

一种合成孔径雷达对地面运动目标成像和精确定位的算法¹

盛 蔚 毛士艺

(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100083)

摘 要: 该文针对正侧视合成孔径雷达工作体制下运动目标成像、定位问题进行研究,分析了运动目标成像与静止目标成像的异同,提出利用距离历程拟合,结合静物场景成像的部分已知信息(地面道路或者桥梁的方向),准确估计 $t = 0$ 时刻目标的坐标和两维速度,不仅为运动目标精确成像提供了信息,同时得到目标运动轨迹相对地面场景的准确位置,该文提出的方法对于目标在照射孔径内的位置没有特殊假设(以往研究的时频分析方法需要假设目标在 $t = 0$ 时刻位于载机的正侧方向),最后定量分析了不同形式匹配滤波器对运动目标回波成像的效果以及采用静止目标匹配滤波器对运动目标回波进行成像处理而产生的移位和散焦影响。

关键词: 合成孔径雷达, 运动目标成像, 目标运动参数估计, 匹配滤波

中图分类号: TN951, TN958 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)04-0598-09

An Effective Method for Ground Moving Target Imaging and Location in SAR System

Sheng Wei Mao Shi-yi

(Electrical and Information Engineering College, BeiHang University, Beijing 100083, China)

Abstract This paper addresses the research of ground moving target imaging and positioning in Synthetic Aperture Radar (SAR) system. First it analyzes the difference between ground moving target imaging process and that for stationary ones. The method brought forward in this paper uses the direction of road and bridge of the gazing ground as prior known knowledge, and it can accurately estimate the coordinates and velocities of the moving targets while $t = 0$. It means that the method can get the position of the moving targets and image them with the same precision as stationary targets imaging in SAR system. There is no special postulation in the proposed algorithm contrast to the conventional method which always assumes that the targets located on the vertical side of SAR at the point of $t = 0$. Finally two different forms of matched filters are given out for moving targets imaging and the different results are analyzed. The smearing and position shifting effect when using stationary target matched filter to process the moving target echo is also analyzed at the last part.

Key words Synthetic Aperture Radar (SAR), Ground moving target imaging, Moving parameters estimation, Matched filter

1 引言

国内外对 SAR 体制下的地面运动目标成像问题进行了深入的研究。总体而言,这一问题涉及对以下三方面问题的探讨^[1-3]: 首先,地面杂波的面积大、频谱范围广,运动目标常常在时域和频域都淹没在地杂波中,必须从中分离出运动目标的信号。目前研究人员的注意力多集中在采用多通道、时空处理的方法^[1],即通过时空信息联合分析,将运动目标信号从地杂波中分离出来;其次,为了清晰地对运动目标成像,还需要精确估计目标的各项运动参数,包括坐标、速度、加速度等等。这一环节具有两层意义:(1)只有精确估计目标运动参数,并且将运动参数

¹ 2002-09-23 收到, 2003-07-02 改回

与时间结合, 即估计运动参数的时间历程才能确定每时每刻运动目标相对静物场景的位置, 这对于成像和图像后处理非常重要; (2) 估计每个运动点目标精确坐标的前提下, 可获得面上每点的正确相对位置, 解决运动目标变形、模糊的问题。估计目标运动参数的途径有很多, 其中时频分析法是常用的方法之一, 该方法无需知道回波之外的信息即可估计目标运动参数。缺点是运算量较大; 对多目标回波信号的分辨能力有限; 能够估计的参数个数少。本文针对时频分析法的 3 个缺陷提出了改进的目标运动参数估计方法: 地面运动目标成像的第三步就是根据估计的运动参数设计距离和方位两维的匹配滤波器, 对每个点聚焦成像。以往的研究处于将目标尽可能清晰成像的水平, 并不非常注重成像位置以及目标随时间的坐标变化, 也就是说注重发现目标, 并不注重分析目标位置随时间的变化; 以往的研究还有一个特点即假设目标在数据采集时段的中点位于载机的正侧方向, 这一近似虽然有一定道理, 但在精确成像及定位的要求下不适用。针对地面运动目标成像中存在的问题, 本文着重进行了以下几个问题的研究: (1) 条带式 SAR 体制下, 定量分析运动目标回波形式; (2) 采用距离历程拟合法对初始位置、径向速度、法向速度均未知的运动目标估计其运动参数; (3) 运动目标距离徙动校正过程分析以及与静止目标距离徙动校正的比较; (4) 距离历程拟合法估计目标运动参数与时频分析估计法的效率和精度对比; (5) 运动目标成像位置与匹配滤波器形式的关系; (6) 定量分析静止目标匹配滤波器对运动目标回波成像处理的移位和散焦影响。

本文分析均针对匀速运动目标成像问题, 当载机与目标均匀速运动时, 或者照射孔径比较小即可满足。文中公式中符号对应物理意义:

t 为时间; n 为方位向采样时刻序号; f_c 为载频; T_p 为发射脉冲宽度; T 为脉冲重复周期; k_r 为距离向调频率; $R(n)$ 为在每个采样时刻目标-雷达距离; $R(t)$ 为目标-雷达距离连续表达式; f 为距离向频率; f_a 为方位向频率; A, A', A'' 为信号幅度; v_r, v_c 为目标径向/法向速度; T_s 为合成孔径时间; v_a 为载机速度; i 为正整数, 表示运动目标的序号; N 为目标个数。

2 地面运动目标回波形式分析

以下讨论均在斜距平面内进行。无论静止目标还是运动目标的回波都是 SAR 发射信号的延迟, SAR 发射的信号、点目标回波信号、经过变频的信号依次表示为式 (1)-(3),

$$s_t(t, n) = \text{rect}\left(\frac{t - nT}{T_p}\right) \exp(j2\pi f_c t) \exp[j\pi k_r (t - nT)^2] \quad (1)$$

$$s_r(t, n) = \text{rect}\left(\frac{t - nT - 2R(n)/c}{T_p}\right) \cdot \exp[j2\pi f_c (t - 2R(n)/c)] \exp[j\pi k_r (t - nT - 2R(n)/c)^2] \quad (2)$$

$$\hat{s}_r(\hat{t}, n) = \text{rect}\left(\frac{\hat{t} - 2R(n)/c}{T_p}\right) \cdot \exp[j2\pi f_c (-2R(n)/c)] \exp[j\pi k_r (\hat{t} - 2R(n)/c)^2] \quad (3)$$

回波信号的 $\exp[-j2\pi f_c 2R(n)/c]$ 代表方位向信息, 常常称之为方位向回波; $\exp[j\pi k_r (\hat{t} - 2R(n)/c)^2]$ 代表距离向信息, 称之为距离向回波。成像的第一步是对回波进行距离向压缩, 首先对变频后的回波进行距离向傅里叶变换, 即对式 (3) 中的 $\hat{t} = t - nT$ 进行傅里叶变换:

$$\begin{aligned} s(f, n) &= A \exp[-j2\pi f_c \cdot 2R(n)/c] p(f) \exp[-j2\pi f \cdot 2R(n)/c] \\ &= Ap(f) \exp[-j2\pi (f_c + f) \cdot 2R(n)/c] \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $p(f)$ 是 $\exp(j\pi k_r \hat{t}^2)$ 的傅里叶变换, 利用相位驻留原理可以得到, $|p(f)| = (1/\sqrt{k_r}) \text{rect}[f/(k_r T_p)]$, $\text{phase}[p(f)] = -\pi f^2/k_r + \pi/4$ 。忽略常数相位的影响, 距离向匹配滤波器:

$$s_{\text{ref}}(f, n) = \text{rect}\left(\frac{f}{k_r T_p}\right) \exp(j\pi f^2/k_r) \quad (5)$$

距离向压缩之后的信号:

$$\begin{aligned} s_{\text{rc}} &= \text{FFT}^{-1}\{s(f, n)s_{\text{ref}}(f, n)\} \\ &= \text{FFT}^{-1}\left[A' \text{rect}\left(\frac{f}{k_r T_p}\right) \exp[-j2\pi f \cdot 2R(n)/c] \exp[-j2\pi f_c \cdot 2R(n)/c]\right] \\ &= A'' \text{sinc}\left(\frac{\hat{t} - 2R(n)/c}{T_p}\right) \exp[-j2\pi f_c \cdot 2R(n)/c] \end{aligned} \quad (6)$$

点目标回波经过距离向压缩之后在对应 $2R(n)/c$ 的位置出现尖峰。下面来分析静止目标和地面运动目标在经过相同的距离向压缩过程之后的不同, 主要体现在距离历程的不同上。

从图 1 可以看出, 在理想飞行条件下, 运动目标与载机之间的距离 (连续形式):

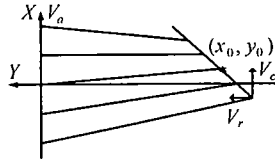


图 1 运动目标与载机斜距平面相对位置示意图

$$R(t) = \sqrt{(x_a - x_p)^2 + (y_a - y_p)^2} \quad (7)$$

$$x_a = v_a t, y_a = 0, x_p = x_0 + v_c t, y_p = y_0 + v_r t \quad (8)$$

其中 (x_a, y_a) , (x_p, y_p) 分别代表载机和点目标的坐标, (x_0, y_0) 代表目标在 $t = 0$ 时刻的位置, $-T_s/2 < t < T_s/2$ 。对距离 (连续形式) 在 $t = 0$ 时刻的临域进行 Taylor 展开, 其 3 次 (包括 3 次) 以上的高阶项均以距离的三次以上的幂次为分母, SAR 注视的条带一般距离都比较远, 因此忽略 3 次 (包括 3 次) 以上的高阶项:

$$R(t) = R(0) + \dot{R}(0)t + \frac{1}{2}\ddot{R}(0)t^2 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} R(0) &= \sqrt{(x_0^2 + y_0^2)}, \dot{R}(0) = \dot{R}(t)|_{t=0} = (x_0^2 + y_0^2)^{-\frac{1}{2}}[-x_0(v_a - v_c) + y_0 v_r], \\ \ddot{R}(0) &= \ddot{R}(t)|_{t=0} = (x_0^2 + y_0^2)^{-\frac{1}{2}}[(v_a - v_c)^2 + v_r^2] \end{aligned} \quad (10)$$

距离是时间的二次函数, 将式 (9), (10) 代入距离向压缩后的信号表达式 (6) 可知 s_{rc} 的相位为二次函数, 因此回波在方位向也是线性调频信号。运动目标的距离徙动问题非常严重, 为了校正距离徙动, 并且对目标精确定位, 需要完成目标运动参数的估计和距离徙动校正。

3 目标运动参数估计及距离徙动校正

3.1 估计目标运动参数

引言中已经提到目标运动参数估计的有效方法之一是时频分析法。时频分析法只能估计两个参量, 本文提出一种根据目标的距离历程估计目标运动参数的方法, 这种方法能够估计 4 个目标运动参数。经过距离向压缩之后, 每个方位采样时刻地面运动目标的距离为

$$R(n) = R_{\min} + \rho A(n) - \text{int}\left[\frac{T_s}{2} \text{PRE}\right] < n < \text{int}\left[\frac{T_s}{2} \text{PRE}\right] \quad (11)$$

其中 ρ 代表距离分辨单元的大小, R_{\min} 表示每行回波记录的最近点距离, $A(n)$ 表示目标在经过距离向压缩的回波矩阵第 n 行出现的列序号, int 表示四舍五入取整。对 $R(n)$ 进行二次曲线拟合, 得到 3 个系数 a_0, a_1, a_2 :

$$\begin{aligned} R(t) &= a_0 + a_1 t + \frac{1}{2} a_2 t^2, \quad a_0 = \sqrt{(x_0^2 + y_0^2)}, \quad a_1 = (x_0^2 + y_0^2)^{-\frac{1}{2}}[-x_0(v_a - v_c) + y_0 v_r], \\ a_2 &= \frac{1}{2} (x_0^2 + y_0^2)^{-\frac{1}{2}} [(v_a - v_c)^2 + v_r^2] \end{aligned} \quad (12)$$

为了求解 a_0, y_0, v_r, v_c , 需要至少 4 个方程。通过观察地面静物场景的像, 可以确定载机飞行轨迹和目标运动方向之间的几何关系。

例如 SAR 常常是对地面公路、桥梁上的车辆成像, 静物成像过程已经可以确定公路、桥梁等的轮廓, 在此前提下, 我们可以得到目标的两维速度之间的关系。假设 $X, Y, H, V, \text{ag12}$ 分别表示载机飞行轨迹在地面的投影、地面垂直 X 的坐标轴、飞行高度、目标在地面的运动速度、目标速度相对 Y 轴的夹角。SAR 下视角:

$$\begin{aligned} \text{ag11} &= \arcsin(H/R_0), \quad v'_c = v \sin(\text{ag12}), \quad v'_r = v \cos(\text{ag12}) \\ v_c &= v'_c = v \sin(\text{ag12}), \quad v_r = v'_r \cos(\text{ag12}) \cos(\text{ag11}) \end{aligned} \quad (13)$$

$$v_c = \frac{v_r}{\cos(\text{ag11})} \tan(\text{ag12}) \quad (14)$$

利用式 (13), (14) 联立可以解得 x_0, y_0, v_r, v_c 。

3.2 与时频分析法估计运动参数比较^[3-5]

时频分析近年来获得了研究人员的高度重视, 用于 SAR 体制地面运动目标检测时, 时频分析方法需要首先完成距离向的徙动校正, 提取同一距离门内方位向的信号进行分析; 时频分析的结果是信号频率随时间的变化规律, 以维格纳分布为例, 对于 SAR 系统涉及的线性调频信号而言, 维格纳分布集中在时频平面由信号的中心频率和调频率决定的直线上, 通过 Hough 变换, Radon 变换等方法可以提取中心频率和调频率两个信息。从前面的分析得知地面运动目标方位向回波信号满足线性调频特性, 其中心频率、调频率分别对应距离历程的一阶、二阶导数。而距离历程的一阶、二阶导数与目标 $t = 0$ 时刻相对 SAR 的位置 $(x_p(0), y_p(0))$, 速度 (v_r, v_c) 有关, 也就是说, 4 个目标运动参数共同决定了目标方位向回波信号的两个参数: 中心频率和调频率。可见即使采用时频分析法估计了中心频率和调频率两个参数 (仅有两个方程) 也无法精确估计目标的 4 个运动参数。以往的研究利用 SAR 体制几何关系的特征, 假设 $x_p(0) \approx 0$, $y_p(0) \approx -R_0$ (负号是坐标定义的方向导致, 见图 2), 即假设目标在 $t = 0$ 时刻位于载机的正侧方向, 并且认为位于成像条带的中心, 将方位向回波的形式简化为仅含有两个未知数 (v_r, v_c) 的形式:

$$s_{rc} = \exp \left\{ -j \left[\frac{4\pi v_r}{\lambda} t + \frac{2\pi [(1 - v_c/v_a)^2 + (v_r/v_a)^2] v_a^2 t^2}{R_0 \lambda} \right] \right\} \quad (15)$$

通过估计式 (15) 的中心频率、调频率计算出 (v_r, v_c) ，其本质是本文所提出的方法的近似，或者说是

$$x_0 \ll y_0 \approx R_0, \quad R_0 \approx y_0, \quad a_1 = v_r, \quad a_2 = \frac{1}{2}[(v_a - v_c)^2 + v_r^2]/R_0 \quad (16)$$

的一种特殊情况。总之，与以往研究中的时频分析估计目标运动参数与本文提出方法相比的结果如下：

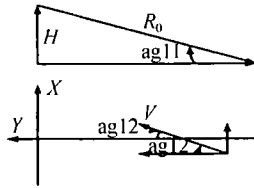


图 2 地面运动目标速度方向示意图

(1) 本文提出的方法在距离徙动校正之前、之后都可以进行，通过距离历程拟合估计目标运动参数；时频分析法必须经过距离徙动的矫正，并且距离徙动校正的程度直接影响分析的精度和有效性；

(2) 时频分析方法仅能估计两个参数，因此必须根据 SAR 的几何关系特征，将描述目标运动的 4 个未知参数简化为两个未知参数并估计出来。这种简化（目标在 $t = 0$ 时刻位于载机的正侧方向，并且认为位于成像条带的中心）在很多情况下并不能很好成立。

3.3 距离徙动校正^[6]

对地面运动目标的回波进行距离向压缩之后，必须校正其距离徙动，运动目标距离徙动的原因与程度都与静止目标不同，见图 3。对静止目标而言，A 点表示了在整个合成孔径时间 T_s 内，目标相对于雷达的最短距离，其他各点相对 A 点的偏移可以根据载机和目标的相对位置以及载机的速度得到，因此所有的静止点目标都常常选择 A 点作为基准校正距离徙动，最终可以得到符合地面几何比例关系的图像。

本文针对任意起始位置、任意速度的运动目标成像以及精确定位问题， $t = 0$ 不一定是目标相对于雷达距离最短的时刻，目标甚至不一定在雷达的正侧方向；其他时刻目标距离与 $t = 0$ 时刻目标距离的差也不能确定，因为目标距离载机的位置由载机和目标运动共同决定。理论上讲任意时刻的距离为基准校正徙动都是可以成像的。为了统一，同时也为了成像与定位联系起来，每个运动目标距离徙动校正也规定以 $t = 0$ 时刻距离为基准，即图 3 中的 B 点，这预示着运动目标将成像在 $t = 0$ 时刻的距离上。

运动点目标在方位向的位置虽然同样与多普勒频率有关，但运动目标的多普勒频率不仅与载机速度、相对载机飞行方向的角度有关，还与自身的运动速度和角度有关。每个运动点目标的速度是不同的，未知的。因此运动目标在方位向的位置并不能体现其在地面的几何位置，常常出现能够成像，但位置偏移的情况。为了确定运动目标的位置，必须依据估计 $t = 0$ 时刻的 x_0, y_0, v_r, v_c ，调整匹配滤波器参数，使之对运动目标匹配，纠正散焦和位置偏移。具体过程见下一节分析和仿真结果。

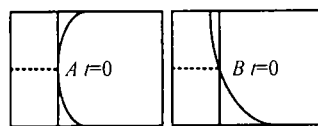


图 3 静止(左)/运动(右)目标距离徙动比较

4 运动目标成像与成像位置分析校正

4.1 运动目标成像

完成距离向压缩和距离徙动校正之后,可以进行方位向的压缩。正如前文所分析的,运动目标的方位向匹配滤波器与静止点目标不同,应该与估计的运动目标参数有关。为了描述方便起见,同时不影响分析的结果,以下的分析忽略幅度和常数相位的影响,方位向回波表示为

$$\begin{aligned} s_{rc} &= \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \left[\dot{R}(0)t + \frac{1}{2} \ddot{R}(0)t^2 \right] \right\} \\ &= \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{\lambda} \frac{1}{2} \ddot{R}(0) \left[2 \frac{\dot{R}(0)}{\ddot{R}(0)} t + t^2 + \left(\frac{\dot{R}(0)}{\ddot{R}(0)} \right)^2 - \left(\frac{\dot{R}(0)}{\ddot{R}(0)} \right)^2 \right] \right\} \\ &= \exp \left\{ -j \frac{2\pi}{\lambda} \ddot{R}(0) \left\{ \left[t + \left(\frac{\dot{R}(0)}{\ddot{R}(0)} \right) \right]^2 - \left(\frac{\dot{R}(0)}{\ddot{R}(0)} \right)^2 \right\} \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

方位向信号也是线性调频信号,相位驻留原理是求解其傅里叶变换的有效方法。根据方位向信号得到方位向匹配滤波器的形式有两种:

$$s_{aref1} = \{\text{FFT}[s_{rc}]\}^* = \exp \left[-j \frac{\pi\lambda}{2\ddot{R}(0)} f_a^2 \right] \exp \left[-j 2\pi f_a \frac{\dot{R}(0)}{\ddot{R}(0)} \right] \quad (18)$$

$$s_{aref2} = \exp \left[-j \frac{\pi\lambda}{2\ddot{R}(0)} f_a^2 \right] \quad (19)$$

经过方位向的匹配滤波可以对运动目标成像,采用不同的匹配滤波器形式会对具体成像的位置产生不同的影响,下面详细分析成像位置与滤波器形式以及运动目标参数之间的关系。另外还将定量地分析采用静止目标匹配滤波器对运动目标回波成像处理时造成的散焦和移位后果。

4.2 成像位置分析与校正^[7]

根据线性调频信号匹配滤波的原理可知:采用式(18),(19)所示的匹配滤波器均能够达到脉冲压缩的效果,即都能够使目标聚焦;不同之处在于如果采用式(18)匹配滤波,中心频率偏移导致的时域移位问题可以得到完全的补偿,成像位置只与信号的时域分布有关,与信号的调频率和中心频率无关,即成像在 $t=0$ 时刻的位置;采用式(19)匹配滤波,成像位置与信号的时域分布、中心频率、调频率都有关系。从频域分析,方位向压缩信号:

$$\begin{aligned} s_a &= \text{IFFT}(\text{FFT}[s_{rc}] \times s_{aref2}) = \text{IFFT} \left\{ \exp \left[j \frac{\pi\lambda}{2\ddot{R}(0)} f_a^2 \right] \exp \left[j 2\pi f_a \frac{\dot{R}(0)}{\ddot{R}(0)} \right] \exp \left[-j \frac{\pi\lambda}{2\ddot{R}(0)} f_a^2 \right] \right\} \\ &= \text{IFFT} \left\{ \exp \left[j 2\pi f_a \frac{\dot{R}(0)}{\ddot{R}(0)} \right] \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

可见,成像的具体位置不仅与 $t=0$ 的位置有关,还与 $\exp \left[j 2\pi f_a \frac{\dot{R}(0)}{\ddot{R}(0)} \right]$ 导致的时延有关, \dot{R} , \ddot{R} 分别对应信号的中心频率和调频率,而信号的中心频率和调频率则由目标的运动参数决定,在斜距远远大于孔径长度的条件下,

$$\dot{R}(0) \approx v_r, \quad \ddot{R}(0) \approx [(v_a - v_c)^2 + (v_r)^2]/R_0 \quad (21)$$

本文的仿真采用了 s_{aref1} 作为运动目标匹配滤波器,因此纠正了目标运动带来的中心频率偏移,消除了中心频率偏移导致的时域移位问题,成像的位置就是 $t=0$ 时刻目标的坐标 (x_0, y_0) 。

具体结果见仿真部分。其次分析采用静止目标匹配滤波器对运动目标回波成像处理所导致的移位和散焦影响。正侧视模式下，静止目标回波信号中心频率等于零。匹配滤波器：

$$s_{\text{aref3}} = \exp\left(-j\frac{\pi\lambda}{2k_s}f_a^2\right), \quad k_s = v_a^2/R_0 \quad (22)$$

k_s 对应静止目标回波调频率，与运动目标回波调频率不匹配。脉压信号：

$$\begin{aligned} s_{a3} &= \text{IFFT}(\text{FFT}[s_{rc}]s_{\text{aref3}}) = \text{IFFT}\left\{\exp\left[j\frac{\pi\lambda}{2\dot{R}(0)}f_a^2\right]\exp\left[j2\pi f_a\frac{\dot{R}(0)}{\dot{R}(0)}\right]\times\exp\left[-j\frac{\pi\lambda}{2k_s}f_a^2\right]\right\} \\ &= \text{IFFT}\left\{\exp\left[j2\pi f_a\frac{\dot{R}(0)}{\dot{R}(0)}\right]\times\exp\left[j\frac{\pi\lambda}{2}f_a^2\left(\frac{1}{\dot{R}(0)}-\frac{1}{k_s}\right)\right]\right\} \end{aligned} \quad (23)$$

等式 (23) 最右端括号中的第一项导致移位；第二项导致散焦。移位和散焦的具体数值与运动目标参数和静止目标匹配滤波器参数有关。

5 仿真

仿真数据：波长 0.03m；天线主波束宽度 1.1667°；载机高度 4000m；下视角 24°；载机速度 50m/s；距离向采样率 240×10^6 Hz；方位向采样率 470 Hz；目标平行载机运动速度 $v_c=7$ m/s；目标垂直载机运动速度 $v_r=5$ m/s； $x_0=5$ m, $y_0=-9772.8$ m；条带中心距离雷达 -9822.8 m。为了更加清晰地认识运动目标成像与静止目标成像的区别，并且了解目标运动的两维速度所产生的不同的散焦、移位效应，本文首先分别假设在 (1) $v_r=0$ m/s, $v_c=7$ m/s, $x_0=5$ m, $y_0=-9772.8$ m；(2) $v_r=5$ m/s, $v_c=0$ m/s, $x_0=5$ m, $y_0=-9772.8$ m；条件下仿真。针对相同的运动目标回波数据，对比静止目标距离-多普勒算法与本文提出的距离历程拟合、参数估计及运动目标成像算法的不同成像效果。成像结果：(图 4~ 图 11 方位向、距离向的坐标单位均为分辨单元个数，三维图像的 z 坐标为经过方位向和距离向压缩的幅度)

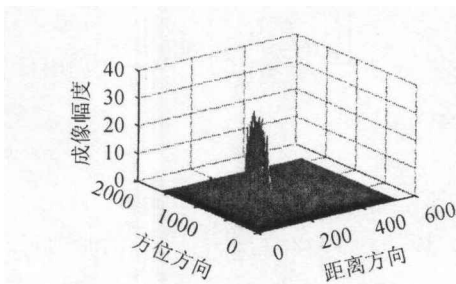


图 4 $v_r=0, v_c=7$, R-D 算法成像

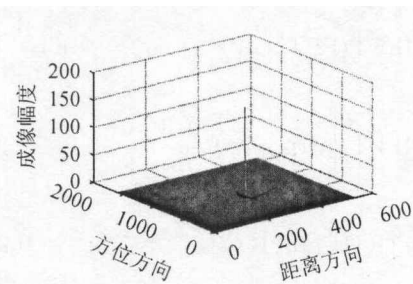


图 5 $v_r=0, v_c=7$, 本文算法成像

图 4、图 5 仿真情况分析：径向速度 $v_r=0$ 的运动目标从上一节的分析可知 $\dot{R}(0)=0$ ，中心频率 $=0$ ，因此采用静止目标匹配滤波器对运动目标回波成像的后果主要是散焦影响，没有移位问题。

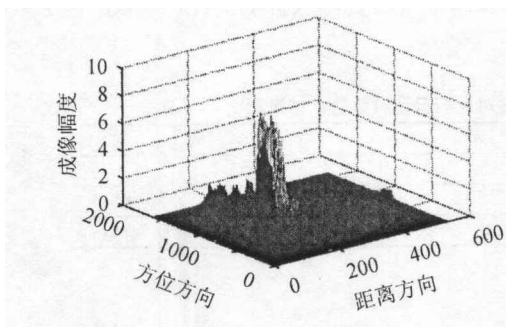


图 6 $v_r = 5, v_c = 0$, R-D 算法成像

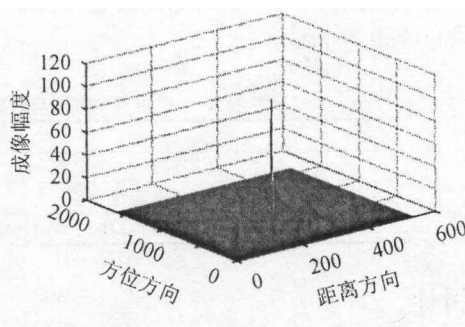


图 7 $v_r = 5, v_c = 0$, 本文算法成像

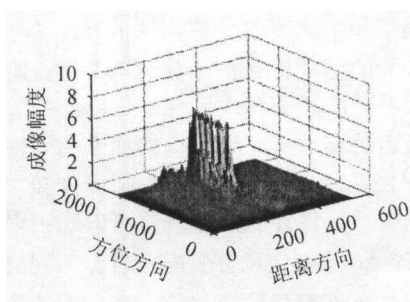


图 8 $v_r = 5, v_c = 7$, R-D 算法成像

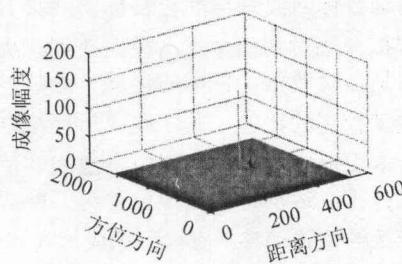


图 9 $v_r = 5, v_c = 7$, 本文算法成像

图 6、图 7 仿真情况分析: $v_r \neq 0, v_c = 0$ 的运动目标从上一节的分析可知 $\dot{R}(0) = v_r \neq 0$, 即中心频率 $\neq 0$, $k_s = v_a^2/R_0 \neq (v_a^2 - v_r^2)/R_0$ 。因此采用静止目标匹配滤波器对运动目标回波成像的后果既有散焦影响, 也有移位问题。

图 8、图 9 仿真情况分析: $v_r \neq 0, v_c \neq 0$ 的一般运动目标成像结果, 仿真中采用本文提出的参数估计算法估计目标运动参数, 与时频分析方法估计目标运动参数的精度进行了比较。

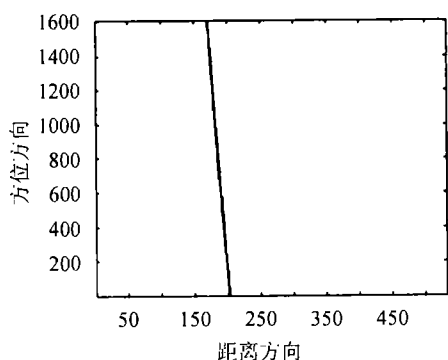


图 10 目标运动对距离徙动的影响

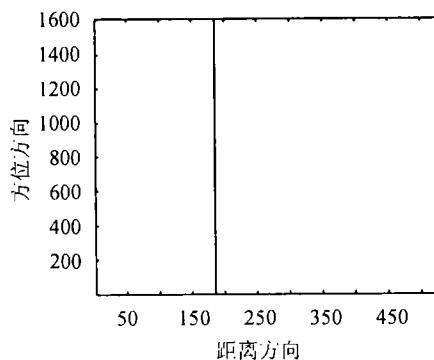


图 11 经过距离向压缩和徙动校正

图 10 表示经过距离压缩, 未经过徙动校正的目标图像, 图 11 为采用本文方法校正距离徙动后的情况。

从图 8 与图 9 的对比可以看出, 对运动目标回波采用与静止目标相同的成像处理方法使得目标散焦和移位问题很突出, 只有正确的估计目标的距离历程, 正确估计目标运动参数, 才能对运动目标清晰成像及定位。

表 1 为 $t = 0$ 时刻目标运动参数估计结果与仿真所采用而真实数据的对比: 距离单位为米; 速度单位为米 / 秒。

表 1 采用本文方法与时频分析法对目标运动参数估计结果对比

	x_0	y_0	v_r	v_c
真实数据	5	-9772.8	5	7
距离历程拟合法估计参数	4.2287	-9847.8	4.9776	7.0023
时频法估计参数 (Wigner Distribution)	0	-9822.8	4.0773	6.4890

6 讨论

本文着重讨论了正侧视 SAR 工作体制下运动目标的成像以及定位问题, 并通过仿真证明了方法的有效性。对以下问题进行了探讨: (1) 条带式 SAR 体制下, 定量分析运动目标回波形式; 运动目标回波是与静止目标回波具有不同中心频率和调频率的线性调频信号; (2) 采用距离历程拟合法对初始位置、径向速度、法向速度均未知的运动目标估计其运动参数; 距离历程拟合法是在时域估计目标的运动学参数; (3) 运动目标距离徙动校正过程分析以及与静止目标距离徙动校正的比较; (4) 距离历程拟合法估计目标运动参数与时频分析估计法的效率和精度对比; 本文提出的距离历程拟合法能够估计 4 个目标运动参数, 并具有较高的精度和更一般的适用性; (5) 运动目标成像位置与匹配滤波器形式的关系; 设计匹配滤波器可以校正由于中心频率导致的位置偏移, 使得目标成像在 $t = 0$ 时刻位置上; (6) 定量分析静止目标匹配滤波器对运动目标回波成像处理的移位和散焦影响, 中心频率的不匹配导致散移位; 调频率的不匹配导致散焦。

参 考 文 献

- [1] Klemm R. Space-Time Adaptive Processing Principles and Application. UK: Short Run Press Ltd., 1998: 1-10, 64-84.
- [2] Ender J, Klemm R. Airborne MTI via digital filtering. *IEE Proc.-Radar, Sonar and Navigation*, 1989, 136(1): 22-28.
- [3] Barbarossa S, et al.. Space-time-frequency processing of synthetic aperture radar signals. *IEEE Trans. on AES*, 1994, 30(2): 341-358.
- [4] Blacknell D, et al.. Geometric accuracy in airborne SAR images. *IEEE Trans. on AES*, 1989, 25(2): 241-258.
- [5] Coe D J, White R G. Moving target detection in SAR imagery: experimental results. IEEE Int. Radar Conf, Alexandria, VA, USA, 1995: 644-649.
- [6] Soumekh M. Moving target detection and imaging using an X band along-track mono-pulse SAR. *IEEE Trans. on AES*, 2002, 38(1): 315-333.
- [7] Moccia A, Rufino G. Space-borne along-track SAR interferometry: performance analysis and mission scenarios. *IEEE Trans. on AES*, 2001, 37(1): 199-213.

盛 蔚: 女, 1972 年生, 讲师, 主要研究方向合成孔径雷达检测地面运动目标、地面多目标跟踪、相控阵雷达系统、阵列信号处理等。

毛士艺: 男, 1937 年生, 教授, 主要研究方向雷达信号处理、图像融合处理技术、阵列信号处理与通信技术等。