

对多通道SAR欺骗干扰抑制的多干扰机协同调幅对抗方法

黄大通^{1,2}, 邢世其², 徐 伟^{2,3}, 李永祯², 肖顺平²

(1. 中国电子科技集团公司第十研究所, 四川成都 610036;

2. 国防科技大学电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 湖南长沙 410073; 3. 西安电子工程研究所, 陕西西安 710100)

摘要: 针对单干扰机生成的假目标会被多通道SAR(Synthetic Aperture Radar)系统抑制的问题, 本文提出了基于多干扰机协同调幅的对抗方法. 首先对多通道SAR的欺骗干扰抑制原理作了推导和分析, 得到了单干扰机欺骗干扰失效的本质原因, 在此基础上, 建立了多干扰机的协同调制模型, 进而推导出其反抑制条件, 并且, 从理论上详细推导并分析了干扰机数目对反抑制效果的影响情况. 仿真结果表明, 本文所提的多干扰机协同对抗方法能消除干扰信号的附加相位, 使其获得与目标回波相同的雷达处理增益, 继而有效反制干扰抑制作用, 实现对多通道SAR的欺骗.

关键词: 合成孔径雷达; 欺骗干扰; 多干扰机; 协同对抗; 幅度调制; 反干扰抑制

基金项目: 国家自然科学基金(No.61971429)

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)09-2301-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211247

A Cooperative Countermeasure of Multiple Jammers Against Multi-Channel SAR Deception Jamming Suppression Based on Amplitude Modulation

HUANG Da-tong^{1,2}, XING Shi-qi², XU Wei^{2,3}, LI Yong-zhen², XIAO Shun-ping²

(1. The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu, Sichuan 610036, China;

2. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

3. Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710100, China)

Abstract: Considering the problem that the false target that is produced by single jammer will be suppressed by multichannel synthetic aperture radar (SAR) system, a countermeasure method based on amplitude cooperative modulation of multiple jammers is proposed in this paper. The principle of deception jamming suppression of multichannel SAR is analyzed in detail, making the essential reason why deception jamming of single jammer is ineffective understood. On the basis, the cooperative modulation model of multiple jammers is established and the condition against jamming suppression is deduced. And the influence of jammer number on the proposed method is analyzed theoretically. Simulation results demonstrate that the proposed countermeasure method of multiple jammers in this paper can counteract the extra phase of jamming signal. In this way, the jamming signal can obtain the same processing gain as the echo of real target, effectively offsetting the jamming suppression and making the SAR deceived.

Key words: synthetic aperture radar; deception jamming; multiple jammers; cooperative countermeasure; amplitude modulation; countermeasure against jamming suppression

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61971429)

1 引言

由于合成孔径雷达^[1](Synthetic Aperture Radar, SAR)具备全天时、全天候和高增益等众多优势,是现代“察打一体化”武器系统的核心传感器^[2]. 尤其是近年来,多通道技术的成熟与应用使其能获得更多有用信息,如利用航迹向干涉相位来实现对地面动目标检测^[3],利用跨航迹向干涉相位来做高程反演^[4]等. 而在电子对抗领域,多通道SAR的高自由度更是被用于抑制干扰^[5-14],降低了干扰性能,导致我重要军事设施和高价值目标被暴露. 因此,如何有效对抗多通道SAR的干扰抑制技术,实现破“盾”制敌的作战目的,已成为当今电子战领域亟需解决的重要问题^[15].

在多通道SAR抗干扰方法中,干扰对消技术由于能够适应多种干扰类型,且具备运算量小的优势,因而得以广泛应用. 文献[5]基于噪声干扰的窄带缓变特性,利用双通道SAR作快时间对消,抑制了噪声干扰;文献[6]提出了三通道的噪声干扰对消方法,扩展了文献[5]中对消产生的损失周期,改善了对消后的成像质量;在此基础上,文献[7]提出了一种对干扰源位置的高精度估计方法;针对散射波干扰,文献[8]指出当通道间距满足特定条件时,即可通过慢时间的双通道对消进行抑制;文献[9]则提出了基于最小能量的自动相位搜索算法,解决了文献[8]相位估计的难题;文献[10]通过沿航迹线和跨航迹线的双通道对消,提高了SAR对虚假点目标的检测和识别能力. 但是,梳理公开发表的文献资料可知,针对多通道SAR干扰对消的对抗研究却很少,按照干扰对象可将其分为两类:针对InSAR快时间噪声干扰对消的对抗方法^[16,17]和针对航迹线双通道SAR慢时间散射波干扰对消的对抗方法^[18-21]. 其中,针对InSAR的噪声干扰干涉相位近似为常数,故只需一个慢时间时刻的估计相位来进行快时间干扰对消,基于该原理,文献[16]通过干扰机不同位置的天线分时发射,模拟不同臂长和转速的干扰机旋转,以造成干涉相位的慢时间变化,致使噪声干扰无法对消;但当对每个慢时间的接收信号均作相位估计时,文献[16]所提的对抗方法将失效,针对该问题,文献[17]通过多干扰机同时发射,致使每个慢时间的估计相位不能同时对消所有干扰,继而有效反制了InSAR的快时间噪声干扰对消作用. 另一方面,针对散射波干扰,沿航迹线的双通道SAR若满足特定间距要求,则相邻脉冲的干扰信号只相差干涉相位,故雷达方可通过相位估计来对散射波干扰作慢时间对消,基于该原理,文献[18,19]对散射波干

扰分别作慢时间的间歇采样和余弦调相,改变了干扰信号相邻慢时间的相位差,致使雷达对消失效;文献[20,21]则通过多干扰机的分时和同时协同工作,破坏干扰信号在双通道SAR的原有相位关系,致使相位估计失效,在对消后仍能产生散射波干扰效果. 由此可知,现有的反反干扰研究存在以下问题:(1)噪声干扰对干扰机的功率需求较高,易被敌方锁定而遭受反辐射打击;(2)散射波干扰扩散范围广,能量分散,不易进入雷达主瓣,干扰效果较差,很少应用于工程实践;(3)反制对象单一,仅针对多通道SAR的快、慢时间干扰对消. 作为一种重要的干扰样式,欺骗干扰^[22,23]不仅对干扰机发射功率要求低,还能通过修改欺骗模板以灵活适应各类作战场景,迷惑敌SAR成像侦察,扰乱其作战决策,进而有效掩护我关键军事设施和高价值目标. 然而,多通道的应用使SAR系统具备了更高自由度,能充分利用干扰信号与目标回波间的差异来抑制欺骗干扰,极大降低了欺骗干扰的作用效能,但目前却尚未开展针对多通道SAR欺骗干扰抑制^[14]的对抗研究.

基于以上背景,本文提出了基于多干扰机协同调幅的对抗方法,通过抵消合成干扰信号的附加相位,使干扰信号能进行相参积累,继而有效反制了多通道SAR的欺骗干扰抑制作用.

2 多通道SAR欺骗干扰抑制原理

图1中,SAR平台在高度 h 的航迹线上以速度 v 沿 X 轴飞行,慢时间 $\eta=0$ 的地面投影为原点 O ,天线的瞬时位置为 $(v\eta+nd,0,h)$, $n=-\frac{N-1}{2},\dots,0,\dots,\frac{N-1}{2}$, N 为天线数目(奇数), d 为天线间距,雷达工作模式为中间天线发射信号,所有天线均接收回波. 对于场景中

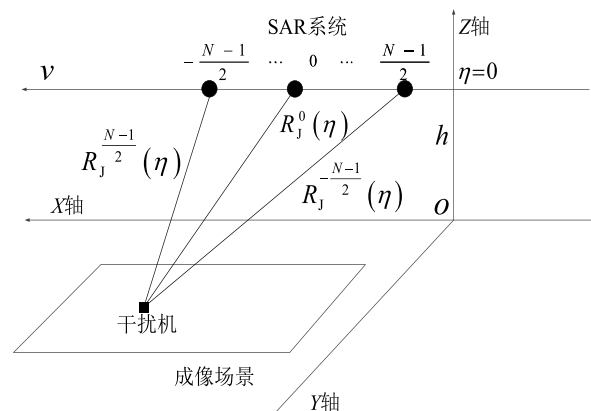


图1 干扰抑制场景

$(x_T, y_T, 0)$ 处的真目标和 $(x_J, y_J, 0)$ 处的干扰机,其到SAR第 n 个天线的瞬时斜距 $R_T^n(\eta)$ 和 $R_J^n(\eta)$ 分别近似为:

$$R_T^n(\eta) \approx R_0 + \frac{(nd)^2 - 2ndx_T}{2R_0} + \frac{(nd - x_T)v}{R_0}\eta + \frac{v^2}{2R_0}\eta^2 \quad (1)$$

$$R_J^n(\eta) \approx R_0 + \frac{(nd)^2 - 2ndx_J}{2R_0} + \frac{(nd - x_J)v}{R_0}\eta + \frac{v^2}{2R_0}\eta^2 \quad (2)$$

其中 R_0 为场景中心到SAR平台的初始斜距.

雷达发射信号为线性调频信号:

$$s_t(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_p}\right) \exp(j\pi k_r t^2) \exp(j2\pi f_c t) \quad (3)$$

其中, t 表示快时间, T_p 为信号时宽, k_r 表示调频斜率, f_c

为信号载频, $\text{rect}(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq 1/2 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$.

忽略通道间的快时间延迟差异^[24],SAR系统第 n 个天线接收的目标回波 $s_T^n(t, \eta)$ 为:

$$s_T^n(t, \eta) \approx s_T^0(t, \eta) \exp\left\{-j\frac{\pi(nd)^2}{\lambda R_0}\right\} \times \exp\left\{j\frac{2\pi ndx_T}{\lambda R_0}\right\} \exp\left\{-j\frac{2\pi ndv}{\lambda R_0}\eta\right\} \quad (4)$$

其中, $s_T^0(t, \eta)$ 表示中间通道的目标回波,如式(5)所示, λ 是波长.

$$s_T^0(t, \eta) = \text{rect}\left[\frac{t - 2\tau_0(\eta)}{T_p}\right] \text{rect}\left[\frac{\eta - x_T/v}{T_s}\right] \times \exp\left\{j\pi k_r [t - 2\tau_0(\eta)]^2\right\} \exp\left\{-j\frac{4\pi}{\lambda} R_T^0(\eta)\right\} \quad (5)$$

其中, T_s 是合成孔径时间, $\tau_0(\eta) = \frac{R_T^0(\eta)}{c}$ 为目标与中间通道单程路径的时延, c 为光速.

为实现对SAR系统的欺骗^[22,23],干扰机需将截获的雷达信号作快时间时延调制和慢时间多普勒相位补偿后再进行转发,则SAR系统第 n 个天线接收的干扰信号 $J^n(t, \eta)$ 为:

$$J^n(t, \eta) = s_J^n(t, \eta) \otimes H(t, \eta) = s_T^n(t, \eta) \exp\left\{-j\frac{2\pi nd(x_i - x_j)}{\lambda R_0}\right\} \quad (6)$$

$$\mathbf{W}_J = \left[l_{-\frac{N-1}{2}} \times \exp\left\{-j\frac{2\pi\left(-\frac{N-1}{2}\right)d(x_i - x_j)}{\lambda R_0}\right\}, \dots, 1, \dots, l_{\frac{N-1}{2}} \times \exp\left\{-j\frac{2\pi\left(\frac{N-1}{2}\right)d(x_i - x_j)}{\lambda R_0}\right\} \right]^T \quad (12)$$

其中, $l_n = \exp\left\{-j\frac{\pi(nd)^2}{2\lambda R_0}\right\} \exp\left\{j\frac{\pi nd}{v} f\right\}$, $n =$

$$-\frac{N-1}{2}, \dots, 0, \dots, \frac{N-1}{2}.$$

$$s_J^n(t, \eta) = \text{rect}\left[\frac{t - \tau_J^0(\eta) - \tau_J^n(\eta)}{T_p}\right] \text{rect}\left[\frac{t_a - x_J/v}{T_s}\right] \times \exp\left\{j\pi k_r [t - \tau_J^0(\eta) - \tau_J^n(\eta)]^2\right\} \times \exp\left\{-j\frac{2\pi}{\lambda} [R_J^0(\eta) + R_J^n(\eta)]\right\} \quad (7)$$

$$H(t, \eta) = \delta[t - \Delta\tau(\eta)] \exp\left\{-j2\pi f_c \Delta\tau(\eta)\right\} \quad (8)$$

其中, $s_J^n(t, \eta)$ 为干扰机处的目标回波,如式(7)所示,

$\tau_J^n(\eta) = \frac{R_J^n(\eta)}{c}$ 为干扰机与第 n 个天线单程传播路径的时延; $H(t, \eta)$ 为干扰机的频域响应函数,如式(8)所示,

$\Delta\tau(\eta) = \frac{2[R_T^0(\eta) - R_J^0(\eta)]}{c}$ 为时延补偿; \otimes 表示快时间上的卷积运算.

因此SAR系统第 n 个天线的实际接收信号 $r^n(t, \eta)$ 为:

$$r^n(t, \eta) = s_T^n(t, \eta) + J^n(t, \eta) \quad (9)$$

对比式(4)和式(6)可以发现,尽管干扰机通过卷积调制来对目标回波进行模拟,但对于多通道SAR系统,干扰信号与目标回波在传播路径上存在着本质差异^[24],继而会产生额外的附加相位.故,多通道SAR系统可充分利用该差异来抑制欺骗干扰.

将所有通道的接收信号变换到慢时间频域后,写成向量形式,即有:

$$\mathbf{R}(t, f) = \mathbf{W}_T S_T^0(t, f) + \mathbf{W}_J S_T^0(t, f) \quad (10)$$

其中, $\mathbf{R}(t, f) = \left[r^{-\frac{N-1}{2}}(t, f), \dots, r^0(t, f), \dots, r^{\frac{N-1}{2}}(t, f) \right]^T$

为SAR所有通道的接收信号向量, \mathbf{W}_T 为目标回波的导向向量,如式(11)所示; \mathbf{W}_J 为干扰信号的导向向量,如式(12)所示.

$$\mathbf{W}_T = \left[l_{-\frac{N-1}{2}}, \dots, 1, \dots, l_{\frac{N-1}{2}} \right]^T \quad (11)$$

基于此,对雷达接收信号乘以目标导向矢量,即可得到多通道SAR干扰抑制后的输出结果:

$$\begin{aligned}
W_T^H R(t, f) &= W_T^H W_T S_T^0(f) + W_T^H W_J S_T^0(f) \\
&= NS_T^0(f) + \left[1 + \exp \left\{ -j \frac{2\pi \left(-\frac{N-1}{2} \right) d(x_i - x_j)}{\lambda R_0} \right\} \right. \\
&\quad \left. + \dots + \exp \left\{ -j \frac{2\pi \left(\frac{N-1}{2} \right) d(x_i - x_j)}{\lambda R_0} \right\} \right] S_T^0(f)
\end{aligned} \quad (13)$$

可以看出,在式(13)的第一项中,目标回波由于在不同通道间存在固定相位差,经抑制后能进行相参积累,故SAR系统的通道数量越多,其能量积累就越大,干扰抑制效果将越好.然而,在式(13)的第二项中,干扰信号却因附加相位 $\exp \left\{ -j \frac{2\pi d(x_i - x_j)}{\lambda R_0} \right\}$ 而只能作非相参积累,故其会被相对抑制.特别地,进一步观察式(13)还能发现,多通道SAR的欺骗干扰抑制方法存在不足之处^[14,25]:当假目标与干扰机处在相同方位向位置时,干扰信号的附加相位将消失,因此其也能进行相参积累,故将导致SAR系统的欺骗干扰抑制作用失效.

3 多干扰机协同的反抑制方法

3.1 反抑制原理

根据第2节可知,由于实际传播路径的差异,干扰信号会存在附加相位,继而被多通道SAR系统利用而对其进行抑制.针对单干扰机存在的该问题,本文提出了多干扰机协同的对抗方法,其基本原理为:多干扰机间通过幅度协同调制来抵消掉合成干扰信号的附加相位,使其同样能进行相参积累,以获得与目标回波相同的处理增益,继而实现对多通道SAR干扰抑制的反制.为简化分析,本小节仅对干扰信号进行建模分析.

在图1的场景中干扰方共部署了 M 部干扰机,其坐标位置为 $(x_m, y_m, 0)$, $m=1, 2, \dots, M$,干扰机与其产生的假目标方位向位置不同,即有 $x_T \neq x_m$.在式(6)的基础上,干扰机除了对截获信号作卷积调制,以在指定位置上产生假目标外,还需对其作额外的幅度调制处理,则SAR系统第 n 个天线接收到第 m 部干扰机的欺骗干扰信号为:

$$J_m^n(t, \eta) = Q_m s_{T,m}^n(t, \eta) \exp \left\{ -j \frac{2\pi n d(x_i - x_{j_m})}{\lambda R_0} \right\} \quad (14)$$

其中, Q_m 和 $s_{T,m}^n(t, \eta)$ 分别为第 m 部干扰机的幅度调制系数和其模拟的假目标回波.

鉴于所有干扰机均在指定位置处产生假目标,即有 $s_{T,m}^n(t, \eta) = s_T^n(t, \eta)$, $m=1, 2, \dots, M$,故SAR系统第 n 个通道接收到的干扰信号合成结果为:

$$J^n(t, \eta) = \sum_{m=1}^M J_m^n(t, \eta) = s_T^n(t, \eta) H_n \quad (15)$$

其中, H_n 表示经幅度调制后所有干扰信号的附加相位合成^[26],如式(16)所示.

$$H_n = \sum_{m=1}^M Q_m \exp \left\{ -j \frac{2\pi n d(x_i - x_{j_m})}{\lambda R_0} \right\} \quad (16)$$

对比式(4)可知,当干扰机间满足式(17)所示的协同条件时,则能抵消掉合成干扰信号的附加相位,使其具备与目标回波相同的信号模型,即 $J^n(t, \eta) = s_T^n(t, \eta)$.故,此时合成干扰信号同样能进行相参积累,以获得雷达处理增益,继而有效反制多通道SAR的干扰抑制作用.

$$H_n = 1 \quad (17)$$

3.2 性能分析

基于上一小节的反抑制原理,经多通道SAR抑制处理后,干扰方依然能有效实现对SAR的欺骗.在本小节中,将分析干扰机数量对其反抑制效果的影响情况.

考虑SAR系统的所有通道,将式(17)重写为矩阵形式,即有:

$$Ax = b \quad (18)$$

其中, A 表示与干扰机位置相关的系数矩阵,如式(19)所示; $x=(Q_1, Q_2, \dots, Q_M)^T$ 表示各干扰机的幅度调制系数向量; b 表示与假目标位置相关的向量,如式(20)所示;中间变量 $P = \frac{2\pi d}{\lambda R_0}$.

$$A = \begin{bmatrix} \exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{j_1} \right\} & \dots & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{j_M} \right\} \\ \exp \left\{ j \left(-\frac{N-3}{2} \right) P x_{j_1} \right\} & \dots & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-3}{2} \right) P x_{j_M} \right\} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \exp \left\{ j \left(\frac{N-3}{2} \right) P x_{j_1} \right\} & \dots & \exp \left\{ j \left(\frac{N-3}{2} \right) P x_{j_M} \right\} \\ \exp \left\{ j \left(\frac{N-1}{2} \right) P x_{j_1} \right\} & \dots & \exp \left\{ j \left(\frac{N-1}{2} \right) P x_{j_M} \right\} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\mathbf{b} = \left[\exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_T \right\}, \exp \left\{ j \left(-\frac{N-3}{2} \right) P x_T \right\}, \dots, 1, \dots, \exp \left\{ j \left(\frac{N-3}{2} \right) P x_T \right\}, \exp \left\{ j \left(\frac{N-1}{2} \right) P x_T \right\} \right]^T \quad (20)$$

由此,多干扰机的协同调幅将转换成方程求解的问题,故存在以下两种情况。

(1) 当 SAR 通道数量大于干扰机数量时,即 $N > M$,

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}(1: M, 1: M) = \begin{bmatrix} \exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_1} \right\} & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_2} \right\} & \dots & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_M} \right\} \\ \exp \left\{ j \left(-\frac{N-3}{2} \right) P x_{J_1} \right\} & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-3}{2} \right) P x_{J_2} \right\} & \dots & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-3}{2} \right) P x_{J_M} \right\} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \exp \left\{ j \left(-\frac{N-2M+1}{2} \right) P x_{J_1} \right\} & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-2M+1}{2} \right) P x_{J_2} \right\} & \dots & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-2M+1}{2} \right) P x_{J_M} \right\} \end{bmatrix} \quad (21)$$

计算矩阵 \mathbf{B} 的行列式^[26]:

$$|\mathbf{B}| = \prod_{m=1}^M \exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_m} \right\} \prod_{1 \leq j < i \leq M} \left[\exp \{ j P x_{J_i} \} - \exp \{ j P x_{J_j} \} \right] \quad (22)$$

由于复指数 $\exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_m} \right\} \neq 0$, 当 $0 < |x_{j_i} - x_{j_j}| < L_{SAR}$ 时, L_{SAR} 为合成孔径长度, 矩阵 \mathbf{B} 为满秩矩阵, 即有 $\text{rank}(\mathbf{B}) = M$, 故根据矩阵理论可知,

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}(1: N, 1: N) = \begin{bmatrix} \exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_1} \right\} & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_2} \right\} & \dots & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_N} \right\} \\ \exp \left\{ j \left(-\frac{N-3}{2} \right) P x_{J_1} \right\} & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-3}{2} \right) P x_{J_2} \right\} & \dots & \exp \left\{ j \left(-\frac{N-3}{2} \right) P x_{J_N} \right\} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \exp \left\{ j \left(\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_1} \right\} & \exp \left\{ j \left(\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_2} \right\} & \dots & \exp \left\{ j \left(\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_N} \right\} \end{bmatrix} \quad (23)$$

其行列式结果为:

$$|\mathbf{B}| = \prod_{m=1}^N \exp \left\{ j \left(-\frac{N-1}{2} \right) P x_{J_m} \right\} \prod_{1 \leq j < i \leq N} \left[\exp \{ j P x_{J_i} \} - \exp \{ j P x_{J_j} \} \right] \quad (24)$$

同样,根据矩阵理论可知, $\text{rank}(\mathbf{A}) = \text{rank}(\bar{\mathbf{A}}) = N$, 故原始方程式(18)有解: 当 $N = M$ 时, 即干扰机数目和通道数目相等, 该方程存在唯一解; 当 $N < M$ 时, 即干扰机数目大于通道数目, 则该方程存在多个解。

4 干扰调制流程

综上所述, 本文所提的干扰方法通过多部干扰机协同调幅来消除合成干扰信号的附加相位, 以反制多通道 SAR 的欺骗干扰抑制, 使假目标经抑制后仍能出

构造矩阵 $\bar{\mathbf{A}} = [\mathbf{A}, \mathbf{b}]$, 取矩阵 \mathbf{A} 的前 M 行和前 M 列来构造矩阵 \mathbf{B} , 如式(21)所示。

$\text{rank}(\mathbf{A}) = M$

另一方面, 取矩阵 $\bar{\mathbf{A}}$ 的前 $M+1$ 行和前 $M+1$ 列来构造矩阵 $\bar{\mathbf{B}} = \bar{\mathbf{A}}(1: M+1, 1: M+1)$ 。同理可知, $\text{rank}(\bar{\mathbf{A}}) = M+1$, 故有 $\text{rank}(\bar{\mathbf{A}}) \neq \text{rank}(\mathbf{A})$, 即原始方程式(18)无解。因此, 只能采用基于最小二乘^[26]的最优解法: 方阵 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 为可逆方阵, 故方程 $(\mathbf{A}^T \mathbf{A}) \mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ 存在唯一解, 即 $\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}$ 。

(2) 当 SAR 通道数量不大于干扰机数量时, 即 $N \leq M$, 取矩阵 \mathbf{A} 的前 N 行和前 N 列来构造矩阵 \mathbf{B} , 如式(23)所示。

现在指定位置, 其主要调制流程如图 2 所示, 可分为以下三个步骤。

步骤 1: 通过电子侦察设备, 确定雷达信号来波方向, 对其进行截获并储存, 同时估计敌方 SAR 相关参数, 如平台运动信息、信号参数等, 为干扰调制做准备。

步骤 2: 在此基础上, 根据式(6)的欺骗原理, 各部分干扰机分别生成式(8)的频域调制函数, 以在指定位置生成虚假目标; 接着, 由式(18)计算出各部分干扰机的幅度调制系数, 以满足式(17)的协同条件, 消除合成干扰信号的附加相位。

步骤 3: 将步骤一储存的截获信号与步骤二生成的频域响应函数作卷积, 经 D/A 转换成模拟信号, 并通过上变频到射频和功率放大, 形成干扰信号。

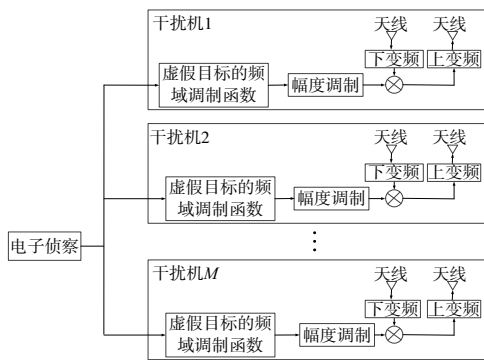


图2 干扰调制流程

5 仿真验证

5.1 有效性验证

5.1.1 对虚假点目标的反抑制效果验证

设定SAR平台的飞行高度为5 km,飞行速度为200 m/s,信号载频为10 GHz,信号时宽和带宽分别为10 μ s和200 MHz,系统配置了5个天线,天线间距为1 m,波束宽度为0.03 rad,下视角为45°,脉冲重复频率为496 Hz. 为对比验证本文所提的反抑制方法,在图3(a)场景中P1~P5的位置上设置五个真实目标,其位置分别为(-45 m, 5 000 m)、(-60 m, 5 050 m)、(20 m, 4 970 m)、(50 m, 5 030 m)和(50 m, 4 900 m). 经抑制处理后,真目标回波由于能获得相参处理增益,故依然出现在了原始位置,如图3(b)所示.

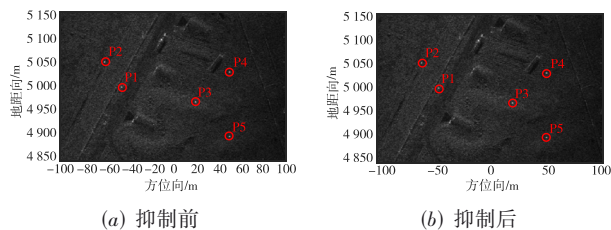


图3 真实目标的五通道SAR抑制结果

将干扰机部署于场景中心,使其在与图3(a)的相同位置上产生五个假目标,进而便于与同一位置的真目标进行对比,如图4(a)所示. 由第2节的推导分析可知,当假目标位于与干扰机不同方位向位置时,经多通道SAR抑制处理,干扰信号只能作非相参积累,故场景中只有假目标P3得以显示,其余假目标均被抑制,如图4(b)所示. 保持其他条件不变,将SAR通道数量增加为9个,其抑制结果如图5所示,可以发现,相比五通道SAR,通道数量的增加提高了目标回波的相参积累能量,进而增强了雷达的干扰抑制效果,故图5(a)中的所有假目标均被九通道SAR抑制,如图5(b)所示,仿真结果与理论分析相一致.

由此可知,针对多通道SAR系统,单干扰机生成的

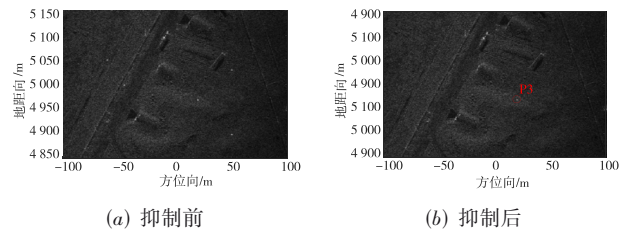


图4 对单干扰机的五通道SAR抑制结果

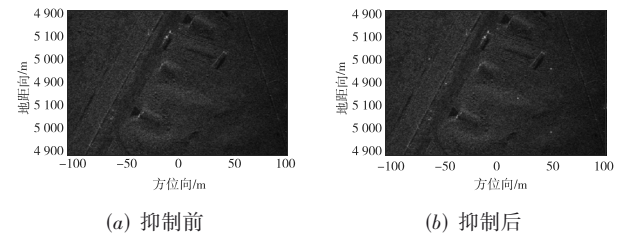


图5 对单干扰机的九通道SAR抑制结果

假目标会因抑制而消失于场景中,降低了欺骗干扰作用效果,使敌方操作人员能轻易将其鉴别. 针对该问题,依据本文所提的干扰方法,以五通道SAR作为干扰对象,在场景中共部署五部干扰机,其位置分别为(0 m, 5 000 m)、(23 m, 5 000 m)、(46 m, 5 000 m)、(-23 m, 5 000 m)和(-46 m, 5 000 m),所有干扰机均在P1~P5的指定位置上生成五个假目标. 从第3.2小节可知,干扰机数目和通道数目相等时,式(18)的方程具有唯一解,由此计算得表1所示的各部干扰机幅度调制系数,其中假目标P4和P5因为处在了相同方位向位置,故其幅度调制系数相同. 图6所示为反抑制的成像结果,对比图4可以发现,由于五部干扰机的协同调制消除了干扰信号的附加相位,使其能获得雷达处理增益,故所有假目标即使经抑制处理后依然能成功显示于场景中,达到了反制五通道SAR欺骗干扰抑制的目的,仿真结果与理论分析相一致.

表1 5部干扰机的调制幅度

干扰机	P1	P2	P3	P4	P5
Q1	-0.088 3	2.282 8	0.185 8	0.454 4	0.454 4
Q2	0.047 7	-1.388 2	0.901 4	-0.581 3	-0.581 3
Q3	-0.014 1	0.446 6	-0.036 4	1.305 2	1.305 2
Q4	0.125 9	-2.510 9	-0.067 3	-0.256 5	-0.256 5
Q5	0.928 9	2.169 6	0.016 5	0.078 1	0.078 1

为进一步验证协同干扰的有效性,以相同位置的真目标作为参考,图7给出了抑制后单干扰机和多干扰机协同生成的假目标方位向截面对比图. 可以发现,单干扰机生成的假目标P1、P2、P4、P5和其相同位置的真目标峰值差距较大,分别为15.36 dB、8.67 dB、7.90 dB

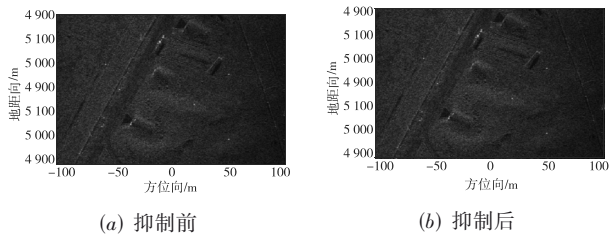


图6 五干扰机对五通道SAR的协同反抑制结果

和 8.74 dB,故会被成功抑制;假目标P3的差距很小,仅为 2.31 dB,故不能被彻底抑制,与图4结果相一致.然而,五部干扰机协同产生的五个假目标与其对应的真目标峰值基本相同,故SAR系统的干扰抑制作用失效,与图6结果相一致.

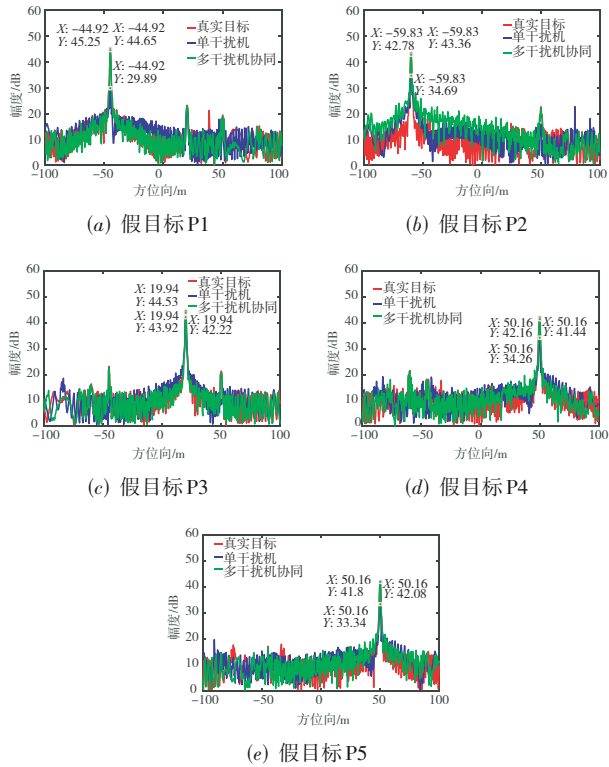


图7 五通道SAR抑制后截面对比图

在此基础上,针对九通道SAR,场景中部署九部干扰机,其坐标位置分别为(0 m, 5 000 m)、(23 m, 5 000 m)、(46 m, 5 000 m)、(69 m, 5 000 m)、(92 m, 5 000 m)、(-23 m, 5 000 m)、(-46 m, 5 000 m)、(-69 m, 5 000 m)和(-92 m, 5 000 m),表2为其幅度调制系数,与对五通道SAR的反抑制效果相同,即使经抑制处理后,所有假目标仍能得以成功显示,如图8所示.图9则是在相同位置上的真假目标方位向截面对比图,相比于图7,通道数目的增加提高了真目标的积累能量,

表2 9部干扰机的调制幅度

干扰机	P1	P2	P3	P4	P5
Q1	-0.025 2	0.145 7	0.149 5	0.089 3	0.089 3
Q2	0.018 2	-0.118 4	0.969 4	-0.152 7	-0.152 7
Q3	-0.015 1	0.106 9	-0.109 8	0.962 3	0.962 3
Q4	0.013 6	-0.104 0	0.057 0	0.188 1	0.188 1
Q5	-0.012 4	0.104 1	-0.035 7	-0.074 0	-0.074 0
Q6	0.048 0	-0.214 2	-0.072 4	-0.067 4	-0.067 4
Q7	0.994 3	0.519 5	0.049 8	0.057 6	0.057 6
Q8	-0.038 8	0.737 8	-0.039 1	-0.053 2	-0.053 2
Q9	0.017 4	-0.177 4	0.031 3	0.050 0	0.050 0

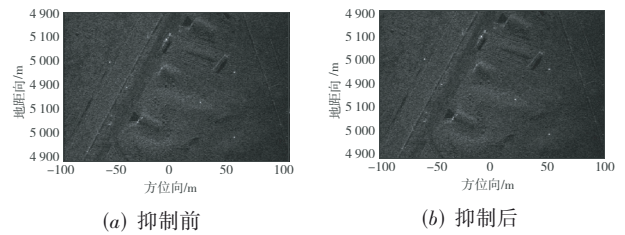


图8 九干扰机对九通道SAR的反抑制结果

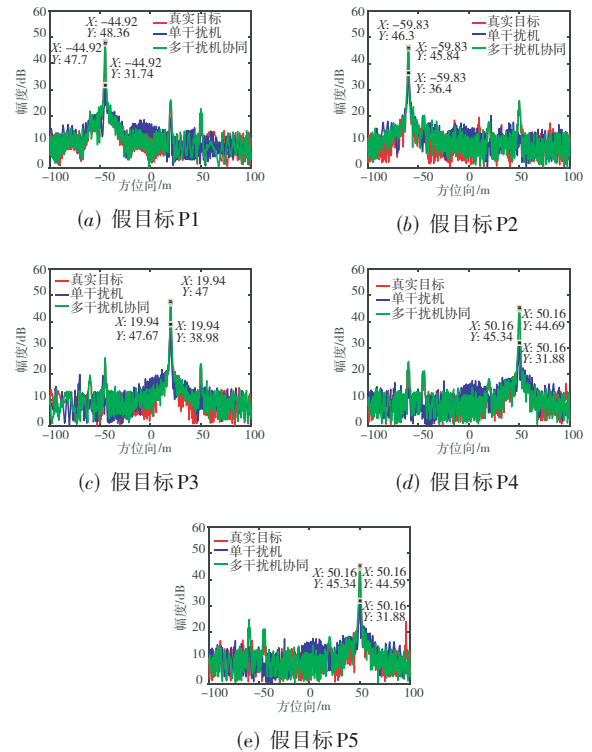


图9 九通道SAR抑制后截面对比图

导致单干扰机生成的五个假目标与其相同位置的真目标峰值差距分别增大为 15.96 dB、9.44 dB、8.02 dB、12.81 dB和 12.71 dB,故所有假目标均会被抑制,与图5的结果相一致.然而,与图7相同,九部干扰机协同

产生的五个假目标与其对应的真目标峰值基本相同,故 SAR 系统的干扰抑制作用失效,与图 8 结果相一致.

5.1.2 对虚假面目标的反抑制效果验证

考虑到虚假面目标的欺骗情景,针对五通道 SAR,保持和 5.1.1 小节相同的场景和雷达参数,干扰机部署于场景中心,欺骗模板的方位向和地距向尺寸^[27]分别为 311 像素和 221 像素,经欺骗干扰调制^[22,23]后,干扰机在场景中(40 m, 5 000 m)处产生一架虚假飞机,如图 10(a)所示,但经 SAR 抑制处理后,虚假飞机消失于场景中,如图 10(b)所示,故对比抑制前后的成像结果,敌方能轻易辨识出飞机场中的真假目标.为反制五通道 SAR 的欺骗干扰抑制作用,在场景中(0 m, 5 000 m)、(23 m, 5 000 m)、(46 m, 5 000 m)、(-23 m, 5 000 m)和(-46 m, 5 000 m)的位置上共部署五部干扰机,根据本文所提的协同对抗方法,与 5.1.1 小节相同,五部干扰机分别计算出欺骗模板方位向所有 311 个像素点所需的幅度调制系数,继而抵消掉合成干扰信号的附加相位,图 11 所示为其反抑制效果,可以看出,即使经抑制处理后,虚假飞机仍能清晰地出现在场景中的设定位置,如图 11(b)所示,与图 11(a)抑制前的成像结果相同.仿真结果与理论分析相一致,验证了本文所提干扰方法的有效性.

5.2 性能验证

5.2.1 干扰机数目大于通道数目

在本小节中,将验证干扰机数目对反抑制效果的影响情况.首先,以五通道 SAR 作为干扰对象,考虑场景中部署九部干扰机.由 3.2 小节可知,此时式(18)的方程存在多个解,即各部干扰机的幅度调制系数存在多种情况,表 3 所示为其中一种情况.图 12 则是对应的反抑制效果,可以看出,五个假目标均能得以有效合成,如图 12(a)所示;即使经九通道 SAR 抑制处理后,所有假目标均能被有效保留,如图 12(b)所示.

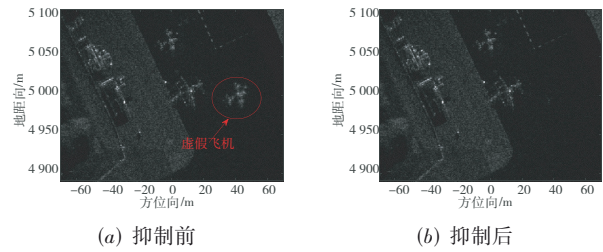


图 10 对单干扰机的五通道 SAR 抑制结果

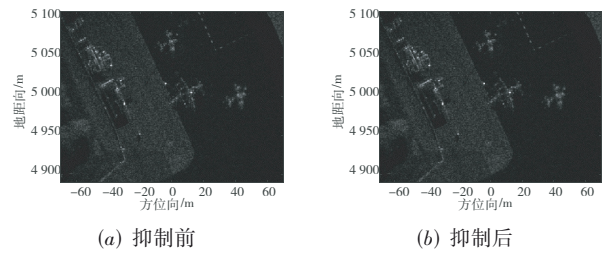


图 11 五干扰机对五通道 SAR 的协同反抑制结果

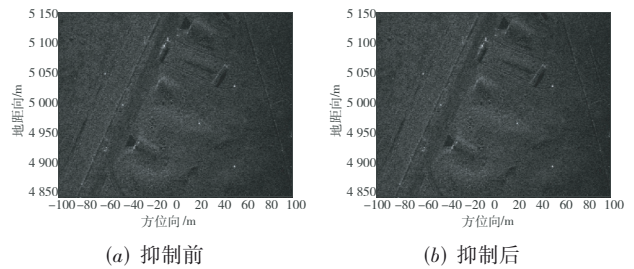


图 12 九干扰机对五通道 SAR 的协同反抑制结果

同样以相同位置的真目标作为参考,图 13 是抑制后的五个假目标方位向截面对比图.可以看出,由于式(18)的原始方程有解,满足式(17)的协同条件,即九部干扰机的协同调制能抵消掉合成干扰信号的附加相位,使其获得与目标回波相同增益,故所有真假目标的峰值基本相等,有效实现了对五通道 SAR 的反抑制效果,仿真结果与理论分析相一致.

表 3 9 部干扰机的调制幅度

干扰机	P1	P2	P3	P4	P5
Q1	-0.127 7+0.161 1j	-0.342 0+0.161 1j	0.565 7+0.161 1j	-0.227 0+0.161 1j	-0.227 0+0.161 1j
Q2	0.154 1-0.263 6j	0.154 1-0.263 6j	0.154 1-0.263 6j	0.154 1-0.263 6j	0.154 1-0.263 6j
Q3	-0.172 1+0.233 4j	0.007 2+0.233 4j	0.454 0+0.233 4j	0.818 2+0.233 4j	0.818 2+0.233 4j
Q4	0.154 7-0.097 4j	0.154 7-0.097 4j	0.154 7-0.097 4j	0.154 7-0.097 4j	0.154 7-0.097 4j
Q5	-0.097 2-0.021 0j	-0.451 5-0.021 0j	-0.530 9-0.021 0j	0.030 3-0.021 0j	0.030 3-0.021 0j
Q6	0.124 7-0.022 7j	0.124 7-0.022 7j	0.124 7-0.022 7j	0.124 7-0.022 7j	0.124 7-0.022 7j
Q7	0.939 5-0.034 6j	0.733 1-0.034 6j	-0.340 9-0.034 6j	-0.006 0-0.034 6j	-0.006 0-0.034 6j
Q8	-0.018 0-0.005 6j	-0.018 0-0.005 6j	-0.018 0-0.005 6j	-0.018 0-0.005 6j	-0.018 0-0.005 6j
Q9	0.042 1+0.050 3j	0.637 7+0.050 3j	0.436 6+0.050 3j	-0.025 5+0.050 3j	-0.025 5+0.050 3j

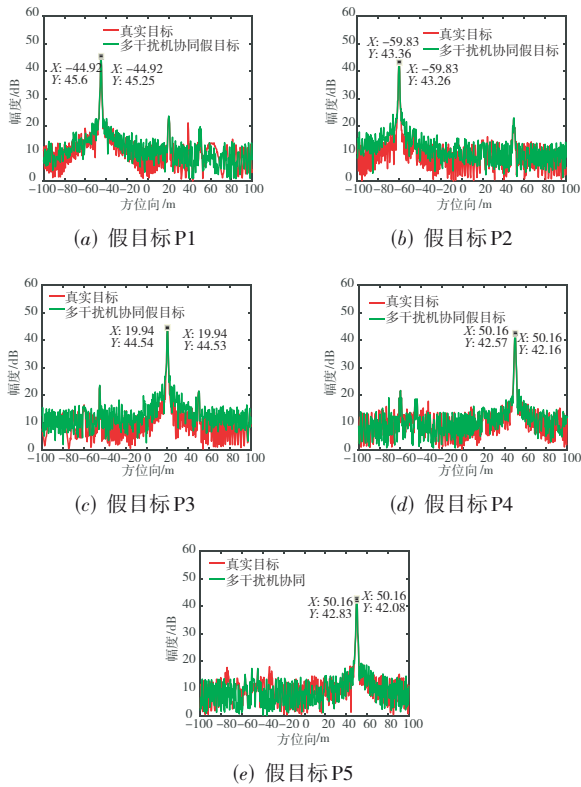


图 13 五通道SAR抑制后截面对比图

5.2.2 干扰机数目小于通道数目

针对九通道SAR系统,考虑场景中只部署了四部干扰机,根据3.2小节可知,式(18)的原始方程无解,即不存在协同调制幅度,使其能消除合成干扰信号的附加相位,而只能采用3.2小节所述的最小二乘方法来得到干扰机的调制幅度,如表4所示.图14所示为其反抑制效果,可以看出,鉴于干扰机的调制幅度并非原始方程的解,即不满足式(17)的协同条件,因此在图14(a)中,只有假目标P1和P2得以显示,但经抑制处理后,所有假目标均被抑制而消失于场景中,如图14(b)所示.

表 4 四部干扰机的调制幅度

干扰机	P1	P2	P3	P4	P5
Q1	-0.823 5	-0.260 5	0.108 3	0.040 7	0.040 7
Q2	0.781 8	0.263 5	1.009 5	-0.105 1	-0.105 1
Q3	0.918 2	0.234 8	-0.028 2	-0.015 6	-0.015 6
Q4	-27.322 7	-14.582 9	-1.547 5	-0.885 2	-0.885 2

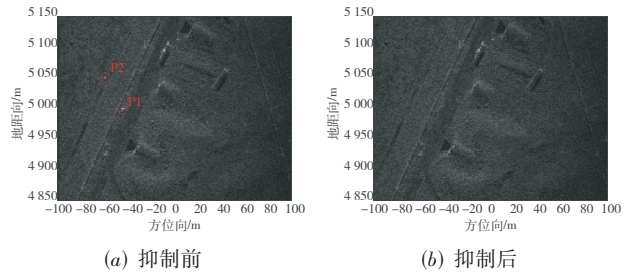


图 14 四干扰机对九通道SAR的协同反抑制结果

图15~19给出了五个假目标在干扰抑制前后与其相同位置的真目标方位向截面对比图.从图15~19的各个子图(a)的抑制前结果可以看出,假目标P1~P5与其相同位置的真目标峰值差距分别为2.25 dB、4.95 dB、17.13 dB、10.54 dB和11.74 dB,其中由于假目标P1的差距较小而得以显示,假目标P2次之,而假目标P3、P4和P5由于差距较大而不被显示,如图14(a).而在图15~19的子图(b)中,五个假目标的抑制后峰值与其对应的真目标峰值差距均较大,分别为12.00 dB、14.07 dB、10.95 dB、11.70 dB和12.55 dB,故所有假目标均被抑制,如图14(b),仿真结果与理论分析相一致.

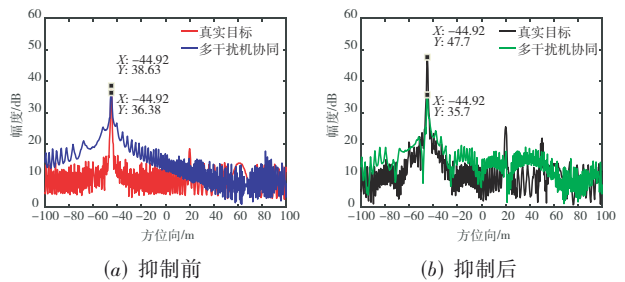


图 15 九通道SAR抑制前后的假目标P1截面对比图

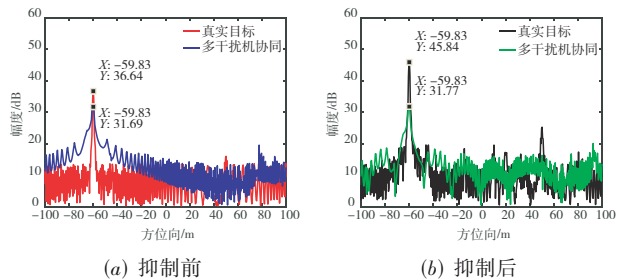


图 16 九通道SAR抑制前后的假目标P2截面对比图

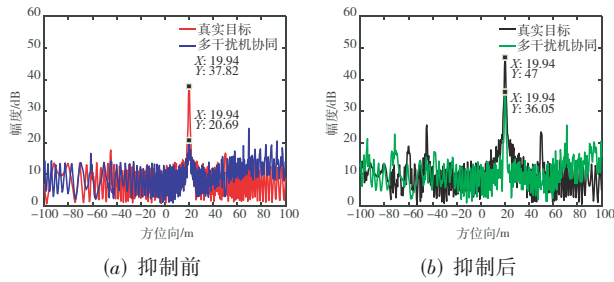


图 17 九通道 SAR 抑制前后的假目标 P3 截面对比图

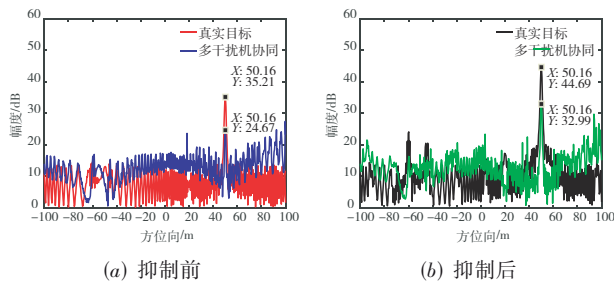


图 18 九通道 SAR 抑制前后的假目标 P4 截面对比图

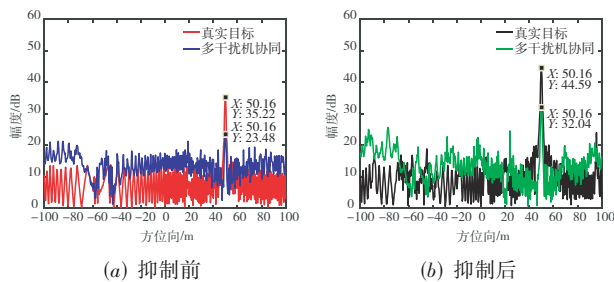


图 19 九通道 SAR 抑制前后的假目标 P5 截面对比图

6 结论

针对多通道 SAR 系统能抑制欺骗干扰,降低其作用效能的问题,本文提出了多干扰机协同的对抗方法,文中首先详细推导分析了对单干扰机的多通道 SAR 欺骗干扰抑制原理,在此基础上,通过多干扰机协同调幅的方法,抵消合成干扰信号的附加相位,使其能获得与目标回波相同的雷达处理增益,继而实现对多通道 SAR 的反抑制效果,接着文中从理论上充分论证了干扰机数量对反抑制效果的影响情况.实验结果表明,当干扰机数目不小于 SAR 系统的通道数目时,本文所提的干扰方法能对多通道 SAR 进行有效地反抑制,使虚假目标经抑制后依然能显示在场景的原始位置,继而迷惑敌方 SAR 成像侦察.

参考文献

- [1] CUMMING I G, WONG F H C. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston: Artech House, 2005.
- [2] SUN H B, SHIMADA M, XU F. Recent advances in synthetic aperture radar remote sensing—Systems, data processing, and applications[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(11): 2013-2016.
- [3] ENDER J H G, BERENS P, BRENNER A R, et al. Multi-channel SAR/MTI system development at FGAN: From AER to PAMIR[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE, 2022: 1697-1701.
- [4] ROSEN P A, HENSLEY S, JOUGHIN I R, et al. Synthetic aperture radar interferometry[J]. Proceedings of the IEEE, 2000, 88(3): 333-382.
- [5] 马永华. 合成孔径雷达对抗技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
- [6] 马晓岩, 秦江敏, 贺照辉, 等. 抑制 SAR 压制性干扰的三通道对消方法[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1015-1020.
MA X Y, QIN J M, HE Z H, et al. Three-channel cancellation of SAR blanketing jamming suppression[J]. Acta Electronica Sinica, 2007, 35(6): 1015-1020. (in Chinese)
- [7] 林晓烘. 星载合成孔径雷达干扰与抗干扰技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
LIN X H. Study on Jamming and Anti-Jamming Techniques for Spaceborne Synthetic Aperture Radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014. (in Chinese)
- [8] 甘荣兵, 王建国, 何川. 双路对消抑制对合成孔径雷达的弹射式干扰[J]. 信号处理, 2005, 21(1): 27-30.
GAN R B, WANG J G, HE C. Rebound jamming suppression by two-channel SAR[J]. Signal Processing, 2005, 21(1): 27-30. (in Chinese)
- [9] 甘荣兵, 王建国, 何川. 双天线对消弹射式干扰中的相位估计[J]. 电子学报, 2005, 33(9): 1691-1693.
GAN R B, WANG J G, HE C. Phase estimation in rebound jamming suppression by two-channel SAR[J]. Acta Electronica Sinica, 2005, 33(9): 1691-1693. (in Chinese)
- [10] 李晨, 朱岱寅. 利用双天线干涉检测针对 SAR 的欺骗干扰[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(6): 1412-1415.
LI C, ZHU D Y. The detection of deception jamming against SAR based on dual-aperture antenna interferometry[J]. Journal of Electronics & Information Technology,

- 2007, 29(6): 1412-1415. (in Chinese)
- [11] 苏远兴, 李然, 李林琳. 多通道 SAR 成像及基于 STAP 的抗噪声干扰算法[J]. 现代防御技术, 2012, 40(5): 116-120, 155.
SU Y X, LI R, LI L L. Multichannel SAR imaging and STAP for antijamming[J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(5): 116-120, 155. (in Chinese)
- [12] ROSENBERG L, GRAY D. Anti-jamming techniques for multichannel SAR imaging[J]. IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation, 2006, 153(3): 234-242.
- [13] TANG X J, III X L, IV L Z, et al. A novel jamming suppression method for spaceborne multi-channel synthetic aperture radar[C]//Proc SPIE 10796, Electro-Optical Remote Sensing XII. Berlin: SPIE, 2018: 140-148.
- [14] 于春锐. 合成孔径雷达有源干扰抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
YU C R. Study on Active Interference Suppression for Synthetic Aperture Radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [15] 李永祯, 黄大通, 邢世其, 等. 合成孔径雷达干扰技术研究综述[J]. 雷达学报, 2020, 9(5): 753-764.
LI Y Z, HUANG D T, XING S Q, et al. A review of synthetic aperture radar jamming technique[J]. Journal of Radars, 2020, 9(5): 753-764. (in Chinese)
- [16] 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 L, DONG C X, SHEN Z B, 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. (in Chinese)
- [17] 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 L, DONG C X, ZHAO G Q. Investigation on countermeasure against SAR dual-channel cancellation technique with multi-jammers[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(4): 904-907. (in Chinese)
- [18] 张云鹏, 毕大平, 房明星, 等. 对 SAR 双通道对消的方位向间歇采样散射波干扰[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2832-2839.
ZHANG Y P, BI D P, FANG M X, et al. Azimuth intermittent sampling scatter-wave jamming against SAR dual-channel cancellation[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 2832-2839. (in Chinese)
- [19] 张云鹏, 毕大平, 周阳, 等. 余弦调相散射波干扰对 SAR 双通道对消干扰抑制的影响[J]. 遥感学报, 2019, 23(1): 99-107.
ZHANG Y P, BI D P, ZHOU Y, et al. Effect of cosinusoidal phase-modulated scatter-wave jamming to the jamming suppression of SAR dual-channel cancellation[J]. Journal of Remote Sensing, 2019, 23(1): 99-107. (in Chinese)
- [20] 张云鹏, 毕大平, 沈爱国, 等. 针对 SAR 双通道对消的多站协同散射波干扰[J]. 现代雷达, 2018, 40(5): 78-83.
ZHANG Y P, BI D P, SHEN A G, et al. Cooperative scatter-wave jamming of multi-jammer against SAR dual-channel cancellation[J]. Modern Radar, 2018, 40(5): 78-83. (in Chinese)
- [21] 房明星, 毕大平, 沈爱国, 等. 合成孔径雷达双通道对消的多站干扰方法[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(4): 54-60.
FANG M X, BI D P, SHEN A G, et al. Jamming technique of multi-jammers against SAR dual-channel cancellation[J]. Journal of Detection & Control, 2017, 39(4): 54-60. (in Chinese)
- [22] 刘永才. 对多模式高分辨合成孔径雷达的大场景欺骗干扰技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
LIU Y C. Study on Large-Area Deceptive Jamming Against Multi-Mode High-Resolution Synthetic Aperture Radar[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [23] ZHOU F, TIAN T, ZHAO B, et al. Deception against near-field synthetic aperture radar using networked jammers[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6): 3365-3377.
- [24] 张静克, 汪亚, 戚宗锋, 等. 多通道 SAR-GMTI 虚假运动目标成像特性分析[J]. 航天电子对抗, 2018, 34(5): 9-13, 33.
ZHANG J K, WANG Y, QI Z F, et al. Image characteristic analysis of deceptive moving target in multi-channel SAR-GMTI[J]. Aerospace Electronic Warfare, 2018, 34(5): 9-13, 33. (in Chinese)
- [25] 张双喜, 孙光才, 刘艳阳, 等. 基于四通道 SAR 欺骗式干扰抑制算法[J]. 现代雷达, 2011, 33(2): 22-26, 30.
ZHANG S X, SUN G C, LIU Y Y, et al. Deception inter-

ference suppresion algorithm based on four-channel for SAR[J]. Modern Radar, 2011, 33(2): 22-26, 30. (in Chinese)

- [26] 孙清洋. SAR-GMTI高逼真有源欺骗干扰方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.

SUN Q Y. Research on High-Fidelity Active Deception Jamming Method Against SAR-GMTI[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)

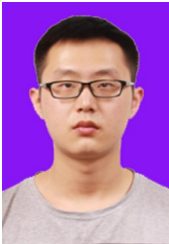
- [27] 徐乐涛, 冯德军, 刘庆富, 等. 对逆合成孔径雷达的乘积调制干扰方法[J]. 电子学报, 2014, 42(12): 2501-2508.

XU L T, FENG D J, LIU Q F, et al. ISAR decoy generation by utilizing coherent multiplication modulated jamming[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(12): 2501-2508. (in Chinese)



肖顺平 男, 1964年出生于江西省. 现为国防科技大学电子信息系统复杂磁环境效应国家重点实验室教授, 博士, 博士生导师. 主要研究方向为极化信息处理、电子仿真与雷达目标识别、雷达电子对抗. 中国电子学会会员编号: E190007666S.

作者简介



黄大通 男, 1993年出生于四川省. 现为国防科技大学电子信息系统复杂磁环境效应国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为合成孔径雷达信号处理与对抗、合成孔径雷达系统仿真技术.

E-mail: huangdatong68@163.com



邢世其(通讯作者) 男, 1984年出生于江西省. 现为国防科技大学电子信息系统复杂磁环境效应国家重点实验室副研究员, 博士. 主要研究方向为极化雷达成像、雷达信号处理以及合成孔径雷达对抗.



徐伟 男, 1986年出生于安徽省. 现为国防科技大学电子信息系统复杂磁环境效应国家重点实验室博士研究生. 主要研究方向为电子对抗系统设计技术与信号处理技术.



李永祯 男, 1977年出生于内蒙古自治区. 现为国防科技大学电子信息系统复杂磁环境效应国家重点实验室研究员, 博士, 博士生导师. 主要研究方向为极化雷达信号处理、雷达电子对抗. 中国电子学会会员编号: E190003841S.