

目标运动对机载正侧视条带 SAR 方位像影响的量化分析

吴晓芳 代大海 王雪松 卢焕章

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南, 长沙, 410073)

摘要: 解释了由目标运动引起的各项方位多普勒频移量的物理含义, 利用驻定相位定理推导出目标运动对机载正侧视条带 SAR 图像方位向位置和初始位置、速度、加速度的解析关系; 对由运动引起的方位向二次相位项、三次相位项以及四次相位项的影响给出了对应的偏移量和展宽量的理论表达式; 通过分离各相位调制项的方法, 实验验证了理论推导的正确性。该分析结果有助于深刻理解运动目标的 SAR 图像变化。

关键词: 合成孔径雷达; 匀加速运动; 量化分析; 驻定相位定理; 分离变量法

中图分类号: TN959 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2010)05-0665-07

Quantized Analysis of the Target Motion Influence on the Strip Image of Airborne Side-looking Mode SAR in Azimuth Direction

WU Xiao-fang DAI Da-hai WANG Xue-song LU Huan-zhang

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China)

Abstract: The physical meaning of each Doppler frequency shift items in azimuth direction caused by target motion is explained firstly. The analytical relationship between the peak position of the moving target's strip image for airborne side-looking mode SAR in azimuth direction and the initial position, velocity and acceleration are obtained using stationary phase principle. The theoretical expressions of the offsets and spreading cross range of each phase modulation items, such as quadratic phase factor, cubic phase factor, and quartic phase factor, are derived. Through separation of the phase modulation items and motion parameters, the theoretical derivations are verified by the simulation experiments. The research results are useful to understand the change of moving target's SAR images.

Key words: Synthetic Aperture Radar; target motion; quantized motion; stationary phase principle; separation of variables

1 引言

常规合成孔径雷达(SAR)的成像处理一般是针对地面静止目标或场景而言的。当目标运动时,在快时间的位置变化很小,可认为在一个线性调频脉冲内目标位置保持不变,即近似于“一步一停”;而方位向相干时间(合成孔径时间)相对较长,目标方位像对运动非常敏感,由运动引起的相位调制可使得目标的 SAR 方位向图像(简称为方位像)发生主瓣峰值降低、峰值偏移、展宽、重影甚至完全淹没于杂波^[1],这里暂且统称

为变形。一般认为目标在地面低速运动,由运动引起的二次以上相位干扰项影响不大,可忽略不计。然而,地面同样存在着速度高达在 30 ~ 100m/s 的各类车辆目标,运动可使得其方位向图像扩展高达数十乃至数百米。此时开展目标运动对 SAR 方位像影响的定量分析需求就非常突出,它是深入理解运动影响和开展后端运动目标成像处理的基础。

Raney 于 1971 年较早分析了低速运动目标的运动参数对 SAR 图像的影响,给出了不出现距离走动以及方位向散焦的条件,指出了径向速度使得目标方位像

偏移,径向加速度和方位向速度使得目标方位像扩展^[2];文献[3]用驻定相位定理分析了SAR的 $\omega-k$ 成像算法中运动目标的成像特点,动目标方位像将出现椭圆形或双曲线形的模糊。张焕胜在其博士论文中讨论了匀速和匀加速直线运动目标的多普勒带宽和合成孔径时间的变化^[5];F. Zhou给出了由运动引起的相对合成孔径长度以及二阶Keystone格式估计匀加速运动参数的方法^[6]。从运动补偿角度来考虑SAR平台非理想运动对静止目标成像的影响,和SAR平台理想飞行情况下对运动目标的成像异曲同工,但仅是对由运动引起的高阶干扰相位项进行了定性分析^{[7]-[8]};Ramin Sabry提出了一种斜视角下的瞬态距离多普勒历程模型,将运动在距离向和方位向上的影响二维可视化^[9]。以上研究限于运动对SAR图像影响的偏移量的定量分析和对扩展量和模糊量的定性描述。

本文旨在深化运动对SAR图像影响的理解,重点分析运动对SAR方位向图像的变形量化公式,给出明确的物理解析。采用常规机载SAR平台及其正侧视条带工作模式,近似“一步一停”工作条件,SAR平台匀速直线飞行,忽略地球自转及曲率的影响,利用经典RD算法成像,可将合成的方位向线性调频信号独立出来,由驻定相位原理推导出匀加速运动目标SAR图像方位向峰值位置和目标初始位置、速度及加速度的解析关系;通过分离各相位调制项的方法研究各运动参数的影响,推导出相应的偏移、展宽等变形量的理论表达式。考虑到在较大运动参数的影响,讨论了目标方位像分裂的情况。仿真实验验证了理论分析的正确性和精确性。

2 运动目标的SAR方位向图像

以SAR飞行方向为 x 轴正方向,以沿地面垂直于航线方向为 y 轴正方向建立右手直角坐标系 $Oxyz$ 。坐标原点 O 为当方位向慢时间为零时刻时SAR位置的地面投影点。图1中合成孔径长度为 L ,SAR载机速度为 ν ,平台高度为 H ,合成孔径时间 $T_L = L/\nu$,取 t_r 为距离向快时间, t_a 为方位向慢时间,全时间 $t = t_r + t_a$;点目标 P 在地面运动,沿方位向(即 x 轴向)的速度和加速度分别为 ν_x, a_x ,沿地距向的速度和加速度分别为 ν_y, a_y ;因SAR的系统响应函数在 x 维具有平移不变性^[10],为方便起见,定义 $t_a = 0$ 时刻 P 的初始位置为 $(x_0, y_0, 0)$,则 P 到载机的垂直斜距为 $R_0 = \sqrt{y_0^2 + H^2}$ 。

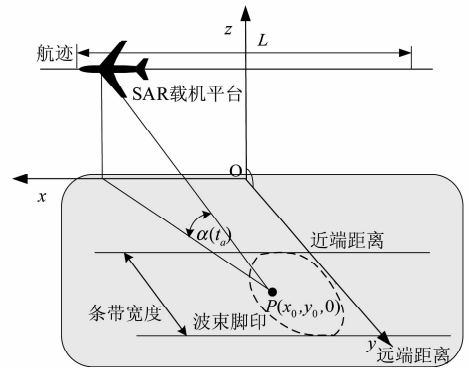


图1 SAR运动目标成像几何关系图

2.1 方位向回波相位分析

目标到载机的斜距及按麦克劳林公式展开的形式为

$$R(t_a) = \sqrt{(x_0 + \nu_x t_a + a_x t_a^2/2 - \nu t_a)^2 + (y_0 + \nu_y t_a + a_y t_a^2/2)^2 + H^2} \approx R_0 + \frac{x_0(\nu_x - \nu) + y_0 \nu_y t_a}{R_0} + \frac{(\nu_x - \nu)^2 + \nu_y^2 + x_0 a_x + y_0 a_y t_a^2}{2R_0} + \frac{a_x(\nu_x - \nu) + a_y \nu_y t_a^3}{2R_0} + \frac{a_x^2 + a_y^2 t_a^4}{8R_0} \quad (1)$$

设SAR发射的是线性调频信号,则目标 P 经去载频后的回波信号为

$$s(t_r, t_a) = \sigma \cdot \text{rect} \left[\frac{t_r - 2R(t_a)/c}{T_p} \right] \cdot \text{rect} \left(\frac{t_a - x_0/\nu}{T_{LP}} \right) \cdot \exp \left\{ j\pi \mu_r \left[t_r - \frac{2R(t_a)}{c} \right]^2 \right\} \cdot \exp[-j2kR(t_a)] \quad (2)$$

其中 $T_p, \mu_r, k = 2\pi/\lambda$ 为线性调频信号的脉冲宽度、调频斜率以及距离波数, $T_{LP} = L/(\nu - \nu_x)$ 为 P 点的合成时间, σ 为与天线方向图和目标后向散射强度有关的慢变函数,受天线波束方向图的调制,在波束宽度内可近似为常数。取经距离向脉压处理和距离徙动校正后,与 t_a 不相关的脉压输出记为 $I(t_r)$,与 t_a 相关的方位向信号可分离为

$$s(t_a) = \text{rect} \left(\frac{t_a - x_0/\nu}{T_{LP}} \right) \cdot \exp[-j2kR(t_a)] \quad (3)$$

将(1)代入(3),得方位向相位项 $\phi(t_a)$,并通过调整如下 $\phi(t_a) = \phi_0(t_a) + \phi_1(t_a) + \phi_2(t_a) + \phi_3(t_a) + \phi_4(t_a) = -\frac{4\pi R_0}{\lambda} + 2\pi \mu_a \underbrace{\left(\frac{t_a}{2} - \frac{x_0}{\nu} \right)}_{f_{d0}} t_a + 2\pi \mu_a \underbrace{\frac{x_0 \nu_x + y_0 \nu_y}{\nu^2}}_{f_{d1}} t_a$

$$\begin{aligned}
& + 2\pi\mu_a t_a \underbrace{\frac{(\nu_x^2 - 2\nu_x\nu_y + \nu_y^2)}{2\nu^2}}_{f_{d2}} t_a + 2\pi\mu_a \underbrace{\frac{(x_0 a_x t_a + y_0 a_y t_a)}{2\nu^2}}_{f_{d3}} t_a \\
& + 2\pi \underbrace{(\mu_a t_a) \frac{a_x t_a (\nu_x - \nu) + a_y t_a \nu_y}{2\nu^2}}_{f_{d4}} \\
& + 2\pi \underbrace{\frac{\mu_a t_a}{2\nu^2} \left[\left(\frac{a_x t_a}{2} \right)^2 + \left(\frac{a_y t_a}{2} \right)^2 \right]}_{f_{d5}} t_a \quad (4)
\end{aligned}$$

其中 $\mu_a = -2\nu^2/(\lambda R_0)$ 为多普勒调频率,

$$\phi_0(t_a) = -\frac{4\pi R_0}{\lambda} - \pi\mu_a \frac{2x_0}{\nu} t_a + \pi\mu_a t_a^2$$

$$\phi_1(t_a) = 2\pi\mu_a \frac{x_0\nu_x + y_0\nu_y}{\nu^2} t_a$$

$$\phi_2(t_a) = \pi\mu_a \frac{(\nu_x^2 - 2\nu_x\nu_y + \nu_y^2 + y_0 a_y + x_0 a_x)}{\nu^2} t_a^2$$

$$\phi_3(t_a) = \pi\mu_a \frac{a_x(\nu_x - \nu) + a_y\nu_y}{\nu^2} t_a^3$$

$$\phi_4(t_a) = \pi\mu_a \frac{(a_x^2 + a_y^2)}{4\nu^2} t_a^4$$

在方位向脉压处理时,第一项为常数相位项,不影响成像特征。第二项中 f_{d0} 反映了目标静止时在不同 SAR 脉冲重访时刻的多普勒频率偏移,通过脉冲压缩处理可获得目标方位向初始位置高分辨方位像。第三项中 f_{d1} 为由速度引起的多普勒频移,且对每个脉冲而言,多普勒频移量相同,使得目标方位像整体偏离原始位置。第四项中 f_{d2} 体现了速度和方位向调频波形的相互作用,不同的脉冲时刻对应着等间隔的多普勒频率变化量,这使得方位向回波数据中含有 $T_{LP}P_{rf}$ 个多普勒频率分量(P_{rf} 为脉冲重复频率),造成方位向频率上的对称均匀展宽,经脉压处理后导致方位像的均匀展宽。

当目标匀加速运动时,在每个脉冲重复周期内可将加速度的影响用平均速度来等效理解,即取

$$\bar{V}_x(t_a) = a_x t_a / 2 \quad \bar{V}_y(t_a) = a_y t_a / 2 \quad (5)$$

再用类似于速度对方位像影响的分析方法来研究等效平均速度的影响,所不同的是等效速度随方位向时刻 t_a 等间隔变化。第五项中 f_{d3} 为加速度对应的等效速度引起的多普勒频移,因等效速度随 t_a 等间隔变化,故 f_{d3} 也等间隔变化,对方位像的影响类似 f_{d2} ,使得方位像发生对称均匀展宽。第六项中 f_{d4} 反映了目标加速度对应的等效速度和速度对方位向调频波形的联合作用,等效速度和方位向调频波均随 t_a 等间隔变化,故回波数据中多普勒频率分量的间隔呈二次方非均匀展宽,在方位向像上体现为非对称变形。第七项中

f_{d5} 为对应于加速度的等效速度对方位向调频波形的作用,回波数据中的各多普勒频率分量的间隔呈三次方非均匀展宽,在方位像上体现为波的非对称性变形。

2.2 方位像分析

方位压缩处理的参考信号时域表达式为

$$h_a(t_a) = \text{rect}(t_a/T_L) \cdot \exp(-j\pi\mu_a t_a^2) \quad (6)$$

采用方位向参考函数进行脉压处理,

$$I(t_a) = s(t_a) \otimes h_a(t_a) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) \cdot h_a(t_a - \tau) d\tau \quad (7)$$

其中“ \otimes ”表示卷积,忽略常数项得(7)式待积分项的相位为

$$\begin{aligned}
\varphi(\tau) = & \pi\mu_a \left[\frac{2x_0(\nu_x - \nu) + 2y_0\nu_y}{\nu^2} \tau \right. \\
& + \frac{(\nu_x - \nu)^2 + \nu_y^2 + x_0 a_x + y_0 a_y}{\nu^2} \tau^2 + \frac{a_x(\nu_x - \nu) + a_y\nu_y}{\nu^2} \tau^3 \\
& \left. + \frac{a_x^2 + a_y^2}{4\nu^2} \tau^4 \right] - \pi\mu_a (t_a - \tau)^2 \quad (8)
\end{aligned}$$

驻定相位定理是分析线性调频信号的有效工具,因 Fresnel 近似条件下,SAR 的方位向回波数据也是线性调频信号形式,且具有较大的时宽带宽积,故可采用驻相点法求取积分^[7],将积分式内的相位项 $\varphi(\tau)$ 对 τ 求导,得到驻相点处的关系式^[12]

$$\begin{aligned}
\varphi'(\tau) \Big|_{\tau=\tau^*} & = 2\pi\mu_a \\
& \left[\frac{x_0(\nu_x - \nu) + y_0\nu_y}{\nu^2} + t_a + \frac{\nu_x^2 - 2\nu_x\nu_y + \nu_y^2 + x_0 a_x + y_0 a_y}{\nu^2} \tau \right] \\
& + 3\pi\mu_a \frac{a_x(\nu_x - \nu) + a_y\nu_y}{\nu^2} \tau^2 + \pi\mu_a \frac{a_x^2 + a_y^2}{\nu^2} \tau^3 = 0 \\
\Rightarrow t_{am} & = \frac{x_0}{\nu} - \frac{x_0\nu_x + y_0\nu_y}{\nu^2} - \frac{\nu_x^2 - 2\nu_x\nu_y + \nu_y^2 + x_0 a_x + y_0 a_y}{\nu^2} \tau^* \\
& - \frac{3a_x(\nu_x - \nu) + 3a_y\nu_y}{2\nu^2} \tau^{*2} - \frac{a_x^2 + a_y^2}{2\nu^2} \tau^{*3} \quad (9)
\end{aligned}$$

其中 t_{am} 为取驻相点时的方位向时刻,从求得的驻相点 τ^* ,可求得积分 $I(t_a)$ 为^[12]

$$I(t_a) \sim \sqrt{\frac{\pi}{2|\varphi''_{\tau^*}|}} \exp \left\{ j \left[\varphi_{\tau^*} + \frac{\pi}{4} \text{sgn}(\varphi''_{\tau^*}) \right] \right\} \quad (10)$$

其中 φ''_{τ^*} 为 $\varphi(\tau)$ 在 τ^* 处的二阶导数。当 $|\varphi''_{\tau^*}|$ 越大时,积分值越小。相位函数在驻相点的二阶导数为

$$\varphi''(\tau^*) = 2\pi\mu_a \left\{ \frac{\nu_x^2 - 2\nu_x\nu_y + \nu_y^2 + x_0a_x + y_0a_y}{\nu^2} + \frac{3[a_x(\nu_x - \nu) + a_y\nu_y]}{\nu^2} \tau^* + \frac{3(a_x^2 + a_y^2)}{2\nu^2} \tau^{*2} \right\} \quad (11)$$

当积分式 $I(t_a)$ 有多个驻相点时, 积分结果为各驻相点处积分值的累加。在 $|\varphi''(\tau^*)|$ 最小时的驻相点处, 积分 $I(t_a)$ 取最大值, 其它时刻目标像随 τ^* 变化而变化。

3 运动对方位像的影响分析

$\phi_0(t_a)$ 为目标静止时对应的相位, 其 RD 成像结果为两个方向上的辛克函数形式。一旦目标运动, 就会产生附加的干扰相位项, 对理想成像结果形成破坏。运动引起的各阶相位项量化分析如下:

3.1 各阶相位项的影响分析

3.1.1 一次相位项的影响

$\phi_1(t_a)$ 体现了一次相位项的影响, 对应于 $\phi(t_a)$ 式中的第三项以及 t_{am} 关于 τ^* 的常数项, 可知目标方位向峰值位置位于 $x_0 - (x_0\nu_x + y_0\nu_y)/\nu$ 处 (如图 2(a)), 因一次相位项引起的方位像峰值位置偏移量为

$$\Delta x_1 = -(x_0\nu_x + y_0\nu_y)/\nu \quad (12)$$

偏移量和目标初始位置、速度成正比, 和 SAR 速度成反比。值得指出的是偏移量和展宽量的符号代表了在方位向上的变形方向。图 2 中“箭头”代表多普勒频点所处的位置, “箭头”分布反映了相应的多普勒频点分布, “箭头”的密度反映了目标能量的散布情况。从图 2(b)~(d) 中可以看出方位像在均匀展宽的同时, 能量也均匀展宽; 在非均匀展宽的同时, 能量也被非均匀散布。随着展宽现象的产生, 目标的峰值中心位于展宽方位像的能量中心处, 展宽量也对应着一定的峰值位置偏移, 该偏移量的大小和展宽形式有关。

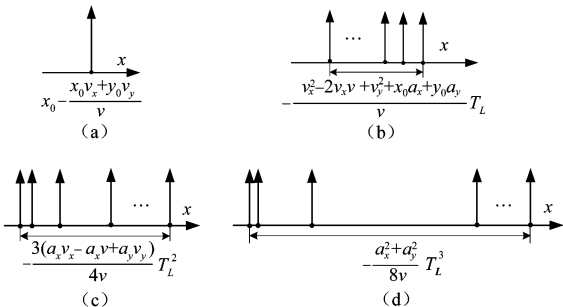


图2 目标峰值方位向位置

3.1.2 二次相位项的影响

$\phi_2(t_a)$ 体现了由速度和加速度引起的二次相位项的影响, 对应于 $\phi(t_a)$ 式中的第四、第五项以及 t_{am} 的第三项。 $\phi_2(t_a)$ 使得峰值时刻的位置随着 τ^* 的变化而以 $(\nu_x^2 - 2\nu_x\nu_y + \nu_y^2 + x_0a_x + y_0a_y)/(P_{rf}\nu)$ 线性变化 (如图 2(b))。其中由速度引起的二次相位项在方位像上体现为波形的均匀展宽。因二次相位项引起的展宽量为

$$\delta x_2 = -(\nu_x^2 - 2\nu_x\nu_y + \nu_y^2 + x_0a_x + y_0a_y) T_L / \nu \quad (13)$$

3.1.3 三次相位项的影响

$\phi_3(t_a)$ 体现了三次相位项的影响, 对应于 (4) 式中的六项以及 (9) 式中 t_{am} 关于 τ 的二次项。 $\phi_3(t_a)$ 使得峰值时刻的位置随着时间 τ 的变化而以 $3(a_x\nu_x - a_x\nu + a_y\nu_y)/(4\nu)$ 为系数呈平方递减趋势变化 (如图 2(c)), 在方位像上体现为波形的非均匀展宽, 因三次相位项引起的展宽量为

$$\delta x_3 = -\frac{3(a_x\nu_x - a_x\nu + a_y\nu_y)}{4\nu} T_L^2 \quad (14)$$

三次相位项引起的方位像展宽量和目标的速度、加速度以及合成孔径时间成正比, 和 ν 成反比。同样地, 这种展宽变形也使得峰值中心发生一定偏移, 偏移量和能量中心位置一致。

3.1.4 四次相位项的影响

$\phi_4(t_a)$ 体现了四次相位项的影响, 对应于 $\phi(t_a)$ 的第七项以及 t_{am} 关于 τ^* 的三次项。 $\phi_4(t_a)$ 使得 t_a 随着 τ^* 变化而以 $(a_x^2 + a_y^2)/(8\nu)$ 为系数呈三次方递减趋势变化 (如图 2(d)), 在方位像上体现为非均匀展宽, 因四次相位项引起的展宽量为

$$\delta x_4 = -(a_x^2 + a_y^2) T_L^3 / (8\nu) \quad (15)$$

四次相位项引起的方位像展宽量和目标的加速度以及合成孔径时间成正比, 和 ν 成反比。由运动引起的偏移和展宽总量为

$$\Delta x = -(x_0\nu_x + y_0\nu_y)/\nu$$

$$\delta x = \delta x_2 + \delta x_3 + \delta x_4 = -\frac{\nu_x^2 - 2\nu_x\nu_y + \nu_y^2 + x_0a_x + y_0a_y}{\nu} T_L - \frac{3(a_x\nu_x - a_x\nu + a_y\nu_y)}{4\nu} T_L^2 - \frac{a_x^2 + a_y^2}{8\nu} T_L^3 \quad (16)$$

3.2 各运动参数的影响分析

3.2.1 方位向速度的影响

取 $a_x = 0, \nu_y = 0, a_y = 0$, 可得仅方位向速度影响下目标方位像在 t_{am} 时有值

$$t_{am} = \frac{x_0}{\nu} - \frac{x_0\nu_x}{\nu^2} - \frac{\nu_x^2 - 2\nu_x\nu_y}{\nu^2} \tau^* \quad (17)$$

方位向速度使得目标方位像偏移 $-x_0\nu_x/\nu$, 均匀展宽

$$-(v_x^2 - 2v_x v_y) T_L / \nu。$$

3.2.2 方位向加速度的影响

取 $v_x = 0, v_y = 0, a_y = 0$, 可得仅方位向加速度影响下目标方位像在 t_{am} 时有值

$$t_{am} = \frac{x_0}{\nu} - \frac{x_0 a_x}{\nu^2} \tau^* + \frac{3a_x}{2\nu} \tau^{*2} - \frac{a_x^2}{2\nu^2} \tau^{*3} \quad (18)$$

方位向加速度使得目标方位像均匀展宽 $-x_0 a_x T_L / \nu$, 平方型非均匀展宽 $3a_x T_L^2 / 4$, 三次型非均匀展宽 $-a_x^2 T_L^3 / (8\nu)$ 。

3.2.3 地距向速度的影响

取 $v_x = 0, a_x = 0, a_y = 0$, 可得仅地距向速度影响下目标方位像在 t_{am} 时有值

$$t_{am} = \frac{x_0}{\nu} - \frac{y_0 v_y}{\nu^2} - \frac{v_y^2}{\nu^2} \tau^* \quad (19)$$

地距向速度使方位像偏移 $-y_0 v_y / \nu$, 均匀展宽 $-v_y^2 T_L / \nu$ 。

3.2.4 地距向加速度的影响

取 $v_x = 0, a_x = 0, v_y = 0$, 可得仅地距向加速度影响下目标方位像在 t_{am} 时有值

$$t_{am} = \frac{x_0}{\nu} - \frac{y_0 a_y}{\nu^2} \tau^* - \frac{a_y^2}{2\nu^2} \tau^{*2} \quad (20)$$

地距向加速度使方位像均匀展宽 $-y_0 a_y T_L / \nu$, 三次型非均匀展宽 $-a_y^2 T_L^3 / (8\nu)$ 。

3.2.5 对比分析

当速度和加速度不同时为零时, t_{am} 关于 τ^* 的二次项将存在由速度和加速度耦合引起的交叉项, 共同使得目标方位像发生二次型非均匀展宽。从前面的分析中可看出除方位向速度、加速度和 SAR 平台速度有额外的作用项(方位向速度的均匀展宽量为 $2v_x T_L$, 加速度的非均匀展宽量为 $3a_x T_L^2 / 4$) 以外, 地距向速度引起的偏移量受初始位置 y_0 的线性影响, 均匀展宽量是对等的; 地距向加速度引起的均匀展宽量同样受 y_0 的线性影响, 三次型非均匀展宽量是对等的。

3.3 目标方位像分裂

当运动引起的偏移超出一定的范围后, 合成的方位像会发生分裂或缺省的现象, 统称为“像分裂”。宽泛地讲, 运动引起的方位像的扩展, 也可以认为是像分裂的一种情况。该特点和高分辨距离像中由于目标引起的“目标分裂”类似, 可根据相关方法进行补偿或拼接处理。

在前面的分析中如果运动目标的方位向峰值时刻 t_{am} 在方位向时间窗口内, 空间各独立散射点脉压成像时不发生混叠。当 t_{am} 不在 SAR 回波信号的方位向时间

窗口内, 即 $t_{am} \notin \left[\frac{x_0}{\nu} - \frac{T_{PL}}{2}, \frac{x_0}{\nu} + \frac{T_{PL}}{2} \right]$ 时, 方位像在方位

距离上的偏移, 在合成孔径内表现为目标由合成孔径的另一端反折回来, 会发生方位距离模糊。当运动引起的变形超出可以分辨目标的方位向单元时, 就会发生方位像的分裂。

目标运动引起的方位像分裂现象, 破坏了目标的正常方位向成像, 会给许多的后续处理带来麻烦, 所以要采取措施解决目标的方位像分裂现象, 可以设法对目标进行运动补偿。但通常情况下, 难以对其进行精确的补偿, 可通过调整成像参数来克服距离像的分裂。最直接的方法就是增大方位向合成孔径长度, 具体可以通过增加目标成像的径向距离或者增大 SAR 系统的方位向波束宽度来实现。关于目标方位像分裂的补偿方法这里不再展开论述。

4 仿真实验

下面将通过仿真实验, 逐个研究由运动引起的各阶相位项以及各运动参数对目标方位像的调制效果。仿真实验的主要参数为 $f_0 = 10\text{GHz}$, $T_p = 10\mu\text{s}$, 带宽 $B = 100\text{MHz}$, $P_{rf} = 1000\text{Hz}$, $H = 6000\text{m}$, $\nu = 200\text{m/s}$ 。因 SAR 的系统响应函数在 x 维具有平移不变性, 为方便起见, 取 P 点位于 $(0, 8000\text{m}, 0)$, 为便于后面的比较分析, 取 $v_x = v_y = 2\text{m/s}$, $a_x = a_y = 2\text{m/s}^2$ 。

4.1 各阶相位项的影响

根据仿真参数和前面的理论推导可知, $\phi_0(t_a)$ 对应于目标的初始位置; $\phi_1(t_a)$ 使得目标方位像发生 $\Delta x_1 = -80\text{m}$ 的偏移; $\phi_2(t_a)$ 使得目标方位像发生 $\delta x_2 = -159.68\text{m}$ 的展宽; $\phi_3(t_a)$ 引起 $\delta x_3 = 6.48\text{m}$ 的二次型非均匀展宽; $\phi_4(t_a)$ 使得目标方位像发生 $\delta x_4 = -0.05\text{m}$ 的三次型非均匀展宽; 动目标的总体成像效果应呈现为在初始位置的基础上发生 $\Delta x = -80\text{m}$ 的方位向偏移和 $\delta x = -153.25\text{m}$ 的展宽。

图3为经过加汉宁窗处理后的各阶附加相位项在 $\phi_0(t_a)$ 基础上形成的成像结果图, (a) 图中目标位于初始位置, 方位向坐标为 0m , 距离向坐标为 10000m ; (b) 图为仅一次附加相位项作用下的图像, 目标距离向坐标保持不变, 方位向坐标偏移了 -80m 的距离; (c) 图为仅二次附加相位项作用下的图像, 目标在初始位置的基础上扩展了 159.4m ; (d) 图为仅三次附加相位项作用下的图像, 目标在初始位置的基础上非均匀扩展了 6.78m , 中心偏移了 5.5m ; 从 (e) 图中可看出四次相位项对方位像的影响甚小; (f) 为运动引起的各阶相位项

对 SAR 图像的综合影响,展宽了 149.4m。仿真实验中的变形量误差和理论值吻合,误差均在 10% 以内。

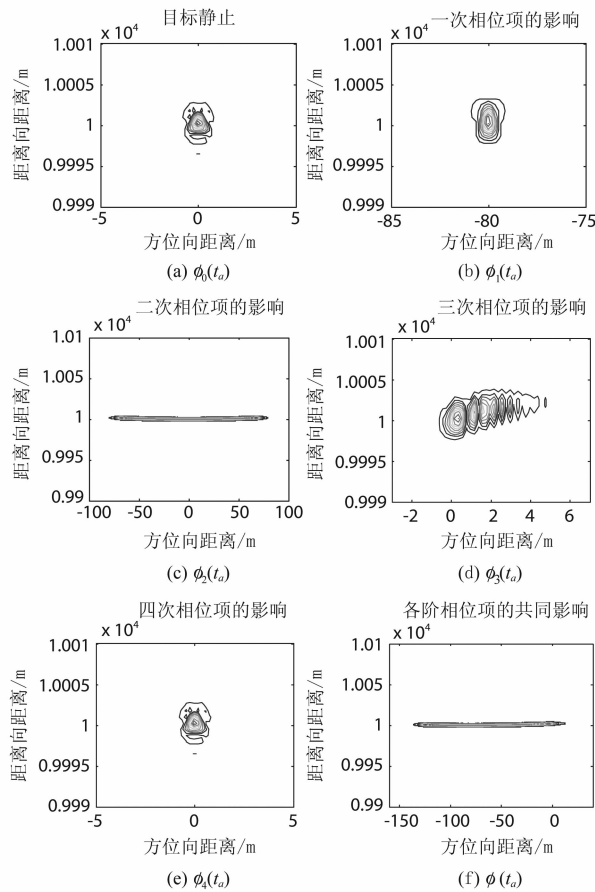


图3 运动引起的各阶相位项对方位像的影响

4.2 各运动参数的影响

下面将开展单个运动参数对成像结果的影响,仿真参数同上,方便起见,不再细分各阶相位项对应的变形量,而是用总偏移量和总展宽量进行对比。图4为经过加汉宁窗处理后的实验结果,表1为变形量的理论值和和实验值对比。

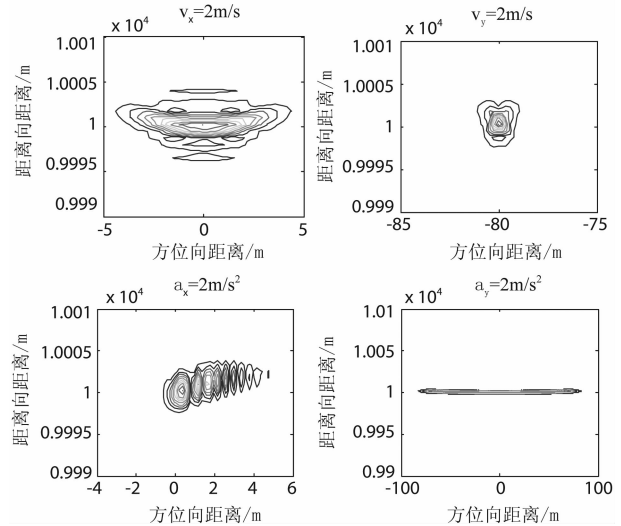


图4 不同运动参数对方位像的影响

从图4和表1中可以看出实验值和理论值非常吻合,绝对误差在可接受范围内。方位向速度主要使得方位像发生展宽,地距向速度主要使得方位像发生偏移,方位向加速度主要使得方位像发生非均匀展宽,地距向加速度主要使得方位像非均匀展宽。

表1 实验结果对比

变形量/m	$v_x = 2\text{m/s}$			$v_y = 2\text{m/s}$			$a_x = 2\text{m/s}^2$			$a_y = 2\text{m/s}^2$		
	理论值	实验值	误差	理论值	实验值	误差	理论值	实验值	误差	理论值	实验值	误差
偏移量	-----	-----	-----	-80.00	-80.0	0	-----	-----	-----	-----	-----	-----
展宽量	8.34	8.8	0.46	-0.04	0.0	0.04	6.59	5.5	-1.09	-168.02	-165.0	3.02

4.3 目标方位像的分裂

图5给出了目标点静止以及运动出现方位像分裂的情况。(a)给出了目标的散射点原始位置;(b)是因为目标运动使方位像发生偏移和扩展,目标的前一部份扩展像从合成孔径的另一端移入,使目标分布在合

成孔径窗口的两端,分裂成两个目标,从而破坏了方位像;(c)中目标的运动使得方位像偏移量超出了合成孔径窗口,目标方位像从合成孔径窗口的另一端反射回来,形成模糊。

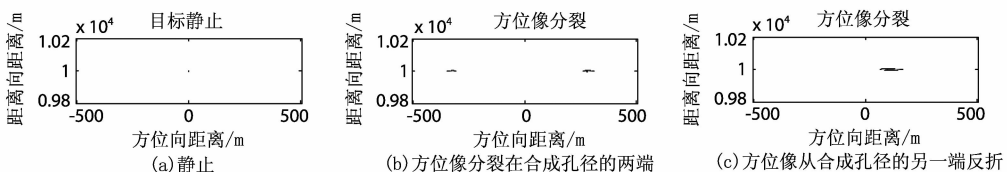


图5 目标方位像的分裂

5 结束语

针对 SAR 方位向的合成线性调频信号,从物理含义上,解释了由运动引起的各项多普勒频移的产生原因,用驻定相位原理推导出了运动目标方位像峰值中心和初始位置、速度和加速度的解析关系,通过分离变量法分析了由速度和加速度引起的各相位调制项和各运动参数对机载正侧视条带 SAR 图像的影响,量化了方位像目标峰值的偏移量和展宽量,通过仿真实验验证了理论分析的正确性。分析了当运动引起的变形量超过合成孔径长度时,目标方位像分裂的情况。

研究表明:(1)从各阶相位项的变形量大小可以看出,由速度决定的一次相位项和由速度和加速度决定的二次相位项对方位像的影响通常最大,前者主要决定偏移量,后者主要决定展宽量;(2)从各单种运动参数下的变形量大小可以看出,地距向速度和加速度的影响较为突出,前者主要产生偏移量,后者主要形成展宽;(3)变形量一般和运动方向反向。因运动目标的回波仅明显存在于照射到其上的有限脉冲内,故变形后的目标图像也受到合成孔径长度的限制,变形量后目标方位像峰值不在时间窗口内时,将发生方位像分裂;(4)可通过增大合成孔径的方法减少方位像分裂。

本文的主要价值在于给出了各项多普勒频移量的物理内涵,给出了二次、三次、四次附加相位项引起的变形量量化公式。对深入理解 SAR 运动目标成像以及相关的后续处理有重要的指导意义。

参考文献

- [1] Marina V. Dragošević. Autofocusing of Moving Objects in SAR Data Based on Adaptive Notch Filtering. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*. 2008, 44(1): 384-392.
- [2] R. Keith Raney. Synthetic Aperture Imaging Radar and Moving Targets. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*. 1971, 7(3): 499-505.
- [3] W. M. Brown. SAR Resolution in the Presence of Phase Errors. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*. 1988, 24(6): 808-814.
- [4] A. F. Yegulalp. Analysis of SAR Image Formation Equations for Stationary and Moving Targets. Project Report (FPR-14), Lincoln Laboratory, MIT, 2002.
- [5] 张焕胜. 机载 SAR 地面运动目标检测与成像技术研究 [D]. 中国科学院电子学研究所. 2006.
- [6] F. Zhou, R. Wu, M. Xing and Z. Bao. Approach for Sin-

gle Channel SAR Ground Moving Target Imaging and Motion Parameter Estimation. *IET Radar Sonar Navig.* 2007, 1(1): 59-66.

- [7] 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.
- [8] 曹福祥, 保铮, 袁建平. 运动测量误差对带状 SAR 成像影响的定量分析. *西北工业大学学报*. 2001, 19(4): 621-624.
- [9] Ramin Sabry. Basic Slant Range-Doppler Modeling of Moving Scatterers for SAR Applications. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2008, 5(1): 8-12.
- [10] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [11] J. K. Jao. Theory of Synthetic Aperture Radar Imaging of a Moving Target. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*. 2001, 39(9): 1984-1992.
- [12] 李家春, 周显初. 数学物理中的渐近方法 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.

作者简介



吴晓芳(1983-),女,安徽亳州人,2004年毕业于清华大学,现为国防科学技术大学博士生。主要研究方向成像雷达的信号处理及干扰技术研究等。

E-mail: byeu722@yahoo.com.cn



代大海(1980-),男,河南信阳人,博士,国防科技大学讲师,主要研究方向:极化 SAR 信号处理。

E-mail: ddh1206@163.com



王雪松(1972-),男,教授,博士生导师。中国电子学会高级会员,遥感遥测遥控分会委员。1994年毕业于国防科技大学电子技术系,1999年6月获工学博士学位,博士论文评为2001年度“全国百篇优秀博士学位论文”,在国际国内知名学术期刊发表论文70篇,SCI/EI收录30余篇。

E-mail: wxs1019@vip.sina.com



卢焕章,男,教授,博士生导师。国防科技大学电子科学与工程学院 ATR 国家重点实验室副主任,国家 863 计划专题专家。主要研究方向:军用电子系统中的实时信息处理系统设计和构造技术,包括:目标检测、跟踪、识别理论、实时算法设计、算法专用实现电路设计、实时系统软件设计等。