

多径反射下低空目标检测研究¹

杨世海 胡卫东 万建伟 周良柱

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要 该文主要考虑多径反射对目标检测的影响及采用频率分集技术的多脉冲 M/N 检测的参数选择 (M 是超过检测阈值的脉冲个数, N 是总脉冲个数), 为了选取适当的 M 和 N 以保证检测概率, 必须获得噪声加目标乘以多径因子后的统计分布. 与其他研究不同的是, 该文采用了更一般的反射模型, 实际推导出无起伏和瑞利起伏目标的多径回波功率的 PDF, 并应用该 PDF 简要计算出在多径环境下多脉冲检测的最佳 M/N 选择与 p_F 和 p_D 的关系 (与自由空间相比).

关键词 低空目标检测, 多径反射, 频率分集

中图分类号 TN951

1 前言

目前的远程预警雷达及火控雷达经常需要处理低空或超低空目标, 这时接收的回波信号通常是在强杂波背景下直接路径与在波束宽度范围内的反射路径 (一条或多条) 信号的叠加, 有可能增强或衰减, 取决于一个与频率和相对位置有关的函数. 多径衰落现象对目标检测和参数估计带来较大影响, 从统计上讲, 提高了目标检测性能但降低了参数估计精度. 在多径环境下进行目标检测时, 为了避免衰减, 保证足够的检测概率, 可以采用天线遮蔽、频率分集、极化分集或高距离分辨力雷达等方法^[1,2]. 常用的频率分集的目标检测技术是用频率捷变或多个频率的 M/N 检测器, 这时必须选取适当的 M 和 N , 一方面保证检测概率 p_D 和控制虚警概率 p_F , 另一方面降低雷达的带宽. 以前的这方面资料通常只给出了定性的结果, 文献 [3] 分析了多径环境下接收回波幅度的 PDF 分布, 给出了无起伏目标和瑞利起伏 (斯威林 II) 目标的 SNR- M/N - p_D 间的相互关系. 但该文存在以下几个不足: 计算模型采用的是平面地球、理想反射模型 ($\rho = -1$), 与实际情况有一定的差异 (尤其是垂直极化时); 由于反射系数 $\rho = -1$, 该文实际只计算了回波中两个分量 (直接-直接和直接-反射) 的干涉, 而在实际应用中至少也有 4 个分量对回波做出了贡献^[4]. 本文详细计算了弯曲地球、一般反射模型 (但擦地角应小于布儒斯特角) 下的回波幅度的 PDF (Probability Density Function) 分布, 并将结果应用于采用频率分集的多脉冲检测技术, 确定在给定 p_F 和 p_D 时最佳的 M/N 选择.

2 陆地和海洋的一般多径模型

当雷达探测低空目标时, 由于陆地或海面的多径反射 (前向散射分量较强时), 使雷达主波束接收到除目标直接反射外的多个路径的反射分量. 当地面是平缓的陆地或海面时, 其相互几何关系如图 1.

多径反射经常只研究一条反射路径, 实际应用中, 4 条路径 (直接-直接、直接-反射、反射-直接、反射-反射) 的多重反射信号构成了雷达接收回波. 反射系数是一个复值, 通常包含两个分量: 镜面反射, 又称相干分量; 散射反射, 又称非相干分量. 镜面反射系数为: $\rho_S = \rho_0 D R_S$, 其中 ρ_0 是光滑平面地表的反射系数, D 是散度因子, R_S 是由表面粗糙度决定的因子. 散射

¹ 2000-07-10 收到, 2000-12-07 定稿

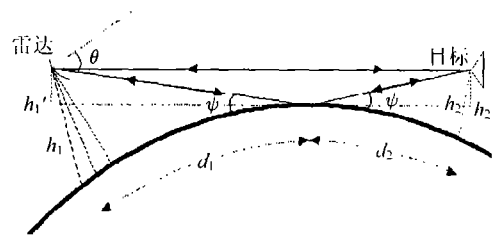


图 1 多径反射几何图

反射系数为 $\rho_D = \rho_0 R_D$, 其中 R_D 是一个与反射表面粗糙度有关的系数。非相干分量随着入射余角(或擦地角) ψ 的增大而增大, 当 ψ 接近 0° 时, 非相干分量趋于零, 相干分量趋于 -1 (幅度和相位上)。如果目标 RCS 对直接和反射路径都是相同的, 且直接路径(自由空间)回波恰为 $1(e^{j0})$, 则此时多径回波的幅值为

$$\begin{aligned} v = |\mathbf{E}| &= |\mathbf{E}_{\text{直接-直接}} + \mathbf{E}_{\text{直接-反射}} + \mathbf{E}_{\text{反射-直接}} + \mathbf{E}_{\text{反射-反射}}| \\ &= \left| 1 + \rho e^{j2\pi\Delta l/\lambda} + \rho e^{j2\pi\Delta l/\lambda} + \rho^2 e^{j2\pi^2\Delta l/\lambda} \right| = \left| \left(1 + \rho e^{j2\pi\Delta l/\lambda} \right)^2 \right| \end{aligned} \quad (1)$$

其中 λ 是波长, ρ 是反射系数, $\rho = \rho_S + \rho_D$, Δl 是反射路径与直接路径的差值, 从图 1 的几何关系上可以证明(见附录 1): $\Delta l = l - \sqrt{l^2 - 4h_1'h_2'}$, l 是单程反射路径的长度, h_1' , h_2' 是雷达和目标与反射点的相对高程。在(1)式中, 令 $z = \Delta l/\lambda$, 若取 $|\rho| \leq 1$, 则 $0 \leq |\mathbf{E}| \leq 4$, 且当 z 的数值变化 $1/2$ 时, $|\mathbf{E}|$ 的数值取遍所有值。由于其所在位置, 我们只需考虑 z 的小数值就可以了。

3 回波功率统计量的 PDF 分布

由于通常情况下 Δl 是未知的, 为了检测目标, 必须:

(1) 频率分集所得到的 $\Delta l/\lambda_i$ 应能覆盖 $|\mathbf{E}|$ 能取到的所有数值(在任意 Δl 下);

(2) 对取定的 Δl , λ_i 变化范围越大, 则 $|\mathbf{E}|$ 所取的值经过的周期数越多, 从统计上讲, 其平均值越接近于均匀概率分布下 $|\mathbf{E}|$ 的期望值;

设雷达的带宽/中心频率比相同(如 10%), 且 N 个检测器在工作带宽内均匀分布, 对 S 波段(3.3GHz), z 值变化约 $1.1 \times \Delta l$, 只要 $\Delta l \geq 0.5\text{m}$, 就可以取遍 $|\mathbf{E}|$ 的所有值; 对较低频段, UHF(500MHz), z 值变化约 $\Delta l/6$, 此时若 $\Delta l > 3\text{m}$, 则 $|\mathbf{E}|$ 的某些值取不到。因此, 在具体分析时, 应考虑以下问题:

(1) 是否接收回波中包含了所有多径分量?

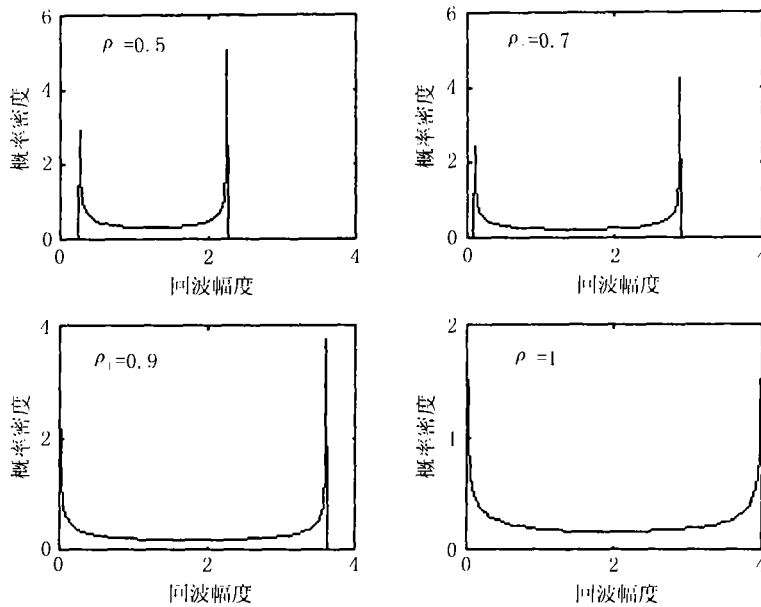
(2) 目标的 RCS 对所有的多径分量是否是一致的? 通常这个角度很小, 例如目标高度 20m, 距雷达 10km, 直接分量与反射分量在目标上的夹角约 0.12° 。

(3) 频率分集是否使 z 变化范围足够大, 使我们可以认为 N 个检测器的数据是在 $z \in [0, 1/2]$ 间均匀分布的?

(4) 雷达是否不能在时延(距离)上区分多径分量?

如果上述回答是肯定的, 那么本文的结论是有效的。当 z 基本满足均匀分布的条件时,

$$\left. \begin{aligned} p(z) &= 2, \quad \forall z \in [0, 1/2] \\ v &= |(1 + \rho e^{j2\pi z})^2| \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

图2 不同 $|\rho|$ 下的回波幅度概率分布

则回波幅度 v 的 PDF 是 (详细证明见附录 2)

$$p(v) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{2(|\rho|^2 + 1)v - v^2 - (|\rho|^2 - 1)^2}}, \quad \forall v \in [0, 4] \quad (3)$$

不同 $|\rho|$ 下的回波幅度概率分布见图 2, 注意到随着 $|\rho|$ 的减小, 合成回波的幅度分布的上下限向中间靠拢, 且尖锐化。

同样地, 令 $\mu = v^2$, 则多径条件下的功率因数为

$$\begin{aligned} p(\mu) &= p(v = \mu^{1/2}) \left| \frac{dy}{d\mu} \right| = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{2(|\rho|^2 + 1)\mu^{3/2} - \mu^2 - (|\rho|^2 - 1)^2\mu}} \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{4\mu^{3/2} - \mu^2}}, \quad \forall \mu \in [0, 16], \quad |\rho| = 1 \end{aligned} \quad (4)$$

μ 的上下限 μ_1 和 μ_2 可以通过求解方程 $2(|\rho|^2 + 1)\mu^{1/2} - \mu - (|\rho|^2 - 1)^2 = 0$ 来获得, $p(\mu)$ 在不同 $|\rho|$ 下的图形与图 2 类似, 只是图形变得更加尖锐, 这里就不给出了。

4 在给定 P_F 和 P_D 下选择最优的 M/N

若单脉冲检测的虚警概率为 p_F , 则对 M/N 检测, 其总的虚警概率 P_F 为^[5]

$$P_F = \sum_{k=M}^N \binom{N}{k} p_F^k (1 - p_F)^{N-k} \quad (5)$$

在已知噪声的情况下可以利用 $-\ln p_F$ 来确定检测阈值 η 。下面计算多径回波中单脉冲检测的 p_D , 对无起伏目标, 这时接收回波的瞬时 SNR 为 $S' = \mu S$, 这里 S 是通常意义下 (自由空

间) 的 SNR, μ 是多径功率因数。则回波包络平方 t 的条件概率可以用 μ 的积分表示。

$$p(t/S) = \int_{\mu_1}^{\mu_2} e^{-t-\mu S} I_0(2\sqrt{\mu S t}) p(\mu) d\mu \quad (6)$$

由 (4) 式可知当 $|\rho| = 1$ 时积分区间是 $[0, 16]$, 当 $|\rho| < 1$ 时区间上下限向中间移动, 间隔缩小。将 $p(t/S)$ 在检测阈值上积分可得 p_D 。

$$p_D = \int_{\eta}^{\infty} p(t/S) dt \quad (7)$$

将 (4), (6) 式分别代入 (7) 式, 这时的 p_D 为

$$\begin{aligned} p_D &= \int_{\mu_1}^{\mu_2} p(\mu) e^{-\mu S} \left[\int_{\eta}^{\infty} e^{-t} I_0(2\sqrt{\mu S t}) dt \right] d\mu = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{S^k}{(k!)^2} \times \int_{\mu_1}^{\mu_2} \mu^k e^{-\mu S} p(\mu) \\ &\times \left[\int_{\eta}^{\infty} t^k e^{-t} dt \right] d\mu = e^{-\eta} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{S^k}{k!} \sum_{m=0}^k \frac{\eta^m}{m!} \times \int_{\mu_1}^{\mu_2} \mu^k e^{-\mu S} p(\mu) d\mu \end{aligned} \quad (8)$$

为清楚起见, 下面列出自由空间下无起伏目标的结果:

$$p_D = e^{-\eta-S} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{S^k}{k!} \sum_{m=0}^k \frac{\eta^m}{m!}$$

(8) 式的最后一个积分项的计算较为复杂, 结果是一个广义超几何函数 (generalized hypergeometric function), 但可以采用辛普森等数值积分方法进行计算 (实际计算中 k 需要取得很大, 为减小奇异性, 可对积分变量作代换, 让积分区间处于 $[0, 1]$ 间)。对起伏目标, 设目标 RCS 的 PDF 分布为 $p_1(\sigma)$, 多径功率因数的 PDF 为 $p_2(\mu)$, 由于 $S' = \mu\sigma$ 均为随机变量, 可得

$$\left. \begin{aligned} p_3(S'/\mu) &= p_1(\sigma) \left| \frac{d\sigma}{dS'} \right| = p_1\left(\sigma = \frac{S'}{\mu}\right) \frac{1}{\mu} \\ p_4(S') &= \int_{\Omega} p_1\left(\sigma = \frac{S'}{\mu}\right) \frac{1}{\mu} p_2(\mu) d\mu \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

这里 Ω 是 $p_2(\mu)$ 的定义域, 若 $p_1(\sigma/S) = (1/S)e^{-\sigma/S}$, 则

$$\left. \begin{aligned} p_3(S'/\mu, S) &= p_1\left(\sigma = \frac{S'}{\mu} / S\right) \left| \frac{d\sigma}{d\mu} \right| = \frac{1}{S\mu} e^{-S'/\mu S} \\ p_4(S'/S) &= \frac{1}{S} \int_{\mu_1}^{\mu_2} e^{-S'/\mu S} p(\mu) \frac{d\mu}{\mu} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

这时, 将 (10) 代入自由空间下瑞利起伏目标的功率 PDF 分布函数 $p_t(t/S)$ (莱斯分布), 可得

$$\begin{aligned} p_5(t/S) &= \frac{1}{S} \int_{\mu_1}^{\mu_2} \frac{p(\mu)}{\mu} \times \left[\int_0^{\infty} e^{-S'/(\mu S)} e^{-t-S'} I_0(2\sqrt{S't}) dS' \right] d\mu \\ &= \frac{e^{-t}}{S} \int_{\mu_1}^{\mu_2} \frac{p(\mu)}{\mu} \times \left(\frac{\mu S}{\mu S + 1} \right) e^{t\mu S/(\mu S + 1)} d\mu \end{aligned} \quad (11)$$

$$p_D = \int_{\eta}^{\infty} p_5(t/S) = \int_{\mu_1}^{\mu_2} p(\mu) e^{-\eta/(\mu S + 1)} d\mu \quad (12)$$

同样地，自由空间下斯韦林 II 起伏目标的结果是 $p_D = e^{-\eta/(1+S)}$ 。

以上结果针对的是单脉冲检测，对 M/N 检测，有

$$P_D = \sum_{k=M}^N \binom{N}{k} p_D^k (1 - p_D)^{N-k} \tag{13}$$

5 计算仿真

(1) 多径和自由空间下对无起伏目标单脉冲检测的对比 (见图 3(a))。首先，对比单脉冲检测在多径和自由空间下的区别，可以看出，由于多径所带来的回波功率增益，在 $p_D < 0.7$ 左右需要的 SNR 比在自由空间减小，且 $|\rho|$ 越小越接近于自由空间。在高 SNR 时，多径检测性能下降，这是由于多径检测的不确定性 (多径衰落) 决定的。

(2) 多径和自由空间下对瑞利起伏目标单脉冲检测的对比 (见图 3(b))。

(3) 多径 $|\rho| = 0.9$ 和自由空间下瑞利起伏目标多脉冲检测的对比 (见图 4)。

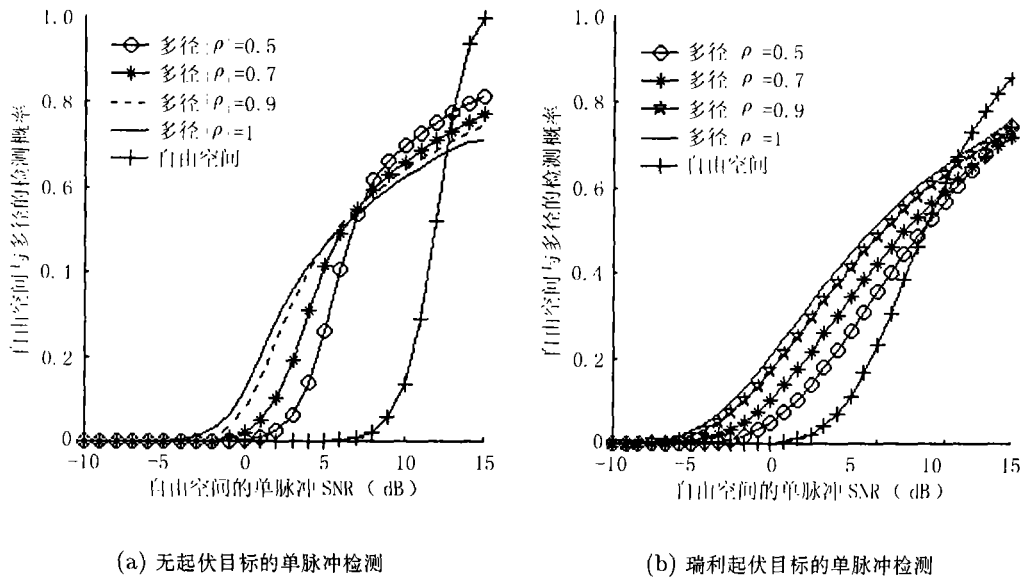


图 3 检测对比

可以发现，对多脉冲检测，自由空间与多径下的表现完全不同。在相同 SNR 下，随着 M 的增加，自由空间的检测概率略上升，多径检测的检测概率反而有可能下降 (图形也可能是交织的)，这是由多径衰落和频率分集的覆盖率决定的。

6 结束语

本文较系统地研究了多径现象对低空目标检测的影响，对于弯曲地球、一般反射平面模型的回波功率的 PDF 分布做了详细的解析分析。在满足一定条件下，可以计算出采用频率分集技术的最佳 M/N 检测。在实际做低空目标检测时，海 (地) 杂波的回波功率通常很强，且具有时变特点。考虑到此时目标一般是运动的，当不在雷达的盲速区内时，可先对回波信号进行动目

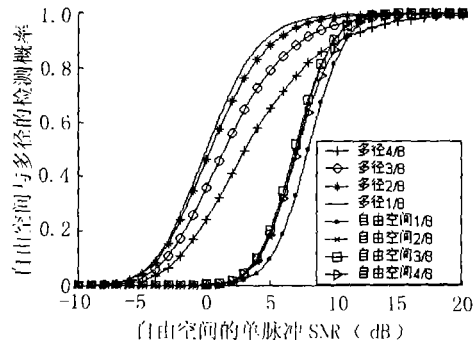


图 4 瑞利起伏目标的多脉冲检测

标检测 MTI, 再应用以上结论。另外, 根据实际计算, 频率分集主要性能指标是频带宽度 (最大频率减最小频率) 和脉冲个数, 而对频率点的个数不敏感。

附录 1

由图 1, 两段反射路径的长度分别为 $h'_1/\sin\psi$ 和 $h'_2/\sin\psi$, 则直接路径的长度为

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{h_1'^2 + h_2'^2 - 2h_1'h_2'\cos(\pi - 2\psi)}{\sin^2\psi}} &= \sqrt{\frac{h_1'^2 + h_2'^2 + 2h_1'h_2'(1 - 2\sin^2\psi)}{\sin^2\psi}} \\ &= \sqrt{\frac{(h_1' + h_2')^2}{\sin^2\psi} - 4h_1'h_2'} = \sqrt{l^2 - 4h_1'h_2'} \end{aligned}$$

计算时可取 $h'_1 = h_1 - [d_1^2/(2ka)]$, $h'_2 = h_2 - [d_2^2/(2ka)]$, 这里的 ka 是等效地球半径。

附录 2

首先, 由 (1) 式

$$\begin{aligned} v &= |(1 + \rho e^{j2\pi z})^2| \\ &= \sqrt{(1 + 2|\rho|\cos(2\pi z + \phi) + |\rho|^2\cos(4\pi z + 2\phi))^2 + (2|\rho|\sin(2\pi z + \phi) + |\rho|^2\sin(4\pi z + 2\phi))^2} \end{aligned}$$

其中 ϕ 是复数 ρ 的相位, 当 z 满足 (2) 时, ϕ 与 v 的 PDF 无关, 在下面推导中可以略去。利用符号函数求解其反函数 (可用 Matlab、Maple 等数学工具) 可得

$$z = \frac{1}{2\pi} \operatorname{atan}_2 \left(\sqrt{2(|\rho|^2 + 1)v - v^2 - (|\rho|^2 - 1)^2}, 1 + |\rho|^2 - v \right), \quad \forall v \in [0, 4]$$

这里 atan_2 是四向限反正切函数, 则回波幅度 v 的 PDF 是

$$\begin{aligned}
 p(v) &= p(z) \left| \frac{dz}{dv} \right| = 2^* \frac{d}{dv} \left[\frac{1}{2\pi} \text{atan}_2(\sqrt{2(|\rho|^2 + 1)v - v^2 - (|\rho|^2 - 1)^2}, 1 + |\rho|^2 - v) \right] \\
 &= \begin{cases} \frac{1}{\pi} \cdot \frac{d}{dv} \text{atan}(\sqrt{2(|\rho|^2 + 1)v - v^2 - (|\rho|^2 - 1)^2} / (1 + |\rho|^2 - v)), & \forall v \in [0, 1 + |\rho|^2] \\ \frac{1}{\pi} \cdot \frac{d}{dv} \left[\pi + \text{atan}(\sqrt{2(|\rho|^2 + 1)v - v^2 - (|\rho|^2 - 1)^2} / (1 + |\rho|^2 - v)) \right], & \forall v \in (1 + |\rho|^2, 4] \end{cases} \\
 &= \frac{1}{\pi} \frac{1}{\sqrt{2(|\rho|^2 + 1)v - v^2 - (|\rho|^2 - 1)^2}} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{4v - v^2}}, \quad \forall v \in [0, 4], |\rho| = 1 \quad \text{证毕}
 \end{aligned}$$

参 考 文 献

- [1] M. I. 斯科尔尼克 (美) 编著, 林茂庸等译, 雷达系统导论, 北京, 国防工业出版社, 1992, 140-148.
- [2] M. W. 朗 (美) 著, 薛德镛译, 陆地和海面的雷达波散射特性, 北京, 科学出版社, 1981, 第 4 章.
- [3] S. L. Wilson, B. D. Carison, Radar detection in multipath, IEE Proc.-F, 1999, 146(1), 45-52.
- [4] E. Daeipour, W. D. Blair, Y. Bar-Shalom, Bias compensation and tracking with monopulse radars in the presence of multipath, IEEE Trans. on AES, 1997, AES-33(3), 863-882.
- [5] 何友, 等著, 雷达自动检测与恒虚警处理, 北京, 清华大学出版社, 1999, 17-31.

RADAR DETECTION OF LOW ALTITUDE TARGET IN MULTIPATH

Yang Shihai Hu Weidong Wan Jianwei Zhou Liangzhu

(National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract This paper deals with the influence induced by multipath propagation and optimal selection of M/N when frequency diversity technique is used. To ensure the detection statistic and choose the correct M and N , it must be known that the probability density function (PDF) of the noise plus target times the multipath factor. Differ from other papers, the more general model of reflection is adopt, the PDF is derived for a nonfluctuating target and for a Rayleigh target, then the relation between M/N and P_D/P_F is got by multi-pulse detection in multipath.(compared with free-space)

Key words Low altitude target detection, Multipath reflection, Frequency diversity

- 杨世海: 男, 1970 年生, 博士生, 研究方向是雷达信号处理、CDMA 多用户检测等。
 胡卫东: 男, 1967 年生, 副教授, 研究方向为雷达目标识别及数据融合等。
 万建伟: 男, 1962 年生, 教授, 研究方向为 DSP 及现代信号处理等。
 周良柱: 男, 1949 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理等。