

## 基于运动调制的SAR-GMTI间歇采样遮蔽干扰方法

周 阳\* 毕大平 沈爱国 房明星

(国防科技大学电子对抗学院 合肥 230037)

**摘 要:** 该文提出一种对SAR-GMTI的遮蔽干扰方法。该方法将截获的SAR信号进行间歇采样并对其运动调制后转发出去, 利用运动调制效应在方位向上产生展宽和间歇采样转发在距离向上产生周期延拓的多假目标, 二者结合形成灵巧遮蔽干扰效果, 且干扰经多通道对消后无法被对消。此干扰独特之处在于能够将干扰能量仅出现在需要遮盖的运动目标上, 从而更有效地利用了干扰能量。以三通道干涉对消为例着重分析了该方法对多通道GMTI的干扰原理。仿真实验证明了此干扰方法的正确性和有效性。

**关键词:** 合成孔径雷达地面动目标显示; 调制干扰; 运动调制效应; 间歇采样转发干扰

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2017)04-0359-09

DOI: 10.12000/JR16075

**引用格式:** 周阳, 毕大平, 沈爱国, 等. 基于运动调制的SAR-GMTI间歇采样遮蔽干扰方法[J]. 雷达学报, 2017, 6(4): 359-367. DOI: 10.12000/JR16075.

**Reference format:** Zhou Yang, Bi Daping, Shen Aiguo, *et al.* Intermittent sampling repeater shading jamming method based on motion modulation for SAR-GMTI[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(4): 359-367. DOI: 10.12000/JR16075.

## Intermittent Sampling Repeater Shading Jamming Method Based on Motion Modulation for SAR-GMTI

Zhou Yang Bi Daping Shen Aiguo Fang Mingxing

(Laboratory 503, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** In this paper, we present a shading jamming method for the Synthetic Aperture Radar and Ground Moving Target Indicator (SAR-GMTI). This method begins with intermittently sampling intercepted SAR signals, performing motion modulation, and then transmitting them. The motion modulation of SAR signals can produce a motion modulation effect and intermittent sampling repeater jamming can produce multi-fronted and lagged false targets along a range. Their combination provides a jamming effect of smart shading areas, which can't be cancelled after multi-channel cancelling. The uniqueness of this jamming method is that the energy only appears on the moving target to be covered, so less jamming energy is needed. We analyzed the proposed jamming principle against GMTI using the tri-channel interference cancelling technique. Our simulation results verify our analyses and confirm its jamming effectiveness for SAR-GMTI.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar Ground Moving Target Indication (SAR-GMTI); Modulation jamming; Effect of motion modulation; Intermittent sampling repeater jamming

收稿日期: 2016-05-27; 改回日期: 2017-07-03; 网络出版: 2017-08-09

\*通信作者: 周阳 zhouyanglb@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61671453), 总装预研基金(5133030103)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61671453), The Advanced Project of PLA General Equipment Department Foundation of China (5133030103)

### 1 引言

合成孔径雷达地面动目标显示(Synthetic Aperture Radar-Ground Moving Target Indication, SAR-GMTI)结合了SAR能对地面全天时、全天候高分辨成像和GMTI能够检测、跟踪地面运动目标的优点, 能对任意地面动目标进行检测、识别、跟踪、定位和成像<sup>[1]</sup>, 已成为先进体制SAR必备的功能。随着SAR-GMTI的快速发展, 已对军事运动

目标构成了严重威胁,因此,对SAR-GMTI系统干扰技术的研究具有重要意义<sup>[2]</sup>。

SAR-GMTI通常用多个通道对杂波和静止目标进行对消<sup>[3]</sup>,仅留下具有运动信息的目标,从而完成对运动目标的检测。常规的SAR干扰方法<sup>[4,5]</sup>经过多通道对消后,会失去干扰效果,这使得对SAR-GMTI干扰必须有别于SAR干扰。文献<sup>[6,7]</sup>提出利用多干扰机对抗SAR双通道干扰对消技术,为多通道SAR-GMTI干扰提供了新的思路,但多个干扰机的协同工作难度较大;文献<sup>[8,9]</sup>提出了针对SAR-GMTI的虚假动目标欺骗干扰方法,这一类干扰需侦测SAR信号,并在此基础上进行复杂调制后转发出去,产生此类干扰对收发隔离度要求高,工程上较难实现;文献<sup>[10]</sup>就相干干扰工程实现难的问题,提出了间歇采样处理的干扰方法,利用收发分时避开了收发高隔离度的难以实现的难题;文献<sup>[11,12]</sup>提出了对SAR-GMTI的无源压制干扰,其干扰成本低且具有一定压制干扰效果,但无源干扰设备摆放受地形的限制,无法针对重要目标位置进行灵活压制,干扰灵活性不足。基于上述背景,本文提出了一种对常规的通道干涉对消SAR-GMTI的遮蔽干扰方法,该方法可以控制遮蔽区域的大小和出现的位置,达到对指定运动目标进行遮蔽的效果,通过遮蔽运动目标,影响运动目标回波的相位和幅度,从而无法检测运动目标,无法正确估计参数,无法正确定位运动目标,最终达到对SAR-GMTI干扰的目的。文章首先给出了干扰模型,然后分析了该方法对SAR-GMTI的干扰原理,并分析了采样周期、占空比、运动调制参数和干扰能量对干扰效果的影响,最后通过仿真验证了干扰的正确性和有效性。

## 2 运动调制间歇采样遮蔽干扰模型

如图1, SAR处于正侧视工作模式,设SAR平台以速度 $v$ 沿 $x$ 轴方向做匀速直线运动,其高度为 $H$ ,合成孔径长度为 $L$ ,合成孔径时间为 $T_L = L/v$ 。干扰机J位置为 $(x_j, y_j, 0)$ ,  $t_a=0$ 时干扰机到SAR的斜距为 $R_j = \sqrt{x_j^2 + y_j^2 + H^2}$ ,任意时刻 $t_a$ 干扰机到SAR的斜距为 $R_j(t_a)$ 。

### 2.1 运动调制干扰模型

对SAR运动调制干扰是指利用干扰机模拟运动目标的反射回波相位特征的干扰方法。运动目标相对于静止目标的反射回波会存在一个运动附加相位,只要将此附加相位求得,并利用干扰机在截获SAR信号的基础上,调制上这个运动附加相位,然后转发出去,就能模拟产生运动假目标回波信号。

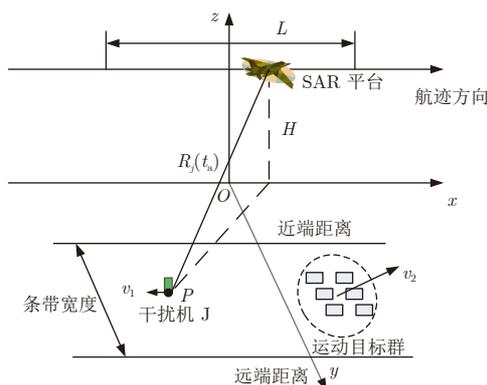


图 1 SAR成像场景图

Fig. 1 The imaging scene of SAR

下面重点推导匀加速运动目标的运动附加相位 $\Delta\phi(t_a)$ 。

如图1,假设一个运动点目标 $P$ 在 $t_a=0$ 时刻坐标为 $(x_j, y_j, 0)$ (即与干扰机同坐标),在地面上做匀加速运动,它沿方位向和距离向的速度、加速度分别为 $v_x, a_x$ 和 $v_y, a_y$ ,任意 $t_a$ 时刻, $P$ 坐标为 $(x_j + v_x t_a + \frac{1}{2} a_x t_a^2, y_j + v_y t_a + \frac{1}{2} a_y t_a^2, 0)$ ,  $t_a=0$ 时 $P$ 到SAR的斜距为 $R_j$ ,  $P$ 与SAR间距离 $R_j(t_a)$ 表达式为:

$$\begin{aligned} R_j(t_a) &= \sqrt{\left(x_j + v_x t_a + \frac{1}{2} a_x t_a^2\right)^2 + \left(y_j + v_y t_a + \frac{1}{2} a_y t_a^2\right)^2 + H^2} \\ &\approx R_j + \frac{x_j(v_x - v) + E v_y}{R_j} t_a + \frac{(v_x - v)^2 + v_y^2 + x_j a_x + y_j a_y}{2R_j} t_a^2 \\ &\quad + \frac{a_x(v_x - v) + a_y v_y}{2R_j} t_a^3 + \frac{a_x^2 + a_y^2}{8R_j} t_a^4 \end{aligned} \quad (1)$$

若目标 $P$ 静止,任意 $t_a$ 时刻, $P$ 坐标为 $(x_j, y_j, 0)$ ,则 $P$ 与SAR间距离 $R_0(t_a)$ 表达式为:

$$\begin{aligned} R_0(t_a) &= \sqrt{(x_j - v t_a)^2 + y_j^2 + H^2} \\ &\approx R_j - \frac{x_j v}{R_j} t_a + \frac{v^2}{2R_j} t_a^2 \end{aligned} \quad (2)$$

根据式(1)和式(2),可以得到运动附加相位的表达式为:

$$\begin{aligned} \Delta\phi(t_a) &= \frac{2\pi}{\lambda} [2R(t_a) - 2R_0(t_a)] \\ &= 4\pi \frac{x_j v_x + y_j v_y}{\lambda R_j} t_a \\ &\quad + 2\pi \frac{v_x^2 - 2v_x v + v_y^2 + x_j a_x + y_j a_y}{\lambda R_j} t_a^2 \\ &\quad + 2\pi \frac{a_x(v_x - v) + a_y v_y}{\lambda R_j} t_a^3 + \pi \frac{a_x^2 + a_y^2}{2\lambda R_j} t_a^4 \end{aligned} \quad (3)$$

将推导出的运动附加相位 $\Delta\phi(t_a)$ 调制在截获到的SAR信号上，可以得到运动调制干扰信号，其基带形式为：

$$s_j(t_r, t_a) = \text{rect}\left[\frac{t_r - 2R_j(t_a)/c}{T_p}\right] \text{rect}\left(\frac{t_a - x_j/v}{T_L}\right) \cdot \exp\left\{j\pi\mu_r\left[t_a - \frac{2R_j(t_a)}{c}\right]^2\right\} \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}R_j(t_a)\right] \cdot \exp[j\Delta\phi(t_a)] \quad (4)$$

其中， $\text{rect}(u) = \begin{cases} 1, & |u| \leq 1/2 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$ ， $t_r$ 为快时间， $t_a$ 为慢时间， $f_0$ 为中心频率， $\mu_r$ 为调频率， $T_p$ 为脉宽， $c$ 为光速， $v_x$ ， $a_x$ 和 $v_y$ ， $a_y$ 在式(4)中分别称为方位向调制速度、调制加速度和距离向调制速度、调制加速度。

### 2.2 间歇采样转发干扰模型

间歇采样干扰指干扰机接收SAR信号后，高保真度地采样其中一小段信号后进行转发处理，再采样下一段并进行转发，如此收发分时、采样和转发交替工作直至大时宽信号结束<sup>[13]</sup>。设间歇采样脉冲信号 $p(t_r)$ 为矩形包络脉冲串(如图2)，其表达式为：

$$p(t_r) = \text{rect}\left(\frac{t_r}{T_w}\right) \otimes \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t_r - nT_s) = D_r + \sum_{n=1}^{\infty} 2a_n \cos 2\pi n f_s t_r \quad (5)$$

其中。“ $\otimes$ ”为卷积符号， $\delta(\cdot)$ 为冲击函数， $T_w$ 为采样脉宽， $T_s$ 为采样周期， $D_r = T_w/T_s = T_w f_s$ 为占空比， $a_n = T_w f_s \text{sinc}(n\pi T_w f_s) = D_r \text{sinc}(n\pi D_r)$ 为幅度加权系数，通常情况下 $T_w$ ， $T_s$ 远小于雷达信号的脉冲宽度。

对截获的SAR信号 $s_0(t_r, t_a)$ 进行距离向间歇采样后，就得到了间歇采样干扰信号，其表达式为：

$$s_{jr}(t_r, t_a) = s_0(t_r, t_a) \cdot p(t_r) \quad (6)$$

间歇采样干扰基于天线收发分时体制，能够改善干扰机收发隔离问题，可在距离向产生密集的多假目标干扰效果。

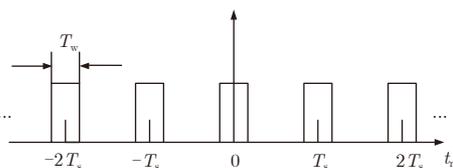


图2 距离向间歇采样脉冲串

Fig. 2 Azimuth intermittent sampling pulse series

### 2.3 运动调制间歇采样遮蔽干扰模型

运动调制间歇采样干扰详细产生步骤是在接收到的SAR信号上调制匀加速运动附加相位 $\Delta\phi(t_a)$ ，并对其距离向间歇采样，然后转发出去，此干扰信号的基带形式为：

$$s_j(t_r, t_a) = \text{rect}\left[\frac{t_r - 2R_j(t_a)/c}{T_p}\right] \text{rect}\left(\frac{t_a - x_j/v}{T_{Lp}}\right) \cdot \exp\left\{j\pi\mu_r\left[t_r - \frac{2R_j(t_a)}{c}\right]^2\right\} \cdot \exp[-j2kR_j(t_a)] \exp[\Delta\phi(t_a)] \cdot \left\{D_r + \sum_{n=1}^{\infty} 2a_n \cos 2\pi n f_s \left[t_r - \frac{2R_j(t_a)}{c}\right]\right\} \quad (7)$$

运动调制间歇采样干扰在方位向上利用运动调制效应实现展宽和偏移，在距离向上利用间歇采样产生距离向多假目标，二者相结合能实现2维区域遮蔽干扰，因此将这种新的干扰样式称为运动调制间歇采样遮蔽干扰。

## 3 对SAR-GMTI干扰原理

GMTI按实现方式的不同可分为两类：一是单通道GMTI，该方式对硬件需求较低，运算量相对较小，但是对弱目标或慢速目标的检测性能较差；二是多通道GMTI，该方式通过增加雷达系统空间维信息对杂波实现良好的抑制和对消，能够在低信噪比条件下对慢速运动目标进行有效检测，主要包括DPCA, STAP, ATI等<sup>[14]</sup>。这里采用三通道干涉技术为例分析对SAR-GMTI的干扰原理，其几何模型如图3所示。

三通道子孔径天线沿航迹以等间隔 $D_a$ 排列，天线2发射信号，天线1、天线3同时接收信号。由图3可知，干扰信号到3个通道的传播路程分别

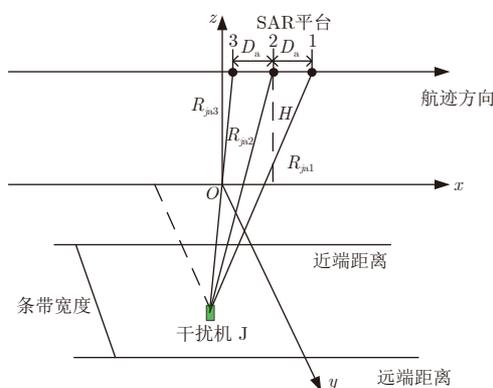


图3 三通道SAR-GMTI干涉处理几何模型

Fig. 3 The sketch map of tri-antenna interference cancelling technique

为 $R_{j1}=(R_{ja2}+R_{ja1})$ ,  $R_{j2}=2R_{ja2}$ ,  $R_{j3}=(R_{ja2}+R_{ja3})$ 。忽略干扰机延迟, 3个通道接收到的干扰信号分别为(略去窗函数):

$$\begin{cases} s_{j1}(t_r, t_a) = \exp \left\{ j\pi\mu_r \left[ t_a - \frac{R_{j1}(t_a)}{c} \right]^2 \right\} \\ \quad \cdot \exp [-jkR_{j1}(t_a)] \cdot \exp [j\Delta\phi(t_a)] \\ \quad \cdot \left\{ D_r + \sum_{n=1}^{\infty} 2a_n \cos 2\pi n f_s \left[ t_r - \frac{R_{j1}(t_a)}{c} \right] \right\} \\ s_{j2}(t_r, t_a) = \exp \left\{ j\pi\mu_r \left[ t_a - \frac{R_{j2}(t_a)}{c} \right]^2 \right\} \\ \quad \cdot \exp [-jkR_{j2}(t_a)] \cdot \exp [j\Delta\phi(t_a)] \\ \quad \cdot \left\{ D_r + \sum_{n=1}^{\infty} 2a_n \cos 2\pi n f_s \left[ t_r - \frac{R_{j2}(t_a)}{c} \right] \right\} \\ s_{j3}(t_r, t_a) = \exp \left\{ j\pi\mu_r \left[ t_a - \frac{R_{j3}(t_a)}{c} \right]^2 \right\} \\ \quad \cdot \exp [-jkR_{j3}(t_a)] \cdot \exp [j\Delta\phi(t_a)] \\ \quad \cdot \left\{ D_r + \sum_{n=1}^{\infty} 2a_n \cos 2\pi n f_s \left[ t_r - \frac{R_{j3}(t_a)}{c} \right] \right\} \end{cases} \quad (8)$$

利用RD算法对3个通道成像进行分析, 3个通道信号经距离向匹配滤波可得

$$\begin{cases} s_{jr1}(t_r, t_a) \approx s_{jr2}(t_r, t_a) \\ \quad \cdot \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{D_a^2 - 2D_a x_j}{2R_j} + \frac{D_a v t_a}{R_j} \right) \right] \\ s_{jr2}(t_r, t_a) = \exp [-jkR_{j2}(t_a)] \cdot \exp [j\Delta\phi(t_a)] \\ \quad \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \chi \left( t_r - \frac{R_{j2}(t_a)}{c}, -n f_s \right) \\ s_{jr3}(t_r, t_a) \approx s_{jr2}(t_r, t_a) \\ \quad \cdot \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{D_a^2 + 2D_a x_j}{2R_j} - \frac{D_a v t_a}{R_j} \right) \right] \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $\chi(\cdot)$ 为SAR线性调频脉冲信号的模糊函数<sup>[10]</sup>, 其表达式为:

$$\chi(\tau, f_d) = \exp(-j\pi f_d \tau) \cdot \left( 1 - \frac{|\tau|}{T_p} \right) \cdot \text{sinc}[(f_d - \mu_r \tau)(T_p - |\tau|)] \quad (10)$$

经距离徙动校正, 忽略接收通道的位置差异对距离向成像的影响, 在进行方位向匹配滤波前, 必须补偿通道位置间隔产生的多普勒中心频率偏差, 以通道2为参考, 则通道1和通道3的补偿函数分别为:

$$\begin{cases} C_1(t_a) = \exp(j2\pi v D_a t_a / \lambda R_j) \\ C_3(t_a) = \exp(-j2\pi v D_a t_a / \lambda R_j) \end{cases} \quad (11)$$

对通道1、通道3进行多普勒中心偏差补偿后, 可得方位向匹配滤波输出包络为:

$$\begin{cases} s_{ja1}(t_r, t_a) \approx s_{ja2}(t_r, t_a) \cdot \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{D_a^2 - 2D_a x_j}{2R_j} \right) \right] \\ s_{ja2}(t_r, t_a) = (1 - |t_r^*| / T_p) \cdot (1 - |t_a^*| / T_L) \\ \quad \cdot \text{sinc}[\pi \mu_a t_a^* (T_L - |t_a^*|)] \\ \quad \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \exp(-j\pi n f_s t_r^*) \\ \quad \cdot \text{sinc}[\pi (n f_s + \mu_r t_r^*) (T_p - |t_r^*|)] \\ s_{ja3}(t_r, t_a) \approx s_{ja2}(t_r, t_a) \cdot \exp \left[ -j \frac{2\pi}{\lambda} \left( \frac{D_a^2 + 2D_a x_j}{2R_j} \right) \right] \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $t_r^* = t_r - 2R_j/c$ ,  $t_a^* = t_a - t_{am}$ ,  $a_n = D_r \text{sinc}(n\pi D_r)$ ,  $D_r$ 是间歇采样脉冲串的占空比,  $t_{am}$ 为驻相点 $\tau^*$ 处对应的方位向时刻, 在 $t_a = t_{am}$ 时各通道有最大输出值,  $t_{am}$ 的表达式为<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} t_{am} = & \frac{x_j}{v} - \frac{x_j v_x + y_j v_y}{v^2} \\ & - \frac{v_x^2 - 2v_x v + v_y^2 + x_j a_x + y_j a_y}{v^2} \tau^* \\ & - \frac{3a_x(v_x - v) + 3a_y v_y}{2v^2} \tau^{*2} - \frac{a_x^2 + a_y^2}{2v^2} \tau^{*3} \end{aligned} \quad (13)$$

$t_{am}$ 关于 $\tau^*$ 的常数项体现了目标方位像的峰值偏移位置, 关于 $\tau^*$ 的1次、2次和3次项可使方位向目标像展宽和散焦。

由式(12)通道2成像表达式可见, 由运动调制效应产生的干扰条带在距离向以间隔为 $ncf_s/2\mu_r$ 周期延拓出现, 能量较强的干扰条带数为 $\text{floor}(2/D_r) - 1$ , 因此会产生区域遮蔽干扰效果。根据运动目标SAR成像效应<sup>[9]</sup>知干扰条带方位向中心偏移位置和展宽量分别为:

$$x = x_j - \frac{x_j v_x + y_j v_y}{v} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \delta x = & \left| - \frac{v_x^2 - 2v_x v + v_y^2 + x_j a_x + y_j a_y}{v} T_L \right. \\ & \left. - \frac{3(a_x v_x - a_x v + a_y v_y)}{4v} T_L^2 - \frac{a_x^2 + a_y^2}{8v} T_L^3 \right| \end{aligned} \quad (15)$$

由此可以计算出形成有效干扰的面积为:

$$S_j = \delta x \cdot \frac{ncf_s}{2\mu_r} \cdot \left[ \text{floor} \left( \frac{2}{D_r} \right) - 2 \right] \quad (16)$$

由于各接收通道存在沿航迹方向位置偏差, 在

进行杂波对消之前, 必须补偿由位置偏差引起的相位偏差, 相应的补偿函数为:

$$\begin{cases} C_{12}(t_a) = \exp[j\pi D_a(D_a - 2vt_a)/\lambda R_j] \\ C_{23}(t_a) = \exp[j\pi D_a(D_a + 2vt_a)/\lambda R_j] \end{cases} \quad (17)$$

利用式(15)进行位置偏差相位补偿, 并进行杂波对消可得

$$\begin{cases} y_{12}(t_r, t_a) = s_{ja1}(t_r, t_a)C_{12} - s_{ja2}(t_r, t_a) \\ = s_{ja2}(t_r, t_a) \\ \cdot \left[ \exp\left(j \frac{2\pi D_a v}{\lambda R_j} \left(\frac{x_j}{v} - t_a\right)\right) - 1 \right] \\ y_{23}(t_r, t_a) = s_{ja2}(t_r, t_a) - s_{ja3}(t_r, t_a)C_{23} \\ = s_{ja2}(t_r, t_a) \\ \cdot \left[ 1 - \exp\left(j \frac{2\pi D_a v}{\lambda R_j} \left(\frac{x_j}{v} - t_a\right)\right) \right] \end{cases} \quad (18)$$

对式(18)取模, 则干扰信号通过SAR-GMTI系统后的输出幅度为:

$$\begin{aligned} |y_{12}(t_r, t_a)| &= |y_{23}(t_r, t_a)| = 2 |s_{ja2}(t_r, t_a)| \\ &\cdot \left| \sin \left[ \frac{\pi D_a v}{\lambda R_j} \left(t_a - \frac{x_j}{v}\right) \right] \right| \end{aligned} \quad (19)$$

一般情况下,  $t_{am}$ 表达式中  $-\frac{v_x^2 - 2v_x v + v_y^2}{v^2} \tau^*$   $-\frac{3a_x(v_x - v) + 3a_y v_y}{2v^2} \tau^{*2} - \frac{a_x^2 + a_y^2}{2v^2} \tau^{*3}$  对成像能量的影响较小, 可忽略不计<sup>[9]</sup>, 此时对消后输出幅度近似为:

$$\begin{aligned} |y_{12}(t_r, t_a)| &= |y_{23}(t_r, t_a)| = 2 |s_{ja2}(t_r, t_a)| \\ &\cdot \left| \sin \left[ \frac{\pi D_a}{\lambda R_j v} (x_j v_x + y_j v_y + (x_j a_x + y_j a_y) \tau^*) \right] \right| \end{aligned} \quad (20)$$

由式(20)可知, 干扰机位置, 距离向和方位向速度、加速度取值将直接影响到杂波对消后运动目标的保留能量的大小。当  $x_j v_x + y_j v_y + (x_j a_x + y_j a_y) \tau^* = n\lambda R_j v / D_a$  时, 干扰能量将被全部对消, 干扰位于对消特性的凹口处; 当  $x_j v_x + y_j v_y + (x_j a_x + y_j a_y) \tau^* = (n + 1/2)\lambda R_j v / D_a$  时, 干扰位于对消特性的凸口处, 干扰幅度得到最大程度地增强, 可达到对消前的2倍; 其余均介于凸口和凹口之间。这说明运动调制间歇采样干扰经过GMTI处理后不会被完全对消, 能够对SAR-GMTI达到干扰效果。

#### 4 干扰参数和干扰功率分析

运动调制间歇采样遮蔽干扰经过SAR-GMTI处理后的输出与采样周期、占空比、运动调制参数和干扰能量4个干扰指标有关。因此需要进一步理解这些干扰参数的影响。

##### (1) 间歇采样周期 $T_s$

间歇采样周期影响遮蔽面积, 遮蔽疏密程度, 是一个关键的干扰指标。当间歇采样周期越大时, 假目标条带越密集, 所形成的遮蔽面积越小, 干扰能量越集中; 当间歇采样周期越小时, 假目标条带越稀疏, 所形成的遮蔽面积越大, 干扰能量越分散。

##### (2) 占空比 $D_r$

占空比影响干扰输出加权系数  $a_n$ , 因而会影响到干扰输出幅度。设  $n=0$  为距离向中心假目标, 其余为距离向第  $n$  阶次假目标。当  $n\pi D_r = k\pi$  ( $k$  为整数) 时,  $a_n=0$ , 此时图像上将看不到该次级假目标。由于  $a_n=D_r$ , 所以占空比越大, 距离向中心假目标幅度越大, 次级假目标幅度相对中心假目标会降低。占空比减小时, 中心假目标幅度下降较快, 次级假目标幅度下降较慢。

##### (3) 运动调制参数 $v_x, v_y, a_x, a_y$

运动调制参数主要影响方位向假目标峰值中心位置及展宽量。一般地, 干扰机位置纵坐标  $y_j$  远大于横坐标  $x_j$ , 由式(14)和式(15)知,  $v_x$  影响方位向均匀展宽量,  $v_y$  影响假目标峰值中心位置在方位向上发生偏移的大小,  $a_x$  对偏移和展宽影响均不大,  $a_y$  是使方位向发生非均匀展宽的原因。

##### (4) 干扰能量分析

干扰能量影响干扰信号处理后的幅度, 因而决定了对目标遮蔽的好坏。干扰能量过小, 则无法有效遮蔽目标; 干扰能量过大, 则影响干扰效率。由于干扰信号在距离维间歇采样和方位维运动调制, 因而会导致2维部分失配, 为了选择合适的干扰功率, 需要根据匹配滤波的信号处理过程, 对所需干扰能量进行分析。根据式(12), 单位幅度干扰信号经过距离向匹配滤波后的幅度  $A_r$  为  $(1 - |t_r^*|/T_p) \cdot \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n \text{sinc}[\pi(nf_s + \mu_r t_r^*)(T_p - |t_r^*|)]$ , 而经过方位向匹配滤波后的幅度  $A_a$  为  $(1 - |t_a^*|/T_L) \cdot \text{sinc}[\pi\mu_a t_a^*(T_L - |t_a^*|)]$ , 从而经过2维匹配滤波处理后的幅度为  $A_r \cdot A_a$ 。干扰信号2维处理后的幅度大于被保护目标回波2维处理后幅度的  $\sqrt{2}$  倍时, 一般能达到有效遮蔽<sup>[15]</sup>。根据上述能量分析, 可以得到合适的干扰功率。

由于干扰机与待保护目标成像后的相对位置是已知的, 结合待保护区大小, 选择合适的干扰参数和干扰功率, 可使得目标恰好被遮蔽。

#### 5 仿真实验

为了验证理论分析的正确性和干扰的有效性, 根据式(12)生成的干扰信号按照RD成像算法进行干扰仿真。设SAR-GMTI工作于正侧视, 其主要

实验参数如表1所示, SAR干扰机放置坐标为(0, 10000, 0), 干扰实验参数如表2所示, 设置干信比为15 dB。

表 1 SAR-GMTI实验参数

Tab. 1 The simulation experiment parameters

SAR参数名称	数值
信号载频(GHz)	10
信号脉宽( $\mu\text{s}$ )	20
距离向信号带宽(MHz)	100
方位向信号带宽(Hz)	400
各通道天线间距(m)	1
飞行高度(m)	6000
合成孔径长度(m)	300
载机速度(m/s)	200
脉冲重复周期(Hz)	480
通道数目	3

表 2 干扰实验参数

Tab. 2 The jamming experiment parameters

干扰参数名称	符号
采样周期( $\mu\text{s}$ )	$T_s$
距离向调制速度(m/s)	$v_y$
距离向调制加速度( $\text{m/s}^2$ )	$a_y$
占空比	$D_r$
方位向调制速度(m/s)	$v_x$
方位向调制加速度( $\text{m/s}^2$ )	$a_x$

### 5.1 对运动装甲车干扰遮蔽效果

因为干扰机和待保护目标相对位置是已知的, 对干扰机设置合理的运动参数, 可使干扰能量仅出现在待保护目标上, 从而有效利用了干扰能量。

现需保护6辆具有较强反射特性的运动装甲车, 其坐标分别为(-110, 9975, 0), (-110, 10000, 0), (-110, 10025, 0), (-100, 9975, 0), (-100, 10000, 0), (-100, 10025, 0), 均以 $v_{Tx} = 0$ ,  $a_{Tx} = 0$ ,  $v_{Ty} = -3$  m/s,  $a_{Ty} = 0$ 行进。运动装甲车SAR成像后会发生偏移或展宽, 其方位向偏移量 $\Delta x$ 和展宽量 $\delta x$ 由式(14)和式(15)可以计算得出。将装甲车运动参数代入, 可得各装甲车偏移量 $\Delta x = 150$  m、展宽量 $\delta x = 0$ , 因此装甲车SAR成像后的坐标分别为(40, 9975, 0), (40, 10000, 0), (40, 10025, 0), (50, 9975, 0), (50, 10000, 0), (50, 10025, 0)成像仿真图如图4(a)所示, 运动装甲车和静止参考点均清晰可见; 图4(b)表示经过GMTI对消后的成像图, 静止参考点被对消, 运动装甲车仍清晰可见。

用运动调制间歇采样干扰对SAR-GMTI进行转发, 按上述实验参数进行仿真。根据计算出的待保护目标成像后的位置信息, 干扰参数设置为 $v_x = 0$ ,  $a_x = 0$ ,  $v_y = -0.85$  m/s,  $a_y = -0.15$   $\text{m/s}^2$ ,  $D_r = 10\%$ ,  $T_s = 8$   $\mu\text{s}$ ; 根据第3节干扰能量分析, 选择干信比为15 dB。经SAR-GMTI对消处理后干扰仿真效果如图4(c)所示, 可见在干信比为15 dB时, 干扰能量没有被对消, 并且将运动装甲车完全遮盖, 而对一般的噪声干扰要达到相同的遮盖干扰效果, 干信比至少要达到50 dB<sup>[4]</sup>, 说明此干扰方法能量利用效

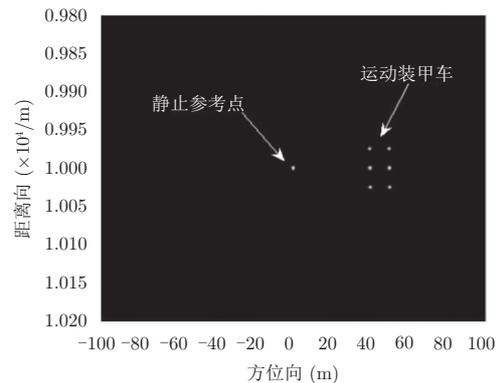
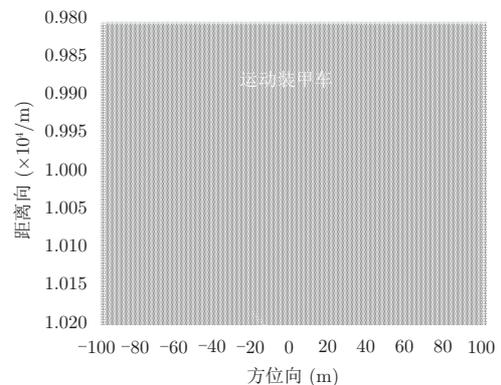
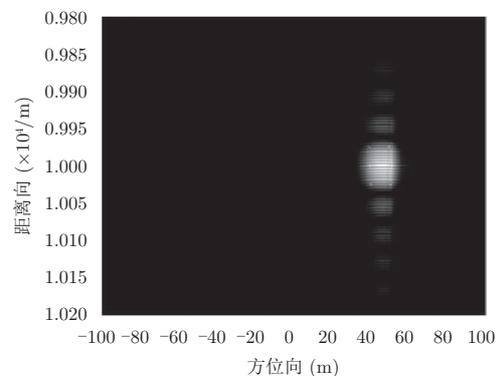
(a) 装甲车 SAR 成像图  
(a) SAR image of six armored car(b) 对消后成像图  
(b) SAR image after cancelling(c) 遮蔽干扰效果  
(c) Effect of shading jamming

图 4 遮蔽6辆装甲车干扰效果图

Fig. 4 The jamming images effect of shading six armored car

率较高。遮蔽面积约为1600 m<sup>2</sup>，与式(16)计算结果基本一致，说明了理论分析的正确性。

### 5.2 各参数对干扰效果影响仿真

#### (1) 间歇采样周期

取 $v_x=0, a_x=0, v_y=-0.85$  m/s,  $a_y=-0.3$  m/s<sup>2</sup>,  $D_r=10\%$ ，采样周期依次为 $T_s=4$  μs,  $T_s=8$  μs进行对比仿真，对GMTI干扰成像结果如图5。可见，随着采样周期的变大，干扰条带在距离向上分布越密集，干扰区域越小，能量越集中。

#### (2) 占空比

取 $v_x=0, a_x=0, v_y=-0.85$  m/s,  $a_y=-0.3$  m/s<sup>2</sup>,  $T_s=6$  μs，占空比依次为 $D_r=10\%$ ,  $D_r=15\%$ ，进行对比仿真，结果如图6。可见，随着占空比的增大，干扰条带数目减少，遮蔽面积减小，各干扰条带强度差别变大。

#### (3) 运动调制参数

取 $v_x=0, a_x=0, v_y=-0.85$  m/s,  $T_s=8$  μs,  $D_r=10\%$ ，当 $a_y=-0.30$  m/s<sup>2</sup>,  $a_y=-0.45$  m/s<sup>2</sup>时，结

果如图7(a)–图7(b)；再取 $v_x=0, a_x=0, a_y=-0.15$  m/s<sup>2</sup>,  $T_s=8$  μs,  $D_r=10\%$ ，当距离向速度依次为 $v_y=0.3$  m/s,  $v_y=-0.6$  m/s时，结果如图7(c)–图7(d)。可见，距离向调制加速度对干扰条带长度影响很大，其绝对值越大，干扰条带越长；距离向调制速度主要影响遮蔽面中心的方位向出现位置。

## 6 结束语

本文提出一种基于运动调制的SAR-GMTI间歇采样遮蔽干扰方法，建立了干扰模型，并进行了理论分析和仿真实验。理论分析表明，该方法能够对SAR-GMTI产生遮蔽干扰效果，且其遮蔽面的大小、疏密程度和覆盖位置可以通过改变采样周期、占空比和运动调制参数进行灵活地控制；仿真实验表明，该方法对强反射目标群具有较好的遮蔽效果，且所需干扰能量较小。此干扰方法改善了干扰机收发隔离的问题，能产生灵活可控的遮蔽面，且干扰能量较一般噪声压制干扰更低，因此具有较高的研究与运用价值。

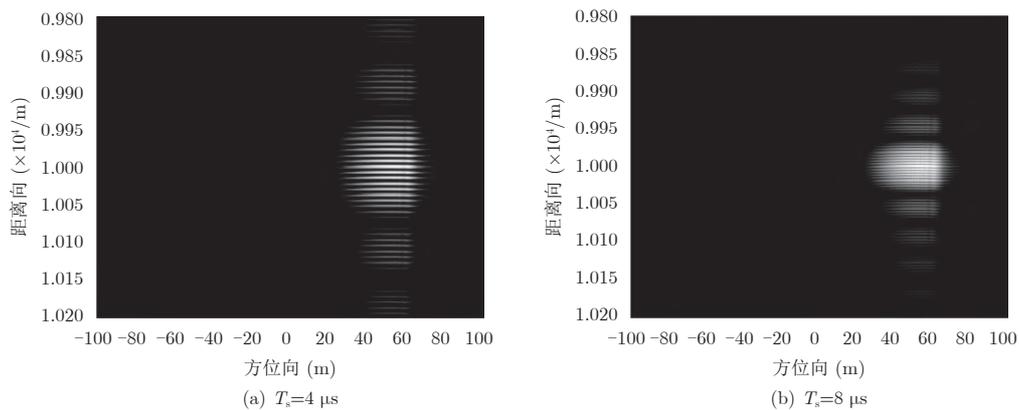


图 5 不同采样周期下的干扰图像

Fig. 5 Jamming images with different sampling periods

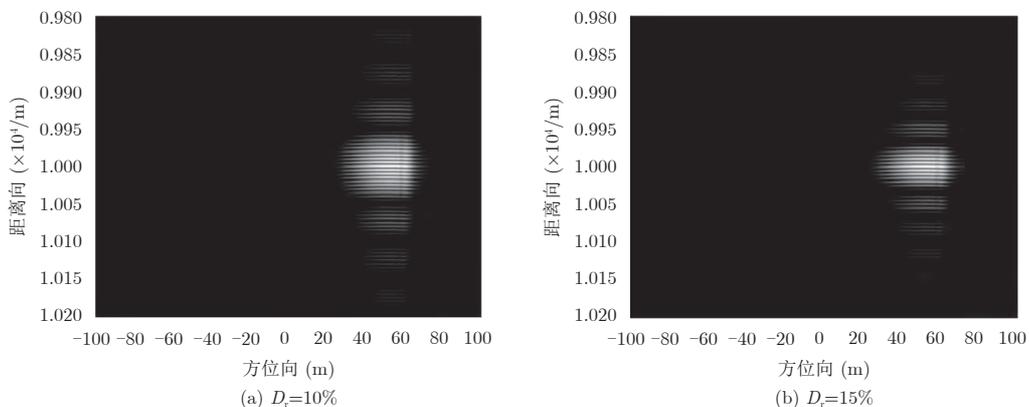


图 6 不同占空比下的干扰图像

Fig. 6 Jamming images with different duty ratio

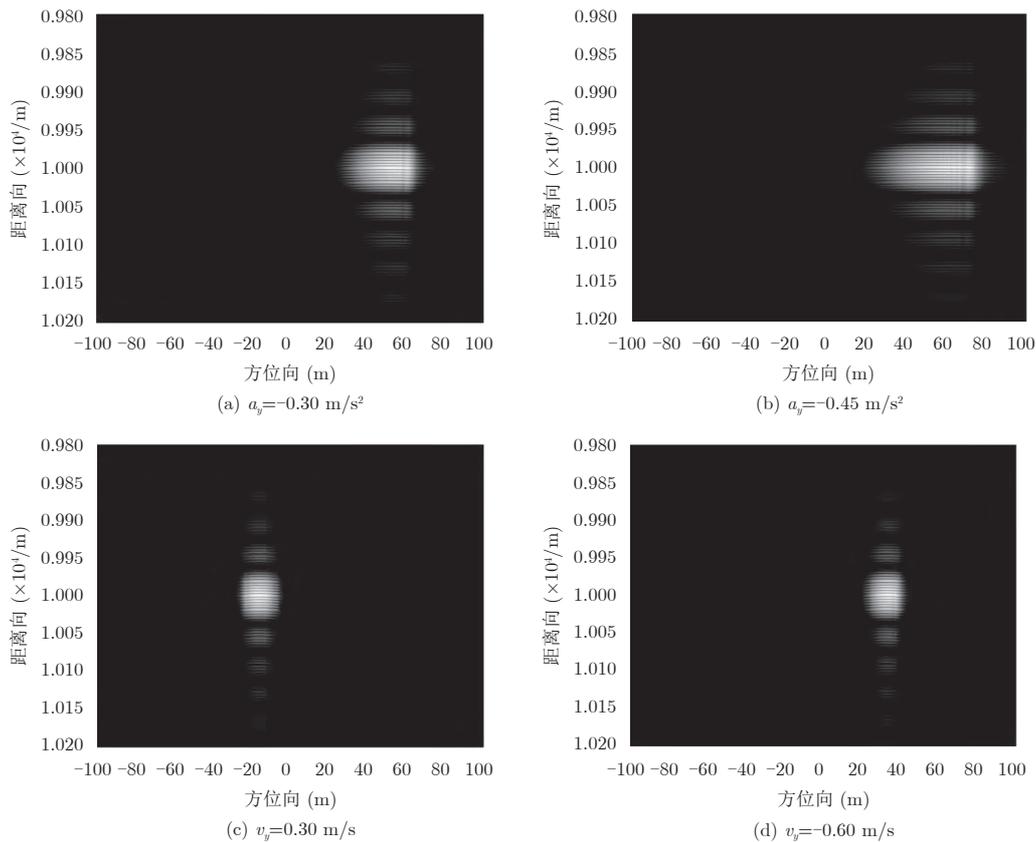


图7 不同运动调制参数下的干扰图像

Fig. 7 Jamming images with different motion modulation parameters

## 参考文献

- [1] Zhang Xue-pan, Liao Gui-sheng, Zhu Sheng-qi, *et al.*. Geometry-information-aided efficient motion parameter estimation for moving-target imaging and location[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(1): 155–159. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2329941.
- [2] Huang Long, Dong Chun-xi, Shen Zhi-bo, *et al.*. The influence of rebound jamming on SAR GMTI[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(2): 399–403. DOI: 10.1109/LGRS.2014.2345091.
- [3] Zhang Shuang-xi, Xing Meng-dao, Xia Xiang-gen, *et al.*. Robust clutter suppression and moving target imaging approach for multichannel in azimuth high-resolution and wide-swath synthetic aperture radar[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(2): 687–709. DOI: 10.1109/TGRS.2014.2327031.
- [4] 李兵, 洪文. 合成孔径雷达噪声干扰研究[J]. *电子学报*, 2005, 32(12): 2035–2037.  
Li Bing and Hong Wen. Study of noise jamming to SAR[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 32(12): 2035–2037.
- [5] 蔡幸福, 宋建社, 郑永安, 等. 二维间歇采样延迟转发SAR干扰技术及其应用[J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 37(3): 566–571.  
Cai Xing-fu, Song Jian-she, Zheng Yong-an, *et al.*. SAR jamming technology based on 2-D intermittent sampling delay repeater and its application[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(3): 566–571.
- [6] 黄龙, 董春曦, 赵国庆. 利用多干扰机对抗SAR双通道干扰对消技术的研究[J]. *电子与信息学报*, 2014, 36(4): 904–907.  
Huang Long, Dong Chun-xi, and Zhao Guo-qing. Investigation on countermeasure against SAR dual-channel cancellation technique with multi-jammers[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2014, 36(4): 904–907.
- [7] 黄龙, 董春曦, 沈志博, 等. 多天线干扰机对抗InSAR双通道干扰对消的研究[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(4): 913–918.  
Huang Long, Dong Chun-xi, Shen Zhi-bo, *et al.*. Investigation on countermeasure against InSAR dual-channel cancellation technique with multi-antenna jammer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(4): 913–918. DOI: 10.11999/JEIT140769.
- [8] 吴晓芳, 王雪松, 梁景修. SAR-GMTI高逼真匀速运动假目标调制干扰方法[J]. *宇航学报*, 2012, 33(10): 1472–1479.  
Wu Xiao-fang, Wang Xue-song, and Liang Jing-xiu. Modulation jamming method for high-vivid false uniformly-moving targets against SAR-GMTI[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(10): 1472–1479. DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2012.10.016.

- [9] 吴晓芳, 梁景修, 王雪松, 等. SAR-GMTI匀加速运动假目标有源调制干扰方法[J]. 宇航学报, 2012, 33(6): 761-768.  
Wu Xiao-fang, Liang Jing-xiu, Wang Xue-song, *et al.*. Modulation jamming method of active false uniformly-accelerating targets against SAR-GMTI[J]. *Journal of Astronautics*, 2012, 33(6): 761-768.
- [10] 王雪松, 刘建成, 张文明, 等. 间歇采样转发干扰的数学原理[J]. 中国科学E辑: 信息科学, 2006, 36(8): 891-901.  
Wang Xue-song, Liu Jian-cheng, Zhang Wen-ming, *et al.*. Mathematical principles of intermittent sampling repeater jamming[J]. *Science in China Series E: Information Sciences*, 2006, 36(8): 891-901.
- [11] 孙光才, 周峰, 邢孟道. 一种SAR-GMTI的无源压制性干扰方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(1): 39-45.  
Sun Guang-cai, Zhou Feng, and Xing Meng-dao. New passive barrage jamming method for SAR-GMTI[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(1): 39-45.
- [12] 周阳, 房明星, 毕大平, 等. 旋转角反射器阵列对SAR-GMTI的无源遮蔽干扰方法[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(2): 87-93.  
Zhou Yang, Fang Ming-xing, Bi Da-ping, *et al.*. A passive shading jamming method to SAR-GMTI using array rotating angular reflectors[J]. *Journal of Detection & Control*, 2017, 39(2): 87-93.
- [13] 吴晓芳, 王雪松, 卢焕章. 对SAR的间歇采样转发干扰研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(5): 2043-2049.  
Wu Xiao-fang, Wang Xue-song, and Lu Huan-zhang. Study of intermittent sampling repeater jamming to SAR[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(5): 2043-2049.
- [14] Sjögren T K, Vu V T, Pettersson M I, *et al.*. Suppression of clutter in multichannel SAR GMTI[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(7): 4005-4013. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2278701.
- [15] 周阳, 毕大平, 房明星, 等. 对SAR-GMTI的运动调制-步进移频复合干扰[J]. 信号处理, 2016, 32(12): 1468-1477.  
Zhou Yang, Bi Da-ping, Fang Ming-xing, *et al.*. A motion modulated and step frequency shifting compound interference to SAR-GMTI[J]. *Journal of Signal Processing*, 2016, 32(12): 1468-1477.

### 作者简介



周阳(1991-), 男, 江西南昌人, 国防科技大学电子对抗学院在读博士研究生, 主要从事SAR信号处理及SAR对抗理论研究。

E-mail: zhouyanglb@163.com



沈爱国(1975-), 男, 安徽肥东人, 博士, 国防科技大学电子对抗学院副教授, 主要从事雷达信号处理、雷达干扰与抗干扰技术研究。

E-mail: shenaiguo\_405@sina.com



毕大平(1965-), 男, 安徽桐城人, 国防科技大学电子对抗学院教授, 博士生导师, 主要从事电子对抗侦察和干扰新技术研究。

E-mail: bdpei@163.com



房明星(1988-), 男, 安徽蚌埠人, 国防科技大学电子对抗学院在读博士生, 主要从事SAR信号处理及SAR对抗理论研究。

E-mail: mingxingfang89@163.com