

抑制 SAR 压制性干扰的三通道对消方法

马晓岩, 秦江敏, 贺照辉, 杨 军, 鲁千红

(空军雷达学院, 湖北武汉 430019)

摘 要: 针对合成孔径雷达(SAR)压制性干扰的抑制问题, 提出了一种三通道对消方法. 首先从理论上给出了该方法抑制压制性干扰的原理及对 SAR 成像产生的影响, 然后导出了目标回波信号的损失周期表达式, 最后进行了仿真实验. 与双通道对消处理的比较结果表明, 本文所提出方法在 SAR 抗干扰方面具有的优越性. 此外, 本文将该方法推广到 N 通道对消处理的一般意义情况, 从而使该法抑制 SAR 干扰方法在应用上具有可行性和有效性, 且在理论上具有完备性.

关键词: 合成孔径雷达; 抗干扰; 压制性干扰; 三通道处理

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 06-1015-06

Three Channel Cancellation of SAR Blanketing Jamming Suppression

MA Xiaoyan, QIN Jiangmin, HE Zhao hui, YANG Jun, LU Qian hong

(Air Force Radar Academy, Wuhan, Hubei 430019, China)

Abstract: Aimed at the SAR blanketing jamming suppression, a method of three channel cancellation is proposed. First, principles of the method to suppress blanketing jamming and its influences on SAR imaging are presented in theory, from which the expression of target loss period (TLP) is derived, and then the simulation experiment is carried out. The results show the superiority of the proposed method for SAR anti jamming in comparison with the method of two channel cancellation. In addition, this method can be extended to the general circumstance of N -channel cancellation processing, which allows the method to be applicable, effective, and theoretically complete.

Key words: synthetic aperture radar (SAR); anti jamming; blanketing jamming; three channel processing

1 引言

随着合成孔径雷达(SAR)在军事领域所发挥的日益重要的作用, 如何提高 SAR 的抗干扰能力越来越引起人们的关注. 目前, SAR 的抗压制性噪声干扰措施主要有^[1]: 相干平均法、时频方法、提高脉冲重复频率和采用类似双基地雷达的抗干扰方式. 相干平均法要求 SAR 在同一位置发射 N 个信号, 接收 N 次回波, 这无疑增加了 SAR 系统实现的复杂性; 时频方法不能将在时频域与回波信号重合的噪声干扰有效去除; 提高脉冲重复频率, 受到实际雷达设计与实现的限制; 而类似双基地雷达会降低成像的分辨率, 且只适用于干扰源具有方向性的干扰. 受启发于相位中心偏置天线^[2~4] (Displaced Phase Center Antenna, DPCA) 技术而于最近提出的双通道对消方法^[5], 可以不必区分干扰信号的类型而达到良好的抗干扰效果, 且运算量小, 但是这种方法由于在对消的过程中有周期性的回波信号能量损失, 使得成像结果出现周期性的明暗区域.

本文从减小目标回波损失角度出发, 提出了一种三通道对消方法来进行 SAR 压制性干扰抑制, 它能够增大双通道对消方法中由于目标回波损失产生的暗纹区

域的周期, 减小目标回波的损失量. 该方法的主要思想是: 相同的干扰进入 SAR 三副天线后, 变化不是很大或者说是慢起伏, 即相当于慢变杂波, 因此可以用对消方法来实现干扰抑制. 这里与传统 DPCA 方法区别在于 SAR 系统中各天线之间的距离不满足 DPCA 所要求的条件, 且各天线之间的距离不等. 实际上, 已有文献报道将双通道抗干扰方法用于抑制 SAR 欺骗性干扰^[6], 本文提出的抗干扰方法不仅对压制性干扰有效, 而且对弹射式等干扰形式也有效.

2 三通道对消方法与抗干扰分析

建立如图 1 所示的 SAR 正侧视三通道工作模型, 平台水平匀速飞行, 天线 T_2 发射, 天线 T_1 、 T_2 、 T_3 同时接收, 天线 T_1 和天线 T_2 、天线 T_2 和天线 T_3 之间的间距分别为 d_1 和 d_2 , 且 $d_1 \neq d_2$. 设天线 T_2 在某一时刻 t 的 x 坐标为 x_2 , 则天线 T_1 、 T_3 在此时刻的坐标分别为 $x_1 = x_2 + d_1$, $x_3 = x_2 - d_2$. 对于分布目标, 可采用点散射模型结构将面目标离散为一系列矩形网格, 即地面分辨单元 i , 其中网格大小与 SAR 分辨率等效, 其平面点散射模型如图 2 所示. 分布目标区域方位向点数为 N_x ,

距离向点数为 N_y , Δx 表示地面分辨单元在方位向上的宽度, Δy 表示地面分辨单元在距离向上的宽度, 则面目标上每个点的 x 坐标为 $(k_x - 1) \cdot \Delta x$ (其中 k_x 为分布目标区域方位向的某一个点, $k_x = 1, 2, \dots, N_x$), y 坐标为 $(k_y - 1) \cdot \Delta y + R_c$ (其中 k_y 为分布目标区域距离向的某一个点, $k_y = 1, 2, \dots, N_y$), $R_c = H \tan \alpha$, H 为平台高度, α 为下视角. 干扰机 M 在面目标 (x_M, y_M) (其中 $x_M = 1, 2, \dots, N_x$, $y_M = 1, 2, \dots, N_y$) 分辨单元内, 则干扰机的坐标为 $(x_M \cdot \Delta x, R_c + y_M \cdot \Delta y)$. 为了分析方便, 可以假设三副天线每次接收到的分辨单元回波是相同的, 对于干扰机, 认为其天线具有很好的方向性, 即 SAR 在整个接收回波数据过程中, 都能够接收到干扰机发射的干扰信号. 设在 t 时刻, 第 i 个分辨单元到三副天线的距离分别为 $R_{i1}(t)$ 、 $R_{i2}(t)$ 、 $R_{i3}(t)$, 干扰源 M 到三副天线的距离分别为 R_{M1} 、 R_{M2} 、 R_{M3} . 根据图 1, 可将 $R_{i1}(t)$ 、 $R_{i2}(t)$ 、 $R_{i3}(t)$ 以及 R_{M1} 、 R_{M2} 、 R_{M3} 分别表示为

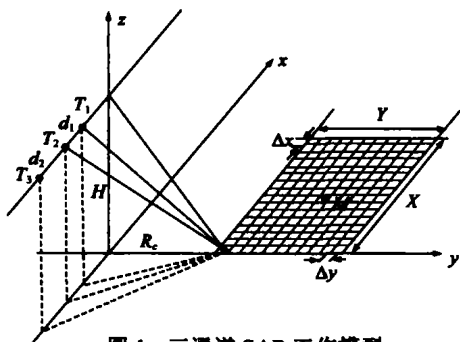


图 1 三通道 SAR 工作模型

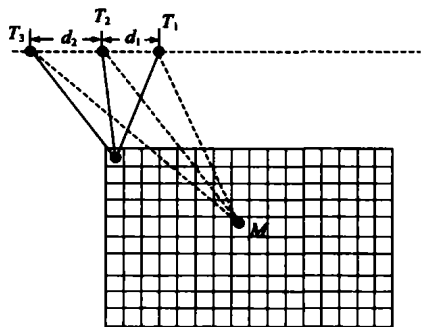


图 2 三通道 SAR 点散射模型

$$\begin{cases} R_{i1}(t) = \sqrt{[x_2 + d_1 - (k_x - 1)\Delta x]^2 + [R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2 + H^2} \\ R_{i2}(t) = \sqrt{[x_2 - (k_x - 1)\Delta x]^2 + [R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2 + H^2} \\ R_{i3}(t) = \sqrt{[x_2 - d_2 - (k_x - 1)\Delta x]^2 + [R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2 + H^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_{M1} = \sqrt{[x_2 + d_1 - x_M \Delta x]^2 + [R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2 + H^2} \\ R_{M2} = \sqrt{[x_2 - x_M \Delta x]^2 + [R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2 + H^2} \\ R_{M3} = \sqrt{[x_2 - d_2 - x_M \Delta x]^2 + [R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2 + H^2} \end{cases} \quad (2)$$

根据菲涅耳近似可得

$$\begin{cases} R_{i1}(t) \approx H + \frac{[x_2 + d_1 - (k_x - 1)\Delta x]^2}{2H} + \frac{[R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2}{2H} \\ R_{i2}(t) \approx H + \frac{[x_2 - (k_x - 1)\Delta x]^2}{2H} + \frac{[R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2}{2H} \\ R_{i3}(t) \approx H + \frac{[x_2 - d_2 - (k_x - 1)\Delta x]^2}{2H} + \frac{[R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2}{2H} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R_{M1} \approx H + \frac{(x_2 + d_1 - x_M \Delta x)^2}{2H} + \frac{[R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2}{2H} \\ R_{M2} \approx H + \frac{(x_2 - x_M \Delta x)^2}{2H} + \frac{[R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2}{2H} \\ R_{M3} \approx H + \frac{(x_2 - d_2 - x_M \Delta x)^2}{2H} + \frac{[R_c + (k_y - 1)\Delta y]^2}{2H} \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)和式(4), 可以得到三副天线到同一分辨单元及到干扰源的距离差, 分别表示为

$$\begin{cases} R_{i2}(t) - R_{i1}(t) = \frac{-2[x_2 - (k_x - 1)\Delta x]d_1 - d_1^2}{2H} \\ R_{i2}(t) - R_{i3}(t) = \frac{2[x_2 - (k_x - 1)\Delta x]d_2 - d_2^2}{2H} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} R_{M2} - R_{M1} = \frac{-2(x_2 - x_M \Delta x)d_1 - d_1^2}{2H} \\ R_{M2} - R_{M3} = \frac{2(x_2 - x_M \Delta x)d_2 - d_2^2}{2H} \end{cases} \quad (6)$$

从以上计算得到的距离差, 可以定量地分析三通道对消方法在抑制干扰的同时, 目标回波的损失部分和周期, 对应的三通道对消方法的处理结果分析如下.

设天线 T_2 发射信号为线性调频信号 $f(t)$ 为

$$f(t) = a(t) \exp(j\omega_c t) \exp(-j\pi k t^2) \quad (7)$$

式中 $a(t)$ 为包络, ω_c 为发射信号的载频, k 为线性调频信号的斜率. 干扰源 M 发射的干扰信号 $N(t)$ 为

$$N(t) = n(t) \exp(j\omega_c t) \quad (8)$$

式中 $n(t)$ 为干扰信号的包络.

天线 T_1 、 T_2 、 T_3 接收到的回波信号为进入 SAR 天线的各散射点回波与干扰信号之和, 分别为 $S_1(t, \tau)$ 、 $S_2(t, \tau)$ 、 $S_3(t, \tau)$, 其中 $S_1(t, \tau)$ 、 $S_2(t, \tau)$ 、 $S_3(t, \tau)$ 均已进行了去载频处理, 则有

$$\begin{cases} S_1(t, \tau) = \sum_i \mu \left[t - \frac{R_{i1}(t) + R_{i2}(t)}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i1}(t) + R_{i2}(t)}{c} \right] \\ \quad \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i1}(t) + R_{i2}(t)}{c} \right]^2 \right\} + n \left(t - \frac{R_{M1}}{c} \right) \exp \left(-j\omega_c \frac{R_{M1}}{c} \right) \\ S_2(t, \tau) = \sum_i \mu \left[t - \frac{2R_{i2}(t)}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{2R_{i2}(t)}{c} \right] \\ \quad \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{2R_{i2}(t)}{c} \right]^2 \right\} + n \left(t - \frac{R_{M2}}{c} \right) \exp \left(-j\omega_c \frac{R_{M2}}{c} \right) \\ S_3(t, \tau) = \sum_i \mu \left[t - \frac{R_{i3}(t) + R_{i2}(t)}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i3}(t) + R_{i2}(t)}{c} \right] \\ \quad \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i3}(t) + R_{i2}(t)}{c} \right]^2 \right\} + n \left(t - \frac{R_{M3}}{c} \right) \exp \left(-j\omega_c \frac{R_{M3}}{c} \right) \end{cases} \quad (9)$$

从式(9)可以看出, 三副天线中干扰回波数据的差异是由于天线到干扰机的距离不同而引起的^[2], 主要反映在相位上, 如果以天线 T_2 为基准, 将天线 T_1 、 T_3 进行相位补偿, 使天线 T_1 、 T_3 的干扰数据近似等于天线 T_2 的干扰数据, 则三通道对消方法的处理框图如图 3 所示。

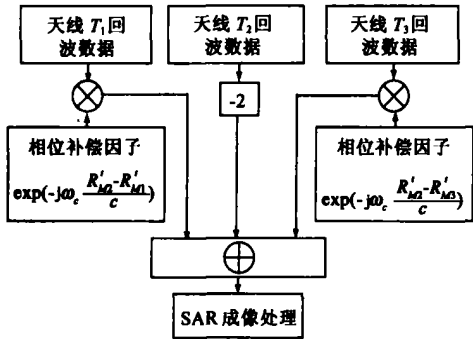


图 3 三通道对消处理框图

分别将天线 T_1 、 T_3 接收到的回波数据乘以相位补

偿因子 $\exp\left[-j\omega_c \frac{R'_{M2} - R'_{M1}}{c}\right]$ 、 $\exp\left[-j\omega_c \frac{R'_{M2} - R'_{M3}}{c}\right]$ 得到

$$\begin{cases} S'_1(t, \tau) = \sum_i a \left[t - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ \quad \cdot \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t) + R'_{M2} - R'_{M1}}{c} \right] \\ \quad \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} \\ \quad + n \left[t - \frac{R_{M1}}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{M1} + R'_{M2} - R'_{M1}}{c} \right] \\ S'_3(t, \tau) = \sum_i a \left[t - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ \quad \cdot \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t) + R'_{M2} - R'_{M3}}{c} \right] \\ \quad \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} \\ \quad + n \left[t - \frac{R_{M3}}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{M3} + R'_{M2} - R'_{M3}}{c} \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中 R'_{M1} 、 R'_{M2} 、 R'_{M3} 分别为 R_{M1} 、 R_{M2} 、 R_{M3} 的估计值。将三副天线的回波数据以滤波系数 $(1, -2, 1)$ 进行对消得到

$$G_{3T}(t, \tau) = S'_1(t - \tau) - 2S'_2(t, \tau) + S'_3(t, \tau)$$

$$= \sum_i a \left[t - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]$$

$$\cdot \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t) + R'_{M2} - R'_{M1}}{c} \right]$$

$$\cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\}$$

$$+ n \left[t - \frac{R_{M1}}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{M1} + R'_{M2} - R'_{M1}}{c} \right]$$

$$- 2 \sum_i a \left[t - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right]$$

$$\begin{aligned} & \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} - 2n \left[t - \frac{R_{M2}}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{M2}}{c} \right] \\ & + \sum_i a \left[t - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t) + R'_{M2} - R'_{M3}}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} + n \left[t - \frac{R_{M3}}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{M3} + R'_{M2} - R'_{M3}}{c} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

由于 SAR 发射信号处于微波波段, R 的变化对 $n(t - R_{M1}/c)$ 、 $n(t - R_{M2}/c)$ 、 $n(t - R_{M3}/c)$ 的影响不大, 故在同一时刻, 可认为 $n(t - R_{M1}/c) \approx n(t - R_{M2}/c) \approx n(t - R_{M3}/c)$ 。当 R'_{M1} 、 R'_{M2} 、 R'_{M3} 是 R_{M1} 、 R_{M2} 、 R_{M3} 的精确估计时, 即认为 $R'_{M1} = R_{M1}$ 、 $R'_{M2} = R_{M2}$ 、 $R'_{M3} = R_{M3}$, 这时有

$$\begin{aligned} G_{3T}(t, \tau) &= \sum_i a \left[t - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t) + R_{M2} - R_{M1}}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} \\ & - 2 \sum_i a \left[t - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} + \sum_i a \left[t - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t) + R_{M2} - R_{M3}}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

从式(12)中可以看出, 干扰被完全抑制。

3 三通道对消对成像的影响分析

在式(12)中, $a \left[t - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right]$ 、 $a \left[t - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]$ 、 $a \left[t - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]$ 、 $\exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\}$ 、 $\exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\}$ 、 $\exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\}$ 都是关于距离 R 的慢时间变化函数, 因此, 对于同一时刻来说, 可以有以下近似

$$\begin{aligned} a \left[t - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right] &\approx a \left[t - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ &\approx a \left[t - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} &\approx \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} \\ &\approx \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

而 $\exp \left[-j\omega_c \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right]$ 、 $\exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t) + R_{M2} - R_{M1}}{c} \right]$ 是距离 R 的快时间变化函数, 对距离 R 的变化很敏感, 故只需要讨论这

两项在对消的过程中所造成的信号回波损失.

由于对同一时刻来说, 进入两副天线的散射点是一样的, 因此, $G_{3T}(t, \tau)$ 可分解为同一点对应对消, 即

$$G_{3T}(t, \tau) = \sum_i g_{3T}^i(t, \tau) \quad (15)$$

则对应于同一点的三天线回波数据对消可表示为

$$\begin{aligned} g_{3T}^i(t, \tau) = & a \left[t - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t) + R_{M2} - R_{M1}}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i1}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} \\ & - 2a \left[t - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} + a \left[t - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t) + R_{M2} - R_{M3}}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{R_{i3}^i(t) + R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

将式(13)、式(14)代入式(16), 并进行恒等变换得到

$$\begin{aligned} g_{3T}^i(t, \tau) \approx & a \left[t - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} \\ & \cdot \left\{ \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i2}^i(t) + R_{i1}^i(t) + R_{M2} - R_{M1}}{c} \right] - 2 \right. \\ & \left. + \exp \left[-j\omega_c \frac{R_{i2}^i(t) + R_{i3}^i(t) + R_{M2} - R_{M3}}{c} \right] \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

将式(5)、式(6)代入式(17)并进行化简得

$$\begin{aligned} g_{3T}^i(t, \tau) \approx & a \left[t - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right] \exp \left[-j\omega_c \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right] \\ & \cdot \exp \left\{ jk\pi \left[\tau - \frac{2R_{i2}^i(t)}{c} \right]^2 \right\} \\ & \cdot \left\{ \exp \left[-j\omega_c \frac{(x_M - k_x + 1) \Delta x d_1}{c} \right] - 2 \right. \\ & \left. + \exp \left[-j\omega_c \frac{(x_M - k_x + 1) \Delta x d_2}{c} \right] \right\} \end{aligned} \quad (18)$$

对式(18)分析可以得出, 当 $k_x = x_M + 1$ 时, $g_{3T}^i(t, \tau) = 0$, 这时与干扰机在同一距离向上的目标回波被完全对消掉了. 从式(18)可以计算出此三通道对消方法的目标损失周期为 $HN(\Delta x d_1)$ 与 $HN(\Delta x d_2)$ 的最小公倍数, 在此算法下, 若取 d_1, d_2 不等时, 将使目标回波损失的周期变得比双通道对消方法下的目标回波损失的周期^[7] $HN(\Delta x d_1)$ 大得多.

4 仿真实验与分析

本文采用仿真和实际采集 SAR 数据对上述方法进行分析, 并与双通道方法比较. 对应的 SAR 参数如下:

轨道高度 $H = 600\text{km}$, 脉冲重复频率 $f_p = 1988.3\text{Hz}$, 脉冲的宽度 $\tau = 2\mu\text{s}$, 信号带宽 $B = 100\text{MHz}$, 天线水平波束宽度 $\beta = 0.35^\circ$, 距离向波束宽度 $\beta_s = 2.62^\circ$, 天线的下视角 $\alpha = 31.31^\circ$, 信号载频 $f_c = 5.4\text{GHz}$, 采样率 $f_s = 112.6\text{MHz}$, 平台速度 $v = 7500\text{m/s}$. 天线 T_1, T_2 之间的距离 $d_1 = 11\text{m}$, 天线 T_2, T_3 之间的距离 $d_2 = 7\text{m}$.

4.1 仿真面目标处理结果及分析

图4(a)~(d)分别给出了无干扰下的 SAR 成像结果、信干比为 -12dB 的受干扰 SAR 成像结果、双通道对消处理结果和采用三通道对消方法抑制压制性干扰处理结果.

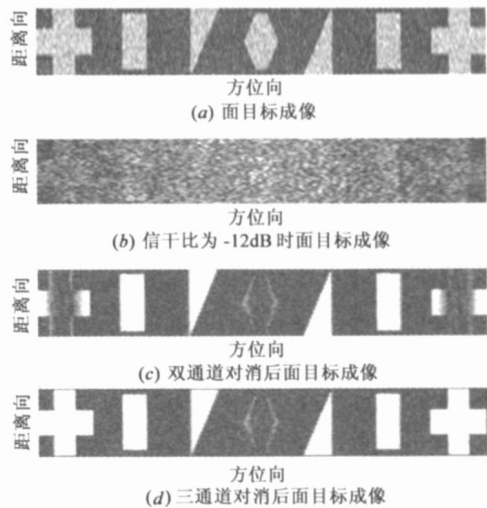


图4 面目标场景仿真结果

从图4(c)和(d)中可以看到, 两种对消处理方法均能有效将噪声干扰抑制, 同时两种方法均在图像中间区域即干扰机及其附近的距离向分辨单元出现暗纹区域, 此即为对消过程中目标回波损失的部分. 但是双通道对消方法在噪声干扰抑制的同时, 目标损失严重, 暗纹出现周期性, 根据仿真参数, 计算双通道对消方法目标损失的周期(反映在图像上为点数)为 $\text{INT}[(H\lambda)/(\Delta x d_1)] = 803$, 即 SAR 图像上每隔 803 点就会有目标损失, 图4(c)中反映了暗纹区域的周期性, 在场景中“十字”中心也出现暗纹, 为目标回波损失. 而三通道对消方法目标损失的周期为 $\text{INT}[(H\lambda)/(\Delta x d_1)] = 803$ 与 $\text{INT}[(H\lambda)/(\Delta x d_2)] = 1262$ 的最小公倍数, 其周期已经远远大于 803, 反映在此仿真数据中只有在干扰机及其附近的距离向分辨单元回波被对消掉了.

仿真实验验证了本文所提出的三通道对消方法与双通道对消方法相比, 在实现有效抑制噪声干扰的同时, 使得目标回波损失的周期大大增大, 损失量减少.

4.2 某飞机场场景的仿真与分析

图5(a)为没有干扰时的实际飞机场图像, 在 SAR 回波数据中加入信干比为 -12dB 的模拟噪声, 受干扰

的飞机场图像如图 5(b) 所示, 采用双通道对消处理结果如图 5(c) 所示, 采用三通道对消处理结果如图 5(d) 所示。

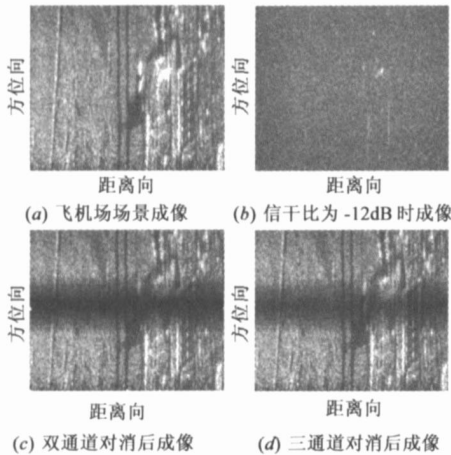


图 5 飞机场场景仿真结果

在实际仿真中, 由于选取的飞机场图像数据的方向向大小只有 512 点, 比 803 点小, 故无论是双通道对消方法还是三通道对消方法都不能将目标损失的周期性反映在图像上, 但是从图 5(b) 和图 5(c) 中可以明显看到, 采用三通道对消后的目标损失区域比双通道对消后的目标损失区域小。

以上两个仿真实验, 验证了三通道对消方法在干扰抑制时, 目标回波会出现周期性的损失及理论上推导的这种损失周期表达式的正确性, 同时与双通道对消方法相比在 SAR 抗干扰方面具有优越性。

5 对消方法的推广讨论

类似于低分辨率雷达的动目标显示(MTI)技术, 由于上述双通道处理和三通道处理与 MTI 中的基于二项式滤波系数完全一样, 因此根据杂波抑制对消器的设计原理^[8], 可将该干扰抑制方法推广到 N 通道对消处理情况。

N 通道对消处理方法的 SAR 系统模型是在 SAR 平台上装载 N 副天线 T_1, T_2, \dots, T_N , 其中天线 T_2 发射天线调频信号, N 副天线同时接收, 各天线到天线 T_2 之间的间距分别为 d_1, d_2, \dots, d_{N-1} , 且 $d_1 \neq d_2 \neq \dots \neq d_{N-1}$ 。设 N 副天线接收的去载频回波信号分别为 $S_1(t, \tau), S_2(t, \tau), \dots, S_N(t, \tau)$, 以天线 T_2 为基准, 将天线 T_1, T_3, \dots, T_N 进行相位补偿, 使各天线的干扰数据近似等于天线 T_2 的干扰数据, 分别乘以相位补偿因子

$$\exp\left[-j\omega_c \frac{R'_{M2} - R_M}{c}\right], \exp\left[-j\omega_c \frac{R'_{M2} - R_M}{c}\right], \dots, \exp\left[-j\omega_c \frac{R'_{M2} - R_M}{c}\right]$$

后得到 $S'_1(t, \tau), S'_3(t, \tau), \dots, S'_N(t, \tau)$ 。

根据杂波抑制对消器设计原理, N 通道对消处理如果按二项式系数加权, 它等效于多个双通道对消处理级联。则 N 通道 SAR 回波数据对消处理后有

$$G_{3T}(t, \tau) = S'_1(t, \tau) + a_1 S'_2(t, \tau) + a_2 S'_3(t, \tau) + \dots + a_{N-1} S'_N(t, \tau) \quad (19)$$

式中 $a_m (m = 1, 2, \dots, N-1)$ 为二次项系数

$$a_m = (-1)^m C_{N-1}^m = (-1)^m \frac{(N-1)!}{m! (N-1-m)!} \quad (20)$$

且 $1 + a_1 + a_2 + \dots + a_{N-1} = 0$ 。

根据三通道对消方法相同的原理, 可以计算出此 N 通道对消算法的周期为 $H\lambda/(\Delta x d_1), H\lambda/(\Delta x d_2), \dots, H\lambda/(\Delta x d_{N-1})$ 的最小公倍数, 在此情况下, 若取 d_1, d_2, \dots, d_{N-1} 互不相等时, 将使目标损失的周期进一步变大。

通过以上分析可知, 将三通道对消方法推广到 N 通道对消处理的一般意义情况, 可以使在干扰完全抑制的过程中目标损失的周期变得足够大, 这说明多通道对消处理方法在理论上的完备性。

6 结论

针对强噪声压制性干扰下 SAR 抗干扰问题, 提出了一种三通道对消方法。在理论上推导了该方法在实现将噪声干扰信号完全对消的同时, 能够使回波信号的损失周期比双通道对消方法的目标损失周期大大增加, 从而减小了损失量。仿真实验验证了三通道对消方法中目标回波损失周期表达式的正确性以及具有优越的 SAR 抗干扰性能。最后, 本文将该方法推广到 N 通道对消处理的一般意义情况, 从而使对消处理方法抑制 SAR 干扰不但在应用上具有可行性和有效性, 而且在理论上具有完备性。

参考文献:

- [1] 杜贤俊. 合成孔径雷达抗干扰技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003.
Du Xianjun. Study of SAR Anti-Jamming Technology [D]. Chengdu University of Electronic Science and Technology, 2003. (in Chinese)
- [2] Coe D J, White R G. Moving target detection in SAR imagery: Experimental results[A]. Record of the IEEE 1995 International Radar Conference[C]. USA: IEEE, 1995. 644-649.
- [3] Stockburger E F. Interferometric moving ground target imaging [A]. Proceedings of the Radar Conference[C]. Alexandria VA, USA: PRC, 1995. 438-443.
- [4] Joachim H G Ender. Detection and estimation of moving target signals by multi channel SAR[A]. EUSAR' 96[C]. Germany: EUSAR' 96, 1996. 411-417.
- [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, 2003.

大学, 2004.

Ma Yonghua. Study of SAR Conflict Technique[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2004. (in Chinese)

- [6] 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 Rongbing, Wang Jianguo, He Chuan. Rebound jamming suppression by two channel SAR[J]. Signal Processing, 2005, 21(1): 27- 30. (in Chinese)

- [7] 贺照辉. 基于 SAR 压制性电子对抗研究[D]. 武汉: 空军

雷达学院, 2006.

He Zhaohui. Research on SAR Blanketing Electronic Countermeasures[D]. Wuhan: Air Force Radar Academy, 2006. (in Chinese)

- [8] 马晓岩, 向家彬, 等. 雷达信号处理[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1999.

Ma Xiaoyan, Xiang Jiabing, et al. Radar Signal Processing [M]. Changsha: Technology Publishing Company of Hunan Province, 1999. (in Chinese)

作者简介:



马晓岩 男, 1962 年 8 月生于湖北省赤壁市, 教授、博士生导师, 1982 年在南京理工大学获得学士学位, 1988 年在国防科技大学电子技术系获得信号与信息处理专业硕士学位, 2002 年在清华大学自动化系获得模式识别与智能系统专业博士学位. 主要从事雷达系统、现代信号处理与智能信息处理及其应用的研究, 出版著作 2 部, 发表论文 60 多篇, 获省(军队) 级科技进步奖 4 项. E-mail: qinjiangmin59@ 126. com

秦江敏 女, 1959 年 6 月生于湖北武汉市, 副教授、硕士生导师, 1982 年在华中工学院获得学士学位, 1987 年在西北电讯工程学院获得信号、电路与系统专业硕士学位. 主要从事现代信号处理理论、方法及应用, 神经网络, 模式识别的研究, 发表论文 56 篇.

E-mail: kjldxyxb@ 126. com

贺照辉 女, 1980 年 7 月生于湖北随州, 硕士, 2003 年在中国地质大学获得学士学位, 2006 年在空军雷达学院获得信号与信息处理专业硕士学位. 主要从事现代信号处理理论、方法及应用, 神经网络, 模式识别, 电子对抗的研究, 发表论文 8 篇.

E-mail: huihui4592472@ 163. com

杨 军 男, 1973 年 11 月生于云南大理, 副教授. 1996 年、1999 年分别在空军雷达学院获工学学士学位和硕士学位, 2003 年在空军工程大学获工学博士学位. 主要从事雷达信号检测、现代信号处理与智能信息处理及其应用的研究, 发表论文 30 多篇.

E-mail: yangjem @ 126. com

鲁千红 男, 1971 年 7 月出生于湖北应城, 1993 年, 1997 年分别在空军雷达学院获得工学学士学位和硕士学位. 现任空军雷达学院信息与指挥自动化系信号与信息处理教研室讲师、副主任. 主要从事雷达信号处理方面的教学和研究工作, 发表论文 10 篇.