

新型 X 波段散射计辐射计组合系统¹

姚传亮 金亚秋^{*2} 赵银龙 方振和 张南雄^{*} 章俊

(上海大学电子物理研究所 上海 201800)

^{*}(复旦大学波散射和遥感中心 上海 200433)

摘 要 为进行同时同地相继连续的多极化后向散射和热辐射的主被动遥感的组合测量, 本文介绍了一种新型 X 波段散射计辐射计组合系统。该系统工作体制采用双参考数字解调辐射计与噪声散射计组合。散射系数 σ^0 的测量不同于传统的调频连续波体制和脉冲体制, 发射信号是由固态噪声源发出的微波热噪声信号, 用辐射计接收机测量目标回波信号大小。因此, 该系统比连续波体制有更宽的频谱, 而且与辐射计测量的频谱一致。测出的地面目标有源和无源的微波特性有更好的相关性。本系统操作灵活机动自动化程度高, 通过计算机控制既可进行自动测量, 也可进行人工干预。用该系统已对地面背景和人造目标进行了后向散射和热辐射的组合测量, 得到了一些典型实验结果。

关键词 散射计辐射计组合系统, 主被动遥感组合

中图分类号 TP7

1 引 言

在已知地面实况参数的可控条件下, 进行车载对地面散射辐射的遥感实验, 对理解各类地表遥感的物理机制, 区分自然背景和人造目标散射和辐射的识别特征, 为机载、星载遥感数据验证和应用提供理论基础, 均具有不可或缺的十分关键的作用。主动遥感的散射计测量后向散射系数 $\sigma_{pq}^0(p, q = v, h)$, 被动遥感的辐射计测量辐射亮度温度 T_{B_p} 或热发射率 $e_p(p = v, h)$, 这二者往往是分开进行的。但是对于同一物理目标同一物理现象散射与热发射的观测必然是相关的, 其反映的变化规律应该是一致的、互补的。我们的研究表明^[1], 在农作物的整个生产过程中 σ_{pq}^0 与 T_{B_p} 的观测是相关的。但是至今, 我们尚未见到将散射计和辐射计组合成一个系统作同时同地多极化的 σ_{pq}^0 - T_{B_p} 组合观测。

本文介绍我们新近研制成的 X 波段散射计辐射计组合系统, 阐述它的工作原理、基本构造和性能。并给出地面车载现场测试的 σ_{pq}^0 - T_{B_p} 组合观测数据。

2 X 波段散射计辐射计组合系统工作原理

X 波段散射计辐射计组合系统由双参考数字解调的 Dick 辐射计配上噪声发射源和发射天线所构成, 如图 1, 图 2 所示。

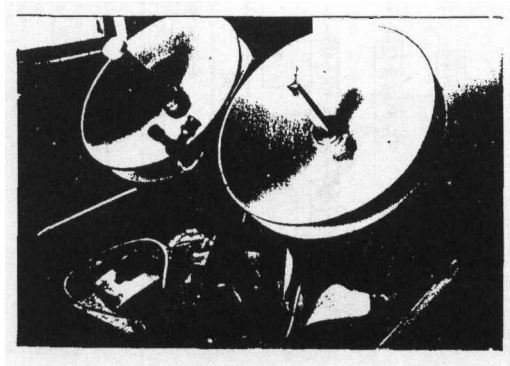


图 1 X 波段散射计辐射计组合系统

¹ 1998-05-05 收到, 1998-11-16 定稿

国家自然科学基金资助项目 (49831060, 49685005, 69771007), 国家教育部博士点基金, 上海市科技研究与发展基金等资助项目

² 联系人

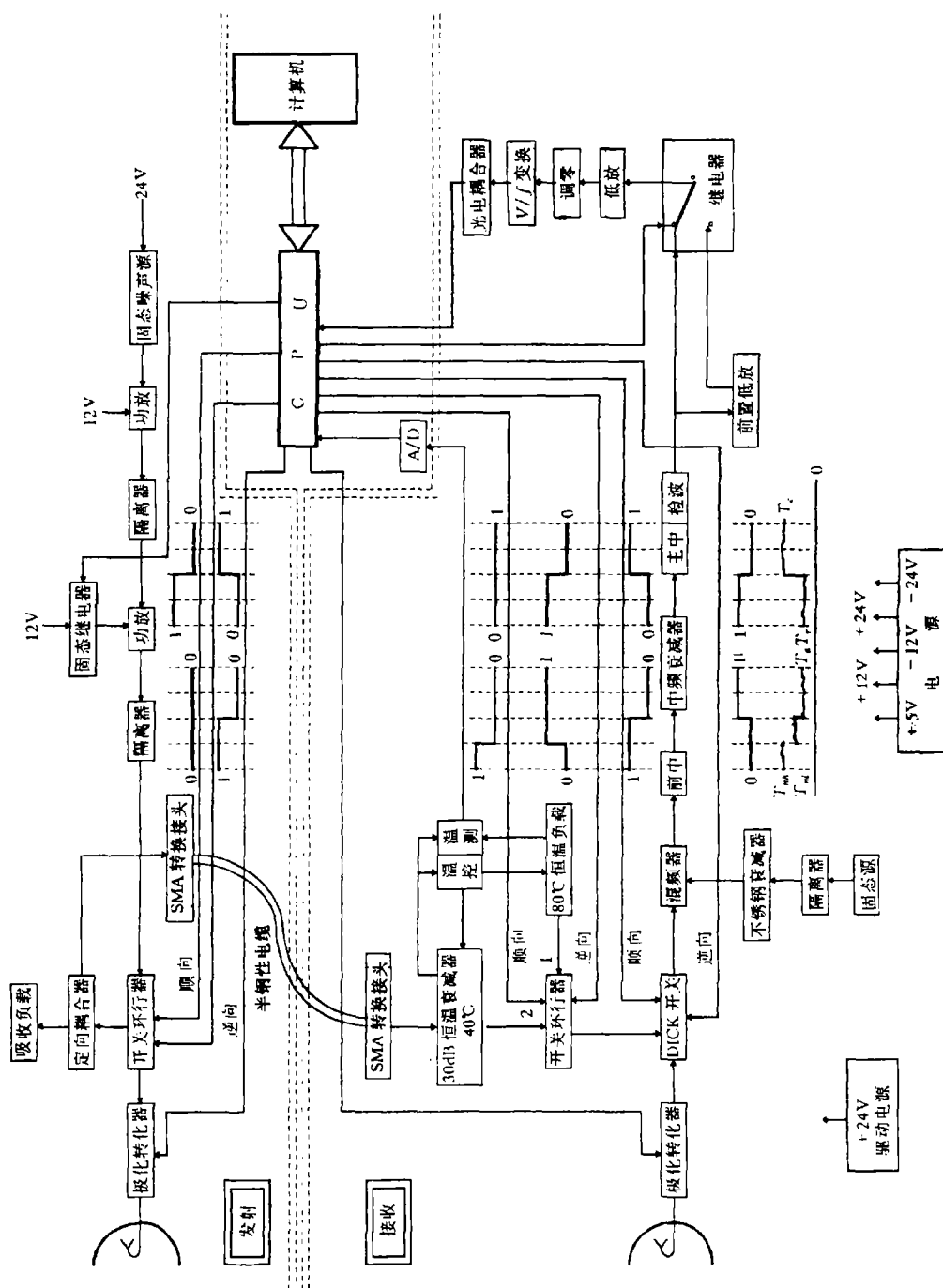


图 2 系统方框图

该系统辐射计接收机亦用于散射测量。整机主要由发射机、接收机、天线及其转台驱动电路、电源和中央处理器五部分组成。整机的工作状态控制、数据的输入输出和运算处理由中央处理器 (CPU 板) 完成。信噪比为 30dB 的固态噪声源加上 70dB 功率放大器所组成的固态噪声发射机, 经锁式开关环行器、极化转换器与发射天线连接。开关环行器的另一端口

接 40dB 定向耦合器, 定向耦合器的辅臂经硬同轴电缆线及恒温 40 度可变衰减器与接收机的参考温度开关环行器 2 号端连接, 以提供发射机的校正信号。衰减器本身作为低参考温度源。同时该开关环行器的 1 号端接 80 度恒温负载作高参考温度源。接收机支路中的 Dick 开关环行器使微波接收机可交替输入天线接收信号及来自参考温度开关的校正信号与参考温度信号。极化转换器可改变收发天线的线极化方向 (vv, hh, hv, vh)。发射支路的锁式开关环行器用作切换发射信号和校准信号。

辐射测量和散射测量的工作模式转换是通过中央处理器输出控制信号分别控制接收机继电器和发射机继电器来完成的。辐射测量时控制信号为低电平, 这时发射机功放断电不发射信号功率, 同时接收机继电器使前置低放接入低放电路。散射测量时控制信号为高电平, 这时发射机功放通电而发射功率, 同时接收机继电器使前置低放不接入低放电路。

中央处理器 (CPU 板) 采用 8098 微处理器, 通过 12m 电缆 RS-232 串口 1 号与计算机连接, 而 RS-232 串口 2 号也通过 12m 电缆与地面有效物理温度测量板 (MTB 板) 连接。

2.1 辐射亮度温度 T_{B_p} 测量

当进行辐射亮度温度测量时, CPU 同时输出两组控制脉冲, 一组为双参考负载控制脉冲 (周期为 1s, 脉宽为 1/4s) 去控制参考负载开关工作, 使恒温在 40K 的衰减器参考噪声信号 (T_{ol}) 及恒温在 80K 的参考负载噪声信号 (T_{oh}) 交替输入 Dick 开关环行器。另一组即 Dick 开关控制脉冲 (周期为 1s, 脉宽为 0.5s), 使微波接收机交替接通天线及参考负载。其调制信号波形如图 2 所示。该调制信号经低噪声交叉场混频器变频成 20~600MHz 中频信号后由主中滤波放大成 30~330MHz 中频信号, 经过平方律检波, 低频放大后馈入 LM331 压/频变换器 (V/f) 得到频率与天线温度及高低参考温度相关的周期变化的脉冲信号, 然后通过 SL985 高速光电耦合器, 输入 CPU 板经计数及数字解调后得到目标亮度温度。

现设天线温度 (目标亮温) 计数值 $N_a = m(T_{rec} + T_a)$, 低参考温度计数值 $N_{ol} = m(T_{rec} + T_{ol})$, 高参考温度计数值 $N_{oh} = m(T_{rec} + T_{oh})$, 这里 T_{rec} 是接收机系统噪声温度 (K), m 是与接收机增益有关的系数。经计算机运算可得到 T_a 的测量值:

$$T_a = \frac{N_a - N_{ol}}{N_{oh} - N_{ol}} (T_{oh} - T_{ol}) + T_{ol}, \quad (1)$$

该值经校准处理后, 最终得到目标亮温 T_{B_p} 。

2.2 后向散射系数 σ_{pq}^0 测量

当进行后向散射系数测量时, CPU 输出三组控制脉冲信号。其中一组为发射机控制脉冲, 控制发射机输出开关环行器使之顺向逆向交替切换。环行器顺向导通时信号经天线发射, 而逆向导通时信号经 40dB 定向耦合器分流到接收机作实时校准用。另外二组为接收机控制脉冲。其一为参考负载开关环行器控制脉冲, 使参考负载开关永远处于逆时针工作状态, 接收机便能接收到 40dB 定向耦合器分流来的发射机信号作实时校正用。其二为 Dick 开关控制脉冲 (周期为 1s 脉宽为 0.5s)。使接收机能交替接收来自发射机的校正信号及来自天线的目标回波信号。输入信号经接收机信号变换及放大后输出数字脉冲信号, 后经 CPU 板采集计数得到 N_r 和 N_c 值, 分别对应地面目标回波和校正信号电平。调制脉冲时序图如图 2 所示。

目标后向散射系数 $\sigma_{pq}^0(\theta_i)$ (dB) 可由下式计算:

$$\sigma^0(\theta_i) = (P_r/P_t) - K - I(\theta_i, H), \quad (2)$$

式中 θ_i 为入射角, H 为天线架设高度 (m), $I(\theta_i, H)$ 为照射积分 (dB), 是入射角和天线高度的函数, $K\lambda^2 G_0^2 / (4\pi^2) = -3.27\text{dB}$, λ 是工作波长 (0.032m), G_0 是天线增益 (29.8dB), P_r 指接收功率 (W), P_t 指发射功率 (W). 上式除 (P_r/P_t) 是待测量外其余都是已知量, (P_r/P_t) 可通过接收机输出电压计数值 N_r 或 N_c 查内校正曲线表《 $N \sim (P_r/P_t)$ 》获得.

《 $N \sim (P_r/P_t)$ 》表是通过预先将系统的收发分机用精密衰减器对接起来, 然后逐步改变衰减器测出所对应的接收机输出电压计数值而得到, 同时存盘以便查用.

由于收发天线之间不是理想隔离及整机增益随时间、环境温度可能变化要直接影响 (P_r/P_t) 的准确性, 我们的解决方法为

(1) 测地面目标回波时亦叠加有发射天线对接收天线直接耦合信号、接收机系统噪声温度以及地面目标的自身热辐射. 除后者比目标回波信号强度小得多可予以忽略外, 其余的干扰信号必须消除. 由于这些信号与有用信号都是非相干信号, 因此可用软件消除, 测量时先将天线对天顶, 这时接收机输出电压计数值 N_K 为天线直接耦合信号 (含接收机系统噪声温度), 通过查表得到 (P_K/P_t) 值然后在实测目标时予以扣除.

(2) 由于发射功率及接收机增益的不稳定所造成的测量误差, 可通过实时内校正方法来消除. 实时内校正及消除直接耦合公式为

$$(P_r/P_t) = (P_R/P_t)\xi_R - (P_K/P_t)\xi_K, \quad (3)$$

式中 P_R 是所接收到的总信号功率, P_K 是天线直接耦合信号功率, ξ_R 是地面测量时的实时校正系数, ξ_K 是对天空测量时的实时校正系数, $\xi = N_{co}/N_c$, N_{co} 是作校正曲线表时接收机输出的内校正电压计数值, N_c 是测量时接收机输出的动态校正电压计数值.

2.3 发射率的测量

发射率是先测得热辐射亮度温度 T_{B_p} , 天空亮温 T_{sky} , 以及目标后向散射系数 σ_{pq}^0 , 结合地面物理温度 T_{eff} , 利用下式求得:

$$e_p = (T_{B_p} - T_{sky}) / (T_{eff} - T_{sky}), \quad (4)$$

但对于粗糙表面天空辐射温度必须在多个方向上测量, 通过在不同方向上测得天空温度 T_{sky} 及所对应的地面散射系数 $\sigma_{pq}^0(\theta_i)$, 求以 $\sigma_{pq}^0(\theta_i)$ 作为权函数的天空辐射温度的加权平均, 即

$$\bar{T}_{sky} = \sum_i \sigma_{pq}^0(\theta_i) T_{sky} / \sum_i \sigma_{pq}^0(\theta_i), \quad (5)$$

式中 θ_i 为天线波束入射角. 将 (4) 式中 T_{sky} 用 $\bar{T}_{sky}$ 代替, 则粗糙表面的发射率由下式计算:

$$e_p = (T_p - \bar{T}_{sky}) / (T_{eff} - \bar{T}_{sky}). \quad (6)$$

3 系统结构和性能指标

该系统从结构上设计成紧凑型一体机, 即所有分机器装配在一个单元机座上. 对外除了一根电源线外仅有一根 12m 长电缆线与计算机相连, 携带方便有利于运输和转场. 主要技术性能如下:

(1) 工作频率: $9375 \pm 300 \text{ MHz}$, (2) 接收机噪声系数: $\leq 6 \text{ dB}$, (3) 辐射计灵敏度: $\leq 0.2 \text{ K}$ (积分时间 1 s), (4) 积分时间: 软件可调 ($1 \sim 60 \text{ s}$), (5) 接收机动态范围: $\geq 40 \text{ dB}$, (6) 亮度温度量程: $5 \sim 355 \text{ K}$, (7) 后向散射系数 σ^0 量程: $-40 \text{ dB} \sim 20 \text{ dB}$, (8) 发射率 e_p 量程: $0 \sim 1$, (9) 测量高度: $5 \sim 8 \text{ m}$, (10) 天线形式: 抛物面双天线, hh, vv, hv, vh 四种极化自动转换。口径 $D = 40 \text{ cm}$, 增益 $G = 29.8 \text{ dB}$, 波束宽度 (3dB) 5.4° , 天线俯仰角扫描范围: $0 \sim 180^\circ$, (11) 发射功率: 6 mW , (12) 外形尺寸: $82 \times 40 \times 60 \text{ cm}$, 重量 $= 26 \text{ kg}$ 。

4 标定和校正

4.1 辐射测量定标

双参考数字解调辐射计的高低参考温度在与目标亮温同一界面的天线口面处的温度值需进行定标。方法是用两种已知温度值的标准高低温黑体由辐射计来实测标定:

(1) 先将接收天线对准常温微波黑体 (温度为 T_H) 进行测量, 这时辐射计输出可用 (7b), (7c), (7d) 式表示。

(2) 再将接收天线对准浸于液氮中的的低温微波黑体 (温度为 T_L) 进行测量, 这时辐射计输出可用 (7a), (7c), (7d) 式表示。

$$N_L = m(T_{\text{rec}} + T_L), \quad (7a)$$

$$N_H = m(T_{\text{rec}} + T_H), \quad (7b)$$

$$N_{ol} = m(T_{\text{rec}} + T_{ol}), \quad (7c)$$

$$N_{oh} = m(T_{\text{rec}} + T_{oh}), \quad (7d)$$

解上式联立方程可得

$$T_{ol} = [(T_H - T_L)/(N_H - N_L)](N_{ol} - N_L) + T_L, \quad (8)$$

$$T_{oh} = [(T_H - T_L)/(N_H - N_L)](N_{oh} - N_H) + T_H, \quad (9)$$

T_{ol} , T_{oh} 便为低高参考温度标定值, 程序会自动保护这两个标定值以供测量时用。

4.2 散射测量的校正

在用微波散射计测量目标散射系数 σ^0 时, 所测得数据不仅取决于目标的反向散射特性而且也与散射计系统的某些参数有关, 如机内馈线损耗、接收机的增益及带宽、天线增益及波束宽度、发射功率等。为了准确测量 σ^0 值就必须对散射计进行校正, 校正手段有两种, 即机内校正 (相对校正) 及实测校正 (绝对校正)。

本机所采用的内校方法是: 在用精密衰减器测得《 $N \sim P_r/P_t$ 》表的基础上利用 Dick 开关调制半周期输出的实时内校电压进行实时校正。要准确测量目标的 σ^0 值还必须在机内校正的基础上进行绝对校正, 将散射计对准已知散射系数的标准散射体进行实测校正^[3]。我们采用已知散射系数的标准铜球作为标准散射体。将在对应 $20^\circ \sim 70^\circ$ 波束入射角时的斜距 R_{ci} 测得的散射系数修正值 $\Delta\sigma_{dbi}^0$ 变换成 $\Delta\sigma_i^0$, 求其算术平均值, 再用分贝表示有

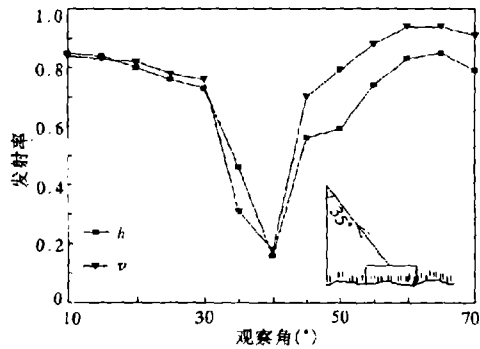


图3 草地及草地上放置金属平板的热发射率

$$\Delta\sigma_{db}^0 = 10\lg \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta\sigma_i^0, \quad (10)$$

式中 $\Delta\sigma_{db}^0$ 为目标后向散射系数 σ_{db}^0 的绝对校正因子。 $\Delta\sigma_{db}^0$ 存盘后用来对目标的散射系数测量值 σ_{dbM}^0 进行修正。 $\Delta\sigma_{db}^0$ 对散射计量程内离目标任何斜距都适用。修正公式为

$$\sigma_{db}^0 = \sigma_{dbM}^0 - \Delta\sigma_{db}^0. \quad (11)$$

5 后向散射和热辐射的组合测量实例

我们用该组合系统对草地、树木和人造金属目标进行了组合测试。图3给出了在草地以及在草地上放置金属平板(边长 $1 \times 1\text{m}$, 高 0.2m) 时的热发射率。平板放在观测角 35° 处。可以看出金属平板作为冷背景和光滑镜面反射体, 使辐射亮度温度明显减小。图4给出了草地和目标同极化后向散射 $\sigma_{vv}^0, \sigma_{hh}^0$ 。其中粗实线是草地上放置金属四棱锥目标(底面边长 0.8m , 高 1.2m) 时的 σ_{pp}^0 ($pp = vv, hh$), 而细实线是无金属目标时草地的 σ_{pp}^0 。可以看出, 金属四棱锥使 σ_{pp}^0 增强。图5给出了同样情况下的去极化 σ_{pq}^0 ($pq = hv, vh$)。对于 σ_{pq}^0 与 T_{Bp} 组合测量的进一步研究可以参见文献[2]。

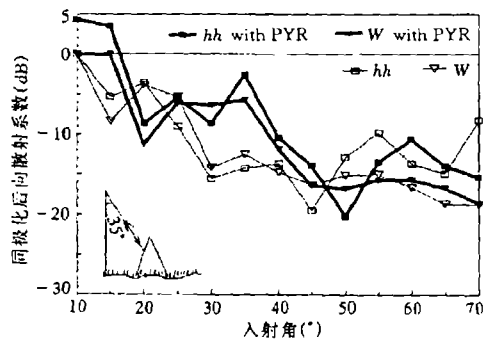


图4 草地及草地上放置金属四棱锥的同极化后向散射系数

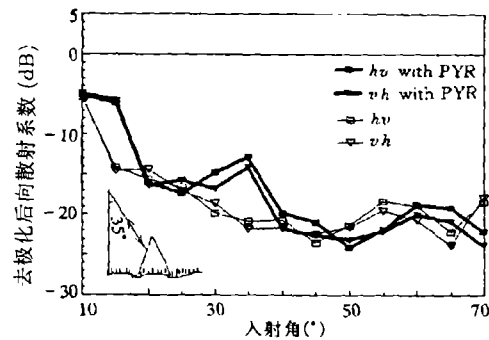


图5 草地及草地上放置金属四棱锥的去极化后向散射系数

6 结 论

本文介绍了我们研制的新型 X 波段散射计辐射计组合系统。它能同时同地相继连续地组合测量主被动遥感的多极化 σ_{pq}^0 及 T_{Bp} 。该系统为地面车载主被动组合遥感研究提供了新的实验手段。

参 考 文 献

- [1] Jin Y Q, Huang X. Correlation of temporal variation of microwave active & passive signatures from vegetation canopy. IEEE Trans. on Geosci. Rem. Sens., 1996, GRS-34(1): 257-263.
- [2] 金亚秋, 姚传亮, 张南雄, 陈晓光, 郑福海. X 波段散射计辐射计组合系统对树木背景中金属目标的观测研究. 遥感学报, 1999, 3(2): 1-5.
- [3] 姚传亮, 朱为中, 俞顺弟, 许赛卿. 用标准散射体绝对校正地面散射计. 中国空间科学技术, 1983, (4): 53.

A NOVEL SYSTEM OF COMBINED X-BAND
RADIOMETER-SCATTEROMETER

Yao Chuanliang Jin Yaqiu* Zhao Yinlong
Fang Zhenhe Zhang Nanxiong* Zhang Jun

(*Institute of Electronic Physics, Shanghai University, Shanghai 201800*)

(** (Wave Scattering and Remote Sensing Center, Fudan University, Shanghai 200433)*)

Abstract In this paper a novel system of combined X-band radiometer-scatterometer is reported. This system is especially designed for correlated observation of active and passive remote sensing. By employing this system, multi-polarized (vv , hh , vh , hv) backscattering coefficients and v , h -polarized brightness temperature can be measured simultaneously. An example of scattering and emission from land surface and metal targets is presented.

Key words Combined radiometer-scatterometer, Active and passive remote sensing

姚传亮: 男, 1941 年生, 工程师, 专业为微波技术及应用 (微波遥感设备研制).

金亚秋: 男, 1947 年生, 教授, 博士生导师, 专业为微波遥感, 计算电磁学.

赵银龙: 男, 1965 年生, 工程师, 专业为计算机软件.

方振和: 男, 1944 年生, 研究员, 专业为电子工程及信号处理.

张南雄: 男, 1974 年生, 硕士生, 专业为电磁场与微波技术, 微波遥感.