

## 旋转微动目标的 SAR 成像特性分析

吴晓芳, 刘 阳, 王雪松, 卢焕章

(国防科技大学电子科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 旋转因具有不同方向上的运动分量而对 SAR 回波具有复杂的多普勒调制作用, 进而形成特殊的成像结果。详细分析了旋转微动目标的 SAR 图像特征、图像形式以及位置关系, 指出不同运动参数的旋转微动目标可形成方位向上等间隔分布的、幅度受第一类贝塞尔函数调制的互相独立、交接或交错的直线型、直线点列型、直线条带型以及直线圆列型图像, 并给出了以上图像形式和位置关系的形成条件; 实验验证了理论分析的正确性。该研究结果深化了对旋转微动目标的 SAR 成像特性的认识, 可有助于判定旋转微动目标的存在, 为其特征提取奠定基础。

**关键词:** SAR; 旋转微动; 方位向; 正弦调制; 像元

**中图分类号:** TN985

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-1328(2010)04-1181-09

**DOI:** 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.04.039

### 0 引言

SAR 可实现全天候、全天时、高增益的地面目标成像, 具体为通过宽信号频带设计实现距离向高分辨; 通过平台运动, 等效地在空间形成很长的线性阵列来实现方位向高分辨。然而地面目标的多样性以及地貌的复杂性给 SAR 的高分辨成像提出了一系列的难题, 除质心以外的目标或目标组成部分的转动、振动和加速运动等微动形式<sup>[1]</sup> (如天线罩的旋转<sup>[2]</sup>、桥梁或建筑的振动<sup>[3]</sup>、人体的摆动等等<sup>[4]</sup>) 会对 SAR 回波形成复杂的多普勒调制, 进而产生特殊的 SAR 成像结果, 旋转微动是其中的典型。关于旋转微动目标的成像<sup>[5]</sup>、估计<sup>[6]</sup>、特征提取<sup>[7-8]</sup>、分类与识别<sup>[9-10]</sup> 等方面的研究已逐渐展开。对 SAR 而言, 深入理解目标的成像特性是进行后续检测和识别的基础。文献[2]对旋转微动目标进行了时频分析和 SAR 仿真成像, 简单地分析了其成像输出特性, 指出旋转会引起目标在 SAR 图像方位向上的扩展。时频分析虽然是当前研究微动目标特性的好方法, 但对 SAR 成像系统而言, 处理的是大场景、大数据量的目标回波, 其中包含的大多是静止目标回波, 如不加区分地直接对整个回波数据进行时频分析来提取微动目标特征, 结果将会得不偿失。实际通常

会采取的处理流程是, 首先进行常规成像, 当从中发现具有旋转微动目标的 SAR 图像特征时, 将该段数据提取出来, 再采用时频分析的方法对提取出的数据段进行微动特征提取。对旋转微动目标 SAR 成像特性的准确认知是有效发现微动目标的重要环节, 而已公开报道的研究结果尚不够详细和清晰。

当前 SAR 系统的功能日益完善, 在具有不同工作模式的同时, 通常也配有适合不同场景的成像算法, 工作模式和成像算法的不同可能会使得目标的成像结果有所不同。本文将典型的机载正侧视成像 SAR 系统为对象, 建立旋转微动目标的几何建模和信号建模; 采用距离-多普勒成像算法推导出旋转微动目标的 SAR 成像输出结果; 给出不同图像形式的形成条件; 指出目标像的距离向位置随方位向慢时间呈正弦规律变化, 方位向位置以旋转中心的方位向坐标为中心等间隔分布, 成像结果可表现为直线型、直线点列型、直线条带型以及直线圆列型等四种形式, 像元之间可呈现互相独立、交接以及交错等三种位置关系; 并通过仿真实验和外场实验进行验证。当 SAR 图像中出现这些特征时, 可初步判定地面上有旋转微动目标的存在, 进而可进一步通过时频分析等手段进行特征提取。

收稿日期: 2009-03-27; 修回日期: 2009-05-12

基金项目: “十一五”武器装备预先研究项目(513040305); 国家自然科学基金(60672033)

1 理论建模

当 SAR 用于场景成像时,通常总是处于正侧视工作模式,对目标的信号建模时可采用点散射模型进行简化分析。故本文以机载 SAR 正侧视工作模式为前提,采用点目标散射模型进行讨论。

1.1 几何场景

图 1 中  $L$  为合成孔径长度, SAR 载机速度为  $v_s$ , 平台高度为  $H$ , 点目标  $T$  以  $O$  为中心在地面上做匀速旋转运动。不妨选取 SAR 正侧视探测模式,忽略地球曲率的影响,以载机飞行方向为  $X$  轴,垂直向上方向为  $Z$  轴建立坐标系,设  $O$  点的坐标为  $(x_0, y_0, 0)$ , 到雷达合成孔径中心的斜距为  $R_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + H^2}$ ,  $T$  的旋转半径为  $r$ , 旋转速度为  $\omega$  (逆时针方向为正,顺时针方向为负),则合成孔径时间  $T_s = L/v_s$  取  $t_r$  为距离向快时间,  $t_a$  为方位向慢时间,全时间  $t = t_r + t_a$ , 以飞机位于  $YZ$  平面内的时刻为方位向慢时间的零时刻,此时目标对应的初始相位为  $\varphi_0$  (以  $X$  正方向为起点)。

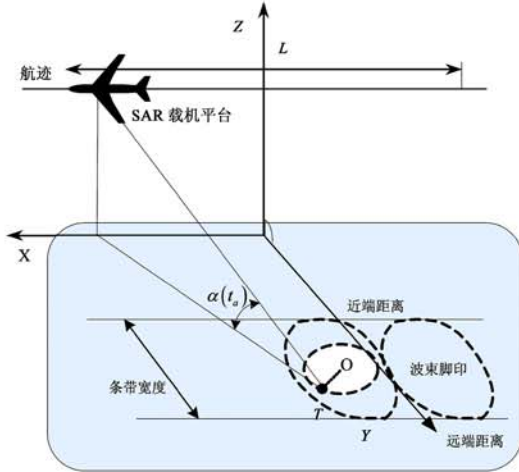


图 1 几何场景图  
Fig.1 Geometric scene

考虑到机载 SAR 可近似为在快慢时间“一步一步”模式下工作,则目标一般位置坐标可表示为  $(x_0 + r\cos(\omega t_a + \varphi_0), y_0 + r\sin(\omega t_a + \varphi_0), 0)$ , SAR 天线相位中心到目标的斜距为

$$R(t_a) \approx R_0(t_a) + r\cos[\alpha(t_a)]\sin[\omega t_a + \varphi_0 + \theta(t_a)] \quad (1)$$

其中取  $R_0(t_a) = \sqrt{y_0^2 + (x_0 - v_s t_a)^2 + H^2}$ ,

$\alpha(t_a) = \arccos[\sqrt{y_0^2 + (x_0 - v_s t_a)^2}/R_0(t_a)]$ ,  $\theta(t_a) = \arctan[(x_0 - v_s t_a)/y_0]$ ,  $\arccos(\cdot)$  为反余弦函数,  $\arctan(\cdot)$  为反正切函数,俯仰角  $\alpha(t_a)$  随方位向慢时间而变化。因在一个脉冲来回的快时间内,目标因旋转而变化的相位微乎其微,故可将因快时间旋转运动引起的距离变化忽略不计。

为方便起见,采用归一化幅度形式,设 SAR 发射的线性调频信号为

$$s(n, t) = \text{rect}\left(\frac{t - nT_r}{T_p}\right) \cdot \exp\left[j2\pi\left(f_0 t + \frac{1}{2}k_r(t - nT_r)^2\right)\right] \quad (2)$$

式中  $f_0$  为载频,  $T_p$  为脉冲宽度,  $\omega_0 = 2\pi f_0$  为载波角频率,  $k_r$  为线性调频斜率,  $t_r = t - nT_r$  表示发射脉冲的脉内快时间,  $T_r$  为脉冲重复周期,  $n$  表示脉冲数,  $\text{rect}(\cdot)$  为矩形函数。

$$\text{rect}(x) = \begin{cases} 1 & |x| \leq 1/2 \\ 0 & |x| > 1/2 \end{cases}$$

经解调去载频后的 SAR 接收机接收到的回波信号为

$$s_r(t_r, t_a) = \text{rect}\left[\frac{t_r - 2R(t_a)/c}{T_p}\right] \cdot \exp\left\{j\pi k_r\left[t_r - \frac{2R(t_a)}{c}\right]^2\right\} \cdot \exp[-j2kR(t_a)] \quad (3)$$

其中  $k = 2\pi/\lambda$  是电磁波的距离波数。

1.2 成像处理

根据距离徙动影响和实际应用的不同, SAR 系统宜采取的成像算法会有所不同<sup>[11]</sup>, 难以一概而论。距离-多普勒(RD)成像算法的基本思想是把二维移变滤波器分解成两个一维处理的级联,先对每个回波脉冲进行距离向压缩,然后在 R-D 域中,通过插值来解除由于距离徙动所引起的距离向和方位向间的耦合,最后完成方位向聚焦处理。RD 成像算法只需随距离改变插值函数和方位向聚焦参考函数,可以很容易地完成 SAR 空间滤波的任务,显著提高计算的效率,成为正侧视 SAR 中最为通用的成像算法。故本文采用 RD 算法进行成像,在作距离压缩时,只需考虑与时间  $t_r$  有关的相位项,即上式中的第一个复指数相位项。其距离压缩的过程与常规雷达中线性调频信号的脉冲压缩过程一致,用于

脉压的参考信号为

$$h_r(t_r) = \text{rect}(t_r/T_p)\exp(-j\pi k_r t_r^2) \quad (4)$$

由于脉压处理采用 FFT 实现,时域的参考信号需要变换到频域,实际过程中先对参考函数直接进行 FFT,取共轭后与信号在频域相乘并进行逆傅立叶变换(IFFT)。经过距离压缩后的信号可表示为

$$s_1(t_r, t_a) = \text{sinc}[B(t_r - 2R(t_a)/c)] \cdot \exp[-j2kR(t_a)] \quad (5)$$

其中  $\text{sinc}(x) = \sin(\pi x)/(\pi x)$  表示辛克函数,  $B$  为信号带宽。

经过距离向压缩处理后的回波信号是辛克函数,其分辨率由信号带宽决定,信号的峰值出现在  $R(t)$  处。一个静止点目标的回波信号可在距离向被压缩成一个“点”,在方位向表现为一条“线”。如果这条线是在一个距离单元之内,只要在相应的距离单元按方位向进行脉压处理即可。但当距离分辨率较高时,往往会产生距离徙动,使得同一目标的回波落在不同的距离分辨单元内。此时要实现有效的方位压缩,需要进行距离徙动的校正。RD 算法将距离校正工作放在 RD 域进行,其特点是将距离-时间域中等距离、不同方位向位置的信号线经过内插变换到 RD 域中的相同信号线。距离校正后的信号时域表达式为

$$s_2(t_r, t_a) = \{B[t_r - 2R'(t_a)/c]\} \cdot \exp[-j2k\{R_0(t_a) + r\cos[\alpha(t_a)]\}] \cdot \sin[\omega t_a + \varphi_0 + \theta(t_a)] \quad (6)$$

其中  $R'(t) = R_0 + r\cos[\alpha(t_a)]\sin[\omega t_a + \varphi_0 + \theta(t_a)]$ 。

实际上经过距离徙动校正后的回波相位比较复杂,存在微小的交叉分量,因其影响甚小,这里进行了简化处理。取  $r_0 = r\cos[\alpha(t_a)]$  为等效旋转半径,因为  $v_a \ll R_0$ , 故可近似认为  $\alpha(t_a)$  不随慢时间变化,不妨简化为  $\alpha(t_a) \approx \arccos[\sqrt{\mathcal{Y}_0^2 + x_0^2}/R_0]$ , 此时  $r_0$  近似为固定值。另外当  $x_0 - v_a \ll \mathcal{Y}_0$  时,  $\theta(t_a) \approx (x_0 - v_a)/\mathcal{Y}_0$ 。则

$$s_2(t_r, t_a) = \text{sinc}\{B[t_r - 2R'(t_a)/c]\} \cdot \exp\{-j2k\{R_0(t_a) + r_0\sin[(\omega - v/\mathcal{Y}_0)t_a + \varphi_0 + x_0/\mathcal{Y}_0]\}\} \quad (7)$$

由数学恒等式

$$\exp(jx\sin\theta) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(x)\exp(jm\theta)^{[3]}$$

其中  $J_m(\cdot)$  为第一类  $m$  阶贝塞尔函数,故  $s_2(t_r, t_a)$  可写成

$$s_2(t_r, t_a) = \exp[-j2kR_0(t_a)] \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ J_m(2kr_0) \cdot \text{sinc}\left\{B\left[t_r - \frac{2R'(t_a)}{c}\right]\right\} \cdot \exp\left\{-jm\left[\left(\omega - \frac{v}{\mathcal{Y}_0}\right)t_a + \varphi_0 + \frac{x_0}{\mathcal{Y}_0}\right]\right\}\right\} \quad (8)$$

在 R-D 域进行方位向信号的脉压处理,方位压缩的参考信号的时域表达式为

$$h_a(t_a) = \text{rect}(t_a/T_s)\exp(-j\pi k_a t_a^2) \quad (9)$$

其中  $k_a = -2v^2/(\lambda R_0)$  为多普勒调频率。经过方位向压缩后,得到的图像信号为

$$s(t_r, t_a) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(2kr_0)\exp\left[-jm\left(\varphi_0 + \frac{x_0}{\mathcal{Y}_0}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left[B\left(t_r - \frac{2R'(t_a)}{c}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left\{B_d\left[t_a - \frac{2x_0}{v} - \frac{m}{2\pi k_a}\left(\omega - \frac{v}{\mathcal{Y}_0}\right)\right]\right\} \quad (10)$$

式中,  $B_d = k_a T_s$  表示回波信号的多普勒带宽。

### 1.3 旋转微动目标 SAR 图像分析

旋转微动目标的 SAR 成像结果为距离向位于  $R'(t_a)$ , 方位向位于  $m\pi(\omega - v/\mathcal{Y}_0)/(2\pi k_a)$  的多个像元,这些像元成对出现,方位向间隔为  $\pi(\omega - v/\mathcal{Y}_0)/(2\pi k_a)$ , 目标的旋转中心和旋转速度影响像元的间隔。方位向上出现成对像元的原因从数学上来讲,是由于旋转微动目标回波的傅立叶变换对应一系列辛克函数对,其幅度受第一类贝塞尔函数调制。从物理意义上来讲,由于旋转运动引起的目标回波相当于对静止目标回波进行正弦相位调制,故经过正常的成像处理不能实现同相相加,所以最终出现了很多成对的像元<sup>[12]</sup>。另外考虑到像元距离向的位置  $R'(t_a)$  也是时变的,可知随着系统参数和目标旋转运动参数的不同,将出现复杂的成像结果。

## 2 成像特性分析

旋转微动目标的 SAR 图像输出结果和系统参数以及目标运动参数密切相关,为了更进一步理解其成像特性,本节将从旋转微动目标的 SAR 图像特征、图像形式以及位置关系入手,分析旋转微动对成

像输出的影响。

## 2.1 图像特征

### (1) 距离向位置

由(10)式可知旋转微动目标的 SAR 图像中多个像元的距离向位置为  $R'(t_a)$ , 它随方位向慢时间呈正弦规律变化。

$$R'(t_a) = R_0 + r_0 \sin[(\omega - v/\gamma_0)t_a + \varphi_0] \quad (11)$$

### (2) 方位向位置

多个像元等间隔地沿方位向分布, 第  $m$  阶像元的方位向位置为

$$x = x_0 + m \frac{v}{2\pi k_a} \left( \omega - \frac{v}{\gamma_0} \right) \quad (12)$$

### (3) 方位向间隔

多个像元的方位向间隔为

$$\Delta x = \frac{v}{2\pi k_a} \left( \omega - \frac{v}{\gamma_0} \right) = \frac{1}{2\pi} \left( \omega - \frac{v}{\gamma_0} \right) T_s \rho_a \quad (13)$$

其中  $\rho_a$  为方位向分辨率, 可见在场景和 SAR 系统确定的情况下, 像元的方位向间隔与目标的旋转速度呈线性变化。合成孔径时间越长、方位向分辨率越低, 旋转速度越大, 则像元的方位向间隔就越大。这里给出的是理论表达式, 而  $v/\gamma_0$  的值通常很小, 往往可忽略不计。

### (4) 像元的个数

从理论上讲, 像元个数应该和第一类贝塞尔函数的阶数一致, 为无穷。由卡森公式<sup>[13]</sup>知

$$B_m = 2(\beta_m + 1)f_m \quad (14)$$

其中  $B_m$  为旋转引起的正弦相位调制回波对应的调制频带宽度;  $\beta_m = 2kr_0$  为调制指数;  $f_m$  为调制频率, 对应于  $(\omega - v/\gamma_0)/(2\pi)$ 。当旋转引起的回波相位调制项的边频阶数取到大于  $(\beta_m + 1)$  次时, 其幅度小于未调制载频波幅度的 15%, 可近似认为边频阶数高于  $(\beta_m + 1)$  的像元可粗略不计。即有效像元的个数为

$$\text{Num}_1 = 2\beta_m + 3 = 4kr_0 + 3 \quad (15)$$

然而考虑到(10)式中, 只有当  $m(\omega - v/\gamma_0)/(2\pi)$  在多普勒带宽  $[-B_d, B_d]$  之内时才能在 SAR 图像中有输出, 不妨取在多普勒带宽内有效的最大阶数为  $M$ , 因

$$\begin{aligned} \frac{(M+1)}{2\pi} \left( \omega - \frac{v}{\gamma_0} \right) &> B_d \geq \frac{M}{2\pi} \left( \omega - \frac{v}{\gamma_0} \right) \\ \Rightarrow M &= \text{floor} \left[ \frac{2\pi B_d}{\left( \omega - \frac{v}{\gamma_0} \right)} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

其中  $\text{floor}(\cdot)$  表示往小取整函数, 则此时可能的最大输出像元个数为

$$\text{Num}_2 = 2M + 1 \quad (17)$$

结合能量和频带范围两方面的考虑, 可知在 SAR 图像上能形成的有效像元个数为

$$\text{Num} = \min(\text{Num}_1, \text{Num}_2) \quad (18)$$

其中  $\min(\cdot)$  为取最小值函数,  $\text{Num}$  为  $\text{Num}_1$  和  $\text{Num}_2$  中的最小值。

### (5) 目标像的方位向跨度

在确定了像元的间距和个数之后不难得到其在方位向上的跨度为

$$\begin{aligned} \Delta L &= \text{Num} \cdot \Delta x \\ &= \begin{cases} \frac{1}{2\pi} (4kr_0 + 3) \left( \omega - \frac{v}{\gamma_0} \right) T_s \rho_a & \text{Num}_2 \geq \text{Num}_1 \\ \frac{1}{2\pi} (2M + 1) \left( \omega - \frac{v}{\gamma_0} \right) T_s \rho_a & \text{Num}_1 > \text{Num}_2 \end{cases} \end{aligned} \quad (19)$$

### (6) 像元的幅度

第  $m$  阶像元的峰值幅度为

$$\begin{aligned} A_m &= J_m(2kr_0) \text{sinc} \left[ B \left( t_r - \frac{2R'(t_a)}{c} \right) \right] \cdot \\ &\text{sinc} \left\{ B_d \left[ t_a - \frac{2x_0}{v} - \frac{m}{2\pi k_a} \left( \omega - \frac{v}{\gamma_0} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

避开 SAR 系统参数和成像的场景参数不谈, 像元的幅度和第一类贝塞尔函数的阶数  $m$ , 调制指数  $2kr_0$ , 目标的旋转速度  $\omega$  均有关系。

## 2.2 图像形式

多个像元的方位向间隔特性已毋庸置疑, 仔细观察(11)式后不难发现, 这些方位向等间隔分布的像元在距离向上随慢时间呈正弦规律分布。并且

$$\Delta R'(t) = 2r_0 \cos \varphi_0 \sin[(\omega - v/\gamma_0)T_s/2] \leq 2r_0 \quad (21)$$

随着  $R'(t_a)$  中各参数的不同, 多个像元呈现出不同的图像形式。

### (1) 直线型

当  $\Delta R'(t_a) \leq 2r_0 \leq \rho_r$  ( $\rho_r = c/(2B)$  为距离向分辨率), 并且多个像元的间隔  $\Delta x \leq \rho_a$ , 即

$$\left( \omega - \frac{v}{\gamma_0} \right) T_s \leq 2\pi \quad (22)$$

各像元将在距离向上位于同一距离分辨单元, 在方位向上无法区分, 旋转微动目标所成的像为一条沿方位向分布的直线。

### (2) 直线点列型

当  $\Delta R'(t_a) \leq 2r_0 \leq \rho_r$ , 并且  $\Delta x > \rho_a$  时, 旋转

目标所成的像在距离向上位于一个分辨单元内,在方位向上位于不同的方位分辨单元;所成图像为一串在方位向等间隔为  $\Delta x$  分布的直线点列。

### (3) 直线条带型

当  $2r_0 > \rho_r$ , 并且  $\Delta x \leq \rho_a$  时,各像元在距离向上将占据多个距离单元,在方位向上无法区分,故此时旋转微动目标所成的像为一条沿方位向分布具有一定距离向宽度的条带。

### (4) 直线圆列型

当  $2r_0 > \rho_r$ ,  $\Delta x > \rho_a$  时,各像元在距离向上按正弦规律将占据多个距离单元,在方位向上位于不同的方位分辨单元,旋转微动点目标所成的像为沿方位向等间隔为  $\Delta x$  分布的圆列。

## 2.3 位置关系

随着等效旋转半径  $r_0$  和像点间距  $\Delta x$  大小对比关系的不同,旋转微动点目标形成的点列或圆列像将出现不同的位置关系。

### (1) 当 $2r_0 < \Delta x$ 时

当旋转微动点目标的像为直线点列时,  $\Delta x$  对应的是点目标像之间的间隔;当为直线圆列时,  $\Delta x$  对应的是圆列像圆心之间的间距。由此不难进一步推出,当  $2r_0 < \Delta x$  时,将形成多个孤立的点列或圆列像。

### (2) 当 $2r_0 = \Delta x$ 时

当等效旋转直径等于点像间隔,即  $2r_0 = \Delta x$  时,将形成多个交接的点列或圆列像。

### (3) 当 $2r_0 > \Delta x$ 时

当等效旋转直径大于点像间隔,即  $2r_0 > \Delta x$  时,将形成多个交错的点列(即连成直线)或圆列像。

## 3 仿真实验

按照机载 SAR 正侧视工作模式下经典 RD 成像算法进行成像处理,参数设置如下:载机飞行高度  $H = 6000$  m,  $O$  点位于  $(0, 8000$  m,  $0)$ ,另有一参考点目标位于  $(0$  m,  $8050$  m,  $0)$ ,旋转点目标的初始相位为  $\varphi_0 = 0^\circ$ ,散射强度和参考点目标的相同;飞行速度  $v = 125$  m/s, SAR 中心频率  $f_0 = 10$  GHz,带宽  $B = 300$  MHz,脉冲宽度  $T_p = 10\mu\text{s}$ ,脉冲重复频率  $prf = 500$  Hz,合成孔径长度  $L = 300$  m,成像区域距离

向范围为  $R = [9900$  m,  $10100$  m],方位向距离范围为  $X = [-100$  m,  $100$  m](场景面积小,可方便观察成像特性)。不难知道此时  $R_0 = 10000$  m,参考点目标斜距为  $R_r = 10040$  m,  $\alpha(t_a) \approx 4/5$ ,距离向分辨率  $\rho_r = c/(2B) = 0.5$  m,方位向分辨率为  $\rho_a = \lambda R_0/(2L) = 0.5$  m。仿真实验中没有考虑杂波场景,一是为了突出重点,二是典型背景和目标的选择难以一概而论,如地基旋转的天线、悬停直升机的旋翼等典型微动目标的散射强度都很大,一般有足够的信杂比可实现 SAR 图像微动特征的检测<sup>[2]</sup>。

### 3.1 图像特征分析

令旋转微动目标的旋转速度  $\omega = 10\pi, 40\pi$ ,等效旋转半径  $r = 0.25$  m,进行仿真实验来分析验证关于旋转微动目标图像特征的结论。

等效旋转半径和旋转速度是旋转微动目标的关键参数,等效旋转半径决定了目标像对距离分辨单元的跨度情况,旋转速度则直接影响到目标像的方位间隔大小。旋转半径对目标像的影响将在后面的仿真论证中阐述,这里给出了两种不同旋转速度下目标的成像结果(如图 2 所示)。根据仿真参数可知道等效旋转半径为  $r_0 = 0.2$  m;当  $\omega = 10\pi$  时像元方位向间隔为  $\Delta x = 6$  m,当  $\omega = 40\pi$  时像元方位向间隔为  $\Delta x = 24$  m。因满足  $\Delta R'(t) \leq 2r_0 \leq \rho_r$ ,且  $\Delta x > \rho_a$  的条件,故所成的像属于第 2.2 节第二种情况。从图 2(a)~(b)不难发现参考点目标位于方位向  $0$  m,距离向  $10040$  m 处,目标像为一串以方位向  $0$  m,距离向  $10000$  m 为中心的点列,  $[-100$  m,  $100$  m] 方位向范围内含有 33 个尖峰,尖峰幅度受第一类贝塞尔函数确定的边频幅度影响,尖峰之间的间距约为  $6$  m。同样地,从图 2(c)~(d)可以得到类似的结果,所不同的是场景中含有 9 个尖峰,间距约为  $24$  m。由此可清晰看出旋转微动目标像的方位向间隔随旋转速度的增加而线性增大,除了因场景和目标像间隔大小随旋转速度变化等因素所限,不便观察所成的尖峰总数之外,其它结果和理论分析完全吻合。

### 3.2 图像形式分析

基本系统参数和场景参数同上,依次令(1)  $\omega = 0.8\pi$ ,  $r_0 = 0.2$  m;(2)  $\omega = 50\pi$ ,  $r_0 = 0.2$  m;(3)  $\omega = 0.8\pi$ ,  $r_0 = 10$  m;(4)  $\omega = 50\pi$ ,  $r_0 = 10$  m。

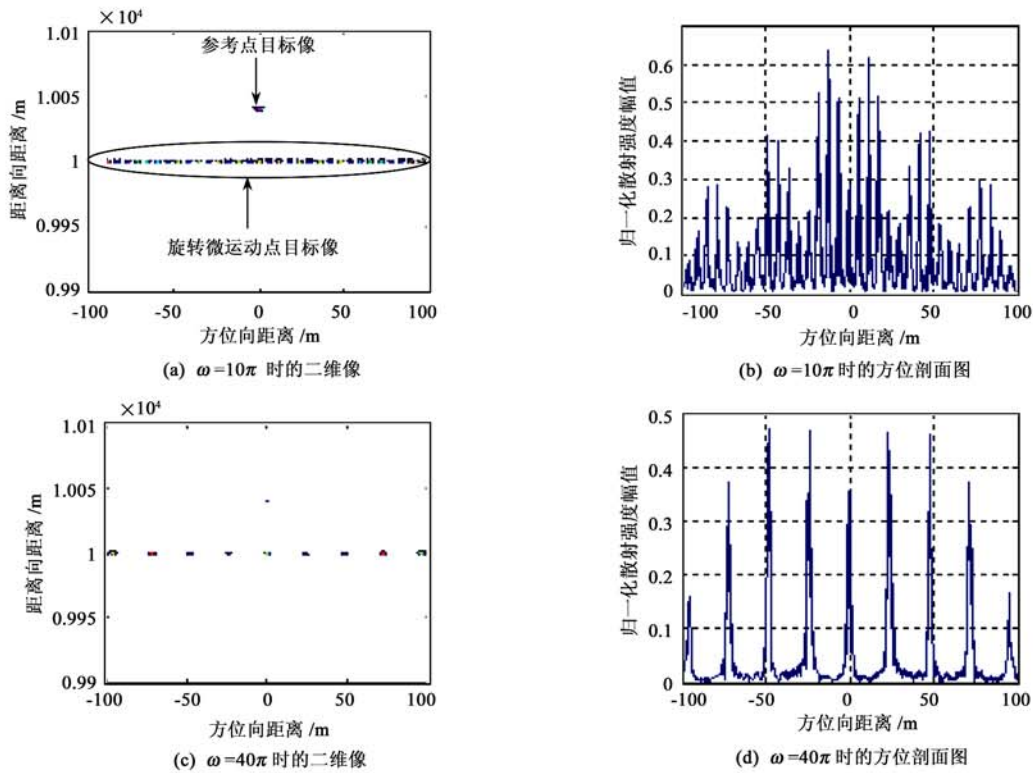


图 2 不同旋转速度目标的成像图

Fig.2 Images of the targets with different rotational velocity

在(1)中,根据(13)式可得到  $2r_0 = 0.4 \text{ m} < \rho_r$ ,  $\Delta x = 0.48 \text{ m} < \rho_a$ ,  $\text{Num}_1 = 170$ ,  $\text{Num}_2 = 1251$ ,  $\text{Num} = 170$ ,  $\Delta L = 81.6 \text{ m}$ ,符合 2.2 节讨论的第一种情况,输出图像应为沿方位向分布的直线;在(2)中,可得到  $2r_0 = 0.4 \text{ m} < \rho_r$ ,  $\Delta x = 30 \text{ m} > \rho_a$ ,符合 2.2 节讨论的第二种情况,输出图像应为沿方位向以 30 m 等间隔分布的直线点列;在(3)中,可得到  $2r_0 = 20 \text{ m} > \rho_r$ ,  $\Delta x = 0.48 \text{ m} < \rho_a$ ,符合第三种情况,输出图像应为沿方位向分布的距离向跨度为 20 m 的直线条带;在(4)中,可得到  $2r_0 = 20 \text{ m} > \rho_r$ ,  $\Delta x = 30 \text{ m} > \rho_a$ ,符合第四种情况,输出图像应为沿方位向分布的半径为 10 m,圆心间隔为 30 m 的直线圆列。

仿真得到的结果依次如图 3(a)~(d)所示,(a)中旋转微动目标像呈直线型分布,线条以方位向坐标 0m,距离向坐标 10000 m 为中心,长度约为 80 m;(b)中目标像呈直线点列型分布,点列以方位向坐标 0 m,距离向坐标 10000 m 为中心,间隔为 30 m,幅度随第一类贝塞尔函数各阶边频的幅度变化而变化;(c)中目标像呈直线条带型分布,因距离向坐标随方位向慢时间呈正弦规律变化,距离向坐标在最大值和最小值处的变化率最小,波束照射时的停留时间

较长,故图像能量在距离向坐标最大值和最小值两端集中;(d)中目标像呈直线圆列型分布,各圆的形状完全相同,半径均约为 10 m,间隔为 30 m,其中(11)式中的零阶输出对应于真实目标的位置,其它高阶分量输出可认为是对零阶输出经过一定调制的对称搬移。可见,图 3 中的仿真结果与理论结果完全一致。

### 3.3 位置关系分析

旋转微动目标图像可视为由方位向上形状相同的图像串组成,这些图像串是通过零阶图像按照一定调制规律以一定间隔分布形成的。间隔距离和旋转半径的大小关系直接影响到各阶像元间的位置关系。系统参数和场景参数同上,依次令(1)  $\omega = 40 \pi$ ,  $r_0 = 0.2 \text{ m}$ ;(2)  $\omega = \pi/2$ ,  $r_0 = 0.15 \text{ m}$ ;(3)  $\omega = 6 \pi$ ,  $r_0 = 3 \text{ m}$ ;(4)  $\omega = 40 \pi$ ,  $r_0 = 8 \text{ m}$ ;(5)  $\omega = 40 \pi$ ,  $r_0 = 12 \text{ m}$ ;(6)  $\omega = 40 \pi$ ,  $r_0 = 20 \text{ m}$ 。仿真结果依次如图 4(a)~(f)。

在(1)中,  $\Delta x = 24 \text{ m}$ ,  $2r_0 < \rho_r$ ,  $\Delta x > 2r_0$ ,目标像应为间距为 24 m 的直线点列;在(2)中,  $\Delta x = 0.3 \text{ m}$ ,  $2r_0 = 0.3 \text{ m} < \rho_r = 0.5 \text{ m}$ ,  $\Delta x = 2r_0 < \rho_a$ ,目标像应为交接的点列,从视觉上看仍为一条直线;

在(3)中,  $\Delta x = 3.6 \text{ m}$ ,  $2r_0 = 6 \text{ m} > \rho_r = 0.5 \text{ m}$ ,  $\Delta x > 2r_0$ , 目标像应为距离向跨度多个分辨单元的交错直线条带。在(4)中,  $\Delta x = 24 \text{ m}$ ,  $\Delta x > 2r_0 > \rho_r = \rho_a$ , 目标像应为半径为 8 m、圆心间距为 24 m 的直线圆列, 圆和圆之间互相独立; 在(5)中,  $\Delta x = 24$

$\text{m}$ ,  $\Delta x = 2r_0$  且  $\Delta x > \rho_a$ ,  $\Delta x > \rho_r$ , 故目标像应为半径为 12 m、圆心间距为 24 m 的交接直线圆列, 圆和圆之间外部相切; 在(6)中,  $\Delta x = 24 \text{ m}$ ,  $\Delta x < 2r_0$  且  $\Delta x > \rho_a$ ,  $\Delta x > \rho_r$ , 故目标像应为半径为 20 m、圆心间距为 24 m 的交错直线圆列。

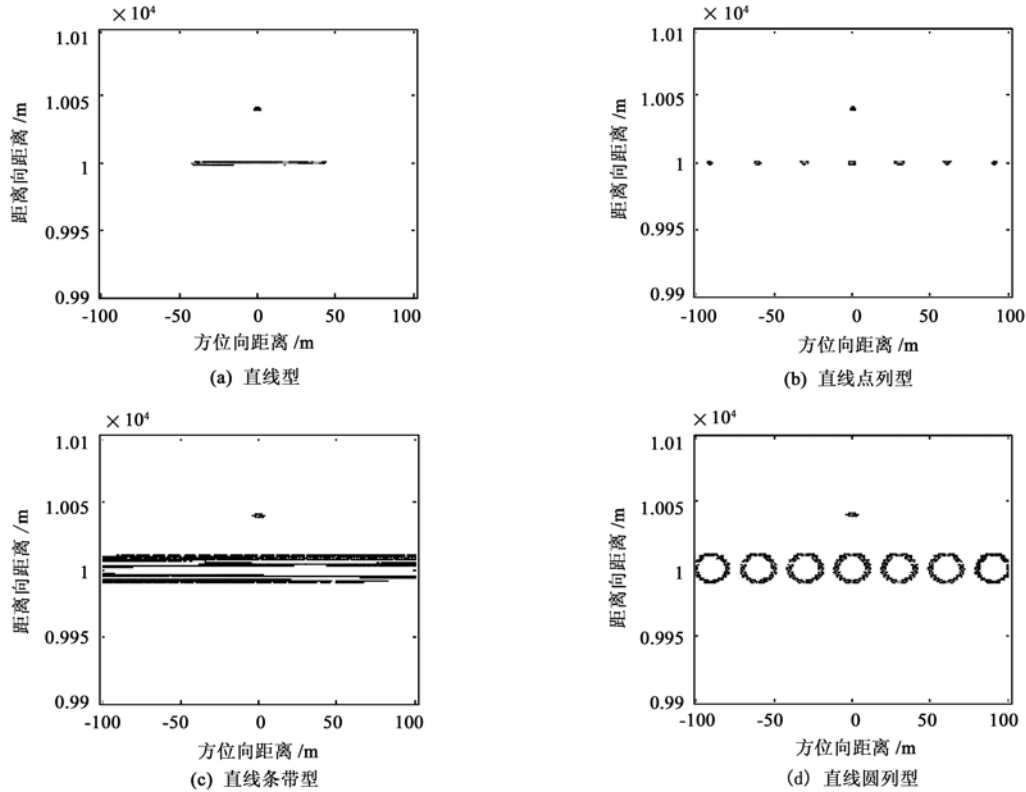


图 3 多种旋转微动目标成像形式图

Fig. 3 Different image forms of rotation micro-motion targets

图 4 中的 6 幅子图显示了两组不同位置关系的成像图, 图(a)~(c)分别给出了  $2r_0 > \Delta x$ ,  $2r_0 = \Delta x$ ,  $2r_0 < \Delta x$  三种位置下点列、直线以及直线条带型的成像结果; 图(d)~(f)依次给出了旋转微动目标形成的圆型像列之间独立、交接和交错等三种位置关系。(a)~(f)的图像特征均与理论分析结果一致。

### 3.4 外场实验分析

为了进一步验证上述理论分析的结果, 设计了一个旋转体目标 SAR 外场成像实验。图 5(a)为一个实验目标体, 其上有两个四象限角反射器等距离布置于旋臂的两端, 采用某 X 波段成像雷达进行探测, 采用 RD 成像算法, 经过自聚焦处理后得到成像结果如图 5(b)所示。图 5(b)中用于参考的固定角反射器在 SAR 图像中表现为强亮点, 而旋转的角反射器则形成沿方位向扩展一定长度的直线型目标像, 和理论分析吻合。

上述多组实验分析无论是从成像形式还是细节特征方面, 均有效地验证了本文理论分析的正确性和精确性, 而这些认识对深入开展旋转微动目标的成像特性、检测和识别等方面的研究将大有帮助。

### 4 结论

SAR 对运动目标的成像处理已逐渐成熟, 以旋转为代表的微动目标成像逐渐成为新的研究热点。复杂的地面场景中存在着大量以旋转微动形式运动的目标, 如旋转的天线罩、起飞中的直升机旋翼等等。已有的关于 SAR 旋转微动目标成像特性的研究不足以满足实际认知的需求。本文以机载正侧视 SAR 成像系统为背景, 采用点目标模型结合 RD 成像算法详细推导了地面旋转微动目标的成像结果, 分析了旋转微动目标的 SAR 图像特征、图像形式以及位置关系, 并通过仿真和外场实验进行了验证。

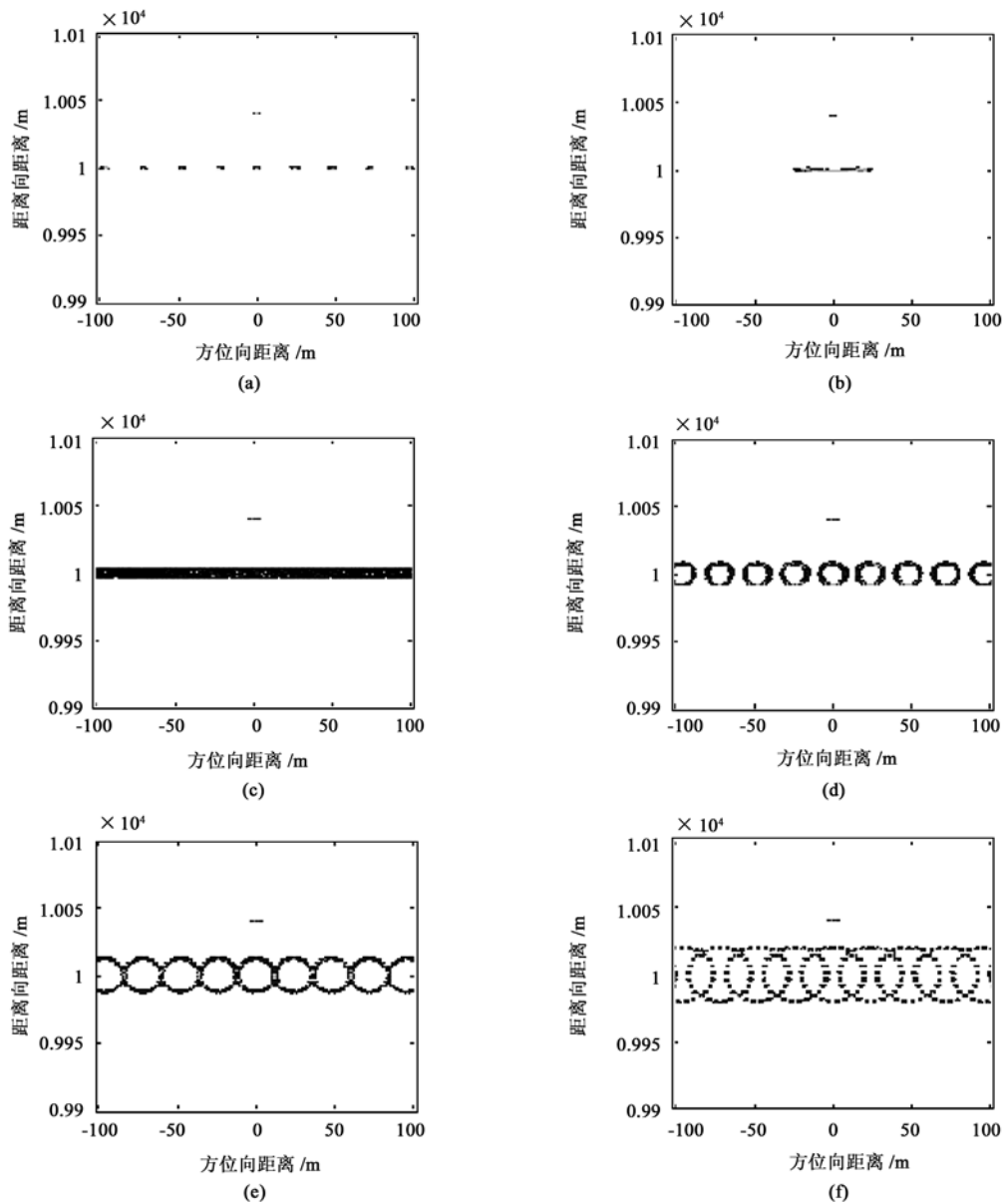


图 4 不同位置关系的旋转微动目标成像图

Fig. 4 Images of the rotation micro-motion targets with different positions

研究表明:对旋转微动目标,(1) SAR 回波近似为在静止目标回波的基础上进行了由旋转运动参数决定的正弦调制;(2) 成像结果为多个在方位向上等间隔搬移的二维辛克函数图像列,幅度受第一类贝塞尔函数调制;(3) 目标像的距离向位置随方位向慢时间呈正弦规律变化,方位向位置以旋转中心的方位向坐标为中心,以  $T_s \rho_a (\omega - v / y_0) / (2 \pi)$  为间距等间隔分布,目标像的方位向跨度为  $\text{Num} \cdot \Delta x$ ;(4) 随着等效旋转直径  $2 r_0$  和距离向分辨率  $\rho_r$ 、方位向距离间隔  $\Delta x$  和方位向分辨率  $\rho_a$  对比关系的不同,成像结果可表现为直线型、直线点列型、直线

条带型以及直线圆列型等四种形式;(5) 随着等效旋转直径  $2 r_0$  和方位向距离间隔  $\Delta x$  对比关系的不同,像元之间呈现出不同的位置关系;当  $2 r_0 < \Delta x$  时,各像元互相独立;当  $2 r_0 = \Delta x$ ,各像元互相交接;当  $2 r_0 > \Delta x$  时,各像元互相交错。

通过本文的论述,可以发现旋转微动目标的 SAR 成像结果比文献[2]中讨论的要复杂得多,远非简单的方位向扩展可以粗略概括。如果考虑因载机平台、成像模式和成像算法的不同带来的差异,则情况将会更加复杂,这将是作者进一步研究的方向。本文研究的核心思想和价值在于通过详细的理论推



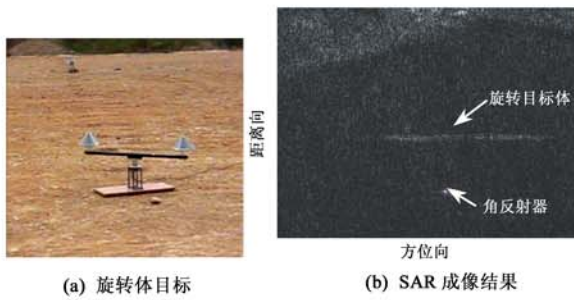


图5 外场实验图

Fig.5 Outfield experiments

导和实验验证,得到了不同运动参数下的旋转微动目标的图像特征、图像形式以及位置关系,该结果可用于从 SAR 图像中初步判定旋转微动目标的存在,为后续更加有效的图像检测和特征提取提供帮助。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Chen V C, Li F, Ho S S, Wechsler H. Analysis of micro-doppler signatures[J]. IEE Proc. Radar Sonar Navigation, 2003, 150(4): 271 - 276.
- [ 2 ] Maurice Ruegg. Ground moving target indication with millimeter wave synthetic aperture radar[D]. Remote Sensing Laboratories, University of Zurich, 2007. Chapter 3.
- [ 3 ] Victor C, Chen, Fayi Li, Shen-shyang Ho, Harry Wechsler. Micro-doppler effect in radar: phenomenon, model, and simulation study [J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 2006, 42(1): 2 - 21.
- [ 4 ] Van Dorp, Groen P, F C A. Human walking estimation with radar [J]. IEE Proceedings on Radar, Sonar and Navigation, 2003, 150(5): 356 - 365.
- [ 5 ] 张群,罗斌风,管桦,等. 基于微 Doppler 提取的具有旋转部件雷达目标成像 [J]. 自然科学进展, 2007, 17(10): 1410 - 1417. [ZHANG Qun, LUO Bin-feng, GUAN Hua, et al. Radar imaging of targets with rotational components based on micro Doppler extraction[J]. Nature Science Progress, 2007, 17(10):1410 - 1417.]
- [ 6 ] Pawan Setlur, Moeness Amin, Thayananthan Thayaparan. Micro-doppler signal estimation for vibrating and rotating targets[C]. Proceedings of the Eighth International Symposium, 2005: 639 - 642.
- [ 7 ] Laurence Marple S, Jr. Sharpening and bandwidth extrapolation techniques for radar micro-Doppler feature extraction[C]. Proceedings of the International Radar Conference, 2003: 166 - 170.
- [ 8 ] Victor C, Chen. Spatial and temporal independent component analysis of micro-Doppler features[C]. IEEE International Radar Conference, 2005: 348 - 353.
- [ 9 ] Yinan Yang, Jiajin Lei, Wenxue Zhang and Chao Lu. Target classification and pattern recognition using micro-Doppler radar signature [C]. Proceedings of the Seventh ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, 2006: 213 - 217.
- [ 10 ] Graeme E, Smith, Karl Woodbridge and Chris J, Baker. Template based micro-Doppler signature classification[C]. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> European Radar Conference, 2006: 158 - 161.
- [ 11 ] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. [BAO Zheng, XING Meng-dao, WANG Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.]
- [ 12 ] 李源,刘建新,陈惠连. 基于正弦调相的 ISAR 干扰方法 [J]. 信号处理, 2007, 23(1): 101 - 105. [LI Yuan, LIU Jian-xin, CHEN Hui-lian. A jamming method to ISAR based on sinusoidal phase modulation[J]. Signal Processing, 2007, 23(1):101 - 105.]
- [ 13 ] 曹志刚,钱亚生. 现代通信原理[M]. 北京:清华大学出版社, 2002. [CAO Zhi-gang, QIAN Ya-sheng. Modern Communication Principles[M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 2002.]

作者简介:吴晓芳(1983-),女,博士研究生,主要研究方向为 SAR 对抗及 SAR 的信号处理等。  
通信地址:湖南国防科学技术大学,电子科学与工程学院,综合电子信息研究所(410073)  
电话:(0731)4573492  
E-mail:wuxiaofang83@gmail.com

## Analysis of SAR Imaging Characteristics of Targets with Rotational Micro-Motion

WU Xiao-fang, LIU Yang, WANG Xue-song, LU Huan-zhang

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

**Abstract:** The rotation has a complex Doppler Effect on SAR echo because of the motion components in different directions. The image features, output forms and position features are analyzed in detail. The results indicate that the SAR image of a rotational target in the ground with various motion parameters can be in the form of a line, a line of points, a line strip or a line of circles, and can be mutual independent, connected or interlaced, where it is uniformly-spaced in the azimuth direction with the amplitude affected by Bessel function. Moreover, the formative conditions of these different forms and positions are given. The analyses are verified by simulation and outfield experiments. The research is very useful for understanding the SAR image characteristics and further extracting motion features of targets with rotational micro motions and feature extractions, and can be used to determine whether there is a rotational target.

**Key words:** SAR; Rotational micro-motion; Azimuth direction; Sinusoidal modulation; Image element