

# 机载测雨雷达两种反演方法的优化和综合利用的模拟研究

王连仲 窦贤康

中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026

**摘 要** 由于机载雷达的天线不能做得太大, 如果想获得一个较好的束向分辨率, 就不得不使用 X 波段的频率, 而该波段的电磁波穿过雨区时会受到衰减, 直接利用视反射率进行降水反演就会产生很大的误差, 因此, 衰减效应必须进行校正。两种降水反演方法——立体雷达方法和双束算法, 在实际的反演中各有优缺点。立体雷达方法对边界条件要求高, 而双束算法在雨团中心雨强大处会有较大的误差。引入权重因子后的立体雷达方法-双束算法(综合算法)能充分发挥两种方法的优点, 从而更具适用性和准确性。

**关键词** 立体雷达方法 双束算法 权重因子

**文章编号** 1006-9895(2007)02-0265-08

**中图分类号** P413

**文献标识码** A

## A Simulation Study of Two Algorithms Optimization and Application for the Airborne Rain Radar

WANG Lian-Zhong and DOU Xian-Kang

*School of Space and Earth Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

**Abstract** The airborne radars have good maneuverability and can easily follow the observed phenomena and allow scanning meteorological systems in place where ground-based radars are not easy to operate (i. e. oceans). On the other side, the size of the airborne rain radars' antennas is difficult to be made large enough, so radars use an X-band frequency. However, the electromagnetic wave on the frequency is attenuated through rain, thus algorithm should be studied to correct for the attenuation effect. The dual-beam algorithm and the stereoradar analysis have obvious shortcoming in different conditions. The stereoradar analysis needs to get the required boundary conditions where the 'true' reflectivity is known. And the dual-beam algorithm cannot provide reliable estimates for reflectivity at the cell center. It is an ideal means that the final result is composed of difference proportion of the dual-beam algorithm and the stereoradar analysis. The proportion of retrieval result by dual-beam algorithm is more than that by stereoradar analysis at the cell boundary. And the proportion of retrieval result by stereoradar analysis is more at the cell center. It is called the hybrid algorithm. In the hybrid algorithm, a normative weighting factor is used. It changes along with the PIA (Path-Integrated Attenuation) difference. The weighting factor has a very good corresponding relation with the rain rate. The factor is the maximum value when the rain rate is the minimum value. Then the factor reduces with the rain rate increasing. All algorithms are applied to a simulative rain system. The simulative system has two peak value areas, and has a minimum value area between the peak value areas. In order to be consistent with the actual situation, stochastic noise is used in the simulation field. The value of noise is between  $\pm 0.7$  dB. The reflectivity estimated by the hybrid algorithm is more accurate than that estimated by stereoradar and dual-beam algo-

rithms. The good result is gotten using the hybrid algorithm in the simulation field. The hybrid algorithm is of serviceability and accuracy.

**Key words** stereoradar analysis, dual-beam algorithm, weighting factor

## 1 引言

雷达作为一种有力的探测手段被广泛地应用。20 世纪 80 年代以前使用的雷达主要是地基雷达,中国科学院大气物理研究所吕达仁等<sup>[1]</sup>利用地基雷达建立了主被动联合探测系统,并在遥感云雨分布的观测实验和应用研究中取得进展<sup>[2, 3]</sup>; 20 世纪 90 年代以来机载大气多普勒雷达开始被逐渐使用并显示出诱人的前景<sup>[4, 5]</sup>。与地基雷达相比,机载雷达的好处是明显的,自然界中大气现象如对流系统的形成在地理位置上分布是随机的,同时雷达观测半径又是有限的,这样地基雷达只能观测方圆几百公里的降水系统。而机载雷达可以方便地跟踪观测对象,并且可以观察有些地基雷达较难观察的区域(如海洋)。由于机载雷达的天线尺寸的限制,如果想获得一个较好的束向分辨率,就不得使用 X 波段的频率,而该波段的电磁波穿过雨区时会受到衰减,因此,直接利用视反射率进行降水反演就会产生很大的误差。为了校正衰减效应,Testud 和 Amayenc<sup>[6]</sup>提出了立体雷达方法(即利用雷达从两个不同角度对雨团的观测来实现整个观察区域的反射率因子和比衰减因子场的反演),并将其应用于数值试验,发现在存在回波涨落噪声的情况下,立体雷达方法也能给出令人满意的反射率因子和比衰减因子场的反演。Kabeche 等<sup>[7]</sup>又将此方法应用于 CaPE 实验中获取机载多普勒雷达实测资料,他们的结果与地基 C-band 雷达获得的反射率结构相比相关性很好。但立体雷达方法对边界条件要求较严,需要一个能包围所反演区域的、完整的基本上无衰减的边界,这在机载雷达实验中有时很难满足。TOGA-COARE 实验中,有时同时有三架载有机载雷达飞机对同一地区进行观测,补救的办法就是利用不同飞机的互相补充的机载雷达资料提供一个完整的边界条件,从而实现反演区域雷达反射率的订正<sup>[8]</sup>。但这样做对于大多数实验中只有单架飞机的情形,问题依然没有解决。Testud 和 Oury<sup>[9]</sup>在 Hitschfeld 和 Bordan 算法<sup>[10]</sup>的基础上发展一种名为“双束算法”的算法,这种算法虽然会在雨团中

心雨强大的地方产生很大的误差,但在雨团边界处的反演精度却很高。双束算法在雨团边界处的高精度反演恰巧可以为立体雷达方法提供一个边界条件,这就使得我们很自然地想到联合立体雷达方法和双束算法形成一个综合算法,该算法初步被 Oury 等<sup>[11]</sup>应用于研究 TOGA-COARE 实验中 1993 年 2 月 9 日观测到的一个中尺度对流系统的降水效率。但以往在操作中,我们在联合两种方法时采取了平权的办法。由于双束算法在雨团边界处的反演精度很高,可以为立体雷达方法提供一个边界条件,但在雨团中心雨强大的地方会产生较大的误差。因此,一种理想的办法就是当按立体雷达方法得出的边界条件较完整和准确时,应减小双束算法在综合反演方法中的比重。本文用模拟场对这一办法进行了验证,同时也对雷达绝对定标误差的订正作一些讨论。

## 2 算法简介

下面简要介绍双束算法、立体雷达方法和综合算法。

### 2.1 双束算法

距离雷达  $r_i$  处的视反射率因子  $Z_i (i=1, 2)$  可以用反射率因子  $Z_0$  和比衰减因子  $K$  (dB/km) 之间的关系<sup>[11]</sup>给出:

$$Z_i = Z_0 10^{[-0.2 \int_0^{r_i} K(s) ds]}, \quad i = 1, 2. \quad (1)$$

假设  $K$ - $Z$  关系  $K = aZ_0^b$  中的  $a$  和  $b$  是与路径无关的,代入到式(1)中消去  $K$ ,可得到:

$$Z_0 = \frac{Z}{(1 - aI_i)^{1/b}}, \quad i = 1, 2 \quad (2)$$

$$I_i = 0.2 \ln(10) b \int_0^{r_i} Z^b ds, \quad i = 1, 2. \quad (3)$$

$I$  为全路径衰减因子。在以往的各种研究中表明,参数  $b$  不受雨滴谱的变化影响,相反这个变化对参数  $a$  有非常大的影响。在同时有  $a$  和  $b$  的式(2)中,  $Z_0$  对雨滴谱的变化是敏感的,甚至当  $aI_i \approx 1$  时,  $Z_0$  是完全不准确的。为了获得不依赖于  $a$  的连续  $Z_0$ , 设

$$Z_0 = Z_{01} = Z_{02} = \frac{Z_1}{(1 - aI_1)^{1/b}} = \frac{Z_2}{(1 - aI_2)^{1/b}}, \quad (4)$$

由(4)式可求得:

$$a = \frac{Z_1^b - Z_2^b}{Z_1^b I_2 - Z_2^b I_1}. \quad (5)$$

这样在每个网格点上  $a$  的值通过  $b$  来调整。把(5)式带入到(4)式中可得到  $Z_0$  的表达式:

$$Z_0 = \left( \frac{Z_1^b I_2 - Z_2^b I_1}{I_2 - I_1} \right)^{1/b}, \quad (6)$$

用(6)式求得的  $Z_0$  只与  $b$  有关,但由于我们前面的假设,在两种情况下(6)式是不适用的:

①  $I_1 = I_2 = 0$ , 这表示两个方向上的全路径衰减因子是可以忽略的,因此有  $Z_0 = (Z_1 + Z_2)/2$ 。

②  $I_1 = I_2$ ,  $Z_0$  无法计算获得。

得到  $Z_0$  后,  $K$  可从通过关系式  $K = aZ_0^b$  求得:

$$K = \frac{Z_1^b - Z_2^b}{I_2 - I_1}. \quad (7)$$

## 2.2 立体雷达方法<sup>[13]</sup>

对于同时被两个雷达观测到的空间中任意一点,位置如图1所示。

在相应的两个观测方向上,对视反射率因子( $Z_1$  和  $Z_2$ ) 和反射率因子( $Z$ ) 之间的关系,求对数后可写成如下形式:

$$Z_1 = Z - 2 \int_0^{r_1} k(r, \lambda) dr, \quad (8)$$

$$Z_2 = Z - 2 \int_0^{r_2} k(r, \lambda) dr. \quad (9)$$

将(8)、(9)式分别对  $r_1$ 、 $r_2$  求导,并考虑到对  $r_1$ 、 $r_2$  的微分和对  $x$ 、 $y$  的偏微分的关系,可推出:

$$\frac{dZ_1}{dr_1} = \left( \cos \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} + \sin \alpha_1 \frac{\partial}{\partial y} \right) Z - 2k, \quad (10)$$

$$\frac{dZ_2}{dr_2} = \left( \cos \alpha_2 \frac{\partial}{\partial x} + \sin \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} \right) Z - 2k, \quad (11)$$

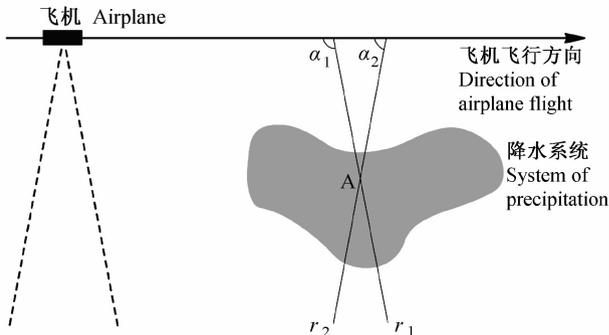


图1 包含飞行轨迹的平面内雷达成射束的几何位图(A点被前向和后向雷达在两个不同时刻观测到)

Fig. 1 Geometrical diagram of radar beam in flight plane (Point A is observed in the two directions at different time)

消去未知数  $k$ , 可得:

$$\left[ (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \frac{\partial}{\partial x} + (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_2) \frac{\partial}{\partial y} \right] Z = \frac{dZ_1}{dr_1} - \frac{dZ_2}{dr_2}, \quad (12)$$

然后通过使下列函数最小化来计算  $Z$ :

$$F = \iint_D \left( A \frac{\partial Z}{\partial x} + B \frac{\partial Z}{\partial y} - M \right)^2 dx dy + \mu \iint_D L(z) dx dy + 10 \iint_E (Z - Z_{\max}) dx dy, \quad (13)$$

其中,

$$A = \cos \alpha_1 - \cos \alpha_2,$$

$$B = \sin \alpha_1 - \sin \alpha_2,$$

$$M = \frac{dZ_1}{dr_1} - \frac{dZ_2}{dr_2},$$

$L(z)$  是  $D$  域内的滤波因子,  $\mu$  是滤波控制参数,  $Z_{\max} = \max(Z_1, Z_2)$ 。

得到反射率因子后, 比衰减因子可由(10)、(11)式得:

$$k_1 = \frac{1}{2} \left( \cos \alpha_1 \frac{\partial}{\partial x} + \sin \alpha_1 \frac{\partial}{\partial y} \right) (Z - Z_1), \quad (14)$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \left( \cos \alpha_2 \frac{\partial}{\partial x} + \sin \alpha_2 \frac{\partial}{\partial y} \right) (Z - Z_2). \quad (15)$$

为了使两个  $k$  保持一致性, 采用变分法使下列函数最小化,

$$G = \frac{1}{2} \iint_D [(k - k_1)^2 + (k - k_2)^2] dx dy + \mu_1 \iint_D L_2(k) dx dy + 10 \iint_E k^2 dx dy, \quad (16)$$

其中,  $L_2(k)$  是  $D$  域内的滤波因子,  $\mu_1$  是滤波控制参数。立体雷达方法的优点在于: 它无需作任何关于雨滴谱的假设, 就能得到比衰减因子  $k$ 。

## 2.3 综合算法

针对前两种算法分别在强降雨区和弱雨区反演结果好的特点, 引入因子  $\lambda$ , 使

$$R = \lambda R_{\text{dual}} + (1 - \lambda) R_{\text{stereo}}, \quad (17)$$

其中,  $R_{\text{dual}}$  和  $R_{\text{stereo}}$  分别为双束算法和立体雷达方法得到的反演值。由公式(6)可知, 当积分路径衰减因子  $I_1$  和  $I_2$  之差小时, 用双束算法不能得到准确的反演结果, 所以可把  $\lambda$  定义为一个与  $I_1$  和  $I_2$  之差有关的可变参量, 这样就可以通过  $\lambda$  来自动区分两种算法所适用的区域。在计算中设  $\lambda$  的形式为

$$\lambda = |I_1 - I_2| / (I_1 + I_2). \quad (18)$$

$I_1$  和  $I_2$  分别代表两个不同方向上的路径衰减因子。

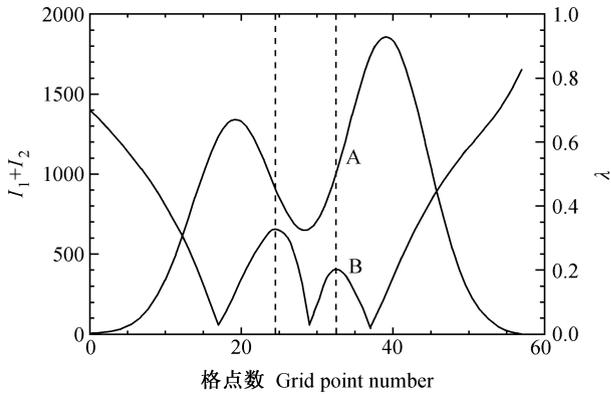


图2 2 km 高度处  $I_1+I_2$  和  $\lambda$  的变化规律 (A:  $I_1+I_2$ ; B:  $\lambda$ )  
Fig. 2  $I_1+I_2$  and  $\lambda$  change rule (A:  $I_1+I_2$ ; B:  $\lambda$ ) at the altitude of 2 km

图2为路径衰减因子  $I_1$ 、 $I_2$  之和与  $\lambda$  在模拟场中的变化规律, A 线代表  $I_1$ 、 $I_2$  和的变化规律, 与雨强的分布是相似的。对于 (18) 式中所设的  $\lambda$ , 我们得到图2中的 B 曲线。B 曲线上有三个极小值, 左右两个极小值对应雨强场的两个极大值处, 此处前后向的路径衰减因子  $I_1$  和  $I_2$  的测值是很接近的, 这是由于这里雨场的对称性引起的, 因而使两者差出现极小值, 并得到  $\lambda$  极小值; 虚线中间的  $\lambda$  极小值则是前后向波束通过雨强场的两个峰值区后形成的, 虽然雨强场两个峰值不同, 但也形成了 PIA 因子差的一个极小值, 这在单峰情况下是不会出现的。对于虚线中间部分, (17) 式是否还可以应用? 虽然虚线中间的  $\lambda$  极小值对应的不是雨强场峰值, 但形成原理与在雨强场峰值区形成  $\lambda$  极小值的原理一致, 因此可以把它当成峰值区处理, 即立体雷达方法的结果占的比重大, 这样 (17) 式仍可应用。从后面的模拟反演中也可以看到, 这样的处理是可行的。

### 3 对引入 $\lambda$ 因子的综合算法的模拟研究

#### 3.1 三维降雨模型

采用双中心三维降雨模型:

$$R(x, y, z) = R_{1\max}g(\rho_1)f(h) + R_{2\max}g(\rho_2)f(h), \quad (19)$$

其中,  $\rho_1 = (x_1^2 + y_1^2)^{1/2}$ ,  $\rho_2 = (x_2^2 + y_2^2)^{1/2}$  表示离两雨团中心的距离;  $R_{1\max}$ ,  $R_{2\max}$  表示两雨团中心轴上的最大雨强;  $g(\rho)$  为雨强在水平面内的变化曲线,

研究中采用的是高斯模型<sup>[14]</sup>:

$$g(\rho) = \exp[-4\ln 2(\rho/D_{\text{im}})^2], \quad (20)$$

其中,  $D_{\text{im}}$  为雨团直径, 模拟中取为 4 km。

$f(h)$  为雨强在垂直面内的变化。雷达观测表明 S 或 C 波段的反射率在地表面和零温度面(在热带为 4~5 km)之间基本上是常数, 在此高度以上则以每公里 5 dBZ 的速度递减。在此观测基础上, 取反射率因子的模型为:

$$Z = Z_{\max} - \{p z + [p^2(z - z_0)^2 + 4A_0]^{1/2} - [(pz_0)^2 + 4A_0]^{1/2}\} / 2, \quad (21)$$

其中,  $z$  为高度,  $Z_{\max}$  为雨团中心轴处的最大雨强,  $z_0$  为零温度面高度,  $p$  为在零温度面高度以上雷达反射率的衰减速度,  $A_0$  定义为地表面和零温度面之间的反射率差。在模拟中参数取为  $z_0 = 4$  km,  $p = 5$  dB km<sup>-1</sup>,  $A_0 = 9$  dB<sup>2</sup>。

从这个 Z 模型出发, 用标准的 Marshall-Palmer 关系  $Z = 200R^{1.6}$  ( $Z$  的单位: mm<sup>6</sup>/m<sup>3</sup>,  $R$  的单位: mm/h), 利用轴线上雨强关系可得:

$$f(z) = 10^{B_0/16}, \quad (22)$$

其中,

$$B_0 = -\{p z + [p^2(z - z_0)^2 + 4A_0]^{1/2} - [(pz_0)^2 + 4A_0]^{1/2}\} / 2.$$

由此, 可建立雨团模型, 模拟雨团中心轴处的最大雨强分别取为 30 mm/h 和 40 mm/h。

#### 3.2 模拟结果

模拟中视反射率引入了随机噪音信号, 其值介于  $\pm 0.7$  dB 之间, 下面讨论的反演结果是同一方向上 50 次独立取样后的平均值(即图3到图6中的反演值曲线<sup>[15]</sup>)。图3到图6中还绘出在噪音影响下的反演值标准偏差。用双束算法反演的结果如图3所示, 虚线为反演值平均值。在雨强小的区域, 算法能准确反演出模拟场的雨强值。随着雨强的不断增加, 反演值与模拟场雨强值之间的差距越来越大, 在雨团的峰值处, 双束算法没办法得到反演值。我们可以看到, 噪音信号在双束算法反演较好的雨团边界区域对反演值影响不大, 这也是双束算法的一个好处。对雨强大的地方, 双束算法已不能得到准确的反演结果, 噪音信号的影响更是没有意义的。

用立体雷达方法反演的结果如图4所示, 虚线为反演平均值。在雨团的两个峰值区立体雷达方法反演值与模拟场的雨强值非常接近, 而在雨强小的

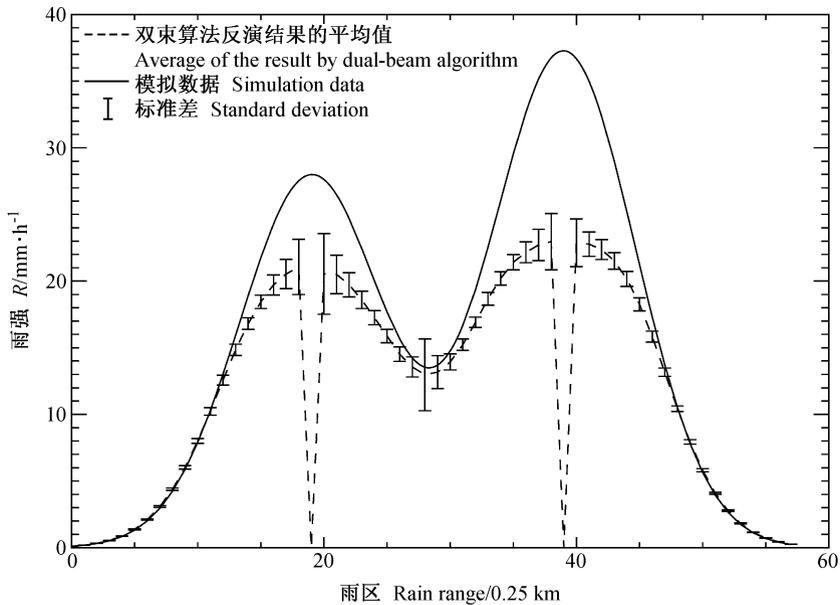


图 3 2 km 高度处双束算法反演值与模拟场值的比较

Fig. 3 The comparison of the result by dual-beam algorithm and simulation data at the altitude of 2 km

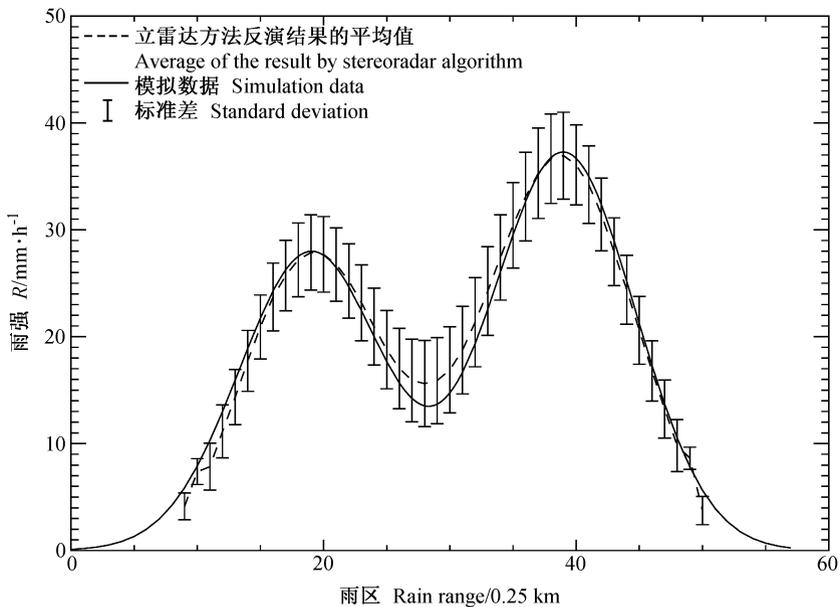


图 4 2 km 高度处立体雷达方法反演值与模拟场值的比较

Fig. 4 The comparison of the result by stereoradar algorithm and simulation data at the altitude of 2 km

区域则无法准确反演出模拟场的雨强值。由于立体雷达方法是用视反射率因子  $Z$  的梯度来计算的，所以噪音信号的影响是不可忽略的，图 3 中清楚表明当有 0.7 dB 大小的噪音时，得到的反演值变动的范围很大。所以实测中，要对一个点进行多次不同方向上的梯度测量，才能保证最终的立体雷达方法反演结果的准确性。

图 5 为用平权方法求得的反演值，虚线表示平权反演结果。只有在两种算法反演结果都比较好的区域，平权方法求反演值与模拟场的雨强值是接近的，在两个峰值区的反演值都偏小，而在边界区的反演值则偏大，并且反演值起伏大，没有明显变化规律。这是把每种算法中的缺点都引入到最后的反演结果中去了。

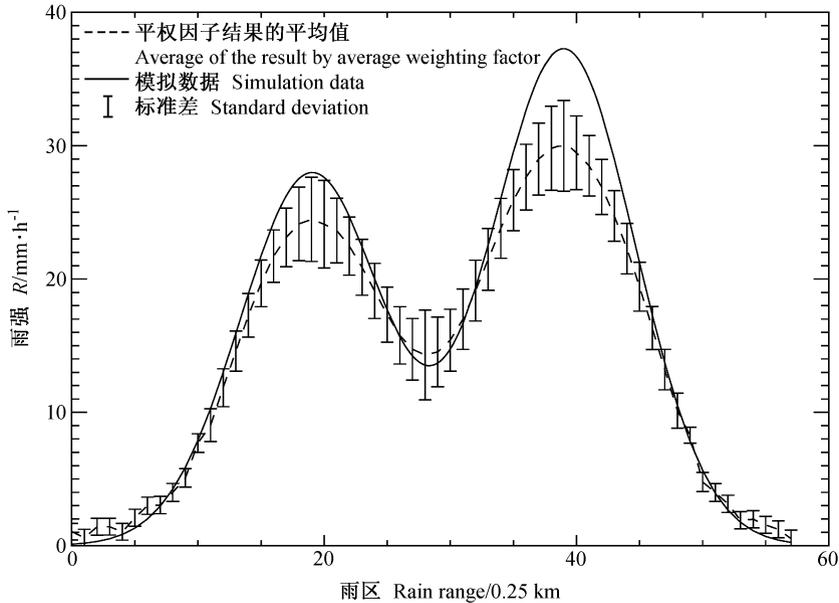


图5 2 km 高度处平权反演的雨强值与模拟场的比较

Fig. 5 The comparison of the result by average weighting factor and simulation data at the altitude of 2 km

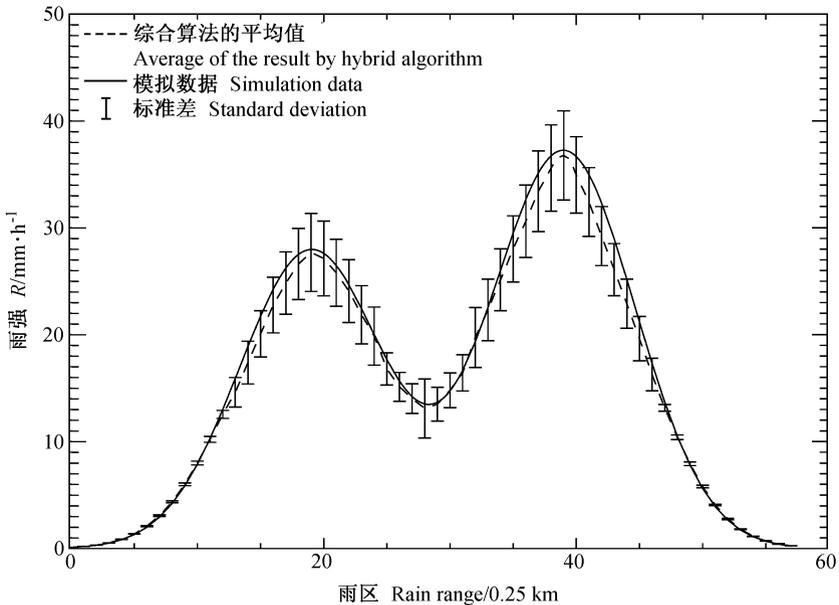


图6 引入 $\lambda$ 后在2 km 高度处反演的雨强值与模拟场的比较

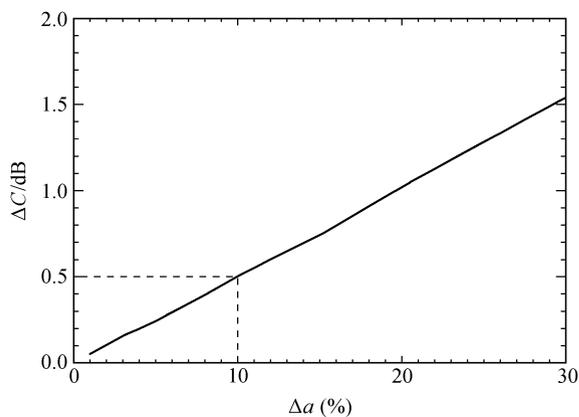
Fig. 6 The comparison of the result by hybrid algorithm and simulation data at the altitude of 2 km

引入了因子 $\lambda$ 后,利用(17)式得到一条新的雨强曲线(图6),虚线为反演平均值。可以看到这条雨强曲线和模拟场的雨强值几乎是一致的。引入这个 $\lambda$ 因子是让双束算法和立体雷达方法的优点充分体现出来,但并未改动两算法主体,但从最终结果上反映出:通过这一方法,反演结果比单独使用前两者中任何一个所得结果都要好。与图5的平权

结果相比,变权重因子方法能在雨区中心和边界处把两种算法的优点充分发挥出来,从而得到较为准确的反演结果。所以,利用 $\lambda$ 进行拟合的这一综合算法是可行的。

#### 4 对绝对定标误差的讨论

在用雷达对降水进行测量时,雷达本身的一些

图7  $a$  与  $C$  之间的变化关系Fig. 7 The relationship between  $a$  and  $C$ 

影响是不可避免的, 如雷达绝对定标误差  $C$ , 但可以让它的影响尽量降到最小。从(6)、(7)式中可以看到, 雷达绝对定标误差  $C$  会在  $Z_0$  中引入同样的定标误差, 而对  $K$  却没有任何影响。假设已知  $K-Z$  关系中  $a$  参数的真值为  $a_0$ , 有  $C$  影响和无  $C$  影响的两个  $K-Z$  关系分别表达为

$$K = a_0 Z_0^b, \quad (23)$$

$$K = a(CZ_0)^b. \quad (24)$$

上两式相比, 则可得到  $C$  与参数  $a$  的一个对应关系:

$$C = -\frac{10}{b} \lg\left(\frac{a}{a_0}\right), \quad (25)$$

其中,  $a_0$  为符合真实雨滴谱分布的值, 可以通过雨滴谱参数优化方案<sup>[16]</sup>获得。 $a$  的表达式见(5)式。这样, 通过(25)式就可以获得对  $C$  的估算。

我们还计算了  $a$  与  $C$  之间的变化关系。设  $\Delta a = |a - a_0|/a_0$ , 取  $\Delta a$  从 0 变化到 30%, 得到了如图 7 所示两者变化的对应关系。从图 7 中可看到, 两者的对应变化近似为一条直线, 当  $a$  与  $a_0$  的差小于 10% 时,  $C$  的值小于 0.5 dB。

## 5 结论

通过模拟雨场, 分别用双束算法、立体雷达方法和两者结合的综合算法进行了反演计算, 可以得出如下结论: 通过引入权重因子  $\lambda$ , 以  $\lambda$  的大小来判断雨区中雨强的大小, 并可以自动调整双束算法和立体雷达方法反演结果的比重, 使得反演结果更接近真实的雨强场。因此, 我们在综合算法中引入  $\lambda$  权重因子是可行的。引入权重因子  $\lambda$  的综合反演

方法, 克服了单独使用单体雷达方法对边界条件的苛求这一缺点以及双束算法在强降雨区的不稳定性, 更具适用性和准确性。

新的雨滴谱优化可以提供一个较准确的  $a_0$  值, 在这一前提下, 可以通过计算来估算雷达的绝对定标误差。当  $a$  与  $a_0$  的差在 10% 之内时, 估算的定标误差  $C$  的值将小于 0.5 dB。

## 参考文献 (References)

- [1] 吕达仁, 林海. 雷达和微波辐射计测雨特性比较及其联合应用. 大气科学, 1980, **4** (1): 30~39  
Lu D R, Lin H. Radar and microwave radiometers characteristic comparison and application in measuring the rain. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1980, **4** (1): 30~39
- [2] 刘锦丽, 张凌. 微波主被动联合测雨的应用研究. 大气科学, 1993, **17** (2): 219~226  
Liu J L, Zhang L. Research of active and passive remote sensing and its application to measure the rain. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1993, **17** (2): 219~226
- [3] Liu J L, Zhang G L. Remote sensing of liquid water content with combined radar-radiometer. *Atmospheric Research*, 1994, **34**: 145~152
- [4] Hildebrand P H, Moore R K. Meteorological radar observations from mobile platforms. *Radar in Meteorology*, D. Atlas, Ed., Amer. Meteor. Soc., 1990. 287~314
- [5] 程明虎, 刘黎平, 张沛源, 等. 暴雨系统的多普勒雷达反演理论和方法. 北京: 气象出版社, 2004. 114~168  
Cheng M H, Liu L P, Zhang P Y, et al. *The Retrieval Theories and Methods of Doppler Radar in Heavy Rainfall System*. Beijing: China Meteorological Press, 2004. 114~168
- [6] Testud J, Amayenc P. Stereoradar meteorology: A promising technique for observation of precipitation from a mobile platform. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 1989, **6**: 89~108
- [7] Kabeche A, Testud J. Stereoradar meteorology: A unified approach to process data from airborne or ground-based meteorological radars. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 1995, **12**: 783~795
- [8] Oury S, Testud J, Marcal V. Estimate of precipitation from the dual beam airborne radars in TOGA-COARE. Part 1: The  $K-Z$  relationships derived from the stereo- and quad-beam analysis. *J. Appl. Meteor.*, 1999, **38** (2): 156~174
- [9] Testud J, Oury S. Algorithm de correction d'atténuation pour radar météorologique. *C. R. Acad. Sc. Paris, sérieIIa*, 1997. 705~710
- [10] Hitschfeld W, Bordan J. Errors inherent in the radar meas-

- urement of rainfall at attenuating wavelengths. *J. Meteor.*, 1954, **11**: 58~67
- [11] Oury S, Dou X K, Testud J. Estimate of precipitation from the dual beam airborne radars in TOGA-COARE. Part II: Precipitation efficiency in convective cells. Case study of 9th February 1993. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39** (12): 2371~2384
- [12] Testud J, Amayenc P, Marzoug M. Rainfall rate retrieval from a spaceborne radar: Comparison between single-frequency, dual-frequency, and dual beam techniques. *J. Atmos. Oceanic. Technol.*, 1992, **9**: 599~623
- [13] 窦贤康, Testud J. 立体雷达方法在星载测雨雷达上的应用. *气象科学*, 1999, **57** (3): 358~366  
Dou X K, Testud J. The application of stereoradar analysis to the spaceborne rain radar. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1999, **57** (3): 358~366
- [14] Goldhirsh J, Walsh E J. Rain measurements from space using a modified Seasat-type radar altimeter. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1982, AP-30 (4): 726~733
- [15] 窦贤康, Testud J, Amayenc P. 星载测雨雷达降雨量反演算法及模拟验证. *科学通报*, 1997, **42** (3): 292~295  
Dou X K, Testud J, Amayenc P. Analytical retrieval and simulation testing of rain rate to the spaceborne rain radar. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1997, **42** (3): 292~295
- [16] 窦贤康, 王连仲, Testud J, 等. 雨滴谱参数估计优化方案及其微物理资料检验. *电波科学学报*, 2001, **16** (4): 493~497  
Dou X K, Wang L Z, Testud J, et al. A new method to parameterize the rain drop size distribution and its validation by microphysical data. *Chinese Journal of Radio Science* (in Chinese), 2001, **16** (4): 493~497