

文章编号: 2095-4980(2018)06-0955-08

运动误差对太赫兹圆迹 SAR 成像质量影响分析

阚学超^{1,2}, 李银伟^{1,2}, 盛佳恋^{1,2}, 付朝伟^{1,2}, 王海涛^{1,2}

(1.上海无线电设备研究所, 上海 200090; 2.上海目标识别与环境感知工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 太赫兹圆迹合成孔径雷达(SAR)结合了太赫兹波和圆迹 SAR 技术, 比传统的直线 SAR 具有更高的成像分辨力, 在雷达领域拥有广阔的应用前景。雷达实际运动中存在的运动误差将导致成像聚焦差、旁瓣升高和分辨力下降, 是影响雷达成像质量的重要因素, 在太赫兹圆迹 SAR 中, 雷达的成像质量受运动误差的影响是各个方位向的运动误差共同作用的。为了分析运动补偿时所需达到的精确度, 建立了太赫兹圆迹 SAR 的运动误差模型, 定量分析了运动误差存在时目标的峰值下降系数, 并根据峰值下降系数分析了运动误差对成像质量的影响, 包括分辨力、峰值旁瓣比(PSLR)和积分旁瓣比(ISLR)的变化, 同时通过仿真验证了分析的正确性。

关键词: 太赫兹圆迹 SAR; 高分辨力; 运动误差; 成像质量

中图分类号: TN957

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201806.0955

Imaging quality analysis of terahertz circular SAR affected by the motion error

KAN Xuechao^{1,2}, LI Yinwei^{1,2}, SHENG Jialian^{1,2}, FU Chaowei^{1,2}, WANG Haitao^{1,2}

(1.Shanghai Radio Equipment Research Institute, Shanghai 200090, China;

2.Shanghai Engineering Research Center of Target Identification and Environment Perception, Shanghai 200090, China)

Abstract: The Terahertz circular Synthetic Aperture Radar(SAR) which combines the terahertz wave and the circular SAR can obtain the higher imaging resolution compared to the traditional linear SAR, and it has a broad application prospect in the radar field. An important factor which influences the imaging quality of radar is the motion error in the real movement which will cause the bad focusing effect, high side lobe and decline in resolution. In the imaging process of terahertz circular SAR, the imaging quality affected by the motion error is determined by the motion errors in different directions together. In order to analyze the accuracy of motion compensation, this paper makes the model of motion error in the terahertz circular SAR and the quantitative analysis of target's peak descent coefficient of target when the motion error exists. The changes of imaging qualities included resolution, Peak Sidelobe Ratio(PSLR) and Integrated Sidelobe Ratio(ISLR) are quantitatively analyzed by the descent coefficient. Besides, this paper makes some simulations to prove the correctness of analysis. The analysis shows important guiding significance for the imaging of terahertz circular SAR.

Keywords: Terahertz circular SAR; high resolution; motion error; imaging quality

太赫兹波(THz)是指频率位于 100 GHz~10 THz(波长约 3 mm~30 μ m)的电磁波, 由于其波长短, 定向性高, 抗干扰能力强, 在雷达成像领域具有很大的应用前景。随着太赫兹波研究的逐渐深入和太赫兹技术的不断进步, 太赫兹雷达成像技术也越来越成熟^[1]。

合成孔径雷达(SAR)在军事、民用等许多领域发挥着重要的作用, 获得高分辨力的成像一直是 SAR 研究的重要方向。传统的直线 SAR 中, 距离向分辨力由雷达信号带宽决定, 可通过增加带宽来提高距离向分辨力; 但方位向分辨力受限于天线尺寸, 不能无限制地减小天线长度来提高方位向分辨力^[2]。与直线 SAR 的工作方式不同, 圆迹 SAR 的工作方式是雷达围绕成像场景的中心做圆周运动, 在整个观测过程中雷达波束始终照射同一区域, 可实现目标的多个角度观察^[3]。

圆迹 SAR 和直线 SAR 都是通过方位合成孔径来获取目标的方位向高分辨成像, 但相比于直线 SAR, 圆迹

收稿日期: 2018-03-26; 修回日期: 2018-07-13

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(41601508); 上海市自然科学基金资助项目(15ZR1439500)

SAR 的运动方式扩展了方位向的合成孔径。圆迹 SAR 的特殊合成孔径能使距离向和方位向的频谱拓展到最宽,从而极大地提高了二维平面的分辨力。同时,随着雷达转动角度的增大,距离向和方位向耦合逐渐加深,当雷达运动整个圆周时两个方向的分辨力可达到一致^[4-5]。相比于直线 SAR,圆迹 SAR 具有更高的分辨力。此外,圆周 SAR 还具有高度向分辨能力,可实现三维成像^[6-7]。

由于圆迹 SAR 可得到更高分辨力的成像^[8],国内外学者对圆迹 SAR 的成像技术进行了大量研究。对于圆迹 SAR 的曲线运动,文献[4,8]提出了后向投影(Back Projection, BP)算法和波数域算法,可有效得到高分辨力成像。对于圆迹 SAR 的三维成像,文献[9-10]通过干涉 SAR 来获取目标的高度信息。对于圆迹 SAR 的高旁瓣问题,文献[4]中通过增大 BP 算法中网格间距的方法可有效降低旁瓣,文献[11]通过多航迹稀疏成像的方法来降低高度向旁瓣。同时,针对圆迹 SAR 中运动误差对成像的影响,文献[12]提出了自聚焦的方法,文献[13]提出了基于图像域相位误差估计的圆迹 SAR 聚焦方法,改善了成像质量。

太赫兹圆迹 SAR 将太赫兹波和雷达领域中的圆迹 SAR 技术结合起来,其成像的分辨力将得到大幅度提高。在实际运动中,受到气流、天气等外部因素和雷达平台的非平稳运动、振动等因素的影响,雷达将做非理想圆周运动,导致运动误差产生,严重影响成像质量。文献[14]基于三维运动误差在微波频段对成像质量进行了分析,文献[15]通过图区相位梯度的方法实现圆迹 SAR 轨迹重建。在太赫兹波段下,由于信号频率高、波长短,很小的运动误差都将对成像质量产生影响,此时需要很高的雷达运动补偿精确度。本文基于圆迹 SAR 成像质量的要求,分析了运动误差在成像要求下所允许范围。在圆迹 SAR 中,目标的成像质量受运动误差的影响是各个方位向的运动误差共同作用的。基于后向投影算法,定量分析了各个方位向的随机运动误差对太赫兹圆迹 SAR 成像质量的影响,包括分辨力、峰值旁瓣比(PSLR)、积分旁瓣比(ISLR)的变化。通过仿真,验证了分析的正确性。

1 太赫兹圆迹 SAR 成像模型

1.1 太赫兹圆迹 SAR 理想运动模型

太赫兹圆迹 SAR 采用的是线性调频信号,当雷达围绕目标中心转动角度为 $\theta \in [0, 2\pi]$ 时,其回波信号为:

$$\begin{cases} s(t, \theta) = \int_y \int_x f(x, y) p \left[t - \frac{2R_n}{c} \right] dx dy \\ p(t) = \exp \left[j2\pi \left(f_c t + \frac{1}{2} K_r t^2 \right) \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为目标的散射特性函数; R_n 为雷达到目标的距离; $s(t, \theta)$ 为雷达接收到的回波信号; t 为快时间; θ 为雷达转动的角度; $p(t)$ 为线性调频信号; f_c 为雷达载波频率; K_r 为信号调频斜率。

在圆迹 SAR 中,为了方便分析,以快时间采样表示距离向,雷达转动的角度表示方位向。随着雷达转动角度的增大,距离向和方位向耦合逐渐加深,当转动角度为 2π 时,距离向和方位向完全耦合,因此传统的距离—多普勒算法(Range Doppler, RD)算法不适用于圆迹 SAR 成像。对于太赫兹圆迹 SAR 的成像,本文采用 BP 算法,其核心是对距离向采用成像区域中心点的匹配滤波函数进行匹配滤波,并在整个方位向累积,表达式为:

$$f(x, y) = \int_{\theta} \int_t s(t, \theta) p^*(t - t_{\text{central}}(\theta)) dt d\theta \quad (2)$$

式中 t_{central} 表示电磁波到成像区域中心点的时间。

在 BP 算法中,距离向匹配滤波后还需要对方位向进行相位补偿,如式(3)所示:

$$f(x_i, y_i) = \int A(x_i, y_i, \theta_k) \exp \left(-j \frac{4\pi}{\lambda} R(x_i, y_i, \theta_k) \right) \exp \left(j \frac{4\pi}{\lambda} R(x_i, y_i, \theta_k) \right) d\theta \quad (3)$$

在 θ 角度下,根据点 (x, y) 与成像中心点的距离,计算出此点在距离向对应的位置, $A(x, y, \theta)$ 为此位置在距离向匹配滤波后的值,与目标的散射特性相关,假设目标在整个圆周中各向同性,则有:

$$A(x_i, y_i, \theta_1) \approx A(x_i, y_i, \theta_2) \approx \dots \approx A(x_i, y_i, \theta_k) = A \quad (4)$$

式中 A 表示各个方位向幅度相等的常量。

雷达平台做理想运动时,方位向相位得到完全补偿,点目标的散射系数可以表示为:

$$f(x_i, y_i) = \int A(x_i, y_i, \theta_k) d\theta = N_a A \quad (5)$$

式中 N_a 为方位向采样点数。

1.2 太赫兹圆迹 SAR 运动误差模型

在太赫兹圆迹 SAR 模式中,雷达平台的运动误差包括受气流和天气等产生的偏离理想航迹的误差和高频振动产生的误差,雷达运动的轨迹误差模型如图 1 所示。

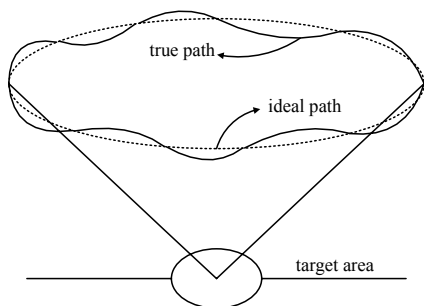


Fig.1 Moving path of radar when the motion error exists
图 1 雷达运动存在误差时的运动轨迹

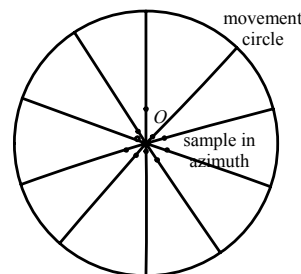


Fig.2 Deviations between the focused center point and the peak points in all directions
图 2 各个方位向存在的运动误差导致的距离压缩峰值点与聚焦中心的偏离

当整个圆周运动中存在运动误差时,各个方位向的运动误差并不一样,各个方位向的运动误差导致的距离压缩峰值点与聚焦中心的偏离如图 2 所示。

此时雷达与目标的实际距离和目标的散射特性函数可以表示为:

$$\begin{cases} \tilde{R}(x_i, y_i, \theta_k) = R(x_i, y_i, \theta_k) + \Delta R(x_i, y_i, \theta_k) \\ f(x_i, y_i) = \int A(x_i, y_i, \theta_k) \exp(-j4\pi\Delta R(x_i, y_i, \theta_k)/\lambda) d\theta = A \left| \sum_{k=1}^{N_a} \rho_k \right| \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\tilde{R}(x, y, \theta)$ 为实际距离; ΔR 为运动误差; $\rho_k = \exp(-j4\pi\Delta R(x_i, y_i, \theta_k)/\lambda)$ 。

设 $\rho_k = \exp(-j\phi_k)$, $\phi_k = 4\pi\Delta R(x_i, y_i, \theta_k)/\lambda$, 可以得到:

$$\begin{cases} \rho_k = \cos \phi_k - j \sin \phi_k \\ \left| \sum_{k=1}^{N_a} \rho_k \right| = \left| \sum_{k=1}^{N_a} (\cos \phi_k - j \sin \phi_k) \right| = \left| \sum_{k=1}^{N_a} \cos \phi_k - j \sum_{k=1}^{N_a} \sin \phi_k \right| = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{N_a} \cos \phi_k \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{N_a} \sin \phi_k \right)^2} \end{cases} \quad (7)$$

对于式(7), 有:

$$\left| \sum_{k=1}^{N_a} \rho_k \right| = \begin{cases} N_a, & \forall i \neq j, \phi_i = \phi_j \\ < N_a, & \exists i \neq j, \phi_i \neq \phi_j \end{cases} \quad (8)$$

在实际运动中,各个方位向的运动误差是不同的,可得到 $\left| \sum_{k=1}^{N_a} \rho_k \right| < N_a$ 。相比于理想状态,目标的散射特性值下降,设下降系数为 γ , 则:

$$\gamma = \left| \sum_{k=1}^{N_a} \rho_k \right| / N_a \quad (9)$$

上述的分析是在目标各向同性的基础上进行的,考虑到实际过程中目标散射特性的各向异性,理想圆周运动下点目标的散射系数可以表示为:

$$f(x_i, y_i) = \int A(x_i, y_i, \theta_k) d\theta = A_1 + A_2 + \dots + A_{N_a} = \sum_{k=1}^{N_a} g(k) \quad (10)$$

式中 $g(k) = A_k \geq 0, k=1, 2, \dots, N_a$ 。

由此可得运动误差存在时,点目标的散射特性系数可以表示为:

$$f(x_i, y_i) = \left| \sum_{k=1}^{N_a} g(k) \cdot \rho_k \right| = \sqrt{\left(\sum_{k=1}^{N_a} g(k) \cdot \cos \phi_k \right)^2 + \left(\sum_{k=1}^{N_a} g(k) \cdot \sin \phi_k \right)^2} \quad (11)$$

在式(11)中,有不等式:

$$\begin{cases} \sum_{k=1}^{N_a} g(k) \cdot \cos \phi_k \leq \sum_{k=1}^{N_a} g(k) \cdot \sum_{k=1}^{N_a} \cos \phi_k, \forall g(k) \geq 0, \cos \phi_k \geq 0 \\ \sum_{k=1}^{N_a} g(k) \cdot \cos \phi_k \geq \sum_{k=1}^{N_a} g(k) \cdot \sum_{k=1}^{N_a} \cos \phi_k, \forall g(k) \geq 0, \cos \phi_k \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

因此可得:

$$\begin{cases} \gamma \leq \left| \sum_{k=1}^{N_a} \rho_k \right| / N_a, & \cos \phi_k \geq 0, \sin \phi_k \geq 0 \\ \gamma \geq \left| \sum_{k=1}^{N_a} \rho_k \right| / N_a, & \cos \phi_k \leq 0, \sin \phi_k \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

可以观察到, 目标散射特性的下降系数与误差相位 ϕ_k 有关, 在实际运动中, 运动误差的随机性导致误差相位的随机性, 且目标的散射特性是缓慢变化的, 因此各向异性目标的散射特性下降系数在 $\left| \sum_{k=1}^{N_a} \rho_k \right| / N_a$ 附近变化。为了简化分析, 本文仅仅基于目标各向同性的情况进行考虑。

在圆迹 SAR 回波数据处理时, 对于雷达平台运动中存在的误差, 可使用 POS 数据和自聚焦方法进行高精度补偿, 使其达到一定的精确度而不影响成像质量, 本文的分析可视为雷达信号经抑制噪声和运动补偿后所需要的运动补偿精确度。

2 运动误差对成像质量的影响

衡量 SAR 图像区分相邻点目标的能力指标主要有: 分辨力、峰值旁瓣比(PSLR)、积分旁瓣比(ISLR)。其中, PSLR 描述了强散射点掩盖弱散射点的程度, ISLR 描述了图像局部的对比度, 两者值越小, 图像质量越高^[16-17]。

1) 分辨力

圆迹 SAR 的分辨力以 -3 dB 分辨力表示, 当雷达运动中存在运动误差时, 目标的散射特性值将会下降, 由此引起主瓣展宽, 分辨力下降。圆迹 SAR 由于距离向和方位向的耦合, 其波数谱呈现圆形, 二维分辨力达到一致, 运动误差对二维分辨力的影响是一致的, 图 3 表示峰值左侧第一个点的变化。

由于目标散射特性值的下降, 峰值左侧第一点的 PSLR₁ 将会升高, 主瓣展宽。设主瓣的展宽系数为 η , 可计算得到:

$$\eta = L_1 / L_0 \quad (14)$$

式中:

$$\begin{cases} \frac{L_1}{L_0} = \frac{h_{-3} / h_1}{h_{-3} / h_0} = \frac{h_0}{h_1} \\ \eta = \frac{h_0}{h_1} = \frac{10^{(-PSLR_1/20)}}{10^{(-PSLR_1/20) - (\Delta PS LR_1/20)}} = 10^{(\Delta PS LR_1/20)} \end{cases} \quad (15)$$

式中 $\Delta PS LR_1$ 表示峰值左侧第一个点的增量。

圆迹 SAR 分辨力的变化与主瓣的展宽成反比, 设分辨力下降系数为 κ , 则 κ 与 η 的关系为:

$$\kappa = \frac{1}{\eta} \quad (16)$$

2) PSLR

由式(9)可知, $\gamma < 1$ 。因此, 运动误差将会导致目标的散射特性值下降, PSLR 升高。考虑到圆迹 SAR 成像中峰值远大于旁瓣, 误差对旁瓣的影响较小, 可忽略不计, 此时 PSLR 的增量为:

$$\Delta PS LR = 20 \lg \left(P_{\text{side_max}} / (N_a A \gamma) \right) - 20 \lg \left(P_{\text{side_max}} / (N_a A) \right) = -20 \lg \gamma \quad (17)$$

式中 $P_{\text{side_max}}$ 表示最大旁瓣。

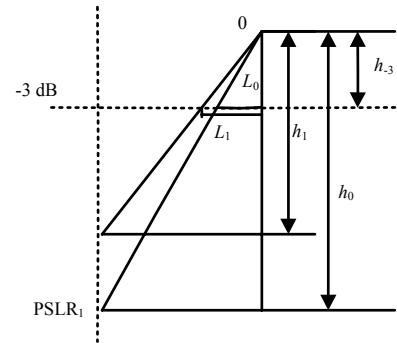


Fig.3 Value change of the first point on the left side of the peak
图 3 峰值左侧第一个点的变化

3) ISLR

对于 ISLR, 有

$$\Delta ISLR = 10 \lg \left(E_{\text{side_new}} / E_{\text{main_new}} \right) - 10 \lg \left(E_{\text{side}} / E_{\text{main}} \right) \quad (18)$$

式中: E_{side} 和 E_{main} 为无运动误差时旁瓣和主瓣的能量; $E_{\text{side_new}}$ 和 $E_{\text{main_new}}$ 为存在运动误差时旁瓣和主瓣的能量。

$$\begin{cases} E_{\text{side_new}} = \int_{2N} \left(10^{(PSLR_{\text{side}} + \Delta PSLR)/20} \cdot |\gamma A| \right)^2 = \int_{2N} \left(10^{(PSLR_{\text{side}})/20} \cdot A \right)^2 \\ E_{\text{main_new}} = \int_{N-1} \left(10^{(PSLR_{\text{main}} + \Delta PSLR)/20} \cdot |\gamma A| \right)^2 + |\gamma A|^2 = \int_{N-1} \left(10^{(PSLR_{\text{main}})/20} \cdot A \right)^2 + \gamma^2 A^2 \end{cases} \quad (19)$$

式中: N 表示主瓣宽度; $PSLR_{\text{side}}$ 表示无运动误差时的旁瓣; $PSLR_{\text{main}}$ 表示无运动误差时除峰值外的主瓣。

由此可以得到:

$$\Delta ISLR = 10 \lg \frac{\int_{2N} \left(10^{(PSLR_{\text{side}})/20} \right)^2}{\int_{N-1} \left(10^{(PSLR_{\text{main}})/20} \right)^2 + \gamma^2} - 10 \lg \frac{\int_{2N} \left(10^{(PSLR_{\text{side}})/20} \right)^2}{\int_{N-1} \left(10^{(PSLR_{\text{main}})/20} \right)^2 + 1} = 10 \lg \frac{\int_{N-1} \left(10^{(PSLR_{\text{main}})/20} \right)^2 + 1}{\int_{N-1} \left(10^{(PSLR_{\text{main}})/20} \right)^2 + \gamma^2} \quad (20)$$

当 $PSLR_{\text{main}} \leq -20$ dB 且 N 较小时, 有:

$$\Delta ISLR \approx 10 \lg \frac{1}{\gamma^2} = -20 \lg \gamma \quad (21)$$

4) 理论分析

基于目标散射特性下降系数 γ 对成像质量进行分析, γ 的大小通过未补偿的相位 ϕ_k 计算得到, 而 ϕ_k 与雷达波长 λ 和误差距离 ΔR 有关。

对于太赫兹圆迹 SAR, 整个圆周运动中不同方位向的运动误差是随机的, 本文是在运动误差服从均匀随机分布的基础上进行讨论的, 其分布范围在 $\Delta R_{\text{max}} \cdot [-1, 1]$, 其中 ΔR_{max} 为随机误差界限。运动误差相位可以表示为:

$$\phi_k = (4\pi / \lambda) \cdot \Delta R_{\text{max}} \cdot \text{rand}[-1, 1] \quad (22)$$

以载频 220 GHz 的太赫兹雷达为例, 此时雷达波长 $\lambda = 1.36$ mm。在 SAR 成像误差中, 运动误差相位较大时, 可知目标的散射特性下降系数 γ 将会很大, 影响成像质量。取 ΔR_{max} 的范围为 0~0.3 mm, 不同 ΔR_{max} 下的 γ 和 PSLR, ISLR 增量如图 4 所示。

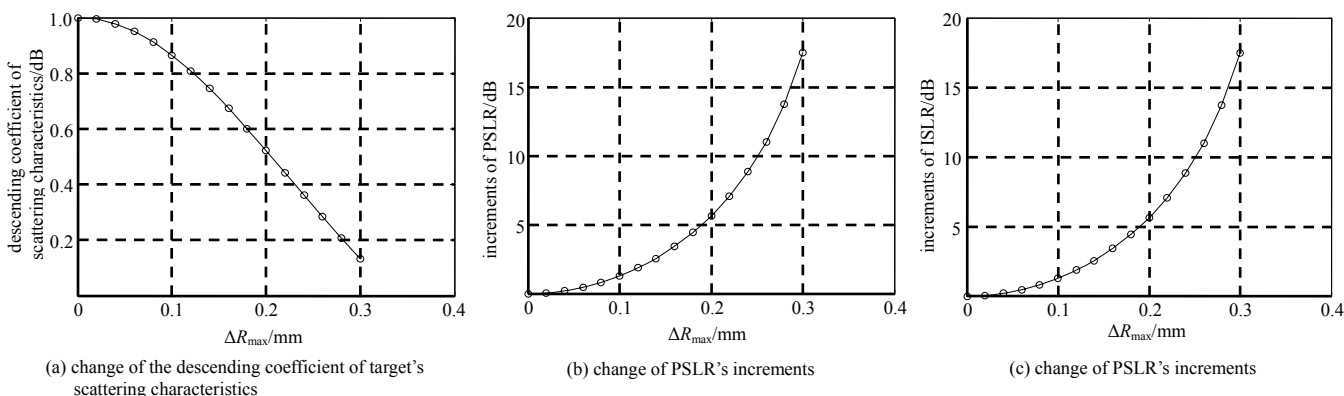


Fig.4 Increments of scattering characteristics of target,PSLR and ISLR when the ΔR_{max} is different

图 4 不同 ΔR_{max} 对目标散射特性 PSLR 和 ISLR 的影响

在图 4 中可观察到, 当运动误差存在时, 目标散射特性下降系数 γ 小于 1, 峰值下降, PSLR 和 ISLR 增大。随着运动误差的增大, 目标的散射特性值逐渐减小, PSLR 和 ISLR 逐渐增大。

3 仿真分析

上述部分定量分析了运动误差对太赫兹圆迹 SAR 成像质量的影响, 在此通过仿真验证分析的正确性。在上述分析中, 运动误差造成了未补偿的相位 $4\pi\Delta R_{\text{max}} / \lambda$, 误差与波长 λ 相关。太赫兹波段在 0.1~10 THz 范围内,

考虑到国内 220 GHz 太赫兹技术比较成熟, 该文以 220 GHz 的太赫兹波进行仿真, 带宽为 1 GHz, 采样频率为 1.2 GHz, 雷达平台运动半径为 10 km, 雷达高度为 3 km, 距离向采样 512 个点, 方位向采样 5 210 个点。

首先仿真太赫兹圆迹 SAR 在理想运动和存在运动误差时的成像, 如图 5 所示。

由图 5(a)~5(b)可以观察到, 理想情况下太赫兹圆迹 SAR 成像的主瓣峰值尖锐, 峰值点附近的值可达到 -20 dB 以下。由图 5(c)~图 5(d)可以观察到, 当太赫兹圆迹 SAR 存在运动误差时, 旁瓣升高, 且旁瓣呈现不规则变化, 这是由于在整个圆周运动中运动误差的随机性引起的。

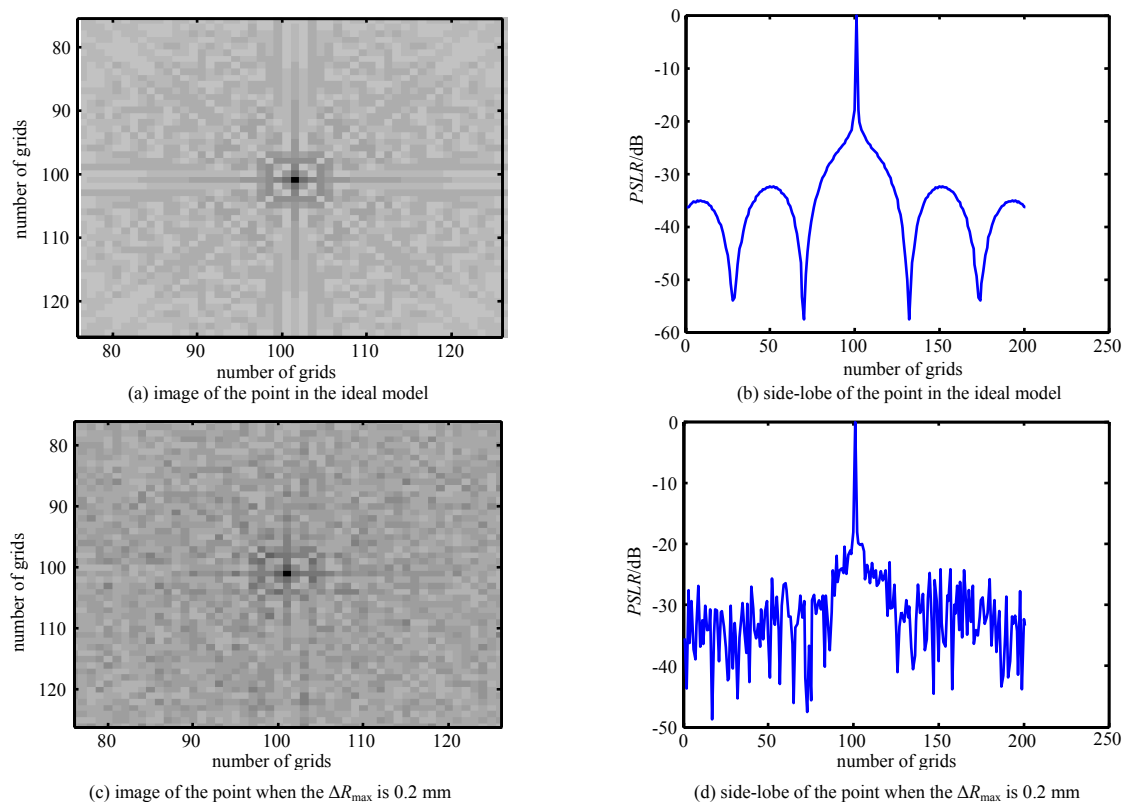


Fig.5 Point's images of terahertz circular SAR in the ideal model and the model with motion error

图 5 太赫兹圆迹 SAR 理想运动与存在运动误差时的点目标成像

仿真不同的运动误差对成像质量的影响, 取 0~0.3 mm 范围内的 $\Delta R_{\max}$ 进行仿真, 分析分辨率、PSLR 和 ISLR 的变化, 如图 6 所示。

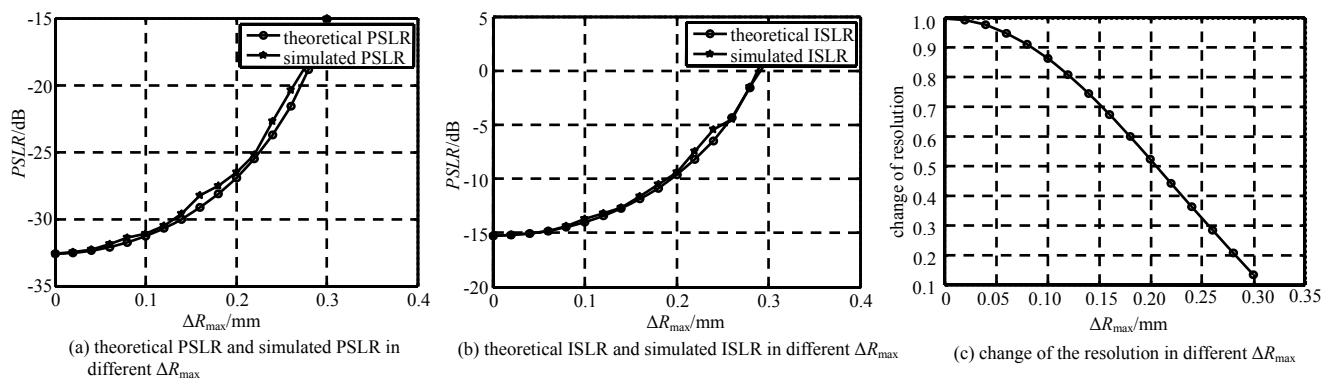


Fig.6 Imaging quality analysis affected by the motion error

图 6 运动误差对成像质量的影响分析

图 6(a)~图 6(b)为 $\Delta R_{\max}$ 在 0~0.3 mm 的运动误差下, 理论计算的 PSLR,ISLR 和仿真得到的 PSLR,ISLR。可以观察到, 仿真得到的 PSLR,ISLR 和理论计算的 PSLR,ISLR 大致一致, 验证了分析的正确性。同时, 运动误差也将导致分辨率的下降, 如图 6(c)所示。可以观察到, 当运动误差 $\Delta R_{\max} < 0.2$ mm 时, 分辨率近似下降了 1 倍, 因此运动误差对分辨率的影响十分严重, 在成像时为了保证分辨率的精确度, 应严格控制运动误差的大小。

在上述的仿真中可以观察到,不同的运动误差对雷达成像质量的影响也不相同。运动误差容限表示在满足 SAR 成像质量指标的要求下,在实际成像中所允许的最大运动误差。以载频 $f_c=220$ GHz, 网格间距 $\Delta r_{\text{grid}}=2.5$ mm 为例, $PSLR=-32.44$ dB, $ISLR=-15.28$ dB。当 SAR 要求 $PSLR<-25$ dB, $ISLR<-10$ dB, 且分辨力变化不超过一倍时, 误差容限为 $\Delta R_{\text{max}}=0.2$ mm。

4 结论

本文基于后向投影算法, 分析了运动误差对太赫兹圆迹 SAR 成像质量的影响。首先建立了太赫兹圆迹 SAR 存在运动误差时的工作模型, 分析了运动误差对方位向相位补偿的影响, 并给出了运动误差存在时目标散射特性值的下降系数。同时, 定量分析了不同运动误差下分辨力、PSLR 和 ISLR 的变化, 并通过仿真验证了分析的正确性, 为太赫兹圆迹 SAR 的进一步研究提供了基础。

参考文献:

- [1] 舒鑫. 太赫兹雷达高分辨 ISAR 成像方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014. (SHU Xin. Research on high resolution ISAR imaging of THz radar[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2014.)
- [2] 贾高伟, 常文革. 圆周 SAR 与线性 SAR 成像特性分析与对比[J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(5): 161–168. (JIA Gaowei, CHANG Wenge. Comparison and analysis of the imaging properties between circular SAR and linear SAR[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2015, 37(5): 161–168.)
- [3] 冉达, 尹灿斌, 贾鑫. 多角度合成孔径雷达成像技术研究进展[J]. 装备学报, 2016, 27(4): 86–91. (RAN Da, YIN Canbin, JIA Xin. Research progress on multi-angle synthetic aperture radar imaging technology[J]. Journal of Equipment Academy, 2016, 27(4): 86–91.)
- [4] 张祥坤. 高分辨力圆迹合成孔径雷达成像机理及方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2007. (ZHANG Xiangkun. Study on imaging mechanism and algorithm of high-resolution circular synthetic aperture radar[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2007.)
- [5] LI Haolin, ZHANG Lei, XING Mengdao, et al. Expediting back-projection algorithm for circular SAR imaging[J]. Electronic Letters, 2015, 51(10): 785–787.
- [6] PRONCE O, PRATS P, SCHEIBER R, et al. Polarimetric 3D reconstruction from multicircular SAR at P-band[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(4): 803–807.
- [7] PRONCE O, PRATS P, PINHEIRO M, et al. Fully polarimetric high-resolution 3D imaging with circular SAR at L-band[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3074–3090.
- [8] 洪文. 圆迹 SAR 成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 125–135. (HONG Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. Journal of Radars, 2012, 1(2): 125–135.)
- [9] 侯丽英, 林赞, 洪文. 干涉圆迹 SAR 的目标三维重建方法研究[J]. 雷达学报, 2016, 5(5): 538–546. (HOU Liying, LIN Yun, HONG Wen. Three-dimension reconstruction method study based on interferometric circular SAR[J]. Journals of Radars, 2016, 5(5): 538–546.)
- [10] 刘燕, 林赞, 谭维贤, 等. 基于圆迹干涉 SAR 的 DEM 提取[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(6): 1463–1469. (LIU Yan, LIN Yun, TAN Weixian, et al. DEM extraction based on interferometric circular SAR[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(6): 1463–1469.)
- [11] 张博军. 圆周 SAR 成像及运动补偿方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2016. (ZHANG Bojun. Research on imaging and motion compensation method of circular SAR[D]. Chengdu, China: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.)
- [12] 田甲申, 张晓玲. 基于自聚焦 BP 的圆周 SAR 运动补偿方法[J]. 中国科技论文, 2014, 9(1): 4–10. (TIAN Jiashen, ZHANG Xiaoling. Circular SAR motion compensation based on autofocus back-projection algorithm[J]. China Sciencepaper, 2014, 9(1): 4–10.)
- [13] 郭振宇, 林赞, 洪文. 一种基于图像域相位误差估计的圆迹 SAR 聚焦算法[J]. 雷达学报, 2015, 4(6): 681–688. (GUO Zhenyu, LIN Yun, HONG Wen. A focusing algorithm for circular SAR based on phase error estimation in image domain[J]. Journal of Radars, 2015, 4(6): 681–688.)
- [14] 周芳, 孙光才, 吴玉峰, 等. 圆迹 SAR 运动误差分析及补偿技术[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(5): 948–955. (ZHOU Fang, SUN Guangcai, WU Yufeng, et al. Motion error analysis and compensation techniques for circular SAR[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(5): 948–955.)

(下转第 983 页)