(14)可以看出, 非均匀采样会在频域滤波时产生余弦加窗效应, 这会使得方位向脉冲压缩的主峰展宽, 即非均匀采样会降低方位向分辨率。同时, 比较式(13)和式(12)可得非均匀采样所带来的主峰增益损失为

$$P_{\text{loss}} = \frac{\sum_{k=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \operatorname{sinc}\{B_a k(\Delta\eta - T_s)\}}{M} \quad (15)$$

下面考察式(12)的第2部分, 它是假目标的贡献项。其中指数项与相位有关, 对假目标的幅度大小没有影响。对于不同的  $l, m$  值共有  $2(M-1)$  种组合, 所以主峰两侧将存在  $2(M-1)$  个虚假目标。取定  $l, m$  值, 且只考察幅度可得相应的假目标幅度为

$$\text{Ghost}_{l,m} = \sum_{k=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \left[(-1)^{l+1} (mf_s/M - lf_s) + \frac{B_a + f_s}{2}\right] \\ \cdot \operatorname{sinc}\left\{\left[(-1)^{l+1} (mf_s/M - lf_s) + \frac{B_a + f_s}{2}\right] \left[\eta + \frac{mf_s/M - lf_s}{K_a} + k(\Delta\eta - T_s)\right]\right\} \quad (16)$$

考察式(16)中的  $\operatorname{sinc}\{\bullet\}$  项, 易得假目标的位置为

$$\text{POS}_{l,m} = \frac{lf_s - mf_s/M}{K_a} = (l\alpha_s - m\alpha_s/M)T_a \quad (17)$$

将假目标幅度与主峰幅度相比, 可得对数形式的峰值假目标比为

$$\text{PGR}_{l,m} = 20 \lg \left[ \frac{(-1)^{l+1} (mf_s/M - lf_s) + \frac{B_a + f_s}{2}}{\sum_{k=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} B_a \operatorname{sinc}\{B_a k(\Delta\eta - T_s)\}} \right] \\ + 20 \lg \left[ \sum_{k=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \operatorname{sinc}\left\{\left[(-1)^{l+1} (mf_s/M - lf_s) + \frac{B_a + f_s}{2}\right] k(\Delta\eta - T_s)\right\} \right] \quad (18)$$

## 4 仿真分析

前面一节分析指出了非均匀采样会造成方位向的虚假目标、主峰增益降低、主峰展宽等弊端, 本节将对理论分析结果作仿真实验。仿真中的雷达主要参数如表1所示, 雷达目标为  $5 \times 5$  的点阵, 点阵间距为 5 m, 且假设各点的后向散射系数相同。为了定量评价非均匀采样对成像性能的影响并参考图2, 定义非均匀采样因子为

$$F_{\text{nu}} = \Delta\eta / T_s \quad (19)$$

表1 雷达仿真参数

轨道高度: 514 km	距离向过采样率: 1.25
下视角: $30^\circ$	脉冲宽度: 35 $\mu\text{s}$
中心频率: 9.65 GHz	方位向分辨率: 1 m
信号带宽: 150 MHz	孔径数: 3

如图4所示是非均匀因子为 0.8 时, 点阵目标的成像结果, 图中可以看出真实目标像两侧有 4 组比较明显的假目标存在, 这与理论上一个真实目标会出现  $2(M-1)$  个虚假目标相一致。为了定量分析假目标的相对大小, 对图4中的点阵目标像取方位向切片, 如图5所示。在考察虚假目标的电平大小时, 使用相应虚假点阵的电平平均值。峰值假目标比与非均匀因子之间的依赖关系如图6所示, 图中

PGR-1 表示  $POS_{0,1}$  和  $POS_{1,2}$  处的峰值-假目标比, PGR-2 表示  $POS_{0,2}$  和  $POS_{1,1}$  处的峰值-假目标比。图中的曲线中间有一段空缺, 这是由于在仿真时非均匀性较小会使得假目标很难被辨别。由图 6 可以看出, 当非均匀因子  $F_{nu}$  从 1.05 增加到 1.5(或从 0.95 降至 0.5)时, 峰值假目标比会迅速增大, 且其理论值和仿真值间有较好的吻合。图 7(a)为非均匀性与峰值增益下降之间的依赖关系, 可以看出理论值和仿真值几乎重合。图 7(b)的仿真表明, 非均匀采样

会造成脉冲压缩的主瓣展宽, 这正是式(14)中频率域的余弦加权造成的。

虽然虚假目标的峰值相对于主峰来说通常要低很多, 但由于虚假目标峰和真实主峰所处的位置不同, 这会使得强目标的虚假图像在暗背景(如水面、阴影等)中会表现的特别突出。如图 8 所示为非均匀采样条件下的一个方位向多波束 SAR 成像结果, 图中明显可以看出在暗背景区有一些虚假亮点的出现。

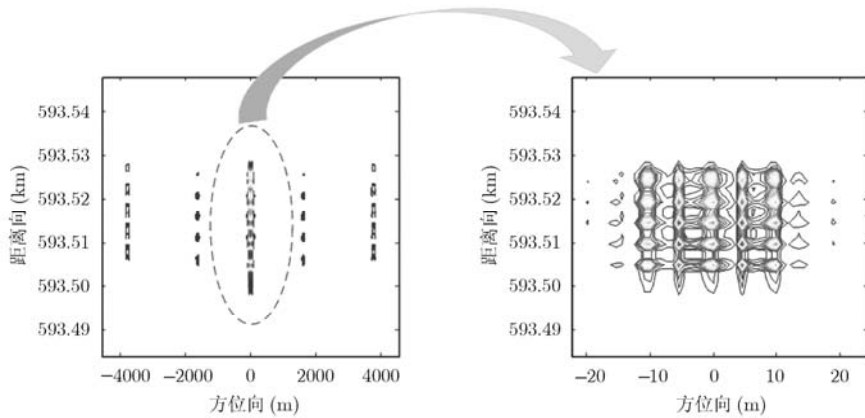


图 4 非均匀因子为 0.8 时, 点阵目标像

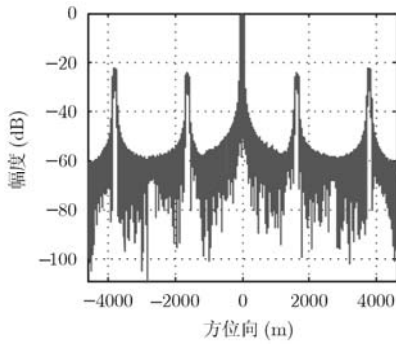


图 5 非均匀因子为 0.8 时, 点阵目标像的方位向切片

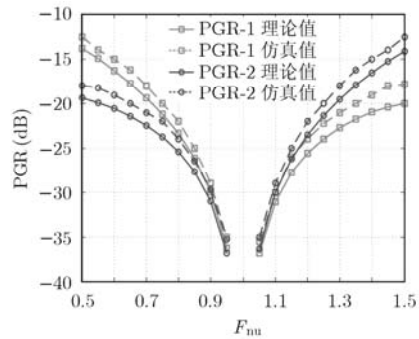
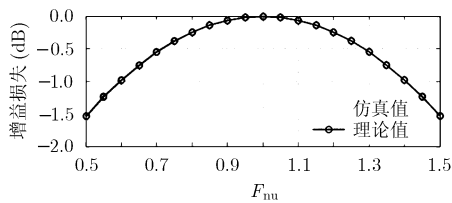
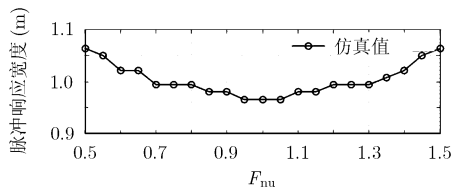


图 6 峰值假目标比与非均匀因子之间的依赖关系



(a) 峰值增益损失



(b) 脉冲压缩主瓣展宽

图 7 非均匀性对脉冲压缩主瓣性能的影响

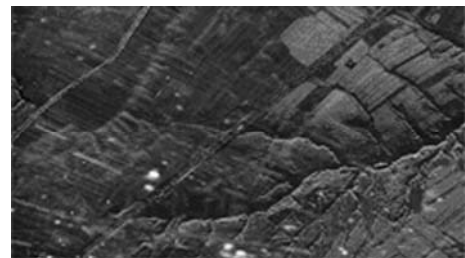


图 8 暗背景中的虚假目标

### 5 结束语

本文分析了方位向非均匀采样对偏置相位中心方位向多波束 SAR 性能的影响。理论分析表明由于

方位向的非均匀采样, 方位向脉冲压缩时会出现不希望的虚假目标, 虚假目标的数量、位置及大小与通道数、方位向过采样率及不均匀程度等因素相关。文中给出了假目标位置、假目标电平相对大小及脉冲压缩主峰增益损失的计算公式, 点目标仿真结果验证了公式的正确性。本文给出的理论分析对于偏置相位中心方位向多波束 SAR 在工程上将具有一定的指导意义, 因为无论是在系统的前期设计中还是在成像处理时决定是否需要作非均匀采样重建, 都需要深刻了解非均匀采样对成像性能的具体影响。

### 参 考 文 献

- [1] Cumming I and Wong F 著, 洪文, 胡东辉, 等, 译. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 2-3, 96.
- [2] Currie A and Brown M. Wide-swath SAR [J]. *IEE Proceedings F- Radar & Signal Processing*, 1992, 139(2): 122-135.
- [3] Krieger G, Younis M, Gebert N, *et al.* Advanced concepts for high-resolution wide-swath SAR imaging [C]. *Proceedings of the EUSAR, Aachen*, 2010: 524-527.
- [4] Gebert N, Krieger G, and Moreira A. Multichannel azimuth processing in scanSAR and TOPS mode operation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(7): 2994-3008.
- [5] Krieger G, Gebert N, and Moreira A. Unambiguous SAR signal reconstruction from nonuniform displaced phase center sampling [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2004, 1(4): 260-264.
- [6] Jing Wei, Xing Meng-dao, Qiu Cheng-we, *et al.* Unambiguous reconstruction and high-resolution imaging for multiple-channel SAR and airborne experiment results [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(1): 102-106.
- [7] 赵伟. 一种高分辨率连续宽测绘带星载 SAR 性能分析和算法研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2004: 44-58.
- Zhao Wei. Analysis and algorithm of space-borne SAR with high-resolution and consecutive wide-swath[D]. [Master dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2004: 44-58.
- [8] 陈志愿. 多波束高分辨率星载 SAR 的成像处理方法研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院电子学研究所, 2005: 59-77.
- Chen Zhi-yuan. Study on the processing methods of multi-beam space-borne SAR with high-resolution [D]. [Master dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2005: 59-77.
- [9] 郜参观, 邓云凯, 冯锦. 通道不平衡对偏置相位中心多波束 SAR 性能影响的理论分析 [J]. *电子与信息学报*, 2011, 33(8): 1828-1832.
- Gao Can-guan, Deng Yun-kai, and Feng Jin. Theoretical analysis on the mismatch influence of displaced phase center multiple-beam SAR systems [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2011, 33(8): 1828-1832.
- [10] 张磊, 金英汇, 刑孟道, 等. 一种种子空间投影的高分辨宽测绘带 SAR 成像通道均衡方法[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(1): 1-6.
- Zhang Lei, Jin Ying-hui, Xing Meng-dao, *et al.* An SSP based channel calibration for high-resolution and wide-swath SAR imagery[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1): 1-6.

郜参观: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达系统仿真技术.

邓云凯: 男, 1962 年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事合成孔径雷达系统设计和微波技术的研究.

冯 锦: 男, 1970 年生, 副研究员, 长期从事合成孔径雷达成像处理技术的研究.

闫 贺: 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为广域动目标监视技术.