

匀加速运动平台下的大斜视 DBS 成像方法

赵宏钟, 谢华英, 周剑雄, 付 强

(国防科技大学 ATR 实验室, 湖南长沙 410073)

摘 要: 距离走动校正和二次相位误差补偿是匀加速运动平台下大斜视 DBS 成像的难点. 因此, 本文提出一种基于 Radon 变换校正距离走动、基于 Radon 模糊变换补偿二次相位误差的 DBS 成像算法, 并推导了此校正和补偿算法的空域适应性条件. 该算法原理简单、精度高, 且无需雷达平台运动参数、视角等先验信息, 可实现预定方位分辨率的 DBS 成像. 仿真实验验证了算法的有效性.

关键词: 雷达成像; 多普勒波束锐化 (DBS); 大斜视; 匀加速运动; Radon 变换; Radon 模糊变换

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 06-1280-07

High Squint DBS Imaging Based on Constant Acceleration Movement Platform

ZHAO Hong-zhong, XIE Hua-ying, ZHOU Jian-xiong, FU Qiang

(ATR Lab, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

Abstract: For high squint DBS imaging on a constant acceleration movement platform, range walk correction and quadratic phase error compensation are challenging issues. According to these two issues, this paper proposes a DBS imaging algorithm, which corrects the range walk based on the Radon transform and compensates the quadratic phase error based on the Radon ambiguity transform. And the spatial adaptability of the algorithm is also analyzed. It is easy to understand, shows good performance and needs no prior knowledge of the movement parameters and the look angle of the radar platform. Simulation results demonstrate the validity of the method.

Key words: radar imaging; Doppler beam sharpening (DBS); high squint; constant acceleration movement; Radon transform (RT); Radon ambiguity transform (RAT)

1 引言

多普勒波束锐化 (DBS) 技术利用雷达回波中的多普勒信息, 通过频域的高分辨处理, 等效地对真实天线波束进行划分, 从而有效改善雷达的方位分辨率^[1]. 它可在短时间内对大面积范围获得分辨率大为改善的雷达图像, 从而在对地测绘、匹配制导、地面目标识别等方面获得了广泛的应用^[2,3].

已有的 DBS 成像研究, 多基于雷达平台作匀速直线运动这一假设^[2~4]. 事实上, 在一些特殊的应用场合中, 平台机动性很强, 不宜用匀速直线运动状态描述^[3~5]. 本文即是在平台作匀加速运动这一假设条件下, 研究大斜视下的 DBS 成像问题.

匀加速运动平台下的大斜视 DBS 成像, 需进行距离走动校正和二次相位误差补偿. 这本质上相当于将聚焦型 SAR 处理的方法引入到 DBS 成像中. 文献[4,6]提

出将多普勒中心和多普勒调频率的真值分别代入进行校正和补偿, 它们依赖的一个重要前提是雷达平台运动参数、视角等信息均可由惯导等测量系统精确获取; 文献[7]提出在载机机动时利用载机在雷达视线上的投影速度实时控制重频的相位补偿方法, 同样依赖于惯导系统给出的测量值的精度. 本文直接利用雷达回波数据自适应估计相关运动参数, 再进行相应的校正和补偿, 取得了同样的方位分辨率, 并避免了对测量设备与测量精度的依赖.

2 匀加速运动平台下大斜视 DBS 成像几何及信号特征

惯性坐标系 XYZ 下, 雷达平台与波束照射区域之间的几何关系如图 1 所示. 假设 $t=0$ 时刻平台位于 M_0 点, 坐标为 $(0, 0, H)$, 以初速度 $V_0 = (v_{x0}, v_{y0}, v_{z0})$ 、加速度 $A = (a_x, a_y, a_z)$ 作匀加速运动. P 为地面场景中一静止

点目标, $t=0$ 时刻, 雷达平台与该目标之间的距离为 R_0 , 雷达视线俯仰角为 γ , 偏航角为 ψ , 加速度与视线的夹角为 σ_A , 速度与加速度的夹角为 σ_{vA} , 速度与视线的夹角也即等效斜视角^[8]为 σ_v , 与斜视角互余. 则 t 时刻雷达与目标的瞬时距离可由下式计算得到

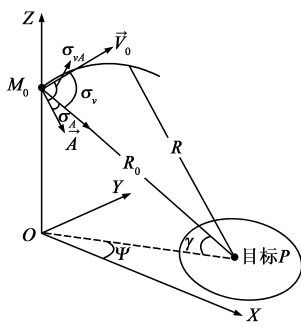


图1 DBS成像几何

$$R(t) = \sqrt{\begin{aligned} & (v_{x0}t + a_x t^2/2 - R_0 \cos \gamma \cos \psi)^2 \\ & + (v_{y0}t + a_y t^2/2 - R_0 \cos \gamma \sin \psi)^2 \\ & + (-R_0 \sin \gamma + v_{z0}t + a_z t^2/2)^2 \end{aligned}} \quad (1)$$

设雷达发射线性调频(LFM)信号, 对接收的回波信号距离向作匹配滤波, 得

$$s(\hat{t}, t) = A_p \text{sinc} \left[\Delta f_r \left(\hat{t} - \frac{2R(t)}{c} \right) \right] \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R(t) \right] \quad (2)$$

其中, A_p 为距离压缩后回波的幅度, \hat{t} 为距离向快时间, $t = m \cdot \text{PRT}$ 为方位向慢时间, PRT 为脉冲重复周期, Δf_r 为 LFM 信号的频带, c 为光速, λ 为波长, $\text{sinc}(a) = \sin$

$(\pi a)/\pi a$. 由式(2)可知, $R(t)$ 的变化即距离徙动^[9]同时影响回波的包络时延和相位分布, 进而对成像效果产生影响.

为便于分析, 对 $R(t)$ 在 $t=0$ 处作 Taylor 级数展开, 展开后的序列保留至四次项得^[15]

$$R(t) = R_0 + R'(0)t + \frac{R''(0)}{2}t^2 + \frac{R^{(3)}(0)}{3!}t^3 + \frac{R^{(4)}(0)}{4!}t^4 \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} R'(0) &= -|\mathbf{V}_0| \cos \sigma_v \\ R''(0) &= -|\mathbf{V}| \cos \sigma_A + R_0^{-1} |\mathbf{V}_0|^2 \sin^2 \sigma_v \\ R^{(3)}(0) &= 3R_0^{-2} |\mathbf{V}_0|^3 \sin^2 \sigma_v \cos \sigma_v + 3R_0^{-1} |\mathbf{V}_0| |\mathbf{A}| \\ &\quad (\cos \sigma_{vA} - \cos \sigma_v \cos \sigma_A) \\ R^{(4)}(0) &= 15R_0^{-3} |\mathbf{V}_0|^4 \sin^2 \sigma_v \cos^2 \sigma_v + 12R_0^{-2} |\mathbf{V}_0|^2 \\ &\quad |\mathbf{V}| \cos \sigma_v (\cos \sigma_{vA} - \cos \sigma_v \cos \sigma_A) - 3R_0^{-3} |\mathbf{V}_0|^4 \\ &\quad \sin^2 \sigma_v + 6R_0^{-2} |\mathbf{V}_0|^2 |\mathbf{A}| \cos \sigma_A \sin^2 \sigma_v + 3R_0^{-1} |\mathbf{A}|^2 \sin^2 \sigma_A \end{aligned} \quad (4)$$

通常称式(3)右边 t 的一次项为距离走动, 二次项为距离弯曲.

式(3)将代入式(2), 得距离压缩后的回波可近似表示为

$$\begin{aligned} s(\hat{t}, t) &= A_p \text{sinc} \left[\Delta f_r \left(\hat{t} - \frac{2 \left(R(0) + R'(0) \cdot t + \frac{R''(0)}{2!} \cdot t^2 + \frac{R^{(3)}(0)}{3!} \cdot t^3 + \frac{R^{(4)}(0)}{4!} \cdot t^4 \right)}{c} \right) \right] \\ &\quad \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(R(0) + R'(0) \cdot t + \frac{R''(0)}{2!} \cdot t^2 + \frac{R^{(3)}(0)}{3!} \cdot t^3 + \frac{R^{(4)}(0)}{4!} \cdot t^4 \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

通常 DBS 对一次相位项采用 FFT 实现非聚焦 SAR 处理^[1], 这就要求在相干积累时间内, 可忽略距离徙动对包络时延和二次及更高次相位项的影响. 一般地, 当一个成像处理周期 T_{DBS} 内的最大距离徙动量小于 $\rho_r/4$ (ρ_r 为距离分辨率) 时, 认为距离徙动对包络时延的影响可忽略^[9], 否则必须进行校正(即距离徙动校正); 当一个成像处理周期内二次及更高次相位项的最大值小于 $\pi/2$ 时, 可将其忽略^[9], 否则必须进行补偿. 由式(5), 相位误差的最大值小于 $\pi/2$, 相当于距离徙动的最大值小于 $\lambda/8$. 以下对距离徙动各项进行分析.

一次相干积累时间 T_{DBS} 内, 若距离走动可忽略, 则需满足

$$|\Delta R_w(T_{DBS})| = |\mathbf{V}_0| T_{DBS} |\cos \sigma_v| < \frac{\rho_r}{4} \quad (6)$$

上式表明, 平台运动速度越快、斜视角越大也即等效斜视角越小、相干积累时间越长, 距离走动就越大, 它与平台运动的加速度无关. 大斜视 DBS 成像中, 式(6)通常难以满足, 即必须对距离走动进行校正, 这与匀速直线运动平台下的结论是一致的.

计算距离弯曲的最大值得

$$\left| \frac{R''(0)}{2} \left(\frac{T_{DBS}}{2} \right)^2 \right| = \left| -|\mathbf{A}| \cos \sigma_A + \frac{|\mathbf{V}_0|^2 \sin^2 \sigma_v}{R_0} \right| \frac{T_{DBS}^2}{8} \quad (7)$$

加速度与速度共同作用引起的距离弯曲恰好相消到可以忽略的情况是很少的, 因此, 将速度与加速度引起的距离弯曲量分别进行分析, 可得

当

$$\begin{cases} |\mathbf{V}_0| \cdot T_{DBS} \cdot \sin \sigma_v \leq \sqrt{2\rho_r \cdot R_0} \\ |\mathbf{A}| T_{DBS}^2 \cdot \cos \sigma_A \leq 2\rho_r \end{cases} \quad (8)$$

时, 距离弯曲对包络时延的影响可忽略. 当

$$\begin{cases} |\mathbf{V}_0| \cdot T_{DBS} \cdot \sin \sigma_v \leq \sqrt{\lambda \cdot R_0} \\ |\mathbf{A}| T_{DBS}^2 \cdot \cos \sigma_A \leq \lambda \end{cases} \quad (9)$$

时, 距离弯曲对二次相位的影响可忽略.

对一般的微波雷达, 距离分辨率远大于波长, 因此式(9)的约束远比式(8)的严格. 由于斜视角较大且相干积累时间不长, 匀加速运动平台下大斜视 DBS 成像, 距离弯曲对包络时延的影响常常可忽略. 但平台作大机

动时,式(9)的要求往往难以满足,也即距离弯曲对二次相位的影响需进行补偿.这比匀速直线运动平台的情况更复杂,除考虑速度的影响外,还需考虑加速度的影响.

同样可分析距离徙动的高次项对包络时延和相位的影响,结果表明在短相干积累时间内,它们通常可忽略,在此不赘述.

经上述分析,匀加速运动平台下大斜视 DBS 成像的回波信号可简化为

$$s(\hat{t}, t) = A_p \text{sinc} \left[\Delta f_r \left(\hat{t} - \frac{2(R_0 + R'(0) \cdot t)}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} R_0 + j2\pi f_{dc} t + j\pi f_{dr} t^2 \right] \quad (10)$$

其中

$$f_{dc} = -\frac{2}{\lambda} R'(0) = \frac{2|V_0| \cos \sigma_v}{\lambda} \quad (11)$$

$$f_{dr} = -\frac{2}{\lambda} R''(0) = -\frac{2}{\lambda} \left(-|A| \cos \sigma_A + \frac{|V_0|^2 \sin^2 \sigma_v}{R_0} \right) \quad (12)$$

分别为多普勒中心和多普勒调频率.

3 距离走动校正和二次相位误差补偿

由上节分析知,匀加速运动平台下的大斜视 DBS 成像,需对距离走动进行校正,对二次相位误差进行补偿.若雷达平台运动参数和视角信息已知且足够精确,则可直接将其代入式(3)、(4)、(10)求出距离徙动的各项系数,进行相应的校正和补偿,否则,就必须基于回波数据进行估计.本文讨论后一种情况.

由式(10)可以看出,在时域中,距离压缩后的回波包络峰值轨迹可近似看作一条斜率由 $R'(0)$ 确定的直线.只需估计出该直线的斜率,就可以对距离走动进行校正.距离走动校正后,重新排列在距离单元上的数据可看作一个 LFM 信号.理想状态下,LFM 信号的模糊函数在时频面中呈直线分布,该直线的斜率由 LFM 信号的调频率在这里也即多普勒调频率 f_{dr} 确定.由式(10),估计出了多普勒调频率,就可以对二次相位误差进行补偿.从而,问题就转化为对直线特征这里即直线斜率的提取,一种简单有效的方法即 Radon 变换^[11].

3.1 Radon 变换

设 $f(x, y)$ 为二维平面 (x, y) 上的任一函数,则 Radon 变换可写成^[11]

$$\hat{f}(\rho, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(\rho - x \cos \varphi - y \sin \varphi) dx dy \quad (13)$$

其中 δ 表示 delta 函数,积分角 $0^\circ \leq \varphi < 180^\circ$.设图像中有一条直线,倾角为 α ,由式(13)知其特定角度 $\varphi = \alpha$

的 Radon 变换为最大值.这一特性使得 Radon 变换非常适合在图像中对直线的提取和检测.

传统的方法根据 Radon 变换最大值对应的角度 $\tilde{\varphi}$ 估计直线倾角 $\tilde{\alpha} = \tilde{\varphi}$.当噪声杂波存在时,这种方法精度不高.为提高估计精度,本文采用一种高斯函数拟合的方法^[12].计算 Radon 变换每一个角度 φ 上沿 ρ 轴的切片的差分的方差,用一个含四个未知参数的高斯函数

$$G(x) = A_0 \exp \left\{ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\} + C \quad (14)$$

去拟合,其中 x 表示独立的角变量, A_0 为未知的幅度, μ 表示均值或峰值位置参数, σ 为标准偏差, C 为基底.拟合得到的峰值参数 μ 即为的估计值,由此得到直线倾角的估计 $\tilde{\alpha} = \mu$.

3.2 距离走动校正

对雷达回波数据进行距离压缩后,回波包络峰值的轨迹可近似看作一条直线,其斜率 $K = \tan \alpha$ 为距离方位采样平面内距离和方位上占据的采样单元数之比,它与式(10)中由 $\tilde{K} = R'(0)$ 表示的距离走动曲线的斜率本质上是相同的,刻画的都是回波包络在距离上的走动率,只是量纲不同.统一量纲为 m/s,则^[12]

$$\tilde{K} = K \cdot c \Delta \hat{t} / 2 / PRT \quad (15)$$

其中 $\Delta \hat{t}$ 为快时间采样间隔.则由式(3)、(10),距离走动可近似表示为

$$\Delta R(t) = \tilde{K} \cdot t = K \cdot \frac{c \Delta \hat{t}}{2} \cdot PRF \cdot t \quad (16)$$

将距离压缩后的回波数据在距离频域乘以一个线性相位因子

$$H_1(f_r, t) = \exp \left[j4\pi \frac{\Delta R(t)}{c} (f_r + f_c) \right] \quad (17)$$

即校正了距离走动,其中 f_r 是距离频率, f_c 为载频.

由式(15)~(17)可以看出,这种校正距离走动的方法只需已知快时间和慢时间上的采样间隔,利用 3.1 中提到的 Radon 变换估计出距离方位采样平面内回波响应曲线的斜率 K 即可,它无需雷达平台运动速度、加速度及视角等先验信息.

3.3 相位误差补偿

校正距离走动以后,式(10)所示的回波信号就转化为

$$s(\hat{t}, t) = A_p \text{sinc} \left[\Delta f_r \left(\hat{t} - \frac{2R_0}{c} \right) \right] \cdot \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 - \frac{\lambda}{4} f_{dr} t^2 \right) \right] \quad (18)$$

对各距离单元沿方位轴进行能量积分,得到一条能量相对于距离的曲线.检测最大能量的距离单元,该距离单元上的数据可以被看作是一个 LFM 信号

$$s(t) = A_p \exp \left[-j \frac{4\pi}{\lambda} \left(R_0 - \frac{\lambda}{4} f_{dr} t^2 \right) \right] \quad (19)$$

持续时间为 T_{DBS} ,基于此数据可估计多普勒调频率 f_{dr} .

复信号 $r(t)$ 的 Radon-ambiguity 变换 (RAT) 定义为^[10]

$$RA_r(\rho, \varphi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |A_r(\tau, \xi)| \delta(\rho - \tau \cos \varphi - \xi \sin \varphi) d\tau d\xi \quad (20)$$

其中 $A_r(\tau, \xi)$ 为 $r(t)$ 在多普勒频移 ξ 和时移 τ 构成的二维平面上的模糊函数, 定义为^[11]

$$A_r(\tau, \xi) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t + \tau/2) r^*(t - \tau/2) \exp\{-j2\pi\xi t\} dt \quad (21)$$

式(19)表示的 LFM 信号的模糊函数的幅度为

$$|A_s(\tau, \xi)| = \begin{cases} (T_{DBS} - |\tau|) A_p \text{sinc}[(\xi - f_d \tau)(T_{DBS} - |\tau|)], & |\tau| \leq T_{DBS} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (22)$$

这意味着在理想条件下, 能量集中在时频面 (τ, ξ) 上一条由 delta 函数 $\delta(\xi - f_d \tau)$ 表示的直线上. 采用 3.1 中基于高斯函数拟合的 Radon 变换估计这条直线的倾角, 则多普勒调频率也就估计出来了. 同样的, 这种方法也无需雷达平台运动参数及视角等先验信息.

将距离走动校正后的回波 $s(\hat{t}, t)$ 乘以相位补偿因子

$$H_2(t) = \exp(-j\pi f_d t^2) \quad (23)$$

回波信号就转化为

$$s(\hat{t}, t) = A_p \text{sinc}\left[\Delta f_r \left(\hat{t} - \frac{2R_0}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda} R_0\right] \quad (24)$$

3.4 DBS 成像

对式(24)在方位向作 FFT, 则待成像点目标将出现在多普勒频谱的零频处, 即其实际方位位置是由多普勒中心频率 f_{dc} 确定的.

若场景中有多个点目标, 设以前面讨论的点目标作为参考点, 则由式(4)与(11), 与参考点同一距离也即俯仰角 γ 相同的目标, 其多普勒中心频率为

$$\begin{aligned} \hat{f}_{dc} &= 2 |V_0| \cos \bar{\sigma}_v / \lambda \\ &= 2(\cos \gamma \cdot \cos \bar{\psi} \cdot v_{x0} + \cos \gamma \cdot \sin \bar{\psi} \cdot v_{y0} + \sin \gamma \cdot v_{z0}) / \lambda \end{aligned} \quad (25)$$

若 \hat{f}_{dc} 与 f_{dc} 之差 $\Delta f_{dc} = \hat{f}_{dc} - f_{dc}$ 经方位向 FFT 后可分辨, 则该点目标将出现在偏航角 $\bar{\psi}$ 确定的与参考点相隔 Δf_{dc} 的频率位置. 故多普勒中心 f_{dc} 的估计误差将导致场景中目标在多普勒维的整体偏移.

由式(25), 场景中不同目标的多普勒中心有差别, 由其对应的等效斜视角决定. 因此, 估计出的多普勒中心一般为平均多普勒中心. 为提高精度, 将多普勒中心分为基带多普勒中心 f_{dc_base} 和多普勒模糊数 p 分别进

行估计. 本文采用相关多普勒方法^[13,14] 估计基带多普勒中心, 用上面提到的基于 Radon 变换的方法估计多普勒模糊数. 由于一个波束内的多普勒带宽不会超过重频, 因此, 估计的模糊数与波束照射区域内任一部分的模糊数是相同的.

3.5 校正补偿的空域适应性条件

需指出的是, 上文提出的方法是基于某一参考点进行距离走动校正和二次相位误差补偿. 实际中对一定范围的场景进行 DBS 成像时, 在偏离参考点的区域的校正和补偿都是近似的, 这种近似的合理性可通过波束锐化比来判断(推导过程见附录):

(a) 当锐化比

$$N \leq \frac{c}{4 \cdot \Delta f_r \cdot \lambda} \quad (26)$$

时, 可对整个雷达波束照射范围统一校正距离走动, 即统一校正的空域适应性只取决于信号带宽和波长, 而与斜视角、相干积累时间、速度等量无关.

(b) 当锐化比

$$N \leq \frac{|V_0| \sin \sigma_v}{|A| T_{DBS} \sin \sigma_A} \quad (27)$$

$$N \leq \frac{R_0}{4 |V_0| T_{DBS} \cos \sigma_v} \quad (28)$$

$$N \leq \frac{R_0 \tan(-\gamma)}{2 |V_0| T_{DBS} \sin \sigma_v} \quad (29)$$

时, 可对整个波束照射范围统一补偿二次相位误差. 式(27)表明全波束范围内统一补偿限制了 DBS 所能达到的锐化比不能超过垂直于雷达视线方向上的速度与速度变化量的比值. 因此, 对机动性不强也即加速度较小的运动平台, 是否可以统一补偿二次相位误差主要由参考点的初始斜距与沿视线和垂直视线方向上的位移的比值决定, 如式(28)、(29)所示. 对于机动性较强的平台, 需综合考虑加速度和速度的影响. 由附录中的推导过程知, 式(27)~(29)为统一进行补偿的充分而非必要条件.

确定了需求的方位分辨率, 则该应用场景的波束锐化比 N 也就确定了, 当其满足式(26)~(29), 可利用同一参考点对整个波束照射区域进行校正和补偿. DBS 要求的方位分辨率不高, 因此在很多情况下都是满足约束的. 若不满足, 可对回波数据矩阵进行分块, 在不同的块上估计参数, 进行相应的校正和补偿.

4 仿真

本节进行仿真计算. 相关参数见表 1, 相干积累时间取零时刻波束中心与地面交点(4.5km, 14km)处方位分辨率为 10m 所需的波束驻留时间 0.0844s, 成像场景采用等 RCS、等间隔(x, y 方向间隔均为 100m)的 $10 \times$

10 点阵.

表 1 仿真参数

波长(m)	0.02	带宽(MHz)	15	脉宽(μs)	10
重频(kHz)	5	波束宽度($^\circ$)	2	初速度(m/s)	(100, 1000, -100)
采样率(MHz)	100	扫描速度($^\circ/\text{s}$)	10	加速度(m/s^2)	(50, 50, -50)

首先验证第二部分距离徙动分析的正确性. 为衡量距离徙动对包络时延和相位的影响, 图 2 比较了一个成像处理周期内场景中所有点目标的距离徙动各项的模与 $\rho_r/4$ 及 $\lambda/8$ 的大小关系. 可以看出, 距离走动的最大值远大于 $\rho_r/4$, 因此必须进行校正; 距离弯曲远大于 $\lambda/8$, 远小于 $\rho_r/4$, 因此, 可忽略其对包络时延的影响, 但必须进行二次相位误差补偿; 距离徙动的三次及更高次项远小于 $\lambda/8$, 可忽略.

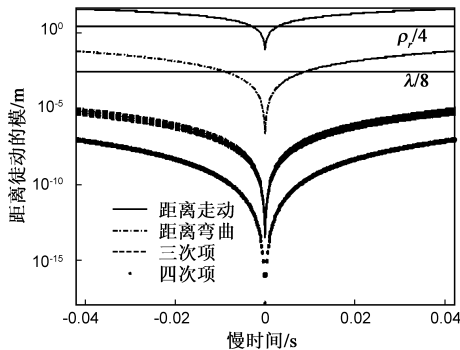


图 2 距离徙动各项对包络时延和相位的影响

接下来验证本文提出的参数估计方法的有效性. 在此之前, 先计算校正和补偿的空域适应性条件. 由式(26)计算得到可统一进行距离走动校正约束的最大锐化比为 250, 由式(27)~(29)计算出来的可统一进行二次相位误差补偿约束的最大锐化比分别为 95、69 和 107, 10m 方位分辨率对应的锐化比约为 62, 远小于约束. 因此, 可统一估计参数, 进行相应的校正和补偿.

用 Radon 变换估计多普勒中心、Radon 模糊变换估计多普勒调频率的有效性已在文献[12, 16]中得到验证, 这里仅给出本文条件下的估计精度. 仿真结果表明, 多普勒中心估计误差为方位带宽的 0.7684%, 远小于成像所要求的 5%~10%^[14], 多普勒调频率估计误差引起的二次相位误差为 0.1504, 远小于成像要求的 $\pi/2$ ^[14], 因此, 这种估计方法是有效的.

最后, 基于估计的参数, 进行距离走动校正和二次相位误差补偿, 成 DBS 像. 图 3 为某一点目标校正和补偿前后方位向的脉冲响应曲线, 其中实线为校正和补偿后的脉冲响应曲线, 此时的方位分辨率为 9.4854m, 峰值旁瓣比为 -13.7617dB, 积分旁瓣比为 -5.6836dB; 虚线为未校正补偿直接作 FFT 成 DBS 像的结果, 可以看出信噪比大大降低, 且谱峰位置发生明显偏移, 可见

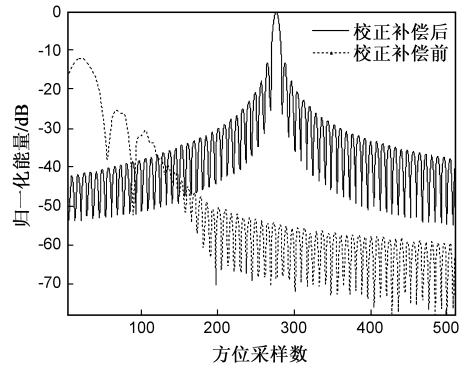


图 3 点目标校正补偿前后的脉冲响应曲线

应用本文方法校正和补偿后成像效果明显改善. 然后, 对场景的 DBS 成像进行仿真, 图 4 为校正和补偿后的 DBS 成像结果, 为便于比较, 图 5 给出了未经校正和补偿的 DBS 成像结果. 可以看出, 校正和补偿后, 分辨率明显改善. 为进一步对本文方法的有效性进行分析, 图 6 给出了图 4 几何校正到地距平面上的 DBS 图像与点阵原始位置的比较, 图中的圆圈表示点阵的真实位置, 可以看出由本文提出的方法所成 DBS 像与其真实位置之间的偏移较小. 区域边缘处方位分辨率的恶化是由于场景较大, 波束扫描引起该位置处的积累时间不够引起的, 而由于 10×10 的点阵分布太广, 以致波束不能完全覆盖, 所以进行 DBS 成像的实际目标并没有那么多.

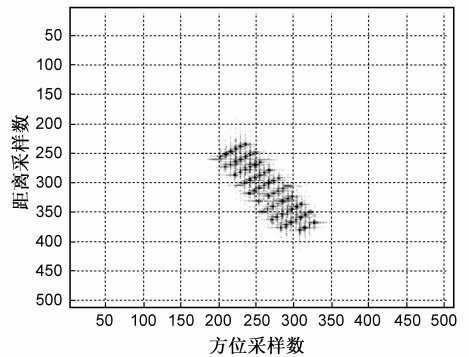


图 4 基于参数估计的距离走动校正和二次相位误差补偿后的 DBS 成像

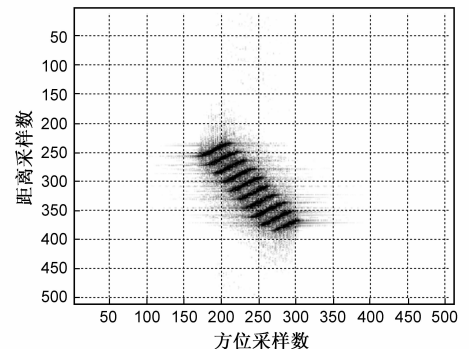


图 5 未进行距离走动校正和二次相位误差补偿的 DBS 成像

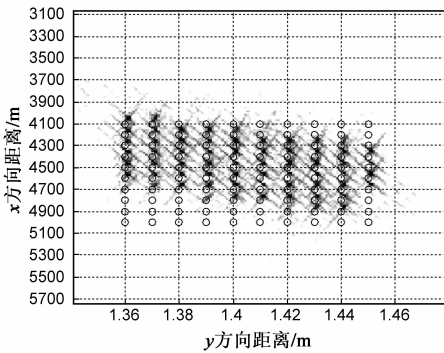


图6 图4几何校正到地距平面上的DBS图像

5 结论

本文研究了匀加速运动平台下的大斜视 DBS 成像问题,提出了一种无先验信息下的多普勒参数估计方法,用于相应的距离走动校正和二次相位误差补偿.仿真表明,这种方法可获得较为理想的 DBS 图像.由于 DBS 对方位分辨率的要求不高,所以一般只需进行一次多普勒中心估计和一次多普勒调频率估计即可完成整个成像场景的校正和补偿.需要指出的是,尽管本文的方法是针对匀加速运动平台提出的,但是对匀速直线运动平台的大斜视 DBS 成像同样适用,并可容易推广到动目标检测和聚焦.

附录 校正和补偿的空域适应性条件推导

设参考点的初始斜距为 R_0 ,等效斜视角为 σ_v ,加速度与视线的夹角为 σ_A ,地面波束照射区域内任一点的初始斜距为 $R_0 + \Delta R$,等效斜视角为 $\sigma_v + \Delta\sigma_v$,加速度与视线的夹角为 $\sigma_A + \Delta\sigma_A$.假定当二者之间的距离走动之差小于 $\rho_r/4$ 时,认为距离走动对回波包络的影响差别可忽略;当二者之间的二次相位误差之差小于 $\pi/2$,也即距离弯曲之差小于 $\lambda/8$ 时,认为相位误差之间的差别可忽略^[15].则有

$$\left| -|\mathbf{V}_0| \cos \sigma_v \cdot t - |\mathbf{V}_0| \cos(\sigma_v + \Delta\sigma_v) \cdot t \right| \leq \rho_r/4 \quad (A1)$$

$$\left| -|\mathbf{A}| \cos \sigma_A + \frac{|\mathbf{V}_0|^2 \sin^2 \sigma_v}{R_0} \left| \frac{t^2}{2} \right| - \left| -|\mathbf{A}| \cos(\sigma_A + \Delta\sigma_A) + \frac{|\mathbf{V}_0|^2 \sin^2(\sigma_v + \Delta\sigma_v)}{R_0 + \Delta R} \left| \frac{t^2}{2} \right| \right| \leq \lambda/8 \quad (A2)$$

易证 $\Delta\sigma_v \leq \theta_a$ (θ_a 为方位波束宽度),则由式(A1)及多普勒频率

$$f_d = \frac{2|\mathbf{V}_0| \cos \sigma_v}{\lambda} \quad (A3)$$

可推得当锐化比

$$N = \frac{\theta_a}{d\sigma_v} \leq \frac{\rho_r / (4|\mathbf{V}_0| T_{DBS} \sin \sigma_v)}{\lambda / (2|\mathbf{V}_0| T_{DBS} \sin \sigma_v)} = \frac{c}{4 \cdot \Delta f_r \cdot \lambda} \quad (A4)$$

时,可统一对整个波束照射范围内目标的距离走动进行校正.

讨论统一补偿的范围时,为简单起见,将式(A2)中的加速度与速度引起的距离弯曲分别讨论,令二者均小于等于 $\lambda/16$,并将 $\frac{1}{1 + \frac{\Delta R}{R_0}}$ 作幂级数展开后忽略二次及高次项,可得

$$|\Delta\sigma_A| \leq \frac{\lambda}{2|\mathbf{A}| T_{DBS}^2 \sin \sigma_A} \quad (A5)$$

$$\left| \sin^2 \sigma_v - \sin^2(\sigma_v + \Delta\sigma_v) \right| \leq \frac{\lambda R_0}{4|\mathbf{V}_0|^2 T_{DBS}^2} \quad (A6)$$

$$\left| \sin^2(\sigma_v + \Delta\sigma_v) \cdot \frac{\Delta R}{R_0} \right| \leq \frac{\lambda R_0}{4|\mathbf{V}_0|^2 T_{DBS}^2} \quad (A7)$$

将 $\Delta R \approx \frac{R_0 \cdot \theta_r}{\tan(-\gamma)}$ (θ_r 为俯仰波束宽度)代入(A7),令 $\theta_r = \theta_a$,采用(A4)类似的推导,由上述三式可推导全波束范围内统一补偿二次相位误差的条件为锐化比满足

$$N \leq \min \left(\frac{|\mathbf{V}_0| \sin \sigma_v}{|\mathbf{A}| T_{DBS} \sin \sigma_A}, \frac{R_0}{4|\mathbf{V}_0| T_{DBS} \cos \sigma_v}, \frac{R_0 \tan(-\gamma)}{2|\mathbf{V}_0| T_{DBS} \sin \sigma_v} \right) \quad (A8)$$

实际应用中,速度与加速度是共同作用的,由推导过程知,(A4)、(A8)是全波束范围内统一校正和统一补偿的充分而非必要条件.

当参考点为波束中心与地面交点时,对锐化比的约束可放宽到(A4)、(A8)中约束的二倍.

参考文献:

- [1] 毛士艺,等.脉冲多普勒雷达[M].北京:国防工业出版社,1990:191-192.
- [2] 毛士艺,李少洪,黄永红,等.机载 PD 雷达 DBS 实时成像研究[J].电子学报,2000,28(3):32-34.
Mao Shiyi, Li Shaohong, Huang Yonghong, et al. Study of real-time image by DBS on airborne PD radar[J]. Acta Electronica Sinica, 2000, 28(3): 32-34. (in Chinese)
- [3] Jeremy A Hodgson, David W. Lee. Terminal guidance using a Doppler beam sharpening radar[A]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference[C]. Texas, USA, 2003.
- [4] 宋雪岩,李真方,保铮.大斜视 DBS 成像[J].现代雷达,2004,26(1):30-33.
Song Xueyan, Li Zhenfang, Bao Zheng. Highly squint DBS imaging [J]. Modern Radar, 2004, 26(1): 30-33. (in Chinese)
- [5] 孙兵,周荫清,陈杰,等.基于横加速度模型的斜视 SAR 成像 CA-ECS 算法[J].电子学报,2006,34(9):1595-1599.
Sun Bing, Zhou Yinqing, Chen Jie, et al. CA-ECS algorithm for squinted SAR imaging based on constant acceleration model [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(9): 1595-1599. (in Chinese)

- [6] 王宏远,危嵩,孙文. DBS 高分辨成像及动目标轨迹处理[J]. 电波科学学报, 2005, 20(5): 637 - 640.
Wang Hongyuan, Wei Song, Sun Wen. High resolution DBS imaging moving target trajectory processing[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(5): 637 - 640. (in Chinese)
- [7] 张庆文,张剑云. 多卜勒波束锐化运动补偿方法的研究[J]. 航空学报, 1994, 15(11): 1348 - 1356.
Zhang Qingwen, Zhang Jianyun. The study of motion compensation for Doppler beam sharpening[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 1994, 15(11): 1348 - 1356. (in Chinese)
- [8] 刘光炎. 斜视及前视合成孔径雷达系统的成像与算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2002. 34.
- [9] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 125 - 134.
- [10] Minsheng Wang, Andrew K. Chan, et al. Linear frequency - modulated signal detection using Radon-ambiguity transform [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1998, 46(3): 571 - 586.
- [11] 张贤达,保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 32 - 35, 153 - 156.
- [12] Huaying Xie, Hongzhong Zhao, et al. A Doppler Centroid Estimation Method Using the Radon Transform for Forward-squint SAR Imaging[A]. 2008 IEEE Radar Conference[C]. Rome, Italy, 2008. 989 - 993.
- [13] S Nørvang Madsen. Esimating the Doppler centroid of SAR data [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(2): 134 - 140.
- [14] Ian G. Cumming, Frank H. Wong. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data Algorithm and Implementation [M]. Norwood, MA: Artech House, 2005. 483 - 509.
- [15] Tat Soon Yeo, Ngee Leng Tan, et al. A new subaperture approach to high squint SAR processing[J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(5): 954 - 968.
- [16] Huaying Xie, Hongzhong Zhao, et al. A Doppler parameters estimation technique for squint SAR imaging[A]. International Conference on Radar[C]. Adelaide, Australia, 2008. 402 - 406.

作者简介:



赵宏钟 男, 1971 年生于山西寿阳, 工学博士, 国防科技大学副教授, 中国电子学会会员, 主要研究方向为雷达信号处理与自动目标识别。
E-mail: hzzhao777@163.com



谢华英 女, 1979 年生于湖南湘潭, 国防科技大学 ATR 实验室博士生, 主要研究方向为 SAR 成像与目标识别。
E-mail: xie_huaying@nudt.edu.cn



周剑维 女, 1977 年生于湖南湘潭, 工学博士, 国防科技大学副教授, 主要研究方向为高分辨雷达信号处理与自动目标识别。



付强 男, 1962 年生于湖南长沙, 工学博士, 国防科技大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达信号处理与目标识别应用。
E-mail: fuqiang1962@vip.sina.cn

