

基于 SCFT 处理算法的机载 SAR 运动补偿

郑卫平^{***} 张秋玲^{**} 冯宏川^{***} 王岩飞^{*}

^{*}(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^{**}(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘 要: 该文较为详细地分析了高分辨率机载 SAR 数据处理中, 有关目标距离单元徙动(RCM)校正和平台运动偏差的精确补偿问题。将平台运动偏差分解为空不变和空变分量, 利用机载 SAR 系统传递函数以及 SCFT 算法, 提出了目标 RCM 校正与平台 MOCO 合并处理的方法。仿真结果验证了方法的正确性。

关键词: 合成孔径雷达, 系统传递函数, Scaled 傅里叶变换, 距离单元徙动, 运动补偿

中图分类号: TN958, TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2005)09-1375-04

Airborne SAR Motion Compensation Based on SCFT Processing Algorithm

Zheng Wei-ping^{***} Zhang Qiu-ling^{**} Feng Hong-chuan^{***} Wang Yan-fei^{*}

^{*}(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

^{**}(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract This paper detailedly analyzes precise Range Cell Migration(RCM) correction of the targets and motion error compensation of platform in high resolution airborne SAR data processing. The motion error of platform is divided into space-invariant component and space-variant component. Then the paper proposes an approach of combining RCM correction and platform MOCO using transfer function of airborne SAR system and Scaled Fourier Transform algorithm. The data simulation results verify the validity of the new method.

Key words SAR, System Transfer Function(STF), Scaled Fourier Transform(SCFT), Range Cell Migration(RCM), Motion compensation

1 引言

SAR 数据处理实质上是对接收信号实现一个距离相关的滤波器运算。已经开发出各种不同的 SAR 数据处理算法, 大体可以分为 3 类: 时域算法, 一维频域算法(即距离多普勒算法), 二维频域算法等^[1]。在时域中距离相关性易于考虑, 但总计算效率较低。距离-多普勒算法将二维滤波器近似分解为两个一维滤波器级联。显然, 为补偿距离单元徙动(RCM)引入的畸变, 需要附加运算。二维频域算法是补偿 SAR 系统传递函数(STF)二维特性的最自然方法。在该情况下, 主要问题是 STF 距离相关性的补偿, 该 STF 距离相关性通常导致所谓的 Stolt 映射以及网格变形的距离向非线性映射^[2]。该效应必须精确补偿。在许多情况下, 将 STF 距离相关性限制到聚焦深度变化, 则可以实现精确求解^[3]。然而, 对于具有非常宽扫描带和/或大方位波束宽度 SAR 系统情况, STF 距离相关性的聚焦深度变化限制并不总是可以接受的, 因此提出了 Chirp Scaling(CS)算法^[4]以及 Scaled 傅里叶变换

(SCFT)算法^[5], 补偿距离徙动效应的变化。

尽管上面提出的二维频域算法可以精确补偿 RCM 效应, 但是在机载 SAR 系统中, 由于大气湍流的影响, 实际轨迹与标称轨迹的偏差以及姿态和前向速度的改变经常发生。因此, 为实现高分辨率成像, 必须对机载 SAR 平台的运动偏差进行补偿。而在 SAR 处理期间处理已知飞行轨迹偏差的运动补偿(MOCO)算法, 一个可实现的简单方法是假定轨迹偏差导致一个空不变畸变, 此时, MOCO 程序简化为一个相位乘法和距离门重新定位^[6]。然而, 空间不变性的假设不满足高分辨率机载 SAR 的要求。因此如何在 SAR 处理中将目标 RCM 补偿与平台轨迹偏差的空变性补偿结合起来, 目前仍是一项较活跃的研究课题。

基于上面的原因, 本文对目标 RCM 补偿与平台轨迹偏差补偿的结合问题进行了初步探讨。首先简单介绍沿标称轨迹运动的机载 SAR STF 以及 SCFT 算法, 然后将 SCFT 处理算法与运动补偿技术结合, 对目标 RCM 以及机载 SAR 平台航迹偏差所导致的运动误差进行补偿。为此, 将与平台航迹

偏差有关的运动分解为距离空不变和空变分量。最后利用5个点目标的仿真数据验证所提出的处理方法。

2 机载 SAR STF 及 SCFT 处理算法

我们知道 SAR 原始数据呈现下面的函数形式^[2,3]:

$$h\left(x' = vt_n, r' = \frac{ct'}{2}\right) = \iint dx dr \gamma(x, r) g(x' - x, r' - r; x, r) \quad (1)$$

其中 (x', r') 为方位和距离坐标, (x, r) 为地面上的对应坐标, $\gamma(x, r)$ 为等效后向散射系数, $g(\cdot)$ 为系统脉冲响应函数。因此 SAR 成像问题就是从式(1)再现 $\gamma(x, r)$ 或其模 $|\gamma(x, r)|$ 的滤波过程。

计算式(1)关于 x' 和 r' 的二维傅里叶变换(2D FT), 即 $HH(\xi, \eta)$, 得到^[2,3]

$$\begin{aligned} HH(\xi, \eta) &= \iint dx' dr' h(x', r') \exp\{-jx'\xi - jr'\eta\} \\ &= \iint dx dr \gamma(x, r) \exp\{-jx\xi - jr\eta\} G(\xi, \eta; r) \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $G(\xi, \eta; r)$ 为 $g(x' - x, r' - r; x, r)$ 的 2-D FT, 即 SAR 系统的 STF。 ξ 和 η 分别为方位和距离频率。由于 $g(\cdot)$ 已知, 因此, 原则上 $G(\xi, \eta; r)$ 也是已知的。

根据文献[3]我们得到正侧视机载 SAR 系统传递函数 $G(\xi, \eta; r)$ 精确表达式为

$$G(\xi, \eta; r) = \text{rect}\left[\frac{\eta}{2b^2}\right] w^2\left[-\frac{\xi}{2a^2}\right] \exp[-j\Psi(\xi, \eta; r)] \quad (3)$$

其中 $w\left(-\xi/(2a^2)\right)$ 为地面照射函数的 FT, 因为我们假设天线以发射和接收模式工作, 因此其为平方:

$$\begin{aligned} \Psi(\xi, \eta; r) &= -\frac{\eta^2}{4b^2} + \frac{1}{\rho}(1 + \beta r) \sqrt{\frac{4a^4}{\rho^2} \left(1 + \varepsilon \frac{\eta}{2b^2}\right) - \xi^2} \\ &\quad - \frac{2a^2}{\rho^2} \left(1 + \varepsilon \frac{\eta}{2b^2}\right) (1 + \beta r) \end{aligned} \quad (4)$$

其中

$$a^2 = \frac{2\pi X^2}{\lambda r_0}, \quad b^2 = \frac{\alpha \tau^2}{2}, \quad \beta = \frac{c\tau}{2r_0}, \quad \varepsilon = \frac{\Delta f}{f}, \quad \rho = \frac{X}{r_0} \quad (5)$$

式(5)中各量的含义如下: X 为合成孔径长度, λ 为波长, r_0 为雷达到地面照射区域中心的最近点距离, α 为发射信号调频率, τ 为信号宽度, Δf 为信号带宽, c 为传播速度, $f = \lambda/c$ 。

将 $G(\xi, \eta; r)$ 表示为两个函数的乘积: 一个空不变和一个空间相关^[2]。因此, 重写式(3)如下:

$$G(\xi, \eta; r) = G(\xi, \eta; 0) \cdot \Delta G(\xi, \eta; r) = G_0(\xi, \eta) \cdot \Delta G(\xi, \eta; r) \quad (6)$$

式中

$$\left. \begin{aligned} G_0(\xi, \eta) &= G(\xi, \eta; 0) \\ \Delta G(\xi, \eta; r) &= \sqrt{1 + \beta r} \exp[-j\Psi_1] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Psi_1 &= \frac{2a^2\beta}{\rho^2} \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\rho\xi}{2a^2}\right)^2} - 1 \right] \cdot r + \left[\frac{1}{\sqrt{1 - (\rho\xi/2a^2)^2}} - 1 \right] \cdot \eta r \\ &= \mu(\xi) \cdot r + \nu(\xi) \cdot \eta r \end{aligned} \quad (8)$$

上式中因子 $\nu(\xi) \cdot \eta r$ 考虑了 RCM 的距离相关性。

如果我们用 $G_0(\xi, \eta)$ 滤波整个数据, 则只有图像中心能正确处理。因此, 附加 $\Delta G(\xi, \eta; r)$ 因子包含 STF 的残余部分, 对于近距和远距数据的正确处理必须考虑该残余部分。

将式(6), 式(7)和式(8)代入式(2), 我们得到

$$\begin{aligned} HH(\xi, \eta) &= G_0(\xi, \eta) \iint dx dr \gamma(x, r) \exp[-jx\xi - jr\eta - j\Omega(\xi)r - j\Omega(\xi)\eta r] \\ &= G_0(\xi, \eta) \Gamma[\xi, \Omega(\xi)\eta + \mu(\xi)] \end{aligned} \quad (9)$$

其中

$$\Omega(\xi) = 1 + \nu(\xi) \quad (10)$$

$\Gamma[\xi, \Omega(\xi)\eta + \mu(\xi)]$ 为利用变量 $[\xi, \Omega(\xi)\eta + \mu(\xi)]$ 计算的 $\gamma(\cdot)$ 的 FT。由式(9)显知, SAR 系统传递函数距离相关性导致距离频率非线性映射, 这就是所谓的 Stolt 变量变换^[2]。

我们用 $G_0^{-1}(\xi, \eta)$ 乘 2-D 频谱 $HH(\xi, \eta)$, 得到

$$\widehat{HH}(\xi, \eta) = HH(\xi, \eta) G_0^{-1}(\xi, \eta) = \Gamma[\xi, \Omega(\xi)\eta + \mu(\xi)] \quad (11)$$

如果我们沿 η 方向用新核 $\exp[j\Omega(\xi)\eta r']$ 代替通常核 $\exp(j\eta r')$ 计算式(11)的逆傅里叶变换, 则可以求得 Stolt 问题的解。作为该运算的结果, 我们得到 Scaled 逆傅里叶变换 (SCFT⁻¹)^[5]:

$$\begin{aligned} \text{SCFT}^{-1}[\widehat{HH}(\xi, \eta)] &= \frac{1}{2\pi} \int \widehat{HH}(\xi, \eta) \exp[j\Omega(\xi)\eta r'] d\Omega(\xi)\eta \\ &= \frac{1}{2\pi} \int \Gamma[\xi, \Omega(\xi)\eta + \mu(\xi)] \exp[j\Omega(\xi)\eta r'] d\Omega(\xi)\eta \\ &\approx \Gamma[\xi, r'] \exp[-j\mu(\xi)r'] \end{aligned} \quad (12)$$

函数 $\Gamma[\xi, r']$ 表示后向散射系数在距离/方位频域中的估算。

在最后一步中, 我们用 $\exp[j\mu(\xi)r']$ 乘式(12), 并且关于 ξ 变量实施一个标准逆 FT 变换。整个程序结构图显示在图 1 中。



图 1 基于 SCFT⁻¹ 运算的 2-D SAR 处理

在完成机载 SAR 系统 STF 分析以及不考虑运动误差的 SCFT SAR 处理之后, 下面我们讨论如何将机载 SAR 运动误差的补偿结合到 SCFT 算法中。

3 平台轨迹偏差分析及补偿

图 2 为存在轨迹偏差时的机载 SAR 系统几何关系。图中: x 和 r 分别为场景散射点 P 的方位和斜距坐标; θ 为目标视角; x' 为 SAR 天线位置; d 为平台偏离理想航迹(沿 x

方向)的位移矢量, 其 y 和 z 分量分别垂直于平台理想航迹, 其 x 分量应假设为零, 或按文献[7]进行处理; δr 为在与飞行方向正交平面内的距离向位移; R 和 R_n 分别为实际和标称天线位置与目标之间的距离。

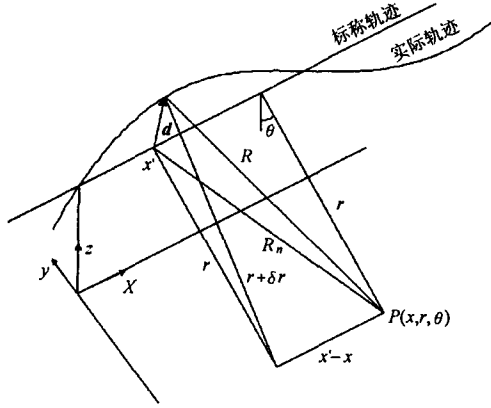


图2 存在轨迹偏差时的机载 SAR 几何关系

由图2我们得到 R 和 R_n 分别为

$$R(r, x', x) = \sqrt{(r + \delta r)^2 + (x' - x)^2} \quad (13)$$

$$R_n(r, x' - x) = \sqrt{r^2 + (x' - x)^2} \quad (14)$$

其中 δr 项取决于 x' 和 r 。假设 SAR 方位向带宽足够窄, 则我们可以展开 R 如下:

$$R(x' - x, x', r) \approx R_n(x' - x, r) + \delta r(x', r) \quad (15)$$

假设轨迹位移是由惯性测量单元(IMU)测量的, 并在 SAR 处理阶段可以利用。将 δr 按下式分离成距离向空不变(位于场景中心)和空变两部分^[8]:

$$\delta r(x', r) = \delta r(x', r_0) + \delta r_v(x', r) = \delta r_0(x') + \delta r_v(x', r) \quad (16)$$

式中 $\delta r_0(x')$ 为距离向空不变运动误差, 对它的补偿称为一阶 MOCO; $\delta r_v(x', r)$ 为距离向空变运动误差, 对它的补偿称为二阶运动补偿。

假设发射的线性调频信号为

$$f(t') = \text{rect}\left[\frac{t'}{\tau}\right] \exp\left(j2\pi ft' - j\frac{\alpha}{2}t'^2\right) \quad (17)$$

式中各量意义同前。去载频之后的回波信号为

$$\begin{aligned} hh(x', r') &= \iint dx dr \gamma(x, r) \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda}R - j\frac{2\alpha}{c^2}(r' - R)^2\right) \\ &\cdot \text{rect}\left(\frac{r' - R}{c\tau/2}\right) w^2(x' - x) \end{aligned} \quad (18)$$

对式(18)沿距离向进行 FT 得到

$$\begin{aligned} hH(x', \eta) &= \text{rect}\left[\frac{\eta}{2\alpha\tau/c}\right] \exp\left(j\frac{c^2}{8\alpha}\eta^2\right) \\ &\cdot \iint dx dr \gamma(x, r) w^2(x' - x) \exp\left(j\left[\eta + \frac{4\pi}{\lambda}\right]R\right) \end{aligned} \quad (19)$$

将 R 的展开式(15)及式(16)代入上式得到

$$\begin{aligned} hH(x', \eta) &= \text{rect}\left[\frac{\eta}{2\alpha\tau/c}\right] \exp\left[j\frac{c^2}{8\alpha}\eta^2 - j\left(\eta + \frac{4\pi}{\lambda}\right)\delta r_0\right] \\ &\cdot \iint dx dr \gamma(x, r) w^2(x' - x) \exp\left[-j\left(\eta + \frac{4\pi}{\lambda}\right)(R_n - r)\right] \\ &\cdot \exp\left[-j\left(\eta + \frac{4\pi}{\lambda}\right)r\right] \exp\left[-j\left(\eta + \frac{4\pi}{\lambda}\right)\delta r_v\right] \end{aligned} \quad (20)$$

相位项 $(4\pi/\lambda)(R_n - r)$ 是包含聚焦深度项($r \neq r_0$)的理想目标方位向响应; 相位项 $\eta(R_n - r)$ 说明了目标距离不相关($r = r_0$)和距离相关($r \neq r_0$)的 RCM。

首先对式(20)进行距离压缩, 即与 $\exp\left[-j\frac{c^2}{8\alpha}\eta^2\right]$ 相乘:

然后用 $\exp\left[j(\eta + 4\pi/\lambda)\delta r_0\right]$ 乘以式(20)得到对距离不相关运动误差相位项 $\exp\left[-j(\eta + 4\pi/\lambda)\delta r_0\right]$ 的补偿, 称之为—阶运动补偿。在一阶运动补偿之后, 忽略 $\eta\delta r_v$, 然后沿方位向(x')进行 FT, 得到

$$\begin{aligned} HH(\xi, \eta) &= \text{rect}\left[\frac{\eta}{2\alpha\tau/c}\right] \int dr \exp\left[-j\left(\eta + \frac{4\pi}{\lambda}\right)r\right] \\ &\cdot \int d\xi Q_v(\xi, r) \Gamma(\xi - \zeta, r) G_x(\xi - \zeta, \eta, r) \end{aligned} \quad (21)$$

式中 $Q_v(\xi, r)$ 为距离相关项误差 $\exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\delta r_v(x', r)\right]$ 的方位向 FT; $\Gamma(\xi, r)$ 为 $\gamma(x, r)$ 的方位向 FT, 而 $G_x(\xi, \eta, r)$ 为距离压缩之后 SAR 系统的 STF。根据式(7)和式(8), 我们可得到 $G_x(\xi, \eta, r)$ 的近似表达式为

$$G_x(\xi, \eta, r) = G_1(\xi, \eta, r) G_2(\xi, \eta, r) \quad (22)$$

$$G_1(\xi, \eta, r) \approx w^2\left(\frac{\xi}{4\pi/L}\right) \text{rect}\left[\frac{\eta}{2\alpha\tau/c}\right] \exp\left[-j\frac{\xi^2}{2} \frac{\lambda r}{4\pi}\right] \quad (23)$$

$$G_2(\xi, \eta, r) \approx \exp\left[-\frac{\xi^2}{2} \frac{\lambda r}{4\pi} \frac{\eta \lambda}{4\pi}\right] \quad (24)$$

式(23)说明包含聚焦深度效应的方位向频率调制, 其中 L 为真实天线方位向长度; 式(24)是描述目标 RCM 效应的项。

对于适度的轨迹位移, 就所涉及的距离徙动项而言, 我们可以假设 $Q_v(\xi, r)$ 沿 ξ 方向发散足够小, 则在场景中:

$$\begin{aligned} &\int Q_v(\xi, r) \Gamma(\xi - \zeta, r) G_x(\xi - \zeta, \eta, r) d\xi \\ &\approx G_2(\xi, \eta, r) \int Q_v(\xi, r) \Gamma(\xi - \zeta, r) G_1(\xi - \zeta, \eta, r) d\xi \end{aligned} \quad (25)$$

式(25)表明, $G_x(\cdot)$ 中的距离徙动滤波器分量可以从式(21)中偏差导致的卷积积分中提出来。在该阶段, 目标 RCM 校正是在频域中用 $G_2^*(\xi, \eta, r_0)$ 乘式(25)中信号, 而后在距离向对式(27)实施前面第2节的 SCFT⁻¹ 完成的。

距离徙动校正之后, 通过实施一个方位向逆 FT, 则可以补偿掉^[8]距离相关项误差 $\exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}\delta r_v(x', r)\right]$, 即乘以

$\exp\left(j\frac{4\pi}{\lambda}\delta r_v(x',r)\right)$, 这称为二阶 MOCO。一个最后的方位向压缩步骤同时包括聚焦深度补偿结束了处理程序。

整个处理过程如图3所示。

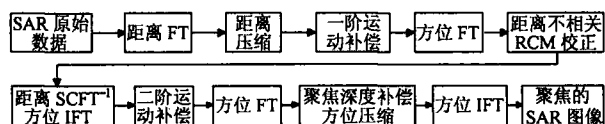


图3 基于SCFT并结合运动补偿的SAR处理流程

4 仿真结果

本节通过处理仿真数据验证上面所给出的处理程序。传感器参数如表1所示。通过引进每合成孔径长度5周的频率和沿y方向3m幅度的正弦轨迹偏差,得到5个点目标原始数据的仿真。目标位置的选择应能分开测试空不变和空变运动补偿的性能。中心点距离为5000m,近距点和远距点分别在4000m和6200m。

表1 仿真的传感器参数

标称高度	3000m	取样频率	100MHz
场景中心视角	53°	线性调频带宽	90MHz
合成孔径长度	180m	线性调频宽度	5μs
平台标称速度	80m/s	波长	3.14cm
脉冲重复频率	250Hz	距离延迟	23μs

图4为没有实施运动补偿处理的图像,从图中可以看出,目标方位向的展览是很明显的,使得定位3个中心距离向目标相当困难。图5为只对运动产生的空不变项进行补偿处理的图像,可见由于实施了空不变项运动补偿,中心点目标得到了很好聚焦,但近距和远距点在方位向仍然存在发散。图6为应用图3处理程序实施空不变和空变项补偿处理后的图像,可见在近距和远距目标上空变运动补偿的好处是明显的。

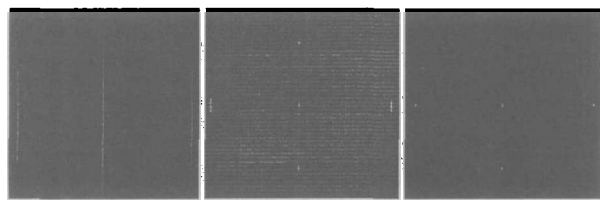


图4 无运动补偿处理的图像 图5 运动导致空不变项补偿处理的图像 图6 实施空不变和空变项补偿处理的图像

5 结束语

根据参考文献[9],我们知道,基于SAR处理器的CS算法相对于基于SAR处理器的SCFT而言,少两次FT。然而,这是以发射信号要求为线性调频信号,以及截断SAR STF

中RCM的距离不相关成分泰勒展开的二阶量为代价获得的。通过对CS中和本文所提议的算法中结合MOCO所需要的FT数目比较,两个算法可获得相同的计算效率。然而,SCFT算法并不要求发射信号为线性调频信号,并且不存在泰勒展开的截断误差。

本文将基于SAR处理器的SCFT算法与IMU测量的机载平台轨迹有机结合起来,提出了一个同时补偿目标RCM和平台运动误差的机载SAR数据处理程序。在此基础上,进行了5个点目标的原始数据仿真,仿真结果表明,该处理程序能较好补偿目标RCM的距离相关性以及平台轨迹的空变性误差。

参考文献

- [1] Barber B C. Theory of digital imaging from orbital synthetic aperture radar. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 6(6): 1009 – 1057.
- [2] Franceschetti G, Lanari R, Pascasio V, Schirizzi G. WASAR: A wide-angle SAR processor. *IEE Proc.-F*, 1992, 139(2): 107 – 114.
- [3] Franceschetti G, Lanari R, Marzouk E S. A new two-dimensional squint mode SAR processor. *IEEE Trans. on Aerospace Electron. Syst.*, 1996, 32(2): 854 – 863.
- [4] Raney R K, Runge H, Mamlar R, Cumming I A, Wong E H. Precision SAR processing using chirp scaling. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, 32(4): 786 – 799.
- [5] Lanari R. A new method for the compensation of the SAR range cell migration based on the chirp Z-transform. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(5): 1296 – 1299.
- [6] Kirk J. Motion compensation for synthetic aperture radar. *IEEE Trans. on Aerospace Electron. Syst.*, 1975, 11(3): 338 – 348.
- [7] 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: 301 – 302.
- [8] Fornaro G. Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation. *IEEE Trans. on Aerospace and Electron. Syst.*, 1999, 35(3): 997 – 1008.
- [9] Lanari R, Fornaro G. A short discussion on the exact compensation of the SAR range-dependent range cell migration effect. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(6): 1446 – 1453.

郑卫平: 男, 1966年生, 博士生, 中国兵工学会夜视技术专业委员会会员,《红外技术》编委,研究方向为热成像技术、机载合成孔径雷达运动补偿及信号处理等。

张秋玲: 女, 1970年生, 博士生, 研究方向为干涉合成孔径雷达系统设计及信号处理。

冯宏川: 男, 1972年生, 博士生, 研究方向为合成孔径雷达动目标检测等。

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。