

## 空间碎片监测与态势感知信号处理方法研究

罗 熹, 李小军, 宋大伟, 尚 社, 孙文锋

(中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室, 陕西 西安 710000)

**摘 要:** 针对 LFM 脉冲雷达体制, 分析了在空间碎片监测中, 回波信号在积累时间内距离维、多普勒维和波束维走动, 目标 RCS 起伏较大的原因, 研究了基于“三跨补偿”、“航迹跟踪”和“频率分集”补偿和校正方法, 通过分析和仿真信号时宽和带宽对雷达探测能力的仿真, 得出利用该方法可以很好地解决远、近距离目标捕获和跟踪精度的问题的结论。最后利用验证平台对该算法进行仿真, 并给出了多普勒维补偿、最小二乘法和 Kalman 法航迹跟踪曲线和频率分集距离变化等仿真结果, 证明了该算法有效性。

**关键词:** LFM 脉冲雷达; 空间碎片监测; 相参积累; 回波补偿和校正

**中图分类号:** TN953 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S229008

## Research of signal processing method based on supervision and space situation awareness for space debris

Luo Xi, Li Xiaojun, Song Dawei, Shang She, Sun Wenfeng

(National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an 710000, China)

**Abstract:** According to the signal model of LFM radar, the reason of range, Doppler and wave beam migration, and the variety of target RCS during accumulation period in space debris detection were analysed. Based on research of compensation on striding three dimension, flight path tracking, and frequency diversity, the signal timewidth and bandwidth influencing on radar detecting ability were analysed and simulated, and a conclusion was obtained that this method was applicable for solving target capture and tracking precision from far to near distance. At last the simulation demonstrates the validity of the algorithm with providing the compensation on Doppler dimension, LS and Kalman in flight path tracking and variety of range for frequency diversity method.

**Key words:** LFM radar; space debris supervision; coherent intergration; echo compensation and correction

收稿日期: 2016-08-11; 修订日期: 2016-09-17

基金项目: 国家重点实验室基金(9140A2105130C5300001)

作者简介: 罗熹(1988-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事天基目标检测信号处理及合成孔径雷达技术方面的研究。

Email: matrix02061016@126.com

## 0 引言

随着人类空间活动的日益频繁,空间碎片的影响和危害日益显著,这些空间碎片对航天器的在轨运行构成了严重的威胁,对于空间碎片的检测和管理也逐渐得到广泛关注。目前,世界主要航天国家或者机构分别提出了多种空间碎片在轨检测技术措施,如热成像感知技术、LFM 雷达探测技术等<sup>[1]</sup>。其中 LFM 雷达探测作为航天测控的重要手段之一,在空间碎片探测中发挥着重要作用。但由于空间碎片尺寸小、运动速度高和运行轨迹的不确定性,导致目标检测信噪比大幅下降,同时目标 RCS 变化起伏较大,给雷达探测带来了巨大困难。

为了实现雷达系统的高灵敏度探测,很多学者提出基于 Hough 变换的信号检测技术<sup>[2]</sup>,但是由于该技术运算量太大,制约了该算法的实用性。此外有学者提出了频分包络移位补偿算法<sup>[3]</sup>,但是该算法因受噪声和干扰信号影响,在重频较低、目标速度径向速度很大的情况下适应性较差。文中针对 LFM 脉冲雷达体制,采用“三跨补偿”、“航迹跟踪”和“频率分集”三种手段,分析了产生距离走动的原因和影响,解决了空间高速运动目标检测、多目标捕获与跟踪和目标 RCS 起伏的一些瓶颈问题,并进行了仿真分析,证明了该方法的可行性。

## 1 空间高速运动目标检测方法

由空间目标所具有的动力学特性,按调姿方式来分,空间目标可分为非自旋和自旋两大类,两大类同时都具有高速运动特性。拟采取空时处理和 ISAR 成像处理两种方法来对高速运动目标进行检测。

### 1.1 跨距离单元的雷达弱信号增强技术

微弱目标作长时间积累时,可以分两个阶段进行:第一阶段对获得的数据进行滤波,尽可能地抑制背景杂波,滤除噪声,并利用短时间内回波信号的相参性,分批作短时相参积累以提高一定的信噪比,此时可以得到多帧距离-多普勒图像。第二阶段,再采用非相参方式对多帧图像进行积累。

针对距离走动问题,该项目拟实施的实验方案为对多帧数据分别做 MTD,补偿距离走动,如图 1、图 2 所示。

第一阶段:相参积累阶段

Step1 接收多帧原始数据分别做 FFT,如图 1 所示。

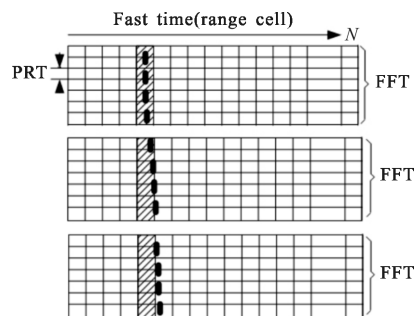


图 1 多帧接收数据

Fig.1 Several receiving data frames

Step2 获得目标信息,对邻近距离单元目标相关性判决,若为同一目标,进行距离补偿,图中  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$  为距离补偿权值,如图 2 所示。

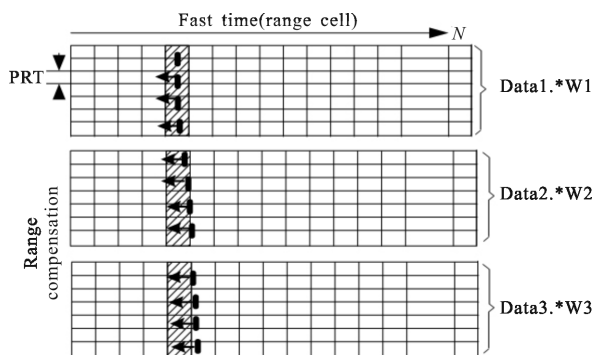


图 2 不同帧间对同一目标距离补偿

Fig.2 Compensation on range for the same target between different data frame

第二阶段:非相参积累阶段

对补偿后的数据,在同一距离单元内目标做非相参积累,获得目标处理增益,如图 3 所示。

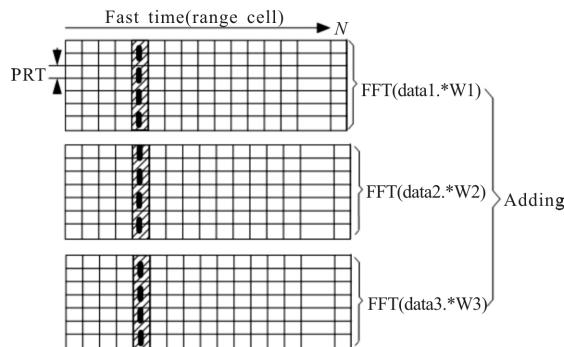


图 3 补偿后数据做积累

Fig.3 Data accumulation after the compensation

### 1.2 跨多普勒单元的雷达弱信号增强技术

目标穿过固定波束时,其目标回波多普勒频率可以表示为:

$$f_d = \frac{2V}{\lambda} \cos \varphi_v \quad (1)$$

式中:  $V$  为目标多普勒速度;  $\lambda$  为波长;  $\varphi_v(t)$  为目标运动方向与雷达视线的夹角。由于观测时间增长,即使不考虑长时间运动中目标加速度对多普勒频率的影响,对于匀速直线运动的目标,也会因夹角  $\varphi_v(t)$  的改变而产生多普勒频率的变化。对于匀速直线运动的目标,  $f_d$  近似按线性调频规律变化,其变化率为:

$$\mu_f = \frac{df_d}{dt} \approx \frac{2V^2}{\lambda R} \sin^2 \varphi_v(t) \quad (2)$$

若波束宽度为  $\theta_b$ , 目标穿过波束所需的时间为  $T_c$ 。假定在  $T_c$  期间,  $\varphi_v(t)$  近似不变,则穿越波束时间可以表示为:

$$T_c = \frac{R\theta_b}{V \sin \varphi_v} \quad (3)$$

在此期间,  $f_d$  的变化带宽为:

$$B_f = |\mu_f| T_c = \frac{2V\theta_b}{\lambda} \sin \varphi_v \quad (4)$$

图 4 给出了目标所在距离单元、所在多普勒通道附近的多普勒通道输出信号,由图可知有三个多普勒通道的输出信号接近相等,表明同一速度对应的多普勒频率分散到多个多普勒通道(称多普勒扩展),同一多普勒通道没有包括全部发射信号,故有一定的损失。

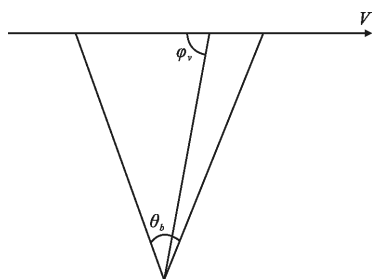


图 4 目标穿过固定波束

Fig.4 Target cross the fixed beam

针对多普勒扩展问题,可以采用先单帧数据做 MTD 处理,估计运动目标多普勒,再分别对其进行补偿,步骤如下。

Step1 单帧数据做 MTD,估计目标多普勒频率  $f_d$ ;

Step2 分析信号处理所需增益,确定所需信号帧

数  $L$ ;

Step3 对第  $n$  段数据做 MTD,估计目标的多普勒频率  $f_{dn}$ ,构造补偿函数  $h_n(t) = \exp^{-j2\pi f_{dn} t}$ ,对多普勒频移进行补偿;

Step4 在零多普勒处对信号进行累积,获得 TBD 增益。

### 1.3 跨波束的雷达弱信号增强技术

对于弱回波信号的目标而言,在单个波束照射期间收集到的回波脉冲能量不足以超过雷达的检测门限,从而不能发现目标。为此,可以考虑通过跨波束积累方式将分散于多个波束中的雷达脉冲回波有效地累积起来,最终实现弱小目标的检测和跟踪。

图 5 为单波束和多波束扫描目标图。其中,目标以速度  $v$  飞行,径向速度为  $v_{||}$ ,切向速度为  $v_{\perp}$ 。当目标处于波束照射期间时,对目标回波能量的积累,只需要考虑跨距离、跨多普勒的积累问题。

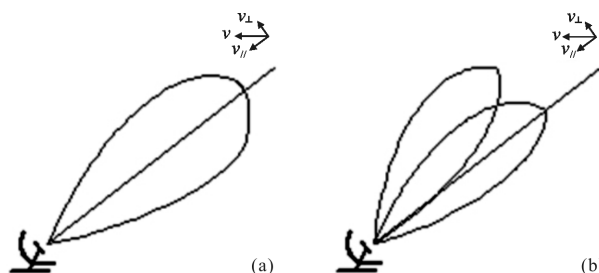


图 5 单波束和多波束扫描目标图

Fig.5 Single beam and multi-beam scanning figure

因此,针对跨波束问题,采用对每个波束接收的数据分别补偿跨距离、跨多普勒走动,最后将各波束积累的能量通过非相参的方式累加起来,提高目标的检测概率。

## 2 高速多目标捕获与跟踪方法

边跟踪边扫描(Track While Scan, TWS)。雷达波束以连续搜索扫描方式扫过目标,通过对目标参数进行滤波,在相继的扫描中保持对每一个有效目标的相对运动路径的跟踪,不单独进行跟踪采样。该方式存在固有的缺陷,因为并不是所有的目标都要有相同的扫描周期和驻留时间;各目标可能不在同一区域。

边跟踪边搜索(Search While Track, SWT)<sup>[4]</sup>。利用相控阵天线的波束捷变性能,SWT 克服了 TWS

的缺陷。相控阵天线波束的指向可以在  $\mu\text{s}$  级的时间内完成切换,并按任意的驻留时间实现对目标的精确跟踪,然后波束再跳回到刚刚正在搜索的区域,却并不显著增加帧扫描时间。也就是说,按时间分割原理把跟踪时间安插在搜索时间内,当雷达在搜索状态发现目标,做出目标存在的报告后,对其进行确认捕获(考虑到有虚警因素),然后转入跟踪状态,而在对已捕获的目标进行跟踪的同时继续在搜索空域中进行搜索,以期发现新的目标。

(1) 基于最小二乘的跟踪滤波算法<sup>[5]</sup>

最小二乘滤波器的原理是:根据给定的数据组  $(x_i, y_i)(i=1, 2, \dots, n)$ , 选取近似函数形式,即给定函数类  $H$ , 求函数  $\varphi(x) \in H$ , 使得

$$\sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2 \quad (5)$$

为最小,即

$$\sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2 = \min_{\varphi \in H} \sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2 \quad (6)$$

这种求近似函数的方法被称为数据拟合的最小二乘法,函数  $\varphi(x)$  称为这组数据的最小二乘函数。通常  $H$  为一些比较简单函数的集合,如低次多项式和指数函数等。一般选用多项式拟合。

对给定的数组  $(x_i, y_i)(i=1, 2, \dots, n)$ , 求一个  $m$  次多项式  $m < n$ , 即

$$P_m(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_mx^m \quad (7)$$

使得

$$\sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [y_i - P_m(x_i)]^2 = F(a_0, a_1, \dots, a_m) \quad (8)$$

为最小,即选取参数  $a_i(i=0, 1, \dots, m)$ , 使得

$$F(a_0, a_1, \dots, a_m) = \sum_{i=1}^n [y_i - P_m(x_i)]^2 = \min_{\varphi \in H} \sum_{i=1}^n [y_i - \varphi(x_i)]^2 \quad (9)$$

式中:  $H$  为至多  $m$  次多项式的集合。  $P_m(x)$  称为这组数据的最小二乘  $m$  次拟合多项式。由多元函数取极值的必要条件,得到方程组

$$\frac{\partial F}{\partial a_j} = -2 \sum_{i=1}^n [y_i - \sum_{k=0}^m a_k x_i^k] x_i^j = 0 \quad j=0, 1, \dots, m \quad (10)$$

移项得

$$\sum_{k=0}^m a_k (\sum_{i=1}^n x_i^{k+j}) = \sum_{i=1}^n y_i x_i^j \quad (11)$$

上式即是最小二乘拟合多项式的系数  $a_k(k=0, 1, \dots, m)$  应满足的方程组,称为正则方程组。由函

数组  $\{1, x, x^2, \dots, x_m\}$  的线性无关性可以证明,上式存在唯一解,且解所对应的多项式  $P_m(x)$  必定是已给数据组  $(x_i, y_i)(i=1, 2, \dots, n)$  的最小二乘  $m$  次拟合多项式。

(2) 基于 Kalman 的波束跟踪滤波算法<sup>[6]</sup>

在数据处理过程中,要求利用有限观测时间内收集到的观测值来估计线性离散时间动态系统的状态  $s$ 。假设系统模型状态方程满足

$$s_{k+1} = \Phi_k \hat{s}_k + B_k u_k + G_k v_k \quad (12)$$

式中:  $s_k$  表示  $k$  时刻系统状态的  $n$  维矢量;  $\Phi_k$  是  $k$  时刻  $n \times n$  阶状态转移矩阵;  $u_k$  为  $p$  维输入向量;  $B_k$  是  $B_k$  阶输入矩阵;  $v_k$  是  $q$  维随机矢量,满足高斯白噪声分布;  $G_k$  是  $n \times q$  维实值矩阵,且

$$E\{v_k\} = 0 \quad (13)$$

$$E\{G_k v_k v_j^T G_j^T\} = Q_k \delta_{kj} \quad (14)$$

观测方程也是线性函数,即

$$z_k = H_k s_k + L_k w_k \quad (15)$$

式中:  $z_k$  是  $k$  时刻  $m$  维观测向量;  $H_k$  是  $m \times n$  阶观测矩阵;  $w_k$  是  $m$  维测量噪声,满足高斯白噪声分布;有

$$E\{w_k\} = 0 \quad (16)$$

$$E\{L_k w_k w_j^T L_j^T\} = R_k \delta_{kj} \quad (17)$$

另假设  $v_k$  与  $w_k$  是相互独立的,即满足

$$E\{v_k w_k^T\} = 0 \quad (18)$$

至此, Kalman 滤波器的基本公式已介绍。此项目中拟采用下述步骤完成跟踪滤波方法:

(1) 根据获得的前两次位置的观测值  $z_1$  和  $z_2$  求得

Kalman 滤波器的状态初始值,既有  $\hat{s}_{2/2}^T = [z_2, (z_2 - z_1)/T]$

(2) 假设观测噪声  $w$  是一个具有平稳方差  $\sigma_w^2$  的

零均值高斯分布随机变量,且与过程噪声和初始条件无关。则可以导出相应的协方差矩阵  $P_{2/2}$  具有如下形式

$$P_{2/2} = \begin{bmatrix} \sigma_w^2 & \sigma_w/T^2 \\ \sigma_w/T^2 & 2\sigma_w^2/T^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

(3) 下面按计算顺序依次给出 Kalman 滤波估计值的计算公式,并进行循环。

首先按滤波协方差矩阵初始值,计算预测协方差矩阵,如已知  $P_{2/2}$ ,可计算  $P_{3/2}$

$$\hat{P}_{k+1/k} = \Phi \hat{P}_{k/k} \Phi^T + Q_k \quad (20)$$

计算出预测协方差矩阵,就可以计算 Kalman 增益

$$K_{k+1} = \hat{P}_{k+1/k} H^T (H \hat{P}_{k+1/k} H^T + R_{k+1})^{-1} \quad (21)$$

若已知 Kalman 增益  $K_{k+1}$  预测协方差矩阵  $\hat{P}_{k+1/k}$ ,则可按下式计算滤波协方差,即

$$\hat{P}_{k+1/k+1} = (I - K_{k+1} H) \hat{P}_{k+1/k} \quad (22)$$

由状态预测值、观测值和 Kalman 增益,就可以计算 Kalman 滤波值:

$$\hat{s}_{k+1/k+1} = \hat{s}_{k+1/k} + K_{k+1} (z_{k+1} - H_{k+1} \hat{s}_{k+1/k}) \quad (23)$$

至此,可以按上述步骤进行分析计算,通过调整参数,实现对不同种类目标的连续跟踪。

### 3 近距离角闪烁抑制方法

雷达是利用从目标表面反射回来的回波信号实现对目标的测量,由于目标外形的复杂性造成总的回波信号是由目标各个部分散射信号矢量叠加而成<sup>[7]</sup>;同时,目标各部分相对于雷达的运动使得总的回波信号随时间变化,从而导致雷达对目标的测量精度恶化。

引起回波起伏的因素有 5 种,包括幅度起伏、相位波前起伏、极化起伏、多普勒起伏及脉冲时间起伏。“起伏”的机制是目标的运动,包括目标随机偏航、俯仰、转动和随机振动。因此,只要从目标各个部分反射回来的信号在幅度和相位上有变化,就会产生回波起伏。

从空间碎片的电磁仿真计算也可以看出,空间碎片目标的 RCS 会随着观测角度的不同产生剧烈的起伏,降低雷达系统的检测信噪比,严重影响微波雷达的探测灵敏度<sup>[8]</sup>。因此,微波雷达必须具有高灵敏度检测方法,抑制目标回波起伏,提高回波信号信噪比,保证微波雷达稳健的捕获目标和高精度测量。

频率分集方法(如图 6 所示)是在一个 CPI 内,采用若干个脉冲串,每个脉冲串由  $M$  个脉冲组成,提供对目标的相关积累,而脉冲串之间采用不同的发射频率<sup>[9]</sup>。在一个 CPI 内,既有脉冲串内的相干积累,又有脉冲串间的非相干积累,前者提供对目标速度的精确测量,后者则平滑由于幅度起伏引起的回波幅度起伏,使目标的 RCS 保持在平均值水平上。

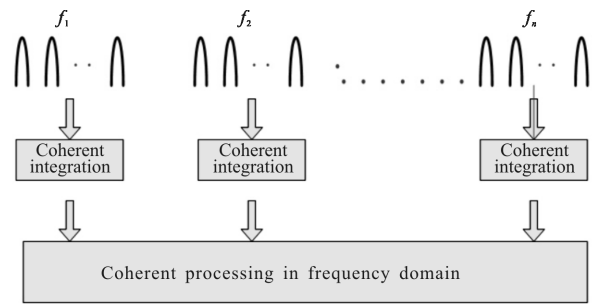


图 6 频率分集算法原理图

Fig.6 Principle diagram of the frequency diversity algorithm

## 4 仿真分析

### 4.1 跨多普勒单元的雷达弱信号仿真分析

假设雷达距离目标的距离  $R=100$  km,则穿越波束时间  $T_c=1.16$  s,波束宽度  $\theta_b=2^\circ$ ,  $V=3\ 000$  m/s(切向飞行,  $\varphi_r=90^\circ$ )。图 7 给出了  $f_d$  与相参积累时间  $t$  的关系,可见积累时间越长,多普勒变化越大。表明同一速度对应的多普勒频率分散到多个多普勒通道(称多普勒扩展),同一多普勒通道没有包括全部发射信号,故有一定的损失,图 8 为多普勒的估计值。图 9 给出了给出了多普勒补偿后的 160 个多普勒通道输出,对多普勒进行分段补偿可以克服多普勒扩散现象。

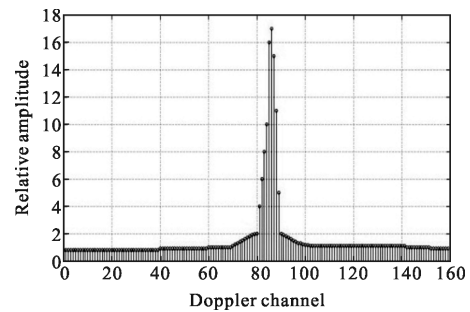


图 7 同一速度下的多普勒扩展

Fig.7 Doppler extension under the certain speed

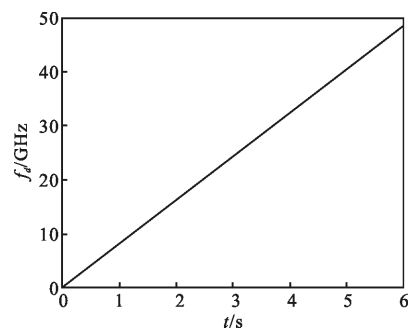


图 8 估计目标多普勒

Fig.8 Estimated target Doppler frequency

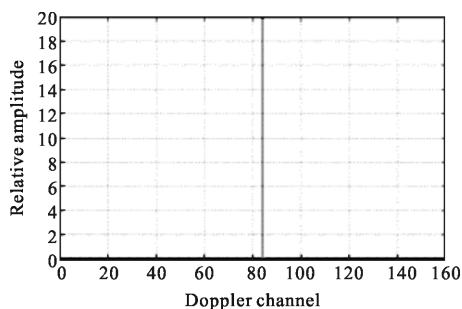


图 9 多普勒补偿后目标所在距离单元 160 个多普勒通道

Fig.9 Range position of target in 160 Doppler channel after Doppler compensation

### 4.2 捕获与跟踪方法分析

对最小二乘法和 Kalman 两种算法进行匀速目标的仿真并进行比较(见图 10)。目标的坐标数据是由真实目标的坐标数据加上互不相关的零均值高斯白噪声产生。假设目标相对卫星以沿  $x$  轴的速度为 2 500 m/s,沿  $y$  轴的速度为 2 000 m/s 做匀速运动,起始点坐标为  $(x, y, z)=(10 \text{ km}, 10 \text{ km}, 10 \text{ km})$ , 采样时间共 10 s,采样周期  $T=0.2 \text{ s}$ ,目标的运动轨迹如图 11 所示。为了简化模型,目标高度始终保持不变,因此用直角坐标系中的  $x$  和  $y$  的二维坐标所示。

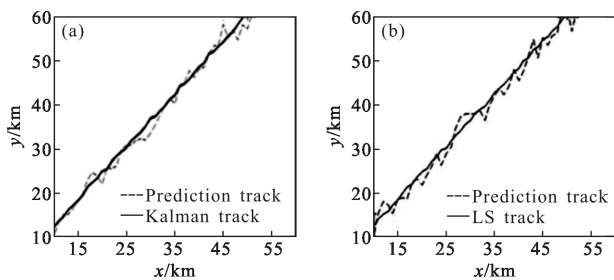


图 10 Kalman 滤波轨迹(a)和最小二乘滤波轨迹(b)

Fig.10 Kalman filtering tracks (a) and least square filtering track (b)

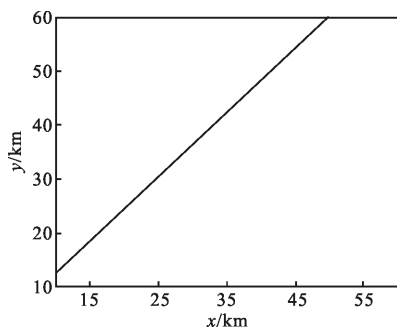


图 11 目标真实轨迹

Fig.11 Target real trajectories

### 4.3 近距离角闪烁抑制方法分析

通过脉冲串之间的频率分集,可以产生目标回波的独立观测样本,通过非相干积累,可以降低由于闪烁而引起的回波起伏,提高检测前的信噪比(信噪比实测结果提高了 4 dB),从而保证测量精度要求。

图 12 是频率分集技术的试验对比结果,距离测量精度为 2.06 m,由上述仿真可得,用频率分集技术后距离分辨率能达到 0.54 m。对比两次测量结果可以看出,使用频率分集技术后测距输出值明显波动减小,图 12(a)中测距数值在 213.6~218.8 m 之间波动,而图 12(b)中测距数值在 214.2~216.8 m 之间波动,测距精度明显提高。

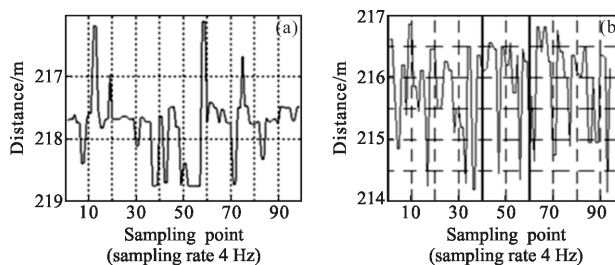


图 12 未加频率分集技术距离输出值(a)和频率分集技术距离输出值(b)

Fig.12 Distance value without frequency diversity (a) and value using frequency diversity (b)

## 5 结论

文中利用 LFM 脉冲雷达的信号模型,分析了空间高速碎片微弱目标检测中距离、速度和波束走动问题,以及目标 RCS 近距离起伏的原因,研究了“三跨补偿”+“航迹跟踪”+“频率分集”的空间碎片检测与态势感知信号处理方法,并对影响积累效果的信号时宽和带宽进行了分析和仿真,通过上述信号处理方法给出了雷达系统在不同条件下对信号积累效果和目标近距离角闪烁的影响,得出了该种算法适用于空间碎片检测,甚至空间高速非合作目标探测脉冲体制雷达的结论。最后对算法进行了仿真分析,证明了该算法有效性,能够提高 LFM 脉冲雷达对空间碎片目标的探测能力。

### 参考文献:

[1] Liu Chunbo, Zhao Shaobo, Han Xiang'e. Detection of space debris of centimeters in size via spaceborne lidar [J].

- Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41 (5): 1244 – 1248. (in Chinese)
- [2] Mo Li, Wu Siliang, Li Hai. Radar detection of range migrated weak target through long-term integration [J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2003, 12(4): 539–544. (in Chinese)
- [3] Wang Yuanmo. Research on the high velocity target accumulation detecting[J]. *Modern Radar*, 2006, 28(3): 24–27. (in Chinese)
- [4] Wang Baoping, Guo Junjie, Sun Chao, et al. ISAR image algorithm based on SRMF and sequence CLEAN [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(12): 3410–3416. (in Chinese)
- [5] Nguyen N, Milanfar P, Golub G. A computationally efficient superresolution image reconstruction algorithm [J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2001, 10(4): 573–583.
- [6] Shahbahrami A, Juurlink B, Vassiliadis S. Accelerating color space conversion using Extend subwords and the matrix register file [C]//Eighth IEEE International Symposium on Multimedia, 2006: 37–46.
- [7] Chen Kunmu. Radar waveform synthesis method a new radar detection scheme [J]. *Antennas and Propagation, IEEE Transaction on*, 1981, 29(4): 553–566.
- [8] Li Y, Huang J, Hong S. A new assessment method for the comprehensive stealth performance of penetration aircrafts [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2011, 15 (7): 511–518.
- [9] Chen Chunlin, Xie Hongmei, Peng Jinye, et al. New compressed sensing algorithm for ISAR imaging of maneuvering target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2269–2274. (in Chinese)