

# 弹载侧视合成孔径雷达信号分析及成像研究

俞根苗<sup>1,2</sup>, 尚 勇<sup>3</sup>, 邓海涛<sup>2</sup>, 张长耀<sup>2</sup>, 葛家龙<sup>2</sup>, 吴顺君<sup>1</sup>

(1. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071; 2. 华东电子工程研究所, 安徽合肥 230031;  
3. 北京大学电子学系, 北京 100871)

**摘 要:** 本文探讨了装载在导弹上的侧视合成孔径雷达(SAR)在导弹下降飞行过程中回波信号的特性和成像处理问题. 根据导弹在要求合成孔径雷达成像期间内的飞行特点, 建立了 SAR 工作的空间几何模型和目标距离表达式, 分析了目标距离的时间变化特性和工作过程中多普勒参数的变化. 由于要求成像的过程中, 导弹的高度在不断减小, 多普勒参数变化大, 不能用同一参数对整个成像过程进行处理. 分析和仿真表明, 通过采用子孔径处理, 能够得到聚焦的子孔径图像.

**关键词:** 弹载合成孔径雷达; 多普勒参数; 成像处理

**中图分类号:** TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 05-0778-05

## Signal Analysis and Imaging Processing of Missile-Borne Side-looking SAR

YU Gen-miao<sup>1,2</sup>, SHANG Yong<sup>3</sup>, DENG Hai-tao<sup>2</sup>, ZHANG Chang-yao<sup>2</sup>, GE Jia-long, WU Shun-jun<sup>1</sup>

(1. National Key Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China;  
2. East China Research Institute of Electronic and Engineering, Hefei, Anhui 230031, China;  
3. Department of Electronics, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** This paper concern the issue of signal characteristic and imaging processing of missile-borne side-looking SAR during its descending flight. According to the flight speciality of missile, the geometric model and target range expression are built. The features of range variation with time in single aperture and Doppler parameter variation with operation time are analysed. Because of the altitude decreasing during SAR operation, Doppler parameters change notably and constant Doppler parameters are not suitable for the imaging processing of entire operation period. Analysis and simulation show that focused image can be obtained by employing sub-aperture processing.

**Key words:** missile borne SAR; signal analysis; imaging processing

## 1 引言

为保证巡航导弹等较长距离的导航精度和增强导弹自主性, 20 世纪 70~80 年代开始发展了如 INS/地形匹配、INS/景象匹配一类组合导航系统, 并已成功地应用于“战斧”等巡航导弹和 F-16 战斗机等. 这类组合导航系统除了能实现高精度导航外, 对地形跟踪、地形回避和威胁回避等也具有重要意义. 和光学系统相比, SAR 的优点是在能见度极差的气象条件下获得类似于光学照相的高分辨率地面目标图像<sup>[1~3]</sup>. 如果能通过装载在导弹上 SAR 获取目标或目标附近典型地物地貌特征信息, 形成实时图, 并进行后续处理, 得到导弹相对于目标或预定区域的精确位置, 从而控制导弹精确命中目标, 则可大大提高导弹的攻击能力<sup>[4]</sup>. 美国、俄罗斯、德国等都开展了 SAR 导引头方面的研究. 本文的目的是从信号分析的角度探讨装载在导弹上的侧视合成孔径雷达在导弹下降飞行

过程中成像的可能性. 根据分析和仿真结果, 采用子孔径处理, 可以得到聚焦的子孔径图像. 这对于分辨率要求不是很高的导弹的末制导是很有实际意义的.

## 2 弹载侧视 SAR 几何关系及目标距离分析

这里, 对弹载侧视条带 SAR 信号进行分析, 在成像过程中, 导弹的飞行速度方向不是水平的, 而是斜向下的, 因此成像过程中, 弹体的高度是在不断减小. 这里考虑的情况是成像带与导弹飞行路径在地面的投影平行, 此时, 随着 SAR 工作过程中高度在不断下降, 需要不断调整雷达波束视角(雷达波束中心线与过飞行路径且垂直于地面的垂直面的夹角).

如图 1 所示, 图中曲线 ABC 表示弹载 SAR 的运动路径, 且在图中所示坐标系的  $yo_z$  平面内, A 点位于  $O_z$  轴上, 图中两条点划线间的区域为成像带, 波束随时间变化视角调整, 使得成像带与飞行路径在地面的投影平行. 下面我们来构建单

个点目标的距离表达式.

设在  $t = 0$  时刻, 雷达处于 A 点, 其波束中心照射的点目标为 P, A 点在 z 轴上, 设 P 点到 A 点的距离为  $R_0$ , 在孔径时间内经过时间  $t$  雷达运动到 B 点. 设导弹在 A 点时相对

地面的水平和垂直速度分别为  $V_{y0}$  和  $V_{z0}$ , 导弹在水平和垂直方向的加速度分别为  $a_y$  和  $a_z$ , 则在  $t$  时刻, 雷达到 P 点的距离可表示为:

$$R(t) = \sqrt{R_0^2 + S(t)^2 - 2 \cdot R_0 \cdot S(t) \cos(\theta(t) + \gamma) \cos \theta_0} \quad (1)$$

这里,

$$S(t) = t \cdot \sqrt{\left(V_{y0} + \frac{1}{2} \cdot a_y \cdot t\right)^2 + \left(V_{z0} + \frac{1}{2} \cdot a_z \cdot t\right)^2} \quad (2)$$

$$\theta(t) = \arctg \left[ -\frac{V_{y0} + \frac{1}{2} \cdot a_y \cdot t}{V_{z0} + \frac{1}{2} \cdot a_z \cdot t} \right] \quad (3)$$

这里的  $V_z$  和  $a_z$  为负值,  $\theta(t)$  表示 A 点和  $t$  时刻导弹所在位置的 B 点间的连线与 z 轴的夹角,  $\gamma$  是 AP 与 yoz 平面的夹角, 是过波束中心线 AP 且平行于 x 轴的平面 (包含图中 APG 的平面) 与 xoz 平面的夹角, G 点在 y 轴上, AP 与 AG 的夹角为  $\gamma$ , AG 与 AO 的夹角为  $\theta_0$ . 不难验证, 不管  $t$  取正值还是负值, 距离  $R(t)$  的表达式都是适用的. 将  $R(t)$  按泰勒级数展开, 其三次近似表达式为:

$$R(t) \approx R_0 + R_{c1} \cdot t + \frac{1}{2} R_{c2} \cdot t^2 + \frac{1}{6} R_{c3} \cdot t^3 \quad (4)$$

其中  $R_{c1}$ 、 $R_{c2}$ 、 $R_{c3}$  分别为距离  $R(t)$  随时间变化的一次、二次和三次变化率, 它们的表达式分别如下:

$$R_{c1} = \cos(\gamma) \cos(\theta_0 + \gamma) \cdot V_0 \quad (5)$$

$$R_{c2} = \frac{V_0^2 \cdot 4 - \cos^2(\gamma) \cos^2(\theta_0 + \gamma)}{R_0} - \cos(\gamma) \cdot \frac{A_0 \cos(\theta_0 + \gamma) + B_0 \sin(\theta_0 + \gamma)}{V_0} \quad (6)$$

$$R_{c3} = \frac{3 \cdot A_0}{R_0} + \frac{3 \cos(\gamma) \cos(\theta_0 + \gamma) \cdot V_0^{3/2} \cdot [1 - \cos^2(\gamma) \cos^2(\theta_0 + \gamma)]}{2 \cdot R_0} - \frac{3 \cos^2(\gamma) \cos(\theta_0 + \gamma) \cdot [A_0 \cos(\theta_0 + \gamma) + B_0 \sin(\theta_0 + \gamma)]}{2 \cdot R_0} \quad (7)$$

式(5)、(6)和(7)中的  $V_0 = \sqrt{V_{y0}^2 + V_{z0}^2}$ ,  $A_0 = a_y \cdot V_{y0} + a_z \cdot V_{z0}$ ,  $B_0 = a_y \cdot V_{z0} - a_z \cdot V_{y0}$ ,  $\theta_0 = \arctg \left[ -\frac{V_{z0}}{V_{y0}} \right]$ .

由(5)、(6)和(7), 当  $\theta_0 + \gamma = 90^\circ$  时,  $R_{c1} = 0$ ,  $R_{c2}$  和  $R_{c3}$  也得到简化, 此时相当于通常的正侧视成像, 只不过由于加速度的影响, 还需要计及加速度项. 实际中可根据弹上的惯性导航

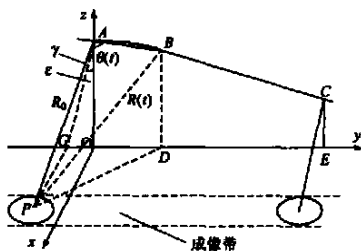


图1 成像带与导弹飞行路径在地面的投影平行的成像几何关系

数据通过天线稳定平台的伺服机构调整天线波束指向, 可实现  $(0) + 90^\circ$ , 从而降低成像处理的复杂度. 这里考虑更为一般的斜视情况, 把正侧视看成斜视的特例. 经分析可以得出, 若  $a_y = a_z = 0$ , (5)、(6)和(7)与通常的斜视情况下的表达式是一致的.

式(1)是单个孔径时间内点目标距离的一般表达式, 若忽略了地球曲率的影响, 由式(5)、(6)和(7)可知, 仅是  $R_0$  有所变化, 但对将要进行的信号分析没有质的影响. 若雷达距地面的高度为  $H$ , 成像点 P 到 y 轴的距离为  $X$ , 忽略地球曲率时, 则可得到用  $H$  和  $X$  表达的  $R_0$  和  $\cos$  的表达式为

$$R_0 = \sqrt{H^2 \cdot (1 + \tan^2 \gamma) + X^2} \quad (8)$$

$$\cos \gamma = \frac{H}{\cos \gamma \cdot R_0} \quad (9)$$

将式(9)代入式(5)、(6)和(7)可得:

$$R_{c1} = -\frac{H \cos(\theta_0 + \gamma) \cdot V_0}{\cos \gamma \cdot R_0} \quad (10)$$

$$R_{c2} = \frac{V_0^2}{R_0} \left[ 1 - \frac{H^2 \cos^2(\theta_0 + \gamma)}{\cos^2 \gamma \cdot R_0^2} \right] - \frac{H \cdot [A_0 \cos(\theta_0 + \gamma) + B_0 \sin(\theta_0 + \gamma)]}{\cos \gamma \cdot R_0 \cdot V_0} \quad (11)$$

$$R_{c3} = \frac{3 \cdot A_0}{R_0} - \frac{3 \cdot H \cos(\theta_0 + \gamma) \cdot V_0^3}{\cos \gamma \cdot R_0^3} \left[ 1 - \frac{H^2 \cos^2(\theta_0 + \gamma)}{\cos^2 \gamma \cdot R_0^2} + \frac{3 \cdot H^2 \cos(\theta_0 + \gamma) \cdot [A_0 \cos(\theta_0 + \gamma) + B_0 \sin(\theta_0 + \gamma)]}{\cos^2 \gamma \cdot R_0^3} \right] \quad (12)$$

根据距离一次和二次变化系数, 可以得到方位向信号多普勒中心频率和调频率的表达式<sup>[2,5]</sup>, 这里就不列出了.

上面分析是单个目标在合成孔径时间内的距离变化特性, 下面来分析在整个成像过程中, 雷达到波束照射区的距离变化.

设成像起始时 SAR 平台的高度为  $H_0$ , 起始水平和垂直速度分别为  $V_{y0}$  和  $V_{z0}$ , 水平和垂直加速度分别为  $a_y$  和  $a_z$ , 成像区波束中心照射目标的 x 轴坐标为  $X$ . 则随着时间  $t$  (这里的时间用  $t$  表示, 以区别于前面的单个孔径内时间  $t$ ) 的变化, SAR 到波束中心照射区的距离变化可表示为:

$$R_{0c}(t) = \sqrt{\left(H_0 + V_{z0} \cdot t + \frac{1}{2} a_z \cdot t^2\right)^2 \cdot (1 + \tan^2 \gamma) + X^2} \quad (13)$$

由式(13)可以看出, 随着高度的下降, SAR 到波束中心照射区的距离的变化即使是在  $a_z = 0$  时也是非线性的.

在 SAR 工作过程中由于高度变化, 从式(8)以及式(10)到式(12)可以看出, 距离表达式的各次系数是变化的, 因此成像过程中多普勒参数也是变化的. 另外由于 SAR 到波束中心照射区的距离的变化会引起图像的几何变形.

### 3 参数计算分析

下面, 对一些参数作一些仿真计算. 综合考虑, 仿真中导弹飞行参数和雷达系统参数取值如下:

方位波束宽度  $1.6^\circ$

雷达工作脉冲重复周期 18000Hz  
 工作波长 0.0175m  
 起始高度 ( $H_0$ ) 40000m  
 起始水平速度 ( $V_{0y}$ ) 4000m/s  
 起始垂直速度 ( $V_{0z}$ ) -1000m/s  
 SAR 工作持续时间 10s  
 成像带与飞行路径在地面的投影距离 29km

分有加速度和没有加速度两种情况,计算的参数包括:多普勒中心频率、多普勒调频率,计算的时间间隔取为 0.01 秒。另外,对点目标在单个孔径时间内的距离变化以及距离的二次近似误差也进行了计算。

(1)  $a_y = 0, a_z = 0, \omega = 0$

在此情况下计算结果分别如图 2 到图 5。

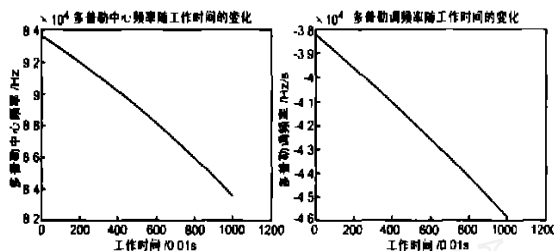


图 2 多普勒中心频率随工作时间的变化

图 3 多普勒调频率随工作时间的变化

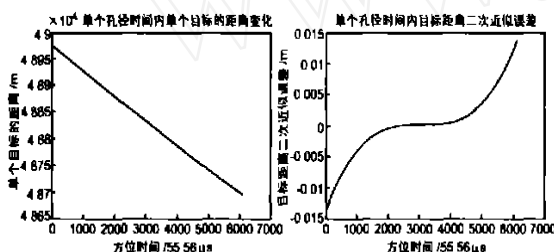


图 4 单个孔径时间内目标距离的变化

图 5 单个孔径时间内目标距离二次近似误差的变化

(2)  $a_y = -50\text{m/s}^2, a_z = -9.8\text{m/s}^2, \omega = 15.6^\circ$

在此情况下对各参数的计算结果分别如图 6 到 9。这里取 15.6 可使 SAR 在成像过程的中间时刻 (即  $t = 5\text{s}$ ) 等效于正侧视工作,并且也使得整个成像过程波束偏离正侧视的角度尽可能小,这也可以从图 5 和图 2 的多普勒中心频率大小的比较中看出。图 4 和图 5 以及图 8 和图 9 是在 SAR 开始工作时的单个孔径内计算的结果。

由上面的计算结果可以看出弹载侧视条带 SAR 成像和通常的条带 SAR 成像的差别是明显的,在通常条带 SAR 工作时,SAR 平台的高度是不变的,雷达运动路径和地面条带成像区域平行,地面上距离单元相同 (即  $x$  轴坐标相同)、不同方位的点目标到雷达运动路径的垂直距离是不变的,且在各自的合成孔径时间内具有相同的距离变化关系,距离表达式的展开式中时间的各次系数是相同的;但对于弹载 SAR,由于 SAR 平台高度在不断变化,雷达到照射区域的距离是变化的,即使是距离单元相同而方位不同的点目标,距离方程展开式中的系数是不同的,对于有加速度的情况,系数的变化更为复杂。这种不同方位的目标距离方程中的系数的变化就反映了

方位向信号多普勒参数的变化 (见图 2、3、6 和 7),多普勒参数的变化增加了成像处理的难度。

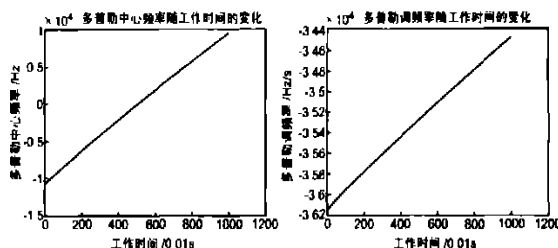


图 6 多普勒中心频率随工作时间的变化

图 7 多普勒调频率随工作时间的变化

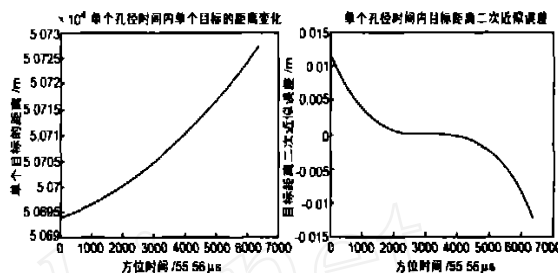


图 8 单个孔径时间内目标距离的变化

图 9 单个孔径时间内目标距离二次近似误差的变化

图 5 和图 9 给出了 SAR 开始工作时的单个孔径内目标距离二次近似误差,通过计算可知,无论有没有加速度,也无论是在弹载 SAR 工作的起始、中间、还是结束时刻,在合成孔径时间内,单个点目标到雷达的距离泰勒展开二次近似误差在孔径边缘达到 0.01m 以上,超过雷达工作波长的四分之一,三次误差经计算可知在  $10^{-4} \sim 10^{-5}$  量级,远小于一个波长。因此若采用全孔径处理,为了不影响聚焦性能,需要补偿距离变化的三次项,虽然距离变化三次项可以补偿,但会大大增加算法的复杂性,而弹载 SAR 通常都要求实时成像,复杂的算法对实时成像处理的要求很高,从实际系统实现的角度,算法不宜太复杂。由于弹载 SAR 的天线尺寸比较小,全孔径处理可得到的方位分辨率比较高,按这里所取的参数计算,方位向分辨率可达到 0.3~0.4m,实际的图像匹配具有 5~10m 的分辨率就足够了,因此在满足一定方位分辨率要求的情况下,可以考虑采用全孔径的一部分来处理,即子孔径处理,选择的子孔径长度要求能满足聚焦成像处理条件。

#### 4 成像处理仿真

由上节的分析计算知道,在工作时间内,多普勒参数变化较大,且单个孔径内变化十分明显,距离二次近似在孔径边缘造成较大的相位误差。通过分析可知,适当降低分辨率,采用子孔径处理,在整个工作期间,都可以满足信号聚焦条件。成像仿真中所需的雷达参数取值如下:

发射信号带宽: 70MHz  
 发射脉宽: 8μs  
 采样率: 80MHz  
 工作波长: 0.0175m

选取的子孔径所包含的方位向脉冲数为 1024,对应的孔径时间为 0.064 秒,按此选择的子孔径在整个成像过程中都

既能满足聚焦条件,又可以获得较高的方位向分辨率.由于采用降分辨率的子孔径处理,不同的子孔径间回波信号的选取可有一定的时间间隔,这样也降低了对成像处理速度的要求.实际中,可根据具体情况选择合适的子孔径长度.在单个子孔径内,多普勒参数变化较小,可以采用相对简单的成像处理方法进行处理,不过成像处理后需要进行几何校正才能得到与地面场景几何关系一致的图像.仿真中距离向采样点数取 2048,方位向子孔径脉冲数为 1024,子孔径中心时刻的导弹的高度为 40000m,水平速度和垂直速度分别为 4000m/s 和 1000m/s,且不失一般性,假设天线的方向图是均匀的.下面给出了两种情况下的成像仿真结果.

#### 4.1 情况 1 ( $a_y = 0$ , $a_z = 0$ , $\theta = 0$ , 系统起始采样斜距为 47500m)

##### (1) 单点目标成像

根据前面信号分析所述的模型,我们产生一个点目标(其在图 1 中的坐标为 (29000, 0, 0))在子孔径时间内的二维回波信号,该二维回波信号的幅度灰度图如图 10、11、12 分别是原始信号的方位谱和距离向压缩结果.图 13 到图 15 是点目标成像的结果,算法流程如图 16,它综合了 CS 算法以及方位 Scaling 和频谱分析技术 (SPECAN) [5~9].

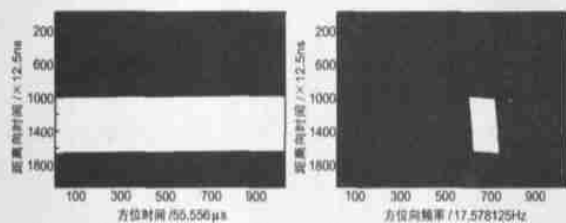


图 10 点目标二维信号幅度灰度图

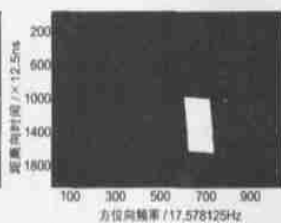


图 11 点目标二维信号的方位谱

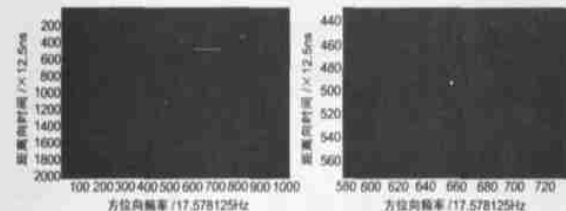


图 12 点目标信号距离向压缩结果

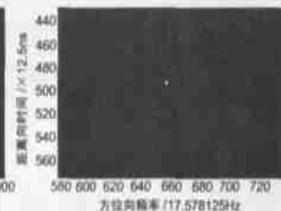


图 13 点目标成像结果

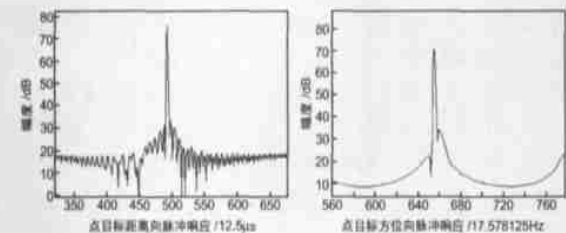


图 14 点目标距离向脉冲响应

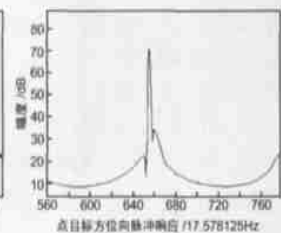


图 15 点目标方位向脉冲响应

降低旁瓣电平,这里以及后面的多点目标的成像仿真中,距离向和方位向都采用了海明加权处理.根据点目标的距离向和方位向脉冲响应可以知道,距离向的分辨率约为 2.6m,方位向的分辨率约为 2.8m;距离向和方位向的峰值副瓣电平均达到 -40dB,积分旁瓣电平分别为 -31.2dB 和 32.3dB.

##### (2) 多点目标的成像结果

地面点目标为 25 个,其坐标为  $((n-3) \cdot 300 + 29000, (m-3) \cdot 60, 0)$ ,其中  $n=1 \sim 5$ ,  $m=1 \sim 5$ ,单位为米,25 个点目标形成地面 1200 × 240 米的区域.我们同样采用上述算法,图 17 给出了目标区域局部成像结果.从图中点目标位置可以看出对不同方位位置的目标在距离向存在较大的几何畸变,且畸变情况和分析一致.经过几何校正后的图像如图 18,它与模拟的点目标间的地面位置关系一致.图 17 中的距离向时间指的是目标到子孔径飞行路径(或其飞行路径延长线)的垂直距离

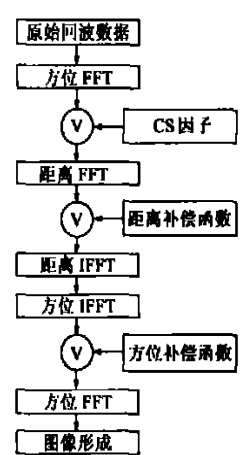


图 16 算法流程

所对应的时间(距离和距离向时间之间是一固定换算关系),而图 18 中的距离向指的是成像点到飞行航迹在地面的投影的垂直距离.需要说明的是,几何校正后的图像经过了插值处理,像元间距为 5m,起始距离为 28000m.几何校正和校正误差分析由于篇幅限制将另外讨论.

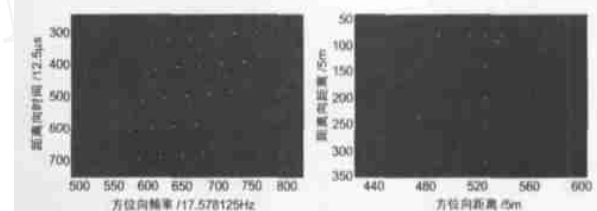


图 17 多点目标成像结果

图 18 几何校正后的结果

#### 4.2 情况 2 ( $a_y = -50 \text{ m/s}^2$ , $a_z = -9.8 \text{ m/s}^2$ , $\theta = 14.036^\circ$ , 系统起始采样斜距为 48500m)

这里仅对多点目标进行成像,目标的设置和 4.1 节相同.取 14.036 使得在所取的成像子孔径时间内波束中心线和速度方向的夹角约等于 90°.成像过程和没有加速度时一样,成像结果如图 19,图 20 是几何校正后的结果.

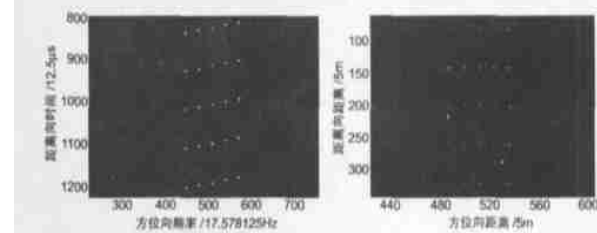


图 19 多点目标成像结果

图 20 几何校正后的结果

根据点目标成像结果的距离向和方位向的响应,在成像过程中若补偿加速度对多普勒参数的影响,图像的分辨率和 4.1 节的情况相同;若不考虑加速度的补偿,则由于失配对图像的聚焦性能有一定的影响,此时距离向分辨率没有变化,而方位向的分辨率约为 3.6m.实际应用时可根据分辨率要求和加速度的影响程度等因素来考虑是否在成像处理时对加速度进行补偿.

## 5 结束语

本文主要探讨了装载在导弹上的侧视合成孔径雷达在导弹下降飞行过程中信号的特性和成像的可能性. 导弹在要求合成孔径雷达成像期间内的飞行特点是其飞行高度不断在减小, 根据该特点建立了 SAR 工作的空间几何模型和目标距离表达式, 分析了目标距离的时间变化特性和工作过程中多普勒参数的变化. 由于成像过程中导弹的高度在不断减小, SAR 到成像区域的距离也不断减小, 多普勒参数变化大, 不能用同一参数对整个成像过程进行处理. 由分析和仿真可知, 通过采用子孔径处理, 能够得到聚焦的子孔径图像. 通过几何校正, 能够得到和设定的场景几何关系一致的图像. 应该指出, 本文是从信号分析和处理的角度初步探讨了成像的可能性, 得出了初步的结论. 就弹载 SAR 而言, 还有其他一些问题需要进行更深入的研究, 如系统参数的选择、图像几何校正以及弹上的惯导系统提供的参数精度对图像质量的影响等, 后续的研究将围绕这些方面进行.

## 参考文献:

- [1] 张澄波. 综合孔径雷达原理-系统分析与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1989.  
ZHANG Cheng-bo. Synthetic Aperture Radar Principal, System Analysis and Application[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [2] 刘永坦, 等. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999.  
LIU Yong-tan, et al. Radar Imaging Technology[M]. Harbin: Harbin Industry University Press, 1999.
- [3] John C Curlander, Robert N McDonough. Synthetic Aperture Radar System and Signal Processing[M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1991.
- [4] 燕英, 周荫清, 李春升, 许丽香. 弹载合成孔径雷达成像处理及定位误差分析[J]. 电子与信息学报, 2002, 24(12): 1932 - 1938.  
YAN Ying, ZHOU Yin-qing, LI Chun-sheng, XU Li-xiang. Missile-borne SAR imaging and error analysis of positioning[J]. Journal of Electronics & Information, 2002, 24(12): 1932 - 1938.
- [5] 黄岩, 李春升, 陈杰, 周荫清. 高分辨率星载 SAR 改进 Chirp Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2000, 28(3): 35 - 38.  
HUANG Yan, LI Chun-sheng, CHENG Jie, ZHOU Yin-qing. Refined chirp scaling algorithm for high resolution spaceborne SAR imaging[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA, 2000, 28(3): 35 - 38.
- [6] 孙进平, 袁运能, 柳重堪, 毛士艺. 斜视聚束模式合成孔径雷达的频率 Scaling 成像算法[J]. 电子学报, 2001, 29(12): 1593 - 1596.
- [7] Moreira A, Y Huang. Airborne SAR processing highly squinted data using a chirp scaling algorithm with integrated motion compensation[J]. IEEE Trans on GE, 1994, 32(5): 1029 - 1040.
- [8] Alberto Moreira, Josef Mittermayer, Rolf Scheiber. Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaging modes[J]. IEEE Trans on GE, 1996, 34(5): 1123-1136.
- [9] R Keith Raney, H Runge, R Bamler, Ian G Cumming, Frank H Wong. Precision SAR processing using chirp scaling[J]. IEEE Trans on A E S, 1994, 32(4): 786 - 799.

## 作者简介:



俞根苗 男, 1964 年出生于安徽贵池, 中国电子科技集团第 38 所高级工程师, 现为西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室在职博士生, 主要从事雷达信号处理及 SAR 系统方面的研究工作. E-mail: yugenmiao@sina.com.

尚 勇 男, 1970 年出生于陕西西安, 北京大学副教授, 主要研究领域为通信信号处理、雷达信号处理以及高速实时信号处理等.



邓海涛 男, 1979 年出生于湖北京山, 中国电子科技集团第 38 研究所工程师, 主要从事高分辨 SAR 成像及动目标检测处理工作.

张长耀 男, 1942 年出生于上海, 中国电子科技集团第 38 所雷达成像研究室副主任, 研究员, 长期从事雷达信号处理方面的研究工作.

葛家龙 男, 1962 年出生于安徽合肥, 中国电子科技集团第 38 所研究员, 主要从事 SAR 系统设计.

吴顺君 男, 1942 年出生于上海, 西安电子科技大学教授, 博士生导师, 现任雷达信号处理国家重点实验室主任. 主要研究领域为雷达系统分析建模与仿真, 信号处理与检测, 高速实时信号处理等, 出版著作 4 部, 发表论文 80 余篇.