

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2025.05.002

基于时空统一补偿的天基分布式雷达 动目标相参合成方法

张晓波¹, 李相海², 徐星苑², 高翔², 杨志伟²

(1. 中国电子科学研究院, 北京 100041; 2. 西安电子科技大学雷达信号处理全国重点实验室, 陕西西安 710071)

摘要: 本文面向天基分布式雷达对高速机动目标的探测需求, 针对平台空间位置差异和目标高速机动特性导致的回波距离走动和多普勒跨越问题, 提出了天基分布式雷达对空间高速机动目标的时空二维相参积累方法。本文基于回波时间-空间相位历程设计了分布式雷达节点间和节点内的时空二维联合补偿函数, 将节点空间合成补偿与节点内目标运动补偿纳入统一框架。首先, 建立分布式一发多收等效为单节点自发自收的等效补偿函数模型, 通过包络距离修正和空间相位差的补偿, 将分布式各节点的回波时域过程完全统一, 从而实现回波空间相参积累。其次, 进行节点内目标回波的时域二维走动修正, 实现高速机动目标的时域脉冲相参积累。为提高计算效率, 在GRFT的基础上把目标相参积累问题转换为目标角度、速度和加速度等参数估计问题, 实现天基分布式雷达对空间目标的积累检测。最后, 通过仿真实验对方法的有效性进行了评估, 仿真结果证明该方法能够准确估计目标参数, 相参积累增益与理论分析吻合。

关键词: 天基分布式雷达; 相参积累; 高速机动目标; 扩展GRFT

中图分类号: TN959.73

文献标志码: A

文章编号: 1672-2337(2025)05-0482-09

引用格式: 张晓波, 李相海, 徐星苑, 等. 基于时空统一补偿的天基分布式雷达动目标相参合成方法[J]. 雷达科学与技术, 2025, 23(5):482-490.

ZHANG Xiaobo, LI Xianghai, XU Xingyuan, et al. A Method for Coherent Synthesis of Moving Targets Based on Spatio-Temporal Unified Compensation in Space-Based Distributed Radar[J]. Radar Science and Technology, 2025, 23(5):482-490.

A Method for Coherent Synthesis of Moving Targets Based on Spatio-Temporal Unified Compensation in Space-Based Distributed Radar

ZHANG Xiaobo¹, LI Xianghai², XU Xingyuan², GAO Xiang², YANG Zhiwei²

(1. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China;

2. National Key Laboratory of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: This study addresses the detection requirements of space-based distributed radar system for high-speed maneuvering space targets. Aiming at the problems of echo range migration and Doppler crossing caused by platform spatial position difference and target high-speed maneuvering characteristics, a spatio-temporal two-dimensional coherent accumulation method for space-based distributed radar is proposed. Based on the spatio-temporal phase history of target echoes, the algorithm designs a spatio-temporal joint compensation function between and within distributed radar nodes and incorporates the node spatial synthesis compensation and intra-channel target motion compensation into a unified processing framework. Firstly, an equivalent compensation function model is established under the distributed one-transmitter and multi-receiver configuration, emulating a monostatic transceiver mode. Through envelope range correction and spatial phase difference compensation, the echo time-domain process of distributed nodes is completely unified, so as to achieve spatial coherent accumulation. Secondly, the time domain two-dimensional walk correction of the target echo in the node is carried out to realize the time domain pulse coherent accumulation of the high-speed maneuvering target. To enhance the computational efficiency, on the basis of generalized Radon-Fourier transform (GRFT), the target coherent accumulation problem is transformed into parameter estimation problems such as target angle, velocity, and acceleration, thereby the accumulation detection of space-based distributed radar for space targets is realized. Finally, the effectiveness of the method is evaluated by simulation experiments. The simulation results show that the method can

收稿日期: 2025-06-14; 修回日期: 2025-09-01

基金项目: 雷达信号处理全国重点实验室支持计划项目(No. JKW202404); 国家自然科学基金青年项目(No. 62501454)

accurately estimate the target parameters, and the coherent accumulation gain is consistent with the theoretical analysis.

Key words: space-based distributed radar; coherent accumulation; high-speed maneuvering target; extended GRFT

0 引言

随着航空航天技术的高速发展,空间轨道飞行器对空间安全构成威胁,对现有的探测系统带来巨大的挑战^[1]。天基雷达可实现大范围探测,在空间高速运动目标探测应用中具有巨大的优势^[2]。与单基地雷达相比,天基分布式雷达可以通过时间-空间两维积累来获得更高的目标信噪比(SNR),推远雷达探测距离^[3]。利用时间与空间联合相参积累可等效扩大虚拟孔径,获得更高的目标测速和测角精度,显著提升对运动目标的探测能力^[4-5]。但是空间分布式雷达在探测弱小散射目标时仍面临诸多问题。空间目标通常 RCS 较小,雷达回波信号能量极低,需要通过时间、空间多维度相参积累提升目标信噪比,但目标参数未知条件下的积累检测面临巨大挑战^[6-7]:一方面,卫星平台与目标之间存在高速相对运动导致目标回波出现“跨距离-跨多普勒”现象^[8];另一方面,分布式卫星构型动态变化,且星间基线较长,导致不同分布式雷达节点间的斜距差和相位调制规律存在较大差异,增加了目标相参合成处理的难度。因此,天基分布式雷达对空间微弱目标进行探测处理时,相参积累的难点在于参数未知条件下的包络对齐和相位差补偿。

针对弱小散射目标探测难题,典型的方法是通过增加相参积累时间以获得高 SNR,从而完成目标检测。空间目标与雷达存在复杂的相对运动,导致脉压后包络峰值偏移(即跨距离现象)和多普勒中心频率随脉冲变化(即跨多普勒现象)的问题,进而导致传统的 MTD 方法目标积累能量损失较大甚至失效。针对目标高速运动导致的距离走动问题,有学者提出 KT、RFT 和 AR-MTD 等方法^[9-14],其核心思路是对回波数据沿距离维进行抽取操作来校正目标距离走动,然后通过 FFT 实现目标快速积累检测。但是这类方法的局限是对目标的加速度、加加速度等高阶运动补偿效果不佳。针对存在径向加速度的目标长时间积累问题,有

学者提出 SOKT、WVD、LVD、Radon-FrFT 和 GRFT 等算法用于矫正距离弯曲^[15-19]。特别地,对于低 SNR 信号,GRFT 算法具有良好的性能。但该方法的局限是对于高阶运动目标需要进行高维参数空间搜索,运算复杂度较高。

针对天基分布式雷达时间-空间两维相参合成难题,有学者分析了不同雷达节点之间距离和相位偏差的影响^[20]。其结果表明,分布式雷达时间和空间二维相参合成需要对节点间二维偏差进行矫正和补偿,从而减小信号包络走动和相位调制带来的相参积累损失。针对这类目标回波相参合成问题,通常采用基于目标参数估计和积累补偿的手段,消除目标距离走动和多普勒调制。常规的参数估计和补偿算法采用先时域后空域的分级补偿思路,但是,对于低 SNR 目标,分级补偿处理的相参损失会累积并放大。文献[6]结合多站定位原理,建立了目标在笛卡尔坐标空间的参数化运动模型,通过求解高维参数集来实现目标参数估计与相参积累。但是该方法对分布式构型,阵列基线长度等有着严格的要求,对系统设计要求更高,增加了信号处理难度,并带来性能损失。此外,上述方法在天基分布式雷达探测应用中存在相位历程模型失配,参数估计精度和相参积累效率严重恶化等问题。针对天基分布式雷达目标运动的复杂特性与低 SNR 条件下的时间-空间两维相参合成难题,本文提出基于扩展 GRFT 的联合多节点和多脉冲的时空二维积累补偿方法。

本文提出的基于扩展 GRFT 的天基分布式雷达运动目标时空联合相参积累方法,实现了目标空间角度、速度和加速度等参数估计与相参积累。创新之处在于设计了空间和时间二维联合补偿校正函数,将目标距离、角度、速度和加速度等参数估计纳入统一框架,实现时空二维相参积累。首先建立等效补偿函数模型将分布式一发多收等效为单节点自发自收;然后,通过包络平移和空间相位补偿,将分布式各节点的回波时域过程变统一,进而完成接收节点空间相参合成;最后,在空间合

成的基础上进行节点内目标回波的时域两维走动矫正,完成高速机动目标的时域脉冲相参积累。此外,为提高计算效率,本文在GRFT的基础上扩展了对目标空间参数的搜索估计,同时进行节点间和节点内的联合补偿,实现多个节点间目标信号的相参积累,有效提升探测性能。

1 分布式相参模型

天基分布式雷达是由多个编队卫星通过信号级协同完成目标探测任务,图1给出了由 K 个节点组成的天基分布式雷达几何示意图。

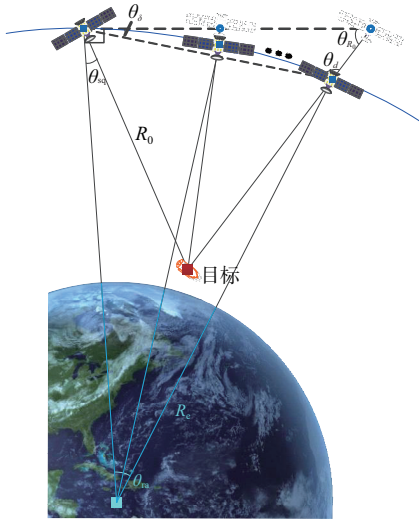


图1 天基分布式雷达几何概念示意图

假设第 i 个节点初始空间位置为 $\mathbf{P}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$,速度为 $\mathbf{V}_i = [V_{xi}, V_{yi}, V_{zi}]^T$,目标初始空间位置为 $\mathbf{P}_{tar} = [x_t, y_t, z_t]^T$,速度为 $\mathbf{V}_{tar} = [V_{xt}, V_{yt}, V_{zt}]^T$ 。则第 i 个雷达节点到目标的发射、接收斜距矢量可表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_u(t_m) &= \mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{tar} + (\mathbf{V}_i - \mathbf{V}_{tar})t_m \\ \mathbf{R}_j(t_m) &= \mathbf{P}_j - \mathbf{P}_{tar} + (\mathbf{V}_j - \mathbf{V}_{tar})t_m \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $t_m = m/PRF$ ($m = 1, 2, \dots, N_a$)为慢时间, N_a 为一个相干处理间隔(CPI)内的脉冲数。第 j 个节点接收到的第 i 个节点发射的目标回波双程斜距为

$$R_{ij}(t_m) = \left\| \mathbf{R}_u(t_m) \right\| + \left\| \mathbf{R}_j(t_m) \right\| \quad (2)$$

本文以基带波形采用LFM信号为例,假设第 j 个节点接收的来自第 i 个节点发射的信号,给出回

波经过脉压后的信号模型:

$$\begin{aligned} s_{ij}(\hat{t}, t_m) &= A \operatorname{sinc} \left(B \left(\hat{t} - \frac{R_u(t_m) + R_j(t_m)}{c} \right) \right) \\ &\exp \left(-j2\pi f_c \frac{R_u(t_m) + R_j(t_m)}{c} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, A 表示目标信号幅度, f_c 表示系统的中心频率, $R_u(t_m)$ 和 $R_j(t_m)$ 分别为发射、接收斜距矢量 $\mathbf{R}_u(t_m)$ 和 $\mathbf{R}_j(t_m)$ 的模值。由以上信号模型可见,分布式雷达接收节点之间的斜距历程差将导致各节点接收的回波信号存在包络时延和相位差。因此,补偿各节点的斜距历程差是分布式雷达相参合成的核心。对于同一发射信号,节点 j_1 与节点 j_2 接收到的目标回波信号斜距差表示为

$$\begin{aligned} \Delta R_{j_1 j_2}(t_m) &= R_{j_1}(t_m) - R_{j_2}(t_m) = \\ &\left\| \mathbf{P}_{j_1} - \mathbf{P}_{tar} + (\mathbf{V}_{j_1} - \mathbf{V}_{tar})t_m \right\| - \\ &\left\| \mathbf{P}_{j_2} - \mathbf{P}_{tar} + (\mathbf{V}_{j_2} - \mathbf{V}_{tar})t_m \right\| \end{aligned} \quad (4)$$

借鉴多项式斜距模型,本文以第1个节点发射为例,对其接收的第 i 个节点的斜距历程进行泰勒展开:

$$\begin{aligned} R_{1i}(t_m) &= R_{1i}(t_m) + R_{ii}(t_m) = \\ &R_0 + v_r t_m + 0.5 a_r t_m^2 + \dots \end{aligned} \quad (5)$$

式中, t_m 表示方位慢时间, v_r 为目标径向速度, a_r 为目标径向加速度。

根据以上几何模型与信号模型可知,制约天基分布式雷达相参合成的关键是各个分布式节点到目标的斜距历程具有时变和空变的特点。对于单节点内的数据,由于目标径向速度、加速度甚至更高阶运动参数的影响,将会导致回波包络峰值所处距离和多普勒频率随慢时间变化,即距离走动和多普勒扩散;而各节点间的回波信号的斜距差存在对分布式空间基线、目标空间角度的依赖性。总之,天基分布式雷达时间-空间两维相参合成的难点在于目标信号的“跨距离-跨多普勒”问题,是由目标运动和平台空间位置差异共同引入的,在回波信号中目标的相位历程与时域运动和空域角度耦合混叠。并且,天基分布式雷达实现相参合成的难点在于目标的角度及运动参数无法预知。因此,设计精准的回波包络和相位补偿函数是实现分布式相参合成的关键。

2 基于时空统一补偿的天基分布式雷达运动目标相参合成方法

天基分布式雷达探测空间目标时,平台与目标之间的高速相对运动导致其斜距历程呈现出二阶甚至高阶运动过程,在雷达回波信号中表现为跨距离、跨多普勒现象。特别是空间目标通常RCS较小,雷达回波信号能量极低,需要通过时间、空间多维度相参积累提升目标信噪比。针对这类目标回波,通常采用基于目标参数估计和积累补偿的手段,消除目标距离走动和多普勒调制。常规的参数估计和补偿采用先时域后空域的分级补偿思路,但是,对于低SNR目标,分级补偿处理的相参损失会累积并放大。为此,本文提出了基于扩展GRFT的时间和空间联合估计补偿的分布式雷达相参积累方法。核心是基于回波时间-空间相位历程,设计时空二维补偿函数同时实现目标相参积累及其角度、速度和加速度等参数的估计。首先,本文将各接收节点间的空间相位差补偿转化为对空间角度参数估计,可避免对星历数据等先验依赖。然后,结合GRFT算法将目标距离、角度、速度和加速度等参数估计纳入统一框架,实现回波数据节点间和节点内二维联合补偿校正。最后,通过先空域补偿后时域包络相位校正的方式避免高维参数搜索,降低算法运算复杂度。本文算法的流程图如图2所示。

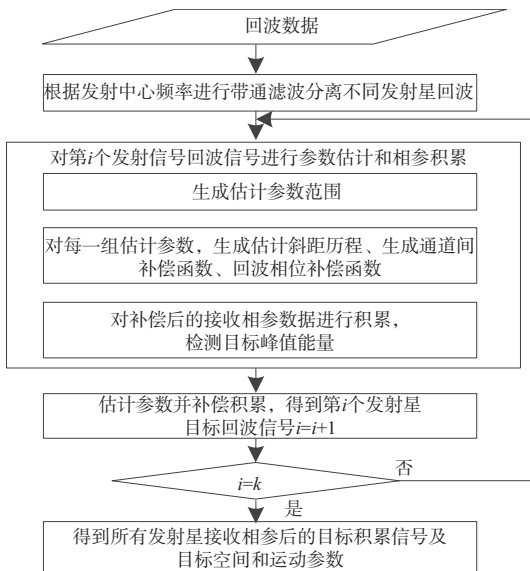


图2 本文算法流程图

本文所提的基于时间和空间相差联合估计补偿的分布式雷达目标相参积累方法,核心思想是以第1个节点的中心时刻为统一时间基准,将时间维度的目标运动距离历程和空间维度的阵列波程差统一用时延差 \hat{t} 来表示。通过构造参量化的时延差补偿函数,将分布式各节点的空域波程差补齐的同时实现回波时域过程统一。进而沿着距离维进行目标回波信号的抽取,并补偿二次相位,将目标时域的包络和相位对齐,即可利用FFT完成目标积累。该过程将传统的时域GRFT算法扩展为时空联合估计参数并补偿,从而得到目标的速度、加速度以及空间角度参数估计结果:

$$\max_{\hat{t}, \hat{R}_0, \hat{v}_r, \hat{a}_r, \theta_{sq}} \left| \text{FFT} \left[S_c \left(\hat{t}, \hat{R}_0, \hat{v}_r, \hat{a}_r, \theta_{sq} \right) \right] \right|^2 \quad (6)$$

式中, θ_{sq} 为空间角度参数, \hat{v}_r, \hat{a}_r 为时域运动参数。

本文所提的扩展GRFT时空联合相参积累方法,关键在于设计时空二维补偿函数,使得目标信噪比最大化。时空二维补偿函数的构造方式如下:

$$S_c \left(\hat{t}, t_m; \hat{R}_0, \hat{v}_r, \hat{a}_r \right) = \text{IFFT} \left[\sum_j^k \text{FFT} \left[s_j \left(\hat{t}, t_m \right), \hat{t} \right] \cdot H_{sj} \left(f_r, t_m, \hat{R}_0, \hat{\theta}_{sq} \right) \right] \cdot H_T \left(t_m, \hat{a}_r \right) \quad (7)$$

式中,第一项 $H_{sj} \left(f_r, t_m, \hat{R}_0, \hat{\theta}_{sq} \right)$ 为空间补偿函数,在目标空间参数搜索估计过程中将 $\hat{R}_0, \hat{\theta}_{sq}$ 当作搜索参数,并在快时间频率-方位慢时间域构造二维补偿函数 H_{sj} 如下:

$$H_{sj} \left(f_r, t_m \right) = H_{Rj} \left(f_r, t_m \right) \odot H_{Dj} \left(f_r, t_m \right) \quad (8)$$

式中, f_r 表示快时间频域变量, $H_{Rj} \left(f_r, t_m \right)$ 表示包络偏移校正补偿函数, $H_{Dj} \left(f_r, t_m \right)$ 表示相位补偿函数。该补偿函数的作用是通过包络对齐和相位校正,使得每个节点接收到的回波时域过程完全相同。第二项 $H_T \left(t_m, \hat{a}_r \right)$ 为时域补偿函数,需要通过多项式模型构造补偿函数,对目标加速度参数搜索估计实现补偿。下文详细介绍了空间相参补偿函数和时域脉冲补偿函数的具体构建方式,以及时间-空间相位差联合估计补偿的详细推导过程。

2.1 分布式节点空间相参补偿函数

分布式节点空间相参合成需要补偿节点位置

偏移引入的回波包络走动和相位偏差。本文采用分布式雷达一发多收斜距等效模型,利用每个平台与主节点接收斜距之间的差值进行包络时延操作,来自第*i*个节点发射第*j*个节点接收信号的包络偏移校正频域补偿表达式为

$$S_{ij}(f_r, t_m) = FFT[s_{ij}(\hat{t}, t_m), \hat{t}] \cdot H_{ij}(f_r, t_m) \quad (9)$$

式中, $H_{ij}(f_r, t_m)$ 表示包络偏移校正补偿函数:

$$H_{ij}(f_r, t_m) = \exp\{j2\pi f_r [R_{ij}(t_m) - R_{i1}(t_m)]/c\} \quad (10)$$

其中, $R_{ij}(t_m) - R_{i1}(t_m)$ 表示第*i*个节点发射第*j*个节点接收信号的空间位置差导致的斜距差。

每个卫星独立完成距离包络对齐后,可认为杂波在距离维已完全对齐,信号仅存在空间角度导致的相位差。其中,相位差中的线性相位将造成目标多普勒中心频率偏移,二阶项将造成多普勒频率的扩展。天基雷达对目标的探测距离较远,通常可满足远场条件,因而不同节点间的相位差仅和目标的角有关,对信号的相位补偿可直接在频域操作:

$$\hat{S}_{ij}(f_r, t_m) = S_{ij}(f_r, t_m) \cdot H_{Dj}(f_r, t_m) \quad (11)$$

式中, $H_{Dj}(f_r, t_m)$ 表示相位补偿函数:

$$H_{Dj}(t_m) = \exp\{j2\pi [R_{ij}(t_m) - R_{i1}(t_m)]/\lambda\} \quad (12)$$

补偿后得到回波,进行叠加得到分布式雷达接收相参回波信号:

$$S_i(\hat{t}, t_m) = \sum_j^K \hat{S}_{ij}(f_r, t_m) \quad (13)$$

将接收相参回波信号变换至距离时域:

$$s_i(\hat{t}, t_m) = IFFT[S_i(f_r, t_m), f_r] \quad (14)$$

由前面的包络和相位两步补偿可以看出,进行节点间距离和相位补偿关键是如何准确计算节点间的斜距历程差。针对不同接收节点,本文采用直线轨迹近似的方式计算斜距历程差。首先将分布式卫星平台近似为直线轨迹,计算每个节点到目标的近似斜距 R'_i , 之后计算真实轨迹与目标之间斜距和近似斜距的差值 ΔR_i , 最后得到每个节点的真实斜距 R_{ni} 。

如图3所示,在跟飞构型下,将第1个节点卫星设为主节点,并将其初始斜距设为 R_0 , 则节点*i*

的近似斜距历程表示为

$$R'_i(t_m) = \sqrt{R_0^2 + d_i^2 - 2R_0 d_i \sin \theta_{sq}} \quad (15)$$

式中, d_i 为节点*i*到主节点初始位置之间的距离, θ_{sq} 为斜视角。根据探测几何关系,在蓝色虚线构成的三角形中利用正弦定理,可推导出近似斜距与真实斜距差 ΔR_i 的表达式:

$$\Delta R_i(t_m) = d_i \cdot \sin \theta_\delta / \sin \theta_d \quad (16)$$

式中, θ_δ 为对应卫星真实轨迹与虚拟轨迹的角度偏差, $\theta_\delta = \theta_m / 2$, θ_m 为当前节点与主节点之间轨道弧长所对应的地心角,计算公式为 $\theta_m \approx d_i / (H + R_e)$, R_e 为地球半径。

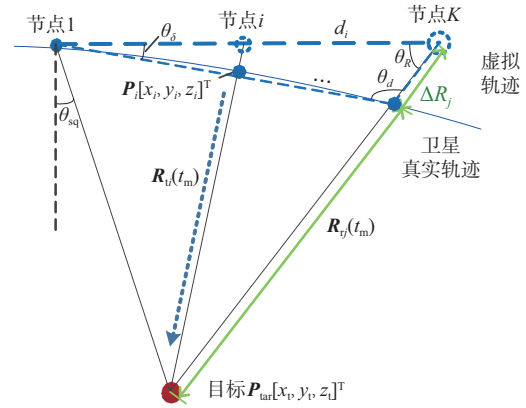


图3 天基分布式雷达探测空间目标几何示意图

此外,式(16)中的参量 θ_d 表示卫星真实轨迹与斜距矢量的夹角:

$$\theta_d = 180 - \theta_R - \theta_\delta \quad (17)$$

$$\theta_R = \arccos\left[\frac{d_i - R_0 \sin \theta_{sq}}{R'_i}\right] \quad (18)$$

式中, θ_R 为对应卫星虚拟轨迹与斜距矢量的夹角。

2.2 时域脉冲相参补偿函数

天基分布式雷达探测空间目标时,平台与目标之间的高速相对运动导致其斜距历程呈现出二阶甚至高阶运动过程,在雷达回波信号中表现为跨距离、跨多普勒现象。时域过程的补偿思路是将目标斜距历程建模为多项式模型,然后通过逐级参数搜索的方式补偿距离走动和多普勒调制。本文以空间轨道目标为例,在机动性较小的情况下将斜距历程近似到二阶,与之对应的时延模型可表示为

$$\hat{\tau} = \frac{2}{c} \left(\hat{R}_0 + \hat{v}_r t_m + 0.5 \hat{a}_r t_m^2 \right) \quad (19)$$

因此,可依据时延模型构造时域脉冲补偿函数:

$$H_D(t_m) = \exp \left(j2\pi \frac{a_r t_m^2}{\lambda_i} \right) \quad (20)$$

上式中,通过对目标加速度参数搜索即可完成目标时域脉冲积累,更高阶运动补偿原理类似,本文不作过多展开。

2.3 扩展GRFT时空联合相参积累方法处理流程

本文提出了基于扩展GRFT的时间和空间联合估计补偿的分布式雷达相参积累方法。将时间维度的目标运动距离历程和多节点空间维度的波程差,统一归到回波信号的包络时延和相位中,通过包络校正和相位补偿实现目标相参积累。本文所提算法的详细步骤流程如下:

输入:

- 1) 系统核心参数,包括卫星轨道高度、基线长度、波束中心斜视角等;
- 2) 多节点-多脉冲原始回波数据;
- 3) 加速度参数搜索精度。

步骤1: 数据预处理,对各节点数据进行通道带内误差均衡与平台运动补偿;

步骤2: 基于空间斜距差补偿包络偏移和相位差,完成空间相参合成;

1) 利用公式(16)通过空间基线与目标角度构造回波空间合成补偿函数;

2) 利用空间补偿函数对回波进行包络对齐和相位补偿;

3) 利用公式(9)将补偿校正后的多节点数据进行空间合成;

步骤3: 利用公式(20)构造时域相位补偿函数,对空间相参合成后的回波进行时域相位补偿和脉冲积累;

步骤4: 搜索目标加速度参数,在目标积累信噪比最大化准则下获得最终的目标参数估计结果。

输出: 多节点空时二维联合相参积累检测结果与参数估计值。

3 仿真实验

本文结合天基分布式雷达动目标探测的斜距随时间/空间的动态特性,将目标时间-空间二维相参积累问题整体考虑,提出了实现目标角度、速度和加速度等参数估计与相参积累的统一框架。前文介绍了时间和空间联合估计补偿的分布式雷达相参积累方法的基本原理与实现步骤,本节通过仿真实验证明所提方法的有效性。考虑采用由3个节点构成的分布式雷达系统,具体系统参数如表1所示,动目标运动参数如表2所示。

表1 分布式雷达系统参数

参数	参数值	参数	参数值
载频 f_c	0.5 GHz	脉宽 T_p	30 μ s
带宽 B	5 MHz	采样率 f_s	6 MHz
重频 PRF	1 200 Hz	脉冲数 N_a	360

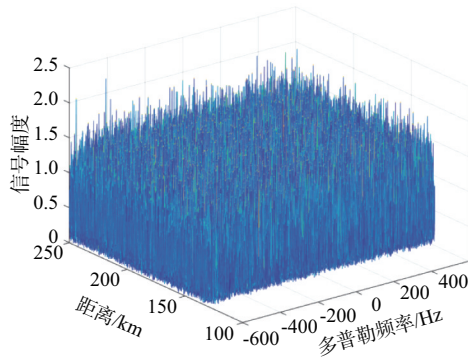
表2 动目标运动参数

目标	初始斜距/ km	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	角度/ $(^\circ)$
1	150.599	4 026	203.5	0.220
2	160.599	4 026	203.5	0.211
3	175.599	4 176	203.5	0.197

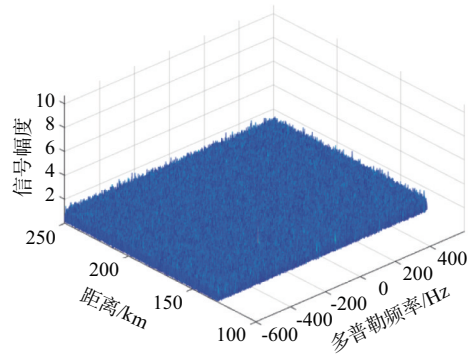
3.1 目标相参处理仿真结果

下面通过本文所提方法进行目标参数估计与目标相参积累处理,用于分析所提算法性能。图4(a)是单节点补偿前的目标距离-多普勒图,可看出对于快速运动且存在机动的空间目标,不对目标进行包络走动和二次相位补偿无法完成脉冲积累;图4(b)是单节点补偿后的目标距离-多普勒图;图4(c)是多节点时空二维相参合成后的积累结果,目标完成相参积累后在距离-多普勒域形成峰值。对比图4(a)~(c)可以看出,采用本文方法处理后目标信噪比获得极大程度改善,证明本方法可实现分布式雷达运动目标时空二维相参合成。目标速度参数估计结果如图5所示,目标速度参数搜索过程会在径向速度-加速度二维参数空间形成尖峰状响应,峰值位置对应为目标参数的估计值。图6(a)是不含噪声条件下的目标回波包络走动仿真结果,可看出目标存在很明显的跨距离走动现象;图6(b)是多节点时空二维相参合成后

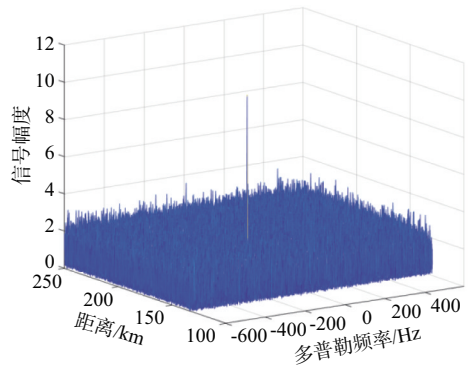
的多目标积累检测结果,与之相应的目标参数估计结果如表 3 所示,可以看出,本文方法能够准确地估计目标参数。



(a) 单节点补偿前距离-多普勒图



(b) 单节点补偿后距离-多普勒图



(c) 多节点相参合成后距离-多普勒图

图 4 单目标仿真结果

表 3 动目标参数估计结果

目标	初始斜距/ km	速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	加速度/ ($m \cdot s^{-2}$)	角度/ $(^\circ)$
1	150.6	4 025.98	203.498	0.245
2	160.6	4 275.98	203.498	0.216
3	175.599	4 175.98	203.498	0.201

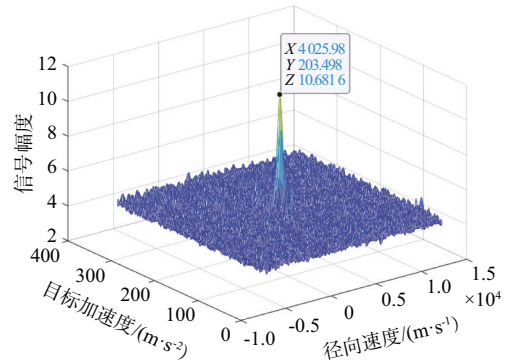
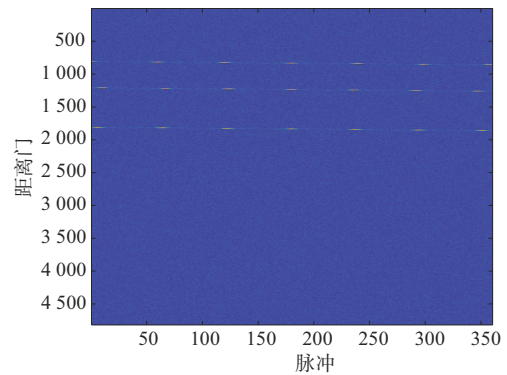
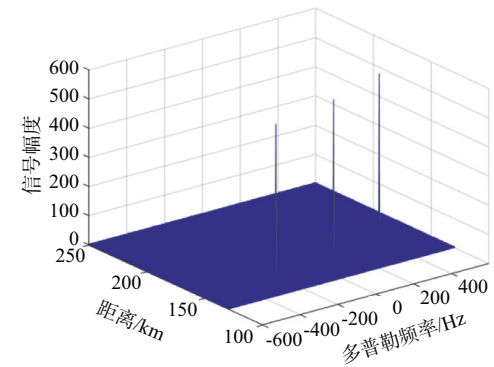


图 5 目标径向速度-加速度参数估计结果



(a) 目标距离走动仿真结果图



(b) 多节点相参合成后距离-多普勒图

图 6 多目标仿真结果

对于多个不同距离、速度、角度的目标,采用基于 GRFT 的时空联合相参积累方法可以准确估计目标的参数,包括初始斜距、速度、加速度和空间锥角。经过时间-空间二维联合矫正补偿,得到二维积累后的目标能量峰值,实现微弱目标信号相参积累。该方法在实现目标相参积累的同时,也可准确估计目标的距离、速度、角度参数,便于后续目标跟踪等处理,从而提升分布式雷达对微弱目标的探测能力。

3.2 算法复杂度分析

对于空间分布式雷达目标时空二维相参积累来说,处理算法的运算资源主要消耗在包络走动补偿和多普勒相位补偿过程,特别是针对高速机动目标需要完成高阶参数搜索。下面以GRFT算法的频域实现为例,分析其运算复杂度。不失一般性,假设雷达快时间采样点数为 N_r ,慢时间脉冲采样点数为 N_a ,空间角度参数搜索次数 N_s ,目标运动一次项搜索次数 N_1 ,二次项搜索点数为 N_2 ,三次项搜索点数为 N_3 ,主要步骤的运算量如下:

1) 回波数据时域到频域的变换操作,单节点需要完成 N_a 次 N_r 点FFT运算,其中包括 $2N_a N_r \log_2 N_r$ 乘法运算与 $3N_a N_r \log_2 N_r$ 次加法运算,则 K 个节点运算量为 $2KN_a N_r \log_2 N_r$ 次乘法与 $3KN_a N_r \log_2 N_r$ 。

2) 回波数据距离包络矫正操作,需要进行 $4KN_s N_1 N_2 N_3 \cdot N_r N_a$ 次乘法运算与 $2KN_s N_1 N_2 N_3 \cdot N_r N_a$ 次加法运算。

3) 回波数据频域到时域的逆变换操作, K 个节点运算量为 $2KN_a N_r \log_2 N_r$ 次乘法与 $3KN_a N_r \log_2 N_r$ 。

4) 对数据多普勒相位补偿操作,需要进行 $4N_2 N_3 \cdot N_r N_a$ 次乘法运算以及 $2N_2 N_3 \cdot N_r N_a$ 次加法运算。

5) 数据变换到距离-多普勒域,需要进行 $2N_r N_a \log_2 N_r$ 次乘法运算与 $3N_r N_a \log_2 N_r$ 次加法运算。

综上,本文所提算法的总运算复杂度为

$$2(2K+1) \cdot N_r N_a \log_2 N_r + (4KN_s N_1 N_2 N_3 + 4N_2 N_3) \cdot N_r N_a \quad (21)$$

由以上分析可知,本文所提方法的运算资源消耗集中在参数搜索过程,工程应用中可采用先空域搜索再时域搜索的方式,降低运算量。

4 结束语

本文提出了一种时间-空间二维联合矫正补偿的目标相参积累方法,实现目标角度、速度和加速度等参数估计与相参积累,可用于天基分布式雷达高速机动目标积累检测。该方法结合天基分布式雷达动目标探测的斜距随时间/空间的动态特性,将目标时间-空间二维相参积累问题整体考虑,

设计出了包络校正和相位补偿的时空二维补偿函数。首先,构造与目标角度参数有关的补偿函数实现各节点回波包络对齐,并通过相位补偿实现各节点空间相参合成。然后,利用扩展GRFT算法对合成后的回波进行距离走动和多普勒扩展补偿。最终,在最大化目标信噪比条件下实现目标时空二维相参合成,同时完成目标空间角和运动参数估计。仿真实验证明了所提方法的有效性,所提方法能够准确估计动目标参数并实现目标相参积累信噪比得益最大化,可提升天基分布式雷达高速机动目标检测性能。此外,本文方法的运算效率还可以进一步提高,未来的工作将进一步研究降低算法计算复杂度的快速实现算法。

参考文献:

- [1] 孟二龙,高桂清,董浩,等.武器装备智能化发展思考[J].兵工自动化,2021,40(6):12-15.
- [2] 孙旭,范明意,张佳佳,等.星载分布式雷达相参合成效率随机误差影响分析[J].雷达科学与技术,2025,23(3):343-348.
- [3] 鲁耀兵,张履谦,周荫清,等.分布式阵列相参合成雷达技术研究[J].系统工程与电子技术,2013,35(8):1657-1662.
- [4] 吴翔宇.空间分布式相参雷达回波建模及快速仿真方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2024.
- [5] 李相海.空间分布式雷达地形起伏杂波抑制与动目标参数估计方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2022.
- [6] WANG Mingxing, LI Xiaolong, GAO Longji, et al. Signal Accumulation Method for High-Speed Maneuvering Target Detection Using Airborne Coherent MIMO Radar [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2023, 71:2336-2351.
- [7] LI Xianghai, YANG Zhiwei, HE Shun, et al. Nonhomogeneous Clutter Suppression Based on Terrain Elevation Interferometric Phase Compensation in Multi-Satellite Formation Systems[J]. Digital Signal Processing, 2022(3):1-15.
- [8] ZHANG Juan, DING Tong, ZHANG Linrang, et al. Long-time Coherent Integration Algorithm for High-Speed Maneuvering Target Detection Using Space-Based Bistatic Radar [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2022, 60:1-16.
- [9] WANG Mingxing, LI Xiaolong, ZHANG Zerui, et al. Coherent Integration and Parameter Estimation for High-

- Speed Target Detection with Bistatic MIMO Radar [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 1-15.
- [10] ZENG Cengcang, WANG Fangzhou, LI Hongbin, et al. Target Detection for Distributed MIMO Radar with Non-orthogonal Waveforms in Cluttered Environments [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(5):5448-5459.
- [11] LU Jiabin, LIU Feifeng, SUN Jingyi, et al. Joint Estimation of Target Parameters and System Deviations in MIMO Radar with Widely Separated Antennas on Moving Platforms [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2021, 57(3):3015-3028.
- [12] LI Zhe, DING Zegang, WANG Yinzi, et al. Space Target Detection Based on DBF and GRFT for Ground-Based Distributed Radar [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2024, 21:1-5.
- [13] RAO Xuan, TAO Haihong, SU Jia, et al. Axis Rotation MTD Algorithm for Weak Target Detection [J]. Digital Signal Processing, 2014(3):81-86.
- [14] YANG Jiefang, ZHANG Yunhua, MI Yunpeng, et al. A Novel Algorithm for Maneuvering Target Coherent Integration Based on Second-Order Keystone and Radon Fourier Transform [C]//IET International Radar Conference, Chongqing, China: IET, 2023:2458-2463.
- [15] 黄鹏辉. 复杂运动目标长时间相参积累方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017.
- [16] ZOU Yifei, LI Xiukun, YU Ge. Adaptive WVD Cross-Term Removal Method Based on Multidimensional Property Differences [J]. Journal of Marine Science and Application, 2025, 24:774-788.
- [17] LI Xiaolong, CUI Guolong, YI Wei, et al. Coherent Integration for Maneuvering Target Detection Based on Radon-Lv's Distribution [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2015, 22(9):1467-1471.
- [18] 陈小龙, 黄勇, 关键, 等. MIMO 雷达微弱目标长时积累技术综述[J]. 信号处理, 2020, 36(12):1947-1964.
- [19] DENG Jiangyun, SUN Zhi, CHEN Haixu, et al. Passive Localization Method of LFM Signal Transmitter Based on Multi-Channel Joint Accumulation in FrFT Domain [C]//International Conference on Information Fusion, Venice, Italy: IEEE, 2024:1-6.
- [20] LIU Xinghua, XU Zhenhai, LIU Xiang, et al. A Clean Signal Reconstruction Approach for Coherently Combining Multiple Radars [J]. Journal on Advances in Signal Processing, 2018(1):1-11.

作者简介:

张晓波 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为雷达系统。

李相海 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为天基分布式雷达微弱目标信号相参处理。

徐星苑 女, 博士研究生, 主要研究方向为高速机动目标探测成像。

高翔 男, 硕士研究生, 主要研究方向为天基分布式雷达 SAR-GMTI 处理。

杨志伟 男, 博士, 教授, 主要研究方向为天基雷达空中动目标探测成像。

(上接第 481 页)

ment Planning Using Self-Attention-Based Dense Generative Adversarial Network [C]//Fourth Congress on Intelligent Systems, Singapore: Springer, 2024:15-28.

- [18] 刘宁波, 董云龙, 王国庆, 等. X 波段雷达对海探测试验与数据获取[J]. 雷达学报, 2019, 8(5):656-667.
- [19] 周子铂, 王鑫奎, 蔡万勇, 等. 联合时频分析和谱估计的机动目标 ISAR 成像[J]. 雷达科学与技术, 2021, 19(4):393-402.

作者简介:

刘宁波 男, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达信号智

能处理、海上目标探测技术。

刘新亮 男, 硕士研究生, 主要研究方向为海杂波仿真和特征分析。

董云龙 男, 博士, 教授, 主要研究方向为多传感器信息融合、雷达目标检测与跟踪。

丁昊 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为海杂波特异性认知与抑制、海杂波中目标检测。

关键 男, 博士, 教授, 主要研究方向为雷达信号处理、海上目标探测检测。

孙殿星 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为机动目标跟踪、信息融合。