

用调频雷达改善定量测雨精度的原理探讨

马振骅

刘国胜 刘炜

(大气物理研究所)

(南京气象学院)

提 要

推导了调频脉冲雷达和调频连续波雷达的雨回波功率计算公式。结果指出,如果选择中心波长在1.1—1.2厘米间的大频率跨度调频脉冲波或连续波,可以使回波平均功率唯一确定地、线性地正比于降雨率,而不论雨滴谱的形式如何。这样,就为精确遥感降雨率提供了一种方法。

一、引 言

目前,用于测量降雨量分布的气象雷达都是恒载频的脉冲波雷达。人们将来自雨区的回波信号强度换算成降水反射因子 Z ,然后通过经验的反射率—降雨率关系式来推算出降雨率。一般说来,经验关系具有下列形式:

$$Z = AR^b \quad (1)$$

式中 R 为降雨率, A 和 b 为回归常数。由于在不同类型的降雨区中,雨滴的尺度分布谱有所不同,而谱型的变化对雷达反射率和对降雨率的影响也有所不同,所以(1)式中的经验常数随雨型的不同而不同。即使对于同一种雨(对流性、稳定性、或混合性降水等),随着地理位置、季节、地形、环境气象要素或降水阶段的不同,谱型也是有所变化的;因此在实际工作中,即使按照雨型的不同而采用具有不同经验常数的回归关系式,也常难以使降雨率的测量结果达到较高的精度。用几个与雷达站相配合的遥测雨量站来实时地提供(1)式中的常数标定值,可以使雷达测雨精度有所提高,但它要求较复杂的设备,同时对于局地变化很强的降水类型来说,遥测雨量站标定方法的效果有时也不够理想。因此,寻找一种在雷达探测原理上加以改进的方法,使定量测量降雨率的结果较少受到雨滴谱变化的影响,就具有重要的实际意义。本文试图利用在不同波长上雨滴的后向散射截面不同的原理,令雷达发射脉冲中包含丰富的频率成分,各种频率分量对总的反射率起着一定的调节作用,从而使得降水体的雷达反射率对雨滴谱的依赖关系基本上与降雨率对滴谱的依赖关系相一致,这样就可得到反射率—降雨率之间唯一确定的线性关系。下面的推演表明,采用工作于一定频段内的调频脉冲雷达或调频—连续波雷达可以达到这个目的。

1982年9月29日收到。

二、原 理

为了导出调频脉冲雷达反射率与降雨率之间的关系,我们假定:

(1) 平均回波功率是单个粒子回波功率的简单叠加;即粒子的后向散射波是不相干的。

(2) 在整个有效散射体积内雨滴谱的空间分布是均匀的。

(3) 在具有一定宽度的针状波束内,天线增益是均匀的;事实上,这个假定只是为了公式推演的方便而提出的,成立与否对最后的结论并无影响。

设雷达发射脉冲功率为 P_t , 天线增益为 G , 天线的有效面积为 $A_p = C_1 \frac{\pi}{4} D_a^2$, 其中 D_a 是天线直径, C_1 是个小于 1 的常数;则雷达接收到的来自体积元 dV 的后向散射功率为 $\frac{P_t G A_p}{(4\pi r^2)^2} \eta dV$, 式中 η 是降水体的反射率, 是个与波长有关的量, r 是降水体元离雷达站的距离。

设波束宽度为 θ , 则有 $\theta = C_2 \frac{\lambda}{D_a}$, 其中 λ 为波长, C_2 为一略大于 1 的常数。在 r 远处, 有效散射体积的横截面积应为 $\frac{\pi}{4} \theta^2 r^2 = C_3 \frac{\lambda^2 r^2}{A_p}$, 其中 $C_3 = C_1 C_2^2 \frac{\pi^2}{16}$ 。因此, 长度为 $h/2$ (其中 h 是发射脉冲的空间长度) 的整个有效散射体积的回波功率在多次脉冲上的平均值为

$$P_r = \frac{C_3 P_t}{(4\pi)^2 r^2} \int_0^{h/2} G \lambda^2 \eta ds$$

其中 s 是有效散射体积内由近雷达一侧边缘算起的径向距离。根据天线理论, 对圆口径抛物面天线应有 $G \lambda^2 = 4\pi A_p$, 故而

$$P_r = \frac{C_3 P_t A_p}{4\pi r^2} \int_0^{h/2} \eta ds \quad (2)$$

因根据雷达反射率的定义, 有

$$\eta = \int_0^\infty N(D) \sigma(\lambda, D) dD \quad (3)$$

其中 D 为球形雨滴的直径, $N(D)$ 为滴谱分布密度, σ 为雨滴后向散射截面;故而

$$P_r = \frac{C_3 P_t A_p}{4\pi r^2} \int_0^\infty N(D) \int_0^{h/2} \sigma(\lambda, D) ds dD \quad (4)$$

设在雷达发射的脉冲中, 载频随时间作线性变化, 则在有效散射体积内, 波长随距离的变化可写作 $\lambda = \lambda_1 + \frac{\Delta\lambda}{\Delta s} s$, 其中 $\Delta\lambda$ 是发射脉冲内波长调制的总跨度, Δs 是有效散射体积的径向深度 (即 $\frac{h}{2}$), $\frac{\Delta\lambda}{\Delta s}$ 为一常数。这样, (4) 式可表达为

$$P_r = \frac{C}{r^2} \int_0^\infty N(D) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda, D) d\lambda dD \quad (5)$$

其中 $C = \frac{C_p P_r A_p}{4\pi} \left(\frac{\Delta f}{\Delta \lambda} \right)$, 是一与目标物性质无关的常数, λ_2 和 λ_1 分别是发射脉冲中始点和终点处的波长.

另一方面, 降雨率可表达为

$$R = \int_0^{\infty} N(D) M(D) V(D) dD \quad (6)$$

其中 $M(D)$ 是雨滴的质量, $V(D)$ 是雨滴的下降末速. 在大部分雨区中, 对降雨率和雷达反射率的贡献来自直径大于 1 毫米的雨滴; 对于这类粒子, 下落末速可表达成^[1]

$$V(D) = C_0 D^{1/2} \quad (7)$$

其中 C_0 为常数, 于是有

$$R = B \int_0^{\infty} N(D) D^{3.5} dD \quad (8)$$

其中 $B = \frac{\pi \rho C_0}{6}$, ρ 是水的密度.

比较(5)、(8)两式, 可以看出, 只要我们选择合适的波长范围, 使(5)式中的内积分项 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda, D) d\lambda$ 随水滴直径 D 的变化遵循正比于 $D^{3.5}$ 的形式, 譬如说可表达为

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda, D) d\lambda = E D^{3.5}$$

其中 E 为一常数, 则(5)式可写作

$$P_r = \frac{CE}{r^2} \int_0^{\infty} N(D) D^{3.5} dD \quad (9)$$

与(8)式比较, 可知应有

$$P_r = \frac{CE}{B r^2} R \quad (10)$$

因 CE/B 为常数, 故而回波功率与降雨率之间有唯一确定的线性关系, 而与雨滴谱的形式无关; 这样就消除了谱型变化对测量结果精确性的影响, 这正是这个研究希望得到的结果.

三、中心波长的选择

为了估计所应该选择的合适波段的位置, 我们先寻求某一单波长值, 使在此波长上的雨滴后向散射截面 $\sigma(\lambda, D)$ 值随雨滴直径的变化比较接近于 $D^{3.5}$ 关系. 然后以此波长为中心, 选择合适的波长范围, 使之满足前述要求.

在图 1 中画出了几种波长下的后向散射截面随水滴直径的变化. 可以看出, 在波长较长时, 变化规律具有 Rayleigh 散射的性质, 即后向散射截面近乎正比于 D^6 . 而当波长减短时, 尽管后向散射截面随直径的变化并不符合 D^6 的规律, 但 σ 随直径变化的平均陡度减小, 因而可望找到一合适的中心波长.

为了定量地找出具有近似 $D^{3.5}$ 关系的中心波长, 我们对每一种波长下 $\sigma(\lambda, D)$ 随 D 的变化关系用形状为 βD^a 的曲线去拟合, 并使各直径上的实际 σ 值与拟合曲线之间具

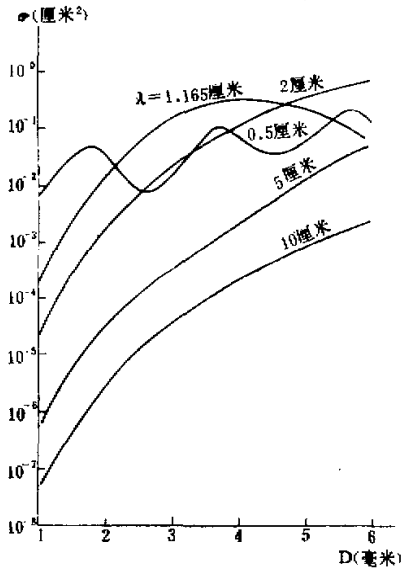


图1 几种波长下的水滴后向散射截面 $\sigma(\lambda, D)$ 随水滴直径 D 的变化; 水滴温度 10°C

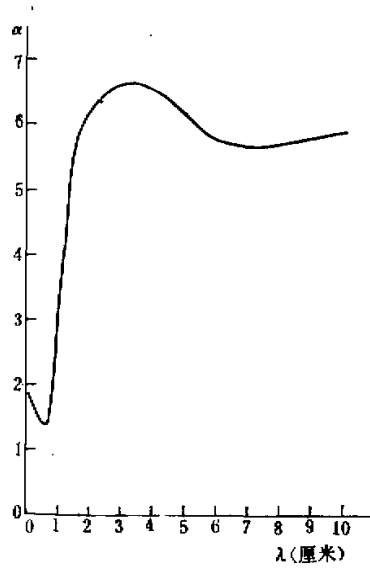


图2 拟合曲线斜率 α 随波长的变化

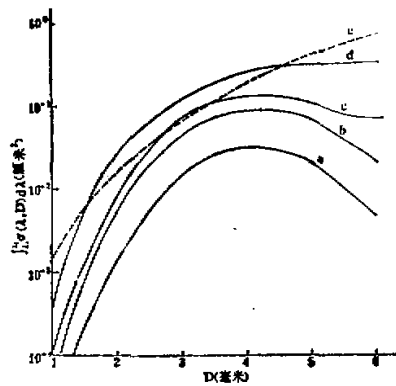


图3 积分 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda, D) d\lambda$ 随水滴直径 D 的变化曲线, 及相应的 $D^{3.5}$ 关系拟合曲线

a. $\lambda_1 = 1.1$ 厘米, $\lambda_2 = 1.2$ 厘米; b. $\lambda_1 = 1$ 厘米, $\lambda_2 = 1.31$ 厘米; c. $\lambda_1 = 0.89$ 厘米, $\lambda_2 = 1.40$ 厘米; d. $\lambda_1 = 0.65$ 厘米, $\lambda_2 = 1.75$ 厘米; e. 与 d 相应的拟合曲线 $4.36D^{3.5}$.

有最小均方差. 这样得到的拟合曲线在 $\lg \sigma \sim \lg D$ 坐标系中的斜率即为 α . 显然, 所选择的中心波长应具有接近于 3.5 的斜率. 在雨滴直径范围为 1—6 毫米的情况下, 所得到的 α 随波长的变化如图 2 所示.

从图可见, 斜率 3.5 出现在波长为 1.1—1.2 厘米间. 因此, 我们选择的波长调制范围将以此区间为中心. 同时, 为了照顾到微波振荡器件频率调制范围的现实可能性, 我们在

计算中考虑的波长变化范围皆不超出中心波长的 $\pm 50\%$ 区间^[2]。

对于选定的几种波长范围, 我们计算了各种直径水滴的后向散射截面在这些波长区间内的积分值 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda, D) d\lambda$, 其部分结果见图 3。对于这类曲线, 也用类似于单波长下的方法, 计算了相应的状如 βD^n 的拟合曲线。在表 1 中列出了某几种波长区间相应的拟合曲线斜率。

表 1 各种波长区间的拟合曲线斜率

波 长 区 间		拟合曲线斜率
λ_1 (厘米)	λ_2 (厘米)	
1	1.31	3.50621
0.89	1.4	3.50413
0.795	1.5	3.50641
0.65	1.75	3.49833

虽然从表 1 看来, 对于所选择的几种波长区间, 相应的拟合曲线都具有极为接近于 3.5 的斜率, 但是图 3 表明, 实际的 $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda, D) d\lambda - D$ 曲线仍相当偏离 $D^{3.5}$ 关系, 呈现出并非单调递升的趋势。但当波长的调制范围较大时, 曲线就接近于 $D^{3.5}$ 关系了。这是由于每种波长下的后向散射截面随雨滴直径变化的规律是有差异的, 波长积分的范围越大, 平滑的程度越高, 从而消除掉在某些直径上出现的 σ 极大值, 使整个曲线呈单调递升的变化, 且符合 $D^{3.5}$ 关系。

四、模 拟 检 验

下面计算某些谱型的降水体对调频与非调频脉冲雷达的反射率, 并加以比较, 以考察调频所带来的好处。

对于恒载频脉冲雷达, 由(2)式可有

$$P_r = \frac{C_p P_t A_p h}{8\pi r^2} \eta \quad (11)$$

因此回波功率与雨区反射率成正比。

假设雨滴谱为下列指数形式:

$$\begin{aligned} N(D)dD &= N_0 e^{-\lambda D} dD \quad \text{当 } 1 \text{ 毫米} \leq D \leq 6 \text{ 毫米} \\ N(D)dD &= 0 \quad \text{其他直径} \end{aligned}$$

选定任一组谱参数 N_0 及 λ , 就可通过(8)式计算出降雨率(取 $\rho = 1$ 克/厘米³, $C_0 = 1300$ 厘米³/秒), 并可通过(3)式计算出单波长下的反射率。当 N_0 取 0.02, 0.06 或 0.1 厘米⁻⁴ 时, 在波长为 5.6 厘米下得到的 $\eta-R$ 关系如图 4 所示。对于 3.2 厘米波长, 也有相似的三条曲线, 只是纵坐标值不同而已。可以看出, 对于这两种气象上常用波长中的任一种, 在同样的降雨率下, 由于雨滴谱形的不同, 所造成的反射率会有很大的变化。在上述三种谱型下, 反射率相差可达一倍多。实际降水中的谱型变化, 可能造成更大的反射率差

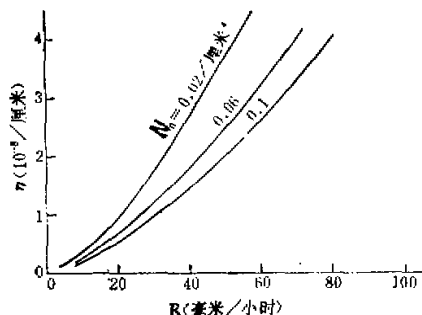


图4 波长为 5.6 厘米时,与三种雨滴谱型对应的反射率—降雨率关系

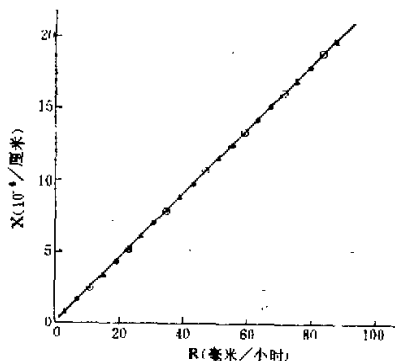


图5 在三种雨滴谱型下,调频反射率与降雨率之间的关系

▲—— $N_0 = 0.02$ 厘米 $^{-4}$, ○—— $N_0 = 0.06$ 厘米 $^{-4}$,
●—— $N_0 = 0.1$ 厘米 $^{-4}$ 。

异。

在调频脉冲雷达情况下,回波功率由(5)式表达。为了使被比较量能与非调频情况下的反射率 η 取得一致的量纲,我们可将(5)式改写作

$$P_r = \frac{C'}{r^2} X \quad (12)$$

其中

$$C' = C \Delta \lambda = \frac{C P_t A_p \Delta s}{4\pi}$$

$$X = \frac{1}{\Delta \lambda} \int_0^\infty N(D) \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda, D) d\lambda dD \quad (13)$$

X 具有与反射率 η 同样的量纲,可称之为调频反射率。当选择波长调制范围为 0.65—1.75 厘米时,在前述三种谱型下计算得到的 X - R 关系如图 5 所示。所有的点几乎都恰恰落在同一条直线上,相关系数达到 0.9997。这说明,使用大偏移的调频脉冲雷达测量降雨时,回波反射率与降雨率之间存在唯一确定的极好的线性关系,而不论雨滴谱型是怎样的。

五、讨 论

前面从原理上证实了采用高载频、大跨度的调频脉冲雷达提高测雨精度的可能性,下面对一些有关问题作简短的讨论。

1. 在前面,为了简明地阐述原理,我们通过讨论调频脉冲雷达回波功率特性的方法,来证实回波功率和降雨率之间可望存在唯一的良好线性关系。但是,进一步考虑就可以想到,要接收包含如此宽频带的脉冲回波,接收机本身就必须具有相应的宽通带,而这样宽的通频带所带来的大噪声可能会掩盖掉雨区的弱回波信号,在脉冲工作方式下,采用脉

冲压缩和信号积分等提高信噪比的方法,可以在一定程度上解决这个问题,但是更恰当的办法是采用调频-连续波的工作方式。因为在调频-连续波的工作状态下,可以做到使接收机谱分析仪对回波信号与本征参考信号所构成的拍频信号有极佳的频率选择性。极窄的通频带保证了接收机具有很高的灵敏度。调频连续波雷达的距离分辨率是由谱分析仪的滤波器通频带宽度决定的^[3]。假定距离分辨率为 ΔH , 则类似于引出脉冲雷达回波功率表达式(2)式的过程,可以得到调频-连续波雷达接收到来自 ΔH 区间的回波功率为

$$P_r = \frac{C_p P_t A_p \Delta H}{4\pi r^2} \eta(\lambda) \quad (14)$$

因为在调频-连续波雷达的一次发射-接收周期内,任一固定距离上的 ΔH 区间的散射波的频率是有变化的,故而(14)式中散射介质反射率也是时间的函数。在一次发射-接收周期内,来自该区间的平均回波功率为

$$\bar{P}_r = \frac{C_p P_t A_p \Delta H}{4\pi r^2 T} \int_0^T \eta(\lambda) dt \quad (15)$$

上式中 t 为时间, T 是调频发射信号的持续时间。

设发射信号的波长线性调制率为 $\frac{d\lambda}{dt} = \frac{\Delta\lambda}{T}$, 其中 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$ 是波长的总变化跨度,则(15)式可写作

$$\bar{P}_r = \frac{C_p P_t A_p \Delta H}{4\pi r^2} \cdot \frac{1}{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \eta(\lambda) d\lambda = \frac{C''}{r^2} X \quad (16)$$

其中 $C'' = \frac{C_p P_t A_p \Delta H}{4\pi}$, X 的表达式仍如(13)式所示。(16)式与脉冲工作状态下导出的平均回波功率表达式(12)相比较,可知两者具有一样的形式。所以前面在脉冲工作状态下所得到的结论对于调频-连续波雷达同样适用,即具有合适跨度的调频-连续波雷达接收到的平均回波功率将正确地正比于降雨率。同时由于在调频连续波的工作方式下,窄通带滤波器的作用,使接收机具有很高的灵敏度,可将信号从噪声背景中鉴别出来。

2. 前面在原理论述部分引出的结论是: 要适合于测量 1—6 毫米雨滴直径范围内的降水,必须采用波长为 1 厘米附近的大频率覆盖度的调频波。显而易见,波长这样短的电磁波在雨区中的衰减比较严重,而这个缺点是难以克服的。因此,上述方法不能适应于测量大范围降水。但是,用来测量近距离内的降水,或测量不盖过本站的雨区近侧边缘部分的降水,还是可以得到较正确的结果。这样的测量也是有意义的;因为,这种测量可以作为雨量遥感的方法之一,来取代传统的雨量计,而得到雨量的标定基准值。

六、结 论

应用雨滴对不同波长的电磁波有不同的后向散射截面的特性,使雷达发射信号中包含较宽的频谱,从而达到在不论雨滴谱型为如何形式的情况下,使回波信号功率与降雨率间存在唯一确定的线性关系,以改善雷达的测雨精度。理论研究表明,采用短厘米、大频偏的调频(脉冲或连续)波是可以达到此目的的,但由于介质衰减的严重影响,不能用来测量大范围降雨。

参 考 文 献

- [1] Spilhaus, A. F., Drop size, intensity, and radar echo of rain, *J. Meteor.* 5, 161—164, 1948.
[2] Skolnik, M. I., Radar handbook, McGraw-Hill Co., Chap. 20, P. 14, 1970.
[3] Richter, J. H., High resolution tropospheric radar sounder, *Radio Sci.*, 4, 1261—1268, 1969.

PRINCIPLE STUDY OF THE FM RADAR FOR IMPROVING THE ACCURACY IN QUANTITATIVE RAINFALL-RATE MEASUREMENT

Ma Zhenhua

(*Institute of Atmospheric Physics*)

Liu Guosheng Liu Wei

(*Nanjing College of Meteorology*)

Abstract

The equations for estimating the echo power from rain when either a FM-pulsed radar or a FM-CW radar is used are derived. The results show that, with an adequate frequency range selected, rain echo power may have a value which correlates well linearly with the rainfall-rate, irrespective of the pattern of drop-size spectrum. Thus, it provides good remote sensing data for rainfall-rate measurement.