

便携式高频地波雷达东海表面流探测试验

文必洋¹, 李自立¹, 周 浩¹, 石振华¹, 吴世才¹, 王晓亮², 杨 华², 李四明³

(1. 武汉大学电子信息学院, 湖北武汉 430079; 2. 国家海洋局东海预报中心, 上海 200081;

3. 武汉德威斯电子技术有限公司, 湖北武汉 430074)

摘 要: 便携式高频地波雷达系统(OSMAR S)采用了线性中断调频连续波体制和单极子/交叉环紧凑型天线阵,通过双站合成得到海洋表面矢量流. 2007 年 11 月在洋山海域进行了 OSMAR S 与其他海洋测量设备的表面流现场探测对比验证试验. 试验采用了构成二个断面的五个定点和运用漂流浮标的一个动点同时进行的对比监测方式. 试验结果表明了 OSMAR S 系统的表面流测量效果与其他海洋测量设备的一致性.

关键词: 便携式高频地波雷达; 海洋表面流; 比测; 相关系数

中图分类号: TN959.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2009)12-2778-05

Sea Surface Currents Detection at The Eastern China Sea by HF Ground Wave Radar OSMAR S

WEN Bi yang¹, LI Zi Li¹, ZHOU Hao¹, SHI Zhen hua¹, WU Shi cai¹,
WANG Xiao-liang², YANG Hua², LI Si ming³

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430079, China;

2. East China Sea forecasting center, State of Oceanic Administration, Shanghai, 200081, China;

3. Wuhan Devices Electronic Technology company Limited, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: Portable HF surface wave radar system OSMAR S adopts Frequency Modulated Interrupted Continuous Waveform (FMICW) and Orthogonal Loop/Whip Antenna Arrays. OSMAR S obtains surface vector currents by composing two station surface radical currents. Verification tests of OSMAR S system against in situ measurements had been accomplished on Nov. 12~ 17, 2007. A observing method of fixed five point and a movable point simultaneity comparison was used in the test. This paper introduces the system structure of OSMAR S system, and then presents comparison results of surface currents measurements. The results indicate the OSMAR S system is meet the need of design.

Key words: portable HF ground wave radar system; sea surface current; compared to measuring; correlation coefficient

1 引言

目前,用于海洋动力学参数探测的高频地波雷达在天线形式上主要有二种体制:基于波束形成技术的阵列式高频地波雷达和基于测向技术的便携式高频地波雷达.高频地波雷达工作于短波波带,为形成较窄的波束,阵列式高频地波雷达需要较大且平坦的天线场地,天线阵孔径通常为数百米,且天线阵必须临近海水,这一苛刻的技术要求使得天线阵的建设与维护工作十分困难,严重限制了阵列式高频地波雷达的推广使用.便携式高频地波雷达使用比幅测向技术,接收天线结构紧凑,占地面积很少,无需进行专门的天线阵场地建设,具有很高的性价比,在国际上得到广泛的应用.

经过二十多年的连续研究,武汉大学在阵列式高频

地波雷达技术的研究方面取得了可喜的成绩,其研制的探测距离为 200km 的高频地波雷达 OSMAR2000 已在浙江和福建分别建立了二个应用示范区^[1,2].与国外阵列式高频地波雷达相比,OSMAR2000 的天线阵孔径属于最小的.尽管如此,OSMAR2000 的接收天线阵孔径仍然超过一百米,天线阵的这一尺寸使得高频地波雷达的建站工作仍然相当困难.

为了更好的推广高频地波雷达海洋环境监测技术,降低建站与使用成本,武汉大学电波传播实验室研制了基于紧凑天线阵的便携式高频地波雷达系统 OSMAR-S 试验样机,并与武汉德威斯电子技术公司合作生产了工程样机,并于 2007 年 11 月中旬在上海洋山海域进行了海洋表面流监测的对比验证实验,取得了令人满意的结果.

2 OSMAR-S 雷达系统简介

垂直极化的高频无线电波照射海面产生后向散射回波, Barrick^[3] 定量解释了海洋回波的一阶和二阶散射形成机理, 并建立了一阶和二阶散射截面方程, 为高频雷达探测海洋提供了理论基础. OSMAR-S 是一种新型的海洋表层流探测设备, 其基本探测原理就是利用垂直极化电磁波沿海面绕射传播的原理实现对海洋状态参数的远程探测.

OSMAR-S 是一部相干散射雷达系统. 它主要由频率综合器、同步控制电路、发射机、发射天线、接收天线、多通道接收机、信号处理机组成. OSMAR-S 的波形体制为线性调频中断连续波(FMICW)^[4]. 其主要特点是采用单极子/交叉环作为接收天线^[5], 占地面积很少, 无需进行专门的天线阵场地建设. 雷达工作频率为 12 - 13MHz, 最大探测距离 100km, 径向距离分辨率 2.5km, 流速分辨率为 5cm/s, 角度分辨率为 2.5°.

2.1 OSMAR-S 的天线系统

OSMAR-S 的一个显著外观特点是其紧凑的接收天线系统: 共相位中心的一个单极子天线, 二个相互垂直交叉放置的环天线, 如图 1 所示. 使用环天线的接收机是根据输出信号的幅度来判断来波方位的. OSMAR-S 采用单极子交叉环作为接收天线, 极大地减少了天线占地面积. OSMAR-S 的发射天线是简单的垂直极化的单极子天线^[6, 7].



图1 单极子交叉环天线结构示意图

2.2 OSMAR-S 的信号处理

OSMAR-S 通过对接收信号的预处理, 再结合雷达分辨率计算对应回波处的海洋表面流速^[8-10]. 单站 OSMAR-S 只能测量表面流的径向速度, 间隔一定距离的双站雷达同时获得同一地点的不同方向的径向流, 通过矢量合成的方法, 获得该点的矢量流^[11]. 矢量流的流速、流向与径向流的大小、方位之间的关系可以由图 2 表示出来.

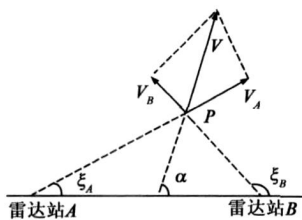


图2 矢量流与单站径向流的关系示意图

V , α 是被测点 P 的矢量流的流速与流向. V_A , ξ_A 是雷达站 A 测得的单站径向流速大小与方位, V_B , ξ_B 则是雷达站 B 测得的单站径向流速大小与方位. 在测得单站径向流后, 由 V_A , ξ_A , V_B , ξ_B 很容易求得 V , α .

3 验证对比实验方案

3.1 实验目的

根据量值溯源和传递原理, 利用已经通过计量检

定的海流观察设备与 OSMAR-S 在同一海区进行同步观测, 通过分析对比不同观测设备所得到的数据, 验证 OSMAR-S 探测的精度和相关性. 本次试验的雷达数据获取由武汉大学、武汉德威斯公司承担, 海上现场试验数据获取由国家海洋局东海预报中心负责, 三方共同承担了便携式地波雷达的海上对比试验.

3.2 实验海区及站位设置

实验海区位于大、小洋山附近海域. 该海域的海流基本为规则半日潮流. 在岱山和嵎泗分别建有二个 OSMAR-S 试验观测站, 最大径向探测距离为 100km. 根据双站观测覆盖范围和海域的具体特点, 选取了五个同步连续观察站位 (A_1 , A_2 , A_3 , A_4 , A_5), 一个漂流浮标起始点 B , 海床基观测站及放置在芦潮港和大戢山的美国 SeaSonde 雷达观测站也同步参与对比. 以上具体位置如图 3 所示.

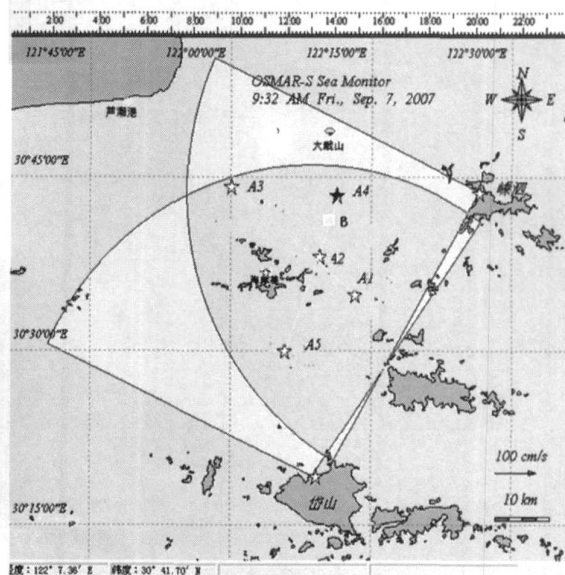


图3 探测海区及站位示意图

3.3 对比实验观测方案

根据需要设计了五点二断面的现场同时监测, 并且首次运用漂流浮标进行同步对比的观测方案. 在五个同步连续观测点分别放置“SLC9-2”型直读式海流计; 在 A_4 站位投放的 SONTEK-1M 型的声学多普勒流速剖面仪(ADP)和放置在海床基观测站的 ADP, 两者都采用坐底观测方式; 漂流浮标选用国家海洋局第二研究所研发的表层流速迹线跟踪仪, 在内置密封的漂流浮筒中放入美国高明的 76 型 GPS, 通过漂流位置点的变化获取表层流速流向; 同时, 在芦潮港和大戢山两处美国 CODAR 公司的 SeaSonde 雷达也参加连续观测对比; 最后, 在 A_4 站位还放置了安德拉海流计.

本次对比实验的方案, 在比测设备的种类和数量上, 以及探测的方式上, 都是比较广泛和丰富的, 所以本次对比实验的方案制定是比较合理和全面的.

4 实验对比结果

海洋表面流一般是缓变的,OSMAR-S 每 20min 得到一场的表面流矢量流场图.对比实验于 12 日 10 时开始,共连续观测 29 个小时,图 4 为监测站点各种测量设备与 OSMAR-S 观测数据对比曲线图.图 5 为美国 CO-

DAR 公司 SeaSonde 雷达和 OSMAR-S 的观测数据对比图.将实验中各个测量设备的数据结果统一在一起进行统计计算.这里用到计算参数有平均误差、平均比值、平均相对误差、均方差、相关系数,对应的结果列于表 1.其中,相关系数反映了雷达测量结果与比测设备实测结果之间的关联程度.

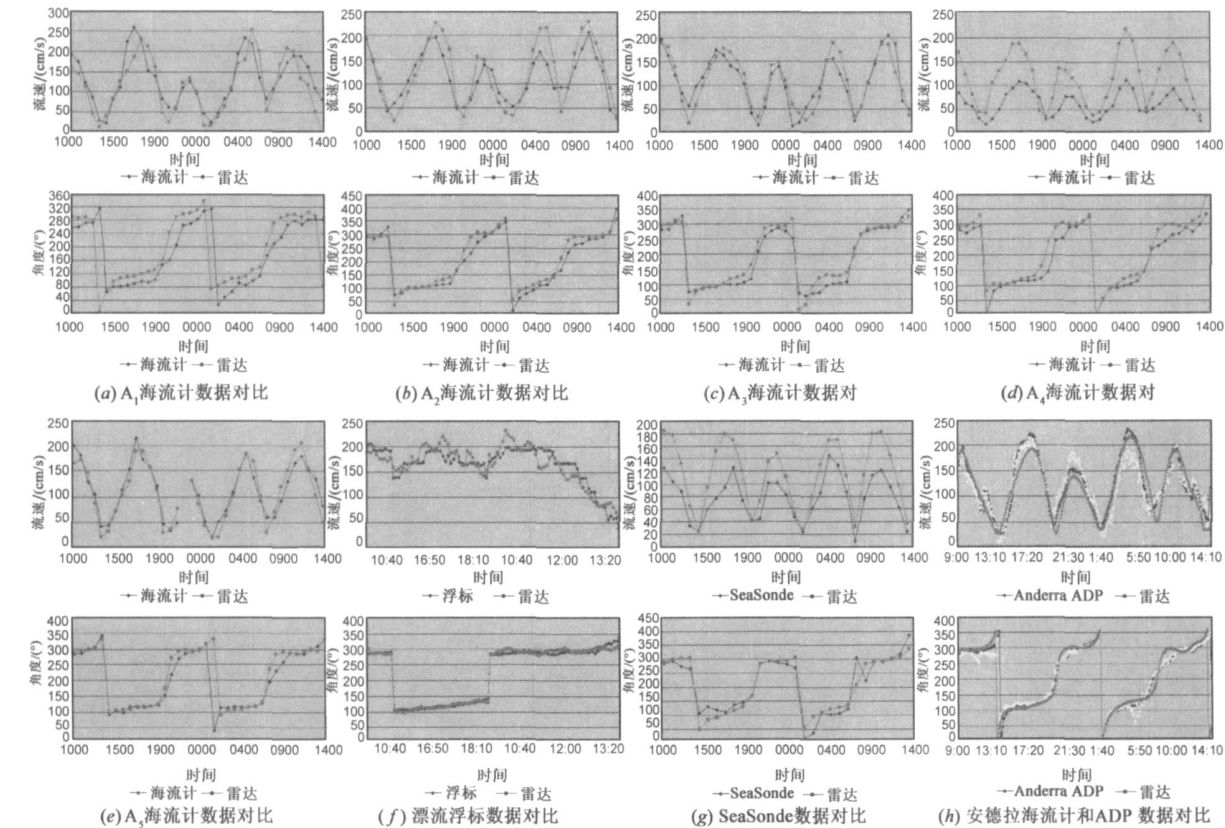


图4 矢量流观测数据对比图

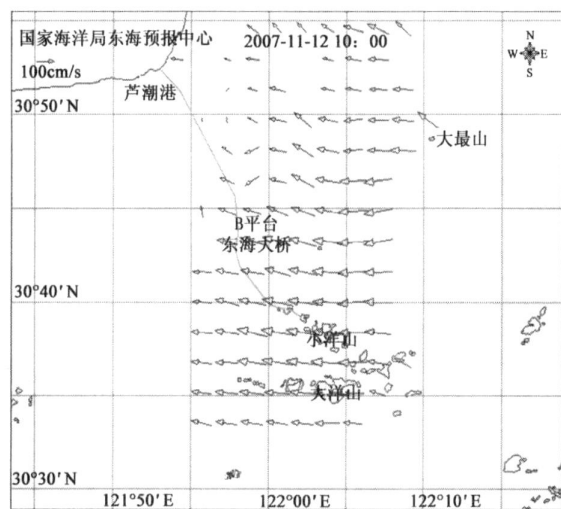
表 1 对比数据参数统计						
		平均 误差	平均 比值	平均相 对误差	均方差	相关 系数
A1 海流计	流速	- 11. 81	0.88	- 0. 12	36. 77	0. 87
	流向	37	1. 22	0. 23	48. 42	0. 84
A2 海流计	流速	9. 80	1. 06	0. 06	32. 16	0. 82
	流向	10. 12	1. 11	0. 07	69. 17	0. 95
A3 海流计	流速	2. 58	1. 13	0. 13	23. 66	0. 91
	流向	8. 04	1. 05	0. 07	24. 20	0. 97
A4 海流计	流速	直读式海流计数据明显偏离正常值,				
A5 海流计	流向	不予计算				
A5 海流计	流速	- 3. 23	0. 96	- 0. 04	19. 11	0. 94
	流向	4. 12	1. 38	- 0. 07	20. 36	0. 74
A4 安德拉	流速	- 4. 37	0. 98	- 0. 02	19. 96	0. 94
	流向	6. 28	1. 06	0. 06	17. 05	0. 99
A4 ADP	流速	- 0. 57	1. 04	0. 04	29. 53	0. 84
	流向	7. 70	1. 04	0. 04	21. 74	0. 99
安德拉 ADP	流速	- 3. 70	0. 996	- 0. 004	21. 46	0. 92
	流向	- 2. 20	1. 15	0. 15	32. 89	0. 94
A3 海流计	流速	37. 37	1. 54	0. 54	38. 37	0. 96

续表 1						
		平均 误差	平均 比值	平均相 对误差	均方差	相关 系数
Seasonde	流向	0. 27	1. 11	0. 11	29. 59	0. 92
海床基	流速	14. 57	1. 30	0. 30	35. 36	0. 78
ADP	流向	- 4. 35	0. 99	- 0. 01	31. 34	0. 93
漂流	流速	0. 83	1. 02	0. 02	18. 77	0. 88
浮标	流向	- 0. 43	0. 996	- 0. 004	9. 89	0. 99

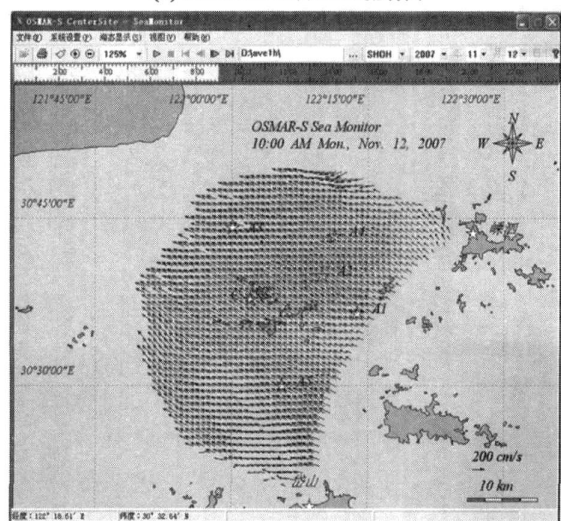
5 实验结果分析

5.1 统计结果对比分析

(1) A1-A2-A3 观测断面. 通过图 4(a)~ 图 4(e) 比较,除了在 A1 站位 OSMAR-S 观测的流向值相对于海流计的测量值相位提前了 30min 之外,其他站位流速和流向对比数据很吻合,整体变化趋势一致.同时,A3 站位处于 SeaSonde 雷达的观测范围内.通过比较图 4(g),SeaSonde 雷达的流速观测值整体上小于 OSMAR-S,而流向观测数据基本一致.两者的流场图所反映的海流整体流向也相同.如图 5 所示.



(a) SeaSonde 12日10:00流场图



(b) OSMAR-S 12日10:00流场图

图5 SeaSonde与OSMAR-S流场图对比

(2) A4-A2-A5 观测断面. 通过图 4(a)~ 图 4(e) 比较, A5 站位 OSMAR-S 观测的流向值相对于海流计的测量值相位滞后了 30min, A4 站位的直读式海流计读数明显偏小, 偏离了正常值, 除此之外, 其他数据对比曲线基本吻合. 在 A4 站位还有安德拉海流计和 ADP 两种对比设备, 与 OSMAR-S 一起进行相互比较. 通过比较图 4(h), 安德拉海流计和 OSMAR-S 两者的流速变化曲线在整体上很吻合, 三种设备的流向变化曲线一致性很高.

(3) 漂流浮标观测. 通过比较图 4(f), 漂流浮标测量的流向与雷达测得的表层流流向非常吻合, 变化规律相同, 流速整体变化趋势也非常一致.

(4) 统计分析结果. 比较表 1 中各种探测设备与 OSMAR-S 观测的相关系数, 除去 A4 站和 A5 站流向、其他站位流速与流向的相关系数均在 0.84 以上, A4 站位的安德拉海流计与 OSMAR-S 观测数据的相关系数最

大, 流速和流向的相关系数分别为 0.94 和 0.99.

综合所有设备的比较分析结果, 安德拉海流计流速测量误差为 $\pm 1 \text{ cm/s}$, 角度测量误差为 $\pm 2^\circ$, 精度是在所有比测仪器中最好的, 而 OSMAR-S 与它的相关系数最好, 从而验证了 OSMAR-S 探测海洋表面流的结果准确, 可靠.

5.2 影响实验结果的因素分析

从总体上看, 在对比验证实验中, OSMAR-S 的观测数据和其他对比观测设备相比, 吻合得较好. 但是, 对比中反映出的差异也是存在的, 引起这些差异的原因大致有以下几点.

(1) 实验都是用不同的设备进行测量, 每种仪器的测量值和表面海流真实值之间都是存在误差的.

(2) 不同设备测量的原理和方法的不同, 得到的测量值一定存在差异.

(3) 不同设备得到的观测数据经过选取和处理以后进行对比, 这个对比数据提取过程又各不相同.

(4) 外部环境因数和地理位置的影响. 比如, 岱山站雷达由于受大、小洋山岛屿的影响, 在 A2 站位接受到的信号可能就比较弱. 还有船舶经过或者局部风的状态的突然变化, 可能存在偏离表面海流变化规律的瞬时扰动, 从而影响观测值.

6 结论

便携式高频地波雷达东海表面流探测对比实验采用了包括漂流浮标在内的多种标准海洋表面流探测设备与 OSMAR-S 进行同海区同步观测对比. 实验结果表明, OSMAR-S 的探测结果和其他标准设备的观测结果能够很好的吻合, 能够满足大面积实时海洋表面流探测的要求. 实验符合国家海洋调查标准, 目的明确, 方案合理, 过程顺畅, 取得了圆满成功. OSMAR-S 的研制成功并投入使用, 是我国在海洋环境监测设备的小型化, 方便化的道路上取得的重要成果.

参考文献:

- [1] 侯杰昌, 吴世才, 杨子杰, 等. 海洋表面流的高频雷达遥感 [J]. 地球物理学报, 1997, 40(1): 18-26.
Hou Jiechang, Wu Shicai, Yang Zijie, et al. Remote sensing of ocean surface currents by HF radar [J]. Acta Geophysica Sinica, 1997, 40(1): 18-26. (in Chinese)
- [2] 吴雄斌, 杨绍麟, 吴世才, 等. 高频地波雷达东海海洋表面矢量流探测试验 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 340-346.
Wu Xiongbin, Yang Shaolin, Wu Shicai, et al. Ocean surface currents detection at the eastern China sea by HF surface wave radar [J]. Acta Geophysica Sinica, 2003, 46(3): 340-346. (in Chinese)

Chinese)

- [3] Barrick D E. First order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the sea[J]. IEEE Trans Antennas Propagation, 1972, AP 20(1): 2- 10.
- [4] Khan R H, Mitchell D K. Waveform analysis for high frequency FMICW radar[J]. IEEE Proceedings F, 1991, 138(5): 411- 419.
- [5] Alan R C. Three Element Antenna Formed of Orthogonal Loops Mounted on a Monopole[P]. U. S. Patent: 443336, 1984.
- [6] 陈江, 吴雄斌, 文必洋, 等. 采用便携式天线的近海洋表面流探测[J]. 武汉大学学报(理学版), 2005, 51(1): 105- 108.
Chen Jiang, Wu Xiongbing, Wen Biyang, et al. Ocean surface current detection by HF ground wave radar with portable antenna system[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2005, 51(1): 105- 108. (in Chinese)
- [7] 高火涛, 郑霞, 李杰等. HFSWR 单极子交叉环天线阵的自适应抗干扰[J]. 电子学报, 2003, 31(10): 1532- 1535.
Gao Huotao, Zhen Xia, Li Jie, et al. Adaptive anti interference for high frequency surface wave radar based on orthogonal loop/ whip antenna arrays[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(10): 1532- 1535. (in Chinese)
- [8] 杨绍麟, 柯亨玉, 吴世才, 等. MUSIC 算法提取海洋表面径向流方位的信号预处理[J]. 现代雷达, 2001, 23(4): 49- 54.
Yang Shaolin, Ke Hengyu, Wu Shicai, et al. Signal preprocessing for bearing determination of ocean surface radial current mapping based on MUSIC[J]. Modern Radar, 2001, 23(4): 49- 54. (in Chinese)
- [9] 钟志峰, 文必洋. 虚拟跳频抑制高频地波雷达角闪烁[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2284- 2288.

Zhong Zhifeng, Wen Biyang. Angular glint suppression by dummy frequency agility for high frequency ground wave Radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(12): 2284- 2288. (in Chinese)

- [10] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation[J]. IEEE Trans Antenna and Propagation, 1986, 34(3): 276- 280.
- [11] 周浩, 文必洋, 刘海文. 高频地波雷达海洋表面矢量流合成[J]. 武汉大学学报(理学版), 2001, 47(5): 634- 637.
Zhou Hao, Wen Biyang, Liu Haiwen. Ocean surface vector current synthesization of HF ground wave radar[J]. Journal of Wuhan University (Natural Science Edition), 2001, 47(5): 634- 637. (in Chinese)

作者简介:



文必洋 男, 1963 年出生于湖北省仙桃市. 武汉大学电信学院博士生导师, 教授. 现从事高频地波雷达系统及海洋遥感研究.
E mail: bywen@whu. edu. cn



李自立 男, 1979 年 12 月出生于广西壮族自治区桂林市. 2006 年毕业于武汉大学电子信息学院电子工程系. 现为武汉大学电子信息学院博士研究生, 从事高频地波雷达信号处理研究.
E mail: enishizli@ hotmail. com