

文章编号:1671-8879(2014)04-0109-06

超宽带探地 SAR 原始回波数据 仿真二维频域快速算法

刘 昕,张林让,周 宇

(西安电子科技大学 雷达信号处理国家重点实验室,陕西 西安 710071)

摘要:针对超宽带探地合成孔径雷达原始回波模拟仿真速度慢的问题,提出了一种二维频域超宽带探地 SAR(synthetic aperture radar)原始回波数据仿真快速算法。分析了超宽带探地 SAR 的信号模型,在方位时域模拟了不随距离空变的距离徙动,重新推导了超宽带探地 SAR 的传递函数,最后通过引入一个新的补偿函数对探地 SAR 的距离空变性进行了模拟。研究表明:将仿真结果与时域算法比较可知,该算法能够在保证回波数据高仿真精度的基础上大大提高仿真速度,计算效率提高了约 $O(N_a N_r / \ln(N_a N_r))$ 个数量级;该算法是一种高效的、准确的获取超宽带探地合成孔径雷达原始回波数据的方法,是研究超宽带探地 SAR 的重要组成部分。

关键词:探地 SAR;超宽带;回波数据模拟;合成孔径雷达(SAR)

中图分类号:U411 文献标志码:A

2-D fourier domain fast algorithm for UWB ground penetrating SAR raw signal simulation

LIU Xin, ZHANG Lin-rang, ZHOU Yu

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

Abstract: In order to solve the problem of slow simulation speed of UWB ground penetrating SAR raw signal, this paper proposed a two-dimensional fourier domain fast algorithm. Based on the analysis of signal characteristics, this paper simulated the main range migration which caused by reference range in azimuth time-domain, deduced a new transfer function of UWB ground penetrating SAR, and solved the range-variant problem by introducing a new compensation function. The results show that the algorithm can improve the efficiency of simulation with high precision after comparing the simulation results with time-domain algorithm. And the computational load is reduced by the order of $O(N_a N_r / \ln(N_a N_r))$. This is an effective and accurate method in obtaining raw signal simulation for UWB ground penetrating SAR, which plays an important role in the study of UWB ground penetrating SAR. 2 tabs, 3 figs, 20 refs.

Key words: ground penetrating SAR; ultra wide band; raw signal simulation; synthetic aperture radar

0 引言

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)以其非破坏性探测、抗干扰性强、分辨率高等优势,在较短时间内被迅速推广应用于地下管线的探测与定位、公路和机场的道路质量检测、浅层地表的结构探测、路面厚度检测、路基密实程度检测以及地质勘探等多个领域^[1-2]。1994年 Roddis 等对美国 Kansas 州的 11 种不同道路利用探地雷达进行了分层检测工作,偏差仅为 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 。2005 年 8 月美国的火星探测器(mars reconnaissance orbiter, MRO)搭载的探地雷达对火星约 1 km 深度内的浅表层结构进行了探测。在 1990~1995 年间,斯坦福研究所开发了探地 SAR,它是用于对土壤中的金属目标(如管线等)进行成像的 SAR 系统^[3]。中国的专家学者也对探地 SAR 进行了大量的研究,卢成明等研究了探地雷达检测公路结构的方法^[4];李才明等研究了基于小波能谱分析的岩溶区探地雷达目标识别^[5];何亮等研究了探地雷达测定土壤水含量的方法^[6]。对探地雷达的研究已经越来越成为近年来一个热点课题。

由于探地雷达是一种对浅层隐藏目标的探测技术,这就要求探地雷达具有较强的穿透能力,所以探地雷达一般采用超宽带(UWB)技术,自 20 世纪 90 年代以来,超宽带探地(UWB)SAR 技术获得迅速发展^[7-9]。UHF/VHF 波段的超宽带系统与合成孔径成像技术相结合,形成了超宽带合成孔径雷达(UWB-SAR),它具有良好的穿透能力,可穿透地表探测隐蔽目标,实现高分辨率成像,地下隐藏目标可清晰、直观的在处理后的成像图中看到,对定位、识别等具有重要的实用价值。与高频窄带的常规 SAR 相比,由于 UWB-SAR 方位波束张角较大(通常几十度)、合成孔径时间长、距离方位耦合性强、距离徙动严重的特点,从而增加了快速获得超宽带探地 SAR 回波数据的难度。

合成孔径雷达(SAR)原始数据模拟技术在 SAR 算法研究和系统仿真中具有十分重要的作用。基于回波数学模型的时域方法物理概念清晰,能够精确模拟出 SAR 回波信号,但计算量巨大,不适用于大场景目标回波模拟^[10];传统合成孔径雷达(SAR)频域回波模拟算法直接推导了系统传递函

数的二维频域表达式,利用频域内的 FFT 代替了时域卷积,大大提高了仿真速度,但推导中采用大量的近似,仅适用于正侧视窄带 SAR,针对超宽带探地 SAR 方位波束张角较大、距离方位耦合性强、距离徙动严重等特点,传统二维频域算法将产生较大的误差。文献[8]推导了超宽带探地 SAR 的频域表达式,但在低载频、大场景情况下误差较大;文献[11]针对强距离方位耦合进行了研究,提出了沿距离向积分的快速算法,虽然保证了模拟精度,但其效率远远不如二维频域算法;虽然针对大距离方位耦合的 SAR 原始回波数据仿真进行了大量研究,但其仿真结果均是在窄波束及运动误差慢变化假设下进行了,虽然在后续的研究中放宽了假设,但其对 SAR 系统参数仍有一定限制^[12-13]。

为此,本文参考了 Franceschetti 等人提出的二维频域模拟方法的思路,根据超宽带 SAR 的特点提出一种探地 SAR 原始回波数据二维频域快速模拟算法,分析了超宽带探地 SAR 的信号模型,重新推导了超宽带探地 SAR 的传递函数,在方位时域模拟了不随距离空变的距离徙动,然后模拟了大场景情况下随距离空变的小包络弯曲,保证了回波数据包络以及相位的准确性,据此给出了其回波信号的二维频域快速模拟算法。性能分析表明,本文算法的计算效率远高于时域算法以及沿距离向积分算法。

1 信号模型

在正侧视情况下,超宽带探地 SAR 在任意时刻 t_m ,系统的瞬时斜距变化 $R(t_m; R_0)$ 方程为

$$R(t_m; R_0) = \sqrt{R_0^2 + (Vt_m)^2} \quad (1)$$

式中: R_0 为目标斜距; V 为雷达运动速度。

由于超宽带探地 SAR 有较大方位波束张角,所以其瞬时斜距变化方程不能在简单的近似为二次函数,在 $t_m = 0$ 时刻,将斜距变化方程进行泰勒级数展开

$$R(t_m; R_0) = \sqrt{R_0^2 + (Vt_m)^2} = R_0 + k_1 t_m + k_2 t_m^2 + k_3 t_m^3 + \dots \quad (2)$$

式中: k_1, k_2, k_3, \dots 为泰勒展开式的系数。

由于超宽带探地 SAR 采用正侧视工作方式,所以斜距变化方程的展开式可写为

$$R(t_m; R_0) = R_0 + k_2 t_m^2 + k_4 t_m^4 + \dots \quad (3)$$

式中: k_2 为线性调频率, $k_2 = \frac{V^2}{2R_0}$; k_4 为高阶相位,

$$k_4 = \frac{V^4}{8R_0^3}。$$

由公式可以看出,距离徙动及空变性主要存在于 k_2, k_4 项中, k_4 项与目标斜距的三次方成反比,所以 k_4 随 R_0 变化较小,基本可以忽略不计,即用场景中心斜距 R_s 代替即可;而 k_2 项受距离空变性的影响较大,将瞬时斜距分为距离徙动项以及随距离变化的空变性项,则距离徙动项 ΔR_{\perp} 可写为

$$\Delta R_{\perp} = \frac{V^2}{2R_s} t_m^2 - \frac{V^4}{8R_s^3} t_m^4 \quad (4)$$

而随距离变化的空变性项 ΔR_{\parallel} 可写为

$$\Delta R_{\parallel} = \left(\frac{V^2}{2R_0} - \frac{V^2}{2R_s} \right) t_m^2 \quad (5)$$

假设超宽带 SAR 雷达发射线性调频信号,则雷达接收的回波基带信号 $g(\hat{t}, t_m; R_0)$ 可写为

$$g(\hat{t}, t_m; R_0) = a_r \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_0)}{c} \right) a_a(t_m) \cdot e^{j\pi\gamma \left(\hat{t} - \frac{2R(t_m; R_0)}{c} \right)^2} e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} R(t_m; R_0)} \quad (6)$$

式中: $a_r(\cdot)$ 、 $a_a(\cdot)$ 分别为雷达回波信号的距离窗函数和方位窗函数; \hat{t} 为距离快时间; $\lambda = c/f_c$ 为雷达载波频率 f_c 对应的波长; c 为光速; γ 为线性调频率。

对式(6)中快时间做傅里叶变换后得到

$$G(f_r, t_m; R_0) = a_r(f_r) a_a(t_m) e^{-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c} R(t_m; R_0)(f_r + f_c)} \quad (7)$$

式中: f_r 为距离向频率; $R(t_m; R_0) = R_0 + \Delta R_{\perp} + \Delta R_{\parallel}$ 。

首先将不含距离徙动及距离空变性状态下的超宽带探地 SAR 的传递函数进行模拟,再分别对距离徙动及距离空变性进行模拟,即可以得到大方位波束张角的超宽带探地 SAR 的回波,这里仅对回波包络进行操作,解耦合后的传递函数为

$$G(f_r, t_m; R_0) = a_r(f_r) a_a(t_m) e^{-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}} \cdot e^{-j\frac{4\pi}{c} (R_0)(f_r + f_c) + \frac{V^2}{k_0} t_m^2 f_c} \quad (8)$$

则根据驻相点原理,对系统传递函数慢时间做傅里叶变换,得到新的传递函数二维频域表达式为

$$G(f_r, f_a; R_0) = a_r[-f_r/\gamma] \cdot a_a \left(\frac{-\lambda R_0 f_a}{\sqrt{4V^2(f_c + f_r)^2 - c^2 f_a^2}} \right) e^{-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}} \cdot e^{-j2\pi f_a \frac{y}{V}} e^{-j\frac{4\pi}{c} R_0 (f_c + f_r)} e^{j\pi\frac{f_a^2 R_0}{2V^2 f_c}} \quad (9)$$

式中: f_a 为方位向多普勒频率; y 为目标在方位上

偏移场景中心的距离。

2 原始数据二维频域模拟算法

假设场景的二维复散射系数为 $\gamma(y, r)$, y 为目标在方位上偏移场景中心的距离, r 为目标在距离上偏离场景中心的距离,则场景的回波信号为

$$s(\hat{t}, t_m) = \iint dy dr \gamma(y, r) g(\hat{t}, t_m) \quad (10)$$

对场景的回波信号做二维傅里叶变换,其二维频域的表达式为

$$S(f_r, f_a) = \iint dy dr \gamma(y, r) G(f_r, f_a) \quad (11)$$

将式(10)代入式(12)可得

$$S(f_r, f_a) = \iint dy dr \gamma(y, r) G(f_r, f_a) = \iint dy dr \gamma(y, r) e^{-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}} e^{-j2\pi f_a \frac{y}{V}} e^{-j\frac{4\pi}{c} R_0 (f_c + f_r)} \cdot e^{-j\pi\frac{f_a^2 R_0}{2V^2 f_c}} = \iint \gamma(y, r) e^{-j2\pi f_a \frac{y}{V}} e^{-2\pi f_r \frac{2R_0}{c}} \cdot dy dr e^{-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}} e^{-j\frac{4\pi}{c} R_0 f_c} e^{j\pi\frac{f_a^2 R_0}{2V^2 f_c}} \quad (12)$$

首先对方位调制项进行模拟,再在时域上乘以空变函数,方位调制函数为

$$G_0(\hat{t}, f_a) = e^{j(\varphi_0(f_a; R_0))} \quad (13)$$

$$\text{这里 } \varphi_0(f_a; R_0) = \left[j \frac{4\pi}{c} R_0 f_c \right] \left[-\pi c \frac{f_a^2 R_0}{2V^2 f_c} \right]。$$

由上节分析可知,距离空变性模拟函数为

$$G_1(\hat{t}, t_m) = e^{(-j\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R_{\parallel})} \quad (14)$$

将回波信号变至二维频域可以得到

$$S(f_r, f_a) = \iint \gamma(y, r) e^{-j2\pi f_a \frac{y}{V}} e^{-2\pi f_r \frac{2R_0}{c}} dy dr e^{-j\pi\frac{f_r^2}{\gamma}} = F_{f_r, f_a} [\gamma(y, r)] G_2(f_r, f_a) \quad (15)$$

式中: $F_{f_r, f_a}[\cdot]$ 为方位距离二维 FFT; $G_2(f_r, f_a)$ 为系统传递函数。

最后在距离频域-方位时域上进行距离徙动的模拟,由上节的分析可知,模拟距离徙动的传递函数为

$$G_3(f_r, t_m; R_0) = e^{j\pi\frac{4\pi}{c} (R_0) t_m^2 f_r + (-\frac{V^4}{8R_0^3} t_m^4)(f_r + f_c)} \quad (16)$$

综上所述,算法的流程图如下页图 1 所示。

3 运算量分析

设回波数据矩阵方位向为 N_a 采样点,距离向采样点数为 N_r ,散射系数 $\gamma(y, r)$ 与回波矩阵大小相同,运算量一般用算法中的复乘次数来评估,则时

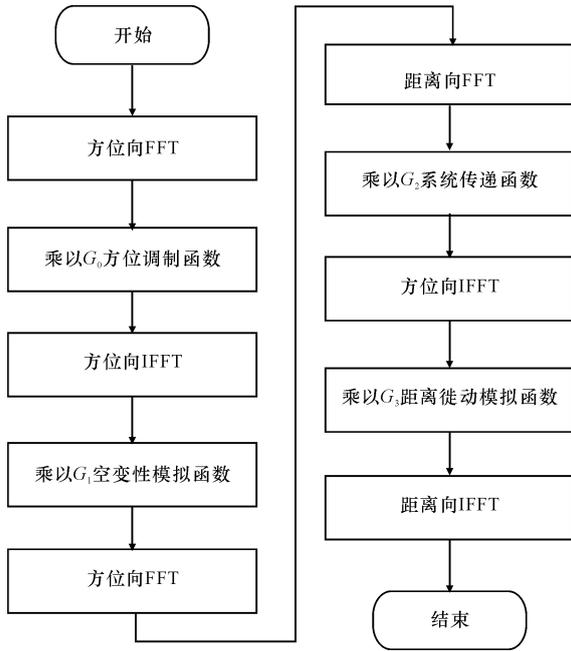


图1 算法流程

Fig. 1 Flow of proposed algorithm

域算法需要 $N_r(N_a N_r)^2$ 次复乘运算,根据算法流程图可知,4次相位函数所需复乘次数为 $4N_a N_r$,二维FFT和IFFT所需复乘次数为 $1.5N_a N_r \ln(N_a N_r)$,所以本算法需要的复乘次数为

$$N_{ff} = 4N_a N_r + 1.5N_a N_r \ln(N_a N_r) \quad (17)$$

可以看出,超宽带探地SAR二维频域算法比时域算法提高了约

$$N_r/N_{ff} = N_a N_r / (4 + 1.5 \ln(N_a N_r)) \quad (18)$$

随着回波矩阵尺寸的增加,二维频域算法的效率会越来越明显,大约提高了 $O(N_a N_r / \ln(N_a N_r))$ 个数量级。对于大场景的SAR原始数据模拟而言,二维频域方法计算效率具有明显的优势。

4 仿真试验

为了验证本算法的高效性和正确性,进行了计算机仿真,仿真参数见表1。

表1 SAR参数

Tab. 1 SAR parameters

载频/MHz	400	雷达高度/m	500
信号带宽/MHz	200	条带宽度/m	400
PRF/MHz	300	天线尺寸/m	2
信号脉宽/ μs	0.5	雷达速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	110

分别用时域方法以及本文所述的二维频域方法进行仿真。为了验证超宽带探地SAR原始数据频域模拟方法对于大场景目标的模拟性能,设置2个

点目标,目标1设置于场景中心,目标2设置于与场景中心同一方位向距场景中心200 m处。

下页图2为本文所述算法产生的回波和时域算法模拟回波的归一化幅度比较值。可以看出,相比于时域算法,场景中心的点目标距离向归一化幅度的误差不超过0.25,方位向归一化幅度的误差小于0.2,目标2虽然形状略有变差,但距离向方位向归一化幅度误差也与场景中心相当;下页图3给出了本文所述回波产生方法与时域算法相比的相位误差,在孔径范围内,场景中心目标点1最大距离相位误差为0.3 rad,最大方位相位误差为0.2 rad,距离场景200 m处的目标点2最大距离相位误差为0.35 rad,最大方位相位误差为0.2 rad,均远小于 $\pi/4$ rad,其影响可以忽略。对2种算法生成的回波信号分别进行成像,表2给出了成像性能指标。可以看出,目标1与目标2在距离向和方位向的峰值旁瓣比(PSLR)以及积分旁瓣比(ISLR)与时域模拟方法的相应数值都比较接近。由此可见本文所述算法能够较为准确地模拟超宽带探地SAR的回波信号。

表2 点目标成像结果性能分析

Tab. 2 Analysis of point target quality measurements

算法	距离向		方位向	
	峰值旁瓣比	积分旁瓣比	峰值旁瓣比	积分旁瓣比
时域算法	-13.32	-10.32	-13.15	-10.44
频域算法(目标1)	-13.30	-10.11	-13.02	-9.98
频域算法(目标2)	-12.83	-9.16	-12.85	-9.47
理论值	-13.26	-9.80	-13.26	-9.80

5 结语

(1)理论和实践表明,本文提出的二维频域模拟算法克服了超宽带探地SAR原始回波数据模拟运算量大、仿真速度慢的问题,并能够保证足够的仿真精度,是研究超宽带探地SAR信号处理的基础,对超宽带探地SAR的研究具有重要意义。

(2)对雷达目标的距离空变性进行了补偿,这使得雷达的探测面积得到了扩展,通过仿真试验可知,补偿后场景边缘点的相位误差和幅度误差均很小,可以忽略,对空变性的补偿保证了大场景面目标的仿真精度。

(3)本文讨论均是基于合成孔径雷达正侧视情况下,这也是斜距高阶项可以忽略的基础,而斜视以

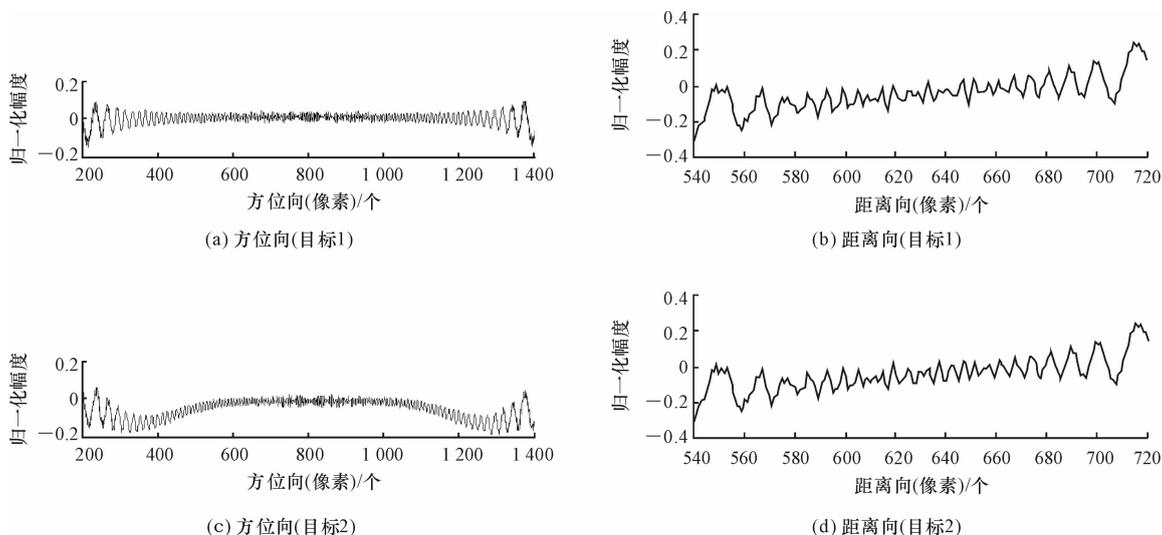


图 2 本文算法与时域算法模拟回波的归一化幅度比较

Fig. 2 Comparison between the proposed algorithm and time-domain algorithm on their normalized amplitude of raw signal

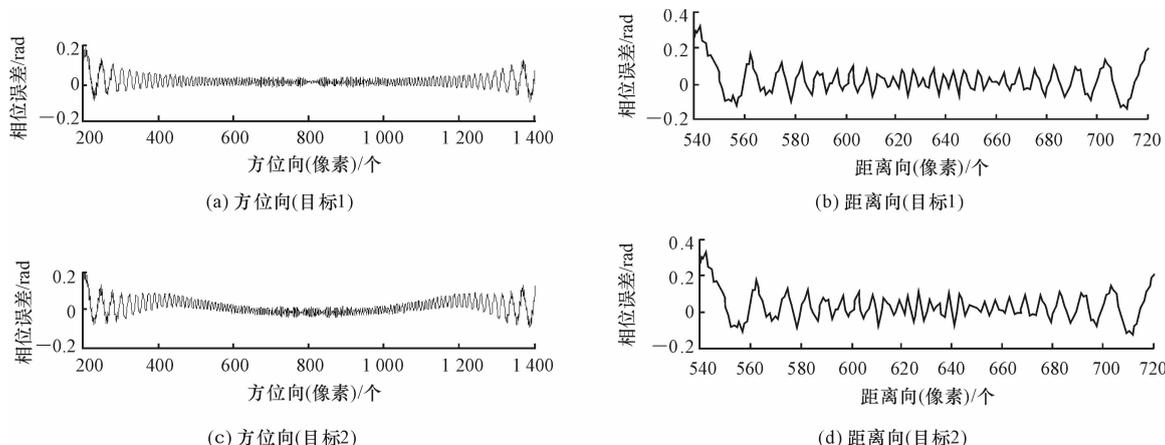


图 3 相位误差

Fig. 3 Range and azimuth cuts of overall phase error

及前视等情况将在后续研究中作进一步的讨论。

参考文献:

References:

- [1] 曾昭发,刘四新,王者江,等.探地雷达方法原理及应用[M].北京:科学出版社,2006.
ZENG Zhao-fa, LIU Si-xin, WANG Zhe-jiang, et al. Method theory and application of ground penetrating radar[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [2] 石刚,田养军,王亚琼,等.基于模糊分型脉冲反褶积的探地雷达信号处理[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(5):79-84.
SHI Gang, TIAN Yang-jun, WANG Ya-qiong, et al. Signal processing of ground-penetrating radar on the principle of deconvolution based on fuzzy fractal pulse

- [J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2012, 32(5): 79-84. (in Chinese)
- [3] 刘四新,冯彦谦,傅磊.机载探地雷达的进展以及数值模拟[J].地球物理学进展,2012,27(2):727-735.
LIU Si-xin, FENG Yan-qian, FU Lei. Advances and numerical simulation of airborne ground penetrating radar[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(2): 727-735. (in Chinese)
- [4] 卢成明,秦臻,朱海龙,等.探地雷达检测公路结构层隐含裂缝实用方法研究[J].地球物理学报,2007,50(5):1558-1568.
LU Cheng-ming, QING Zhen, ZHU Hai-long, et al. Practical methods for detection of concealed cracks in highway pavement using ground penetration radar data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(5): 1558-1568. (in Chinese)
- [5] 李才明,王良书,徐鸣洁,等.基于小波能谱分析的岩

- 溶区探地雷达目标识别[J]. 地球物理学报, 2006, 49(5):1499-1504.
- LI Cai-ming, WANG Liang-shu, XU Ming-jie, et al. Objects recognition of ground penetrating radar in karst regions using wavelet energy spectrum analysis [J]. Chinese Journal Geophysics, 2006, 49(5): 1499-1504. (in Chinese)
- [6] 何亮, 王旭东, 杨放, 等. 探地雷达测定土壤含水量的研究进展[J]. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1673-1679.
- HE Liang, WANG Xu-dong, YANG Fang, et al. Estimation of soil water content by ground penetrating radar[J]. Progress in Geophysics, 2007, 22(5): 1673-1679. (in Chinese)
- [7] 王顺华, 黄晓涛, 梁甸农. 一种有效地 uwb-sar 成像方法[J]. 国防科技大学学报, 1998, 20(4): 47-52.
- WANG Shun-hua, HUANG Xiao-tao, LIANG Dian-nong. An efficient algorithm for UWB-SAR imagery [J]. Journal of National University of Defense Technology, 1998, 20(4): 47-52. (in Chinese)
- [8] 刘光平. 超宽带 SAR 高效成像算法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2003.
- LIU Guang-ping. Efficient image generation for UWB-SAR[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2003. (in Chinese)
- [9] 郑文军, 赵志钦, 张薇, 等. 超宽带探地雷达中 TRM-SAR 成像技术研究[J]. 电子科技大学学报, 2011, 40(3): 363-366.
- ZHENG Wen-jun, ZHAO Zhi-qin, ZHANG Wei, et al. Study of TRM-SAR imaging technique in the UWB ground penetrating radar[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2011, 40(3): 363-366. (in Chinese)
- [10] Mori A, Vita F D. A time-domain raw signal simulator for interferometric SAR[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(9): 1811-1817.
- [11] 刁桂杰, 许小剑. 大斜视 SAR 原始数据的快速模拟算法研究[J]. 电子信息学报, 2011, 33(3): 685-689.
- DIAO Gui-jie, XU Xiao-jian. Fast algorithms for SAR raw data simulation with large squint angles[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(3): 685-689. (in Chinese)
- [12] Franceschetti G, Iodice A, Perna S, et al. SAR sensor trajectory deviations: fourier domain formulation and extended scene simulation of raw signal [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(9): 2323-2334.
- [13] Franceschetti G, Iodice A, Perna S, et al. Efficient simulation of airborne SAR raw data of extended scenes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(10): 2851-2860.
- [14] 刘向阳, 曾操, 王静, 等. 一种二维频域 SAR 回波仿真的改进方法[J]. 西安电子科技大学学报, 2013, 40(3): 42-49.
- LIU Xiang-yang, ZENG Cao, WANG Jing, et al. Improved method for SAR echo signal simulation using two-dimensional frequency domain transformation [J]. Journal of Xidian University, 2013, 40(3): 42-49. (in Chinese)
- [15] 于彬彬, 刘畅, 王岩飞. 一种滑动聚束模式 FMCW-SAR 快速回波模拟算法[J]. 电子信息学报, 2012, 34(8): 1879-1884.
- YU Bin-bin, LIU Chang, WANG Yan-fei. A fast echo signal simulating algorithm for sliding spotlight mode FMCW-SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 34(8): 1879-1884. (in Chinese)
- [16] 汪丙南, 张帆, 向茂生. 基于混合域的 SAR 回波快速算法[J]. 电子信息学报, 2011, 33(3): 690-695.
- WANG Bing-nan, ZHANG Fan, XIANG Mao-sheng. SAR Raw signal fast algorithm in mixed domain[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(3): 690-695. (in Chinese)
- [17] Franceschetti G, Migliaccio M, Riccio D, et al. SARAS: a SAR raw signal simulator[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(1): 110-123.
- [18] 韦立登, 李绍恩, 吴一戎, 等. SAR 原始回波信号生成算法的性能比较研究[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(2): 262-265.
- WEI Li-deng, LI Shao-en, WU Yi-rong, et al. Performance comparison of algorithms for SAR raw signal generation[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(2): 262-265. (in Chinese)
- [19] Deng G B, Li X, Wang H, et al. Fast raw-signal simulation of extended scenes for missile-borne SAR with constant acceleration [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letter, 2011, 8(1): 44-48.
- [20] 文竹, 周荫清, 陈杰. 分布式小卫星 SAR 回波信号精确仿真方法研究[J]. 宇航学报, 2006, 27(5): 909-914.
- WEN Zhu, ZHOU Yin-qing, CHEN Jie. Research on distributed satellite SAR echo signal accurate simulation method[J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(5): 909-914. (in Chinese)

