

空间碎片 SRMF-CLEAN 成像算法

王 琦,邢孟道,周 峰,保 铮

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室,陕西西安 710071)

摘 要: 提出一种空间碎片 SRMF-CLEAN 成像算法. 该算法成功地将太空碎片运动的先验知识纳入到雷达成像过程之内,成像中利用单距离匹配滤波(Single Range Matching Filtering,简称 SRMF)快速算法有效提高了分辨率与成像速度,并采用点扩展函数参数化模型,通过修正 CLEAN 算法抑制点扩展函数扰动的影响. 二者结合,有效地实现了太空碎片高分辨成像. 理论推导和仿真结果验证了该方法的有效性.

关键词: 雷达成像; 空间碎片; SRMF-CLEAN

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 12-2412-05

SRMF-CLEAN Imaging Algorithm for Space Debris

WANG Qi, XING Meng-dao, ZHOU Feng, BAO Zheng

(Key Laboratory for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract: A SRMF-CLEAN algorithm for space debris is proposed. The proposed algorithm can successfully incorporate prior information of space debris movement into imaging process. Together with single-range matching filtering (SRMF) fast algorithm, it can improve the resolution and imaging speed effectively. For point spread function parameterization model is used in the algorithm, the effect of point spread function disturbance can be inhibited by correcting CLEAN algorithm. Combination of the two algorithms can realize high resolution imaging for space debris effectively. Theoretic derivation and simulation result verify validity of this algorithm.

Key words: radar imaging; space debris; SRMF-CLEAN

1 引言

空间碎片的存在严重地威胁着在轨运行航天器的安全,所以对空间碎片的识别和编目是非常重要的工作. 然而对于这些尺寸较小(如 1-10cm)的空间碎片,目前 ISAR 雷达的带宽无法满足其成像的要求. 所以对尺寸小于雷达距离分辨率的太空碎片进行成像,可以采用一种方法—SRDI(单距离多普勒干涉)^[1]. 该方法主要利用太空碎片通常会围绕它的主轴进行简单的自旋转运动这一事实,通过迁徙一个旋转周期的多普勒谱就可以得到目标的二维像. SRDI 主要通过分析目标横向回波的多普勒谱的变化特点,将单个距离单元数据转化为时频域进行曲线积分处理以得到目标二维像. 魏格纳分布等非线性时频分析算法精度较高但有交叉项的影响,线性时频分析算法稳健,多信号下没有交叉项,但是通过加窗把一小段非平稳信号近似为平稳信号形式的方法会使分辨率受到限制,因此,SRDI 方法往往达不到理想的分辨率要求. 同时该方法由于采用时频变换与沿

固定曲线进行积分,所以算法复杂,其计算量非常大. 本文同样基于太空碎片通常会围绕它的主轴进行简单的自旋转运动这一事实,提出一种 SRMF-CLEAN 方法对太空碎片进行雷达成像. 本文方法首先对目标不同旋转半径建立不同匹配滤波器的方法来对横向回波数据逐次进行匹配滤波,匹配滤波后在散射点相应的半径与角度上会出现峰值. 由此得到极坐标形式的目标二维像,从中可以估计目标的形状. 这种算法可利用 FFT 有效地提高成像速度^[2],与 SRDI 方法相比具有分辨率高、计算量少的优点. 为了减少这种算法较高的旁瓣,并提高图像质量,这里采用结合修正 CLEAN 算法^[3]的方法进行太空碎片成像. 文中对该算法的性能作了分析,并给出了仿真结果.

2 回波信号分析

通常 ISAR 成像是发射宽带信号从而获得高分辨距离像,但即使是使用高功率雷达,在 100 ~ 1000km 远处观测 1 ~ 10cm 的物体也是很困难的事情. 同时为了确

保对这些小目标观测的灵敏度, 还需要限制系统的带宽, 在这种情况下要达到小于 10cm 的距离分辨率更是不可能的. 然而, 从太空碎片总是围绕主轴以一定的角速度旋转的实际情况出发, 如果对其观测周期多于一个自旋转周期, 只利用横向回波信息还是有可能获得二维图像的. 所以我们只需要对单个距离单元横向回波加以分析处理.

设空间碎片在空间的姿态用图 1 直角坐标系来表示, 空间碎片在 X-Y 平面内以 Z 轴为旋转轴以角速度 ω 旋转, v 为合成孔径雷达中心到空间碎片坐标系原点基点连线 (los: line of sight) 方向单位向量,

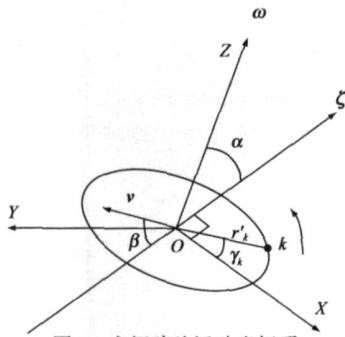


图 1 空间碎片运动坐标系

为与 Z 轴夹角. v 为碎片飞行速度向量与 ω 夹角为 α .

我们给出空间碎片上距旋转中心距离为 r_k , 与 X 轴夹角为 γ_k 的一散射点 k 的单个距离单元横向回波为:

$$s_k(t) = A_k \exp[j2\pi f_c(t - 2R_k(t)/C)] \quad (1)$$

A_k 为散射强度, f_c 为回波载频, t 为一固定距离单元到达时间, τ 为横向采样时间, C 为光速, $R_k(t)$ 为散射点 k 与雷达之间的瞬时斜距距离. 式(1)与载波混频后的基带信号为:

$$s_k(t) = A_k \exp[-j4\pi R_k(t)/\lambda] \quad (2)$$

其中 λ 为发射波长. 令信号 $s_k(t) = A_k \exp[-j\phi_k(t)]$, 其中相位 $\phi_k(t) = \frac{4\pi}{\lambda} R_k(t)$. 如图 1 所示, 点目标的距离函数可写为:

$$R_k(t) = R_0 + v \cos \alpha + r_k \sin(\omega t + \gamma_k) \sin \alpha \quad (3)$$

式(3)中 R_0 为雷达距目标中心 O 的初始距离, 其为一常量, v 为飞行速度, 在观测时间内 α 认为常量, 可将 $r_k \sin \alpha$ 合写为成像平面内点目标半径 r_k , 则该点的雷达回波多普勒频移为

$$f_D = \frac{1}{2} \frac{d\phi(R_k(t))}{dt} = 2f \frac{v \cos \alpha + r_k \cos(\omega t + \gamma_k) \sin \alpha}{\lambda} \quad (4)$$

在只有平动分量的情况下, 目标上各散射点回波的多普勒完全相同, 对雷达成像没有贡献, 应将平动分量补偿掉, 成为转台目标成像^[4]. 假设目标平动得到很好的补偿, 式(3)距离函数变化只有转动分量, 可令 $R_k(t) = r_k \sin(\omega t + \gamma_k)$, 此时目标仅有转动引起的多普勒变化, 多普勒频率变为

$$f_D = 2\pi r_k \cos(\omega t + \gamma_k) / \lambda \quad (5)$$

则信号平动补偿后回波可写为

$$s_k(t) = A_k \exp\left[-j4\pi r_k \sin(\omega t + \gamma_k) / \lambda\right] \quad (6)$$

实际式(6)中 $\omega = \omega_z + \omega_p$, ω_z 为目标自身转动角速度, ω_p 为目标与雷达视线相对转动速度. 通常 ISAR 成像在目标没有自旋转的情况下, 采用转角很小的微动模型, 由相对转动角速度 ω_p 在不同半径产生不同的多普勒频率得到横向图像, 即为普通 RD 算法. 此时额外附加了自转角速度 ω_z 引起的多普勒频率, 且观测时间超过自转周期, 这样回波信号上产生额外的频率调制, 所以旋转目标在信号回波上产生正弦相位调制^[5,6]. 在自旋转引起的角度变化远大于相对转动角度时, 我们可近似认为 ω 为目标自旋转角速度.

在高频近似的情况下, 金属目标的散射场可以表示为离散点散射场的叠加^[7], 所以在多个散射点的情况下最终回波信号模型为:

$$s(t) = \sum_{k=1}^K A_k \exp[-j4\pi (r_k \sin(\omega t + \gamma_k)) / \lambda] \quad (7)$$

3 SRDI 与 SRMF-CLEAN 成像算法

在确定自旋转角速度 ω 的基础上, SRDI 算法可以把信号的瞬时频率和目标相对转台中心的位置直接联系起来. 将横向回波数据由时频分析算法转化到时频域后进行成像处理, 令回波数据时频表达式为 $S_r(t, f)$, 在时频域中时间轴对应旋转角度变化, 可将时间变化 t 转换为转动角度的变化 $\theta = \omega t$, 所以不同的转角对应的回波数据瞬时多普勒频率可用关系式

$$r(\theta) = \frac{\lambda}{2 \cos \theta} f(\theta) \quad (8)$$

与半径对应起来^[11]. 则最终由下式

$$S_m(r, \theta) = \int_0^{\lambda} S_r(r \cos \theta - \lambda/2, \theta) d\theta \quad (9)$$

得到极坐标点 (r, θ) 的散射强度.

这种方法必不可少的步骤采用时频分析, 通常时频分析方法分为线性与非线性两大类, 线性时频分析算法稳健, 多信号下没有交叉项, 但加窗使一小段非平稳信号近似平稳来分析的方法使分辨率受到限制. 魏格纳分布等非线性时频分析算法精度较高但有交叉项的影响, 所以 SRDI 算法受到时频分析算法的精度限制, 并不能达到理想的雷达半波长的分辨率图像. 而且用到的式(9)积分通常是在特定的曲线上求和来进行, 这是比较麻烦的. 所以 SRDI 算法计算量大, 同时达不到理想的精度.

本文给出另一种太空碎片成像方法 SRMF. 通过上节分析, 可以看到如果自旋转角速度观测时间内恒定,

横向回波为一系列以不同旋转半径 r 和角度相位 θ 为变参量的已知波形之和. 如果我们给定一点极坐标位置 (r, θ) , 则可建立该点理论回波波形, 以该点信号波形为参考信号, 将横向回波相位校正后相加作相干处理, 可得到该散射点冲激响应. 对选定点实现相干积累时, 这点附近点的滤波输出信号都不会完全相干, 使输出信号幅度下降, 只实现对该点的聚焦. 依次处理可得到不同半径不同角度的各个散射点的冲击响应, 最终得到完整的目标二维像. 需要指出通过卷积直接作匹配滤波的运算量相对较大, 处理所需的信号与匹配滤波器的卷积可由 FFT 在频域通过共轭相乘再作 IFFT 求得, 这样大大提高了运算效率. 首先我们将式(7)的回波信号用傅立叶变化转换到频域来讨论如何处理, 回波 FFT 变为

$$S(f) = \int_{T_1}^{T_2} A_i \exp \left[\frac{-j4}{r_i} r_i \sin(\theta + i) \right] \exp(-j2\pi f t) dt \quad (10)$$

其中 $[T_1, T_2]$ 为采样区间, 针对逐个旋转半径 r_k ($0, r_{\max}$), 建立 r_k 参考匹配信号:

$$S_{\text{ref}}^k(t) = \exp[-j4\pi r_k \sin(\theta)] \quad (11)$$

将式(11)参考信号 FFT 后

$$S_{\text{ref}}^k(f) = \int_{T_1}^{T_2} \exp \left[\frac{-j4}{r_k} r_k \sin(\theta) \right] \exp(-j2\pi f t) dt \quad (12)$$

令 $t_1 = t - \frac{4r_k \sin(\theta)}{c}$; 则式(10)转化为

$$S(f) = \int_{T_1 + \frac{4r_k \sin(\theta)}{c}}^{T_2 + \frac{4r_k \sin(\theta)}{c}} A_i \exp \left[\frac{-j4}{r_i} r_i \sin(\theta - t_1) \right] \exp(-j2\pi f t_1) \exp(-j2\pi f \frac{4r_k \sin(\theta)}{c}) dt_1 \quad (13)$$

通常周期信号抽样点数应包含整数周期, 否则会出现频谱泄漏, 带来不利影响. 我们在由自相关法得到自旋转周期的基础上容易选取整数倍周期数据, 则

$(T_2 - T_1) = 2k$, $k = 1, 2, \dots$ 由此得到

$$S(f) = \int_{T_1}^{T_2} A_i \exp \left[\frac{-j4}{r_i} r_i \sin(\theta - t_1) \right] \exp(-j2\pi f t_1) d(t_1) \exp(j2\pi f \frac{4r_k \sin(\theta)}{c}) \quad (14)$$

在由半径 r_k 参考信号匹配滤波时其它半径上的回波视为杂波, 设在半径 r_k 上有 p 个散射点, 可令

$$S(f) = \int_{T_1}^{T_2} \sum_p A_p \exp \left[\frac{-j4}{r_k} r_k \sin(\theta - t_1) \right] \exp(-j2\pi f t_1) d(t_1) \exp(j2\pi f \frac{4r_k \sin(\theta)}{c}) + n = S_k(f) + n \quad (15)$$

式(15)中 n 为除旋转半径 r_k 上信号外的回波之和的贡献, 相对参考信号视为杂波, 与参考信号匹配滤波后不会形成完全相干输出. 旋转半径 r_k 上信号频域为:

$$S_k(f) = \int_p A_p S_{\text{ref}}(f) \exp(-j2\pi f \frac{4r_k \sin(\theta)}{c}) \quad (16)$$

经匹配滤波后忽略杂波影响输出为:

$$s(t) = F_{(f)}^{-1} [S(f) S_{\text{ref}}^*(f)] \\ = F_{(f)}^{-1} \left[\int_p A_p S_{\text{ref}}(f) S_{\text{ref}}^*(f) \exp(-j2\pi f \frac{4r_k \sin(\theta)}{c}) \right] \quad (17)$$

最终得到旋转半径为 r_k 的信号输出表达式

$$s(t) = \int_p A_p \text{psf} \left(t - \frac{4r_k \sin(\theta)}{c} \right) \quad (18)$$

其中 $\text{psf}(t) = F_{(f)}^{-1} [|S_{\text{ref}}(f)|^2]$, $\text{psf}(\cdot)$ 称为点散布函数 (Point Spread Function), 它可确定分辨率. 所以经上面步骤可得到旋转半径为 r_k 上面各个点目标散射强度. 选用不同旋转半径匹配滤波参考信号, 就能得到每个半径上散射点位置估计, 从而得到旋转目标空间二维像.

通过单距离匹配滤波可以在对应于散射点空间位置上产生峰值. 由峰值对应的匹配参数可得到散射点空间位置的估计. 但匹配滤波不可避免产生旁瓣, 主瓣也有一定的宽度, 这些都影响了散射点位置的正确识别. 所以我们采用 SRMF 与结合修正 CLEAN 技术相结合的方法对空间碎片成像.

在自旋速度估计^[1]的基础上算法具体步骤如下:

(1) 采用 SRMF 对单个距离单元处理, 此时得到二维复图像, 提取最大峰值对应的二个参数 r, θ 作为其中一个散射点位置估计.

(2) 由上一步估计的位置参数构造其点散布函数:

$$X(r, t) = f_{bw} \text{sinc} \left[\frac{2f_{bw}}{c} (r - x_m \cos(\theta) - y_m \sin(\theta)) \right] \\ \times \exp \left\{ j \frac{4f_c}{c} [r - x_m \cos(\theta) + y_m \sin(\theta)] \right\} \quad (19)$$

式(19)中的 x_m, y_m 为该点直角坐标.

(3) 在前一步的基础上进行该位置上的反射系数估计, 这一步可由用最小范数准则估计.

$$\hat{\alpha} = \min_{\alpha} \| E - \alpha X \| = \min_{\alpha} \sum_{r,t} | E(r, t) - \alpha X(r, t) |^2 \quad (20)$$

为求解上式对参数求导可得:

$$\frac{\partial J}{\partial \alpha} = -2 \sum_{r,t} [E(r, t) - \alpha X(r, t)] X^*(r, t) = 0 \quad (21)$$

得到该位置反射系数的估计

$$\hat{\alpha} = \frac{EX^*}{\sum |X|^2} \quad (22)$$

(4) 对前面得到散射点位置参数加以校正. 由于 psf 主瓣宽度的存在或其它散射点旁瓣的影响用 SRMF 得到的散射点位置估计往往会出现在实际值的附近, 所以由式(10)得到的反射系数估计会出现较大误差, 这会对后续 CLEAN 技术的应用产生不利影响. 所以需要进

一步提高位置估计精度,我们把由上面得到的参数估计作为初始值,在该值附近区域小范围的二维搜索,每变换一次二维位置参数由式(23)求出该位置反射系数的估计,并计算 $\hat{X}(r, t)$,当在搜索范围内使得下式

$$\min_{\hat{r}, \hat{t}} |E - \hat{X}| = \min_{\hat{r}, \hat{t}} |E(r, t) - \hat{X}(r, t)|^2 \quad (23)$$

成立,得到的结果即为该散射点参数准确的估计.

(5) 减去该散射点对回波数据的贡献:

$$E_{\text{new}} = E - \hat{X} \quad (24)$$

(6) 将 E_{new} 作为输入值返回步骤 1,重复进行以上步骤.可以证明 CLEAN 技术进行过程中残留能量是单调递减的,当单调递减到能量最小值时迭代终止.也可采用当估计出 \hat{X} 的能量值小于预先设定的门限值时,步骤终止.

尽管本文是对明显孤立亮点组成的空间碎片为模型进行分析的,但对连续散射点目标的成像结果与参考文献[1]结果相似,仍然可以得到能表现目标外形特

征的亮点图像,所以在满足 CLEAN 收敛条件下也可以得到能表现目标外形特征的强散射点分布.

4 仿真实验与性能分析

4.1 SRMF 与 SRDI 性能比较

从上述分析可以看到 SRMF 直接利用了已知数据波形的特点进行成像,并没有通过时频分析与曲线积分运算,同时可利用快速 Fourier 变换,具有较高的计算效率.为了与 SRDI 方法作性能比较,下面给出分别用 SRDI 与 SRMF 方法成像结果,三个点分别位于 $(0, \quad), (0, \quad/2), (\cos(2/3), \sin(2/3))$,发射波长 λ 选用 0.03.图 3(a)、(b) 分别为 SRMF 与 SRDI 所成的二维像,为了比较两种方法的角度分辨率,图 3(c)、(d) 分别给出了旋转半径为 λ 上的 SRMF 与 SRDI 所成的一维像.图 3(e)、(f) 则给出了 SRMF 与 SRDI 在同一方位角,半径方向上分辨率的比较图.从成像结果比较,我们可以看到 SRMF 方法明显具有更好的分辨率.

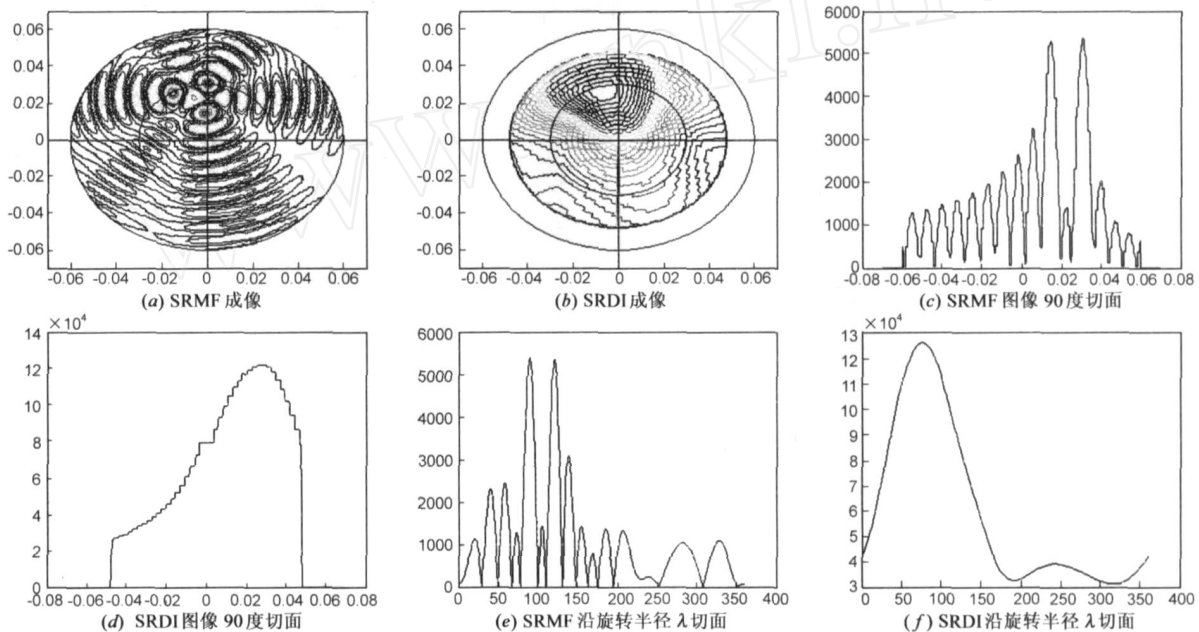


图 2 SRMF 与 SRDI 性能比较

4.2 SRMF-CLEAN 算法成像仿真

虽然 SRMF 具有比 SRDI 高的分辨率但仍然具有高的旁瓣,在存在弱小目标时容易被强目标干扰.设在一半径为 0.03 的圆上均匀分布四个散射点,散射系数

分别为 0.3、0.6、0.9、1. 则直接利用 SRMF 算法成像结果如图 3 所示,可以看到散射系数为 0.3 的点目标淹没在强目标的旁瓣中无法区分.为此我们采用与 CLEAN 技术相结合的方法进行成像,结果如图 4 所示.

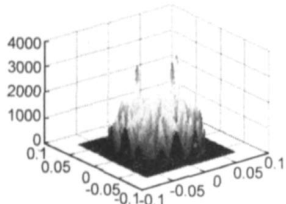


图 3 SRMF 成像

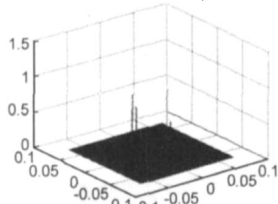


图 4 SRMF-CLEAN 成像结果

5 结束语

本文针对太空碎片提出一种新的成像方法 - SRMF-CLEAN.这种方法利用了太空碎片通常会围绕它们的主轴进行简单的自旋转运动的事实,首先对不同旋转半径的散射点分别采用相应的匹配滤波器进行滤

波的方法得到二维散射点极坐标估计,并结合修正的 CLEAN 技术进行成像处理.文中对 SRMF-CLEAN 方法进行了分析和推导,通过仿真验证了 SRMF-CLEAN 算法的特性.理论推导和仿真实验表明:与 SDRI 相比较,该算法对太空碎片成像方面具有更高的使用价值.需要指出文中只是将变化的散射点强度近似为不变的散射点强度进行成像,这也是雷达成像中常用到的近似.散射点强度变化的情况下成像我们将进一步进行研究.

参考文献:

- [1] Toru Sato. Shape estimation of space debris using single-range Doppler interferometry[J]. IEEE Trans on GRS, 1999, 37(2): 1000 - 1005.
- [2] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2005.
- [3] J Tsao, B D Steinberg. Reduction of sidelobe and speckle artifacts in microwave imaging: the CLEAN technique[J]. IEEE Trans on AP, 1988, 36: 543 - 556.
- [4] 邢孟道,保铮. ISAR 机动目标的平动补偿和瞬时成像研究[J]. 电子学报, 2001, 29(6): 733 - 737.
XING Meng-dao, BAO Zheng. Study of translational motion compensation and instantaneous imaging of ISAR maneuvering target[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(6): 733 - 737.
- [5] Chen V C, Qian S. Joint time-frequency transform for radar time Doppler imaging[J]. IEEE Trans on AES, 1998, 34(2): 486 - 499.
- [6] J Li, H Ling. Application of adaptive chirplet representation for ISAR feature extraction from targets with rotating parts[J]. IEE Proc-Radar Sonar Navig, 2003, 150(4): 284 - 291.
- [7] H J Li, N H Farhat, Y S Shen. A new iterative algorithm for extrapolation of data available in multiple restricted regions with applications to radar imaging[J]. IEEE Trans on AP, 1987, 35(5): 581 - 588.

作者简介:



王 琦 男,1972 年 3 月生于河北省武安市,2004 年 6 月在西安电子科技大学获工学硕士学位,现为雷达信号处理国家重点实验室博士生.主要研究方向为 ISAR 成像、运动目标检测和 ISAR 干扰研究.

E-mail: wanqi627@hotmail.com



邢孟道 男,1975 年 11 月出生生于浙江,1997 年 7 月在西安电子科技大学电子工程学院获工学学士学位,同年免试推荐为该校雷达信号处理国家重点实验室硕博连读生,2002 年 5 月获西安电子科技大学信号与信息处理专业工学博士学位,现为西安电子科技大学教授.发表论文 40 余篇,承担课题十余项.主要研究方向为雷达成像、目标识别和天波超视距雷达信号处理.

E-mail: xmd@mail.xidian.edu.cn



周 峰 男,1980 年 1 月生于河南省通许县,2005 年 6 月在西安电子科技大学获工学硕士学位,现为雷达信号处理国家重点实验室博士生.主要研究方向为雷达成像、运动目标检测和 SAR 干扰研究.

E-mail: fzhou@mail.xidian.edu.cn



保 铮 男,1927 年 12 月出生生于江苏省南通市,现为西安电子科技大学教授、博士生导师、中国科学院院士、中国电子学会会士.主要研究方向为雷达信号处理.