

距离积分式天气雷达数字视频积分 处理器的积分精度

庄荫模 程箴荣

(南京大学大气科学系)

提 要

分辨率比较高的距离积分式天气雷达 DVIP 的积分精度是探测距离和方位的函数, 无法确切地和简单地描述. 为了便于描述和进一步的分析研究, 本文根据坐标转换后直角坐标网格内距离积分数据的数目随径向距离变化比较大, 随切向方位变化比较小的特点, 用方位平均的数据建立了距离积分式天气雷达视频积分处理器平均回波强度标准差的理论公式. 根据网格内数据数随方位变化的范围, 本文估计了用新得出的标准差理论方程计算平均回波强度标准差可能引起的误差. 利用得到的距离积分式积分精度方程, 本文给出了南京大学大气科学系、1014 研究所、江苏省气象局等单位合作研制的 DVIP 的积分精度, 并具体分析了由于采用径向和方位取样加密, 该距离积分式 DVIP 的平均回波强度标准差减小的情况.

一、引 言

为了得到比较精确的降水回波平均强度, 60 年代开始设计研制的天气雷达视频信号积分处理器(VIP 或 DVIP)采用距离积分加方位积分的方法来保证平均需要的统计样本的数目. 考虑到方位积分的波束展宽效应造成大型雷达天线作用的降低, 70 年代加拿大 McGill 大学设计研制了不进行通常方位积分的距离积分式 DVIP. 为了提高数字雷达的探测空间分辨率, 南京大学大气科学系、1014 研究所、江苏省气象局最近合作研制的 DVIP 采用了 McGill 大学的方案.

在距离积分式积分器中, 为了增加积分的样本数, 除了和距离-方位积分式 DVIP 一样进行距离积分以外, 在不额外地增加波束展宽效应的条件下, 在极坐标转换成直角坐标, 数据网格化的过程中, 对堆积在同一网格内的距离积分后的许多数据, 不采取只保留一个, 抛弃多余的数据的办法(一些距离-方位积分式是这样处理的), 而是取网格内所有数据的平均值. 这样, 距离积分式(为了区别于一般距离-方位积分式 DVIP, 我们简称它为距离积分式)DVIP 积分的样本数就会大大增加, 而等于距离积分的样本数和网格内平均的数据数的乘积. 由于这个乘积随距离、方位的不同而变化, 距离积分式 DVIP 的积分精度是距离、方位的复杂函数, 很难确切地和简单地描述, 因此现有距离积分式 DVIP 的积分精度是多少, 是一个无法确切回答的问题. 为了便于对不同 DVIP 的积分精度进行比较和研究改进, 需要搞清楚距离积分式 DVIP 积分精度的分布规律, 具体地确定出现有距离积分式 DVIP 的积分精度, 并且希望它的分

布规律比较简单, 便于说明、比较.

二、距离积分式 DVIP 积分精度的理论公式

根据小平信彦的工作^[1], 当参加积分的独立样本数 $K_1 \geq 10$ 时, 平均回波强度的误差可以表示成 $\pm 1.96 \sigma \text{ dB}$ (95% 的信度区间). 其中

$$\sigma = \frac{\sigma_1}{\sqrt{K_1}} \text{ dB} \quad (1)$$

式中 σ 是平均回波强度的标准差; σ_1 是未平均的信号强度的标准差, $\sigma_1 = 5.57 \text{ dB}$.

如上面所说, 距离积分式 DVIP 积分的独立样本数 K_1 和其距离积分的独立样本数 K_{1l} 、网格内距离积分后的不相关的数据数 K_{Dl} 的关系为

$$K_1 = K_{1l} \cdot K_{Dl} \quad (2)$$

对于连续的距离平均, 其有效独立样本数 K_{1l} 由下式表示^[2]

$$K_{1l} = \frac{6K_1^2}{4K_1 - 1} \quad (3)$$

式中

$$K_1 = \frac{L}{\frac{1}{2} \tau c} \quad (4)$$

这里 L 是距离积分的距离库长度, τ 是脉冲宽度, c 是电波传播速率.

对距离积分式 DVIP, 需要解决的新问题是 K_{Dl} 服从什么样的规律?

在把距离积分后离散的雷达极坐标探测数据转换到计算机显示终端的直角坐标网格中去的时候, 落入网格中的数据个数不但随离雷达的距离增大而减少, 而且在同一距离上不同方位网格内数据的数目也不一样, 即网格内的数据数 $N_D(r, \varphi)$ 是距离 r 和方位 φ 的函数. 坐标转换后不同网格尺度下, 每个网格内的 $N_D(r, \varphi)$ 值可以由计算机统计、打印成 $N_D(r, \varphi)$ 分布图^[3]. 分析 $N_D(r, \varphi)$ 图上 $N_D(r, \varphi)$ 的分布规律可见 (图太大、缩小后字符不清楚, 图略), $N_D(r, \varphi)$ 随距离的变化比较大, 而随方位的变化相对比较小, 为了使问题的处理比较简单和能得到比较简单的积分精度的分布规律, 我们尝试了用不同距离上方位平均的网格内的数据数来代替实际 $N_D(r, \varphi)$ 值计算积分精度.

如图 1 所示, 设圆的中心为雷达站, 在距离 r 处有一宽度为 Δr , 面积为 $2\pi r \Delta r$ 的圆环形面积, 则将圆环面积内距离积分后的数据的总数和圆环面积相除, 就得到平均单位面积上的数据数. 只随距离变化的 $D \times D$ 网格内的平均数据数 $N_D(r)$ 可用下式表示:

$$N_D(r) = \frac{v \cdot \frac{1}{L} \cdot \Delta r \cdot D^2}{2\pi r \Delta r} = \frac{v D^2}{2\pi r L} \quad (5)$$

式中 v 是天线扫描一周时的方位取样总数。

虽然利用落在网格内的距离积分后的数据进行再次平均不会象通常的方位积分那样在网格之外产生额外的波束展宽效应和降低分辨率, 但是网格内的数据来自不同的方位, 对它们进行平均实质上也是一种方位平均, 因而必需考虑相邻方位样本是否独立的问题。设样本独立的时间为 t_c 秒, 天线转速为 Mv/min , 则样本独立的条件应该是

$$\frac{6}{Mv} \times 10^4 \geq t_c \quad (6)$$

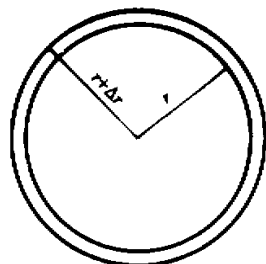


图1 环形面积示意图

对于雨, 式中 $t_c = 1.71 \times 10^{-3} \lambda \text{ (s)}^{[4]}$, 这里的 λ 是波长 (cm)。当天线转速和方位取样总数的乘积满足(6)式的关系时,

$$N_D(r) = K_{D1} \quad (7)$$

利用式(7)、(5)、(3)、(2)和(1)的关系, 得连续进行距离积分的距离积分式 DVIP 平均回波强度标准差 σ 为

$$\sigma(r) = \frac{3.21}{DK_1} \left[\frac{\pi L (4K_1 - 1)r}{v} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

注意, (6)式是使用(8)式计算 $\sigma(r)$ 必需满足的条件。在(6)式的关系不满足时, 必需考虑(5)式的 $N_D(r)$ 中有多少有效独立样本。

根据文献[5], 在

$$\frac{6}{Mv} \times 10^4 < t_c \quad (9)$$

的条件下, 有效独立样本数 $N_{De}(r)$ 和 $N_D(r)$ 以及取样周期 t_0 之间的关系为

$$N_{De}(r) = N_D(r) \left/ \left[1 + \frac{2}{N_D(r)} \sum_{i=1}^{N_D(r)} (N_D(r) - i) \rho(it_0) \right] \right. \quad (10)$$

式中

$$\rho(t_0) = e^{-\left(\frac{4\pi\sigma_v t_0}{\lambda}\right)^2} \quad (11)$$

(11)式中 σ_v^2 是多普勒速度谱的均方差, 对于雨可取 $\sigma_v = 1 \text{ m/s}$ 。

用 $N_{De}(r)$ 代替(2)式中的 K_{D1} , 由式(3)、(2)和(1)的关系, 得

$$\sigma(r) = \frac{2.27}{K_1} \left\{ \frac{4K_1 - 1}{N_D(r)} \left[1 + \frac{2}{N_D(r)} \sum_{i=1}^{N_D(r)} (N_D(r) - i) \rho(it_0) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

当距离积分的回波信号来自互相不重迭的波束空间时, 得到的是独立样本, 这时

$$\sigma(r) = 13.96 \left(\frac{Lr}{K_{v1} v D^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{当 } \frac{6}{Mv} \times 10^1 \geq t_c \quad (13)$$

或

$$\sigma(r) = 5.57 \left[\frac{1 + \frac{2}{N_D(r)} \sum_{i=1}^{N_D(r)} (N_D(r) - i) \rho(it_0)}{K_{r,i} N_D(r)} \right]^{\frac{1}{2}},$$

$$\text{当 } \frac{6}{Mv} \times 10^1 < t_c \quad (14)$$

三、对 $\sigma(r)$ 公式精确程度的估计

用不同距离上方位平均的网格内的样本数代替不同距离、不同方位网格内的样本数计算 σ ，即用 $N_D(r)$ 、 $\sigma(r)$ 来代替 $N_D(r, \varphi)$ 、 $\sigma(r, \varphi)$ ，这样把复杂的情况简化，对理论处理和性能描述都有很大的好处。但是，问题是这样的简化会产生多大的误差？下面先看用 $N_D(r)$ 代替 $N_D(r, \varphi)$ 的误差，然后再看用 $\sigma(r)$ 代替 $\sigma(r, \varphi)$ 的误差。

以南京大学大气科学系等单位研制的距离积分式 DVIP 为例，(5) 式中的有关参数是： $L = 1 \text{ km}$ ， $D \times D = 1 \times 1 \text{ km}^2$ ， $2 \times 2 \text{ km}^2$ ， $4 \times 4 \text{ km}^2$ ， $v = 1024$ ^[3]。由(5)式可以计算出不同距离上 $N_D(r)$ 的值。此外，根据计算机统计的实际 $N_D(r, \varphi)$ 分布，表 1 列举了几个特定距离上的 $N_D(r)$ 理论值(用(5)式计算出来的)和用实际 $N_D(r, \varphi)$ 分布计算出来的方位平均值 $\overline{N_D(r, \varphi)}$ ，以及该距离上 $N(r, \varphi)$ 值变化的范围。

表 1 $L = 1 \text{ km}$ ， $v = 1024$ ，不同尺度网格下 $N_D(r)$ 、 $\overline{N_D(r, \varphi)}$ 和特定 r 值下 $N_D(r, \varphi)$ 的变化范围

$D \times D (\text{km}^2)$	$r = 100 \text{ km}$			$r = 200 \text{ km}$		
	$N_D(r)$	$\overline{N_D(r, \varphi)}$	$N_D(100, \varphi)$ 值的变化范围	$N_D(r)$	$\overline{N_D(r, \varphi)}$	$N_D(200, \varphi)$ 值的变化范围
4×4	26.0	26.1	24—29	13.0	13.1	12—15
2×2	6.5	6.5	5—8	3.3	3.2	2—4
	$r = 40 \text{ km}$			$r = 160 \text{ km}$		
	$N_D(r)$	$\overline{N_D(r, \varphi)}$	$N_D(40, \varphi)$ 值的变化范围	$N_D(r)$	$\overline{N_D(r, \varphi)}$	$N_D(160, \varphi)$ 值的变化范围
1×1	4.1	4.3	3—5	1.0	1.0	0—2

由表 1 的结果可见，公式(5)给出的理论平均值 $N_D(r)$ 的距离分布和 $N_D(r, \varphi)$ 的实际方位平均值 $\overline{N_D(r, \varphi)}$ 的分布很一致。此外，在近距离大网格的情况下 $N_D(r, \varphi)$ 值偏离方位平均值相对比较大，但是由于这时 $N_D(r)$ 值大，偏离平均值的相对百分比反而小，在远距离小网格的情况下， $N_D(r, \varphi)$ 偏离 $N_D(r)$ 相对比较小，但是由于这时 $N_D(r)$ 的数值小，偏离平均值的相对百分比反而比较大。为了能够用计算机统计出来的 $N_D(r, \varphi)$ 的实际值或表 1 中 $N_D(r, \varphi)$ 值随方位变化的范围的数据估计用 $N_D(r)$ 代替 $N_D(r, \varphi)$ 引起的 σ 的误差，下面仍以南京大学大气科学系等单位研制的距离积分式 DVIP 为例，并使用 713 雷达的参数进行 σ 的误差的估计。

对 713 雷达， $\lambda = 5.66 \text{ cm}$ ，样本独立时间的理论值为 $9.7 \mu\text{s}$ 。按(6)式的关系，天线转速最大可达 6 r/min ，(6)式仍能满足。这样我们可以使用式(5)、(3)、(2)和(1)的关系求 $\sigma(r)$ 和求 $\sigma(r)$ 的误差。并且这时有

$$\frac{d\sigma}{\sigma} = - \frac{dN_D(r)}{2N_D(r)} \quad (15)$$

的关系。

根据(15)式和表1中 $N_D(r, \varphi)$ 随方位变化范围的数据, 得到了表2中所列的几个不同距离上 $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ 的数据。由表2的结果可见: (1)用(8)式和(13)式计算的 σ 值, 在网格尺度比较大时误差相对比较小, 而在网格尺度比较小时误差相对比较大。(2)在同一网格尺度下, 近距离误差范围比较小, 远距离误差范围相对比较大。(3)表2中存在负值误差, 即存在 $\Delta\sigma = \sigma(r, \varphi) - \sigma(r) < 0$ 时用(8)式和(13)式计算出的 σ 值偏高的情况。显然实际 $\sigma(r, \varphi)$ 值比理论 $\sigma(r)$ 值小, 这种情况对实际应用有利。因此真正值得注意的是正值误差, 这时 $\sigma(r, \varphi) > \sigma(r)$, 用 $\sigma(r)$ 去代替 $\sigma(r, \varphi)$, 平均回波强度的标准差被低估了。(4)表2中 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 网格160km距离上 $\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$ 的正值达50%。必需说明的是50%的正误差是一种假象, 它对应于表1中 $N_D(r, \varphi) = 0$ 的情况。 $N_D(r, \varphi) = 0$ 的网格是没有数据的“空洞”, 这时网格内平均回波强度的数值不是由直接观测得到的, 而是用相邻网格内的观测值通过内插得到的, 因而这种网格内的平均回波强度根本不存在自己独立积分精度的问题, $\Delta\sigma/\sigma = 50\%$ 在这里没有意义。(5)根据上面的情况和分析可以看出, 真正值得注意的有意义的最大误差的情况是: $4 \times 4 \text{ km}^2$ 网格, 100km处 σ 的最大相对误差为+3.8%, 200km处为+7.7%; $2 \times 2 \text{ km}^2$ 网格, 100km处为+11.5%, 200km处为+10.6%; $1 \times 1 \text{ km}^2$ 网格, 40km处为+11%, 160km处和以外不再存在正误差。为了更简单地说明误差的大小, 根据上面的情况可以说有不利影响的最大误差为+11.5%。考虑到大多数网格的 $N_D(r, \varphi)$ 值等于和接近其平均值 $N_D(r)$, 真正具有上述最大误差的网格只是少数, 因此本文提出的用理论 $N_D(r)$ 关系代替实际 $N_D(r, \varphi)$ 分布进行积分精度的简化计算是有意义的。

表2 几个特定距离下的 $\Delta\sigma/\sigma$ 值的变化范围

$D^2 (\text{km}^2)$	4 × 4		2 × 2		1 × 1	
$r (\text{km})$	100	200	100	200	40	160
$\frac{\Delta\sigma}{\sigma}$	-5.7% +3.8%	-3.8% +7.7%	±11.5%	-19.7% +10.6%	-13% +11%	±50%

四、距离积分式 DVIP 积分精度的计算和比较

有了距离积分式平均回波强度标准差的简化表达式(8)、(12)、(13)、(14)等式, 就能比较简单地给出距离积分式 DVIP 的积分精度, 和能够方便地比较不同的设计参数及积分精度不同的情况。

现在我们可以简单地用上面得到的积分精度公式来计算南京大学大气科学系等单位研制的距离积分式 DVIP 的积分精度。把该 DVIP 的有关参数和 713 雷达的有关参数代入(8)式, 并且把 1km 距离库长内的 16 次取样看成是连续的距离积分, 这样可以用(8)式计算出用于 713 雷达的南京大学大气科学系等单位研制的距离积分式 DVIP 的积分精度(用 σ 表示)如表3所示。

表 3 713 雷达距离积分式 DVIP 的积分精度

$\sigma(r)$ (dB) D^2 (km ²) r (km)	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
4×4	0.19	0.27	0.33	0.38	0.43	0.48	0.52	0.55	0.58	0.61	0.64	0.67
2×2	0.30	0.55	0.67	0.77	0.86	0.96	1.04	1.09	1.16	1.21	1.27	1.40
1×1	0.77	1.09	1.34	1.56	1.74	1.93*	2.11*	2.20*	2.20*	2.20*	2.20*	2.20*

表中注 * 号的数据的样本数小于 10, σ 值只供参考。

表 3 的结果比较简单明了地显示出: 713 雷达距离积分式 DVIP 积分精度在不同网格尺度下随距离变化的基本情况。这里 $4 \times 4 \text{ km}^2$ 网格, 直到 240 km, $\sigma < 0.7 \text{ dB}$ 。在 100 km 以内, $\sigma \leq 0.4 \text{ dB}$, 积分精度很高。 $2 \times 2 \text{ km}^2$ 网格 $\sigma \leq 1 \text{ dB}$ 的距离为 140 km, 一般定量测量的距离也大体在这一距离范围内。 $1 \times 1 \text{ km}^2$ 网格 $\sigma \leq 1 \text{ dB}$ 的距离小于 40 km。在 160 km 距离上 σ 达最大值 2.2 dB, 即在高分辨情况下, 积分精度仍比较低。

利用已经得到的距离积分式 DVIP 积分精度的公式可以十分方便地对不同参数的 DVIP 的积分精度进行分析比较计算。若在其它参数相同的情况下, 由 (8) 式可以得到

$$\frac{\sigma(v_A)}{\sigma(v_B)} = \left(\frac{v_B}{v_A} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

即 $\sigma(r)$ 值的大小和 v 值成平方根反比。因此很容易估计出, 和一些 $v = 256, 360$ 的距离积分式 DVIP 相比, 取 $v = 1024$, $\sigma(1024)$ 的值将分别为 $\sigma(256)$, $\sigma(360)$ 值的 $\frac{1}{2}$ 和 $\frac{1}{1.7}$, 即 σ 值减小了 50% 和 41%。

由 (8) 式和 (13) 式相比, 可得连续进行距离积分和距离积分时只进行不连续的独立取样的标准差的比值为

$$\frac{\sigma(K_1)}{\sigma(K_{r1})} = \frac{0.41}{K_1} (4K_1 - 1)^{\frac{1}{2}} K_{r1}^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

由 (4) 式可见, 在距离库内进行的 K_1 次取样是独立取样。对 713 雷达, 近似认为 1 km 的距离库内可以进行 4 次独立取样, 即取 $K_{r1} = 4$, 而 $K_1 = 3.3$, 这样得 $\frac{\sigma(K_1)}{\sigma(K_{r1})} = 0.87$ 。即对 713 雷达, 在 1 km 库长的情况下, 连续进行距离积分比只取 4 次样进行距离积分, $\sigma(r)$ 值可减小 13%。南京大学等单位研制的距离积分式 DVIP 使用加密方位取样 (v 提高到 1024) 和增加距离积分的样本数这两个方法, 使距离积分式 DVIP 的积分精度有不同程度的提高。

参 考 文 献

- [1] Kodaira, N., 1960, The characteristics of the averaged echo intensity received by the logarithmic I. F. amplifier, *Proc. 8th Weather Radar Conf.*, 255 — 261.
- [2] 马振骅等, 1986, 气象雷达回波信息原理, 科学出版社, 76 — 79.
- [3] 南京大学大气科学系, 1014 研究所, 江苏省气象局, 1986, 713 天气雷达数字处理系统研制报告, 17 — 19.
- [4] Atlas, D., 1964, *Advances in Radar Meteorology, Advances in Geophysics*, Vol. 10, Academic Press, New York, 318 — 478.
- [5] Lhermitte, R. M. and Kessler, E., 1965, An integrator for weather radar signal, *Proc. International Conf. on Cloud Phys.*, Tokyo and Sapporo, 302 — 307.