

文章编号: 2095-4980(2025)05-0502-07

单站高频雷达飞机目标探测的相关研究

刘 赣, 田应伟*, 文必洋, 马盛波

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430000)

摘 要: 为拓展紧凑型高频地波雷达(HFGWR)的应用领域, 针对单站紧凑型 HFGWR 探测飞机目标的场景进行研究。通过探讨高速目标对距离谱和多普勒谱的影响及获取高速目标的速度和距离信息所面临的挑战, 推导出线性调频中断连续波(FMICW)波形参数设计的约束条件, 并针对长、短相干积累时间, 分别设计了相应的波形参数进行数值仿真。研究表明, 在长积累时间条件下, 采用广义 Radon 傅里叶变换(GRFT)方法消除距离和多普勒频率的徙动, 实现了目标能量的有效积累和运动参数的精确估计; 在短积累时间条件下, 通过时频分析结合贪婪算法, 先估算目标的运动参数, 再对距离慢时间信号进行补偿, 显著提升了目标信噪比。通过理论推导和数值仿真, 验证了单站紧凑型 HFGWR 探测高速目标的可行性, 并为后续的实地测试奠定了理论基础。

关键词: 紧凑型高频雷达(HFGWR); 飞机目标; 广义 Radon 傅里叶变换(GRFT); 时频分析; 线性调频中断连续波(FMICW)

中图分类号: TN957.51

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2023385

Research on aircraft target detection by single station HF radar

LIU Gan, TIAN Yingwei*, WEN Biyang, MA Shengbo

(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan Hubei 430000, China)

Abstract: In order to expand the application field of compact High Frequency Ground Wave Radar (HFGWR), research has been conducted on the scenario of single-station compact HFGWR detecting aircraft targets. By exploring the impact of high-speed targets on the range spectrum and Doppler spectrum, as well as the challenges faced in obtaining the speed and range information of high-speed targets, the constraints of the linear Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave(FMICW) waveform parameter design have been derived. Corresponding waveform parameters have been designed for long and short coherent accumulation time, and numerical simulations have been carried out. The research shows that under the condition of long accumulation time, the Generalized Radon Fourier Transform(GRFT) method is employed to eliminate the migration of range and Doppler frequency, achieving effective accumulation of target energy and accurate estimation of motion parameters; under the condition of short accumulation time, the signal-to-noise ratio of the target is significantly improved by combining time-frequency analysis with the greedy algorithm to first estimate the motion parameters of the target, and then compensate for the slow time signal of the range. The feasibility of single-station compact HFGWR detecting high-speed targets has been verified through theoretical derivation and numerical simulation, and a theoretical foundation has been laid for subsequent field tests.

Keywords: compact High Frequency Ground Wave Radar(HFGWR); aircraft targets; Generalized

收稿日期: 2023-07-30; 修回日期: 2023-11-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62071337); 国家重点研发计划资助项目(2022YFC2806300); 湖北省自然科学基金资助项目(2022CFB055)

*通信作者: 田应伟 email:tianyw@whu.edu.cn

引用格式: 刘赣, 田应伟, 文必洋, 等. 单站高频雷达飞机目标探测的相关研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(5): 502-508. DOI: 10.11805/TKYDA2023385.

Citation format: LIU Gan, TIAN Yingwei, WEN Biyang, et al. Research on aircraft target detection by single station HF radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(5): 502-508. DOI: 10.11805/TKYDA2023385.

Radon Fourier Transform(GRFT); time-frequency analysis; linear Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave(FMICW)

近年来, 高速目标探测越来越成为一个研究热点^[1-2]。多种类型的雷达被用来进行高速目标探测试验, 如无源雷达^[3]、噪声连续波雷达^[4]、合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)^[5]和高速雷达等^[6-9]。其中, 高频地波雷达(HFGWR)凭借其电磁波能在海面绕射传播的优势实现超视距探测, 成为主要的远程警戒手段之一^[10]。此外, 高频段电磁波波长与绝大多数隐身目标的尺寸相当, 因此具有良好的反隐身性能^[11]。

HFGWR以美国的SeaSonde为主要代表, 由CODAR公司研发, 主要用来进行海洋监测^[12]。另外, 国际上知名的高频雷达还有德国的WERA^[13]、英国的OSCR^[14]等。国内具有代表性的HFGWR是哈尔滨工业大学研制的EHFR(Experimental HF Surface over-the-horizon Radar), 它的发射天线采用对数周期天线, 接收天线为八元线阵, 主要用于目标探测^[15]。文献[6]利用阵列式HFGWR进行合作飞机目标的探测, 发射天线采用对数周期阵, 接收天线采用40元相控阵, 接收天线占地面积总周长近1 km。文献[7]将FMICW和频率编码脉冲相结合, 实现飞机和船只目标的同时检测。文献[8]采用一种多普勒预处理相位编码信号解决高速目标产生的距离多普勒耦合。文献[9]应用相参频率编码脉冲串信号, 有效实现飞机目标的探测和测速。上述研究中使用的雷达、天线占地面积大, 架设和维护成本高, 所采用的波形体制与本文的研究区别较大。

国内另一个具有代表性的HFGWR, 是武汉大学自主研发的用于海洋表面动力学监测的紧凑型雷达OSMAR(Ocean State Measuring and Analyzing Radar)^[16]。OSMAR发射天线是一根单极子天线, 接收天线是单极子/交叉环天线。其天线占地面积小, 易维护, 可搭载移动平台。发射波形采用线性调频中断连续波(FMICW), 实现收发共站^[17]。近年来, OSMAR主要致力于海态反演和船只目标探测, 取得丰硕的成果^[18-19]。为填补OSMAR高速目标探测这一空白, 本文就单站紧凑型HFGWR探测飞机目标的相关问题展开研究。民航飞机相对于船只目标, 最大的区别是速度快。民航飞机在平稳飞行时速度通常保持在800~900 km/h, 远远超过船只目标的速度。因此, 相干积累时间对高速目标的检测格外重要。

长相干积累时间条件下, 可兼顾海态反演和慢速目标探测, 但高速目标会发生距离徙动和多普勒频率徙动(在长相干积累时间内目标的径向距离和径向速度的变化量超过一个距离分辨率和多普勒分辨率时), 需利用广义的Radon傅里叶变换(GRFT)方法, 对扩散的目标能量进行积累, 从而完成目标检测和参数估计。短相干积累时间条件下, 避免了目标发生距离徙动, 但由于高速目标径向加速度的存在, 会产生多普勒频率徙动, 需利用时频分析方法得到目标的加速度并对多普勒频率徙动进行补偿, 从而完成目标的检测和参数估计。因此, 在不同的相干积累时间条件下, 实现高速目标的检测是本文研究的重点, 为后续展开实地测试提供理论基础。

1 波形参数

线性调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)波形如图1所示, 图中 $S_t(t)$ 为发射信号, $S_r(t)$ 为相应的接收信号。对回波信号进行匹配滤波, 得到第 m 个扫频周期($m=1, 2, \dots, M$)的差频信号为:

$$S_1(m, t) = A_1 \cos 2\pi(f_{1,m}t + \phi_m) \quad (1)$$

式中: A_1 为差频信号的幅度; t 为快时间; ϕ_m 和 $f_{1,m}$ 分别为第 m 个扫频周期的相位和差频频率。

$$\phi_m = \phi_0 + f_d m T \quad (2)$$

$$f_{1,m} = \frac{B}{T} \tau_d + f_d + \frac{2v}{c} B m \quad (3)$$

式中: T 为扫频周期; B 为调制带宽; f_0 为起始频率; τ_d 为发射信号与接收信号之间的延时; $f_d = 2v/\lambda$ 为发射信号与接收信号之间的频偏, 即多普勒频移; c 为光速; v 为目标的径向速度。

对差频信号在快时间域进行快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)可解出距离信息。当 m 个周期内雷达与目标之间的相对运动距离超过一个距离单元时, 便会出现距离徙动, 给检测和参数估计带来巨大困难。假设没有发生距离徙动, 在每一个距离单元上只有相位发生变化, 因此对每一个距离单元在慢时间域进行FFT就能解出速度信息:

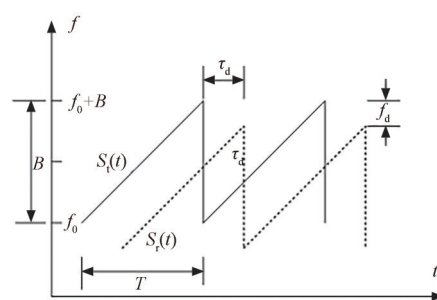


Fig.1 Frequency modulated continuous wave
图1 调频连续波波形

$$Q_n(f) = \int_{-T/2}^{T/2} V_n(t) e^{-j2\pi f t} dt = K_n M T \times \frac{\sin[\pi(f-f_d)MT]}{\pi(f-f_d)MT} \quad (4)$$

式中: $V_n(t)$ 为第 n 个距离元的雷达回波数据; K_n 为第 n 个距离元对应的幅度。

同理, 在相干积累时间内, 多普勒频率的变动超过多普勒频率分辨率时, 便会出现多普勒徙动, 也会加大目标检测的难度。

FMICW 与 FMCW 的区别在于, 前者有门控信号的调制, 实现收发分时。门控信号的周期为 T_q , 发射脉宽为 T_p , 则门控信号的占空比为 T_p/T_q 。门控信号会对距离谱造成 $1/T_q$ 的周期性重复, 为避免距离混叠, 最远探测距离 $R_{\max}$ 对应的频率需满足^[20]:

$$\frac{2kR_{\max}}{c} = \frac{R_{\max}}{T\Delta R} < \frac{1}{T_q} \quad (5)$$

式中: $k = B/T$ 为调频斜率; ΔR 为距离分辨率。

周期性的发射脉宽 T_p 存在距离盲区, 为使感兴趣的目标区域盲区较小, 需满足^[20]:

$$R_{\max} \leq \frac{cT_p}{2} \quad (6)$$

2 设计方案

一般情况下, 在相干积累时间内, 目标运动状态可简化为匀加速运动:

$$r_m = r_0 + v_0 t_m + \frac{1}{2} v_1 t_m^2 \quad (7)$$

式中: r_m 为在第 m 个扫频周期的径向距离; r_0 为初始径向距离; v_0 为初始径向速度; v_1 为径向加速度; $t_m = (m-1)T$ 表示慢时间。

本文基于此运动模型展开研究, 变加速运动原理相同, 不再赘述。

2.1 长时间相干积累

假设需要探测目标的最远距离 $R_{\max}$ 为 150 km, 距离分辨率 ΔR 为 1.25 km, 雷达的工作频率 f_0 为 13 MHz, 脉冲宽度的占空比为 50%, 扫频周期个数 M 为 512。此方案允许目标发生距离徙动、多普勒徙动、速度混叠, 则绝大部分波形参数可与海态反演的波形保持一致^[21]。同时为了不发生距离混叠, 根据式(7)可得 $T_p \leq 1$ ms。因此, 得到的波形参数如表 1 所示。该波形可兼顾高速目标探测、慢速目标探测以及海态反演。

设定目标的初始径向速度 v_0 为 -220 m/s, 初始径向距离 r_0 为 15 km, 匀加速度 a_1 为 2 m/s²。由前文推导可知, 该目标在相干积累时间(约 131 s)内会发生距离徙动, 且速度会发生徙动和混叠。仿真该目标的距离时间(Range-slow Time, RT)谱和距离多普勒(Range-Doppler frequency, RD)谱, 结果如图 2 所示。

从图 2(a)可发现, 目标发生了严重的距离徙动, 在相干积累时间内目标的径向距离变化量为 11.7 km, 因此目标徙动了 9 个距离单元, 仿真与理论保持高度一致。从图 2(b)发现, 由于距离和多普勒徙动的存在, 在 RD 谱中目标的能量没有被完全积累起来, 常规目标检测方法如 FFT 将失效, 而 GRFT 可有效解决这一类问题^[22-23]。该方法是在 RT 谱上沿着预设的运动轨迹进行积累, 从最后的积累结果中通过自适应阈值判断目标是否存在, 进一步估计目标运动参数。

图 3 为经过 GRFT 得到的加速度为 2 m/s² 时的三维 RD 谱切片。可以发现, 目标能量被有效积累。通过峰值所在位置可以确定目标的距离为 15 km, 速度为 -220 m/s, 但谱中存在盲速旁瓣的影响, 极大地提高了虚警率, 这也是该方法的一大缺陷。

表 1 长时间相干积累的雷达波形

Table 1 Radar waveforms with long-time coherent accumulation

parameter	value
operating frequency f_0 /MHz	13
sweep period T /s	0.256
sweep bandwidth B /kHz	120
pulse width T_p /ms	1
pulse period T_q /ms	2
number of sweep periods M	512
maximum detection range $R_{\max}$ /km	150
maximum detection velocity $v_{\max}$ /(m·s ⁻¹)	22.5

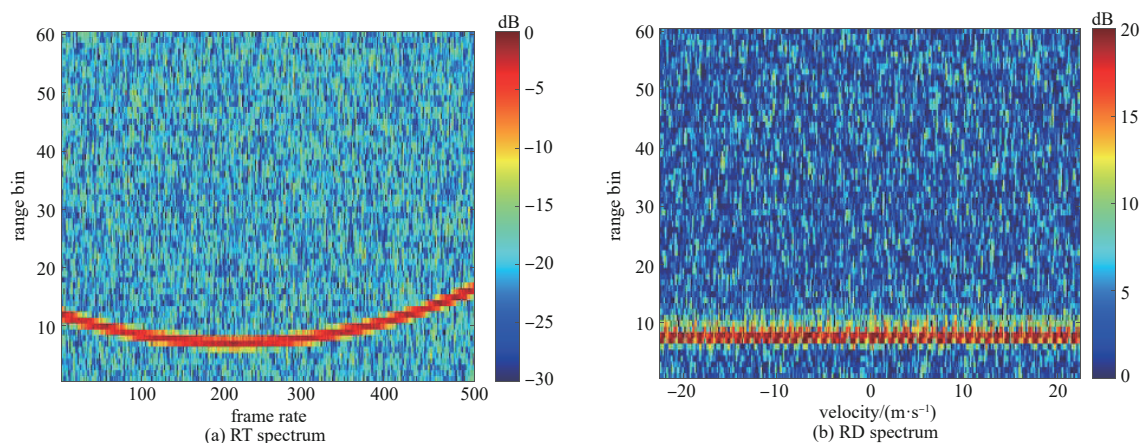


Fig.2 RT spectrum and RD spectrum of long-time coherent accumulation

图2 长时间相干积累的RT谱和RD谱

2.2 短时间相干积累

短时间相干积累的核心思想是在较短的时间内有效检测出目标。由于目标的机动性，以及高频雷达的距离分辨力通常为公里级，而速度分辨力通常为几到几十厘米每秒之间，因此，不允许目标发生距离徙动，但允许目标发生多普勒徙动。则在相干积累周期内避免距离混叠和徙动，除需满足式(5)~(6)外，还需避免多普勒混叠。多普勒频率需满足^[21]：

$$2f_{d,\max} = 2 \times \frac{2v_{\max}}{\lambda} \leq \frac{1}{T} \quad (8)$$

式中： $f_{d,\max}$ 为最大多普勒频率； $\lambda = c/f_0$ 为波长。

假设需探测目标的最远距离 $R_{\max}$ 为 150 km，最大速度 $v_{\max}$ 为 300 m/s，距离分辨力 ΔR 为 6 km，雷达的工作频率 f_0 为 5 MHz，根据约束条件式(5)~(6)、式(8)，得到所需的波形参数如表2所示。该波形可在短时间(12.8 s)内快速预警，是专门针对高速目标设计的。

假设目标的初始径向速度 v_0 为 100 m/s，初始径向距离 r_0 为 60 km，匀加速度 a_1 为 5 m/s²，利用设计的波形进行仿真得到 RD 谱如图4所示。可以发现目标没有发生距离徙动，目标的距离位于第10个距离元位置，但目标的速度维发生了严重的徙动，仿真与理论保持一致。第10个距离元处的多普勒谱为：

$$s = \exp\left(j2\pi \frac{2f_0}{c} \left(v_0 t_m + \frac{1}{2} a_1 t_m^2\right)\right) \quad (9)$$

通过式(9)可以发现，目标的多普勒谱与其速度和加速度有关，且多普勒频率的展宽由加速度造成。由于多普勒徙动的存在，对图4进行恒虚警检测(Constant False Alarm Rate, CFAR)会存在大量的虚警，且不能准确地估计目标的速度。为提高目标的检测概率，对展宽的多普勒谱进行补偿，可大幅提高目标的信噪比。

$$\hat{s} = s \times \exp\left(-j2\pi \frac{2f_0}{c} \times \frac{1}{2} \hat{a}_1^2 t_m^2\right) \quad (10)$$

式中： $\hat{s}$ 为补偿后的目标多普勒谱； $\hat{a}_1$ 为估计的加速度。

利用速度与时间的变化关系估计目标的加速度。首先采

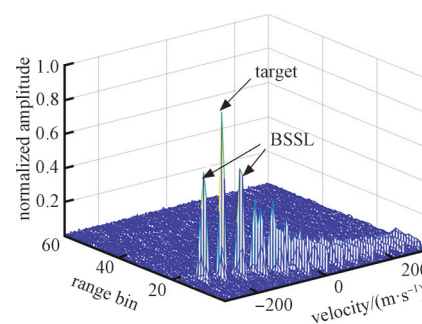
Fig.3 Range-speed spectrum of GRFT ($a_1=2$ m/s²)图3 GRFT的距离-速度三维谱($a_1=2$ m/s²)

表2 短时间相干积累的雷达波形

Table 2 Radar waveforms of short-time coherent accumulation

parameter	value
operating frequency f_0 /MHz	5
sweep period T /s	0.05
sweep bandwidth B /kHz	25
pulse width T_p /ms	1
pulse period T_q /ms	2
number of sweep periods M	256
maximum detection range $R_{\max}$ /km	150
maximum detection velocity $v_{\max}$ /(m·s ⁻¹)	300

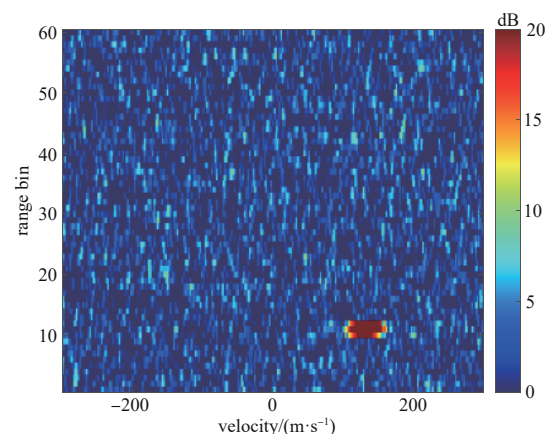


Fig.4 RD spectrum of short-time coherent accumulation

图4 短时间相干积累的RD谱

用时频分析方法得到目标的时频脊线,然后利用贪婪算法对时频脊线进行提取,最后利用最小二乘拟合得到目标的初始径向速度和加速度信息。短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)是最常见的时频分析方法,但由于时间窗长的原因,时间和频率的分辨力不能同时得到提高,从而影响加速度的提取精确度。如图 5(a)所示,此时时间窗长为 128 个扫频周期,可明显看到时频脊线,但分辨力极差,不利于时频脊线的提取。

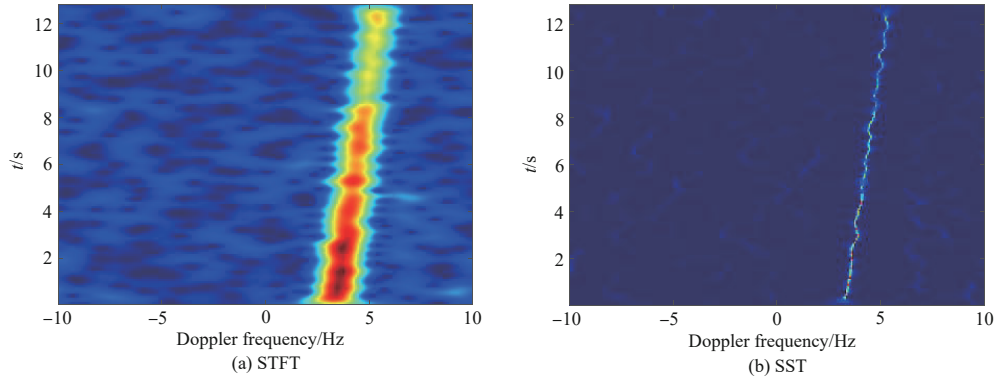


Fig.5 Time-frequency spectrum of STFT and SST

图5 STFT和SST的时频谱

同步挤压变换(Synchro-Squeezed Transform, SST)能够弥补 STFT 的这一缺陷^[24]。SST 表示为:

$$SST(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} STFT(t, \eta) \delta[\eta - \hat{f}(t, f)] d\eta \quad (11)$$

式中: $STFT(t, f)$ 为短时傅里叶变换结果; $\hat{f}(t, f)$ 为短时傅里叶变换的二维瞬时频率估计。

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) h(\tau - t) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (12)$$

$$\hat{f}(t, f) = -i \frac{\partial_t STFT(t, f)}{2\pi STFT(t, f)} \quad (13)$$

式中: ∂_t 为时间的偏导。

SST 通过在频域压缩时频系数聚集能量,属于短时傅里叶变换的后处理工具。经过 SST 处理后目标的时频脊线更加集中,参数估计结果更准确。

选取第 10 个距离单元的射频(Radio Frequency, RT)信号进行 SST 分析。图 5 中可观察到多普勒频率随时间变化而形成的明显脊线,应用贪婪算法成功提取这一时频脊线;然后,利用最小二乘法对时频脊线进行拟合,确定目标的初始速度为 100.2 m/s,加速度为 5.03 m/s²。在此基础上,根据加速度的估计值,采用式(10)对 RT 信号的相位进行补偿。图 6 为相位补偿之后的 RD 谱和速度谱。经过相位补偿,目标能量得到了有效集中,使目标信号的信噪比提升了近 10 dB。这一改进在微弱目标检测中尤为关键,有助于提高目标的检测概率。

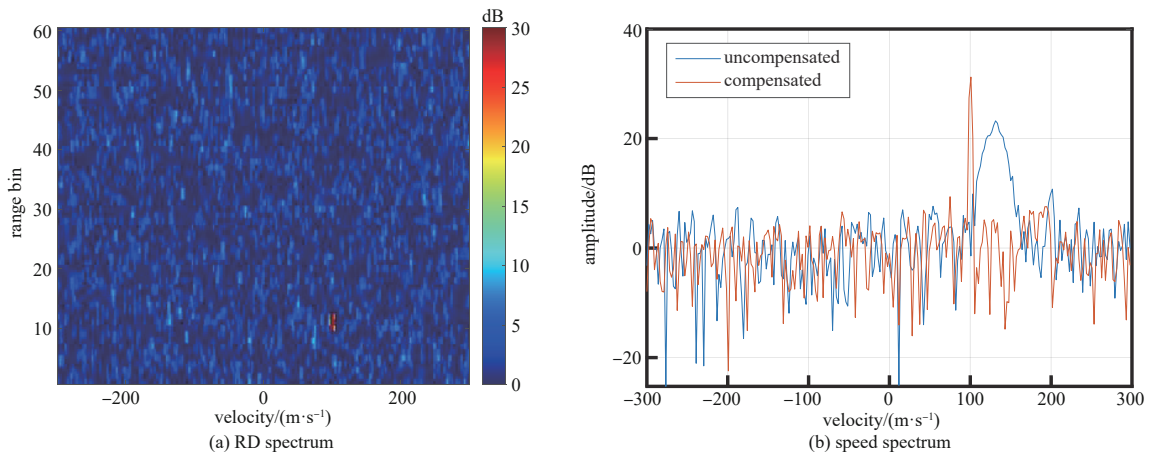


Fig.6 RD spectrum and speed spectrum after phase compensation

图6 相位补偿之后的RD谱和速度谱

3 结论

本文深入研究了单站紧凑型HFGWR在探测飞机目标时面临的挑战。基于FMICW雷达探测原理,推导出波形设计中目标距离与速度的关键约束条件。据此,精心设计了长时间相干积累和短时间相干积累2种FMICW波形,并有效解决了这两种波形在目标检测与参数估计中遇到的技术难题。通过深入的理论分析与数值仿真,验证了紧凑型HFGWR探测高速目标的实际可行性,为后续实地测试奠定了坚实的理论基础。

参考文献:

- [1] DING Zegang, YOU Pengjie, QIAN Lichang, et al. A subspace hybrid integration method for high-speed and maneuvering target detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020, 56(1): 630–644. DOI:10.1109/taes.2019.2919478.
- [2] HE Yongxiang, WU Jun, ZHENG Yaojia, et al. Track defect detection for high-speed maglev trains via deep learning[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022(71): 1–8. DOI:10.1109/tim.2022.3151165.
- [3] ZHANG J A, RAHMAN M L, WU K, et al. Enabling joint communication and radar sensing in mobile networks—a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(1): 306–345. DOI:10.1109/COMST.2021.3122519.
- [4] MALANOWSKI M, KULPA K. Detection of moving targets with continuous-wave noise radar: theory and measurements[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(9): 3502–3509. DOI:10.1109/tgrs.2011.2181521.
- [5] ZHAO Yan, ZHAO Lingjun, LI Chuyin, et al. Pyramid attention dilated network for aircraft detection in SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2021, 18(4): 662–666. DOI:10.1109/lgrs.2020.2981255.
- [6] KHAN R H, POWER D. Aircraft detection and tracking with high frequency radar[C]// Proceedings of International Radar Conference. Alexandria, VA, USA: IEEE, 1995: 44–48. DOI:10.1109/RADAR.1995.522517.
- [7] SHEN Yiyang, LIU Yongtan. Design of complex waveform for detection of ship and aircraft targets by a HF radar[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1998, 5(2): 36–39.
- [8] SHEN Ying, LIU Yongtan. Step pulse train design for high resolution range imaging with Doppler resolution processing[J]. Chinese Journal of Electronics, 1999, 8(2): 196–199.
- [9] 沈一鹰, 刘永坦. 用于探测飞机的多普勒预处理相位编码信号[J]. 系统工程与电子技术, 2000, 22(1): 39–41, 66. (SHEN Yiyang, LIU Yongtan. Phase-coded pulse train with Doppler preprocessing for detection of aircraft[J]. Systems Engineering and Electronics, 2000, 22(1): 39–41, 66.) DOI:10.3321/j.issn:1001-506X.2000.01.013.
- [10] NIKOLIC D, STOJKOVIC N, POPOVIC Z, et al. Maritime over the horizon sensor integration: HFSWR data fusion algorithm[J]. Remote Sensing, 2019, 11(7): 852. DOI:10.3390/rs11070852.
- [11] AL-SUHAIL G, TAHIR F R, ABD M H, et al. Modelling of long-wave chaotic radar system for anti-stealth applications[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2018(57): 80–96. DOI:10.1016/j.cnsns.2017.09.008.
- [12] LIPA B, NYDEN B. Directional wave information from the seasonde[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2005, 30(1): 221–231. DOI:10.1109/joe.2004.839929.
- [13] GURGEL K W, ANTONISCHKI G, ESSEN H, et al. Wellen Radar(WERA): a new ground-wave HF radar for ocean remote sensing[J]. Coastal Engineering, 1999, 37(3/4): 219–234. DOI:10.1016/s0378-3839(99)00027-7.
- [14] HAMMOND T M, PATTIARATCHI C B, ECCLES D, et al. Ocean surface current radar(OSCR) vector measurements on the inner continental shelf[J]. Continental Shelf Research, 1987, 7(4): 411–431. DOI:10.1016/0278-4343(87)90108-7.
- [15] QIAO Xiaolin, LIU Yongtan. Ship detection in heavy sea clutter echoes and man-made radio noise environment for an on-shore HF ground wave frequency agile radar[C]// IEEE International Conference on Radar. Arlington, VA, USA: IEEE, 1990: 34–37. DOI:10.1109/RADAR.1990.201133.
- [16] 吴世才, 柯亨玉. 高频地波雷达OSMAR2000通过验收[J]. 电子学报, 2001, 29(5): 584. (WU Shicai, KE Hengyu. High frequency ground wave radar OSMAR2000 has passed acceptance inspection[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(5): 584.) DOI:10.3321/j.issn:0372-2112.2001.05.040.
- [17] TIAN Y, WEN B, ZHOU H. Measurement of high and low waves using dual-frequency broad-beam HF radar[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(9): 1599–1603. DOI:10.1109/lgrs.2014.2301837.
- [18] TIAN Yingwei, WEN Biyang, ZHOU Hao, et al. Wave height estimation from first-order backscatter of a dual-frequency high frequency radar[J]. Remote Sensing, 2017, 9(11): 1186. DOI:10.3390/rs9111186.
- [19] TIAN Yingwei, TIAN Zhen, ZHAO Jiurui, et al. Wave height field extraction from first-order Doppler spectra of a dual-frequency wide-beam high-frequency surface wave radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(2): 1017–1029. DOI:10.1109/tgrs.2019.2942481.

- [20] 吴世才,杨子杰,文必洋,等. 高频地波雷达信号波形分析[J]. 武汉大学学报(理学版), 2001,47(5):519-527. (WU Shicai, YANG Zijie,WEN Biyang,et al. Waveform analysis for HF ground wave radar[J]. Journal of Wuhan University, 2001,47(5):519-527.) DOI:10.3321/j.issn:1671-8836.2001.05.002.
- [21] 田应伟. 双频全数字高频海洋雷达研制及相关问题研究[D]. 武汉:武汉大学, 2016. (TIAN Yingwei. Dual-frequency fully-digital HF ocean radar: development and research on related issues[D]. Wuhan,China:Wuhan University, 2016.)
- [22] LI X L,SUN Z,YEO T S,et al. STGRFT for detection of maneuvering weak target with multiple motion models[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019,67(7):1902-1917. DOI:10.1109/tsp.2019.2899318.
- [23] XU Jia,PENG Yingning,XIA Xianggen. 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. DOI:10.1109/taes.2011.5751251.
- [24] REHMAN N U,AFTAB H. Multivariate variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2019,67(23):6039-6052. DOI:10.1109/tsp.2019.2951223.

作者简介:

刘 赣(1995-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为雷达目标检测与跟踪、微波无源器件设计、雷达信号处理 .email:liugan@whu.edu.cn.

田应伟(1989-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为高频雷达系统及雷达信号处理.

文必洋(1963-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为高频/超高频雷达系统及信号处理.

马盛波(1999-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为双基地目标跟踪.

(上接第494页)

作者简介:

李兰斌(1993-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹应用技术研究 .email:lilanbin@live.com.

朱刚贝(1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为时间分辨与超快光谱研究.

金 晓(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为加速器物理及技术研究.

杨兴繁(1969-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为加速器物理及技术研究.

黎 明(1968-), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为加速器物理及技术研究.

吴 岱(1986-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为加速器物理及技术研究.

李 鹏(1984-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹技术研究.

王伟俊(1993-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为太赫兹技术研究.

马 帅(1991-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为加速器物理束流诊断、加速器控制系统.

周 奎(1988-), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为超导射频加速腔技术研究.