

一种消除调频连续波 SAR 距离频谱混叠的 FS 算法

张峰会^{*①②} 王岩飞^①

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(上海航天技术研究院第八零四研究所 上海 200101)

摘要: 原始的频率变标算法(Frequency Scaling, FS)用于调频连续波 SAR 成像处理时,会导致严重的距离频谱混叠。该文从频率变标算法原理出发,结合傅立叶变换的尺度变换性质从距离时域和距离频域的角度进行分析,通过引入归一化因子,提出了一种消除距离频谱混叠的改进 FS 算法。该算法保留了原 RVP 项,并且不改变原始 FS 算法的处理步骤和处理效率。最后利用该算法对点目标进行聚焦成像,验证了该算法的有效性。

关键词: 调频连续波; 合成孔径雷达; 频率变标; 剩余视频相位

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2012)01-0076-06

DOI: 10.3724/SP.J.1300.2012.10066

An Improved FS Algorithm for Range Anti-aliasing of FMCW SAR

Zhang Feng-hui^{①②} Wang Yan-fei^①

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

^②(Institute of 804, Shanghai Aerospace Technology Academy, Shanghai 200101, China)

Abstract: Conventional Frequency Scaling (FS) algorithm is applied to process Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW) SAR, which will lead a heavy range frequency aliasing. Through analyzing basic principle of the FS algorithm and combining the scaling propretation of the Fourier transform, with the presence of a constant factor, this paper proposed a improved frequency scaling algorithm for range anti-aliasing. The proposed algorithm holds performance of the conventation one and just removes the aliasing. The successfully imaging a point target shows the validity of the proposed method.

Key words: Frequency Modulated Continuous Wave (FMCW); SAR; Frequency scaling; Residual video phase

1 引言

调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)技术与合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)技术的结合,促使了重量轻、成本低、功耗低的高分辨成像雷达——调频连续波合成孔径雷达的诞生。调频连续波合成孔径雷达在一个脉冲重复间隔内连续发射信号,用较低功率的固态放大器就可以满足要求,较低的发射功率也使其具有隐蔽性好的特点;由于接收端采用了去调频(Dechirp)接收体制,回波信号与参考信号进行混频,产生了较小的差频带宽,从而降低对视频接收通道、后端 A/D 采集设备和信号处理速度的要求,具有体积小,重量轻和成本低等特点。调频连续波 SAR 的诸多特点使其可以适合用于小型飞行平台^[1-4]以及装载空间较小的平台^[5,6]等。

关于调频连续波 SAR 的聚焦成像处理,近几年出现了很多新方法^[7,8],如改进的距离多普勒算法

(Range Doppler Algorithm, RDA)^[9]、改进的波数域算法^[10]、时域重建算法^[11]、改进的频率变标算法(Frequency Scaling Algorithm, FSA)或线调频变标算法(Chirp Scaling Algorithm, CSA)^[12]等以及针对 FMCW SAR 中的非线性度校正技术的成像方法^[13]。距离多普勒算法、波数域算法以及时域重建算法在进行距离徙动校正时,特别是大斜视情况下,需要耗时的插值运算,这对算法的处理效率和性能有一定的影响。

CS 算法主要利用了信号的调频特性使不同目标的距离徙动具有相同的形状,然后将这些与距离无关的徙动曲线校正成直线。CS 算法通过相位相乘避免了 RD 算法中的插值处理,使得成像处理的性能和效率得到很大的提高。FS 算法^[9]采用了与 CS 算法类似的原理实现距离徙动校正,但是 FS 算法可以用于去调频(Dechirp)信号的处理,因此,非常适合于调频连续波 SAR 的成像处理。对于调频连续波 SAR,频率变标算法^[14]通过 3 个相位函数相乘完成距离徙动校正。但是在调频连续波 SAR 系统中,由于采用 Dechirp 处理,系统的采样率很小,

2011-12-26 收到, 2012-03-19 改回; 2012-03-29 网络优先出版

*通信作者: 张峰会 sanqinman@sina.com

一般为几兆赫兹，在进行频率变标处理时，频率变标函数和频率反变标函数的信号带宽通常会大于采样率，特别在大斜视情况下，引起距离频率混叠，导致距离向成像的散焦。为了在调频连续波 SAR 中能应用 FS 算法，必须处理距离频率混叠问题。

本文从频率变标处理的基本原理出发，结合傅立叶变换的尺度变换性质分别从距离时域和距离频域的角度进行分析，提出了一种消除由于频率变标函数引入的距离频谱混叠的算法，所提出的改进算法保留了剩余视频相位(RVP)项，并且不改变原始 FS 算法的处理步骤和处理效率。

2 原始 FS 算法的距离混叠

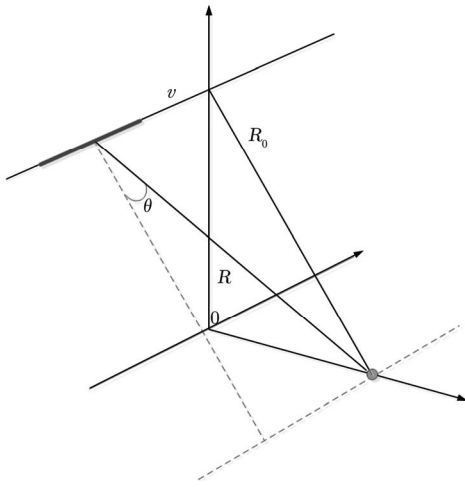


图 1 调频连续波 SAR 斜视工作模式

线性调频连续波 SAR 的点目标回波信号经过 Dechirp 接收处理后的中频信号表示为

$$S_{\text{ri}}(f_a, t_r) = \left\{ \text{rect} \left(\frac{t_r - 2R_{\text{ref}}/c}{\text{PRI}} \right) \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_0 f_0}{c} D \right\} \right. \\ \cdot \exp \left\{ -j \frac{4\pi K_r}{c} \left(\frac{R_0}{D} - R_{\text{ref}} \right) \left(t_r - \frac{2R_{\text{ref}}}{c} \right) \right\} \\ \cdot \exp \left\{ j2\pi f_a t_r \right\} \cdot \text{SRC} \left(f_a, t_r - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}, R_0 \right) \left. \right\} \\ \otimes \exp \left\{ -j\pi K_r t_r^2 \right\} \quad (1)$$

式中

$$D = D(f_a, V) = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2}, \\ -\frac{\text{PRF}}{2} + f_{\text{dc}} \leq f_a \leq \frac{\text{PRF}}{2} + f_{\text{dc}} \quad (2)$$

$$H_{\text{SRC}}(f_a, t_r; R_0) = \exp \left\{ j \frac{2\pi R_0}{c} \frac{(D^2 - 1) K_r^2}{D^3 f_0} t_r^2 \right. \\ \left. - j \frac{2\pi R_0}{c} \frac{(D^2 - 1) K_r^3}{D^5 f_0^2} t_r^3 \right\} \quad (3)$$

式中，PRF 是系统重复频率，PRI = 1/PRF 是系统的重复周期； t_r, f_r 是距离时间和距离频率； t_a, f_a 是方位时间和方位频率； f_{dc} 是多普勒中心频率； K_r 是距离向调频率， R_{ref} 是参考距离， R_0 是目标到 SAR 平台的最近距离； V 是 SAR 平台的运动速度； f_0 是信号载频； \otimes 表示卷积运算。

原始 FS 算法的变标函数和反变标函数分别^[4]为

$$H_{\text{FS}}(f_a, t_r) = \exp \left\{ j\pi K_r (1 - D) t_r^2 \right\} \\ H_{\text{IFS}}(f_a, t_r) = \exp \left\{ j\pi K_r (D^2 - D) t_r^2 \right\}$$

式中， D 为频率变标因子。两个参考信号的带宽分别为

$$\begin{cases} B_{\text{FS}} = \left\{ \frac{B_r}{2} (1 - D) \right\}_{\text{max}} \\ B_{\text{IFS}} = \left\{ \frac{B_r}{2} (D^2 - D) \right\}_{\text{max}} \end{cases} \quad (4)$$

式中， B_r 是系统发射信号带宽。由于 $D = D(f_a, V) \leq 1$ ，因此， $B_{\text{FS}} \geq B_{\text{IFS}}$ ，

$$B_{\text{FS}} = \left\{ \frac{B_r}{2} (1 - D) \right\}_{\text{max}} = \left\{ \frac{B_r}{2} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda f_a}{2V} \right)^2} \right) \right\}_{\text{max}} \quad (5)$$

可以看出，在原始的 FS 算法处理中，随着雷达斜视角的增大，带宽 B_{FS} 随着 D 的减小而增大，并远远大于调频连续波 SAR 的采样率。因此，由于频率变标因子的引入，使得距离向信号发生频谱混叠，在大斜视情况下，更为严重，甚至距离向无法聚焦成像。当然，这个问题也可通过增加雷达系统的采样频率来解决，但是采样率的增加使得距离向采样点数大为增加，系统的处理负担加重，这与调频连续波 SAR 的设计初衷是违背的。而在脉冲 SAR 系统中，由于信号扫频周期很短，系统采样频率很高，这个问题基本是不存在的。

例如，利用第 4 节表 1 参数，在斜视角 20° 时，计算可知， B_{FS} 为 16.069 MHz，远大于系统的采样频率 2 MHz。如果采用增加系统采样频率的方法，则距离向一个调频周期内的处理点数大于 16069，显然，这样会导致 SAR 系统处理负担严重加大。

因此，为了能在调频连续波 SAR 中应用 FS 算法，必须另行寻找解决频率混叠的方法。为此，引入一个常数因子 q ，重新定义频率变标因子为 $D' = Dq$ ，则频率变标函数的信号带宽为

$$B'_{\text{FS}} = \left\{ \frac{B_r}{2} (1 - D') \right\}_{\text{max}} = \left\{ \frac{B_r}{2} (1 - Dq) \right\}_{\text{max}} \quad (6)$$

要保证频率变标处理不引起距离频谱混叠，则应该满足条件

$$B'_{\text{FS}} = \left\{ \frac{B_r}{2} (1 - Dq) \right\}_{\text{max}} < F_s \quad (7)$$

式中, F_s 为系统的采样频率。

为了确定常数因子 q , 可以从频域对信号进行分析。

傅立叶变换的尺度变换特性: 若 $x(t)$ 的傅立叶变换为 $X(f)$, 则 $x(at)$ 的傅立叶变换为 $(1/|a|)X \cdot (f/a)$, 其中, a 为一个常实数。

设在 SAR 处理中, 距离多普勒域的信号为 $S_{fr}(f_a, t_r)$, 进行距离傅立叶变换后, 信号在 2 维频域表示为 $S_{fr}(f_a, f_r)$ 。从频率变标处理的原理可知, 距离多普勒域信号与频率变标函数相乘后, 信号的距离时间变量由 t_r 变为 $(Dq)t_r$, 信号距离多普勒域形式为 $S_{fr}(f_a, (Dq)t_r)$, 对此进行距离频谱变换, 得到 2 维频域信号为 $S_{fr}(f_a, f_r/(Dq))$ 。即经过距离向频率变标处理后, 信号的距离向频谱由 f_r 改变为 $f_r/(Dq)$ 。

由于调频连续波 SAR 系统采样频率根据 f_r 设计的, 满足了距离频谱不发生混叠, 因此, 要保证 FS 处理时, 不发生距离向频率混叠, 则满足条件 $f_r/(Dq) \leq f_r$ 即可。由此可知, $q \geq 1/(D(f_a, V))$ 。因此, q 满足条件的一个合适的取值为

$$q = \frac{1}{\{D\}_{\min}} = \frac{1}{\{D(f_a, V)\}_{\min}} \quad (8)$$

即这时的距离向频率变标因子为

$$D' = Dq = \frac{D}{\{D\}_{\min}} \quad (9)$$

这样, 在调频连续波 SAR 中应用 FS 处理时, 如果用因子 $D' = Dq$ 替代 D 做距离向频率变标处理, 则可保证在处理过程中, 所有的补偿因子和信号将保持在原有信号带宽内, 避免了距离向频率混叠。

3 改进的 FS 算法

根据前述分析可知, 采用修正的变标因子后的距离频率变标处理的参考函数分别为

$$H_{FS}(f_a, t_r) = \exp\{-j2\pi f_a t_r\} \exp\{j\pi K_r (1 - Dq) t_r^2\} \quad (10)$$

$$H_{RVP}(f_a, f_r) = \exp\left\{-j \frac{\pi}{K_r Dq} f_r^2\right\} \quad (11)$$

$$H_{IFS}(f_a, t_r) = \exp\{j\pi K_r ((Dq)^2 - Dq) t_r^2\} \quad (12)$$

式中, 相位因子 $\exp\{-j2\pi f_a t_r\}$ 是为了消除由于脉内运动引起的多普勒频移^[15], 这是调频连续波 SAR 所特有的。

通过上述 3 个相位因子的处理, 消除了 RVP 项和完成了剩余距离徙动的校正。经过剩余距离徙

动校正后, 不同距离处目标的距离徙动曲线变得和参考距离处的距离徙动曲线相同, 这可以通过一致距离徙动校正因子消除。

随后乘以因子 $H_{SRC}(f_a, t_r; R_{ref})$ 以完成二次距离压缩处理,

$$H_{SRC}(f_a, t_r; R_{ref}) = \exp\left\{j \frac{2\pi R_{ref}}{c} \frac{(D^2 - 1) K_r^2}{D^3 f_0} \left(Dq t_r - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^2\right\} \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi R_{ref}}{c} \frac{(D^2 - 1) K_r^3}{D^5 f_0^2} \left(Dq t_r - \frac{2R_{ref}}{c}\right)^3\right\} \quad (13)$$

二次距离压缩时, 用参考距离替代目标的实际距离^[11]。

经过频率变标处理后, 不同距离单元的距离徙动曲线形状变换成与参考距离单元的距离徙动曲线相同。这时再对信号乘以式(14)相位因子, 可以将距离徙动曲线转换成直线

$$H_{BV}(f_a, t_r) = \exp\left\{j \frac{4\pi K_r}{c} R_{ref} \left(\frac{1}{D} - 1\right) \left(Dq t_r - \frac{2R_{ref}}{c}\right)\right\} \quad (14)$$

至此, 完成了距离压缩和距离徙动校正。随后进行信号的方位向压缩即可得到目标的图像

$$S_{img}(t_a, f_r) = \text{sinc}(\pi B_a t_a) \cdot \text{sinc}\left(\pi \frac{T_r}{D} \left(f_r + \frac{2K_r}{c} (R_0 - DR_{ref})\right)\right) \quad (15)$$

式中, B_a 为方位向信号带宽。

4 算法仿真实验

为了验证算法的有效性, 使用表 1 所示的系统参数进行仿真。

表 1 某飞行平台调频连续波 SAR 系统仿真参数

参数	数值	参数	数值
发射频率	35 GHz	斜视角	10°
方位向波束宽度	1°	平台水平方向速度	1000 m/s
发射信号带宽	500 MHz	测绘带	400 m
扫频周期	1 kHz	平台飞行高度	10000 m
采样频率	2 MHz	平台投影点到场景中心距离	4000 m

图 2 显示了点目标的回波数据经过原始 FS 算法处理时引起的距离频谱混叠现象。图 2(a)是距离向原始 FS 处理后的 2 维频谱图; 图 2(b)是图 2(a)

的频谱曲线，更清晰的显示了距离频谱混叠；图 2(c)是原始 FS 算法根据图所示的成像流程所成的 SAR 图像，可以看出由于距离向产生了严重的频谱混叠，已经不能正确成像了。图 2(d)显示了原始 FS 算法 SAR 图像的距离向切片，第 1 旁瓣峰值不到 -1 dB。

图 3 显示了点目标的回波数据经过改进 FS 算法处理时的距离频谱，可以看出距离频谱混叠已消除，点目标得到很好的成像。图 3(a)是距离向改进 FS 处理后的 2 维频谱图；图 3(b)是图 3(a)的一条频谱曲线，更清晰地显示了距离频谱混叠已消除，距离向得到很好的聚焦；图 3(c)是改进 FS 算法 SAR 成像结果(成像点周围取 16 点 \times 16 点进行插值)。图 3(d)、图 3(e)分别是成像点在距离向和方位向的切

片图(插值后)。成像过程中，为了验证改进的 FS 算法的有效性，距离向压缩和方位向压缩未作加窗处理。成像后的图像质量评估结果如表 2 所示。

表 2 成像后的图像质量评估结果

斜视角	PSLR (dB)		ISLR (dB)	
	距离向	方位向	距离向	方位向
10°	-11.20	-10.46	9.41	7.67

从仿真结果可知，改进的 FS 算法消除了由于斜视角增大引入的距离向频谱混叠，使得目标的回波信号得到很好的聚焦成像。仿真结果验证了改进 FS 算法的有效性。

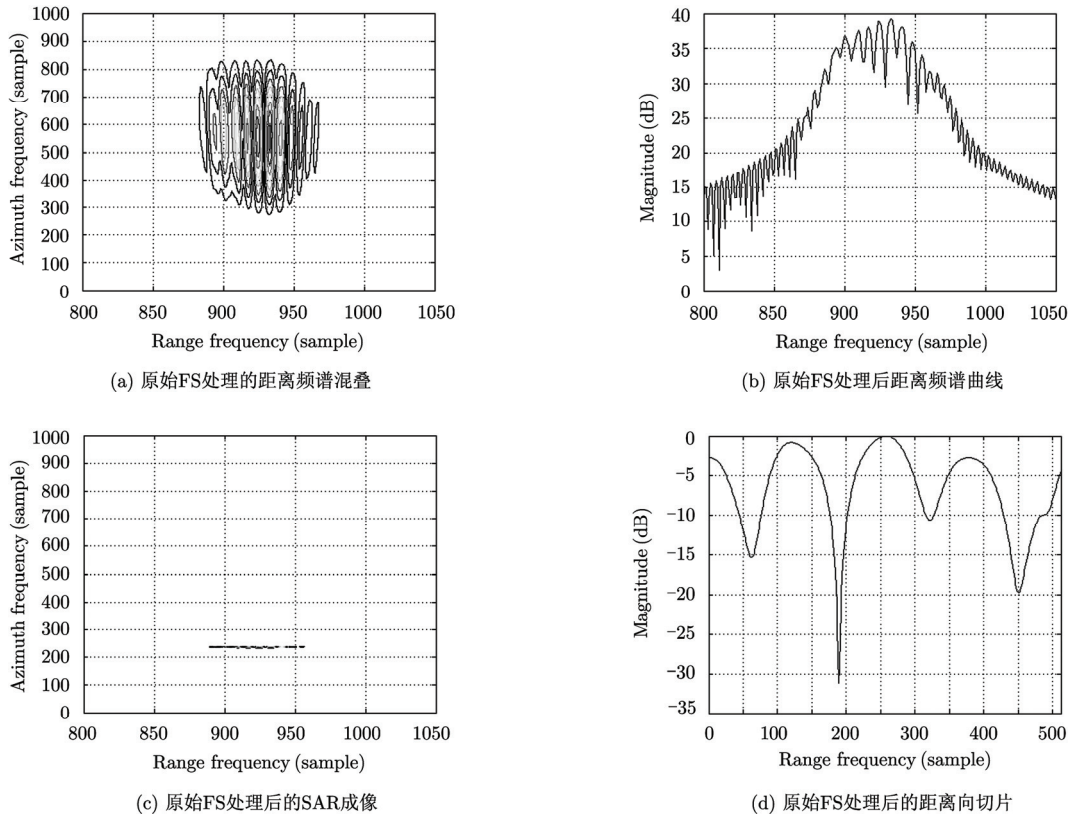
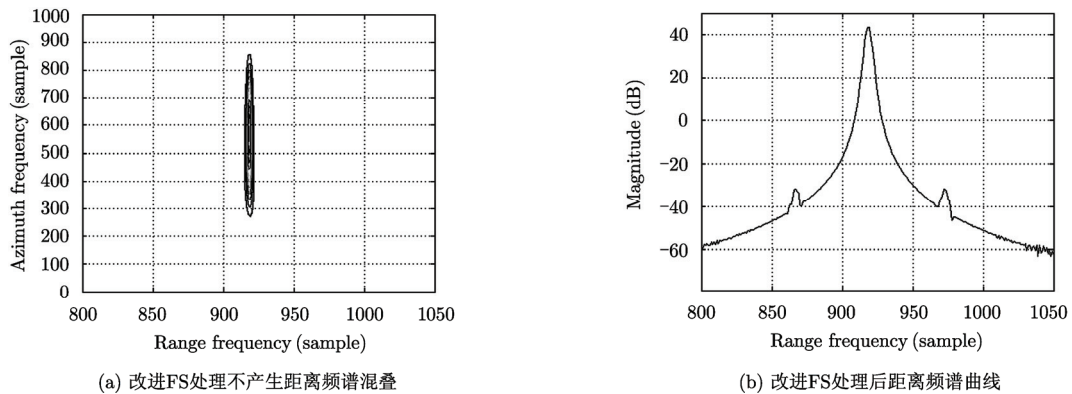


图 2 原始 FS 算法成像处理



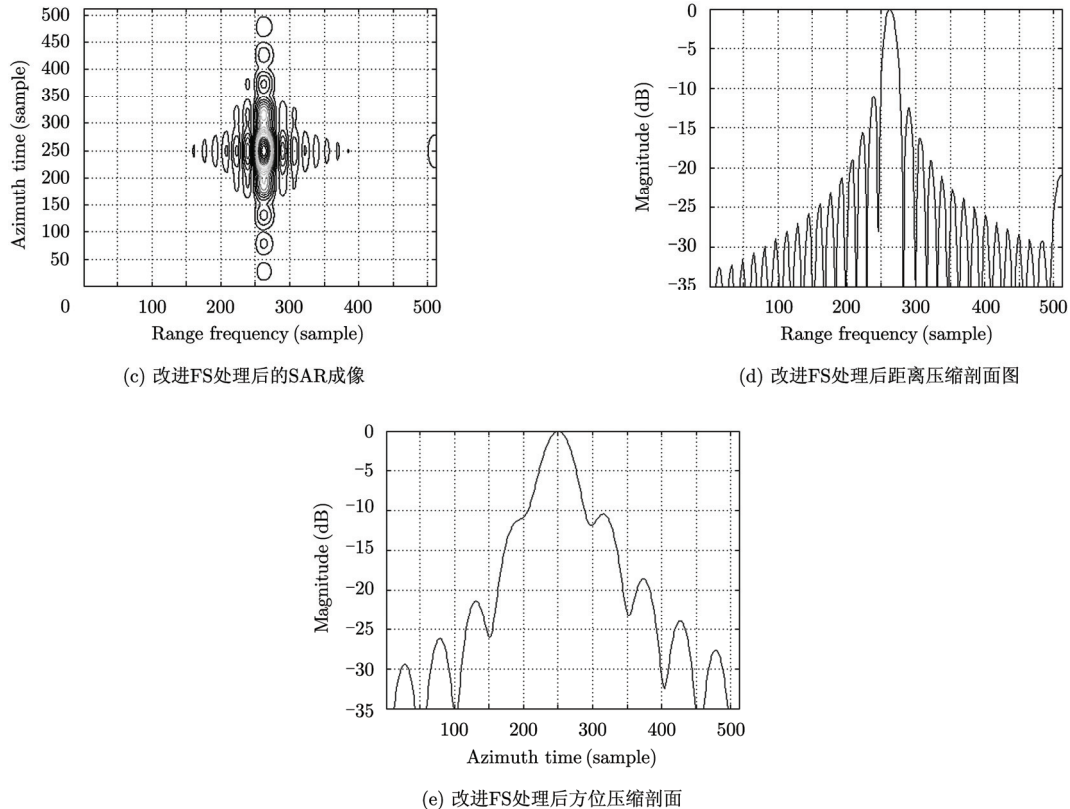


图3 改进FS算法成像处理

5 结束语

本文提出一种改进的FS算法,该算法消除了由于斜视增大时引入的距离频谱混叠现象,利用该算法对点目标进行了很好的聚焦成像。所提出的算法保留了原始的RVP项,并且具有原始FS算法的处理步骤和处理效率。后续的研究工作将分析存在非线性相位误差时算法的适应性,并用该算法对实测数据进行分析处理。

参考文献

- [1] Meta, A, De Wit J J M, and Hoogeboom P. Development of a high resolution airborne millimeter wave FM-CW SAR[C]. EURAD Radar Conference, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2004:209-212.
- [2] Edrich M. Ultra-lightweight synthetic aperture radar based on a 35 GHz FMCW sensor concept and online raw data transmission [J]. *IEE Proceedings Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(2): 129-134.
- [3] Edwards M, Madsen D, Stringham C *et al.* microASAR: a small, robust LFM-CW SAR for operation on UAVs and small aircraft. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium[C]. Boston, Massachusetts, USA, July 2008: V-514-V-517.
- [4] Gonzalez J, Almorox P, Burgos M, *et al.* SAR system for UAV operation with motion error compensation beyond the resolution cell[J]. *Sensors*, 2008, 8(5): 3384-3405.
- [5] Yi Yu-sheng, Zhang Lin-rang, Liu Nan, *et al.* An efficient imaging algorithm for missile-borne side-looking SAR[C]. IET International Radar Conference, Guilin, China, Apr. 2009: 1-4.
- [6] Wang Jian-tao, Qin Yu-liang, and Deng Bin. A modified omega-K algorithm for missile-borne SAR imaging with the dive trajectory[C]. 2nd Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Shanxi, China, Oct. 2009: 71-74.
- [7] Meta A, Hoogeboom P, and Ligthart L P. Signal processing for FMCW SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(11): 3519-3532.
- [8] Wang Robert, Loffeld Otmar, and Nies Holger, *et al.* Analysis and compensation for motion errors in FMCW SAR data[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Honolulu, Hawaii, USA, July 2010: 4075-4078.
- [9] De Wit J J M, Meta A, and Hoogeboom P. Modified range-Doppler processing for FM-CW synthetic aperture radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(1): 83-87.

- [10] Wang Robert, Loffeld Otmar, Nies Holger, *et al.*. Focus FMCW SAR data using the wavenumber domain algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2109-2118.
- [11] Ribalta A. Time-domain reconstruction algorithms for FMCW-SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(3): 396-400.
- [12] Raney R K, Runge H, Bamler R, *et al.*. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786-799.
- [13] Meta A, Hooeboom P, and Ligthart L P. Non-linear frequency scaling algorithm for FMCW SAR data[C]. 3rd European Radar Conference, Manchester, UK, Sept. 2006: 9-12.
- [14] Mittermayer J, Moreira A, and Loffeld O. Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(5): 2198-2214.
- [15] 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.

作者简介



张峰会(1977-), 男, 工程师, 博士生, 2000年毕业于陕西师范大学物理学专业, 2003年于中科院物理所超导电子学专业获硕士学位, 工作单位为上海航天技术研究院(中国航天科技集团八院)第八零四研究所, 主要研究方向为相控阵预警雷达和相控阵成像雷

达进行反解析和电子侦察对抗研究。现在中科院电子所攻读博士学位, 主要研究方向为调频连续波雷达技术、SAR 雷达技术、以及雷达信号处理技术。

王岩飞(1963-), 男, 1984年毕业于北方交通大学, 1987年毕业于中国科学院电子学研究所, 获硕士学位, 1998年获博士学位。现任中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师。主要研究方向包括微波成像雷达系统及其理论、数字信号处理方法与技术等。