

## 滑动聚束 SAR 步进扫描影响分析\*

易天柱<sup>1</sup>, 何峰<sup>1</sup>, 何志华<sup>1</sup>, 陈绍劲<sup>2</sup>, 董臻<sup>1</sup>, 吴曼青<sup>3</sup>

(1. 国防科技大学电子科学学院, 湖南长沙 410073; 2. 中国人民解放军 69015 部队, 新疆乌鲁木齐 830031;

3. 中国电子科技集团公司, 北京 100000)

**摘要:** 滑动聚束 SAR 系统在实际工作中通过步进扫描的方式来实现天线照射波束在方位方向的扫描, 然而该扫描方式会在滑动聚束 SAR 的成像结果中引入成对回波。为分析该成对回波的形成物理机制, 建立滑动聚束 SAR 步进扫描的数学模型, 通过泰勒展开和傅里叶级数分析具体解释了成对回波的成因, 并给出了成对回波幅度及位置与步进脉冲控制数之间的定量关系。理论分析和信号仿真结果表明, 该模型能够准确地解释这一现象, 并可为滑动聚束 SAR 的波束扫描系统参数设计提供理论依据。

**关键词:** 滑动聚束 SAR; 步进扫描; 成对回波; 泰勒展开

中图分类号: TN95 文献标志码: A 文章编号: 1001-2486(2018)02-072-05

## Analysis of impact on sliding spotlight SAR step steering scan

YI Tianzhu<sup>1</sup>, HE Feng<sup>1</sup>, HE Zhihua<sup>1</sup>, CHEN Shaojing<sup>2</sup>, DONG Zhen<sup>1</sup>, WU Manqing<sup>3</sup>

(1. College of Electronic Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. The PLA Unit 69015, Wulumuqi 830031, China;

3. China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 100000, China)

**Abstract:** Antenna beam steering along azimuth of sliding spotlight SAR (synthetic aperture radar) system was accomplished by step steering scan in practical operation. However, this scanning method may cause the paired-echo in the image of sliding spotlight SAR. To analyze the reason of paired-echo, the step steering scan model of sliding spotlight SAR was established. And the relationship in quantitatively between beam stepped steering and both amplitude and position of paired-echo by Taylor series expanding and Fourier series were calculated out. The theory analysis and signal simulation indicate that the model demonstrates the phenomenon well, and the model provides the theory basis for the design of the sliding spotlight SAR beam steering scan parameters.

**Key words:** sliding spotlight SAR; step steering scan; paired-echo; Tyler expansion

滑动聚束合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是近几年来线性 SAR 为实现高分辨所经常使用的工作模式之一<sup>[1]</sup>。该模式通过方位方向的波束扫描来延长目标的雷达波束照射时间, 为此目标可获得较大的方位向信号带宽, 进而实现高分辨成像。滑动聚束 SAR 的实现是依赖于方位向波束的连续扫描, 但在实际系统中这一方式往往很难实现, 通常以步进扫描的方式实现。这种步进扫描的方式导致雷达对目标天线方向图的调制方式发生了改变<sup>[2]</sup>, 进而导致成对回波的出现。文献[2]只是针对地形观测循序扫描 (Terrain Observation by Progressive Scan, TOPS) SAR 的这种现象进行定性的一维谱分析, 对成对回波所在的位置和峰值并未进行翔实的理论推导

和定量的分析。文献[3]对 TOPS SAR 模式天线指向角度进行建模, 该模型与滑动聚束 SAR 天线波束指向模型有较大的差异。

本文从滑动聚束 SAR 波束控制角度出发, 分析了步进扫描对滑动聚束 SAR 成像结果的影响, 并定量分析步进扫描方式对滑动聚束 SAR 成像结果中的成对回波幅度和位置关系, 这一关系可为滑动聚束 SAR 系统波束扫描设计提供相应的参数依据。

### 1 波束步进扫描控制模型及影响分析

在 SAR 系统实际工作中, 雷达的天线方向图为  $\text{sinc}(\cdot)$  函数, 考虑雷达传播的双程效应, 其方向图为  $\text{sinc}^2(\cdot)$ , 由天线方向性图的表达式<sup>[4]</sup>

\* 收稿日期: 2017-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61401480)

作者简介: 易天柱 (1991—), 男, 福建安溪人, 博士研究生, E-mail: yitianzhu95@nudt.edu.cn;

何峰 (通信作者), 男, 副研究员, 博士, 硕士生导师, E-mail: hefeng@nudt.edu.cn

可知:

$$\omega(\eta) = \frac{\sin\left\{\pi \frac{N_d d}{\lambda} [\sin\theta_a(\eta) - \sin\theta_{ac}(\eta)]\right\}}{N_d \sin\left\{\pi \frac{d}{\lambda} [\sin\theta_a(\eta) - \sin\theta_{ac}(\eta)]\right\}} \quad (1)$$

式中,  $\theta_a(\eta)$  是目标与天线相位中心的方位夹角,  $\theta_{ac}(\eta)$  表示的是方位向相位中心视角。  $N_d$  是天线阵元数,  $d$  是天线阵元之间的间距。设雷达的运行速度是  $V_r$ , 天线波束在地面的移动速度为  $V_g$ , 设雷达工作时间范围为  $\eta, \eta \in \left[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}\right]$ ,  $R_0$  为雷达与地面目标的最短斜距, 假设目标  $T$  所在的位置是  $[X_0, Y_0, 0]$ , 其示意图如图 1 所示。

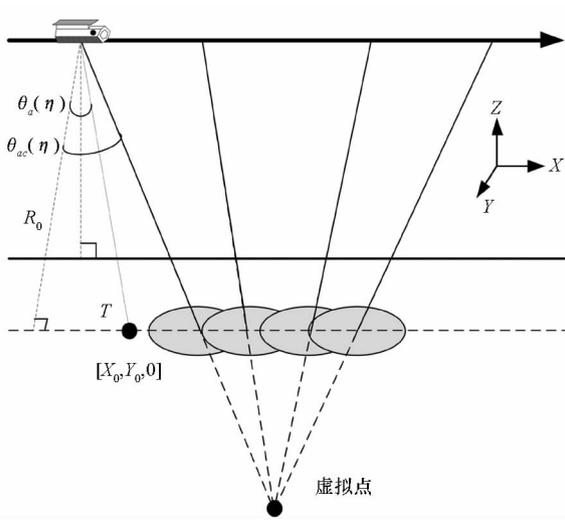


图 1 滑动聚束 SAR 波束扫描

Fig. 1 Sliding spotlight SAR beam scan

其中:

$$\begin{cases} \theta_a(\eta) = \frac{X_0 - V_r \eta}{R_0} \\ \theta_{ac}(\eta) = k_\varphi \eta \end{cases} \quad (2)$$

则目标所在的双程天线方向图加权可表示为  $G(\eta) = \omega^2(\theta_a, \theta_{ac}, \eta)$ , 在小角度的假设下<sup>[5-8]</sup>, 可以近似表示为:

$$\begin{aligned} G(\eta) &= \omega^2(\theta_a, \theta_{ac}, \eta) \\ &\approx \frac{\sin^2\left\{\pi \frac{L}{\lambda} [\sin(\theta_a(\eta)) - \sin(\theta_{ac}(\eta))]\right\}}{\left\{\pi \frac{L}{\lambda} [\sin(\theta_a(\eta)) - \sin(\theta_{ac}(\eta))]\right\}^2} \\ &\approx \text{sinc}^2\left\{\pi \frac{L}{\lambda} \left[\frac{X_0 - V_r \eta}{R_0} - k_\varphi \xi(\eta)\right]\right\} \end{aligned} \quad (3)$$

其中:  $L$  为天线长度,  $L = N_d d$ ;  $k_\varphi$  为天线相位扫描的扫描率;  $\xi(\eta)$  为天线相位扫描的步进波控时间。设天线电扫步进脉冲驻留数为  $T_d$ , 则在观测时间内天线相位扫描的等效步进波控时间可表

示为:

$$\xi(\eta) = \lfloor \frac{\eta}{T_p} \rfloor \cdot T_p = \eta - \left\{ \eta - \lfloor \frac{\eta}{T_p} \rfloor \cdot T_p \right\} \quad (4)$$

其中:  $PRF$  为系统的脉冲重复频率;  $\lfloor \frac{\eta}{T_p} \rfloor$  为取整后的数值;  $\left\{ \eta - \lfloor \frac{\eta}{T_p} \rfloor \cdot T_p \right\}$  为在观测时间内的锯齿波函数, 其周期为  $T_p = \frac{T_d}{PRF}$ 。由式(4)的表达式可知,  $\xi(\eta)$  为单调阶梯函数。波控时序如图 2 所示。

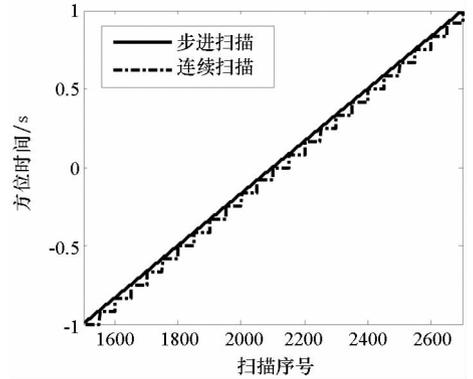


图 2 不同扫描方式下波控时序

Fig. 2 Timing sequence of different scan method

为简化表达式, 本文令  $X_0 = 0$ , 即对处于观测中心时刻的目标进行分析。则式(3)可表示为:

$$\begin{aligned} G(\eta) &= \text{sinc}^2\left\{\pi \frac{L}{\lambda} \left[\frac{V_r \eta}{R_0} + k_\varphi \xi(\eta)\right]\right\} \\ &= \text{sinc}^2\left\{\pi \frac{L}{\lambda} \left[\frac{V_r \eta}{R_0} + k_\varphi \eta - k_\varphi (\eta - \xi(\eta))\right]\right\} \end{aligned} \quad (5)$$

图 3 为不同扫描方式下的天线方向图, 由图可知, 步进扫描的天线方向图会累加锯齿状波动。

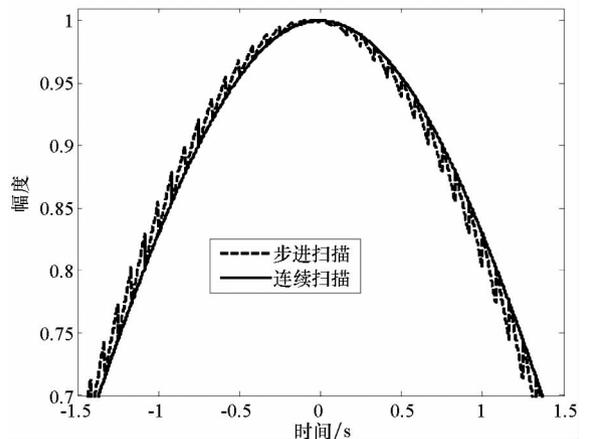


图 3 不同扫描方式下天线方向图

Fig. 3 Antenna pattern of different scan method

锯齿波函数可以用傅里叶级数来表示<sup>[9-10]</sup>:

$$\begin{aligned}
 f'(\eta) &= k_\varphi(\eta - \xi(\eta)) \\
 &= a_0 + \sum_{m=1}^{+\infty} a_m \cos\left(m \frac{2\pi}{T_p} \eta\right) + \sum_{m=1}^{+\infty} b_m \sin\left(m \frac{2\pi}{T_p} \eta\right)
 \end{aligned} \quad (6)$$

经计算,其中各阶傅里叶系数为:

$$\begin{cases} a_0 = \frac{k_\varphi T_p}{2} \\ a_m = 0 \\ b_m = -\frac{k_\varphi T_p}{m\pi} \end{cases} \quad (7)$$

式(5)可写为:

$$\begin{aligned}
 G(\eta) &= \text{sinc}^2 \left\{ \pi \frac{L}{\lambda} \left[ \left( \frac{V_r}{R_0} + k_\varphi \right) \eta - f(\eta) \right] \right\} \\
 &= \text{sinc}^2 [g(\eta) + f(\eta)]
 \end{aligned} \quad (8)$$

其中:

$$\begin{cases} g(\eta) = \pi \frac{L}{\lambda} \left[ \left( \frac{V_r}{R_0} + k_\varphi \right) \eta - \frac{k_\varphi T_p}{2} \right] \\ f(\eta) = \pi \frac{L}{\lambda} \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{k_\varphi T_p}{\pi} \frac{\sin\left(m \frac{2\pi}{T_p} \eta\right)}{m} \end{cases} \quad (9)$$

在滑动聚束 SAR 系统中,存在:

$$g(\eta) \gg f(\eta) \quad (10)$$

对式(8)中的 $f(\eta)$ 进行一阶泰勒近似展开:

$$\begin{aligned}
 G(\eta) &= \text{sinc}^2 [g(\eta) + f(\eta)] \\
 &\approx \text{sinc}^2 [g(\eta)] + \\
 &\quad \frac{2 \left\{ \frac{1}{2} g(\eta) \cdot \sin[2g(\eta)] - \sin^2[g(\eta)] \right\}}{g^3(\eta)} \cdot f(\eta) \\
 &= \text{sinc}^2 [g(\eta)] + \frac{\{ \text{sinc}^2 [g(\eta)] \}'}{[g(\eta)]'} \cdot f(\eta)
 \end{aligned} \quad (11)$$

记:

$$\begin{cases} G_1(\omega) = F[\text{sinc}^2(g(\eta))] \\ F_1(\omega) = F[f(\eta)] \end{cases} \quad (12)$$

其中, $F[\cdot]$ 为函数的傅里叶变换计算。则式(11)也可表示为:

$$\begin{aligned}
 G(\omega) &= F[G(\eta)] \\
 &= G_1(\omega) + \frac{j\omega G_1(\omega)}{\pi \frac{L}{\lambda} \left( \frac{V_r}{R_0} + k_\varphi \right)} \otimes F_1(\omega) \\
 &= G_1(\omega) - \frac{k_\varphi T_p}{\left( \frac{V_r}{R_0} + k_\varphi \right)} \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{1}{m} \left( \omega + \frac{m}{T_p} \right) \cdot \\
 &\quad G_1 \left( \omega + \frac{m}{T_p} \right) + \frac{k_\varphi T_p}{\left( \frac{V_r}{R_0} + k_\varphi \right)} \sum_{m=1}^{+\infty} \frac{1}{m} \left( \omega - \frac{m}{T_p} \right) \cdot \\
 &\quad G_1 \left( \omega - \frac{m}{T_p} \right)
 \end{aligned} \quad (13)$$

在式(13)中,可发现由于天线波束指向的步进扫描形式,目标方位向频谱的傅里叶变换结果有成对回波现象出现。在 $\omega = \pm m/T_p$ 处,成对回波以双峰的形式出现,其双峰的峰值位置 $\omega_{\text{couple}}$ 和幅度 $A_{\text{couple}}$ 为:

$$\begin{cases} \omega_{\text{couple}} = \pm \frac{m}{T_p} \pm \frac{1}{2} \frac{L}{\lambda} \left( \frac{V_r}{R_0} + k_\varphi \right) \\ A_{\text{couple}} = \frac{|k_\varphi| T_p}{4 \left( \frac{V_r}{R_0} + k_\varphi \right) m} \end{cases} \quad (14)$$

从式(14)可以看出,成对回波的位置和峰值的幅度与滑动聚束 SAR 系统的步进扫描脉冲驻留时间 $T_p$ 有关。 $T_p$ 的具体影响在下一节中将结合数值仿真做具体的分析。

## 2 信号仿真

为验证上述算法的正确性,本文做了一维方位谱验证和二维点目标仿真,仿真参数如表 1 所示。

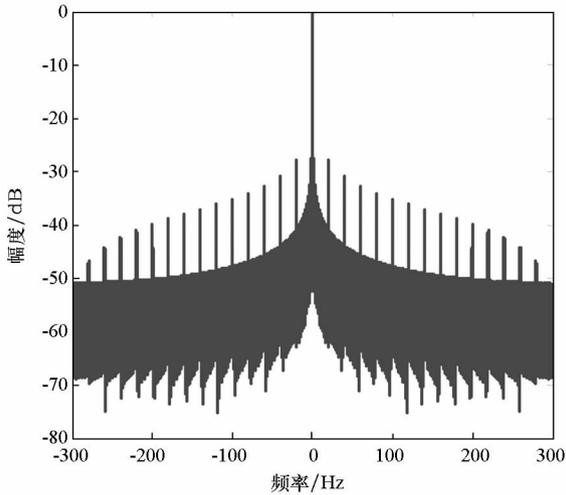
表 1 仿真参数设置

Tab. 1 Simulation parameters for step steering scan

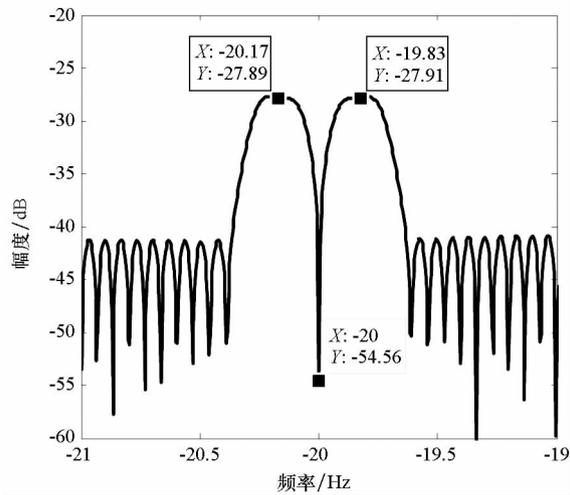
| 仿真参数         | 取值范围  |
|--------------|-------|
| 载频/GHz       | 9.6   |
| 天线方位向长度/m    | 2.8   |
| 目标与平台最近斜距/km | 45    |
| 扫描起始角度/(°)   | 2     |
| 扫描结束角度/(°)   | -2    |
| 工作时长/s       | 15    |
| 脉冲重复频率/Hz    | 600   |
| 系统带宽/MHz     | 600   |
| 采样率/MHz      | 720   |
| 步进扫描脉冲驻留数    | 30/72 |
| 平台运行速度/(m/s) | 240   |

为验证式(13)和式(14)的结果,本文分别做了脉冲驻留数为 30 和 72 的一维方位谱验证。仿真结果如图 4 所示。

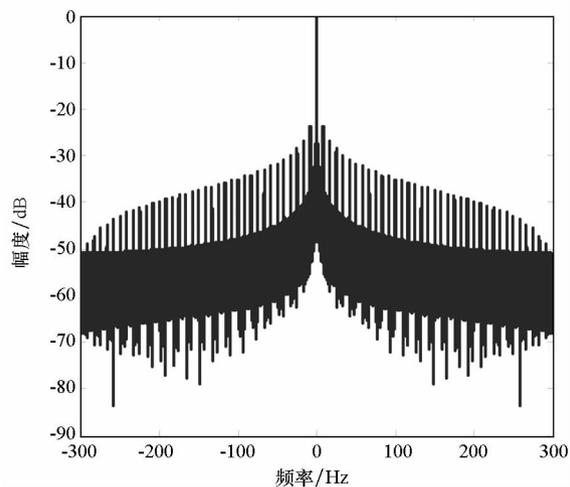
从图 4 (a)和图 4(c)的仿真结果中可以看出,在天线步进扫描的情况下,不同的脉冲驻留时间都会引起不同程度的成对回波。为方便分析,本文选取各自左边第一个成对回波进行分析,具体如图 4(b)和图 4(d)所示。在脉冲驻留数为 30 和 72 的情况下,其第一个成对回波分别出现于 $\omega_{30} = \pm 20$ 和 $\omega_{72} = \pm 8.331$ 处,与式(14)理论值的计算相符;成对回波的双峰分别出现于 $\omega_{30} = \pm 20.17$ 和 $\omega_{72} = \pm 19.83$ ,与式(14)理论值的计算相符,且峰值分别为 $A_{30} = -27.9$  dB 和 $A_{72} = -23.72$  dB,比周围旁瓣约高出-13 dB,与理论值的计算相符。



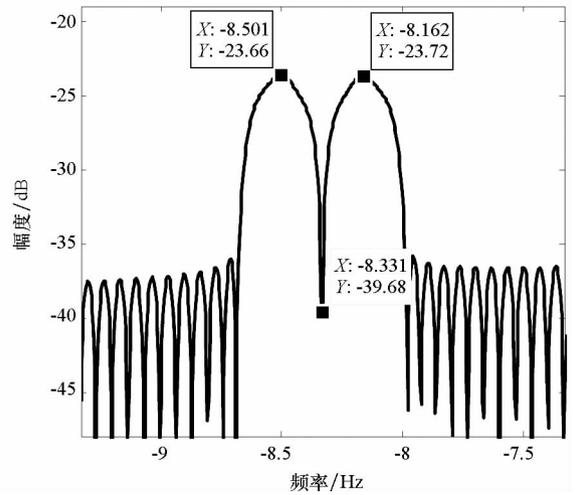
(a)  $T_d = 30$  脉压结果  
(a) Result of  $T_d = 30$



(b) 第一个成对回波 ( $T_d = 30$ )  
(b) The first paired-echo ( $T_d = 30$ )



(c)  $T_d = 72$  脉压结果  
(c) Result of  $T_d = 72$



(d) 第一个成对回波 ( $T_d = 72$ )  
(d) The first paired-echo ( $T_d = 72$ )

图 4 不同  $T_d$  的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of different  $T_d$

由式(14)可知,当  $T_p$  增大至某个数值时,该成对回波会混入主瓣,导致峰值旁瓣比和积分旁瓣比的抬升,即  $T'_d$  为:

$$T'_d \geq \left\lfloor \frac{\lambda}{L \left( \frac{V_r}{R_0} + k_\psi \right)} \cdot PRF \right\rfloor \quad (15)$$

图 5 为不同脉冲驻留数脉冲压缩性能对比结果。本文从峰值旁瓣比 (Peak Side-Lobe Ratio, PSLR)、积分旁瓣比 (Integrated Side-Lobe Ratio, ISLR) 和分辨率 (Resolution, Res) 三个参数来描述波束步进控制扫描对聚焦的影响,如表 2 所示。

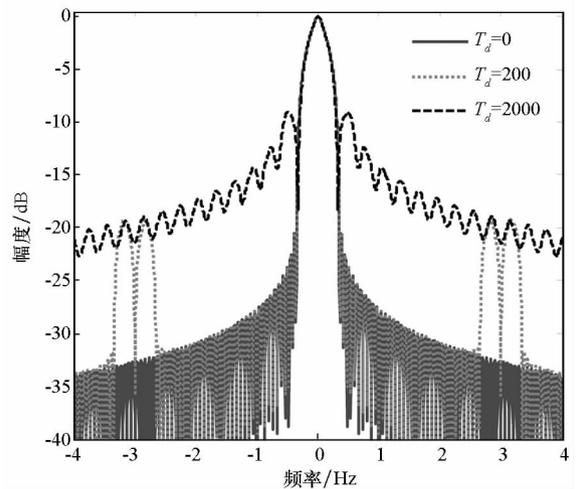


图 5 不同脉冲驻留数性能影响

Fig. 5 Performance impact for different scan number

表 2 不同脉冲驻留数影响分析

Tab. 2 Analysis of impact for different scan number

| 脉冲驻留数 $T_d$ | PSLR/dB   | ISLR/dB   | Res/m   |
|-------------|-----------|-----------|---------|
| 0           | -20.526 9 | -12.347 8 | 0.746 5 |
| 200         | -19.174 3 | -12.310 9 | 0.746 5 |
| 2000        | -9.033 8  | -10.740 9 | 0.746 5 |

由表 2 和图 5 的结果分析可知,扫描脉冲步进数增大至一定值时,成对回波会混进主瓣,恶化回波信号聚焦时的 PSLR 和 ISLR 指标,进而导致聚焦性能下降。因此在系统设计时,需考虑扫描步进脉冲持续数  $T_d$  的这一影响,即式(15)所示的临界值。

图 6 为点目标仿真结果,从图 6 可以看出,在方位向出现了成对虚像,虚像偏离点目标的像素数与点目标的多普勒带宽的比值和脉冲步进持续数与系统的 PRF 比值相对应,该现象出现在星载 SAR 实测滑动聚束模式图像中,这一结果验证了式(14)结果的正确性。

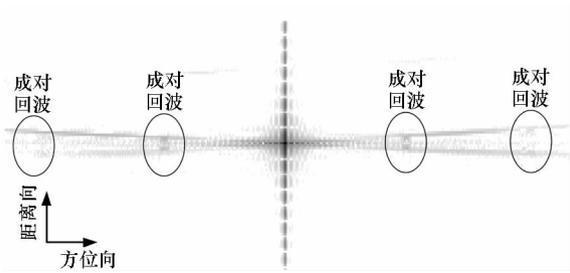


图 6 点目标仿真结果

Fig. 6 Simulation results of point target

### 3 结论

本文基于滑动聚束 SAR 天线相位扫描波束步进控制数学模型,提出一种可以定量分析和解释滑动聚束 SAR 由于步进扫描所导致成对回波的方法。该方法利用泰勒展开和傅里叶级数近似首次解释了滑动聚束 SAR 由于步进扫描所导致成对回波的现象,并具体给出成对回波幅度和位置表达式。该方法可为下一步这一现象的消除与抑制提供思路和理论依据。

### 参考文献 (References)

- [1] Meta A, Prats P, Steinbrecher U, et al. TerraSAR-X TOPSAR and ScanSAR comparison [C]//Proceedings of the 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2008.
- [2] Meta A, Mittermayer J, Prats P, et al. TOPS imaging with TerraSAR-X: mode design and performance analysis [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2010, 48(2): 759-769.
- [3] 黄岩,李春升,陈杰,等.星载 SAR 天线指向稳定度对成像质量的影响[J].北京航空航天大学学报,2000,26(3):282-285.  
HUANG Yan, LI Chunsheng, CHEN Jie, et al. Effects of stability of antenna pointing on spaceborne SAR imaging quality[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 26(3): 282-285. (in Chinese)
- [4] 陈祺.星载多模式合成孔径雷达成像技术研究[D].长沙:国防科技大学,2013.  
CHEN Qi. Research on the imaging technology of spaceborne multimode synthetic aperture radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] 陈杰,周荫清,李春升.合成孔径雷达卫星姿态指向稳定度与图像质量关系的研究[J].电子学报,2001,29(s1):1785-1789.  
CHEN Jie, ZHOU Yinqing, LI Chunsheng. On the relationship between satellite attitude stability and spaceborne SAR imaging qualities[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(s1): 1785-1789. (in Chinese)
- [6] Curlander J C, McDonough R N. Synthetic aperture radar: system and signal processing[M]. New York, USA: John Wiley & Sons Ltd, 1991.
- [7] Wertz J R. Spacecraft attitude determination and control[M]. Boston, USA: Reidel Publishing Company, 1999.
- [8] Wu C, Curlander J C, di Cenzo A. Determination of spacecraft attitude using synthetic aperture radar data [C]//Proceedings of Sensor Systems for the 80's Conference, AIAA 1980-1922, 1980.
- [9] Oppenheim A V, Schaffer R W. 离散时间信号处理[M].黄建国,刘树棠,张国梅,译.3版.北京:电子工业出版社,2015.  
Oppenheim A V, Schaffer R W. Discrete-time signal processing [M]. Translated by HUANG Jianguo, LIU Shutang, ZHANG Guomei. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2015. (in Chinese)
- [10] Skolnik M I. 雷达系统导论[M].左群声,徐国良,马林,等,译.3版.北京:电子工业出版社,2014.  
Skolnik M I. Introduction to radar systems[M]. Translated by ZUO Qunsheng, XU Guoliang, MA Lin, et al. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)