

基于微波链路的雷达回波衰减订正个例分析

薛杨^{1,2} 刘西川^{1*} 高太长¹ 宋堃¹ 张鹏³

(1 国防科技大学气象海洋学院, 南京 211101; 2 西安卫星测控中心, 西安 710000; 3 陆军工程大学, 南京 211101)

摘要 降雨对微波的衰减作用在雷达探测和信号通信中有着不可忽略的影响。本文利用近年来出现的微波链路测量新方法,研究了利用微波链路进行天气雷达回波衰减订正的方法。微波链路可以直接获取传播路径上的总衰减,基于此建立衰减订正的约束条件,并利用前向迭代法对天气雷达回波进行逐库订正。首先从现有衰减订正的理论出发,通过确定微波链路衰减参考值、雷达衰减订正算法和衰减系数,建立基于微波链路的天气雷达衰减订正模型;搭建 9.47 GHz 微波链路测量试验系统,对 X 波段雷达进行衰减订正试验。针对一次个例进行分析,与自动雨量站同步对比观测试验表明:订正后的雷达反射率因子明显高于雷达实测反射率因子;订正后雷达估测的降雨量与自动雨量站的观测差值减小;累积降雨量绝对偏差由 -6.11 mm 减小到 1.04 mm,相对偏差由 0.99% 减小到 0.17%;订正后估测的降雨强度与雨量计的相关性得以提高。该订正算法主要通过参数的调整,使得 $k-Z$ 关系更符合实际,从而提高了探测精度,验证了该方法的可行性与准确性。

关键词 定量估测降水;衰减订正;前向迭代

中图分类号: P407.6 **DOI:** 10.19517/j.1671-6345.20160576 **文献标识码:** A

引言

强降水是引发各种自然灾害的重要因素^[1],准确实时的降雨监测,对于天气预报、农业灌溉、交通运输、军事保障等方面都有十分重要的意义^[2]。目前常规气象观测业务中降水量主要采用雨量计和天气雷达等,雨量计可以获取高精度的单点降水强度和累积降水量,但靠布设稠密雨量点来实现区域性降雨测量在许多地区受到人力、物力和通讯等条件的严重限制,且容易漏掉强降雨中心^[3]。天气雷达因可测量高时空分辨率的降水分布而成为主要遥感测雨手段,在实时监测、临近预报与防洪预警方面是有效的^[4]。但由于降水对雷达信号存在衰减,而且频率越高衰减越严重^[5],使得利用天气雷达对降水进行准确的定量估计仍然是一个难题。

雷达回波的衰减订正技术研究对于提高天气雷达的定量降水估计精度具有重要意义,尤其是 X 波

段雷达。从 1954 年 Hitschfeld^[6]提出的通过求解天气雷达回波衰减 k 与反射率因子 Z 的解析式来进行衰减订正的方法,建立了 HB 衰减订正算法,到随后出现的 Hildebrand^[7]迭代算法、逐库算法及其近似方法^[8]等算法均在降雨量小时订正效果较好。能改善衰减订正稳定性的方法一般都是利用各种参考值检查订正算法,国内吕达仁^[9]等在 1980 年提出利用微波辐射计测得的路径总衰减对雷达衰减总量进行控制来提高衰减订正效果。随着 Serrar^[10]等发现山间的回声可以提高雷达的衰减订正,提出利用山回波信号在晴、雨天的回波差异来对路径总衰减进行估算。星载测雨雷达中普遍采用的地面参照技术(SRT)^[11],通过比较降雨和未降雨时所测的回波强度之差来计算路径衰减。该方法具有相对误差随着积分路径的增加而减小的优点^[12]。随着双偏振雷达技术的发展,基于衰减率(AH)、差分衰减率(ADP)与回波差分传播相移(KDP)的线性关系,

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150708)、国家自然科学基金青年基金项目(41505135)、国家自然科学基金面上项目(41475020)资助

作者简介:薛杨,女,1991年生,硕士研究生,研究方向为大气探测,Email:xyxhgx@foxmail.com

收稿日期:2016年10月8日;定稿日期:2017年6月12日

* 通信作者,Email:Liuxc2012@hotmail.com

KDP 受降水粒子平均半径和温度变化影响较小等特性,陆续出现了 AH-KDP、ADP-KDP 等经验公式、自适应约束算法、改进自适应约束算法、ZH-KDP-R 综合估测法等衰减订正算法。何宇翔等许多学者^[13-15]对其进行改进和对比可以得到更为精细的降水分布,近年来也有通过多种仪器的组网来提高雷达探测精度的方法^[16]。目前衰减订正方法面临的问题主要是衰减量的不确定造成的。主要是因为降水结构空间分布变化复杂,难以用某一特定关系来确定衰减量。

目前,广播通信、微波中继站、移动基站等部分领域存在着很多不同频段的微波链路。微波信号由于受到降水粒子的影响而发生衰减和去极化等效应,并与降水强度、粒子形状和谱分布等存在特定的关系,利用这一关系可以反演微波信号传播区域内的降水分布。且微波链路通信网络覆盖广泛,可利用现有设施,无需额外设置与维护代价,成本低廉。

Ricon^[17]等研究了利用 8.35 GHz、8.45 GHz、25.35 GHz 和 38.025 GHz 多频双偏振微波链路反演降水的方法,利用不同频率的衰减及其组合差分来计算雨强和含水量;Upton^[18]等分别探索了商业微波链路在降雨测量中的应用。Leijnse^[19-20]等分别研究了利用 38 GHz、50 GHz 等频段的微波链路反演路径平均雨强。国内高太长^[21-23]等从 2010 年开始研究了 15~20 GHz 频段的微波链路反演降水。微波链路对衰减测量以及雨强反演的研究均表明,由近地层架设的微波链路测得的雨区路径总衰减具有较高的精确度。因此有部分学者提出将微波链路应用于天气雷达低仰角波束的衰减订正上。

Krämer^[24-25]等分别于 2005 年和 2008 年利用 17.5、10.5 GHz 的双频微波链路对 X 波段和 C 波段雷达进行了衰减订正。Rahimi^[26]等于 2005 年研究了利用 17.5、10.5 GHz 的双频微波链路进行衰减订正的方法。Cummins^[27]等于 2009 年探讨了单频微波链路的衰减测量在天气雷达校正中的应用。

为了验证基于微波链路的雷达回波强度衰减订正效果,本文将微波链路获取的路径总衰减作为约束条件,采用前向迭代法对天气雷达回波进行逐库订正。在现有衰减订正理论的基础上,通过确定微波链路衰减参考值、雷达衰减订正算法和衰减系数,建立基于微波链路的天气雷达衰减订正模型,利用

9.47 GHz 微波链路测量试验系统开展 X 波段天气雷达的衰减订正试验,并结合多点自动雨量站观测数据检验衰减订正方法的有效性和准确性。

1 基于微波链路的雷达衰减订正模型

利用微波链路进行雷达回波衰减订正,首先是利用微波链路测量雷达某径向方向上的路径衰减;然后利用天气雷达的反射率因子测量值和 $k-Z$ 经验关系,计算出该径向上的逐库衰减和路径总衰减;基于路径上微波链路和天气雷达衰减相等的原则,通过迭代法调整 $k-Z$ 经验关系中的 c 和 d 系数使其符合该次降雨事件,从而得到该路径的降水衰减逐库分布,然后进行订正。

1.1 微波链路路径上的雨致衰减

1.1.1 微波链路在特定频段的衰减

微波链路的雨致总衰减是通过晴、雨天的路径衰减差值来确定的。在微波波段上,大气中的气体、降水等因素都会对微波的传播产生重要影响,其中最显著的就是降雨对电磁波的衰减效应。通过降雨发生时测得的路径衰减 A_{wet} 减去晴空条件下测得的路径衰减 A_{dry} ,从而得到降雨过程中微波的衰减量 a_{tlink} ,可由下式计算:

$$a_{\text{tlink}} = A_{\text{wet}} - A_{\text{dry}} \quad (1)$$

其中, A_{wet} 为降雨发生时测得的路径衰减 (dB), A_{dry} 为晴空时测得的路径衰减 (dB)。

1.1.2 微波频段与雷达频段之间的关系

微波链路可通过单频、双频或多频链路的测量得到路径衰减值。单频链路一般会选取与雷达波段相同或相近的频段并建立关系。双频或多频微波链路一般会选取满足衰减特征在降雨过程中高度相关,晴空条件下相关性低,且其中一条的频率与雷达的频率相同或相近的频段并建立关系。

在本文试验中,链路采用的频率 9.47 GHz 与 X 波段雷达波段频率 9.19 GHz 相近。为了获取两个频段之间的关系,通过米散射理论计算了 Gamma 分布条件下(参数设置情况为:雨强 $R=1\sim 100$,形状因子 $\mu=1$,粒子数 $N_0=1.98\times 10^{-5}R(-0.384)$,波长 $\lambda=5.38R^{-0.186}$,温度 $T=20\text{ }^\circ\text{C}$)对应 2 个频率衰减之间的关系,见图 1。因此链路的衰减参考值可由式(2)表示:

$$a_{\text{treference}} = 2(0.9179a_{\text{tlink}(9.47\text{ GHz})} - 0.0265) \quad (2)$$

其中, $a_{\text{tlink}(9.47\text{ GHz})}$ 是频率为 9.47 GHz 的链路测量

的雨致衰减, $a_{\text{ttreference}}$ 是微波链路衰减参考值, 参数 2 是考虑信号双程衰减。

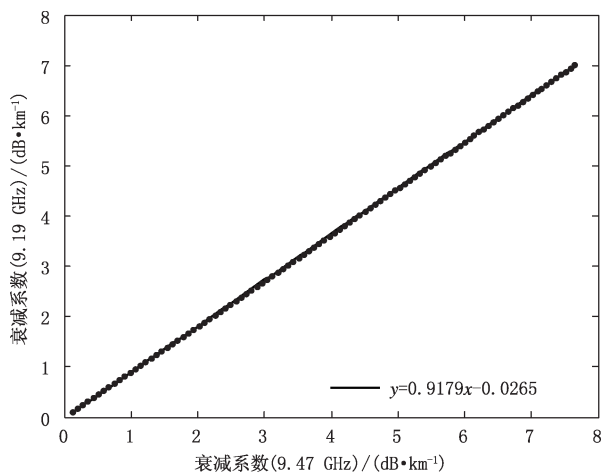


图 1 9.19 GHz 与 9.47 GHz 对应的衰减关系

1.2 衰减订正算法

1.2.1 衰减订正基础理论

由雷达气象学知, 雷达实测反射率因子 Z_m (mm^6/m^3) 和目标的真实反射率因子 Z_r (mm^6/m^3) 满足下列关系式:

$$Z_m(r) = Z_r(r)K = Z_r(r) \times 10^{-0.2 \int_0^R k dr} \quad (3)$$

其中 R 为探测目标与雷达之间的距离, K 是衰减因子, k 是以 dB/km 为单位的衰减系数。式(3)进一步推导可表示为:

$$Z_r = Z_m + 2 \int_0^R k dr \quad (4)$$

其中, Z_r, Z_m 单位为 dB , $2 \int_0^R k dr$ 积分后为雷达路径积分衰减, 单位为 dB 。由此可知, 雷达路径积分衰减值的准确确定是衰减订正的关键。

衰减系数 k (dB/km) 和雷达反射率因子 Z (mm^6/m^3) 的关系满足模型

$$k = cZ^d \quad (5)$$

其中, c 和 d 是依赖于雨滴谱分布的经验回归系数。

1.2.2 前向迭代订正算法

反射率因子订正算法有前向迭代算法和后向迭代算法。后向迭代算法从该路径上雷达最后一个库开始校正^[26], 即最后一个库的反射率因子为雷达实测反射率因子与路径衰减参考值之和; 将路径衰减参考值按衰减逐库分布进行分配, 实现对雷达回波的衰减订正。该算法在微波链路长度较短时精度较高。考虑到雷达回波在近距离处衰减较小, 本文采

用前向迭代算法。

前向迭代的逐库订正算法订正流程(图 2)是从雷达径向第一个库开始, 认为雷达第一个库的衰减无需校正, 雷达后一个库的反射率因子大小因其前面所有库的衰减而偏低, 因此后一个库的真实值 z^* (dBz) 为测量值 z_i (dBz) 和该库前面路径总衰减

$\sum_{i=0}^N A_i$ (dB) 之和, 满足:

$$z_i^* = z_i + \sum_{i=0}^N A_i \quad (6)$$

其中, z_i^* (dBz) 与 Z_i^* (mm^6/m^3) 的转换式为

$$Z_i^* = 10^{z_i^*/10} \quad (7)$$

那么依据式(5), 雷达在第 i 库的衰减 A_i (dB) 可由式(8)表示, Δr 为雷达库长。

$$A_i = 2cZ_i^d \Delta r \quad (8)$$

雷达路径积分衰减值为各个库衰减之和, 满足式(9), N 为该路径长度对应的库数。

$$a_{\text{ttradar}} = 2 \int_0^R k dr = \sum_{i=1}^N A_i = 2c \sum_{i=1}^N Z_i^d \Delta r \quad (9)$$

雷达路径积分衰减 a_{ttradar} 与微波链路衰减 $a_{\text{ttreference}}$ 之差定义为:

$$\sigma = |a_{\text{ttradar}} - a_{\text{ttreference}}| \quad (10)$$

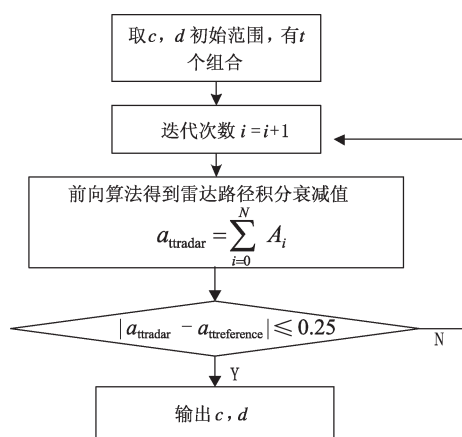


图 2 衰减系数的计算流程

1.3 衰减系数的确定

由前向迭代订正算法可以看出, $k-Z$ 关系是计算雷达每一库衰减的基础。基于雷达径向上路径积分衰减与链路衰减参考值相等的原则, 希望确定的衰减系数使得雷达路径积分衰减和链路衰减参考值相差较小。在 Krämer 等的研究中发现约束条件满足 $\sigma \leq 1$ 时即可得到最佳衰减系数, 将该差值

设为 0.25, 即 $\sigma \leq 0.25$ 。为了使 $k-Z$ 经验关系更符合实际, 将 c, d 作为可调节参数进一步确定, 流程见图 2。依据经验公式中 c, d 的取值, 设置了区间 $0.000001 \leq c \leq 0.001$, 间隔 $\Delta c = 0.00001$, $0.65 \leq d \leq 1.0$, 间隔 $\Delta d = 0.01$, 共有 (c, d) 组合 3600 组。给定 c 及 d 的初值 c_0, d_0 及变化范围后, 据 $k-Z$ 经验关系式可以求出相应作为初级近似的衰减逐库分布情况。再比较微波链路衰减参考值 $a_{\text{treference}}$ 与 a_{ttradar} , 改变 c_0, d_0 值, 进行迭代, 给出误差控制量范围内认为可代表该次降水的 c, d 值。

2 微波链路衰减订正试验及结果分析

为了检验微波链路对天气雷达的衰减订正效

果, 本文在与雷达径向平行的位置搭建了一条长度为 7.6 km 的微波链路, 如图 3 所示。微波发射端采用信号发生器发射连续波, 置于雷达所在处(图中红色线段北端), 位于南京地区古平岗 ($32^{\circ}4'25''\text{N}$, $118^{\circ}44'50''\text{E}$); 接收端采用频谱分析仪用于信号接收, 位于南京地区标营 ($32^{\circ}1'48''\text{N}$, $118^{\circ}48'40''\text{E}$); 微波发射和接收均采用定向天线, 接收端相对于发射端的方位角为 129.5° , 该路径上有 2 个雨量计。雷达工作波段为 9.19 GHz, 扫描时间为 7 min; 链路频段采用 9.47 GHz, 采样间隔为 15 s, 分辨率为 0.01 dB; 雨量计数据的采样间隔为 5 min, 分辨率为 0.1 mm。试验中将微波发射和接收终端都设置在室内, 因此可以不考虑天线沾湿误差的影响。

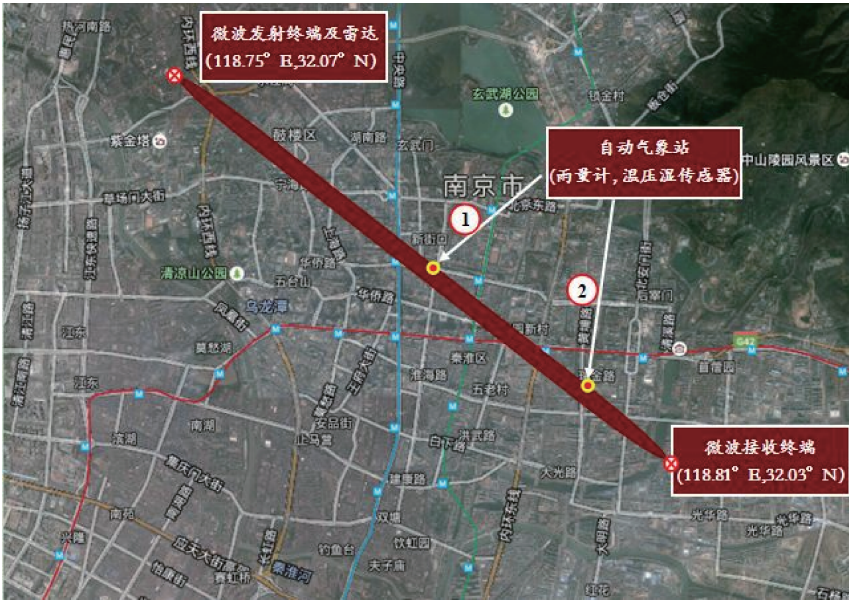


图 3 微波链路、雷达与雨量计分布

本次试验的时间段为 2015 年 6 月 2 日 13:17—17:30。图 4 为 6 月 2 日 15:46 的多普勒天气雷达强度, 雷达仰角为 1° , 属于混合型降水回波。下面利用该日实测微波衰减数据对天气雷达进行衰减订正, 并与雨量计资料进行对比分析。

2.1 衰减系数

在本次试验时间段内的雷达资料, 包含有 34 个时次, 时次的平均间隔为 7 min。图 5 是前向迭代算法中各个时次对应的最佳指数系数 d 与线性系数 c 的拟合曲线, 图中 c 和 d 呈现线性负相关关系, 即 c 随着 d 的减小而增大。由图可知, 每个时次满足约束条件的衰减系数有很多, 使得参数 (c, d) 组合

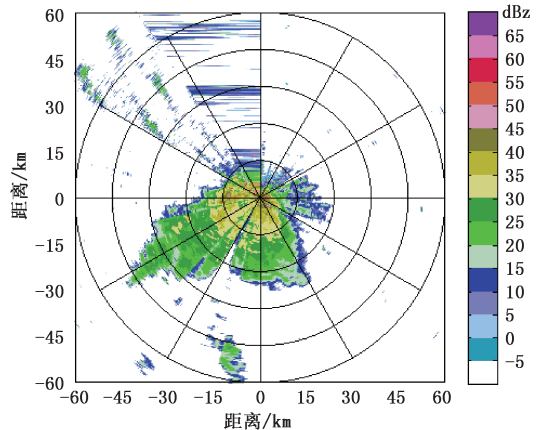


图 4 2015 年 6 月 2 日 15:46 仰角为 1° 的多普勒天气雷达强度

不能唯一确定。前向订正算法的原则是选取的参数要使得雷达衰减和参考衰减之间达到最佳的匹配,但并不是找到与每分钟都相匹配的结果,而是要找到一个平均的、能在整个降水事件或至少 1 h 内满足的参数。在衰减系数的确定中发现指数系数 d 的变化对衰减订正的影响较小,线性系数 c 的变化影响较大。因此,试验中将指数系数 d 固定,取值 0.73。对应 c 值在 $(0.00058, 0.001)$ 之间,当 $(c, d) = (0.001, 0.73)$ 时订正过量。将 c 值从 0.001 开始取间隔 $\Delta c = 0.00001$ 依次减小,直到算法稳定,最终确定 c 值为 0.0006。

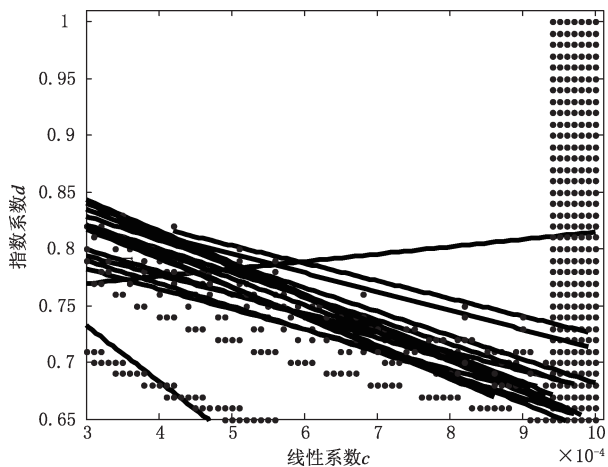


图 5 衰减系数 c, d 的拟合结果

2.2 衰减订正结果

图 6a、b 为该日 15:01 和 16:46 时刻雷达反射率因子衰减订正前后的对比图。15:01 和 16:46 对应的雨强分别是 13.2 mm/h、43.8 mm/h。由图可知,订正后的雷达反射率因子明显高于雷达探测的反射率因子,而且随着库数的增加订正的数值呈上升趋势。在 15:01 各个库反射率因子增加 2~5 dB。在 16:46 前 50 个库反射率因子增加 2~5 dB,在库数大于 50 时反射率因子增加约 12 dB 左右。通过两个时刻订正量的对比可知雨强越大,衰减越多,订正量越高。

2.3 订正效果

为了验证本次个例的订正效果,先根据本地化的 $Z-I$ 关系统计结果^[28] $Z = 212I^{1.38}$ 计算出雷达订正前后的降水量,并与自动气象站测得的降水量进行比较。

图 7 为 6 月 2 日各雨量计点与雷达订正前后得到的雨强及累积降水量。从试验结果来看,雷达反演的降雨强度与雨量计实测雨强显示了较好的相关性,订正前雷达测雨低估非常明显,订正后反演的累积降雨量与雨量计差值变小。其中降雨强度并不完全一致,一方面是由于雷达和雨量计取样空间、体积不一致,另一方面可能的原因是降雨的时空分布不均匀,即使在径向上也存在一定差别,导致了累积降雨量的差异。

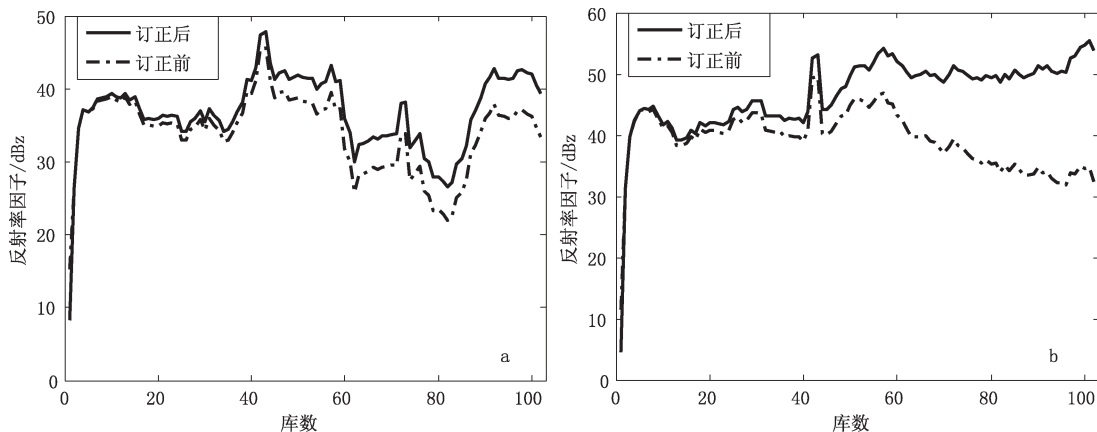


图 6 2015 年 6 月 2 日 15:01(a), 16:46(b) 订正前后反射率因子

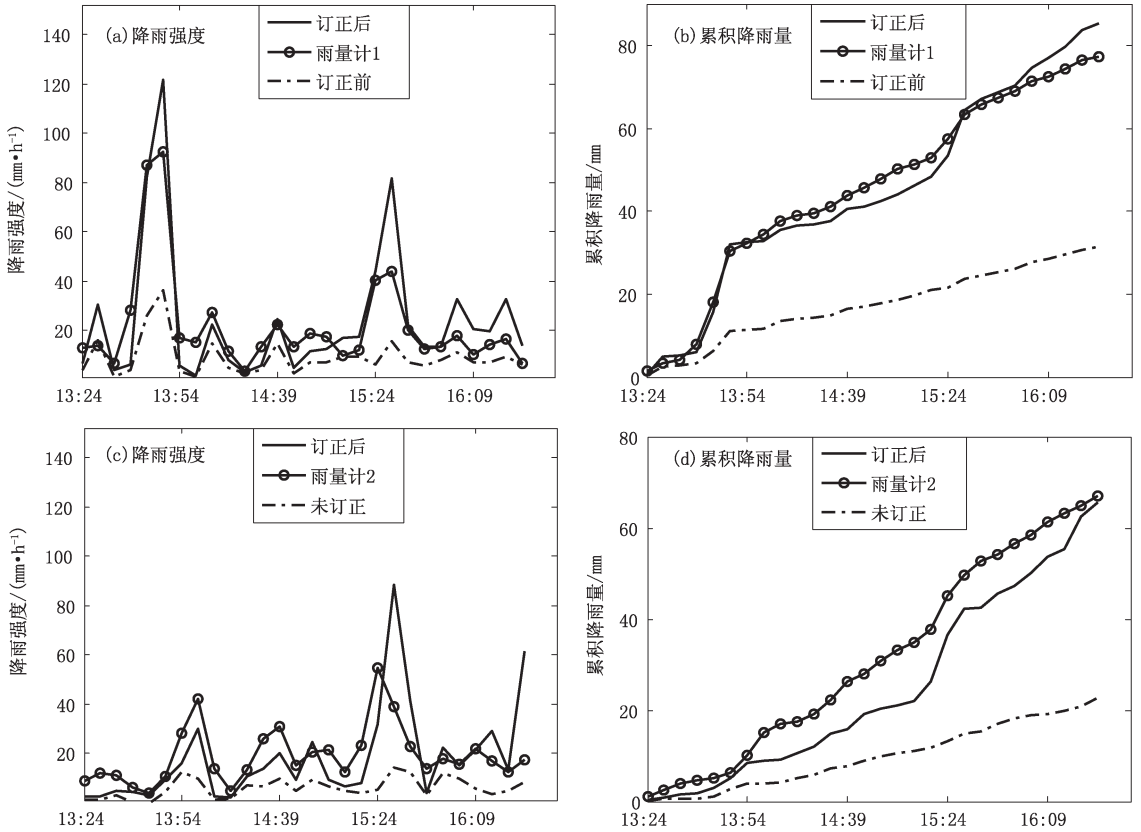


图 7 2015 年 6 月 2 日雷达订正前后反演的降雨与雨量计观测值

为了量化观测数据的比对结果,下面利用降雨强度时序的相关系数 ρ 、累积降雨强度绝对偏差 B_{ias} ,以及累积降雨强度相对偏差 B_{ias_R} 几个指标进行评估:

$$\rho = \frac{\sum_{j=1}^M (r_j^{gauge} - \bar{r}^{gauge})(r_j^{radar} - \bar{r}^{radar})}{\sqrt{\sum_{j=1}^M (r_j^{gauge} - \bar{r}^{gauge})^2 \sum_{j=1}^M (r_j^{radar} - \bar{r}^{radar})^2}}$$

$$B_{ias} = \sum_{j=1}^M (r_j^{radar} - r_j^{gauge})$$

$$B_{ias_R} = \left| \frac{\sum_{j=1}^M (r_j^{radar} - r_j^{gauge})}{\sum_{j=1}^M r_j^{gauge}} \right| \times 100\%$$

如表 1 所示,订正后雷达估测的降雨量与自动雨量站的观测值差异减小,以雨量计点 1 为例,与订正前相比,累积降雨量绝对偏差由 -6.11 mm 减小到 1.04 mm,相对偏差由 0.99% 减小到 0.17%,雷达订正前后估测的降雨强度与雨量计点测得的降雨强度显示了较好的相关性,从而验证了衰减订正的

表 1 雷达订正前后估测降水与雨量计对比

雨量计	实测 降水量 mm	雷达订正前				雷达订正后			
		累积 降雨量 mm	相关 系数 %	绝对 偏差 mm	相对 偏差 %	累积 降雨量 mm	相关 系数 %	绝对 偏差 mm	相对 偏差 %
1	77.22	31.44	84.79	-6.11	0.99	85.44	90.16	1.04	0.17
2	66.99	22.77	57.61	-6.15	1.15	65.70	66.29	2.95	0.55

效果。天气雷达测雨应用过程中,一般会用雨区内某几个点的遥测雨量资料对雷达测雨关系中的经验常数进行实时订正,借以提高测量精度。但由于雷达回波强度不可避免地受距离、雨强分布等的影响而产生衰减,经验关系往往不适用。由此可见,反射率因子的订正算法通过对参数的调整,使得 $k-Z$ 关系更符合实际,从而提高了探测精度。

3 结论与讨论

影响雷达定量估测降水精度的两大主要原因是雨滴谱分布的多样与回波衰减。本文基于实测微波雨衰数据,采用前向迭代逐库订正算法,建立了X波段天气雷达衰减订正模型;并搭建了9.47 GHz的微波链路测量试验系统,对南京地区一次较强的降雨过程进行了测量试验,对比分析了衰减订正前后的雷达测量降水与自动雨量站逐5 min累积的雨量资料。试验结果表明,基于微波链路的径向衰减信息,采用前向迭代法订正后的雷达反射率因子明显高于雷达探测的反射率因子;订正后雷达估测的降雨量与自动雨量站的观测值相差较小,与订正前相比,累积降雨量绝对偏差由-6.11 mm减小到1.04 mm,相对偏差由0.99%减小到0.17%;订正后估测的降雨强度与雨量计的相关性得以提高。该订正算法主要通过对参数的调整,使得 $k-Z$ 关系更符合实际,从而提高了探测精度。试验结果验证了本文所提出的基于微波链路的天气雷达衰减订正模型的可行性和准确性。

本文中尚未考虑探测距离、地球曲率、空间高度等问题,事实上这些问题对于雷达回波与微波链路地面回波的匹配都有影响,将在下一步的工作中考虑这些因素的影响。

参考文献

[1] 王苗,郭品文,邹响,等.我国极端降水事件研究进展[J].气象科技,2012,40(1):79-86.

[2] 梁海河,徐宝祥,刘黎平,等.偏振微波雷达探测大气研究进展及几个问题的考虑[J].地球科学进展,2005,20(5):541-548.

[3] 戴铁丕,傅德胜.天气雷达一雨量计网联合探测区域降水量的精度[J].南京气象学院学报,1990,(4):592-597.

[4] 赵坤,葛文忠,刘国庆,等.在雷达测雨和洪水预报中自适应卡尔曼滤波法的应用[J].高原气象,2005,24(6):956-965.

[5] 白先达,王艳兰,孙莹.雷达定量测量降水[J].气象科技,2011,39(1):61-65.

[6] Hitschfeld W, Bordan J. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths [J]. J Meteor, 1954,11: 58-67.

[7] Hildebrand P H. Iterative correction for attenuation of 5 cm radar in rain [J]. Journal of Applied Meteorology, 1978, 17(4): 508-514.

[8] 张培昌,王振会.天气雷达回波衰减订正算法的研究(I):理论分析[J].高原气象,2001,20(1):1-5.

[9] 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[J].大气科学,1980,4(1):30-39.

[10] Serran S, Delrieu G. Mountain reference technique: use of mountain returns to calibrate weather radars operating at attenuating wavelengths [J]. J Geophys Res 2000, 105(D2): 2281-2290.

[11] 金鑫,朱元竞,王振会.双基雷达联合探测降水廓线的研究[J].气候与环境研究,2001,6(2):191-196.

[12] 郭峰,李凉海,吴旷.星载降水测量雷达参数对反演结果的影响[J].遥测遥控,2007(S1):123-129.

[13] 程明虎,史锐,徐慧.5 cm数字化雷达降水衰减订正[J].科学通报,2000,45(13):1438-1441.

[14] 何宇翔,吕达仁,肖辉,等.X波段双线极化雷达反射率的衰减订正[J].大气科学,2009,33(5):1027-1037.

[15] 毕永恒,刘锦丽,段树,等.X波段双线偏振气象雷达反射率的衰减订正[J].大气科学,2012,36(3):495-506.

[16] 李思腾,陈洪滨,马舒庆,等.网络化天气雷达协同自适应观测技术的实现[J].气象科技,2016,44(4):517-527.

[17] Rincon R F, Bidwell S W, Jameson A R, et al. A multi-frequency, dual-polarization, microwave link for rainfall estimation [C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996. IGARSS '96. Remote Sensing for a Sustainable Future, 1996, Lincoln, NE.

[18] Upton G J G, Holt A R, Cummings R J, et al. Microwave links: The future for urban rainfall measurement? [J]. Atmospheric Research, 2005, 77(1): 300-312.

[19] Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker J. Rainfall measurement using radio links from cellular communication networks [J]. Water Resources Research, 2007, 43(3): W03201.

[20] Leijnse H, Uijlenhoet R, Stricker J N M. Hydrometeorological application of a microwave link: 1. Evaporation [J]. Water Resources Research, 2007, 43(4): W04416. 10.1029/2006WR004988.

[21] 刘西川,高太长,秦健,等.降雨对微波传输特性的影响分析[J].物理学报,2010,59(3):2156-2162.

[22] 姜世泰,高太长,刘西川,等.基于微波链路的降雨场反演方法研究[J].物理学报,2013,62(15):154303.

[23] 刘西川,刘磊,高太长,等.不同类型降水对毫米波传播特性的影响研究[J].红外与毫米波学报,2013,32(4):379-384.

[24] Kramer S, Verworn H R, Redder A. Improvement of X-band radar rainfall estimates using a microwave link [J]. Atmospheric Research, 2005, 77: 278-299.

[25] Krämer S, Verworn H R. Improved C-band radar data pro-

cessing for real time control of urban drainage systems [C]// Proc. 11th Int. Conf. on Urban Drainage, Hydro International, North Somerset, UK. 2008: 1-10.

- [26] Rahimi A R, Holt A R, Upton G J G. Attenuation calibration of an X-band weather radar using a microwave link [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2006, 23(3):

395-405.

- [27] Cummings R J, Upton G J G, Holt A R, et al. Using microwave links to adjust the radar rainfall field [J]. Advances in Water Resources, 2009, 32: 1003-1010.

- [28] 陈磊, 陈宝君, 杨军, 等. 2009—2010年梅雨锋暴雨雨滴谱特征[J]. 大气科学学报, 2013, 36(4):481-488.

Case Analysis of Radar Attenuation Correction Based on Microwave Links

Xue Yang^{1,2} Liu Xichuan¹ Gao Taichang¹ Song Kun¹ Zhang Peng³

(1 College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101; 2 Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710000; 3 The Army Engineering University of PLA, Nanjing 211101)

Abstract: Weather radar attenuation correction has a great significance in improving the accuracy of quantitative precipitation estimation. By using the new method of microwave links, a radar attenuation correction method based on microwave links is analyzed in this paper. The microwave links can measure the path attenuation directly, by which the constraint can be established, and weather radar echoes can be corrected by the forward-iterative correction algorithm. From the existing theories of attenuation correction, the weather radar attenuation correction model based on the microwave links by determining the microwave link attenuation reference, radar attenuation correction algorithm and attenuation coefficients is proposed. At last a 9.47 GHz microwave link measurement experiment system is established, and several automatic precipitation stations and a X-band weather radar are used for comparative observation. The results show that the corrected radar reflectivity factors are higher than the uncorrected factors obviously. The discrepancy between the rainfall derived from the corrected radar reflectivity and the rainfall observed by the automatic precipitation station is relatively small; the absolute deviation of precipitation accumulation is within 3 mm; the relative deviation is within 0.6%. The correlation coefficient is higher than before. The results validated the feasibility and accuracy of the above method. Using the microwave links on weather radar attenuation correction can effectively adjust the relationship between K and Z.

Keywords: quantitative precipitation estimation; attenuation correction; forward-iteration