

## 宽测绘带 MIMO-SAR 运动目标回波特性分析

谢超<sup>1</sup>, 王力宝<sup>1</sup>, 王党卫<sup>1</sup>, 马晓岩<sup>1</sup>, 王玲<sup>2</sup>

- (1. 空军预警学院 空天预警装备系, 湖北 武汉 430010;
2. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 通过对多输入多输出合成孔径雷达(MIMO-SAR)的虚拟空间采样进行等效观测通道重构, 可实现宽测绘带内的多通道合成孔径成像与地面运动目标显示(SAR/GMTI)处理。在建立宽测绘带 MIMO-SAR 运动目标观测模型的基础上, 分析了该模式下 MIMO-SAR 运动目标回波与传统 SAR 系统运动目标回波的区别。并利用成对回波原理建立了目标回波的等效微动模型, 提出了空间通道重构模式下 MIMO-SAR 运动目标的等效微动效应, 并讨论了运动目标回波的时频谱线数目。最后, 数值仿真验证了文中结论的正确性。

**关键词:** 多输入多输出合成孔径雷达; 宽测绘带; 运动目标; 成对回波

**中图分类号:** TN958.94 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2860-07

## Analysis of moving target echo characteristics of wide-swath MIMO-SAR

Xie Chao<sup>1</sup>, Wang Libao<sup>1</sup>, Wang Dangwei<sup>1</sup>, Ma Xiaoyan<sup>1</sup>, Wang Ling<sup>2</sup>

- (1. Department of Space Early Warning Equipment, Air Force Early Warning Academy, Wuhan 430010, China;
2. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The SAR/GMTI in wide-swath can be obtained by reconstructing virtual space samplings of MIMO-SAR into equivalent observation channels. Based on the properties of the configuration of wide-swath MIMO-SAR, the echo signal of moving target was firstly studied to reveal the distinctness with the echo signal of traditional SAR system. The effect of the echo signal of moving target in MIMO-SAR was also studied using paired echo principle (PEP). This analysis decomposed the echo signal into equivalent micro-motion phenomenon, which had a similar characteristic with micromotion target. Then, the expected time-frequency spectrum of MIMO-SAR in wide-swath was discussed in detail. Finally, numerical simulations give the validity of conclusions.

**Key words:** MIMO-SAR; wide-swath; moving target; paired echoes

收稿日期: 2014-01-05; 修订日期: 2014-02-10

基金项目: 国家自然科学基金(61201451); 国家 863 项目(ss2013AA120902)

作者简介: 谢超(1983-), 男, 博士生, 主要从事 MIMO 雷达目标检测与成像等方面的研究。Email: superxapa@126.com

导师简介: 马晓岩(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事雷达信号处理方面的研究。Email: Ldxymaxy@sina.com

## 0 引言

随着合成孔径雷达(SAR)在民用及军事等应用领域的不断拓展,人们不再满足于单一局部静态场景图像的输出,而是希望能同时具备多种应用功能,这其中高分辨宽测绘带静态场景成像和运动目标检测与成像技术就是当前 SAR 技术研究的热点。

高方位分辨率系统需要采用高脉冲重复频率(PRF)来抑制多普勒模糊,但会限制场景的测绘带宽度,这就需要引入更多的空间自由度,如采用多相位中心 SAR(MPC-SAR)来缓解上述矛盾<sup>[1]</sup>。另一方面,由于 SAR 系统下视工作,地杂波分布广、强度大,微弱运动目标容易被杂波淹没<sup>[2]</sup>,这也需要系统利用多个空间自由度的联合处理,如采用多通道 SAR/GMTI 检测地面运动目标<sup>[3]</sup>。但出于运动平台对硬件规模的限制,传统低空间自由度 SAR 系统在进行功能复合时,一般采用快速区域扫描的方式进行宽测绘带目标监测<sup>[4-5]</sup>,难以适用于复杂多变的战场形势。

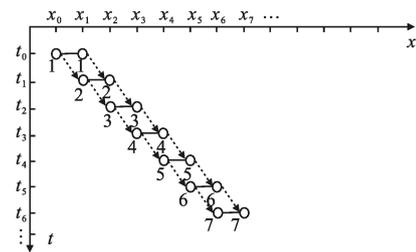
多输入多输出合成孔径雷达(MIMO-SAR)较传统体制雷达提供了更多的空间自由度,从而为单项指标提升或指标功能复合提供了更多选择<sup>[6-7]</sup>。参考文献[8]利用 MIMO 雷达的多自由度的特点,通过低 PRF 来获得不模糊的高分辨率宽测绘带。参考文献[9]在 MIMO-SAR 回波信号进行杂波抑制的基础上,利用多载频的特点,将检测结果进行二次检测,从而有效提高运动目标的检测概率。为了实现功能复合,参考文献[10]提出了一种空时等效采样复用的 MIMO-SAR 信号处理方法,实现了宽测绘带场景下的运动目标检测与成像,但其没有详细分析宽测绘带模式下运动目标的特点。文中则重点对宽测绘带场景下 MIMO-SAR 运动目标的回波特性进行分析,研究发现:对于常规匀速运动目标,在 MIMO-SAR 空间通道重构后的等效观测通道中,运动目标回波中存在着显著的微动特性,由于该微动特性并不是源于目标运动本身,而是由观测通道等效而造成的,因而文中将其命名为运动目标的“等效微动效应”。

## 1 宽测绘带 MIMO-SAR/GMTI 观测模型

### 1.1 原理描述

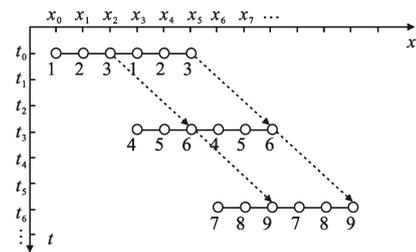
MIMO-SAR 通过阵列优化和波形分集,可在单

次快拍内获取超过实际阵元数目的虚拟空间采样,因此方便通过降低系统 PRF,保证宽测绘带的指标需求。在具体应用中,MIMO-SAR 可按系统的功能需求,对虚拟空间采样进行重新分配与组合<sup>[10]</sup>。图 1 给出了传统多通道 SAR/GMTI 系统与宽测绘带 MIMO-SAR/GMTI 系统的空间通道重构的对比示意图,其中  $t$  轴表示方位慢时间, $x$  轴表示方位虚拟空间采样的位置。



(a) 传统双通道 SAR

(a) Conventional dual-channel SAR



(b) 等效双通道 MIMO-SAR

(b) Equivalent dual-channel MIMO-SAR

图 1 空间通道重构示意图

Fig 1 Reconstruction of spatial channel

图 1(a)为观测通道数目为  $M=2$  的传统多通道 SAR 的原理示意图,各通道在单次快拍内仅有一个虚拟空间采样,其系统的脉冲重复频率设为  $f_{re}$ ,而图 1(b)则为 MIMO-SAR 原理示意图,其在单次快拍内具有  $L=6$  个虚拟空间采样,若重构  $M=2$  个等效观测通道,则各等效观测通道在单次快拍中可分配  $N=3$  个虚拟采样,即满足  $L=M \cdot N$ 。若按该模式进行空间通道重构,运用各等效观测通道中的空间采样代替时间采样,可有效解决静态场景成像中宽测绘带与高方位分辨率两个指标间的矛盾,且能够基于重构出的多个等效观测通道的联合处理来抑制强地物杂波,从而提高运动目标检测性能。由图 1(b)可见,若等效观测通道中虚拟空间采样间距与图 1(a)相同,即等效脉冲重复频率亦为  $f_{re}$ ,则 MIMO-SAR 系统实

际工作的脉冲重复频率为  $f_{re}/N$ 。对比两个系统可知, 宽测绘带 MIMO-SAR/GMTI 在保证空间采样率的同时可有效降低系统 PRF, 因而可获得的最大不模糊探测距离为传统多通道 SAR/GMTI 的  $N$  倍。另外需要指出的是, 由于两个系统是在不同的时间内得到相同空间位置的采样数据, 对于静止目标而言, 其回波多普勒历程一致, 而对运动目标回波会造成显著影响。

## 1.2 信号模型

假设 MIMO-SAR 为正侧视工作模式, 其空间观测几何模型如图 2 所示。载机以速度  $v_a$  沿方位向 ( $x$  轴) 匀速直线飞行, 平台采用优化设计的 MIMO 阵列<sup>[7]</sup>, 再根据 1.1 节的原理描述, 在单次快拍内各等效观测通道的虚拟空间采样数为  $N$ , 空间采样间距为  $d$ , 工作的脉冲重复频率为  $f_{re}/N$ , 设在慢时间  $t=0$  时刻, 运动目标在空间斜距平面内的坐标为  $(0, R_c)$ , 运动速度为  $(v_x, v_r)$ , 其中  $v_x$  表示方位向速度,  $v_r$  表示距离向速度。

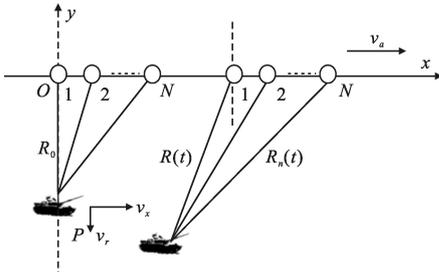


图 2 MIMO-SAR 对地观测模型

Fig.2 Geometry of MIMO-SAR scenario

令  $n_s$  为慢时间索引序数, 则等效观测通道方位慢时间信号可表示为:

$$x_i(n_s) = \sigma_m \cdot \text{rect}\left(\frac{n_s}{N_s}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R_i\left(\frac{n_s}{f_{re}}\right)\right) \quad (1)$$

式中:  $i$  为等效观测通道索引标号,  $i=1, 2, \dots, M$ ,  $\sigma_m$  为运动目标的后向散射系数;  $N_s$  为一个合成孔径内的虚拟空间采样数目;  $\lambda$  为雷达工作波长。

由于  $n_s$  时刻虚拟阵元坐标为  $\left(\frac{v_x n_s}{f_{re}}, 0\right)$ , 运动目标空间坐标为  $\left(\frac{v_x n_m}{f_{re}}, R_c + \frac{v_r n_m}{f_{re}}\right)$ , 这里  $n_m$  是考虑到在单次快拍内运动目标会静止不动而设定的中间变量,  $n_s$  与  $n_m$  满足  $n_m = n_s - l$ , 其中  $l = \text{mod}(n_s, N)$ , “mod” 表示模值取整操作符, 则有  $l=0, 1, \dots, N-1$ 。那么, 任意时刻基准等效通道与运动目标的实际斜距可用离

散形式表示:

$$R_i\left(\frac{n_s}{f_{re}}\right) = \sqrt{\left(\frac{v_x n_m}{f_{re}} - \frac{v_d n_s}{f_{re}}\right)^2 + \left(R_c + \frac{v_r n_m}{f_{re}}\right)^2} \quad (2)$$

经泰勒级数展开并取近似, 公式(2)可进一步表示为:

$$R_i\left(\frac{n_s}{f_{re}}\right) \approx R_c + \frac{v_r n_s}{f_{re}} + \frac{(v_x n_s - v_d n_s)^2}{2R_c f_{re}^2} - \frac{v_r l}{f_{re}} \quad (3)$$

## 2 运动目标回波特性分析

### 2.1 频谱特性

由公式(3)可知, 宽测绘带 MIMO-SAR/GMTI 系统中目标斜距变化与传统多通道 SAR/GMTI 具有明显的差别, 这是由  $l=0, 1, \dots, N-1$  在整个慢时间内的周期性变化, 导致方位信号引入周期性相位调制。因此分析运动目标回波特性, 关键在于定量分析该周期相位调制。

由于公式(3)中  $l/f_{re}, l=0, 1, \dots, N-1$  会在多次快拍时间内按相同规律重复变化, 将此时间周期调制信号记为  $e(t)$ , 并将其在慢时间内连续化后可得:

$$e(t) = t \quad 0 \leq t < \frac{N}{f_{re}} \quad (4)$$

其中, 公式(4)满足  $e(t) = e(t + N/f_{re})$ 。进而, 将公式(3)按慢时间连续化后为:

$$R_i(t) = R_c + v_r t + \frac{(v_x - v_d)^2}{2R_c} t^2 - v_r e(t) \quad (5)$$

因此, 等效观测通道的方位信号模型可写为:

$$x_i(t) = \sigma_m \cdot \text{rect}\left(\frac{t}{T_s}\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_c + v_r t + \frac{(v_x - v_d)^2}{2R_c} t^2 - v_r e(t)\right)\right) \quad (6)$$

式中:  $i=1, 2, \dots, M$ 。为了分析时间周期调制信号  $e(t)$  对回波相位特性的影响, 需要将公式(4)进行展开, 但在展开中需要注意的是,  $e(t)$  并不严格等同于连续时间信号中的锯齿波信号, 差别在于跃变点  $t=t_k = k \frac{N}{f_{re}}$  ( $k$  为整数) 的取值不同。因此,  $e(t)$  需要在傅里叶级数展开的基础上, 增加跃变点的修正项, 即

$$e(t) = \frac{N}{2f_{re}} - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{N}{\pi k f_{re}} \sin\left(2\pi k \frac{f_{re}}{N} t\right) - \frac{N}{2f_{re}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(t - k \frac{N}{f_{re}}\right) \quad (7)$$

进而, 利用有限项级数逼近理论, 公式(6)可写为:

$$e(t) \approx \frac{N}{2f_{re}} - \sum_{k=1}^{K_0} \frac{N}{\pi k f_{re}} \sin\left(2\pi k \frac{f_{re}}{N} t\right) - \frac{N}{2f_{re}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta\left(t - k \frac{N}{f_{re}}\right) \quad (8)$$

式中:  $\delta(\cdot)$  为冲激函数, 而阶数  $K_0$  可由相位误差最大

值  $\varphi_{\max}^e = \max \left( \left| \frac{4\pi v_r}{\lambda} \sum_{k=k_0+1}^{\infty} \frac{N}{\pi k f_{re}} \sin \left( 2\pi k \frac{f_{re}}{N} t \right) \right| \right) \leq \frac{\pi}{8}$  来确定,即忽略残余误差项对图像质量的影响。因此,公式(6)可记为:

$$x_i(t) = x_m(t) \cdot \exp \left( -j \sum_{k=1}^{K_0} \frac{4Nv_r}{\lambda k f_{re}} \sin \left( 2\pi k \frac{f_{re}}{N} t \right) \right) \cdot \exp \left( -j \frac{2\pi N v_r}{\lambda f_{re}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta \left( t - k \frac{N}{f_{re}} \right) \right) \exp \left( -j 2\pi \frac{N v_r}{\lambda f_{re}} \right) \quad (9)$$

其中,第一个乘积项  $x_m(t)$  为传统单或多通道 SAR 的运动目标方位信号,即

$$x_m(t) = \sigma_m \cdot \text{rect} \left( \frac{t}{T_s} \right) \exp \left( -j \frac{4\pi}{\lambda} \left( R_c + v_r t + \frac{(v_x - v_a)^2}{2R_c} t^2 \right) \right) \quad (10)$$

利用成对回波原理,对公式(9)中第二个乘积项进行 Jacobi-Anger 展开,可得到:

$$\exp \left( -j \sum_{k=1}^{K_0} \frac{4Nv_r}{\lambda k f_{re}} \sin \left( 2\pi k \frac{f_{re}}{N} t \right) \right) = \prod_{k=1}^{K_0} \left( \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n \left( \frac{4Nv_r}{\lambda k f_{re}} \right) \exp \left( -j 2\pi n \frac{k f_{re}}{N} t \right) \right) \quad (11)$$

式中:  $J_n(\cdot)$  为  $n$  阶第一类贝塞尔函数。将公式(11)通过 Fourier 变换到频域,并忽略常数项,可得到:

$$\begin{aligned} & \text{FFT} \left[ \exp \left( -j \sum_{k=1}^{K_0} \frac{4Nv_r}{\lambda k f_{re}} \sin \left( 2\pi k \frac{f_{re}}{N} t \right) \right) \right] = \\ & \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{n_{K_0}=-\infty}^{\infty} J_{n_1} \left( \frac{4Nv_r}{\lambda f_{re}} \right) J_{n_2} \left( \frac{2Nv_r}{\lambda f_{re}} \right) \dots J_{n_{K_0}} \left( \frac{4Nv_r}{\lambda K_0 f_{re}} \right) \\ & \delta \left( f - n_1 \frac{f_{re}}{N} - 2n_2 \frac{f_{re}}{N} - \dots - K_0 n_{K_0} \frac{f_{re}}{N} \right) = \\ & \sum_{\Omega=\Omega_0} J_{\Omega} \delta_{\Omega}(f) + \sum_{\Omega \neq \Omega_0} J_{\Omega} \delta_{\Omega} \left( f - \Omega \frac{f_{re}}{N} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $\text{FFT}$  为对慢时间  $t$  进行 Fourier 变换,  $\Omega_0$  为使  $n_1 + 2n_2 + \dots + K_0 n_{K_0} = 0$  的集合,而  $J_{\Omega} = J_{n_1} \left( \frac{4Nv_r}{\lambda f_{re}} \right) J_{n_2} \left( \frac{2Nv_r}{\lambda f_{re}} \right) \dots J_{n_{K_0}} \left( \frac{4Nv_r}{\lambda K_0 f_{re}} \right)$  为  $K_0$  个不同阶数贝塞尔函数的乘积。

将公式(9)中第3个乘积项通过 Fourier 变换到频域,忽略常数项后为:

$$\begin{aligned} & \text{FFT} \left[ \exp \left( -j \frac{2\pi N v_r}{\lambda f_{re}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta \left( t - k \frac{N}{f_{re}} \right) \right) \right] = \\ & \delta(f) + \frac{1}{N} [\exp(-j\beta) - 1] \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta \left( f - k \frac{f_{re}}{N} \right) = \\ & A \delta(f) + B \sum_{k \neq 0}^{\infty} \delta \left( f - k \frac{f_{re}}{N} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

其中  $A = \frac{1}{N} [N + \exp(-j\beta) - 1]$ ,  $B = \frac{1}{N} [\exp(-j\beta) - 1]$ ,  $\beta =$

$$\frac{2\pi N v_r}{\lambda f_{re}}.$$

综合公式(12)和公式(13),将公式(9)变换到频域,并忽略公共常数项后,可得到:

$$\begin{aligned} X_i(f) &= X_m(f) \otimes \left[ \sum_{\Omega=\Omega_0} J_{\Omega} \delta(f) + \sum_{\Omega \neq \Omega_0} J_{\Omega} \delta \left( f - \Omega \frac{f_{re}}{N} \right) \right] \otimes \\ & \left[ A \delta(f) + B \sum_{k \neq 0}^{\infty} \delta \left( f - k \frac{f_{re}}{N} \right) \right] = A \sum_{\Omega=\Omega_0} J_{\Omega} X_m(f) + \\ & B \sum_{k \neq 0}^{\infty} \sum_{\Omega=\Omega_0} J_{\Omega} X_m \left( f - k \frac{f_{re}}{N} \right) + A \sum_{\Omega \neq \Omega_0} J_{\Omega} X_m \left( f - \Omega \frac{f_{re}}{N} \right) + \\ & B \sum_{k \neq 0}^{\infty} \sum_{\Omega \neq \Omega_0} J_{\Omega} X_m \left( f - k \frac{f_{re}}{N} - \Omega \frac{f_{re}}{N} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

式中:  $X_m(f) = \text{FFT}[x_m(t)] = w_a \left( \frac{f}{\gamma} \right) \exp \left( j \frac{(f - f_{dc})^2}{\gamma} \right)$ ;  $w_a$  为方向图函数;  $\gamma$  和  $f_{dc}$  分别为调频斜率和多普勒中心频率。

由公式(14)可看出,第一项即为传统 SAR/GMTI 系统运动目标回波的多普勒频域信号,区别在于文中时间周期调制信号会对幅度产生影响;后面三项为权重不同的多重调制多普勒频谱,其会使频谱  $X_m(f)$  产生搬移。

## 2.2 瞬时多普勒频率

由公式(6)中回波相位(记为  $\varphi$ ),可得到运动目标的瞬时多普勒为:

$$\begin{aligned} f_d &= \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi}{dt} = -\frac{2}{\lambda} \left[ v_r + \frac{(v_x - v_a)^2}{R_c} t + \right. \\ & \left. 2v_r \sum_{k=1}^{K_0} \cos \left( 2\pi k \frac{f_{re}}{N} t \right) + \frac{Nv_r}{2f_{re}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta' \left( t - k \frac{N}{f_{re}} \right) \right] \end{aligned} \quad (15)$$

进一步将上式分为三项:

$$\begin{cases} f_{d1} = -\frac{2v_r}{\lambda} - \frac{2(v_x - v_a)^2}{\lambda R_c} t \\ f_{d2} = -\frac{4v_r}{\lambda} \sum_{k=1}^{K_0} \cos \left( 2\pi k \frac{f_{re}}{N} t \right) \\ f_{d3} = -\frac{Nv_r}{\lambda f_{re}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta' \left( t - k \frac{N}{f_{re}} \right) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $f_{d1}$  对应常规单通道或多通道 SAR 运动目标的多普勒历程。而文中 MIMO-SAR 运动目标的多普勒历程会在  $f_{d1}$  的基础上,附加  $f_{d2}$  和  $f_{d3}$ ,其中  $f_{d2}$  正是“等效微动效应”的主要体现,其形式与传统微动效应类似<sup>[11]</sup>,区别在于传统微动效应的参数受目标运动决定,而文中的等效微动效应由系统参数决定,  $f_{d3}$  为一组冲激偶。

为深入刻画 MIMO-SAR 运动目标回波中由  $f_{d2}$  反映的等效微动效应, 图 3 示例性地给出了运动目标多普勒时频曲线。图中多普勒中心频率和斜率主要由  $f_{d1}$  决定, 而受到等效微动效应影响的多普勒时频图呈现出规律性的强弱点状谱线, 这可看作是在  $f_{d2}$  调制的多普勒时频图中等间距抽取得到<sup>[11]</sup>, 相邻谱线之间的多普勒间距  $f_{dm} = \frac{f_{re}}{N}$ 。

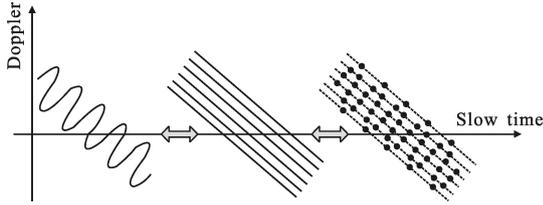


图 3 多普勒时频图

Fig.3 Doppler time-frequency diagram

### 2.3 时频谱线数目

时频谱线数目可结合公式(12)和公式(13)联合确定。首先, 考察公式(12)中第  $k$  个贝塞尔函数  $J_{n_k} \left( \frac{4Nv_r}{\lambda k f_{re}} \right)$ , 根据成对回波理论, 当固定调制指数  $b_k = \frac{4Nv_r}{\lambda k f_{re}}$ ,  $J_{n_k}(b_k)$  会随着贝塞尔阶数  $|n_k|$  的增大而趋近于零, 这表明时频图中谱线数目是有限项。而由卡森准则可知, 成对谱线的数目可由调制指数  $b_k$  来确定, 即谱线对数可近似为:

$$\eta_k \approx |b_k| + 1 = \left| \frac{4Nv_r}{\lambda k f_{re}} \right| + 1 \quad (17)$$

因此,  $n_k$  的可选区间满足:

$$n_k \in [-\eta_k, \eta_k] \quad (18)$$

特别地, 当  $|b_k| < 0.2$  时, 相位误差可忽略不计, 成对谱线的影响可忽略, 即公式(17)修正为  $\eta_k = |b_k| \approx 0$ 。

结合不同  $n_k$  的取值和卷积性质, 理论上由公式(12)造成的时频谱线个数总共为:

$$N_1 = 2(\eta_1 + 2\eta_2 + \dots + K_0\eta_{K_0}) + 1 \quad (19)$$

式中:  $\eta_k, k=1, 2, \dots, K_0$  会随着有限项逼近阶数  $K_0$  的增大而迅速减小。但是, 因等效脉冲重复频率  $f_{re}$  的限制, 且相邻谱线间距又为  $\frac{f_{re}}{N}$ , 因此时频图在区间  $[-f_{re}/2, f_{re}/2]$  最多只能显示  $N_2 = N$  根谱线, 当  $N_1 > N_2$  时, 其它显示区间外的谱线会发生折叠并与显示区间内的谱线相叠加。故而, 由公式(12)形成的时频图中谱线的显示个数由下式给出:

$$\Gamma_1 = \min(2(\eta_1 + 2\eta_2 + \dots + K_0\eta_{K_0}) + 1, N) \quad (20)$$

同理, 在显示区间  $[-f_{re}/2, f_{re}/2]$  内, 可分析出由公式(13)形成的时频图中谱线的显示个数为:

$$\Gamma_2 = N \quad (21)$$

式中, 谱线的幅度可由  $A$  和  $B$  决定。特别地, 当  $\beta = \frac{2\pi N v_r}{\lambda f_{re}}$  的取值接近于零时,  $B$  的影响可忽略。

进一步, 由卷积性质并综合公式(20)和(21), 理论上可联合确定出时频图中谱线在区间  $[-f_{re}/2, f_{re}/2]$  的显示个数为

$$\Gamma = N \quad (22)$$

值得注意的是, 由于受等效脉冲重复频率  $f_{re}$  的限制, 部分谱线会表现出频谱分裂现象, 此外, 谱线的折叠叠加亦会造成幅度的增强或抵消。

## 3 仿真

取星载 MIMO-SAR 的仿真参数, 假设平台的速度为  $v_a = 7200$  m/s, 雷达工作波长  $\lambda = 0.03$  m, 平台航向与运动目标的垂直斜距为  $R_c = 700$  Km, 运动目标方位向速度  $v_x = 1$  m/s, 距离向速度  $v_r = 12$  m/s, 取处理孔径内的时间  $T_s = 0.2$  s。MIMO-SAR 采用优化阵列配置, 为验证文中提出的运动目标等效微动效应, 按理论模型将参数  $L, M, N$  设计为两组, 依次包括参数包一 ( $L=6, M=3, N=2$ ) 与参数包二 ( $L=10, M=5, N=2$ ), 而将等效观测通道的等效脉冲重复频率统一设定为  $f_{re} = 3600$  Hz。

为了仿真实空采样代替时间采样对运动目标回波特性的影响, 首先, 取第一组参数对运动目标的斜距历程进行分析, 同时为便于清晰显示, 特截取斜距历程中的一小段, 如图 4 所示。与传统 SAR 斜距变化相比, 由公式(2)计算的 MIMO-SAR 真实斜距会存在锯齿形状的调制, 而由公式(5)计算的 MIMO-SAR 估计斜距与其相一致。图 4 中 MIMO-SAR 近似斜距为考虑  $K_0=2$  阶条件下而得到的, 其与实际的斜距历程十分接近, 经计算两者对应的最大相位误差仅为  $\frac{\pi}{26}$  rad, 这表明给定条件下二阶逼近即可满足要求。其次, 对运动目标回波时频特性进行分析, 结果如图 5 所示。图 5(a) 中为无周期调制影响情况 (对应  $N=1$ ), 其谱线个数为 1, 并且受  $v_r$  的影响, 多普勒中心会发生偏移, 同时受等效脉冲重复频率  $f_{re}$  的

限制,其谱线会出现分裂。而图 5(b)对应  $N=3$  时有周期调制影响情况,时频图在频率显示区间  $[-f_{re}/2, f_{re}/2]$  近似有  $\Gamma=3$  条谱线,但是受  $f_{re}$  的限制,有一条出现谱线分裂现象,这均与理论分析完全吻合。此外,图中相邻谱线间的多普勒间隔为 1 200 Hz,其与理论值  $f_{re}/N=1\ 200\ \text{Hz}$  亦完全一致。

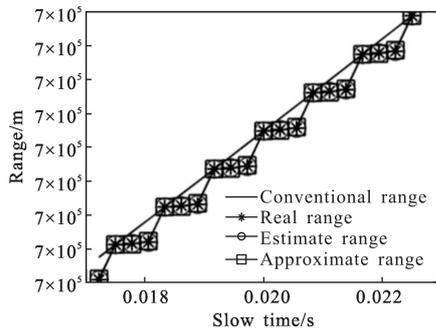


图 4 运动目标斜距历程

Fig.4 History of the moving target range

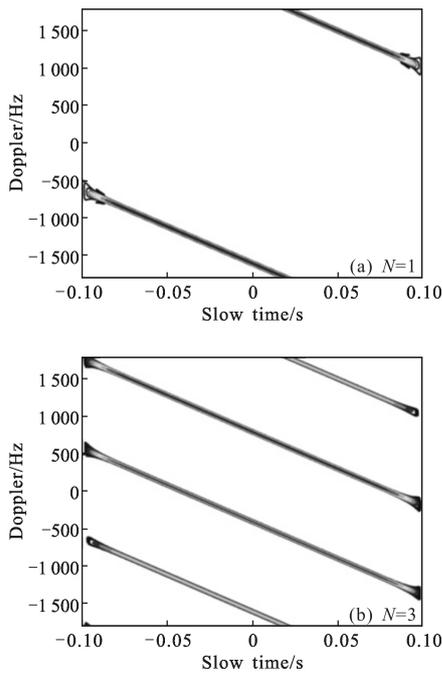


图 5 改变单次快拍虚拟空间采样数时的运动目标时频图

Fig.5 Time-frequency diagram of the moving target with different spatial sampling

进一步,将图 5 中的谱线作局部放大显示,如图 6 所示,会发现  $N=1$  时谱线幅度比较连续,其与传统 SAR/GMTI 中的运动目标时频特性相一致,而  $N=3$  时谱线会表现出幅度的强弱变化,这正是运动目标等效微动效应的表现。

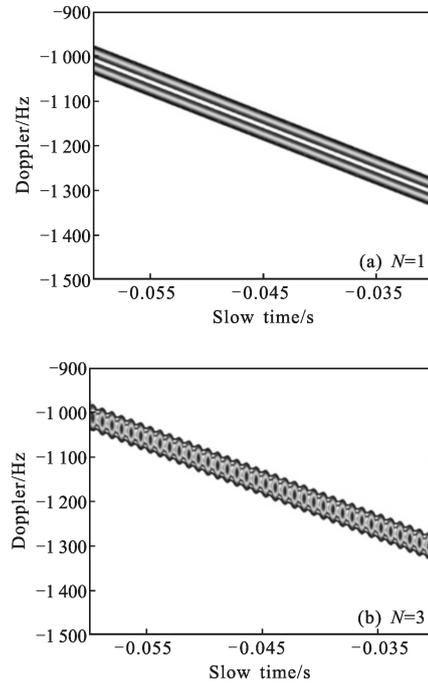


图 6 运动目标时频图局部放大

Fig.6 Partial enlarged time-frequency diagram of moving target

而为进一步验证运动目标的等效微动效应,取第二组参数,图 7 给出了  $v_r=18\ \text{m/s}$  的运动目标回波时频图。在频率显示区间  $[-f_{re}/2, f_{re}/2]$  内,时频图中表现为  $\Gamma=5$  条谱线,相邻谱线间的多普勒间隔为  $f_{re}/N=720\ \text{Hz}$ 。同样,受等效脉冲重复频率  $f_{re}$  的限制,有两条出现谱线分裂现象。

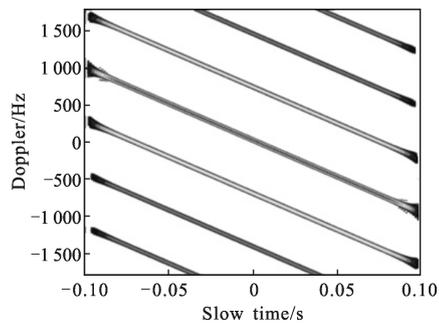


图 7  $N=5$  时运动目标回波时频图

Fig.7 Time-frequency diagram of moving target when  $N=5$

图 8 示意性给出了不同平台速度下运动目标回波的时频图。为使等效通道空间采样均匀,等效脉冲重复频率  $f_{re}$  的取值要随着平台运动速度的减小而减小。因此,由图 8 可看出,运动速度减小,将会减小谱线的间距,而谱线间距的改变与公式(14)

也是一致的。

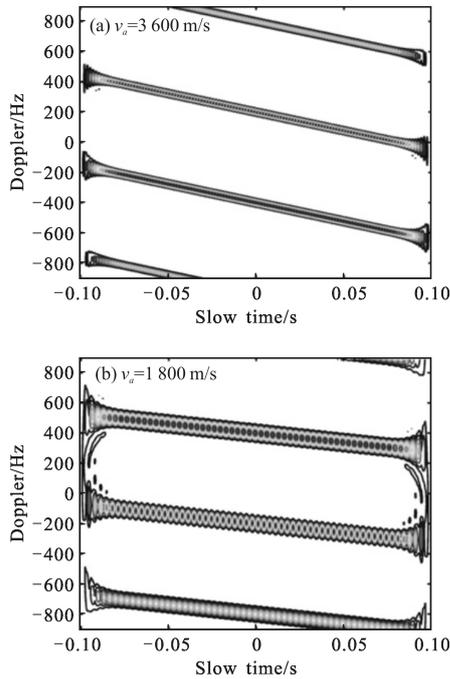


图 8 不同平台速度下的运动目标回波时频图

Fig.8 Time-frequency diagram of moving target with different velocity of radar

## 4 结论

文中研究了宽测绘带条件下 MIMO-SAR 运动目标的回波特性, 通过对等效观测通道运动目标信号建模和回波特性分析, 指出即使目标为匀速运动, 但由于空间通道重构引起的 MIMO-SAR 运动目标回波会存在等效微动效应, 而这正是与传统 SAR 运动目标回波特性的区别所在。通过开展对回波特性的研究, 将为下一步该模式下运动目标检测与参数估计提供指导, 如同研究杂波特性有助于杂波抑制技术的发展。

## 参考文献:

[1] Li Shiqiang, Yang Ruliang. Study on azimuth signal processing of single phase center multiple beams synthetic aperture radar [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2005, 27(7): 2110-2113. (in Chinese)  
李世强, 杨汝良. 单相位中心多波束合成孔径雷达方位信

号处理研究[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(7): 2110-2113.

[2] Wei Song, Sun Wen, Wang Hongyuan. High resolution image by DBS with SAR/GMTI [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(3): 337-340. (in Chinese)  
危嵩, 孙文, 王宏远. 应用 DBS 技术在 SAR/GMTI 模式下高分辨率成像[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(3): 337-340.

[3] Chiu S, Livingstone C. A comparison of displaced phase centre antenna and along-track interferometry techniques for radarsat-2 ground moving target indication [J]. *Canada Journal of Remote Sensing*, 2005, 31(1): 37-51.

[4] Delphine Cerutti-Maori, Jens Klare, Andreas R B, et al. Wide-area traffic monitoring with the SAR/GMTI system PAMIR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(10): 3019-3030.

[5] He Yan, Robert Wang, Fei Li, et al. Ground moving target extraction in a multichannel wide-area surveillance SAR/GMTI system via the relaxed PCP[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 617-621.

[6] Ender J H G. MIMO-SAR [C]//Proceedings of the International Radar Symposium(IRS), Cologne, 2007: 586-588.

[7] Jian Li, Stoica P, Zheng X. Signal synthesis and receiver design for MIMO radar imaging [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(8): 3959-3968.

[8] Wu Qisong, Jing Wei, Xing Mengdao, et al. Wide swath imaging with MIMO-SAR [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(4): 772-775. (in Chinese)  
武其松, 井伟, 邢孟道, 等. MIMO-SAR 大测绘带成像[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(4): 772-775.

[9] Qi Weikong, Yu Weidong. Research on ground moving target indication for spaceborne MIMO-SAR of multiple carrier-frequencies [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(10): 2365-2370. (in Chinese)  
齐维孔, 禹卫东. 多载频星载 MIMO-SAR 系统运动目标检测技术研究[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(10): 2365-2370.

[10] Wang Libao, Xu jia, Peng Shibao, et al. Ground moving target indication for MIMO-SAR [C]//The Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, 2009: 173-176.

[11] Li Xiang, Deng Bin, Qin Yuliang, et al. The influence of target micromotion on SAR and GMTI [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 49(7): 2738-2751.