

非理想航迹城市建筑群 MIMO 下视阵列 SAR 三维仿真

刘 辉¹ 徐 青² 靳国旺² 楼良盛³

1 华北水利水电大学测绘与地理信息学院, 河南 郑州, 450046
2 信息工程大学地理空间信息学院, 河南 郑州, 450001
3 西安测绘研究所, 陕西 西安, 710045

摘 要:在缺少真实下视阵列合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)系统而带来数据获取和成像算法研究等困难的当下,下视阵列 SAR 三维仿真的研究具有重要意义。为了还原载机平台真实的飞行航迹,验证阵列 SAR 技术在高层建筑物密集城区的地形测绘能力,摒弃传统仿真研究基于匀速直线运动的假设,以高度骤变的城市建筑物为对象,分析构建了多输入多输出(multiple input multiple output, MIMO)下视阵列 SAR 非理想航迹运动误差模型,提出了非理想航迹城市建筑群 MIMO 下视阵列 SAR 三维距离多谱勒成像算法。利用航空平台的航迹与姿态建模仿真技术,以及快速高效的回波仿真技术对成像算法进行了仿真实验,验证了方法的正确性和有效性。

关键词:多输入多输出(MIMO);下视阵列 SAR;城市建筑群;非理想航迹

中图分类号:P237 **文献标志码:**A

传统合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)技术以全天时、全天候、强穿透力的优势被广泛应用于地形测图、军事侦察等领域,但其具有左右模糊、几何失真、机底盲区等问题,无法获得高程信息^[1-2]。下视阵列 SAR 系统在跨航向上设置阵列天线,采用天底观测方式,经高程向脉冲压缩技术、方位向合成孔径技术和跨航向波束形成技术实现地形的三维分辨^[3-6],有效解决了上述问题。该技术对建筑物耸立城区和地形复杂山区具有独特的优势,可广泛应用于城市测绘、应急测绘,以及恶劣环境导航等情况,具有良好的应用前景。

早在 1999 年,德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)的 Gierull 首次提出了下视成像雷达(downward-looking imaging radar, DLIR)的概念^[7]。2004 年,法国航天航空研究中心(Office National d'Etudes et de Recherches Aerospatiales, ONERA)的 Giret 等采用线性调频信号代替单频信号,提出了下视 3D-SAR 的概念^[8]。2005 年,法国 ONERA 采用展翼为 23 m 的 BUSARD 滑翔机开始研制下视三

维成像雷达系统——DRIVE Project^[9]。2006 年,德国高频物理与雷达技术研究所(Fraunhofer Institute for High Frequency Physics and Radar Techniques, FGAN-FHR)提出研制用于天底观测的机载三维成像雷达(airborne radar for three-dimensional imaging and nadir observation, AR-TINO)系统^[10-11]。但 2010 年以后便再无与此相关的公开报道。

国内对该技术的发展仍处于起步阶段,学者们关注的焦点多在阵列 SAR 三维成像算法方面。目前相关算法主要分为 3 类:(1)借鉴传统 SAR 成像技术先完成方位向-高程向二维压缩,再进行跨航向压缩,这类算法对回波距离历程引入较多的近似,成像精度较低^[12-15];(2)直接对三维回波数据进行三维重建,这类算法不对距离历程作近似,成像精度较高,但时效性不强^[16];(3)借鉴超分辨率的思想,通过低分辨率的图像实现高分辨率的三维成像^[17-20],这类算法复杂,成像精度和时效性都有待进一步验证。目前公开发表的文献多以点目标为研究对象,且多基于匀速直线运动的假设,不能有效反映下视阵列 SAR 技术在建筑物

耸立城区和地形复杂山区的地形测绘能力。为了还原载机平台真实的飞行航迹,本文以城市建筑物为仿真对象,分析构建了多输入多输出(multiple input multiple output,MIMO)下视阵列 SAR 非理想航迹运动误差模型,将简单有效的三维距离多普勒(range-Doppler, RD)成像算法和两步运动补偿技术相结合,提出了非理想航迹城市建筑群 MIMO 下视阵列 SAR 三维 RD 成像算法。

1 载机航迹及姿态建模仿真

阵列 SAR 技术的载机平台多采用大飞机或无人机,这两种平台都会受到气流、自身形变等影响而无法满足匀速直线飞行条件,导致载机位置和姿态发生变化,给回波数据带来误差。为了更真实地还原载机飞行时的状况,应对平台速度和姿态分别建模。

借鉴信号理论中任何信号都可以表示为有限个正弦信号的叠加,载机在实际飞行过程中,其位置、姿态同样可由多个不同频率的正弦模型累加得到。本文采用式(1)来仿真载机的非理想航迹 $P(t)$:

$$P(t) = v_0 t + \sum_{i=1}^{\infty} A_i \sin(2\pi f_i(t - t_i)) \quad (1)$$

式中, v_0 为初始速度; t 为载机飞行时间; A_i 、 f_i 、 t_i 分别为第 i 个正弦模型的幅值、频率、起始时间。

为了真实还原载机受气流影响飞行姿态不稳的情况,选用阻尼余弦抖动模型来仿真载机的姿态 $G(t)$:

$$G(t) = g_0 + \sum_{j=1}^{\infty} A_j e^{-|\alpha_j| (t - t_{\text{start}})} \cos(2\pi f_j(t - t_{\text{start}})) \quad (2)$$

式中, g_0 为初始姿态; t 为雷达工作时间; t_{start} 为雷达起始工作时间; A_j 、 α_j 、 f_j 分别为第 j 个阻尼余弦抖动模型的幅值、衰减因子、频率。

2 下视阵列 SAR 回波仿真

下视阵列 SAR 回波仿真可分为地形区域建模和回波模拟两步。地形区域建模可根据下视阵列 SAR 的几何模型以及需要仿真的建筑物参数(高程、位置等)来实现;回波模拟可采用距离频域脉冲相干法^[21]来实现。

本文仿真的是城市建筑物,不是单点目标,因此雷达波束照射范围内必然包含多个点目标,雷达回波 $E_R(t_a, t_r)$ 可以认为是多个点目标回波的叠加。即

$$E_R(t_a, t_r) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sigma(i, j) W(t_a; i, j) \cdot p\left[t_r - \frac{2R(t_a; i, j)}{c}\right] \exp\left[-j \frac{4\pi R(t_a; i, j)}{\lambda}\right] \quad (3)$$

式中, M 、 N 表示 t_a 时刻发射波束和接收波束同时照射到的散射单元在方位向和距离向上的数量; t_a 表示方位向慢时间; t_r 表示距离向快时间; $\sigma(i, j)$ 表示散射单元的雷达散射截面; $W(t_a; i, j)$ 表示方位向天线加权函数; $p(t)$ 表示线性调频信号; $R(t_a; i, j)$ 表示散射点与雷达天线相位中心之间的斜距; c 为光速。

雷达回波信号可看作发射信号 $p(t_r)$ 和脉冲响应 $h(t_a, t_r)$ 的卷积结果。即

$$E_R(t_a, t_r) = p(t_r) \otimes h(t_a, t_r) \quad (4)$$

$$h(t_a, t_r) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sigma(i, j) W(t_a; i, j) \cdot \exp\left[-j \frac{4\pi R(t_a; i, j)}{\lambda}\right] \delta\left[t_r - \frac{2R(t_a; i, j)}{c}\right] \quad (5)$$

两个信号的时域卷积可通过频域乘积实现,即通过对两个信号分别快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)后相乘可得到雷达回波仿真信号的傅里叶变换,再对其进行快速傅里叶逆变换(inversion fast Fourier transform, IFFT)即可得到雷达回波仿真信号,这也是距离频域脉冲相干法的数学表达式。公式为:

$$E_R(t_a, t_r) = \text{IFFT}(\text{FFT}(p(t_r)) \cdot \text{FFT}(h(t_a, t_r))) \quad (6)$$

3 结合集合运动补偿的三维 RD 成像算法

3.1 MIMO 下视阵列 SAR 运动误差模型

MIMO 下视阵列 SAR 运动误差模型如图 1 所示,沿飞机飞行方向为 X 轴,阵列天线分布方向为 Y 轴, Z 轴为高程向,图 1 中虚线表示载机的理想航迹,实线表示真实航迹,理想的阵元位置为 $Y_1', Y_2' \cdots Y_K'$ 所示的位置,真实的阵元位置为 $Y_1, Y_2 \cdots Y_K$ 所示的位置。文献[22]指出,雷达回波经过法平面的运动误差补偿后,可认为载机沿理想航迹直线飞行。因此本文假设沿航向的速度、天线指向不变,下视阵列 SAR 只存在法平面的运动误差。

设等效后虚拟阵元的间距为 d ,则沿跨航向第 k 个虚拟阵元在整个虚拟线阵中的位置可记为 kd 。在慢时间 t_a 时,虚拟阵元的坐标为 $(\alpha_a / \text{PRF}, kd, H)$,地面散射点的坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,

其中, v 为平台速度; PRF 为脉冲重复频率; H 为平台的高度。

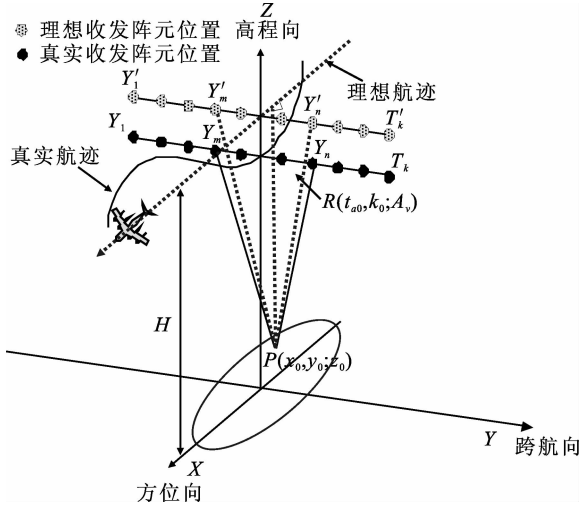


图 1 MIMO 下视阵列 SAR 运动误差模型
Fig. 1 Motion Compensation Model of MIMO Downward-Looking Array SAR

在理想航迹下, 虚拟阵元与地面散射点的距离可表示为:

$$R(t_a, k; A_v) = \sqrt{(\tau_a/\text{PRF} - x_0)^2 + (kd - y_0)^2 + (H - z_0)^2} \quad (7)$$

根据泰勒近似公式, 将距离在阵元 $k_0 d = 0$ 、慢时间 $t_{a0} = x \cdot \text{PRF}/v$ 处展开:

$$R(t_a, k; A_v) \approx R(t_{a0}, k_0; A_v) + \frac{(\tau_a/\text{PRF} - x_0)^2}{2R(t_{a0}, k_0; A_v)} + \frac{(kd)^2 - 2kdy}{2R(t_{a0}, k_0; A_v)} \quad (8)$$

$$R(t_{a0}, k_0; A_v) = \sqrt{(H - z_0)^2 + y_0^2} \quad (9)$$

式(9)是 R 在 (y, z) 平面的投影, 即散射点到阵列天线的最短距离。

在非理想航迹下, 天线相位中心的坐标变为 $(\tau_a/\text{PRF}, kd + \Delta y, H + \Delta h)$, 虚拟阵元与地面散射点的距离可表示为:

$$\bar{R}(t_a, k; A_v) = \sqrt{(\tau_a/\text{PRF} - x_0)^2 + (kd + \Delta y - y_0)^2 + (H + \Delta h - z_0)^2} \quad (10)$$

同样运用泰勒近似公式, 将距离在阵元 $k_0 d = 0$ 、慢时间 $t_{a0} = x \cdot \text{PRF}/v$ 处展开:

$$\bar{R}(t_a, k; A_v) \approx R(t_{a0}, k_0; A_v) + \frac{(\tau_a/\text{PRF} - x_0)^2}{2R(t_{a0}, k_0; A_v)} + \frac{(kd)^2 - 2kdy + 2(kd - y)\Delta y + 2(H - z)\Delta h + \Delta h^2 + \Delta y^2}{2R(t_{a0}, k_0; A_v)} \quad (11)$$

则在远场条件下, 回波信号的距离误差可表示为:

$$\Delta R = \bar{R}(t_a, k; A_v) - R(t_a, k; A_v) = \frac{2(kd - y)\Delta y + 2(H - z)\Delta h + \Delta h^2 + \Delta y^2}{2R(t_{a0}, k_0; A_v)} \quad (12)$$

由式(12)可知, 该情况下回波信号中的相位误差只与阵元跨航向、高度向位置、散射点到每个阵列天线的最短距离有关, 与散射点的方位向位

置无关, 因此可以对同一距离上的所有目标进行统一的运动补偿。

3.2 非理想航迹下的 MIMO 下视阵列 SAR 三维成像方法

本文将简单有效的三维 RD 成像算法和两步运动补偿技术相结合, 如图 2 所示, 在距离压缩前进行距离空不变运动补偿, 在距离徙动校正后、方位向压缩前完成距离空变运动补偿^[22]。其具体步骤为:

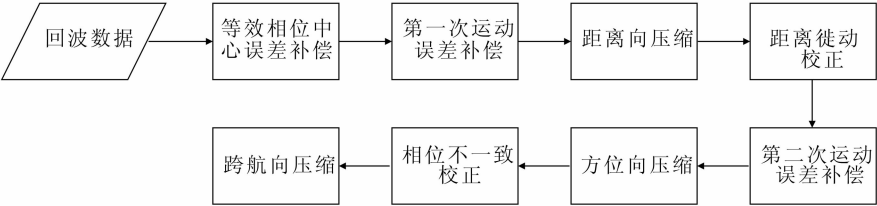


图 2 非理想航迹 MIMO 下视阵列 SAR 成像方法
Fig. 2 Imaging Algorithm of MIMO Downward-Looking Array SAR Under Non-ideal Trajectory

1) 等效相位中心误差补偿。MIMO 阵列不同的收发阵元对应着不同的回波历程, 根据等效相位中心原理, 可将收发分置阵元等效为两者连线中心处虚拟阵元做自发自收, 这必将引入相位误差, 因此需要补偿一个相位常数。将等效后的各回波数据按照方位点数 \times 等效阵元数 \times 距离点

数模式组成三维矩阵, 设三维雷达信号为 $E_R(t_a, n_y, t_r)$, 补偿后的信号为 $E_{\text{comp_EPC}}(t_a, n_y, t_r)$, 则补偿过程为:

$$E_{\text{comp_EPC}}(t_a, n_y, t_r) = E_R(t_a, n_y, t_r) \times \exp\left(-j \frac{2\pi d_n^2}{4R_0\lambda}\right) \quad (13)$$

式中, n_y 为跨航向的等效阵元数; d_n 为收发阵元在跨航向的距离; R_0 为方位-距离平面内点目标与阵元位置的斜距; λ 为工作波长。

2) 距离空不变运动误差补偿。根据文献[22]的方法可推导出距离空不变运动误差补偿函数, 该补偿需要补偿相位 $j4\pi\Delta R_{\text{indep}}/\lambda$ 和包络 $j4\pi f_r \Delta R_{\text{indep}}/c$ 两部分, 其具体补偿过程为:

$$E_{\text{comp_indep}}(t_a, n_y, t_r) = E_{\text{comp_EPC}}(t_a, n_y, t_r) \times \exp(j(4\pi/\lambda + 4\pi f_r/c)\Delta R_{\text{indep}}) \quad (14)$$

式中, f_r 为距离向采样频率; ΔR_{indep} 代表距离空不变运动误差。

3) 距离向压缩。类似于常规 SAR 二维成像, 任意一个点目标的回波, 在接收阵元里都会形成一个二维的线性调频信号, 因此需要将每个相位补偿后的回波信号通过匹配滤波技术进行距离向压缩。其具体压缩过程为:

$$E_{\text{RC}}(t_a, n_y, t_r) = \text{IFFT}_{f_r}(\text{FFT}_{t_r}(E_{\text{comp_indep}}(t_a, n_y, t_r)) \times \text{FFT}_{t_r}(\exp(-j\pi K_r t_r^2))) \quad (15)$$

4) 距离徙动校正。对于单个阵元来说, 阵元到同一个目标的距离沿方位时间呈“远-近-远”形式的抛物线变化, 即同一目标的能量在不同方位时刻分布在不同的距离门, 因此需要将其校正到同一距离门内。其具体校正过程为:

$$E_{\text{RMC}}(t_a, n_y, t_r) = \text{IFFT}_{f_r, f_a} \left(\text{FFT}_{t_r, t_a}(E_{\text{RC}}(t_a, n_y, t_r)) \times \exp\left(-j4\pi \frac{f_r t_a}{c} \times \frac{\lambda^2 R_{\text{near}} f_a^2}{8v^2}\right) \right) \quad (16)$$

式中, R_{near} 为目标至飞行航线的最近斜距; f_a 为方位向采样频率; v 为载机飞行速度。

5) 距离空变运动误差补偿。文献[22]指出, 将距离空变运动误差在距离徙动校正后、方位向压缩前进行补偿, 该补偿只需要补偿相应的相位, 其具体补偿过程为:

$$E_{\text{comp_dep}}(t_a, n_y, t_r) = E_{\text{RMC}}(t_a, n_y, t_r) \times \exp(j4\pi\Delta R_{\text{dep}}/\lambda) \quad (17)$$

式中, ΔR_{dep} 代表距离空变运动误差。

6) 方位向压缩。点目标的回波信号已由沿方位向的曲线校正为沿方位向的直线, 只需要再沿方位向进行脉冲压缩即可完成距离-方位平面的聚焦。其具体压缩过程为:

$$E_{\text{AC}}(t_a, n_y, t_r) = \text{IFFT}_{f_a} \left(\text{FFT}_{t_a}(E_{\text{comp_dep}}(t_a, n_y, t_r)) \times \text{FFT}_{t_a} \left(\exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R_{\text{near}}} t_a^2\right) \right) \right) \quad (18)$$

7) 相位不一致校正。如图 3 所示, 跨航向每个阵元对同一个点 P 斜距上有微小的差异, 构成了相位不一致的情况。以阵元 A_1 和 A_2 为例, 推导出这一微小误差。

$$\Delta R = R_1 - R = \sqrt{R^2 + \Delta d^2} - R \approx R + \frac{\Delta d^2}{2R} - R = \frac{\Delta d^2}{2R} \quad (19)$$

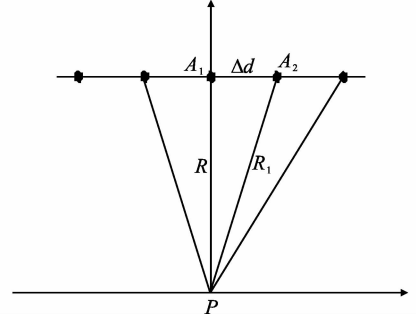


图 3 相位不一致校正示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Phase Inconsistency Correction

因此, 需在跨航向压缩前利用式(20)补偿掉这一微小误差。

$$E_{\text{inconf}}(t_a, n_y, t_r) = E_{\text{AC}}(t_a, n_y, t_r) \times \exp(j2\pi y_m^2/(\lambda R_0)) \quad (20)$$

式中, y_m 为虚拟等效阵元的位置。

8) 角度维压缩。三维 RD 成像算法最重要的一步即是利用波束形成原理完成角度维的分辨。鉴于阵列长度远小于斜距, 可近似认为每个阵元对单个点目标的回波接收角度一致。如图 4 所示, 通过对每个阵元的数据进行跨航向 K 个方向角加权, 再将这些数据相加实现三维成像。均匀线阵在跨航向的转动角 θ_k 可表示为:

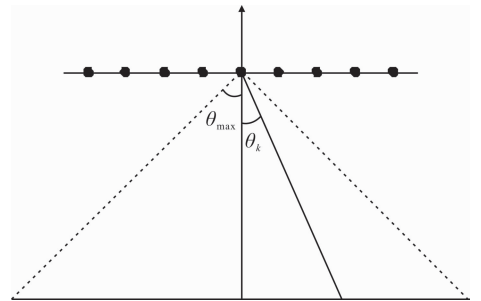


图 4 波束形成示意图

Fig. 4 Diagram of Beamforming

$$\theta_k = \frac{2\theta_{\text{max}}(k-1)}{K-1} - \theta_{\text{max}}, k = 1, 2, \dots, K \quad (21)$$

式中, θ_{max} 为波束扫描宽度的一半; K 为跨航向采样点数。

具体压缩过程为:

$$E_{3D}(t_a,n_y,t_r)=$$
$$\text{sum}\left(E_{\text{inconf}}(t_a,n_y,t_r)\otimes\exp\left(-j\frac{4\pi y_{\text{in}}}{\lambda}\sin\theta_k\right)\right)$$

(22)

式中,⊗代表卷积运算;sum 表示求和运算。

至此,便实现了非理想航迹下的 MIMO 下视阵列 SAR 的三维仿真。

4 三维仿真实验

实验采用 30 发 40 收的 MIMO 模式,仿真了 3 组非理想航迹下等效为 1 200 个阵元的原始回波数据,并分别对 3 组回波数据进行了成像处理,其仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数
Tab.1 Simulation Parameters

发射阵	接收阵	脉冲重复	载频	采样频率	阵元间距	平台速度	脉冲宽度	平台高度	带宽
元数目	元数目	频率/Hz	/GHz	/MHz	/m	/(m·s ⁻¹)	/μs	/m	/MHz
30	40	200	37.5	180	0.004	100	0.1	600	150

原始仿真场景如图 5 所示,在 200 m×200 m 的区域内,构建 5 栋 30 m 高的楼房,其中有两栋成 L 型,三栋为矩形。根据下视阵列 SAR 技术的几何模型,场景中建筑物和地面之间的高度跳变不可避免地会产生阴影区域,本文通过由仿真

建筑物三维位置计算出的雷达入射角来判断阴影是否存在,并将阴影区域的后向散射系数置为 0。图 6、图 7 分别给出了仿真建筑物的楼顶信息和阴影区域。

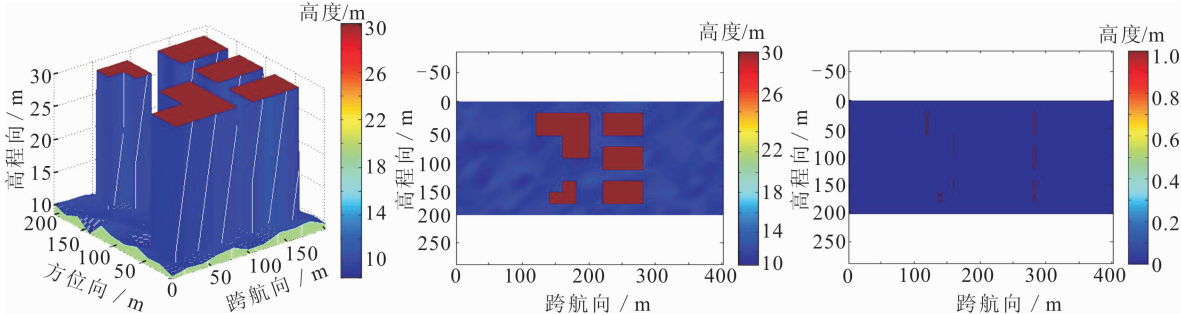


图 5 原始场景
Fig. 5 Original Scene

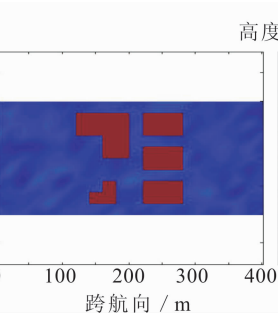


图 6 楼顶信息
Fig. 6 Roof Information

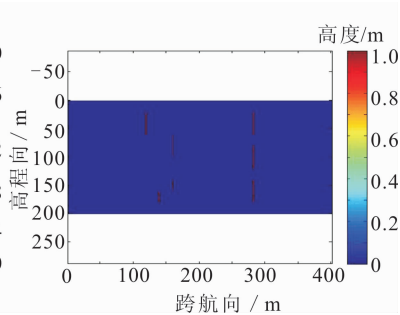


图 7 阴影区域
Fig. 7 Shadow Region

第 1 组回波数据的仿真在高程向上加入正弦变化曲线,其飞行航迹如图 8 所示。

$$g_{\text{range}}(t)=0.5\sin(2\pi\times2(t-t_{\text{end}/2}))$$

(23)

式中, t 表示方位向时刻; $t_{\text{end}/2}$ 表示方位向时刻序列中的中间时刻。

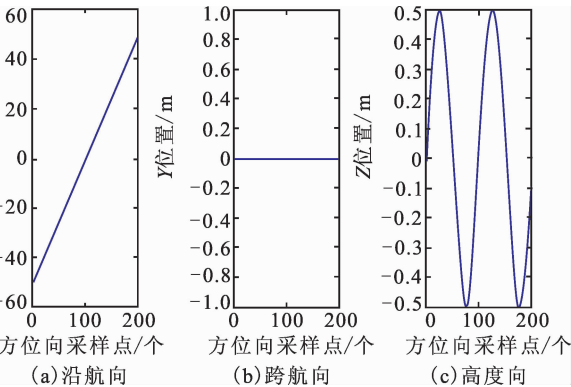


图 8 飞行航迹(高程向加入正弦曲线)
Fig. 8 Flight Path (Join Sine Curve in Elevation Direction)

以此航迹对构建的城市建筑群进行回波仿真,其原始回波数据如图 9 所示,是沿距离向(高

程向)的线性调频信号。经过三维 RD 成像处理后,得到斜距、方位、角度三维分辨,图 10、图 11、图 12 则分别给出了方位-角度平面、角度-斜距平面、方位-斜距平面的切面图。方位-角度平面类似空中的俯视图,沿航迹方向长度不变,跨航向长度缩短;角度-斜距平面表现为随着角度变化的弧线;方位-斜距平面则主要分两块区域(或一块区域),左边区域主要代表高度较高的顶面信息,右边区域主要代表高度较低的地面信息,而且不同的阵元得到的聚焦程度不同,越靠近中间的阵元聚焦程度越好,越靠近两边的阵元聚焦程度越差。但这种成像结果和原始场景不在同一个坐标系里,无法对比分析,需要按照角度、斜距和高度、地距之间的关系进行插值。将成像结果按照与原始场景相同的格网间隔插值处理,规划到同一坐标系后,可得到图 13 所示的成像结果,基本恢复了建筑群的本来形貌,只在边缘地区存在一些毛刺,证明了本文方法的有效性。图 14 给出了最终成像结果与原始场景的差分结果图,由图 14 可知,

重建高程在建筑物内部较准确,在建筑物边缘区域差异较大,且误差主要集中在跨航向上。究其

原因,跨航向分辨率较低、阴影区域高度计算不准,以及相位补偿不精确都会直接影响成像精度。

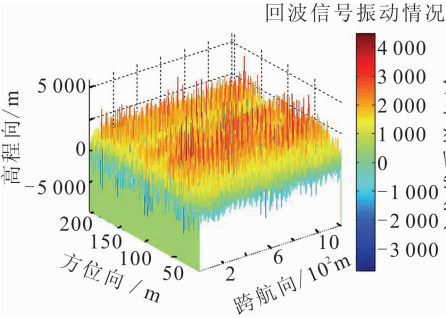


图 9 原始回波 1
Fig. 9 Original Echo 1

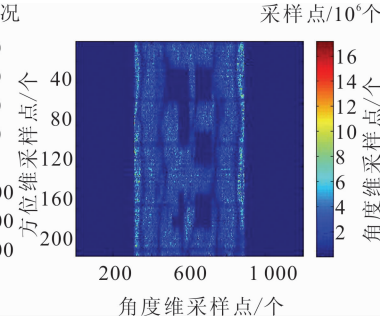


图 10 方位-角度平面 1
Fig. 10 Azimuth-Angle Plane 1

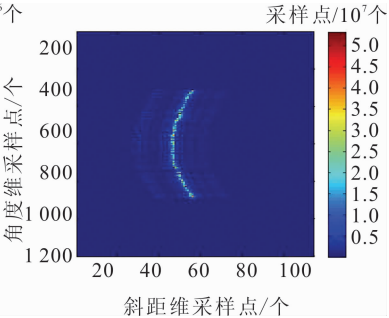


图 11 角度-斜距平面 1
Fig. 11 Angle-Range Plane 1

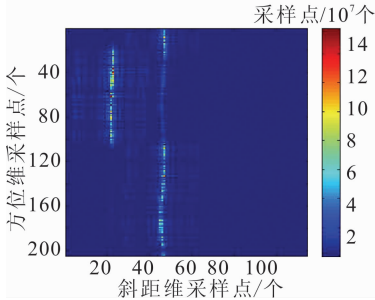


图 12 方位-斜距平面 1
Fig. 12 Azimuth-Range Plane 1

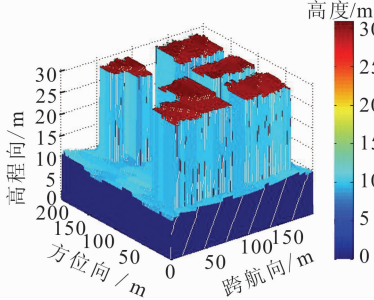


图 13 成像结果 1
Fig. 13 Imaging Results 1

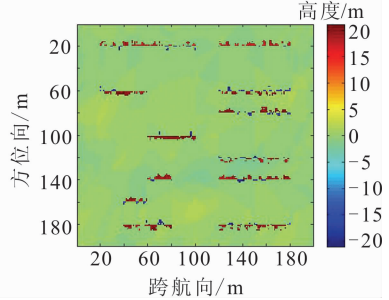


图 14 成像结果与原始场景差分图 1
Fig. 14 Difference Map 1

第 2 组回波数据的仿真在跨航向上加入正弦变化曲线,其飞行航迹如图 15 所示。

在跨航向上加入正弦曲线的飞行航迹,仿真的原始回波数据和与第一组实验相对应的 3 个切面图如图 16 至图 19 所示,成像结果相似。通过插值处理将成像结果和原始场景规划到同一坐标系后,可得到图 20 所示的成像结果,同样恢复了建筑群的本来形貌。将其与原始场景作差分,得到差分结果(见图 21)。从目视效果来看,成像结果在方位向上增加了一些误差,这是误差补偿斜距计算不准所致。

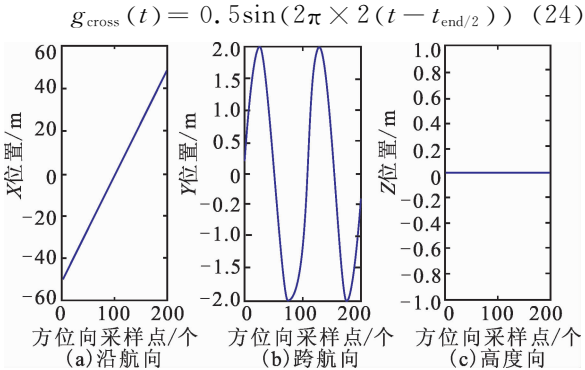


图 15 飞行航迹(跨航向加入正弦曲线)
Fig. 15 Flight Path (Join Sine Curve in the Cross-Track Direction)

第 3 组回波数据的仿真在跨航向、高度向两个方向上加入正弦变化曲线,其飞行航迹如图 22 所示。

$$\left. \begin{aligned} g_{\text{cross}}(t) &= 0.5\sin(2\pi \times 2(t - t_{\text{end}/2})) \\ g_{\text{range}}(t) &= 0.5\sin(2\pi \times 2(t - t_{\text{end}/2})) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

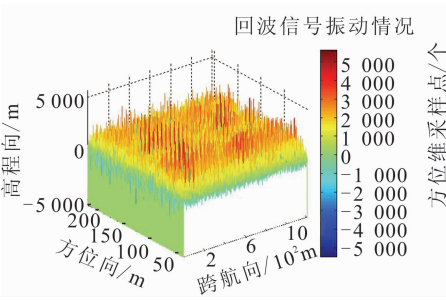


图 16 原始回波 2
Fig. 16 Original Echo 2

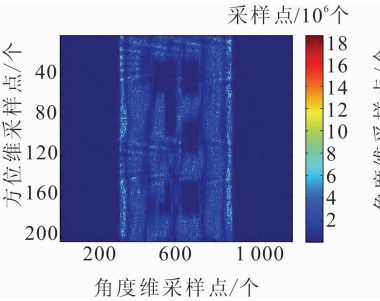


图 17 方位-角度平面 2
Fig. 17 Azimuth-Angle Plane 2

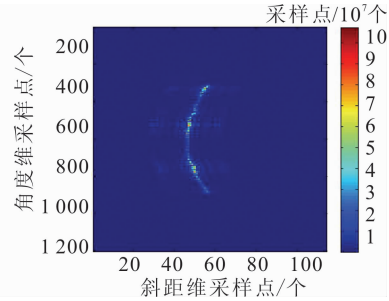


图 18 角度-斜距平面 2
Fig. 18 Angle-Range Plane 2

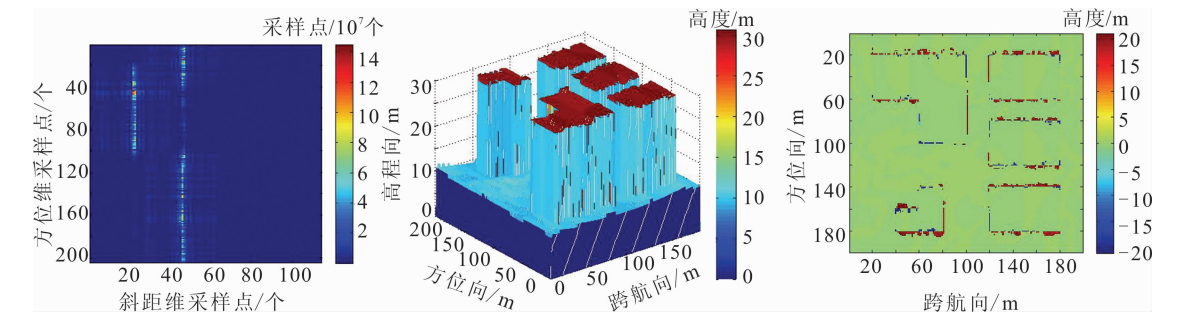


图 19 方位-斜距平面 2

Fig. 19 Azimuth-Range Plane 2

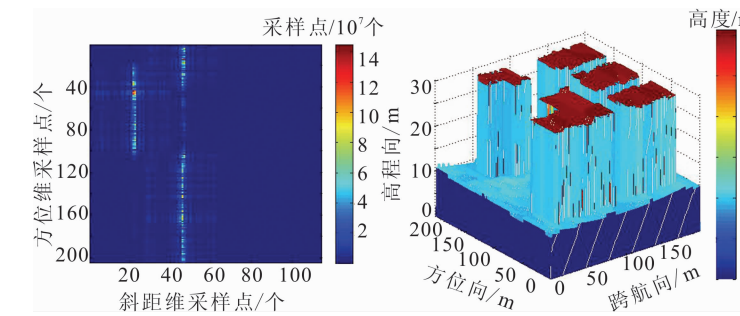


图 20 成像结果 2

Fig. 20 Imaging Results 2

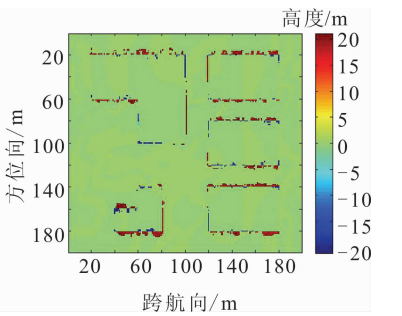


图 21 成像结果与原始场景差分图 2

Fig. 21 Difference Map 2

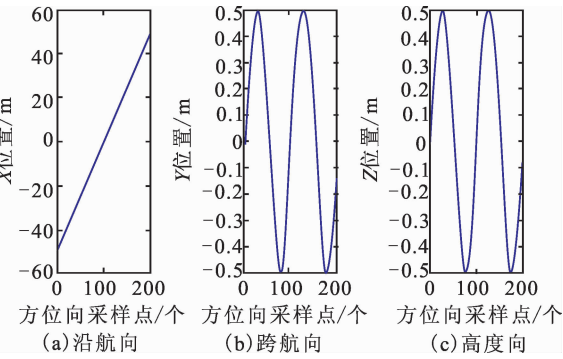


图 22 飞行航迹(跨航向、高程向加入正弦曲线)

Fig. 22 Flight Path (Join Sine Curve in Both Cross-Track Direction and Elevation Direction)

在跨航向和高程向上同时加入正弦曲线的飞行航迹,仿真的原始回波数据如图 23 所示。图 24 至图 27 分别给出了该航迹下方位-角度平面切面图、角度-斜距平面切面图、方位-斜距平面切面图和成像结果,同样能得到与前两组实验相似的目视效果,各维聚焦程度和建筑群重建结果均较好。将最终成像结果与原始场景作差分,得到图 28 所示的差分结果图,边缘区域毛刺明显增多,成像质量也较第一组数据略差。

为了进一步定量分析非理想航迹 MIMO 下视阵列 SAR 三维成像的有效性,表 2 统计了 3 种航迹下成像后,消除阴影区域影响后高程误差的标准

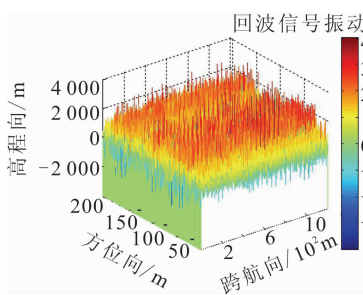


图 23 原始回波 3

Fig. 23 Original Echo 3

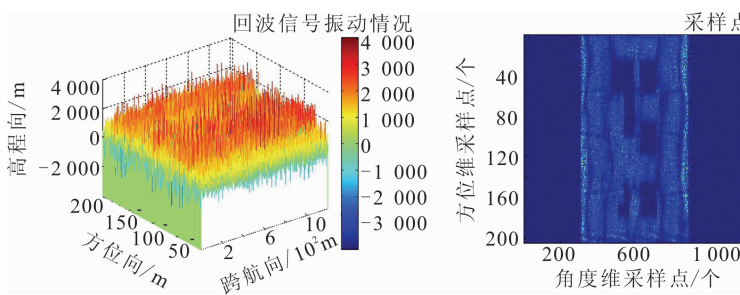


图 24 方位-角度平面 3

Fig. 24 Azimuth-Angle Plane 3

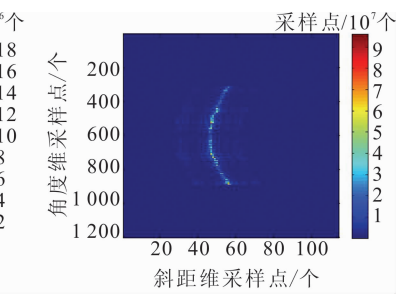


图 25 角度-斜距平面 3

Fig. 25 Angle-Range Plane 3

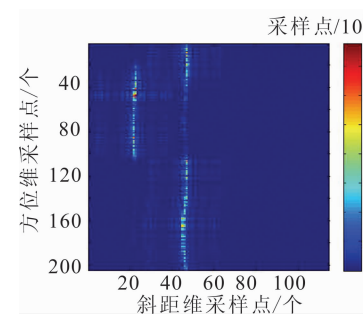


图 26 方位-斜距平面 3

Fig. 26 Azimuth-Range Plane 3

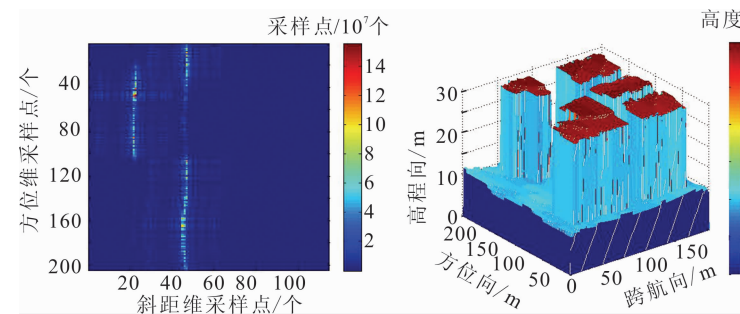


图 27 成像结果 3

Fig. 27 Imaging Results 3

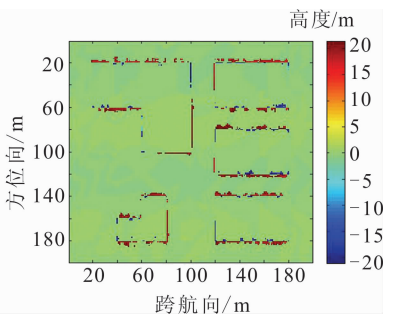


图 28 成像结果与原始场景差分图 3

Fig. 28 Difference Map 3

差、均值,以及整个场景和单独建筑物区域误差在半个分辨率之内的概率。3 组实验的统计结果规

律一致,可以得出两个结论:(1)从后 3 个指标来看,成像结果的准确性较高;(2)在高程向和跨航

向加入相同大小的误差时,高程向的分量影响较大。综上所述,无论从成像结果的目视效果,还是统计量来看,本文模拟的非理想航迹的回波数据,

经成像处理后都能基本恢复原始场景的本来面貌,证明了其有效性和正确性。

表 2 三维成像结果定量指标统计
Tab. 2 Quantitative Statistics Indicators of 3D Imaging Results

数据	消除阴影区域影响 后高程误差标准差/m	消除阴影区域影响 后高程误差均值/m	整个场景误差在半个 分辨率之内的概率/%	单独建筑物区域误差在 半个分辨率之内的概率/%
第 1 组数据	3.216 1	0.358 0	97.41	92.53
第 2 组数据	3.154 3	0.122 5	97.50	92.78
第 3 组数据	3.612 0	0.290 9	96.70	90.51

5 结 语

为了还原载机平台真实的飞行航迹,验证下视阵列 SAR 技术在建筑物耸立城区的地形测绘能力,本文摒弃了传统仿真研究的匀速直线运动假设,分析构建了 MIMO 下视阵列 SAR 非理想航迹运动误差模型;以城市建筑物为仿真对象,将简单有效的三维 RD 成像算法和两步运动补偿技术相结合,提出了非理想航迹城市建筑群 MIMO 下视阵列 SAR 三维距离多谱勒成像算法,并通过三组仿真实验验证了成像算法的正确性和有效性。本文为复杂的 MIMO 模式下视阵列 SAR 仿真问题提供了一种解决思路 and 策略。如何解决阴影区域高度计算不准、相位补偿不精确等问题,是进一步研究的内容。

参 考 文 献

[1] Jin Guowang, Xu Qing, Zhang Hongmin. Synthetic Aperture Radar Interferometry[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014(靳国旺, 徐青, 张红敏. 合成孔径雷达干涉测量[M]. 北京:国防工业出版社, 2014)

[2] Jin Guowang. Research on Key Processing Technique for Deriving Accurate DEM from InSAR[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2007(靳国旺. InSAR 获取高精度 DEM 关键处理技术研究[D]. 郑州:信息工程大学, 2007)

[3] Liu Hui, Li Geshuang. Antenna Configuration Design of MIMO Downward-Looking Array SAR of Unmanned Aerial Vehicle[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(12): 39-43(刘辉, 李葛爽. 无人机 MIMO 下视阵列 SAR 天线构型设计[J]. 测绘通报, 2016(12): 39-43)

[4] Liu Hui, Xu Qing, Jin Guowang, et al. MIMO Antenna Polynomial Weighted Average Design Method of Downward-Looking Array SAR[J]. *Internatio-*

nal Journal of Antennas and Propagation, 2017 (3): 1-18

[5] Du Lei. Study on Model, Algorithm and Experiment for Downward-Looking Synthetic Aperture Radar Three-Dimensional Imaging Based on Linear Array Antennas [D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2010(杜磊. 阵列天线 下视合成孔径雷达三维成像模型、方法与实验研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所, 2010)

[6] Wang Yinbo. Research on Key Technologies of New Three-Dimensional Array SAR[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009(王银波. 新型阵列三维 SAR 关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009)

[7] Gierull C H. On a Concept for an Airborne Downward-Looking Imaging Radar [J]. *International Journal of Electronics and Communications*, 1999, 53(6): 295-304

[8] Giret R, Jeuland H, Enert P. A Study of a 3D-SAR Concept for a Millimeter-Wave Imaging Radar On-board an UAV[C]. European Radar Conference 2004, Amsterdam, Netherland, 2004

[9] Nouvel J, Jeuland H, Bonin G, et al. A Ka-band Imaging Radar; DRIVE On board ONERA Motor-glider[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Denver, USA, 2006

[10] Klare J, Brenner A R, Ender J H G. A New Airborne Radar for 3D Imaging: Image Formation Using the ARTINO Principle[C]. The 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden, Germany, 2006

[11] Klare J. A New Airborne Radar for 3D Imaging - Simulation Study of ARTINO[C]. The 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden, Germany, 2006

[12] Li Weihua. Linear 3D SAR Imaging Principle and Algorithm Research Based on PCA Principle[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009(李伟华. 基于 PCA 原

理的线阵三维 SAR 成像原理与算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2009)

[13] Du Lei, Wang Yanping, Hong Wen, et al. Three-Dimensional Imaging Algorithm for Synthetic Aperture Radar with Linear Array Antennas Based on Elevation Angle Compression Principle[J]. *Journal of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2010, 27(6): 800-808(杜磊, 王彦平, 洪文, 等. 基于俯仰角压缩的阵列天线合成孔径雷达三维成像算法研究[J]. 中国科学院研究生院学报, 2010, 27(6): 800-808)

[14] Peng Xueming, Wang Yanping, Tan Weixian, et al. Airborne Downward-Looking MIMO 3D-SAR Imaging Algorithm Based on Cross-Track Thinned Array[J]. *Journal of Eletronics and Information Technology*, 2012, 34(4): 943-949(彭学明, 王彦平, 谭维贤, 等. 基于跨航向稀疏阵列的机载下视 MIMO 3D-SAR 三维成像算法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(4): 943-949)

[15] Teng Xiumin, Li Daojing. Downward-Looking 3D Imaging Processing for Airborne Cross-Track Sparse Array Radar[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2012, 34(6): 1 311-1 317(滕秀敏, 李道京. 机载交规稀疏阵列天线雷达的下视三维成像处理[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(6): 1 311-1 317)

[16] Peng Xueming, Wang Yanping, Tan Weixian, et al. Fast Wavenumber Domain Imaging Algorithm for Airborne Downward-Looking Array 3D-SAR Based on Region of Interest Pick[J]. *Journal of Eletronics and Information Technology*, 2013, 35(7): 1 526-1 531(彭学明, 王彦平, 谭维贤, 等. 基于感兴趣区域搜寻的机载下视阵列 3D SAR 波数域快速成像方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1 526-1 531)

[17] Li Xueshi, Sun Guangcai, Xu Gang, et al. A New Method of Downward-Looking 3D-SAR Based on Compressed Sensing[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2012, 34(5): 1 017-1 023(李学仕, 孙光才, 徐刚, 等. 基于压缩感知的下视三维成像新方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(5): 1 017-1 023)

[18] Luo Yuchuan. Array SAR 3D Imaging Method Based on Compressed Sensing[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015(罗煜川. 基于压缩感知的阵列 SAR 三维成像方法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2015)

[19] Shi Jun, Zhang Xiaoling, Wei Shunjun, et al. An Optimal DEM Reconstruction Method for Linear Array Synthetic Aperture Radar Based on Variational Model[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(1): 20-28(师君, 张晓玲, 韦顺军, 等. 基于变分模型的阵列三维 SAR 最优 DEM 重建方法[J]. 雷达学报, 2015, 4(1): 20-28)

[20] Zhao Yichao, Zhu Yutao, Yang Meng, et al. Linear Array SAR Imaging Method Based on Redundant Compressive Sampling[J]. *Modern Electronics Technique*, 2015, 38(16): 76-80(赵逸超, 朱宇涛, 杨猛, 等. 基于压缩冗余采样的线阵三维 SAR 成像方法[J]. 现代电子技术, 2015, 38(16): 76-80)

[21] Liu Yongtan. Radar Imaging Technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1999(刘永坦. 雷达成像技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1999)

[22] Bao Zheng, Xing Mengdao, Wang Tong. Radar Imaging Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005(保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005)

Urban Buildings MIMO Downward-Looking Array SAR 3D Simulation Under Non-ideal Trajectory

LIU Hui¹ XU Qing² JIN Guowang² LOU Liangsheng³

1 College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China

2 Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

3 Xi'an Institute of Surveying and Mapping, Xi'an 710045, China

Abstract: In the era of absence of realistic downward-looking array synthetic aperture radar (SAR) system, the difficulties in data acquisition and further imaging algorithms research have been brought about. So the research of downward-looking array SAR three-dimensional (3D) simulation has great (下转第 442 页)

we take the grid as root node to generate adaptive Geohash-Trees. In order to quickly locate the corresponding index, we design trie on the basis of the feature of Geohash. Adaptive Geohash-Trees is a spatial index based on grid. It can divide the space according to the track density by adopting a variety of strategies which improves the efficiency of range query. Meanwhile, we design the algorithm of incremental insertion and update for the supporting of real-time update of trajectory data. Furthermore, this framework has been migrated in Oracle. The experiment results verify that our approach in several aspects such as range query and occupied disk size performs much better than R-Trees.

Key words: trajectory data; Geohash code; adaptability; spatial index; spatial stratified heterogeneity

First author: XIANG Longgang, PhD, professor, specializes in trajectory processing and analysis. E-mail: geoxlg@whu.edu.cn
Corresponding author: GAO Meng, master. E-mail: gmshepard@whu.edu.cn
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41471374, 41001296.

+++++
(上接第 421 页)

significance. In order to restore the aircraft’s real flight path and to verify the topographical mapping ability of array SAR technology in high-rise buildings, the traditional simulation research based on the assumption of uniform linear motion is abandoned. And the non-ideal trajectory motion error model of MIMO(multiple input multiple output) downward-looking array SAR is analyzed and constructed with high-abrupt urban buildings. The 3D range-Doppler (RD) imaging algorithm of urban buildings MIMO downward-looking array SAR under non-ideal trajectory is proposed. Then the flight path and attitude modeling simulation technique of the aeronautical platform, and a fast and efficient echo simulation technique are used to carry out simulation experiments. The correctness and effectiveness of the imaging algorithm are verified by the imaging results.

Key words: MIMO; downward-looking array SAR; urban buildings; non-ideal trajectory

First author: LIU Hui, PhD, lecturer, specializes in InSAR and array SAR. E-mail: lh860801@163.com
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41071296, 41474010, 61401509, 41371439; Key Scientific Research Project of Henan Higher Education Institutions College and University, No. 19A420008.