

X 波段散射计辐射计组合系统对树木背景中 目标的观测研究^{*}

金亚秋

(复旦大学波散射和遥感中心 上海 200433)

姚传亮

(上海大学嘉定校区电子物理所 上海 201800)

张南雄 陈晓光 郑福海

(复旦大学波散射和遥感中心 上海 200433)

摘 要 介绍 X 波段散射计辐射计组合系统的研制,利用这一组合系统可进行同时同地相继观测,得到 VV, HH, VH, HV 多极化的后向散射系数 σ_{pq}^0 , V 和 H 极化的辐射亮度温度 T_{Bp} 和地面热发射率 e_p 。给出了树木地面背景以及有多种金属目标的 $\sigma_{pq}^0-T_{Bp}$ 观测结果,并用一层随机介质散射辐射的主被动遥感理论进行了分析,为地面主被动联合遥感和背景杂波中目标识别提供了一个实例研究。

关键词 散射计辐射计组合,背景与目标,观测与分析

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,具有十分关键的作用。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_{Bp} 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应该是相关的,其反映的变化规律应该是一致的、互补的。我们的研究曾经表明,在农作物的整个生产过程中 σ_{pq}^0 与 T_{Bp} 的观测是相关的^[1]。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 $\sigma_{pq}^0-T_{Bp}$ 组合观测。

在目标识别中,自然地表背景的回波和辐射成为杂波。在杂波环境中目标的散射和辐射的特征识别是空对地观测研究中的一个重要问题。同时,对自然地表背景中特种目标的散射回波分布的统计特性,如 K 分布的特征参数 α 的分类识别^[2]等均还是远未解决的问题。

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,给出了该系统对树木背景和金属目标的 $\sigma_{pq}^0-T_{Bp}$ 组合观测结果。我们用一层随机介质的散射辐射理论分析了这些观测结果。可以表明,用主被动组合遥感测量对于自然地表分类及其特征参数反演,自然背景杂波中目标识别都是一项有意义且有待进一步深入的工作。

2 X 波段散射计辐射计组合系统

由复旦大学提出组合系统构想,并由上海大学电子物理研究所研制的该系统是新颖的多极化主被动联合的微波遥感器,能在同一地点相继连续地测定地表 VV, HH, VH, HV 极化的后向散射系数 σ_{pq}^0 和 V, H 极化辐射亮度温度 T_{Bp} 或热发射率 e_p 。该系统的工作频率为 X 波段 $9.375 \pm 0.3\text{GHz}$, 由双参考数字解调的 Dick 辐射计配上噪声发射源及发射天线所构成。辐射计接收机亦用于散射测量。整机主要由发射机,接收机,天线及转台驱动电路,电源及中央处理器 5 部分组成。天线为抛物面双天线, VV, HH, VH, HV 4 种极化自动转换,口径 40cm,增益 29.8dB,波束宽度 $5.4^\circ(3\text{dB})$ 。辐射计灵敏度为 0.2K,散射计发射功率 6mW。整机重量 26kg,外形

尺寸 82cm×40cm×60cm。整机的工作状态控制、数据的输入输出及运算处理由中央处理器(CPU板)完成。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(图1)。

当进行辐射测量时,控制信号为低电平,来自

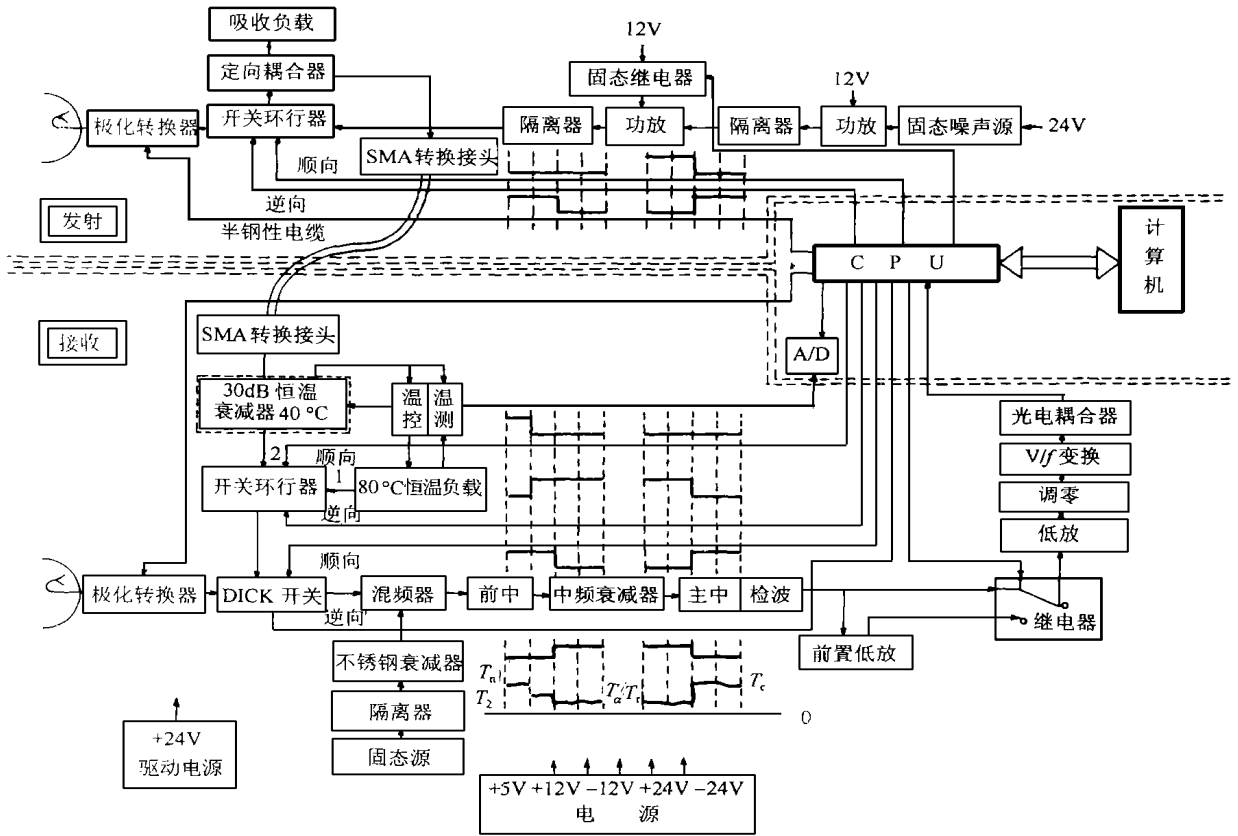


图1 系统方框图

Fig. 1 System graphics

CPU的指令关闭发射机及功放失电而不发射信号功率,同时接收机继电器使前置低放接入低放电路。CPU同时输出两组控制脉冲,一组为双参考负载控制脉冲控制参考负载开关工作,使恒温在40°C的衰减器参考噪声信号及恒温在80°C的参考负载噪声信号交替输入Dick开关环行器。另一组即Dick开关控制脉冲,使微波接收机交替接通天线及参考负载。在Dick开关控制脉冲低电平时接收到天线讯号,而在高电平时接受到冷热参考负载的亮度温度。调制讯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30-300MHz中频信号,经过平方律检波,低频放大后馈入压/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,然后通过高速光电耦合器,输入CPU板经计数及数字解调后得到目标辐射亮度温度。

率,接收机继电器使前置低放不接入低放电路。同时CPU输出3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。另外两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,使接收机作实时校正用;其二为Dick开关控制脉冲,使接收机能交替接收来自发射机的校正信号和来自天线的目标回波信号。输入信号经接收机信号交换及放大后输出数字脉冲信号,后经CPU板采集计数得到地面目标回波和校正信号电平。

由于发射功率、接收机增益随时间及环境温度等可能产生的变化,双参考数字解调辐射计和散射计系统采用了机内校正(相对校正)和实测校正(绝对校正)。

3 树木背景中目标的 σ_{pq}^0 与 T_{Bp} 的组合测量

为现场测量自然植被树林地表的散射和辐射,

以及研究树林散射杂波环境下特种目标识别,我们用该系统对贴梗海棠(约 1.2m 高)、夹竹桃树(约 2.0 m 高)、草地等地面背景和金属目标平板(FT)、四棱锥(PYR)、圆柱(CYL)进行了观测研究。金属平板各边长 1m,高 0.2m;四棱锥各边长 0.8m,高 1.2m;圆柱半径 0.2m,高 0.8m。实验情况如图 2。

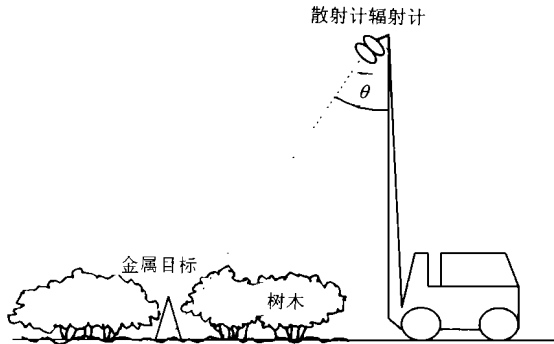


图 2 散射和辐射的实验观测

Fig. 2 Experiment of scattering and emission measurements

图 3 给出了在 35°入射时的同极化 σ_{VV}^0 , σ_{HH}^0 , 分 3 种情况 (1) 海棠树地面, (2) 在 35°观测角处地面上放置金属平板, (3) 在平板上再放置圆柱。可以看出金属目标的存在增强了散射, 其规则形状产生的角反射还可能增强 σ_{HH}^0 与 σ_{VV}^0 的差异。由于我们的目标正好放置在两团树丛中的空间, 使原来较少体散射的空间区域由于目标的加入而增强了散射。

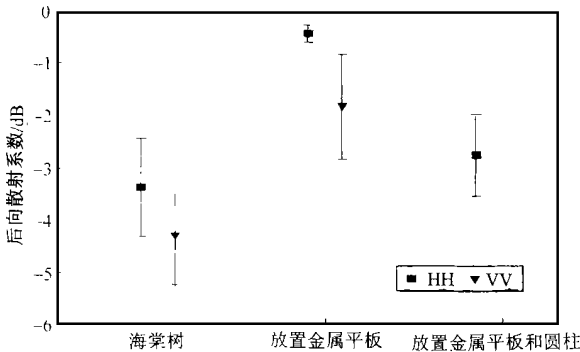


图 3 3 种情况时, 35°入射角下同极化后向散射

Fig. 3 Co-polarized backscattering for three cases at incidence 35°

图 4 给出了同时相继测量的 T_{BV} , T_{BH} 。可以看出情形(2)时金属平板使 T_{BV} , T_{BH} 下降, 金属平板相当于冷背景。再加上圆柱时, T_{BV} , T_{BH} 仍再次下降, 这可能是由于圆柱遮蔽了树木的部分热辐射。

图 5 给出用四棱锥更换圆柱时的 T_{BV} , T_{BH} 。与图 4 相同的是金属平板的存在使 T_{BV} 与 T_{BH} 下降而不同的是放置四棱锥后, T_{BV} 与 T_{BH} 又重新升高。这可能是由于在太阳底下(当时气温 29°C)暴晒后

放入的四棱锥本身的体辐射增强了地面目标的热辐射。观测中风的起伏、工作人员在树丛中的走动都明显影响 σ_{pq}^0 与 T_{Bp} 的变化。

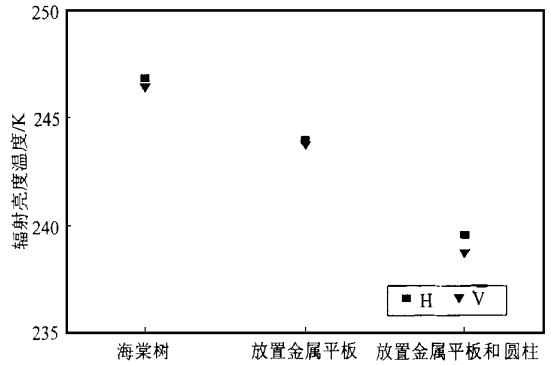


图 4 3 种情况时, 35°观测角下辐射亮度温度
Fig. 4 Brightness temperature for three cases at observation angle 35°

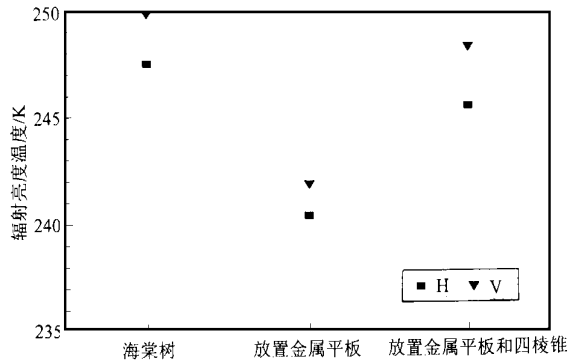


图 5 3 种情况时, 35°观测角下辐射亮度温度
Fig. 5 Brightness temperature for three cases at observation angle 35°

图 6 与图 7 分别给出同极化 σ_{VV}^0 , σ_{HH}^0 和去极化 σ_{VH}^0 , σ_{HV}^0 随入射角的变化。细线为无金属目标时海棠树丛的观测结果, 粗线表示在 35°入射角处地面上放置金属目标时的观测结果。从图 6 可以看出在 35°入射角地面区域金属圆柱目标增强 σ_{VV}^0 , σ_{HH}^0 , 而在图 7 中可以看出金属圆柱目标规则的形状明显减小了去极化 σ_{VH}^0 , σ_{HV}^0 。去极化是随机散射元随机程度的一种量度。

图 8 给出与此同时相继观测的辐射亮度温度 T_{BV} , T_{BH} 随观测角变化。可以看出, 圆柱目标的存在在 35°观测角区域处减少了 T_{BV} 和 T_{BH} 。

4 理论分析

对于一层厚度为 d 的随机介质(树木层), 在一阶 Born 近似条件下得到同极化后向散射系数可写为^[3]:

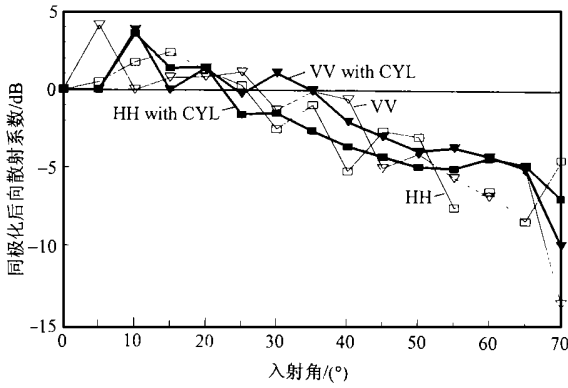


图 6 同极化后向散射随入射角的关系

Fig. 6 Co-polarized backscattering vs incidence angle

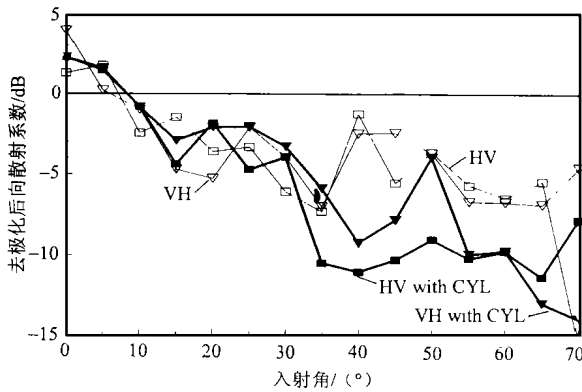


图 7 去极化后向散射随入射角的关系

Fig. 7 De-polarized backscattering vs incidence angle

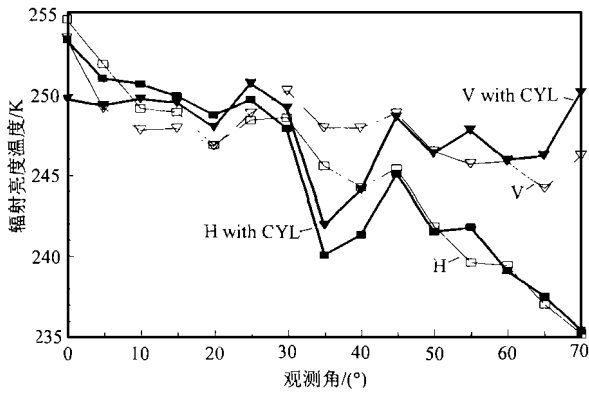


图 8 辐射亮度温度随观测角的变化

Fig. 8 Brightness temperature vs observation angle

$$\sigma_{HH}^{0(1)}(\theta) = 2\pi^2 \left| \frac{X_{01i}}{D_{2i}} \right|^2 \left\{ \frac{1}{4k''_{1zi}} \Phi(2k_{\alpha i}, 2k_{1zi}) \cdot (1 - e^{-4k''_{1zi}d})(1 + |R_{12i}|^4 e^{-4k''_{1zi}d}) + 4d\Phi(2k_{\alpha i}, 0) |R_{12i}|^2 e^{-4k''_{1zi}d} \right\} \quad (1a)$$

$$\sigma_{VV}^{0(1)}(\theta) = 2\pi^2 \left| \frac{k_{0i} Y_{01i}}{k_{1zi} F_{2i}} \right|^4 \left\{ \frac{1}{4k''_{1zi}} \Phi(2k_{\alpha i}, 2k_{1zi}) \cdot (1 - e^{-4k''_{1zi}d})(1 + |S_{12i}|^4 e^{-4k''_{1zi}d}) + 4d\Phi(2k_{\alpha i}, 0) |S_{12i}|^2 e^{-4k''_{1zi}d} \cdot (\cos^2 \theta_i - \sin^2 \theta_i)^2 \right\} \quad (1b)$$

其中 Φ 是随机介质介电起伏相关函数的 Fourier 变换, R_{12} 是(树木)散射层与地面之间的反射系数, 上标''表示虚部, 下标 i 为入射角方向。其余的标记定义可参见文献[3]129 页。对于去极化的 $\sigma_{VH}^0, \sigma_{HV}^0$ 则要求二阶近似求解^[3]。

由起伏逸散定理, 可得到一阶散射近似下一层随机介质辐射亮度温度为^[3]

$$T_{BH}(\theta) = \frac{k_0}{\cos \theta} \frac{\epsilon_1''}{\epsilon_0} T_1 \frac{1}{2k''_{1z}} \left[\left| \frac{X_{01}}{D_2} \right|^2 (1 - e^{-2k''_{1z}d}) \cdot (1 + |R_{12}|^2 e^{-2k''_{1z}d}) \right] + \frac{k_0}{\cos \theta} \frac{\epsilon_2''}{\epsilon_0} T_2 \cdot \frac{1}{2k''_{2z}} \left| \frac{X_{01} X_{12}}{D_2} \right|^2 e^{-2k''_{1z}d} \quad (2a)$$

$$T_{BV}(\theta) = \frac{k_0}{\cos \theta} \frac{\epsilon_1''}{\epsilon_0} T_1 \frac{1}{2k''_{1z}} \left[\left| \frac{k_0 Y_{01}}{k_1 F_2} \right|^2 (1 - e^{-2k''_{1z}d}) \cdot (1 + |S_{12}|^2 e^{-2k''_{1z}d}) \right] + \frac{k_0}{\cos \theta} \frac{\epsilon_2''}{\epsilon_0} T_2 \frac{1}{2k''_{2z}} \left| \frac{k_0 Y_{01} Y_{12}}{k_2 F_1} \right|^2 e^{-2k''_{1z}d} \quad (2b)$$

其推导和标记方法参见文献[3] 176 页。(1a, b) 与 (2a, b) 组成 σ_{pp}^0 与 T_{Bp} 的分析基础。由 (1a, b) 看出, 与随机介质(树木层)介电起伏成正比的 Φ 将使 σ_{HH} 和 σ_{VV} 的差别减小。地面反射率 $|R_{12i}|^2$ 的增大, 可增强 σ_{HH} 和 σ_{VV} , 这对应于地面变潮湿, 或下垫有金属反射目标。由于我们将金属目标放置在两团树丛中间的区域, 由金属目标产生的反射增强了观测到的同极化后向散射。但若是将金属目标取代一团树丛, 则后向散射可能会减小。同时可以理解, 规则形状的角反射会减小本来由随机散射元(树叶、茎, 粗糙地面等)产生的去极化散射。

(2a, b) 给出一层随机介质的 T_{BV}, T_{BH} 。若令 $T_1 = T_2$, 则有 $T_{Bp} = T_1(1 - r_p)$, r_p 为整个随机介质层(包括下垫地面)的反射率。金属目标的放置增强了 r_p , 因此减小了热发射率($e_p = 1 - r_p$), 而使 T_{Bp} 下降。自然, 若太阳的暴晒使 T_2 很高, 情况就可能不一样。另外, 图 4 的四棱锥的倾斜平面与观察角之间较小的夹角可能会使 r_p 减小而使 e_p 增强。同时若再纳入目标和树木, 以及粗糙地面的多次散射影响, 则情况就更复杂一些。但是规则形状的目标与随机树丛产生不同的回波的统计分布, 其同极化

σ_{pp}^0 , 去极化 σ_{pq}^0 与 T_{Bp} 的相应变化, 可以为树丛背景中目标识别提供一个分析基础。

5 结 论

本文介绍了新的 X 波段散射计辐射计组合系统的研制。用该系统对树木背景及其中金属目标的各种极化的后向散射系数和极化辐射亮度温度进行了组合测量。用同时同地多极化主被动组合测量的数据, 分析了树木背景和金属目标存在时的极化散射和热辐射的特征。用一层随机介质散射和热辐射的理论分析了所得到的实验观测结果, 指出多极化的 σ_{pq}^0 与 T_{Bp} 的组合观测可以为树木等背景及其金属目标的散射辐射的识别分析提供方法与途径。

参 考 文 献 (References)

- 1 Jin Y. Q., X. Huang. Correlation of Temporal Variation of Microwave Active & Passive Signatures from Vegetation Canopy. *IEEE Trans. on Geosci. Rem. sens.*, 1996, **34**(1): 257-263.
- 2 Jakeman E. On the Statistics of K-distributed Noise. *J. Phys. A: Math. Gen. B* 1980, 31-48.
- 3 Jin Y. Q. Electromagnetic Scattering Modelling for Quantitative Remote Sensing. World Scientific, Singapore, 1994.

作 者 简 介

金亚秋, 男, 1947 年 9 月生。复旦大学教授、博士生导师, 美国麻省理工学院电气工程与计算机科学系博士。现主要研究领域包括复杂系统中电磁散射与辐射传输、定量遥感理论及其数值模拟与反演、计算电磁学、空间通讯与电波传播等。已在国内外发表学术论文 190 篇。个人中英文学术专著 3 本。

Observation of Scattering and Emission from Tree Canopy and Targets Measured by a Novel System of the X-Band Radiometer-Scatterometer

JIN Ya-Qiu

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

YAO Chuan-Liang

(Institute of Electronic Physics, Shanghai University Shanghai 201800)

ZHANG Nan-Xiong CHEN Xiao-Guang ZHENG Fu-Hai

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

Abstract In this paper a novel system of the X-band radiometer-scatterometer developed by our Institutions is reported. By using this system, multi-polarized (VV, HH, VH, HV) backscattering coefficients for active remote sensing and V, H-polarized brightness temperature for passive remote sensing can be measured simultaneously. Some measurements of scattering and emission from tree canopy with and without artificial metal targets are presented. Theoretical study of scattering and emission from a layer of random medium is discussed with data analysis. Our approach provides an example of correlated active-passive remote sensing and application for target detection in environmental clutters.

Key words Radiometer-scatterometer, Background and target, Observation and analysis