

# 低飞平台大斜视 SAR 的 $\omega$ - $k$ 成像算法实现

欧建平<sup>1</sup> 李 伟<sup>2</sup> 张 军<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与技术学院, 长沙 410038; 2. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077)

**摘 要:** 低飞平台大斜视 SAR 因高度低、速度快、斜视角大而对脉冲重复频率设计提出更高要求, 斜视角过大导致多普勒中心远离零点, 基于传统成像方法会面临严重散焦问题。文章针对低飞平台大斜视 SAR 成像问题, 建立脉冲重复频率与斜视角间关系模型, 从避免距离模糊、方位模糊、回避发射波干扰等出发, 以实现高分辨率成像为目的, 合理设计脉冲重复频率, 解决了成像中散焦问题, 基于 STOLT 插值, 利用  $\omega$ - $k$  成像算法处理原始数据, 得到了良好成像效果。仿真证明该算法可有效解决大斜视平台 SAR 成像问题。

**关键词:** 合成孔径雷达; 低飞; 大斜视;  $\omega$ - $k$  算法

**中图分类号:** TN794 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2014)01-0001-06

## $\omega$ - $k$ Imaging Algorithm for SAR with Low Height and Large Squint Angle

OU Jian-ping<sup>1</sup> LI Wei<sup>2</sup> ZHANG Jun<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410038;

2. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077)

**Abstract:** Higher requirement of pulse repetition frequency will be faced when Synthetic Aperture Radar(SAR) has low height, high velocity and large squint angle. Too large squint angle will cause doppler centroid frequency deviate from zero greatly, if we still use traditional imaging algorithm, image will defocus. According to the problem of imaging of low-platform and squint-looking SAR, in order to avoid range and azimuth ambiguity and the interference coming from the transmitted pulses, and get high resolution image, designing method of pulse repetition frequency is studied, as a result, the problem of image defocusing is solved. After STOLT interpolate mapping, raw data is properly processed with  $\omega$ - $k$  algorithm, and good imaging result is gotten. Simulation results testified that the algorithm can solve the problem of imaging of low height and large squint SAR.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar; Low Height; Large Squint Angle;  $\omega$ - $k$  Algorithm

## 1 引言

合成孔径雷达(SAR)是一种高分辨率成像雷达,可在能见度极差气象条件下得到类似光学照相的高分辨率图像,合成孔径雷达采用综合孔径原理提高雷达方位向分辨率,借助脉冲压缩技术提高距离向分辨率。正因为这些优点,合成孔径雷达被大量用于弹载平台完成修正惯导误差、打击时敏目

标、攻击点选择和打击效果评估等,大大提高了导弹自主命中概率和性能<sup>[1]</sup>。

现有算法研究多从提高运算效率出发,针对 CS(Chirp Scaling)等算法,利用各自斜视等效几何模型,逐步完成距离迁移校正和补偿,直至最后得到较好成像结果<sup>[2]</sup>。但是,这些算法都有近似,而基于  $\omega$ - $k$  算法成像时,没有近似<sup>[3]</sup>,文献[4]通过构建俯冲弹道 SAR 几何模型,基于  $\omega$ - $k$  算法实现了较好

成像结果;文献[5]通过构建星载双基地 SAR 几何模型,基于  $\omega$ - $k$  算法实现了存在一定斜视角时成像;文献[6]研究了弹载 SAR 脉冲重复频率设计问题,指出了一些限制条件;文献[7]利用穷举方法进行最佳脉冲重复频率搜索,给出了一种系统设计方法;本文在这些现有基础上,通过合理设置脉冲重复频率等参数,基于  $\omega$ - $k$  算法实现低飞平台大斜视条件下 SAR 对地面目标成像。文章分为五个部分,第二部分为几何模型和算法流程描述,第三部分是脉冲重复频率设计研究,第四部分为仿真分析,最后一部分为小结。

## 2 低飞大斜视 SAR 平台几何模型和成像算法

弹载 SAR 几何模型如图 1 所示。SAR 平台沿方位向速度为  $V$ ,雷达下视角为  $\theta_d$ ,斜视角为  $\theta_s$ ,雷达天线方位向波束张角为  $\phi_a$ ,距离向波束张角为  $\phi_r$ 。

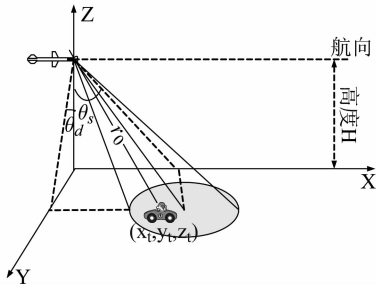


图 1 几何模型

Fig. 1 Imaging geometry

图 1 中,弹载 SAR 初始时刻位置为  $(0, Vt_a)$ ,点目标坐标为  $(x_t, y_t, z_t)$ ,初始方位向位置为  $x$ ,与弹载 SAR 初始距离为  $r_0$ ,则目标到 SAR 平台瞬时斜距表达式为:

$$R(x, r_0) = \sqrt{r_0^2 \cos^2 \theta_d + (Vt_a - x - r_0 \sin \theta_s)^2} \quad (1)$$

设发射信号为线性调频信号,则点目标回波信号时域形式为:

$$d(x, t) = \delta\left(t - \frac{2}{c} \cdot R(x, r_0)\right) \cdot \exp\left\{-j\omega_0 \cdot \frac{2}{c} \cdot R(x, r_0)\right\} \quad (2)$$

根据式(2),基于  $\omega$ - $k$  算法可实现目标成像和二维聚焦<sup>[3]</sup>,具体过程如下:

在对点目标回波进行聚焦时,得到的信号表示形式如下:

$$\begin{aligned} u(x, r) &= \iint_{-\infty}^{+\infty} d(x', t) \cdot h^*(x' - x, t - 2r/c; r) dx' dt \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} d(x, t) \otimes_x h(x, t - 2r/c; r) dt \quad (3) \end{aligned}$$

若假设对回波信号进行二维傅立叶变换时有  $d(x, t) \rightarrow D(k_x, \omega)$ ,则聚焦后信号  $u(x, r)$  的二维傅立叶变换式  $U(k_x, k_r)$  就可以表示成:

$$U(k_x, k_r) = D(k_x, \omega) \cdot H(k_x, \omega, r) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{令 } k_r &= \sqrt{\left(\frac{\omega + \omega_0}{c/2}\right)^2 - k_x^2} - \frac{\omega_0}{c/2}, \text{ 则有 } \omega = \frac{c}{2} \\ &\sqrt{(k_r + 2\omega_0/c)^2 + k_x^2} - \omega_0 \end{aligned}$$

因此,

$$\begin{aligned} U(k_x, k_r) &= A_2 \cdot \int D(k_x, \omega) \\ &\cdot \delta\left[\omega - \frac{c}{2} \sqrt{(k_r + 2\omega_0/c)^2 + k_x^2} + \omega_0\right] d\omega \\ &= A_2 \cdot D\left(k_x, \frac{c}{2} \sqrt{(k_r + 2\omega_0/c)^2 + k_x^2} - \omega_0\right) \end{aligned} \quad (5)$$

假设回波数据窗口围绕在  $t_0$  附近,则有  $d'(x, t) = d(x, t + t_0)$ ,因此  $u'(x, r) = u(x, r + r_0)$ ,其中  $r_0 = \frac{c}{2} \cdot t_0$ ,所以,  $D'(k_x, \omega) = D(k_x, \omega) \cdot \exp\{j \cdot r_0 \cdot 2\omega/c\}$ ,上式可以改成:

$$U'(k_x, k_r) = U(k_x, k_r) \cdot \exp\{j \cdot r_0 \cdot k_r\} \quad (6)$$

其中  $\omega = \frac{c}{2} \cdot \sqrt{(k_r + 2\omega_0/c)^2 + k_x^2} - \omega_0$ 。根据插值过程,上式可进一步写成:

$$\begin{aligned} U'(k_x, k_r) &\propto S\{D'(k_x, \omega) \cdot \exp\{-j \cdot r_0 \cdot 2\omega/c\} \\ &\cdot \exp\{j \cdot r_0 \cdot k_r\}\} \end{aligned} \quad (7)$$

也就是:

$$\begin{aligned} U'(k_x, k_r) &\propto S\{D'(k_x, \omega)\} \cdot \exp\{-j \cdot r_0 \\ &\cdot (\sqrt{(k_r + 2\omega_0/c)^2 + k_x^2} - (k_r + 2\omega_0/c))\} \end{aligned} \quad (8)$$

这样就在 STOLT 插值的基础上实现了二维聚焦和成像。

$\omega$ - $k$  算法基于 STOLT 插值实现数据的二维聚焦和成像,没有任何近似,完全保留了所有信息,它的缺点就是运算量大,因此要求尽可能降低运算量。决定成像质量的最重要因素是脉冲重复频率 (PRF: Pulse Repetition Frequency),在设计 PRF 时,在允许的范围内选择最小可能值即可实现高效高

精度成像。

### 3 脉冲重复频率研究

本文使用  $\omega$ - $k$  算法,无近似实现二维成像,但是,  $\omega$ - $k$  算法对数据二维傅立叶变换和插值,如果方位向多普勒中心变化超出可处理带宽时,会影响成像质量,减小影响的方法是合理设计脉冲重复频率 PRF。对 PRF 的设计主要从回避弹下点回波干扰、避免测绘带模糊和方位向模糊三个方向展开。

#### 3.1 回避弹下点回波干扰

弹下点回波应该在上个脉冲的最远回波时间和本次脉冲最近回波时间之间到达雷达接收天线,这样,弹下点回波既不会干扰上个脉冲的回波,也不会干扰本次脉冲的回波。设  $H$  为雷达平台高度,  $i$  表示第  $i$  个脉冲,  $R_{\min}$  为雷达平台离成像区域的最近距离,且有  $R_{\min} = \frac{H}{\cos(\theta_d - \phi_r/2) \cos(\theta_s - \phi_a/2)}$ ,  $R_{\max}$  为雷达平台离成像区域最远距离,且有  $R_{\max} = \frac{H}{\cos(\theta_d + \phi_r/2) \cos(\theta_s + \phi_a/2)}$ ,为了回避弹下点回波造成的干扰,PRF 应满足:

$$\frac{2H}{c} + \frac{i}{PRF} < \frac{2R_{\min}}{c} \quad (9)$$

#### 3.2 测绘带模糊避免

弹载 SAR 对测绘带进行成像时,工作于条带模式,为避免测绘带出现模糊,要求回波在同一脉冲重复间隔内达到,PRF 应满足:

$$\frac{(n-1)c}{2R_{\min}} \leq PRF \leq \frac{nc}{2R_{\max}} \quad (10)$$

在 PRF 满足(10)式时,回波不会跨测绘带相互影响。

#### 3.3 方位向模糊避免

低飞大斜视 SAR 平台速度通常为多倍音速,而多普勒带宽随速度升高而增大,因此应提高脉冲重复频率 PRF,但是,由于平台高度很低,如果 PRF 过高又会导致无法正常收取数据,不仅会导致无法正常成像,出现散焦,而且频谱混叠还会导致图像质量下降。

根据 SAR 平台在每个重复周期内前进距离不得大于一个分辨单元的原理,可知 PRF 需满足:

$$PRF \geq \frac{v_a}{\rho_a} = \frac{2v_a}{D} \quad (11)$$

天线尺寸  $D$  与波束角关系为  $\beta = \frac{\lambda}{D}$ ,若速度为

1km/s,  $\rho_a = 0.1\text{m}$ ,则 PRF 至少要高于 10000Hz。同

时,从带宽角度考虑,应该有  $-\frac{B}{2} + f_{DC} \leq PRF \leq \frac{B}{2} +$

$f_{DC}$ ,其中  $B = \frac{2v}{\lambda} \cdot \beta_a$ ,多普勒中心频率  $f_{DC} = \frac{v}{\lambda} \cdot \sin$

$\theta_s$ ,  $\theta_s$  就是斜视角,正侧视时为 0,所以多普勒中心为 0,而当斜视角很大(30 度以上)时,由于  $\sin(\theta_s)$  在第一象限中随斜视角从 0 变化到 90 度时为增函数,因此,随着斜视角增大,多普勒中心值越来越大,逐渐偏离零点,这种多普勒中心偏移带来的影响会导致多普勒频谱超过 PRF 大小,超出 PRF 宽度的频谱会折回来,导致出现频谱混叠。因此,为防止出现频谱混叠,PRF 需要在正侧视取值基础上增大。

确定 PRF 时,方位向分辨率、斜视角、速度共同决定了 PRF 的一个下界;距离、下视角、斜视角决定了 PRF 上界,这样才能保证数据不会交叠。

同时还应注意到,方位向采样间隔等于速度和脉冲重复频率比值,因此,在雷达平台速度一定时,PRF 也不能太高,否则运算量太大。视角、斜视角与 PRF 之间约束关系图,通常被称为斑马图,根据斑马图可得到不同视角和斜视角下可选择重复频率,在选择尽可能小 PRF 时,结合距离及方位模糊度,可得到合适 PRF 值,保证成像质量和性能。

在天线波束角较大时,正弦函数出现周期性重复变化,斑马图中曲线就会出现上界和下界交叉问题,导致 PRF 可选择区域大大减小。

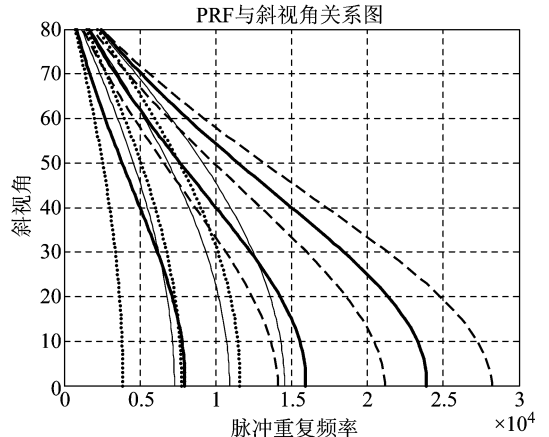


图 2 脉冲重复频率与斜视角关系图

Fig. 2 Relation between PRF and squint angle

图2为基于斜视角得到的PRF选择图,在确定了天线俯视角和斜视角后,就可根据图2选择PRF。横坐标为可选择的脉冲重复频率,单位为Hz,纵坐标为斜视角,单位为度。图中为回避发射脉冲干扰,用蓝色和红色细实线将图中区域从左至右分为多个条带;同时,为避免弹下点回波造成的干扰,将区域用蓝色和红色粗实线分为多个条带,逐条蓝色线和红色线之间的区域为无干扰区域,从红色到蓝色线间的区域为有干扰区域。PRF在交叉的无干扰区域中选择,并且为了降低运算量,应尽量选择可选区域的下限。随着雷达下视角的增大,图中较粗的蓝色线条和红色线条将会慢慢改变变化规律,由向下弯曲改成向上弯曲,导致斜视角对PRF的选择的影响变化比较平缓。而随着高度的增加,在其他参数保持不变的条件下,PRF取值下界在慢慢降低。

4 仿真与分析

仿真时,低飞大斜视 SAR 平台沿方位向做匀速直线运动。平台飞行高度为200米,速度为1000m/s, SAR 发射信号载频为10GHz,天线方位向和距离向波束宽度均为2度,天线下视角为60度,前斜视角为45度。采用较低PRF时得到成像结果如图3所示。

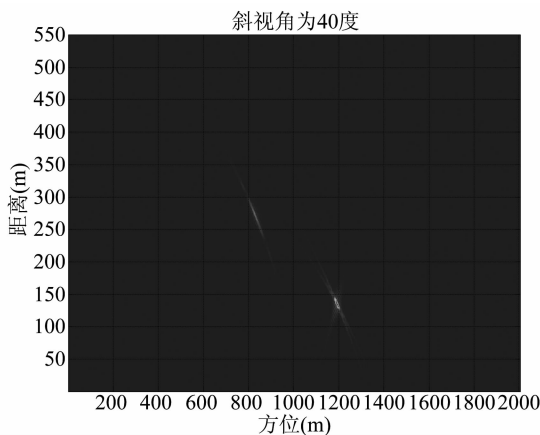


图3 PRF 过低时成像结果  
Fig. 3 Imaging result with too low PRF

由图3可见,PRF 过低时,超出多普勒带宽的点目标方位谱会折叠回来,导致图像出现一个虚假点,强度弱于真实位置,继续降低PRF,虚假点强度继续提高,进行目标检测会导致虚警。

依据第3部分PRF选举准则和斑马图,在大斜视条件下继续提高PRF,斜视角60度时脉冲重复频率为14000Hz,得到斜视角为45度、50度、55度和60度时结果如图4-图7所示。

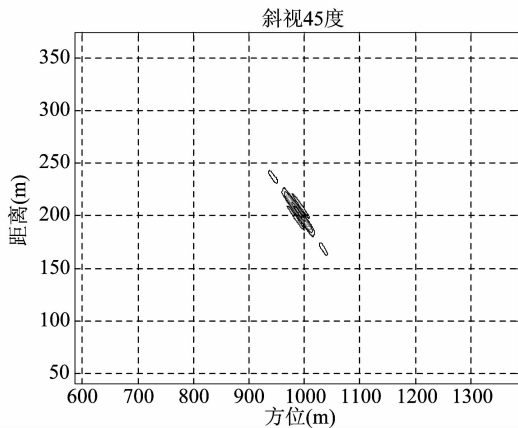


图4 斜视45度时成像结果  
Fig. 4 Imaging result with 45 degree squint angle

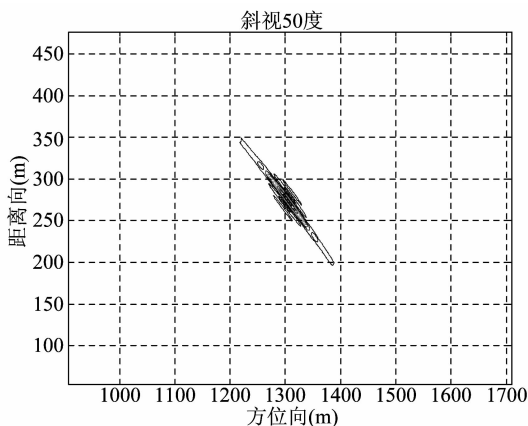


图5 50度斜视角成像结果  
Fig. 5 Imaging result with 50 degree squint angle

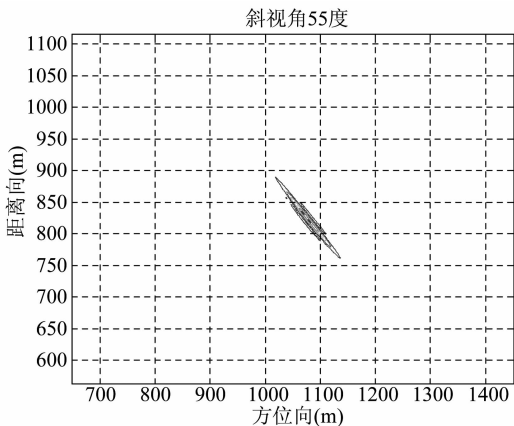


图6 55度斜视角成像  
Fig. 6 Imaging result with 55 degree squint angle

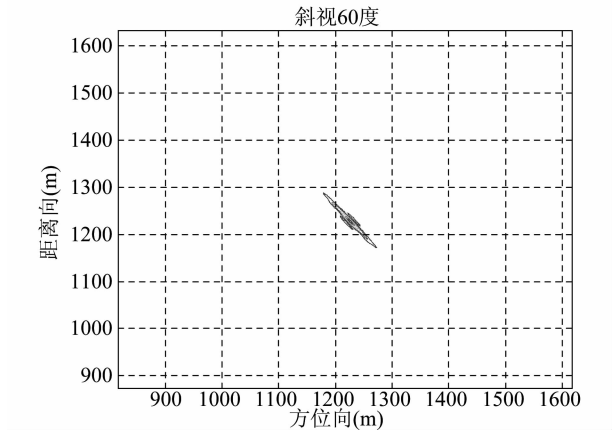


图 7 60 度斜视角成像结果

Fig. 7 Imaging result with 60 degree squint angle

在正确设置 PRF 后,可实现大斜视条件下目标成像,图 4 为 45 度斜视角对点目标成像结果,主瓣变窄,分辨率达到了 1.8 米;斜视角提高到 50 度,方位向分辨率降低,旁瓣能量提高,如图 5 所示;继续提高斜视角至 55 度和 60 度,成像结果如图 6 和图 7 所示,可见,目标成像质量较高,较好体现了目标特征;应注意,在不断提高斜视角和脉冲重复频率时,处于成像区域边缘的目标会出现散焦,这时要通过改变天线波束参数等提高成像质量。

表 1 不同斜视角下点目标成像性能

Tab. 1 Imaging performance of point target under different squint angle

斜视角(°)	45	50	55	60
PLSR( dB)	-20.6572	-24	-26	-28.9361
ISLR( dB)	-4.7932	-6.1449	-6.3551	-10.7743
分辨率(m)	1.8	2.0	2.4	3.0

为证明该算法不仅能对单个点目标成像,而且还能够在不同下视角下对海杂波背景中由多个散射中心组成的分布式目标成像,针对某特殊目标进行了仿真。目标由四个散射中心组成,背景杂波为海杂波,由图 8 结果可见,组成目标的多个散射中心均得到良好成像结果,基于恒虚警检测方法对图 8 成像结果进行检测,在合理设置分辨单元尺寸条件下,虚警率设置为  $10^{-4}$ ,检测结果如图 9 所示,可见,实现了对目标的正确检测和识别。

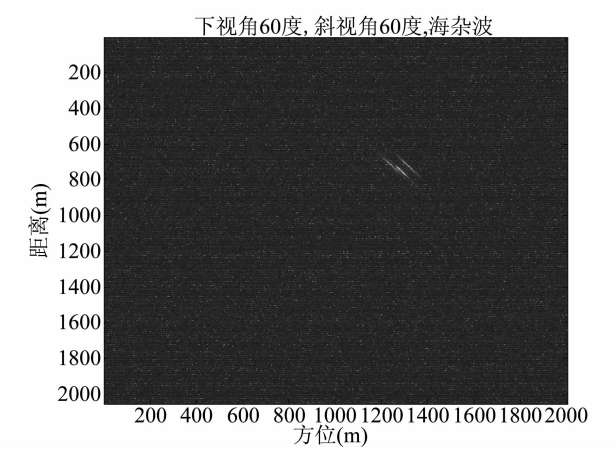


图 8 60 度斜视角分布式目标成像

Fig. 8 Imaging result with 60 degree squint angle

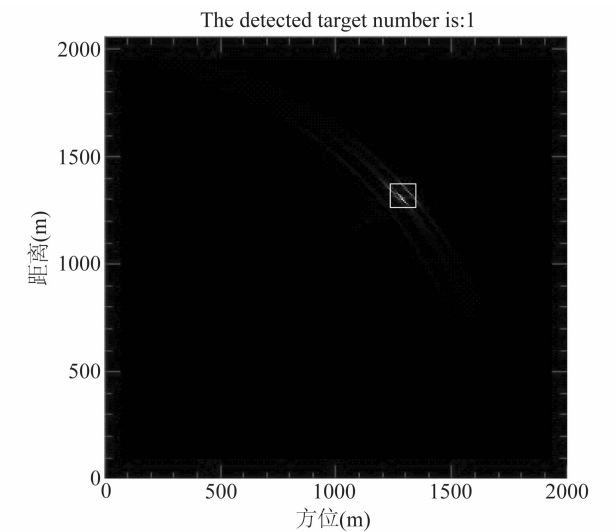


图 9 60 度斜视角分布式目标成像检测结果

Fig. 9 Detecting result when imaging with 60 degree squint angle

5 小结

低飞平台大前斜视 SAR 成像实现是一个有现实意义的重要问题。大斜视角导致回波信号多普勒中心偏移、测绘带与 PRF 的约束关系发生变化,目标成像会出现散焦、模糊等问题。针对这些问题,文章在合理设计 PRF 基础上,保证了大斜视  $\omega$ - $k$  算法良好性能,具有一定价值。

参考文献

[1] 保铮,刑孟道等. 雷达成像技术[M]. 电子工业出版社,北京,2006.  
Bao Zheng, Xing Meng-dao. Imaging Technology of Ra-

- dar[M]. Publishing House of Electronics Industry Press, Beijing, 2006. (in Chinese)
- [2] 彭岁阳, 卢大威, 张军, 沈振康, 胡卫东. 时域校正距离走动的 CS 成像算法[J]. 信号处理, 2010, 26(7): 1115-1120.
- Peng Sui-yang, Lu Da-wei, Zhang Jun, Shen Zhen-kang, Hu Wei-dong. The Chirp Scaling Imaging Algorithm with Range Walk Correction in Time Domain[J]. Signal Processing, 2010, 26(7): 1115-1120. (in Chinese)
- [3] Richard Bamler. A Comparison of Range-Doppler and Wavenumber Domain SAR Focusing Algorithms [J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30(4): 706-713.
- [4] Wang Jian-tao, Qin Yu-liang, Deng Bin, Li Xiang. A Modified Omega-K Algorithm for Missile-borne SAR Imaging with the Dive Trajectory[C]. 2<sup>nd</sup> Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2009: 71-74.
- [5] 何峰, 梁甸农, 董臻. 适于大斜视角的星载双基地 SAR 波数域成像算法[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1011-1015.
- He Feng, Liang Dian-nong, Dong Zhen. A Wavenumber Domain Algorithm for Spaceborne Bistatic SAR Imaging with Large Squint Angle [J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2005, 33(6): 1011-1015. (in Chinese)
- [6] 郑陶冶, 俞根苗. 弹载 SAR 脉冲重复频率设计研究[J]. 雷达科学与技术, 2010, 8(3): 217-222.
- Zheng Tao-ye, Yu Gen-miao. Design Method of Pulse Repetition Frequency of Missile-Borne Side-Looking SAR [J]. Radar Science and Technology, 2010, 8(3): 217-222. (in Chinese)
- [7] 谢华英, 卢再奇, 周剑雄, 朱永峰, 付强. 弹载平台聚束

SAR 成像脉冲重复频率设计[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(11): 2294-2298.

Xie Hua-ying, Lu Zai-qi, Zhou Jian-xiong, Zhu Yong-feng, Fu Qiang. Design of Pulse Repetition Frequency for Missile-borne Spotlight SAR Imaging[J]. Systems Engineering and Electronics, 2010, 32(11): 2294-2298. (in Chinese)

## 作者简介



**欧建平** 男, 副教授, 博士, 1974 年 4 月生, 2003 年毕业于国防科技大学获现代信号处理专业博士学位。研究方向为雷达信号处理, 获军队科技进步二等奖一次, 出版专著《现代制导雷达离散时间信号处理》一部, 发表学术论文 20 余篇。

E-mail: oujianping@nudt.edu.cn



**李伟** 男, 副教授, 博士, 1978 年 8 月生于山东济宁, 2006 年 6 月毕业于国防科技大学获工学博士学位, 主要研究方向为雷达信号处理, 先后参加国家重大安全基础研究项目两项, 承担国家自然科学基金、航空基金、省基金和教育部大学生创新基金各一项, 在核心期刊及国际学术会议发表文章 30 余篇, 出版教材 3 部。E-mail: liwei\_xian@yahoo.com.cn

新基金各一项, 在核心期刊及国际学术会议发表文章 30 余篇, 出版教材 3 部。E-mail: liwei\_xian@yahoo.com.cn

**张军** 男, 教授, 博士, 1973 年生, 2001 年在国防科技大学 ATR 国防科技重点实验室获得博士学位, 研究方向为自动目标识别。先后负责或参与国防预研、863、航空基金、航天基金、校预研基金等项目 20 余项, 先后获军队科技进步一等奖和国家科技进步二等奖各一次, 在国内外相关学术刊物上发表论文 50 余篇, 出版学术专著 1 部。