

毫米波气象雷达的测云能力*

魏 重 林 海 忻 妙 新

(中国科学院大气物理研究所)

毫米波雷达在探测非降水云方面的优越性早已为人们所注意。自五十年代起,它已陆续用于探测云底高度、分辨云层以及直接为机场飞机起飞和着陆的安全服务。在这些实际应用中毫米波雷达在某些方面与厘米波雷达相比有着明显的优越性。但有二点必须指出:首先毫米波雷达能否优于厘米波雷达取决于雷达本身的性能。在发表的对比实验中,毫米波雷达性能均略高于厘米波雷达^[1,2]。其次,即使现有的较高性能的毫米波雷达也不是对所有的云层都能有回波^[3]。我国毫米波雷达尚未广泛用来测云,其主要原因是毫米波器件性能不及厘米波器件。其次,缺乏从理论与实验上对毫米波测云雷达做出确有根据的论述。

1979年大气物理研究所同安徽井岗山机械厂协作研制成双波长雷达,波长为 3.2 厘米和 8.2 毫米(本文中分别称为 X 雷达和 K_a 雷达)。从 1980 年起我们连续几年对云和降水作了系统的观测^[4]。这是我国首次利用毫米波雷达进行气象观测。与此同时,我们对毫米波雷达的测云能力作了理论估计。本文是这两个方面工作的总结。

1. 毫米波雷达测云能力的理论估计

为了考查雷达的测云能力,我们分别用双波长雷达和 713 气象雷达的雷达参数,在特定的大气模式下,根据气象雷达方程

$$P(r, \lambda) = \frac{C_A |K|^2}{r^2} Z_e(r, \lambda) \exp \left\{ -2 \int_0^r [\alpha_a(r, \lambda) + \alpha_c(r, \lambda)] dr \right\}$$

计算不同距离 r 处的回波功率 $P(r, \lambda)$ 。式中 $Z_e(r, \lambda)$ 和 $\alpha_c(r, \lambda)$ 分别是云的雷达反射率因子和吸收系数, $\alpha_a(r, \lambda)$ 是大气中气体(氧气和水汽)在对应波长上对雷达波的吸收系数^[5], C_A 为仪器常数。表 1 列出了这三部雷达的雷达参数,同时将我国目前常用的 3.2 厘米的气象雷达(711)的有关参数也列于表中,以作对比。

计算模式是假定球面分层的大气背景上有一均匀的球面平行的云层,云底 1 公里,云厚 4 公里,云中充满均一的云滴谱,云内温湿压参数与环境一致。背景大气为长沙十年气候平均的探空资料。不同的云谱表征了模式云的差异。我们根据南方地区实测云谱,归纳出两种非降水云的平均谱,称为窄谱和宽谱,分别代表低含水量云(淡积云或雾)和高含水量的云(如层积云、高积云)。此外,在上述窄谱上叠加实测大云滴平均谱构成一种混合谱,其最大滴直径达 2700 微米,以代表降水云中的云滴分布。这三种云谱的主要参数见

* 本文于 1983 年 12 月 22 日收到, 1984 年 9 月 10 日收到修改稿。

表 1 雷 达 参 数

雷达型号		波长 (毫米)	峰值功率 (千瓦)	天线增益 (分贝)	波瓣角 (度×度)	脉冲宽度 (微秒)	阈值功率 P_{min} (分贝瓦)	仪器常数 C_A (瓦公里 ² 米 ³ 毫米 ⁻⁵)	$10 \log \left(\frac{C_A}{P_{min}} \right)$
双波长 雷达	K_a 雷达	8.2	21.24	52	0.42×0.42	0.2	-122.95	0.5079×10^{-9}	30.01
	x 雷达	32	178	35.7	1.9×1.9	0.6	-130.2	0.1037×10^{-10}	20.36
713 雷达		56	250	38	1.3×1.3	2.0	-137.0	0.2141×10^{-10}	30.31
711 雷达		32	75	41.6	1.45×1.45	1.0	-126.02	0.6543×10^{-10}	24.24

表 2 三种云谱参数和雷达的最大可测距离

云滴谱	含水量 (克/米 ³)	雷达有效反射率因子 (毫米 ⁵ /米 ³)	最大直径 (微米)	云底处最大可测距离(公里)		
				K_a 雷达	x 雷达	713
窄 谱	0.14	0.6856×10^{-3}	26	—	—	—
宽 谱	1.04	0.2696×10^0	74	10	5	15
混合谱	0.18	0.3670×10^3 (K_a) 0.3091×10^3 (x) 0.3591×10^3 (c)	2700	50	105	300

表 3 不同雨强下双波长雷达的水平可测距离

雨 强 (毫米/小时)		0.1	1	10	30	100
最大可测距离 (公里)	K_a 雷达	6	17.7	32.6	35.2	30.5
	x 雷达	5	11.8	48.1	87.0	127.0

表2。

在计算中,考虑了大气中气体的吸收系数随波长及探测路径上温湿压的变化,考虑了云中粒子的米散射效应。同时,雷达射线的轨迹是按球面分层大气的斯涅尔(Snell)定律来计算的,也即同时考虑了地球曲率和大气折射率订正。这样,我们的计算将比某些近似估算更接近真实情况。

理论计算结果表明:

(1)所计算的三个波段雷达对窄谱模式云毫无反映。可见,我们的 K_a 雷达也难以探测到低含水量,最大滴径小于 30 微米的水云。

(2)毫米波雷达对于小于 100 微米滴径的宽谱云,如层积云、中积云和高积云将能发挥出特色。这里, K_a 雷达比 x 雷达探测距离要远一倍。最大可测距离虽不及 713 雷达,但由于波长短,分辨率高,因此在刻划云的结构和层次上一定会更细致一些。

(3)在天顶方向近距离处,比较几部雷达探测同一目标的能力大小,只要将表 1 中的 $10 \log \left(\frac{C_A}{P_{min}} \right)$ 值加以比较就可以得到一个基本估计,显然 K_a 雷达和 713 雷达比 x 雷达的值大 10 分贝左右。虽然在某一距离处对于不同模式云来说,雷达回波的信噪比在数值

上会有很大差异,但各雷达之间相对关系不变,在近距离处 K_u 雷达信噪比总比 x 雷达高出 10 分贝左右。

(4)随着探测距离的增加,毫米波比厘米波雷达回波信噪比要下降得快得多。在距离测站 20—25 公里的云底处, K_u 与 x 两雷达回波的信噪比已基本相等,而 45 公里处 K_u 雷达反而小 10 分贝左右。这说明毫米波的路径衰减影响了它的远距离探测。计算还表明,当毫米波穿过云层时,当云含水量大或云中路径较长时,往往只在偏向测站一侧有回波,远离测站一侧虽有云存在,但雷达接收功率已低于阈值功率,雷达无法反映出云的真实情况。

(5)降水的影响。以 Mashall-Palmer 雨谱,计算了在以本站为中心的均匀雨区中,双波长雷达的水平可测距离(见表3)。由表可见, K_u 雷达最大探测降水距离只能维持在 35 公里以内。即使这样,小雨(≤ 1 毫米/小时)时 K_u 雷达仍比 x 雷达的穿透能力强。

综上所述,对于大部分非降水云,我国目前器件水平下的毫米波雷达作垂直探测同 713 雷达相当。显然,比 711 雷达要好。进一步如果将现有 K_u 雷达的几个主要指标稍作改善,则毫米波雷达测云能力将大大提高。理论计算表明,若双波长雷达 K_u 波段的脉冲宽度由 0.2 微秒增加到 0.5 微秒,则能垂直探测到窄谱云底以上 100 米以内的回波;若单独把发射功率提高到 75 千瓦,则能垂直探测到窄谱云底以上 400 米以内的回波;若接收灵敏度提高 10 分贝,则可进一步将探测高度提高到 1.2 公里。上述三项指标同时得到提高,则对 30 公里远处的非降水窄谱云或 9 公里以内的雾(直径 4 微米,浓度为 1000 个/厘米³)均能测到回波。这说明毫米波雷达技术指标提高的重要性。事实上,上述三项性能的改善也是能够实现的,因此可望我国毫米波雷达在探测云雾上发挥出应有的作用。

2. 毫米波与厘米波雷达的测云对比

1980 到 1983 年我们分别在香河观测站和北京城郊进行了双波长雷达对各类云层的对比观测。几年来共取得可对比资料共 320 多组,其中 3/5 是 As, Ac, Sc 和 Ns , 2/5 是 $Cu cong, Cb$ 或降水的资料。主要考察两个波长雷达对同一目标(云层)同时(观测间隔不超过 1 分钟)所取得的回波特征,比较它们的测云能力,从而了解毫米波雷达实际比厘米波雷达的长处所在。

1)高仰角弱回波特征 对于测站上空 x 雷达得到的云的回波较弱, K_u 雷达却能有强烈的回波,并且结构清晰。图 1 是双波长雷达垂直(仰角 87°)探测 As 云的回波, x 波段仅在 2.5 公里高度上有一层几百米厚的回波,而 K_u 雷达回波表明云厚起码在 2 公里以上,并具有三、四层结构。又如 1981 年 8 月 5 日一次层云观测,当时测站有零星小雨,反映在 PPI 扫描图上为一实心圆(图2)。穿过降水层 K_u 雷达的云回波无论在强度还是云的层次方面均比 x 雷达优越。探测仰角在 45° 以上的结果共有 90 例,其中垂直天顶观测有 29 例, K_u 雷达回波范围超过或相当 x 雷达的有 27 例,占 93%。全部 90 例中有 70 例 K_u 雷达回波范围大于或等于 x 雷达,占 78%。其中绝大部分为 As, Ac 和 Sc 。

2)近似水平方向的弱回波 低仰角观测非降水云或趋于消散的积雨云,在近距离内(30 公里左右) K_u 雷达能得到大于 x 雷达的回波,更客观反映出云体的轮廓。图 3 是 1983 年 9 月 7 日傍晚观测到一次正趋向消散,临近本站的 Cb 云体,当时地面上只感觉到稀落

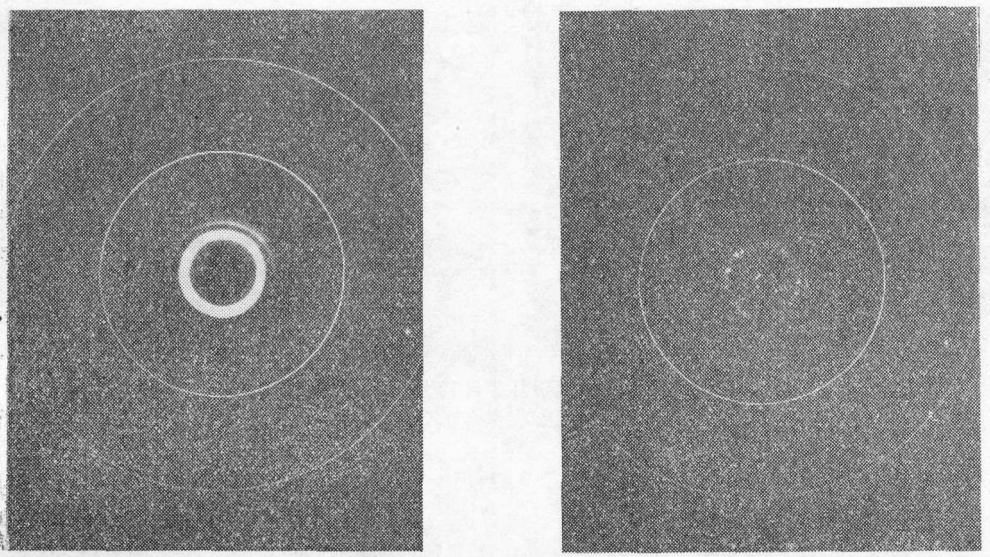


图 1 1981年7月15日21¹⁰—21²⁰高层云回波
(左图:K_a雷达,右图:X_a雷达。距离每圈10公里,仰角87°,PPI扫描,雷达增益衰减0分贝)

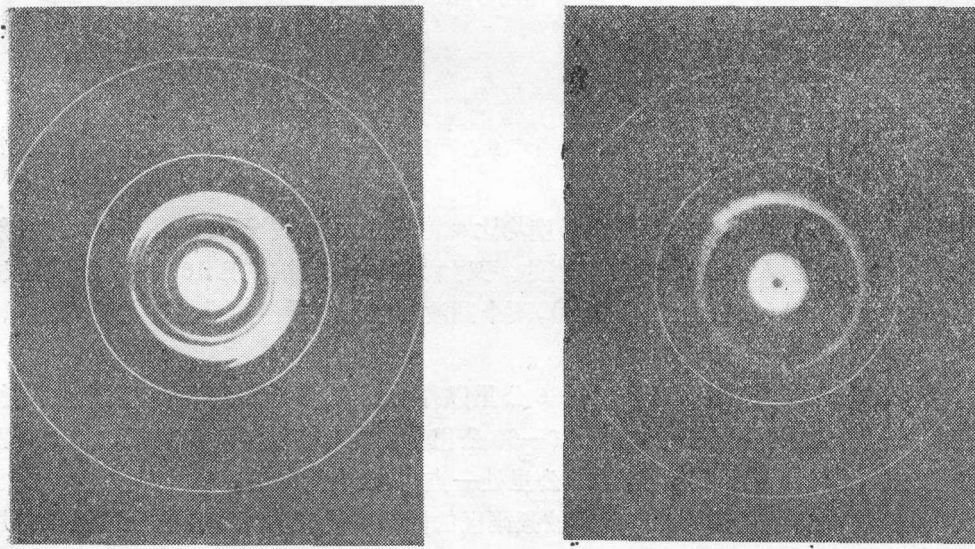


图 2 1981年8月5日6⁴⁴—6⁴⁶层云PPI回波
(说明:同图[1])

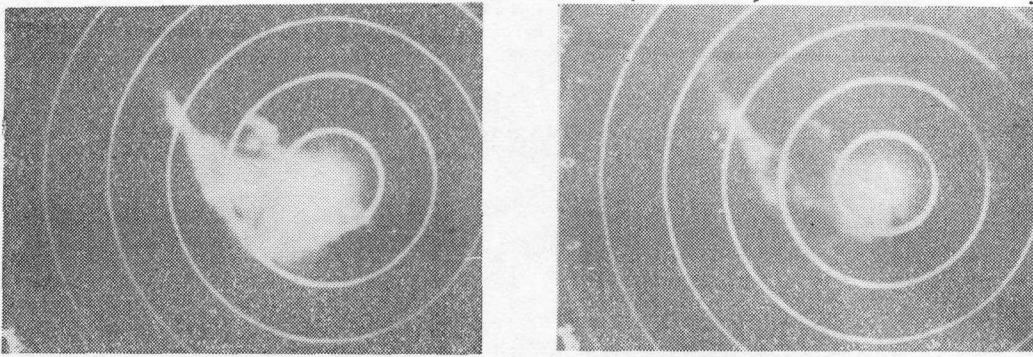


图 3 1983年9月7日 18^{58} — 18^{59} Cb回波
(仰角 6° ,其余同图1)

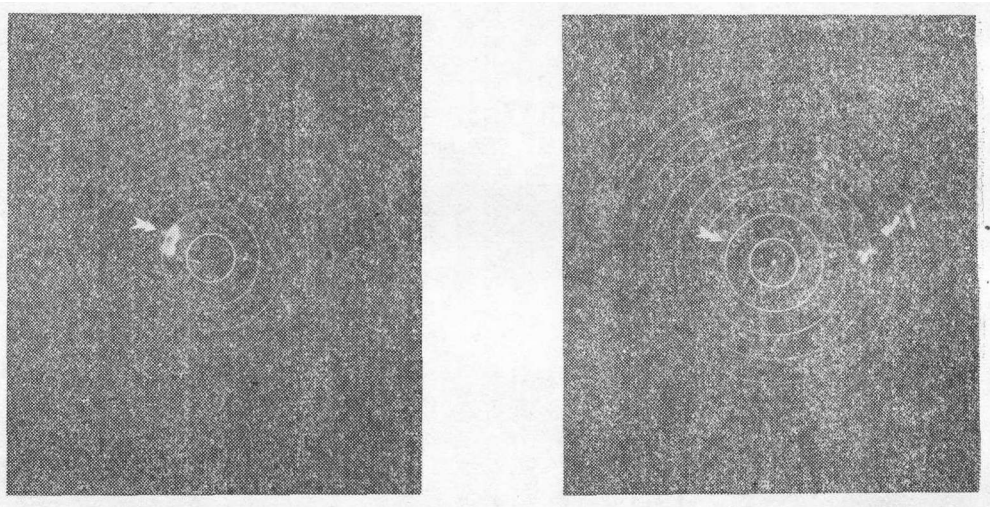


图 4 1981年7月27日 16^{35} 对流云回波对比
(仰角 3° ,其余同图1)

的两点。图中 K_u 雷达回波的范围和强度均比 x 雷达的大。实况目测 西边一大片浅黑色云体占了大半天空, K_u 雷达回波是客观的。又如 1981 年 7 月 27 日 16 时 35 分西北方 20 公里附近的消散 Cb(箭头所示, 见图 4), 两个回波的差别同样很明显。这说明 K_u 雷达探测近距离较弱回波是十分有利的。

3) 远距离云层的探测 对于 30—35 公里以外的云体, 多次观测表明, 毫米波雷达 均无能为力。图 4 的同一例子中, 东面 35—60 公里范围内有多块强对流天气, 右图 x 雷达回波反映得十分清楚, 而 K_u 雷达除 35 公里处一点, 其余全无回波。

对近距离内发展旺盛的对流云或较强雨区的回波对比表明, K_u 雷达回波的径向尺度明显比 x 雷达回波小, 回波中心偏向测站一方。

所有这些说明 K_u 雷达受路径衰减影响大, 不适合远距离探测, 对含水量大或面积宽广的云体也是不利的。

4) 淡积云和雾的探测 实际观测表明, K_u 雷达对淡积云和雾, 即使距离很近, 一般情

况下均无回波。

两个波段对比结果表明,毫米波雷达的测云能力与前述理论估计是一致的。

3. 结 语

理论计算和实验观测分析表明,我国目前器件水平条件下,8.2毫米气象雷达在探测垂直方向近距离的高层云、层积云等云的结构上已超过3厘米波长的气象雷达,即使在小雨中这种优势也能反映出来。理论计算表明,将毫米波器件的主要指标稍作改善,毫米波雷达的测云能力将有很大提高。它将在探测非降水的薄云、低云和雾方面发挥一定作用,这对机场、海防和云雾物理的研究上是很有价值的。

参 考 文 献

- [1] Richard R. Weiss, Sr., John D. Locatelli and Peter V. Hobbs, Simultaneous observations of cloud and precipitation particles with vertically pointing X-band and K-band radars, *IEEE Trans. Geosci. Electron.* GE-17, 151—153, 1979.
- [2] Pasqualucci, F., and, L. J. Miller, Dual-wavelength radar measurements of microphysical processes in clouds, *Third WMO Scientific Conference on Weather Modification*, vol. 1, 391—396, 1980.
- [3] Harper, W. G., M. Sc., Cloud detection with 8.6 Millimeter wavelength radar, *Meteor. Mag.*, 93, 337—346, 1964.
- [4] 林海、忻妙新和魏重, 双波长雷达和微波辐射计系统遥感云中含水量和降水分布的原理和实验, *大气科学*, 1984 第三期。
- [5] 周秀骥等, *大气微波辐射及遥感原理*, 46—58, 科学出版社, 1982。