

雷达和微波辐射计联合系统探测云中 含水量和雨强分布的研究

林海 忻妙新 魏重 郝跃奎 邹寿祥*

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文总结了雷达和微波辐射计联合系统遥感云雨参数的原理,从理论上讨论了误差来源。介绍了我所双波长(35和9.375 GHz)联合系统的结构和性能,并给出了1980—1981年期间所进行观测中的若干例子。

一、引 言

云中液态含水量 M 和雨强 R 分布及其随时间的演变,在人工影响天气、天气预报和水文气象等研究领域均具有十分重要的意义,因此它们的定量探测历来为人们所关心。自从四十年代末雷达在气象上首次得到应用以来,国内外对 M 和 R 的定量测量开展了不少观测研究,取得了一定的进展。雷达测量降水的基础一直建立在1941年 Ryde 提出的微波反射率、衰减和雨强的关系上,经多年的研究表明,雷达反射率因子 Z 和雨强不仅是水滴尺度分布中二个参数(即特征滴径和数密度)的函数,同时还与滴谱宽度有关。因此,单一的 $Z-R$ 关系不是对所有降水类型都适用,此外对于同一次降水还存在时间和空间尺度上对 $Z-R$ 平均关系的偏离。这就是单靠雷达探测云雨精度不能提高的原因。为了进一步提高对云雨的探测能力和改善探测精度,吕达仁和林海根据各类滴谱的微波辐射特征^[1],定量分析了雷达和微波辐射计各自的测雨能力,提出了一种雷达和微波辐射计联合探测求解方案^[2]。它不需要对雨滴谱作任何先验的假设,而通过采用微波辐射计增加微波参数的附加测量,来提高对降水测量的精度。利用多参数测量改进现有的云雨遥感是当前的发展趋向,例如增加光学衰减^[3]和差分反射率^[4]的测量。最近 Atlas 等人^[5]对降水的多参数测量进行了全面的总结,有助于云雨遥感工作的推进。

二、探 测 原 理

让工作在同一频率上的雷达和微波辐射计的天线指向一致, 则雷达方程和微波辐射传输方程中所反映出的路径总衰减应是相同的。根据微波辐射计测到的辐射亮度温度 T_b , 可得雨的总衰减 $\tau_p^{[6]}$:

$$\tau_p = \int \sigma_p(r) dr = -\ln \left[\frac{\bar{T} - T_b}{\bar{T} - T_{bs}} \right], \quad (1)$$

式中 σ_p 是雨的衰减系数, $\bar{T}$ 是路径平均气温, T_{bs} 是无雨时的背景辐射亮度温度。同时, 雷达接收到同一路径上的回波功率为

$$P(r) = \frac{c_A |k|^2}{r^2} Z(r) \exp \left[-2 \int_0^r \sigma(r') dr' \right]. \quad (2)$$

将雷达反射率因子 Z 和衰减系数 σ_p 的关系

$$Z = c \sigma_p^d \quad (3)$$

代入方程 (2), 并根据雷达空间分辨率, 对雨区路径取 $r_1, r_2, \dots, r_n$ 分离值, 则衰减系数 σ_p 随路径的分布为:

$$\begin{aligned} \sigma_p(r_1) &= [r_1^2 P(r_1) / c_A |k|^2 c]^{1/d} \exp \left[\frac{2}{d} \int_0^{r_1} \sigma_a(r') dr' \right], \\ \sigma_p(r_2) &= [r_2^2 P(r_2) / c_A |k|^2 c]^{1/d} \exp \left[\frac{2}{d} \int_0^{r_2} \sigma_a(r') dr' \right] \\ &\quad \times \exp \left[\frac{2}{d} \sigma_p(r_1) (r_2 - r_1) \right], \\ &\quad \dots\dots\dots \\ \sigma_p(r_n) &= [r_n^2 P(r_n) / c_A |k|^2 c]^{1/d} \exp \left[\frac{2}{d$$

复,直到上述条件满足为止。最后由下面的经验关系换算成雨强分布

$$\sigma_p(r) = aR(r)^b, \quad (6)$$

对于云的测量,只要将上述各式中有关雨的参数替换成云的参数,并利用云中衰减系数和含水量之间的关系,同样能迭代求解含水量分布。

这种联合求解方法既能发挥辐射计所具有的良好稳定性,又保持雷达的高分辨率。同时通过对参数 c 的调整,自动补偿了因谱型差异造成的部分影响,从而提高了探测精度。从方程组(4)中发现 c_A 与调节因子 c 构成一个乘积,因此可以将仪器常数和 c 合成一个特定因子求解,这样就无需对雷达进行绝对定标,这一特点对仪器的要求就减低了。

求解过程中必须建立二个经验关系,其中 $\sigma_p = aR^b$ 比较稳定,而 $Z = c\sigma_p^2$ 随谱型变化很大^[1]。此外,反演时还必须知道 $\bar{T}$, T_{br} , σ_a 和 $|k|^2$,在这些量中除了 T_{br} 既可用探空资料计算也可实测外,其它量均需用实时探空资料计算。但实际观测资料处理中常用气候资料来代替实际背景,这样也会引起一定的误差。因此,滴谱的影响和天气资料的利用问题在该迭代求解法中应该给予仔细考察。这正是数值模拟计算的目的。

三、数值试验

假定在球面均匀分层大气中,一定距离和高度上存在供数值计算的云雨分布模式。为方便起见,对非降水云作了垂直探测的数值试验,对降水区仅考虑水平探测,不计降水云的影响。具体做法是:(1)在一定的大气背景下,由假定的模式参数计算出雷达的回波功率和辐射亮度温度(称为正问题);(2)以正问题得到的回波功率和亮度温度作为“实测值”,由联合求解法反演出云雨参数分布(称为反问题);(3)在正问题中分别取不同的谱型、温度和大气背景参数,通过比较其相应的反演结果考察各因子对反演精度的影响。

2—3 公里, 这是夏季雷阵雨中可能见到的现象; 模式 IV 为 Γ 分布的降水, 假想为峰值雨强处于路径中值, 模式 IV 又分为两类, 对应谱型分别为 Γ_1 和 Γ_2 。

模式中滴谱的 $Z-\sigma_p$ 关系是确切可知的, 但是实际测量时, 显然构成降水的谱型不易知道, 为了考察谱型的影响, 在反演中选初值时, 将采用 $M-P$ 谱和北京混合谱的 $Z-\sigma_p$ 关系求解不同模式中的雨强分布。

计算结果表明, 反演精度在很大程度上取决于经验关系 $Z = c\sigma_p^b$ 与模式雨的符合程度, 以模式 III 的计算为例, $M-P$ 谱的 $Z-\sigma_p$ 关系所反演出雨强, 其相对误差的均方根值为 85.35%, 而采用了北京实际滴谱的经验关系后则为 53.72%。这种

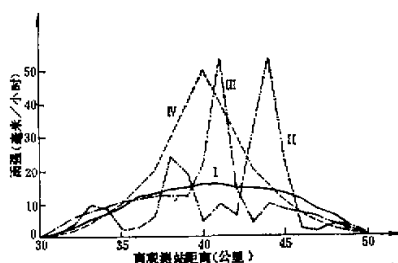


图 1 雨强分布模式

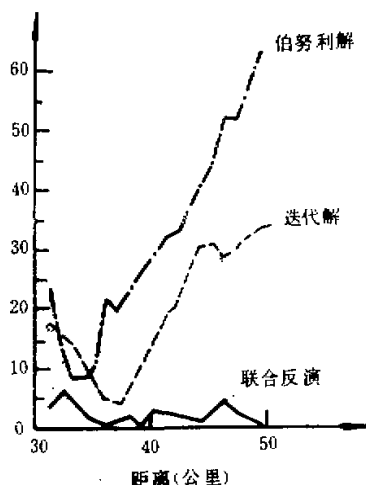


图 2 模式 I 的反演结果的相对误差

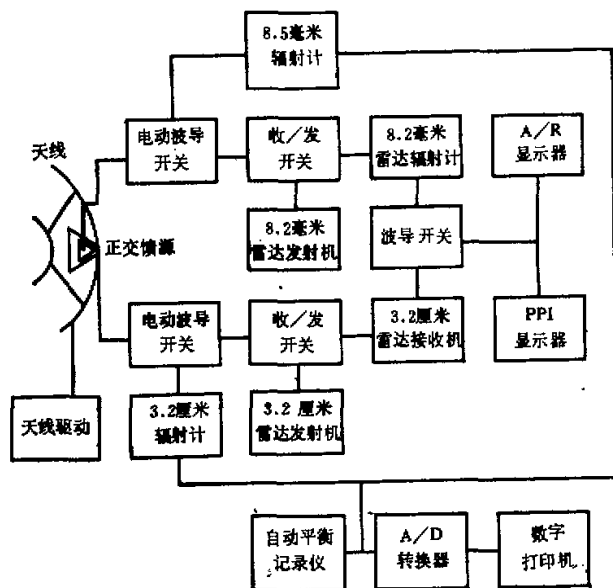
误差主要来源于

谱偏离平均谱较远时(如混合谱),稍改换经验关系进行反演,即用北京经验关系代替 $M-P$ 关系,迭代补偿法所得到的改进远没有联合反演的好,这是因为,在作相同的经验参数改变时,联合反演还可进一步调整 c 值,而迭代补偿法则不具备这一功能。

实际观测时,雨区温度及大气背景一般是不知道的,考虑到资料实时处理的需要,分别考察了用测站温度代替雨区平均温度和用气候背景代替实时背景时对反演结果的影响。如果反演过程中以测站温度代替雨区平均温度,则由于近水平观测,这种误差是很小的,除雨强峰值附近外,其相对误差一般小于 3%。北京夏季用 7 月份气候资料代替实时背景所引起的相对误差一般小于 25%。由此看出温度的影响是次要的,背景资料的采用需要仔细地选择。

四、仪器简介

为了实现上述联合求解的理论方案和云雨参数的微波遥感,我们于 1979 年研制成一台双波长雷达和微波辐射计联合系统^[1]。该系统由频率分别为 35 和 9.375 千兆赫的两部雷达和两架微波辐射计组成。这四个单元由一个正交馈源喇叭耦合到同一个抛物面反射体天线上。天线为直径 1.25 米的卡塞格伦型,能连续作方位 360° ,仰角 90° 的扫描。雷达和辐射计通过电动波导开关交替使用。该系统的结构方框见图 3,其中雷达是由国产 305 和 372 雷达改装而成的一部完整的双波长车载雷达,做为该系统的主体,用来获取云和降水回波信息。其性能接近于常规气象雷达,有关主要技术指标见表 2。该系统还包括两台与雷达相同波长的微波辐射计,它们均为非零平衡外差式 Dicke 型接收机,其



主要技术参数见表 3。为了提高整机稳定性,尽可能采用了国内先进的固体微波器件,如铁氧体锁式开关,低噪声正交场混频器和微带前中放体效应振荡器等,并将接收机置于温控在 50°C 的恒温箱内。两台辐射计的输出信号同时被自动电位差计和数字打印纪录。

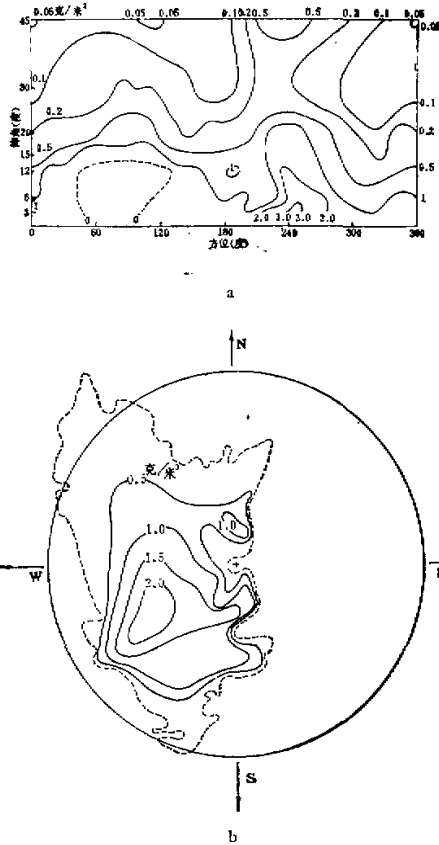
1982 年雷达已改用 715 气象雷达显示器,回波资料质量得到改善,辐射计已实现数据自动纪录。下一步,采用一台小型电子计算机实现整个系统的自动控制和资料处理,使其满足连续获取云雨参数的要求。

表 2 双波长雷达参数

波长	8.2 毫米	3.2 厘米
主波瓣宽度	$0.4-0.5^{\circ}$	$1.8-2.0^{\circ}$
天线增益	$> 50\text{dB}$	$> 35\text{dB}$
峰值功率	$> 30\text{KW}$	$> 200\text{KW}$
重复频率	1.5kHz	1.5 kHz
脉 宽	$0.2\mu\text{s}$	$0.6\mu\text{s}$
整机噪声系数	$< 12\text{dB}$	$< 9\text{dB}$
最小可测信号	-100dB	-102dB

表 3 双波长辐射计参数

中心频率	35GHz ($\pm 100\text{MHz}$)	9.375GHz ($\pm 100\text{MHz}$)
整机噪声系数	$< 9\text{dB}$	$< 7\text{dB}$
前置中放噪声系数	1.2dB	1.4 dB
带宽	80 MHz	100 MHz
增益	$\geq 35\text{dB}$	$\geq 30\text{dB}$



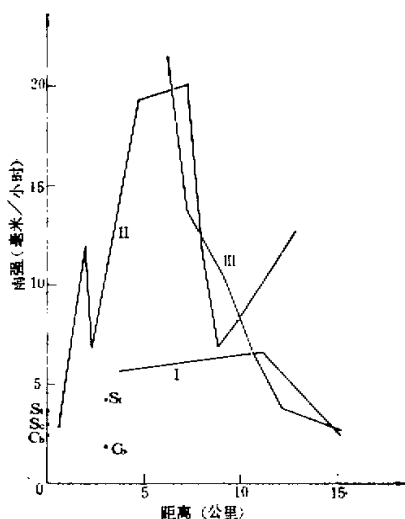


图5 1981年夏季几次雨强沿路径分布的观测结果

法经较为仔细的数值试验及初步实测验证表明,这类系统的观测精度能满足云雾降水物理的研究和水文气象的需要。就实用角度看,根据不同的使用目的,用一个波长的雷达和辐射计系统就够了。3厘米波长的联合装置能有效监测到浓积云和积雨云中的含水量和中小强度的降水。如果着重用于暴雨,则以5厘米波长为宜。若专用于云中含水量的测量,8毫米这个波长为最佳。但根据我们的理论估计及实测结果分析,必须要提高目前使用的8毫米雷达的发射功率,才能得到优于3厘米波段的成果。

目前实测验证有着很大困难,尤其是云中含水量的实测对比。这是当前遥感手段所面临的共同需要解决的问题。除此以外,我们还需进一步考证现有的遥感原理,完善遥感设备。总之,上述两项均为我们今后的任务。

鉴于现有的实践,我们已经能够确认,雷达和微波辐射计联合系统具有较大的潜力,它不仅能测出云雨参数的三维空间分布,而且能连续监测云雨生消移动的演变过程。这对人工影响天气的试验以及中小尺度系统的预报来说,无疑是重要的资料,同时对防洪和水库的合理蓄放也能及时提供可靠的数据。

参 考 文 献

- [1] 林海,鞠

- [10] Meneghini, R., *Radio. Sci.*, Vol. 13, No. 3, 1978.
[11] Jing. Qiyi et al., IAP. Annual Report, Vol. 1, 1982.

REMOTE SENSING OF LIQUID WATER CONTENT IN CLOUD AND RAINFALL DISTRIBUTION BY A COMBINED RADAR-RADIOMETER SYSTEM

Lin Hai, Xin Miaoxin, Wei Chong, Hao Yaokui, Zou Shouxiang
(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

In this paper, a solving procedure of detecting cloud and rain parameters by a combined radar-radiometer system is proposed. Numerical simulations for remote sensing of liquid water content in cloud and rainfall distribution are made and the effect of drop size distribution, atmospheric temperature and climatological background on inversion accuracy is theoretically discussed.

Furthermore, the performance of a combined dual-wavelength radar-radiometer system (35 & 9.375 GHz) for combined active and passive remote sensing of cloud liquid water content and rainfall are described. This is a movable system suitable for field observations. A few observations of different clouds and precipitation by the system during 1980—1981 are also given.