

文章编号:1000-6893(2002)06-0495-06

天波超视距雷达的发展

郭欣¹,倪晋麟²,苏卫民¹,刘国岁¹

(1. 南京理工大学 电子工程技术研究中心,江苏 南京 210094)

(2. 南京电子技术研究所,江苏 南京 210013)

DEVELOPMENT OF SKY WAVE OVER-THE-HORIZON RADAR

GUO Xin¹, NI Jin-lin², SU Wei-min¹, LIU Guo-sui¹

(1. Research Center of Electronic Engineering Technology, Nanjing University
of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2. Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210013, China)

摘要:天波超视距雷达(OTHR)是一种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的雷达体制。由于该雷达具有大范围的监视能力、防低空突袭、抗隐身以及早期预警等突出优点,受到了许多国家的重视。首先介绍了 OTHR 的性能特点及发展历史,接着就雷达的总体结构、干扰的抑制、由电离层引起的信号失真的校正,以及信号检测进行了全面的综述,最后指出这一领域今后的发展方向。

关键词:天波超视距雷达;杂波;干扰;电离层相位扰动;目标检测

中图分类号:V243.2 **文献标识码:**A

Abstract: The sky wave over-the-horizon radar (OTHR) is a new mechanism in which the ionosphere is used as a mirror to reflect the radar high frequency signal to detect the target. Now OTHR has drawn attention of many countries due to its outstanding advantages, such as the capabilities of wide-area surveillance, anti low-flying aircraft, anti-stealth, early warning, etc. In this paper, the characteristics and development history of OTHR are introduced firstly. Then the radar architecture follows. After that, the techniques on interference suppression, correction of ionospheric contamination, and target detection are reviewed in detail. At the end of this paper, the ways ahead in this field are also pointed out.

Key words: sky wave over-the-horizon radar; clutter; interference; ionospheric phase variation; target detection

二战以来,雷达技术有了突飞猛进的发展。在各种类型的雷达中,天波超视距雷达(OTHR)以其大范围的监视能力、防低空突袭、抗隐身以及早期预警等突出优点,受到了许多国家的重视。和一般微波雷达不同的是,OTHR 工作在 3~30MHz 的高频(HF)频段,其利用电离层的反射作用能够自上而下地探测超远距离(1000~4000km)的运动目标,因此具有早期预警的突出优点。同时 OTHR 的下视工作方式使得其能够突破地球曲率的限制,从而探测到低空飞行或隐在山脉背后的目标。此外,OTHR 的工作波长通常为 10~60m,和大部分飞行器的物理尺寸相接近,一些著名的隐身飞机,如 F-117A, F-22 均处于其谐振散射区内,使得该雷达的抗隐身性能非常突出^[1,2]。民用方面,OTHR 发射的高频信号会和某些频率分量的海洋回波发生谐振,从而利

用其可以对海风、洋流等进行监测^[1,3,4]。

早在 50 年代初,美国即开始对 OTHR 进行研究,但当时技术无法解决回波信号中强大的海/地杂波问题。到了 50 年代末,美国海军实验室提出利用长时间相干积累有效提高雷达的多普勒分辨力,从而从强大的杂波背景中检测目标,并于 60 年代初研制出了试验性的 OTHR - MADRE (磁鼓记录仪)。该系统能够探测远程飞机和快速运动的大型舰船,但其方位分辨力、频率范围以及跳频功能非常有限^[1]。1970 年,美国海军实验室和 Stanford 大学联合研制了称之为“宽口径研究设备”(WARF)的 OTHR,采用了 2.55km 长的接收天线阵,极大提高了 OTHR 的方位分辨力,使其能够有效地抑制海杂波。其后,考虑到远洋作战及灵活性的需要,美国海军于 80 年代末研制成功并装备了一种可搬迁重建式的 OTHR-AN/TPS-71,其接收天线的最大口径可以达到 2.7km^[1,5]。此外,美国空军也于 80 年代中期装

备了第一部 OTHR-AN/ FPS-118,该系统可以对巡航导弹进行探测。鉴于 OTHR 在战略早期预警和抗隐身等方面的突出优点,澳大利亚、中国、

英国、法国和俄罗斯也在积极进行这方面的研究。表 1 中是几种服役 OTHR 的典型性能指标。

尽管 OTHR 的优点很多,但其 HF 工作波

表 1 几种服役 OTHR 的典型性能指标

Table 1 The typical performance characteristics of several operational OTHR

	AN/ FPS-118 (美)	AN/ TPS-71 (美)	WARF (美)	Jindalee (澳)
工作频率	5 ~ 28MHz	5 ~ 28MHz	6 ~ 27MHz	5 ~ 28MHz
作用距离	800 ~ 2880km	800 ~ 3000km	750 ~ 3000km	1000 ~ 4000km
平均功率	每部发射机为 100kW,共 12 部	每部发射机为 200kW	最大总发射功率为 1MW	每部发射机为 600kW
天线尺寸	发射天线 1106m 接收天线 1518m	接收天线 2.7km	发射天线 194m 接收天线 2.55km	接收天线 2.8km
距离分辨率	8 ~ 30 km			
相干积累时间	2 ~ 10s (对飞机), 10 ~ 60s (对船)			
信号处理	自适应数字波束形成,瞬态干扰抑制,电离层失真校正,相干积累,峰值检测			

段、利用电离层反射进行传播以及下视工作方式也带来了许多问题: 电离层的高度、密度和厚度会随着太阳的影响而呈现时间和季节性的变化,因此需要对其进行实时评估以选择一个合适的工作频率。在 HF 段,宇宙噪声、大气噪声、人为噪声以及其他 HF 信号发射源等会对接收机的灵敏度产生很大影响。另外 HF 段频谱窄,用户多,雷达必须实时选择干净的频带范围以避免和其他用户的相互干扰。电离层的非平稳会对回波信号产生随机相位扰动,从而导致多普勒谱展宽,尤其是杂波谱的展宽将严重影响慢速目标的检测。此外,在某些工作频率,雷达信号可能经不同的电离层反射(多径传播),也会导致多普勒谱的展宽。

OTHR 的下视工作方式使得回波信号中含有强大的海/地杂波,为了提高目标杂波比,通常要求雷达具有较高的方位、距离以及多普勒分辨能力。

以下将对 OTHR 的系统结构和信号处理作具体分析。

1 天波超视距雷达的系统结构

1.1 频率管理系统

频率管理系统的作用就是依据电离层和外部干扰的当前状况实时选择雷达的工作频率和波形。它通常由以下 3 个部分组成^[6,7]: 后向散射探测仪; 倾斜/垂直入射探测仪; HF 频谱监测仪。其中后向散射探测仪负责测量整个雷达覆盖区域内地球表面后向散射能量和工作频率的关系,它是对电离层的传播条件进行整体评估的一种最有效的方法。倾斜/垂直入射探测仪则负责测量雷达感兴趣的某一传播路径的电离层结

构,包括高度和密度,这些参数对于将目标的射距测量值转化为地面的经纬度坐标是必须的。HF 频谱监测仪则是用来寻找一个未被其它用户占据的频带范围,从而尽量减少外干扰的影响。

1.2 发射设备

为了保证较高的平均发射功率,从而达到较远的探测距离,OTHR 通常采用连续波信号。在发射功率上,目标探测雷达即主雷达所要求的平均发射功率较高,约为 200 ~ 1200kW。而返回散射探测仪由于不需要对目标进行探测,只需对雷达覆盖区域内电离层的传播条件进行评估,因此其发射功率较小,约为 5kW。

OTHR 的发射天线较为复杂。由于主雷达的工作频率需要依据电离层的当前状况进行实时调整,并且要求快速可调,因此其通常具有几个单独的发射天线阵,分别对应不同的工作波段。此外,由于 OTHR 的工作波长较长,其天线阵也通常有几百米。并且为了在较低的发射仰角下仍能保持一定的增益,发射天线前需要铺设延伸几百米的地网^[8]。

1.3 接收设备

由于 OTHR 采用连续波信号,为了避免发射和接收之间的泄露问题,发射和接收站通常相距 100km 以上。此外 OTHR 的工作波长较长,为了达到较高的方位分辨率,接收天线阵通常长达两公里,能够有效抑制海/地杂波以及外噪声的影响。每一个天线单元设置一个数字接收机,所接收的数据将送到高速信号处理机中完成目标探测和电离层环境监测的任务^[6]。同时为了满足雷达扫描和信号处理的需求,发射和接收之间还要

求在时间、空间和相位上达到精确同步^[2]。

1.4 操作控制中心

由接收机接收到的信号经过处理后,将送到操作控制中心。该中心可以远离发射站和接收站,或与接收站设在一起。在这里,雷达信号处理机探测到的目标信息将被相互关联起来,以便形成飞机和舰船的航迹。同时环境信号处理机所得的结果将用来为电离层建模,从而为雷达信号发射设备提供必要的频率管理建议^[6]。

2 干扰及噪声的抑制

和微波雷达不同的是,OTHR 工作在高频段,而该频段的外部干扰和噪声通常比接收机的内噪声高 20~40dB,成为限制雷达性能的主要因素^[3]。因此如何抑制这些干扰和噪声,成为 OTHR 信号处理中的一个重要环节。

自适应波束形成^[9]是对外部干扰和噪声进行抑制的有效手段,它可以依据当前干扰的分布情况自适应地调节阵列天线的权值,使主波束基本保持不变而使波束副瓣与外干扰的分布相适应,从而保证所接收的干扰和噪声的功率达到最小,极大地提高输出信噪比。但是在 HF 波段,一些瞬态信号如闪电、流星以及人为的冲击干扰等能够产生很强的雷达回波,依然能够通过天线的副瓣进入接收机,导致在多普勒频谱上出现高幅度、宽带的干扰能量^[10]。为此,在自适应波束形成的基础上,还需作进一步的处理。

2.1 基于小波变换的瞬态干扰的检测与抑制

相对于海/地杂波以及目标回波而言,瞬态干扰在短时间内包含了很强的信号能量,在时域上表现为突变的特性,利用这一点可以对其进行检测。在距离处理后,对存在突变的距离门的回波信号作小波变换。当得到不同尺度上的小波系数后,将其和所设定的门限相比较,超过门限者被认为是存在瞬态干扰的部分。然后在时域中将该时段的数据挖除。但是为了不降低下一步速度处理的多普勒分辨率,需要人为地将这段数据补上。文献[11]提出利用 AR 模型进行数据的预测,但模型的阶数及预测系数必须精心选择以保证预测误差达到最小。由于在不同的小波尺度上,瞬态干扰的表现是不同的^[11,12]。因此实际应用时,需要在多个尺度上设立门限,以保证干扰能够被正确检测。

2.2 基于多普勒滤波及 IFFT 的检测与抑制

由于海/地杂波在多普勒域中能量分布较为集中,而瞬态干扰在时域中能量分布集中,因此可以利用这两种回波能量分布规律的不同对瞬态干扰进行检测。考虑到瞬态干扰的回波和海/地杂波相比仍然稍弱,因此首先在多普勒域中将海/地杂波滤除,然后作 IFFT 变换到时域。由于此时强大的杂波信号已经被除去,瞬时干扰将会在时域中凸现出来。接下在原始的未滤除海/地杂波的时域信号中将该段数据挖除。最后根据信号的统计特性将挖除的点补上。这种方法^[10]简单直观,易于工程实现。但是它要求瞬态干扰的频谱位于海杂波谱之外,否则将瞬态干扰的部分频谱也一同滤除后,变换到时域中可能对瞬态干扰位置的检测带来不利影响。

2.3 基于自适应 MTI 滤波器的检测与抑制

本方法^[13]利用相邻距离、方位单元上的海/地杂波在短时间内的高度的相关性来进行杂波对消。首先在 K 个重复周期内同时观测来自于相邻距离和方位单元的回波信号,作协方差矩阵。由于海/地杂波在相邻的距离和方位单元内都存在,而瞬态干扰如闪电和流星余迹等只存在于一到两个距离门或一到两个方位单元内。因此在协方差矩阵中,海杂波的成分相对大的多。为此采用主元分析法^[14],首先将协方差矩阵作特征分解,将前 r 个大特征值对应的特征向量构成的空间称为杂波子空间,将剩下的较小特征值对应的空间称为噪声子空间。接下来将存在瞬态干扰的那个分辨单元的原始数据 X 投影在杂波子空间上,得 X_r ,从而 MTI 滤波器的输出为 $X - X_r$ 。由于两个子空间相互正交,因此输出的时域信号中海杂波已经被滤除,从而瞬态干扰将会凸现出来。相比前一种方法,自适应 MTI 滤波器不涉及频域滤波,但是运算量也相对较大。

3 非线性相位路径变化和多径传播的影响及解决方案

除了干扰和噪声外,一些其他的污染机制,如非线性相位路径变化和多径传播等,由于会导致杂波谱展宽,因此仍然给舰船检测和海态遥感带来了很大困难^[13,15~18]。下面我们将针对这两种频谱展宽机制进行分别讨论。

3.1 相位路径变化和多重传播的影响

相位路径变化是指雷达信号经过电离层传播时,由于电离层的非平稳使得各次回波信号的相位产生了一个随机扰动。这种随机扰动在较短的时间内可以近似认为呈线性变化,此时它并不影响多普勒谱的形状,只是使谱发生了频移^[13,15]。但若相干积累时间大于20~30s,相位污染将呈现非线性变化^[17],使得回波信号不能实现有效积累,从而导致多普勒谱展宽。

多重传播是另一种能够产生重大频谱污染的传播现象^[13,15,16]。在某些工作频率,雷达信号可能经不同的电离层反射,这样就使得来自于不同距离的回波信号经过不同的电离层反射后,有可能在同一时间内到达雷达接收机。经过相干积累后,整个接收信号的多普勒谱表现为几组不同反射信号的多普勒谱的叠加。由于不同电离层附加的多普勒频移不同,导致回波信号的多普勒谱会发生重影和展宽。因此在进行舰船检测时,应尽量选择单一传播模式的工作频率,以保证回波信号多普勒谱的纯度^[5]。

3.2 相位路径变化的解污染

(1) 采用短相干积累时间 前面已经提到,在较短的相干积累时间内,电离层的相位路径变化是近似线性的,不会引起多普勒谱的展宽,只是使谱产生了一个频移。该频移可以通过海杂波正负 Bragg 峰在多普勒轴上的对称性得到校正。因此,一种最直观的想法就是采用短相干积累时间。但传统的傅立叶变换在较短的时间内不能提供足够的分辨率,此时可以采用高分辨谱估计方法。

(2) 基于最大熵谱分析的解污染 在 OTHR 的回波信号中,由海杂波引起的 Bragg 峰最强且易于识别,因此我们可以在多普勒谱中,将展宽的正 Bragg 峰(或负 Bragg 峰)滤出,然后作 IFFT。当得到 Bragg 峰的时域信号后,将其分成多个小段(10s 一段),并假设在该段时间内,电离层的相位路径变化为线性。接着对每一小段数据作最大熵谱分析,以对短时间序列 Bragg 峰的多普勒频率作精确估计。由于整个时间段上,相位路径变化是非线性的,因此相邻两小段之间 Bragg 频率也不相同。这样利用整个积累时间内 Bragg 频率的变化可以对非线性的相位污染进行校正^[17]。

(3) 基于相位梯度的解污染 事实上,在 10s 量级内,相位路径变化呈现非线性也时有发生。

为此, J. Parent^[18] 提出直接利用相位梯度来估计瞬时频率。即对 IFFT 变换后的 Bragg 峰的时域信号,假设其相邻采样点之间的相位差为 ϕ , 时间间隔为 t , 则瞬时频率污染为 $\omega = \phi / t - \omega_b$, 其中 ω_b 为 Bragg 峰角频率的大致位置。接下来依据该估计值即可以对原始回波信号的相位污染进行校正。虽然上述方法较为直接,但当信号幅度较低时,瞬时频率的估计误差也较大,为此可以采用几组数据加权平均来降低估计误差^[18]。

(4) 基于特征分解的解污染 在本方法中,整个积累时间也被分成多个小段,并假设每小段上的相位污染可以用线性表示。但由于整个时间段上相位污染是非线性的,因此相邻两小段之间有一个多普勒频差。考虑到相邻分辨单元上的回波信号经过电离层时受到的相位污染基本相同,因此在第 i 个时间段内,同时观测来自于相邻距离、方位单元的回波信号,作协方差矩阵并特征分解。如果雷达回波是平稳的,即相位污染不存在,那么第 $i+1$ 时间段的信号子空间应正交于第 i 时间段的噪声子空间。基于这一点,我们可以首先对相位污染进行补偿,然后作子空间的投影函数,并依据正交性原理来估计各段间的多普勒频差,就可以对回波信号的相位进行校正^[13,16]。

3.3 多重传播的解污染

当多重传播存在时,雷达接收信号可以看作是来自于不同电离层反射的相互独立的信号的总和。这些信号具有相似的多普勒频谱,但每一个谱被附加了和相应电离层所对应的不同的多普勒频移^[13],因此在整个接收信号的多普勒谱中会出现重影现象,可能存在多于两个的 Bragg 峰。通常我们根据 Bragg 峰的个数,强度和位置,就可以对传播模式的数目,每一种传播模式的幅度以及多普勒频移进行初步估计。

4 目标检测

OTHR 需要探测的主要目标有战略轰炸机、巡航导弹、弹道导弹,以及舰船等。

对飞机而言,由于其速度快,产生的多普勒频率远离海/地杂波,因此对它的检测主要是受外噪声的影响。虽然高频段的外部噪声相对较高,但由于采用了宽口径的接收天线阵以及自适应噪声抑制处理,检测较为容易。

另外需要特别指出的是,OTHR 对于隐身飞机来说是非常理想的探测手段。隐身飞机的隐身

机理分为两种:外形隐身和材料隐身。由于 OTHR 工作在高频段,其波长和大部分飞行器的物理尺寸相接近,此时目标的雷达散射截面只取决于飞机的照射面积,而与外形细节无关^[1]。另外 OTHR 采用下视工作方式,这也是外形隐身最薄弱的视角。在材料隐身方面,为了达到较好的隐身性能,飞机涂敷的吸波材料的厚度约为 $\lambda/4$ (λ 为雷达波长)^[21],但这在 OTHR 工作的高频段几乎是不可能的。

对于弹道导弹而言,其速度快,同时物理尺寸较大,和 OTHR 的工作波长很相近,处于雷达的谐振散射区域内,因此检测较为容易。而巡航导弹属于小型目标,飞行速度也较慢,此时应尽量使用较高的工作频率以使其处于或接近谐振散射区域内^[2]。

舰船目标的速度慢,产生的多普勒频率与强大的海杂波相近,需要尽量抑制海杂波。另外一些环境因素如电离层的非平稳以及多径效应等对舰船检测的影响也较为严重。因此在检测舰船时,可以从以下几个方面来考虑:依据电离层的状况尽量选择单一传播模式的工作频率;提高 OTHR 在距离、方位以及多普勒域中的分辨能力。即采用大天线阵、较宽的信号带宽和长相干积累时间。但长时间的相干积累也会带来两个问题^[19,20],其一是要要求雷达在各观察区域驻留更长的时间,影响了跟踪器的工作;其二是在长积累时间下,电离层的非平稳及其引起的相位扰动发生几率更高,影响也更为严重。因此需要考虑能否在较短的积累条件下检测舰船。这里可以采用高分辨谱分析技术^[19],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 也可以从短时间数据中提取出舰船信号^[20]。

需要说明的是 OTHR 对于飞机和舰船的最佳工作参数(包括工作频率、信号带宽、脉冲重复间隔以及积累时间等)不太相同,因此在不同的扫描周期内可以采用不同的工作参数,以对这两种目标分别检测。但若需同时检测,则雷达的工作参数需要折中考虑。

5 总结与展望

OTHR 为大范围的目标检测和海态遥感提供了一种新的手段。但是它的高频工作波段以及通过电离层反射的传播特点使其工作环境十分复杂,同时强大的杂波背景和观测目标的多样性也使得 OTHR 还存在许多技术难点。为此,我们认

为可以在以下几个方面作进一步的努力。

(1) 充分收集和利用各种先验知识,包括根据经验设定的电离层传播模式、雷达探测区域的无线电干扰源以及海图等,并将所得数据和实测值进行合成,将有力地提高雷达的频率管理、干扰的抑制以及目标的检测性能。

(2) 对于强杂波背景下的目标检测,可以考虑采用一些非传统的处理方法。文献[20]分析并验证了高频雷达海回波信号的混沌特性,因此可以利用混沌处理方法进行海杂波中的目标检测。目前的一些研究结果表明利用混沌预测模型对海杂波中的小目标有较好的检测性能^[21]。

(3) 研究海杂波背景下的恒虚警处理方法。由于海杂波是时变的,需要实时地建立杂波模型以根据当前情况调整检测门限,从而取得较好的检测性能。另外发展非参数的检测机制,以使其对杂波的统计特性不敏感,这对于舰船和海面慢速飞行目标的检测是非常有利的。

(4) 由于电离层的法拉第效应,OTHR 的回波信息将是双极化的。与单极化相比,它为目标检测提供了更多的信息量,可以作进一步的研究。

(5) 天波雷达的工作环境十分复杂,而经典的处理方法通常假设回波信号是平稳的、噪声是白高斯的,但实际当中,由于传播条件的影响往往会偏离这些理想情况^[22,23],因此有必要研究在非平稳、非高斯环境下的信号处理方法。

总之,天波雷达以其大范围的监视能力、早期预警、防低空突袭、抗隐身以及海态遥感等突出优点在军事和民用中具有重要意义。但同时它的工作环境极其复杂、涉及的设备也非常多,这项技术还处于不断的发展与完善当中,但可以肯定的是,它必将在未来发挥越来越大的作用。

参 考 文 献

- [1] Headrick J M, Thomason J F. Application of high-frequency radar[J]. Radio Science, 1998, 33(4): 1045-1054.
- [2] Tang X D, Han Y J, Zhou W Y. Skywave over-the-horizon backscatter radar[A]. In: Wu Shun-jun. Proceedings of International Conference on Radar[C], Beijing, 2001: 90-94.
- [3] Headrick J M, Skolnik M I. Over-the-horizon radar in the HF band[J]. Proceedings of the IEEE, 1974, 62(6): 664-673.
- [4] Anderson S J. Adaptive remote sensing with HF skywave radar[J]. IEE Proceedings - F, 1992, 139(2): 182-192.
- [5] Barnum J R. Ship detection with high-resolution HF skywave radar[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1986, 11(2): 196-209.

- [6] Ferraro E, Canter D. Cold war to counter drug[J]. Microwave Journal, 1998, 3: 82 - 92.
- [7] Earl G F, Eard B D. The frequency management system of Jindalee over-the-horizon backscatter HF radar[J]. Radio Science, 1987, 22(2): 275 - 291.
- [8] Basler R P. OTH radar system design[A]. In: proceedings of IEEE National Radar Conference [C]. USA: IEEE Press, 1999: 223 - 226.
- [9] Monzingo R A, Miller T W. Introduction to adaptive arrays [M]. New York: John Wiley & Son, 1980.
- [10] Barnum J R, Simpson E E. Over-the-horizon radar sensitivity enhancement by impulse noise excision[A], In: Proceedings of IEEE National Radar Conference[C]. USA: IEEE Press, 1997: 252 - 256.
- [11] 权太范,李健巍. 高频雷达抗瞬时干扰研究[J]. 现代雷达, 1999, 21(2): 1 - 6.
(Quan T F, Li J W. A study on high frequency radar suppressing sudden interference[J]. Modern Radar, 1999, 21(2): 1 - 6.)
- [12] 权太范,李健巍,于长军,等. 高频雷达抑制冲击干扰的研究与实验[J]. 电子学报, 1999, 27(12): 23 - 25.
(Quan T F, Li J W, Yu C J, et al. An approach and experiment of suppressing burst interference in high-frequency radar [J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(12): 23 - 25.)
- [13] Anderson S J, Abramovich Y I. A unified approach to detection, classification, and correction of ionospheric distortion in HF sky wave radar systems[J]. Radio Science, 1998, 33(4): 1055 - 1067.
- [14] 董华春,宗成阁,权太范. 高频雷达海洋回波信号的混沌特性研究[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 25 - 28.
(Dong H C, Zong C G, Quan T F. Chaotic Characteristics in HF radar backscatter form the ocean surface[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 25 - 28.)
- [15] Anderson S J, Godfrey S E, Voigi S M. On model identification for distortion correction of OTH radar[A]. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. USA: IEEE Press, 1994: VI - 129 - 132.
- [16] Abramovich Y I, Anderson S J, Solomon I S D. Adaptive ionospheric distortion correction techniques for HF skywave radar[A]. In: Proceedings of IEEE National Radar Conference [C]. USA: IEEE Press, 1996: 267 - 272.
- [17] Bourdillon A, Gauthier F. Use of maximum entropy spectral analysis to improve ship detection by over-the-horizon radar [J]. Radio Science, 1987, 22(2): 313 - 320.
- [18] Parent J, Bourdillon A. A method to correct HF skywave backscattered signals for ionospheric frequency modulation [J]. IEEE Transaction on Antennas and Propagation, 1988, 36(1): 127 - 135.
- [19] Olkin J A, Nowlin W C, Barnum J R. Detection of ships using OTH radar with short integration times[A]. In: Proceedings of IEEE National Radar Conference [C]. USA: IEEE, 1997: 1 - 6.
- [20] Root B T. HF over-the-horizon radar ship detection with short dwells using clutter cancellation [J]. Radio Science, 1998, 33(4): 1095 - 1111.
- [21] Li B X, Simon H. Chaotic detection of small target in sea clutter[A]. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing[C]. USA: IEEE Press, 1993: I - 237 - 240.
- [22] Anderson S J. The challenge of signal processing for HF over-the-horizon radar[A]. In: B. Boashash, Proceedings of the Workshop on Signal Processing and Application[C]. Queensland Australia: Queensl Univ. of Tech, 1993: 3 - 16.
- [23] Jarron R K. The processing of HF skywave radar signal[A]. In: Proceedings of International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing [C]. USA: IEEE Press, 1994: VI - 165 - 168.

作者简介:



郭欣(1977 -) 女,江苏涟水人,南京理工大学电光学院博士研究生,1999年于南京理工大学获电子工程专业学士学位,同年免试进入通信与信息系统学科攻读博士学位,主要研究方向为天波超视距雷达信号处理。

倪晋麟(1961 -) 男,安徽桐城人,南京电子技术研究所研究员、副总工程师,1989年获东南大学信号与信息处理学科博士学位,主要研究方向为雷达系统、现代雷达信号处理。

苏卫民(1959 -) 男,江苏启东人,南京理工大学电光学院副教授,博士后,1998年获南京理工大学通信与信息系统学科博士学位,主要研究方向为阵列信号处理和自适应信号处理。



刘国岁(1933 -) 男,辽宁大连人,南京理工大学电光学院教授,博士生导师,1953年毕业于解放军通信工程学院雷达工程系,现为中国电子学会会士、IEEE Fellow,主要研究方向为雷达系统、随机信号处理、雷达成像、目标识别等。

(责任编辑:吴小勇)