



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 116660855 B

(45) 授权公告日 2023. 09. 29

(21) 申请号 202310946616.7

G01S 13/06 (2006.01)

(22) 申请日 2023.07.31

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 116660855 A

CN 103376447 A, 2013.10.30

CN 110940976 A, 2020.03.31

CN 111948620 A, 2020.11.17

(43) 申请公布日 2023.08.29

CN 115755036 A, 2023.03.07

(73) 专利权人 中国科学院空天信息创新研究院  
地址 100190 北京市海淀区北四环西路9号

CN 116148829 A, 2023.05.23

EP 0987564 A1, 2000.03.22

(72) 发明人 王雪梅 董青海 张华 吕晓德  
汪丙南

杨博;王丰华;周一宇;黄知涛.空基辐射源非合作探测系统目标定位.应用科学学报.2010,(第03期),全文.

(74) 专利代理机构 北京科迪生专利代理有限公司 11251

审查员 钱亦泉

专利代理师 金怡

(51) Int. Cl.

G01S 7/41 (2006.01)

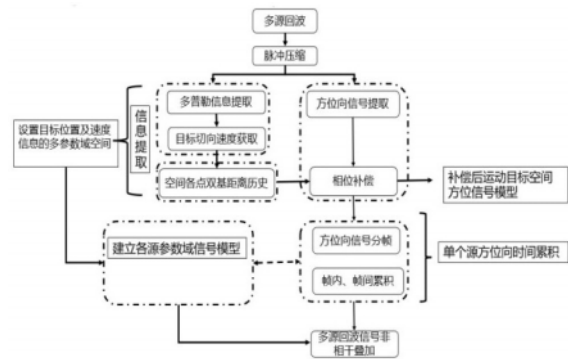
权利要求书4页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

基于多非协作式辐射源的动态三维空间目标探测定位方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于多非协作式辐射源的动态三维空间目标探测定位方法,涉及电子雷达领域。本发明针对传统平台中目标探测信噪比提升不足,多辐射源无法有效利用等问题,通过建立三维空间动态多源接收信号模型,设计多参数域投影及多源叠加算法流程,获得高信噪比的目标探测定位方法,解决动态多源环境下的目标搜索定位问题。本发明可以根据使用需求,建立动态环境下单接收多辐射源目标探测模型,该模型可以推广应用在多接收多辐射源情况中。



1. 一种基于多非协作式辐射源的动态三维空间目标探测定位方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤1、建立单接收系统、多非协作式辐射源三维空间高速目标探测模型;

所述单接收系统、多非协作式辐射源三维空间目标探测模型为用来表征接收系统与辐射源及目标的信号模型,辐射源及接收系统所在接收平台处于同一水平面中,且具有不同的运动速度;目标在空中进行高速运动,且目标的运动速度远大于接收系统所在接收平台及辐射源所在平台运动速度;

以接收系统所在接收平台为原点建立三维空间笛卡尔坐标系,具体为:

接收系统坐标为  $(0, 0, 0, v)$ , 其中  $v$  为接收系统的速度;目标坐标为  $(x_T, y_T, z_T, v_T, a_T)$ , 其中  $x_T, y_T, z_T, v_T, a_T$  分别表示目标在空间  $X, Y, Z$  轴的坐标及速度,加速度;辐射源坐标为  $(x_{P_k}, y_{P_k}, 0, v_{P_k}, a_{P_k})$ , 其中  $x_{P_k}, y_{P_k}, 0, v_{P_k}, a_{P_k}$  分别表示辐射源在空间  $X, Y, Z$  轴的坐标及速度,加速度,  $k=1, 2, 3, \dots$ ;

假设多个辐射源发射信号独立,具体形式如下式:

$$s_{P_k}(t) = A_k \cdot \exp(j2\pi f_c t + \varphi_{0,k}) \quad (1)$$

其中,  $A_k$  表示不同辐射源发射的信号振幅,  $f_c$  表示载频,  $\varphi_{0,k}$  表示对应的初始相位;  $\exp()$  是信号复数表现形式,  $s_{P_k}(t)$  为辐射源发射信号;  $j$  为虚数;

对式(1)中目标回波信号进行脉冲压缩操作,得到距离-多普勒域信息  $s_{pc,P_k}(t, \eta)$ , 如下式:

$$s_{pc,P_k}(t, \eta) = \sigma_{\eta,k} \exp\left\{-j2\pi f_c \frac{R_k(\eta)}{c}\right\} \times r\left[t - \frac{R_k(\eta)}{c}\right] \quad (2)$$

其中,  $t$  表示距离向时间,  $\eta$  表示方位向时间,  $\sigma_{\eta,k}$  为目标的复散射系数,  $c$  表示光速,  $r(\bullet)$  为回波信号与直达波信号的互相关函数;  $R_k(\eta)$  为双基距离历史, 其中  $R_k(\eta) = R_{O,T}(\eta) + R_{R,T}(\eta) - R_{O,k}(\eta)$ ; 其中,  $R_{O,T}(\eta)$  为接收系统到目标的距离,  $R_{R,T}(\eta)$  为辐射源到目标的距离,  $R_{O,k}(\eta)$  为接收系统到辐射源的距离; 距离脉冲压缩信号中相位  $\phi(\eta)$  为  $\phi(\eta) = -f_c \frac{2\pi}{c} R_k(\eta)$ , 对方位向时间求导得到:

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(\eta)}{d\eta} = f_d(\eta) = \bar{f}_{dc,k} + \bar{f}_{dt,k} \cdot \eta \left(|\eta| \leq \frac{T}{2}\right) = -\frac{f_c}{c} R_k(\eta) \quad (3)$$

其中,  $\bar{f}_{dc,k}$ 、 $\bar{f}_{dt,k}$  分别表示多普勒质心和多普勒调频率,  $R_k(\eta)$  为双基距离历史的导数;  $T$  表示每帧信号的时长,  $f_d$  为距离向频率; 积分之后求得双基距离历史  $R_k(\eta)$  的另一种表达式为:

$$R_k(\eta) = R_{0,k} - \frac{c}{f_c} \bar{f}_{dc,k} \eta - \frac{c}{2f_c} \bar{f}_{dt,k} \eta^2 \quad (4)$$

其中,  $R_{0,k}$  是参考时刻的双基距离; 对式(2)做距离向傅里叶变换:

$$S_{pc,P_k}(f_d, \eta) = \sigma_{\eta,k} R(f_d) \cdot \exp \left\{ -j \frac{2\pi(f_d + f_c)}{c} \left[ R_{0,k} - \frac{c}{f_c} \bar{f}_{dc,k} \eta - \frac{c}{2f_c} \bar{f}_{dt,k} \eta^2 \right] \right\} \quad (5)$$

其中,  $S_{pc,P_k}(f_d, \eta)$  为距离向傅里叶变换后的距离-多普勒域信号,  $R(\bullet)$  是  $r(\bullet)$  的傅里叶变换;

建立三维空间笛卡尔坐标系, 设目标在参考时刻的位置矢量为  $\mathbf{R}_T$ , 速度矢量为  $\mathbf{V}_T$ , 加速度为  $\mathbf{a}_T$ , 第  $k$  个辐射源的位置矢量为  $\mathbf{R}_{P_k}$ , 速度矢量为  $\mathbf{V}_{P_k}$ , 加速度为  $\mathbf{a}_{P_k}$ , 接收系统速度参数为 0, 实际为  $\mathbf{V}_O$ , 实际的目标和辐射源的运动参数根据接收系统运动参数校正;

双基距离历史  $R_k(\eta)$  表示为:

$$\begin{aligned} R_k(\eta) = R_{O,T}(\eta) + R_{P_k,T}(\eta) - R_{O,k}(\eta) = & \left| \mathbf{R}_T + \mathbf{v}_T \eta + \frac{1}{2} \mathbf{a}_T \eta^2 \right| \\ & + \left| \mathbf{R}_{P_k} + \mathbf{v}_{P_k} \eta + \frac{1}{2} \mathbf{a}_{P_k} \eta^2 - \mathbf{R}_T - \mathbf{v}_T \eta - \frac{1}{2} \mathbf{a}_T \eta^2 \right| \\ & - \left| \mathbf{R}_{P_k} + \mathbf{v}_{P_k} \eta + \frac{1}{2} \mathbf{a}_{P_k} \eta^2 \right| \end{aligned} \quad (6)$$

对式(6)求导, 对比式(4)和式(6), 目标回波在方位向时间为 0 时的多普勒质心和多普勒调频率的表达式为:

$$\begin{aligned} \bar{f}_{dk} = \frac{f_c}{c} \frac{dR_k(\eta)}{d\eta} \Big|_{\eta=0} &= \frac{f_c}{c} \left\{ |\mathbf{R}_T|^{-1} \cdot \mathbf{R}_T \mathbf{v}_T^T + |\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T|^{-1} \cdot (\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T) (\mathbf{v}_{P_k} - \mathbf{v}_T)^T - |\mathbf{R}_{P_k}|^{-1} \cdot \mathbf{R}_{P_k} \mathbf{v}_{P_k}^T \right\} \quad (7) \\ \bar{f}_{dt,k} = -\frac{f_c}{c} \frac{d^2 R_k(\eta)}{d\eta^2} \Big|_{\eta=0} &= -\frac{f_c}{c} \left\{ -|\mathbf{R}_T|^{-3} \cdot (\mathbf{R}_T \mathbf{v}_T)^2 + |\mathbf{R}_T|^{-1} \cdot (\mathbf{v}_T^2 + \mathbf{R}_T \mathbf{a}_T^T) \right. \\ & - \left. |\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T|^{-3} \cdot [(\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T) (\mathbf{v}_{P_k} - \mathbf{v}_T)^T]^2 + |\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T|^{-1} \cdot [|\mathbf{v}_{P_k} - \mathbf{v}_T|^2 + (\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T) (\mathbf{a}_{P_k} - \mathbf{a}_T)^T] \right. \\ & \left. + |\mathbf{R}_{P_k}|^{-3} \cdot (\mathbf{R}_{P_k} \mathbf{v}_{P_k}^T)^2 - |\mathbf{R}_{P_k}|^{-1} \cdot (|\mathbf{v}_{P_k}|^2 + \mathbf{R}_{P_k} \mathbf{a}_{P_k}^T) \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

当  $|\mathbf{R}_{P_k}| \ll |\mathbf{R}_T|$ 、双基角度较小时, 式(8)近似为:

$$\bar{f}_{dk} = -\frac{f_c}{c} \frac{d^2 R_k(\eta)}{d\eta^2} \Big|_{\eta=0} \approx -\frac{f_c}{c} \left\{ |\mathbf{R}_T|^{-1} \bar{v}_l^2 + \bar{a}_r \right\} \quad (9)$$

其中目标速度分量  $\bar{v}_l = |\mathbf{v}_T| \sin \theta$ ,  $\theta$  是  $\mathbf{R}_T$  和  $\mathbf{R}_{P_k}$  的夹角, 称之为观测角度; 目标的径向加速度矢量  $\bar{a}_r = |\mathbf{a}_T| \cos \vartheta$ ,  $\vartheta$  是  $\mathbf{R}_T$  和  $\mathbf{a}_T$  的夹角;

单接收系统、多非协作式辐射源三维空间高速目标探测模型给出基于多非协作源的动

态三维空间目标回波信号模型,通过对动态三维空间目标回波信号模型的分析,得到多普勒调频率值的具体模型;

步骤2、建立多源多参数域目标探测定位算法。

2. 根据权利要求1所述的一种基于多非协作式辐射源的动态三维空间目标探测定位方法,其特征在于,所述步骤2包括如下步骤:

步骤2.1 对多辐射源下的目标回波信号进行脉冲压缩,利用公式(2)得到不同辐射源对目标探测的距离-多普勒域信息;

步骤2.2 对待测空间进行网格划分,获得三维空间中各网格点的位置参数 $(x, y, z)$ ,得到网格到接收系统的距离 $|\mathbf{R}_T| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 和观测角度 $\theta = \arctan(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z})$ ,以及投影到xoy

平面角度 $\varphi = \arctan(\frac{y}{x})$ ;在已经提取到目标多普勒调频率 $\bar{f}_{dt}$ 的前提下,带入公式(9),求得

各网格点对应的目标速度 $\mathbf{v}_t$ 为:

$$\mathbf{v}_t = \sqrt{-\bar{f}_{dt} \cdot \frac{c}{f_c} \cdot |\mathbf{R}_T| - |\mathbf{R}_T| \bar{a}_r^T} \quad (10)$$

设置一组速度值 $v_r$ ,根据目标速度 $\mathbf{v}_t$ 、观测角度 $\theta$ 和投影到xoy平面角度 $\varphi$ 、目标的径向加速度 $\bar{a}_r$ ,计算空间多个网格点可能目标的速度矢量 $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ :

$$\begin{cases} v_x = v_r \cos \theta \cos \varphi + \text{sign}[v_r] v_t \sin \theta \sin \varphi \\ v_y = v_r \cos \theta \sin \varphi + \text{sign}[v_r] v_t \sin \theta \cos \varphi \\ v_z = v_r \sin \theta + \text{sign}[v_r] v_t \cos \varphi \end{cases} \quad (11)$$

其中,sign[ ]用于对[ ]内的数值判断正负,当[ ]内的数值为负数时,返回-1,正数时则返回1;目标的径向加速度 $\bar{a}_r = 0$ ;

步骤2.3将目标速度与对应空间点位置带入公式(6)中,计算不同辐射源对应的双基距离历史 $\hat{R}_k(\eta; x, y, z, v)$ ;将计算的双基距离历史带入公式(2)中,得到对应的方位向信号 $s_{P_k}(\eta, x, y, z, v)$ :

$$s_{P_k}(\eta, x, y, z, v) = s_{pc, P_k}(t = \frac{2\hat{R}_k(\eta, x, y, z, v)}{c}, \eta) = \sigma_{\eta, k} \exp\left\{-j2\pi f_c \frac{\hat{R}_k(\eta, x, y, z, v)}{c}\right\} \times r\left[\frac{\hat{R}_k(\eta, x, y, z, v)}{c}\right] \quad (12)$$

步骤2.4 对方位向信号进行能量累积,将该方位向信号分为N帧,第n帧信号表示为 $\hat{s}_{P_k, n}(\eta; x, y, z, v)$ ;帧内信号根据接收回波中的双基距离历史进行相位补偿,并完成方位向相干积累:

$$s_{P_k, n}(x, y, z, v) = \sum_{\eta} \hat{s}_{P_k, n}(\eta, x, y, z, v) \exp\left(\frac{j2\pi R_k(\eta)}{\lambda}\right) \quad (13)$$

其中 $R_k(\eta)$ 为目标回波中的双基距离历史, $\lambda$ 为电磁波波长,再对帧间信号进行非相

干叠加:

$$s_{P_k}(x, y, z, v) = \sum_n |s_{P_{k,n}}(x, y, z, v)| \quad (14)$$

步骤2.5 对空间所有划分的点进行步骤2.1-步骤2.4,通过遍历搜索空间中的点与目标回波信息匹配,同时进行方位向和分帧累积,将累积的结果投影到参数空间中,将多辐射源信号在空间参数域进行非相干积累叠加,结果如下:

$$s(x, y, z, v) = \sum_k |s_{P_k}(x, y, z, v)| \quad (15)$$

步骤2.6 根据步骤2.5中的非相干积累叠加的结果中的峰值位置得到目标对应的位置与速度,实现目标的探测定位。

## 基于多非协作式辐射源的动态三维空间目标探测定位方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电子雷达领域,具体涉及一种基于多非协作式辐射源的动态三维空间目标探测定位方法。

### 背景技术

[0002] 无源雷达常利用外界辐射源如广播电视信号、通信基站等对目标的反射信号进行处理来进一步获得目标信息,其隐蔽性、低探测成本等优势使其应用愈加广泛,多基地的无源雷达协同探测是当前研究热点。但随着各类平台应用环境的变化、外界辐射源的信息获取如非协作式辐射源信息的获取难度增加,目标的探测定位愈发困难。尤其是动态接收平台对多非协作式辐射源情况下的目标探测定位,研究难度集中体现在动态平台带来的非相参情况下,目标信噪比弱,目标探测定位精度较差等。传统的目标探测定位方式如基于卡尔曼滤波的航迹跟踪方法等已远不能满足动态多辐射源情况下的目标探测定位需求。

[0003] 在多非协作式辐射源应用场景下,传统目标探测定位方法由于以下特点无法满足要求:

[0004] 1) 信噪比提升微弱:传统的目标探测定位方法常依赖于信号的相参性,在动态环境中,由于辐射源、目标及接收系统所在平台均为动态变化的,破坏了回波信号的相参性,导致回波信噪比较低,无法有效进行目标探测定位;

[0005] 2) 多辐射源数据利用率低:动态平台中,一个接收多个辐射源回波信号情况下,因其非相参特性,无法有效利用多辐射源提升目标探测定位能力。

[0006] 综上,现有的技术方法尚无法应用于动态环境中多非协作式辐射源下目标的探测定位,极大地限制了动态环境下多辐射源无源雷达对目标探测定位的应用。

### 发明内容

[0007] 为解决上述技术问题,本发明提供一种基于多非协作式辐射源的动态三维空间目标探测定位方法,其为一种动态环境中基于多非协作辐射源的三维空间目标探测定位方法。本发明针对接收系统所在平台、多非协作辐射源及运动目标相对运动关系,首先建立动态多源三维空间目标探测模型,该模型给出了单个接收系统、多个非协作辐射源以及三维空间中高速运动目标探测模型;在此基础上,根据模型特点及应用场景需求,进行回波信号的分析及简化;然后根据回波信号特点,建立基于多参数域的目标探测定位方法流程;最后在多参数域空间中进行来自多个源的回波信号的叠加,提高信号回波的信噪比;最终实现目标的探测定位。

[0008] 为达到上述目的,本发明采用如下技术方案:

[0009] 一种基于多非协作式辐射源的动态三维空间目标探测定位方法,包括如下步骤:

[0010] 步骤1、建立单接收系统、多非协作式辐射源三维空间高速目标探测模型;

[0011] 步骤2、建立多源多参数域目标探测定位算法。

[0012] 本发明具有以下有益效果:

[0013] 1、本发明可以根据使用需求,建立动态环境下单接收多辐射源目标探测模型,该模型可以推广应用在多接收多辐射源情况中;

[0014] 2、传统的目标探测定位方法无法解决动态环境引起的非相参问题,不能利用多辐射源的目标信息,从而目标导致信噪比低,限制了目标探测定位功能。而在本发明中通过设置多源多参数域空间,以及多源在空间投影遍历方式,实现多源叠加效果,有效提升目标信噪比;

[0015] 3、传统的目标探测定位方法无法有效利用目标的多普勒信息,而在本发明中,目标探测定位算法流程均在针对多普勒信息进行,提高了利用率。

## 附图说明

[0016] 图1是单接收多非协作式辐射源三维空间目标探测模型图;

[0017] 图2是多源多参数域目标探测定位算法流程图;

[0018] 其中,1-接收平台,2-非协作式辐射源,3-目标。

## 具体实施方式

[0019] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0020] 如图1所示为本发明的应用场景,其中1代表接收平台,2代表非协作式辐射源,3代表目标;接收平台1和非协作式辐射源2距离远小于接收平台1与目标3、非协作式辐射源2与目标3的距离,且接收平台1和非协作式辐射源2在同一平面中即同一地面或海面,目标3为空中目标。

[0021] 本发明提出的基于多非协作式辐射源的动态三维空间目标探测定位方法主要包括如下步骤:

[0022] 步骤1、建立单接收系统、多非协作辐射源三维空间目标探测模型;

[0023] 单接收系统、多非协作辐射源三维空间高速目标探测模型的主要功能是说明应用场景,表征单个接收系统、多非协作式辐射源的空间关系及回波信号模型特点,作为后续信息处理的前提。

[0024] 步骤2、建立多源多参数域目标探测定位算法;

[0025] 所述多源多参数域目标探测定位算法的主要功能是针对多源回波进行处理,提出针对待探测的空间高速目标进行多源参数域空间设置,其主要作用是将待测目标的参数域与空间探测位置关联起来,并对多个辐射源的回波信号进行叠加处理,最终提高目标回波信号的信噪比,对目标进行位置和速度估计,实现目标探测定位。

[0026] 具体地,在步骤1中,动态环境中,单接收系统、多非协作式辐射源三维空间目标探测模型根据应用需求进行调整,以此建立的模型则主要用来表征接收系统与辐射源及目标的信号模型。该信号模型具体特点为:辐射源及接收系统所在接收平台处于同一水平面中,且具有不同的运动速度;目标在空中进行高速运动,且目标的运动速度远大于接收系统所在接收平台及辐射源所在平台运动速度;远大于表示大于一个数量级。具体说明如下:

[0027] 以接收系统所在接收平台为原点建立三维空间笛卡尔坐标系,具体为:

[0028] 接收系统坐标为  $(0,0,0,v)$ , 其中  $v$  为接收系统的速度; 目标坐标为  $(x_T, y_T, z_T, v_T, a_T)$ , 分别表示目标在空间X、Y、Z轴的坐标及速度、加速度, 辐射源坐标为  $(x_{P_k}, y_{P_k}, 0, v_{P_k}, a_{P_k})(k=1,2,3\dots)$ , 分别表示辐射源在空间X、Y、Z轴的坐标及速度、加速度。

[0029] 假设多个辐射源发射信号独立, 具体形式如下式:

$$[0030] \quad s_{P_k}(t) = A_k \cdot \exp(j2\pi f_c t + \varphi_{0,k})(k=1,2,3) \quad (1)$$

[0031] 其中,  $A_k$  表示不同辐射源发射的信号振幅,  $f_c$  表示载频,  $\varphi_{0,k}$  表示对应的初始相位。 $\exp()$  是信号复数表现形式,  $s_{P_k}(t)$  为辐射源发射信号,  $j$  为虚数。对上式中目标回波信号进行脉冲压缩操作, 得到距离-多普勒域信号  $S_{pc,P_k}(t, \eta)$ , 如下式:

$$[0032] \quad S_{pc,P_k}(t, \eta) = \sigma_{\eta,k} \exp\left\{-j2\pi f_c \frac{R_k(\eta)}{c}\right\} \times r\left[t - \frac{R_k(\eta)}{c}\right] \quad (2)$$

[0033] 其中,  $t$  表示距离向时间,  $\eta$  表示方位向时间,  $\sigma_{\eta,k}$  为目标的复散射系数,  $c$  表示光速,  $r(\bullet)$  为回波信号与直达波信号的互相关函数。 $R_k(\eta)$  为双基距离历史, 其中  $R_k(\eta) = R_{O,I}(\eta) + R_{P_k,I}(\eta) - R_{O,k}(\eta)$ 。其中,  $R_{O,I}(\eta)$  为接收系统到目标的距离;  $R_{P_k,I}(\eta)$  为辐射源到目标的距离,  $R_{O,k}(\eta)$  为接收系统到辐射源的距离; 距离脉冲压缩信号中相位  $\phi(\eta)$  为  $\phi(\eta) = -f_c \frac{2\pi}{c} R_k(\eta)$ , 对方位向时间求导得到:

$$[0034] \quad \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(\eta)}{d\eta} = f_d(\eta) = \bar{f}_{dc,k} + \bar{f}_{dt,k} \cdot \eta \left(|\eta| \leq \frac{T}{2}\right) = -\frac{f_c}{c} \dot{R}_k(\eta) \quad (3)$$

[0035] 其中,  $\bar{f}_{dc,k}$ 、 $\bar{f}_{dt,k}$  分别表示多普勒质心和多普勒调频率,  $f_d$  为距离向频率,  $\dot{R}_k(\eta)$  为双基距离历史的导数。 $T$  表示每帧信号的时长。积分之后求得双基距离历史的另一种表达式为:

$$[0036] \quad R_k(\eta) = R_{0,k} - \frac{c}{f_c} \bar{f}_{dc,k} \eta - \frac{c}{2f_c} \bar{f}_{dt,k} \eta^2 \quad (4)$$

[0037] 其中,  $R_{0,k}$  是参考时刻的双基距离。对式(2)做距离向傅里叶变换:

$$[0038] \quad S_{pc,P_k}(f_d, \eta) = \sigma_{\eta,k} R(f_d) \cdot \exp\left\{-j \frac{2\pi(f_d + f_c)}{c} \left[R_{0,k} - \frac{c}{f_c} \bar{f}_{dc,k} \eta - \frac{c}{2f_c} \bar{f}_{dt,k} \eta^2\right]\right\} \quad (5)$$

[0039] 其中,  $S_{pc,P_k}(f_d, \eta)$  为距离向傅里叶变换后的距离-多普勒域信号,  $R(\bullet)$  是  $r(\bullet)$  的



傅里叶变换。建立三维空间笛卡尔坐标系,设目标在参考时刻的位置矢量为  $\mathbf{R}_T$ ,速度矢量为  $\mathbf{V}_T$ ,加速度为  $\mathbf{a}_T$ 。第  $k$  个辐射源的位置矢量为  $\mathbf{R}_{P_k}$ ,速度矢量为  $\mathbf{v}_{P_k}$ ,加速度为  $\mathbf{a}_{P_k}$ 。接收系统速度参数为0(实际为  $\mathbf{V}_O$ ),实际的目标和辐射源的运动参数需要根据接收系统运动参数校正。双基距离历史表示为:

$$R_k(\eta) = R_{O,T}(\eta) + R_{P_k,T}(\eta) - R_{O,k}(\eta) = \left| \mathbf{R}_T + \mathbf{v}_T \eta + \frac{1}{2} \mathbf{a}_T \eta^2 \right| + \left| \mathbf{R}_{P_k} + \mathbf{v}_{P_k} \eta + \frac{1}{2} \mathbf{a}_{P_k} \eta^2 - \mathbf{R}_T - \mathbf{v}_T \eta - \frac{1}{2} \mathbf{a}_T \eta^2 \right| - \left| \mathbf{R}_{P_k} + \mathbf{v}_{P_k} \eta + \frac{1}{2} \mathbf{a}_{P_k} \eta^2 \right| \quad (6)$$

[0040] 对式(6)求导,对比式(4)和式(6),目标回波在方位向时间为0时的多普勒参数表达式为:

$$\bar{f}_{d,k} = \frac{f_c}{c} \frac{dR_k(\eta)}{d\eta} \Big|_{\eta=0} = \frac{f_c}{c} \left\{ |\mathbf{R}_T|^{-1} \cdot \mathbf{R}_T \mathbf{v}_T^T + |\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T|^{-1} \cdot (\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T) (\mathbf{v}_{P_k} - \mathbf{v}_T)^T - |\mathbf{R}_{P_k}|^{-1} \cdot \mathbf{R}_{P_k} \mathbf{v}_{P_k}^T \right\} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{f}_{d,k} = & -\frac{f_c}{c} \frac{d^2 R_k(\eta)}{d\eta^2} \Big|_{\eta=0} = -\frac{f_c}{c} \left\{ \underbrace{|\mathbf{R}_T|^{-3} \cdot (\mathbf{R}_T \mathbf{v}_T)^2 + |\mathbf{R}_T|^{-1} (\mathbf{v}_T^2 + \mathbf{R}_T \mathbf{a}_T^T)}_{\textcircled{1}} \right. \\ & \left. - \underbrace{|\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T|^{-3} [(\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T) (\mathbf{v}_{P_k} - \mathbf{v}_T)^T]^2 + |\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T|^{-1} \cdot [|\mathbf{v}_{P_k} - \mathbf{v}_T|^2 + (\mathbf{R}_{P_k} - \mathbf{R}_T) (\mathbf{a}_{P_k} - \mathbf{a}_T)^T]}_{\textcircled{2}} \right. \\ & \left. + \underbrace{|\mathbf{R}_{P_k}|^{-3} \cdot (\mathbf{R}_{P_k} \mathbf{v}_{P_k}^T)^2 - |\mathbf{R}_{P_k}|^{-1} \cdot (|\mathbf{v}_{P_k}|^2 + \mathbf{R}_{P_k} \mathbf{a}_{P_k}^T)}_{\textcircled{3}} \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

[0041] 结合本发明场景,当  $|\mathbf{R}_{P_k}| \ll |\mathbf{R}_T|$ 、双基角度较小时,式(8)可近似为:

$$\bar{f}_{d,k} = -\frac{f_c}{c} \frac{d^2 R_k(\eta)}{d\eta^2} \Big|_{\eta=0} \approx -\frac{f_c}{c} \{ |\mathbf{R}_T|^{-1} \bar{v}_t^2 + \bar{a}_r \} \quad (9)$$

[0042] 其中目标速度分量  $\bar{v}_t = |\mathbf{v}_T| \cdot \sin \theta$ ,  $\theta$  是  $\mathbf{R}_T$  和  $\mathbf{R}_{P_k}$  的夹角,称之为观测角度;目标的径向加速度矢量  $\bar{a}_r = |\mathbf{a}_T| \cdot \cos \vartheta$ ,  $\vartheta$  是  $\mathbf{R}_T$  和  $\mathbf{a}_T$  的夹角。由式(9)可知,考虑  $\mathbf{R}_T$  与  $\mathbf{R}_{P_k}$  的数量级关系以及双基角度,可假设不同辐射源下的同一目标回波具有相等的多普勒调频率值,即多普勒调频率与  $k$  值无关。

[0043] 单接收、多非协作式辐射源动态三维空间高速目标探测模型给出了基于多非协作源的动态三维空间目标回波信号模型,通过对目标回波信号的分析,得到多普勒调频率值的具体模型。

[0044] 所述步骤2如图2所示,具体步骤如下:

[0045] 步骤2.1 对多辐射源下的目标回波信号进行脉冲压缩,得到不同辐射源对目标探测的距离-多普勒域信息,具体如公式(2);

[0046] 步骤2.2 对待测空间进行网格划分,获得三维空间中各网格点的位置参数 $(x, y, z)$ ,可以得到网格到接收系统的距离 $|\mathbf{R}_T| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 和观测角度 $\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z}\right)$ ,以及投影到xoy平面角度 $\varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$ 。在已经提取到目标多普勒调频率 $\bar{f}_{dt}$ 的前提下,带入式(9),可求得各网格点对应的目标速度 $\mathbf{V}_T$ 为:

$$\mathbf{v}_t = \sqrt{-\bar{f}_{dt} \cdot \frac{c}{f_c} \cdot |\mathbf{R}_T| - |\mathbf{R}_T| \bar{a}_r^T} \quad (10)$$

[0047] 设置一组速度值 $\mathbf{v}_r$ ,根据目标速度 $\mathbf{v}_t$ 、观测角度 $\theta$ 和 $\varphi$ 、目标的径向加速度 $a_r$ 计算空间多个网格点可能目标的速度矢量 $\mathbf{v} = (v_x, v_y, v_z)$ ,本发明考虑目标处于高速运动时,在短时间内目标机动性小,其加速度可忽略的情况,可以理解为径向加速度 $a_r = 0$ 。

$$[0048] \quad \begin{cases} v_x = v_r \cos \theta \cos \varphi + \text{sign}[v_t] v_t \sin \theta \sin \varphi \\ v_y = v_r \cos \theta \sin \varphi + \text{sign}[v_t] v_t \sin \theta \cos \varphi \\ v_z = v_r \sin \theta + \text{sign}[v_t] v_t \cos \varphi \end{cases} \quad (11)$$

[0049] 其中,sign[ ]用于对[ ]内的数值判断正负,当[ ]内的数值为负数时,返回-1,正数时则返回1。

[0050] 步骤2.3将目标速度与对应空间点位置带入公式(6)中,计算不同辐射源对应的双基距离历史 $\hat{R}_k(\eta; x, y, z, v)$ 。将计算的双基距离历史带入公式(2)中,得到对应的方位向信号 $s_{R_k}(\eta, x, y, z, v)$ :

$$s_{R_k}(\eta, x, y, z, v) = s_{r, R_k}(t = \frac{2\hat{R}_k(\eta, x, y, z, v)}{c}, \eta) = \sigma_{\eta, k} \exp\left\{-j2\pi f_c \frac{\hat{R}_k(\eta, x, y, z, v)}{c}\right\} \times r\left[\frac{\hat{R}_k(\eta, x, y, z, v)}{c}\right] \quad (12)$$

[0051] 步骤2.4 对方位向信号进行能量累积。由于目标运动过程中复散射系数发生变化,将该方位向信号分为N帧,在极短的时间内复散射系数可视为定值,第n帧信号表示为 $\hat{s}_{R_k, n}(\eta; x, y, z, v)$ 。帧内信号根据接收回波中的双基距离历史信息进行相位补偿,并完成方位向相干积累:

$$[0052] \quad s_{R_k}(x, y, z, v) = \sum_{\eta} \hat{s}_{R_k, n}(\eta, x, y, z, v) \exp\left(\frac{j2\pi R_k(\eta)}{\lambda}\right) \quad (13)$$

[0053] 其中 $R_k(\eta)$ 为目标回波中的双基距离历史信息, $\lambda$ 为电磁波波长,再对帧间信号进行非相干叠加:

$$s_{R_k}(x, y, z, v) = \sum_n |s_{R_k, n}(x, y, z, v)| \quad (14)$$

[0054] 步骤2.5 对空间所有划分的点进行步骤2.1-步骤2.4,通过遍历搜索空间中的点

与目标回波信息匹配,同时进行方位向和分帧累积,将累积的结果投影到参数空间中,将多辐射源信号在空间参数域进行非相干积累叠加,结果如下:

$$s(x, y, z, v) = \sum_k |s_{P_k}(x, y, z, v)| \quad (15)$$

[0055] 步骤2.6 根据非相干积累叠加的结果中的峰值位置得到目标对应的位置与速度,实现目标的探测定位。

[0056] 本发明的特殊应用场景的单接收、多非协作式辐射源下的三维空间目标探测模型及算法流程体现了创新性,其特殊性体现在本发明给出了空间运动目标的探测模型和算法流程。其中,本发明所述创新性不仅仅局限于单一接收、多非协作式辐射源情况,还可以扩展到多接收、多非协作式辐射源场景。算法流程中对多参数域空间的设置也不仅仅局限于位置和速度信息。

[0057] 综上所述,本发明中提到的方法仅为本发明的较佳实施例而已,并非用于限定本发明的保护范围。凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

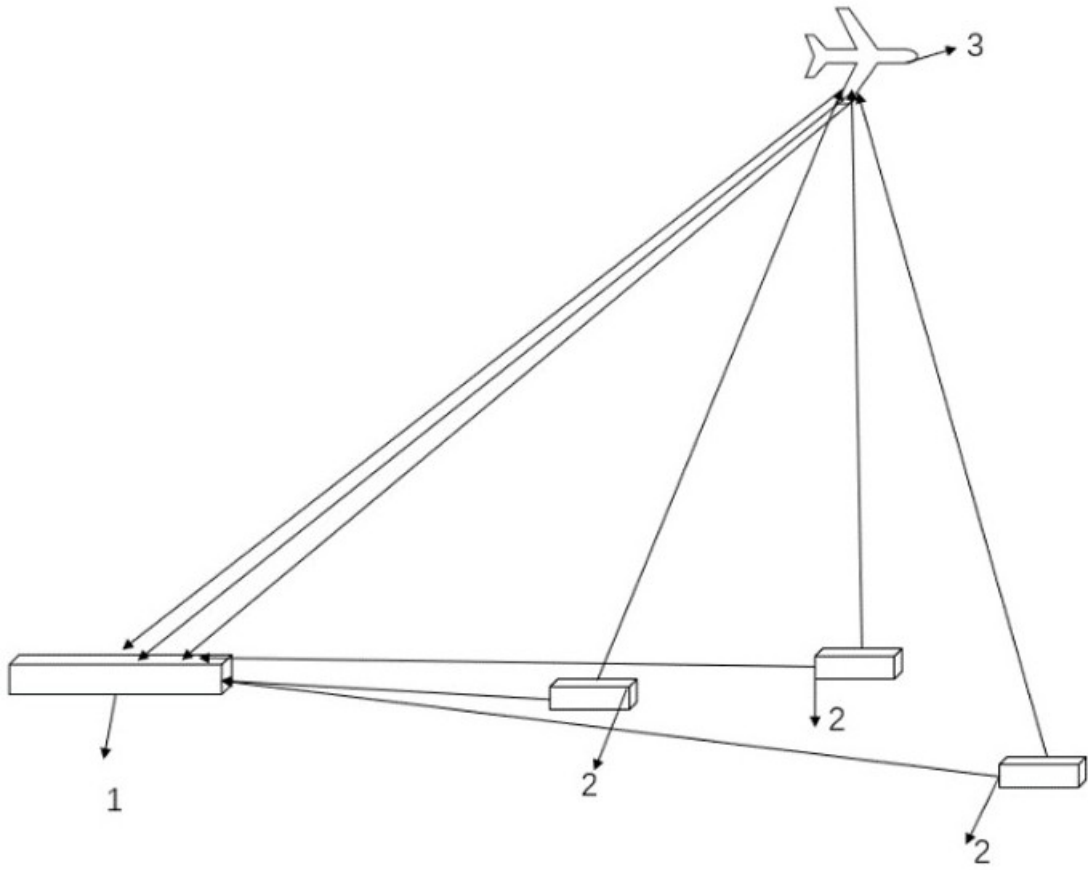


图 1

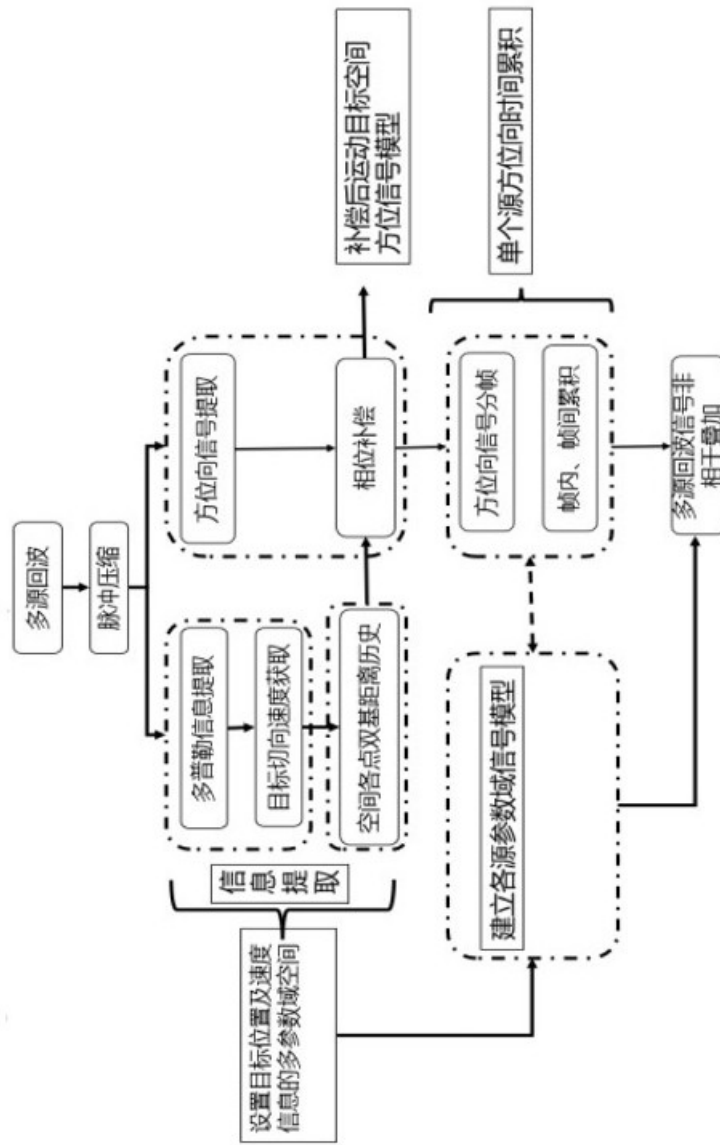


图 2