

条带 FMCW-SAR 回波数据的二维频域模拟算法

马兵强^{*①②} 于彬彬^{①②} 刘 畅^① 王岩飞^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: FMCW-SAR 因其体积小、重量轻、成本低和高分辨率等优点近年来发展迅速, 在低成本的民事应用领域具有广阔的发展前景。传统脉冲 SAR 的系统冲击响应函数不同于 FMCW-SAR, 因而, 脉冲 SAR 的快速回波模拟算法不能直接应用于 FMCW-SAR。该文在分析了条带 FMCW-SAR 信号特性的基础上, 提出了其原始回波数据的 2 维频域快速模拟算法。该算法利用 FFT 快速实现了回波数据时域模拟方法中的距离向和方位向积分运算。与时域模拟方法相比, 其计算效率提高了 $O(N_a N_r / \log_2(N_a N_r))$ 个数量级。点目标回波数据的仿真实验验证了所提算法的合理性和有效性。

关键词: 调频连续波合成孔径雷达(FMCW-SAR); 回波数据模拟; 2 维频域

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)02-0375-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2010.00430

A 2-D Fourier Domain Algorithm for StripMap FMCW-SAR Raw Signal Simulation

Ma Bing-qiang^{①②} Yu Bin-bin^{①②} Liu Chang^① Wang Yan-fei^①

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: Because of small size, lightweight, inexpensive and high-resolution, recently FMCW-SAR develops rapidly and has a great prospect in the cost-effective civil applications. The system transfer function of StripMap FMCW-SAR is different from that of pulsed SAR, therefore the efficient simulation approaches for pulsed SAR could not directly be applied to FMCW-SAR. Based on the analysis of the StripMap FMCW-SAR signal characteristics, a 2-D Fourier domain algorithm of the raw signal simulation for stripmap FMCW-SAR is proposed. The proposed algorithm computes the range and azimuth integration used in time-domain simulation method efficiently by FFT technique. With respect to the time-domain simulation, the computational load is reduced by the order of $O(N_a N_r / \log_2(N_a N_r))$. The rationality and effectiveness of the presented algorithm are verified with the simulation.

Key words: Frequency Modulated Continuous Wave SAR (FMCW-SAR); Echo data simulation; 2-Dimensional Fourier domain

1 引言

传统脉冲体制合成孔径雷达(SAR)经典的回波模拟算法有距离时域脉冲相干法(Range Time Domain Pulse Coherence, RTDPC)、距离频域脉冲相干法(Range Frequency Domain Pulse Coherence, RFDPC)^[1]和 2 维频域快速傅里叶变换法(2-Dimensional Frequency Domain Fast Fourier Transform Method, 2-DFDFFT)等^[2-4]。RTDPC 是一种最基本的回波信号模拟方法, 其最大的缺点是存在由计算偏移距离门时的取整近似引起的误差

相位。RFDPC 利用距离频域的相位因子精确模拟距离时域的距离偏移, 不存在取整近似, 比前者更加精确。距离时域和频域脉冲相干法本质上都是按照脉冲顺序生成回波信号, 每次只计算一个脉冲的回波信号, 因此它们的运算量巨大, 计算效率低。2-DFDFFT 通过对 SAR 系统传递函数的空变性作一定的近似, 利用 2 维快速傅里叶变换(2-Dimensional Fast Fourier Transform, 2D-FFT)快速计算场景目标散射系数与 SAR 系统传递函数的 2 维时域卷积。与前面两种脉冲相干法相比, 其优点主要是计算效率高和距离徙动的精确模拟。

调频连续波合成孔径雷达(Frequency

Modulated Continuous Wave SAR, FMCW-SAR) 结合了合成孔径技术与连续波体制两方面的优点, 近年来发展迅速^[5,6]。FMCW-SAR 收发分置, 发射和接收信号同时进行, 以“去调频率”方式接收回波数据, 因而其系统冲击响应函数不同于传统的脉冲 SAR。因此, 前面介绍的脉冲 SAR 原始回波信号的模拟算法不适用于 FMCW-SAR 系统。该文分析了条带 FMCW-SAR 的几何关系, 建立其信号模型和系统冲击响应函数, 据此给出了其回波信号的 2 维频域快速模拟算法。文中给出了该算法的流程图, 并分析了各个步骤的运算量, 最后比较了与时域模拟方法之间的计算效率。利用典型参数仿真了位于测绘带中心和边缘处的两个点目标对应的回波信号, 仿真实验的结果验证了所建信号模型的合理性和提出算法的有效性。

2 条带 FMCW-SAR 的系统传递函数

图 1 给出了条带 FMCW-SAR 的成像几何关系, O 点表示慢时间零点, OX 是载机的飞行方向。场景中一个理想的孤立点目标 $\delta(x_0, r_0)$ 的回波信号就是 FMCW-SAR 系统的传递函数, 也称为点目标冲击响应函数(Point Scatter Response, PSR)。方位位于 x_0 , 与航线垂直距离 r_0 的点目标 $P(x_0, r_0)$ 的回波信号为^[7]

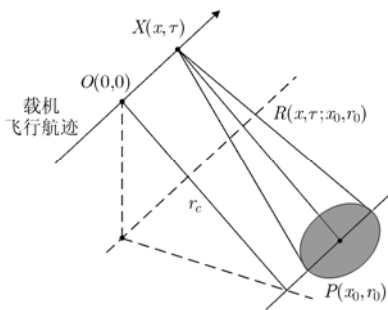


图 1 条带 FMCW-SAR 的几何关系

$$h(x, k_r, \tau; x_0, r_0) = \text{rect}(x_0 - x / L_s) \exp[-j \cdot (k_0 + k_r)(R(x, \tau; x_0, r_0) - r_c)] \cdot \exp[j \phi_{RVP}(x, \tau; x_0, r_0)] \quad (1)$$

式(1)中

$$k_r = 4\pi K_r(\tau - \tau_c) / c \quad (2)$$

$$R(x, \tau; x_0, r_0) = \sqrt{r_0^2 + (x + v\tau - x_0)^2} \quad (3)$$

$$\phi_{RVP}(x, \tau; x_0, r_0) = 4\pi / c^2 \cdot K_r (R(x, \tau; x_0, r_0) - r_c)^2 \quad (4)$$

式(1)中将波束双程方向图近似为矩形函数, L_s 是斜距 r 处的合成孔径长度, $L_s = r\lambda / D$, D 是天线方位尺寸, τ 是距离快时间变量, x 是方位位置变量。

r_c 是位于测绘带中心线上的目标被天线波束中心照射时其与雷达之间的瞬时距离, 一般被选为参考距离。式(1)中第 1 个相位项包含了多普勒相位历史和距离向信息。式(1)中 $k_0 = 4\pi / \lambda$ 是个常数。式(2)中的 k_r 表示距离波数, λ 是波长, $\tau_c = 2r_c / c$, 表示参考距离对应的双程传播延时, K_r 是发射线性调频信号的调频斜率。

式(3)表示目标与雷达之间的瞬时斜距, v 为载机的飞行速度。与脉冲体制 SAR 信号模型相比, FMCW-SAR 信号模型的主要区别在于式(3)所示的瞬时斜距方程。脉冲体制 SAR 中脉冲持续时间非常短, 一般在微妙量级, 而 FMCW-SAR 的脉冲重复周期一般在毫秒量级。因此, 在快时间采样期间载机运动造成的斜距变化 $v\tau$ 远小于波长 λ , 可以忽略, 这就是目前脉冲体制 SAR 理论分析和工程处理的基础即“停-走-停”假设。但在 FMCW-SAR 中目标信号的持续时间跨越整个距离向采样时间, 扫频周期内载机的连续运动导致的快时间走动量 $v\tau$ 会引起回波信号的多普勒频移效应, 该多普勒频移造成的距离徙动一般不能忽略^[8,9]。

式(4)为“Dechirp”接收方式所固有的残留视频相位项, 该项可以在距离频域中补偿^[10], 同理, 回波模拟中可以在距离频域中引入该相位项。因此, 后面的理论分析中暂且忽略之, 最终模拟算法流程中考虑了该相位项。

根据驻定相位原理对式(1)作方位位置 x 的傅里叶变换, 则 2 维波数域的回波信号

$$H(k_x, k_r, \tau; x_0, r_0) = C \cdot \text{rect}[Dk_x / (4\pi)] \exp[-j \cdot r_0 \sqrt{(k_0 + k_r)^2 - k_x^2}] \exp[-j \cdot x_0 k_x] \cdot \exp[j \cdot k_x v\tau] \exp[j \cdot r_c k] \quad (5)$$

式(5)中第 1 个相位项为距离-方位耦合项, 第 2 项代表了目标的方位信息。第 3 项为脉冲内天线的连续运动导致的多普勒频移效应。第 4 项是与参考距离有关的一个固定线性项, 后面的分析中忽略了该项的影响。

3 2-D 频域快速模拟算法

SAR 系统本质上可以等效为一个 2 维空变滤波器, 已知场景的 2 维复散射系数 $\gamma(x_0, r_0)$ 和式(1)所示的 FMCW-SAR 系统传递函数, 则回波信号为

$$g(x, \tau) = \iint \gamma(x_0, r_0) h(x, k_r, \tau; x_0, r_0) dx_0 dr_0 \quad (6)$$

式(6)表示了原始回波数据的 2 维时域模拟方法, 利用 2 维时域相关积分计算回波数据。

对式(6)中的 $g(x, \tau)$ 作方位位置变量 x 的傅里叶变换, 可得

$$G(k_x, \tau) = \iint \gamma(x_0, r_0) H(k_x, k_r, \tau; x_0, r_0) dx_0 dr_0 \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)中可得回波数据的方位波数域-距离时域形式为

$$G(k_x, \tau) = \text{rect}[Dk_x / (4\pi)] \exp[j \cdot k_x v \tau] \exp[j \cdot r_c k_r] \cdot \int \Gamma_{k_x}(k_x, r_0) \exp[-j \cdot \phi(k_x, k_r; r_0)] dr_0 \quad (8)$$

$$\phi(k_x, k_r; r_0) = r_0 \left(\sqrt{(k_0 + k_r)^2 - k_x^2} - k_0 \right) \quad (9)$$

式(8)中 $\Gamma_{k_x}(k_x, r_0)$ 为 $\gamma(x_0, r_0) \exp[-jk_0 r_0]$ 的 1 维方位傅里叶变换。式(9)表示距离-方位耦合相位项, 包含了目标的距离徙动信息。该耦合相位项可以表示为

$$\phi(k_x, k_r; r_0) = r_0 k_0 \left(\sqrt{\beta^2 + 2k_r / k_0 + (k_r / k_0)^2} - 1 \right) \quad (10)$$

式中

$$\beta = \sqrt{1 - (k_x / k_0)^2} \quad (11)$$

β 为多普勒域的距离徙动因子^[7]。对式(10)在距离波数的零点附近泰勒展开, 并忽略二次及以上的高次项, 可得

$$\phi(k_x, \tau; r_0) \approx k_0 r_0 - k_x^2 r_0 / (2k_0) + 4\pi K_r r_0 \tau / (c\beta) \quad (12)$$

将式(12)代入式(8), 回波模拟数据的方位频域-距离时域表达式为

$$G(k_x, \tau) = \text{rect}[Dk_x / (4\pi)] \exp[j \cdot k_x v \tau] \cdot \exp[j \cdot 4\pi K_r r_c (\tau - \tau_c) / c] \cdot \Gamma(k_x, 4\pi K_r (\tau - \tau_c) / (c\beta) - k_x^2 / (2k_0)) \quad (13)$$

式(13)中 $\Gamma(k_x, \omega_r)$ 为 $\gamma(x_0, r_0) \exp[-j \cdot k_0 r_0]$ 的 2 维方位傅里叶变换, ω_r 为 r_0 在变换域中对应的距离波数变量。以快时间 τ 为变量, 对 $G(k_x, \tau)$ 做傅里叶变换可得回波模拟数据的 2 维频域形式为

$$G(k_x, \omega) = \text{rect}[Dk_x / (4\pi)] \exp[j \cdot k_x v \tau_c] \exp[-j\omega\tau_c] \cdot \int \Gamma \left(k_x, \frac{4\pi K_r}{c\beta} \tau - \frac{k_x^2}{2k_0} \right) \cdot \exp \left[j \left(k_x v + \frac{4\pi K_r r_c}{c} \right) \tau \right] \exp(-j\omega\tau) d\tau \quad (14)$$

作变量代换 $\varsigma = 4\pi K_r \tau / (c\beta) - k_x^2 / (2k_0)$, 则

$$\tau = (\varsigma + k_x^2 / (2k_0)) \cdot c\beta / (4\pi K_r) \quad (15)$$

将式(15)代入式(14)并整理, $G(k_x, \omega)$ 可表示为

$$G(k_x, \omega) = H_{\text{ostrip}}(k_x, \omega) \Gamma_{k_u}(k_x, (k_x v + 4\pi K_r r_c / c - \omega) \beta c / (4\pi K_r)) \quad (16)$$

式(16)中 $H_{\text{ostrip}}(k_x, \omega)$ 为

$$H_{\text{ostrip}}(k_x, \omega) = c\beta / (4\pi K_r) \text{rect}[Dk_x / (4\pi)] \cdot \exp[j \cdot r_c \beta k_x^2 / (2k_0)] \exp[j(c\beta k_x^2 / (8\pi K_r k_0) + \tau_c)(k_x v - \omega)] \quad (17)$$

式(16)中的 $G(k_x, \omega)$ 经过方位和距离逆傅里叶变换后就可得到模拟的原始回波数据 $g(x, \tau)$ 。根据前面的理论分析, 图 2 给出了 2-D 频域快速模拟算法的

流程图。图 2 中距离频域的剩余视频相位项 $H_{\text{RVP}}(\omega)$ 为

$$H_{\text{RVP}}(\omega) = \exp[j \cdot \omega^2 / (4\pi K_r)] \quad (18)$$

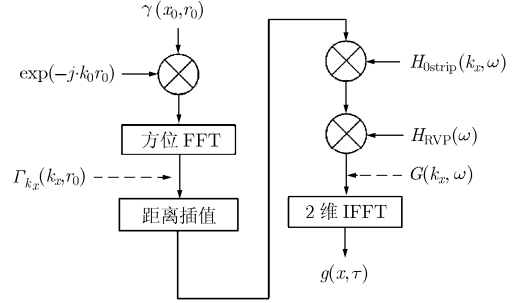


图 2 2 维频域模拟算法的流程图

4 运算量分析

回波模拟数据方位和距离采样点数分别为 N_a 和 N_r , 并假设 $\gamma(x_0, r_0)$ 与回波数据的大小相同。式(6)代表的时域模拟方法需要约 $(N_a N_r)^2$ 次复乘和 $N_a N_r (N_a N_r - 1)$ 次复数加法。为了方便比较不同算法的运算量, 将一次实数加法或者实数乘法运算统称为一次浮点运算, 用 FLOP 表示, 则一次复数乘法等效为 6FLOPs, 一次复数加法为 2FLOPs。因此, 2 维时域模拟方法的总运算量为

$$N_{2\text{DT}} \approx 8(N_a N_r)^2 \text{FLOPs} \quad (19)$$

按照图 2 所示的算法流程图表 1 给出了每个步骤的计算量。

表 1 算法各个步骤的计算量

算法步骤	计算量
复乘 $\exp[-j \cdot k_0 r_0]$	$N_a N_r$ 次复乘
方位 FFT	$N_r N_a \log_2(N_a) / 2$ 次复乘和 $N_r N_a \log_2(N_a)$ 次复数加法
7 点 Sinc 距离插值	$14 N_a N_r$ 次实数乘法和 $12 N_a N_r$ 次实数加法
复乘参考函数和 RVP 项	$2 N_a N_r$ 次复乘
2 维 IFFT	$N_r N_a \log_2(N_a N_r) / 2$ 次复乘和 $N_r N_a \log_2(N_a N_r)$ 次复数加法

综合表 1 中 5 个步骤, 2-D 频域快速模拟算法总的运算量约为

$$N_{2\text{DF}} = N_r N_a (44 + 5 \log_2 N_r + 10 \log_2 N_a) \text{FLOPs} \quad (20)$$

由式(19)和式(20)可得, 2-D 频域回波快速模拟算法的计算效率比时域模拟方法提高了

$$N_{2\text{DT}} / N_{2\text{DF}} = N_a N_r / (5.5 + 0.625 \cdot \log_2 N_r + 1.25 \cdot \log_2 N_a) \quad (21)$$

由式(21)可知, 2 维频域算法比时域方法的计算效率提高 $O(N_a N_r / \log_2(N_a N_r))$ 个数量级。

5 仿真实验

以表 2 的参数仿真了位于测绘带中心的点 1(0, r_c) 和点 2(-50 m, 950 m) 的原始回波数据。如图 3 所示, 图 3(a), 3(c), 3(e), 3(g) 对应点 1, 图 3(b), 3(d), 3(f), 3(h) 对应点 2。与时域模拟方法的对应数值相比, 点 1 和点 2 的距离幅度的最大偏差分别为 5.5% 和 5%, 点 1 和点 2 方位幅度的平均偏差为 3.1% 和 3.3%, 均可以忽略不计。图 3(e), 3(f), 3(g) 和 3(h) 可知, 与理论值相比, 点 1 和点 2 的最大距离相位误差分别为 0.047 rad 和 0.048 rad, 它们的平均方位相位误差为 0.0542 rad 和 0.0593 rad, 都远小于 $\pi/4$ rad^[11], 可以忽略其影响。图 3 中距离向和方位向的相位误差来自于式(10)中距离方位耦合项的近似, 该近似导致的相位误差函数为

$$\phi_{E2df}(k_x, \tau; r_0) = r_0 k_0 \sqrt{\beta^2 + 2k_r / k_0 + (k_r / k_0)^2} - k_0 r_0 + k_x^2 r_0 / (2k_0) - 4\pi K_r r_0 \tau / (c\beta) \quad (22)$$

表 2 仿真参数

载频	10 GHz	天线尺寸	0.5 m
扫频带宽	600 MHz	载机速度	50 m/s
扫频周期	1 ms	采样频率	1 MHz
调频斜率	6.094e11	测绘中心距离	1000 m

依照表 2 给出的仿真参数, 图 4 给出了式(22)所示的相位误差在参考距离 ($r_c = 1000$ m) 处的数值 $|\phi_{E2df}(k_x, \tau; r_c)|_{\max} = 0.19$ rad, 远小于 $\pi/4$ ^[11], 可以忽略不计。

采用 2-D 频域快速模拟算法和时域模拟方法分别仿真了两个点目标的原始回波数据, 再利用文献 [12] 介绍的波数域算法进行了聚焦处理, 点目标图像的性能参数如冲击响应宽度 (Impulse Response Width, IRW)、峰值旁瓣比 (Peak Sidelobe Ratio, PSRL) 和积分旁瓣比 (Integrated Sidelobe Ratio, ISLR) 如表 3 所示。方位分辨率和距离分辨率与时域

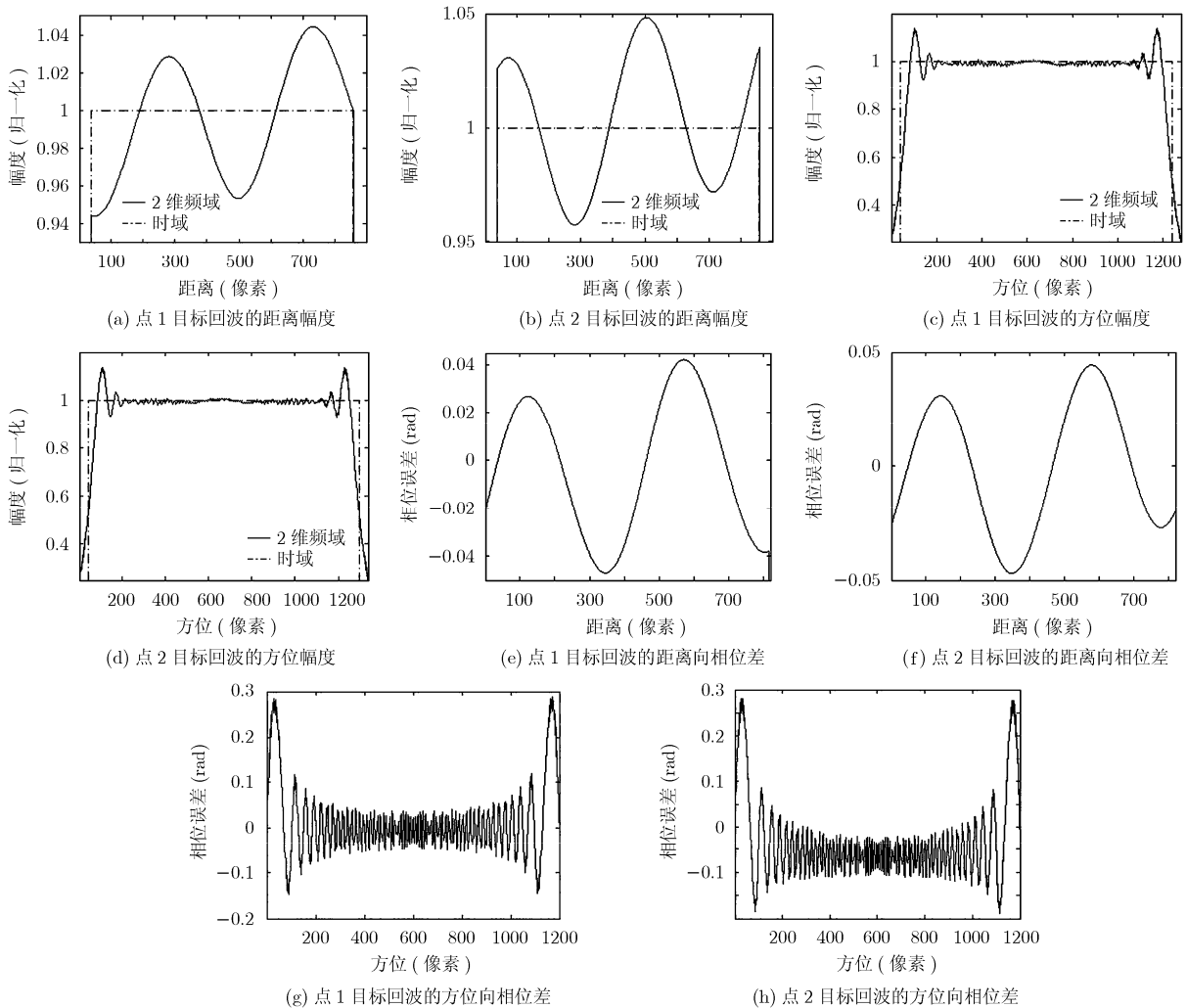


图 3 2 维频域模拟算法与时域模拟方法的性能比较

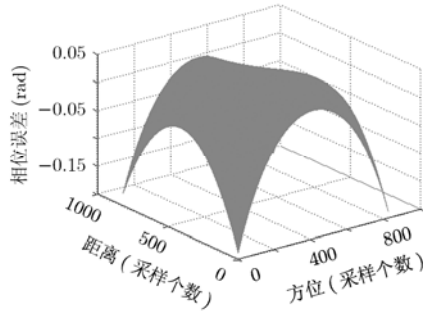


图 4 距离方位耦合项的近似引入的相位误差

模拟方法的 0.25 m 基本一致, 距离向和方位向的 PSLR 和 ISLR 也均趋近于时域模拟方法的相应数值。

仿真了 4096×4096 像素的场景目标, 使用了 Dell 商用台式机 OPTIPLEX 755, 其配置为酷睿双核 CPU 2.66 GHz 和内存 2 GB, 利用 Matlab7.0 开发和运行了模拟算法程序。2 维频域快速模拟算法耗费了 27.98 min, 而时域模拟方法需要约 $9.891 \times$

10^6 min, 计算效率提高了 10^5 个数量级, 这与式(21)算出的理论值 6×10^5 基本吻合。

6 结论

该文分析了条带 FMCW-SAR 成像几何关系, 建立了回波信号模型, 推导了其多普勒域频谱。原始回波数据是 FMCW-SAR 系统冲击响应函数与场景散射系数的 2 维空变相关的结果, 即时域模拟方法。时域模拟方法概念清晰、易于实现。但是, 模拟场景目标时计算量巨大和耗时久。在 2 维波数域, 该文通过距离方位耦合相位项的一阶近似, 得出了一种基于 FFT 的快速回波模拟方法, 它适用于侧视或小斜视角情况。该方法将原来距离向和方位向的时域相关积分运算利用 FFT 快速实现, 因而计算效率比时域模拟方法提高了 $O(N_a N_r / \log_2(N_a N_r))$ 个数量级。与时域模拟方法相比, 该方法模拟的点目标回波信号的幅度偏差和相位偏差均很小, 均可以忽略。仿真结果及分析验证了本文快速算法的有效性。

表 3 频域和时域算法模拟的两个点目标回波数据成像结果的性能比较

		距离向			方位向		
		IRW(m)	ISLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(m)	ISLR(dB)	ISLR(dB)
点 1	频域算法	0.248	-13.27	-10.16	0.251	-13.21	-9.93
	时域算法	0.249	-13.27	-10.18	0.25	-13.23	-10.13
点 2	频域算法	0.249	-13.24	-10.11	0.252	-13.09	-9.87
	时域算法	0.25	-13.26	-10.15	0.251	-13.11	-10.09

参考文献

- [1] 韦立登, 李绍恩, 吴一戎, 向茂生. 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, and Xiang Mao-sheng. Performance comparison of algorithms for SAR raw signal generation. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(2): 262-265.
- [2] Cimmino S, Franceschetti G, Iodice A, Riccio D, and Ruello G. Efficient spotlight SAR raw signal simulation of extended scenes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(10): 2329-2337.
- [3] Franceschetti G, Guida R, Iodice A, Riccio D, and Ruello G. Efficient Simulation of hybrid stripmap/spotlight SAR raw signals from extended scenes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(11): 2385-2396.
- [4] Franceschetti G, Iodice A, Perna S, and Riccio D. Efficient simulation of airborne SAR raw data of extended scenes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(10): 2851-2860.
- [5] Meta A, Hooeboom P, and Ligthart L P. Signal processing for FMCW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3519-3532.
- [6] Zaugg E C and Long D G. Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 2990-2998.
- [7] Jiang Z H and Huang-Fu K. Squint LFM-CW SAR Data processing using doppler-centroid-dependent frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3535-3543.
- [8] Meta A, Hooeboom P, and Ligthart L P. Correction of the effects induced by the continuous motion in airborne FMCW SAR[C]. *IEEE Radar Conference*. Verona, New York, 2006: 358-365.
- [9] 张大炜, 魏芳, 王岩飞. 多普勒效应对 FMCW-SAR 系统成像性能的影响分析[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(3): 559-563. Zhang Da-wei, Wei Fang, and Wang Yan-fei. Analysis of the

- Doppler effect in FMCW-SAR and its influence on the image of the system. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(3): 559-563.
- [10] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms*[M]. Boston: Artech House, 1995: 501-505.
- [11] Cumming I G and Wong F H. *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*[M]. Norwood: Artech House, 2005: 98-103.
- [12] Wang R, Loffeld O, Nies H, Knedlik S, Hagelen M, and Essen H. Focus FMCW SAR data using the wavenumber domain algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2109-2118.
- 马兵强: 男, 1982 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 信号处理与实时成像.
- 于彬彬: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 信号处理与实时成像.
- 刘 畅: 男, 1978 年生, 副研究员, 研究方向为 SAR 成像理论与信号处理等.
- 王岩飞: 男, 1963 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理等.