

相位中心偏差对机载阵列天线下视 3D-SAR 成像影响分析

朱海洋^{*①③④} 洪峻^{①②} 明峰^{①②}

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^③(空间信息处理与应用系统技术实验室 北京 100190)

^④(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 阵列下视 3D-SAR 采用阵列天线实现 3 维分辨成像, 阵列天线包含的大量阵元天线不可避免地会存在相位中心偏差, 这会在回波信号中引入相位误差, 影响阵列下视 3D-SAR 3 维成像。该文首先建立了相位中心偏差分析模型, 然后在此基础上采用随机过程正交展开法, 基于标准勒让德正交基将相位中心偏差带来的回波相位误差展开为正交多项式, 分析了其对图像主副瓣性能及对比度的影响, 并给出了统计规律上的积分旁瓣比与相位中心偏差方差的关系。最后通过仿真结果验证了理论分析的有效性。

关键词: 阵列下视 3D-SAR; 相位中心; 波束形成; 正交分解

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2012)04-0910-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2011.00776

Analysis of Impact of Phase Center Variations in Linear Array Antenna Downward-looking 3D-SAR Imaging

Zhu Hai-yang^{①③④} Hong Jun^{①②} Ming Feng^{①②}

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(National Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Beijing 100190, China)

^③(Key Laboratory of Geo-spatial Information Processing and Application System Technology, Beijing 100190, China)

^④(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: The Linear Array Downward-Looking 3D-SAR (LADL 3D-SAR) achieves the ability of resolving imaging in three dimensions using linear array antennas. The phase center variations of linear array antennas, which is unavoidable under real condition, will lead to echo phase errors that impact the imaging of 3D-SAR. In this paper, the analyzing model of the phase center variation is firstly established, then the impact of phase errors caused by phase center variations in LADL 3D-SAR is discussed based on stochastic process orthogonal expansion. The impact on sidlobe and the statistical relationship between ISLR and the deviation of phase center variations is derived analytically. Finally, the simulation results demonstrate the effectiveness of the theoretical analysis.

Key words: Linear Array Downward-Looking 3D-SAR (LADL 3D-SAR); Phase center; Beamforming operation; Orthogonal expansion

1 引言

阵列下视 3D-SAR 是一种基于阵列天线的 3 维成像合成孔径雷达, 它通过在切航向 (cross-track) 上安装阵列天线, 可以实现对飞行平台正下方场景进行 3 维分辨成像。其成像模式不容易受树木、建筑物和地形起伏的影响, 单次航过即可实现 3 维成像, 并且可以有效避免侧视和斜视 SAR 载机下方的固有盲区。目前国内外正在积极开展阵列 3D-SAR 的研究工作, 其中法国和德国已经进入了系统研制阶段, 国

内还处在成像方法和成像原理验证阶段^[1-4]。

由于切航向的高分辨率实现需要大量的天线阵元, 为降低系统硬件和信号处理复杂度, 对于切航向的阵列布阵, 现有文献均认为可以使用非均匀阵列, 采用收发天线阵元的中点为等效相位中心 (Equivalent Phase Center, EPC), 即虚拟阵元, 这样较少数量的收发天线便可组合出符合需求的阵列^[5,6]。文献[6]研究了在机载平台下这种近似处理带来的误差对 3 维成像的影响, 并提出了有效的改善方法。阵列下视 3D-SAR 系统工作在较高波段 (X, Ka 波段等), 因此需要天线相位中心位置高度精确已知。在实际情况中阵列天线安装完成以后, 由于阵元天线电气特性非理想化, 其真实相位中心并不精

2011-07-28 收到, 2011-12-31 改回

国家 863 计划项目 (2008AA12120301) 资助课题

*通信作者: 朱海洋 qddxzhy@163.com

确等于其物理位置，而是有一定的偏差，这称为天线相位中心偏差^[7]。这种偏差通常会在毫米级，有时达到厘米级。而机翼震动导致的机械位置偏差和环境温度变化等原因也会加剧这种偏差。因此，存在相位中心偏差时会引起回波信号的相位误差，进而对3维成像造成影响，而且文献[6]中对EPC近似影响的改善方法也会受到影响。本文基于非均匀阵列下视3D-SAR系统原理，首先建立了相位中心偏差分析模型，然后通过正交分解的方法将相位中心偏差引起的回波相位误差进行正交展开，分析了对3维成像质量造成的影响，最后通过仿真试验验证了理论分析的正确性。所有这些结论可用于指导阵列下视3D-SAR系统的研制，并且可以为阵列下视3D-SAR系统的性能分析和系统性能优化提供重要的理论依据。

2 阵列下视3D-SAR成像原理及相位中心偏差分析模型

2.1 阵列下视3D-SAR成像原理^[4,8]

在一般的非均匀阵列天线设计中，是将发射阵元密集的置于阵列天线两端，而将接收阵元均匀分布于中间，采用收发天线的中点作为虚拟阵元(EPC)，这样便可形成一个由虚拟阵元组成的等间隔均匀分布的虚拟阵列。在成像中使用虚拟阵元进行计算。假设载机平台以速度 v 沿 x 轴方向飞行，高度为 H ，长度为 L 的虚拟阵列天线由 N 个均匀分布的虚拟阵元组成，如图1所示。 T 表示方位向慢时间， t 表示高程向快时间，第 n 个虚拟阵元的位置为 (u_m, v_n, H) ，其中 $u_m = vT$ 为方位向采样点， $v_n = (n-1)d - L/2$ 为切航向采样点。真实的天线阵元发射的是时分或频分信号^[9]，在分析中，可以认为虚拟阵元是同时发射接收信号。假设雷达发射信号 $s_{st}(t)$ ，点目标 P_0 位于 (x_0, y_0, z_0) ，则第 n 个虚拟阵元接收到的经过解调的信号为

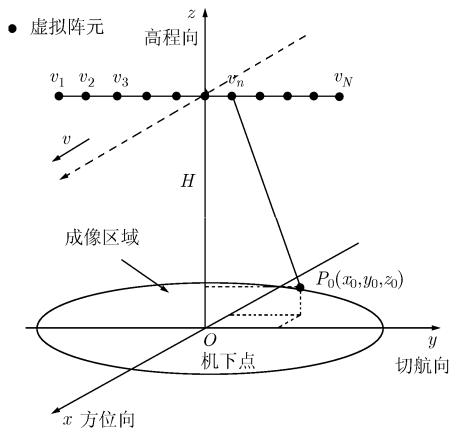


图1 阵列下视3D-SAR成像几何模型

$$s(T, n, t) = \exp(-jk_0 R) s_{st}(t - \tau) \quad (1)$$

其中 $k_0 = 4\pi / \lambda_0$, $R = \sqrt{(u_m - x_0)^2 + (v_n - y_0)^2 + (H - z_0)^2}$ 为距离历程， $\tau = 2R/c$ 为信号时延， c 为光速。令 $r = ct/2$ ，将式(1)映射到距离域

$$s(u_m, v_n, r) = \exp(-jk_0 R) s_{st}((2/c)(r - R)) \quad (2)$$

接收数据的方位向和高程向压缩与普通 SAR 原理一样。高程向和方位向压缩后的数据为

$$s_{u_m, r}(u_m, v_n, r) = p_r(r - R_{n0}) p_{u_m}(u_m - x_0) \cdot \exp(-jk_0 R_{n0}) \quad (3)$$

p_r 和 p_{u_m} 为高程向和方位向的点扩散函数， $R_{n0} = \sqrt{(v_n - y_0)^2 + (H - z_0)^2}$ 。阵列 3D-SAR 一个特点是采用波束形成 (beamforming operation) 来实现切航向的分辨。文献[8]给出了波束形成的原理及具体步骤。波束形成之后

$$s_{u_m, v_n, \Omega}(u_m, v_n, \Omega) = p_r(r - R_{n0}) p_{u_m}(u_m - x_0) \cdot p_\Omega(\sin(\Omega) - \sin(\Omega_0)) \cdot \exp(-jk_0 R_0) \quad (4)$$

式中 $\sin(\Omega_0) = y_0 / R_0$ ， Ω_0 为阵列天线中心到点目标 P_0 的方向角，如图2所示。 Ω 为阵列天线沿切航向的聚焦方向角，通过对阵元的加权操作可以改变 Ω 的角度， p_Ω 为切航向点扩散函数，表示切航向已经压缩至 P_0 所在方向角 Ω_0 。式(4)给出了接收信号在方位向，高程向和切航向压缩后的结果。

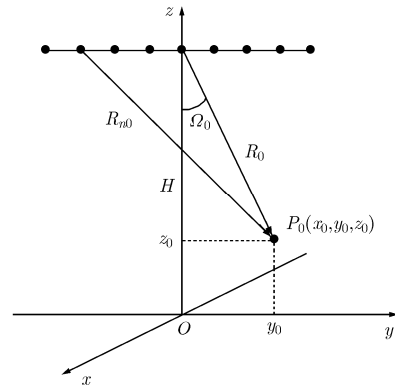


图2 波束形成操作的几何模型

2.2 相位中心偏差分析模型

在成像过程中，回波信号的相位是以接收天线的相位中心位置为准的。阵列3D-SAR通过将所有天线阵元得到的回波信号进行移相和同相叠加(波束形成)来实现对观测对象在切航向上的分辨，所以每个阵元天线的相位中心必须准确已知。在理想情况下，阵列天线的所有阵元的相位中心应该沿切航向水平均匀分布。在实际情况下阵元的真实相位中心总会偏离理想位置，如图3所示。

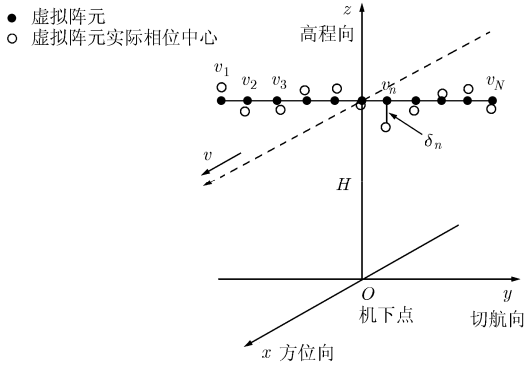


图3 相位中心偏差示意图

设第 n 个虚拟阵元的相位中心偏差为 δ_n ，将 δ_n 沿方位向、切航向和高程向正交分解为 $(\Delta x_n, \Delta y_n, \Delta z_n)$ ，用矢量表示即为 $\delta_n = \Delta \mathbf{x}_n + \Delta \mathbf{y}_n + \Delta \mathbf{z}_n$ ，此时第 n 个阵元的位置可表示为 $(u_m + \Delta x_n, v_n + \Delta y_n, H + \Delta z_n)$ 。则第 n 个阵元到点目标 P_0 的距离历程为

$$R' = ((u_m - x_0 + \Delta x_n)^2 + (v_n - y_0 + \Delta y_n)^2 + (H - z_0 + \Delta z_n)^2)^{1/2} \quad (5)$$

令 $R_0 = \sqrt{y_0^2 + (H - z_0)^2}$ ，对式(5)进行泰勒级数展开，忽略三次及三次以上高次项和误差小项的平方项，则距离历程可近似为

$$R' \approx R_0 + \frac{(u_m - x_0)^2}{2R_0} + \frac{v_n^2}{2R_0} - \frac{y_0}{R_0} v_n + \frac{u_m - x_0}{R_0} \Delta x_n + \frac{v_n - y_0}{R_0} \Delta y_n + \frac{H - z_0}{R_0} \Delta z_n \quad (6)$$

由式(6)，可得出由相位中心偏差 δ_n 引起的回波相位误差为

$$\begin{aligned} \Delta \Phi_e &= \frac{4\pi}{\lambda_0} (R' - R) = k_0 \frac{u_m - x_0}{R_0} \Delta x_n \\ &+ k_0 \frac{v_n - y_0}{R_0} \Delta y_n + k_0 \frac{H - z_0}{R_0} \Delta z_n \\ &= \Delta \Phi_{ex} + \Delta \Phi_{ey} + \Delta \Phi_{ez} \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\Delta \Phi_{ex} = k_0(u_m - x_0)\Delta x_n / R_0$ 为相位中心沿方位向的偏差 Δx_n 引起的相位误差， $\Delta \Phi_{ey} = k_0(v_n - y_0)\Delta y_n / R_0$ 为切航向偏差 Δy_n 引起的相位误差， $\Delta \Phi_{ez} = k_0(H - z_0)\Delta z_n / R_0$ 为高程向偏差 Δz_n 引起的相位误差。为简单起见，采用白高斯随机序列模型来描述 Δx_n 、 Δy_n 和 Δz_n ，即可以分别看作以 v_n 为自变量，均值为零，方差分别为 $\sigma_{x_n}^2$ 、 $\sigma_{y_n}^2$ 和 $\sigma_{z_n}^2$ 的白高斯随机序列。因此， $\Delta \Phi_{ex}$ 为方位向的一次相位误差和切航向的随机相位误差的乘积， $\Delta \Phi_{ey}$ 和 $\Delta \Phi_{ez}$ 为切航向的随机相位误差。

由以上分析可见，相位中心偏差会在回波信号中引入相位误差，从而影响成像质量。由于引入的

相位误差具有随机性，所以下面采用随机过程展开法来分析对成像的影响。

3 相位中心偏差对成像质量影响分析

3.1 基于正交基的随机过程展开

由 2.2 节可知，相位中心偏差对回波信号的影响是引入了随机相位误差 $\Delta \Phi_e$ ，所以相位中心偏差对成像的影响也就是随机相位误差 $\Delta \Phi_e$ 对成像的影响。在分析相位误差对 SAR 成像影响时一般将相位误差分解为一次、二次等多项式，然后分析各次相位误差对成像的影响。为了避免展开式中的各项互相耦合，采用随机过程正交基展开法，将随机相位噪声以标准勒让德多项式为基展开为多项式形式^[10]，即对随机过程 $\{\varphi(t), t \in [-T/2, T/2]\}$ ，展开为

$$\varphi(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n P_n(t), \quad t \in [-T/2, T/2] \quad (8)$$

式中 $a_n = \int_{-T/2}^{T/2} \varphi(t) P_n(t) dt$ ， $P_n(t) = \sqrt{(2n+1)/T} \cdot \rho_n(2t/T)$ ， $\rho_n(\cdot)$ 为 n 次勒让德多项式。各次项系数的统计方差可以由下式求得

$$\begin{aligned} \sigma_{a_n}^2 &= E[a_n a_n] = E \left[\int_{-T/2}^{T/2} \varphi(t_1) P_n(t_1) dt_1 \right. \\ &\quad \left. \cdot \int_{-T/2}^{T/2} \varphi(t_2) P_n(t_2) dt_2 \right] \\ &= \iint R_\varphi(t_1, t_2) P_n(t_1) P_n(t_2) dt_1 dt_2 \\ &= \int S_\varphi(f) df \iint e^{j2\pi f(t_1 - t_2)} P_n(t_1) P_n(t_2) dt_1 dt_2 \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $R_\varphi(t_1, t_2)$ 为 $\varphi(t)$ 的自相关函数， $S_\varphi(f)$ 为 $\varphi(t)$ 的功率谱密度函数。由此可以确定各次相位误差的统计方差，分析各次相位误差对成像的影响。下面采用这种方法分别分析式(7)中相位误差 $\Delta \Phi_e$ 的每一项相位误差对成像的影响。在本文以下的切航向压缩计算结果和仿真结果中均没有采用加权处理。

3.2 相位误差 $\Delta \Phi_{ex}$ 对成像的影响

相位中心沿方位向的偏差 Δx_n 引起的相位误差为

$$\Delta \Phi_{ex} = k_0 \frac{u_m - x_0}{R_0} \Delta x_n \quad (10)$$

$\Delta \Phi_{ex}$ 为方位向的一次相位误差和切航向的随机相位误差的乘积，会对方位向和切航向的压缩成像造成影响。对于方位向，相当于第 n 个天线阵元的回波数据附加了系数为 $k_0 \Delta x_n / R_0$ 的方位向一次相位误差，这会造成在高程向和方位向压缩之后每个天线阵元的回波在方位向上有不同大小的平移，在切航向压缩时，会造成方位向最终的压缩结果主瓣展宽(残余 RCM(距离徙动)效应)^[11]。但是，在一般情况

下 Δx_n 很小, 只有厘米级或毫米级, 所以 $|k_0 \Delta x_n R_0| \ll 1$, $\Delta \Phi_{ex}$ 造成的这种影响可以忽略不计。

对于切航向, 相当于在每个方位向采样点引入了系数为 $k_0(u_m - x_0)/R_0$ 的随机相位误差。由于回波数据最终被压缩至采样点 $u_m = x_0$ 处, 而当 $u_m = x_0$ 时 $\Delta \Phi_{ex} = 0$, 即在此采样点处不存在切航向的相位误差, 所以 $\Delta \Phi_{ex}$ 不会对切航向最终成像产生影响。

3.3 相位误差 $\Delta \Phi_{ey}$ 对成像的影响

当存在相位误差 $\Delta \Phi_{ey}$ 时, 由式(3), 高程向和方位向压缩后的信号为

$$s'_{u_m, r}(u_m, v_n, r) = p_r(r - R_{n0}) p_{u_m}(u_m - x_0) \cdot \exp(-jk_0 R_{n0}) \exp(-j\Delta \Phi_{ey}) \quad (11)$$

为简便起见, 只考虑与切航向压缩有关的项, 则式(11)变为

$$s'(v_n) = \exp(-jk_0 R_{n0}) \exp(-j\Delta \Phi_{ey}) \quad (12)$$

将 R_{n0} 泰勒展开并忽略三次及以上高次项, 补偿掉关于 v_n 的二次项, 忽略常数项并令 $\sin(\Omega_0) = y_0/(H - z_0)$, 进行切航向波束形成操作, 则输出为

$$s'_o(\Omega) = \sum_{v_n=-L/2}^{L/2} \exp(jk_0 v_n \sin(\Omega_0)) \exp(-j\Delta \Phi_{ey}) \cdot \exp(-jk_0 v_n \sin(\Omega)) \quad (13)$$

将 $\Delta \Phi_{ey}$ 进行正交分解

$$\Delta \Phi_{ey} = \sum_{n=0}^{\infty} c_n P_n(v_n), \quad v_n \in [-L/2, L/2] \quad (14)$$

由式(9), 系数 c_n 的统计方差 $\sigma_{c_n}^2$ 为

$$\begin{aligned} \sigma_{c_n}^2 &= \frac{k_0^2}{R_0^2} \sigma_{ym}^2 \left(\int_{-\infty}^{\infty} V(k) dk + y_0^2 \right) \int_{-L/2}^{L/2} \iint P_n(v_{n1}) \\ &\quad \cdot P_n(v_{n2}) \exp(jk(v_{n1} - v_{n2})) dv_{n1} dv_{n2} dk \\ &= \frac{3}{4} \sigma_{\Delta \Phi_{ey}}^2 \left(\int_{-\infty}^{\infty} V(k) dk + y_0^2 \right) \int_{-L/2}^{L/2} \iint P_n(v_{n1}) \\ &\quad \cdot P_n(v_{n2}) \exp(jk(v_{n1} - v_{n2})) dv_{n1} dv_{n2} dk \end{aligned} \quad (15)$$

式中 $V(k)$ 为 v_n 功率谱, $\sigma_{\Delta \Phi_{ey}}^2$ 为 $\Delta \Phi_{ey}$ 的方差。式(15)建立了系数 c_n 方差与 Δy_n 方差和 $\Delta \Phi_{ey}$ 方差的关系。图4给出了 $\Delta \Phi_{ey}$ 方差与式(14)中前4项系数方差的关系。由图中可以看出, $\Delta \Phi_{ey}$ 中前4项占的比例非常小, 基本可以忽略, 所以 $\Delta \Phi_{ey}$ 中起影响作用的主要为高次项。

由勒让德多项式的性质可知, 勒让德多项式的四次及以上高次项具有振荡形的函数图形, 所以相位误差 $\Delta \Phi_{ey}$ 可以看成是一系列不同幅度和频率的周期相位误差的组合

$$\Delta \Phi_{ey} = \sum_n c_n \cos(2\pi f_n v_n) \quad (16)$$

为了定量研究 $\Delta \Phi_{ey}$ 对切航向波束形成输出造成

的影响, 先来分析固定幅度和频率的周期相位误差对波束形成输出的影响。假设有周期相位误差 $\exp(j\alpha \cos(2\pi f_p v_n))$, 由式(4), 切航向压缩输出结果为

$$s'_o(\Omega) = \sum_{v_n=-L/2}^{L/2} \exp(jk_0 v_n \sin(\Omega_0)) \exp(j\alpha \cos(2\pi f_p v_n)) \cdot \exp(-jk_0 v_n \sin(\Omega)) \quad (17)$$

由贝塞尔函数展开式

$$\exp(j\alpha \cos(2\pi f_p v_n)) = J_0(\alpha) + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\alpha) \cdot [\exp(jn2\pi f_p v_n) + (-1)^n \exp(-jn2\pi f_p v_n)] \quad (18)$$

式中 $J_n(\alpha)$ 为第1类 n 阶贝塞尔函数, 则

$$\begin{aligned} s'_o(\Omega) &= \sum_{v_n=-L/2}^{L/2} \exp(-jk_0 v_n (\sin(\Omega) - \sin(\Omega_0))) \\ &\quad \cdot \exp(j\alpha \cos(2\pi f_p v_n)) \\ &= J_0(\alpha) s_o(\Omega) + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\alpha) \\ &\quad \cdot \left[s_o \left(\Omega - n \frac{2\pi f_p}{k_0} \right) + (-1)^n s_o \left(\Omega + n \frac{2\pi f_p}{k_0} \right) \right] \end{aligned} \quad (19)$$

由式(19)可见, 周期相位误差会产生无穷成对回波, 使积分旁瓣电平增大, 而对主瓣基本没有影响。成对回波与主波幅度比值为 $J_n(\alpha)/J_0(\alpha)$, 成对回波的位置距离主波为 $\pm n2\pi f_p/k_0$ 。由于贝塞尔函数为偶函数, 所以系数 α 取正和负的影响是相同的。

综合以上分析, $\Delta \Phi_{ey}$ 对切航向压缩的影响为使旁瓣升高, 积分旁瓣比(ISLR)增大, 而对主瓣没有影响。因为 $\Delta \Phi_{ey}$ 是均值为零的随机相位误差, 所以以方差 $\sigma^2(\Delta \Phi_{ey})$ 表征其大小, 图5(a)给出了 $\Delta \Phi_{ey}$ 对切航向峰值旁瓣比的影响。由于 $\Delta \Phi_{ey}$ 是随机的, 所以它对 ISLR 造成的影响也具有随机性, 为了得到其影响的统计规律, 图5(a)是在每一个 $\sigma^2(\Delta \Phi_{ey})$ 取值点进行了10次计算并取平均得出的结果。图5(b)给出了 $\Delta \Phi_{ey}$ 方差与 Δy_n 方差的关系。

3.4 相位误差 $\Delta \Phi_{ez}$ 对成像的影响

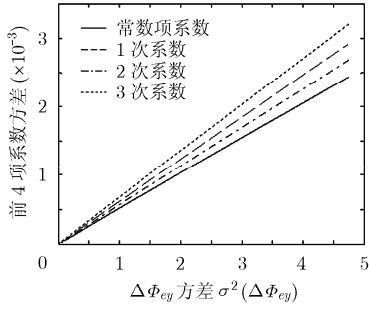
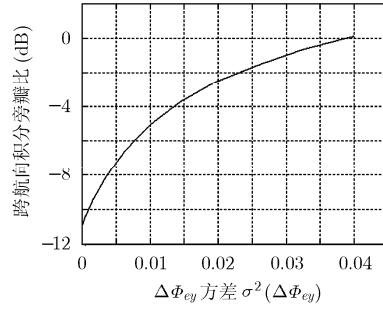
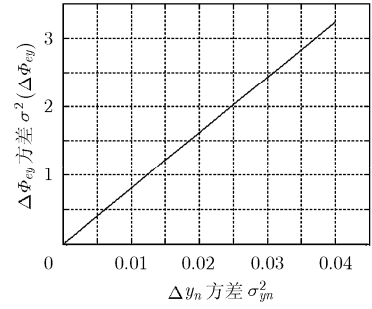
当存在相位误差 $\Delta \Phi_{ez}$ 时, 同式(13)切航向波束形成的输出为

$$s'_o(\Omega) = \sum_{v_n=-L/2}^{L/2} \exp(jk_0 v_n \sin(\Omega_0)) \exp(-j\Delta \Phi_{ez}) \cdot \exp(-jk_0 v_n \sin(\Omega)) \quad (20)$$

同样将 $\Delta \Phi_{ez}$ 正交分解, 有

$$\Delta \Phi_{ez} = \sum_{n=0}^{\infty} d_n P_n(v_n), \quad v_n \in [-L/2, L/2] \quad (21)$$

系数 d_n 的统计方差 $\sigma_{d_n}^2$ 为

图4 $\Delta\Phi_{ey}$ 方差与前4项系数方差的关系(a) $\Delta\Phi_{ey}$ 对切航向峰值旁瓣比的影响(b) $\Delta\Phi_{ey}$ 方差与 Δy_n 方差的关系图5 相位误差 $\Delta\Phi_{ey}$ 对成像的影响

$$\begin{aligned} \sigma_{d_n}^2 &= k_0^2 \sigma_{z_n}^2 \int_{-L/2}^{L/2} \iint_{-L/2 < v_{n1}, v_{n2} < L/2} P_n(v_{n1}) P_n(v_{n2}) \\ &\quad \cdot \exp(jk(v_{n1} - v_{n2})) dv_{n1} dv_{n2} dk \\ &= \sigma_{\Delta\Phi_{ez}}^2 \int_{-L/2}^{L/2} \iint_{-L/2 < v_{n1}, v_{n2} < L/2} P_n(v_{n1}) P_n(v_{n2}) \\ &\quad \cdot \exp(jk(v_{n1} - v_{n2})) dv_{n1} dv_{n2} dk \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)建立了系数 d_n 方差与 Δz_n 方差和 $\Delta\Phi_{ez}$ 方差的关系。图6给出了 $\Delta\Phi_{ez}$ 方差与式(21)中前4项系数方差的关系。由图中可以看出, $\Delta\Phi_{ez}$ 中前4项占的比例非常小, 所以 $\Delta\Phi_{ez}$ 中也主要是高次项起影响作用。

由在3.3节的分析已知, 勒让德正交分解的高次项相位误差相当于高频周期相位误差, 而高频周期相位误差对切航向波束形成的影响为产生无穷对回波, 所以 $\Delta\Phi_{ez}$ 对成像造成的影响相当于无穷个不同幅度和频率的周期相位误差的影响叠加, 会使切航向压缩结果旁瓣电平升高, 积分旁瓣比增大, 而对主瓣没有影响。以方差表征 $\Delta\Phi_{ez}$ 的大小, 图7(a)给出了 $\Delta\Phi_{ez}$ 对切航向积分旁瓣比的影响, 这里为了得到 $\Delta\Phi_{ez}$ 影响的统计规律, 同样是对每一个 $\sigma_{\Delta\Phi_{ez}}^2$ 取值点进行了10次计算并取均值得出的结果。图7(b)给出了 $\Delta\Phi_{ez}$ 方差与 Δz_n 方差的关系。

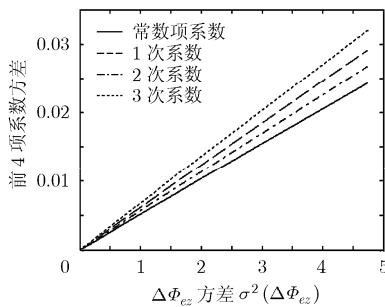
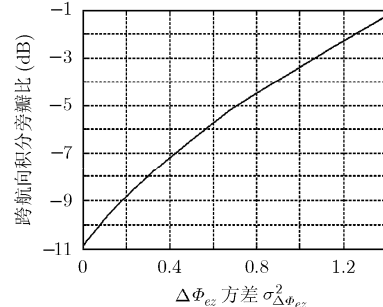
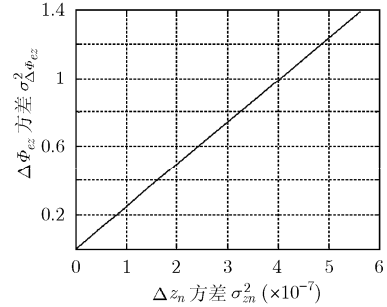
综上所述, 相位中心偏差 δ_n 会引起切航向旁瓣

升高, 积分旁瓣比增大, 图像对比度降低, 而对高程向和方位向的成像基本没有影响。从图5和图7中还可以看出, 切航向的压缩性能对高程向相位中心偏差 Δz_n 要敏感的多, 即在方差相同的情况下高程向相位中心偏差 Δz_n 引起的质量下降要比切航向偏差 Δy_n 引起的严重的多。另外, 在实际情况中, 相位中心偏差 δ_n 可以看作是慢时变的, 即在很长一段时间内保持是白高斯随机过程的一个样本不变, 所以其不同于随机噪声引起的随机相位误差, 它在一段时间内对3维成像的影响是固定不变的。

4 仿真验证

为了验证前面关于相位中心偏差 δ_n 对成像影响的理论分析, 下面进行仿真试验。仿真分两种情况, 单点目标和点阵目标。单点目标仿真设点目标位于机下点处, 点阵目标分布如图8所示。系统参数: 载频 $f_0 = 37.5$ GHz, 带宽 $B = 750$ MHz, 飞行速度 $v = 10$ m/s, 飞行高度 $H = 200$ m, 脉冲重复频率 PRF = 200 Hz, 阵列天线长度 $L = 4$ m, 虚拟天线阵元个数 $N = 1408$ 。由于相位中心偏差 δ_n 沿方位向的分量 Δx_n 对成像没有影响, 所以这里的仿真是假设只存在沿切航向的偏差或只存在沿高程向的偏差。

图9和图10给出了单点目标仿真结果。图9给

图6 $\Delta\Phi_{ez}$ 方差与前4项系数方差的关系(a) $\Delta\Phi_{ez}$ 对切航向峰值旁瓣比的影响(b) $\Delta\Phi_{ez}$ 方差与 Δz_n 方差的关系图7 相位误差 $\Delta\Phi_{ez}$ 对成像的影响

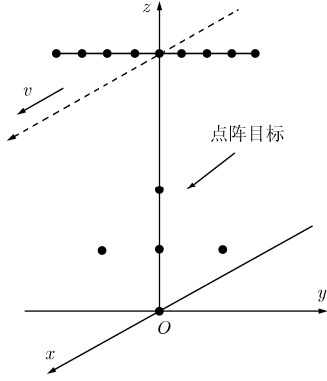


图8 点阵目标分布示意图

出了仿真结果的一个样本的切航向压缩剖面图，这里选取了 $\sigma_{y_n} = 0.2$ 和 $\sigma_{y_n} = 0.75 \times 10^{-3}$ 时的切航向压缩剖面图。从图中可以看出，沿切航向和高程向的偏差均会引起切航向旁瓣升高，而对主瓣基本没有影响，这与前面的理论分析是一致的。图 10 给出了理论计算结果的均值与仿真结果的均值的对比。从图中可以看出在统计规律上仿真结果与计算结果是一致的。

点阵目标仿真结果如图 11 所示。这里由于是点阵目标，所以没有将 δ_n 分解，考察整个相位中心偏

差对成像的影响。从图中可以看出，随着相位中心偏差的增大，切航向旁瓣开始升高，当误差增大到一定程度时，切航向完全散焦。这与上述理论分析结果是一致的。

5 结论

阵列天线是阵列侧视 3D-SAR 实现切航向分辨的关键部分，阵元天线存在相位中心偏差会对切航向成像造成极大影响。本文基于非均匀阵列 3D-SAR 系统原理建立了相位中心偏差分析模型，然后在此基础上理论推导了其对成像质量的影响，计算出了相位中心偏差与成像性能之间的统计规律上的关系。最后通过仿真试验验证了理论计算结果的正确性。此外，阵元天线的相位中心偏差沿切航向是随机变化的，但是从时间角度来看却是慢时变的，即在一段时间内可以认为是不变的，因此它不同于时变随机噪声误差的影响，它们对成像造成的影响在一段时间内是确定的而非随机的。本文提出的误差分析和结论可以为阵列侧视 3D-SAR 系统的研制提供参考，以及为系统性能分析和优化提供重要的理论依据。

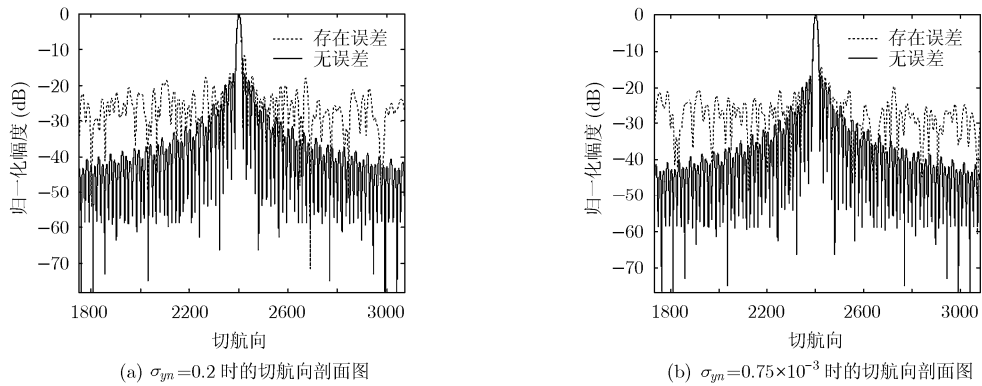


图9 单点目标仿真结果切航向压缩剖面图

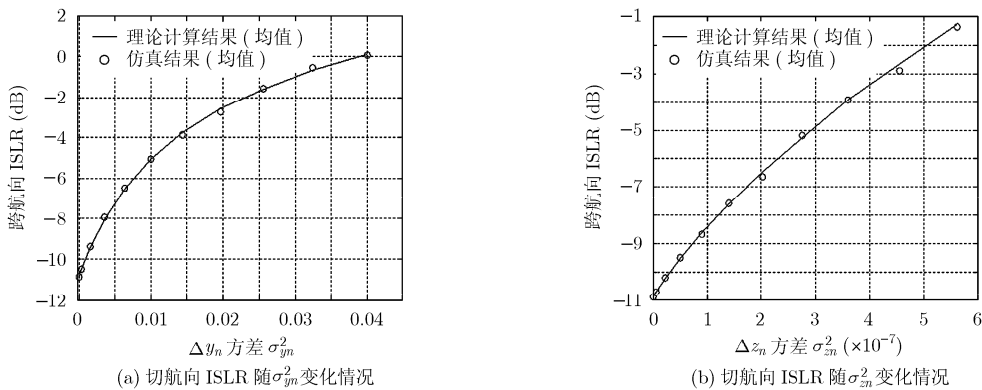


图10 相位中心偏差对点目标成像影响单点目标仿真结果

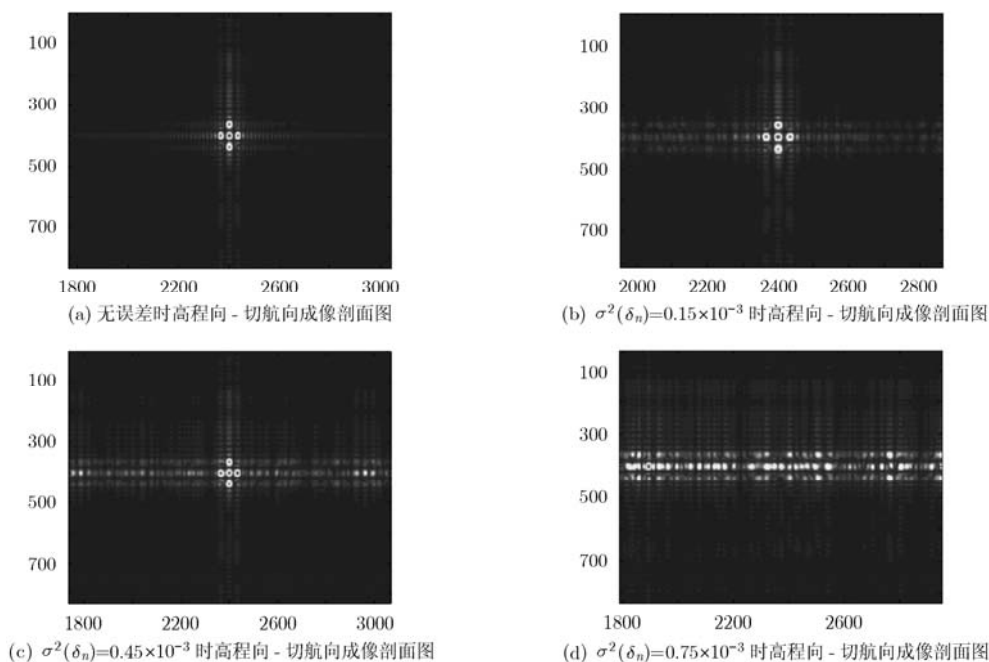


图 11 相位中心偏差对点目标成像影响点目标仿真结果

参考文献

- [1] 谭维贤. 合成孔径雷达三维成像理论与方法研究[D]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2009.
- Tan Wei-xian. Study on theory and algorithms for three-dimensional synthetic aperture radar imaging[D]. [Ph.D dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [2] Weiß M and Ender J H G. A 3D imaging radar for small unmanned airplanes-ARTINO [C]. European Radar Conference, Paris, France, 2005, 2: 209-212.
- [3] Giret R, Jeuland H, and Enert P. A study of 3D-SAR concept for a millimeter-wave imaging radar onboard an UAV [C]. European Radar Conference, Amsterdam, Netherland, 2004, 4: 201-204.
- [4] 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]. [博士论文], 中国科学院电子学研究所, 2010.
- Du Lei. Study on model, algorithm and experiment for downward-looking synthetic aperture radar three-dimensional imaging based on linear array antennas[D]. [Ph.D. dissertation], Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [5] Xie Wen-cheng, Zhang Xiao-ling, and Shi Jun. MIMO antenna array design for airborne downlooking 3D imaging SAR[C]. 2nd International Conference on Signal Processing Systems, Dalian, China, 2010, 2: 452-456.
- [6] 侯海平, 曲长文, 周强, 等. 机载下视阵列SAR等效相位中心分析方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 2154-2160.
- Hou Hai-ping, Qu Chang-wen, Zhou Qiang, *et al.* Research on equivalent-phase-center analysis approach of airborne downward-looking array SAR[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(9): 2154-2160.
- [7] Schmid R, Rothacher M, Thaller D, *et al.* Absolute phase center corrections of satellite and receiver antennas[J]. *GPS Solutions*, 2005, (9): 283-293.
- [8] Klare J, Brenner A, and Ender J. A new airborne radar for 3D imaging — image formation using the ARTINO principle [C]. 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden, Germany, 2006: 295-299.
- [9] Klare J. Digital beamforming for a 3D MIMO SAR improvements through frequency and wave-form diversity[C]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, USA, Boston, 2008: 17-20.
- [10] Brown W and Palermo C. Effects of phase errors on the ambiguity function[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1963, 51(3): 526-527.
- [11] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementaion[M]. Norwood: Artech House, Inc., 2005: 156-166.
- 朱海洋: 男, 1989年生, 硕士生, 研究方向为阵列下视3D-SAR定标理论与技术.
- 洪峻: 男, 1960年生, 研究员, 博士生导师, 长期从事合成孔径雷达定标及定量遥感应用技术研究.
- 明峰: 男, 1977年生, 副研究员, 从事SAR定标理论与量化的研究.