

文章编号: 1671-0576(2023)01-0006-06

# 弹载雷达单脉冲前视成像回波建模

孙文源, 王树文, 吴振凯, 卫 恒

(上海无线电设备研究所, 上海 201109)

**摘 要:** 研究了弹载雷达单脉冲前视成像的回波建模方法。通过对单脉冲前视成像原理的分析, 设计了弹载雷达运动模型和回波模型两个模块, 回波模型中包括扫描过程天线方向图增益计算及回波表达式的分析和构建。通过仿真验证了该建模方法能够有效地获取目标的一维距离像, 并测试验证了扫描过程中目标回波幅度变化的正确性, 为后续的单脉冲前视成像提供了分析依据。

**关键词:** 单脉冲前视成像; 回波建模; 一维距离像

**中图分类号:** TN957.52

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2023.01.002

## Echo Modeling of Monopulse Forward-looking Imaging of Missile-borne Radar

SUN Wenyan, WANG Shuwen, WU Zhenkai, WEI Heng

(Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** The echo modeling method of monopulse forward-looking imaging of missile-borne radar was studied. By analyzing the principle of monopulse forward-looking imaging, two modules of missile motion model and echo model were designed. The echo model included the calculation of the antenna pattern in the beam scan and the construction of the echo expression. It is verified that the method can effectively obtain the one-dimensional distance image of targets through simulation, and the correctness of the target echo amplitude change during scanning is proved by test, which provides an analytical basis for subsequent monopulse forward-looking imaging.

**Key words:** monopulse forward-looking imaging; echo modeling; one-dimensional distance image

### 0 引言

收稿日期: 2022-08-02

作者简介: 孙文源(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事雷达前视成像技术研究。

多普勒波束锐化(DBS)技术利用雷达与目标

间相对运动产生的多普勒频率提高合成孔径雷达(SAR)的方位向分辨率<sup>[1]</sup>。在导弹末制导阶段,目标往往位于弹载雷达前视区域,由于前斜视角逐渐变小,SAR与DBS不再具有方位向分辨能力,导致弹载雷达无法工作至弹目交会。而前视成像技术能够突破SAR与DBS必须侧视或斜视的限制,实现弹载雷达前视区域的二维高分辨成像,解决弹目交会前雷达前视飞行状态下的“盲区”问题<sup>[2]</sup>,在导弹末制导领域有着十分迫切的应用需求<sup>[3]</sup>。

近年来,前视成像<sup>[4]</sup>已经成为制导雷达领域的一个研究热点,国内外专家学者对多种前视成像方法开展了研究,并取得了一些进展。根据目前的研究成果,双基SAR前视成像、视景增强雷达成像等方法受雷达尺寸及导弹空间限制,难以实现弹载应用<sup>[5-6]</sup>。而单脉冲前视成像<sup>[7]</sup>由于其算法复杂度低、计算量小、实时性强的特点,更适用于弹载雷达平台。单脉冲前视成像利用波束扫描获取成像区域的回波数据,并引入单脉冲技术<sup>[8]</sup>,通过适当的信号处理,能够显著改善前视区域方位向成像质量<sup>[9]</sup>,实现全程二维成像雷达末制导。

研究雷达单脉冲前视成像的基础是建立相应的回波模型。前视成像的回波建模需要在前视区域场景、目标和观测雷达模型构建的基础上,根据目标与雷达在空间中的相对位置关系,计算三维空间中弹目视线与波束中心线的偏角,以获取目标和差回波信号的幅相关系。此外需要考虑前视成像扫描过程中波束指向变化及弹目相对位置变化,进而在前视成像时调整信号处理过程。

结合以上分析,本文提出一种弹载雷达单脉冲前视成像的回波建模方法,建立前视成像的雷达运动模型和回波信号模型,并进行仿真验证。为后续单脉冲前视成像研究提供参考。

## 1 弹载雷达前视成像运动模型

导弹制导是利用导弹-目标的相对位置和相对运动参数,形成控制信号,指引导弹飞向目标。在运动模型构建过程中,本文通过求最小二乘解进行运动曲线拟合。

在北天东坐标系下,建立导弹的运动模型。

选取导弹轨迹中标绘的 $L$ 个点,设第 $i$ 个点坐标为 $(x_i, y_i, z_i)$  ( $i=0, 1, \dots, L-1$ ),其中初始位置坐标为 $(x_0, y_0, z_0)$ 。通过 $n$ 阶多项式拟合的方法,建立导弹的运动模型。

以导弹轨迹的 $x$ 轴坐标为例,构建轨迹的 $x$ 轴向量 $\mathbf{x}$ 和时间矩阵 $\mathbf{t}$ ,其表达式分别为

$$\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_i, \dots, x_{L-1}]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_0^2 & t_0 & 1 \\ t_1^2 & t_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_i^2 & t_i & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{L-1}^2 & t_{L-1} & 1 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

式中: $t_i$ 为第 $i$ 个标绘点对应的时刻; $T$ 为矩阵的转置运算符。建立二次多项式,对多项式系数向量 $\mathbf{A} = [a_0, a_1, a_2]^T$ 进行估计,得到最小二乘解表达式为

$$\mathbf{A} = (\mathbf{t}^T \mathbf{t})^{-1} \mathbf{t}^T \mathbf{x} \quad (3)$$

式中: $-1$ 为矩阵求逆运算符。

对导弹轨迹的三维坐标均按式(3)进行拟合,即可得到导弹轨迹随时间变化的运动曲线表达式。导弹轨迹表达式时间标度以脉冲重复时间为间隔,计算发射脉冲时的瞬时弹目距离,并以此作为参数构建回波模型。

## 2 弹载雷达前视成像回波模型

### 2.1 天线方向图增益计算

#### (1) 天线扫描空间几何关系建立

对于波束中的一个目标散射点,其回波数据在慢时间域会受到天线方向图的调制。方位扫描模式下,和差波束天线数据录取的二维空间几何关系示意如图1所示。单脉冲前视成像主要采用单脉冲测角技术,结合扫描过程的瞬时波束指向,获取目标的方位向信息,进而改善方位向分辨率,而不是仅依靠波束宽度。因此,回波建模需要考虑扫描过程中天线方向图对回波幅度的影响。

#### (2) 天线方向图建模

天线方向图反映了天线辐射的能量在角度上的分布情况。以高斯函数来拟合天线方向图函数 $F(\theta)$ ,其表达式为

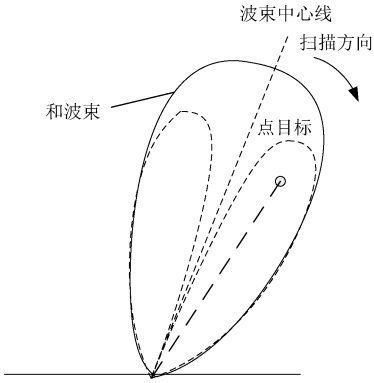


图 1 扫描模式下和差波束天线数据采集的空间几何关系图

$$F(\theta) = \exp(-1.386\theta/a^2) \quad (4)$$

式中： $\theta$  为目标回波入射方向与波束中心线的偏角； $a$  为半功率波束宽度。

比幅和差单脉冲测角的原理是在平面上形成两个对称且部分交叠的子波束，两个子波束分别偏离零轴方向  $\theta_0$  和  $-\theta_0$ ，其方向图函数分别为  $F(\theta + \theta_0)$  和  $F(\theta - \theta_0)$ 。如果目标位于天线轴线上，则两波束接收到的回波幅度一致；若目标偏离天线轴线一定角度，则两回波幅度不一致，且幅度差与该偏角成比例，由此可以获取目标的方位角信息。综合以上分析，等效的差波束天线方向图函数  $F_{\text{dif}}(\theta)$  与和波束天线方向图函数  $F_{\text{sum}}(\theta)$  分别为

$$F_{\text{dif}}(\theta) = F(\theta - \theta_0) - F(\theta + \theta_0) \quad (5)$$

$$F_{\text{sum}}(\theta) = F(\theta - \theta_0) + F(\theta + \theta_0) \quad (6)$$

仿真中，采用将一维天线方向图绕波束中心线旋转的方法模拟二维天线方向图，增益受方位向偏角及俯仰向偏角两个变量影响。

### (3) 天线扫描方向图增益计算

天线方向图的增益由目标回波入射方向与波束中心线的俯仰和方位向偏角决定。仿真中使用一种由弹体坐标系旋转构建波束坐标系的方法，计算目标回波入射方向与波束中心线的偏角。

弹体坐标系  $ox_1y_1z_1$  示意如图 2 所示。弹体坐标系与导弹固联，其原点  $o$  位于波束中心处， $x_1$  轴沿导弹弹轴指向弹头， $y_1$  轴垂直于  $x_1$  轴沿铅垂面向上， $z_1$  轴垂直于  $x_1oy_1$  平面，方向由右手坐标系确定。

波束坐标系可由弹体坐标系根据扫描过程中的瞬时波束指向角旋转得到。首先将弹体坐标系

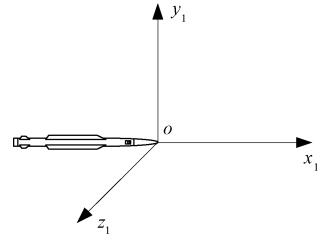


图 2 弹体坐标系示意图

$ox_1y_1z_1$  绕  $y_1$  轴旋转，旋转角度为波束方位角，得到中间状态坐标系  $ox_2y_2z_2$ ；再将坐标系  $ox_2y_2z_2$  绕  $z_2$  轴旋转，旋转角度为波束俯仰角，得到波束坐标系  $ox_3y_3z_3$ ，其中坐标轴  $x_3$  正方向即为波束指向。

目标回波入射方向与波束中心线的方位偏角和俯仰偏角几何关系如图 3 所示。假设地面上有一目标散射点  $T$ ， $ox_3y_3z_3$  为此时的波束坐标系， $x_3$  轴正方向与波束指向一致， $T_1$  为  $T$  在波束坐标系  $x_3oy_3$  面的投影，则目标回波入射方向与波束中心线的方位偏角  $\eta$  为  $x_3$  轴与  $oT_1$  的夹角，俯仰偏角  $\varphi$  为  $oT$  与其投影  $oT_1$  的夹角。

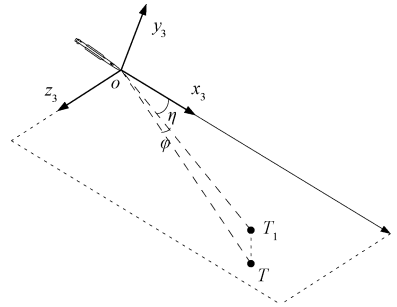


图 3 目标回波入射方向与波束中心线偏角示意图

仿真中，根据导弹轨迹表达式获取发射脉冲时导弹位置坐标及目标回波入射的方向向量，结合此时波束坐标系，通过上述方法计算目标回波入射方向与波束中心线的方位和俯仰向偏角，并获取天线方向图增益。

## 2.2 雷达回波模型及脉冲压缩

线性调频信号通过脉内调制，可以实现大信号带宽，实现较高的距离分辨率。线性调频信号

$$x(t) = \exp(j\pi kt^2) \quad (7)$$

式中： $k$  为线性调频信号的调频斜率。雷达发射信号经目标后向散射，形成目标回波信号。

设导弹飞行过程中雷达波束保持固定俯仰角

进行方位向扫描,扫描角范围为 $\varphi$ ,扫描速度为 $v_{\text{scan}}$ ,发射脉冲重复频率为 $f_r$ 。则波束完成一次方位向扫描发射的脉冲数

$$N = \varphi f_r / v_{\text{scan}} \quad (8)$$

设在扫描过程中雷达发射第 $j$ 个脉冲信号时,波束内有 $n_j$ 个目标散射点。根据已知的弹目地理位置,计算此时成像中心与导弹的相对距离 $D$ ,构建仿真中回波信号的时间标度 $t_r$ 。时间标度 $t_r$ 的取值范围为

$$t_r \in \left[ -\frac{N_r}{2f_s} + \frac{2D}{c}, \frac{N_r - 1}{2f_s} + \frac{2D}{c} \right] \quad (9)$$

式中: $N_r$ 为距离门内采样点数; $f_s$ 为采样频率; $c$ 为光速。结合天线方向图增益,雷达发射第 $j$ 个脉冲信号对应的目标散射点合成回波

$$y_j(t) = \sum_{i=1}^{n_j} \sigma_i F(\eta_{ij}, \varphi_{ij}) \text{rect}\left(\frac{1}{T_p} \left(t_r - \frac{2R_{ij}}{c}\right)\right) \times \exp\left(-j4\pi \frac{R_{ij}}{\lambda} + j\pi k \left(t_r - \frac{2R_{ij}}{c}\right)^2\right), \quad j=1,2,3,\dots,N \quad (10)$$

式中: $\sigma_i$ 为第 $i$ 个散射点的雷达散射截面; $\eta_{ij}$ , $\varphi_{ij}$ 分别为发射第 $j$ 个脉冲时,第 $i$ 个散射点回波入射方向与波束中心线的方位偏角和俯仰偏角; $\text{rect}(\cdot)$ 为门函数,通常为矩形函数; $T_p$ 为脉冲宽度; $R_{ij}$ 为发射第 $j$ 个脉冲时由第 $i$ 个散射点回波测量的弹目距离; $\lambda$ 为信号波长。相位项中第一项为载频产生的多普勒项,第二项为线性调频基带信号项。

实际系统中,目标信号会受到噪声干扰,则雷达接收到的第 $j$ 个脉冲的回波信号

$$s_j(t) = y_j(t) + n_j(t) \quad (11)$$

式中: $n_j(t)$ 为噪声信号,通常为加性高斯白噪声。

脉冲压缩处理能够将发射的宽脉冲信号压缩为窄脉冲信号,即可以在发射宽脉冲保证雷达平均功率的同时,获取窄脉冲的高距离分辨性能。线性调频信号的脉冲压缩处理可以通过一个匹配滤波器实现,其冲激响应 $h(t) = x^*(-t)$ ( $*$ 为共轭运算符)。滤波器输出信号 $s_o(t)$ 由接收信号 $s_j(t)$ 与匹配滤波器冲激响应 $h(t)$ 进行时域卷积得到,即

$$s_o(t) = s_j(t) \otimes h(t) \quad (12)$$

式中: $\otimes$ 为卷积运算符。

## 3 仿真实验

### 3.1 弹目运动模型仿真

以地面上一点为原点建立北天东坐标系。导弹初始位置三维坐标为 $x=0\text{ m}$ , $y=500\text{ m}$ , $z=0\text{ m}$ ,导弹飞行速度 $v=300\text{ m/s}$ ,初始三维速度分别为 $v_x=271.72\text{ m/s}$ , $v_y=-127.16\text{ m/s}$ , $v_z=0\text{ m/s}$ ,弹体俯仰角为 $-25.078^\circ$ ,弹体偏航角和横滚角均为 $0^\circ$ 。仿真中以抛物线构建导弹空间运动轨迹,空间插值后选择轨迹中的标绘点,根据导弹速度选择合适的时间标度,按照式(3)进行拟合,得到北天东坐标系中导弹三维运动坐标 $(x_r, y_r, z_r)$ ,其表达式为

$$\begin{cases} x_r = -3.972 2t^2 + 272.887 2t + 0.009 2 \\ y_r = -7.011 1t^2 - 127.704 1t + 500.058 5 \\ z_r = 0 \end{cases} \quad (13)$$

弹目距离为(1 000~500)m时,导弹三维空间运动轨迹拟合结果如图4所示。

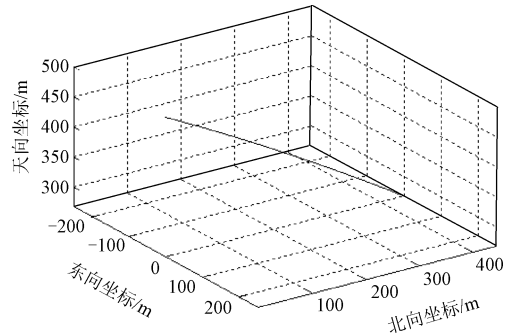


图4 导弹三维空间运动轨迹拟合结果

弹目距离为(1 000~500)m时,导弹速度拟合曲线如图5所示。

在北天东坐标系 $xoz$ 面内设置5个目标散射点,分布在 $50\text{ m} \times 50\text{ m}$ 的雷达前视成像区域内,弹目距离1 000 m。5个散射点坐标分别为 $(866.03, 0, 0)$ , $(879.02, 0, -7.50)$ , $(853.04, 0, 7.50)$ , $(873.53, 0, 12.99)$ , $(858.52, 0, -12.99)$ ,单位为米。散射点分布如图6所示,图中 $\Delta$ 表示散射点,下方为对应的散射点编号。

### 3.2 波束坐标系及天线方向图仿真

仿真验证中,波束扫描模式为方位向扫描,扫描范围为 $+5^\circ \sim -5^\circ$ ,结合弹体姿态计算出波束

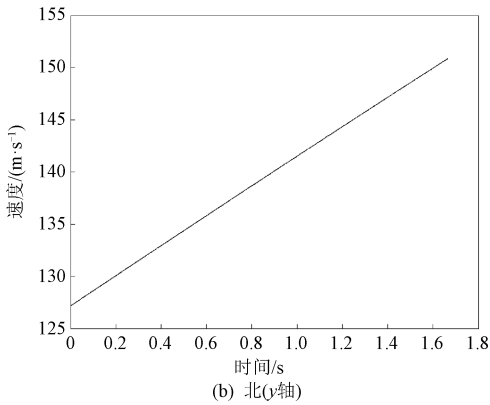
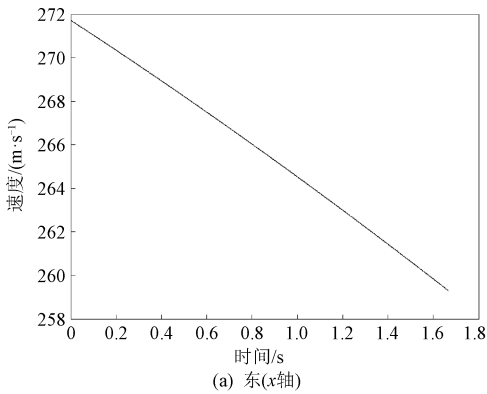


图 5 导弹速度拟合曲线

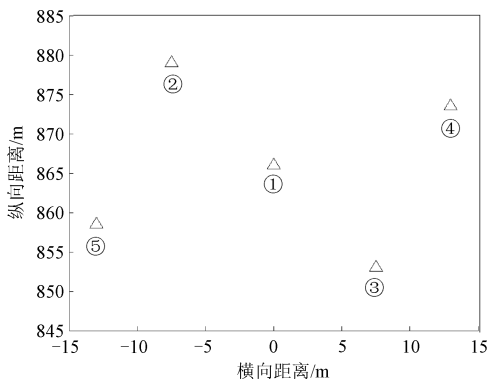


图 6 散射点分布图

指向向量为 $(0.87, -0.50, 0.01)$ 。弹体坐标系由北天东坐标系根据弹体姿态角旋转得到,再结合波束指向角旋转得到波束坐标系。图 7 为此时弹体坐标系及波束坐标系的仿真结果。

设波束主瓣宽度为 $2^\circ$ ,由波束坐标系计算可知,部分目标散射点回波入射方向与波束中心线的俯仰向偏角超过 $0.35^\circ$ 。因此在构建回波模型时俯仰向的增益不能忽略,需要根据目标回波入射方向与波束中心线的二维偏角对照二维天线方向图计算增益。

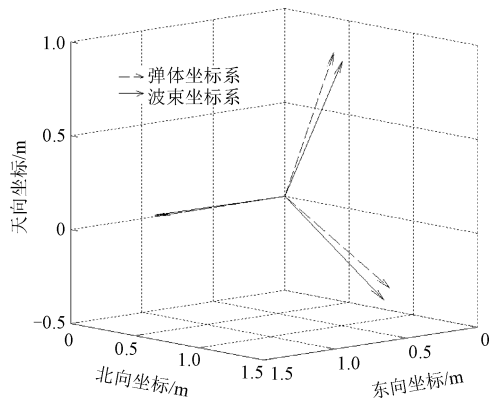


图 7 弹体坐标系和波束坐标系仿真图

### 3.3 回波模型仿真

本节对回波模型进行仿真分析和验证。仿真参数为:雷达脉冲宽度 $3\ \mu\text{s}$ ,脉冲重复频率 $32\ \text{kHz}$ ,波长 $4\ \text{mm}$ ,调制方式线性调频,信号带宽 $75\ \text{MHz}$ ,采样频率 $150\ \text{MHz}$ ,成像纵向幅宽 $50\ \text{m}$ ,距离门内采样点数 $650$ 个,波束主瓣宽度 $2^\circ$ ,波束扫描速度 $100^\circ/\text{s}$ ,完成一次方位向扫描积累脉冲数 $3\ 200$ 个;目标散射点个数 $5$ 个,信号中混入加性高斯白噪声,信噪比 $10\ \text{dB}$ 。结合弹目相对位置、天线方向图增益及雷达波形参数,按照式(10)构建回波信号。扫描过程中的和通道回波一维距离像仿真结果如图 8 所示。

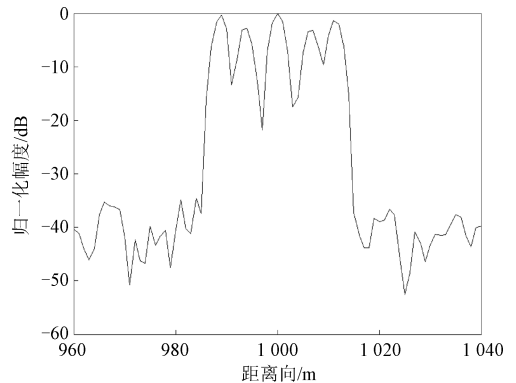


图 8 和通道回波一维距离像仿真图

为验证回波一维距离像各峰值与散射点的对应关系,仿真中依次去掉各散射点,观察峰值变化情况。表 1 为脉压峰值对应的散射点弹目距离与仿真结果的对比。

一维距离像中 $5$ 个峰值对应距离与 3.1 节中散射点设置相符。为进一步分析回波的建模效果,使用中频回波模拟器验证其有效性。该模拟

表 1 散射点弹目距离对比结果

散射点编号	脉压峰值对应距离/m	仿真距离/m
1	1 000	1 000.0
2	1 011	1 011.3
3	989	988.8
4	1 007	1 006.6
5	994	993.6

器与被测试设备互联,产生模拟回波信号进行测试。采用相同的仿真参数生成模拟回波,并将相应的脉冲同步信号及时钟信号注入中频回波模拟器中,以产生 450 MHz 中频模拟回波信号。该模拟回波信号通过数字下变频及脉冲压缩等处理,获取基带回波信号。图 9 为第 800 个到第 2 400 个回波脉冲压缩后,目标散射点所在的距离单元扫描过程中的回波幅度变化。

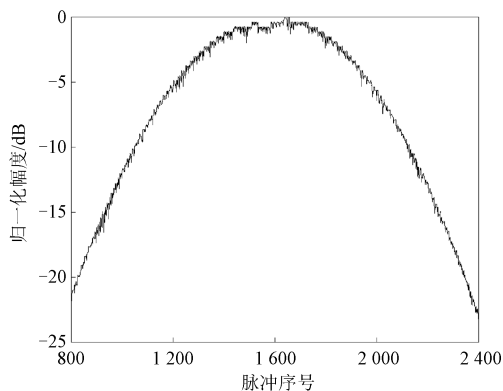


图 9 扫描过程中目标回波幅度变化曲线

最后,将仿真回波用于单脉冲前视成像过程,进行下一步验证。对雷达方位向扫描获取的脉冲回波进行单元平均恒虚警检测、单脉冲测角等处理,结合发射脉冲的瞬时波束方位指向,计算目标的方位偏角。在此基础上,通过逐脉冲的非相干积累,生成目标的距离-方位二维图像,获取单脉冲前视成像结果,如图 10 所示。

## 4 结论

本文提出了一种弹载雷达单脉冲前视成像回波的建模方法。首先分析并建立了弹载雷达前视成像的运动模型,通过最小二乘法拟合了弹体三维运动轨迹,并分析了三维速度变化情况;分析了

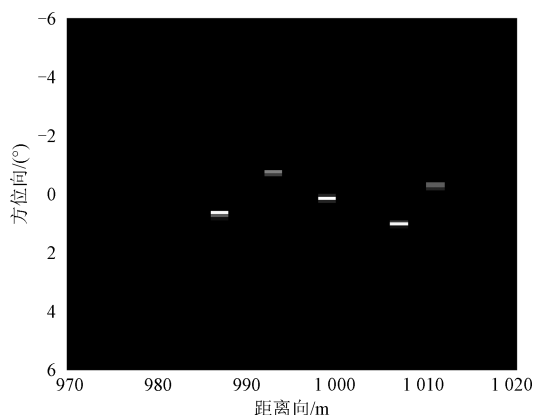


图 10 单脉冲前视成像仿真结果

前视成像雷达目标回波的特点,通过建立波束坐标系求解天线方向图增益,进而构建了单脉冲前视成像回波模型。本文通过仿真得到了一维距离像,通过测试获取了扫描过程中的目标回波幅度包络变化曲线,验证了单脉冲前视成像回波模型的有效性。

## 参考文献

- [1] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 3版. 西安:西安电子科技大学出版社,2010.
- [2] 杨成杰. 单脉冲雷达前视成像技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [3] 穆佳. 雷达前视成像方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2018.
- [4] 杜勇,磨国瑞,杨海粟,等. 雷达导引头单脉冲前视成像技术研究[J]. 现代雷达,2014,36(5):44-48.
- [5] WU J J, YANG J Y, YANG H J, et al. Optimal geometry configuration of bistatic forward-looking SAR[C]// 2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009: 1117-1120.
- [6] 刘群. 视景增强雷达系统的发展与展望[J]. 现代雷达,2001,23(4):8-10.
- [7] 吴迪,朱岱寅,田斌,等. 单脉冲成像算法性能分析[J]. 航空学报,2012,33(10):1905-1914.
- [8] 吴迪,杨成杰,朱岱寅,等. 一种用于单脉冲成像的自聚焦算法[J]. 电子学报,2016,44(8):1962-1968.
- [9] 杨洋,李悦丽. 单脉冲前视成像多目标分辨算法[J]. 信号处理,2016,32(9):1055-1064.