8.6 毫米和 3.2 厘米两个波长地面辐射计探测云中含水量

魏重林海 沈炯新

(中国科学院大气物理研究所)

提要

本文讨论了在地面上用 8.6 毫米和 3.2 厘米两个波长辐射计测量云中路径平均含水量的方法，通过数值实验和实际野外观测证明了该方法的可行性。给出了较好的观测结果并对测量误差进行了讨论。同时，比较了两个波长辐射计测量云中含水量的能力，指出了它们各自的测量适用范围和局限性。

一、前言


二、辐射计探测的亮度温度和云柱积分含水量的关系

在微波波段，辐射计接收到的来自空间某方向上大气和云的微波辐射总量一般可以用微波亮度温度 $T_\nu$ 来表示。在无源、水平均一、无散射大气的假定下，由辐射传输方程可以推得 $T_\nu$ 的表达式如下：

1981 年 1 月 21 日收到原稿。
大气科学

式中 $\lambda$ 为辐射计的波长，$\theta$ 为辐射计天线指向与水平面之间的夹角（仰角），$r$ 为辐射计到路径上各点的距离矢量，$dr$ 是沿路径的积分元量，$T(r)$ 是$r$ 处的温度，$\alpha_0$ 和 $\sigma_0$ 分别是大气氧气和水汽的吸收系数，$\alpha_L$ 和 $\sigma_L$ 分别是云的吸收和衰减系数。

为了了解 8.6 毫米和 3.2 厘米两波长辐射计的测量动态范围，我们选用一批实测云谱资料，根据 (1) 式进一步做了微扰计算，然后求得得到各波长的探测偏差 $T_b$ 与路径积分含水量 $G$ 之间的关系。微扰求得在球面分层、水平均一的晴空背景大气上，有一层均匀、连续的云层覆盖。云厚距地 1 公里，云量 4 公里，云中各处温度相同，云内温、湿压与云外大气一样。具体计算时，氧气和水汽吸热系数是按照 [6] 中公式根据气层平均吸热系数求得的，云的吸收和衰减系数是依据 [7] 按照实际云谱进行积分求得。在对 (1) 式积分时对积分路径元 $dr$ 进行了地球曲率和技术质量率订正。

图 1 垂直探测时含水量 $T_b$ 及 $T_r$ 的相对误差

图 2 斜阳探测时 $T_b$, $T_r$ 及 $\frac{\Delta T_b}{T_b}$ 随目标的变化

垂直探测时，两个波长的辐射计所测的含水量 $T_b$ 随路径上单位面积云层总含水量 $G$ 的变化曲线在图 1 中以实线表示。一般来说，只有亮温 $T_b$ 随云层含水量 $G$ 的变化率 $\frac{\Delta T_b}{\Delta G}$ 值较大时，亮温才能灵敏地反映出云层含水量的变化。由图中曲线可见，对由于每个波长的 $T_b$ 都具有各自的随 $G$ 值变化的敏感区域，亦即两个波长辐射计都有其各自的较佳探测范围。$G$ 值从 230 到 10000 克/米$^2$ 之间，8.6 毫米波长的 $\frac{\Delta T_b}{\Delta G}$ 值较大。而在 3.2
厘米波长，只有当 $C$ 值大于 27000 克/米$^3$时才能较好地进行探测，低于此值的云几乎无法分辨。根据国内某些地区云厚和云中含水量测量的估算表明，云积云 $C \approx 250$ 克/米$^3$，浓积云 $C \approx 2000\sim8000$ 克/米$^3$，北方冬季高层毛云 $C \approx 500$ 克/米$^3$（该水部分）。因此，在垂直探测时，8.6 毫米波长辐射计比 3.2 厘米波长辐射计有更宽的可探测范围，它基本上适用于各类云的探测。而 3.2 厘米波长辐射计只适用于浓积云或 $C_0$ 云等 $G$ 值较大的云的探测。图 1 还表明，当 $G$ 值超过 10000 克/米$^3$ 时，8.6 毫米波长的 $T_a$ 值趋于“饱和”。斜程探测时，两个波长辐射计探测的有云亮度 $T_a$ 和无云背景亮度 $T_s$ 随仰角的变化曲线在图 2 中以实线表示。图中横坐标是对应路径上单位面积云体总含水量 $G(\theta)$ 的关系为 $G(\theta) = G(90)/\sin \theta$。图中对应的 $G(90) = 500$ 克/米$^3$。$G(\theta)$ 相应的仰角值也一并标出。由图可见，仰角越低背景亮度值越大。8.6 毫米波长背景亮度在垂直探测时为 35K，而仰角时可高达 250K 以上。由此，低仰角探测时，亮度饱和现象出现时所对应的云层含水量 $G$ 值要比垂直探测时为小。例如图中 8.6 毫米 $T_s$ 曲线当 $G(\theta)$ 超过 5000 克/米$^3$（而不是图 1 中的 10000 克/米$^3$）时就已表现出饱和的趋势。因此应避免在低仰角用 8.6 毫米辐射计对 $G$ 值大的云层进行探测，这时一般用 3.2 厘米辐射计进行探测为宜。

三、辐射计测云的简化公式及其适用范围

将 (1) 式进行一定的简化，就可以得到云层的微波路径衰减量的表达式。由此可进一步推得云层的路径积分含水量。所谓云的微波路径积分衰减即光学上称为光学厚度。我们用 $\tau$ 表示。

将 8.6 毫米大气分为地面到云底、云底至云顶以上大气的三段，令 $T_1, T_2, T_3$ 分别为各段的平均温度。并假设云中粒子与波长相比足够小，可以用云的衰减系数代替衰减系数。这时采用与文献 [4] 中关于云的衰减系数相同的方程，即可得到云层的光学厚度

$$
\tau(\lambda, \theta) = -L_n \left[1 - \frac{T_3(\lambda, \theta) - T_2(\lambda, \theta)}{T_2 + (T_2 - T_1) e^{-\tau} - T_1} \right],
$$

(2)

式中 $e^{-\tau}$ 为沿探测路径方向地面到云顶的空气透过率，其余符号均与前面意义相一致。

若单位含水量云的衰减系数（即比衰减系数）为 $\tau_n$，沿路径云层为 $L$，则可求得探测方向上单位面积云柱总含水量 $G(\theta)$ 和路径平均含水量 $W(\theta)$。

$$
G(\theta) = \frac{\tau(\lambda, \theta)}{\tau_n},
$$

(3)

$$
W(\theta) = G(\theta)/L,
$$

(4)

其中 $\tau$ 是云层等效厚度，一般以云的平均温度 $T_2$ 表示。图 3 为两波长上 $\tau$ 随温度的变化曲线，它是由实际云谱用 Mie 理论计算后回归得到的。

综上所述，公式 (2), (3) 和 (4) 构成了用辐射计测量单位面积云柱总含水量（或路径平均含水量）的一组简化公式。
简化公式（2）的导出中做了瑞利近似的假设，取云的吸收系数等于衰减系数。但是，实际云中往往有一些几百甚至上千微米直径的较大粒子存在，这时瑞利近似就不一定适用了，采用简化公式探测会产生一定的误差。为了考察简化公式对不同云进行探测时的误差，我们通过模式计算分别统计了探测非降水云和混合云谱时，简化公式所测含水量对含水量原值的百分误差（Δ），结果列于表1中。

表1 中所选392份非降水云谱是庐山地面云雾点从Sc, Cu等云的下部或边缘的取样。一般谱的最大谱径不超过100微米，对于所用的两个波长，这些云谱无疑是能满足瑞利近似条件的。表内非降水云谱一栏中，在3.2毫米波长上简化公式对全部非降水云谱探测的误差都在5%以内，8.6毫米波长上Δ < 5%的谱也有85%。这正是瑞利近似适用这一物理本质的反映。至于8.6毫米波长上有占总数不到百分之五的云谱Δ大于5%，其原因并不是云中粒子不完全瑞利近似，而是这些谱的含水量都在2克/米³以上，相应层G值较大，光散射因子饱和而造成较大误差，即使这时，误差也在25%以下。在两波长上用简化公式探测非降水云谱都是有足够精度的。

表中混合谱一栏所用152份谱，是将飞机测得云的152份大云谱谱分别与同一小云谱谱相连接而得的。所用小云谱含水量是0.14克/米³，谱的平均直径为5.8微米，最大直径为26微米。152份大云谱谱所测最小粒子为33微米，每份谱的最大直径由120微米到2710微米不等，平均直径在600到700微米之间。

表1 简化公式测云含水量的百分误差Δ统计

<table>
<thead>
<tr>
<th>谱长</th>
<th>8.6毫米</th>
<th>3.2毫米</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td></td>
<td>Δ&lt;5%</td>
<td>5%&lt;Δ&lt;10%</td>
</tr>
<tr>
<td>非降水云谱（392份）</td>
<td>374</td>
<td>11</td>
</tr>
<tr>
<td>百分比</td>
<td>95.4</td>
<td>2.8</td>
</tr>
<tr>
<td>混合谱（152份）</td>
<td>123</td>
<td>5</td>
</tr>
<tr>
<td>百分比</td>
<td>81.1</td>
<td>3.3</td>
</tr>
</tbody>
</table>

平均含水量为0.023克/米³。从表1混合谱一栏中可以看出，即使云中存在着几百甚至上千微米的水滴，多数情况下（百分之八十以上）简化公式的百分误差仍小于5%。进一步考察混合谱中Δ > 10%的那些个例，发现3.2毫米波长来说，他们都是一些最大谱径大于1000微米的谱，对于8.6毫米波长来说，它们都是最大谱径超过717微米的谱。显然，这时由于谱中存在着比上述尺度还要小的，使得瑞利近似不再适用，引起了简化公式的测量的较大误差。由上面对图可见，对于混有雨滴的云，只要谱径在0.7到1毫米以下，简
化公式仍有相当高的精度，还应看到，在混合谱中上述瑞利近似适用的尺度上限是随小滴和大滴之间权重不同而变化的，小滴部分权重越大，谱的瑞利近似适用的尺度上限也越大。必须指出，我们所用混合谱与云中实际的大、小滴混合情况相比，混合谱的小滴部分的权重是偏小很多的。即使这样，简化公式对存在将近1毫米雨滴的云探测，仍有相当高的精度，那么，对实际降雨云进行测量时简化公式将在更大的粒子尺度范围内保持高的精度。换句话说，用8.5毫米和3.2厘米辐射计根据简化公式测雨量云及雨强不太大的降水云时都有较高的精度，只是对较强的降水探测时精度则会下降。

四、实验观测结果及误差估计

1980年6月至9月在河北省香河县中国科学院大气物理研究所香河观测站进行了实验观测。观测仪器是我们自行研制的双波长辐射计-雷达联合系统。雷达用于云的定位和云厚的测量。观测结果分为下列三条：

（1）浓积云或积雨云的路径总含水量的空间分布 8月8日午夜用双波长辐射计同时观测一发展较强的C cy云，得到了沿观测路径总含水量分布的等值线图，表示于图4中，图中横坐标是方位角，纵坐标是仰角。8.5毫米波长的等值线以虚线表示，3.2厘米波长测量结果等值线用实线表示。图中两个波长辐射计各自的测量结果反映出的含水量结构是相当一致的，两个波长的高值区和低值区对应得比较好。路径平均含水量的数值在量级上与其他一些降水云中含水量的观测结果也是一致的。另外的几次用8.6毫米辐射计测量得到的路径平均含水量空间分布个例，也都得到了分布和数值上都合理的结果。这些结果有力地表明微波辐射计遥测对流云中含水量结构的能力。

![图4 浓积云路径平均含水量空间分布的等值线图](image)

实线：3.2厘米，虚线：8.5毫米，单位：克/米³。1980.8.8.13时—15时。

（2）云的垂直方向总含水量的水平结构 当云向下发展时，辐射计垂直探测到的亮温随时间的变化，实际上反映了云中辐射路径积分含水量的水平结构。图5是7月10日积云过顶时的实例，图中横坐标是云的垂直距离，它是根据云所在高度上当日探空的风速当作云逆算的。图中实线是所测云的亮温曲线，虚线是最后求得的垂直方向上
单位面积云的总含水量单位是克/米²，图中表明这块云中心路径积分含水量可达 3000 克/米²以上，同时也反映出高积云的垂直路径总水量在水平方向是不均匀的。

（3）层状云的路径积分含水量统计

对于高层云或高积云等类大面积覆盖的云，我们做了不同仰角的观测，得到了相对应的路径衰减和路径积分含水量。将观测结果按高仰角（60° < α ≤ 90°）、中仰角（30° ≤ α < 60°）和低仰角（α < 30°）三部分统计

于表 2 中。表中所列的 $G$ 值比前面例中积状云对应的 $G$ 值要小。表中数字表明同一类云的路径总水量随仰角降低而增大，二次遮挡能见度 200 米左右的含积状云的积分含水量甚至比 $A_e$ 或 $A_s$ 云的路径积分含水量大 3 倍到 5 倍。这些问题对研究云状含水量以及电波传播问题都是有一定意义的。

表 2 层状云的路径总合水量和 8.6 毫米波长的衰减

<table>
<thead>
<tr>
<th>仰角</th>
<th>云型</th>
<th>$T_e$</th>
<th>$G$（克/米²）</th>
<th>平均系数</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>60° &lt; α ≤ 90°</td>
<td>A_e</td>
<td>0.0143</td>
<td>197.8</td>
<td>4</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>A_s</td>
<td>0.0186</td>
<td>100.5</td>
<td>8</td>
</tr>
<tr>
<td>30° &lt; α ≤ 60°</td>
<td>A_e</td>
<td>0.1059</td>
<td>593</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>A_s</td>
<td>0.0485</td>
<td>214.5</td>
<td>8</td>
</tr>
<tr>
<td>3° ≤ α ≤ 30°</td>
<td>A_e</td>
<td>0.054</td>
<td>285</td>
<td>4</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>A_s</td>
<td>0.0116</td>
<td>772</td>
<td>2</td>
</tr>
<tr>
<td>α ≤ 5°</td>
<td>A_e</td>
<td>0.311</td>
<td>1481</td>
<td>1</td>
</tr>
</tbody>
</table>

最后，我们讨论实验观察误差，由公式（3）可知，云柱积分含水量的测量误差主要是云的光学厚度 $\tau_e$ 和单位含水量云的吸收系数 $\tau_r$ 的测量误差造成的。当云中有无降水存在时，$\tau_e$ 误差是由云的等效厚度 $T_e$ 的误差引起的。由图 3 可以看出，若等效厚度的误差为 $5K_e$，造成 $\tau_e$ 的百分误差约 10° 15%。

关于 $\tau_e$ 的误差，可根据公式 2 求得 $\tau_e$ 的误差传递公式

$$\frac{\Delta \tau_e}{\tau_e} = \frac{1}{\tau_e} \left( \frac{\Delta (T_b - T_a)}{T_b + (T_b - T_s) e^{-\tau_e} - T_s} + \frac{\Delta T_a}{T_b + (T_b - T_s) e^{-\tau_e} - T_s} \frac{\Delta A}{A} \right),$$

其中 $A = T_b + (T_b - T_s) e^{-\tau_e} - T_s$

$$|\Delta A| = |\Delta T_b| + |\Delta T_s| + |\Delta \tau_e| + |\Delta e^{-\tau_e}| \Delta \tau_e + |(T_b - T_s)\Delta e^{-\tau_e}|.$$ 

考虑到测量误差，令 $|\Delta T_b| \sim 2K_e, \Delta (T_b - T_s) \sim 2K_e, \Delta e^{-\tau_e} \sim 0.1, \Delta T_s \sim 3K_e,$ $|\Delta (T_b - T_s)| \sim 5K_e$，求得相应的垂直探测和斜程探测时 $\tau_e$ 的相对误差曲线分别在图 1 和图 2 中
以虚线表示，图中在两个波长上有其各自对应的高值和低值区域。在第二章中我们已结合图1、图2详细地讨论了两辐射计各自的测量适用范围。在这里分别将两图中同一波长的虚线与实线相照对，可以发现对每个波长来说，τ。相对误差较小时对应的G值区域都与该波长辐射计测量适用时对应的G值范围相一致，相反，当某个波长辐射计探测不适用时，虽然仪器的绝对误差没变，图中τ。的相对误差却变得很大。例如3.2厘米波长辐射计垂直探测时（图1），当云的G值小于1000克/米2时，τ。的相对误差在150%以上，又如8.6毫米波长辐射计斜角探测时（图2），当仰角在30°以下时，τ。相对误差也超过150%。对于上述这两种τ。相对误差较大的情况，在观测时应注意加以避免。从两图中τ。相对误差曲线还可以看到，当一个波长的探测误差较大时，刚好另一个波长却处于探测的较好范围内。因此，用两个波长辐射计同时探测，互相取长补短，将会得到比较理想的结果。

五、结 论

1. 本文提出了一种用微波辐射计测云路径总含水量的方法。数值实验表明这种方法对降水云和非降水云都是可采用的，对非降水云或雨量不大的降雨云有较高的探测精度。据此，用自制的双波长辐射计—雷达系统取得了较好的实验观测结果。

2. 模式计算和观测误差分析都表明，在垂直探测或仰角探测时，8.6毫米波长辐射计有较宽的测量范围和较高的测量精度，因而它基本上适用于各类云的探测。此时3.2厘米波长辐射计只适用于总路径含水量较大（G ≥ 2700克/米3）的云的探测。

3. 在低仰角探测时，若斜程路径含水量G值较大，8.6毫米辐射计会出现亮湿饱和现象，造成探测值相对误差增大。与此相反，此时3.2厘米波长辐射计往往有较高的探测精度，为了得到理想的结果，最好将两个波长辐射计结合起来使用。

致谢：本文所用云雨谱资料是由中央气象局人工影响天气研究所和湖南省气象局提供，在此表示谢意。

参考文献

[5] 脉冲辐射, 大气散射辐射和遥感, (待出版)。
MEASUREMENT OF LIQUID WATER CONTENT IN CLOUD
BY DUAL-WAVELENGTH GROUND-BASED MICROWAVE
RADIOMETER

Wei Zhong Lin Hai Xin Miao-xin
(Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica)

Abstract

A dual-wavelength ground-based radiometer operating in 0.86 and 3.2 cm has been used to measure the integrated or mean liquid water content in cloud. Using actual cloud-drop spectra, the accuracy of liquid water determination is estimated. The merit and limitation of these two radiometers in cloud liquid water measurement are discussed. Quantitative analysis of their reliability is made, and their probing ability is compared with each other.