

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860,CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: GNSS 外辐射源动目标遥感检测技术现状与发展趋势
作者: 龚健雅, 张策, 石书祝
DOI: 10.13203/j.whugis20240050
收稿日期: 2024-02-07
网络首发日期: 2024-04-10
引用格式: 龚健雅, 张策, 石书祝. GNSS 外辐射源动目标遥感检测技术现状与发展趋势 [J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240050>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20240050

引用格式：龚健雅, 张策, 石书祝. GNSS 外辐射源动目标遥感检测技术现状与发展趋势[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240050 (GONG Jianya, ZHANG Ce, SHI Shuzhu. Review of Moving Target Detection Techniques Using GNSS Passive Remote Sensing System[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, DOI:10.13203/J.whugis20240050)

GNSS 外辐射源动目标遥感检测技术现状与发展趋势

龚健雅¹ 张策¹ 石书祝¹

¹ 武汉大学遥感信息工程学院, 武汉 湖北, 430079

摘要: 全球卫星导航系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 除了用于导航定位服务之外, 因其信号覆盖率高及卫星可见性强等优势, 亦可作为被动雷达的机会辐射源完成地表环境和运动目标的遥感探测。但另一方面, 其较低的到达地面功率和较窄的信号带宽也给该类系统的应用带来诸多挑战。回顾了 GNSS 被动雷达遥感系统近 30 年的发展历程, 聚焦运动目标遥感检测技术。通过分析后向散射和前向散射两种 GNSS 外辐射源探测体制下的动目标检测流程, 梳理了相关技术的重点和难点, 介绍了国内外在相关问题上取得的研究进展和潜在发展趋势, 以期对相关研究提供参考。

关键词: 全球卫星导航系统; 被动雷达遥感系统; 动目标检测; 动目标参数估计
中图分类号: P237 文献标识码: A

Review of Moving Target Detection Techniques Using GNSS Passive Remote Sensing System

GONG Jianya¹ ZHANG Ce¹ SHI Shuzhu¹

¹ School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: The Global Navigation Satellite System (GNSS), besides being utilized for navigation and positioning services, also being regarded as signal source of opportunity for remote sensing of earth surface environments and spatial targets through its advantages of high signal coverage and satellites visibility. Nevertheless, its inherent characteristics, including low power levels and limited bandwidth, pose considerable challenges to relative applications. The development of GNSS-based passive remote sensing system during the past three decades is reviewed, with a focus on the target detection technology. By analyzing the target detection processes of GNSS-based remote sensing system under both backward and forward scattering configurations, the key points and difficulties of relevant technologies are delineated. Progress and potential opportunities achieved domestically and internationally for addressing relative problems are also discussed.

Key words: GNSS; passive remote sensing systems; moving target detection; motion parameters estimation

早在全球定位系统 (global positioning system, GPS) 正式投入民用的 20 世纪 80 年代, 使用全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 作为多基地遥感系统的信号源的想法就已经被提出并很快得到了理论验证^[1]。时至今日, GNSS 信号已在诸多遥感领域得到了广泛的应用^[2]; 在对地观测技术方面, GNSS 信号主要在 GNSS 反射计 (GNSS reflectometry, GNSS-R)^[3-9]以及 GNSS 无线电掩星 (GNSS radio occultation, GNSS-RO) 两

收稿日期: 2024-02-07

基金项目: 国家自然科学基金 (42090011)。

第一作者: 龚健雅, 博士, 教授, 中国科学院院士, 长期从事地理信息理论和摄影测量与遥感基础研究。
gongjy@whu.edu.cn

通信作者: 石书祝, 博士, 副教授。shishuzhu@whu.edu.cn

个方向发挥作用^[10-13]；另外因 GNSS 信号具备和传统雷达的脉冲信号类似的测距能力，利用 GNSS 反射信号实现目标检测的可行性也在 1995 年被验证并随即得到推广^[14]，而今已成为多基地被动雷达系统的常用外辐射源之一。具体来说，因为 GNSS 信号的形式完全公开且包含精确的时间信息，其卫星的位置信息亦可依据公开播发的星历和历书进行实时解算，所以它天然地解决了多基地雷达的时间、相位以及空间，这三大同步难题中的前两项^[15-17]。而针对空间同步的挑战，得益于 GNSS 卫星辐射面广阔的特性，在系统使用宽波束接收天线的条件下空间同步的满足条件亦并不严苛。借助上述诸多优势，尽管 GNSS 信号并非为了雷达应用而播发，但它实则可以成为非常可靠的多基地遥感系统的天基外辐射源。

目前，使用 GNSS 信号作为机会辐射源的被动雷达遥感系统正逐渐显现出巨大的潜力，且该类系统对距离接收机较近（数公里级别）的动目标进行探测及参数估计的可行性已经得到充分验证。而近年来随着新体制的 GNSS 星座，如我国的北斗导航卫星系统（BeiDou navigation satellite system, BDS）以及欧洲联盟的伽利略定位系统（Galileo）的组网状态日趋完备，GNSS 被动雷达遥感系统的实用价值也在随之提升。但另一方面，囿于 GNSS 信号辐射功率较低的特征，低信噪比问题长久以来一直制约着该类系统的发展和运用，相关领域中亦仍有许多亟待突破的技术难关。

本文首先概括总结在后向散射和前向散射两种探测体制下的 GNSS 被动雷达遥感系统检测动目标的基本原理；然后按照上述两种体制的分类法，进一步梳理动目标检测的难点所在，介绍目前学界主流的动目标检测手段和技术发展现状并比较各类现有算法的优势与特点；最后结合目前相关技术的发展趋势，对 GNSS 被动雷达遥感系统的未来研究方向进行了展望。

1 GNSS 外辐射源动目标遥感检测的基本原理

GNSS 信号往往由数据码，测距码以及高频载波三部分组成，其信号形式可以概括表示为：

$$S(t) = AD(t)C(t)\cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (1)$$

其中， A 为信号的幅值； D 和 C 分别为信号的数据码和测距码； f_0 代表载波频率； φ_0 则代表信号的初始相位。

GNSS 信号通常被调制为右旋圆极化形式播发，而来自目标的回波信号则往往呈现出椭圆极化的特征，其具体极化参数受到目标结构和材质等因素影响^[18]。在后向散射探测体制的雷达遥感系统中，普遍可以认为反射信号以左旋成分为主导，因而该类系统普遍使用双通道接收机同时对信号进行采集来抑制非对应极化方式的信号成分，即通过左旋圆极化天线和右旋圆极化天线来分别接收直射信号和回波信号。另一方面，在前向散射探测体制下的雷达遥感系统中，因为目标在前向散射区内时，系统的双基地角已经接近 180° ，可以近似认为散射信号和直射信号具有相同的极化特征和入射角度，所以系统通常只需要一副右旋圆极化天线来接收信号。

借助式(1)的信号表达形式，系统中的直射信号成分可以表示为：

$$S_d(t) = A_d D(t - \tau_d) C(t - \tau_d) \cos[2\pi f_0 (t - \tau_d) + \varphi_d] \quad (2)$$

其中， A_d 表示直射信号的幅值； τ_d 表示直射信号的时延； φ_d 表示直射信号的初始相位。与之类似，用 A_r 、 τ_r 和 φ_r 分别表示反射信号的幅值，时延以及初始相位，反射信号可以写为：

$$S_r(t) = A_r D(t - \tau_r) C(t - \tau_r) \cos[2\pi f_0 (t - \tau_r) + \varphi_r] \quad (3)$$

用 τ_{delta} 和 R_{delta} 来分别表示直射信号和反射信号之间的时延差和传播路径长度差, 进而有如下表达:

$$\tau_{\text{delta}} = \tau_r - \tau_d = \frac{R_{\text{delta}}}{c} = \frac{R_{st} + R_{tr} - R_{sr}}{c} \quad (4)$$

式中, R_{st} 表示卫星与目标的距离; R_{tr} 代表目标与接收机的距离; R_{sr} 则代表卫星到接收机的距离。

1.1 后向散射探测体制下的动目标遥感检测方法

后向散射探测体制下的典型应用是监测运动模式较简单且雷达截面积 (radar cross section, RCS) 较大的水面运动目标。相应的双站雷达遥感系统的几何结构图如图 1 所示, 其中本地坐标系的原点设置为接收机位置, 并用 α 表示双基地角。

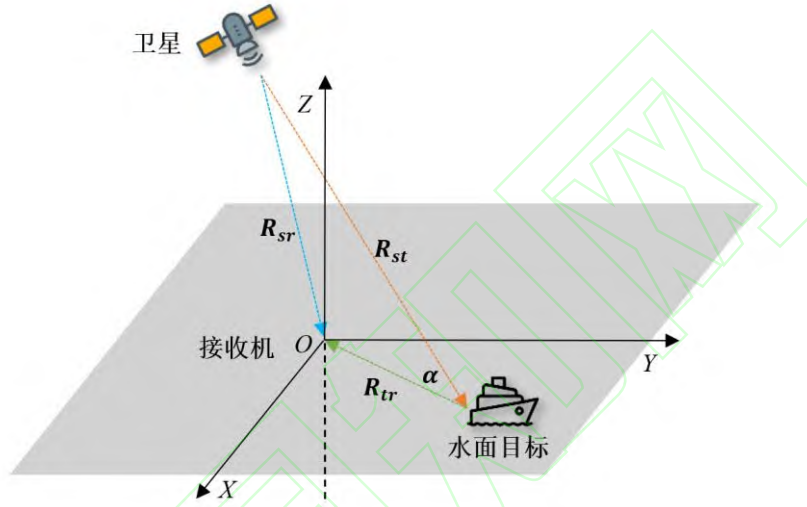


图 1 后向散射探测体制下的 GNSS 被动雷达遥感系统检测水面动目标的几何结构图

Fig. 1 The Geometric Configuration of GNSS-based Backward Scattering Remote Sensing System for Maritime Target Detection

进一步引入系数 k 来描述 R_{delta} 和 R_{tr} 之间的关系:

$$R_{\text{delta}} = R_{st} + R_{tr} - R_{sr} = kR_{tr} \quad (5)$$

系数 k 的数值随着目标和卫星的相对运动而变化。但后向散射探测体制往往适用于运动较慢的目标, 所以在较短的信号处理时间, 如说常被采用的数秒钟的相干处理间隔 (coherent processing interval, CPI) 之内, 可以近似认为系数 k 是一个常数。进一步地, 使用直射信号作为参考信号, 对反射信号进行距离压缩之后的结果的复数形式可以表示为:

$$S_{rc}(t) = A_{rc} \rho \left(t - \frac{kR_{tr}}{c} \right) \exp \left(-j2\pi f_0 \frac{kR_{tr}}{c} \right) \quad (6)$$

其中, A_{rc} 是距离压缩后的信号幅值; ρ 是距离维度的信号包络, 常数相位项则忽略不计。

当回波信噪比足够高时, 形如式 (6) 的距离压缩结果足以让系统完成目标的探测及径向距离的估计。但为了进一步提高信噪比以及准确估计目标的运动参数, 在典型的信号处理流程中脉冲化的回波会被排列成二维矩阵并在方位向进行时频转换。为了推导出更简洁的信号形式, 这里不妨假设目标相对接收机做理想的匀速直线运动, 则目标和接收机的径向距离可以表示为 $R_0 + vt$ (R_0 和 v 分别为采样起始时刻目标的径向距离和径向速度)。那么二维信号矩阵在经过方位向的离散傅里叶变换 (discrete Fourier transform, DFT) 处理之后会被转换到距离向时域方位向频域, 也就是距离多普勒 (range-Doppler, RD) 域。此时的信号形式可以被表示为:

$$S_{RD}(\tau, f_a) = A_{rc} \rho \left(\tau - \frac{kR_0}{c} \right) \text{sinc} \left[T(f_a - f_{d0}) \right] \exp(j\varphi_{RD}) + N \quad (7)$$

其中, f_a 表示方位向频率变量; f_{d0} 是和径向速度对应的多普勒频移; N 则为噪声成分; φ_{RD} 表示当前信号的初始相位, 或者也可以解释为 RD 域信号中幅值峰值点的复数相位。

式 (7) 即为典型的后向散射探测体制下的动目标检测流程的处理结果, 来自目标的回波能量已经被聚焦到和初始径向距离以及速度相关的 RD 单元内。因为 GNSS 被动雷达遥感系统的参考信号通常可被精准重构且其信息完全已知, 所以系统普遍采用互相关检测器 (cross correlation detector, CCD) 对动目标进行遥感检测。此外, 因为 RD 域内噪声能量的分布难以预估, 所以系统也常会采用恒虚警检测 (constant false alarm rate, CFAR) 等自适应阈值设定方法来为检测器配置参数。当 RD 域中的信号峰值参数超过系统预设的阈值, 便可认为目标被检测到, 而峰值所在的位置, 可以反演出目标到接收机的径向距离以及径向速度等参数。

1.2 前向散射探测体制下的动目标遥感检测方法

对于前向散射探测体制下的动目标检测问题, 因为目标穿越双基基线的时间窗口非常短暂, 且回波受到目标剧烈震荡的 RCS 调制, 所以系统往往无法将信号排列成二维形式进而使用传统的 RD 处理进行目标检测。但得益于在前向散射区内回波信号的幅值会产生显著变化的特点, 目标往往在时域即可被有效检测^[19]。典型的前向散射探测体制下的双站雷达遥感系统的几何结构图如图 2 所示。

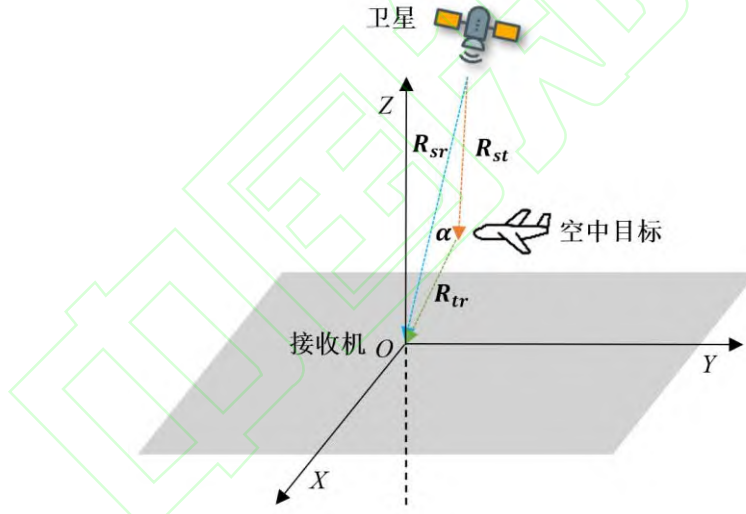


图 2 前向散射探测体制下的 GNSS 被动雷达遥感系统探测空中动目标的几何结构图

Fig. 2 The Geometric Configuration of GNSS-based Forward Scattering Remote Sensing System for Air Target Detection

在前向散射体制下, 因为直达波和目标回波具备相似的极化方向和入射角度, 所以接收机往往配置一副右旋圆极化天线进行单通道采集。接收信号中包含直射信号、散射信号以及噪声等成分。相应的实信号形式可以被表示为:

$$S_{FSR}(t) = A_d D(t - \tau_d) C(t - \tau_d) \cos[2\pi f_0(t - \tau_d) + \varphi_d] + A_r D(t - \tau_r) C(t - \tau_r) \cos[2\pi f_0(t - \tau_r) + \varphi_r] + N \quad (8)$$

为了明确更简洁的基带信号形式, 引入两个假设条件: 第一, 目标在穿越基线时, 直射和散射信号的时延近似相等; 第二, 直射信号的幅值远大于散射信号。那么当高频载波、数据码及测距码均被剥离之后, 基带信号的一维形式可以简化为^[20]:

$$S_{FSR}(t) \approx A_{FSR}(t) \cos[2\pi f_0 \tau_{delta}(t) + \varphi_{FSR}] + S_{DC} + N \quad (9)$$

其中， φ_{FSR} 为信号的初始相位； S_{DC} 为直流成分 A_{FSR} 为信号幅值。

接收机一侧的电磁场由与直射信号相关的直射场以及与目标相关的衍射场的总场决定。当目标相对于接收机位于电磁场远场位置时，其回波信号的衍射效应以夫琅禾费衍射为主，而近场位置则主要为菲涅尔衍射。因为前向散射区可能同时涵盖一部分远场和一部分近场区域，所以当目标进入前向散射区内，衍射效应往往在近场和远场两种类型之间发生变化。另外，在实际工程中直射场与散射场的幅值之比与目标和接收机的距离有关：距离越大，比例则越小。概括地讲，在前向散射区内直射场与衍射场之间的关系与该时刻具体的双基构型、信号形式、目标尺寸以及目标距离均密切相关，难以一概而论并给出具体的量化表达。而关于电磁场近场和远场的界限划分，北京理工大学的刘长江在 2017 年给出了使用目标尺寸、目标视线角、信号波长以及双基基线长度为变量的理论推导。该研究认为当目标横向投影尺寸与电磁场菲涅尔半径之比的平方大于 6 时可以认为目标进入近场，而该比例小于 2 时则为较理想的远场^[21]。

基于上述理论，对于特定的前向散射雷达（forward scattering radar, FSR）系统可以定性分析当目标穿越前向散射区时接收信号的幅值变化规律：若目标位于远场位置，依据适用于夫琅禾费衍射的巴比涅原理可以证得此时目标的 RCS 只与其形状有关，衍射信号能量被大幅增强。而与此同时，遮蔽效应因为信号以球面波形式传播而相对较弱，直射信号的能量被较大程度上保留，总场信号的幅值会呈现上升趋势；若目标位于近场位置，则遮蔽效应占据主导，巴比涅原理也不再适用于菲涅尔衍射，衍射场的强度会小于远场。若目标足够接近接收机且其阴影面积较大，其甚至会将会将系统的第一菲涅尔区完全遮蔽（该区域包含了直射信号近百分之九十的能量）进而使得直射场强度被大幅削弱，总场信号的幅值呈现下降趋势。

基于前向和后向散射探测体制的被动雷达遥感技术，本质上均依赖于对散射信号的延时、多普勒频移及相位等参数的估计和分析。但在实际应用中两者的信号处理方式和适用的探测目标类型上则大有不同，这导致二者在检测流程中的一些近似条件并不通用。例如，因为前向散射探测体制往往用以检测高速的空中目标，那么系数 k 不再可以视为常数，进而导致 τ_{delta} 一项成为时变项，令接收信号的多普勒频移发生变化。事实证明在目标穿越基线的一段时间内，散射信号会呈现出明显的线性调频（linear frequency modulation, LFM）特征。在实际工程应用中，前向散射探测体制下的 GNSS 被动雷达遥感系统通常便利用上述的信号幅值变化规律及对应的时频关系来定性判断目标是否出现。

2 GNSS 外辐射源动目标遥感检测的关键技术及研究现状

对于一般意义上的被动雷达遥感系统应用场景，在发射源不可控的同时，也存在着多径效应和杂波干扰等现象。故而该类系统的直射信号提纯是一个关键难点，通常需要使用杂波抑制和信号恢复算法进行预处理以期获得纯净的直射信号成分^[22]。但对于 GNSS 被动雷达遥感系统来说该过程则较为简便，因为根据完全公开的信号体制和调制方法，相应的数字接收机可以高效完成直射信号参数提取并据此重构纯净的参考信号。具体来说，当作为机会辐射源的卫星可见时，系统可通过 GNSS 接收机的跟踪环路中载波环和码环输出的多普勒频移及码相位信息精准重构直射信号成分。此外，信号中的杂波和多径干扰等成分会初步通过天线的极化方向得到抑制，并进一步地借助跟踪环路的相关和积分运算被再次滤除。所以对于 GNSS 被动雷达遥感系统的目标检测问题，回波信号的提纯和能量聚焦往往是主要难点所在。以下部分中，本文按照后向散射和前向散射的体制分类法，依次梳理相应的关键技术和研究现状。

2.1 后向散射探测体制下的动目标遥感检测关键技术及研究现状

2.1.1 帧内回波能量聚焦技术

在后向散射探测体制下，一段时长为 CPI 的二维信号被称为一帧，而能量的聚焦则分为帧内和帧间两种类型。帧内的能量聚焦通过距离向的匹配滤波或脉冲压缩，以及方位向的 DFT 实现，这也是经典的雷达系统动目标检测（moving target detection, MTD）方法。对于回波能量不足的弱目标探测问题，目前主流的做法是在保证帧内信号相干性的前提下，延长 CPI 进而获得更充分的能量积累。然而对于特定的点目标，当其在帧内发生跨越距离单元和频率单元的走动，帧内的信号相干性会被破坏，来自目标的回波能量无法聚焦在一个 RD 单元内，进而导致能量的散焦^[23-24]。帧内能量聚焦的关键技术可以分为距离徙动（range cell migration, RCM）校正和多普勒徙动（Doppler shift cell migration, DCM）校正两类。一帧典型的经过 RCM 和 DCM 校正的水面动目标实测检测结果如图 3 所示。其中目标在 RD 域中的位置以红框标识，且其多普勒频移已被换算成径向速度。

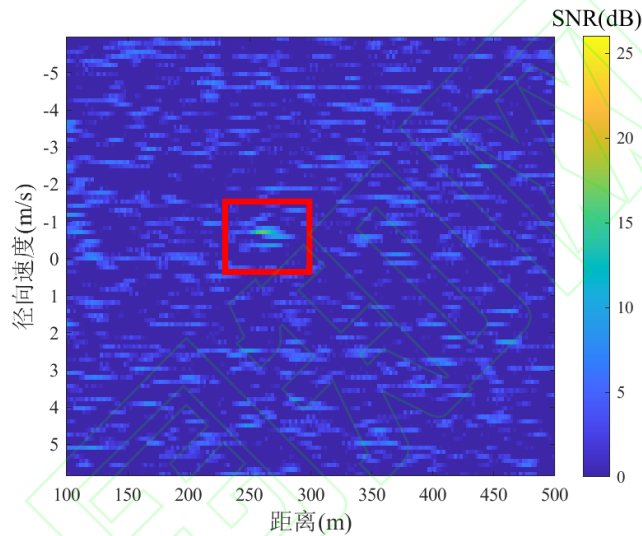


图 3 后向散射探测体制下的 GNSS 被动雷达遥感系统检测水面动目标结果

Fig. 3 The Result of Maritime Target Detection with GNSS-based Passive Backward Scattering Remote Sensing System

最符合直觉的 RCM 校正方法是直接将有关的相位项按照径向速度的数值用共轭项进行补偿，但目标的速度信息通常是未知的。1999 年 Perry 等针对动目标的合成孔径雷达（synthetic aperture radar, SAR）成像技术提出了 Keystone 变换（Keystone Transform, KT）来校正图像中的 RCM。这是一种无需速度先验信息的校正算法，它可以将来自没有多普勒模糊的一阶径向速度引起的 RCM 完全校正^[25]。KT 时至今日在 GNSS 被动雷达遥感领域仍是非常主流的算法，但 KT 也有它的局限性，主要便是上述的多普勒模糊问题。若雷达的脉冲重复频率（pulse repetition frequency, PRF）较低，方位向上的等效采样率也较低，那么对于径向速度的求解便可能存在多普勒模糊的问题^[26-28]。针对 KT 存在诸多衍生变体，譬如 2006 年北京理工大学的 Li 等提出的 MKT（Modified Keystone Transform），解决了多普勒模糊的问题，但不可避免地增加了算法复杂度^[27]。电子科技大学的 Huang 等在 2019 年提出的 SKT（Symmetrical Keystone Transform），借助两次二阶 KT 则可以同时校正一阶和二阶的距离走动，但与此同时会丢失奇数阶的 DCM 参数，使得后续的参数估计工作变得更加复杂^[29]。在另一个思路，系统也可以对预设范围内所有可能的速度进行搜索进而实现 RCM 校正。因为一阶 RCM 会导致脉压峰值在二维的雷达信号图中呈现线性走动，那么可以借助 Radon 变换来搜索该斜率进而对其进行校正，这也是目前比较主流的 RFT（radon Fourier transform）的原理^[30-31]。相较于 KT，RFT 的优越性在于可以同时得到多普勒频移以及目标的径向速度信息^[32]，而该算法亦拥有一些针对特定阶数运动的派生变体，例如北京航空航天大学的 Zhou

等提出的可以额外校正一阶 DCM 的 MRFT (modified radon Fourier transform) [33]。RFT 更具普适性的变体是 2012 年北京理工大学的 Xu 等提出的经过改进的 GRFT (Generalized RFT) 算法, 该研究将算法的一维走动修正限制提升至任意维, 理论上在信噪比足够的条件下可以校正用 N 阶多项式表示的 RCM 和 DCM [34]。但同样的, GRFT 作为一种高维搜索算法, 算力开销也比 KT 更大。表 1 整理了上述几种主流的 RCM 校正方法的特点。

表 1 主流 RCM 补偿方法比较

Tab.1 Comparisons Amongst Mainstream RCM Correction Algorithms

算法	补偿阶数	基本原理	特点
KT	1	重映射距离向时间轴	无需速度先验信息, 无需搜索。存在多普勒模糊问题。
MKT	1	补偿掉与多普勒模糊数相关的相位项, 并重映射距离向时间轴	无多普勒模糊问题。复杂度较高, 需要反复执行 KT。
SKT	2	使用正负重映射参数分别对信号进行二阶 KT 并相乘, 用以移除相关相位项	可同时校正一阶和二阶 RCM, 但导致奇数阶 DCM 参数丢失。
RFT	1	使用 Radon 变换求解目标轨迹的斜率, 并对速度和距离进行联合搜索	可在校正 RCM 的同时获得目标的速度信息。但需要帧内目标速度保持不变。
MRFT	1	在 RFT 基础上增加调频率搜索	可以在校正 RCM 的同时对一阶 DCM 进行校正。但要求帧内不存在二阶 RCM。
GRFT	N	将目标运动表示为 N 阶多项式并对相关参数进行遍历搜索	理论上可以在任意时间长度上通过高维搜索实现任意动目标的运动补偿, 但实际应用中仍旧需要指定具体阶数

DCM 的数值和目标及卫星的加速度有关。卫星的运动参数是已知的, 但目标的运动参数则是有待估计的, 所以 DCM 校正本质上需要对慢时间频域信号能量分布进行检测。考察频谱能量分布最简单的办法是利用 DFT 直接进行时频转换 [35], 然而当目标具备高机动性且需要的能量积累时间较长时, 频率随着时间的变化会更加复杂, 该方法带来的能量聚焦便不足以实现目标的检测和参数估计。这种情况下需要使用时频分析方法来找到频谱能量的分布规律, 再进一步根据频率随着时间的变化来进行频率补偿, 最终实现帧内回波的聚焦。时频分析方法可以大致分为线性和双线性两种类型, 前者对于具备多个时频调制成分的交叉项抑制效果更好, 但在时频域的能量聚焦效果相对有限; 后者则具备更好的能量聚焦效果, 不过相对地会在时频域中引入更多不同信号成分的交叉项。

2000 年 Ozaktas 等提出的离散分数傅里叶变换 (discrete fractional Fourier transform, DFrFT) 是一种简单有效的线性时频分析方法, 它针对具备径向加速度的目标回波进行时频分析, 在实现能量聚焦的同时也可以借助目标的峰值位置信息反演出径向加速度的数值 [36]。DFrFT 目前是比较流行的时频分析方法, 但它只能解算一阶的多普勒走动 [37-38]。电子科技大学的李中余等在 2017 年基于 DFrFT 提出了在多普勒质心-多普勒调频率 (Doppler centroid-Doppler frequency rate, DC-DFR) 域对动目标进行检测的思想, 该算法将 RCM 校正之后包含目标回波能量的方位向数据的 DFrFT 结果中的频率和旋转角度数据分别映射为多普勒质心和多普勒调频率, 更为直观地展示了经过能量聚焦后的弱目标检测结果 [39]。2011 年南洋理工大学的 Lv 等将 KT 的尺度映射思想引入到 WVD (Wigner-Ville distribution) 分析上, 提出了 LVD (Lv's distribution) 时频分析方法 [40]。该方法通过重新映射信号的对称参数瞬时自相关函数实现了信号的时间变量和自相关的时延变量的解耦, 让线性调频信号在中心频率-调频率 (centroid frequency and chirp rate, CFCR) 域成为一个独立的点, 以实现信号调频率的估计和解调。该方法结合了线性和双线性时频分析方法的优点, 是目前较为先进的时频分析手段, 但该方法在 GNSS 被动雷达遥感系统中的应用目前较少。2016 年电子科技大学的

Li 等提出了基于相邻相关函数 (adjacent cross correlation function, ACCF) 的非搜索 RCM 校正方法, 便利用了 LVD 分析可以校正加速度引起的距离走动的特点, 并使用仿真实验进行了验证^[41]。该方法首先利用相邻相关去除 RCM 并降低 DCM 的阶数到一阶, 再利用上述的 LVD 分析解调其调频率进而实现目标回波能量的聚焦。该方法全程未使用搜索的思想, 但本质上利用了相邻信号的高自相关特性, 其可行性在实测数据上, 尤其是 GNSS 被动雷达遥感数据上的适用性还有待研究。其他主流的时频分析方法, 如短时傅里叶变换 (short-time Fourier transform, STFT) 和小波变换 (wavelet transform, WT) 等, 均具备在某些特定条件下解算目标径向速度随时间变化的能力, 亦并不局限于对一阶 DCM 分析, 但上述两种时频分析的方法的通用性均不高, 对信号本身的信噪比有较强的依赖性^[42-46]。另外需要注意的是, 上述的时频分析方法本身并不等同于 DCM 补偿, 而是求解 DCM 数值的过程, 后续的补偿可以根据算法给出的数值在复数域直接令信号与共轭项相乘来实现。表 2 整理了上述几种主流的多普勒频移时频分析方法的特点。

表 2 主流多普勒频移时频分析方法比较

Tab.2 Comparisons Amongst Mainstream Time-Frequency Analysis Methods for Doppler Shift

算法	补偿阶数	基本原理	特点
DFrFT	1	在时频平面按照任意角度进行分数阶傅里叶变换	属于线性时频分析方法, 不存在交叉项。但本质上是对调频率的遍历搜索, 复杂度较高。
DC-DFR 分析	1	对 DFrFT 数值进行重新映射, 得到多普勒中心和调频率数据	本质上依旧是 DFrFT, 但可更直观地考察信号特征和所需估计的参数。
LVD 分析	1	针对信号的对称参数瞬时自相关函数引入类似 KT 的时间轴重映射思想, 解耦时间和时延变量	结合了线性 and 双线性时频分析的优点, 理论上具备当前最佳的针对 LFM 信号的分析性能。
STFT	N	将时域信号加窗分段, 并逐一进行傅里叶变换	线性分析方法, 并不局限于特定阶数的时频关系分析, 但结果的可用性高度依赖于每段信号的信噪比。
WT	N	使用一组小波基对信号的频率成分进行逼近和分解	线性时频分析方法, 可以很好地分析具有频率突变特征的信号的时频分布。算法的复杂度相对较高。

综合来讲, 除了 KT 以及 LVD 分析, 目前较为主流的 RCM 和 DCM 补偿方法均基于搜索的思想, 而搜索结果判断则依赖于接收信号的信噪比。倘若原始回波信噪比较低以致在 RD 域内难以检测到目标峰值, 这些分析方法便很难奏效。从另一方面考察, 搜索的过程需要对目标运动进行多项式估计, 以便对特定参数进行有针对性的解算。当目标的机动性较高时, 低阶多项式对目标的运动表达将不再充分, 而高阶多项式对应的搜索过程则具有呈指数级上升的时间开销, 这并不符合雷达系统的性能要求。进一步地, 若系统能接受的多项式阶数有上限, 则其 CPI 的选择亦是受限的。最大 CPI 的数值和多项式阶数息息相关, 理想情况下任何运动过程都可以用多项式来拟合, 但其阶数可能远超系统限制, 所以帧内回波能量聚焦的效果对于高机动性、小 RCS 的目标往往并不理想。

2.1.2 帧间回波能量聚焦技术

目前针对 GNSS 被动雷达遥感系统帧间的回波能量积累技术, 或者多帧检测 (multi-frame detection, MFD) 技术的相关研究较少。其根本原因在于当单帧数据无法成功检测目标, 那么帧间的 RCM 和 DCM 会处于无法预估的状况。此外帧间的信号相位走动受到噪声、杂波以及目标闪烁等因素影响, 亦是完全随机的。

普遍意义上, 后向散射体制下的 MFD 思路主要分为两种, 首先是通过同一颗卫星的不同时刻的数据帧的积分对目标的回波能量进行聚焦。2017 年罗马大学的 Santi 等在使用

GNSS 信号检测水面目标的任务中提出了一种将 RD 域数据映射到本地坐标系的思想,并通过实测数据对其可行性进行了验证^[47]。该算法首先将回波信号分割为一系列 CPI 为一秒的帧,再为目标可能的速度矢量和初始位置进行预设,依据每一组可能的值产生的目标运动历程在 RD 图序列中提取对应的单元内的能量进行非相干叠加。该检测方法本质上是一个四维搜索过程,通过非相干积累实现了弱目标回波能量的帧间聚焦。2019 年该团队针对该类问题又引入了主动雷达的检测前跟踪(track before detection, TBD)思想对 GNSS 被动雷达遥感系统的帧间回波能量聚焦进行了尝试^[48],成功在 RD 域实现了对弱目标的检测。但该类方法的劣势在于算法复杂度较高,当子问题尺寸较大时并不适合实时处理^[42-51]。2022 年北京航空航天大学的 Zhou 等则利用高帧率图像序列(high frame rate image sequence, HFRIS)技术来检测 RD 图序列中能量的变化,进而对空中目标实现 MFD,提供了比传统检测方法更高的处理效率^[52]。

第二种 MFD 思想是将多基地雷达的回波信号进行融合并对目标进行联合检测,这其中又可以分为多星单接收机(multiple input single output, MISO)系统、单星多接收机(single input multiple output, SIMO)系统以及多星多接收机(multiple input multiple output, MIMO)系统三类,而其中 MISO 系统目前较为主流。对于分布式系统的联合检测问题,其关键难点在于如何将多个信源的数据有效配准。如 2019 年罗马大学的 Santi 等实现的多基地雷达对水面动目标的联合检测^[53],使用了该团队在 2017 年提出的多星信号配准方法^[54]。该方法利用单颗星回波解算出的双站构型参数如双基地角等作为标准,对不同卫星回波信号中目标坐标位置的差异进行修正。2018 年北京航空航天大学的 Zeng 等提出了使用 ICMB(iterated-corrector multi-Bernoulli)滤波器对多信号源得到的检测结果进行联合处理并更新其中低信噪比的结果进而提高 RD 图序列中目标可见性的算法,用以实现 MISO 构型雷达系统的目标检测^[55],并在 2020 年通过实验验证了该算法对空中目标的检测能力^[56]。该算法的本质是一种基于统计信号处理理论的多传感器融合过程,依赖于每一帧信号的检测结果提供的目标信息。同年电子科技大学的黄川等提出了通过在目标运动参数空间中映射多颗卫星检测结果对目标实现联合检测的技术,但其帧间的信号配准借助了单颗卫星检测的先验信息^[57]。2021 年伯明翰大学的 Ma 等提出的使用多组双站 GNSS 被动雷达遥感系统对目标的参数进行联合估计的技术亦基于类似的思路,依靠多组单帧的检测结果融合来提高参数估计的准确性^[58]。

在极低信噪比的前提下,若在每一帧回波中系统都无法单独解算目标信息,则目前还未有较好的方法可以实现多信源能量的聚焦。其原因便是目标位置和参数的不确定性导致无法配准的多路信号难以进行有效的积累能量,这无疑是目前该领域亟待解决的难题之一。这种帧间信息差的不可预估,也导致了在帧间的能量积累方式上,目前广泛采用的是可以不顾及相位差异影响的非相干积分^[59]。不过目前已经有部分研究开始探索帧间的相干积分方式。如 2011 年电子科技大学的 Wang 等人提出的帧间相干性补偿方法^[60],在理论上证明了具备相干性补偿的 MFD 技术可以带来更高的检测概率,该理论亦在 2023 年通过了实测数据的验证^[61]。又如电子科技大学的 Li 等在 2021 年提出的方法^[62],通过仿真实验验证了帧间相干积分的信噪比增强效果。不过上述两种方法均建立在对帧间相位走动的建模和估计之上,原则上来说只适用于较为理想的高信噪比且运动模式可用低阶多项式较好拟合的目标检测任务。在实际的动目标检测问题中,帧间的相位走动往往是没有任何规律可循的。

2.1.3 动目标定位及成像技术

当动目标的探测和参数估计完成,系统可进一步对目标进行定位、跟踪以及逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)成像等后续处理。其中水面动目标的定位和跟踪技术已经较为成熟,因高度信息相对稳定,所以可以较为方便地在一个二维平面上解算其

空间位置。在前面小节提到的 2017 年罗马大学的本地坐标系四维搜索算法事实上便可以实现目标在水面平面上的定位^[47]，但具备不同初始位置和速度矢量的目标完全可能拥有相同的 RD 历程^[57]，所以算法应该针对此问题进行进一步优化。若系统的信号源不局限于单颗卫星，则可利用 MISO 系统的多星检测结果来实现交叉定位，进而避免上述的定位模糊问题。如伯明翰大学的 Ma 等在 2018 年使用 Galileo 导航卫星系统作为机会辐射源搭建的 MISO 雷达遥感系统实现了对水面动目标的有效检测，利用的便是椭圆定位的思想^[63]。类似的技术还有 2021 年 Sadeghi 等提出的使用 GPS 回波信号对目标进行交叉定位的方案^[64]，以及在 2022 年 Nasso 等利用两颗卫星对目标进行联合定位的方法^[65]。上述定位方法也被称作两步定位法，需要先解算回波信号中和目标相关的参数，如传播时延、到达角以及到达频率等参数，并进一步在空间中寻找同时符合上述解算参数的位置来实现目标的定位。该类方法在空中目标的外辐射源三维定位问题中亦有相关应用，如 2023 年北京航空航天大学的谭传瑞等提出的针对 GNSS 外辐射源空中目标交叉定位方法中不同信号源的贡献进行加权的思想，其可以突破实际工程中卫星高度角越低则定位性能越差的局限性，并分别用仿真和实测数据验证了该方法对空中目标定位精度的提升^[66-67]。另一方面，若系统可以接受更高的计算复杂度，亦可直接从多个原始回波中根据目标相关参数的关系直接实现定位，避免两步定位法引入的中间参数计算。2023 年重庆移通学院的闫攀等提出了使用 BDS 卫星作为外辐射源的目标直接定位方法，该研究建立了脉冲压缩之后的信号关于目标位置和速度估计的似然函数，通过求得相关参数的最大似然估计的方法实现目标定位。此方法的定位性能可以逼近系统的克拉美罗下界（Cramer-Rao lower bound, CRLB）^[68]，但该研究中的目标位置和速度在仿真实验中均被设置为二维矢量，所以相关算法在实际工程中的目标定位效果还需要针对三维位置和运动参数的实测验证。

在动目标成像技术方面，2021 年罗马大学的 Pastina 等使用单站 GNSS 反射信号对水面动目标实现了 ISAR 成像，图像中可清晰观察目标在方位向的能量展宽^[69]。类似地，电子科技大学的 Huang 等在 2022 年成功使用多基地 BDS 被动雷达遥感系统对水面动目标进行了 ISAR 成像^[70]。在积累时间内，目标由于发生转动而导致不同散射点具备不同的多普勒历程，而该算法便依照上述区别对目标的回波能量在方位向进行投影，并进一步通过非相干积分融合多颗星之间的成像结果。此外，倘若目标沿着垂直于接收机的视线方向做直线运动，那么也可以利用传统的 SAR 成像技术对回波能量进行映射。例如香港理工大学的 He 等分别在 2020 年^[71]，以及 2023 年提出的水面动目标成像技术^[72]，均利用了目标转动时其多个散射点呈现出的不同多普勒历程反演出目标上不同散射点的位置信息。然而事实上受限于 GNSS 信号较低的距离分辨率，目标在距离向的能量分布仍然难以被清晰观察，所以真正意义上目标的二维成像技术还处于早期探索阶段。

2.2 前向散射探测体制下的动目标遥感检测关键技术及研究现状

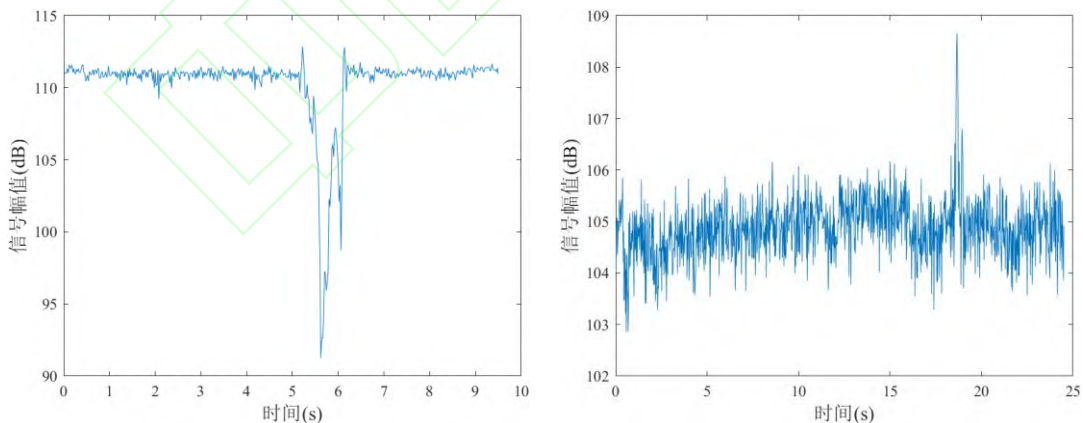
2.2.1 前向散射回波信号提纯技术

使用 GNSS 信号的 FSR 系统通常只设置一个接收通道，并无参考通道和回波通道的区分。是以在接收通道内混杂着直达波、目标回波以及噪声等成分。为了获得尽可能纯净的散射信号，需要对接收通道内的非回波成分进行滤除，这是目前相关应用的难点之一。理想状况下，在载波和测距码都已被剥离且数据码均翻转到正电平的情况下，可以近似认为直射信号已经被压制成直流成分。所以目前常用的回波提纯手段是在跟踪环路输出的结果中，使用陷波滤波器直接滤除和直达波对应的直流成分^[20]。当然，因为 GNSS 信号的跟踪本身是一个不断调整参考信号生成参数以逼近接收信号的闭环自动控制过程，所以环路的输出结果不会完全和直射信号吻合，也为直达波的估计引入了不可避免的误差。对于残留的噪声成分，通常则用低通滤波器来对相关的高频成分进行抑制。上述的载波和测距码剥离之后使用陷波

滤波器配合低通滤波器的方案通常便可以较为有效地从接收通道中提取出具备 LFM 特征的散射信号。当前亦有部分研究成果提出了对于散射信号提纯的更精细化的处理方案，如 Ustalli 等在 2020 年提出的基于子空间投影的直射信号抑制算法，其本质上是将信号映射到和直流成分垂直的子空间上进而滤除该类成分^[73]。子空间投影在传统的 FSR 系统中是非常经典杂波抑制算法，也派生出诸多衍生技术如扩展相消算法 (extensive cancellation algorithm, ECA)^[74]，和扩展相消批处理算法 (extensive cancellation algorithm batches, ECA-B) 等^[75]。然而该类子空间投影算法依赖的是对杂波的建模和搜索，这往往只在信噪比较高或杂波成分具备一定的先验信息的条件下才可以执行^[76-77]。针对 GNSS FSR 系统相关应用中常见的极低信噪比的情况，相关的信号提纯技术还有待进一步研究。

2.2.2 动目标检测器

通常意义上可以认为当 FSR 系统的双基地角大于 135° 时目标处于前向散射区内^[21,78]，而在广阔的待检测空域中，要求目标穿越该区域是较为苛刻的构型条件。在 GNSS 被动雷达遥感技术近 30 年的发展历程中，关于使用前向散射信号进行目标检测的工作较为少见，但倘若不限制辐射源为 GNSS 信号，相关研究成果则相对丰富。如 2017 年罗马大学的 Colone 等给出的使用 Wi-Fi 信号的 FSR 系统的车辆目标检测的实验结果^[79]，同年伯明翰大学的 Contu 等也利用广播信号对在前向散射区内的空中目标实现了有效检测^[80]。上述两种信号的到达功率相比于 GNSS 信号来说有显著优势，所以相关的时频分析也较为简便，譬如在罗马大学的实验中系统可以直接对目标穿越基线的信号段进行 RD 处理来实现目标的运动参数估计^[79]。但在 GNSS FSR 系统中动目标的探测通常借助回波信号的幅值变化来实现，如 2011 年 Behar 等提出的动目标检测方法^[81]、2017 年北京理工大学的 Liu 等推导的在无 RCS 调制下的前向散射信号形式^[82]，均在理论上为该类目标检测方式提供了支持。而在实验验证方面，文献^[83-84]展示了可靠的空中目标探测结果，但这类检测手段通常针对被遮蔽效应调制的信号而设计，所以适用范围受到目标尺寸和目标飞行高度的限制。事实上除了 1995 年 Koch 等的对多种飞行器的穿越前向散射区时信号幅值变化规律的测试以外，目前还较少有利用增强效应实现目标检测的成果^[14]。典型的受到遮蔽效应调制的空中目标回波幅值变化如图 4 (a) 所示；受到前向散射 RCS 增强效应调制的结果如图 4 (b) 所示。



(a) 受遮蔽效应调制的信号

(b) 受前向散射 RCS 增强效应调制的信号

图 4 前向散射体制下的 GNSS 被动雷达遥感系统检测空中目标结果

Fig. 4 The Results of Air Target Detection with GNSS-based Passive Forward Scattering Remote Sensing System

形如图 4 (a) 的幅值变化特征被认为是 FSR 系统检测到目标的可靠依据，但目前相关研究内并未给出被广泛认可的定量标准，既何种程度的回波幅值变化可以表征目标被正确检测。尽管对于使用其他辐射源的 FSR 系统已经有可靠的检测器被提出，如 2018 年 Ustalli 等提出的针对 FM 信号的晶体视频检测器 (crystal video detector, CVD)^[85]，以及一般似然比

检测器 (generalized likelihood ratio detector, GLRD) [86], 但针对 GNSS 被动雷达遥感系统来说目前还鲜有相关工作。综上可见, 当前学界的相关研究主要集中在较近距离的大 RCS 目标的检测任务上, 且缺乏具备量化标准的检测器。对于远距离的小 RCS 目标, 还需要更多基础研究来明确其回波信号的调制方式, 进而设计相应的检测方案和参数估计算法。

2.2.3 动目标参数估计及轮廓成像

当目标被系统成功检测, 则可以进一步实现对目标相关运动参数的估计, 包括多普勒调频率、运动速度以及穿越基线时刻等, 这其中对于调频率或者多普勒历程的搜索是 FSR 系统目标参数估计最关键的问题之一。当目标回波的多普勒历程已知, 便可以通过遍历速度矢量以及目标穿越基线时刻来寻得和多普勒历程相匹配的真实参数[21]。回波信号的多普勒频移由目标在双站构型中的运动产生, 而在目标穿越前向散射区内的一小段时间内, 往往可以认为目标的绝对速度是恒定的。与低斜视角的 SAR 成像技术相似地, 当忽略掉高阶的距离变化参数后, 可以近似地认为目标的多普勒频移在这段时间内满足 LFM 形式, 而其调频率与目标速度以及整个双站系统的构型参数有关[87-91]。不过在 LFM 信号上还调制着震荡的目标 RCS, 所以难以使用传统的解调频或者 DFrFT 等整体分析方法实现对调频率的搜索, 而只能借助 STFT 一类的分段时频分析手段求得目标在前向散射区内不同时刻上的频率变化。图 5 (a) 展示了一段有实测空中目标穿越的时长约为 2 s 的回波信号幅值历程, 相应的原始信号已经过直流成分滤除处理; 图 5 (b) 是该信号段的双边 STFT 时频分析结果, 从中可以看到明显的用黑色虚线标识的 LFM 特征。当获知多普勒调频率之后, 系统便可以结合双站构型参数遍历搜索出目标的运动速度及目标穿越时刻等运动参数。2016 年伯明翰大学的 De Luca 等也提出了从 FSR 系统回波的频谱中直接对速度进行估计的思想并使用水面目标进行了实验验证, 其利用了目标速度越快则多普勒变化率也越高的时频特征, 但该方法对于空中目标的适用性还有待进一步探索[92]。

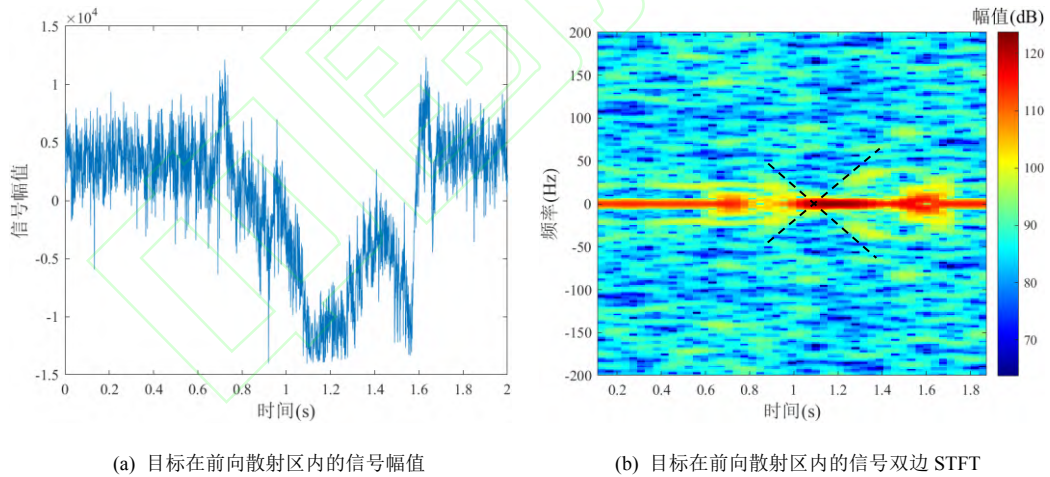


图 5 前向散射体制下的 GNSS 被动雷达遥感系统空中目标回波时频分析结果
Fig. 5 Time-Frequency Analysis of Air Target Returns of GNSS-based Passive Forward Scattering Remote Sensing System

因为 FSR 系统不具备距离分辨能力, 所以传统的雷达成像技术并无法直接应用在该类系统上, 但在获知回波信号的多普勒调频率以及对应的多普勒历程之后, 目标穿越基线时的轮廓可以被有效重建。在前向散射区内, 目标的复散射信号可以看作是目标多普勒有关的复数相位以及与目标形状相关的时变衍射成分的叠加。其中前者可以根据已知的多普勒信息进行补偿, 而剩余的后者可以看作是目标复轮廓函数 (complex profile function, CPF) 的菲涅尔变换。因为 CPF 的幅值和相位分别对应目标的高度差像和中线高度像, 所以对多普勒补偿之后的剩余成分通过菲涅尔逆变换求得目标的 CPF 之后便可解出目标的高度轮廓[93]。故而目标轮廓信息的求解本质上基于复散射信号的重建, 上述过程也便是适用于空中动目标

的小衍射角条件下的阴影逆合成孔径雷达 (shadow inverse forward scatter radar, SISAR) 成像技术的基本原理^[94]。值得一提的是, Chapurskiy 等在 2000 年在给出空中目标的 SISAR 实验结果的同时, 也指出了目标的复散射信号的功率谱特征同样和目标的轮廓直接相关, 进而可以借助相关特征对空中目标实现进一步的分类工作^[95]。

然而倘若将问题重新聚焦回 GNSS FSR 系统, 由于双基构型时刻发生变化, 且其信号到达功率通常较低导致多普勒调频率求解较为困难, 所以 SISAR 成像在该类系统中的应用较少。在较为严格的构型限制下, 2017 年北京理工大学的 Hu 等提出了使用 GNSS 信号作为辐射源的前向散射雷达的 SISAR 成像技术, 借助目标穿越基线时产生的复散射信号对接收机正上方的 1km 高度的民航客机的顶部轮廓进行了成功的描绘^[20]。但其研究亦指出该技术的应用受到双基构型和目标尺寸的限制, 当目标位于近场位置时虽然根据遮蔽效应对目标实现检测较为直观, 但同时该类构型下目标回波的多普勒信息基本完全丢失, 导致参数识别及 SISAR 技术无法应用。该项技术是否可以推广到更宽松的 FSR 构型下, 还有待深入研究。此外, 2019 年哈尔滨工业大学的祝兴晟提出了使用稀疏自动编码器 (SAE) 的使用 BDS 信号的 FSR 系统的目标识别技术, 直接在目标的 SISAR 成像结果上实现了目标分类, 并使用仿真数据验证了该项技术的可行性, 为 GNSS FSR 系统的动目标识别工作提供了与前文所述的利用功率谱特征进行分类的不同思路^[96]。

3 GNSS 外辐射动目标源遥感检测展望

GNSS 外辐射源雷达遥感系统的动目标检测技术目前的发展阶段仍旧处于适配传统雷达技术的阶段, 但事实上使用 GNSS 信号作为机会辐射源的真正优势在于该类系统同时拥有数量众多的信息完全公开的可见卫星。所以向着多信号源融合的方向探索, 最终形成分布式 MIMO 系统, 是属于 GNSS 被动雷达遥感技术的特色道路。除此之外, 后向散射雷达的帧间相干积分以及两种体制下的动目标成像, 也是具备高可行性的发展方向。

3.1 后向散射探测体制下的动目标遥感检测技术展望

如前文所述, 当前的后向散射探测体制下的帧间能量积累主要依赖非相干积分来实现, 但事实上因为噪声的相位随机性, 使用相干积分可以进一步削弱噪声成分能量进而带来更高的信噪比增益。不论对于 SISO 构型下的帧间积累还是 MISO 构型下的多星数据融合, 相干积分都需要首先对不同帧的二维信号进行参数配准, 其中包括目标峰值在 RD 域中的位置以及峰值点的复数相位。当前针对传统雷达的 MFD 问题已有关于相干性修复的技术提出, 如 2017 年电子科技大学的 Yi 等提出的通过高维搜索算法对不可预估的多维度信号帧间相位差异进行修复的方案^[97]。虽然在 GNSS 被动雷达遥感领域中还较少有相关成果, 但事实上因为在讨论通过多帧信号融合实现信噪比增强的语境中往往隐含着单帧数据并不具备目标可见性的前提, 所以在帧间相干积分技术上 GNSS 信号和传统雷达信号并无本质差异, 对此类问题尝试适配主动雷达的相关解决方案依然不失为是实现突破的方向之一。此外, 积累同一颗可见卫星的多频带目标回波能量亦是实现相干 MFD 的潜在解决方案。因为同一颗 GNSS 卫星可能在多个频点同时播发信号, 但接收机一侧则通常只对特定频带内的信号进行接收和解调, 这无疑舍弃掉了一部分信号能量。而该方案的优势也在于对于来自同一系统且同样时间下的不同频带的回波数据帧, 其中目标的运动特征必然完全一致, 所以其回波能量积累过程无需对帧间的 RD 域峰值位置差异进行校正, 相关算法的开发可以更多关注于复信号的相干性补偿方法。

3.2 前向散射探测体制下的动目标遥感检测技术展望

当单一前向散射区内的回波信号无法检测到目标穿越, 是否可以通过结合多个前向散射区内的回波信息对目标进行联合检测, 是目前亟待解决的问题之一。2023 年北京航空航天

大学的苗铎等在理论层面探讨了 MISO 构型 FSR 系统的目标探测概率,指出在该构型下 FSR 系统比后向散射体制系统具备更高的探测能力^[18]。虽然后向散射体制的构型要求更容易满足,但 FSR 系统的高信噪比特征则在实际应用中更具优势,所以如何利用多信号源对目标进行联合检测是提升系统检测性能的重点。不过该问题与后向散射体制的 MFD 问题大有区别,因为 FSR 系统中并没有帧的概念,系统往往在一维时域对目标进行检测。当前缺少有效的技术手段将目标穿过不同基线的能量变化累积起来以实现微弱能量波动的检测,而倘若此问题得到有效解决,那么 MIMO 雷达遥感系统的双基基线组成的前向散射区网络将会实现非常高效的弱目标甚至隐身目标的检测和跟踪。针对类似的问题,当前已经有部分理论探索和实验成果,如文献[98]定性分析了 MIMO FSR 系统使用 GNSS 卫星作为信号源的优势,并用实测数据验证了 MISO 构型下目标联合检测的可行性。类似地,2022 年国防科技大学的 Ai 等用仿真实验搭建了 MIMO FSR 系统,在只使用目标穿越时刻这一参数的前提下实现了目标的检测及运动参数的估计^[99]。

MIMO 构型下 FSR 系统实现的另一主要难点是多台接收机的布站方案选择。当前针对 SIMO 构型的分布式雷达遥感系统的布站方案已有部分相关成果,尽管主要局限于仿真验证阶段,但对未来的 MIMO FSR 系统的构筑仍具有重要参考意义。2022 年西安电子科技大学的李海鹏以在给定区域内 SIMO 构型多基地雷达的栅栏覆盖性能为指标,给出了多种不同的接收机布站方案并详细比较了其间的性能差异^[100]。但该研究的内容主要聚焦于雷达系统在二维探测区域的覆盖表现,其布站方案对于 GNSS FSR 系统在三维空间中的适用性需要深入考察。而同年陈宏焯等则使用几何精度因子 (geometric dilution of precision, GDOP) 为标准配合遗传算法寻求在时差定位法下 SIMO 系统的接收机布站方案^[101]。该研究探讨了在三维空间中地基分布式雷达的最优目标探测性能,但相关方案在 GNSS FSR 系统中的表现还有待进一步研究。

3.3 GNSS 被动雷达遥感系统成像技术展望

使用 GNSS 反射信号对地表成像的技术由来已久,其原理是利用卫星的在轨运动形成合成孔径,配合地基或机载接收机形成双站 SAR 系统实现对地成像。早在 2003 年新南威尔士大学的 Li 等使用仿真数据验证了使用 GPS 反射信号对地表进行成像的可行性^[102]。后续如伯明翰大学的 Antoniou 等在 2013 年用 GALILEO 导航卫星信号结合传统的双站 SAR 成像算法在实测层面完成了对地成像,虽然其成像结果并不具备太强的可读性,但其对能量的正确聚焦无疑证明了该项技术的潜力^[103]。类似的成果又如 2018 年武汉大学的严颂华等实现的使用 BDS 信号作为信号源的对地成像^[104]。该研究得到了与成像区域地物分布高度匹配的时域图像,但受制于 GNSS 信号的较低的距离分辨率,相关技术目前还需更多研究。2021 年北京航空航天大学的吴世玉等针对 GNSS 双站 SAR 系统的后向投影算法进行了实验验证,同时使用了并行计算技术加速该成像算法使其具备更强的实用性^[105]。该团队又于 2023 年针对该类系统在长合成孔径条件下方位向调频率变化的问题,引入了分块处理的思想,用以动态更新匹配滤波器的参数^[106]。在实验验证中,该方法改进下的 RD 成像算法实现了和后向投影成像算法相似的成像能力。但上述成果中,其成像产品依然需要配合光学影像才具备一定的解析能力。目前使用 GNSS 信号作为外辐射源的双站 SAR 系统的性能表现主要受限于接收机成像视角以及信号固有的低分辨率限制,使得该类系统的成像结果一直和传统的 SAR 影像质量有着较大差距。如何优化信号的分辨率或提升信号的有效带宽,是改进该类系统成像质量的关键所在。在 2021 年,Zheng 等人提出了使用 BDS 的 B3I 信号实现分米级成像的算法,并使用理想情况下的反射信号对算法进行了验证^[107]。该思想本质上通过提高信号的中频过采样率来缩小距离单元尺寸进而提高成像分辨率,不过距离单元的大小和信号分辨率并不能一概而论,所以该方法在实际应用场景中的效果还需要更多验证来支撑。

在对目标成像方面, 依旧可以从两种不同的散射体制出发进行考察。对于后向散射探测体制下的水面及地面动目标的成像, 已有的部分研究成果对目标的运动方式要求都比较苛刻。因为地基接收机通常静止, 所以该类系统往往需要目标发生转动或者沿着垂直视线方向发生运动才可以利用 ISAR 或 SAR 的能量聚焦逻辑实现成像。但雷达系统中的待检测目标往往是非合作的, 更具通用性的成像技术或许需要将接收机搭载到运动平台上以实现更理想的合成孔径效果。对于空中动目标的成像工作, 因为回波信号的低信噪比和可用信号窗口较短的特征, 所以通常只能依赖 FSR 系统的 SISAR 成像技术, 而传统的 ISAR 空中动目标成像算法则不再可用。SISAR 应用目前普遍局限于目标恰好从接收机正上方穿越系统的双基基线这一特定场景, 未来若能扩展到更多构型下并得到验证, 将为算法提供更高的通用性。进一步地, 倘若可以利用未来可能实现的 MIMO FSR 系统从多个角度对空中目标实现阴影尺寸提取并重建目标的三维轮廓, 将给出更可靠的目标分类结果。

4 结 语

过去的 30 年里, 有赖于国内外学者的持续探索, GNSS 外辐射源雷达遥感系统的性能不断得到优化, 但 GNSS 信号固有的劣势长久以来都是限制该类系统发展的瓶颈。可在另一方面, GNSS 系统自身的优势或许也是改进该类系统表现的突破口所在。如本文在第三部分中的展望, 诸多 GNSS 星座通常可以同时为雷达遥感系统提供具备十几个甚至几十个信息完全已知的可见信号源。如何将这些分散在空间中的信号能量聚焦起来, 无疑是该类系统在动目标检测方向上最值得被解决的问题之一。随着越来越多的学者开始尝试突破这一难关, GNSS 被动雷达遥感系统也正在朝着智能化、多基地化以及前向后向散射协同化的方向稳步发展。在这项技术前景广阔又挑战重重的发展途径上, 也希望本文概略梳理的脉络可以为相关的工作提供一些灵感和参考。

参考文献

- [1] Hall C D, Cordey R A. Multistatic Scatterometry[C]//International Geoscience and Remote Sensing Symposium, "Remote Sensing: Moving Toward the 21st Century", Edinburgh, UK, 1988.
- [2] Zavorotny V U, Gleason S, Cardellach E, et al. Tutorial on Remote Sensing Using GNSS Bistatic Radar of Opportunity[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2014, 2(4): 8–45.
- [3] Rodriguez-Alvarez N, Camps A, Vall-llossera M, et al. Land Geophysical Parameters Retrieval Using the Interference Pattern GNSS-R Technique[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(1): 71–84.
- [4] Wang Y, Morton Y J. Coherent GNSS Reflection Signal Processing for High-Precision and High-Resolution Spaceborne Applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2020, 59(1): 1–12.
- [5] Jia Y, Jin S, Xiao Z, et al. Soil Moisture Remote Sensing Using Global Navigation Satellite System-Reflectometry: Current Status and Opportunity[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(11): 1784–1799. (贾燕, 金双根, 肖智宇, 等. 全球导航卫星系统反射测量土壤水分遥感: 现状与机遇[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2023, 48(11): 1784-1799.)
- [6] Ye Shirong, Luo Xinqi, Nan Yang, et al. An Improved Sea Ice Detection Method Based on Spaceborne GNSS-R Using CNN[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,

- 2024, 49(1): 90–99. (叶世榕, 罗歆琪, 南阳, 等. 一种改进的星载GNSS-R卷积神经网络海冰检测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 90-99.)
- [7] Zhang Shuangcheng, Guo Qinyu, Ma Zhongmin, et al. Research Advances and Some Thoughts on Soil Moisture Retrieval by Space-Borne GNSS-R[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 15–26. (张双成, 郭沁雨, 马中民, 等. 星载GNSS-R反演土壤湿度研究进展与思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 15-26.)
- [8] Chen Y and M. Constraints Based on Spaceborne GNSS-R[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, 21: 1–5.
- [9] Wu Xuerui, Song Shaohui, Ma Wenxiao, et al. A Review of GNSS-R/SoOP-R for Essential Hydrological Climate Variables Detection[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(1): 1-14. (吴学睿, 宋少辉, 马文晓, 等. 典型水循环参数星载GNSS-R/SoOP-R遥感探测的研究现状[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(1): 1-14.)
- [10] Sumantyo J T S, Imura N. Development of GNSS-RO and EDTP sensors onboard microsatellite for ionosphere monitoring[C]//2015 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Milan, Italy, 2015.
- [11] Cardellach E, Tomás S, Oliveras S, et al. Sensitivity of PAZ LEO polarimetric GNSS radio-occultation experiment to precipitation events[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(1): 190–206.
- [12] Hu A, Wu S, Wang X, et al. Improvement of Reflection Detection Success Rate of GNSS RO Measurements Using Artificial Neural Network[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(2): 760–769.
- [13] Ludwig-Barbosa V, Rasch J, Carlstrom A, et al. GNSS Radio Occultation Simulation Using Multiple Phase Screen Orbit Sampling[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(8): 1323–1327.
- [14] Koch V, Westphal R. New approach to a multistatic passive radar sensor for air/space defense[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1995, 10(11): 24–32.
- [15] Saini R, Zuo R, Cherniakov M. Problem of signal synchronisation in space-surface bistatic synthetic aperture radar based on global navigation satellite emissions – experimental results[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2010, 4(1): 110–125.
- [16] Xiong Tao. Study on Imaging Algorithms for Bistatic SAR[D]. Xi'an: Xidian University, 2012. (熊涛. 双基SAR成像算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.)
- [17] Zeng Z. Generic signal synchronisation algorithm for passive global navigation satellite system - based synthetic aperture radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2015, 9(4): 364–373.
- [18] Miao Duo, Yang Dongkai, Xu Zhichao, et al. Low-altitude, Slow Speed and Small Target Detection Probability of Passive Radar Based on GNSS Signals[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(3): 657-664. (苗铎, 杨东凯, 许志超, 等. GNSS外辐射源雷达低慢小目标探测概率[J]. 北京航空航天大学学报, 2023: 657–664.)
- [19] Chesnokov Y S, Krutikov M V. Bistatic RCS of aircrafts at the forward scattering[C]//Proceedings of International Radar Conference, Beijing, China, 2000.
- [20] Hu C, Liu C, Wang R, et al. Detection and SISAR Imaging of Aircrafts Using GNSS Forward Scatter Radar: Signal Modeling and Experimental Validation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(4): 2077–2093.

- [21] Liu Changjiang. Research on Forward Scatter Radar Air Moving Target Parameter Estimation and SISAR Imaging[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017. (刘长江. 前向散射雷达空中运动目标参数估计与SISAR成像研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2017.)
- [22] Colone F, O'Hagan D W, Lombardo P, et al. A Multistage Processing Algorithm for Disturbance Removal and Target Detection in Passive Bistatic Radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2009, 45(2): 698–722.
- [23] Pastina D, Santi F, Pieralice F, et al. Maritime Moving Target Long Time Integration for GNSS-Based Passive Bistatic Radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(6): 3060–3083.
- [24] Nasso I, Santi F, Pastina D. Maritime Targets Velocity Estimation in Space-Based Passive Multistatic Radar Using Long Integration Times[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 163764–163779.
- [25] Perry R P, DiPietro R C, Fante R L. SAR imaging of moving targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 188–200.
- [26] Zhang Shunsheng, Zeng Tao, Long T, et al. Weak Target Detection Based on Keystone Transform [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 9: 1675-1678. (张顺生, 曾涛,等. 基于Keystone变换的微弱目标检测[J]. 电子学报, 2005, 9: 1675-1678.)
- [27] Li Y, Zeng T, Long T, et al. Range Migration Compensation and Doppler Ambiguity Resolution by Keystone Transform[C]//2006 CIE International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006.
- [28] He Z, Chen W, Yang Y, et al. Sea target detection using the GNSS reflection signals[J]. *GPS Solutions*, 2023, 27(4): 160.
- [29] Huang C, Li Z, Wu J, et al. Multistatic Beidou-Based Passive Radar for Maritime Moving Target Detection and Localization[C]//IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Yokohama, Japan, 2019.
- [30] Carretero-Moya J, Gismero-Menoyo J, Asensio-Lopez A, et al. Small-target detection in sea clutter based on the Radon Transform[C]//2008 International Conference on Radar, Adelaide, Australia, 2008.
- [31] Rao X, Tao H, Su J, et al. Axis rotation MTD algorithm for weak target detection[J]. *Digital Signal Processing*, 2014, 26(1): 81–86.
- [32] Xu J, Yu J, Peng Y-N, et al. Radon-Fourier Transform for Radar Target Detection, I: Generalized Doppler Filter Bank[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(2): 1186–1202.
- [33] Zhou X, Wang P, Chen J, et al. A Modified Radon Fourier Transform for GNSS-Based Bistatic Radar Target Detection[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1–5.
- [34] Xu J, Xia X, Peng S, et al. Radar Maneuvering Target Motion Estimation Based on Generalized Radon-Fourier Transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2012, 60(12): 6190–6201.
- [35] Ma H, Tzagkas D, Antoniou M, et al. Maritime Moving Target Indication and localisation with GNSS-based multistatic radar: Experimental proof of concept[C]//2017 18th International Radar Symposium (IRS), Prague, Czech Republic, 2017.
- [36] Candan C, Kutay M A, Ozaktas H M. The discrete fractional Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2000, 48(5): 1329–1337.
- [37] Tian Ruiqi, Bao Qinglong, Wang Dinghe, et al. An Algorithm for Target Parameter Estimation Based on Fractional Fourier and Keystone Transforms[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(5): 511–

- 517.(田瑞琦, 鲍庆龙, 王丁禾,等. 基于FRFT与Keystone变换的运动目标参数估计算法[J]. 雷达学报, 2014, 3(5):511-517.)
- [38] Li Y, Yan S, Gong J. SNR Improvement for Maneuvering Ship Using Weak Echo Under the Condition of Beidou GEO Satellites[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15: 1256–1271.
- [39] Li Z, Santi F, Pastina D, et al. Multi - frame fractional Fourier transform technique for moving target detection with space - based passive radar[J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2017, 11(5): 822–828.
- [40] Lv X, Bi G, Wan C, et al. Lv's Distribution: Principle, Implementation, Properties, and Performance[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2011, 59(8): 3576–3591.
- [41] Li X, Cui G, Kong L, et al. Fast Non-Searching Method for Maneuvering Target Detection and Motion Parameters Estimation[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2016, 64(9): 2232–2244.
- [42] Chen J, Xing M, Yu H, et al. Motion Compensation/Autofocus in Airborne Synthetic Aperture Radar: A Review[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2022, 10(1): 185–206.
- [43] Liang X, Zhang H, Fang G, et al. An Improved Algorithm for Through-Wall Target Detection Using Ultra-Wideband Impulse Radar[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 22101–22118.
- [44] Zulkifli S, Balleri A. FMCW Radar Prototype Development for Detection and Classification of Nano-Targets[C]//2020 IEEE International Radar Conference (RADAR), Washington, USA, 2020.
- [45] Mubarak K A, Dawood A M, Shubair R M, et al. Improved analysis of spaceborne radar signals using wavelet-based techniques[C]//2009 IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology (ISSPIT), Ajman, United Arab Emirates, 2009.
- [46] Che Wan Fareez C W F, Kama Azura O, Nur Emileen A R, et al. Forward Scattering Radar (FSR) ground target signal processing using wavelet technique (WT)[C]//2015 16th International Radar Symposium (IRS), Dresden, Germany ,2015.
- [47] Santi F, Pastina D, Bucciarelli M. Maritime moving target detection technique for passive bistatic radar with GNSS transmitters[C]//2017 18th International Radar Symposium (IRS), Prague, Czech Republic, 2017.
- [48] Santi F, Pastina D. Application of track-before-detect techniques in GNSS-based passive radar for maritime surveillance[C]//2019 IEEE Radar Conference (RadarConf), Boston, USA, 2019.
- [49] Orlando D, Ricci G, Bar-Shalom Y. Track-Before-Detect Algorithms for Targets with Kinematic Constraints[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(3): 1837–1849.
- [50] Deng X, Bi R, Liu H. Threshold setting of track-before-detect based on dynamic programming for radar target detection[C]//IET International Radar Conference 2013, Xi'an, China, 2013.
- [51] Yi W, Fang Z, Li W, et al. Multi-Frame Track-Before-Detect Algorithm for Maneuvering Target Tracking[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69(4): 4104–4118.
- [52] Zhou X, Wang P, Zeng H, et al. Moving Target Detection Using GNSS-Based Passive Bistatic Radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1–15.
- [53] Santi F, Pieralice F, Pastina D. Joint Detection and Localization of Vessels at Sea With a GNSS-Based Multistatic Radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2019, 57(8): 5894–5913.

- [54] Pieralice F, Pastina D, Santi F, et al. Multi-transmitter ship target detection technique with GNSS-based passive radar[C]//IET Conference Publications, Belfast, UK, 2017.
- [55] Zeng H-C, Chen J, Wang P B, et al. 2-D Coherent Integration Processing and Detecting of Aircrafts Using GNSS-Based Passive Radar[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 1164.
- [56] Zeng H, Chen J, Wang P, et al. Moving Target Detection in Multi-Static GNSS-Based Passive Radar Based on Multi-Bernoulli Filter[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(21): 3495.
- [57] Huang Chuan, Li Zhongyu, Zhang Lijun, et al. A Maritime Moving Target Detection and Localization Method for Passive Multistatic Radar[J]. *Journal of Signal Processing*, 2020, 36(12): 2016-2023. (黄川, 李中余, 张丽君,等. 无源多基雷达海面运动目标检测与定位方法[J]. 信号处理, 2020, 36(12): 2016-2023.)
- [58] Ma H, Antoniou M, Stove A G, et al. Target Kinematic State Estimation With Passive Multistatic Radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(4): 2121–2134.
- [59] Huang C, Li Z, Lou M, et al. BeiDou-Based Passive Radar Vessel Target Detection: Method and Experiment via Long-Time Optimized Integration[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(19): 3933.
- [60] Wang K, Zhang X. A TBD method using multi-frame coherent integration[C]//2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, APSAR 2011, Seoul, Korea (South), 2011.
- [61] Wang M, Li X, Zhang Z, et al. Coherent Integration and Parameter Estimation for High-Speed Target Detection with Bistatic MIMO Radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1–15.
- [62] Li X, Yang Y, Sun Z, et al. Multi-Frame Integration Method for Radar Detection of Weak Moving Target[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(4): 3609–3624.
- [63] Ma H, Antoniou M, Stove A G, et al. Maritime Moving Target Localization Using Passive GNSS-Based Multistatic Radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(8): 4808–4819.
- [64] Sadeghi M, Behnia F, Amiri R. Maritime Target Localization From Bistatic Range Measurements in Space-Based Passive Radar[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 1–8.
- [65] Nasso I, Santi F. A Centralized Ship Localization Strategy for Passive Multistatic Radar Based on Navigation Satellites[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1–5.
- [66] Yang Dongkai, Tan Chunrui, Wang Feng, et al. Elevation-Dependent Stochastic Localization Algorithm for GNSS-based Passive Radar[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2023, 45(10): 1-9. (杨东凯, 谭传瑞, 王峰, 等. 基于高度角随机模型的GNSS外辐射源雷达定位算法[J]. 电子与信息学报, 2023: 45(10): 1-9.)
- [67] Tan Chuanrui, Li Tang, Chen Wenqian, et al. Evaluation of TDOA Based Air Target Localization Algorithm Using GNSS-Based Passive Radar[J/OL]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 1-15 [2024-03-30]. (谭传瑞, 李唐, 陈文谦, 等. GNSS外辐射源雷达空中目标TDOA定位算法评估[J/OL]. 北京航空航天大学学报, 2024, 1-15 [2024-03-30].)
- [68] Yan Pan, Li Qiangqiang, Yan Huifeng. Direct Position Determination of Moving Target Using BeiDou Satellite External Illuminators[J]. *Radio Engineering*, 2023, 53(2): 410–416. (闫攀, 栗强强, 闫会峰. 基于北斗卫星外辐射源的目标直接定位算法[J]. 无线电工程, 2023, 53(2): 410-416.)

- [69] Pastina D, Santi F, Pieralice F, et al. Passive Radar Imaging of Ship Targets With GNSS Signals of Opportunity[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(3): 2627–2642.
- [70] Huang C, Li Z, An H, et al. Passive Multistatic Radar Imaging of Vessel Target Using GNSS Satellites of Opportunity[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1–16.
- [71] He Z, Yang Y, Chen W, et al. Moving Target Imaging Using GNSS-Based Passive Bistatic Synthetic Aperture Radar[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): 3356.
- [72] He Z, Chen W, Yang Y, et al. Maritime Ship Target Imaging With GNSS-Based Passive Multistatic Radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 1–18.
- [73] Ustalli N, Pastina D, Lombardo P. Target Motion Parameters Estimation in Forward Scatter Radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(1): 226–248.
- [74] Li Guangrui. Research on GNSS reflection signal processing method based on the principle of bistatic radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2021. (李光蕊. 基于双基雷达原理的GNSS反射信号处理方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.)
- [75] Liu Y, Lv X, Yang P. Batch version of extensive cancellation algorithm for clutter mitigation in frequency domain of passive radar[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(3): 293–301.
- [76] Chen Wei, Wan Xianrong, Zhang Xun, et al. Parallel Implementation of Multi-channel Time Domain Clutter Suppression Algorithm for Passive Radar[J]. *Journal of Radars*, 2014, 3(6):686-693. (陈伟, 万显荣, 张勋,等. 外辐射源雷达多通道时域杂波抑制算法并行实现[J]. 雷达学报, 2014, 3(6):686-693.)
- [77] Liu M, Gao Z, Chen Y, et al. Passive Detection of Moving Aerial Target Based on Multiple Collaborative GPS Satellites[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(2): 263.
- [78] Zheng Yuqing, Ai Xiaofeng, Xu Zhiming, et al. Target parameters estimation of FSR net based on crossing times[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2023, 45(5): 1323–1332. (郑雨晴, 艾小锋, 徐志明,等. 基于GNSS的前向散射雷达网目标穿越特性研究[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(5): 1323–1332.)
- [79] Colone F, Martelli T, Lombardo P. Quasi-Monostatic Versus Near Forward Scatter Geometry in Wi-Fi-Based Passive Radar Sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(15): 4757–4772.
- [80] Contu M, De Luca A, Hristov S, et al. Passive Multifrequency Forward-Scatter Radar Measurements of Airborne Targets Using Broadcasting Signals[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2017, 53(3): 1067–1087.
- [81] Behar V, Kabakchiev C, Rohling H. Air target detection using navigation receivers based on GPS L5 signals[J]. *24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2011, ION GNSS 2011*, 2011, 1(January 2011): 333–337.
- [82] Liu C, Hu C, Wang R, et al. GNSS forward scatter radar detection: Signal processing and experiment[C]//2017 18th International Radar Symposium (IRS), Prague, Czech Republic, 2017.
- [83] Suberviola I, Mayordomo I, Mendizabal J. Experimental Results of Air Target Detection With a GPS Forward-Scattering Radar[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2012, 9(1): 47–51.
- [84] Gronowski K, Samczynski P, Stasiak K, et al. First results of air target detection using single channel passive radar utilizing GPS illumination[C]//2019 IEEE Radar Conference (RadarConf) , 2019: 1–6.

- [85] Ustalli N, Lombardo P, Pastina D. Detection Performance of a Forward Scatter Radar Using a Crystal Video Detector[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(3): 1093–1114.
- [86] Ustalli N, Lombardo P, Pastina D. Generalized Likelihood Ratio Detection Schemes for Forward Scatter Radar[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2018, 54(6): 2951–2970.
- [87] Zeng T, Hu C, Cherniakov M, et al. Joint parameter estimation and Cramer-Rao bound analysis in ground-based forward scatter radar[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2012, 2012(1): 80.
- [88] Hu C, Sizov V, Antoniou M, et al. Optimal Signal Processing in Ground-Based Forward Scatter Micro Radars[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(4): 3006–3026.
- [89] Liu C, Hu C, Zeng T, et al. Signal modeling and experimental verification in GNSS forward scatter radar[C]//2016 17th International Radar Symposium (IRS), Krakow, Poland, 2016.
- [90] De Luca A, Daniel L, Gashinova M, et al. Target parameter estimation in moving transmitter moving receiver forward scatter radar[C]//2017 18th International Radar Symposium (IRS), Prague, Czech Republic, 2017.
- [91] Falconi M T, Lombardo P, Pastina D, et al. A Closed-Form Model for Long- and Short-Range Forward Scatter Radar Signals From Rectangular Conductive Targets[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(2): 1370–1390.
- [92] De Luca A, Contu M, Hristov S, et al. FSR velocity estimation using spectrogram[C]//2016 17th International Radar Symposium (IRS), Krakow, Poland, 2016.
- [93] Hristov S, Daniel L, Hoare E, et al. Target Shadow Profile Reconstruction in ground-based forward scatter radar[C]//2015 IEEE Radar Conference (RadarCon), VA, USA, 2015.
- [94] Wu Yunyang. Study of Orientation and Imaging Based on Bistatic (Multistatic) Shadow Inverse Synthetic Aperture Radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2007. (吴云阳. 基于双(多)基地阴影逆合成孔径雷达的目标定位及成像研究[D].西安: 西安电子科技大学, 2007.)
- [95] Chapurskiy V V, Sablin V N. SISAR: shadow inverse synthetic aperture radiolocation[C]//Record of the IEEE 2000 International Radar Conference, VA, USA, 2000.
- [96] Zhu Xingsheng. A Research On Target Aircraft Detection Methods Based On Forward Scattering Wave of BeiDou Navigation Satellite[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (祝兴晟. 基于北斗导航卫星的前向散射波飞行器探测方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.)
- [97] Yi W, Fang Z, Wen M. An efficient coherent multi-frame track-before-detect algorithm in radar systems[C]//2017 IEEE Radar Conference, RadarConf 2017, Seattle, USA, 2017.
- [98] Wachtl S, Koch V, Schmidt L P. Global navigation satellite systems in passive surveillance applications[C]//2014 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles, TIWDC/ESAV 2014, Rome, Italy, 2014.
- [99] Ai X, Zheng Y, Xu Z, et al. Parameter Estimation for Uniformly Accelerating Moving Target in the Forward Scatter Radar Network[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(4): 1006.
- [100] Li Haipeng. Research on Barrier Coverage of Multistatic Radar[D]. Xi'an: Xidian University, 2022. (李海鹏. 多基地雷达栅栏覆盖问题研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2022.)

- [101] Chen Hongye, He Zhida. Optimazation Scheme of Passive Radar Station Placement Based on Regional Discretization[J]. *Journal of Detection & Control*, 2022, 44(4): 41-47. (陈宏烨, 赫志达. 基于区域离散化的无源雷达布站优化方案[J]. 探测与控制学报, 2022, 44(4): 41-47.)
- [102] Yong-hong L, Rizos C, Donskoi E, et al. Terrain imaging using a SAR system based on reflected GPS signals[J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2003, 8(2): 659-664.
- [103] Antoniou M, Cherniakov M. GNSS-based bistatic SAR: a signal processing view[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2013, 2013(1): 98.
- [104] Yan S, Zhou H, Gong J. GNSS Imaging: A Case Study of Tree Detection Based on Beidou GEO Satellites[J]. *Progress In Electromagnetics Research C*, 2018, 84(March): 227-240.
- [105] Wu S, Xu Z, Wang F, et al. An Improved Back-Projection Algorithm for GNSS-R BSAR Imaging Based on CPU and GPU Platform[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(11): 2107.
- [106] Wu Shiyu, Yang Dongkai, Wang Feng, et al. GNSS-R BSAR range-Doppler imaging algorithm based on synchronization of direct and echo signal[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(3): 588-596. (吴世玉, 杨东凯, 王峰, 等. 直反信号协同的GNSS-R BSAR距离多普勒成像算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(3): 588-596.)
- [107] Zheng Y, Zhang Z, Wu P, et al. Decimetre Level Range Resolution for Beidou B3I Signal-Based Passive SAR Imaging—Proof-of-Concept Experimental Demonstrations[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 22927-22938.