

文章编号: 1672-2892(2010)03-0281-06

干涉合成孔径雷达多层次数据仿真

向 征, 王 桢 霖, 刘 兴 钊

(上海交通大学 电子工程系, 上海 200240)

摘 要: 为了对干涉合成孔径雷达(InSAR)系统研究提供数据源, 提出了一种 InSAR 多层次数据仿真器(包括原始信号级(RSL)、单视复图像级(SIL)和干涉相位级(IPL)), 该仿真器能同时适用于星载和机载合成孔径雷达(SAR)/InSAR 数据仿真, 并针对雷达后向散射系数在 InSAR 中的应用作了一定的改进。对每一层次 InSAR 数据仿真实现进行讨论: 对于 RSL 仿真, 通过利用信号生成的对称性, 基于 CPU 的多线程处理和基于图形处理单元(GPU)的超线程处理等手段, 大大提升原始回波生成速度; 对于 SIL 仿真, 提出了一种快速有效的 InSAR 复图像生成方法; 对于 IPL, 提出了一种由几何去相关而引入的相位噪声模型。最后, 实验结果证实了理论分析的正确性。

关键词: 干涉合成孔径雷达; 图形处理单元; 原始数据; 单视复图像; 干涉相位

中图分类号: TN911.72

文献标识码: A

Multilevel data simulation of the interferometric Synthetic Aperture Radar

XIANG Zheng, WANG Zhen-lin, LIU Xing-zhao

(Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to provide the data source for the research of Interferometric Synthetic Aperture Radar(InSAR) system, a novel InSAR simulator was studied, which consisted of the Raw Signal Level (RSL), the Single-look-complex Image Level(SIL), and the Interferometric Phase Level(IPL). This simulator could be applied to the Synthetic Aperture Radar(SAR)/InSAR data simulation of both spaceborne and airborne. A new model of complex backscattering coefficients for the InSAR data simulation was presented and validated. Furthermore the implementation details of the multilevel simulator were discussed. For the RSL, a new model with higher computation efficiency to generate the radar echo was proposed, benefiting from the symmetry of the signal generation, the multi-core technique of CPU and many-core technique of Graphic Processing Units(GPU). For the image level, an efficient approach to create single-look image pair was presented. For the IPL, a reasonable noise model related to geometric decorrelation was also proposed. Some meaningful results by the novel simulator verified the theoretical analysis.

Key words: Interferometric Synthetic Aperture Radar; Graphic Processing Units; raw signal; single-look-complex image; interferometric phase

干涉合成孔径雷达(InSAR)技术被广泛应用于地面高程提取和地表形变等方面。由于其参数的可控性和结果的可预知性, InSAR 数据仿真受到越来越多的重视, 它能更好地帮助理解 InSAR 中所涉及的物理现象。从已发表的论文^[1-4]可总结出 3 个层次的 InSAR 数据仿真级别: 原始信号级(RSL)^[1-2]、单视复图像级(SIL)^[3]和干涉相位级(IPL)^[4], 其各自对应了不同的系统模型和处理复杂度, 也被应用在不同的情况中。RSL 仿真器生成了在雷达照射下分布目标所反射的雷达原始回波, 其中应包含 SAR/InSAR 所特有的迎坡缩短、斑点噪声和基线去相关等信息。在该层次的仿真中, 主要集中讨论 2 个问题: 后向散射系数模型和时/频域回波积累方式。单视复图像级仿真器直接生成聚焦之后的 InSAR 图像对, 并包含一些强度可控的噪声信号。由于回避了原始信号积累和成像处理过程中的误差, 该层次的仿真器比较适合对 InSAR 处理流程中诸如图像配准和相位解缠等方面的分析。IPL 仿真器通过内插处理将地理坐标系中数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)转换为雷达坐标系中干涉相位, 由 DEM 坡度所带来的几何去相关将被量化成加性噪声。

本文建立了1套包含3个仿真层次的InSAR仿真平台,其中不同的仿真层次共享部分模块。同时,该仿真器有如下特性:对于RSL仿真,提出了一种幅度确定、相位随机的雷达后向散射模型,同时针对该层次仿真效率低的问题,通过利用信号生成的对称性,基于CPU的多线程(multi-core)处理和基于图形处理单元(GPU)的超线程(many-core)处理等手段,大大提升了原始回波生成速度;对于SIL仿真,提出了一种包含不同噪声源的快速单视复图像生成方法,同时该层次仿真与RSL共用后向散射系数计算模块;对于IPL仿真,分析了DEM坡度和极限基线之间的关系,提出了一种由几何去相关而引入的相位噪声模型。同时,如果考虑实际的卫星轨道模型,该仿真平台可用于星载SAR/InSAR数据仿真;如果考虑直线飞行模型,该平台又可应用于机载情况。最后,通过实验在几个方面比较了这3个仿真层次。

1 仿真器结构

InSAR数据仿真中雷达和地面目标的几何关系可参考文献[1-3]。下变频之后回波信号 $s_{1,2}$ 可写成^[1]:

$$s_{1,2}(x',r'_{1,2}) = \iint \gamma_{1,2}(x,y,z) w^2 \left(\frac{x'-x}{X} \right) f \left(\frac{r'-R(x,r_{1,2})}{\frac{c\tau}{2}} \right) \exp \frac{-j4\pi R(x,r_{1,2})}{\lambda} dx dr_{1,2} \quad (1)$$

式中:下标1和2分别表示主、副天线的接收信号; x' 和 r' 分别是方位向和距离向的采样; $\gamma(\cdot)$ 是雷达后向散射系数; (x,y,z) 为地面三维坐标系; $w(\cdot)$ 为雷达照射函数; X 为方位向波束宽度; $f(\cdot)$ 是发射的chirp信号; c 为光速; τ 是脉冲持续时间; λ 为雷达波长; R 和 r 分别为地面上任意一点到雷达的瞬时距离和到航线的最短距离,对于星载情况需要通过卫星轨道6个参数(即半长轴、偏心率、轨道倾角、升交点赤经、近地点幅角和真近心角)计算得到^[2],而对于机载情况只需要通过简单的几何模型就可以得到^[1]。同时需要注意的是,当背离雷达一面的局部目标斜率大于信号的人射角时,就会出现雷达成像阴影区。对于地面散射的每个小平面,在确定了小平面的中心点坐标之后,可以按照文献[2]中的方法来确定该小平面是否处于阴影区域中。

回波信号聚焦之后的复图像 $\hat{\gamma}_{1,2}$ 可写成:

$$\hat{\gamma}_{1,2}(x',r'_{1,2}) = \iint dx dr \gamma_{1,2}(\cdot) \exp(-j4\pi r_{1,2}/\lambda) \text{sinc}[a(x'-x)] \text{sinc}[b(r'-r)] \approx \gamma_{1,2}(\cdot) \exp(-j4\pi r_{1,2}/\lambda) \quad (2)$$

式中: a 和 b 分别为系统方位向和距离向的带宽; $\text{sinc}(x) = \sin(x)/x$ 。当假设 a 和 b 为无穷大时,式(2)中的约等式成立。

对主、副复图像对进行图像配准之后,共轭相乘得到其相位差 φ 为:

$$\varphi(x',r') = \text{Ph}[\hat{\gamma}_1(x',r'_1) \hat{\gamma}_2^*(x',r'_1 + \delta r'_1)] = \frac{4\pi}{\lambda} \delta r' \quad (3)$$

式(3)给出了干涉相位的表达式,Ph(\cdot)表示相位解缠绕操作,*表示取共轭, $\delta r'$ 为主副天线得到的图像的斜距差。

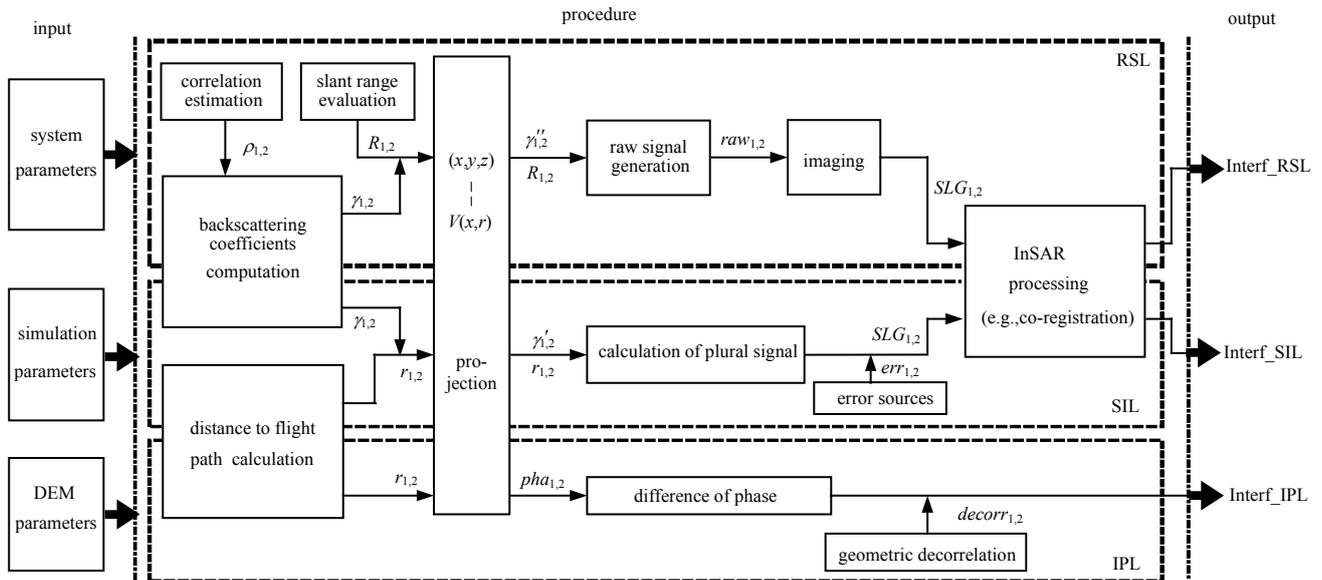


Fig.1 Structure of the multilevel InSAR simulator

图1 多层次InSAR仿真器结构

本文提出的多层次 InSAR 仿真器即计算式(1~3)，其系统结构见图 1。输入、流程和输出为该仿真器的 3 个主要部分，其中 RSL,SIL 和 IPL 有部分模块共享。同时需要注意的是，修正的后向散射系数 γ^* 和 γ' 都分别包含了传播因子 $\exp[-j(4\pi/\lambda)R]$ 和 $\exp[-j(4\pi/\lambda)r]$ 。

2 模块分析

2.1 原始信号级

RSL 仿真需要重点考虑 2 个问题：后向散射系数的计算和时域/频域仿真方法的选择。如文献[1]中分析，DEM 可近似地采用大于雷达波长、小于雷达分辨率的二维小平面来逼近。同时，文献[1]中还证明了在 InSAR 原始信号仿真中，1 个雷达分辨率中只需要安放 2 个小平面。这样就可以通过一些电磁散射或者经验模型的方法来计算后向散射系数，即有 3 种模型：Kirchhoff 模型^[5]、Currie 模型^[6]和 Ulaby 模型^[7]。如笔者之前的工作^[8]所讨论，Ulaby 模型因为简单合理而被应用到本文的仿真器之中，然而它只能确定后向散射系数的强度(即幅度)。文献[5]中提出了一种简单近似的方法，假设后向散射系数的相位为 $[0,2\pi]$ 之间的均匀分布。由于主副天线的入射角都小于 1° ，因此主副天线的后向散射系数近似相等，但是副天线的后向散射系数还是需要利用后向散射系数的相关和复图像的相关这两者之间的联系来估计，这些内容在文献[8]中有详细的介绍。

需要考虑采用时域或者频域方法来计算公式(1)中的积分。虽然频域方法在计算上具有高效性，但是时域方法还考虑到了运行平台的实际轨道及一些在文献[2]中所涉及到的因素。因此，在 RSL 仿真中，采用时域方法，并针对其高复杂度的计算做了相应改进。首先，考虑到距离向发射的 chirp 信号的对称性和方位向的零斜视角对称性(一般情况)，只需要计算 1/4 的回波数据块。图 2 展示了 3 个小平面对应在原始回波中的数据块，其中数据块 1 和数据块 2 都在同一个方位向数据单元中，数据块 2 和数据块 3 处于同一个距离向单元中。以数据块 1 为例，只需要计算灰色部分，其他部分可通过方位向和距离向的对称性得到。同时，对于每一个小平面的回波数据，其计算只与该小平面的斜距以及后向散射系数有关。这种计算的独立性也使得能进行算法的并行，显著提高了计算的速度。在 CPU 中，可利用其多线程(multi-core)处理能力来加快计算速度；更进一步，在 GPU 中也可利用其超线程(many-core)来进一步加快计算速度。其中 CPU 和 GPU 在架构上的区别见图 3。可以看出，如果将回波生成中的流程控制交给 CPU 完成，而将回波积累过程放在 GPU 中完成，将大大提高仿真速度。

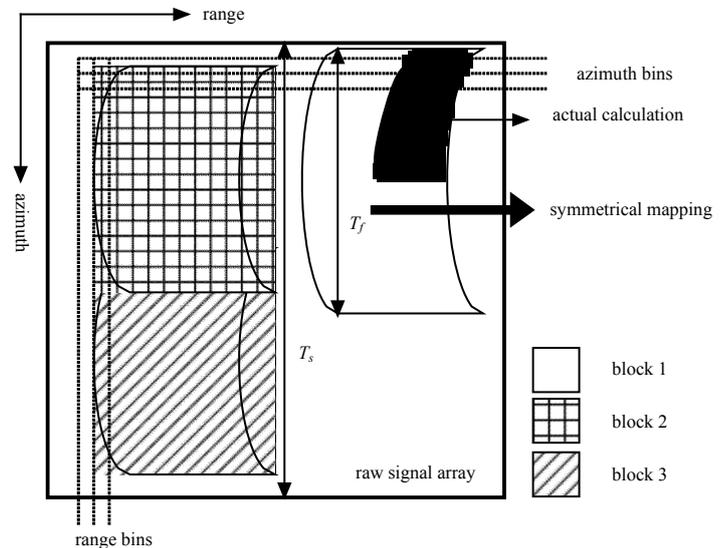


Fig.2 Raw signal generation of different facets
图 2 不同小平面的原始回波生成

需要计算灰色部分，其他部分可通过方位向和距离向的对称性得到。同时，对于每一个小平面的回波数据，其计算只与该小平面的斜距以及后向散射系数有关。这种计算的独立性也使得能进行算法的并行，显著提高了计算的速度。在 CPU 中，可利用其多线程(multi-core)处理能力来加快计算速度；更进一步，在 GPU 中也可利用其超线程(many-core)来进一步加快计算速度。其中 CPU 和 GPU 在架构上的区别见图 3。可以看出，如果将回波生成中的流程控制交给 CPU 完成，而将回波积累过程放在 GPU 中完成，将大大提高仿真速度。

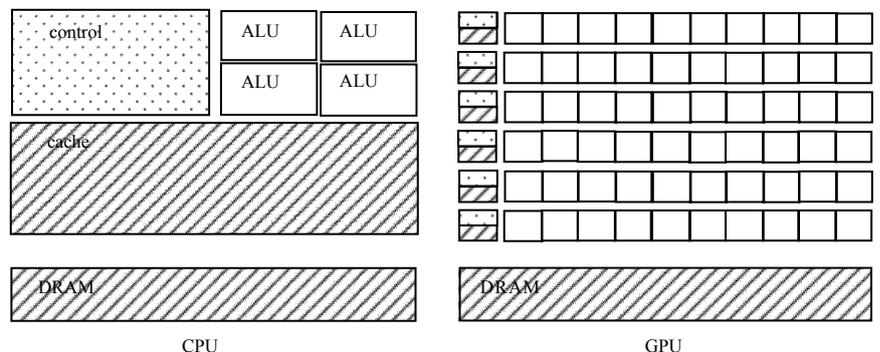


Fig.3 More transistors in GPU devoted to data processing than in CPU
图 3 CPU 和 GPU 在系统架构上的不同，其中 GPU 有更多的线程来处理数据

2.2 单视复图像级

在该层次仿真中，雷达后向散射系数的计算与 RSL 共享 1 个模块。轨道距离 r 的计算通过内插从 DEM 分辨单元 (x,y,z) 转换到雷达分辨单元 (x,r) 。同时，SIL 仿真也加入了文献[3]中所提出的图像偏差和噪声模型，见图 4。

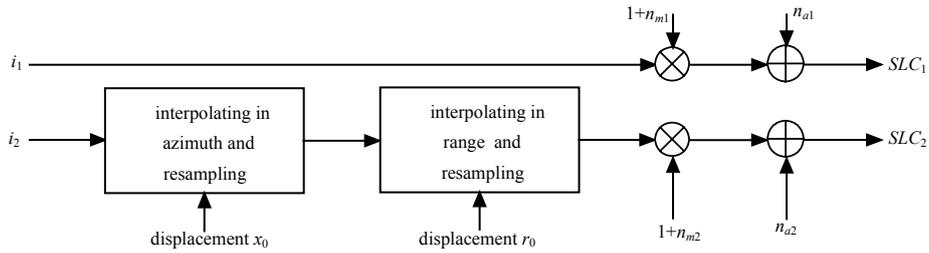


Fig.4 Error sources for the SLC image pair
图4 单视复图像级仿真中的噪声源模型

图4中，输入 i_1 和 i_2 分别是不含噪声的主副图像，而输出 SLC_1 和 SLC_2 则加入4种噪声：

噪声1：图像方位向偏差，定义在1个采样间隔内。

噪声2：图像距离向偏差，同样定义在1个采样间隔内。

噪声3：乘性斑噪声^[9] n_{m1} 和 n_{m2} ，为零均值方差为 $\frac{1}{\rho_i} - 1$ 的高斯变量， ρ_i 为图像的相关性。

噪声4：加性接收机噪声 n_{a1} 和 n_{a2} ，为零均值方差由接收机的信噪比(R_{SN})决定的高斯变量。

2.3 干涉相位级

在该层次仿真中，由于只涉及到相位信息，不需要计算雷达后向散射系数，同时轨道距离 r 的计算与 SIL 共享1个模块。干涉相位通过计算主副天线的相位差得到，同时加入了一种由几何去相关而引入的相位噪声。

InSAR 系统中极限基线定义^[10]：

$$B_{critical} = \frac{\lambda r B_w \tan(\theta - \alpha)}{c} \tag{4}$$

式中： B_w 为系统带宽； θ 为入射角； α 是 DEM 的坡度角。

此时相关性可表示为：

$$\rho = 1 - \frac{B_{\perp}}{B_{critical}} \tag{5}$$

式中 B_{\perp} 为垂直基线。这样，干涉相位的概率密度函数可表示为^[11]：

$$pdf(\varphi; \rho, N) = \frac{\Gamma(N + \frac{1}{2})(1 - \rho^2)^N \rho \cos \varphi}{2\sqrt{\pi}\Gamma(N)(1 - \rho^2 \cos^2 \varphi)^{N + \frac{1}{2}}} + \frac{(1 - \rho^2)^N}{2\pi} \cdot {}_2F_1\left(N, 1; \frac{1}{2}; \rho^2 \cos^2 \varphi\right) \tag{6}$$

式中： N 是多视的次数； $\Gamma(\cdot)$ 是 Gamma 函数； ${}_2F_1(\cdot)$ 是超几何函数。这样，通过式(4)~式(6)将 DEM 的坡度和几何去相关通过零均值方差为式(6)的高斯噪声联系起来。

3 实验结果

实验中，采用 ERS-1 卫星的系统参数，见表1。首先需要测试 RSL 仿真中的计算复杂度，主要考察最费时的实乘操作。考虑到回波生成过程中的对称性，实乘数量较文献[2]中计算量大约减少了 3/4，见图5。同时，基于 CPU 的多线程处理对仿真速度的提升也在该表1中。实验中，采用 Intel 的 1.5 GHz 的四核 Itanium 处理器。更进一步，采用 Quadro FX 3700 显卡中 GPU 技术超线程进行回波生成，能够进一步提升仿真速度，见图6。虽然经过上述技术已经大大提升了时域方法的速度，但是比频域方法，其计算复杂度依然比较高。需要注意的是，基于时域的原始信号仿真能够非常方便地模拟诸如平台的不稳定等因素，见图7。

表1 仿真器中使用的 ERS1 卫星主要参数
Table1 Main ERS-1 system parameters used in the simulator

parameter	value
carrier frequency	5.3 GHz
look angle	23°
platform height	775.8 km
platform velocity	6.7 km/s
pulse length	37.12 μs
chirp bandwidth	15.55 MHz
sampling frequency	18.94 MHz
PRF	1 678 Hz
baseline length	100 m-300 m
baseline tile angle	10°
scene size	8 km × 8 km

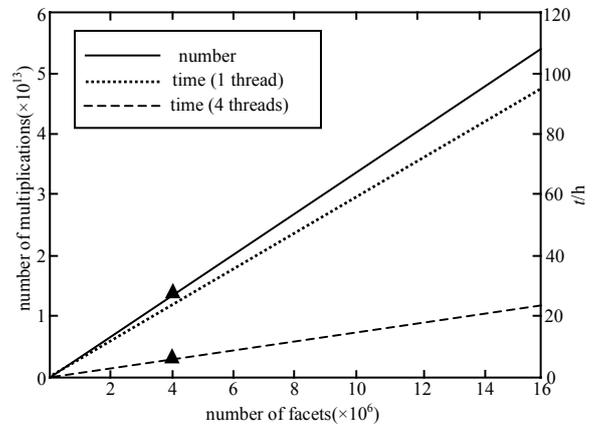


Fig.5 Number of real multiplications(continuous line),time without (dotted line) and with (dashed line) multithreading in the RSL simulator. The ▲ indicates the case tested in this section
图5 实乘数(实线)，不采用(点线)和采用(虚线)CPU 的多核处理能力的时间，其中▲给出了实验中的情况

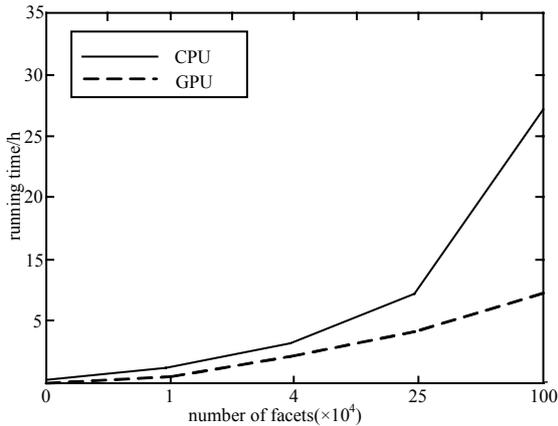


Fig.6 Simulation time comparison between CPU and GPU
图 6 CPU 和 GPU 仿真速度的比较

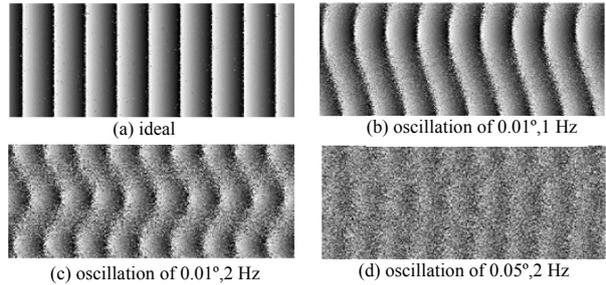


Fig.7 Interferogram of a flat earth, near range is on the left
图 7 平地的干涉相位，其中近地点在左边

为了测试多层次仿真器的性能，仿真了 1 个高度为 500 m 的金字塔 DEM。图 8(a)给出了 RSL 和 SIL2 个仿真器所生成的单视复图像的幅度图。RSL 生成的干涉条纹见图 8(b)，可看出由于去相关而带来的相位噪声。同时，在 SIL 仿真中，设定方位/距离向偏差为 0.1 个像素点，等效相关系数为 0.9， R_{SN} 为 30 dB，得到的干涉条纹见图 8(c)。最后，干涉条纹级仿真直接得到的干涉条纹见图 8(d)，其中包含了由于几何去相关而引入的加性噪声。将 3 个层次的仿真结果进行对比，可以发现除了噪声模型的不同之外，条纹的数量和趋势都是相同的，这就证明了本文的仿真器在不同层次仿真结果的正确性。同时，也在不同的层次之间进行了比较，见表 2。

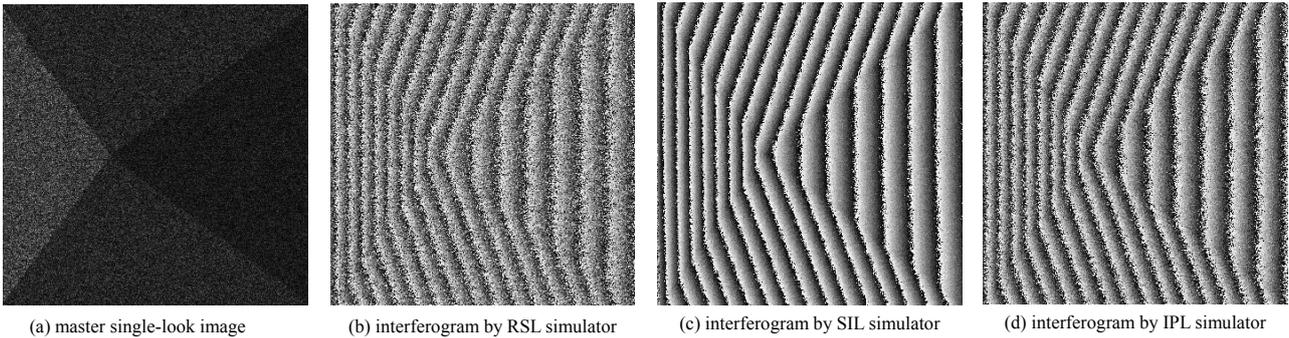


Fig.8 Results of multilevel simulator where near range is on the left
图 8 多层次仿真器的实验结果

表 2 不同仿真层次之间的比较

Table2 Comparison of the three simulation levels

	RSL	SIL	IPL
raw signal	yes	no	no
SLC images	yes	yes	no
interferogram	yes	yes	yes
error sources	CBC model,echo collection and imaging	four types of simulated errors	geometric de-correlation
resolution	radar	radar	DEM
run speed	slow	fast	very fast
reality	high	medium	low

4 结论

本文提出了一种多层次 InSAR 仿真器，其包含 3 个仿真级别：RSL、复图像级和 IPL。如果需要考察包括回波生成和数据成像等方面在内的 InSAR 系统处理流程，可以选择 RSL 仿真；如果重点需要测试 InSAR 处理的一些算法的性能，可选择 SIL 仿真；如果想快速生成干涉相位，则需要选择 IPL 仿真。同时，在各自的仿真级别中，作了相应的改进工作。该仿真器能够同时工作于星载和机载两种模式，也能非常方便地仿真出 SAR 图像。最后，实验结果证实了该多层次仿真器的正确性和有效性。

(下转第 327 页)