

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20190358

侧扫雷达测流系统在水文信息监测中的 比测研究及误差分析

梅军亚¹, 陈 静², 香天元²

(1. 水利部长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010;

2. 水利部长江水利委员会水文局长江中游水文水资源勘测局, 湖北 武汉 430012)

摘 要:国内现有的侧扫雷达测流大多停留在比测试验上,尚未有在国家水文站,尤其是大江大河上正式投产、参与整编归档的案例。利用自主研发的 UHF 雷达测流系统,通过在仙桃水文站与常规缆道流速仪测流开展比测试验,判断其测得的表面流速分布的合理性;重点研究表面流速反演流量的技术方法,并开展相应的误差分析。结果表明,UHF 雷达测流系统有较好的流量测验精度,可为该系统在水文信息监测中的推广应用提供参考。

关键词:侧扫雷达;流量反演;比测研究;误差分析

中图分类号:TV123

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2020)05-0054-07

水文信息监测是水文行业最基础的工作之一,包括水文基本资料收集、整理整编、入库归档与发布等。水文基本资料包括水位、流量、含沙量、降水等,其中,流量资料的传统收集方法有声学多普勒流速剖面仪法、流速仪法等。

美国地质调查局(USGS)专门成立了水文二十一委员会,确定了雷达技术最有希望应用于水深、水位高程以及水面流速的远程测量^[1]。2000年,国外学者首次利用非接触式雷达系统成功测得了河流表面流速数据,并计算得到河流流量。当前,我国水文行业正处于一个由传统向现代过渡的阶段^[2-7],在参考和借鉴国外非接触式雷达测流应用研究的基础上,国内对其也开展了较多研究,如在长江、黄河、图们江及南京秦淮河上均开展了实地监测和探测试验,以验证雷达测流方案的可行性和适用性^[8-18]。

目前国内侧扫雷达测流系统的应用大多还停留在比测试验上,尚未有在国家水文站,尤其是大江大河上正式投产、参与整编归档的案例。这可能是因为测验人员对侧扫雷达测流系统原理、性能、流速比测、表面流

速反演流量的技术方法研究不够透彻,数据分析处理水平滞后于测验技术现代化水平。面对严峻的防汛抗旱压力,水文部门对在大江大河上使用新仪器设备开展水文监测的态度比较谨慎。

综上,本文利用武汉大学自主研发的 UHF 雷达测流系统,在仙桃水文站与常规缆道流速仪测流开展比测工作,验证其测得的雷达表面流速分布的合理性,分析测速误差存在的原因;重点研究雷达测得的表面流速反演流量的技术方法,探索其在大江大河水文信息监测中的可行性及适用途径。

1 概况

1.1 仙桃水文站

仙桃水文站地处湖北省仙桃市龙华山六码头(30°23'N, 113°28'E),集水面积 142 056 km²,距汉江河口约 157 km,是控制汉江下游经东荆河分流后设立的一类精度站、国家重要水文站。现有监测项目包括水位、水温、流量、悬移质泥沙、床沙、降水等。

测验断面上距兴隆水利枢纽 111 km,上游右岸约

收稿日期:2019-10-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508000, 2018YFC1508002, 2017YFC0405701)

作者简介:梅军亚(1969-),男,湖北黄梅人,博士,教授级高级工程师,主要从事水文水资源方面的工作。E-mail:2280035532@qq.com

通讯作者:陈静(1990-),女,江苏常熟人,硕士,工程师,主要从事水文水资源方面的工作。E-mail:819929087@qq.com

82km 为汉江分流入东荆河口,下游右岸 6km 处为杜家台分洪闸。测验河段上下游有弯道控制,顺直段长约 1km。河槽形态呈不规则的“w”形,右岸为深槽,左岸中低水有浅滩。河床为乱石夹沙组成,冲淤变化较大,且无规律。全年采用缆道流速仪法测流,按连时序法布置测次。水位流量关系受洪水涨落、变动回水、不经常性冲淤影响,长江干流高水期对该站水位流量关系有明显顶托影响;低水期,水位流量关系受河槽控制呈临时单一关系。仙桃站历史最低水位 22.33m,调查最高水位 36.24m。历史最小流量 165m³/s,实测最大流量 14 600m³/s。水位级划分详见表 1。

表1 仙桃站水位级划分

Table1 The water level division of Xiantao hydrometric station

高水期水位/m	中水期水位/m	低水期水位/m	枯水期水位/m
≥27.00	27.00~25.50	25.50~24.60	≤24.60

1.2 UHF 雷达测流系统

雷达利用目标对电磁波的反射(或散射)现象来发现目标并测定其位置和速度:雷达利用接收回波与发射波的时间差来测定距离,利用电波传播的多普勒效应来测量目标的运动速度,并利用目标回波在各天线通道上幅度或相位的差异来判别其方向。

UHF 雷达测流系统还利用了 Bragg 散射理论,即当雷达电磁波与其波长一半的水波作用时,同一波列不同位置的后向回波在相位上差异值为 2π 或 2π 的整数倍,因而产生增强性 Bragg 后向散射^[19-21]。综合考虑设计成本和原理效果,UHF 雷达测流系统雷达波长为 0.88m,频率为 340MHZ,硬件部分包括发射、接收天线、发射机、接收机、通信模块、电源系统和中心站计算机,软件系统部分包括系统设置、系统测试、数据采集和数据通讯,应用软件部分则包括数据处理和结果显示。

2 比测研究概况

2.1 仪器布设

根据仙桃水文站测验河段特性,UHF 雷达测流系统采用双站式布设,A 站和 B 站均安装于右岸堤顶,雷达监测区域处于 U 型弯道内,靠近雷达的一边为深水区,远离雷达的一边为浅水区(见图 1)。

2.2 比测内容及方法

考虑常规流速仪测验已经形成了长系列的水文资



图1 仙桃站 UHF 雷达测流系统布设位置

Fig.1 The location of UHF radar discharge measurement system at Xiantao hydrometric station

料,采用仙桃站常规测验方法—水文缆道测流与雷达测流系统同步进行流速、流量比测。雷达测流的误差统计以常规流速仪法测验成果为“真值”,利用数理统计方法统计各项误差。

UHF 雷达系统于 2018 年 2 月安装,于 3 月 10 日开始至 9 月底有较稳定的监测数据。B 站雷达金属支架接收天线信号较弱,经 7 月 3 日维修改进后监测到双站矢量合成流速。

仙桃站是国家基本水文站,本次比测工作结合仙桃站日常生产开展,将雷达数据与生产的资料进行对比分析,故采用内插法来解决比测时间及点流速横向分布不一致的问题。

2.2.1 比测时间

雷达测流系统根据设置在整点前 5min 开始工作,每 20s 采集一组数据,连续采集 5min 流速数据后取平均值生成表面流速数据,与实际流速仪测流时段并非严格重合,因此,要根据实际测流平均时间,查找与该平均时间最接近的整点所对应的雷达测流数据,进行对比分析。

2.2.2 起点距定位

由于雷达处理得到的表面流速对应的雷达斜距(0m,10m,20m,30m,...)为雷达发射位置到水体表面的直线距离,与实际的断面起点距存在一定差别。因此,要根据雷达发射位置的高程、坐标、大断面数据及各测次的水位,将雷达斜距做水平投影并加上断面线起点至雷达的水平距离(27m),最终将雷达斜距转换成与实际的大断面起点距相对应的距离(见图 2)。

经过转换后的雷达斜距与本站固定垂线不重合,要根据本站测速垂线的起点距,对相邻雷达斜距对应的雷达表面流速进行线性插补,得到与测速垂线起点距对应的雷达表面流速,再进行误差分析。

2.3 比测资料选用

本研究采用的雷达测流数据为 2018 年 3 月 14

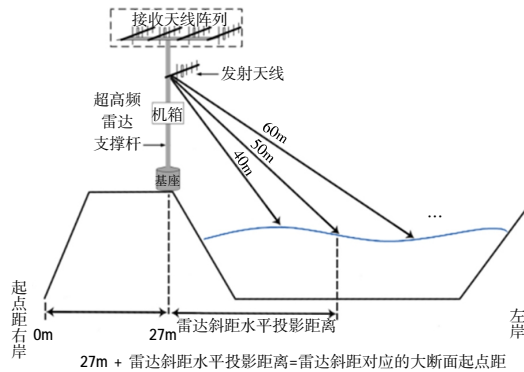


图2 雷达斜距与断面起点距转换关系

Fig.2 The conversion relation between the radar slant range and distance from the starting point of section

日~8月31日的A站雷达测流数据(共计60个测次),7月4日~8月31日的双站合成雷达测流数据(共计24个测次)。流速仪实测资料时间范围为3月14日~8月31日,水位在24.46m~28.68m之间(低水12次、中水19次、高水29次),实测流量在811~3150m³/s。

3 流速比测

3.1 数据选用

表面流速比测A站共有15次,双站共有10次,高、中、低水位级比测测次均在3次及以上(见表2)。

由于本次比测缺乏必要支持,只能结合仙桃站日常生产来开展,本站断面最大水深不超过10m,垂线流速分布呈指数分布,在一般水情下,0.2相对水深位置的流速与水面流速大致接近,且如果流速仪过于接近水面位置可能会对雷达测速产生影响,因此将雷达测速与流速仪0.2相对水深位置的流速进行相关性分析,判断其测得的表面流场是否合理。

3.2 相关性分析及误差分析

虽然已将雷达斜距换算成与断面起点距相应的距离,但由于雷达测距定位的原因,在表面流速横向分布相关性比较中,发现雷达测速与流速仪测速分布存在

一定的水平位移差,对雷达测速数据水平移动不同距离后,再与流速仪实测流速统计相关系数,得到相关系数最大的最佳吻合位置(见图3)。

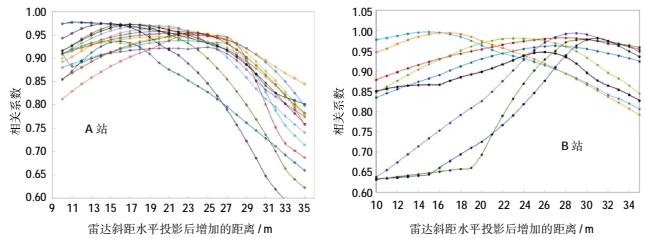


图3 雷达测速数据水平移动不同距离后的相关系数分布

Fig.3 The correlation coefficient distribution of radar velocity data after moving horizontally by different distances

从单站来看,雷达斜距水平投影后加19m后转化成的起点距吻合较高,即雷达测速数据整体向右岸偏移8m,与流速仪测速相关系数在0.91~0.97;从双站来看,雷达斜距加27m后转化成的起点距吻合较高,这也与实际情况较为符合,相关系数在0.91~0.99。据此,对雷达双站合成表面流速与流速仪流速相比,相对误差的绝对值在10%以内占22.22%,10%~20%之间占42.22%,20%~50%之间占30.00%,超过50%占5.56%(见图4)。

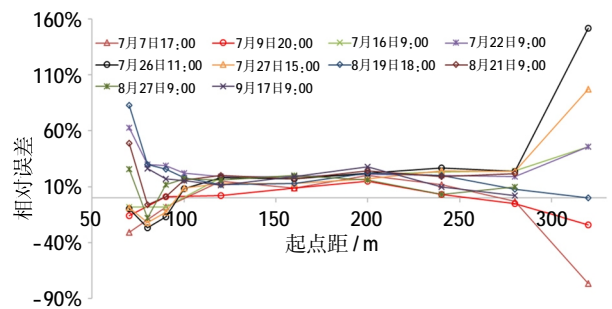


图4 雷达测速数据与流速仪测速数据误差分布

Fig.4 The error distribution of radar velocity data and velocimeter data

3.3 小结

根据雷达测速横向分布相关性分析可知,雷达测

表2 表面流速比测分析统计

Table2 The statistic of surface velocity comparison analysis

序号	时间	水位	雷达	水位级	序号	时间	水位	雷达	水位级
1	5月6日14:00	25.19	A站	低水	9	7月22日9:00	26.98	A站、双站	中水
2	5月9日15:00	25.67	A站	中水	10	7月26日11:00	26.59	A站、双站	中水
3	5月11日9:00	26.08	A站	中水	11	7月27日15:00	26.48	A站、双站	中水
4	5月12日9:00	25.90	A站	中水	12	8月19日18:00	25.75	A站、双站	中水
5	5月18日10:00	25.72	A站	中水	13	8月21日9:00	25.40	A站、双站	低水
6	7月7日17:00	27.80	A站、双站	高水	14	8月27日9:00	24.88	A站、双站	低水
7	7月9日20:00	28.68	A站、双站	高水	15	9月17日9:00	23.70	A站、双站	低水
8	7月16日9:00	27.55	A站、双站	高水					

得的表面流速与实际断面流速分布的一致性较高,双站的测速数据更加稳定、可靠。根据双站雷达测速误差分析可知,雷达测速相对误差在 10%~20%为主,存在误差的主要有以下几个原因:

(1)比测位置的不一致:由于条件所限,流速仪测的是 0.2 相对水深位置的流速,这导致垂向位置不一致;同时,雷达测流系统的测量区域是以仪器安装点为圆心,由天线发射张角构成的扇形区域(见图 5),某点的流速为 10m×10m 扇形方格网(A 站)或 10m×10m 矩形方格网(双站)面上测量得到的平均值,与固定垂线起点距不一致。

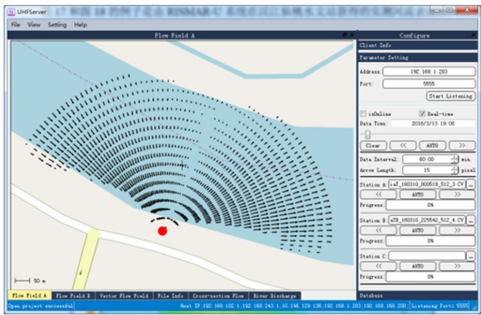


图 5 雷达系统获取的表面径向流
Fig.5 The radial surface flow obtained by radar system

(2)比测时间的不一致:雷达系统为整点前 5min 流速数据的平均值,而传统的水文缆道流速仪测流限于具体的操作方法,往往难以做到测流时间为整点时间,单次流量成果的测验时间为开始时间和结束时间的平均值。

(3)误差较大的地方主要出现在两岸,这主要是由于:①岸边流速较小导致计算相对误差基数小,误差值大。②岸边流速相对主泓变化剧烈,非线性关系(见图 6),而雷达测速面均值,在单点比较上会存在一定的不

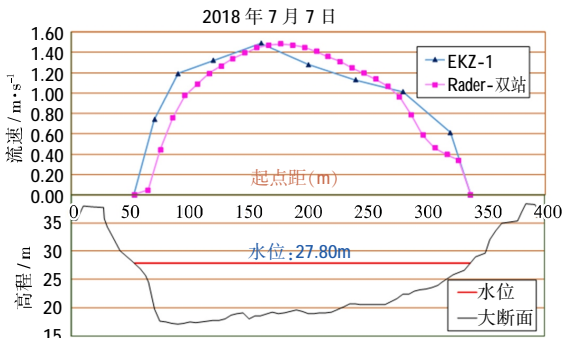


图 6 雷达与流速仪流速分布对照
Fig.6 The comparison of velocity distribution between radar and velocimeter

同。但是岸边流速对断面流量的贡献较小,对断面流量的影响较低。

综上,根据流速相关性分析和误差分析,在条件限制的情况下,可以认为雷达测得的表面流速与实际天然流速存在一定一致性,可用于后续表面流速反演流量的进一步分析。

4 流量反演方法及误差分析

目前侧扫雷达测得河流表面流速后反演流量的主要方法包括:流速面积法、类浮标法、指标流速法及水动力学模型等 4 种方法,水动力学模型法较为复杂,实用性有待加强,因此本文对前 3 种较为常规的方法进行分析。

4.1 流速面积法

UHF 雷达测流系统软件利用流速面积法进行断面流量的计算:将雷达测流生成的各垂线表面流速按照指数分布,计算得到各垂线平均流速;根据测站自记水位计查得相应水位;借用仙桃站 2018 年汛前实测大断面,计算部分面积、部分平均流速,得到部分流量 $q_i = V_i A_i$,累加得到断面流量 $Q = \sum_{i=1}^n q_i$ 。其中,针对某些异常值,软件采用中值滤波法处理。

在指数模型下,其指数关系满足:

$$\frac{v}{v_*} = a \left(\frac{y}{y_*} \right)^m \tag{1}$$

对 y 积分得垂线流速与表面流速关系如下:

$$\begin{aligned} \frac{V}{v_0} &= \frac{[(h+y')(m+1) - y'(m+1)]}{(m+1)h(m+1)} \\ &= \frac{1}{(m+1)} \left(\frac{y'}{h} \right)^{m+1} \left[\left(\frac{h}{y'} + 1 \right)^{m+1} - 1 \right] \end{aligned} \tag{2}$$

经分析,A 站、双站合成雷达系统流量与本站实测流量相关系数分别为 0.961、0.973,相对误差-17.5%~8.5%、-10.9%~7.9%,系统误差-2.68%、1.83%,随机不确定度 12.6%、10.7%(见图 7)。

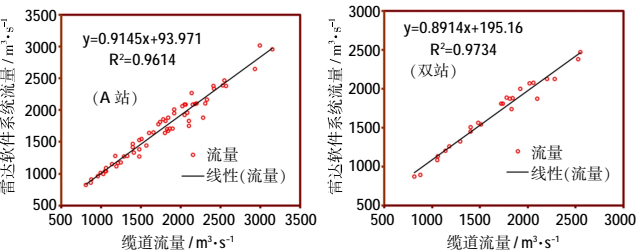


图 7 雷达系统流量与实测流量相关关系
Fig.7 The correlation between radar system and measured discharge

4.2 指标流速法

将流速仪测流断面平均流速与雷达表面流速进行比较,找出与流速仪测流断面平均流速相关关系最好的若干条雷达表面流速的垂线位置,将多条垂线测得的雷达表面流速加权作为指标流速($V_{\text{index}} = \sum_{i=1}^n \alpha V_i$, α 为权重系数)。

利用试错法,综合考虑横向分布代表性较好的若干条垂线(如主泓选择3条左右的垂线,两岸各选1条),得到与断面平均流速相关系数最高的垂线位置及其权重系数:

$$V_{\text{A站加权}} = 0.45V_{40} + 0.02V_{70} + 0.02V_{110} + 0.45V_{160} + 0.03V_{200} + 0.02V_{250} \quad (3)$$

$$V_{\text{双站加权}} = 0.02V_{60} + 0.19V_{110} + 0.60V_{160} + 0.18V_{200} + 0.01V_{270} \quad (4)$$

建立指标流速与流速仪实测断面平均流速的相关关系($V_m = f(V_{\text{index}})$):指标流速与流速仪实测断面平均流速相关关系曲线公式采用抛物线拟合,选取误差最小与实测点配合最佳关系式(见图8):

$$\bar{V}_{\text{流速仪}} = 0.0612 V_{\text{A站加权}}^2 + 1.0056 V_{\text{A站加权}} + 0.1284 \quad (5)$$

$$\bar{V}_{\text{流速仪}} = 0.2724 V_{\text{双站加权}}^2 - 0.0902 V_{\text{双站加权}} + 0.5292 \quad (6)$$

根据两者相关关系,查算雷达线上流速与流速仪法断面平均流速进行误差分析,A站、双站相对误差分别在-18.8%~12.6%、-5.71%~6.01%,系统误差为-0.25%、-0.08%,随机不确定度为10.5%、5.7%。

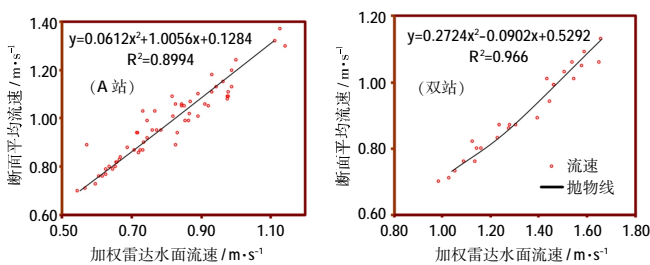


图8 加权雷达表面流速与断面平均流速相关关系

Fig.8 The correlation between the weighted radar surface velocity and the mean velocity in section

4.3 类浮标法

采用均匀浮标法的计算方法把雷达测得的表面流速当做浮标流速,部分平均虚流速、部分面积、部分虚流量、断面虚流量的计算方法与流速仪法测流计算方法相同。

对同一时间雷达表面流速计算得到的虚流量与本站实测流量建立相关关系(见图9),得到:

$$Q_{\text{实测}} = 0.9479 Q_{\text{虚-A站}} - 56.7678 \quad (7)$$

$$Q_{\text{实测}} = 0.9423 Q_{\text{虚-双站}} - 158.22 \quad (8)$$

根据两者相关关系,查算雷达线上流量与实测流量进行误差统计分析,得到以下结果:A站、双站相对误差分别在-24.9%~13.9%、-10.4%~9.6%,系统误差为0.52%、0.16%,随机不确定度为13.9%、10.0%。

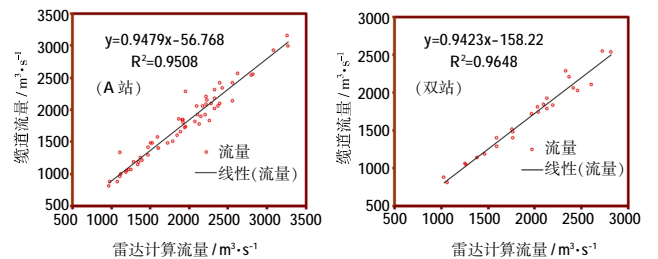


图9 雷达计算虚流量与实测流量相关关系

Fig.9 The correlation between the virtual discharge calculated by radar and the measured discharge

4.4 小结

对上述3种流量反演方法成果进行整理(见表3)可以发现:(1)双站合成的精度均高于单站;(2)指标流速法精度最高;(3)参照《水文资料整编规范》(SL247-2012)水位流量关系定线精度指标,一类站单一曲线法系统误差在±1%以内,随机不确定度在8%以内,采用水面浮标法测流定线随机不确定度可增大2%~4%。除采用A站浮标法推流随机不确定度超过12%外,其余均满足精度要求。

5 结论与展望

5.1 结论

(1)通过对仙桃站UHF雷达测流系统比测研究分

表3 3种流量反演方法误差分析结果

Table3 The results of error analysis by discharge inversion methods

序号	比测分析方法	与断面平均流速/断面平均流量相关关系	系统误差 / %	随机不确定度 / %
1	流速面积法	A 站	-2.68	12.6
		双站	1.83	10.7
2	指标流速法	A 站 $\bar{V}_{\text{A 流速仪}}=0.0612 V^2_{\text{A 站}}+1.0056 V_{\text{A 站}}+0.1284$	-0.25	10.5
		双站 $\bar{V}_{\text{流速仪}}=0.2724 V^2_{\text{AB}}-0.0902 V_{\text{AB}}+0.5292$	-0.08	5.7
3	类浮标法	A 站 $Q_{\text{实测}}=0.9479 Q_{\text{虚-A 站}}-56.7678$	0.52	13.9
		双站 $Q_{\text{实测}}=0.9423 Q_{\text{虚-双站}}-158.22$	0.16	10.0

析,参照《水文资料整编规范》(SL247-2012),认为采用 UHF 雷达测流系统进行测流,收集到的流量资料进行处理后,采用适宜的流量反演方法可得到较好的推流精度,可作为重要成果参与资料整编,初步具备了投产条件。2018 年 12 月,经长江委水文局审查研究后批准投产,同意使用其进行高洪流量测验与相应流量报讯,测验数据与传统方法同步整编。

(2)指标流速法和浮标法优于雷达测流系统本身的流量计算方法,说明本身的流量计算方法有进一步优化可能。

(3)本次比测尚缺乏更加系统全面的资料依据,如比测范围主要在中、低水位级,高水位、大流量资料代表性不足有待继续收集。由于条件限制,现有的比测方案适应性还需要进一步提高。

5.2 展望

通过比测试验与示范应用可以看出,侧扫雷达测流系统实现了全天候、全自动、连续性的河流流量监测,且其安装于岸边,方便技术人员日常维护,是非接触式法中应用较为成功仪器之一,该项技术为我国基本站水文信息监测新方法提供了新思路,将有效的推进水文信息监测现代化技术水平。

由于测量原理上的较大差异,雷达测流系统“面”流速等概念超越了现有规范的理论基础,亟待提出更为科学合理的比测思路与方法。根据《水利部办公厅关于印发水文现代化建设技术装备有关要求的通知》,新仪器设备投产前可与 ADCP 进行比测,建议后续将雷达与 ADCP 进行比测,来解决比测时间、位置不一致的问题。同时,可探索最适合本站的垂线平均流速分布模型,或三维水动力学模型来计算断面流量。此外,由于雷达系统暂时无法获取实时大断面,需要对仙桃站游荡性河床断面冲淤随时间、季节、水位级、流量级、洪水过程变化引起的流量误差分布进一步累积资料样本,给出侧扫雷达系统测流在本站的适用条件。

参考文献:

- [1] 陆伟佳,时霞.浅谈雷达测流技术在美国的发展[J].水利水文自动化,2006,(4):43-45. (LU Weijia, SHI Xia. Lightly discuss development of application of radar technology in flow measurement in USA [J]. Automation in Water Resources and Hydrology, 2006,(4):43-45. (in Chinese))
- [2] 香天元,熊珊珊. 论水文监测信息生产现代化体系的构建[J]. 人民长江, 2015,46(3):65-69. (XIANG Tianyuan, XIONG Shanshan. Construction of modernization system of hydrologic monitoring information production [J]. Yangtze River, 2015,46(3):65-69. (in Chinese))
- [3] 赵昕,梅军亚,李厚永,等.水文监测创新在 2016 年长江洪水测报中的作用[J]. 人民长江, 2017,48(4):8-12. (ZHAO Xin, MEI Junya, LI Houyong, et al. Role of hydrological monitoring and measurement innovation in flood forecast of Changjiang River in 2016 [J]. Yangtze River, 2017,48(4):8-12. (in Chinese))
- [4] 陈守荣,香天元,赵昕. 长江水文测验方式方法技术创新实践与探讨[J]. 中国水利, 2010,(5):45-47. (CHEN Shourong, XIANG Tianyuan, ZHAO Xin. Technical innovation of hydrometry ways and means in Yangtze River: practice and discussion [J]. China Water Resources, 2010,(5):45-47. (in Chinese))
- [5] 王俊.长江水文测验方式方法技术创新的探索与实践[J]. 水文, 2011,31(S1):1-3. (WANG Jun. Innovation of hydrometry for Yangtze River basin [J]. Journal of China Hydrology, 2011,31(S1):1-3. (in Chinese))
- [6] 熊莹,王俊. 长江水文测验体系创新实践与方向性问题探讨[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2017,38(2):11-15. (XIONG Ying, WANG Jun. Practice on innovation of hydrological monitoring system for the Yangtze River and analysis on directional problems [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2017,38(2):11-15. (in Chinese))
- [7] 香天元,梅军亚.效率优先:近期水文监测技术发展方向探讨[J]. 人民长江, 2018,49(5):26-30. (XIANG Tianyuan, MEI Junya. Efficiency first: strategic direction on development of hydrological monitoring technology in the near future [J]. Yangtze River, 2018,49(5):26-30. (in Chinese))
- [8] 陈荣,郑永伟.双轨式雷达波自动测流系统流量系数率定分析[J]. 人民长江, 2018,49(S2):62-65+102. (CHEN Rong, ZHENG Yongwei. Calibration analysis of discharge coefficient of dual track radar wave automatic flow measurement system [J]. Yangtze River, 2018,49(S2):62-65+102. (in Chinese))
- [9] 周凌芸,潘仁红. 非接触式雷达测流技术在阳朔水文站的应用[J]. 广西水利水电, 2014,(2):56-59. (ZHOU Lingyun, PAN Renhong. Application of non-contact radar flow measurement technology at Yangshuo hydrological station [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2014,(2):56-59. (in Chinese))
- [10] 李庆平,秦文安,毛启红.非接触式流量在线监测技术在山区性河流的应用研究[J].湖北民族学院学报,2013,31(3):354-356. (LI Qing-ping, QIN Wenan, MAO Qihong. Application of non-contact flow online monitoring technology in mountainous rivers [J]. Journal of Hubei University for Nationalities (Natural Science Edition), 2013,31(3):354-356. (in Chinese))
- [11] 李柯.基于全数字超高频雷达海浪 Bragg 与非 Bragg 散射机理研究[D]. 武汉:武汉大学,2015. (LI Ke. Bragg and Non-Bragg Wave Scattering Research Based on Full-digital UHF Radar System [D]. Wuhan: Wuhan University, 2015. (in Chinese))
- [12] 吴汉,宋丽琼.雷达测速仪水文测验的应用研究[J].中国水利,2014,(7):58-59. (WU Han, SONG Liqiong. Studies on application of radar current meter for hydrological test [J]. China Water Resources, 2014,(7):58-59. (in Chinese))
- [13] 张琦.雷达波流速仪在中小河流流量测验中的应用分析[J].黑龙江科学,2017,8(2):47-48. (ZHANG Qi. Application of radar wave current meter in flow test of small and medium rivers [J]. Heilongjiang

- Science, 2017,8(2):47-48. (in Chinese))
- [14] 沈晓红.雷达波测流技术在永定水文站的应用[J]. 水利科技, 2016, (2):53-56. (SHEN Xiaohong. Application of radar wave discharge measurement technology in Yongding hydrological station [J]. Hydraulic Science and Technology, 2016,(2):53-56. (in Chinese))
- [15] 刘代勇,邓思滨,贺丽阳. 雷达波自动测流系统设计与应用[J]. 人民长江,2018,49(18):64-68. (LIU Daiyong, DENG Sibin, HE Liyang. Design and application of radar wave automatic flow measurement system [J]. Yangtze River, 2018,49(18):64-68. (in Chinese))
- [16] 王文华.雷达测流仪比测分析[J].人民黄河, 2016,38(5):6-9. (WANG Wenhua. Comparing test and analysis of radar measuring instrument [J]. Yellow River, 2016,38(5):6-9. (in Chinese))
- [17] 陈学林. 雷达枪水面流速仪简介及其比测试验研究 [J]. 水文, 2008,28(2):67-69. (CHEN Xuelin. Brief introduction and comparative test research of radar gun water surface velocity meter [J]. Journal of China Hydrology, 2008,28(2):67-69. (in Chinese))
- [18] 周冬生,宗军,蒋东进,等. 雷达流速仪测量精度关键技术研究[J]. 水文, 2018,38(5):67-70. (ZHOU Dongsheng, ZONG Jun, JIANG Dongjin, et al. Core technology research on high precision for radar velocity meter [J]. Journal of China Hydrology, 2018,38(5): 67-70. (in Chinese))
- [19] Barrick D E. FM/CW radar signal and digital processing [R]. NOAA Technical Report ERL 183-WPL 26, USA, 1973.
- [20] Crombie D D. Doppler spectrum of sea echo at 13.56 Mc/s. [J]. Nature, 1955,175(4459):681-682.
- [21] Lipa B , Barrick D E. Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: Application at ARSOLE [J]. Journal of Oceanic Engineering, 1983,8(4):22-253.

Intercomparison and Error Analysis of Side Scan Radar Discharge Measurement System on Hydrological Information Collection

MEI Junya¹, CHEN Jing², XIANG Tianyuan²

(1.Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission,Wuhan 430010,China;2. Middle Changjiang River Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430012,China)

Abstract:Based on the fact that the domestic side scan radar discharge measurement is limited on comparison experiment, and lacking application cases in formally production and hydrological data processing at national hydrometric station and great rivers. This study applied self-developed UHF radar discharge measurement system, and judged the rationality of the radar surface velocity distribution through its comparison experiments with regular hydrological cableway velocimeter at Xiantao hydrometric station, and focused on the technical method of discharge calculation and error analysis. The results show that its precision is high, which could provide reference for the application of the radar discharge system in hydrological information collection.

Key words: side scan radar; discharge calculation; comparison experiments; error analysis

(上接第 70 页)

- [9] 云南省水利厅. 云南省水功能区纳污能力核定和分阶段限制排污总量控制方案[R]. 2015. (Yunnan provincial Department of Water Resources. Scheme of approved assimilative carrying capacity of water functional zones and staged restriction pollutants discharge in Yunnan province [R]. 2015. (in Chinese))
- [10] 丛沛桐,王瑞兰,李艳. 南方暖湿地区河流生态环境需水量估算 [J].水土保持通报, 2007,27(1):43-46. (CONG Peitong, WANG Ruilan, LI Yan. River eco-environmental water requirement in the warm-wetness region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2007,27 (1):43-46. (in Chinese))
- [11] 李家星,赵振兴. 水力学[M]. 南京:河海大学出版社, 2001. (LI Jiaxing, ZHAO Zhenxing. Hydraulics [M]. Nanjing: Hohai University Press, 2001. (in Chinese))

Study on the Ecological Water Demand of Yinjiang National Wetland Park

ZHAO Cui

(Water Power Survey and Design Institute of Dehong Prefecture, Mangshi 678400, China)

Abstract: This paper established ecological water demand model of wetland and calculated ecological water demand of Yinjiang national wetland park, which was based on attributes of ecosystems for Yinjiang national wetland park, topographic map and measured hydrographic data at Lahelian hydrometric station. Results show that the minimum ecological water requirement is 20.9 m³/s and 47.2 m³/s in dry season and flood season respectively. The upland water is much greater than the minimum ecological water demand from Dayingjiang river. The wetland ecosystems are healthy for Yinjiang national wetland park.

Key words: Yingjiang national wetland park; ecological water demand; wild animals and plants; sand transport; dilution and purification of pollutants