

## 非正交发射的宽域高分辨 MIMO InSAR 成像模式研究

刘楠\* 刘昕 张娟 张林让

(西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室 西安 710071)

**摘要:** MIMO InSAR 具有比多基线 InSAR 更稳健和精确的地形高程重建能力,但其关键技术之一是在各阵元接收端分离出自不同阵元发射信号的回波。现有“正交”信号正交性不足,依赖它们实现回波分离会产生严重回波间相互干扰。为此,该文提出了一种非正交发射的 MIMO InSAR 成像模式,该模式首先通过控制各阵元交替发射信号,使其主瓣回波交替出现在各脉冲重复周期,此时只需压低各阵元天线俯仰维旁瓣即可大幅降低回波间的相互干扰,从而避免回波分离对发射信号正交性的依赖。在此模式基础上,该文又引入基于方位向多通道处理的波束扫描技术以缓解交替发射时方位不模糊与距离不模糊之间矛盾,从而实现宽域、高分辨观测。仿真结果证明了该文 MIMO InSAR 成像模式的有效性。

**关键词:** 干涉合成孔径雷达; 多发多收; 非正交发射; 互干扰; 宽域高分辨

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)01-0140-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00466

## A Wide-swath High-resolution Imaging Mode for MIMO InSAR without Transmitting Orthogonal Signals

Liu Nan Liu Xin Zhang Juan Zhang Lin-rang

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** The ability to reconstructing the terrain height profile of MIMO InSAR outperforms the ordinary multibaseline InSAR. One key technology of MIMO InSAR is the echo separation on the receiver. The available orthogonal signals introduce great cross-interferences between different MIMO Channels due to their inadequate orthogonality. An equivalent MIMO InSAR imaging mode without transmitting orthogonal signals is presented in this paper, whose echo separation do not depend on the orthogonality of transmitting signals. Instead, the elements of this MIMO InSAR system transmit alternately in different pulse duration under this mode, hence the mainlobe echoes of different transmitting signals appear in different pulse duration coordinately. The cross-interferences are suppressed sufficiently with low sidelobe transmitting pattern in elevation. Furthermore, the multichannel azimuth processing based ScanSAR technique is employed in this MIMO InSAR imaging mode to improve its swath width and azimuth resolution. The numerical simulations prove the validation of the proposed mode.

**Key words:** InSAR; MIMO; Non-orthogonally transmitting; Cross-interference; Wide-swath high-resolution

### 1 引言

为改善传统单基线 InSAR 的高程重建性能,人们提出了多基线 InSAR 的概念。多基线 InSAR 由多个独立观测阵元构成,能够提供更多数量的干涉相位以提高估计精度,并且能够直接估计地面的高程<sup>[1,2]</sup>,具有应对复杂地形的能力。在垂直航线方向上的独立观测阵元越多,多基线 InSAR 的高程估计精度越高,应对复杂地形的能力也越强。但受到系

统复杂度和成本等因素的限制,现有的机载多基线 InSAR 系统通常只有 3 至 5 个独立观测阵元<sup>[3-5]</sup>,而近年来研究较多的星载分布式雷达编队<sup>[6]</sup>也仅由 3 至 5 颗卫星构成。

文献[7]将近年来兴起的 MIMO 雷达技术引入多基线 InSAR,提出了 MIMO InSAR 的概念,为增加系统观测阵元的数量提供了一条低成本的技术途径。MIMO InSAR 中各阵元均向地面发射信号并接收其它阵元发射信号的地面回波,不同的收、发组合带来了不同的回波延迟相位,由此能够等效形成比真实观测阵元更多的虚拟观测阵元,不但可提高多基线 InSAR 系统的高程估计精度,还可分辨

2011-05-16 收到, 2011-09-07 改回

长江学者创新团队发展计划, 国家自然科学基金(61001213)和中央高校基本科研业务费(K50510020021)资助课题

\*通信作者: 刘楠 liunaneoe@163.com

更多的高程重叠(layover)单元。不过,在现有 MIMO SAR 体制<sup>[8]</sup>下各观测阵元均采用收、发同步的工作模式。此时,各阵元必须发射正交信号才能在接收端分离出不同阵元发射信号的地面回波,从而形成各虚拟接收阵元。而现有正交二相码<sup>[9]</sup>、多相码信号<sup>[10]</sup>和正交离散频率编码信号<sup>[11]</sup>等“正交”信号都具有较高的自相关和互相关积分旁瓣电平,既不适用于对地面成像,还会导致严重的回波相互干扰。

我们注意到,成像取决于能否形成具有足够多采样点的合成孔径,而且高程重建所需的干涉相位也只与基线有关,它们都与合成孔径中各采样点的位置和采样顺序无关。由此,本文提出了一种基于各阵元交替发射信号的工作模式,通过控制发射顺序让不同阵元发射信号的回波循环地出现在不同的脉冲重复周期(即各虚拟接收阵元将在不同的脉冲重复周期循环出现),以此等效地构建出一个 MIMO InSAR 系统。此时,只需要通过压低阵元天线方向图的俯仰维旁瓣即可大幅降低回波间的相互干扰,因此可采用常用的线性调频信号作为各阵元的发射信号,从而解决了依靠发射正交信号来实现回波分离所面临的问题。不过,为保证多普勒不模糊,这种交替发射的方式将增加系统的总脉冲重复频率,导致系统的观测条带宽度降低。为此,本文又引入了基于方位多通道处理的波束扫描技术<sup>[12]</sup>,在各观测阵元交替发射信号的基础上,通过子天线方位向宽域照射和方位向多通道解多普勒模糊,使得系统能在相同的合成孔径时间内覆盖更宽的方位向区域。如此节省出的时间资源既可用于增加距离向扫描波位的数量以拓宽条带宽度,也可分配给各子观测条带以提高方位分辨率,从而为实现宽域、高分辨的高程重建铺平道路。参考 Tandem-X 计划中卫星参数,本文给出了一个 MIMO InSAR 系统的设计实例,对该设计实例的仿真和分析结果验证了本文模式的性能。

## 2 MIMO InSAR 模型分析

假设 MIMO InSAR 系统由  $K$  个垂直航向分布的真实观测阵元构成(观测阵元既可是机载 InSAR 系统中一个独立的观测天线也可以是一颗独立的 SAR 卫星),各阵元均向地面发射信号,并接收自身及其它阵元发射信号的地面回波(如图 1 所示)。在各阵元接收端分离来自不同阵元发射信号的回波后共可得到  $K^2$  路输出。每路输出都对应着一对收、发阵元的组合,可将其等效视为一个虚拟的独立接收阵元。因此,采用多发多收工作方式之后,真实的 InSAR 观测阵列被虚拟地扩展为一个具有  $K^2$  个

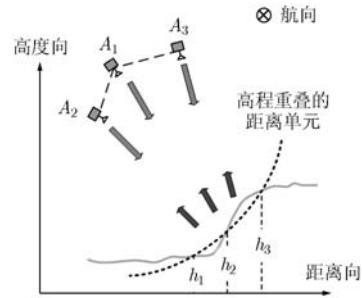


图 1 MIMO InSAR 几何示意图

阵元的虚拟 InSAR 观测阵列(如图 2 所示)。由此可以带来以下两点性能改善:

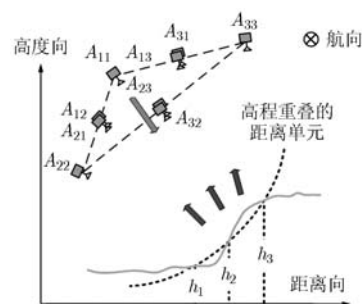


图 2 等效虚拟多基线 InSAR 几何示意图

(1)提高了对地面高程估计的精度。InSAR 高程估计的精度会受到基线长度和噪声的影响。基线越长,其对高程变化越敏感,而虚拟阵列扩展可等效增加观测阵列的孔径长度。只要虚拟阵列扩展后阵列孔径仍在最佳基线长度的范围内,则将有利于改善高程估计精度。同时,虽然提高发射功率能够抑制系统热噪声对高程估计精度的影响,但是由视角不同而引起的地面回波去相关现象会等效地引入与地面回波强度成正比的乘性噪声<sup>[1]</sup>。因此,单纯提高发射功率并不能抑制此类乘性噪声对高程估计精度的影响。虚拟阵列扩展等效增加了独立观测阵元的数量,有利于改善高程估计的精度。

(2)提高了对高程重叠单元的分辨能力。由图 2 可知,扩展后的虚拟观测阵列中能够提供不同干涉相位的阵元多达  $K(K+1)/2$  个。因此, MIMO InSAR 可以在同一像素中最多分辨出  $K(K+1)/2-1$  个高程重叠的单元。以图 1 和图 2 中的高程重叠场景为例,如果采用多基线 InSAR 模式,由于高程重叠单元的数量已经超过了系统自由度,系统无法分辨其中的任何一个单元。而 MIMO InSAR 却有充足的自由度去辨识这 3 个高程重叠单元,从而避免系统失效。

MIMO InSAR 实现虚拟观测阵列扩展的关键

技术之一就是各真实观测阵元的接收端分离出不同阵元发射信号的地面回波。若采用常规 MIMO 雷达体制中各阵元同步收、发的工作模式,回波分离只能通过发射正交信号来保证。而由于现有“正交”信号并非严格正交,不同阵元发射信号的回波间必然存在一定的互相关干扰。成像后,上述干扰在每个像素点上表现为一种积分干扰。那么,第 $(m, n)$ 号虚拟观测阵元(第 $m$ 个阵元发射、第 $n$ 个阵元接收)的像素信干比(期望回波和干扰回波之比)可以表示为

$$\begin{aligned} \text{SIR}_{m,n} &= \left\{ \int_{-\rho_a/2}^{\rho_a/2} \int_{-\rho_r/2}^{\rho_r/2} (G_m(R_0+r)G_n(R_0+r)) \right. \\ &\quad \cdot |s_{R_a}(r)| |s_A(x)|^2 \text{d}r \text{d}x \left. \right\} \\ &\quad \left/ \left\{ \sum_{i=1, i \neq m}^K \int_{-X_{BW}/2}^{X_{BW}/2} \int_{-cT_p/2}^{cT_p/2} (G_i(R_0+r)) \right. \right. \\ &\quad \cdot G_n(R_0+r) |s_{R_c}(r)| |s_A(x)|^2 \text{d}r \text{d}x \left. \right\} \\ &= \frac{\int_{-\rho_r/2}^{\rho_r/2} |s_{R_a}(r)|^2 \text{d}r}{\sum_{i=1, i \neq m}^K \int_{-cT_p/2}^{cT_p/2} |s_{R_c}(r)|^2 \text{d}r} \\ &\quad \cdot \frac{\int_{-\rho_a/2}^{\rho_a/2} |s_A(x)|^2 \text{d}x}{\sum_{i=1, i \neq m}^K \int_{-X_{BW}/2}^{X_{BW}/2} |s_A(x)|^2 \text{d}x} \quad (1) \end{aligned}$$

式中 $\rho_a$ 和 $\rho_r$ 表示系统方位向和距离向分辨率, $X_{BW}$ 表示发射波束主瓣在地面的方位维投影宽度, $T_p$ 为发射信号脉宽, $c$ 为光速, $s_{R_a}(r)$ 为发射信号自相关函数(即距离脉冲压缩响应函数), $s_{R_c}(r)$ 为发射信号间的互相关函数, $r$ 为斜距向距离; $s_A(x)$ 表示方位脉冲压缩响应函数, $x$ 为方位向距离, $G_i(R)$ 为第 $i$ 个阵元相对最短斜距为 $R$ 的地面目标的增益(这里假设各阵元收、发天线增益对于同一地面单元是相等的), $R_0$ 为目标到阵元的最短斜距。

由于方位脉冲压缩响应与发射波形无关,因此式(1)表明像素信干比只取决于各阵元发射信号间的互相关积分旁瓣电平(即式(1)等号右边第1项)。表1列出了MIMO雷达中常用“正交”信号的互相关积分旁瓣电平,由表1可知,现有“正交”信号的互相关积分旁瓣电平过高,将导致严重的相互干扰。此外,现有成像算法都是利用线性调频信号(LFM)的时频特性来完成成像处理的。而现有“正交”信号并不具备LFM信号的时频特性,难以对其进行高精度成像处理。综上,需要寻找其它方法

表1 现有“正交”信号的积分旁瓣积分电平

信号类型	二相码信号 <sup>[9]</sup>	多项码信号 <sup>[10]</sup>	离散频率编码信号 <sup>[11]</sup>
互相关积分旁瓣电平(dB)	-0.4402	-0.6447	0.2160

以避免回波分离对发射信号正交性的依赖。

### 3 一种非正交发射的 MIMO InSAR 成像模式

SAR 成像取决于能否形成足够长的合成孔径,并且合成孔径中空间采样点的密度能够保证多普勒不模糊。因此, MIMO InSAR 并不一定要采用各观测阵元同时发射信号的成像模式。TanDEM-X 计划<sup>[13]</sup>提出了一种两颗卫星交替发射信号并同时接收地面回波的工作模式,可形成更多的干涉观测通道。本节将该思想推广到 MIMO InSAR,对基于交替发射的 MIMO InSAR 成像模式进行分析。

图3给出了该 MIMO InSAR 成像模式的示意图。与现有 MIMO 雷达各阵元同时发射信号的模式不同,在这种模式下 $K$ 个阵元将在各个脉冲重复周期交替地发射信号,当然在每一脉冲重复周期 $K$ 个阵元仍将同时记录来自地面的回波。如此,各阵元发射信号的主瓣回波将交替地出现在不同的脉冲重复周期(如图4所示),从而避免发生混叠。若以发射阵元分类将 MIMO InSAR 的所有收、发组合划为 $K$ 组。在交替发射的条件下,这 $K$ 组收、发组合将在不同的脉冲重复周期循环出现,通过交替选通即可得到各组收、发的观测数据。而在方位向均匀采样的前提下,各方位向采样点位置的整体偏移只会引起 SAR 图像的方位向位移而不会产生形变。并且 SAR 图像之间的干涉相位只与各阵元与目标间的最短斜距有关(正侧视条件下),而与各方位向采样点的位置无关。因此,采用交替发射的成像模式同样能构建出一个可进行相干处理的 MIMO InSAR 系统。

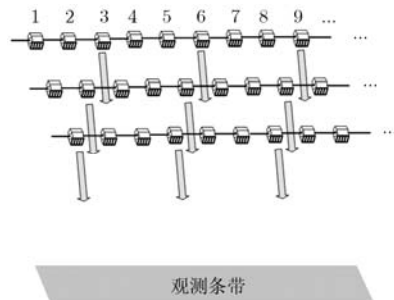


图3 基于交替发射的 MIMO InSAR 成像模式示意图

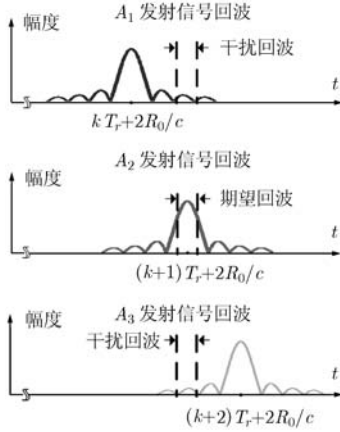


图 4 某阵元接收端上各发射信号回波包络示意图

由图 4 可知，某一阵元发射信号的天线主瓣回波所受到的干扰主要来自其它阵元的天线旁瓣回波，此时第  $(m, n)$  号收、发组合输出图像的像素信干比可以近似表示为

$$\begin{aligned} \text{SIR}_{m,n} = & \left\{ \int_{-\rho_a/2}^{\rho_a/2} \int_{-\rho_r/2}^{\rho_r/2} (G_m(R_0 + r)G_n(R_0 + r)) \right. \\ & \cdot |s_R(r)||s_A(x)|^2 \text{d}r\text{d}x \left. \right\} \\ & \left/ \left\{ \sum_{i=1, i \neq m}^K \int_{-X_{BW}/2}^{X_{BW}/2} \int_{-cT_p/2}^{cT_p/2} (G_i(R_0 + r) \right. \right. \\ & + (i-m)T_r c) G_n(R_0 + r + (i-m)T_r c) \\ & \left. \left. \cdot |s_R(r)||s_A(x)|^2 \text{d}r\text{d}x \right\} \right. \quad (2) \end{aligned}$$

式中  $T_r$  为脉冲重复周期， $G_i(R_0 + r)$  为天线波束主瓣增益，而  $G_i(R_0 + r + (i-m)T_r c)$  为距离模糊单元处的天线波束旁瓣增益。由式(2)可知，通过压低各阵元天线的俯仰维旁瓣电平，干扰回波的能量将得到足够的抑制，不会对后续处理产生影响。因此，不再需要发射正交信号，可用现有成像算法的 LFM 信号作为各阵元的发射信号，从而解决依赖正交信号的发射同步模式所面临的难题。

下面对基于交替发射的成像模式对系统参数的要求及性能影响进行分析。假设各阵元天线的方位向长度为  $D_a$ ，阵元速度为  $V_s$ 。那么每个阵元的脉冲重复频率需均大于地面回波的主瓣多普勒带宽  $2V_s/D_a$ 。为保证多普勒不模糊，系统总脉冲重复频率  $F_r$  需满足

$$F_r > K \cdot 2V_s/D_a \quad (3)$$

因此，为保证距离不模糊，系统的最大观测条带宽度需要满足

$$W_{\text{swath}} < \frac{c(1 - F_r T_p)}{2F_r \sin \theta} < \frac{c(D_a - K \cdot 2V_s T_p)}{K \cdot 4V_s \sin \theta} \quad (4)$$

式中  $T_p$  为发射信号脉宽， $\theta$  为下视角。由式(4)可知，采用基于交替发射的成像模式后系统最大观测条带宽度将降低到原来的约  $1/K$ ，即需要以牺牲系统观测条带宽度为代价等效地实现多发多收。

同时，为保证距离不模糊，各阵元的天线俯仰维长度还需满足

$$D_r > \frac{K \cdot 4R_s \lambda V_s \tan \theta}{cD_a} \quad (5)$$

即各阵元的天线俯仰维长度需要增加  $K$  倍。

根据上述系统参数条件，此模式下的 SAR 图像的噪声等效后向散射系数  $\sigma_{NE}^0$  可以表示为

$$\sigma_{NE}^0 = \frac{8\pi\lambda R_0^3 k_n T_0 B_N V_s K}{P_i A^2 \rho_{gr} F_s T_p F_r} \quad (6)$$

式中  $A = D_a D_r$  为各阵元天线面积， $F_r$  为系统的总脉冲重复频率， $\rho_{gr}$  为地距分辨率， $F_s$  为系统采样率， $\lambda$  为系统工作波长， $k_n$  为玻尔兹曼常数， $T_0$  为系统温度， $B_N$  为噪声带宽。由于各阵元天线的俯仰维孔径增加了  $K$  倍，在相同的阵元脉冲重复频率条件下，该 MIMO InSAR 成像模式只需要常规成像模式  $1/K^2$  的发射功率即可具备与之相同的噪声等效后向散射系数。

#### 4 适于宽域、高分辨观测的 MIMO InSAR 成像模式

交替发射耗费了大量的时间资源，导致系统观测条带宽度降低。引入距离维波束扫描技术<sup>[14]</sup> (ScanSAR)，利用多个扫描波位无缝隙地覆盖地面上的多个子观测条带可大大提高交替发射模式下的总观测条带宽度。但是，由于分配给各子观测条带的合成孔径时间减小，方位向分辨率将大幅降低。本节将在基于交替发射的 MIMO InSAR 成像模式中引入新近出现的基于方位多通道处理的波束扫描技术<sup>[12]</sup>，以实现宽域、高分辨观测。

如图 5 所示，各观测阵元的天线沿方位向被等分为  $M$  个子天线。工作时，各观测阵元仍旧交替发射信号以实现 MIMO 模式。不过各阵元均只使用一个子天线向地面辐射信号。每个阵元在俯仰维均有  $N_B$  个扫描波位，其发射波束将在各个波位上循环切换以形成一个较宽的俯仰波束。由于发射天线的方位向孔径减小，故发射波束的方位维宽增加。因此，在相同的波束驻留时间内发射波束能够覆盖更宽的方位向地面区域。假定在每个波位上的驻留时间为  $\Delta T$ ，为保证对各子观测条带的连续性观测， $\Delta T$  需要满足

$$\Delta T \leq \frac{M\lambda R_0}{N_B D_a V_B} \quad (7)$$

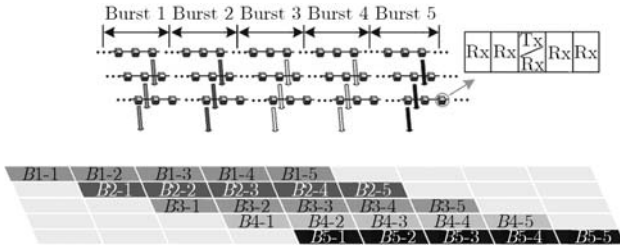


图5 宽域高分辨 MIMO InSAR 成像模式示意图

在每个波束驻留时间内所形成的合成孔径长度为  $\Delta TV_S$ ，此时方位向的分辨率为

$$\rho'_a = \frac{N_B D_a}{2M} \quad (8)$$

因此，若  $M > N_B$ ，系统方位向分辨率将得以改善(但  $M$  过大会增加系统的复杂性，需折衷考虑)。

由于多个观测阵元交替发射，此时每一个子观测条带的宽度仍需满足式(4)的限制，故本节模式下系统的最大测绘条带宽度满足

$$\begin{aligned} W'_{\text{swath}} &= N_B W_{\text{swath}} < \frac{N_B c(1 - F_r T_P)}{2F_r \sin \theta} \\ &< \frac{N_B c(D_a - K \cdot 2V_S T_P)}{K \cdot 4V_S \sin \theta D_a} \end{aligned} \quad (9)$$

由式(9)可知，在保持方位向分辨率不变(即  $N_B/M$  保持不变)的情况下，可以通过减小发射天线方位向孔径(即增加  $M$ )来增加系统的总测绘条带宽度。

不过，由于发射天线方位向孔径降低了  $M$  倍，故地面回波的多普勒带宽将变为全孔径发射时的  $M$  倍。若通过提高单个观测阵元的脉冲重复频率来避免多普勒模糊必然导致系统总脉冲重复频率的增加，反而不利于拓展系统的观测条带宽度。因此，需在每个观测阵元的接收端采用多通道接收和空域滤波的方式将图 5 中各个方位向子波束  $B_{i-j}$  ( $i = 1, \dots, N_B; j = 1, \dots, M$ ) 的回波分别取出，从而解决多普勒模糊问题。

需要指出的是，在每个子观测条带的每个波束驻留时间内，本节模式与第 3 节的模式实际上是相同的。因此，本节模式下各收、发组合输出 SAR 图像的像素信干比仍然可由式(2)表示。由于方位向分辨率的改变并不会改变方位脉冲压缩响应的积分旁瓣电平，故本节模式的像素信干比与第 3 节模式相同。而由于本节模式下发射天线增益将随发射天线的面积的降低而降低为原来的  $1/M$ ，故其噪声等效后向散射系数将变为

$$\sigma_{NE}^{0'} = \frac{M^2 \cdot 8\pi \lambda R_0^3 k_n T_0 B_N V_S K}{N_B P_t A^2 \rho_{gr} F_S T_P F_r} \quad (10)$$

因此，需将各阵元的发射功率提高  $M^2/N_B$  倍才能得到与第 3 节模式相同的噪声等效后向散射系数。不过考虑到天线俯仰维孔径的增加，在相同的发射功率条件下，本节模式也具备与常规成像模式相当的噪声等效后向散射系数。

## 5 设计实例分析及仿真

参考 TanDEM-X 计划中 TerraSAR-X 卫星的参数，表 2 给出了一个 MIMO InSAR 系统的基本参数，其中各阵元天线的尺寸能够保证在本文模式下不发生多普勒和距离模糊，并且假设各阵元天线在俯仰维均采用  $-35$  dB 的 Taylor 窗幅度加权以抑制旁瓣电平。下面，将分析在表 2 参数条件下本文所提出的 MIMO InSAR 成像模式的性能。

首先，在交替发射的条件下，为保证不出现多普勒模糊，由表 2 参数和式(3)可知系统的总脉冲重复频率需满足： $F_r \geq 9.35$  kHz。那么根据上述参数，可由式(2)计算出各收、发组合输出 SAR 图像的像素信干比，计算结果在表 3 中列出。可见，在本文模式下，各收、发组合的输出像素信干比均高于 70 dB。因此，即使采用线性调频信号作为发射信号，其回波之间的相互干扰也可忽略不计。

其次，根据上述参数，可由式(4)和式(9)计算

表 2 MIMO InSAR 系统基本参数

阵元数	3	基线倾角	$0^\circ, 0^\circ$	信号脉宽	30 $\mu$ s
阵元高度	514 km	下视角	$20^\circ \sim 50^\circ$	峰值发射功率	2000 W
阵元速度	7604.87 m/s	信号波形	LFM	工作波长	0.0311 m
基线长度	161.3 m, 442.5 m	信号带宽	30 MHz	天线尺寸(方位 $\times$ 距离)	4.88 m $\times$ 2.4 m

表 3 本文 MIMO InSAR 成像模式下各收、发组合输出 SAR 图像像素信干比

收、发组合	T1-R1	T2-R1	T3-R1	T1-R2	T2-R2	T3-R2	T1-R3	T2-R3	T3-R3
SIR(dB)	73.515	73.518	73.522	74.047	74.046	74.045	74.136	74.141	74.146

第 3 节模式(以下称模式 1)中和第 4 节模式(以下称模式 2)的最大观测条带宽度。表 4 给出了上述两种模式以及 TanDEM-X 计划中的波束扫描模式<sup>[13]</sup>(以下称模式 3)的最大观测条带宽度随视角的变化情况,这里假设模式 2 中  $M = 6$ ,  $N_B = 5$ 。表 4 的结果表明,模式 1 的最大条带宽度将比模式 3 降低 3 倍以上,仅为 15 km(远端)~40 km(近端)。而模式 2 由于采用了波束扫描和方位多通道解模糊处理,其最大条带宽度增加到 75 km(远端)~168 km(近端),已超过了模式 3 的最大观测条带宽度。且由式(8)可知,此时模式 2 的方位向分辨率为 2.03 m,优于模式 1 下的 2.44 m。

最后,表 5 给出了两种模式的噪声等效后向散射系数随下视角的变化情况。由于在 X 波段 SAR 常用的下视角范围内,地面单位面积后向散射系数的通常不低于 -15 dB,因此,本文提出的两种 MIMO InSAR 成像模式均能得到较高的信噪比。

下面,通过数值仿真验证本文模式在上述系统参数条件下的性能。图 6 和图 7 首先给出了各阵元同时发射“正交”信号的 MIMO InSAR 模式的成像结果及干涉相位图。可以看到,由于回波间的相互干扰较为严重,得到的 SAR 图像非常模糊,同时干涉条纹也受到了较大的噪声干扰。而图 8 和图 9 则给出了本文模式 1 各收发组合的输出 SAR 图像及其对应的干涉相位图。从图 8 和图 9 的结果可以看到,采用本文模式得到了清晰的 SAR 图像和干涉条纹,表明回波间的相互干扰得到了有效的抑制。图 10 给出了本文模式 2 各子观测条带的输出 SAR 图像和相应的干涉相位图,这里假定  $M = 4$ ,  $N_B = 3$ 。图中,纵向为方位向而横向为距离向。可以看到通过多子带拼接能够无缝地形成一个更宽的条带。图 11 给出了采用本文模式后高程重建的结果。对比图 11(a), 11(b)和 11(c)可知,由于回波间相互干扰严重,“正交”发射模式的高程估计误差甚

表 4 不同模式下系统最大观测条带宽度随视角的变化情况

视角	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
模式 1 条带宽度(km)	33.8	27.3	23.1	20.1	18	16.3	15.1
模式 2 条带宽度(km)	168.9	136.7	115.5	100.7	89.9	81.7	75.4
模式 3 条带宽度(km)	127.6	103.3	87.3	76.1	67.9	61.7	56.9

表 5 不同模式下噪声等效后向散射系数随视角的变化情况

视角	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
模式 1 $\sigma_{NE}^0$ (dB)	-49.1	-47.7	-46.4	-45.0	-43.7	-42.2	-40.6
模式 2 $\sigma_{NE}^0$ (dB)	-40.5	-39.2	-37.8	-36.5	-35.2	-33.7	-32.1

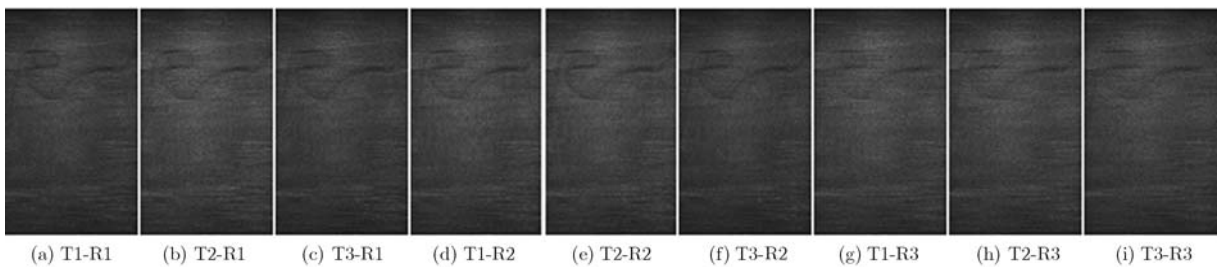


图 6 “正交”发射模式下各收发组合输出 SAR 图像

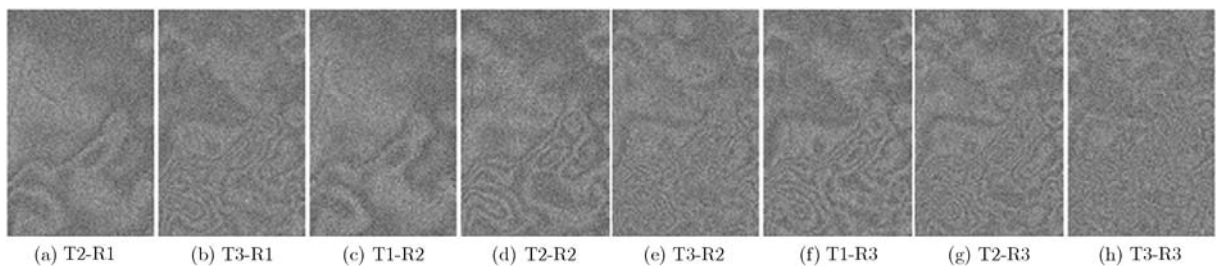


图 7 “正交”发射模式下各收发组合与组合 T1-R1 之间的干涉相位图

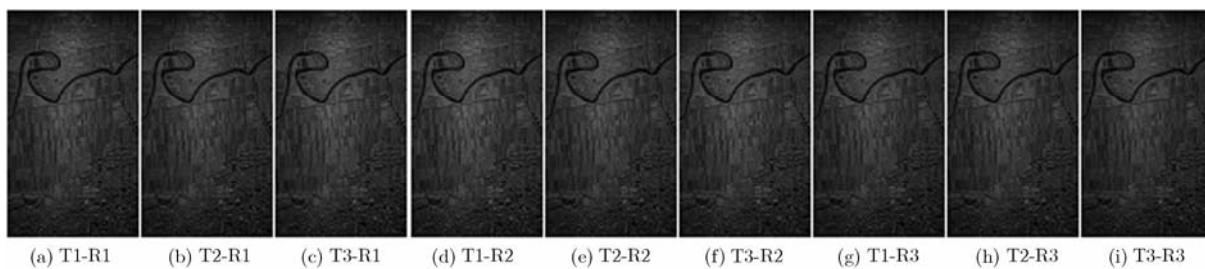


图 8 本文模式 1 各收发组合输出 SAR 图像

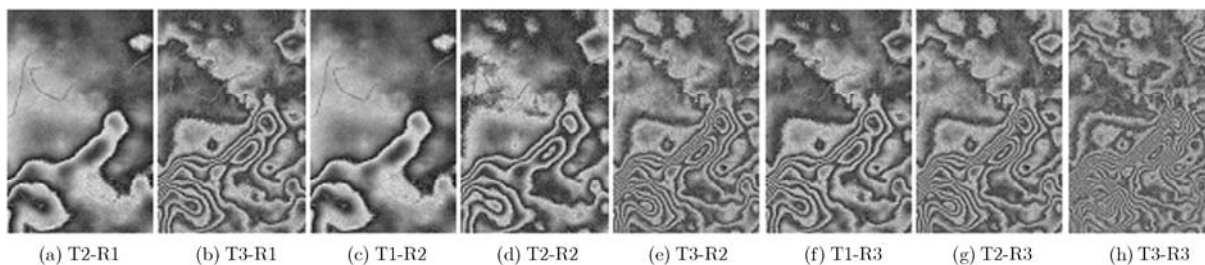


图 9 本文模式 1 各收发组合与组合 T1-R1 之间的干涉相位图

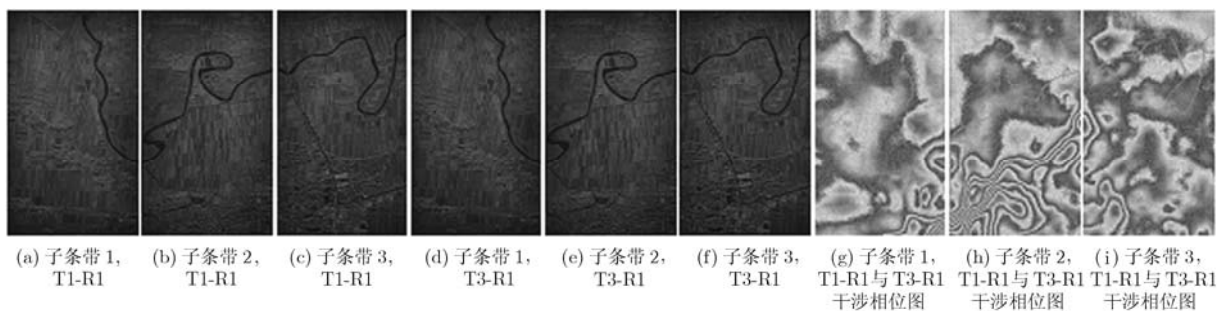


图 10 本文模式 2 各子观测条带输出 SAR 图像及干涉相位图

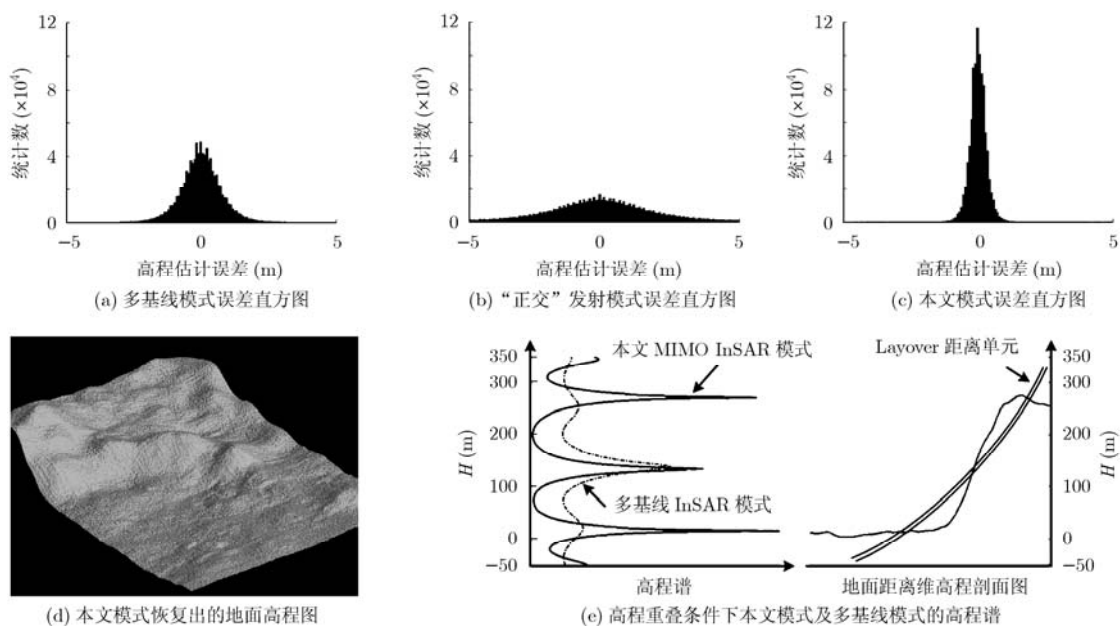


图 11 各种模式高程重建结果

至要大于多基线模式, 而本文模式则有效地改善了高程估计精度。而图 11(e)则表明, 在混叠单元的数量大于真实阵元数的条件下, 多基线模式的高程谱无法在各混叠单元对应高程处形成明显的峰值, 而从本文模式的高程谱中却可以明显地分辨出多个混叠的单元, 证明本文模式能有效改善系统应对复杂地形的能力。

## 6 结论

MIMO InSAR 具有比多基线 InSAR 更好的高程估计精度和高程重叠单元辨识能力。但由于现有 MIMO 雷达中常用的正交信号存在着正交性不足且不适于对地观测, 难以采用基于同步正交发射的常规 MIMO 雷达模式来构建 MIMO InSAR。为解决这一问题, 本文首先提出了一种各观测阵元交替发射信号的 MIMO InSAR 成像模式, 该模式下各组收发组合将轮流出现在各个脉冲重复周期, 通过合理地设计系统脉冲重复频率以及在收发天线俯仰维幅度加权以抑制旁瓣, 不同阵元发射信号回波之间的相互干扰将被降低到极低的水平, 从而不再需要发射正交信号。不过, 由于交替发射耗费了大量的时间资源, 导致最大观测条带宽度大幅降低。为此, 本文又将基于方位多通道处理的波束扫描技术引入该 MIMO InSAR 成像模式, 通过方位宽波束发射和方位多通道解多普勒模糊处理, 实现了宽域、高分辨观测, 为宽域、高分辨的高程重建铺平了道路。数值仿真的结果证明了本文提出的 MIMO InSAR 模式具有更加稳健和精确的高程重建能力。

## 参 考 文 献

- [1] Gini F and Lombardini F. Multibaseline cross track SAR interferometry: a signal processing perspective [J]. *IEEE Aerospace Electronic System Magazine*, 2005, 20(8): 71-93.
  - [2] 柳祥乐, 宋岳鹏, 杨汝良. 采用酉 ESPRIT 算法处理多基线 InSAR 层叠效应 [J]. *电子与信息学报*, 2008, 30(7): 1731-1735.  
Liu X L, Song Y P, and Yang R L. Layover solution based on unitary ESPRIT algorithm in multibaseline InSAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(7): 1731-1735.
  - [3] Lombardini F, Ender J, Roessing L, et al. Experiments of interferometric layover solution with the three-antenna airborne AER-II SAR system [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Anchorage, Alaska, USA, 2004: 3341-3344.
  - [4] Magnard C, Meier E, Small D, et al. Processing of MEMPHIS millimeter wave multi-baseline InSAR data [C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Honolulu, USA, 2010: 4302-4305.
  - [5] Wilden H and Brenner A. The SAR/GMTI airborne radar PAMIR: technology and performance [C]. *IEEE International Microwave Symposium Digest (MTT)*, Anaheim, CA, USA, 2010: 534-537.
  - [6] Massonnet D. Capabilities and limitations of the interferometric Cartwheel [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(3): 506-520.
  - [7] Sharma R and Corporation G. Application of MIMO to IFSAR [C]. *IEEE Radar Conference*, Washington DC, USA, 2010: 1-4.
  - [8] Wang Wen-Qin. Space-time coding MIMO-OFDM SAR for high-resolution imaging [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 3094-3104.
  - [9] Li Wei-ping, Liao Gui-sheng, Tao Hai-hong, et al. Poly-phase encoded waveform optimal design for space-borne MISO radar systems [C]. *IET International Radar Conference*, Guilin, China, 2009: 1-4.
  - [10] Deng Hai. Polyphase code design for orthogonal netted radar systems [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2004, 52(11): 3126-3135.
  - [11] Liu Bo. Orthogonal discrete frequency-coding waveform set design with minimized autocorrelation sidelobes [J]. *IEEE Transactions on Aerospace Electronic System*, 2009, 45(4): 1650-1657.
  - [12] 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.
  - [13] Bartusch M, Berg H, and Siebertz O. The TanDem-X mission [C]. *EUSAR*, Friedrichshafen, Germany, 2008: 27-30.
  - [14] Cumming I and Wong H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation* [M]. MA, USA, Artech House Inc., 2005: 285-304.
- 刘楠: 男, 1981年生, 博士, 讲师, 研究方向为 MIMO 雷达、干涉合成孔径雷达和雷达抗干扰。
- 刘昕: 男, 1983年生, 博士生, 研究方向为干涉合成孔径雷达。
- 张娟: 女, 1979年生, 博士, 副教授, 研究方向为阵列信号处理、MIMO 雷达和自适应信号处理。
- 张林让: 男, 1966年生, 博士, 教授, 研究方向为自适应信号处理和阵列信号处理。