

# 雷达技术在水文冰厚测量上的应用试验

刘晓凤

(黑龙江省水文局,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:通过比测试验,分析论证了使用雷达技术进行天然条件下河流冰厚测量与传统方法冰厚测量的区别,对测量误差进行了分析,阐述了应用雷达技术可快速、准确测量冰厚的优点。

关键词:雷达;冰厚;测量;误差分析

中图分类号:P332.8

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)04-0066-04

## 1 概述

随着雷达应用的不断发展,雷达技术已广泛用于我国各个行业领域。应用雷达技术进行探测、定位、跟踪、测速等开发应用已相对成熟;近年来雷达技术和仪器在水文测验上也得到越来越广泛的应用,例如雷达测雨,雷达水位计和雷达测速仪进行流速测量等<sup>[1-5]</sup>。

目前在北方冬季冰期测验上,仍然采用传统的测验方式,即按照测验时机在观测断面或观测点上人工开凿冰孔,利用量冰尺测量冰厚。其存在着劳动强度大、工作效率低、测量值误差大、作业安全性差、应急机动能力低等诸多弊端。如应用雷达技术开展冬季冰期测验,可从根本上改变传统打冰孔测量的作业方式,能极大地提高工作效率,减少人工作业的强度和危险性。本文探索雷达技术在水文冰期测验上的应用可行性,并为相关观测规范的修订提供技术支撑。

## 2 雷达探测冰层厚度的基本原理

利用雷达技术测量冰厚的基本原理是利用电磁波在不同介质界面处的反射-折射现象。自21世纪60年代以来,用雷达探测极地冰盖的厚度、结构及冰下地貌等,并利用获得的数据进行相关的极地冰川研究越来越多<sup>[6]</sup>,但在水文行业利用雷达技术测量河流的冰厚等冰情还很少见。

雷达在探测冰层厚度时,向冰面下发射脉冲形式的高频宽带电磁波,电磁波在冰层传播过程中遇到水面与其具有电性差异时发生反射,反射信号到达冰层上表面时由接收天线感应接收,并通过超宽带接收机

转换、放大、量化和记录下回波时刻 $t_1$ ,折射电磁波在冰层中进行传播至冰层下表面与水的分界面时电磁波会再次发生反射和透射,反射回的电磁波再次在冰层中传播至冰层上表面与空气分界面时会第三次发生反射和透射,透射回来的电磁波同样会被量化和记录下回波时刻 $t_2$ 形成雷达回波图像。雷达回波中所记录下的 $t_2$ 和 $t_1$ 之间的差值即为雷达脉冲电磁波在冰层中的传播双程走时,根据雷达脉冲电磁波在冰中的传播速度,自动寻找到冰层与水面分界面,即冰层的下底界面,从而计算出冰层厚度值,见图1。

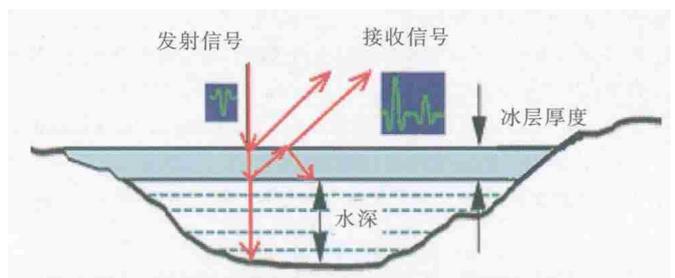


图1 雷达测冰层厚度工作原理示意图

Fig.1 Working principle of the radar to detect ice thickness

根据电磁波在冰层中的双程走时以及冰层的相对介电常数,可采用下式确定冰层的厚度:

$$T = \frac{\Delta t \times c}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中: $T$ 为冰层厚度,mm; $\Delta t$ 为雷达波在冰层中的双程走时,ns; $c$ 为电磁波在空气中的传播速度(30mm/ns); $\epsilon_r$ 为冰层中相对介电常数。

雷达探测冰层厚度具有毫米级的距离分辨能力,能够精准地探知冰层的厚度信息。同理,也可进行冰

上积雪深、冰下冰花厚度和水深的测量。

### 3 开展试验情况

近年来由于新技术、新设备的应用及社会发展和工程建设对冰情观测资料的需求,原《河流冰情观测规范》(SL59-93)已使用近 20 年,不能满足当前水文监测工作实际需求。为探索使用雷达技术在水文冰期测验上的应用和完成“规范”修编相关内容,充实新技术、新设备应用条款,黑龙江省水文局作为该“规范”修编的主编单位,与中国电波传播研究所协作共同完成了相关试验工作,为“规范”修编在新技术、新设备方面的应用,提供了技术支持。主要试验内容是:进行冰层厚度及冰层覆盖积雪深的探测测量,同时进行冰下较浅部位(3m~5m)的水深探测。试验地点选择松花江哈尔滨段水文测验断面,该处江面宽度约为 1100m。试验是分两次完成,2013 年 2 月 24 日采用定点测量方式,测量点选择在哈尔滨水文站固定观测断面线上 33 个测点附近进行。3 月 13 日进行积雪深探测,则分别采用定点和连续两种测量方式,其中定点方式中每个测量点间距为 5m,测量横跨整个江面,一共进行了 213 次的数据采集。此次试验采用了手持式一体化探测雷达、通用雷达两套设备分别进行,并搭配高频天线。

### 4 测试数据及结果

#### 4.1 冰厚探测

进行了 33 个水文观测孔处冰层厚度的测量,其中一处的雷达回波图像如下图 2 所示:

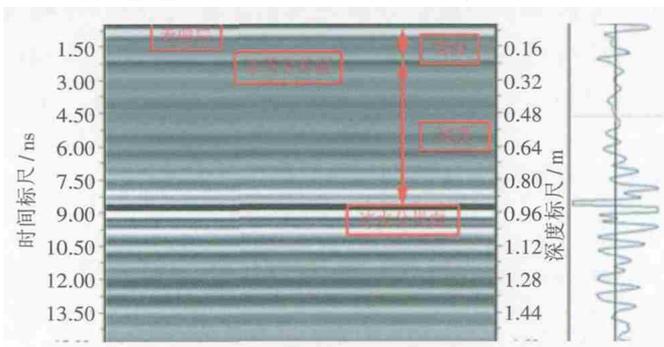


图 2 冰层厚度探测雷达回波图

Fig.2 Radar echo from the ice thickness detection

雷达冰厚测量及与人工测量值对比成果见表 1 所示。

#### 4.2 冰厚和积雪深探测

进行了哈尔滨站全断面剖面的探测,分别采用了连续测量和间隔 5m 的定点测试,其中连续测量的一段雷达图像如图 3 所示。从图 3 可以很明显地看出冰

表 1 哈尔滨站实测冰厚成果统计表

Table1 The measured ice thickness at the Harbin station

测点编号	起点距 / m	冰厚 / m	
		人工	雷达
1	35	0.96	0.97
2	80	0.99	1.00
3	120	0.70	0.71
4	180	0.60	0.60
5	220	0.53	0.54
...	...	...	...
26	810	0.44	0.45
27	840	0.70	0.72
28	880	0.60	0.61
29	900	0.46	0.47
30	920	0.48	0.49
31	950	0.39	0.40
32	980	0.56	0.57
33	1010	0.26	0.26

层厚度的变化,并且可以看出冰层中的裂缝。

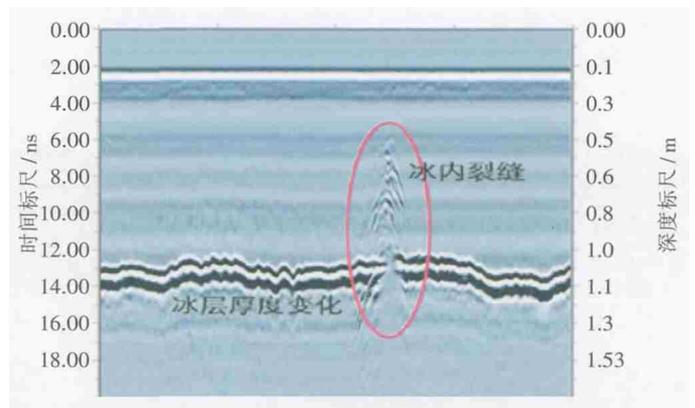


图 3 连续测量雷达回波图

Fig.3 Radar echo of continuous measurement

整个江面冰层厚度变化如图 4 所示:

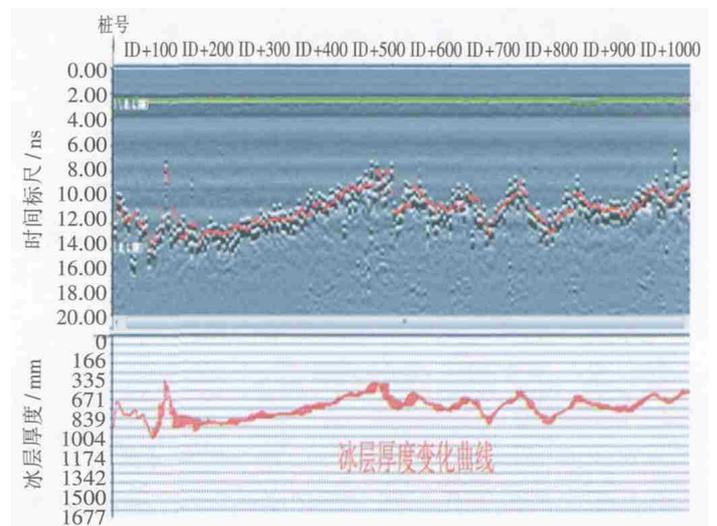


图 4 冰层厚度变化曲线图

Fig.4 Curve of the ice thickness change

通过软件处理可以将该冰层厚度变化曲线形成报表格式,其中部分冰层厚度报表如表 2 所示:

表2 冰层厚度曲线报表

Table2 The ice thickness curve

测试地点		日期		检测设备	
起始里程	终止里程	测量长度	平均值	标准差	实测道数
m	m	m	(mm)	(mm)	
KD+0	KD+5	5	871.33	4.63	10
KD+5	KD+10	5	825.84	44.23	10
KD+10	KD+15	5	858.64	5.91	10
KD+15	KD+20	5	682.58	73.28	10
KD+20	KD+25	5	624.19	10.97	11
KD+25	KD+30	5	680.73	12.45	10
KD+30	KD+35	5	725.90	13.50	10
KD+95	KD+100	5	775.10	31.10	10
KD+100	KD+105	5	511.95	137.61	11
KD+105	KD+110	5	471.56	18.47	10
KD+110	KD+115	5	590.37	19.56	10
KD+115	KD+120	5	791.50	53.70	10

定点测量结果如下表 3 所示:

表3 哈尔滨断面积雪深定点测试结果

Table3 The test results of the snow depth at the Harbin station

起点距 / m	积雪深 / mm		雷达测量冰厚 / mm
	人工测量	雷达测量	
0	125	122	909
5	120	112	630
10	115	108	748
15	30	35	616
20	130	119	564
25	78	84	613
...	...	...	...
...	...	...	...
1 020	115	121	520
1 025	82	90	601
1 030	40	51	579
1 035	140	142	510
1 040	40	48	551
1 045	0	0	571
1 050	115	120	580

将表 3 中积雪深和冰厚值转换成图形模式如图 5 所示。

图 5 可精确标识出哈尔滨站断面剖面上的江面积雪深和冰层厚度的连续分布情况。

### 4.3 水深探测

对于水深探测,采用了中低频 270M 天线进行了一组数据的采集工作,选用此频率的天线所测最大水深约为 5m,因此如需探测到最大深度为 15m 的水深(历年同期最大水深),则相应的可以选用更低频天线

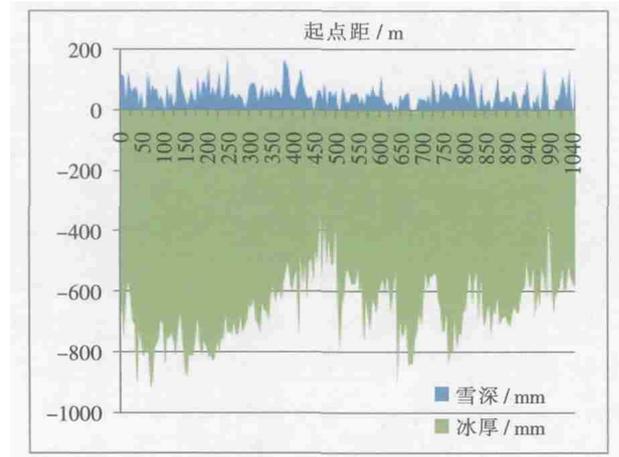


图 5 积雪深及冰厚连续变化图

Fig.5 The continuous variation of the snow depth and ice thickness

如 25M 或 50M 天线。其中本次探测的一幅雷达图像如下图 6 所示:

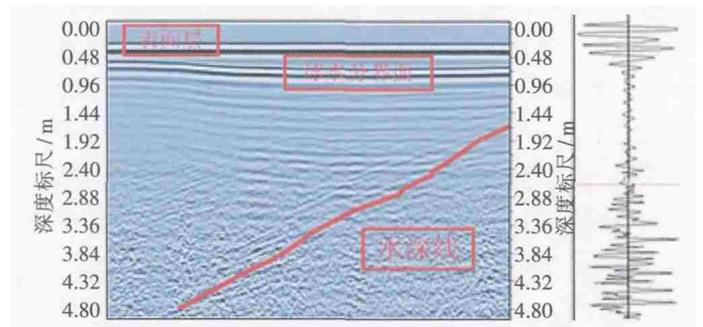


图 6 水深探测雷达回波图

Fig.6 Radar echo from the water depth detection

### 4.4 疑似冰花探测

根据历史同期的观测及当前的天气状况,实验进行时应该已无冰花现象,但根据其中一处所采集到的数据分析,冰层底部存在异常,应是冰层下界一定深度范围内的物质,疑似冰花存在。但因条件所限本次未进行现场的凿冰验证,雷达图像如图 7 所示:



图 7 冰层底部异常反应雷达回波图

Fig.7 Abnormal Radar echo from the ice at the bottom

## 5 误差分析

通过对实测冰厚的 33 组数据分析,利用公式(2)、(3)可计算出标准差和随机不确定度。标准差为<sup>[7]</sup>:

$$S_e = \left[ \frac{1}{n-2} \sum \left( \frac{D_i - D_{ci}}{D_{ci}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: $S_e$  为实测点标准差,%; $D_i$  为雷达实测点的冰厚值,cm; $D_{ci}$  为人工实测点的冰厚值,cm; $n$  为实测点总数。

随机不确定度(置信水平为 95%)为:

$$X'_D = 2S_e \quad (3)$$

利用以上公式计算,人工测量与雷达测量的标准差为 0.023,随机不确定度 0.046,满足《河流冰情观测规范》(SL59-2015)7.2.3 冰厚测量的规定要求。

## 6 结论

通过以上试验和实测数据分析表明:

(1)应用雷达技术测量冰层厚度,可采用定位和连续测量两种方式进行,可快速精确地测定冰层厚度,与常规的人工凿冰孔测量结果对比,误差均小于 2cm。同时,雷达测量冰厚的优点是:快速、准确,可真实、完整地测量测孔和横断面的冰厚数据,准确获取河流全断面的冰厚数据及其空间分布特征,极大地避免了由于人工开凿冰孔或采用冰钻钻孔时,在冰厚下边缘易形成的缺损所造成的人工测量误差。测量结果可真实、全面地反映出河流断面冰层厚度变化情况,显示出雷达连续测量冰厚与人工凿冰孔测量的显著优势。

(2)考虑到人工凿冰孔测量冰厚产生固有偏差,通过雷达测冰理论计算,结合松花江哈尔滨段取冰场电锯切割冰层厚度与雷达直接测量冰块厚度比对,可以确认雷达测量冰层厚度准确性远远高于人工开凿测量精度,可靠性和测量实效性上也优于传统的人工冰厚测量方式。

(3)在雷达测量冰厚作业时可同步完成对冰层表面积雪深度的准确测量,与人工现场测量结果比对,绝大多数测点的误差小于 1cm。采用雷达测量积雪深不仅比人工测量方法快捷精确,同时能够将冰厚和积雪深数据一一对应,准确标识其相关关系,并且可以取得河流全断面冰厚测量的连续数据和积雪深的空间分布情况。

(4)本次试验也验证了使用雷达对冰下水深测量的有效性,采用 270M 天线准确测量到了水下 0~5m 处的河床位置。据此,可以初步推算采用 25M 及 50M

天线就可以达到预计的 15m 水深量程。

(5)依据应用雷达技术测量冰层厚度的试验方法和结果,经分析论证认为,此方法可快速、准确测取冰厚,改变了传统打冰孔测量冰层厚度存在的有限点位代表性差、工作效率低、作业方式原始、劳动强度大、安全性差等诸多弊病。可极大地提高现场工作效率,减少人工作业强度和危险性,并将应用雷达技术探测冰层厚度、积雪深的方法和要求,写入了新修编《河流冰情观测规范》(SL59-2015)的相关条款中。其中:在固定点冰厚测量中,7.2.3 冰厚测量应符合下列规定:e)可采用雷达冰厚仪测量积雪深、冰厚和冰花厚;f)采用雷达冰厚仪进行冰厚测量,应对仪器进行复杂环境下试验,评价标准除仪器测量标准差外应重点分析仪器的适应性、稳定性,应能准确分辨和测量冰上覆雪深度、冰厚、冰花厚等……。在河段冰厚测量中,7.3.9 冰厚平面图测绘应符合下列规定:b)采用雷达冰厚仪进行断面法河段冰厚测量时,断面上测点数量应较凿测孔测量适当增加……;以散点法进行河段冰厚测量时,测点间距应以准确勾绘冰厚等值线为原则,其测孔间距在图上距离宜不大于 3cm……<sup>[8]</sup>。

### 参考文献:

- [1] 张利平,赵志朋,胡志芳,等.雷达测雨及其在水文水资源中的应用研究进展[J].暴雨灾害,2008,(4). (ZHANG Liping, ZHAO Zhipeng, HU Zhifang, et al. An overview of precipitation measured by radar and its application on hydrology and water resources [J]. Torrential Rain and Disasters, 2008,(4). (in Chinese))
- [2] 徐胜,王琳,郑文,等. 黄淮流域天气雷达应用系统介绍与应用分析[J]. 水文,2013,(3). (XU Sheng, WANG Lin, ZHENG Wen, et al. Application analysis of weather radar application system in Huang-Huai basin [J]. Journal of China Hydrology, 2013,(3). (in Chinese))
- [3] 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). (WU Han, SONG Liqiong. Studies on application of radar current meter for hydrological test [J]. China Water Resources, 2014,(7). (in Chinese))
- [4] 周凌云,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). (ZHOU Lingyun, PAN Renhong. Application of non-contact radar flow measurement technology at Yangshuo hydrological station [J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2014,(2). (in Chinese))
- [5] 权雄章,郭云杰,刘文洲. SEBAPULS20 型雷达水位计在民和水文站的比测分析及应用[J]. 甘肃水利水电技术,2010,46(1). (QUAN Xiongzhong, GUO Yunjie, LIU Wenzhou. Application of SEBAPULS20 radar water gauge in Minhe station [J]. Gansu Water Conservancy and Hydropower Technology, 2010,46(1). (in Chinese))

(下转第 43 页)

- [12] Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2011,4:485-498.
- [13] 辛晓歌,吴统文,张洁. BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介绍 [J]. 气候变化研究进展, 2012,(5):378-382. (XIN Xiaoge, WU Tong-wen, ZhANG Jie. Introduction of CMIP5 experiments carried out by BCC climate system model [J]. Advances in Climate Change Research, 2012,(5):378-382. (in Chinese))

## A CMIP5 Multi-model Estimation of Spatio-temporal Characteristics of Temperature, Precipitation in 7 Regions of China

CHENG Xuerong<sup>1</sup>, REN Liliang<sup>1</sup>, YANG Xiaoli<sup>1</sup>, LIU Shijun<sup>2</sup>, TONG Rui<sup>1</sup>, ZHOU Meng<sup>1</sup>

(1.College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China

2.Sichuan water Resources and Hydroelectric Investigation& Design Institute, Chengdu 610072, China)

**Abstract:** Based on outputs from 7 models that participate in CMIP5 under Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios, to analyze and estimate the temperature and precipitation in the 7 regions of China using yearly, seasonal, monthly datasets. The results show that warming is expected in all regions of China and the linear trend of N, ENW, WNW and Tibet is higher than others under the RCP scenarios from 2010 to 2099, with the temperature in autumn and winter show greater warming than in spring, especially in January, August, September, November and December. The trend of temperature for RCP8.5 is higher than the trend for RCP4.5 in most of the regions. It is noted that the temperature in NE will be cool during 2060-2099 under RCP4.5. The regional averaged precipitation will increase, present decreasing from the southeast to the northwest, and more stronger in spring and summer while weaker in winter. The linear trend of precipitation in WNW is the smallest in all the regions. North of the Yellow River precipitation trend is smaller, while the centre of precipitation is in the south of the Yangtze River in spring and summer, especially in May, June, July and August. In autumn, the trend in SE is lower and equal to the averaged level in China under RCP4.5, RCP8.5, respectively, and the slope of temperature is higher than others in NE, N, ENW. It is noted that precipitation will decrease in SW during 2010-2039 under RCP8.5.

**Key words:** estimation; RCP scenarios; CMIP5; China; 7 regions

(上接第 69 页)

- [6] 崔祥斌,孙波,田钢,等.冰雷达探测研究南极冰盖的进展与展望[J]. 地球科学进展,2009,(4).(CUI Xiangbin, SUN Bo, TIAN Gang, et al. Progress and prospect of ice radar in investigating and researching antarctic ice sheet[J]. Advances in Earth Science,2009,(4). (in Chinese))
- [7] SL247-2012,水文资料整编规范[S].(SL247-2012,Code for Hydrologic Data Processing[S]. (in Chinese))
- [8] SL59-2015,河流冰情观测规范[S]. (Technical Standard for Observations of Ice Regime in Open Channels. (in Chinese))

## Application of Radar Technology in Ice Thickness Measuring

LIU Xiaofeng

(Hydrology Bureau of Heilongjiang Province, Harbin 150001, China)

**Abstract:** The comparative test was made to analyze the difference of ice thickness measurement between the radar technology and traditional method. In addition, the measurement errors were analyzed, and the advantages were described as that radar technology can improve quick and accurate measurement of ice thickness.

**Key words:** radar; ice thickness; measurement; error analysis