

文章编号: 1001-2486(2011)03-0126-08

## 雷达平台运动特性及其对一维距离像影响分析\*

刘 峥<sup>1,2</sup>, 张 翼<sup>3</sup>, 付 强<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 北京航天指挥控制中心, 北京 100094;  
3. 北京系统工程研究所, 北京 100101)

**摘要:**分析运动特性对雷达一维距离像的影响是研究运动平台下雷达运动补偿、检测、识别和跟踪等方法的前提。针对这一问题,首先分析了雷达平台的运动特性,推导了运动平台下雷达线性调频信号回波模型,定量地分析了运动特性对一维距离像的影响,给出通常雷达平台的运动特性和时宽带宽积条件下,平台微动对径向运动速度、加速度的影响可以忽略;平台平动是影响一维距离像的主要因素,平台微动对一维距离像影响不大;平动加速度对目标一维距离像的影响可以忽略的结论。最后通过仿真实验验证了分析结论的正确性。

**关键词:**雷达平台;运动特性;一维距离像;影响分析;微动

**中图分类号:** TN957 **文献标识码:** A

## Radar Platform Motion Characteristics and Their Effect on Range Profile

LIU Zheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi<sup>3</sup>, FU Qiang<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Beijing Aerospace Command Control Center, Beijing 100094, China;  
3. Research institute of system engineering, Beijing 100101, China)

**Abstract:** Analysis of how motion characteristics of radar platform influence imaging is the premise of researching on motion compensation, detection, recognition and tracking methods. Aiming at the problem of radar platform motion characteristics and its effect on range profile, the study firstly analyzed the motion characteristics of radar platform, gave an LFM signal model based on motion platform, and quantitatively analyzed the influence on range profile which result from the motion characteristics of the radar platform. It is concluded that, under the condition of general radar platform, the micro-motion of platform influencing the radial velocity/acceleration can be ignored; the translational-motion of platform is the main factor influencing the range profile, the micro-motion of platform have little influence on range profile; radial acceleration influencing the range profile can be ignored. Finally, the simulation results verify the correctness of conclusion.

**Key words:** radar platform; motion characteristics; range profile; influence analysis; micro-motion

运动平台下雷达常采用脉冲压缩波形来提高距离分辨率,以获取目标一维距离像。雷达平台与目标间的相对运动使一维距离像发生平移和展宽,其中相对速度是影响一维距离像性能的重要因素之一,很多文献<sup>[1-6]</sup>对一维距离像速度补偿进行了研究,通过速度补偿可以改善运动引起的一维距离像失真。如果雷达发射大时宽带宽积信号,只有速度补偿很难很好地改善一维距离像质量,还需要进行加速度补偿。对运动平台来说,不但存在平移运动,还存在各类干扰运动(振动、抖动和旋转的统称),它们使得雷达与目标之间的相

对径向运动关系比较复杂。通常,高速运动平台下雷达运动速度能达到上千米每秒,加速度也能达到数十个g,若攻击机动目标时,在很短的时间内其相对机动加速度将更大,这些都将对目标一维距离像产生影响。因此,要研究运动平台下雷达后续信号处理如运动补偿、检测、识别和跟踪等方法,首先应分析运动平台的各种运动特性,研究各种运动对一维距离像的影响问题。

本文对雷达平台运动特性及其对雷达一维距离像的影响进行了分析研究。分析了雷达平台的运动特性,给出了运动平台下雷达线性调频信号

\* 收稿日期:2010-10-12

作者简介:刘峥(1981—),男,博士生。

回波模型,定量地分析了雷达平台运动对径向速度、加速度的影响以及雷达平台运动对一维距离像的影响,仿真实验验证了分析结论的正确性,最后讨论了典型雷达平台运动特性及其对一维距离像的影响。

## 1 雷达平台运动特性分析

### 1.1 雷达平台运动分析

雷达平台(以雷达天线相位中心为参考)的理想运动状态是匀速直线运动,各种理论分析也是基于天线相位中心的理想运动状态进行的。实际上,雷达平台往往受到诸如大气运动、设备性能等因素的影响,即通常所称的干扰<sup>[7]</sup>,而偏离理想的匀速直线运动状态。雷达平台的运动主要包括两部分:一是雷达平台沿平均航迹方向的平动;二是干扰引起的与理想状态的运动偏差。为区别于平台宏观质心运动,这里将干扰引起的运动偏差统称为微动。这些运动将会造成回波信号产生畸变,影响一维距离像质量。

本文主要分析高速运动的雷达平台,其运动速度远大于目标运动速度的情况,在这里可以忽略目标运动的影响。在三维空间中雷达平台运动情况如图 1(a)所示。地球坐标系  $xyz$  下的雷达平台运动方程可以表示为

(1) 雷达平台平动的速度、加速度:

$$\begin{cases} \dot{x} = |v_M| \cos\varphi \cos\theta & \dot{x} = |a_M| \cos\varphi \cos\theta \\ \dot{y} = |v_M| \cos\varphi \sin\theta & \dot{y} = |a_M| \cos\varphi \sin\theta \\ \dot{z} = |v_M| \sin\varphi & \dot{z} = |a_M| \sin\varphi \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $v_M$ 、 $a_M$  分别为雷达平台平动速度和加速度,  $\varphi$ 、 $\theta$  分别为地球坐标系中雷达平台运动的俯仰角和方位角。

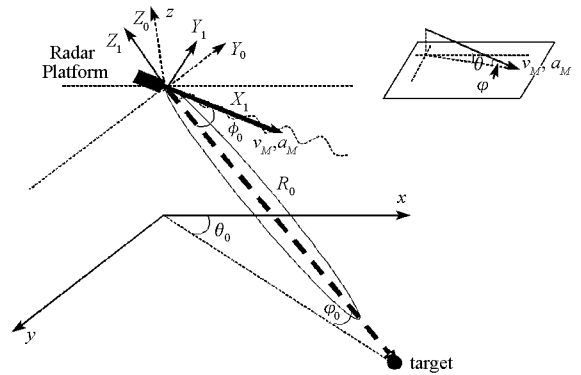
(2) 干扰引起的运动偏差(微动)。文献[8]在研究导弹运动的稳定性时,将干扰运动分为纵向扰动和侧向扰动,文献[9]在前者基础上,以纵向扰动为例,建立了扰动模型。研究表明这类干扰运动可以用正弦型误差、非周期误差和随机误差来建模。将非周期误差看作是随机误差的一种特例,本文考虑雷达平台扰动使得速度、加速度存在正弦和随机误差的情况:

$$\begin{cases} \Delta v(t) = \Delta V \cos(\omega t) \\ \Delta a(t) = -\omega \Delta V \sin(\omega t) \end{cases} \quad (2)$$

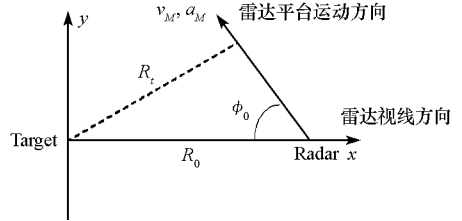
其中,  $\omega$  为角频率。对于随机误差模型,一般假设雷达平台沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向均有一定幅度的由均匀分布随机产生的位置误差。

### 1.2 雷达平台径向运动特性分析

雷达在观测慢速目标时,由于一个雷达观测周期很短,在雷达信号处理周期内,可以将雷达平台高速运动看作是匀加速运动,由于雷达平台运动速度远大于目标的运动速度,可以忽略目标运动的影响。雷达与目标间的几何关系如图 1(a)所示,图 1(b)所示雷达平台运动方向与雷达和目标间视线方向构成参考平面的几何关系模型。



(a) 雷达平台与目标间的几何关系



(b) 雷达平台运动方向和视线方向几何关系

图 1 雷达平台与目标几何关系图  
Fig. 1 The geometric relationship between radar platform and target

在图 1(a)中,粗实线表示雷达平台运动的平动方向,粗虚线代表雷达与目标之间的视线方向,细虚线代表雷达平台运动的实际航迹方向。在图 1(b)中,以目标为坐标原点,雷达平台运动方向和雷达与目标间视线方向构成参考平面,视线方向为  $x$  轴,垂直方向为  $y$  轴,雷达平台靠近目标为负,远离目标为正。在此坐标系内,雷达平台的运动可以分解为  $x$  轴分量和  $y$  轴分量,速度和加速度的  $x$  轴和  $y$  轴分量分别为

$$\begin{cases} v_x = v \cos\phi_0 \\ a_x = a \cos\phi_0 \end{cases}, \begin{cases} v_y = v \sin\phi_0 \\ a_y = a \sin\phi_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中,  $v = v_M + \Delta v$ ,  $a = a_M + \Delta a$ ,  $v_M$ 、 $a_M$  为雷达平台恒定运动方向的速度和加速度,  $\Delta v$ 、 $\Delta a$  为微动产生的速度和加速度。

任意时刻目标坐标位置为

$$\begin{cases} x_t = R_0 - (v \cos\phi_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \cos\phi_0 \cdot t^2) \\ y_t = v \sin\phi_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \sin\phi_0 \cdot t^2 \end{cases} \quad (4)$$

一般情况下,雷达相干处理时间  $t \ll 1, R_0 \gg vt + 1/2 \cdot at^2$ , 则任意时刻雷达与目标之间的径向

$$R_r(t) = \sqrt{x_i^2 + y_i^2} = \sqrt{\left(R_0 - v \cos \phi_0 \cdot t - \frac{1}{2} a \cos \phi_0 \cdot t^2\right)^2 + \left(v \sin \phi_0 \cdot t + \frac{1}{2} a \sin \phi_0 \cdot t^2\right)^2} \quad (5)$$

将式(5)展开,省略时间高次项,雷达径向运动可以用加速运动描述,径向距离、径向速度和径向加速度分别为

$$\begin{cases} R_r(t) = R_0 - v \cos \phi_0 \cdot t + \frac{1}{2} \left(-a \cos \phi_0 + \frac{v^2 \sin^2 \phi_0}{R_0}\right) \cdot t^2 \\ v_r(t) = v \cos \phi_0 + \left(a \cos \phi_0 - \frac{v^2 \sin^2 \phi_0}{R_0}\right) \cdot t \\ a_r(t) = a \cos \phi_0 - \frac{v^2 \sin^2 \phi_0}{R_0} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,在  $a = 0$  时,雷达平台也存在径向速度和径向加速度。

(1) 雷达平台平动分析

假设雷达平台运动方向与雷达视线夹角为  $\phi_0 = 45^\circ$ , 雷达与目标间的距离为 100km, 雷达平台平动速度为  $v_M = 1000\text{m/s}$ , 平动加速度分别为  $a = 0, 50\text{m/s}^2, 100\text{m/s}^2$ 。根据式(6)得到的径向距离、径向速度、径向加速度曲线如图 2 所示。

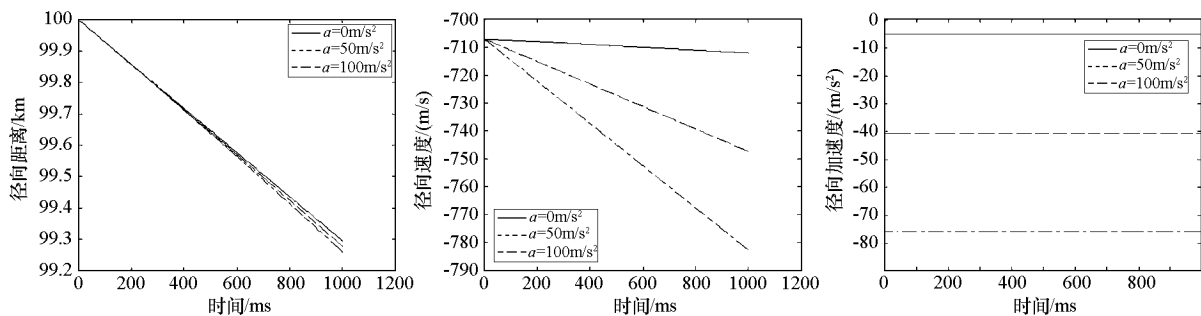


图 2 雷达平台平动特性分析

Fig.2 An analysis of the translational motion characteristic of radar platform

由图 2 可以看出,雷达平台运动速度和加速度将引起径向速度和加速度的变化,当  $a = 0$  时,雷达平台也存在径向速度和径向加速度;随着加速度的增大,径向速度和加速度也将增大。

设雷达平台与目标间的距离分别为 10km、100km、200km,在不同的雷达平台与雷达视线夹角条件下,目标运动速度与径向加速度之间的关系如图 3 所示。

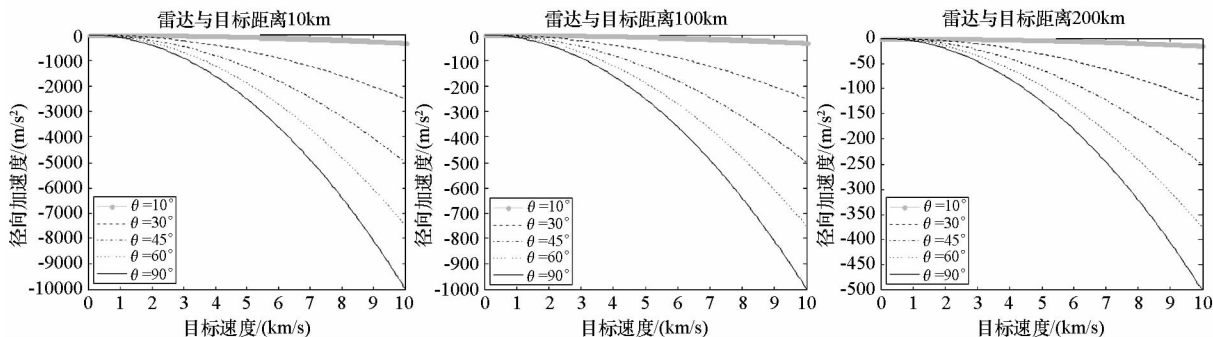


图 3 目标速度与径向加速度的关系

Fig.3 The relationship of translational velocity and radial acceleration

由图 3 可以看出,当雷达与目标间的距离、雷达平台运动速度一定的情况下,雷达平台运动方向与雷达视线方向夹角越大,目标的径向加速度越大;当雷达与目标间的距离、雷达平台运动方向与雷达视线方向夹角一定的情况下,雷达平台运动速度越大,目标的径向加速度越大。在其他参数一定的情况下,雷达与目标间距离越远,目标的

径向加速度越小。

(2) 雷达平台微动分析

假设雷达平台运动方向与雷达视线夹角为  $\phi_0 = 45^\circ$ , 雷达与目标间的距离为 100km, 雷达平台平动速度为  $v_M = 1000\text{m/s}$ , 平动加速度为  $a = 100\text{m/s}^2$ , 在速度分量上加上幅度为  $\Delta V$ , 角频率为  $\omega$  的正弦起伏误差, 其中  $\Delta V$  分别为 1m/s、10m/s、

500m/s、1000m/s,  $\omega$  分别为 0.02rad/s、0.2rad/s。径向距离、径向速度、径向加速度曲线如图 4 所示。

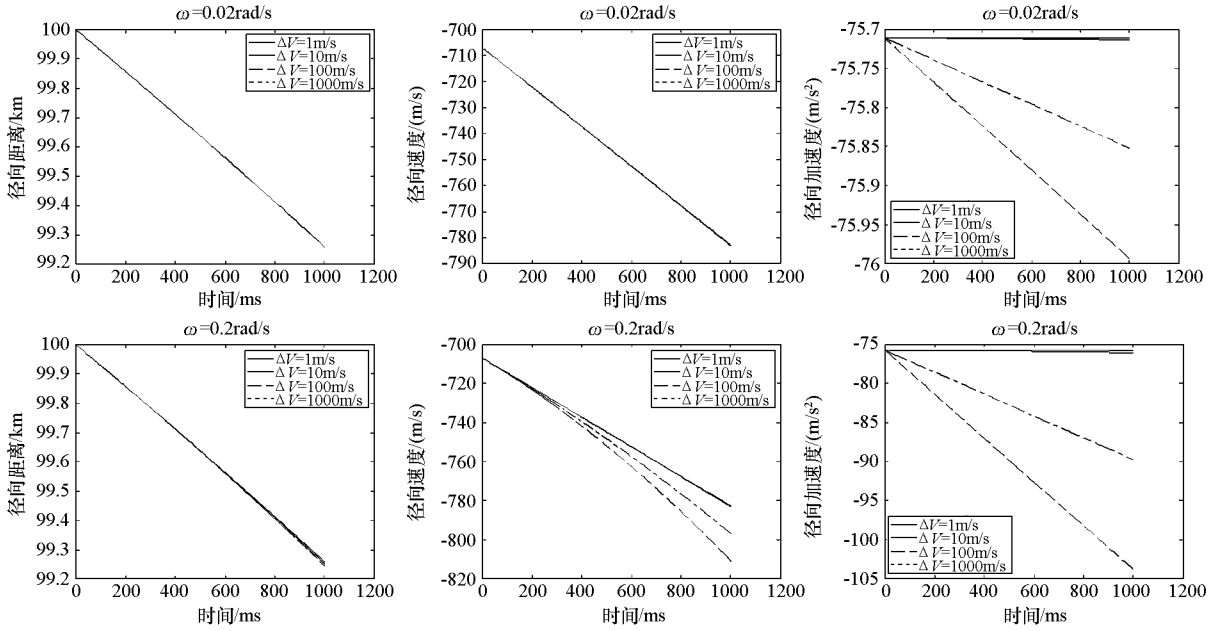


图 4 雷达平台微动特性分析

Fig. 4 An analysis of the micro-motion characteristic of radar platform

由图 4 可以看到,决定微动特性的两个量为  $\Delta V$  和  $\omega$ 。 $\omega$  一定的情况下,  $\Delta V$  增大,径向距离变化不大,径向速度增大,径向加速度增大;  $\Delta V$  一定的情况下,  $\omega$  增大,径向距离缓慢增大,径向速度增大,径向加速度增大。

实际上,由于雷达平台工作对稳定性的要求很高,控制系统使得摆动幅度  $\Delta V$  不可能很大,除非是雷达平台由于某种原因主动做正弦式的机动,但这不是本文要研究的内容。因此,可以认为实际雷达平台运动过程中,  $\Delta v$  与平动速度相比很小,即  $\Delta v \ll v_M$ 。由上述分析可知,微动对于雷达平台径向运动的影响可以忽略,只考虑雷达平台平动运动即可。同时,雷达平台的高速平动运动将带来径向距离、径向速度和加速度的变化,这些变化将影响到雷达信号处理性能。

## 2 运动平台下雷达回波信号模型

设雷达发射的 LFM 信号可表示为

$$s(\hat{t}, t_m) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c \hat{t} + \frac{1}{2}\mu\hat{t}^2\right)\right] \quad (7)$$

其中  $f_c$  为中心频率,  $T_p$  为脉冲宽度,  $\mu$  为调频率,  $B$  为带宽。设雷达发射脉冲重复周期为  $T_r$ , 全时间变量  $t$  可以表示为脉内快时间  $\hat{t}$  和脉间慢时间  $t_m$  的组合  $t = \hat{t} + t_m$ ,  $t_m = mT_r$ ,  $m = 0, 1, \dots, M - 1$  为脉冲序号。

假设目标有  $K$  个散射点,第  $i$  个散射点与雷

达的距离为  $R_i(\hat{t}, t_m)$ ,  $i = 1, 2, \dots, K$ 。雷达接收到的第  $i$  个散射点的回波信号为

$$\begin{aligned} & s_{ir}(\hat{t}, t_m) \\ &= A_i \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - t_{0i}}{T_p}\right) \exp\left\{j2\pi\left[f_c\left(t - \frac{2(R_{0i} - v_i\hat{t} - \frac{1}{2}a_i\hat{t}^2)}{c - v_i}\right) + \frac{1}{2}\mu\left(\hat{t} - \frac{2(R_{0i} - v_i\hat{t} - \frac{1}{2}a_i\hat{t}^2)}{c - v_i}\right)^2\right]\right\} \quad (8) \end{aligned}$$

其中,  $v_i$  和  $a_i$  分别为雷达与第  $i$  个散射点之间的径向速度和加速度,  $t_{0i} = 2R_{0i}/(c + v_i)$ 。

发射视频信号为  $s(\hat{t}, t_m)$ , 设  $t_0 = 0$ , 其匹配滤波器为  $h(\hat{t}, t_m) = s^*(t_0 - \hat{t}, t_m)$ , 可得雷达匹配滤波输出信号为

$$\begin{aligned} & y(\hat{t}, t_m) = s_{ir}(\hat{t}, t_m) \otimes h(\hat{t}, t_m) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} s_{ir}(\tau, t_m) \cdot h(\hat{t} - \tau, t_m) d\tau \\ &= A_i \exp(-j\pi\mu\hat{t}^2) \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \exp\{j\Phi(\tau)\} \\ &\quad \cdot \text{rect}\left(\frac{\tau - t_{0i}}{T_p}\right) \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - \tau}{T_p}\right) d\tau \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \Phi(\tau) = 2\pi\left[b_{0,i} + b_{1,i}\tau + b_{2,i}\tau^2 + b_{3,i}\tau^3 + b_{4,i}\tau^4\right] \\ &= 2\pi \cdot \left\{ \left( \frac{2\mu R_{0,i}^2}{(c - v_i)^2} - \frac{2f_c R_{0,i}}{c - v_i} \right) \right. \\ &\quad + \left( \mu\hat{t} + \frac{2f_c v_i}{c - v_i} - \frac{2\mu R_{0,i}}{c - v_i} - \frac{4\mu R_{0,i} v_i}{(c - v_i)^2} \right) \tau \\ &\quad \left. + \left( \frac{f_c a_i}{c - v_i} + \frac{2\mu v_i}{c - v_i} + \frac{2\mu v_i^2}{(c - v_i)^2} - \frac{2\mu R_{0,i} a_i}{(c - v_i)^2} \right) \tau^2 \right\} \end{aligned}$$

$$+ \left\{ \left( \frac{\mu a_i}{c - v_i} + \frac{2\mu a_i v_i}{(c - v_i)^2} \right) \tau^3 + \frac{\mu a_i^2}{2(c - v_i)^2} \tau^4 \right\} \quad (10)$$

式(10)所得即为目标的一维距离像。

(1) 当加速度为零,即  $a_i = 0, v_i \neq 0$ 。则有  $b_{3,i} = 0, b_{4,i} = 0, b_{2,i}$  中加速度调频项为零。当  $b_{2,i} = 0$  时,相位项只剩时间的一次项,根据傅里叶变换的性质,其结果使得目标的一维距离像产生平移。平移量主要由多普勒频移项  $2f_c v_i / (c - v_i)$  决定,当目标由多个散射中心构成时,频率剩余项  $\mu \hat{t} - 2\mu R_{0,i} / (c - v_i) - 4\mu R_{0,i} v_i / (c - v_i)^2$  决定了一维距离像的分布特性;当  $b_{2,i} \neq 0$  时,相位项包含时间的一次项和二次项,回波信号仍然是 LFM 信号,其时宽带宽积为  $D = \mu' T_p^2 / 2\pi = \mu (2v_i / (c - v_i) + 2v_i^2 / (c - v_i)^2) \cdot T_p^2 / \pi$ , 根据 LFM

信号频谱的特点,  $D$  越大,频谱越宽<sup>[10]</sup>,因此当  $\mu, v_i$  和  $T_p$  很大时,一维距离像被调制展宽,并且波峰幅度减小,它可以表示成 Fresnel 余弦积分和 Fresnel 正弦积分的形式。

(2) 当速度为零,即  $a_i \neq 0, v_i = 0$ ,则有  $b_{1,i}$  中的多普勒频移项  $2f_c v_i / (c - v_i)$  和  $b_{2,i}$  中速度调频项为零;可以看出,加速度没有改变时间一次项系数而引起一维距离像的平移。加速度的影响主要表现在时间的高次项,它们同样导致了一维距离像的包络展宽和波峰幅度减小。

设发射信号频率为 5GHz,带宽为 10MHz,雷达平台速度为 1000m/s,加速度分别为 0、100m/s<sup>2</sup>、200m/s<sup>2</sup>、300m/s<sup>2</sup>,脉冲宽度分别为 3ms、15ms、30ms,匹配滤波结果如图 5 所示。

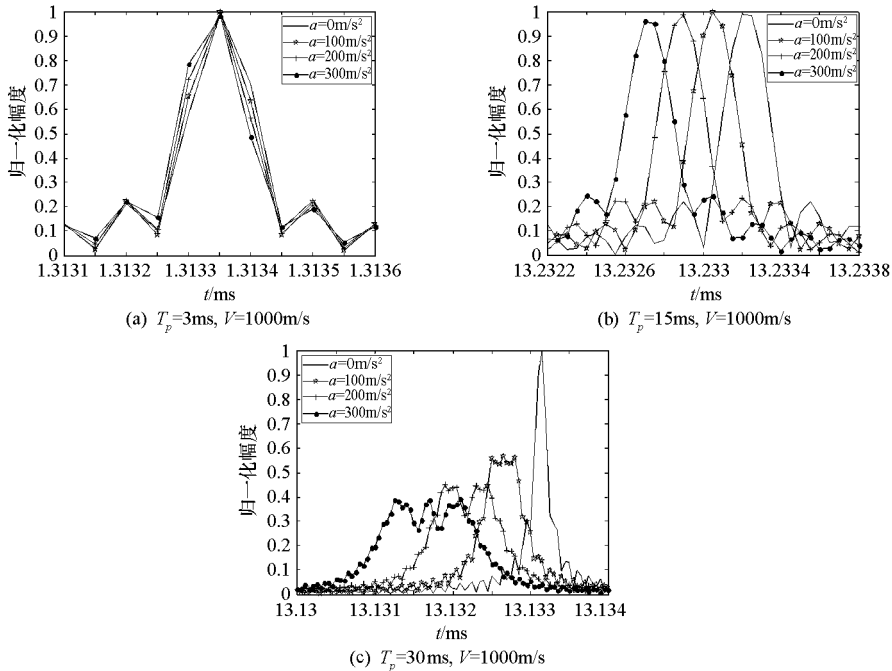


图 5 速度和加速度对匹配滤波的影响

Fig.5 Matched filtering effect by velocity and acceleration

由图 5 可以看到,加速度为零时,匹配滤波输出的是 sinc 函数;加速度不为零时,输出为 Fresnel 积分函数。速度使得一维距离像产生平移,加速度使得 LFM 信号调频率失配,两者共同影响匹配滤波的效果。脉冲宽度越大,匹配滤波失配越严重,随着加速度的增大,波瓣展宽、输出峰值下降得越厉害,甚至出现波瓣分裂。

### 3 雷达平台运动特性对一维距离像影响分析

#### 3.1 径向速度/加速度对一维距离像影响分析

借鉴文献[11]中高速机动目标频谱展宽系数来分析雷达平台与目标间径向运动速度和加速度对一维距离像展宽的影响。

由式(10)可以得到回波信号的瞬时频率为  $f(t) = d\Phi(t)/2\pi dt = b_{1,i} + 2b_{2,i}\tau + 3b_{3,i}\tau^2 + 4b_{4,i}\tau^3$ 。根据脉冲宽度内目标频谱展宽  $B_L \approx T_p \cdot df(t)/dt$ ,以

静止目标一维距离像的频谱分辨率  $1/T_p$  为参考,定义一维距离像频谱展宽系数<sup>[11]</sup>为

$$N_L = B_L / (1/T_p) = (2b_{2,i} + 6b_{3,i}\tau + 12b_{4,i}\tau^2) \cdot T_p^2 \quad (11)$$

(1) 当加速度为零时,速度引起的频谱展宽系数为

$$N_L = B_L / (1/T_p) = 2b_{2,i}(v_i) \cdot T_p^2 = \frac{4v_i c}{(c - v_i)^2} BT_p \quad (12)$$

可以看到,展宽系数与速度  $v_i$  和时宽带宽积  $BT_p$  成正比。对于大时宽带宽积信号,速度引起的频谱展宽将是很大的,需要进行速度补偿。

(2) 当速度为零时,加速度引起的频谱展宽

系数为

$$N_L = \frac{2f_c a_i}{c} T_p^2 - \frac{2R_{0,i}}{c} \frac{2BT_p a_i}{c} + t_{0i} \frac{6BT_p a_i}{c} + t_{0i}^2 \frac{6BT_p a_i^2}{c^2} \quad (13)$$

其中  $t_{0i} = 2R_{0,i}/c$ 。

设雷达平台与目标间的距离分别为 100km 和 300km,带宽分别为 10MHz、100MHz 和 1GHz,发射信号频率为 5GHz,速度分别为 1000m/s、2000m/s、3000m/s、4000m/s,加速度为 0,不同距离和不同速度下脉冲宽度变化时展宽系数的影响如图 6 所示。

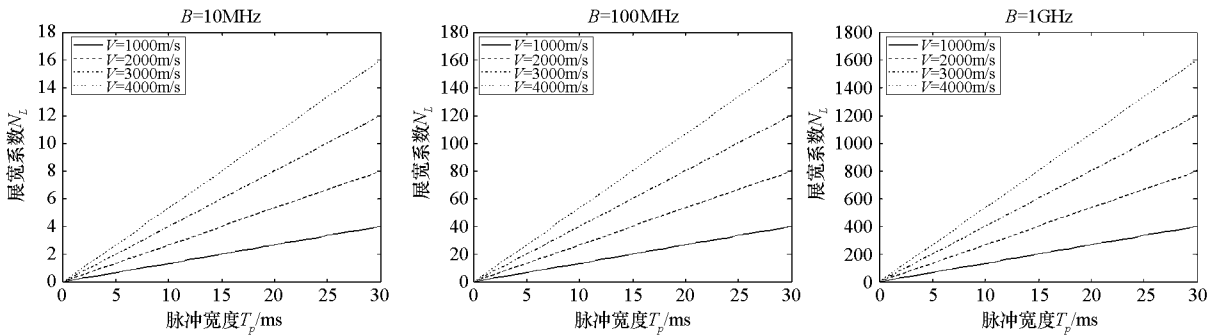


图 6 速度对一维距离像展宽系数影响

Fig.6 Expansion coefficient of range profile effect by velocity

由图 6 可以看到,速度和脉冲宽度对一维距离像展宽的影响很大,雷达平台和目标间距离对一维距离像展宽的影响非常小。

设雷达平台与目标间的距离分别为 100km 和 300km,带宽分别为 10MHz、100MHz 和 1GHz,发射

信号频率为 5GHz,加速度分别为  $50\text{m/s}^2$ 、 $100\text{m/s}^2$ 、 $200\text{m/s}^2$ 、 $300\text{m/s}^2$ ,速度为 0,不同距离和不同加速度下脉冲宽度变化时展宽系数的影响如图 7 所示。

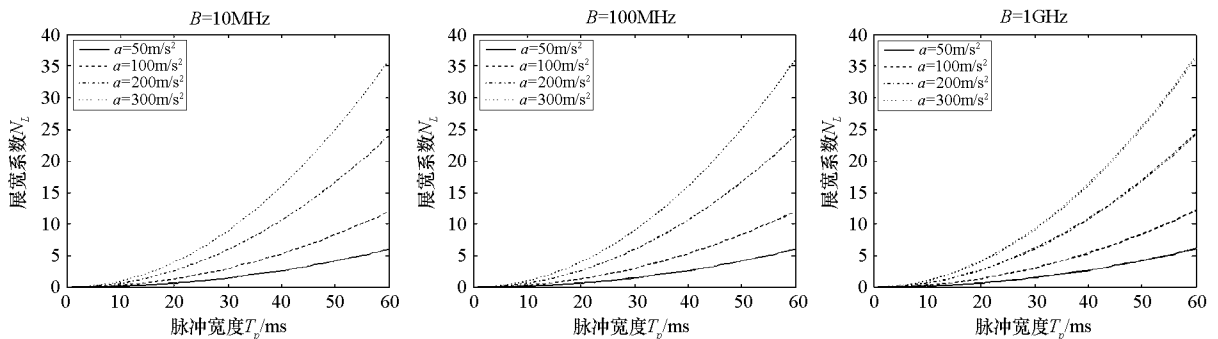


图 7 加速度对一维距离像展宽系数影响

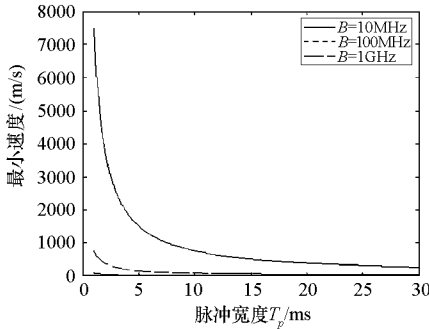
Fig.7 Expansion coefficient of range profile effect by acceleration

由图 7 可以看到,随着加速度的增大,脉冲宽度越大,展宽系数越大,必须进行加速度补偿才能得到一维距离像。在脉宽和加速度确定的情况下,带宽对于展宽系数的影响不明显;在带宽较小的情况下,雷达平台与目标间距离对展宽系数影响要小于带宽较大的情况。

文献[11]认为当  $N_L \geq 1$  时就需要考虑展宽的影响,需要通过运动补偿来消除或减弱展宽的影响。由式(12)和式(13)可以得到,在给定的时宽带宽积条件下,需要考虑一维像展宽影响的最小速度  $v_{i\text{min}}$  和最小加速度  $a_{i\text{min}}$  分别为

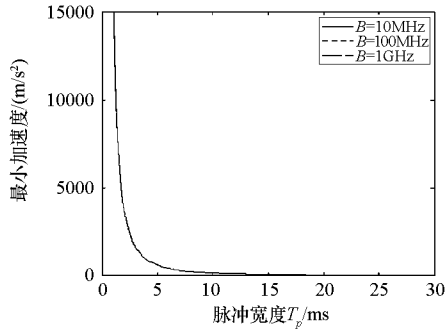
$$v_{i\min} \approx \frac{N_L c}{4BT_p}, \quad a_{i\min} \approx \frac{N_L c}{2f_0 T_p^2 + 4BT_p t_0} \quad (14)$$

图 8(a) 所示为引起展宽最小速度与脉冲宽



(a) 最小速度与脉冲宽度和带宽的关系图

度和带宽的关系图;图 8(b)所示为引起展宽的最小加速度与脉冲宽度和带宽的关系图。



(b) 最小加速度与脉冲宽度和带宽的关系图

图 8 补偿所需最小速度/加速度与脉宽/带宽的关系图

Fig.8 The relationship between minimum velocity/acceleration and pulsewidth/bandwidth

由图 8(a) 可以看到,脉冲宽度和带宽的乘积(时宽带宽积)大时引起展宽的最小速度要比相对较小的时宽带宽积信号引起展宽的最小速度小;由图 8(b) 可以看到,脉冲宽度越大,引起展宽的最小加速度越小,最小加速度与带宽关系不大。

### 3.2 雷达平台微动对一维距离像影响分析

雷达平台沿平均航迹方向平动的情况在前一节已作了详细分析。雷达平台存在正弦和随机运动误差对一维距离像的影响非常复杂,难以建模分析。本节基于理想点目标模型进行仿真实验,验证雷达平台存在的正弦和随机运动误差对一维

距离像的影响。

设发射信号频率为 5GHz,带宽为 100MHz,假设雷达平台运动方向与雷达视线夹角为  $\phi_0 = 45^\circ$ ,雷达与目标间的距离为 100km,雷达平台速度为 1000m/s,加速度为 100m/s<sup>2</sup>。

#### (1) 存在正弦起伏误差

正弦起伏误差形式如式(2)所示。仿真中在速度上加上幅度为  $\Delta V$ ,角频率为  $\omega$  的正弦起伏误差,其中  $\Delta V$  分别为 1m/s、10m/s、100m/s、1000m/s, $\omega$  分别为 20rad/s、 $2 \times 10^5$  rad/s,图 9 所示为存在正弦起伏误差时点目标的一维距离像。

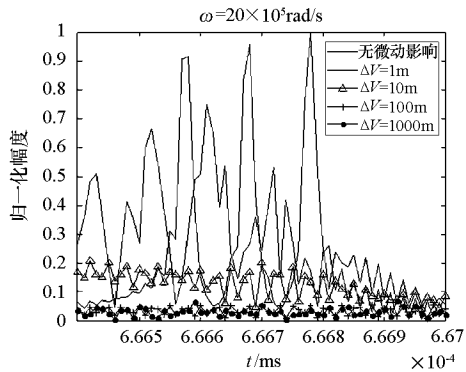
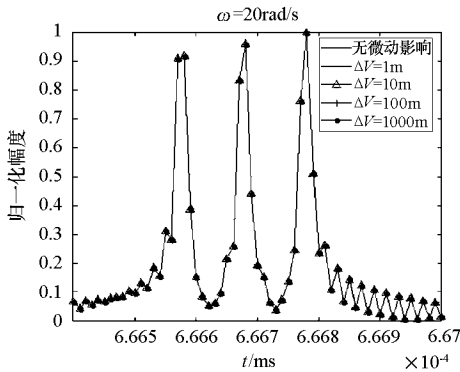


图 9 正弦起伏误差存在时的一维距离像

Fig.9 Range profile effect by sine fluctuation error

由图 9 可以看出,正弦起伏误差的大小完全由  $\Delta V$  和  $\omega$  决定。 $\omega$  一定, $\Delta V$  越大,起伏误差越大,一维距离像失真越厉害; $\Delta V$  一定, $\omega$  越大,起伏频率越高,一维距离像失真越厉害。

#### (2) 存在随机运动误差

雷达平台存在的随机运动误差对一维距离像影响很难正确地建模。在仿真中,采用图 9 仿真参数,设雷达平台沿运动方向有幅度为  $[-\Delta r, \Delta r]$  之间的由均匀分布随机产生的位置误差。图

10 所示为随机运动误差存在时的点目标一维距离像。由图 10 可以看出,随着随机误差幅度的增大,随机运动误差主要导致一维距离像的平移;当随机误差幅度相当大时,还会造成一维距离像展宽。

根据前面分析的结论,在实际中,控制系统使得  $\Delta v$  幅度不可能很大,实际雷达平台运动过程中, $\Delta v$  与平动速度相比很小,即  $\Delta v \ll v_M$ ;同时,一般认为角频率  $\omega = 2\pi/T_s$ ,对一维距离像来说, $T_s$

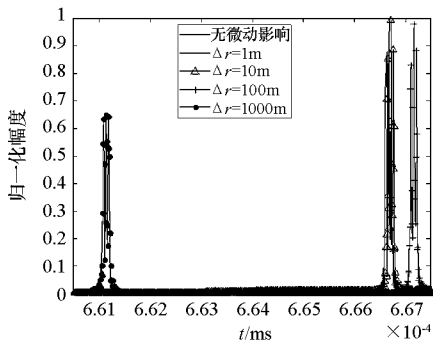


图10 随机运动误差存在时的一维距离像

Fig. 10 Range profile effect by random motion error

为脉冲周期,一般在 ms 甚至更高量级,  $\omega$  亦不可能太大 ( $10^3$  量级或者更小);对于随机运动误差,一般认为幅度起伏在  $[-2, 2]$  范围内。因此,微动对于一维距离像的影响可以忽略,只考虑雷达平台的平动运动即可。

#### 4 结论

本文对雷达平台运动特性及其对一维距离像的影响进行了分析研究。分析了雷达平台的运动特性,推导了运动平台下雷达线性调频信号回波模型,定量地分析了雷达平台运动对一维距离像的影响,得到了一些结论:在通常雷达平台运动特性和系统参数条件下,(1) 雷达平台微动对雷达平台径向速度、加速度影响可以忽略;(2) 雷达平台沿平均航迹的平动是影响一维距离像的主要因素,微动对一维距离像的影响可以忽略;(3) 对于雷达发射大时宽带宽积信号,必须考虑加速度对一维距离像的影响;对于通常雷达系统参数,加速度的影响可以忽略。

典型的雷达平台运动特性是和目标的运动形式密切相关的,本文的分析是基于雷达运动平台对慢速目标进行的,对于其他典型雷达平台运动特性对高速目标或高速机动目标等的分析,本文方法和结论依然可以借鉴,只要分析在一定的雷达系统参数下(如时宽带宽积等),雷达平台和目标

之间的相对径向速度和加速度即可。另外,本文的分析是基于单个散射点目标进行的,实际情况下,目标大都由多个散射点组成,多散射点矢量叠加时各散射点之间会相互干涉,输出峰值可能增大,也可能下降,失配样式更为复杂,但分析方法与单个散射点一致。

研究平台运动特性对 SAR 成像的影响是研究运动平台下 SAR 信号处理如运动补偿、成像、检测、识别等方法的前提。平台运动对 SAR 成像的影响比对一维距离像的影响要复杂,特别是平台微动特性对 SAR 成像的影响更为复杂,这些都将是下一步的主要工作。

#### 参考文献:

- [1] 曹敏,付耀文,黄雅静,等. 弹道目标高分辨一维距离像运动补偿研究[J]. 电子与信息学报. 2009, 31(3): 601 - 605.
- [2] Xing M D, Jiang X W, Wu R B, et al. Motion Compensation for UAV SAR Based on Raw Radar Data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2009, 47(8): 2870 - 2883.
- [3] 李文臣,王雪松,王国玉. 机动目标一维距离像 RAT 法线性化补偿[J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(5): 38 - 42.
- [4] Kawalec A, Serafin P. A Multichannel Receiver Application for Platform Motion Compensation in Synthetic Aperture Radar [C]// International Radar Symposium: 2008.
- [5] Prodi F, Tilli E. Motion Compensation for a Frequency Stepped Radar [C]// International Waveform Diversity and Design Conference: 2007.
- [6] Li Y P, Xing M D, Bao Z. A New Method of Motion Error Extraction from Radar Raw Data for SAR Motion Compensation [C]// CIE International Conference on Radar: 2006.
- [7] 张毅,杨辉耀,李俊莉. 弹道导弹弹道学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1999.
- [8] 赵汉云. 大气飞行器姿态动力学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1987.
- [9] 谢华英. 弹载 SAR 理论设计与成像方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2010.
- [10] 林茂庸,柯有安. 雷达信号理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [11] 李文臣. 高速机动目标雷达信号参数估计与成像处理[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009.