

# 弹道导弹的 ISAR 回波模拟

陈秀伟, 张云华, 张祥坤

(中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

**摘要** 提出了一种基于 FPGA 通用雷达回波模拟器系统, 并利用该回波模拟器产生弹道导弹的 ISAR 回波信号源。首先建立基于解线频调(去斜)技术的弹道导弹 ISAR 回波信号模型, 产生弹道导弹的 ISAR 回波仿真数据; 进而利用所开发的回波模拟器产生弹道导弹的 ISAR 回波模拟信号并对该信号进行采样和处理, 获得了与 Matlab 仿真数据成像一致的结果。实验结果表明: 模拟器能够精确有效地模拟和产生弹道导弹回波信号, 该模拟器具有可扩展性、可升级和可编程性。

**关键词** 雷达; 弹道导弹; 回波模拟

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.01.007

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)01-0029-06

随着弹道导弹技术迅速发展, 针对其防御的技术也越来越受重视, 进行弹道导弹的高分辨率成像是其中的一项重要技术。

自从雷达在第二次世界大战中出现和得到应用以来<sup>[1]</sup>, 雷达模拟器<sup>[2-8]</sup>技术始终伴随着雷达的发展而发展。随着计算机和集成电路技术的发展, 不断有新的雷达模拟器在世界范围内相继出现, 研制出了各种类型的雷达信号模拟器, 包括通用型 PD 雷达目标模拟器、毫米波目标模拟器和 X 波段机载火控相控阵雷达模拟器等, 目前已达到了较高的水平<sup>[7-8]</sup>。

本文针对弹道导弹的特点对弹道导弹的 ISAR 回波模拟进行了研究。

## 1 弹道导弹的弹道模型

弹道导弹飞行过程包括主动段和被动段 2 部分<sup>[9]</sup>。由于地球表面曲率的影响和地面雷达平台高度的限制, 防御方的地面雷达对弹道导弹的探测和预警主要在其被动段进行。假定地球为匀质无旋转圆球体且导弹运动不受空气阻力的影响, 由理论力学可知, 导弹被动段飞行作为一种位于速度矢量与地球引力矢量所决定的平面内的运动, 简称平面运动, 该平面称为弹道平面。导弹的运动为在地球有心力场内的运动, 运动轨迹为一椭圆弧段<sup>[10]</sup>。运动轨迹可以在弹道坐标系中予以表示, 见图 1(a), 其中, 实线椭圆表示为弹道轨迹; 图 1(b)所示为弹道导弹运动参数计算示意图。

弹道导弹的椭圆轨道形状可由长半轴  $a$  和偏心率  $e$  确定, 地心位于椭圆的 1 个焦点上。在椭圆轨道面内, 真近点角  $f$  和偏近点角  $E$  见图 1(a), 二者之间存在以下关系<sup>[10]</sup>:

$$\tan f/2 = \sqrt{(1+e)/(1-e)} \tan E/2 \quad (1)$$

椭圆轨道运动遵循开普勒方程:

$$E - e \sin E = n(t - \tau) \quad (2)$$

式中:  $n$  为轨道平均角速度;  $\tau$  为过近地点时刻;  $\mu_0$  为地球引力常数,  $\mu_0 = 3.986\ 005 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$ ; 决定偏心

\* 收稿日期: 2010-10-12

基金项目: 中国科学院技术支撑资助项目(10016xxx1005)

作者简介: 陈秀伟(1978-), 男, 辽宁朝阳人, 博士生, 主要从事成像雷达技术研究。

E-mail: chenspring\_sun@163.com

率  $e$  的  $p$  为半通径;  $a$  为长半轴。

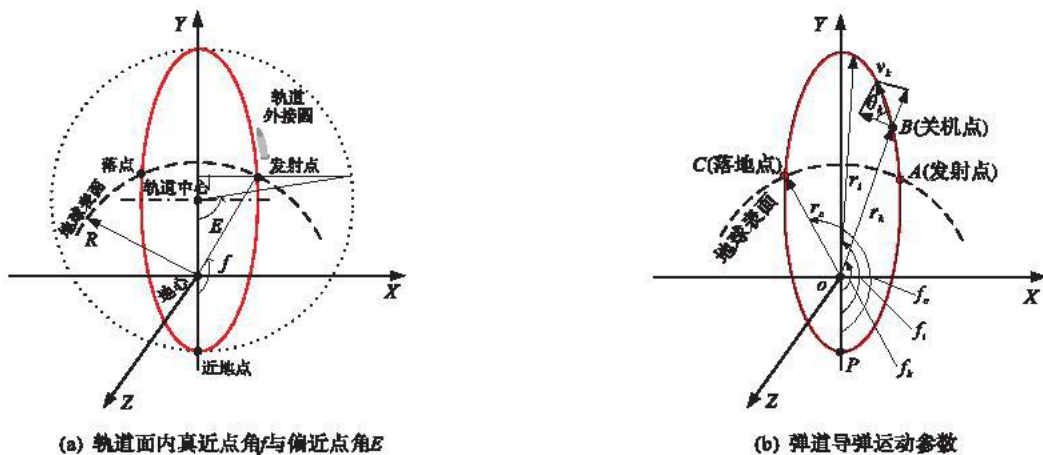


图1 弹道导弹的弹道轨迹示意图

Fig. 1 Ballistic trajectory diagram of ballistic missile

$$n = \sqrt{\mu_0/a^3} \quad (3) \quad e = \sqrt{1-p/a} \quad (4)$$

在图1(b)中,  $A$  点为弹道导弹的发射点,  $B$  点为弹道导弹的关机点,  $C$  点为弹道导弹的落地点; 在关机点,  $r_k$ 、 $v_k$  和  $\theta_k$  分别为弹道导弹在此时的地心距、飞行速度和弹道倾角;  $r_t$  为弹道导弹在  $t$  时刻的地心距,  $r_c$  为弹道导弹在落地点的地心距,  $r_c$  近似取地球平均半径,  $r_c = 6\,371 \times 10^3$  km;  $f_k$ 、 $f_c$ 、 $f_t$  分别为弹道导弹关机点、落地点和  $t$  时刻的真近地角。由椭圆弹道理论及其几何参数<sup>[11]</sup>, 半长轴  $a$ , 半通径  $p$  和偏心率  $e$  的计算公式为:

$$a = \mu_k/2\mu - r_k v_k^2; \quad p = r_k^2 v_k^2 \cos^2 \theta_k / \mu_0; \quad e = \sqrt{1-p/a} \quad (5)$$

设弹道导弹在时间  $t$  的地心距为  $r(t)$ , 坐标为  $(x_M(t), y_M(t))$ , 计算式为:

$$r(t) = a(1 - e \cos(E(t))); \quad x_M(t) = r(t) \sin(\pi - f_k(t)); \quad y_M(t) = r(t) \cos(\pi - f_k(t)) \quad (6)$$

式中, 由方程(1)可得:

$$f_k(t) = 2 \arctan \left( \sqrt{(1+e)/(1-e)} \tan \left( E(t)/2 \right) \right) \quad (7)$$

在方程(6)中, 求解  $t$  时刻的  $r(t)$  需要开普勒方程的解  $E(t)$ , 而开普勒方程为超越方程, 这里采用牛顿迭代法进行求解, 求解步骤如下:

- 1) 设置收敛条件;
- 2) 在  $t$  时刻, 由方程(3)可得开普勒方程(2)的右边值, 即  $n(t - \tau)$  的值为已知;
- 3) 求泰勒级数展开的开普勒方程左边式子的值:

$$E_m(t) = E_0(t) - (E_0(t) - e \sin(E_0(t)) - n(t_k - \tau)) / (1 - e \cos(E_0(t))) \quad (8)$$

$E_m(t)$  为迭代算法的中间值, 直到满足收敛条件时, 所得到的  $E_m(t)$  值为最终所求值。

由此可知, 弹道导弹的弹道是由导弹的关机点参数决定, 假定导弹的关机点参数  $(r_k, v_k, \theta_k)$  为已知, 那么这时就可以通过上述算法实现导弹在弹道坐标系中的弹道坐标计算, 为下一步的 ISAR 回波信号建模提供弹道模型数据。

## 2 弹道导弹的 ISAR 回波信号模型

通常情况下, 弹道导弹的运动速度非常高, 能够达到 5 000 m/s 以上。为了获得高距离分辨率和远的搜索距离, ISAR 通常采用时宽带宽积非常大的发射信号。ISAR 用大时宽带宽积的发射信号对高速弹道导弹进行成像及监控, 在这种情况下, 要模拟出这样的射频回波信号难度很大, 同时, 针对弹道导弹这样的高速目标, 通常的走-停模型对回波信号进行建模变得不适用, 因此, 将采用以下措施解决上述 2 种情况: ①针对大时宽带宽积采用解线频调技术; ②针对高速运动的弹道导弹目标考虑目标的脉内运动。

### 2.1 ISAR 解线频调基本原理

雷达回波信号解线频调原理见图 2。

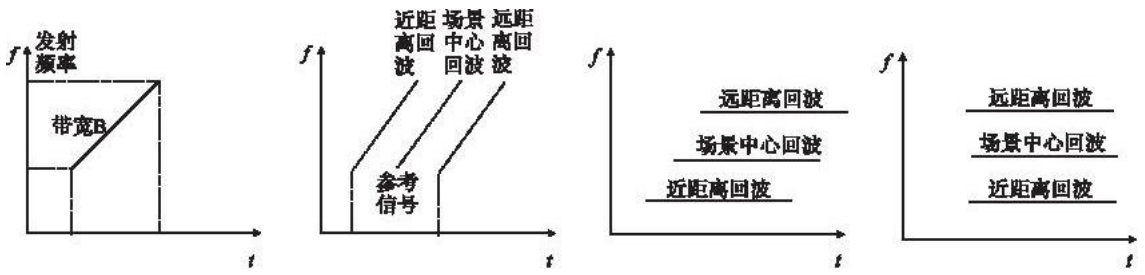


图 2 雷达回波信号去斜率解调原理示意图

Fig. 2 Theory diagram of radar echo dechirp demodulation

可以通过如下的处理过程对解线频调原理<sup>[11]</sup>进行说明,雷达发射的线性频率调制信号可以写成:

$$S_r(t)_m = \text{rect}\left(\frac{\hat{t}}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c \hat{t} + \frac{1}{2}\gamma \hat{t}^2\right)\right] \quad (9)$$

式中:  $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1 & |u| \leq 0.5 \\ 0 & |u| > 0.5 \end{cases}$ ,  $\hat{t} = t - mT_r$ ,  $T_r$  是雷达脉冲重复间隔;  $f_c$  是载频;  $T_p$  是脉冲宽度;  $B$  是带宽;  $\gamma =$

$B/T_p$  是频率调制率。Stretch 处理就是用发射信号的固定时延和目标回波信号混频,取出差频:

$$S_r(\hat{t})S^*(\hat{t}-t_l) = \exp\{j2\pi[\gamma(t_l - t_d)\hat{t} + f_c(t_l - t_d) - \gamma(t_l^2 - t_d^2)/2]\} \quad (10)$$

式中  $\gamma(t_l^2 - t_d^2)/2$  为剩余相位项。通过上式可以看出,作为信号源的宽带线性频率调制信号解线频调后成为一个固定点频的信号,且信号频率表示为:

$$f = 1/2\pi \, d\Phi/dt = \gamma(t_l - t_d) \quad (11)$$

式中  $\Phi$  为式(10)中的相位项。

ISAR 通常宽窄带信号交替发射。窄带信号用于对目标搜索,确定目标位置,从而确定本振时延  $t_l$ 。对于距离为  $L$  的 2 个点目标,其回波信号时间间隔为  $2L/c$ ,解线频调后 2 个点目标的特征频率差值为  $\Delta f = 2\gamma L/c$ 。在方程(10)中,存在的剩余相位项可以在后续的回波数据处理中补偿掉。

## 2.2 高速导弹目标的回波建模及成像

对于平稳匀速运动目标,可以基于走—停模型<sup>[12]</sup>建立回波模型,但对于高速导弹目标来说,这种模型不能满足要求,不能描述出目标在发射脉冲内运动产生的回波模型,这时为了更精确描述回波模型,应考虑高速运动目标的速度或加速度以及转动情况,图 3 给出了雷达和弹道导弹的几何关系图。雷达对空中导弹目标进行照射成像,第  $m$  个脉冲照射时导弹目标上的第  $n$  个散射点和雷达之间的距离可以表示为:

$$R_{nm}(\hat{t}) = R_{nm0} + |\mathbf{V}_m| \cos\theta \hat{t} + \frac{1}{2} |\mathbf{a}| \cos\theta \hat{t}^2 \quad (12)$$

式中,  $R_{nm0}$  为第  $m$  次脉冲照射导弹时,在  $\hat{t} = 0$  的时刻雷达和目标上第  $n$  个散射点之间的距离;  $\mathbf{V}_m$  为雷达发射第  $m$  次脉冲照射时的导弹目标速度;  $\mathbf{a}$  为导弹目标的加速度。散射点的时间延迟为  $\tau = 2R_{nm}\hat{t}/c$ ,所以回波信号可以表示为:

$$S_r(\hat{t}-\tau)_m = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t}-\tau}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c(\hat{t}-\tau) + \frac{1}{2}\gamma(\hat{t}-\tau)^2\right)\right] \quad (13)$$

式中  $A$  代表相应散射点的散射强度。接收信号经过解线频调技术处理后回波信号可以表示为:

$$S_{IF}(\hat{t}) = A \text{rect}\left(\frac{\hat{t}-\tau}{T_p}\right) \exp\left\{j2\pi\left[\phi_m + \omega_m \hat{t} + \frac{1}{2}K \hat{t}^2 + \Gamma \hat{t}^3 + H \hat{t}^4\right]\right\} \quad (14)$$

式中  $\phi_m, \omega_m, K, \Gamma$  和  $H$  分别表示如下:

$$\phi_m = \left\{ \frac{2(R_{mr} - R_{nm0})}{\lambda} + \frac{2\gamma(R_{mr}^2 - R_{nm0}^2)}{c^2} \right\} \quad (15)$$

$$\omega_m = \left\{ \frac{-2V_m \cos\theta}{\lambda} + \frac{2\gamma(R_{mr} - R_{nm0})}{c} + \frac{4\gamma(-R_{nm0} V_m \cos\theta)}{c^2} \right\} \quad (16)$$

$$K = \left\{ \frac{-a \cos \theta}{\lambda} + \frac{(-2V_m \gamma \cos \theta)}{c} + \frac{2\gamma(-R_{nm0} a \cos \theta - V_m^2 \cos^2 \theta)}{c^2} \right\} \quad (17)$$

$$\Gamma = \left\{ \frac{-a \gamma \cos \theta}{c} + \frac{-2a \gamma V_m \cos^2 \theta}{c^2} \right\} \quad (18)$$

$$H = \left\{ \frac{\gamma(-a^2 \cos^2 \theta)}{2c^2} \right\} \quad (19)$$

式中  $R_{mr}$  为第  $m$  次脉冲照射导弹目标时,雷达和导弹目标上参考点的距离,通常情况下,慢速目标在脉冲发射期间的距离变化是可以忽略的,方程(16) - (19) 含有速度或加速度的项在回波分析中是可以忽略的,这样散射点的回波信号经过解线频调处理后,可以认为是单频点信号;距离压缩可以通过离散傅立叶变换(DFT)实现。无论怎样,快速目标的径向速度在回波分析中是不能忽略的,必须加以考虑,由于在脉冲期间距离变化很可能大于距离分辨单元,因此在方程(14)中的回波信号为非线性的频率调制信号。相对于慢速目标,由于存在距离走动和距离展宽,快速目标的回波信号经压缩后其脉冲响应将发生平移和展宽。在实际中,距离展宽将严重地破坏回波信号距离包络和产生图像散焦。

综上所述,前面基于高速弹道导弹的弹道模型建立了回波信号模型,这里将采用解线频调技术对回波信号进行成像处理,仿真时雷达系统参数见表1,弹道导弹目标的三维图及坐标值见图4和表2,这里弹道导弹尺寸是按实际尺寸的缩比模型设置的。

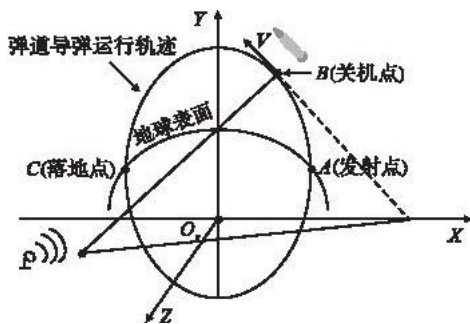


图3 雷达和导弹的几何关系

Fig. 3 Geometric relationship of radar and missile

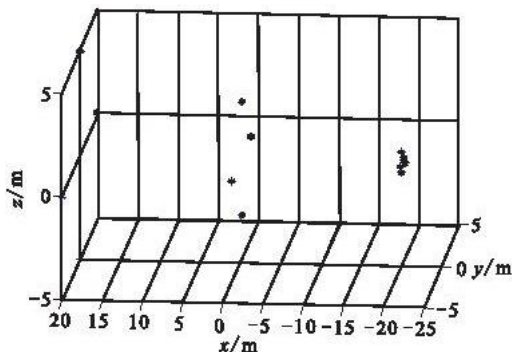


图4 弹道导弹目标的三维图

Fig. 4 3-D diagram of ballistic missile

表1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters

雷达系统仿真参数	
载频/GHz	10
带宽/MHz	500
脉宽/us	100
脉冲重复频率/Hz	1 000
采样频率/MHz	25
成像时间/s	0.4

仿真中,弹道导弹历经的弹道见图5,雷达所在的位置( $X_R, Y_R, Z_R$ )为(200, -444 700, 6 265 000),弹道导弹关机点参数( $r_k, v_k, \theta_k$ )为(6 372 000, 2 565, 0.61)。

基于上述的回波数据,采用常规的ISAR解线频调成像方法,成像结果见图6。

表2 目标上散射点位置

Tab. 2 Scatter point position of target

目标散射点序号	散射点坐标( $x, y, z$ )
1	(5, 20, 0)
2	(2.75, 0, 0)
3	(0.5, -20, 0)
4	(0, 20, 5)
5	(0, 0, 2.75)
6	(0, -20, 0.5)
7	(-5, 20, 0)
8	(-2.75, 0, 0)
9	(-0.5, -20, 0)
10	(0, 20, -5)
11	(0, 0, -2.75)
12	(0, -20, -0.5)
13	(0, -20.4 469, 0)

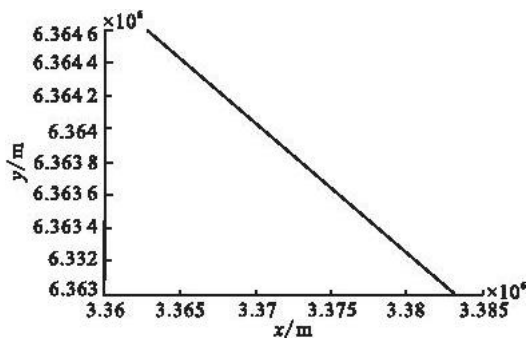


图 5 导弹的弹道历程

Fig. 5 Ballistic trajectory of missile

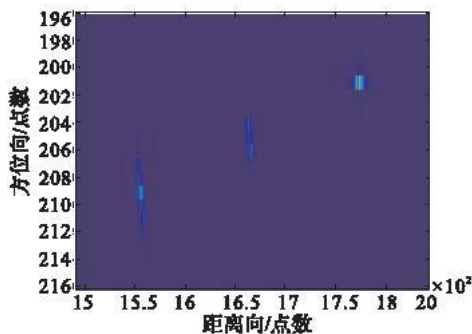


图 6 Matlab 仿真数据的成像结果

Fig. 6 Imaging result based on Matlab data

### 3 弹道导弹的 ISAR 回波信号源

#### 3.1 数据处理和回波产生单元

本部分的硬件模块单元主要基于 Xilinx 的 XtremeDSP Development Kit - IV 开发板,见图 7。图中指示的主控计算机上的目标回波仿真软件,它是用来产生仿真回波数据和调用真实场景回波数据库的,利用它就可以把数据下传给 FPGA 进行实时数据处理;系统给出了外同步和内同步信号输出端,可以灵活控制模拟回波的输出;差分单端转换电路可以作为信号输出检测端口,也可以作为视频信号的输出端口和信号源的输出端口。

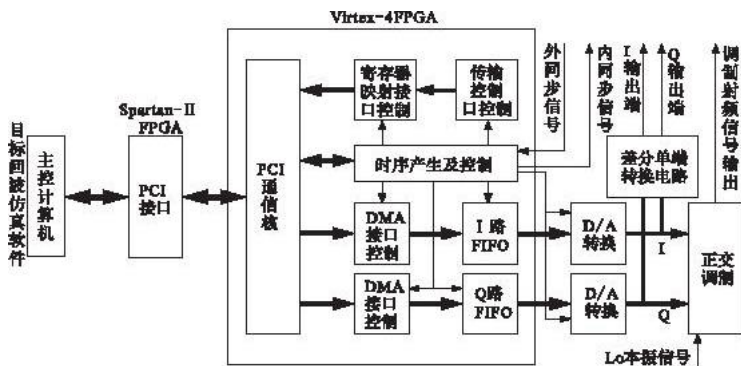


图 7 雷达回波模拟器回波产生单元框图

Fig. 7 Diagram of radar simulator echo generation unit

#### 3.2 弹道导弹的回波模拟及成像结果

现代雷达为了获得高性能,均采用先进的信号处理技术,对需要在复杂环境中检测目标的雷达尤其如此,其后续信号处理对 I、Q 通道的幅相不平衡提出了严格的要求,作为回波模拟信号源,保证 I、Q 通道的幅相平衡是非常关键的,测试波形见图 8。

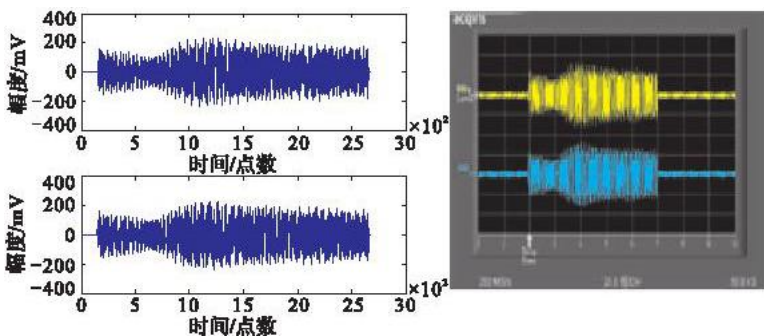


图 8 ISAR 解线频调仿真及实际信号输出

Fig. 8 ISAR stretch simulation and practical signal output

图 8 中给出了弹道导弹 ISAR 回波的仿真波形和与之对应的实际波形输出,为了进一步说明回波模拟信号的保真性,下面给出了第一次回波的仿真数据和模拟信号采样数据的归一化一维距离像,见图 9(a),可以看出,模拟回波信号对位置信息和幅度信号都有很好的保持;图 9(b)给出了仿真数据和采样数据的二维成像结果。对比图 9(b)和图 6 的成像结果可看出二者的一致性很好,说明所建立 ISAR 回波信号模拟器能够较好地实现理论计算的回波信号。试验中所用采样卡的采样率为 25 MHz, PRF 设置为 1 000 Hz,采样点数为 5 000。

图 9(a) 展示了第一次回波的仿真数据和模拟信号采样数据的归一化一维距离像。图 9(b) 展示了仿真数据和采样数据的二维成像结果。对比图 9(b) 和图 6 的成像结果可看出二者的一致性很好,说明所建立 ISAR 回波信号模拟器能够较好地实现理论计算的回波信号。试验中所用采样卡的采样率为 25 MHz, PRF 设置为 1 000 Hz,采样点数为 5 000。



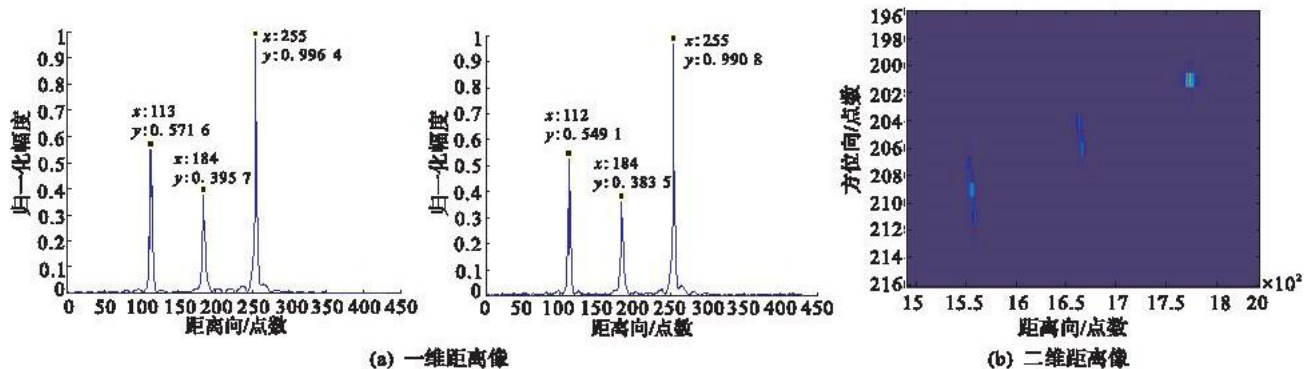


图9 仿真信号硬件输出数据的成像结果

Fig.9 Imaging results of hardware output signal data based on simulation

## 4 结束语

本文就雷达在以大时宽带宽的线性调频信号作为发射信号时,对高速运动的弹道导弹目标进行了研究,针对大带宽信号对接收机及后续组件系统的指标有严格要求的瓶颈,采用了通常的线性频率调制信号去斜率解调技术,并且建立了考虑弹道导弹目标的径向速度或加速度和偏航角速度条件下的回波模型。在对弹道导弹的回波进行分析基础上,建立了基于 FPGA 硬件 ISAR 回波模拟器。实验结果表明,这种基于 PCI 总线和先进 FPGA 技术的 ISAR 回波模拟器系统可以为 ISAR 的研究和后端数据的实时处理提供数据源。

## 参考文献:

- [1] 美·斯科尼克, 雷达手册[M]. 北京:电子工业出版社,2003.  
Skolnik Merrill L. Introduction to radar systems[M]. Beijing: Electronic industry press, 2003. (in Chinese)
- [2] Leonov S A, Leonov A I. Handbook of computer simulation in radio engineering, communications, and radar [M]. Boston: Artech house, 2001.
- [3] Franceschetti G. SAR raw signal simulation of actual ground sites described in terms of sparse input data[J]. IEEE trans on geoscience and remote sensing, 1994, GE - 32(6) :1160 - 1169.
- [4] Yao S J. Synthetic aperture radar raw signals simulation of extended scenes[J]. wuhan university journal of natural sciences, 2004, 9(3) :327 - 331.
- [5] 顾翔. 雷达成像的电磁场仿真与超分辨成像算法研究[D]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心,2009.  
GU Xiang. Study on electromagnetic simulation of radar Imaging and super - resolution algorithms [D]. Beijing: Center for space science and applied research, Chinese Academy of sciences, 2009.
- [6] 岳海霞. 合成孔径雷达回波信号模拟研究 [D]. 北京:中国科学院电子所,2005.  
YUE Haixia. Study on synthetic aperture radar echo simulation [D]. Beijing: doctoral dissertation Institute of electronics, Chinese academy of sciences, 2005.
- [7] 陆伟宁. 弹道导弹攻防对抗技术[M]. 北京:中国宇航出版社, 2007.  
LU Weining. Countermine technology of ballistic missile [M]. Beijing: China astronautic publishing house, 2007.
- [8] 刘林. 航天器轨道理论[M]. 北京:国防工业出版社,2000.  
LIU Lin. Orbit theory of spacecraft [M]. Beijing: National defence industry press, 2000.
- [9] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006.  
BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technique [M]. Beijing: Electronic industry press, 2006. (in Chinese)
- [10] 温晓杨. 动态目标雷达回波建模与仿真程序设计[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.  
WEN Xiaoyang. Modeling and simulation programming of radar return of moving targets [D]. Changsha: National university of defense technology, 2006. (in Chinese)
- [11] Chen C C, Andrews H C. Target Motion Induced radar Imaging[J]. IEEE trans on AES, 1980, 11(3) : 2 - 14.