

超视距雷达海杂波与干扰信号的多域特征与海杂波检测

罗忠涛*^① 严美慧^① 卢琨^② 何子述^③

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(南京电子技术研究所 南京 210013)

^③(电子科技大学信息与通信工程学院 成都 611731)

摘要: 针对超视距(OTH)雷达接收信号成分复杂的问题, 该文提出基于多域组图的信号分析方法, 讨论海杂波、瞬态干扰和射频干扰的多域特征。运用时域、频域、距离域、重复周期和多普勒5域, 组合为6种2维矩阵图, 提出雷达接收数据的“五域六图”(5D6M)方法。通过五域六图, 各种接收信号成分在多个域得以分离, 海杂波和干扰在不同域的特征得以体现, 清晰展示海杂波的频谱和多普勒谱特性、瞬态干扰的大功率和短时性以及射频干扰的窄带与多普勒特性。基于五域六图的信号特性分析, 能够为雷达信号分析与处理提供很好的帮助。该文以海杂波为例, 设计了基于频域-多普勒域的海杂波多普勒单元检测的新方法。

关键词: 超视距雷达; 海杂波; 干扰; 特征分析

中图分类号: TN958.93

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)03-0580-09

DOI: 10.11999/JEIT200655

The Characteristics of Sea-clutter and Interferences in Various Domains and the Detection of Sea-clutter for Over-The-Horizon Radar

LUO Zhongtao^① YAN Meihui^① LU Kun^② HE Zishu^③

^①(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

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

^③(School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Considering that the receiving data of Over-The-Horizon (OTH) radar is complicated, a signal analysis method based on various domains and maps is proposed, and the characteristics of sea-clutter, transient interference and radio frequency interference are discussed in this paper. By employing the time, the frequency, the range, the period and the Doppler domains, six kinds of two dimensional matrices or maps are constructed, which forms the Five-Domain-Six-Map (5D6M) concept for the radar receiving data. By using the 5D6M, the signal components of the receiving data and reveal their characteristics can be separated in various domains, including the spectrum and Doppler property of sea-clutter, the power and transient features of transient interference, and the narrowband and Doppler property of radio frequency interference. The characteristic analysis based on the 5D6M can help the radar signal analysis and processing. By taking the sea-clutter as an example, a novel method for detecting the sea-clutter Doppler based on the frequency-Doppler map is proposed.

Key words: Over-The-Horizon (OTH) radar; Sea-clutter; Interference; Characteristic analysis

收稿日期: 2020-08-03; 改回日期: 2020-12-24; 网络出版: 2021-01-04

*通信作者: 罗忠涛 luozt@cqupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701067, 61702065)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701067, 61702065)

1 引言

超视距(Over-The-Horizon, OTH)雷达工作于高频段, 具有独特的超视距检测和跟踪能力, 是国防远程预警的重要组成部分^[1-3]。相比常规雷达, OTH雷达接收数据中的信号成分比较复杂, 含有多种杂波和干扰。因此, OTH雷达接收信号分析很重要。

海杂波在OTH雷达中不可避免。天波和地波OTH雷达均对海照射, 故海杂波在接收数据中占主导地位。对于海杂波特性的认识, 一个有用的结论是高频海杂波主要集中于低多普勒域, 理论上存在Bragg峰^[4,5]。因此可采用动目标检测滤波、带阻滤波器或低多普勒置0的方法消除海杂波^[6-8]。此外海杂波子空间^[9]与高阶奇异值分解^[10]也可用于抑制海杂波。

其次, 高频段经常发生瞬态干扰和射频干扰, 会污染距离-多普勒谱图, 严重降低雷达性能。瞬态干扰的特点是幅度大但持续时间短, 故经典抑制思路是基于时域“检测-剔除-重构”^[11], 其中检测需要消除海杂波后进行, 而重构可基于线性预测^[11]、小波变换^[12]、特征分解^[6]和压缩感知^[13]等。射频干扰的显著特点是相对雷达带宽的窄带特性, 因此可采用滤波器设计的方法抑制干扰^[14], 或在频域检测干扰并置0消除的方法^[15]。此外, 瞬态干扰和射频干扰的空域特性使其可由波束形成来抑制^[16,17], 根据子空间特性可采用子空间投影方法^[18,19]。

以上研究验证了一个事实: 信号特性决定了信号处理的思路, 而信号特性分析决定了能提出何种处理算法。利用瞬态干扰的大功率瞬时性, 唐晓东等人^[7]提出基于功率大小的干扰检测算法; 基于窄带射频干扰的频谱特性, 胡进峰等人^[15]提出基于频谱功率的射频干扰检测算法; 针对快慢时间图中的瞬态干扰线和距离-多普勒图中的窄带干扰线, 罗忠涛等人^[20,21]提出直线检测算法实现干扰检测。可见, 信号特性分析是信号处理研究的必要工作。

目前, OTH雷达接收信号的分析与处理已有多种角度, 如时域、频域、多普勒域、空域和子空间域等, 但缺少一个综合系统的方法。本文希望对OTH雷达常见信号进行多个域的综合分析。考虑到空域特性比较独立而子空间性质复杂, 本文选择

从时域、频域、距离域、重复周期、多普勒维5个域展开分析, 构造时域-周期、时域-多普勒和距离-多普勒等6种图, 从而形成“五域六图”(Five-Domain-Six-Map, 5D6M)的概念。对五域六图中海杂波、瞬态干扰和射频干扰的特征分析, 可为杂波和干扰处理提供可靠的创新思路与依据。

2 五域六图的概念

2.1 五域含义

为方便介绍, 考虑天波OTH雷达的一个典型工作场景。设雷达采用连续波体制, 以周期 T 重复发射雷达波形, 带宽为 B ; 接收端持续接收信号, 基带采样率为 f_s ; 每个周期 T 时间内的采样点数为 $M=f_sT$; 接收端在积累 P 个周期后进行相干处理, 即相干积累间隔(Coherent Processing Interval, CPI)为 PT ; 因此, 一个CPI内的采样数据有 $N=PM$ 个, 设为 $r(n)$, $n=1, 2, \dots, N$ 。

为了分析 $r(n)$ 含有的信号及其特性, 本文关注 $r(n)$ 在5个域的特征。五域的名称与含义如表1所示。简介如下:

(1) 时域: 雷达接收数据的快时间维。由于雷达信号重复发射, 快时间维的尺度为 M 。

(2) 频域: 快时间维 M 个连续采样的频域, 一般采用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)实现, 故其尺度也为 M 。

(3) 距离域: 接收数据进行脉冲压缩, 获得距离分辨率, 距离单元的个数仍然是 M 。

(4) 重复周期: 雷达接收数据的慢时间维, 由时间上相隔 T (采样序号相隔 M)的接收数据组成。每个CPI包含 P 个周期, 故每组慢时间维数据有 P 个点, 一个CPI包含 M 组。

(5) 多普勒维: 慢时间维采样点对应的频域反映了接收信号的多普勒频移。由于海杂波极为强烈, 一般慢时间维FFT之前会采用加窗操作。此为常规处理, 后文不再赘述。

可见, 五域主要分为两类: 一是快时间类, 包括时域快时间采样、FFT频域和脉冲压缩带来的距离域; 二是慢时间类, 包括慢时间周期及其FFT带来的多普勒域。

表1 五域名称与含义

五域	含义	英文简写
时域	一个雷达重复周期内接收数据的采样点即快时间维	T(Time)
频域	快时间维时域数据的快速傅里叶变换所对应频域	F(Frequency)
距离域	时域数据在脉冲压缩处理后, 获得距离域分辨率	R(Range)
重复周期	雷达发射信号的重复周期序号, 相当于慢时间维	P(Period)
多普勒维	慢时间维的快速傅里叶变换, 对应频域为多普勒维	D(Doppler)

2.2 六图含义

将接收数据进行处理和排列,可以得到6种2维矩阵,均含 $N=PM$ 个元素,其行数为 P ,列数为 M 。6种2维矩阵的物理意义,对应了两类域的6种组合。将矩阵绘制成图,得到了6种图,其名称和含义如表2。简介如下:

(1) TP图,即快时间-周期图。将雷达接收数据,每 M 个采样点排为一行,按照各周期依次排列,共 P 行,即可得到 P 行 M 列的TP矩阵 \mathbf{X}_{TP} 。接收数据 $\mathbf{r}(n)$ 与TP矩阵元素的对应关系是 $\mathbf{X}_{TP}(p,m)=\mathbf{r}[m+(p-1)M]$ 。

(2) TD图,即快时间-多普勒图。TP矩阵每一列为慢时间对应的采样点,进行FFT处理,转换到多普勒域,即可得到TD矩阵 $\mathbf{X}_{TD}(p,m)$ 。

(3) FP图,即频率-周期图。将TP矩阵每一行进行FFT转换到频域,给出了每个周期接收数据的频谱信息,得到FP矩阵 $\mathbf{X}_{FP}(p,m)$ 。

(4) FD图,即频率-多普勒图。对FP矩阵每一列进行FFT转换到多普勒域,即可得到FD矩阵 $\mathbf{X}_{FD}(p,m)$ 。

(5) RP图,即距离-周期图。整个CPI的雷达接收数据进行脉冲压缩后,再将每 M 点排为一行(意为单周期数据的测距),按周期依次排列,得到RP矩阵 $\mathbf{X}_{RP}(p,m)$ 。

(6) RD图,即距离-多普勒图。由RD矩阵每一列进行FFT转换到多普勒域得到 $\mathbf{X}_{RD}(p,m)$ 。RD矩阵是雷达最常用的处理结果,给出了待检目标的距离和速度信息。

六图可展现OTH雷达信号在5个域的所有特征,为信号分析和处理提供了很好的工具。通过五域六图这一工具,能够帮助解决两个问题:第一是综合分析当前的雷达接收信号含有什么成分;第二是综合分析已知信号(如杂波和干扰)的特性。这些分析能够为雷达信号处理带来更全面的视角和创新的思路。

3 信号的多域特征

本文介绍的五域六图从不同的角度展现雷达接收数据中所含信号的特征。OTH雷达接收数据可能含有多种分量,本文主要分析OTH雷达中常见的海杂波、射频干扰和瞬态干扰。

3.1 海杂波

海杂波能量极强,一般在OTH雷达接收数据中占有主导地位,在雷达信号处理中不可忽视。作为示例,图1为天波OTH雷达仿真海杂波的典型六图,其中坐标轴没有标出各域物理量的值,而是用行列序号标识,不影响特征分析。该组数据参数为 $M=500$, $P=512$, $T=0.01$ s,每幅图绘制数据幅度的对数,幅度动态范围是最小值为最大值的 10^{-4} 。明显图1中六图有很大区别,体现了海杂波信号在不同域特性差异很大。

下面对比分析海杂波特征。

(1) 从周期图与多普勒图之间的对比,如TP图对比TD图,FP图对比FD图,RP图对比RD图,可见多普勒域最能体现海杂波特征。在TD图,FD图和RD图中,海杂波主要集中在低多普勒区域,且3图中海杂波宽度和位置大致相同。

(2) 从时域图和频域图之间的对比,如TP图对比FP图,TD图对比FD图,可见海杂波频率集中在雷达频段,说明海杂波的确是雷达信号回波。由于雷达频段较宽,相比海杂波在多普勒域集中于低多普勒区域,在频域的集中程度并不算高。

(3) 从时域图和距离图之间的对比,如TP图对比RP图,TD图对比RD图,可见时域图中原本分散在各个采样点的海杂波能量,在距离域图中集中到了对应的海杂波单元上。在RD图中,海杂波完成了在距离域和多普勒域上的相干总和。

可见,海杂波的突出特征是多普勒特性,由多普勒域进行海杂波检测和处理是合理的。不过,海杂波检测所需的观测统计量和检测算法还必须考虑干扰的因素。因此,实现稳健的海杂波检测需要先分析干扰在五域六图中的表现。此外,电离层相位污染与解污染也会影响海杂波^[2],五域六图方法可以帮助分析该问题,但因缺少实测数据,本文不再深入探讨。

3.2 瞬态干扰

瞬态干扰在五域六图中的特征观察需要先消除大部分海杂波,因为一般情况下海杂波极强,会遮盖干扰特征。本文通过多普勒域置0方法消除海杂波,具体操作是:将接收数据转化到TD图,置0海杂波所在多普勒单元,再逆FFT到TP矩阵,得到时域接收数据。

表2 六图名称与含义

六图	时域(T)	频域(F)	距离域(R)
重复周期(P)	TP图将接收数据按照周期排列所得2维矩阵	FP图对TP图的快时间维进行FFT得到	RP图将接收数据脉冲压缩后按照周期排列得到
多普勒维(D)	TD图对TP图慢时间维进行加窗和FFT得到	FD图对FP图慢时间维进行加窗和FFT得到	RD图对RP图慢时间维进行加窗和FFT得到

图2给出了实测瞬态干扰数据的五域六图示例，其中多普勒图中低多普勒区域幅度为零是因为海杂波被消除了。对比各图特征，可见如下现象：

(1) 从周期图与多普勒图之间的对比，如TP图对比TD图，FP图对比FD图，RP图对比RD图，可见瞬态干扰在周期域集中能量，在多普勒域分散能

量。原因在于瞬态干扰本身不具有显著频率特性，故无明显多普勒特征。对于瞬态干扰在多普勒域(包括TD图和RD图)中表现出的斜线特点，目前尚不能解释。

(2) 从周期图如TP图、FP图和RP图中可见，瞬态干扰主要集中在少数周期，如图2(a)中周期序号217~238。相比其他周期的噪声和残余海杂波，

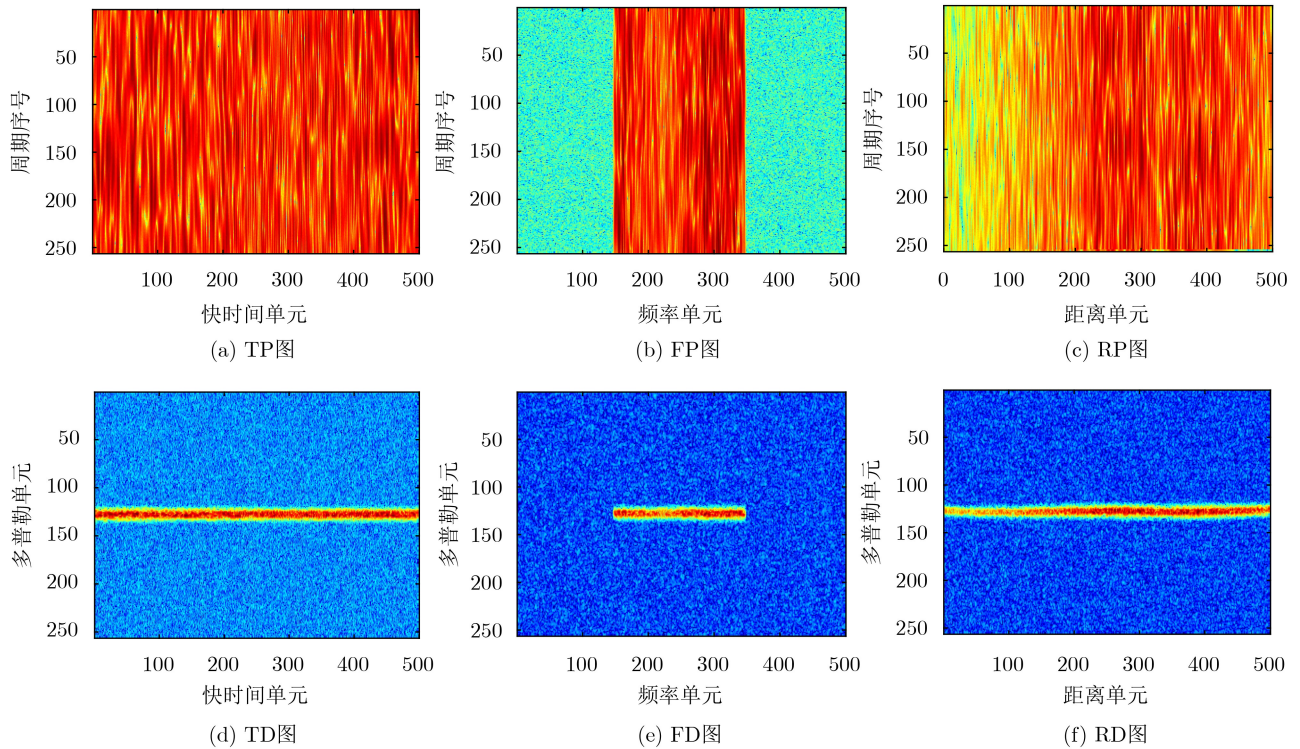


图1 海杂波的五域六图

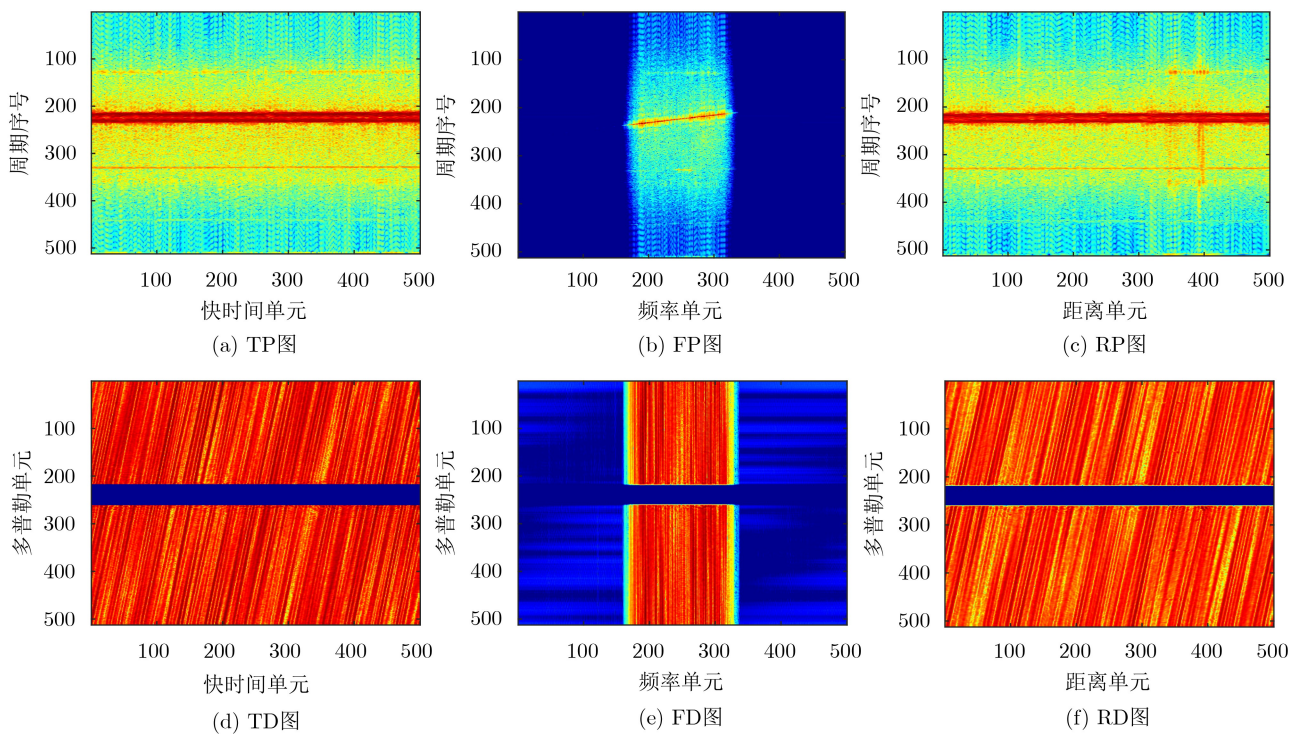


图2 瞬态干扰的五域六图

瞬态干扰幅度明显高很多。此为瞬态干扰的时域和周期上的分布特征。

(3) 对比TP图和RP图可见, 脉冲压缩没能提取距离信息, 说明瞬态干扰不含距离信息。注意, FP图有一个原因不明的现象: 在瞬态干扰所在周期与雷达频段的重叠区域, 即周期序号217~238与频率序号173~330构成的矩形区域, 具有幅度很高的对角线。

以上分析可见, 瞬态干扰的典型特征是连续少数周期存在大幅度, 因此可从各周期信号幅度来检测瞬态干扰。由于瞬态干扰数据本身不含明显的距离、频率或多普勒信息, 不能在其他域聚集干扰能量。相反, 多普勒处理会极大地分散干扰能量。

3.3 射频干扰

射频干扰可分为两种, 一种是相对窄带的干扰, 其频谱几乎为点频; 另一种是相对宽带的干扰, 其频谱具有一定宽度。为了观察干扰, 依然采用消除海杂波后的数据。

采用 $P=256$, $M=500$ 的实测数据, 绘制五域六图如图3。对比各图可发现如下特征:

(1) 从周期图与多普勒图之间的对比, 如TP图对比TD图, FP图对比FD图, RP图对比RD图, 可见宽带射频干扰并没有在多普勒域聚集能量。这是因为宽带射频干扰的频谱比较规律, 因此有多普勒谱峰但能量不聚集。同时, 窄带射频干扰的能量会集中到对应多普勒单元上。

(2) 从FP图和FD图可见, 射频干扰的频域特征明显。射频干扰的能量集中到干扰频段上, 即频率维的294~306单元。多普勒处理不能集中宽带射频干扰的能量, 但能集中窄带射频干扰的能量。

(3) 从周期图上看, 在TP图、FP图和RP图中, 射频干扰在各周期能量分布是中间高两端低。不过, 这并非射频干扰本身的幅度变化, 而是海杂波消除处理的副作用。因此, 射频干扰是持续性干扰, 其存在时间超过CPI。

由分析可见, 射频干扰的突出特征是其频谱特征, 可从频域角度来检测射频干扰。其次, 射频干扰的频谱特性使其具有多普勒规律。图3(e)多普勒谱图中, 宽带射频干扰遍布整个多普勒域, 窄带射频干扰只占据少数多普勒单元。两类干扰的特征表现也不相同。

4 观测统计量的设计

五域六图作为雷达信号分析工具, 为雷达信号处理提供了新的视角和手段。本节以海杂波和干扰的检测定位为例, 分析说明五域六图特征如何帮助设计观测统计量。

4.1 观测统计量的考虑

观测统计量意为针对检测问题的观测样本。不同于雷达观测数据 $r(n)$, 此处观测统计量指 $r(n)$ 处理后产生的统计量, 作为解决具体的检测问题(如海杂波检测)的观测样本。

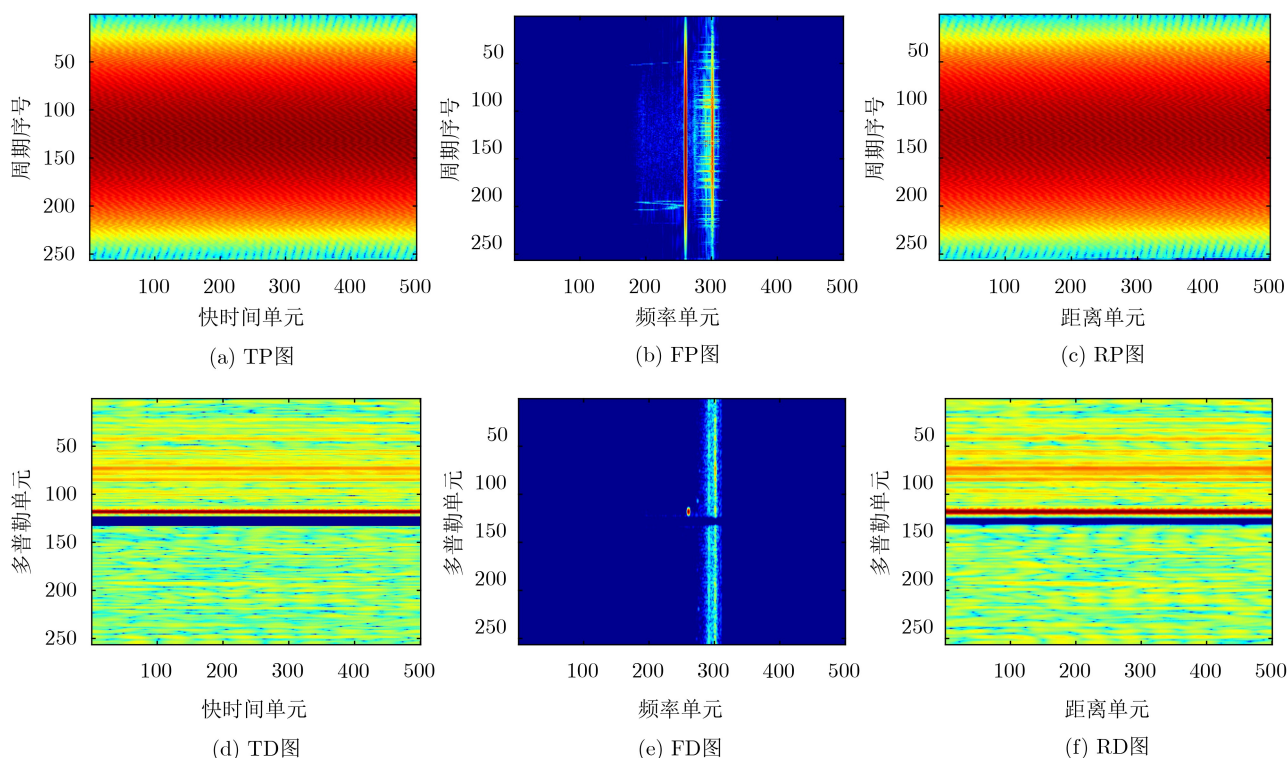


图3 射频干扰的五域六图

在OTH雷达对海照射正常工作的接收数据中,海杂波信号肯定存在,瞬态干扰和射频干扰可能存在。海杂波与干扰的检测之间存在着一个矛盾:更好的干扰检测和抑制,需要尽可能地消除海杂波;消除海杂波需要精确定位海杂波,而定位精度又会受到干扰的影响。在没有充分的信号分析之前,这个矛盾很难调和。

大致来说,海杂波消除应当在干扰检测之前,因为即使没有抑制干扰,海杂波还是能够大体定位,例如10倍Bragg多普勒频率以内^[8]。如果不消除海杂波,一般功率的干扰很难被检测。相反,即使海杂波消除效果一般,也足以支撑有效的干扰检测。

总体上,观测统计量的设计应当具有“突出待检测信号、排除其他信号”的特点,使待检测信号不受其他信号的影响。由于干扰的突发性和未知性,雷达不能预先判断某干扰是否存在,因此必须设计统计量能够在有无其他干扰下均能有效工作。例如,海杂波检测统计量需要在干扰发生时稳健,瞬态干扰检测统计量需要无视射频干扰,反之亦然。

此外,如果检测结果不仅能做出有无干扰的判断,而且能提供关于干扰的更多信息,那必能利于信号处理。例如,如果检测出瞬态干扰后还定位了瞬态干扰所在周期,那么雷达可以直接采用基于时域“消除-重构”的瞬态干扰抑制算法^[7]。又如,如果检测到窄带射频干扰的频点,那么可以采用基于频域消除的方法抑制射频干扰^[15]。如果能够获取宽带射频干扰的频宽,则必有助于接收滤波器设计中的相似度参数设计^[14]。

4.2 海杂波的观测统计量

由海杂波五域六图特征可见,海杂波最突出的特性在其多普勒域。瞬态干扰没有多普勒特性,在

各多普勒频率均保持相似幅度。射频干扰因其频谱特点而在多普勒谱上有所表现。如图3(f)中,宽带射频干扰也会形成在多普勒单元上的横线条,且其幅度能与海杂波相当。

基于多普勒域的数据有TD矩阵 $\mathbf{X}_{TD}(p,m)$,FD矩阵 $\mathbf{X}_{FD}(p,m)$ 和RD矩阵 $\mathbf{X}_{RD}(p,m)$ 。各矩阵按行计算其平均功率,即各多普勒单元信号功率,作为海杂波检测的参考。此过程必须观察考虑它在干扰问题上的稳健性。如果有瞬态干扰,则瞬态干扰在多普勒域平均分布,会抬高所有多普勒单元的平均功率,但不足以影响海杂波单元的大功率特性。如果有射频干扰,那么射频干扰可能会大幅提升对应多普勒单元的功率。这会严重影响海杂波检测。

不过,五域六图方法提供的FD图带来了新的观察收获。在FD图中,射频干扰的能量会进一步聚集,而海杂波则局限于雷达带宽内。图4(b)展示了真实射频干扰与杂波数据的FD图。可见,宽带射频干扰集中于其频段且遍布所有多普勒单元,窄带射频干扰集中于一点,而海杂波集中于所在多普勒单元及雷达频段。也就是说,FD图实现了射频干扰与海杂波的分离。

因此,可基于FD矩阵中雷达带宽内无干扰的FD单元的平均功率,检测某多普勒单元是否含有海杂波。本文所提观测统计量的设计方法如下:

(1) 由雷达接收数据 $\mathbf{r}(n)$ 生成FD矩阵 $\mathbf{X}_{FD}(p,m)$ 。

(2) 计算雷达带宽在频域的对应该宽度,即 $M_B = \lfloor M_B/f_s \rfloor$,其中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整。雷达频段对应序号为 $[(M - M_B)/2]$ 到 $[(M + M_B)/2]$ 。

(3) 取雷达频段内较小幅度点(比如1/2比例),计算各多普勒单元的平均幅度,得到观测统计量 $A_{FD}^{sc}(p)$ 。

在设计观测统计量时,第(2)步挑选雷达频段内的数据,保证海杂波多普勒范围内的频率单元都是海杂波;第(3)步取雷达频段内较小幅度点是避

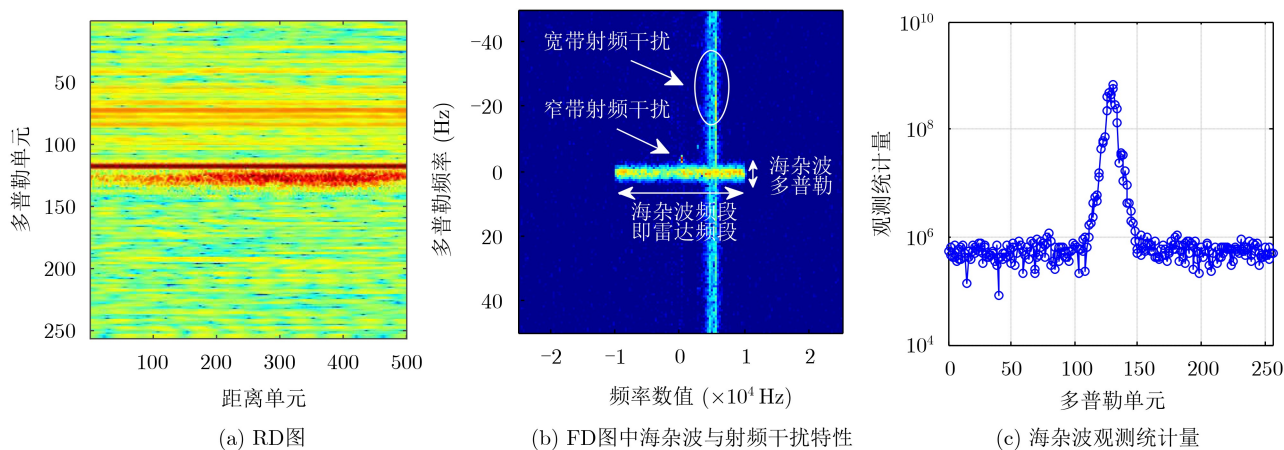


图4 含射频干扰的RD图、FD图及海杂波观测统计量

开射频干扰的关键一步。结合图3(e)和图4(b)可见,雷达频段所在频域序号在149~350(对应的频率值-10.1~10.0 kHz),而宽带射频干扰频段更窄,在294~306(对应的频率值为4.4~5.5 kHz)。如果笼统地计算整个雷达频段内的信号幅度,那么干扰频段幅度会影响非海杂波的多普勒单元。取用 $\mathbf{X}_{\text{FD}}(p, m)$ 中较小幅度值来计算统计量,既能很好地避开干扰,又省略了干扰频段的检测。当存在干扰时,无海杂波的多普勒单元会只计算较小幅度的噪声区域,而有海杂波的多普勒单元会计算较弱海杂波的杂波区域。不过,由于海杂波能量总是很大,故其平均幅度依然会远高于噪声幅度。

获得观测统计量之后,海杂波检测可采用一般的异常值剔除算法,比如 α 倍标准差法。此外,利用海杂波的其他特点也能进一步提升海杂波检测性能。例如,海杂波仅出现在低多普勒区域,故可以低多普勒为待检测对象,其他多普勒作为无海杂波样本,为海杂波检测算法提供参考信息。又如,对空监测时CPI较小,海杂波多普勒谱连在一起,故可取连续的大幅度多普勒区域为海杂波区域,丢弃其他非连续区域。

4.3 干扰的观测统计量

在五域六图中,瞬态干扰的突出特征是所在周期具有较大幅度,明显比噪声和残余海杂波更高,如图2中TP图,FP图和RP图。同时,海杂波和射频干扰都是非瞬时信号,能够在整个CPI持续存在。因此,消除海杂波后的各周期功率是瞬态干扰的合理观测量。

基于周期序号的数据有TP矩阵 $\mathbf{X}_{\text{TP}}(p, m)$,FP矩阵 $\mathbf{X}_{\text{FP}}(p, m)$ 和RP矩阵 $\mathbf{X}_{\text{RP}}(p, m)$ 。各矩阵按行计算其平均功率,得到各周期的信号功率。然后根据功率大小,判断该周期是否存在瞬态干扰。此方法对于射频干扰和海杂波依然稳健。如果有射频干扰或残余海杂波,则它们的能量在各周期平均分布,因此会抬高所有周期的平均功率,但不影响瞬态干扰具有明显更大功率的特性。除非海杂波消除得很差,有大量海杂波残余,以至于淹没了瞬态干扰。

因此,可设计TP矩阵 $\mathbf{X}_{\text{TP}}(p, m)$ 各行平均功率为观测统计量,即

$$A_{\text{TP}}^{\text{tsi}}(p) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M |\mathbf{X}_{\text{TP}}^2(p, m)| \quad (1)$$

用来检测瞬态干扰是否存在及其存在的周期。

这里没有采用FP或RP矩阵来设计观测统计量,是因为目前瞬态干扰与雷达信号的调制关系尚未分析透彻,避免不必要的操作带来干扰能量的损失。

在检测瞬态干扰并定位其周期后,不仅可以采用时域方法进行抑制,还可截取该周期的各阵元数据,进行空域波束形成,实现精准的瞬态干扰抑制。

最后,对于射频干扰,其五域六图特征是明显的窄带特性,功率谱密度可与海杂波相比。如图3中的FP图和FD图,射频干扰的频谱很明显。尤其是在FD图中,窄带射频干扰的能量集中于一点,是干扰检测的最佳样本。不过,实用的射频干扰检测必须兼容宽带和窄带射频干扰的检测能力,还需要更多细节的考虑。

由于篇幅所限,本文对于干扰检测的讨论不再继续展开,因为干扰问题的分析颇为复杂。干扰检测与干扰抑制紧密联系,而干扰抑制的讨论内容很多,包括多样化的干扰抑制手段,针对不同干扰的抑制性能的综合评价,以及干扰与海杂波之间的关系等。本文所提五域六图方法,是雷达接收数据的信号分析工具,可为海杂波和干扰等问题的解决提供有力帮助与有益思路。

5 仿真与分析

本节仿真海杂波的多普勒单元检测算法,验证在干扰影响下的表现稳健性。一组存在射频干扰的接收数据的RD图如图4(a)所示。可见,射频干扰遍布所有多普勒单元,且有一强烈窄带干扰临近海杂波。采用本文所提海杂波检测算法,得到的观测统计量如图4(c)。多普勒单元125~133的统计量幅度很大,对应于RD图中的海杂波位置。其次,射频干扰区域的观测统计量并不大,说明本文所提的观测统计量能够很好地避免射频干扰的影响。

再观察存在瞬态干扰的情况。该组数据的RD图如图5(a)所示,可见瞬态干扰很强烈。采用基于FD图的观测统计量方法,得到的观测统计量如图5(b)所示。可以看到,海杂波所在多普勒单元的观测统计量值较高,而其他多普勒单元的统计量值明显更低,因此设置合适门限即可实现对海杂波所在多普勒单元的检测。

正如五域六图的特征分析所说,瞬态干扰的幅度比海杂波更弱,其时域周期特性需要进行海杂波消除后才能显现。图5(c)描绘了海杂波消除前后的TP图各周期的平均功率。可以看到,海杂波抑制前,瞬态干扰难以检测;采用本文的海杂波检测方法并置0消除后,瞬态干扰得以显现。

6 结论

本文通过引入时域、频域、距离域、重复周期和多普勒维及组合的6种矩阵图,对超视距雷达接收数据中常见的杂波与干扰信号进行了特征分析。

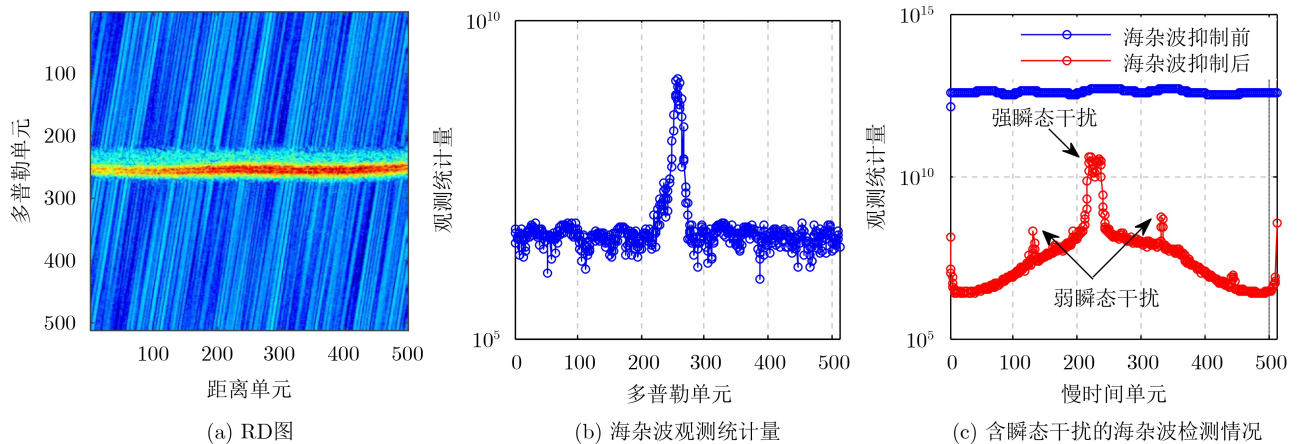


图5 含瞬态干扰的RD图、海杂波与瞬态干扰检测情况

由于杂波和干扰信号本身特性不同，它们在五域六图中展现出不同的特征。这些特征给雷达信号分析与处理提供了新的思路，能够帮助信号处理算法的创新。本文考虑海杂波多普勒单元检测问题，根据海杂波和干扰在频域-多普勒域图中的不同特征，设计了一个新的观测统计量，能够在不抑制干扰时有效检测海杂波所在多普勒单元。此外，本文对于干扰的特性分析和五域六图表现，可为干扰检测方法提供新的思路，帮助提升干扰抑制效果。

参考文献

- [1] 周文瑜, 焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
ZHOU Wenyu and JIAO Peinan. Over-the-Horizon Radar Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.
- [2] BAZIN V, MOLINIE J P, MUNOZ J, et al. Nostradamus: An OTH radar[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2006, 21(10): 3–11. doi: 10.1109/maes.2006.275299.
- [3] FABRIZIO G A. High Frequency Over-the-Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing, and Practical Applications[M]. New York: McGraw-Hill Professional, 2013.
- [4] BARRICK D E, HEADRICK J M, BOGLE R W, et al. Sea backscatter at HF: Interpretation and utilization of the echo[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1974, 62(6): 673–680. doi: 10.1109/PROC.1974.9507.
- [5] LIPA B J and BARRICK D E. Extraction of sea state from HF radar sea echo: Mathematical theory and modeling[J]. *Radio Science*, 1986, 21(1): 81–100. doi: 10.1029/RS021i001p00081.
- [6] 邢孟道, 保铮, 强勇. 天波超视距雷达瞬态干扰抑制[J]. *电子学报*, 2002, 30(6): 823–826. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2002.06.014.
XING Mengdao, BAO Zheng, and QIANG Yong. Transient interference excision in OTHR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, 30(6): 823–826. doi: 10.3321/j.issn:0372-2112.2002.06.014.
- [7] 唐晓东, 周文瑜. 短波雷达干扰与抗干扰技术[J]. *现代雷达*, 2003, 25(2): 21–25. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2003.02.006.
TANG Xiaodong and ZHOU Wenyu. Interference and anti-interference techniques of HF radar[J]. *Modern Radar*, 2003, 25(2): 21–25. doi: 10.3969/j.issn.1004-7859.2003.02.006.
- [8] 罗忠涛. 新体制天波超视距雷达信号处理研究[D]. [博士学位论文], 电子科技大学, 2015.
LUO Zhongtao. Study on signal processing for future sky-wave over-the-horizon radar system[D]. [Ph. D. dissertation], University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [9] 赵志国, 陈建文, 鲍拯. 一种改进的OTH自适应海杂波抑制方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2012, 34(5): 909–914. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.05.10.
ZHAO Zhiguo, CHEN Jianwen, and BAO Zheng. Modified adaptive ocean clutter suppression approach in OTHR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2012, 34(5): 909–914. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2012.05.10.
- [10] 关泽文, 陈建文, 鲍拯. 一种改进的基于峰值信噪比-高阶奇异值分解的天波超视距雷达自适应海杂波抑制算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(7): 1743–1750. doi: 10.11999/JEIT180707.
GUAN Zewen, CHEN Jianwen, and BAO Zheng. A modified adaptive sea clutter suppression algorithm based on PSNR-HOSVD for skywave OTHR[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(7): 1743–1750. doi: 10.11999/JEIT180707.
- [11] TURLEY M. Impulsive noise rejection in HF radar using a linear prediction technique[C]. *The International Conference on Radar*, Adelaide, Australia, 2003: 358–362.
- [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. doi: 10.3321/j.issn:

- 0372-2112.1999.12.007.
- QUAN Taifan, LI Jianwei, YU Changjun, *et al.* An approach and experiment of suppressing burst interference in high-frequency radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 1999, 27(12): 23–25. doi: [10.3321/j.issn:0372-2112.1999.12.007](https://doi.org/10.3321/j.issn:0372-2112.1999.12.007).
- [13] QUAN Yinghui, XING Mengdao, ZHANG Lei, *et al.* Transient interference excision and spectrum reconstruction for OTHR[J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(1): 42–44. doi: [10.1049/el.2011.2799](https://doi.org/10.1049/el.2011.2799).
- [14] LUO Zhongtao, HE Zishu, LU Kun, *et al.* Optimal receive filter design under similarity constraint in coloured noise[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(7): 888–899. doi: [10.1049/iet-rsn.2014.0421](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2014.0421).
- [15] 胡进峰, 李万阁, 艾慧, 等. 基于频域干扰剔除的OTHR射频干扰抑制算法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(5): 1046–1051. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.05.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.05.12).
- HU Jinfeng, LI Wange, AI Hui, *et al.* Radio frequency interference suppression algorithm based on interference elimination of frequency domain in OTHR[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2016, 38(5): 1046–1051. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2016.05.12](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2016.05.12).
- [16] GUO Xin, SUN Hongbo, and YEO T S. Interference cancellation for high-frequency surface wave radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(7): 1879–1891. doi: [10.1109/TGRS.2008.916482](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.916482).
- [17] LIU Ziwei, SU Hongtao, and HU Qinzhen. Radio frequency interference cancelation for skywave over-the-horizon radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(3): 304–308. doi: [10.1109/LGRS.2015.2503358](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2503358).
- [18] ZHOU Hao and WEN Biyang. Radio frequency interference suppression in small-aperture high-frequency radars[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(4): 788–792. doi: [10.1109/LGRS.2011.2181817](https://doi.org/10.1109/LGRS.2011.2181817).
- [19] WANG Wei and WYATT L R. Radio frequency interference cancellation for sea-state remote sensing by high-frequency radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, 5(4): 405–415. doi: [10.1049/iet-rsn.2010.0041](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2010.0041).
- [20] LUO Zhongtao, SONG Tiecheng, HE Zishu, *et al.* Approach for transient interference detection based on straight line extraction for high-frequency sky-wave radar[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(9): 618–620. doi: [10.1049/el.2016.4125](https://doi.org/10.1049/el.2016.4125).
- [21] 罗忠涛, 吴太锋, 何子述, 等. 基于图像分割的高频雷达射频干扰提取算法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(4): 776–781. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.04.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.04.10).
- LUO Zhongtao, WU Taifeng, HE Zishu, *et al.* Extraction of radio frequency interference based on image segmentation for high-frequency radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2018, 40(4): 776–781. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2018.04.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2018.04.10).
- [22] 于文启, 陈建文, 李雪. 天波超视距雷达电离层相位污染时频校正方法综合性能评估[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(4): 992–1001. doi: [10.11999/JEIT170701](https://doi.org/10.11999/JEIT170701).
- YU Wenqi, CHEN Jianwen, and LI Xue. Comprehensive performance evaluation of ionosphere phase contamination time-frequency correction approaches in over-the-horizon radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 992–1001. doi: [10.11999/JEIT170701](https://doi.org/10.11999/JEIT170701).
- 罗忠涛: 男, 1984年生, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为通信信号处理、雷达信号处理与数字图像处理.
- 严美慧: 女, 1996年生, 硕士生, 研究方向为雷达信号处理和数字图像处理.
- 卢 琨: 男, 1977年生, 博士, 研究员级高级工程师, 研究方向为超视距雷达系统设计和信息处理.
- 何子述: 男, 1962年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达信号处理、阵列信号处理与MIMO信号处理.

责任编辑: 余 蓉