发射机固定的双站 SAR 对运动目标的成像¹

任冬晨 汤子跃* 张守融

(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100080) *(空军雷达学院 武汉 430010)

摘 要: 该文研究发射机固定的双站合成孔径雷达(双站 SAR)的运动目标成像问题,应用 WVD-Radon 变换来估计运动目标回波的多普勒参数,以此来调节成像和运动补偿处理参数,得到较好的运动目 标成像效果.计算机仿真结果证明该文推导的正确性. 关键词: 双站 SAR,运动目标,成像 **中图分类号**: TN951 **文献标识码**: A **文章编号**: 1009-5896(2004)07-1126-05

The Imaging Technique of Bistatic SAR with Stationary Transmitter to Moving Targets

Ren Dong-chen Tang Zi-yue^{*} Zhang Shou-rong

(Nat. Key Lab of Microwave Imaging Tech., Chinese Academy of Sci., Beijing 100080, China)

*((Air Force Radar Academy, Wuhan 430010, China)

Abstract This paper studies the imaging of moving target in the situation of the bistatic synthetic aperture radar with stationary transmitter. The WVD-Radon method is used to estimate the Doppler frequency parameter of the moving target, and to adjust the parameter of the imaging and the motion compensation to get better imaging result. The results of computer simulation are given to demonstrate that the conclusion of the paper is correct.

Key words Bistatic SAR, Moving targets, Imaging

1 引言

双站合成孔径雷达 (双站 SAR) 是指发射机和接收机分置在不同平台上的合成孔径雷达, 而发射机位置固定的双站合成孔径雷达则又是双站 SAR 的一种特殊工作模式,仅利用接收机 和地 (海) 面目标的相对运动所产生的多普勒频移来实现方位向孔径合成和对目标成像。其成像 的理论分辨率为

$$\rho_a = d_a \tag{1}$$

其中 da 为接收机天线水平方向尺寸。

发射机固定的双站 SAR 的一种典型应用是海岸成像警戒雷达:利用已有的岸基雷达作为 发射机,配以机载成像接收机组成系统,可以实现对一定海域内的舰船目标监视和成像。由于 一般情况下舰船目标多处于航行状态,这样,从实际应用角度来看,发射机固定的双站 SAR 系 统需要解决运动目标的成像问题.

本文利用 WVD-Radon 方法估计运动目标回波的多普勒参数,并用其调节成像和运动补偿 处理参数,实现发射机固定的双站 SAR 对运动目标的成像。

2 运动目标回波模型

图 1 是发射机固定的双站 SAR 的几何关系. 其中 $heta_T$ 为发射天线水平方向波束宽度, X_T

1 2003-04-15 收到, 2003-07-09 改回

为发射机位置。设接收机采取正侧视方式,且接收机载机作匀速直线飞行,速度为 vR。



图 1 发射站固定的双站 SAR 合成孔径几何关系

假设目标在孔径合成时间内始终处于发射波束的稳定照射下,不失一般性,设 t = 0 时, 接收机处于 X_{R0} 位置,接收波束 (水平)中心指向点目标 P(位置为 $X_P)$,收发天线相位中心 至点 X_P 的距离分别为 R_{R0} 和 R_{T0} ,收发波束对点 X_P 的俯角分别为 α_T , α_R ;点目标的速 度为 v_P ,与接收机航线方向成 α_P 的角度,将其分解为沿接收机航线方向的分量 v_X 和与 v_X 方向垂直的分量 v_Y (如图 1 所示).这样,在 t 时刻,点目标 P 到发射、接收天线相位中心的 距离分别为

$$r_T(t) = [(R_{T0} - v_Y t \cos \alpha_T)^2 + v_X^2 t^2]^{1/2}$$
(2)

$$r_R(t) = \left[(R_{R0} - v_Y t \cos \alpha_R)^2 + (v_R t - v_X t)^2 \right]^{1/2}$$
(3)

通常总存在 $(R_{T0} - v_Y t \cos \alpha_T) >> v_X t$, $(R_{R0} - v_Y t \cos \alpha_R) >> (v_R t - v_X t)$, 所以式 (2), 式(3) 可近似为^[1]

$$r_T(t) = \left[(R_{T0} - v_Y t \cos \alpha_T) + v_X^2 t^2 / (2R_{T0}) \right]$$
(4)

$$r_R(t) = \left[(R_{R0} - v_Y t \cos \alpha_R) + (v_R t - v_X t)^2 / (2R_{R0}) \right]$$
(5)

雷达信号从发射天线照射目标反射到接收天线的距离和为

$$r_T(t) = (R_{T0} + R_{R0}) - (v_Y \cos \alpha_T + v_Y \cos \alpha_R)t + \frac{v_X^2 t^2}{2R_{T0}} + \frac{[(v_R - v_X)t]^2}{2R_{R0}}$$
(6)

对式 (6) 求导, 可以求得回波信号的多普勒频率为

$$f_d = f_{d0} - f_{dt} \tag{7}$$

其中 $f_{d0} = v_Y (\cos \alpha_T + \cos \alpha_R) / \lambda$ 为回波信号的多普勒中心频率;而

$$f_{dt} = -[(v_X^2)/(\lambda R_{T0}) + (v_R - v_X)^2/(\lambda R_{R0})]t$$
(8)

这样,对于点目标 P(运动),发射机固定的双站 SAR 回波信号 (去除高频项) 可以表示为

$$s(t) = e^{j[\phi_0 + 2\pi f_{d0}t + \pi\gamma_a t^2]}$$
(9)

式中 $\gamma_a = -[(v_X^2)/(\lambda R_{T0}) + (v_R - v_X)^2/(\lambda R_{R0})]$ 表示方位向回波信号的多普勒线性调频率.

根据式 (9) 给出的回波信号表达形式,我们必须对 f_{d0} 和 γ_a 进行估计,以调整成像处理参数,最终实现对运动目标的聚焦成像.

3 基于 WVD-Radon 变换的运动目标多普勒参数估计

为了实现对回波信号多普勒参数 f_{d0} 和 γ_a 的估计,我们采用 Wigner-Ville-Distribution (WVD) 将信号变换到时间 – 频率域进行分析.可以求得式 (9) 所表示的回波信号的 WVD 分布 为 ^[2]

$$W_s(t,f) = \delta(f - f_{d0} - \gamma_a t) \tag{10}$$

令上式中 $f - f_{d0} - \gamma_a t = 0$,可以知道动目标回波信号的 WVD 为一条直线

$$f = \gamma_a t + f_{d0} \tag{11}$$

WVD 是双线性变换,对于多目标的回波信号,其 WVD 会产生交叉项,由于交叉项在形式和性质上都和信号本身的 WVD 十分相近,这样,在利用 WVD 来估计回波信号的多普勒参数时,必须对交叉项进行抑制。设接收机收到的回波信号为两个点目标回波信号的和为

$$s(t) = s_1(t) + s_2(t) = A_1 e^{j(\phi_1 + 2\pi f_{d01}t + \pi\gamma_{a1}t^2)} + A_2 e^{j(\phi_2 + 2\pi f_{d02}t + \pi\gamma_{a2}t^2)}$$
(12)

对应的 WVD(加高斯窗) 为^[3]

$$W(t,f) = \int \left[s_1 \left(t + \frac{\tau}{2} \right) s_1^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) + s_1 \left(t + \frac{\tau}{2} \right) s_2^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right]$$
$$+ s_2 \left(t + \frac{\tau}{2} \right) s_1^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) + s_2 \left(t + \frac{\tau}{2} \right) s_2^* \left(t - \frac{\tau}{2} \right) \right] \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\tau^2/(2\sigma^2)} e^{-j2\pi f\tau} d\tau$$

$$= W_1(t,f) + W_2(t,f) + W_{12}(t,f) + W_{21}(t,f)$$
(13)

式中 $W_1(t, f), W_2(t, f)$ 分别表示 $s_1(t), s_2(t)$ 的WVD, $W_{12}(t, f), W_{21}(t, f)$ 分别表示交叉项, 其值分别为

$$W_{1}(t,f) = A_{1}^{2} e^{-2\pi^{2}\sigma^{2}(f-f_{d01}-\gamma_{a1}t)^{2}} W_{2}(t,f) = A_{2}^{2} e^{-2\pi^{2}\sigma^{2}(f-f_{d02}-\gamma_{a2}t)^{2}} W_{12}(t,f) = \frac{\sqrt{2}c}{2} \frac{A_{1}A_{2}}{\sigma} e^{-\pi^{2}\left(f - \frac{f_{d01} + f_{d02}}{2} - \frac{\gamma_{a1} + \gamma_{a2}}{2}t\right)/c^{2}} e^{j[(\phi_{1}-\phi_{2}) + 2\pi(f_{d01} - f_{d02})t + \pi(\gamma_{a1} - \gamma_{a2})t^{2}]} W_{21}(t,f) = \frac{\sqrt{2}c^{*}}{2} \frac{A_{1}A_{2}}{\sigma} e^{-\pi^{2}\left(f - \frac{f_{d01} + f_{d02}}{2} - \frac{\gamma_{a1} + \gamma_{a2}}{2}t\right)/c^{*2}} e^{j[(\phi_{1}-\phi_{2}) + 2\pi(f_{d01} - f_{d02})t + \pi(\gamma_{a1} - \gamma_{a2})t^{2}]}$$

$$(14)$$

其中 $c = [(1/2\sigma^2) - j\pi(\gamma_{a1} - \gamma_{a2})/4]^{1/2}$, 上标"*"表示共轭.

从式 (14) 的结果我们可以看出, 信号本身的 WVD 沿直线分布, 其值在整个时频平面都大 于零; 两个交叉项互为共轭复数, 他们的和为实数, 其值在正负之间振荡. 针对交叉项和信号 本身 WVD 在性质上的差别, 我们采用 Radon 变换对交叉项进行抑制. 任意二维函数 *f*(*x*,*y*) 的 Radon 变换 ^[4] 为

$$R_{\rho,\phi} = \iint f(x,y)\delta(x\sin\phi + y\cos\phi - \rho)\mathrm{d}x\mathrm{d}y \tag{15}$$

由式 (15) 可知, Radon 变换相当于沿几何参数为 (ρ , ϕ) 的直线积分. 对式 (13) 进行 Radon 变换后, 由于信号本身的 WVD 为正值, 在 Radon 变换域中将在特定的 (ρ_0 , ϕ_0) 点上将形成峰

值,该点的坐标表征瞬时频率直线的几何参数,将(ρ_0,ϕ_0)转换成斜率和频率轴截距,就可求得运动目标回波信号的多普勒参数;而交叉项由于在正负之间振荡,故其 Radon 变换结果基本为0,不会在(ρ,ϕ)平面上形成峰值.这样,在 Radon 变换域中((ρ,ϕ)平面上)按门限进行检测时,只有信号本身(WVD)可以通过,这也就抑制了交叉项,同时,对噪声也有相似的抑制作用.

4 仿真

设接收机正侧视工作,接收机载机飞行轨迹垂直于发射机中心波束,载机高度为 H_R = 3.0 km,距目标点斜距为 R_{R0} = 10.0 km,飞行速度 v_R = 150 m/s,接收天线尺寸 d_a = 5 m; 发射机高度 H_T = 1.0 km,距目标点斜距为 R_{T0} = 20.0 km,发射信号载频为 f_c = 3 GHz, 发射线性调频脉冲信号带宽 Δf = 30 MHz,脉冲持续时间T = 1.333 μ s,脉冲重复频率为 PRF=300 Hz.

图 2 为两个运动点目标加入高斯窗的 WVD 和 Radon 变换图。由于 WVD 分布的周期为 π,故用 WVD 估计多普勒中心频率有模糊问题;按照本文所给仿真数据,估计周期为 75 Hz。



图 2 两个运动点目标的 WVD 分布和 Radon 变换

图 3 是一由 6 点形式组成的目标在 3 种不同运动状态下的成像仿真结果,其中图 3(a)为目标静止时的成像结果;图 3(b)为目标仅有方位向速度 $v_X = 7 \text{ m/s}$ 时,没有进行多普勒参数 调整直接成像的结果;图 3(c)为进行多普勒参数估计并调整成像处理参数后的结果;图 3(d)为目标方位向速度为 $v_X = 15 \text{ m/s}$,垂直方向速度 $v_Y = 3 \text{ m/s}$ 时,没有进行多普勒参数调整直接 成像的结果;图 3(e)为进行多普勒参数估计并调整成像处理参数后的结果。

5 结束语

本文就发射机固定的双站 SAR 对运动目标成像问题进行了研究,利用 WVD-Radon 变换 来估计运动目标回波的多普勒参数,以此来调节成像和运补参数. 仿真结果说明本文方法是有 效的.



图 3 运动目标成像仿真结果

参 考 文 献

- [1] 张澄波.综合孔径雷达原理、系统分析与应用.北京:科学出版社, 1989,第二章.
- L. 科恩, 白居宪, 译. 时-频分析: 理论与应用. 西安: 西安交通大学出版社, 1998, 第8章. [2]
- Barbarossa S, et al.. A combined Wigner Ville and Hough transform for cross term suppression [3] and optimal detection estimation. IEEE ICASSP'92, 1992: 173-176.
- [4] 吕凤军. 数字图像处理编程入门. 北京:清华大学出版社, 1999,第7章.
- 男, 1977年生, 硕士生, 主要研究方向为双站合成孔径雷达. 任冬晨
- 男, 1966 年生, 博士后, 副教授, 发表论文 30 余篇, 目前, 主要从事有关合成孔径雷达系统及微波成 汤子跃: 像新技术方面的研究.
- 男, 1942年生,博士,研究员,博士生导师,主要从事有关微波成像理论方面的研究. 张守融: