

遗传算法在扫描 SAR 波位设计中的应用¹

朱力*** 何东元** 倪晋麟** 刘国岁*

*(南京理工大学电子工程技术研究中心 南京 210094)

** (南京电子技术研究所 南京 210013)

摘要: 该文提出了用遗传算法计算天线相位加权的方法, 实现了天线方向图展宽赋形, 以满足星载 SAR 观测带的要求。另外, 对天线方向图展宽赋形进行了仿真, 然后根据展宽的方向图、扫描 SAR 系统参数和轨道参数, 对距离和方位模糊度、系统灵敏度等指标进行了计算, 给出了仿真计算结果; 由这些指标, 设计出了波位。仿真表明: 在天线方向图展宽赋形中, 用遗传算法计算天线相位加权的方法是可行的。

关键词: 遗传算法, 方向图展宽, 距离和方位模糊度, 波位设计

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)02-0188-06

Applying Genetic Algorithm to Beam Position Design of ScanSAR

Zhu Li*** He Dong-yuan** Ni Jin-lin** Liu Guo-sui*

*(Electron. Eng. Dept., Nanjing Univ. of Science and Tech., Nanjing 210094, China)

** (Nanjing Research Institute of Electronic Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract In this paper, phase weighting method using genetic algorithm is presented in order to make pattern broaden, satisfying the need of swath. In addition, the broadened pattern is simulated. According to the broadened pattern, the SAR system parameter and the orbit parameter, the range and azimuth ambiguity levels and the system sensitivity are calculated and the results are given. Based on these results, beam positions are devised. The simulation results show that phase weighting method using genetic algorithm is feasible

Key words Genetic algorithm, Pattern broadening, Range and azimuth ambiguity levels, Beam position design

1 引言

星载 SAR 条带工作模式下观测带宽度一般为 30-50km, 在 ScanSAR 工作模式下, 观测带宽度更大, 根据文献 [1], 1995 年加拿大发射的 Radarsat-1 高分辨率模式下观测带宽度为 49km, ScanSAR 模式下可达到 310km 或 520km。要使波束覆盖观测带, 必须对天线俯仰波束进行展宽。波束展宽的方法较多, 从理论上讲, 可对天线阵元分别进行幅度和相位加权, 也可同时进行幅度和相位加权。相位加权波束展宽方法很多, 有梯度搜索法^[2,3](phase-only gradient search, 简称 POGS) 和遗传算法等。梯度搜索法属于局部优化, 对初值的依赖很大; 另外, 文献 [3] 没有考虑波束扫描, 主瓣展宽的同时副瓣太高, 不能满足星载 SAR 总体设计的要求。遗传算法属于多变量非线性搜索和优化, 近年来用于天线波束设计的文献很多, 有的用于非均匀稀布阵阵元位置的优化^[4], 有的用于干扰源来波方向置零处理^[5], 但是遗传算法用于波束展宽赋形的文献还未见到, 本文用遗传算法对波束展宽赋形, 以满足星载 ScanSAR 模式下子观测带宽度较大的要求。

¹ 2002-09-24 收到, 2003-04-23 改回

微波成像技术重点实验室资助项目 (No:51442010101DZ2401)

文中首先给出 ScanSAR 的基本理论和遗传算法波束展宽赋形的理论, 根据初选的波位进行波束展宽仿真, 得到了与观测带相匹配的天线俯仰方向图; 根据展宽的俯仰方向图, 计算出距离模糊度、系统灵敏度等波位性能参数; 最后根据这些参数的计算结果, 判断初选的波位是否满足系统设计的要求, 若不满足, 重新选择波位, 重复上述工作, 直至设计出满足系统总体设计指标要求的波位。

2 ScanSAR 的距离模糊度和系统灵敏度

设卫星高度为 h , ScanSAR 组合观测带的最近、最远斜距分别为 R_n 、 R_f , 卫星平台速度为 V_s , N_B 为 ScanSAR 一个观测带中的子观测带数, ScanSAR 的工作模式示意图如图 1 所示。图 1 中, $N_B = 3$ 。

波位设计是 ScanSAR 总体设计的重要组成部分, 它决定了 ScanSAR 的覆盖区域、脉冲重复频率和发射的平均功率。波位设计要综合考虑数据率、系统灵敏度 ($NE\sigma^0$)、模糊度、观测带宽、多普勒带宽、线性调频引起的观测带损失等, 同时要保证相邻子观测带分别在方位向、距离向有一定的重叠。波位性能参数包括分辨率、模糊度、系统灵敏度、数据率, 其中距离模糊度和系统灵敏度与天线俯仰方向图有关, 本文重点

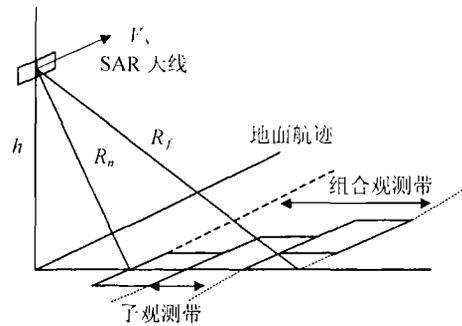


图 1 ScanSAR 工作模式示意图

研究天线俯仰波束加权展宽对距离模糊度和系统灵敏度的影响, 波位其它参数的计算公式见文献 [6]。下面对 ScanSAR 距离模糊度和系统灵敏度进行研究。

距离模糊度由天线副瓣电平决定, 利用天线俯仰方向图、脉冲重复频率和目标后向散射系数等参数, 可求出模糊信号在回波信号录取窗口内的全部能量之和。由文献 [1], 距离模糊度 $RASR_k$ 为

$$RASR_k = \frac{\sum_{n \neq i} \int_{-T_w/2+n/f_{pk}}^{T_w/2+n/f_{pk}} \frac{G_k^2(\tau_n) \sigma^0(\tau_n)}{R_k^3(\tau_n) \sin(\theta_k(\tau_n))} d\tau_n}{\int_{-T_w/2}^{T_w/2} \frac{G_k^2(\tau_i) \sigma^0(\tau_i)}{R_k^3(\tau_i) \sin(\theta_k(\tau_i))} d\tau_i} \quad (1)$$

式 (1) 中 $R_k(\tau)$, $G_k(\tau)$, $\theta_k(\tau)$ 分别表示第 k 个子观测带的斜距、俯仰功率方向图和入射角; f_{pk} , T_w 分别表示第 k ($k = 1, 2, \dots, N_B$) 个子观测带的脉冲重复频率和回波窗时宽; $\sigma^0(\tau)$ 是地面目标的后向散射系数, γ 为归一化的后向散射系数。

$$\sigma^0(\tau) = \gamma \cos(\theta_k(\tau)) \quad (2)$$

系统灵敏度是地物目标后向散射系数与信号处理器的采样波门内平均输入信噪比之差, 它表示成像时卫星观测弱小目标的能力。第 k 个波位的系统灵敏度 $NE\sigma_k^0$ 为

$$NE\sigma_k^0 = \frac{2(4\pi)^3 k T L F_n V_g R_{sk}^3}{\lambda^3 p_v \tau G_k^2 \rho_{rk} f_{pk}} \quad (3)$$

式 (3) 中 k , T , F_n , L , V_g , λ , τ , p_v 分别为波尔兹曼常数、接收机系统等效噪声温度、接收机噪声系数、系统损耗、星体地速、工作波长、脉宽和发射机的峰值功率, R_{sk} , ρ_{rk} 分别表示第 k

个子测绘带中心的斜距和地面距离分辨率。由式 (1) 和式 (3) 知, 天线俯仰方向图影响距离模糊度和系统灵敏度。

3 波束展宽的遗传优化算法

利用遗传算法可计算出各阵元上的附加相位, 并使天线俯仰方向图展宽。设天线俯仰向线阵单元数为 N_r , 阵元间距为 d_r , I_n 为各阵元上电流幅度且相等, 各阵元各向同性, 工作波长为 λ ; 从阵面法线方向度量, θ 为偏离法线的角度, θ_k 为第 k 个波位对应的扫描角。第 k 个子观测带的天线俯仰方向图 $E_{k0}(\theta)$ 为

$$E_{k0}(\theta) = \sum_{n=1}^{N_r} I_n e^{j(2\pi d_r/\lambda)(n-1)(\sin\theta - \sin\theta_k)} \quad (4)$$

设每个阵元上附加相位为 Φ_n , 则展宽后的俯仰方向图为

$$E_k(\theta) = \sum_{n=1}^{N_r} I_n e^{j\Phi_n} e^{j(2\pi d_r/\lambda)(n-1)(\sin\theta - \sin\theta_k)} \quad (5)$$

$$G_k(\theta) = |E_k(\theta)|^2 \quad (6)$$

在星载 SAR 中, 一般天线阵面平行于飞行方向, 且法线指向与星下点方向有一夹角, 这一夹角称为雷达中心视角。波位的视角常从星下点方向开始度量, 当从星下点方向开始度量时, 设 α_0 为雷达中心视角, α 为下视角, α_k 为第 k 个波位中心视角, 则展宽后的方向图为

$$E_k(\alpha) = \sum_{n=1}^{N_r} I_n e^{j\Phi_n} e^{j(2\pi d_r/\lambda)(n-1)[\sin(\alpha - \alpha_0) - \sin(\alpha_k - \alpha_0)]} \quad (7)$$

$$G_k(\alpha) = |E_k(\alpha)|^2 \quad (8)$$

可用遗传算法优化求解式 (8) 中 Φ_n 。

优化数学模型为

$$\begin{cases} -3\text{dB} \leq G_k(\alpha) \leq 0\text{dB}, & |\alpha - \alpha_k| \leq \alpha_{Mk}/2 \\ G_k(\alpha) \leq -12\text{dB}, & \text{其它} \end{cases} \quad (9)$$

式 (9) 中 α_{Mk} 为第 k 个波位天线俯仰波束 3dB 主瓣宽度。此外, 还必须考虑方向图主瓣形状、天线口径效率等问题。

本文采用的遗传算法步骤如下:

(1) 编码和初始化 本文对各阵元的附加相位 ($\Phi_i \in [0, 360^\circ]$) 采用 8 位二进制编码。相位矢量 $\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_{N_r}]$ 构成一个染色体。设初始群体染色体个数为 $M = 100$ 。由于采用 8 位二进制编码, 因此得到的相位是离散的, $\Phi_i = n \times 360^\circ/2^8$, $i = 1, 2, \dots, N_r$, 且 n 为整数。

(2) 排序适应函数的选取 根据式 (8), 分析每一条染色体对应的天线波瓣特性, 由于波瓣优化是多目标的, 如主瓣宽度、主瓣形状、副瓣电平、阵列效率等, 构造基于多目标的线性函数

$$g = a_1 g_1 + a_2 g_2 + a_3 g_3 + a_4 g_4 \quad (10)$$

其中 g_1 表示某一染色体对应的主瓣宽度与优化目标主瓣宽度的差异, g_2 表示某一染色体对应的主瓣形状与优化目标主瓣形状的差异, g_3 表示某一染色体对应的副瓣电平与优化目标副瓣电

平的差异, g_i 表示某一染色体对应的阵列效率与优化目标阵列效率的差异, a_1, a_2, a_3, a_4 分别表示多目标间的优化权重系数, 由式 (10) 可求出每一个染色体对应的 g 值。 g 值越小, 说明这一染色体表示的解越接近最优解。然后把染色体按其 g 值从小到大排列, 即染色体从好到坏的顺序排列。取分布概率为

$$p(i) = a(1 - a)^{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, M \tag{11}$$

式 (11) 中 a 表示第一条染色体被选择的概率, 根据分布概率从大到小的顺序, 随机选取一些染色体构成一个种群, 使每一代的当前最好解以最大概率 a 遗传。

(3) 交叉运算 对种群中染色体两两随机配对, 对每对染色体, 随机设置一个交叉点, 然后对每对染色体根据设定的交叉概率 P_c 进行交叉运算。

(4) 变异运算 对染色体的每一个基因座, 按变异概率 P_m 指定其为变异点, 对每一个指定变异点进行取反运算。

(5) 转至第 (2) 步进行循环, 直到天线方向图满足优化目标为止。

在仿真中, $a = 0.05, P_c = 0.6, P_m = 1\%$ 。天线俯仰方向图展宽的遗传算法流程图如图 2 所示。

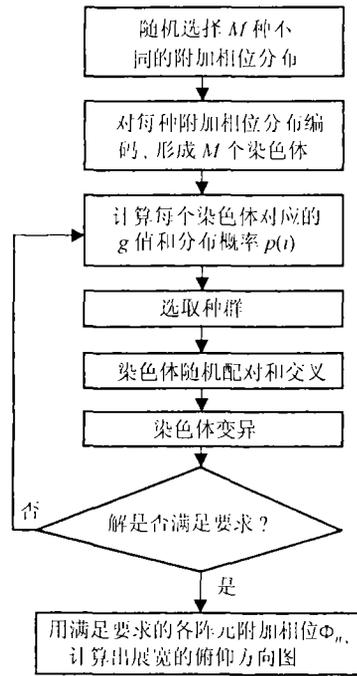


图 2 天线俯仰方向图展宽的遗传算法流程图

4 仿真

设卫星轨道的平均高度为 $h=632\text{km}$, 星下点回波干扰与发射脉冲干扰区间图 (简称斑马图) 如图 3 所示。应根据斑马图来设计波位, 在斑马图上, 从最小入射角开始, 按照了观测带宽度和相邻子观测带重叠度的要求, 在发射信号盲区和星下点回波区之外的菱形区域内按序选择波位; 同时要考虑数据率、观测带宽、多普勒带宽、线性调频引起的观测带损失等; 另外, 设计波位时应尽量把数据率控制在一定范围以内, 观测带宽应尽量相等, 这样各波位的中心入射角和脉冲重复频率就选定了。

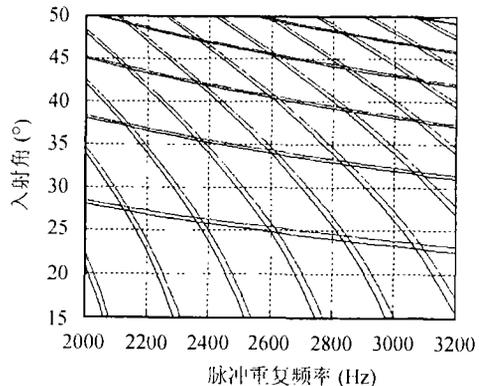


图 3 星下点回波干扰与发射脉冲干扰区间图

设信号波长为 $\lambda = 0.0313\text{m}$ ，天线高度为 2.10m ，且 $N_r = 96$ ， $d_r = 22\text{mm}$ ；雷达的中心视角为 $\alpha_0 = 36^\circ$ ，观测带宽度大于 300km ，子观测带数为 $N_B = 6$ ，即用 6 个子观测带组合成 ScanSAR 观测带，每个子观测带宽度必须大于 50km ，设计的 6 个子观测带的波位如表 1 所示。

我们把遗传算法应用于 ScanSAR 的天线俯仰波束展宽。线阵等幅、同相分布时，天线俯仰 3dB 主瓣宽度为 0.755° ；根据表 1 中波位所需的波束宽度，用上述的遗传算法分别对俯仰方向图展宽，得到与各波位相匹配的天线方向图；如波位 1，所需的 3dB 主瓣宽度为 4.35° ，即要求俯仰波束 3dB 主瓣展宽至 4.35° ，俯仰波束主瓣展宽 5.76 倍，对应的扫描角为 -15.62° ，副瓣小于 -12dB ，主瓣内幅度起伏 $< 1.0\text{dB}$ ，线阵增益为 19.3dB ；相位加权后的俯仰方向图如图 4 所示，其中图 4(a) 表示波束展宽功率方向图，图 4(b) 是图 4(a) 中主瓣部分的放大图。对应图 4 的线阵口径附加相位 Φ_n 如表 2 所示。其它波位的相位加权方法同波位 1。根据展宽后的天线俯仰方向图，由式 (1) 和式 (3) 可计算出距离模糊度和系统灵敏度，结果如表 1 所示。ScanSAR 部分系统指标为： $\text{RASR} \leq -18\text{dB}$ ， $\text{NE}\sigma^0 \leq -18\text{dB}$ ，根据表 1 中的各参数的计算结果和系统设计指标要求，可知表 1 中选择的波位是合理的，即为所要设计的波位；若波位性能参数如距离模糊度和系统灵敏度等计算结果不能满足系统设计要求，就要重新选择波位，用遗传算法进行相应的俯仰波束展宽，重复上述过程，直至波位性能参数计算结果满足系统设计要求为止。表 1 中 AASR 表示方位模糊度。

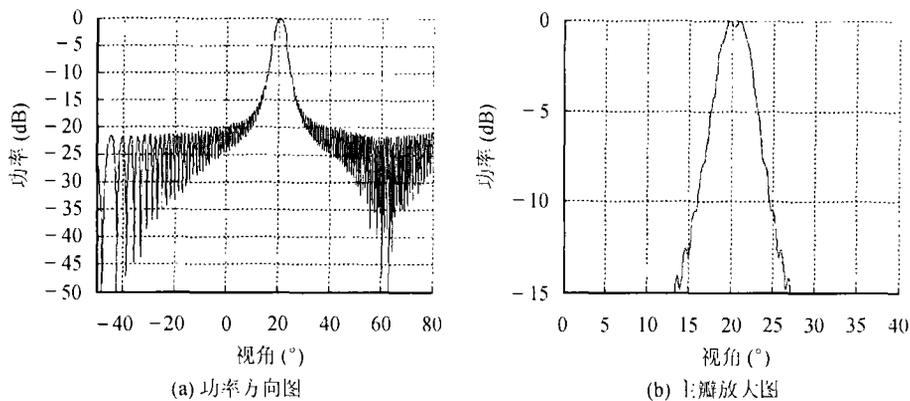


图 4 波位 1 对应的天线俯仰功率方向图

表 1 ScanSAR 波位设计及其部分性能参数计算结果

| 波位序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 中心视角 ($^\circ$) | 20.38 | 24.15 | 27.70 | 31.10 | 34.10 | 36.86 |
| 中心入射角 ($^\circ$) | 22.506 | 26.724 | 30.727 | 34.594 | 38.042 | 41.251 |
| 脉冲重复频率 (Hz) | 2100 | 3075 | 2200 | 3075 | 2413 | 2857 |
| 回波宽度 (μs) | 160.76 | 186.50 | 208.72 | 229.72 | 246.21 | 267.56 |
| 斜距宽度 (km) | 21.413 | 25.275 | 28.608 | 31.758 | 34.231 | 37.433 |
| 地距宽度 (km) | 55.891 | 56.158 | 55.951 | 55.902 | 55.519 | 56.746 |
| LFM 的地距损失 (km) | 6.341 | 5.5259 | 4.9487 | 4.5121 | 4.1978 | 3.9495 |
| 观测带宽度 W/W_{scan} (km) | 55.858/302 | 56.129/302 | 55.925/302 | 55.877/302 | 55.496/302 | 56.724/302 |
| 所需波宽 ($^\circ$) | 4.35 | 4.10 | 3.80 | 3.50 | 3.20 | 3.00 |
| 数据率 (Mbps) | 64.817 | 110.109 | 88.163 | 135.628 | 114.070 | 146.767 |
| $\text{NE}\sigma^0$ (dB) | -19.621 | -21.001 | -18.910 | -20.429 | -18.997 | -19.782 |
| RASR (dB) | -43.0759 | -24.7575 | -31.8243 | -24.8398 | -26.9151 | -22.1458 |
| AASR (dB) | -20.6162 | -28.0722 | -24.1604 | -28.0722 | -35.2170 | -34.3924 |

表 2 用遗传算法得到的 1 波位各阵元上的附加相位 $\Phi_n (n = 1, \dots, N_r)$, 单位为 $\text{deg}(\circ)$

| | | | | | | | | | | | | |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 阵元编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 相位 | 85.781 | 313.59 | 102.66 | 219.38 | 319.22 | 53.438 | 142.03 | 229.22 | 315.00 | 37.969 | 120.94 | 202.50 |
| 阵元编号 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 相位 | 282.66 | 2.8125 | 81.563 | 160.31 | 237.66 | 316.41 | 32.344 | 109.69 | 185.63 | 261.56 | 336.09 | 50.625 |
| 阵元编号 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 相位 | 126.56 | 199.69 | 274.22 | 347.34 | 61.875 | 135.00 | 206.72 | 279.84 | 351.56 | 64.688 | 136.41 | 208.13 |
| 阵元编号 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 | 44 | 45 | 46 | 47 | 48 |
| 相位 | 278.44 | 350.16 | 60.469 | 130.78 | 201.09 | 271.41 | 341.72 | 50.625 | 120.94 | 189.84 | 258.75 | 327.66 |
| 阵元编号 | 49 | 50 | 51 | 52 | 53 | 54 | 55 | 56 | 57 | 58 | 59 | 60 |
| 相位 | 35.156 | 104.06 | 171.56 | 237.66 | 305.16 | 12.656 | 78.75 | 144.84 | 210.94 | 277.03 | 343.13 | 47.813 |
| 阵元编号 | 61 | 62 | 63 | 64 | 65 | 66 | 67 | 68 | 69 | 70 | 71 | 72 |
| 相位 | 113.91 | 178.59 | 243.28 | 307.97 | 11.25 | 75.938 | 139.22 | 202.50 | 265.78 | 329.06 | 30.938 | 92.813 |
| 阵元编号 | 73 | 74 | 75 | 76 | 77 | 78 | 79 | 80 | 81 | 82 | 83 | 84 |
| 相位 | 154.69 | 216.56 | 277.03 | 338.91 | 39.375 | 98.438 | 158.91 | 217.97 | 275.63 | 333.28 | 30.938 | 88.594 |
| 阵元编号 | 85 | 86 | 87 | 88 | 89 | 90 | 91 | 92 | 93 | 94 | 95 | 96 |
| 相位 | 143.44 | 198.28 | 253.13 | 305.16 | 357.19 | 46.406 | 92.813 | 136.41 | 172.97 | 192.66 | 180.00 | 88.594 |

5 结论

在 ScanSAR 波位设计中, 用遗传算法对天线俯仰波束展宽, 使波束宽度与各子观测带相匹配。仿真结果表明, 遗传算法对于波束展宽是非常有效的。

参 考 文 献

- [1] 魏钟铨等著. 合成孔径雷达卫星. 北京: 科学出版社, 2001.1, 表 1.6.
- [2] Chang D C, Hu Chang-Nan, Hung Chia-I, Ho Ko-Tai. Pattern synthesis of the offset reflector antenna system with less complicated phased array feed. *IEEE Trans. on AP*, 1994, AP-42(2): 240-245.
- [3] Hu Chang-Nan, Chung Ching-Song, Hung Chia-I. Phase-only pattern synthesis for the design of an active linear phased array. 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems & Technology (PAST), Dana Point, California, May 20-26, 2000: 275-278.
- [4] 张子敬, 赵永波, 焦李成. 阵列天线的遗传优化. *电子科学学报*, 2000, 22(1): 174-176.
- [5] 李晋文, 毛均杰, 柴舜连, 姚德森. 遗传算法在天线阵自适应算法中的应用. *电子科学学报*, 2000, 22(2): 336-340.
- [6] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1991, Chapter 6.

朱力: 男, 1964年生, 高级工程师, 博士生, 主要从事星载 SAR 总体、信号处理方面的研究。

何东元: 男, 1974年生, 工程师, 从事天线与微波的技术工作, 感兴趣的领域是微带天线和阵列天线设计。

倪晋麟: 男, 1960年生, 研究员, 博士生导师, 获部级科技进步二等奖两项, 部级科技进步三等奖两项, 发表论文 60 余篇, 主要研究领域为雷达信号处理、自适应阵列及微波成像。

刘国岁: 男, 1933年生, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 主要从事噪声雷达、连续波雷达系统及信号处理技术研究。