

国 际 电 信 联 盟

ITU-R

国际电联无线电通信部门

ITU-R M.1874-1 建议书

(02/2013)

**在3-50 MHz 频率范围的子频带内
工作的海洋雷达的技术
和操作特性**

M 系列

**移动、无线电测定、业余
和相关卫星业务**

15 
1865-2015



国际电信联盟

前言

无线电通信部门的职责是确保卫星业务等所有无线电电信业务合理、平等、有效、经济地使用无线电频谱，不受频率范围限制地开展研究并在此基础上通过建议书。

无线电通信部门的规则和政策职能由世界或区域无线电通信大会以及无线电通信全会在研究组的支持下履行。

知识产权政策 (IPR)

ITU-R的IPR政策述于ITU-R第1号决议的附件1中所参引的《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策》。专利持有人用于提交专利声明和许可声明的表格可从<http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>获得，在此处也可获取《ITU-T/ITU-R/ISO/IEC的通用专利政策实施指南》和ITU-R专利信息数据库。

ITU-R 系列建议书

(也可在线查询 <http://www.itu.int/publ/R-REC/en>)

系列	标题
BO	卫星传送
BR	用于制作、存档和播出的录制；电视电影
BS	广播业务（声音）
BT	广播业务（电视）
F	固定业务
M	移动、无线电定位、业余和相关卫星业务
P	无线电波传播
RA	射电天文
RS	遥感系统
S	卫星固定业务
SA	空间应用和气象
SF	卫星固定业务和固定业务系统间的频率共用和协调
SM	频谱管理
SNG	卫星新闻采集
TF	时间信号和频率标准发射
V	词汇和相关问题

说明： 该ITU-R建议书的英文版本根据ITU-R第1号决议详述的程序予以批准。

电子出版
2015年，日内瓦

© 国际电联 2015

版权所有。未经国际电联书面许可，不得以任何手段复制本出版物的任何部分。

ITU-R M.1874-1 建议书

在3-50 MHz频率范围的子频带内工作的
海洋雷达的技术和操作特性

(ITU-R 240/5号研究课题)

(2009-2010-2013年)

范围

本建议书提出3至50 MHz频带内共用和兼容性研究以及频谱规划和系统部署所用的海洋雷达的技术与操作特性。本建议书提出短距离、标准距离、远距离、甚远距离和高分辨率海洋测量系统的相关特性。

国际电联无线电通信全会，

考虑到

- a) 在无线电测定业务¹系统中需要使用3至50 MHz频率范围内的频谱来运行海洋雷达系统；
- b) WRC-12为运行这些雷达在3至50 MHz频率范围内划分了一系列频段；
- c) 在全世界范围内部署此类工作系统具有普遍吸引力；
- d) 性能、功能和数据要求通常决定了海洋观测雷达系统可使用的频谱范围，

认识到

频谱管理和部署规划需要了解海洋雷达系统的有代表性的技术和操作特性，

建议

- 1 在开展与其他业务系统的共用和兼容性研究时，应考虑附件中所含海洋雷达的技术和操作特性；
- 2 在进行规划时也应考虑附件中所含海洋雷达的技术和操作特性。

¹ 无线电定位业务和无线电导航业务都是无线电测定业务的分支业务。

附件

在3-50 MHz频率范围的子频带内工作的 海洋雷达的技术和操作特性

1 引言

世界上有相当比例的人口居住在海岸线50英里以内，这种状况突出了对准确、可靠和详细的沿海环境变量测量的需求。

大气中风的运动为何时何地出现天气系统提供了信息，同样，海流决定了海洋事件的运动。这两种动态流都用于确定人为的或天然的污染源的移动方向。目前，海流不像风那样有现成的测量数据。

有鉴于此，人们越来越关注准确测量沿岸水域海流和波浪的能力。在50 MHz以上频率工作的雷达系统提供的数据在满足目前的范围、准确度和分辨率要求方面能力有限。全球海洋学界正计划在沿海部署海面监测雷达系统。获得更准确的沿岸流和海况的测量带来的社会效益包括更好地理解近岸污染、渔业管理、搜救、海滩侵蚀、水上导航、沉积物输运和海啸及相关的面波共振响应（见附录）等问题。海岸雷达对海面的测量通过搜集海况和主要的海浪数据为气象服务提供支持。另外，海洋雷达技术可进行水面船舶的远距离探测，在全球海上预警中得到了应用。这将有益于船舶航行和港口的安全保障²。

为了减轻海啸等灾害的后果，理解气候变化和确保安全的海上旅行，有必要提供更多的数据，这促使人们考虑在全球范围内海洋雷达网络的实际使用。

这些系统在日本的实施示于图1和图2。

² 《岸基海洋动力学应用雷达(CODAR)技术在美国海岸护卫队搜救规划中的使用》，David Ullman, James O'Donnell, Christopher Edwards, Todd Fake, David Morschauser, 海岸护卫队研发中心，康涅狄格州，格罗顿。

图1

日本国土交通省运行的东京湾观测系统的
海洋雷达观察到的表层流示例



M.1874-01

图2

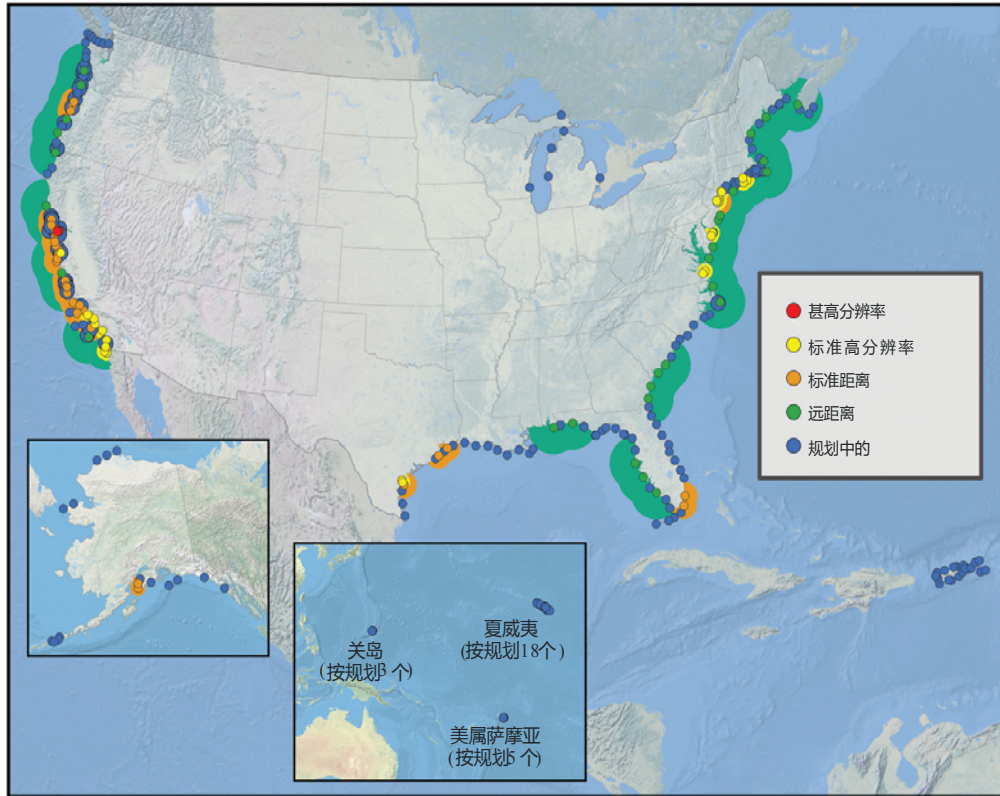
日本の海洋雷达
(示出了每一固定雷达站的观测区域)



M.1874-02

截至2009年，美国沿海地区不均匀地散布着143个海洋雷达（该数字包括目前不定期工作的雷达）。美国几乎所有的海洋雷达系统都由大学的研究机构拥有和运行。美国、太平洋岛屿和加勒比海地区现有和规划中的海洋雷达站示于图3。

图3
美国、太平洋岛屿和加勒比海地区
现有和规划中的海洋雷达站

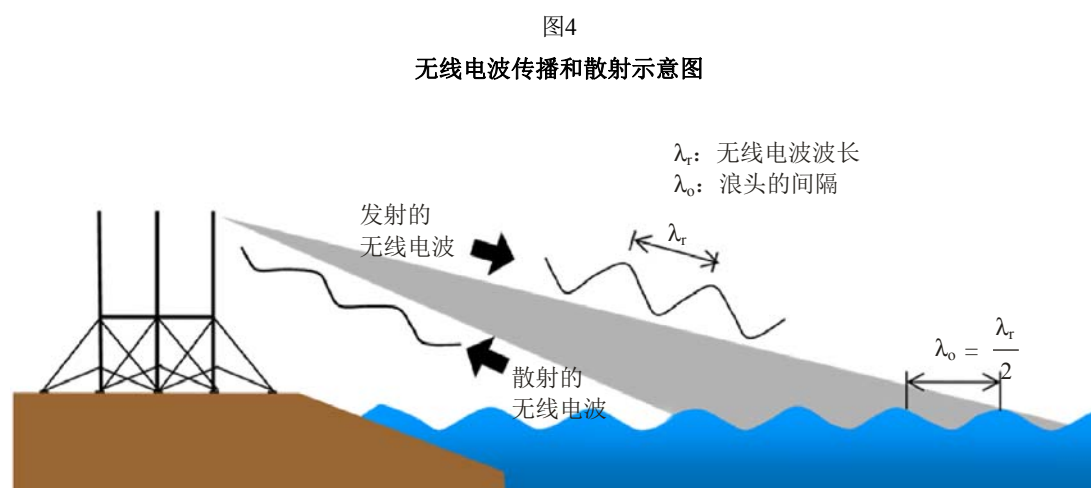


M.1874-03

建立海洋雷达监测站网络纳入了综合海洋观测系统(IOOS)开发计划，并成为全球海洋观测系统(GOOS)的一部分，而全球海洋观测系统则是全球综合地球观测网(GEOSS)的一个重要组成部分。

2 工作原则

对于采用布拉格散射³的海洋雷达，3至50 MHz的频率范围(波长100至6 m)在测量由风掀起的海浪方面非常有用(见图4)。雷达的空间分辨率受到信号带宽的限制，例如，100和300 kHz的带宽给出的分辨率分别为1.5 km和500 m⁴。



M.1874-04

这些系统的目标是用海洋雷达获得环境操作（例如污染的信息搜集和控制）的连续、实时信息，提供减灾服务（例如海啸浪检测），提供水上安全服务（例如监测海流的海况观测）。

由海洋雷达测量的物理参数及相关性能要求决定了支撑数据搜集的频率范围。在海洋观测中，海洋雷达利用粗糙的海平面来测量海流和海况。当海洋表面上浪头之间的间隔等于海洋雷达所用频率的半波长时，就会在雷达方向反射回强烈的反射信号。这种现象就称为布拉格散射。3至50 MHz的频率范围对海洋观测雷达操作非常有用，因为浪头之间的间隔与雷达工作频率匹配的海浪总会出现。减灾行动会追求较高的时间分辨率，而环境操作则会追求较高的空间分辨率。另外，对回波信号多普勒频移的测量会令运行机构测量海况和海流的其他属性。

海洋雷达所用的两种主要传输技术是连续波(CW)脉冲和线性调频连续波(FMCW)脉冲群。表1是与典型海洋雷达有关的参数清单。

³ 当发射的表面波波长等于海上表面波的半波长时，在雷达方向将会反射回强烈的反射信号。

⁴ L 为分辨率， c 为光速(= 300 000 km/s)，带宽为 f_c ，其关系式为 $fc = c/2L$ 。

表1

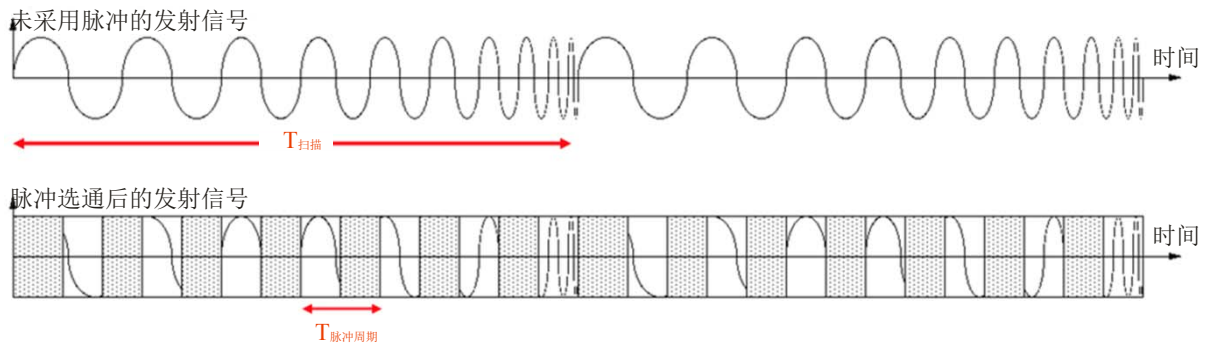
典型海洋雷达波形参数清单

中心频率 (MHz)	扫描带宽 (kHz)	扫描时间 ($T_{扫描}$) (s)	脉冲周期 ($T_{脉冲周期}$) (μs)	占空比 (%)
4.53	25.6	1	1 946	50
13.46	49.4	0.5	669	50
24.65	101	0.5	486	50

图5示出了典型海洋雷达的波形结构。图中上部的波形表示FMCW信号。下部的波形是有代表性的选通信号。

图5

典型海洋雷达的波形结构

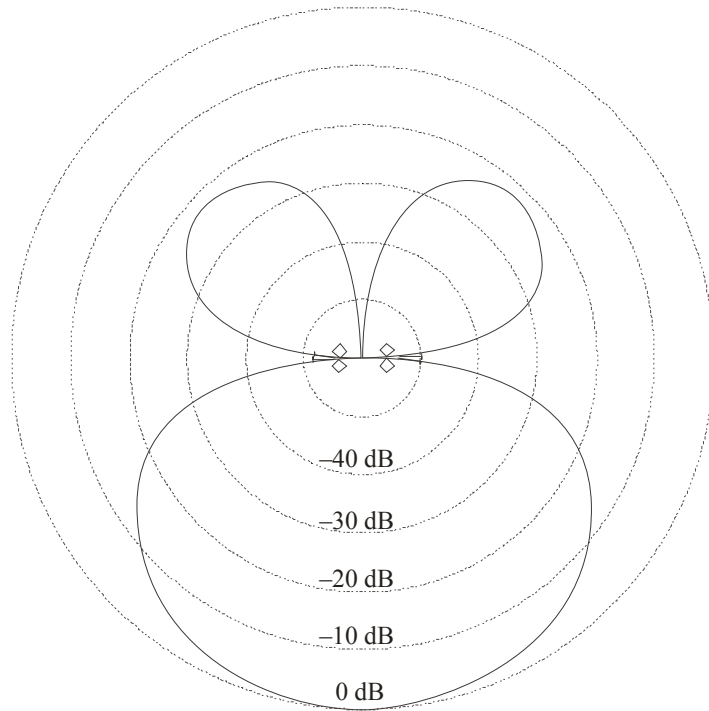


M.1874-05

3 海洋雷达天线

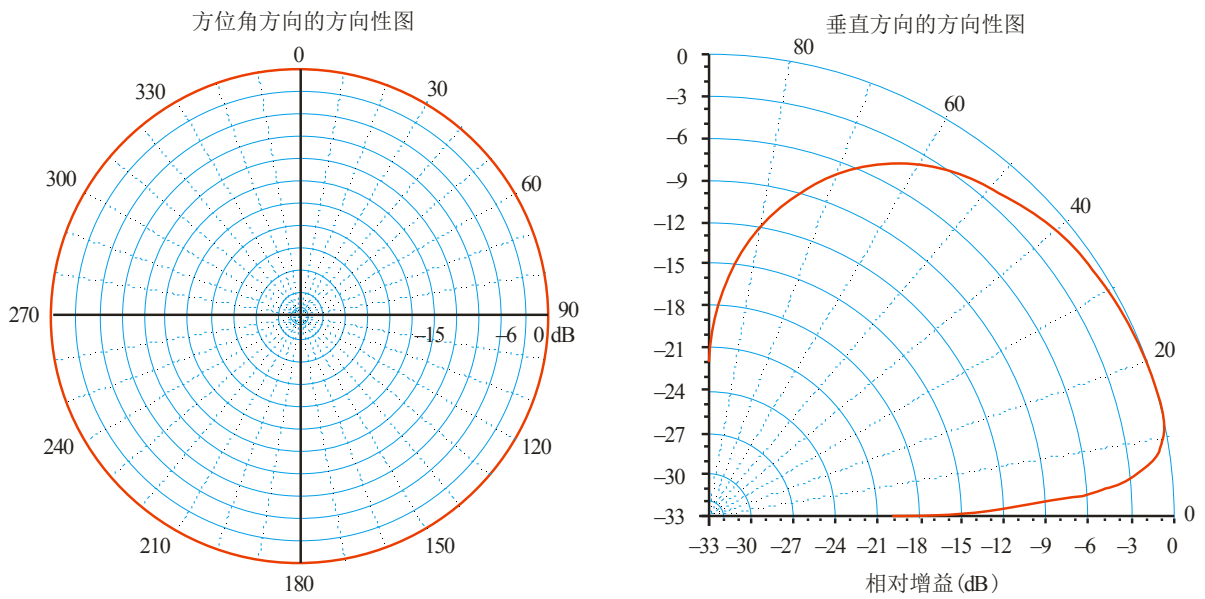
目前，海洋观测雷达系统采用种类繁多的天线。有些系统在方位角方向的扫描既利用3单元八木天线，也利用相控阵系统，而发射则采用多组八木天线，以限制海洋雷达信号的地理传播范围。图6、图7、图8示出了某些典型海洋雷达天线的方向性图。

图6
典型海洋雷达天线方向性图
(4单元垂直单极阵)



M.1874-06

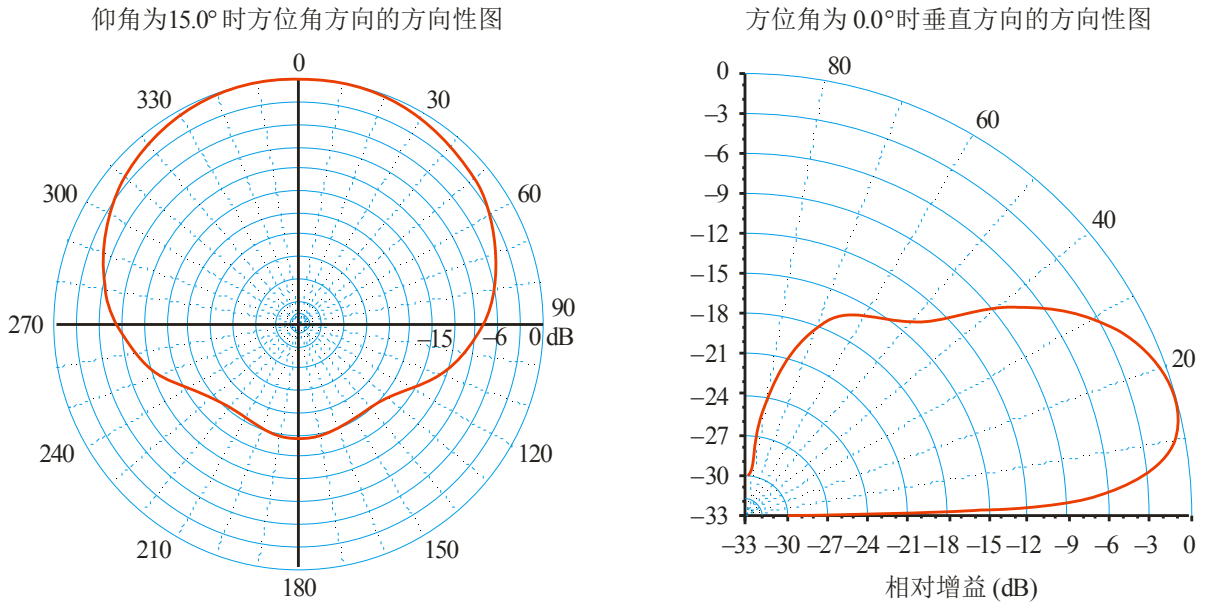
图7
典型海洋雷达天线方向性图
(全向; 左幅: 方位角方向, 右幅: 垂直方向)



M.1874-07

图8

典型海洋雷达天线方向性图
(单向, 3单元八木天线; 左幅: 方位角方向, 右幅: 垂直方向)



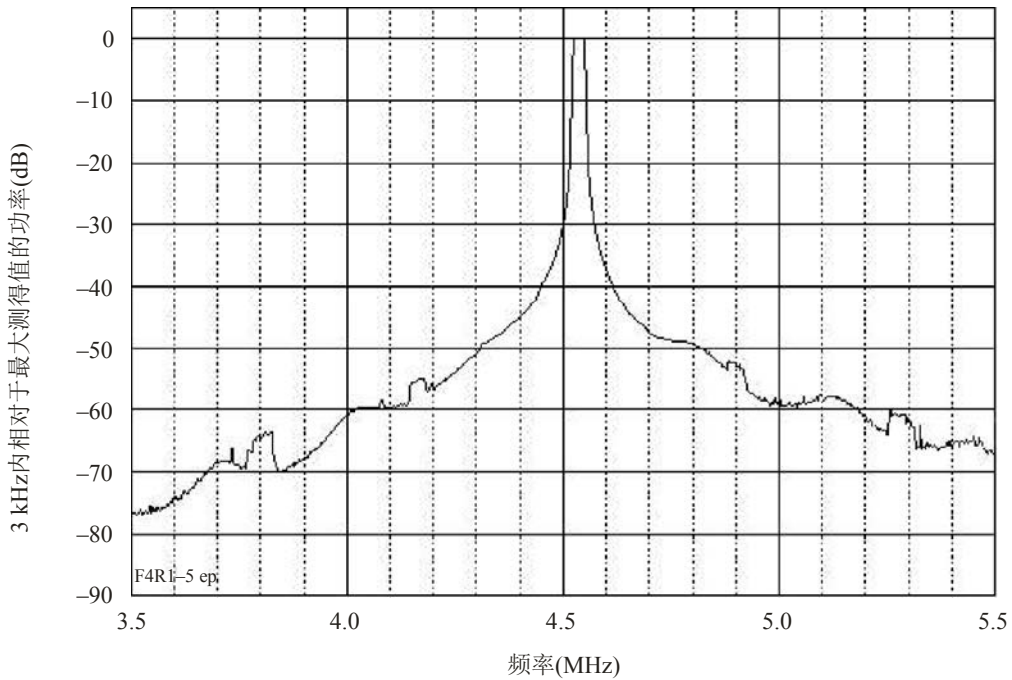
M.1874-08

4 发射机的发射

图9和图10示出了典型4.5 MHz和24 MHz海洋雷达的发射。

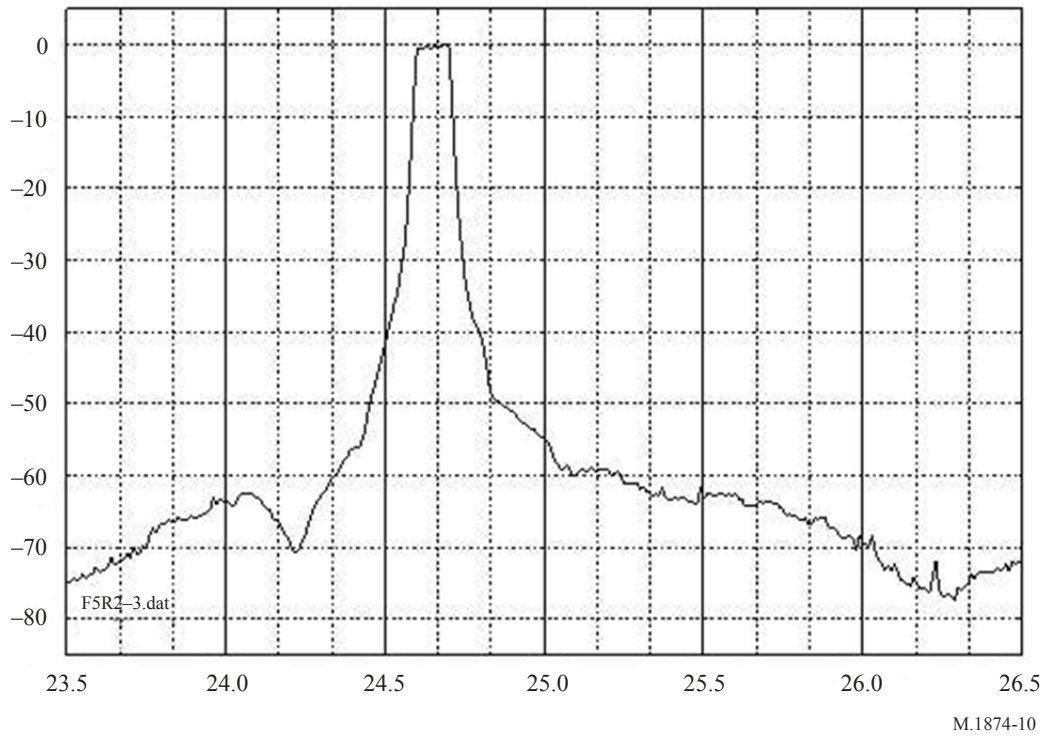
图9

4.5 MHz海洋雷达的发射



M.1874-09

图10
24 MHz海洋雷达的发射



5 系统特性

表2至表4归纳了3至50 MHz频率范围内用于海洋监测的有代表性的海洋雷达系统的射频特性。

表2

海洋观测中采用调频中断连续波 (FMICW) 的一般海洋雷达的特性

特性	单位	系统1 5 MHz	系统2 13 MHz	系统3 25 MHz	系统4 42 MHz
功能		远距离海洋测量	标准海洋测量	高分辨率海洋测量	
最大可用(测量)距离 ⁽¹⁾	km	170-200 (日间平均) ⁽²⁾	60-90 (日间平均) ⁽²⁾	30-50 (日间平均) ⁽²⁾	15-25 (日间平均) ⁽²⁾
用户可选距离分辨率的范围	km	3-12 ⁽³⁾	2-3 ⁽³⁾	0.3-2 ⁽³⁾	0.3-1 ⁽³⁾
典型扫描带宽	kHz	25 ⁽³⁾	50 ⁽³⁾	100 ⁽³⁾	125 ⁽³⁾
频率范围 ⁽⁴⁾	MHz	4-6 ⁽⁴⁾	12-14 ⁽⁴⁾	24-27 ⁽⁴⁾	40-44 ⁽⁴⁾
所用的典型峰值功率 最大系统容量 — 进入天线的峰值功率	W	50 80			50 80 (100)
脉冲宽度	μs	1 000-2 000	300-600		30-100
最大占空比	%	50%			
脉冲上升/下降时间	μs	16/32	16		8/16
发射机调谐方法		数字			
接收机调谐方法		数字			
输出设备		选通FET(AB类操作)			
发射机稳定度	ppm	0.001			
接收机稳定度	ppm	0.001			
发射天线方向性图的类型		全向(水平面内)			
发射天线的类型		地面四分之一波单极天线			

表2 (续)

特性	单位	系统1 5 MHz	系统2 13 MHz	系统3 25 MHz	系统4 42 MHz
天线极化		垂直			
天线主波束增益	dBi	8			
发射天线仰角宽度	度	35°			
发射天线方位角波束宽度		全向			
发射天线水平扫描速率		固定天线			
发射天线高度	m	10	4	2	1.2
接收天线方向性图的类型		电磁偶极子			
接收天线的类型		两个交叉环和一个单极组成一个单元			
接收天线极化		垂直			
接收天线主波束增益	dBi	5			
接收天线仰角波束宽度	度	45°			
接收天线方位角波束宽度	度	90°-360°			
接收天线水平扫描速率		固定天线			
接收天线高度	m	4			
接收机中频3 dB带宽	Hz	500			
接收机噪声系数	dB	12, 采用选通脉冲			
最小判别信号	dBm	-147 (500 Hz RBW ⁽⁵⁾) (规定的系统噪声电平)			
扫描间隔	s	0.5至1.0 s			

表2 (完)

特性	单位	系统1 5 MHz	系统2 13 MHz	系统3 25 MHz	系统4 42 MHz
发射机的发射带宽 3 dB 20 dB	kHz	26 58	54 70	105 150	128 170
谐波抑制		是			

- (1) 距离取决于若干环境因素：外部噪声，大浪高度，海流速度，雷达位置(例如距离水域的远近、附近的障碍物)，以及工作频率。
- (2) 夜间距离会显著缩短。
- (3) 尽管扫描带宽是可调的(带宽越宽，数据的分辨率越高)，但由于可用带宽有限且必须与其他无线电系统共存，系统一般都按规定的典型扫描带宽工作。
- (4) 从科研的角度规定最佳性能的频率范围。工作中不是全部频率范围都需要。
- (5) RBW表示分辨带宽。

表3

采用调频连续波 (FMCW) 的一般海洋雷达的特性

特性	单位	系统5 8 MHz	系统6 12 MHz	系统7 16 MHz	系统8 25 MHz	系统9 42 MHz
功能		甚远距离 海洋测量	远距离海洋测量	标准海洋测量	高分辨率 海洋测量	最佳分辨率 短距离测量
最大可用 (测量) 距离	km	150-300 (日间平均) ⁽¹⁾	100-150 (日间平均) ⁽¹⁾	50-100 (日间平均) ⁽¹⁾	30-60 (日间平均) ⁽¹⁾	10-20 (日间平均) ⁽¹⁾
距离分辨率	km	3-12	1-3	1-3 高分辨率模式: 0.5	0.5-2 高分辨率模式: 0.25	0.15-0.5
扫描带宽	kHz	50-12.5	150-50	300-50	600-75	300-1 000

表3 (续)

特性	单位	系统5 8 MHz	系统6 12 MHz	系统7 16 MHz	系统8 25 MHz	系统9 42 MHz
频率范围	MHz	6-9	11-14	14-18	24-27	40-44
进入天线的平均功率 (= 峰值功率)	W	30 7, 每个天线				
脉冲宽度	°	未采用脉冲				
最大占空比	°	连续波				
脉冲上升/下降时间		连续波				
发射机调谐方法		数字(DDS)				
接收机调谐方法		数字(DDS)				
输出设备		固态, 双极 (AB类操作)				
发射机稳定度	ppm	0.1 /年				
接收机稳定度	ppm	0.1 /年				
发射天线方向性图的类型		单向 在±60°的宽度内能量> 90%				
发射天线的类型		4个垂直单极组成的矩形阵列 0.5 × 0.15波长				
天线极化		垂直				
天线主波束增益	dBi	5至8				
发射天线仰角宽度	度	25至35				
发射天线方位角宽度	度	120				

表3 (续)

特性	单位	系统5 8 MHz	系统6 12 MHz	系统7 16 MHz	系统8 25 MHz	系统9 42 MHz
发射天线水平扫描速率		固定天线				
发射天线高度(m)		< 10	< 6	< 4	< 3	< 2
接收天线方向性图的类型		单向, 波束宽度为 $\pm 3^\circ$ 至 $\pm 15^\circ$				
接收天线的类型		单极阵列 (4至16个单极天线)				
接收天线极化		垂直				
接收天线主波束增益	dB _i	10至18				
接收天线仰角波束宽度	度	35°				
接收天线方位角波束宽度	度	6°至30°, 视阵列尺寸而定				
接收天线水平扫描速率		固定天线				
接收天线高度	m	< 10	< 6	< 4	< 3	< 2
接收机中频3 dB带宽	kHz	未用中频。基带带宽为1.5 kHz				
接收机噪声系数	dB	8				
最小判别信号	dB _m	-142 1 500 Hz RBW ⁽²⁾ (规定的系统噪声电平)				

表3 (完)

特性	单位	系统5 8 MHz	系统6 12 MHz	系统7 16 MHz	系统8 25 MHz	系统9 42 MHz
瞬时 带宽 3 dB 20 dB 60 dB	kHz	0.2 0.6 30				
谐波抑制	dBc	< -60				
扫描间隔	ms	200至500	130至500		130至250	

(1) 夜间距离会显著缩短。

(2) RBW表示分辨带宽。

表4

特性	单位	系统10 9.2 MHz	系统11 24.5 MHz	系统12 24.5 MHz	系统13 41.9 MHz
功能		远距离海洋测量	标准海洋测量		高分辨率海洋测量
最大工作(测量)范围	km	200-300	50-70		20-25
距离分辨率	km	6.8	1.5		0.5
扫描带宽	kHz	22	100		300
频率范围	MHz	9.2	24.5		41.9
进入天线的峰值功率	W	1 000	100	200	100
脉冲宽度	μs	1 330	488		244-280
最大占空比	%	50			
脉冲上升/下降时间		经过平滑 ⁽¹⁾			
发射机调谐方法		数字			

表4 (续)

特性	单位	系统10 9.2 MHz	系统11 24.5 MHz	系统12 24.5 MHz	系统13 41.9 MHz
接收机调谐方法		数字			
输出设备		选通FET (AB类操作)			
发射机稳定度	ppm	0.03 /年			
接收机稳定度	ppm	0.03 /年			
发射天线方向性图的类型		单向			
发射天线的类型		3单元八木	8组3单元八木	3单元八木	
天线极化		垂直			
天线主波束增益	dBi	6	15	6	
发射天线仰角波束宽度	度	30	25		
发射天线方位角波束宽度	度	120	15	120	
发射天线水平扫描速率		固定天线	固定天线相控阵 每12个方向60 min	固定天线	
发射天线高度 ⁽²⁾	m	10	2-14		
接收天线方向性图的类型		单向			
接收天线的类型		16组2单元八木	8组3单元八木		
接收天线极化		垂直			
接收天线主波束增益	dBi	16	15		
接收天线仰角波束宽度	度	30	25		

表4 (续)

特性	单位	系统10 9.2 MHz	系统11 24.5 MHz	系统12 24.5 MHz	系统13 41.9 MHz
接收天线方位角波束宽度	度	8-10	15		
接收天线水平扫描速率		固定天线 DBF ⁽³⁾	固定天线相控阵 每12个方向60 min	固定天线DBF ⁽³⁾	
接收天线高度 ⁽²⁾	m	10	2-14		
接收机中频3 dB带宽	Hz	200			
接收机噪声系数	dB	17, 采用选通脉冲	12, 采用选通脉冲		13, 采用选通脉冲
最小判别信号	dBm	-157 (1 Hz RBW ⁽⁴⁾)	-162 (1 Hz RBW ⁽⁴⁾)		-161 (1 Hz RBW ⁽⁴⁾)
发射机的发射带宽(kHz)		25	110		320
谐波抑制		是			
扫描间隔	s	0.7	0.5		0.25

(1) 改变脉冲边缘的形状以控制其频谱。用频谱间接规定边沿的斜度。

(2) 天线阵中馈送点距地平面的高度。

(3) 数字波束成形。

(4) RBW表示分辨带宽。

附录

海洋雷达应用

海啸面波共振响应侦测案例

1 概述

2011年3月11日日本标准时间（JST）14时46分，里氏9.0级的日本东部大地震及相关的海啸波袭击了太平洋沿岸。我们对死伤者表示诚挚的哀悼，并感谢全球对我们提供的援助和表达的同情。

这一篇简短的文稿将介绍海洋雷达怎样促进了沿海地区海啸波的侦测工作，并强调了向用于海洋雷达应用的RLS做出新的划分并就与现有业务可能的共用制定适当监管规定，以便最有效地利用频谱并缓解对现有业务干扰的重要性。

2 日本太平洋沿岸地区的海啸

日本东北地区海啸的最大爬高超过39米（图11：2011年东北地震海啸联合调查组，<http://www.coastal.jp/tjit/>）。海啸的高度和受淹地区的广度创下了历史记录，超过500 km²的地区受灾。

海啸是在地震发生约1个半小时后于2011年3月11日日本标准时间约16时20分抵达日本东部（图12）纪伊水道以南大陆架斜坡的。在水道长时间和较大幅度的振荡造成了水涝损失。水道西部沿岸的橘町港的水淹深度达3.5米。在图13所示的头一波海啸之后的约4个半小时，水道东岸海南港（图12的KA）的最大浪高约达2.6米。

3 使用的系统

本建议书提及的常用海洋雷达系统12被用于监测工作。雷达配备的指向天线系统（包括三元八木天线的二个发射和八个接收天线）具有数字波束成形功能。 ± 45 度覆盖角的方位角分辨率为7.5度。系统作为FMICW（调频中断连续波）运行，其中心频率为24.515 MHz，扫描带宽100 kHz，从而达到1.5 km的距离分辨率。这些规范使我们能够检测出具有高时空分辨力特别分布的海面洋流。

在正常运行模式下，海面径向速度图测量每小时进行一次。作为专用运行模式，持续的收发信号能够使我们每2-3分钟得到一张径向速度图。自2011年日本标准时间3月11日17时至3月19日16时30分，海洋雷达一直在以专用操作模式运行。

用于分析工作的不仅有海洋雷达，还有从水道（KA和KO）和大陆架斜坡（WA）取得的洋面上升数据。日本国土地理院获得了KA数据。国土交通省（MLIT）向全国港湾海洋波浪信息网（NOWPHAS）提供了KO和WA数据。

4 观察结果

第一波海啸波于3月11日16时20分左右抵达WA，又如图13所示，于约17时到达KO和17时05分到达KA。KA的首轮浪高（168 cm）可被笼统地解释为大陆架WA（63 cm）入射波的浅化作用，而水道西侧的KO（66 cm）与WA的入射波大致相同（63 cm），可能是因为水深测量引起的波折射和浅水效应的组合作用。

在WA和KO，浪高随着时间推移逐渐降低到3月12日12时的15 cm以下。相比之下在KA，虽然第一至三次浪潮的浪高逐渐下降，但由于海面浪的共振，从第四波起快速增长。在大约21点30分，KO目睹了最高达到262 cm的第七次浪潮，后于3月12日12时左右经历了由表面波共振引起的超过50 cm的浪高。

从第一到具较大径向速度幅度的第三波，远距离相位引领近距离相位（图14）。在20-23时的第三波次之后，相位关系逐渐变化，随后由于海面波共振，沿雷达波速1.5至30 km的整个范围内同向关系得以建立。HF-12K和HF-24K（图14）的径向速度时间系列图显示了相位关系的变化。从第一至第三波次，HF-12K相位落后HF-24K约4分钟。鉴于两点之间的平均水深为50 m，海啸波的行进时间估计为8分钟，即短于观察到的时差，也就是说，最初的三个波次的传播方向可能不同于雷达波速的传播方向。

5 结论

在第三波次之前，海啸波从大陆架斜坡向纪伊水道内部逐波传播，随后自然波动又受到浪潮的激励，在水道内造成二次波动并在沿海地区造成洪灾⁵。

据认为，海洋雷达的主要优点是能够探测海啸距岸边的距离；但这还需要进一步的技术和操作研究^{6、7}。

⁵ Hinata, H.等人，“日本纪伊水道HF雷达侦测到的传播中的海啸波和后续的共振响应信号”，《港湾、沿海和大陆架科学》95期：268-273页，2011年。

⁶ Lipa等人，“两个大陆HF雷达观测到的日本海啸流动”遥感3：1663-1679页，2011年。

⁷ HELZEL Messtechnik GmbH. “日本2011年3月11日震后智利WERA海洋雷达观察到的海啸特征”2011年5月发布，（<http://www.helzel.com/files/432/upload/Tsunami/Press-Release-Tsunami-WERA-2011.pdf>）。

这些研究结果赋予了海洋雷达新的作用，即以高时空分辨率详细测量洋面水流场，以了解水道海啸波共振响应的详细程序。由于共振响应可能激发较原输入波更大的波浪，这成为为预防突发灾害而必须事先研究的另一重要问题。

图 11

2011年东海地震海啸联合调查组提供的水淹和爬高图 (<http://www.coastal.jp/ttjt/>)

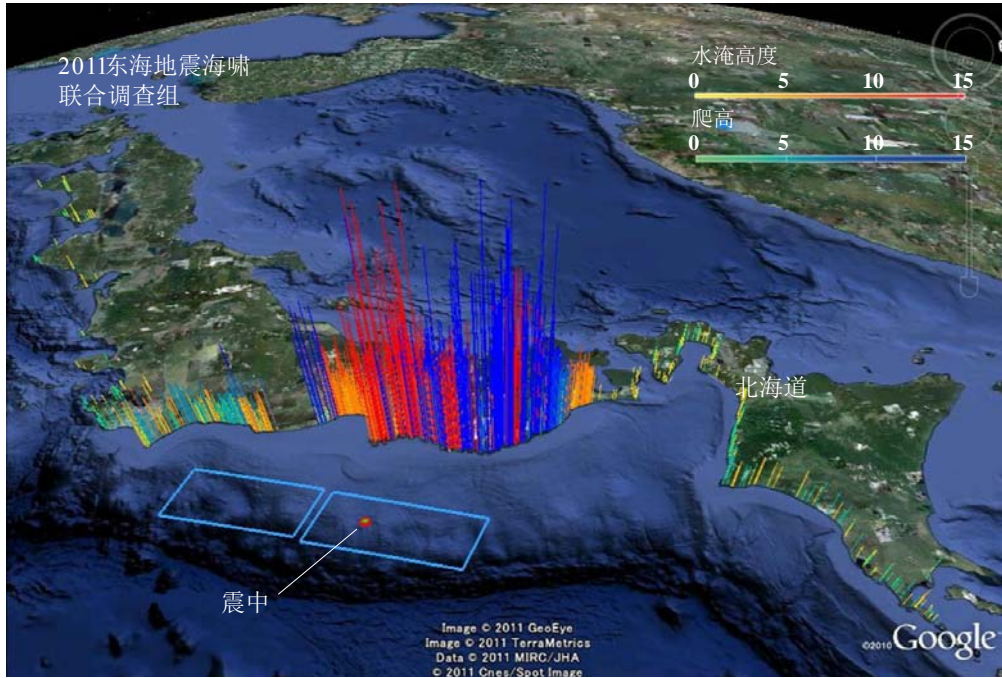


图 12

日本西海岸纪伊水道海洋雷达系统（方块和三角）
和海面升高监测系统图

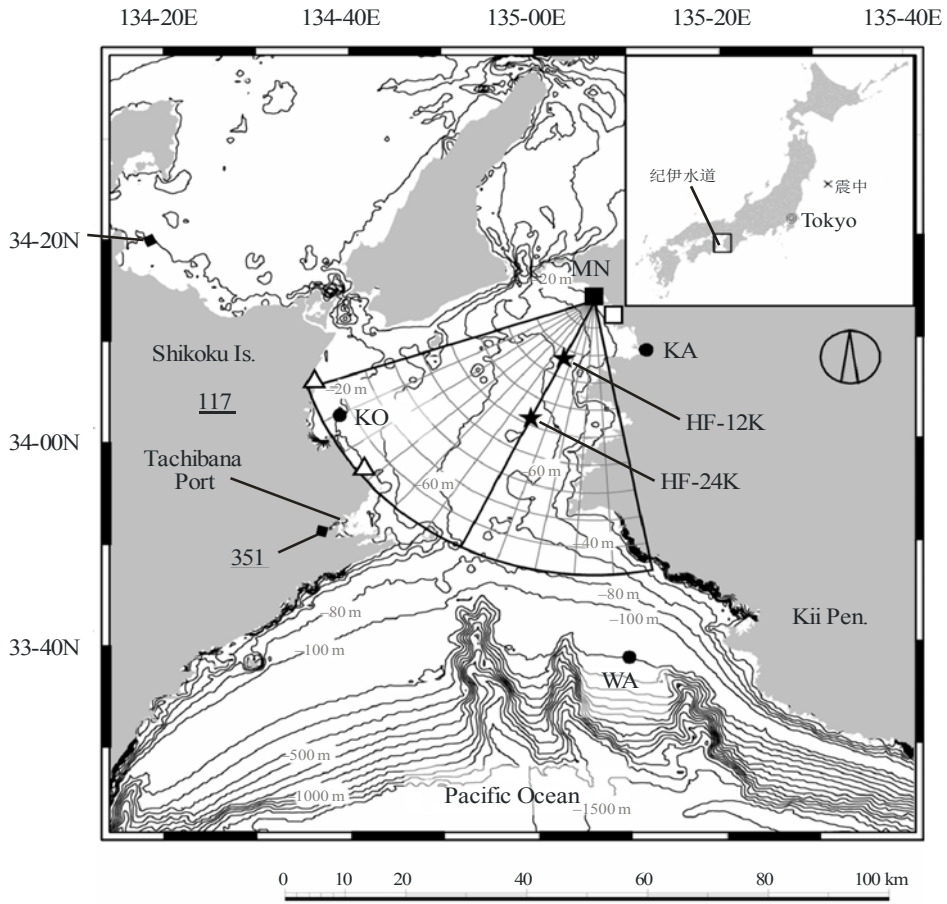
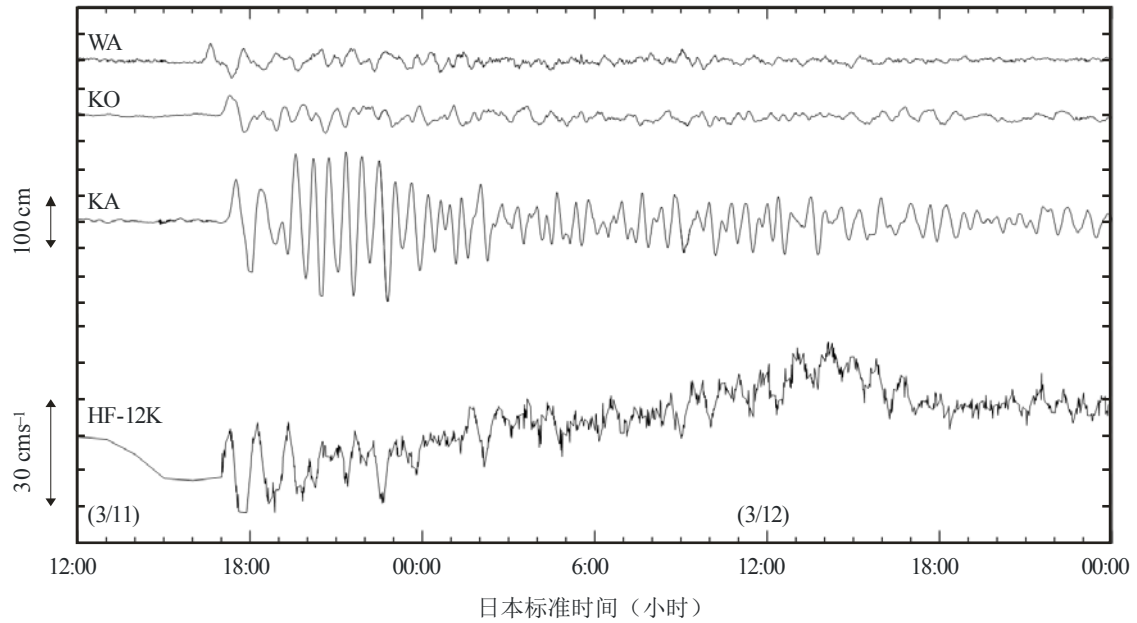


图 13

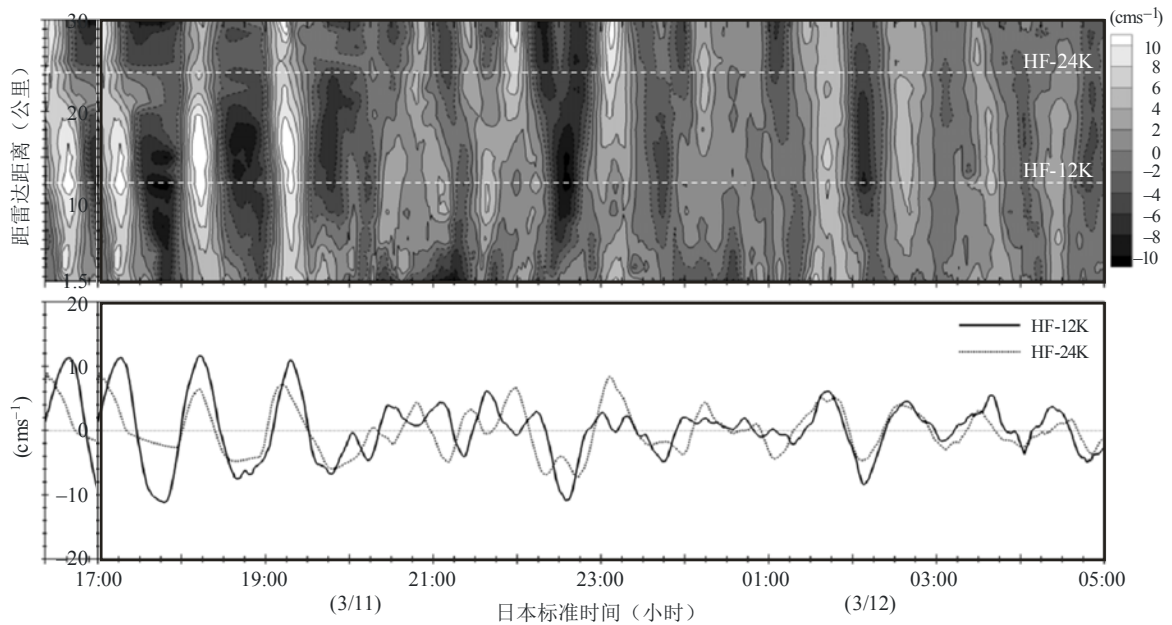
WA、KO、KA的详细海面升高及HF-12K的
径向速度（位于距雷达12 km的近海）



M.1874-13

图 14

自2011年3月11日17时起12小时内径向速度的
时间/距离（上部）和时间系列图



M.1874-14