

## 多普勒效应对 FMCW-SAR 系统成像性能的影响分析

张大炜<sup>①②</sup> 魏芳<sup>①②</sup> 王岩飞<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

<sup>②</sup>(中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:** 该文结合机载连续波合成孔径雷达(FMCW-SAR)系统的成像原理,讨论了 FMCW-SAR 成像系统与脉冲 SAR 成像系统的不同,分析了载机运动所带来的多普勒效应对 FMCW-SAR 成像系统性能的影响,指出多普勒效应会带来距离向与方位向信号的二次耦合,进而会影响图像在距离向和方位向的聚焦。然后,根据 FMCW-SAR 的回波特性给出了一种在回波信号方位向多普勒域对误差进行补偿的方法,并结合 RD 算法给出了整个成像系统的流程。最后给出了补偿前后算法仿真和验证的结果,可以看出对多普勒效应进行补偿之后能够消除距离向与方位向信号二次耦合带来的误差,提高成像质量。

**关键词:** 脉冲 SAR; FMCW-SAR; 多普勒效应

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)03-0559-05

## Analysis of the Doppler Effect in FMCW-SAR and Its Influence on the Image of the System

Zhang Da-wei<sup>①②</sup> Wei Fang<sup>①②</sup> Wang Yan-fei<sup>①</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

<sup>②</sup>(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

**Abstract:** Sawtooth signals are transmitted and received continuously in FMCW-SAR, which makes the character of the echo of FMCW-SAR is different from pulsed SAR. Combined with the imaging principle of FMCW-SAR, the influence of Doppler effect on FMCW-SAR imaging system is analyzed in this paper. It is pointed out that second coupling of range and azimuth signals may be caused by Doppler effect and defocusing of the image may be caused by it. An approach to compensate for the Doppler effect in the azimuth Doppler domain is presented and the flow chart of the RD algorithm for the FMCW-SAR imaging system is given out. Experimental results show that the Doppler effect and second coupling of the range and azimuth signals may be compensated by the approach presented in this paper and better images could be formed.

**Key words:** Pulsed SAR; FMCW-SAR; Doppler effect

### 1 引言

传统的合成孔径雷达是一种脉冲体制雷达。对于脉冲雷达来说,由于其体制的原因,造成了雷达的收发设备复杂,设备的整体可靠性也相对较差。随着技术的发展,机载合成孔径雷达越来越倾向于采用低功耗、小型化和高可靠性的设备来执行某些紧急任务。采用连续波体制的合成孔径雷达由于其具有功耗低、重量轻、可维护性强以及研制费用相对低廉等等特点,越来越受到人们的关注<sup>[1-3]</sup>。

在传统的脉冲体制机载 SAR 中,系统的工作比相对较低,因此,在脉冲信号的持续时间内,雷达载机前进所引起的位置的变化就可以忽略不计。与脉冲 SAR 不同的是,在机载连续波合成孔径雷达(FMCW-SAR)系统中,由于雷达是连续地发射和接收回波,因此在信号的持续时间内由于雷达运动所引起的多普勒频率的变化就不能忽略。这时,包

含载机位置的“慢”变化时间就会与“快”变化时间耦合。在 FMCW-SAR 信号处理中,对载机前向速度所引起的多普勒效应的补偿的好坏会直接影响其成像后的图像质量。本文结合 FMCW-SAR 的成像原理,分析了 FMCW-SAR 中多普勒效应的成因以及该效应对系统成像性能的影响,随后结合 RD 算法给出了在方位向多普勒域对多普勒误差进行补偿的方法并给出了成像系统流程。通过仿真验证的结果可以看出,在 FMCW-SAR 系统中,对多普勒误差进行补偿后可以结合脉冲 SAR 的成像方法得到同样的成像效果。

### 2 FMCW-SAR 系统中多普勒效应的成因及补偿方法

#### 2.1 多普勒效应的成因

FMCW-SAR 采用了在接收机直接进行线性调频混频的方式对接收到的回波信号进行 Dechirp 处理。图 1 给出了 FMCW-SAR 成像系统的几何模型以及发送和接收回波的示

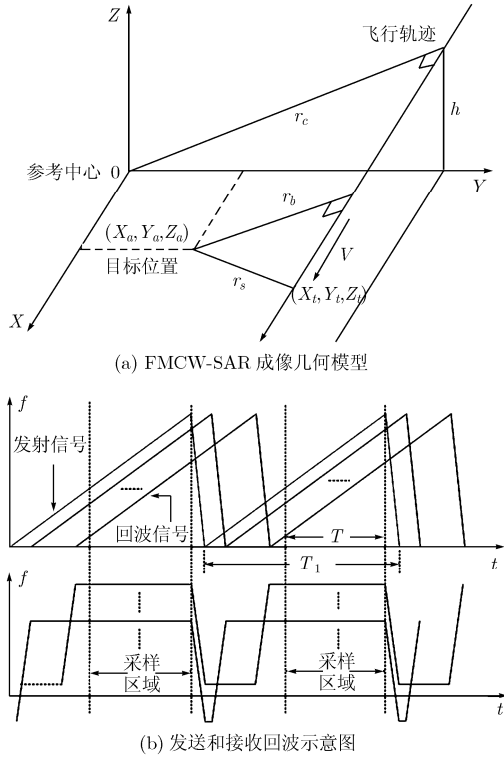


图1

意图。图中载机的运动方向是沿着  $X$  方向，点目标所在位置到航线的垂直距离为  $r_b$ ，到载机的距离为  $r_s$ ，测绘带参考中心到航线的垂直距离为  $r_c$ ，载机在不同时刻的位置坐标为  $(X_t, Y_t, Z_t)$ ，点目标位于  $(X_a, Y_a, Z_a)$ 。

假设对 FMCW-SAR 回波信号经过 Dechirp 之后，回波信号就可以表示为

$$S_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A \cdot \text{rect} \left( \frac{t - nT_1 - \frac{2}{c} \|r_s\|}{T} \right) \cdot \exp j \left\{ \frac{2}{c} \left[ 2\pi f_c + 2\pi k_r \left( t - nT_1 - \frac{2}{c} \|r_c\| \right) \right] (\|r_c\| - \|r_s\|) + \frac{4\pi k_r}{c^2} (\|r_c\| - \|r_s\|)^2 \right\} \quad (1)$$

这里，进行 Dechirp 处理的参考信号相对发射信号的延时取为  $\frac{2}{c} \|r_c\|$ ，其中  $r_c$  为参考距离。进行 Dechirp 的时间区域时长为  $T$ ， $T < T_1$ 。 $k_r$  表示发射线性调频信号频率上升期的调频斜率， $T_1$  表示频率上升期的持续时间， $f_c$  表示载波的中心频率， $n$  表示不同的扫频周期。

在式(1)中， $\frac{4\pi k_r}{c^2} (\|r_c\| - \|r_s\|)^2$  代表回波 Dechirp 之后的残留相位误差(RVP)。RVP 是在接收机采用 Dechirp 方式处理 SAR 信号时存在的一种现象。在大多数情况下，RVP 对成像的影响比较小，并且在同样的系统带宽和分辨率情况下，线性调频信号的持续时间越长，调频斜率越小，RVP 对成像的影响越小<sup>[4]</sup>。由于 FMCW-SAR 系统中线性调频信号

的持续时间比脉冲 SAR 系统中线性调频信号的持续时间要长得多，因此，在其它系统参数相同的情况下，FMCW-SAR 中 RVP 的影响相比脉冲 SAR 系统要小得多。并且，由于残留相位的影响本身比较小<sup>[4]</sup>，载机运动引起的多普勒效应在残留相位中的表现更加可以忽略不计。

在传统的脉冲体制合成孔径雷达中，对  $r_s$  进行处理时，由于回波脉冲的时间宽度  $T_p$  很短，采用了 Stop and Go<sup>[5,6]</sup> 的近似方式。在这种近似下， $r_s$  只与不同脉冲回波的起始时刻有关，而并不与每个脉冲内回波的持续时间相关，也就是说，在脉冲持续时间内， $r_s$  并不发生变化：

$$\|r_s\| = \sqrt{(X_a - X_t)^2 + r_b^2} = \sqrt{(X_a - n \cdot v_a / f_a)^2 + r_b^2} \quad (1)$$

在 FMCW-SAR 中，锯齿波频率上升期的持续时间接近于方位向采样的回波采样间隔，由图 2 可以看出，在连续波的工作体制下，一个锯齿波回波的持续周期比一个脉冲 SAR 的回波持续周期要大得多，因此计算  $r_s$  的时候就需要考虑锯齿波持续时间内不同时刻下  $r_s$  的数值的变化。

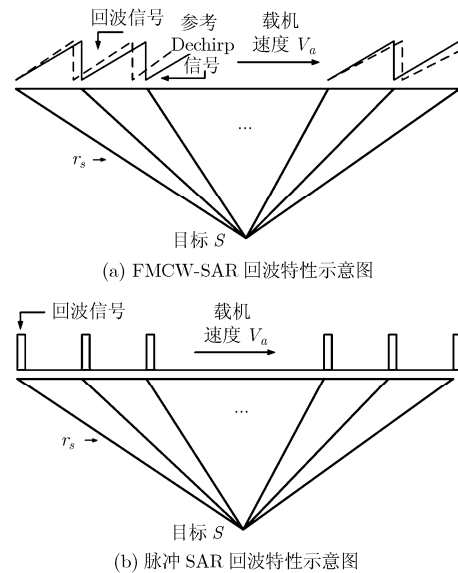


图2 脉冲 SAR 与 FMCW-SAR 回波特性差别示意图

考虑脉冲 SAR 中的处理方法，对 Dechirp 之后的 FMCW-SAR 回波信号进行采样。采样过程同样分为“快”时间采样和“慢”时间采样两个过程。考虑“慢”时间采样持续周期内，载机运动变化所带来的影响，经过采样之后，就形成了二维的数据矩阵，其  $r_s$  的表达式变为

$$\|r_s\| = \sqrt{(X_a - n \cdot v_a / f_a - m \cdot v_a / f_s)^2 + r_b^2} \approx r_b + \frac{(X_a - n \cdot v_a / f_a - m \cdot v_a / f_s)^2}{2r_b} \quad (2)$$

其中  $n$  代表“慢”时间采样点， $m$  代表“快”时间采样点， $f_s$  和  $f_a$  分别代表距离向和方位向采样间隔， $v_a$  是载机的前向运动速度。

在不考虑残留相位误差的情况下，结合菲涅尔近似，这

时回波信号就可以表示为

$$\begin{aligned}
 S_r(m, n) \approx & A \exp j \left[ \frac{2}{c} \left( 2\pi f_c + 2\pi k_r m \frac{1}{f_s} \right) (\|r_c\| - \|r_b\|) \right] \\
 & \cdot \exp j \left[ -\frac{2\pi (X_a - nv_a / f_a)^2}{\lambda r_b} \right] \exp j \left[ -\frac{2\pi k_r m (X_a - nv_a / f_a)^2}{cf_s r_b} \right] \\
 & \cdot \exp j \left[ -\frac{2}{c} \left( 2\pi f_c + 2\pi k_r m \frac{1}{f_s} \right) \left[ \frac{-mv_a (X_a - nv_a / f_a)}{f_s r_b} \right] \right] \\
 & \cdot \exp j \left[ -\frac{1}{c} \left( 2\pi f_c + 2\pi k_r m \frac{1}{f_s} \right) \left[ \frac{m^2 v_a^2}{r_b f_s^2} \right] \right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

## 2.2 多普勒效应对 FMCW-SAR 成像系统的影响

根据以上的分析可以看出, FMCW-SAR 系统的回波模型与脉冲 SAR 的回波模型有所不同。分析式(4)得到的结果, 其中第 1 项代表回波点目标的距离向位置, 第 2 项代表方位向线性调频回波, 第 3 项代表距离向与方位向的耦合, 也就是距离迁移现象。前 3 项与脉冲体制下 SAR 的回波特性是完全相同的。第 4 项和第 5 项则代表了由于“慢”时间内载机运动所引起的多普勒效应带来的误差。可以看出, 第 4 项包含了方位向与距离向信号除距离迁移现象之外的二次耦合, 第 5 项包含了距离向的二次项和三次项信息。第 5 项造成的误差大小与 Dechirp 后信号采样率、作用距离、载机速度、调频斜率和载波频率有关。在 SAR 系统参数条件下, 一般系统的采样率都在兆赫以上, 因此由该项造成的误差非常小, 其带来的最大相位误差都会小于  $10^{-6}$ rad, 在这种情况下由该项造成的相位误差的影响可以忽略不计<sup>[5]</sup>。

例如在  $f_c = 9\text{GHz}$ ,  $\tau = 0.5\text{ms}$ ,  $f_s = 50\text{MHz}$ ,  $V_a = 100\text{m/s}$ ,  $r_b = 10\text{km}$ , 测绘带宽为  $3\text{km}$  的条件下其最大二次相位误差为  $1.885 \times 10^{-8}$  rad, 其三次相位误差在不同分辨率情况下, 如图 3 所示: 第 4 项中的方位向与距离向信号的二次耦合包含了距离向的二次项和一次项信息与方位向一次项信息的交叉耦合, 它将会带来距离向信号的散焦, 并会引起距离向压缩之后, 目标位置沿方位向发生偏移。同时, 由于每一个方位向回波采样时刻都存在沿距离向的“快”时间偏移, 因此, 对于单个点目标的回波, 方位向采样点的采样间隔呈现出非均匀采样的变化。这时, 如果不对方位向信号进行插值处理, 将会在方位向压缩之后也出现散焦的现象。可见, 这种多普勒效应所带来的误差, 如果不经补偿, 将会严重影响图像质量, 造成图像的降晰。图 4 给出了式(4)

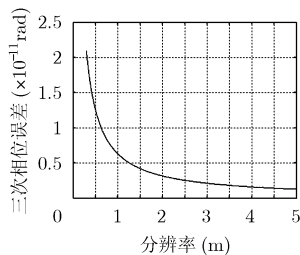


图 3 多普勒效应带来的距离向三次相位误差在不同分辨率条件下的对比图

所表示的误差项在距离向压缩之后的影响。图 5 给出了点目标成像后对距离向和方位向信号的影响。由图 4 可以看出, 沿方位向的分布, 距离向信号出现散焦的情况, 距离方位向中心点越远, 散焦现象越明显, 并且点目标中心位置发生了偏移, 这一点恰好验证了式(4)中的误差项所带来的影响。

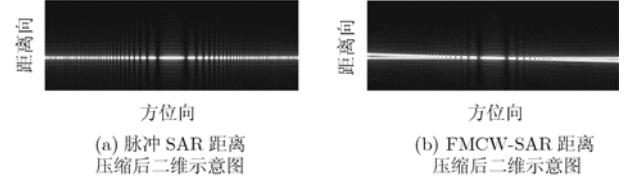


图 4 距离压缩后误差项影响示意图

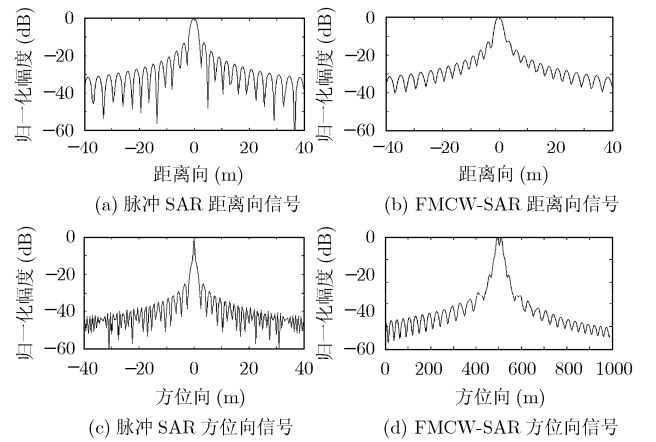


图 5 点目标压缩后误差项影响示意图

## 2.3 多普勒效应的补偿

前已指出, 由于载机运动引入的多普勒频率造成了回波信号距离向的散焦和方位向与距离向信号的二次耦合, 所以在进行成像处理时, 必须将多普勒效应引起的误差消除, 将目标的回波能量重新聚集起来。与脉冲 SAR 回波相比, 在方位向的“慢”时间回波采样信号中, 实际上是在每个回波脉冲中都增加了一个“快”时间方向的回波延迟。在实际的回波信号中, 由于回波信号是地面上散射点回波的叠加, 不同距离上的回波信号其方位向的回波特性并不相同, 如果需要在时域对式(4)的误差项进行补偿, 就需要进行插值处理。因此, 可以选择在方位向多普勒域进行精确补偿。参考式(3), 相比脉冲体制 SAR 来说, 对于回波在时域的表达式中每一个“慢”时间采样周期内增加的“快”时间偏移量来说, 其在方位向多普勒域中始终表现为一个随距离向采样点而变化的固定的频偏。假设在不考虑多普勒频率偏移的情况下, 回波信号方位向多普勒域的相位表达式为  $\Phi(f_a)$ , 那么 FMCW-SAR 回波信号在多普勒域的相位就可以表示为

$$\Phi(f_a') = \Phi(f_a) + \zeta_a = \Phi(f_a) - v_a f_a m / f_s \quad (3)$$

其中  $\zeta_a = -v_a f_a m / f_s$  就是多普勒误差在方位向多普勒域的表达式,  $f_a$  代表方位向多普勒频率。

由上面的分析可以看出, 在误差项的表达式中, 载机的

飞行速度是补偿表达式中一个重要的物理量，因此在成像时，载体速度的变化将成为对多普勒效应进行补偿时不能忽略的因素。在方位向多普勒域对  $\Phi(f'_d)$  的误差项  $\zeta_a$  进行补偿之后，就消除了由于载体运动产生的多普勒效应所带来的运动误差。这样，FMCW-SAR 的成像处理过程就可以采用 Stop and Go 的近似，并采用 Dechirp 体制的脉冲 SAR 的成像处理方法来得到最终的图像。图 6 给出了结合 RD 算法的整个成像处理流程框图。

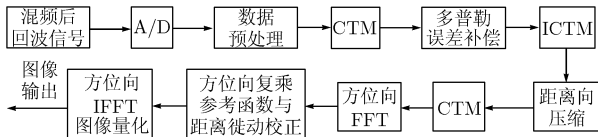


图 6 FMCW 成像算法流程图

### 3 试验验证与仿真结果分析

根据多普勒效应的成因，对载体运动所带来的多普勒误差进行精确补偿，需要在回波方位向多普勒域进行。按照文中给出的方法，首先将原始回波变换到方位向多普勒域，然后通过复乘操作就可以对多普勒效应带来的误差进行补偿。图 7 给出了在原始回波多普勒域进行补偿的示意图，图 8 给出了经过压缩之后回波点目标的示意图。通过图 7 可以看出，在没有进行补偿之前，距离向信号与方位向信号之间的二次耦合现象很明显，并且图像出现了扭曲的现象。经过补偿之后，就可以消除多普勒效应带来的误差现象。通过图 8 可以看出，补偿之后的点目标在距离向和方位向都能够重新聚焦，消除了散焦现象。

系统仿真所采用的参数为：载波中心频率 3GHz，成像中心区域距离 10km，回波距离向采样时间宽度 5ms，带宽 50MHz，锯齿波扫频周期 6.67ms。点目标理想分辨率：距离向分辨率 3m，方位向分辨率 3m。

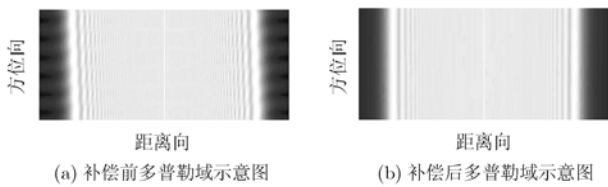


图 7 回波方位向多普勒域示意图

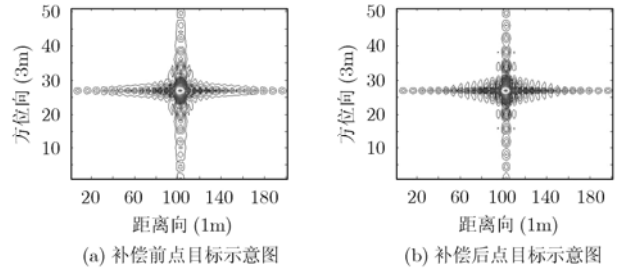


图 8 点目标成像示意图

表 1 给出了补偿前后，主瓣宽度，距离向和方位向积分旁瓣比与峰值旁瓣比的改善情况。

从表 1 的结果可以看出，多普勒效应的出现主要影响了 FMCW-SAR 方位向压缩之后的成像效果，对距离向的影响相对比较小。点目标压缩之后的距离向 PSLR 和 ISLR 都保持在比较好的水平，而压缩后方位向得到的结果相对较差。在仿真的系统参数情况下，距离向压缩后主瓣展宽系数  $\approx 1.17$ ，方位向主瓣展宽系数  $\approx 1.51$ 。补偿之后的主瓣宽度基本上达到了系统分辨率的要求。

观察仿真的结果，点目标压缩之后，方位向信号出现了主瓣展宽和散焦现象，同时由于存在方位向一次项信息与距离向二次项的耦合，使得方位向压缩之后的输出产生了非对称性畸变，一侧的旁瓣电平升高，主瓣向一侧展宽，这样就造成了方位向压缩后的输出较差。同时由于主瓣展宽现象，造成主瓣能量的增加，使得 ISLR 的结果高于 PSLR。经过补偿之后，方位向输出信号的散焦现象得到了很好的补偿，补偿后主瓣展宽系数  $\approx 1.03$ ，同时 ISLR 和 PSLR 得到了一定的改善。需要说明的是，在仿真中补偿前后并没有对理想点目标回波进行距离迁徙校正，因此最终得到的方位向压缩后的 PSLR 距离理想情况还有一定的差距，但从总的仿真结果可以看出多普勒效应对成像的影响和补偿算法的有效性，从而可以提高 FMCW-SAR 系统成像后的图像质量。

### 4 结束语

本文在结合 FMCW-SAR 原理的基础上，分析了由于载体运动所带来的多普勒效应对 FMCW-SAR 系统成像性能的影响。针对多普勒效应带来的误差，给出了一种在方位向多普勒域进行补偿的方法，并结合 RD 算法给出了系统的成像流程。由文中的分析可以知道，多普勒效应带来的误差将

表 1 补偿多普勒效应前后点目标性能比较

	主瓣宽度(m)		距离向(dB)		方位向(dB)	
	距离向	方位向	ISLR	PSLR	ISLR	PSLR
补偿前	3.51	4.52	-15.49	-15.4	-9.78	-6.76
补偿后	3	3.1	-15.27	-15.52	-10.53	-7.38

会使得距离向压缩之后的信号出现散焦和位置偏移的情况,并且由于距离向与方位向之间的二次耦合现象,造成了方位向回波的非均匀采样,进而影响到方位向压缩之后的图像的聚焦。通过本文的分析和仿真可以看出,FMCW-SAR 在回波特性和系统成像流程上与传统脉冲体制 SAR 有所不同,通过对误差进行补偿,就可以按照传统脉冲 Dechirp 体制 SAR 的处理方法进行成像处理。

### 参 考 文 献

- [1] Purseyed B and Griffiths H D. A synthetic aperture altimeter. IGARSS' 88, Edinburgh, Scotland, Sept., 1988: 981-982.
  - [2] Griffiths H D. New ideas in FM radar. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1990, 2(5): 185-194.
  - [3] Skolnik M I. Radar Handbook (Second Edition). New York: McGraw-Hill Publishing Company, 1990, Chapter 14.
  - [4] Carrara W G, Goodman R S, and Majewski R M. Spotlight Synthetic Aperture Radar. Boston, USA: Artech House Inc., 1995: 501-505.
  - [5] 张澄波. 综合孔径雷达, 原理、系统分析与应用. 北京: 科学出版社, 1989: 82-83, 172-178.
  - [6] Meta A, de Wit J J M, and Hoogeboom P. Development of signal processing algorithms for high resolution airborne millimeter wave FMCW SAR. In Proc. EuRAD, Amsterdam, The Netherlands, Oct. 2004: 209-212.
  - [7] 丁鹭飞, 耿富录. 雷达原理. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002: 177-182.
  - [8] Giorgio F and Lanari R. Synthetic Aperture Radar Processing. New York, USA: CRC Press, 1999: 152-155.
- 张大炜: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为 SAR 信号处理与实时成像.
- 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.