

# 多通道 SAR 频率多普勒域宽带长 CPI STAP 方法

常玉林,周 红,黄晓涛,周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

**摘 要:** 在频率-多普勒域,提出了一种适合多通道 SAR 系统的宽带长 CPI(Coherent Processing Intervals) STAP (Space Time Adaptive Processing)方法.该方法突破了传统 STAP 方法“距离走动不能超过一个距离分辨单元”的限制,能够适应运动目标沿时间维/空间维的跨距离单元走动,从而能够利用长的相干积累时间和长基线,其运动目标检测和速度估计性能远远优于传统的 GMTI (Ground Moving Target Indication)方法.

**关键词:** 地面运动目标指示;多通道 SARSTAP;宽带长相干积累时间;频率多普勒域

**中图分类号:** TN959.73; TN959.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1245-08

## Frequency-Doppler Domain Wideband Long CPI STAP Method for Multichannel SAR System

CHANG Yu-lin, ZHOU Hong, HUANG Xiao-tao, ZHOU Zhi-min

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract:** A new STAP method is proposed suitable for multi-channel SAR system; the frequency-Doppler domain wideband long CPI STAP method. The introduced method can adapt to the range walk along slow time and space dimension, so it can make use of both long CPI and long baseline. By utilizing the large bandwidth of the SAR system, the proposed method can eliminate the blind speed introduced by long sparse baseline. The introduced method can detect moving targets even with small non-zero range velocities or non-zero azimuth velocities, and can estimate their range and azimuth velocities.

**Key words:** GMTI; multi-channel SAR; STAP wideband long CPI; frequency Doppler domain

### 1 引言

多通道合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)同时具有地面静止场景成像和地面运动目标指示能力<sup>[1,2]</sup>,可获得战场静态和动态全方位信息.但是,由于 SAR 天线俯视工作,其地面杂波分布范围广,强度大,最高可达 60~90dB,同时由于载体运动,杂波谱显著展宽,导致运动目标淹没在杂波中,因此基于多通道 SAR 实现 GMTI 的前提是较好的抑制杂波.

空时自适应处理(STAP)是一种具有最优杂波抑制能力的 GMTI 方法,它对载体飞行不平稳、通道误差、杂波内部运动等多种不理想情况均有较强的适应能力.但是,由于目前绝大部分有关 STAP 的文献<sup>[3,4]</sup>,所针对的信号是窄带的(相对带宽小于 10%或带宽小于 10MHz),所利用的 CPI 长度较短(要求一个 CPI 内目标和载体之间的相对运动不超过一个距离单元),我们将传统的 STAP 方法称之为窄带短 CPI STAP 方法.多通道 SAR 系

统具有的通道数目不可能太多(一般为 3~5 个),SAR 系统所发射的信号一般也是宽带的,若要求目标和载体之间的相对运动不超过一个距离单元,所能利用的相干积累脉冲数目很少,故基于短 CPI STAP 方法不能达到较高的输出信杂噪比,运动目标检测能力有限.同时,由于通道数目较少,基于短 CPI STAP 方法也不能获得较高的速度分辨能力,并且对运动目标的定位精度较差.

针对多通道 SAR 系统, Ender 于上世纪末提出了长 CPI STAP 处理的思想<sup>[5]</sup>,突破了“不同脉冲之间的距离走动不超过一个距离分辨单元”的限制,从而能够利用较多相干积累脉冲数目进行 STAP 处理,达到远高于传统 STAP 方法的输出信杂噪比.长 CPI STAP 方法是近几年 STAP 研究的热点问题<sup>[3]</sup>,目前已有多种长 CPI STAP 方法先后出现,包括基于距离多普勒域的长 CPI STAP 方法<sup>[5,6]</sup>、基于 SAR 图像域的长 CPI STAP 方法等<sup>[7~12]</sup>.但是,这些方法不能适应运动目标沿空间维的

距离走动,不能适应较长的基线,同时,这些方法也没有充分考虑 SAR 系统的宽带特点,不能适应色散等因素的影响。

本文提出了一种适合多通道 SAR 系统的宽带长 CPI STAP 方法——频率多普勒域宽带长 CPI STAP 方法.下面对该方法的原理、实现方法、性能进行分析,并给出实验结果。

## 2 多通道 SAR 频率多普勒域宽带长 CPI STAP 原理

### 2.1 宽带长 CPI 条件下的多通道 SAR 频率多普勒域运动目标信号和杂波模型

假设多通道 SAR 工作于正侧视模式,阵列天线工作对地观测几何图如图 1 所示. 载机距地面高度  $h$  以速度  $(v_a, 0, 0)$  沿  $X$  轴作匀速直线运动,收发天线构成了  $N$  个等效相位中心,天线相位中心之间的间距为  $d$ . 在零时刻,第一个相位中心位于  $(x_a, 0, h)$ ,在地面  $(x_T, y_T, 0)$  处存在某运动目标  $P$ ,其运动速度为  $(v_x, v_y, 0)$ . 那么任意  $t_m$  时刻第  $n$  个相位中心至地面目标的瞬时斜距可表示为:

$$R_n(t_m) = \{[(x_T + v_x t_m) - (x_a + v_a t_m + (n-1)d)]^2 + (y_T + v_y t_m)^2 + h^2\}^{1/2} \quad (1)$$

令

$$\begin{cases} X_T = \frac{(x_T - x_a)(v_a - v_x) - y_T v_y}{V} \\ Y_T = \frac{y_T(v_a - v_x) + (x_T - x_a)v_y}{V} \\ V = \sqrt{(v_a - v_x)^2 + v_y^2} \end{cases} \quad (2)$$

$(X_T, Y_T)$  可看作第 1 个通道运动目标的等效位置参数,  $V$  可看作运动目标和载机之间的合成运动速度. 将第  $n$  个通道的回波数据和第 1 个通道的回波数据配准,配准后的瞬时斜距可表示为:

$$R_n(t_m) = \{[Vt_m - X + (n-1)d\cos\alpha]^2 + [Y - (n-1)d\sin\alpha]^2 + h^2\}^{1/2} \quad (3)$$

为了讨论的方便,本文的分析均针对机载 P 波段多通道 SAR 系统进行,并假设不存在多普勒模糊。

设发射信号为:

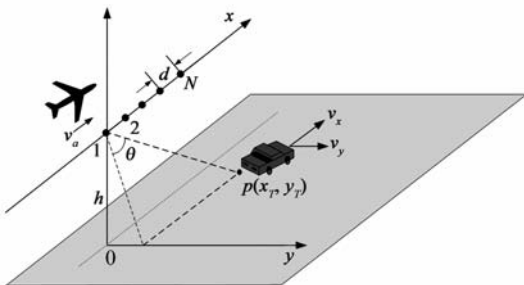


图1 阵列天线对地观测几何

$$p(t) = \exp(j2\pi f_c t + j\pi K t^2), \quad t \in [-\frac{T}{2}, +\frac{T}{2}] \quad (4)$$

其中  $f_c$  代表发射信号的载频,  $T$  代表发射信号的脉宽,  $K$  为调频率. 第  $n$  个通道所接收到的运动目标  $P$  的回波信号经正交解调、脉冲压缩、二维傅立叶变换后,所得频率多普勒域表达式可表示为<sup>[7,12]</sup>:

$$\begin{aligned} s_n(f, fa) = & \frac{2f/c}{\gamma \sqrt{(2f/c)^2 - (fa/V)^2}} \\ & \cdot \exp\{-j2\pi(fa/V) \cdot [X_T - (n-1)d(v_a - v_x)/V]\} \\ & \cdot \exp\{-j2\pi \sqrt{h^2 + [Y_T - (n-1)d \cdot v_y/V]^2} \\ & \cdot \sqrt{(2f/c)^2 - (fa/V)^2}\} \end{aligned} \quad (5)$$

$s_n(f, fa)$  可表示为与  $n$  无关的项  $A(f, fa)$  和与  $n$  有关的项  $\tilde{s}_n(f, fa)$  之积:

$$s_n(f, fa) = A(f, fa) \cdot \tilde{s}_n(f, fa) \quad (6)$$

其中:

$$\begin{aligned} A(f, fa) = & \frac{2f/c}{\gamma \sqrt{(2f/c)^2 - (fa/V)^2}} \\ & \cdot \exp\{-j2\pi X_T \cdot fa/V - j2\pi R_{sT} \cdot \sqrt{(2f/c)^2 - (fa/V)^2}\} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \tilde{s}_n(f, fa) = & \exp\{j2\pi(n-1)d \cdot [\frac{fa}{V} \cdot \frac{v_a - v_x}{V} \\ & + \sqrt{(\frac{2f}{c})^2 - (\frac{fa}{V})^2} \frac{v_y}{V} \sin\varphi]\} \end{aligned} \quad (8)$$

定义归一化空间频率  $\tilde{f}_{sp}$  为:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_{sp} = & \frac{1}{d} \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi[\tilde{s}_n(f, fa)]}{dn} \\ = & \frac{fa}{V} (\cos\alpha - \gamma) + \sqrt{(2f/c)^2 - (fa/V)^2} \sin\alpha \sin\varphi \end{aligned} \quad (9)$$

那么  $\tilde{s}_n(f, fa)$  可重新表示为:

$$\tilde{s}_n(f, fa) = \exp\{j2\pi(n-1)d \cdot \tilde{f}_{sp}\} \quad (10)$$

杂波信号是由观测场景内大量静止杂波单元的回波叠加而成. 设  $(f, fa)$  处第  $i$  个杂波单元的散射函数为  $g_i(f, fa)$ , 天线增益为  $g_A(f, fa)$ , 于是第  $n$  个通道  $(f, fa)$  处的杂波信号可以表示为:

$$\begin{aligned} c_n(f, fa) = & \frac{2(f/c) \cdot g_A(f, fa)}{\sqrt{(2f/c)^2 - (fa/v_a)^2}} \\ & \cdot \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} g_i(f, fa) \exp(-j2\pi fa \frac{X_i}{v_a}) \right. \\ & \left. \cdot \exp(-j2\pi \sqrt{(2f/c)^2 - (fa/v_a)^2} \cdot R_i) \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

从式(11)可看出:由于杂波来自大量静止散射单元的信号构成,不同通道间  $c_n(f, fa)$  的相位差也和静止目标一样为零. 若类似式(9)定义杂波的归一化空间频率  $\tilde{f}_{sp}$ , 则杂波对应的  $\tilde{f}_{sp}$  和静止目标一样满足  $\tilde{f}_{sp}(f, fa) = 0$ .

可看出:

(1)对于杂波而言,  $\tilde{f}_{sp}(f, fa) = 0$ , 不同通道间  $c_n(f,$

$fa$ )的相位差恒为零;对于运动目标而言,  $v_x \neq 0$  或者  $v_y \neq 0$ ,  $\tilde{f}_{sp}(f, fa) \neq 0$ , 不同通道间  $s_n(f, fa)$ 的相位差不为零, 据此可区分运动目标信号和杂波;

(2)不同速度的运动目标对应的  $\tilde{f}_{sp}(f, fa)$ 沿  $(f, fa)$ 的迁变规律也不相同, 因此综合支撑域上  $\tilde{s}_n(f, fa)$ 的值, 也可对不同速度的运动目标加以区分;

(3)在大带宽和长 CPI 条件下, 运动目标信号的频率多普勒域支撑域范围越大, 这样就可利用更多的信息从杂波中检测运动目标信号, 也可有更多的信息对不同速度的运动目标加以区分。

## 2.2 频率多普勒域宽带长 CPI STAP 原理

设多通道 SAR 系统包括  $N$  个空域采样通道, 每一通道接收的回波距离压缩后距离向点数为  $L$ , 方位向点数为  $M$ . 将多通道回波数据变换到频率多普勒域, 数据维数为  $N \times L \times M$  维, 将其排成  $(N \times L \times M) \times 1$  维的空时列矢量:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_s^T(f_1, fa_1), \dots, \mathbf{X}_s^T(f_1, fa_M), \mathbf{X}_s^T(f_2, fa_1), \dots, \mathbf{X}_s^T(f_2, fa_M), \dots, \mathbf{X}_s^T(f_L, fa_1), \dots, \mathbf{X}_s^T(f_L, fa_M)]^T \quad (12)$$

$\mathbf{T}$  代表转置运算. 且

$$\mathbf{X}_s(f_l, fa_m) = [x_1(f_l, fa_m), x_2(f_l, fa_m), \dots, x_N(f_l, fa_m)]^T \quad (13)$$

给出对  $\mathbf{X}$  的如下二元假设:

$$\begin{aligned} H_1: \mathbf{X} &= b\mathbf{S} + \mathbf{C} + \mathbf{Q} \\ H_0: \mathbf{X} &= \mathbf{C} + \mathbf{Q} \end{aligned} \quad (14)$$

其中  $\mathbf{S}$  为等效位置参数为  $(X_T, Y_T)$ 、速度参数为  $(v_x, v_y)$  的运动目标信号导向矢量,  $b$  为运动目标回波幅度,  $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{Q}$  为杂波和噪声矢量.  $\mathbf{S}$  的表达式为:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{S}^T(f_1, fa_1), \dots, \mathbf{S}^T(f_1, fa_M), \mathbf{S}^T(f_2, fa_1), \dots, \mathbf{S}^T(f_2, fa_M), \dots, \mathbf{S}^T(f_L, fa_1), \dots, \mathbf{S}^T(f_L, fa_M)]^T \quad (15)$$

且:

$$\mathbf{S}(f_l, fa_m) = [s_1(f_l, fa_m), s_2(f_l, fa_m), \dots, s_N(f_l, fa_m)]^T \quad (16)$$

其中  $s_n(f_l, fa_m)$  如式(5)所示 ( $n = 1, 2, \dots, N$ ). 类似  $\mathbf{S}$ 、 $\mathbf{C}$  和  $\mathbf{Q}$  也可表示为  $(N \times L \times M) \times 1$  维矢量.

频率多普勒域长 CPI STAP 处理器对观测矢量  $\mathbf{X}$  进行线性组合, 得到输出  $\mathbf{Y}$ :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}^H \mathbf{X} \quad (17)$$

输出  $\mathbf{Y}$  为标量,  $\mathbf{H}$  代表共轭转置,  $\mathbf{W}$  为  $(N \times L \times M) \times 1$  维的滤波器权值. 长 CPI STAP 滤波器输出的信杂噪比为:

$$\text{SINR}_{\text{out}} = \frac{E[\mathbf{W}^H \mathbf{S} \mathbf{S}^H \mathbf{W}]}{E[\mathbf{W}^H \mathbf{R}_{X|H_0} \mathbf{W}]} \quad (18)$$

$\mathbf{R}_{X|H_0}$  代表  $H_0$  假设下观测样本的协方差矩阵, 即观测样本中杂波和噪声的期望协方差矩阵:

$$\mathbf{R}_{X|H_0} = E[\mathbf{C} \mathbf{C}^H] + E[\mathbf{Q} \mathbf{Q}^H] \quad (19)$$

$\mathbf{R}_{X|H_0}$  的维数为  $(N \times L \times M) \times (N \times L \times M)$  维.

根据检测理论<sup>[3]</sup>, 满足输出信杂噪比最高准则的最优权矢量为:

$$\mathbf{W}_{\text{opt}} = \mu \mathbf{R}_{X|H_0}^{-1} \mathbf{S} \quad (20)$$

式中  $\mu$  为常数, 为保证输出的检验统计量是恒虚警的, 此处  $\mu$  取作  $1/\sqrt{\mathbf{S}^H \mathbf{R}_{X|H_0}^{-1} \mathbf{S}}$ .

将输出检验统计量  $Y$  的绝对值和一检测门限  $\beta_T$  进行比较, 则可判定  $H_1$  是否成立.

## 2.3 频率多普勒域宽带长 CPI STAP 的优点

前一部分给出的频率多普勒域宽带长 CPI STAP 器具有如下优点:

(1)若选择 CPI 长度较长, 且信号为宽带时, 运动目标占据了一定频率多普勒范围, 该宽带长 CPI STAP 处理器能使频率多普勒平面上运动目标和杂波之间的输出信杂噪比达到最大;

(2)该处理器将运动目标沿空间维、时间维的距离走动可转化为依赖于频率-多普勒域的相位项, 因此能够适应运动目标沿时间维和空间维的距离走动, 且可适应稀疏长基线等较为灵活的天线配置;

(3)在频率-多普勒域进行 STAP 处理, 能够适应宽带引起的色散, 以及不同频率/多普勒杂波及干扰特性不一致的情况;

(4)若在较长的 CPI 时间内, 天线相对运动目标的观测角度发生了一定的变化, 使得运动目标速度的径向投影不恒为零, 而该处理器由于综合了运动目标的所有多普勒范围进行 STAP 处理, 可检测距离向速度为零但方位向速度不为零的运动目标;

(5)该处理器由于综合了一定频率范围进行 STAP 处理, 即使天线稀疏放置, 由于不同频率出现盲速的位置也不相同, 当 SAR 系统带宽较大时, 一定频带范围内的综合可消除天线稀疏放置引起的盲速;

(6)该处理器综合一定频率多普勒范围进行 STAP 处理, 可区分  $v_x$  或者  $v_y$  不同的运动目标, 并可区分  $v_x$  或者  $v_y$  相同但位置参数不同的运动目标.

## 3 频率多普勒域宽带长 CPI STAP 的实现方法

### 3.1 频率多普勒域长 CPI STAP 的降维实现模型

本文 2.2 节给出的宽带长 CPI STAP 处理器的维数达到了  $N \times L \times M$  维, 这使得

(1)估计  $\mathbf{R}_{X|H_0}$  需要的训练样本数太多, 至少需要  $2(N \times L \times M)$  个独立的训练样本;

(2) 一次自适应处理的运算量太大, 达到  $(NLM)^3$  数量级. 因此在实际中需要对其降维实现.

首先对杂波和噪声的协方差阵  $\mathbf{R}_{X|H_0}$  进行分析. 参考文献[13]一文指出: 由于包含了来自大量地面散射点的贡献, 杂波在频域的相关性很弱. 当回波的方位点数  $M$  和距离向点数  $L$  较大时, 不同频率分量上的杂波可认为是独立的, 于是  $\mathbf{R}_{X|H_0}$  可以表示为:

$$\mathbf{R}_{X|H_0} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(f_1, fa_1) & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathbf{R}(f_1, fa_2) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{R}(f_L, fa_M) \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中对角矩阵  $\mathbf{R}(f_l, fa_m)$  代表  $(f_l, fa_m)$  处的多通道杂波噪声协方差阵:

$$\mathbf{R}(f_l, fa_m) = E[\mathbf{C}(f_l, fa_m)\mathbf{C}^H(f_l, fa_m)] + E[\mathbf{Q}(f_l, fa_m)\mathbf{Q}^H(f_l, fa_m)] \quad (22)$$

其中  $\mathbf{C}(f_l, fa_m)$  为  $(f_l, fa_m)$  处的多通道杂波协方差阵,  $\mathbf{Q}(f_l, fa_m)$  为  $(f_l, fa_m)$  处的多通道噪声协方差阵. 根据式(22)可看出: 维数为  $(NLM)^2$  的协方差阵  $\mathbf{R}_{X|H_0}$  中非零元素实际上只有  $N^2LM$  个.

根据  $\mathbf{R}_{X|H_0}$  的这一性质, 可将频率多普勒域长 CPI STAP 的输出表示为如下的求和式:

$$Y = \mathbf{W}_{\text{opt}}^H \mathbf{X} = \frac{\mathbf{S}^H \mathbf{R}_{X|H_0}^{-1} \mathbf{X}}{\sqrt{\mathbf{S}^H \mathbf{R}_{X|H_0}^{-1} \mathbf{S}}} = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \mathbf{S}^H(f_l, fa_m) \mathbf{R}^{-1}(f_l, fa_m) \mathbf{X}(f_l, fa_m)}{\sqrt{\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \mathbf{S}^H(f_l, fa_m) \mathbf{R}^{-1}(f_l, fa_m) \mathbf{S}(f_l, fa_m)}} \quad (23)$$

其中  $\mathbf{S}(f_l, fa_m)$  如式(16)所示. 根据式(5)~(8), 式(23)可进一步表示为:

$$Y = \frac{\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \mathbf{A}^H(f_l, fa_m) \tilde{\mathbf{S}}^H(f_l, fa_m) \mathbf{R}^{-1}(f_l, fa_m) \mathbf{X}(f_l, fa_m)}{\sqrt{\sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M |\mathbf{A}(f_l, fa_m)|^2 \tilde{\mathbf{S}}^H(f_l, fa_m) \mathbf{R}^{-1}(f_l, fa_m) \tilde{\mathbf{S}}(f_l, fa_m)}} \quad (24)$$

$$\text{令: } \tilde{\mathbf{W}}(f_l, fa_m) = \mathbf{R}^{-1}(f_l, fa_m) \tilde{\mathbf{S}}(f_l, fa_m) \quad (25)$$

$$\mathbf{Y}(f_l, fa_m) = \tilde{\mathbf{W}}^H(f_l, fa_m) \mathbf{X}(f_l, fa_m) \quad (26)$$

式(24)可表示为:

$$Y = \mathbf{W}_{\text{opt}}^H \mathbf{X} = \mu \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^M \mathbf{A}^H(f_l, fa_m) \mathbf{Y}(f_l, fa_m) \quad (27)$$

若将  $\mathbf{X}(f_l, fa_m)$  当作  $(f_l, fa_m)$  处的  $N$  维局部观测值, 于是  $\tilde{\mathbf{S}}(f_l, fa_m)$  可看作  $(f_l, fa_m)$  处的局部导向矢量,  $\tilde{\mathbf{W}}(f_l, fa_m)$  可看作为局部自适应滤波器权值, 局部滤波

器的输出为  $Y(f_l, fa_m)$ .  $\tilde{\mathbf{W}}(f_l, fa_m)$  使得  $Y(f_l, fa_m)$  中的信杂噪比达到最大.

根据式(27), 频率-多普勒平面上的  $N \times L \times M$  维的宽带长 CPI STAP 滤波器的输出  $Y$  可以表示为  $L \times M$  个  $N$  维局部自适应滤波器  $Y(f_l, fa_m)$  的线性组合. 这样, 即实现了频率-多普勒宽带长 CPI STAP 滤波器的降维处理.

经过降维处理后, 频率-多普勒域长 CPI STAP 处理器实际上包含了两个相对独立的过程:

(1) 频率-多普勒域局部自适应滤波

(2) 频率-多普勒域局部自适应滤波器输出结果的相干积累

这两个过程均可设计为与运动目标位置参数无关的形式, 即一次可对某速度下所有位置的运动目标同时进行局部自适应滤波, 并可一次对该速度下的局部滤波器输出结果进行相干积累. 接下来对这两个步骤进行详细讨论.

### 3.2 与位置参数无关的局部自适应滤波器的设计

根据式(8)、(25)可知: 在频率-多普勒域局部滤波器中, 局部自适应滤波器的最优权值与其下视角  $\varphi$  有关, 弱依赖于斜距参数的.

为了得到与目标位置参数无关的自适应滤波器, 本节将脉冲压缩后的回波数据沿距离向均匀分块, 基于分块后的数据进行自适应处理抑制杂波. 设脉冲压缩后的回波数据沿距离向均匀分为  $L_r$  块, 分块后的回波数据对应的下视角变化范围较小, 从而可用该段回波数据中心斜距对应的下视角  $\varphi_i$  近似表示. 这样, 即得到了与目标位置参数无关的导向矢量.

将脉冲压缩后的回波数据沿距离向分段之后, 更大的好处是方便了杂波噪声协方差矩阵的估计. 假设不同距离块对应的杂波数据是同分布的, 那么不同距离块的数据都经过 2DFFT 变换后, 在频率-多普勒域后仍然是同分布的. 于是, 对于任意一块回波数据, 其  $(f_l, fa_m)$  处的杂波噪声协方差矩阵均可通过下式进行估计:

$$\hat{\mathbf{R}}_i(f_l, fa_m) = \frac{1}{L_r - 1} \sum_{j=1, j \neq i}^{L_r} \mathbf{c}_j(f_l, fa_m) \mathbf{c}_j^H(f_l, fa_m) \quad (28)$$

其中  $\mathbf{c}_j(f_l, fa_m)$  为第  $j$  块回波数据  $(f_l, fa_m)$  处的观测值, 为了保证  $\hat{\mathbf{R}}_i(f_l, fa_m)$  估计的有效性, 必须保证  $L_r \geq 2N$ .

第  $i$  块数据经过局部自适应滤波后的输出为:

$$\begin{aligned} Y_i(f_l, fa_m; v_x, v_y) &= \tilde{\mathbf{W}}^H(f_l, fa_m) X_i(f_l, fa_m) \\ &= \tilde{\mathbf{S}}_i^H(f_l, fa_m) \hat{\mathbf{R}}_i^{-1}(f_l, fa_m) X_i(f_l, fa_m) \end{aligned} \quad (29)$$

### 3.3 与位置参数无关的局部滤波器输出结果相干积累方法

在频率-多普勒域进行局部自适应处理之后, 得到

局部自适应处理后的频率-多普勒域图像  $Y_i(f, fa; v_x, v_y)$ . 设场景中存在速度为  $(v_x, v_y)$ , 位置参数为  $(X_T, R_{ST})$  的运动目标  $P$ , 该目标在  $Y_i(f, fa; v_x, v_y)$  上的信号可以表示为:

$$\begin{aligned} & A(f, fa; v_x, v_y) \\ &= \frac{2f/c}{\gamma \sqrt{(2f/c)^2 - (fa/V)^2}} \\ & \cdot \exp\{-j2\pi X_T \cdot \frac{fa}{V} - j2\pi R_{ST} \cdot \sqrt{(2f/c)^2 - (fa/V)^2}\} \end{aligned} \quad (30)$$

对  $Y_i(f, fa; v_x, v_y)$  上的运动目标信号进行相干积累的过程, 实际上就是频率-多普勒域的运动目标成像过程.

类似于静止目标的波数域成像算法<sup>[14]</sup>, 本节采用频率-多普勒域插值加二维逆 FFT 的方法对运动目标信号进行相干积累, 具体实现过程可参见文献[15]. 本文仅给出频率-多普勒域插值公式:

$$\begin{cases} k_x = \frac{2\pi fa}{V} \\ k_r = 2\pi \sqrt{(2f/c)^2 - (fa/V)^2} \end{cases} \quad (31)$$

经过频率-多普勒域插值、二维逆 FFT、幅度归一化之后, 可得速度参数为  $(v_x, v_y)$  的运动图像, 记为  $Y_i(x, r; v_x, v_y)$ . 由于这几个步骤均与运动目标的位置参数无关,  $Y_i(x, r; v_x, v_y)$  中速度参数为  $(v_x, v_y)$  的所有位置运动目标均得到了聚焦.

### 3.4 基于频率多普勒域宽带长 CPI STAP 处理的运动目标检测和参数估计方法

在以上的分析基础上, 给出基于频率多普勒域宽带长 CPI STAP 处理的运动目标检测和参数估计方法, 其处理流程如图 2 所示, 其中局部 STAP 处理、局部 STAP 处理结果相干积累等步骤前面已进行了说明. 经过这两步处理后,  $Y(r, x; v_x, v_y)$  中只包含了速度为  $(v_x, v_y)$  的运动目标. 若  $Y(r, x; v_x, v_y)$  中  $(R_T, X_T)$  位置处的幅度高于检测门限, 则可判断该处存在速度参数为  $(v_x, v_y)$  的运动目标. 但是, 由于宽带长 CPI STAP 处理过程只抑制了杂波, 而并没有抑制其它速度的运动目标,  $Y(r, x; v_x, v_y)$  中可能包含其它速度的运动目标. 由于当宽带长 CPI STAP 处理时, 所利用的速度参数和运动目标真实速度参数最接近时, 运动目标的聚焦程度最好, 峰值能量最大, 于是在“多速度综合”步骤, 根据“最佳聚焦”和“能量最大”准则去除  $Y(r, x; v_x, v_y)$  中其它速度运动目标.

上述方法可一次检测出场景中所有位置是否存在某速度的运动目标, 其中局部 STAP 处理过程运算量为  $LMN^3$  次, 局部 STAP 处理结果的相干积累运算量为

$LM \log_2(LM)$  次, 依某一速度进行一次完整的频率多普勒域宽带长 CPI STAP 处理所需运算量为  $LM(N^3 + \log_2(LM))$  数量级, 和一次距离迁徙(RMA) SAR 成像过程运算量相当.

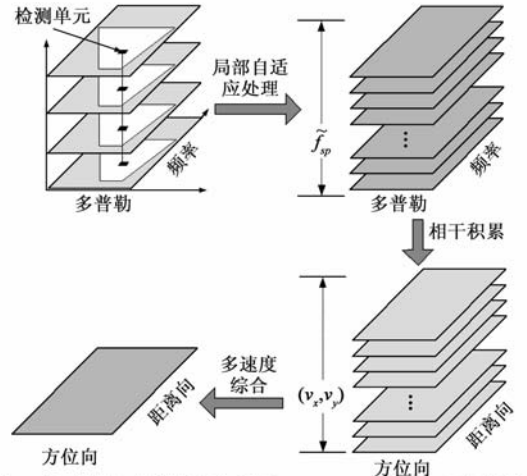


图2 基于频率多普勒域宽带长CPI STAP的运动目标检测和参数估计流程

## 4 实验

由于目前还没有可利用的多通道 SAR 实测回波数据, 本节将已有的单通道实测回波数据抽样, 根据空时等效原理产生模拟多通道杂波数据, 然后在其上叠加仿真产生的多通道运动目标信号和杂波, 这样即可得到包含运动目标信号、杂波、噪声的多通道回波数据, 其中通道一数据成像后结果如图 3(a)所示.

表 1 九个运动目标的速度和初始位置参数

目标	速度 m/s		初始位置 m	
	$v_x$	$v_y$	$x_T$	$y_T$
1	0.74	-2.91	770.0	11558.7
2	1.24	-4.84	740.0	11687.7
3	1.54	-3.69	630.0	72059.5
4	2.32	-5.53	550.0	12268.6
5	-18.83	6.75	1300.0	11618.0
6	-15.06	5.40	1100.0	11740.8
7	-11.30	4.05	850.0	11839.3
8	0.00	7.00	900.0	11606.5
9	0.00	1.00	900.0	12155.1

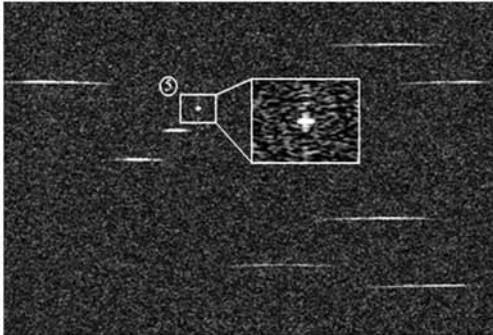
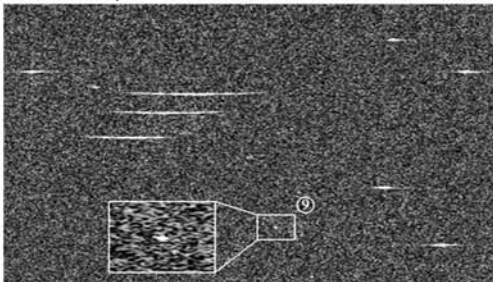
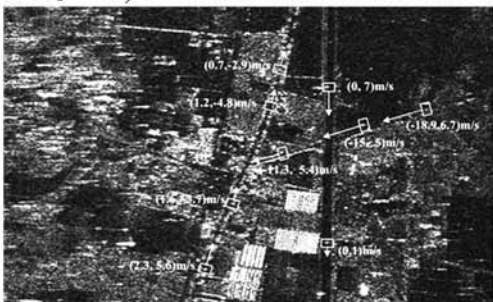
将产生的三通道回波数据分别进行距离压缩, 然后变换到频率多普勒域, 利用本文提出的空间-频率-多普勒三维自适应方法进行杂波抑制和运动目标检测实验. 基于空间-频率-多普勒三维自适应方法进行运动目标检测时, 需要对  $(v_x, v_y)$  进行二维搜索. 当依目标 5、目标 9 对应的速度进行空间-频率-多普勒三维自适应处理时, 其结果分别为图 3(b)、(c)所示, 其中图像幅度显示的动态范围为 -50dB ~ 0dB. 目标 5 在图 3(b)上、目标 9 在图 3(c)上的  $SINR_{out}$  分别达到了 45dB 和 35dB.

将 9 个速度对应的长 CPI STAP 后图像进行多速度图像综合,多速度综合图像上目标 1~9 均为聚焦的.检测出九个运动目标后,估计出目标的速度和初始位置参数后,计算观测时间段对应的中心时刻运动目标位置.根据该位置,将聚焦后的运动目标进行重新定位(依观测时间段对应的中心时刻定位),并将其和场景图像叠加,结果显示如图 3(d)所示.

各目标的方向向速度和距离向速度估计误差均小于 0.1m/s,各目标定位误差也小于 1m/s,九个目标均聚



(a) 通道1成像结果

(b) 依  $v_x = -18.9\text{m/s}, v_y = 6.7\text{m/s}$  进行维自适应处理的输出结果(-50dB结果)(c) 依  $v_x = 0\text{m/s}, v_y = 1\text{m/s}$  进行进行方法的输出结果(-50dB结果)

(d) 聚焦并重新定位后的运动目标

图3 空间-频率-多普勒三维自适应处理过程

焦显示于道路上.

## 5 性能分析

### 5.1 杂波改善因子 (Improved Factor, IF)

输出信杂噪比( $\text{SINR}_{\text{out}}$ )是直接决定运动目标检测能力的量.根据检测理论,当  $P_{fa}$  一定时,  $\text{SINR}_{\text{out}}$  越高,  $P_D$  越高<sup>[3]</sup>.对于非起伏杂波,当输出信杂噪比达到 -15dB 以上,即可保证在  $P_{fa} = 1e-6$  的情况下,  $P_D$  达到 0.95 以上.

本文所提空间-频率-多普勒三维自适应方法的 IF 可以表示为:

$$\begin{aligned} \text{IF} &= \frac{\text{SINR}_{\text{out}}}{\text{SINR}_{\text{in}}} = \mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S} \cdot \frac{\sigma_c^2 + \sigma_n^2}{\sigma_s^2} \\ &= \frac{\sigma_c^2 + \sigma_n^2}{\sigma_s^2} \cdot \left\{ \sum_l \sum_m |A(f_l, fa_m)|^2 \right. \\ &\quad \left. \cdot \tilde{\mathbf{S}}^H(f_l, fa_m) \mathbf{R}^{-1}(f_l, fa_m) \tilde{\mathbf{S}}(f_l, fa_m) \right\} \quad (32) \end{aligned}$$

其中式(32)求和均在运动目标的频率多普勒域支撑域上进行.

基于本文 4.1 部分所产生的多通道 SAR 回波数据,计算空间-频率-多普勒三维自适应方法的 IF,绘出图 4 所示,从该图可以看出:

(1)空间-频率-多普勒三维自适应方法的杂波改善能力远远超过传统方法图 4 中 IF 改善因子最大达到了 75dB,而 DPCA 和 CSI 方法能够达到的理论改善因子不超过 50dB,实际中一般仅为 20dB 左右;在同样的系统参数下,传统短 CPI STAP 方法的改善因子也不超过 60dB.

(2)空间-频率-多普勒三维自适应方法可检测径向速度为零(但切向速度不为零)的运动目标

即使是距离向速度为零的目标,若其方位向速度不为零,也可达到较高的改善因子.以距离向速度为零,方位向速度为 5m/s 的运动目标为例,它在图 4 中的改善因子超过了 50dB,这表明长 CPI STAP 方法具备检测径向速度为零(但切向速度不为零)的运动目标的能力.

(3)空间-频率-多普勒三维自适应方法可消除天线稀疏放置引起的盲速现象

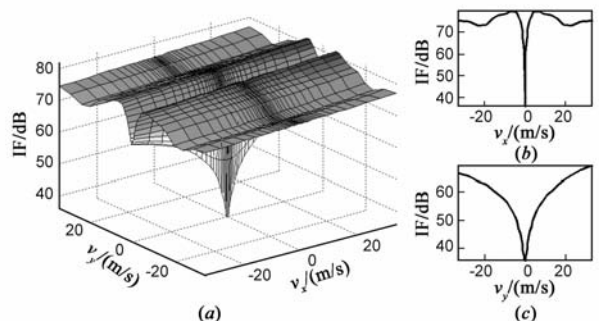


图4 本文所提空间-频率-多普勒三维自适应方法的IF

图 4 中天线的间距均远大于半波长,但是仍未出现盲速现象.这是因为不同频率和不同观测角度对应的盲速并不相同,对于多通道低频 UWB SAR 系统的波束角和频率范围很大,空间-频率-多普勒三维自适应处理包含的多频和多角度综合机制,正好消除了盲速的影响.

## 5.2 输出信杂噪比损失(SINRLoss)

当进行空间-频率-多普勒三维自适应处理时,若导向矢量的速度参数和运动目标的真实速度参数不匹配,此时自适应滤波器的输出相比速度无失配时,存在一定的输出信噪比损失.速度失配引起的输出信杂噪比损失(SINRLoss)可以看作是衡量速度区分能力的量,若 SINRLoss 随速度误差变化越快,滤波器对不同速度运动目标的区分能力越强.

对于速度为 $(\hat{v}_x, \hat{v}_y)$ 的运动目标,若以参数 $(v_x, v_y)$ 进行空间-频率-多普勒三维自适应处理,将速度失配时记为 SINRLoss $(v_x, v_y; \hat{v}_x, \hat{v}_y)$ :

$$\text{SINRLoss}(v_x, v_y; \hat{v}_x, \hat{v}_y) = \frac{|\hat{\mathbf{S}}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}|^2}{\mathbf{S}^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{S}}^H \mathbf{R}^{-1} \hat{\mathbf{S}}} \quad (33)$$

其中  $\mathbf{S}$  为 $(v_x, v_y)$ 对应的导向矢量, $\hat{\mathbf{S}}$  为 $(\hat{v}_x, \hat{v}_y)$ 对应的导向矢量.

基于本文 4.1 部分所产生的多通道 SAR 回波数据,计算空间-频率-多普勒三维自适应方法的 SINRLoss.其中 $(\hat{v}_x, \hat{v}_y)$ 取为将目标 4 所对应的速度,绘出不同速度 $(v_x, v_y)$ 所对应的 SINRLoss 如图 5 所示.

可看出:

(1) SINRLoss 在  $v_x = 2.3\text{m/s}$ ,  $v_y = -5.5\text{m/s}$  时, SINRLoss 达到最大;而在  $v_x = 0$ ,  $v_y = 0$  处, SINRLoss 达到最小值  $-78\text{dB}$ .这表明空间-频率-多普勒三维自适应处理器能在目标真实速度处形成峰值,在零速度处形成凹口;

(2)  $v_x$  和  $\hat{v}_x$  相差约  $0.1\text{m/s}$ ,  $v_y$  和  $\hat{v}_y$  相差约  $3\text{m/s}$  时, SINRLoss 降为  $-3\text{dB}$  左右,因此,若将  $-3\text{dB}$  峰值高度定义为速度分辨率,那么该实验中  $v_x$  和  $v_y$  的分辨率约为  $0.1\text{m/s}$  和  $3\text{m/s}$ ;

(3) SINRLoss 虽然出现了几个虚假峰,但虚警峰的

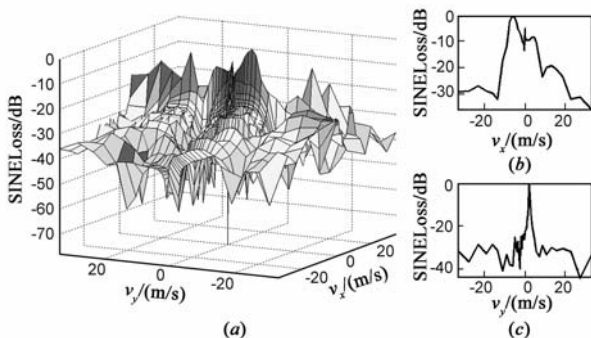


图5 空间-频率-多普勒自适应滤波器的SINRLoss

峰值低于  $-10\text{dB}$ ,这表明空间-频率-多普勒三维自适应处理器能够消除天线稀疏放置引起的重复检测现象.这是因为不同频率和不同观测角度对应的重复检测速度并不相同,对于多通道低频 UWB SAR 系统的波束角和频率范围很大,空间-频率-多普勒三维自适应处理包含的多频和多角度综合机制,正好消除重复检测的影响.

## 6 结论

本文提出的频率多普勒域的长 CPI STAP 方法突破了传统 STAP 方法对“目标和载机之间的相对运动不超过一个距离分辨单元”的限制,能够适应运动目标沿时间维/空间维的跨距离单元走动,因此可以利用长相干积累时间和长基线,达到远高于传统 STAP 方法的输出信杂噪比.该方法还可以消除宽带 SAR 系统引起的色散,并利用 SAR 系统大带宽的特点消除稀疏基线引起的盲速,从而可适应更灵活的阵列天线配置.当长 CPI 内雷达相对载机观测角度发生一定变化时,该方法还可检测距离向速度为零但方位向速度不为零的运动目标.本文方法可一次检测场景中所有位置是否存在待检测速度的运动目标,且运算量仅和一次 RMA SAR 成像算法相当,检测效率高,运动目标检测能力和速度分辨能力强.

## 参考文献

- [1] Lars M H Ulander, Hans Hellsten, G Stenstrom. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection[J]. IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 760 - 776.
- [2] Lar Ulander, M Blom. The VHF UHF-band LORA SAR and GMTI systems[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5095: 206 - 215.
- [3] William L Melvin, Gregory A Showman, R K Hersey. Adaptive radar: Beyond the RMB rule[A]. IEEE Radar Conference 2008 [C]. Rome: IEEE, 2008. 670 - 677.
- [4] 吴洪, 王永良, 武文. 非均匀杂波环境下线性预测类空时自适应处理性能分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(1): 86 - 92.
- [5] J H G. Ender. Space-time processing for multichannel synthetic aperture radar[J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1999, 11(1): 29 - 38.
- [6] 杨凤凤. 天基分布式 GMTI 技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [7] Ali F Yegulalp. Wideband, Long-CPI GMTI[R]. Lexington, Massachusetts, Lincoln Laboratory, 2004.
- [8] 杨志伟, 廖桂生, 曾操. 基于联合特征空间投影的 SAR 图像域杂波抑制[J]. 电子学报, 2007, 35(12): 2298 - 2301.

- Yang Zhi-wei, Liao Gui-sheng, Zeng Cao. Clutter suppression based on joint eigenspace projection in synthetic aperture radar image domain[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(12): 2298 – 2301. (in Chinese)
- [9] 李真芳, 保铮, 王彤. 分布式小卫星 SAR 系统地面运动目标检测方法[J]. *电子学报*, 2005, 33(9): 1664 – 1666.
- Li Zhen-fang, Bao Zheng, Wang Tong. Ground moving target indication for distributed small satellite SAR systems[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2005, 33(9): 1664 – 1666. (in Chinese)
- [10] H el ene Oriot, B Vaizan. Preliminary results on ground moving target detection with L band data acquired with RAMSES sensor[A]. *EUSAR 2006* [C]. Dresden, Germany: IEEE Press, 2006. 1 – 4.
- [11] J K Jao, A F Yegulalp, S Ayasli. Unified Synthetic Aperture Space Time Adaptive Radar (USASTAR) Concept[R]. Lexington, Massachusetts: Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [12] Chang Yulin, Zhou Hong, Huang Xiaotao, Zhou Zhimin. The representation of moving targets in multi-channel UWB SAR images and its application in the generalization of image domain GMTI methods[A]. 9th International Conference on Signal Processing (ICSP' 08) [C]. Beijing: IEEE Press, 2008. 2525 – 2528.
- [13] L Ljung. *System Identification, Theory for the User*[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1999.
- [14] 保铮, 邢孟道, 王彤. *雷达成像技术*[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [15] J K Jao. Theory of synthetic aperture radar imaging of a moving target[J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2001, 39(9): 1984 – 1991.

#### 作者简介

常玉林 男, 1980 年生, 湖北宜昌人, 毕业于国防科学技术大学电子科学与工程学院. 主要从事 SAR 成像、多通道 SAR/GMTI、无源定位、辐射源识别、SAR 图像理解等方面的研究工作.

E-mail: tsingle-cyl@yahoo.com.cn

周红 女, 1982 年生, 广西桂林人, 现为国防科学技术大学电子科学与工程学院在读博士研究生, 主要从事 SAR 成像、多通道 SAR 运动目标指示等方面的研究.

黄晓涛 男, 1972 年生, 湖北武汉人, 博士, 国防科学技术大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要从事 RFI 抑制、SAR 信号处理、阵列信号处理、谱分析等信号与信息领域的工作.

周智敏 男, 1957 年生, 河北易县人, 中国电子学会高级会员, 国防科学技术大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 主要从事 SAR 系统设计、高速实时信号处理等领域的研究工作.