

## 交替收发模式下 SAR-GMTI 沿航迹基线形式及其影响分析

束宇翔\* 廖桂生 杨志伟

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室 西安 710071)

**摘要:** 采用子孔径交替收发的工作模式, 可以增加沿航迹基线长度和相位中心个数, 是提升单平台多通道 SAR 系统地面动目标检测(GMTI)性能的有效途径。该文在建立交替收发模式下多通道动目标信号模型的基础上, 通过分析推导明确了形成 GMTI 基线的必备条件。以建立的模型和推导为依据, 给出了交替收发工作模式的设计考虑, 通过对同一系统采用不同天线孔径划分和交替方式下的 GMTI 性能的比较, 说明了合理选择天线孔径划分和交替方式对提升 GMTI 性能的重要性。仿真和实测数据处理结果验证了结论的正确性。

**关键词:** 合成孔径雷达; 地面运动目标检测; 沿航迹基线; 交替收发

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)09-2135-08

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.01393

## Analysis of the Form and Effects of the Along-track Baseline in SAR-GMTI Systems with Alternate Transmission and Reception

Shu Yu-xiang Liao Gui-sheng Yang Zhi-wei

(National Lab of Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

**Abstract:** Alternate transmission and reception is an effective way to obtain a longer along-track baseline and additional independent phase centers to improve the performance of Ground Moving Target Indication (GMTI) in single-platform multi-channel SAR systems. A theoretic analysis of the signal model of moving targets in multi-channel SAR systems with alternate transmission and reception is made. And the necessary condition for the existence of the along-track baseline is indicated. Based on the signal model and the theoretical derivation, the design consideration of the modes of alternate transmission and reception is given. The comparison of GMTI performance with different antenna partitions and alternating strategies shows that an appropriate antenna partition and alternating strategy is important in improving the GMTI performance. The correctness of the conclusion is experimentally verified by the simulated and real SAR data.

**Key words:** SAR; Ground Moving Target Indication (GMTI); Along-track baseline; Alternate transmission and reception

### 1 引言

合成孔径雷达(SAR)技术与地面运动目标检测(GMTI)技术相结合, 可以在得到高分辨地面图像的同时完成地面动目标的检测及测速定位, 具有重要的军事应用价值。在单通道 SAR 系统中, 可以采用频域滤波、反射特性位移、时频分析<sup>[1,2]</sup>等技术实现 GMTI 的功能, 但都有检测淹没在主瓣杂波区的慢速微弱运动目标能力差的缺点。而在多通道 SAR-GMTI 系统中, 采用相位中心偏置天线(DPCA), 空时自适应处理(STAP), 沿航迹干涉(ATI)<sup>[3-5]</sup>等方

法进行动目标检测可以有效解决这一问题。

对于多通道系统, 沿航迹基线越长、通道数越多, 越容易获得更好的 GMTI 性能。现有的单平台多通道系统包括 PAMIR<sup>[6]</sup>, Radarsat-2<sup>[7]</sup>, TerraSAR<sup>[8]</sup>, COSMO-SkyMed<sup>[9]</sup>等。为了进一步提高单平台多通道系统的 GMTI 能力, 而又不增加额外的成本和系统复杂度(例如采用分布式平台), 可以采用子孔径交替收发<sup>[9-11]</sup>的工作模式来增加沿航迹基线长度以获得更好的低速目标响应, 并增加相位中心个数以获得系统信噪比的提高。需要注意的是, 交替收发得到的多个相位中心之间可能不存在沿航迹基线, 这些回波数据并不能提高抑制杂波后动目标的输出信杂噪比, 造成了数据的冗余。而且采用子孔径发射信号, 在 T/R 组件工作状态不变的情况下, 相比全孔径发射而言, 发射功率和天线增益都会降低。如果冗余的数据过多, 总的信噪比反

2011-12-27 收到, 2012-03-31 改回

国家 973 计划项目(2011CB707001), 长江学者和创新团队发展计划(IRT-0954), 国家自然科学基金(60901066)和教育部博士点基金(20090203120006)资助课题

\*通信作者: 束宇翔 shuyuxiang723@163.com

而会降低。

针对上述问题，本文对交替收发形成的各通道数据中的动目标信号形式进行了分析和推导，讨论了通道间具有沿航迹基线的必备条件。在此基础上，给出了交替收发工作模式的设计考虑，并在相同系统参数下，对不同天线孔径划分和交替方式的 GMTI 性能进行了仿真分析比较，说明了合理选择天线孔径划分和交替方式对提升 GMTI 性能的重要性。仿真和实测数据处理结果验证了结论的正确性。

### 2 多通道 SAR 相位中心的时空关系

多通道 SAR 检测动目标的基本原理是：在对动目标的观测过程中，不同通道的相位中心以固定时间差先后到达同一个观察位置，利用径向速度导致的动目标与杂波多普勒差异来实现杂波抑制和动目标检测。以两个通道为例，通道相位中心所处的方位位置和时间关系可以分为 4 种情况：情况 1：两个相位中心在不同的时间到达同一方位观测动目标；情况 2：两个相位中心在同一时间处于不同的方位观测动目标；情况 3：两个相位中心在同一时间处于同一方位观测动目标；情况 4：两个相位中心在不同的时间处于不同的方位观测动目标。4 种情况如图 1 所示。

情况 1 和情况 2 如图 1(a)所示，是典型的沿航迹双通道雷达观测目标的情况，沿航迹基线长度即为两个相位中心在同一时刻的方位位置差。情况 3 如图 1(b)所示，是典型的不存在沿航迹基线的情况。情况 4 如图 1(c)所示，这种情况下是否存在沿航迹基线，沿航迹基线的长度都难以直接判断。而在交替收发模式中，不同的发射/接收孔径在不同的时间交替工作，其产生的通道相位中心之间的关系通常属于情况 4。因此，讨论交替收发模式中的如情况 4 所述的通道间是否具有沿航迹基线，对交替工作模式的设计具有十分重要的作用。

### 3 交替收发模式的沿航迹基线形式

#### 3.1 相位中心时空关系分析

下面以两通道交替收发模式为例进行分析，天

线孔径划分和交替方式如图 2 所示，天线沿航向等分为前后两个子孔径交替发射脉冲，两个子孔径同时接收回波。图中灰色的孔径表示发射脉冲时该孔径不工作。平台运动速度为  $v_0$ ，雷达工作波长为  $\lambda$ ，方位脉冲重复频率为 PRF，孔径间距为  $2d$ ，天线等效自发自收的相位中心可以认为在发射孔径和接收孔径连线的中点处。可以得到 4 组回波数据：孔径 1 发射时，孔径 1，孔径 2 接收的回波数据  $S_{11}, S_{12}$ ；孔径 2 发射时，孔径 1，孔径 2 接收的回波数据  $S_{21}, S_{22}$ 。图中  $c_{11}^{t=\tau}, c_{12}^{t=\tau}, c_{21}^{t=\tau}, c_{22}^{t=\tau}$  分别表示 4 组回波数据在  $t = \tau$  时刻的相位中心方位位置，令  $t = 0$  时刻， $c_{11}^{t=0} = 0$ 。

类似图 1 的描述方式，其各相位中心的时间位置关系如图 3 中左图所示。根据上一节的分析，这些相位中心之间的时空关系可分为：属于情况 2 的有两对： $c_{11}$  与  $c_{12}$ ， $c_{21}$  与  $c_{22}$ ，容易判断它们的沿航迹基线都为  $d$ ；属于情况 4 的有 4 对： $c_{11}$  与  $c_{21}$ ， $c_{11}$  与  $c_{22}$ ， $c_{12}$  与  $c_{21}$ ， $c_{12}$  与  $c_{22}$ ，其沿航迹基线难以直接判断。下面对属于情况 4 的相位中心的基线形式进行分析。

不同时间处于不同方位的多个相位中心，如果以同一时间基准，对所有相位中心插值得到相同采样时刻下的等效位置，此时便可以用情况 2 或情况 3 来判断这些等效位置之间的基线关系。从图 3 左图中可以看出， $c_{11}, c_{12}$  无法与  $c_{21}, c_{22}$  在同一时刻出现，当平台匀速飞行时，对  $c_{11}, c_{12}$  插值得到  $t = 1/PRF$  时刻，即与  $c_{21}, c_{22}$  出现在同一时刻的等效位置，如图 3 中右图所示。插值后属于情况 2 的相位中心有 3 对： $c_{11}$  与  $c_{21}$ ， $c_{11}$  与  $c_{22}$ ， $c_{12}$  与  $c_{22}$ ，它们之间的沿航迹位置差分别为  $d, 2d, d$ ；插值后属于情况 3 的相位中心有一对： $c_{12}$  与  $c_{21}$ ，沿航迹基线为 0。

下面通过理论推导来验证，插值后的等效方位位置差是否等同于沿航迹基线长度。

#### 3.2 沿航迹基线形式推导

天线孔径划分和交替方式仍如图 2 所示，其观测动目标的过程示意如图 4 所示。令  $t = 0$  时刻， $c_{11}$

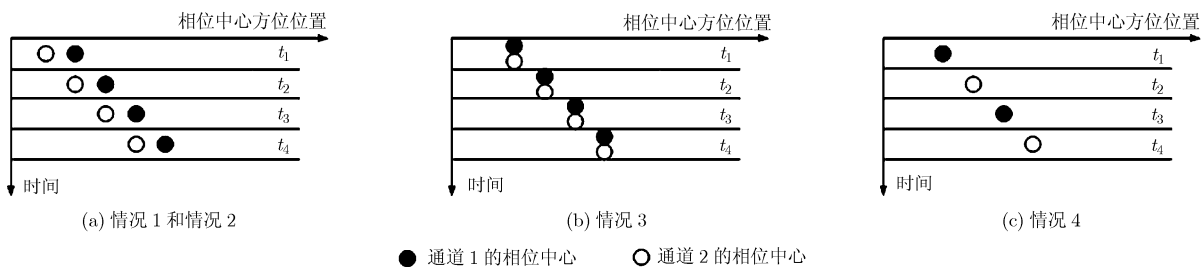


图 1 4 种情况下的相位中心时空关系示意图

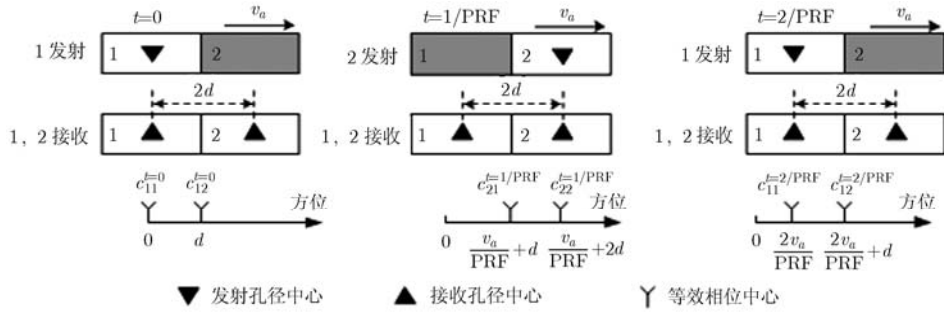


图2 两通道交替收发示意图

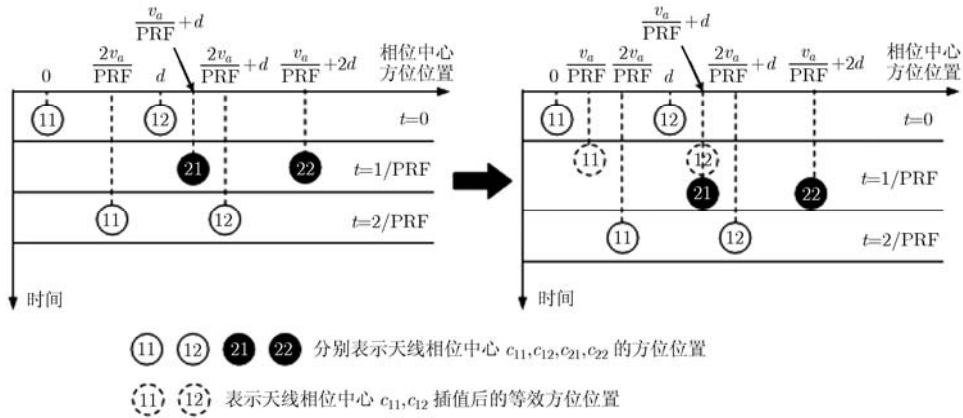


图3 两通道交替收发模式中各相位中心时空关系示意图

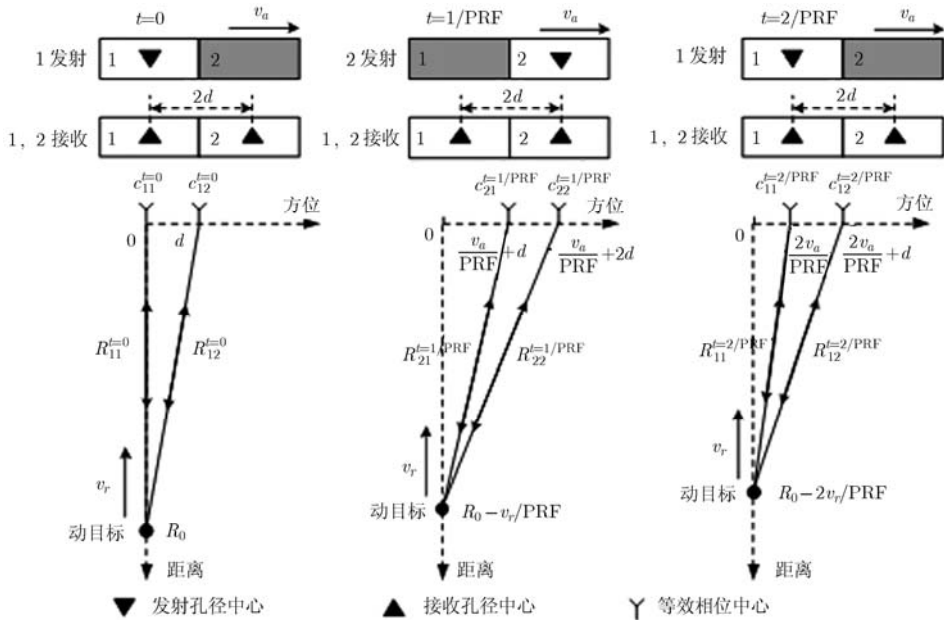


图4 两通道交替收发模式观测动目标示意图

处于运动目标的正上方，以  $c_{11}^{t=0}$  为原点，建立方位-距离坐标轴。为了推导简便暂不考虑动目标的方向速度，这不会影响推导结果。假设动目标以径向速度为  $v_r$  沿距离轴向着平台运动，令  $t = 0$  时刻动目

标距离向坐标为  $R_0$ 。

由于采用交替发射模式，方位采样频率  $F_a$  为重频的一半，即  $F_a = \text{PRF}/2$ 。假设重频减半后仍然能够保证方位信号不模糊，令合成孔径时间为  $T$ ，则

回波信号在一个合成孔径的总采样点数为  $N = T \cdot F_a$ 。设方位采样点  $n \in [-N/2, N/2 - 1]$ ，对应合成孔径时间内的每一个采样时间。则4组动目标回波数据的斜距历程可以写为

$$\left. \begin{aligned} R_{11}(n) &= \sqrt{(R_0 - v_r \cdot n / (\text{PRF}/2))^2 + (v_a \cdot n / (\text{PRF}/2))^2} \\ &\approx R_0 - v_r \frac{2n}{\text{PRF}} + \frac{v_a^2 (2n/\text{PRF})^2}{2R_0} \\ R_{12}(n) &\approx R_0 - v_r \frac{2n}{\text{PRF}} + \frac{v_a^2 (2n/\text{PRF} + d/v_a)^2}{2R_0} \\ R_{21}(n) &\approx R_0 - v_r \frac{2n+1}{\text{PRF}} + \frac{v_a^2 ((2n+1)/\text{PRF} + d/v_a)^2}{2R_0} \\ R_{22}(n) &\approx R_0 - v_r \frac{2n+1}{\text{PRF}} + \frac{v_a^2 ((2n+1)/\text{PRF} + 2d/v_a)^2}{2R_0} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

令  $\sigma_a$  表示距离压缩后沿方位信号的幅度， $\phi_0 = 4\pi R_0/\lambda$ ， $f_v = 2v_r/\lambda$ ， $\gamma = 2v_a^2/\lambda R_0$ ，则距离压缩后的数据为

$$\left. \begin{aligned} S_{a11}(n) &= \sigma_a \exp(-j2\pi \cdot 2R_{11}(n)/\lambda) \\ &= \sigma_a \exp(-j\phi_0 + j2\pi f_v 2n/\text{PRF} \\ &\quad - j\pi\gamma (2n/\text{PRF})^2) \\ S_{a12}(n) &= \sigma_a \exp(-j\phi_0 + j2\pi f_v 2n/\text{PRF} \\ &\quad - j\pi\gamma (2n/\text{PRF} + d/v_a)^2) \\ S_{a21}(n) &= \sigma_a \exp(-j\phi_0 + j2\pi f_v (2n+1)/\text{PRF} \\ &\quad - j\pi\gamma [(2n+1)/\text{PRF} + d/v_a]^2) \\ S_{a22}(n) &= \sigma_a \exp(-j\phi_0 + j2\pi f_v (2n+1)/\text{PRF} \\ &\quad - j\pi\gamma [(2n+1)/\text{PRF} + 2d/v_a]^2) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对应的方位匹配函数分别为

$$\left. \begin{aligned} S_{r11}(n_r) &= \exp(j\pi\gamma (2n_r/\text{PRF})^2) \\ S_{r12}(n_r) &= \exp(j\pi\gamma (2n_r/\text{PRF} - d/v_a)^2) \\ S_{r21}(n_r) &= \exp(j\pi\gamma [(2n_r - 1)/\text{PRF} - d/v_a]^2) \\ S_{r22}(n_r) &= \exp(j\pi\gamma [(2n_r - 1)\text{PRF} - 2d/v_a]^2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中  $n_r \in [-N_r/2 + 1, N_r/2]$ ， $N_r = (\text{PRF}/2)^2/\gamma$  表示参考信号的总点数。

以  $S_{a11}$  信号为例，其匹配压缩的结果为

$$\begin{aligned} y_{11}(n') &= S_{a11}(n) * S_{r11}(n) \\ &= \begin{cases} \sum_{m=-N/2}^{n'+N_r/2-1} S_{a11}(m) \cdot S_{r11}(n'-m), \\ n' \in [-(N+N_r)/2+1, (N-N_r)/2-1] \\ \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} S_{a11}(m) \cdot S_{r11}(n'-m), \\ n' \in [(N-N_r)/2, (N_r-N)/2] \\ \sum_{m=n'-N_r/2}^{N/2-1} S_{a11}(m) \cdot S_{r11}(n'-m), \\ n' \in [(N_r-N)/2+1, (N+N_r)/2-1] \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

其中“\*”表示卷积。当  $f_v$  满足  $|f_v| < F_a/2 - T \cdot \gamma/2$ ，匹配压缩结果的峰值出现在  $n' \in [(N-N_r)/2, (N_r-N)/2]$ 。以该情况为例进行分析，当匹配压缩结果在其他数据段的结果类似。此时

$$\begin{aligned} y_{11}(n') &= \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} S_{a11}(m) \cdot S_{r11}(n'-m) \\ &= \sigma_a \exp(-j\phi_0 + j\pi\gamma (2n'/\text{PRF})^2) \\ &\quad \cdot \sum_{m=-N/2}^{N/2-1} \exp(-j2\pi(\gamma 2n'/\text{PRF}^2 - f_v/\text{PRF})2m) \\ &= \sigma_a \frac{\sin(2\pi(\gamma 2n'/\text{PRF}^2 - f_v/\text{PRF})N)}{\sin(2\pi(\gamma 2n'/\text{PRF}^2 - f_v/\text{PRF}))} \\ &\quad \cdot \exp(-j\phi_0 + j\pi\gamma (2n'/\text{PRF})^2 \\ &\quad + j2\pi(\gamma 2n'/\text{PRF}^2 - f_v/\text{PRF})) \end{aligned} \quad (5)$$

当  $n' = f_v \cdot \text{PRF}/2\gamma$  时， $y_{11}$  取到峰值，其峰值相位为  $\phi_{11} = \pi f_v^2/\gamma - \phi_0$ 。

类似地， $S_{12}$ ， $S_{21}$ ， $S_{22}$  成像后的峰值相位分别为  $\phi_{12} = \pi f_v^2/\gamma - \phi_0 - 2\pi f_v d/v_a$ ， $\phi_{21} = \pi f_v^2/\gamma - \phi_0 - 2\pi f_v d/v_a$ ， $\phi_{22} = \pi f_v^2/\gamma - \phi_0 - 2\pi f_v 2d/v_a$ 。

由上述推导可以得到：属于情况4的4对数据： $S_{11}$ 与 $S_{21}$ ， $S_{11}$ 与 $S_{22}$ ， $S_{12}$ 与 $S_{21}$ ， $S_{12}$ 与 $S_{22}$ ，成像后它们的干涉相位分别为  $2\pi f_v d/v_a$ ， $2\pi f_v 2d/v_a$ ， $0$ ， $2\pi f_v d/v_a$ ，对应的沿航迹基线分别为  $d$ ， $2d$ ， $0$ ， $d$ 。证明了不同时间处于不同方位的多个相位中心之间的沿航迹基线，等于以同一时间基准对所有相位中心位置进行插值后得到的等效位置之间的沿航迹差。

下面在此结论基础上给出交替收发工作模式的设计考虑。

(1)重频选择：交替收发模式下方位采样率将会

降为系统重频的一半，因此在系统设计时需要选择大于两倍方位主瓣带宽的重频，以保证不会产生方位信号模糊。

(2)孔径划分和交替方式设计：交替收发模式下得到的回波数据对之间可能不存在沿航迹基线，对于抑制杂波检测目标来说是冗余的。因此，在设计孔径划分和交替方式时，需要同时考虑最长基线的增大和对杂波抑制处理冗余的相位中心的减少，根据系统参数进行优化选择，以实现更好的动目标检测性能。

### 4 实验结果及分析

下面通过仿真实验和实测数据处理，验证本文对交替收发模式的沿航迹基线形式讨论所得到的结论。并对不同天线孔径划分和交替方式下的 GMTI 性能进行了仿真分析比较。

#### 4.1 基线形式的仿真实验结果

仿真条件：天线孔径划分和交替方式如图 2 所示，平台运动速度为  $v_a = 7500 \text{ m/s}$ ，波长  $\lambda = 0.03 \text{ m}$ ，重频  $\text{PRF} = 5000 \text{ Hz}$ ，天线方位尺寸  $D = 15 \text{ m}$ ， $d = D/4$ ，动目标径向速度  $v_r = 3 \text{ m/s}$ ， $S_{11}$  成像中心时刻目标斜距  $R_0 = 750 \text{ km}$ 。4 组数据距离方位压缩后的峰值位置和对应的峰值相位分别如图 5 和图 6 所示。 $S_{11}$  与  $S_{21}$ ， $S_{22}$  成像后的峰值干涉相位分别为  $\Delta\phi_{11/21} = 0.6283 = 4\pi v_r d / (\lambda v_a)$ ， $\Delta\phi_{11/22} = 1.2566 = 4\pi v_r 2d / (\lambda v_a)$ ，对应的沿航迹基线分别为  $d$ ， $2d$ ； $S_{12}$  与  $S_{21}$ ， $S_{22}$  成像后的峰值干涉相位分别

为  $\Delta\phi_{12/21} = 0$ ， $\Delta\phi_{12/22} = 0.6283 = 4\pi v_r d / (\lambda v_a)$ ，对应的沿航迹基线分别为  $0$ ， $d$ ，与本文理论分析一致。

#### 4.2 实测数据处理验证

本节利用某机载多通道 SAR-GMTI 实测数据验证本文的结论。主要系统参数如下：载机速度约为  $115 \text{ m/s}$ ，脉冲重复频率  $\text{PRF} = 1000 \text{ Hz}$ ，通道间距  $d = 0.56 \text{ m}$ 。成像区域如图 7 所示。图 8 给出了双通道数据采用自适应杂波抑制处理<sup>[12,13]</sup>后的场景残差图。

以目标 1 为例，图 9 给出了双通道(属于第 2 节中的情况 2)抑制杂波前、后，目标 1 所在距离门的能量对比(以该距离门杂波抑制前最大能量归一化)。从处理结果可以看出，杂波抑制后动目标的信杂噪比明显增加。

为了得到满足第 2 节情况 4 的数据，对其中一个通道的回波数据沿方位向按奇偶次序抽取两组采样数据。考虑到系统重频大于两倍主瓣多普勒带宽，抽取后的数据仍不发生方位模糊。根据本文结论，这两组数据之间不存在沿航迹基线。采用相同的杂波抑制处理，仍以目标 1 为例，图 10 给出了抑制杂波前、后，目标 1 所在距离门的能量对比(以该距离门杂波抑制前最大能量归一化)。从处理结果可以看出，抑制杂波的同时动目标能量也被抑制，验证了本文的结论。

#### 4.3 不同交替工作模式的性能对比

仿真系统参数：平台运动速度为  $v_a = 7500 \text{ m/s}$ ，

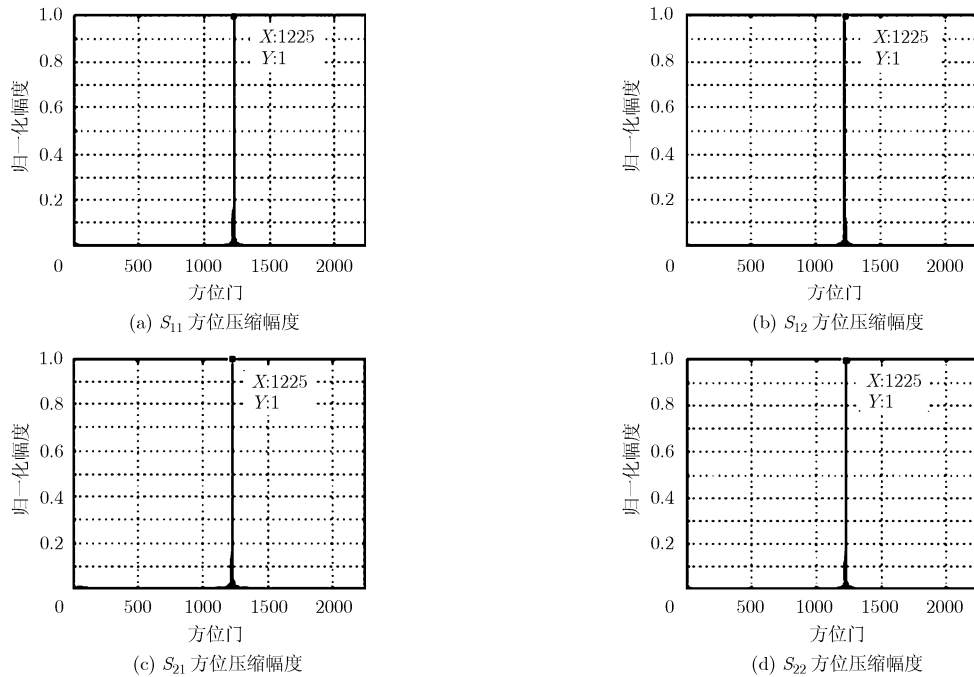


图 5 4 组数据距离方位压缩的峰值位置

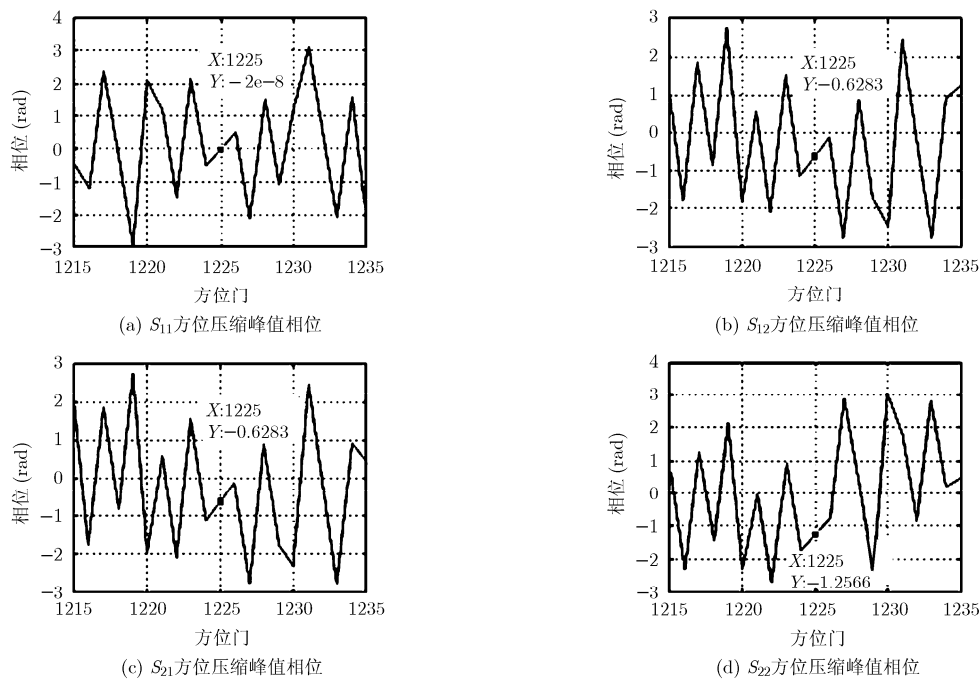


图 6 4 组数据距离方位压缩后的峰值相位

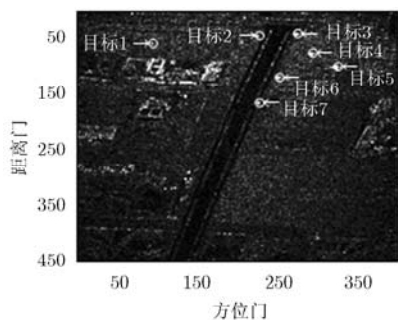


图 7 实测数据场景 SAR 图像

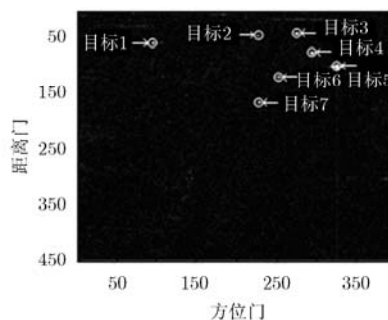


图 8 双通道杂波抑制残差图

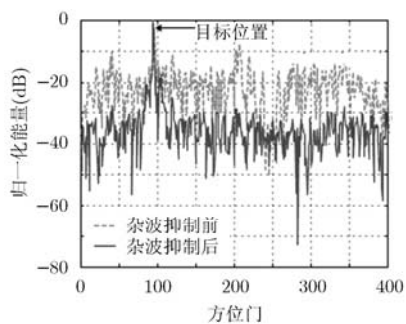


图 9 真实两通道数据杂波抑制前后目标 1 所在距离门能量对比

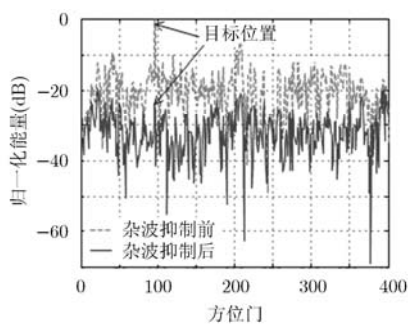


图 10 奇偶抽取得到的两通道数据杂波抑制前后目标 1 所在距离门能量对比

波长  $\lambda = 0.03 \text{ m}$ ，波束中心斜距  $R_0 = 640 \text{ km}$ ，方位重频  $\text{PRF} = 5000 \text{ Hz}$  (交替工作下仍满足方位信号不模糊)，天线方位尺寸  $9 \text{ m}$ ，沿方位向均匀划分为 6 块面板，每块面板接收回波的杂噪比为  $10 \text{ dB}$ ，动目标信杂比为  $0 \text{ dB}$ 。设计 4 种工作模式，它们的同

一时刻等效相位中心之间的位置关系如图 11 所示。

模式 1: 全孔径发射，6 块面板接收。模式 2: 前、后 5 块面板分别合成为发射孔径交替发射，6 块面板接收。模式 3: 前、后 5 块面板分别合成为发射孔径交替发射，6 块面板两两合成形成 3 个孔

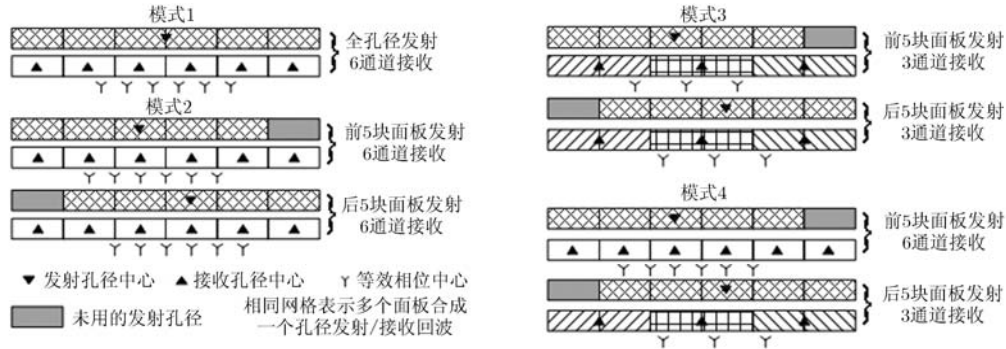


图 11 不同孔径划分和交替方式示意图

径接收。模式 4：前、后 5 块面板分别合成为发射孔径交替发射，再采用 6 孔径和 3 孔径接收方式交替接收。各模式的最长基线和冗余数据量如表 1 所示。

表 1 各模式下的最长基线和冗余的数据量

	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
最长基线(m)	3.75	4.5	3.75	4.125
冗余数据量	-	5 路	0	0

图 12 为上述仿真条件下采用空时自适应杂波抑制处理<sup>[12,13]</sup>后，4 种模式输出信杂噪比曲线对比，对于交替工作模式考虑了子孔径发射带来的发射功率和天线增益的降低。图 13 进一步给出了虚警概率为  $10^{-6}$  时，采用恒虚警检测后的检测概率曲线。

认为检测概率高于 0.75 时为可靠检测，则最小可检测速度(MDV)如表 2 所示。

从实验结果可以看出，虽然子孔径发射会带来

表 2 各模式下的最小可检测速度

	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
MDV(m/s)	6.65	6.39	5.57	5.46

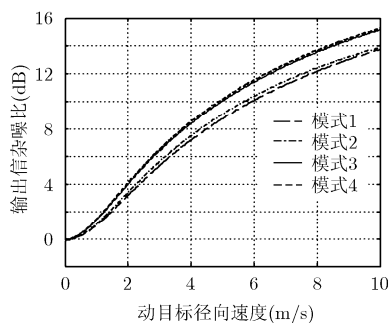


图 12 杂波抑制输出信杂噪比曲线

信噪比的损失，但增加的等效相位中心和更长的沿航迹基线不仅能够弥补发射能量的损失，还能使积累后的信噪比进一步提高。因此模式 2~模式 4 的检测性能相比模式 1 都有提高。虽然模式 2 具有最长的沿航迹基线，但大量等效相位中心之间不具有沿航迹基线，因此模式 2 的动目标检测性能较模式 1 改善并不明显。而模式 3 和模式 4 不存在数据的冗余，因此最小可检测速度都缩小了近 1 m/s。模式 3 虽然没有冗余，但最长基线并没有扩大；而模式 4 不仅交替发射，而且采用不同的孔径划分方式交替接收，没有数据冗余且最长基线也进一步扩大，因此具有最好的动目标检测性能。

### 5 结束语

子孔径交替收发工作模式是提高单平台多通道 SAR 系统 GMTI 性能的有效方式。本文对交替收发模式的动目标信号形式进行了分析推导，提出了形成 GMTI 基线所需要的条件，为交替收发模式下沿航迹基线形式的确定以及动目标检测性能分析提供了依据。并在此基础上给出了交替收发工作模式的设计考虑。如何采用优化算法在给定的系统参数下进行孔径划分和交替方式的优选，以实现最佳的 GMTI 性能，则有待进一步的研究。

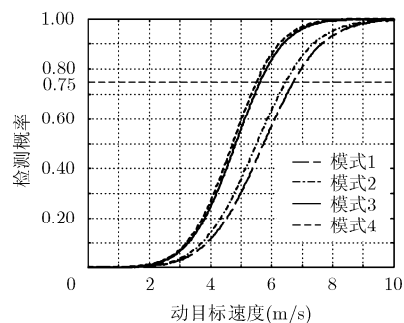


图 13 检测概率曲线

## 参考文献

- [1] Raney R K. Synthetic aperture imaging radar and moving targets [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, 7(3): 499-505.
- [2] Moreira J R and Keydel W. A new MTI-SAR approach using the reflectivity displacement method[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(5): 1238-1244.
- [3] 郑明洁, 杨汝良. 基于DPCA和干涉技术的SAR动目标检测[J]. *电子与信息学报*, 2003, 25(11): 1525-1530.  
Zheng M J and Yang R L. SAR moving targets detection based on DPCA and interferometric processing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(11): 1525-1530.
- [4] Cerutti-Maori D and Sikaneta I. Optimum GMTI processing for space-based SAR/GMTI systems - theoretical derivation [C]. EUSAR 2010, Aachen, June 2010: 390-393.
- [5] Chapin E and Chen C W. Airborne along-track interferometry for GMTI[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2009, 24(5): 13-18.
- [6] Cerutti-Maori D, Klare J, Brenner A R, *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.
- [7] Chiu S, Livingstone C, Sikaneta I, *et al.* Radarsat-2 moving object detection experiment (MODEX) [C]. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Boston, Massachusetts, 2008: 13-16.
- [8] Gabele M, Brutigam B, Schulze D, *et al.* Fore and aft channel reconstruction in the TerraSAR-X dual receive antenna mode [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(2): 795-806.
- [9] Lombardo P, Colone F, and Pastina D. Monitoring and surveillance potentialities obtained by splitting the antenna of the COSMO-SkyMed SAR into multiple sub-apertures[J]. *IEEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(2): 104-116.
- [10] Cerutti-Maori D, Gierull C H, and Ender J H G. Experimental verification of SAR-GMTI improvement through antenna switching [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2066-2075.
- [11] Ender J H G, Gierull C H, and Cerutti-Maori D. Improved space-based moving target indication via alternate transmission and receiver switching [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(12): 3960-3974.
- [12] Yang Z W, Liao G S, He S, *et al.* Target location with signal fitting and sub-aperture tracking for airborne multi-channel radar[J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2010, 21(5): 752-758.
- [13] Suo Z, Li Z, and Bao Z. Multi-channel SAR-GMTI method robust to coregistration error of SAR images [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2010, 46(4): 2035-2043.
- 束宇翔: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为运动平台雷达动目标检测、阵列信号处理。
- 廖桂生: 男, 1963年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为空时自适应处理、天基预警和阵列信号处理等。
- 杨志伟: 男, 1980年生, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为天基预警、多维域动目标检测等。