

## 短相干积累条件下天波超视距雷达的舰船检测<sup>1</sup>

郭欣 倪晋麟\* 刘国岁

(南京理工大学工程技术研究中心 南京 210094)

\*(南京电子技术研究所预研部 南京 210013)

**摘要:** 天波超视距雷达 (OTHR) 的观测范围非常广, 实战中经常要求在短相干积累条件下检测出舰船目标。然而短相干积累时间带来的低多普勒分辨率很难从强大的海杂波中区分出舰船。为了解决这一问题, 可以采用海杂波循环对消法, 这就要求对杂波参数进行精确估计。传统方法直接利用 Fourier 谱中的最大幅度估计杂波参数, 估计精度不高从而导致对消性能不太理想。该文提出了一种新的基于 FFT 相位分析的杂波对消法。该方法与传统的杂波对消相比, 有效提高了参数估计精度, 减小了剩余杂波强度和扩散程度, 有利于舰船目标的峰值显露和从剩余杂波中区分出舰船。以上分析和比较得到了实测数据的检验。

**关键词:** 天波超视距雷达, 舰船检测, 海杂波循环对消

**中图分类号:** TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)04-0613-06

## The Ship Detection of Sky Wave over-the-Horizon Radar with Short Coherent Integration Time

Guo Xin Ni Jin-lin\* Liu Guo-sui

(Res. Center of Electron. Eng. Tech., Nanjing Univ. of Sci. and Tech., Nanjing 210094, China)

\*(Dept of Pre-research, Nanjing Research Inst. of Electron. Tech., Nanjing 210013, China)

**Abstract** Since the surveillance area of sky wave Over-The-Horizon Radar (OTHR) is very vast, realizing the ship detection with short coherent integration time (CIT) is an operational requirement for OTHR. However, short CIT and the resulting low Doppler resolution cannot separate the ship target from the close powerful ocean clutter. To resolve this problem, clutter cancellation algorithm can be adopted but it requires accurate estimation for clutter parameters. The conventional cancellation method only uses the maximal amplitude of Fourier transform to estimate the clutter parameters, which may not get satisfied estimation and cause imperfect clutter cancellation. In this paper, the phase information of Fourier transform is combined to provide more accurate estimation of clutter parameters. As the result, the power and spreading of clutter residue are reduced which is helpful for the ship visibility and identification. The above analysis and comparison have been demonstrated by real data.

**Key words** Sky wave Over-The-Horizon Radar (OTHR), Ship detection, Ocean clutter iteration cancellation

### 1 引言

天波超视距雷达 (OTHR) 利用电离层对高频信号的反射作用自上而下进行目标探测, 作用距离可以达到 1000 — 4000km, 因此它的一个主要任务是提供大范围的早期预警。对于 OTHR 需要探测的两类主要目标: 飞机和舰船而言, 船的速度慢, 产生的多普勒频率和强大的海杂波相近, 因此检测要困难得多。此外, 由于 OTHR 观测范围非常广, 为了提高数据率, 保证大范围的警戒能力, 实现短相干积累条件下的舰船检测也显得尤为重要。

<sup>1</sup> 2002-09-23 收到, 2003-05-14 改回

本文首先分析了高频段海洋回波谱的特征,然后给出了用于短积累条件下舰船检测的传统的海杂波循环对消方法<sup>[1]</sup>。该方法通过在时域中将杂波峰值建模为正弦信号,然后相减的方式进行杂波对消,这就要求对杂波参数进行精确估计。传统方法仅利用 Fourier 谱中的最大幅度估计杂波参数,但由于短时间序列的频率分辨率较低,导致杂波参数的估计精度不高、对消性能不理想,造成剩余杂波在多普勒谱中扩散开来,严重影响了舰船目标的识别。

为此,本文将一种新的基于 FFT 相位分析的频率估计法<sup>[2]</sup>引入到海杂波的循环对消中,该方法不仅考虑了 Fourier 变换的幅度信息,同时还考虑了相位信息。相比于传统方法,它具有更好的参数估计精度和杂波对消性能,降低了剩余杂波的强度和扩散程度,有利于舰船目标的峰值显露和从剩余杂波峰值中区分出舰船。

## 2 高频段海洋回波谱的特征

图 1 显示了 OTHR 工作的高频段 (3-30MHz) 海洋回波的多普勒谱,其中位于零频周围两个对称的峰值称为一阶 Bragg 峰,这是由波长为雷达波长一半的海浪和雷达发射的高频信号发生谐振,产生较强的雷达回波而形成的<sup>[3,4]</sup>。其多普勒频率约为  $\pm 0.102\sqrt{f_0}$  (Hz),其中  $\pm$  号表示朝向及背离雷达波束的谐振海浪所产生的正负 Bragg 峰,  $f_0$  为雷达载频 (兆赫)。两个一阶 Bragg 峰的相对强度反映了引起海浪的表面风的风向。在高频段海洋回波谱中,由于一阶峰的强度很大,是海洋回波的主要成分,这样变换到时域中,海洋回波的多普勒信号可以近似认为呈正弦变化。这一结论为基于正弦假设的海杂波循环对消法提供了理论基础。

然而在某些情况下,OTHR 信号通过电离层反射传播时,由电离层引起的一些环境因素会导致回波信号发生畸变。其一,电离层的非平稳会对回波信号附加非线性的相位扰动<sup>[5]</sup>,导致杂波峰值不完全是正弦信号。幸运的是,对于短时间序列而言,非线性相位污染发生几率较低。其二,在某些工作频率,雷达信号可能经不同的电离层反射(多模传播)<sup>[6-8]</sup>,导致在多普勒谱中存在两个以上的 Bragg 峰,如图 2 所示,这会为舰船目标的检测和识别带来不利影响。

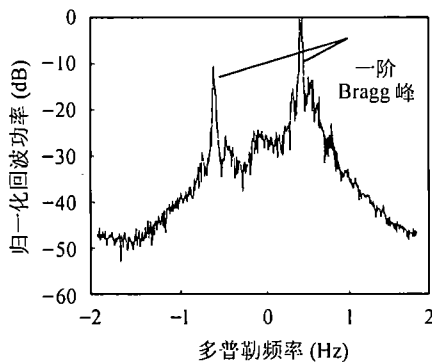


图 1 高频段海洋回波的多普勒谱

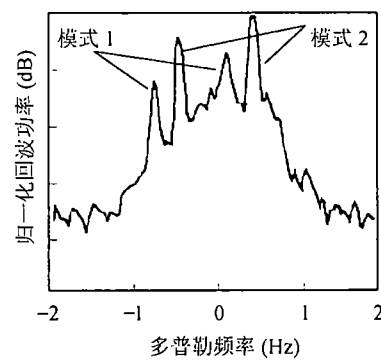


图 2 存在多模传播时的回波谱<sup>[8]</sup>

## 3 传统的海杂波循环对消法

对于 OTHR 的舰船检测而言,采用长相干积累时间可以有效提高多普勒分辨率,从而从强大的杂波背景中区分出舰船目标。然而由于天波雷达的观测范围非常广,对各个区域采用长驻留时间将会影响到大范围的警戒能力。为此,我们希望能够短积累条件下实现舰船检测。这里可以采用高分辨谱估计技术<sup>[9,10]</sup>,也可以在舰船检测前首先将强大的海杂波对消掉,这样利用 FFT 也可以从短时间序列中提取出舰船信号。本文主要对后一种方法——海杂波循环对消法进行研究。

海杂波循环对消法就是在舰船检测前,利用循环迭代的方法将海杂波的主峰值及剩余杂波一起对消掉,然后再利用 FFT 进行检测。虽然利用频域滤波器可以直接在多普勒谱中将海杂波滤除,但是这样有可能将接近于海杂波的目标信号破坏掉,甚至一起滤掉。由于海杂波的主分

量作一阶近似时 (即 Bragg 峰) 可以认为是正弦信号, 因此 1998 年 Benjamin T. Root 提出在时域上通过减去正弦信号的方式进行杂波对消<sup>[1]</sup>。这就要求对海杂波所表示的正弦信号的幅度、频率和初相进行精确估计。

在 Root 的方案中正弦信号的幅度  $A$  和频率  $f$  直接根据 FFT 所得的多普勒谱中杂波峰值来估计, 而初始相位则通过最大程度地减小估计的误差量:

$$\varepsilon(\phi) = \sum_{n=1}^N |x(n) - Ae^{j\phi}e^{j2\pi f(n-1)T}|^2 \quad (1)$$

来获得。式 (1) 中,  $x(n), n = 1, \dots, N$  是在某个距离方位单元上相干积累时间内的采样信号,  $T$  为采样间隔,  $\phi$  为所估计的正弦信号的初始相位, 采用在  $0 - 2\pi$  上搜索获得。由于  $A, f, \phi$  的估计都不可能是完全精确的, 这样当主要杂波峰值被估计和减去后, 多普勒谱中将会存在剩余杂波。接下来重复这一过程, 对剩余的最大杂波峰值进行估计和减去, 直到最后杂波峰值被压低, 舰船显现出来为止。

为了对这一方法进行验证和评估, 我们利用仿真和实测数据作了一系列的实验, 结果显示当两个 Bragg 峰的多普勒频率  $\pm f_B$  在离散频率点上时, 仅需两次对消即可获得较好的检测性能。但由于短时间序列的频率分辨率低, 谱线间隔大,  $\pm f_B$  通常不在离散频率点上, 此时利用 FFT 对 Bragg 峰的频率和幅度进行估计时精度下降, 进而无法得到较好的初相估计, 造成循环对消次数增加。而随着对消的不断进行, 剩余杂波将会在多普勒谱中扩散开来, 影响了舰船目标的识别。为此, Root 提出使用杂波界限, 即在两个 Bragg 峰周围各定义一个范围, 在该范围内的峰值信号被认为是杂波、杂波剩余, 从而只在该范围内进行杂波对消以避免将范围外的舰船峰值当作扩散的剩余杂波一起对消掉, 同时也便于程序对舰船目标的自动搜索和识别。但是使用杂波界限的一个主要缺点是当舰船信号位于所定义的杂波范围内时, 就无法发现。此外, 某些在杂波界限外的剩余杂波峰值和舰船目标峰值非常相似, 使得我们无法准确判断舰船目标。

#### 4 基于 FFT 相位分析的海杂波循环对消法

如果能够提高海杂波的参数估计精度, 将会提高对消性能, 降低剩余杂波强度和在多普勒谱上的扩散程度, 有利于舰船目标的峰值显露和从剩余杂波中区分出舰船, 同时也便于程序对舰船目标的自动搜索和识别。

这里我们将一种 FFT 相位分析法<sup>[2]</sup>引入到海杂波的循环对消中, 利用 FFT 变换后的相位信息对首先获得的粗测频率进行补差从而达到较好的估计性能。对于一个正弦信号  $s(t) = a \exp[j(2\pi f_0 t + \phi_0)]$ , 对其作  $N$  点的 FFT, 得到离散频谱  $S(k) = A \exp(j\varphi)$ , 其中  $S(k)$  幅度最大时所对应的幅度项  $A_{\max}$ , 相位项  $\varphi_{\max}$  分别为

$$A_{\max} = a \sin[\pi(f_0 T - k_0)] / \sin[\pi(f_0 T - k_0)/N] \quad (2)$$

$$\varphi_{\max} = \phi_0 + (1 - 1/N)(f_0 T - k_0)\pi \quad (3)$$

以前仅利用 FFT 变换后幅度最大值得到信号的估计频率为  $\hat{f}_0 = k_0/T$  ( $k_0$  为幅度最大时所对应的离散谱线值), 但是实际上, 采样引起的栅栏效应通常使得信号的真实频率位于两谱线之间, 特别是对于短时序列而言。

这里我们联合考虑变换后的相位项。在式 (3) 中,  $\varphi_{\max}$  和  $k_0$  可通过 FFT 直接获得, 但由于信号的初相  $\phi_0$  未知, 无法求出信号的真实频率  $f_0$ 。为解决这一问题, 将整个数据点分成两部分, 前  $N/2$  点和后  $N/2$  点, 分别作 FFT, 则前后两段数据谱线最大值处对应的相位差为  $\varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi f_0(T/2) = \pi f_0 T$ , 考虑到相位的  $2\pi$  整周模糊, 实际测得的相位差应该是  $(\varphi_2 - \varphi_1)_{\text{实测}} = \pi f_0 T - 2\pi k_{01}$ , 其中  $k_{01}$  为  $N/2$  段数据中对应的最大谱线值。从而信号的真实频率  $f_0$  和依据最大谱线估计的频率值  $\hat{f}_0$  之间的偏差为  $(\varphi_2 - \varphi_1)_{\text{实测}} = \pi T(f_0 - 2k_{01}/T) = \pi T \Delta f$ , 即

$$\Delta f = (\varphi_2 - \varphi_1)_{\text{实测}} / (\pi T) \quad (4)$$

$\Delta f$  的变化范围应为  $-0.5f_{\text{res}0} \sim 0.5f_{\text{res}0}$ ,  $f_{\text{res}0}$  为频率分辨率, 等于  $1/T$ . 当  $\Delta f$  由于整周模糊的计算问题超出此范围时, 修正如下:

$$\left. \begin{aligned} \Delta f &= \Delta f - f_{\text{res}0}, & \Delta f > 0.5f_{\text{res}0} \\ \Delta f &= \Delta f + f_{\text{res}0}, & \Delta f < -0.5f_{\text{res}0} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

从而信号的真实频率  $f_0 = \hat{f}_0 + \Delta f$ . 这样将  $f_0$  代入式 (2) 和式 (3), 由于  $A_{\text{max}}$  和  $\varphi_{\text{max}}$  已知, 即可直接求出信号的幅度  $a$  和初相  $\phi_0$ , 而无需通过极小化估计误差在  $0 - 2\pi$  上搜索获得初相.

该方法的具体步骤如下:

(1) 首先作短时数据  $N$  点的 FFT, 得离散谱线最大值处的变换幅度  $A_{\text{max}}$  和相位  $\varphi_{\text{max}}$ , 并得到信号的初步估计频率  $\hat{f}_0$ .

(2) 短时数据分成前后两部分, 求两组数据最大谱线处的相位差  $\varphi_2 - \varphi_1$ , 并由式 (4), (5) 得到估计频率和真实频率的偏差  $\Delta f$ , 从而信号的真实频率  $f_0 = \hat{f}_0 + \Delta f$ .

(3) 由于式 (2) 和式 (3) 亦可写为  $A_{\text{max}} = a \sin[\pi \Delta f T] / \sin[\pi \Delta f T / N]$ ,  $\varphi_{\text{max}} = \phi_0 + (1 - 1/N) \Delta f T \pi$ . 因此直接代入频率偏差  $\Delta f$  求出信号幅度  $a$  和初相  $\phi_0$ .

该方法估计精度的提高是对粗测频率进行补差获得的, 不受栅栏效应的影响, 同时可以直接求得信号的初相, 无需通过最小化估计误差在  $0 - 2\pi$  上搜索获得. 但由于其利用了回波信号的相位信息, 因此通常要求两个 Bragg 峰具有较高的杂噪比. 图 3 给出了相干积累时间 3.2s(16

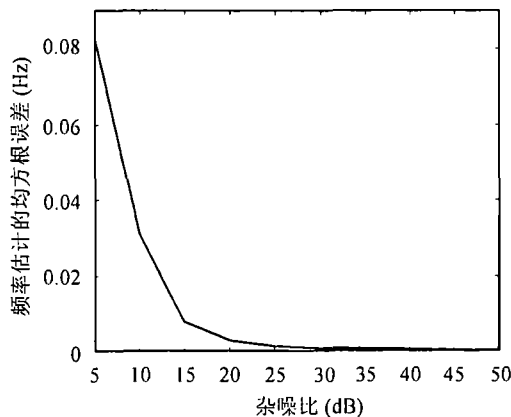


图 3 杂波频率估计的均方根误差随杂噪比的变化情况

个数据点), 频率分辨率为 0.3125Hz 情况下, 100 次实验得到的杂波频率估计的均方根误差 ( $\sigma$ ) 随杂噪比的变化情况. 由图可见杂噪比越高, 估计误差越小, 而且当杂噪比大于 15dB 时, 估计精度已经远高于频率分辨率. 实际上, 在天波雷达中, 由于采用了长达 2km 的天线阵和自适应波束形成, 杂噪比通常相当高 (排除某些夜间或存在相位扰动情况), 一般大于 50dB<sup>[1]</sup>, 因此高杂噪比的要求在天波雷达中一般是满足的.

## 5 数据处理和比较结果

图 4 显示了某段实测数据的多普勒谱, 图中相干积累时间为 44s(64 个数据点), 在频率  $-0.45\text{Hz}$  处有一个舰船目标 (如箭头所示), 我们从图 4 中抽取前 16 点数据, 其多普勒谱如图 5 所示, 显然在图 5 中由于频率分辨率较低舰船已经看不出来. 以下将传统的和我们提出的基于 FFT 相位分析的海杂波循环对消应用到该段数据中, 并对处理结果进行比较.

在传统的海杂波循环对消中, 杂波频率和幅度估计直接由 Fourier 谱中的峰值得到, 相位估计通过数值搜索的方式进行. 然而对于图 5 所示的 16 点多普勒谱而言, 由于严重的栅栏效应, 频率估计精度很差, 这样进一步影响到初相估计并导致较差的对消结果. 为了提高估计精度, 一种最简单的方法是对 16 点数据作时域补零的 FFT. 尽管这样不能提高频率分辨率, 但是在多普勒观测范围内增加了频率点数, 提高了参数估计精度.

图 6 为对消前, 对 16 点数据补零作 128 点 FFT 的处理结果. 图 7、8 为经过两次对消后的多普勒谱, 其中图 7 中的参数估计直接由 16 点 FFT 获得, 图 8 中的参数估计利用补零后

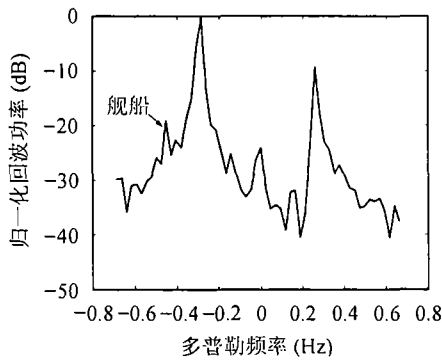


图4 64点数据的多普勒谱

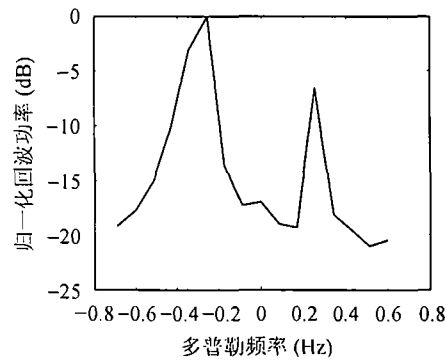


图5 从图4中抽取前16点数据的多普勒谱

128点的FFT获得。图7中由于参数估计精度不高,经过两次对消后舰船目标的峰值仍未显露,而图8中对消性能提高了很多,舰船目标已经显露出来,但对对消后形成的剩余杂波还是对舰船目标识别造成一定困难。这里可以使用杂波界限区分舰船和剩余杂波,但杂波界限的选择是一个问题,界限选择大了,舰船目标就会被当作剩余杂波一起对消掉,而界限选择小了,则有可能将剩余杂波引起的峰值错误判定为舰船目标。此外,补零FFT方法虽然极大提高了估计精度,但其参数估计仍然受栅栏效应的影响。

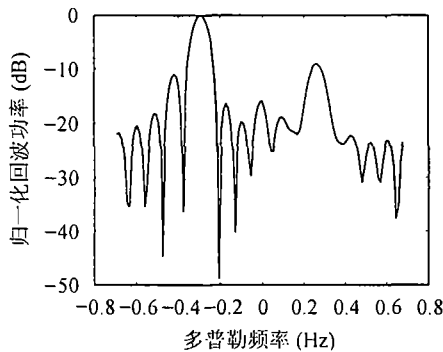


图6 对消前,16点数据补零作128点FFT得到的多普勒谱

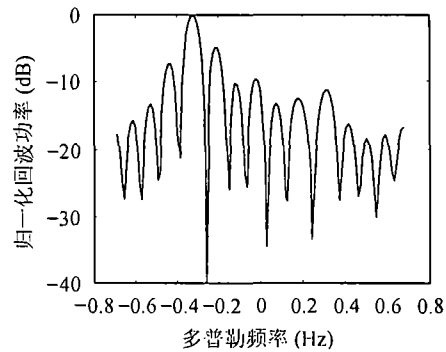


图7 传统方法:2次对消后的多普勒谱(参数估计直接由16点FFT获得)

图9给出了利用FFT相位分析法对杂波参数进行估计,并经过2次对消后的多普勒谱。为了便于与图7、图8比较,图9中对消后的16点数据作了128点的FFT。与图7、图8相比,舰船目标不仅得到有效突出,同时由于其参数估计精度高,杂波对消性能好,剩余杂波强度及扩散程度明显降低,有利于舰船目标的峰值显露以及从剩余杂波中区分出舰船。另一方面,FFT相位法可以直接得到初相估计,无需在 $0-2\pi$ 上搜索获得。

## 6 结束语

实现短积累条件下的舰船检测对于提高OTHR的数据率、保证大范围的警戒能力有着重要意义。本文在传统的海杂波循环对消法的基础上,提出了一种新的基于FFT相位分析的杂波对消法。相比于传统方法,该方法具有更好的参数估计精度和杂波对消性能,降低了剩余杂波强度和扩散程度,有利于舰船目标的峰值显露和从剩余杂波中区分出舰船。另一方面,它可以直接得到初相估计,无需在 $0-2\pi$ 上搜索获得。但是该方法利用了相位信息,因此通常要求海杂波具有较高的杂噪比,这在OTHR中一般是可以满足的。

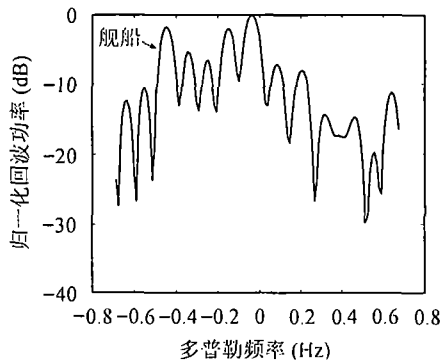


图8 传统方法: 2次对消后的多普勒谱  
(参数估计由补零后128点的FFT获得)

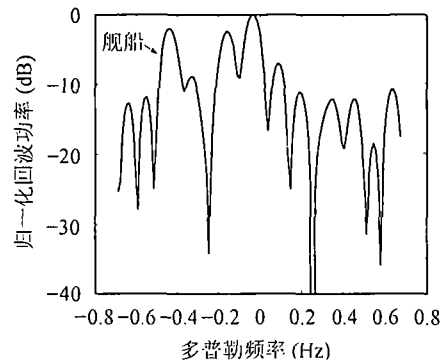


图9 FFT相位法: 2次对消后的多普勒谱  
(参数估计由FFT相位法获得)

这里需要说明的是,在某些情况下 OTHR 的回波信号通过电离层反射时,会受到非线性相位扰动和多模传播的影响。其中非线性相位扰动在短相干积累条件下发生几率较低,但多模传播的影响则较为严重。首先多模传播引起两个以上的 Bragg 峰,这本身就是一种杂波扩散,会影响舰船目标的识别。此外由于短时序的频率分辨率较低,多个正的(或负的)Bragg 可能位于一个杂波峰值中,使得杂波参数的估计性能下降,进一步影响到杂波对消。为此,在舰船检测前,需要选择合适的雷达工作频率以尽可能地避免多模传播,另外通过一些预处理技术<sup>[7]</sup>也可以减小多模传播的影响。

### 参 考 文 献

- [1] Root B T. HF over-the-horizon radar ship detection with short dwells using clutter cancellation. *Radio Science*, 1998, 33(4): 1095-1111.
- [2] 齐国涛, 贾欣乐. 基于 DFT 相位的正弦波频率和初相的高精度估计方法. *电子学报*, 2001, 29(9): 1164-1167.
- [3] Crombie D D. Doppler spectrum of sea echo at 13.6Mc/s. *Nature*, 1955, 175: 681-682.
- [4] Barrick D E. First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter form the sea. *IEEE Trans. on AP.*, 1972, AP-20(1)0: 2-10.
- [5] Parent J, Bourdillon A. A method to correct HF skywave backscattered signals for ionospheric frequency modulation. *IEEE Trans. on AP.*, 1988, AP-36(1): 127-135.
- [6] Barnum J R. Ship detection with high-resolution HF skywave radar. *IEEE J. of Oceanic Engineering*, 1986, 11(2): 196-209.
- [7] Anderson S J, Abramovich Y I. A unified approach to detection, classification, and correction of ionospheric distortion in HF sky wave radar systems. *Radio Science*, 1998, 33(4): 1055-1067.
- [8] Anderson S J. Adaptive remote sensing with HF skywave radar. *IEE Proc.-F*, 1992, 139(2): 182-192.
- [9] Olkin J A, Nowlin W C, Barnum J R. Detection of ships using OTH radar with short integration times. *IEEE National Radar Conference*, Syracuse, USA, 1997: 1-6.
- [10] Anderson S J, Mahoney A R, Turley M D E. Applications of superresolution techniques to HF radar sea echo analysis, *Proceedings of the Pacific Ocean Remote Sensing Conference*, Melbourne, Australia, 1994.

郭欣: 女, 1977年生, 博士生, 研究方向为天波超视距雷达信号处理。

倪晋麟: 男, 1961年生, 研究员, 研究方向为雷达系统、现代雷达信号处理。

刘国岁: 男, 1933年生, 教授, 研究方向为雷达系统、随机信号处理。