

文章编号:1002-1175(2010)06-0800-09

基于俯仰角压缩的阵列天线合成孔径 雷达三维成像算法 *

杜 磊^{1,2}, 王彦平^{1†}, 洪 文¹, 吴一戎¹

(1 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 100190;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(2010 年 3 月 8 日收稿; 2010 年 4 月 27 日收修改稿)

Du L, Wang Y P, Hong W, 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.

摘要 从阵列天线合成孔径雷达(SAR)的信号模型出发, 提出了一种基于俯仰角压缩的阵列天线 SAR 三维成像算法, 解决了阵列天线 SAR 中存在的距离单元徙动项的校正问题, 从俯仰角压缩的角度分析了阵列天线 SAR 的三维成像原理。通过计算机仿真验证了信号模型和三维成像算法的有效性。

关键词 合成孔径雷达, 距离单元徙动, 三维成像, 阵列天线, 俯仰角压缩

中图分类号 TN957

1 引言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)利用合成孔径原理获得方位向分辨力, 利用脉冲压缩技术获得距离向分辨力, 从而实现将三维分布的空间场景投影到方位-距离平面作高分辨二维成像。但在与飞行航线垂直的零多普勒面内, 以极坐标表示, SAR 只在极径向(即距离向)具有距离分辨能力, 而在极角向(即俯仰角方向)不具备角分辨能力^[1], 这使得该平面内距离相等的所有目标在二维图像中混叠为同一个分辨单元而无法分开^[2]。由于上述原因, 一方面使得常规 SAR 在场景的高程向上不具有分辨能力, 因而存在着由于场景高程起伏引起的叠掩、顶底倒置等几何失真问题^[1]; 另一方面使得常规 SAR 存在着左右模糊问题, 在同一时刻只能对航迹的一侧进行成像(即侧视观测方式), 在对城区建筑物和山区复杂地形等高度变化剧烈的区域成像时存在着严重的阴影问题^[3]。

阵列天线 SAR 是一种新的 SAR 三维分辨成像^[4]技术, 它通过在跨航向(cross-track)上设置阵列天线实现了俯仰角分辨, 从而使其具有三维分辨成像能力, 解决了常规 SAR 存在的几何失真问题。另一方面, 阵列天线 SAR 解决了常规 SAR 的左右模糊问题, 使其具有下视(downward-looking)观测能力, 不存在常规 SAR 中的阴影问题, 在对城区测绘和山区搜索中具有广泛的应用前景^[2]。由于具有上述优势, 使得阵列天线 SAR 的研究和系统研制已引起国外许多机构的重视, 目前在研的机载阵列天线 SAR 原理验证系统包括法国 ONERA 的 DRIVE 系统^[5-6]和德国 FGAN-FHR 的 ARTINO 系统^[7-9]。

在阵列天线 SAR 三维成像算法方面, 文献[7]从阵列信号处理的角度分析了 ARTINO 系统的三维

* 国家杰出青年科学基金(60725103)、国家“863”计划(2007AA12Z116)资助

† 通讯联系人, E-mail: ypwang@mail.ie.ac.cn

成像原理。但由于阵列天线 SAR 的距离历程不仅随方位向采样位置而改变,而且还与跨航向采样位置有关,这使得阵列天线 SAR 的距离单元徙动(RCM)^[10]问题更为严重,同时也使得距离徙动校正(RCMC)变得更为复杂,而文献[7]中没有考虑 RCMC 问题,使得该算法只适用于跨航向成像幅宽较窄的情况。针对常规 SAR 不具备俯仰角分辨率的问题,本文从阵列天线 SAR 的回波信号模型出发,提出了一种基于俯仰角压缩的阵列天线 SAR 三维成像算法,并且算法中考虑了 RCM 项的校正问题,最后通过仿真实验证明了该算法的可行性和有效性。

2 阵列天线 SAR 回波信号模型

图 1 为阵列天线 SAR 在下视成像时的几何关系图,空间直角坐标系 $Oxyz$ 定义如图所示。沿跨航向分布的阵列天线长度为 L ,由位于中央 Q 的单个发射天线和 N 个接收天线阵元组成,其中,各接收天线以发射天线为中心,以等间隔 d 对称分布, v_n 表示第 n 个接收天线阵元在跨航向上的坐标值,表达式为 $v_n = \frac{-L}{2} + (n - 1)d$, $n = 1, 2, \dots, N$ 。在方位向采样点 u_m 处,发射天线到点目标 P 的距离为

$$R_T(u_m) = \sqrt{(u_m - x_0)^2 + y_0^2 + (H - z_0)^2} = \sqrt{(u_m - x_0)^2 + r_0^2}, \quad (1)$$

第 n 个接收天线阵元到点目标 P 的距离为

$$R_R(u_m, v_n) = \sqrt{(u_m - x_0)^2 + (v_n - y_0)^2 + (H - z_0)^2} = \sqrt{(u_m - x_0)^2 + v_n^2 - 2v_n r_0 \sin\theta_0 + r_0^2}, \quad (2)$$

其中, $\{x_0, r_0, \theta_0\}$ 为点目标 P 在柱面坐标系 $Qxr\theta$ 中的坐标值,与空间直角坐标 $\{x_0, y_0, z_0\}$ 的变换关系为

$$\begin{cases} x_0 = x_0 \\ y_0 = r_0 \sin\theta_0 \\ z_0 = H - r_0 \cos\theta_0 \end{cases}, \quad (3)$$

柱面坐标系 $Qxr\theta$ 定义如图 2 所示。当目标斜距 r_0 满足远远大于方位向合成孔径长度 L , 和跨航向阵列天线长度 L 时,根据菲涅耳近似^[11],阵列天线到点目标 P 的往返距离可近似为

$$R(u_m, v_n) = R_T(u_m) + R_R(u_m, v_n) \approx 2r_0 + \frac{(u_m - x_0)^2}{r_0} + \frac{v_n^2}{2r_0} - v_n \sin\theta_0. \quad (4)$$

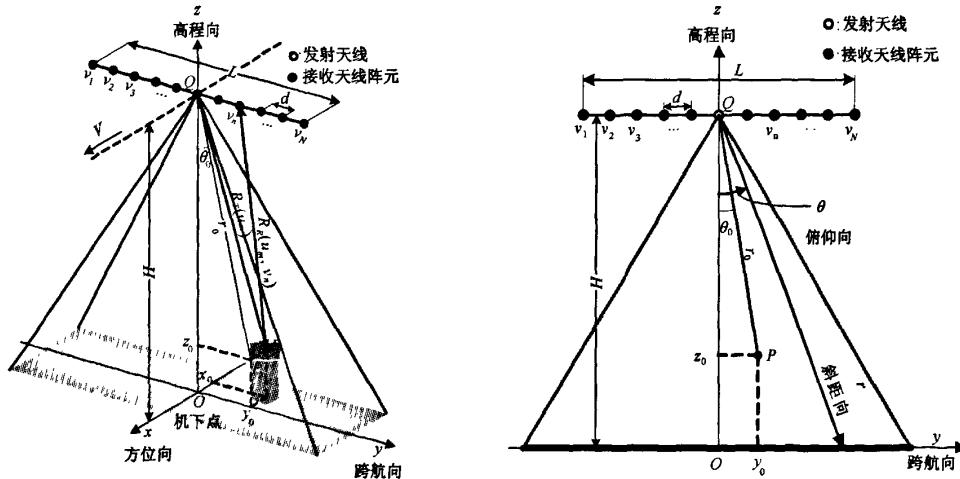


图 1 阵列天线 SAR 下视成像几何关系图

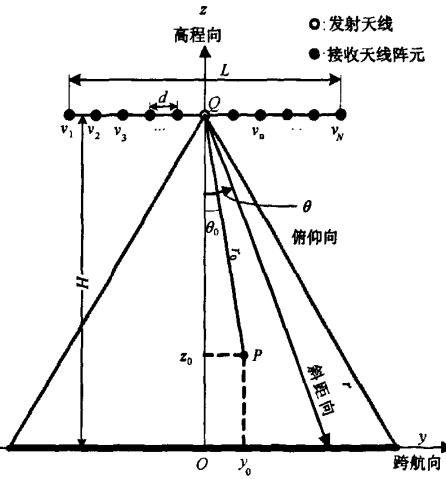


图 2 跨航向 - 高程向平面内的几何关系图

阵列天线 SAR 发射线性调频信号为 $s(t) = \text{rect}(t/T_p) \cdot \exp\{j2\pi(f_c t + K_r t^2/2)\}$, 其中, T_p 为发射脉冲宽度, f_c 为发射信号载波频率, K_r 为线性调频信号的调频率, $\text{rect}(\cdot)$ 表示发射信号的包络, 为矩形函

数. 第 n 个接收天线阵元收到的回波信号经解调后可以表示为:

$$sss(t, u_m, v_n) = \text{rect}\left\{\frac{t - R(u_m, v_n)/C}{T_p}\right\} \cdot \exp\left\{j\pi K_r \left(t - \frac{R(u_m, v_n)}{C}\right)^2\right\} \cdot \exp\{j\varphi(u_m, v_n)\}, \quad (5)$$

其中, 忽略了天线方向图对回波幅度加权的影响; 相位项 $\varphi(u_m, v_n)$ 可表示为

$$\varphi(u_m, v_n) = -2\pi f_c \frac{R(u_m, v_n)}{C} \approx -\frac{2\pi f_c}{C} \left\{ 2r_0 + \frac{(u_m - x_0)^2}{r_0} + \frac{v_n^2}{2r_0} - v_n \sin\theta_0 \right\}. \quad (6)$$

式(5)中第 1 项表示回波信号的包络, 为发射信号包络的一个延时信号; 第 2 项是回波信号的距离向信息; 第 3 项则包含了回波信号的方位向和跨航向信息.

3 三维成像处理算法

由式(4)可以看出, 阵列天线 SAR 距离历程中 RCM 项 $\Delta R(u_m, v_n)$ 表达式为

$$\Delta R(u_m, v_n) = \frac{(u_m - x_0)^2}{r_0} + \frac{v_n^2}{2r_0} - v_n \sin\theta_0. \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 第 1 项是由方位向采样点 u_m 变化引起的 RCM 项, 第 2 项和第 3 项则是跨航向采样点 v_n 变化的 RCM 项. 如果 $\Delta R(u_m, v_n)$ 大于距离采样单元, 那么点目标的距离轨迹将经过不同的距离单元, 则在方位向和跨航向压缩之前需要进行距离徙动校正. 整个三维成像处理流程如图 3 所示.

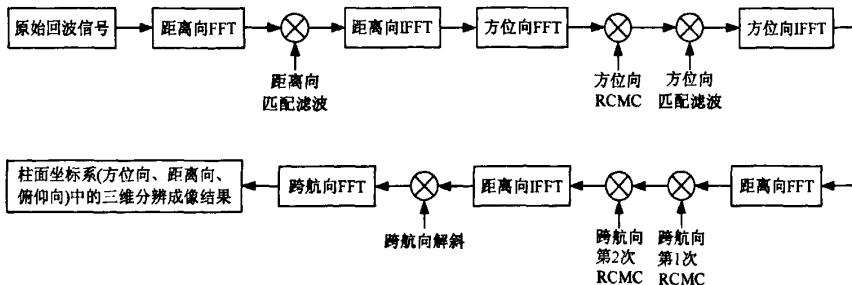


图 3 基于俯仰角压缩的阵列天线 SAR 三维成像算法流程图

3.1 距离向压缩

距离向压缩是在距离频域、方位时域和跨航时域中通过匹配滤波来实现的. 回波信号 $sss(t, u_m, v_n)$ 变换到该域内的表达式为

$$Sss(f_t, u_m, v_n) = \text{rect}\left(\frac{f_t}{K_r T_p}\right) \cdot \exp\left(-j\pi \frac{f_t^2}{K_r}\right) \cdot \exp\left\{-2\pi f_c \frac{R(u_m, v_n)}{C}\right\} \cdot \exp\{j\varphi(u_m, v_n)\}. \quad (8)$$

其中, $Sss(f_t, u_m, v_n)$ 为 $sss(t, u_m, v_n)$ 的距离向傅里叶变换. 距离向压缩匹配滤波参考函数为

$$H_r(f_t) = \text{rect}\left(\frac{f_t}{K_r T_p}\right) \cdot \exp\left(j\pi \frac{f_t^2}{K_r}\right), \quad (9)$$

则距离向压缩后的回波信号经距离向傅里叶逆变换后的表达式为

$$\begin{aligned} sss_r(t, u_m, v_n) &= A_r \cdot \text{sinc}\left[B_r \left(t - \frac{R(u_m, v_n)}{C}\right)\right] \cdot \exp\left[-j \frac{2\pi}{\lambda_c} \frac{(u_m - x_0)^2}{r_0}\right] \cdot \\ &\quad \exp\left(-j \frac{\pi}{\lambda_c} \frac{v_n^2 - 2v_n r_0 \sin\theta_0}{r_0}\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda_c} r_0\right), \end{aligned} \quad (10)$$

其中, A_r 为距离向压缩后的目标信号幅度; B_r 为线性调频信号的带宽, 表达式为 $B_r = K_r T_p$; λ_c 表示载波波长; sinc 函数表达式为 $\text{sinc}(a) = \frac{\sin(\pi a)}{(\pi a)}$.

3.2 方位向压缩

在进行方位向压缩之前,首先要对 $\Delta R(u_m, v_n)$ 中与方位向采样点 u_m 有关的 RCM 项进行校正,暂不考虑与跨航向 v_n 有关的 RCM 项。方位向压缩则是在距离时域、方位频域和跨航时域中完成的,利用驻定相位原理^[10](POSP),将 $sss(t, u_m, v_n)$ 变换到该域后的信号表达式为

$$ssS_{r_c}(t, f_u, v_n) = C_r \cdot \text{sinc}\left[B_i\left(t - \frac{R_e(f_u, v_n)}{C}\right)\right] \cdot \exp\left(j\pi \frac{f_u^2}{K_a}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_u x_0), \quad (11)$$

其中, $K_a = \frac{2}{(\lambda_c r_0)}$, 表示方位向信号调频率; C_r 表示与方位向压缩无关的项

$$C_r = A_r \cdot \exp\left(-j\frac{\pi}{\lambda_c} \frac{v_n^2 - 2v_n r_0 \sin\theta_0}{r_0}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda_c} r_0\right); \quad (12)$$

根据 POSP, 方位向上的时频关系为 $f_u = -k_a(u_m - x_0)$, 代入式(7)中可以得到方位频域中的 RCM 项 $\Delta R(f_u, v_n)$ 的表达式为

$$\Delta R(f_u, v_n) = \frac{\lambda_c^2 r_0 f_u^2}{4} + \frac{v_n^2}{2r_0} - v_n \sin\theta_0, \quad (13)$$

方位向压缩前需要校正的 RCM 由式(13)中的第 1 项给出,

$$\Delta R_e(f_u) = \frac{\lambda_c^2 r_0 f_u^2}{4}. \quad (14)$$

式(14)表明方位向目标偏移是方位频率 f_u , 同时是 r_0 的函数, 即随距离变化的。方位向 RCMC 可通过 sinc 插值来实现。RCMC 后信号变为

$$ssS_{r_c}(t, f_u, v_n) = C_r \cdot \text{sinc}\left[B_i\left(t - \frac{R_e(v_n)}{C}\right)\right] \cdot \exp\left(j\pi \frac{f_u^2}{K_a}\right) \cdot \exp(-j2\pi f_u x_0), \quad (15)$$

其中, $R_e(v_n)$ 为方位向 RCMC 后剩余的距离项, 表达式为

$$R_e(v_n) = 2r_0 + \frac{v_n^2}{2r_0} - v_n \sin\theta_0. \quad (16)$$

式(15)中距离包络与方位频率无关, 表明与方位向有关的 RCM 项已得到校正。下面通过匹配滤波来完成方位向压缩, 匹配滤波参考函数为

$$H_e(f_u) = \exp\left(-j\pi \frac{f_u^2}{K_a}\right). \quad (17)$$

将 $ssS_{r_c}(t, f_u, v_n)$ 乘以匹配滤波参考函数 $H_e(f_u)$, 再经方位向傅里叶逆变换即完成方位向压缩。压缩后的信号表达式为

$$ssS_{r_a}(t, u_m, v_n) = C_r \cdot A_a \cdot \text{sinc}\left[B_a\left(t - \frac{R_e(v_n)}{C}\right)\right] \cdot \text{sinc}[B_a(u_m - x_0)], \quad (18)$$

其中, A_a 为方位向压缩后的信号幅度; $B_a = \frac{2\alpha}{\lambda_c}$ 为方位向信号带宽, 其中 α 为发射天线方位向波束宽度。

3.3 跨航向压缩

由式(16)可以看出, 经过方位向 RCMC 后剩余的 RCM 项为

$$\Delta R_e(v_n) = \frac{v_n^2}{2r_0} - v_n \sin\theta_0, \quad (19)$$

其中, 第 1 项是跨航向采样点 v_n 和目标斜距 r_0 的函数, 第 2 项是 v_n 和目标俯仰角 θ_0 的函数。随着目标位置的变化, r_0 和 θ_0 分别发生着变化, 因此通过 1 次校正很难完成跨航向 RCMC。注意到式(19)中 r_0 与 θ_0 之间不存在耦合关系, 因此可分 2 次 RCMC 依次对 ΔR_e 中与 r_0 和 θ_0 有关的 RCM 项进行校正。跨航向 RCMC 是在距离频域、方位时域和跨航时域中, 依次乘以下面 2 个跨航向 RCMC 的校正因子来完成的。

$$He1_{rcmc}(f_t) = \exp\left(j \frac{\pi f_t}{C} \frac{v_n^2}{r_0}\right), \quad (20)$$

$$He2_{rcmc}(f_t) = \exp\left(-j \frac{2\pi f_t}{C} v_n \sin\theta_0\right). \quad (21)$$

其中,当目标斜距 r_0 满足远远大于跨航向阵列天线长度 L 时, $\Delta R_e(v_n)$ 中的第 1 项对整个跨航向 RCM 项的影响很小,此时跨航向 RCMC 只需考虑式(21)所示的校正因子;当目标位于机下点 O 附近时,目标俯仰角 θ_0 值较小, $\Delta R_e(v_n)$ 中的第 2 项对整个跨航向 RCM 项的影响很小,此时跨航向 RCMC 只需考虑式(20)所示的校正因子,极端情况下,位于机下点 O 的目标 $\theta_0 = 0^\circ$,因此不需要考虑式(21)所示的校正因子.

跨航向 RCMC 后的信号表达式为

$$\begin{aligned} sss_{rac}(t, u_m, v_n) = & A_r \cdot A_a \cdot \text{sinc}\left[B_t\left(t - \frac{2r_0}{C}\right)\right] \cdot \text{sinc}[B_a(u_m - x_0)] \cdot \\ & \exp(-j\pi K_e v_n^2) \cdot \exp\left(j \frac{2\pi}{\lambda_c} v_n \sin\theta_0\right) \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda_c} r_0\right), \end{aligned} \quad (22)$$

其中,距离包络与跨航向采样点 v_n 无关,表明与跨航向有关的 RCM 项已得到校正; $K_e = 1/(\lambda_c r_0)$, 表示跨航向信号调频率.

跨航向 RCMC 后的信号 $sss_{rac}(t, u_m, v_n)$ 中包含 v_n 的线性相位项 $\exp(j2\pi v_n \sin\theta_0 / \lambda_c)$ 和二次相位项 $\exp(-j\pi k_e v_n^2)$. 跨航向压缩是在距离时域、方位时域和跨航时域中完成的,主要包括解斜(deramping)操作和傅里叶变换 2 步. 解斜操作的目的是补偿 $sss_{rac}(t, u_m, v_n)$ 中 v_n 的二次相位项 $\exp(-j\pi k_e v_n^2)$,解斜函数表达式为

$$h_{dr}(v_n) = \exp(j\pi k_e v_n^2). \quad (23)$$

解斜后的信号表达式为

$$sss_{racd}(t, u_m, v_n) = C_{r,a} \cdot \exp\left[j \frac{2\pi}{\lambda_c} v_n w(\theta_0)\right], \quad (24)$$

其中, $w(\theta_0) = \sin\theta_0$; $C_{r,a}$ 表示与跨航向压缩无关的项,表达式为

$$C_{r,a} = A_r \cdot A_a \cdot \text{sinc}\left[B_t\left(t - \frac{2r_0}{C}\right)\right] \cdot \text{sinc}[B_a(u_m - x_0)] \cdot \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda_c} r_0\right). \quad (25)$$

由式(24)可以看出: v_n 与 w 之间存在着线性变换关系,对 $sss_{racd}(t, u_m, v_n)$ 作傅里叶变换,可以将信号由跨航向时域 v_n 压缩至与目标俯仰角 θ_0 相应的 w 域,使得变换后的信号能够聚焦到目标的俯仰角位置处,得到最终的三维分辨图像. 跨航向压缩后的信号表达式为

$$sss_{rac}(t, u_m, w(\theta)) = C_{r,a} \cdot A_e \cdot \frac{\sin\left\{\frac{\pi}{\lambda_c} N d [w(\theta) - w(\theta_0)]\right\}}{N \cdot \sin\left\{\frac{\pi}{\lambda_c} d [w(\theta) - w(\theta_0)]\right\}}, \quad (26)$$

其中, A_e 为跨航向压缩后的目标信号幅度. 函数 $\sin(\pi Na)/\{N \cdot \sin(\pi a)\}$ 在形状上与 sinc 函数相似,同样会在 $a = 0$ 位置处出现主瓣峰值. 但与 sinc 函数不同的是,该函数是关于 a 的周期函数,这意味着除在 $a = 0$ 处出现峰值外,还会在其他位置处出现峰值,即栅瓣. 为避免 $sss_{rac}(t, u_m, w(\theta))$ 中出现俯仰角模糊问题,必须限制阵元间距 d 的取值,这方面的内容在文献[2]中有详细介绍,这里不再详细展开.

4 仿真结果及分析

为验证本文算法的有效性,进行了 7 个点目标的三维成像仿真,仿真参数如表 1 所示.

仿真参数中,接收天线数目阵元间隔阵元间距 d 的选择依据在文献[2]中有详细说明. 根据式(26)及表 1 中的仿真参数可以计算出理论分辨率为 $0.4\text{m} \times 0.4\text{m} \times 0.22^\circ$. 仿真中阵列天线 SAR 采用下视成

像方式。7个点目标在柱面坐标系中的位置参数如表2所示,空间位置分布如图4所示。其中,目标1、2和3方位向和俯仰向的坐标值相同,而在距离向上不同;目标3、4和5距离向和俯仰向的坐标值相同,而在方位向上不同;目标3、6和7的距离向和方位向的坐标值相同,而在俯仰向上不同,分别用于验证阵列天线SAR在距离向、方位向和俯仰向上的分辨能力。

表1 仿真参数

参数说明	数值
载波频率/GHz	37.5
信号带宽/MHz	375
脉冲重复频率/Hz	400
飞行高度/m	500
方位向成像范围/m	0~20
跨航向成像范围/m	-25~25
方位向合成孔径长度/m	5
阵列天线长度/m	2
发射天线数目	1
接收天线数目	28
接收天线数目阵元间隔/m	0.0764
发射天线方位向波束宽度/°	0.57
发射天线俯仰向波束宽度/°	6

表2 目标位置参数(柱面坐标系)

点目标	方位向/m	距离向/m	俯仰向/°
1	10	485	0
2	10	495	0
3	10	490	0
4	15	490	0
5	5	490	0
6	10	490	2
7	10	490	-2

标值相同,因而经距离向和方位向压缩后这3个目标发生了叠掩现象而无法分辨。

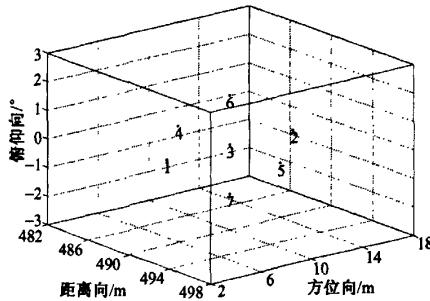


图4 目标空间位置分布图(柱面坐标系)

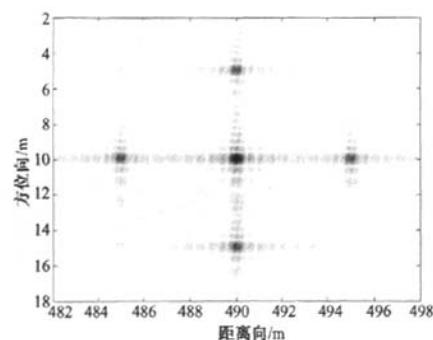


图5 跨航向压缩前的成像结果(第14个阵元)

图6为点目标6的跨航向距离单元徙动值,可以看出:由于平台的飞行高度远远大于阵列天线的长度,使得跨航向RCM项中与目标斜距 r_0 有关的部分要远远小于与目标斜距 θ_0 有关的部分,因此在本文的跨航向RCMC中可以忽略与目标斜距 r_0 有关的RCM项的校正。

图7为基于本文提出的三维成像算法得到的7个点目标的三维分辨成像结果图。其中,图7(a)为三维分辨成像结果的-3dB包络图,图7(b)、7(c)、7(d)分别为三维成像结果在距离向坐标值为490m处的俯仰向-方位向切面、方位向坐标值为10m处的俯仰向-距离向切面和俯仰向坐标值为0°处的距离向-方位向切面内的二维成像结果。由图7可以看出:经过跨航向压缩后,图5中发生叠掩的3个目标在俯仰向平面内可以分辨出来;通过成像处理得到的7个点目标的空间位置与图5仿真输入的点目标的空间位置一致。表3中列出了仿真中7个点目标的成像性能指标,从表中可以看出,仿真实验分辨率与理论分辨率比较一致,峰值旁瓣比与积分旁瓣比均在合理的范围之内,能够满足阵列天线SAR三

维成像的要求.

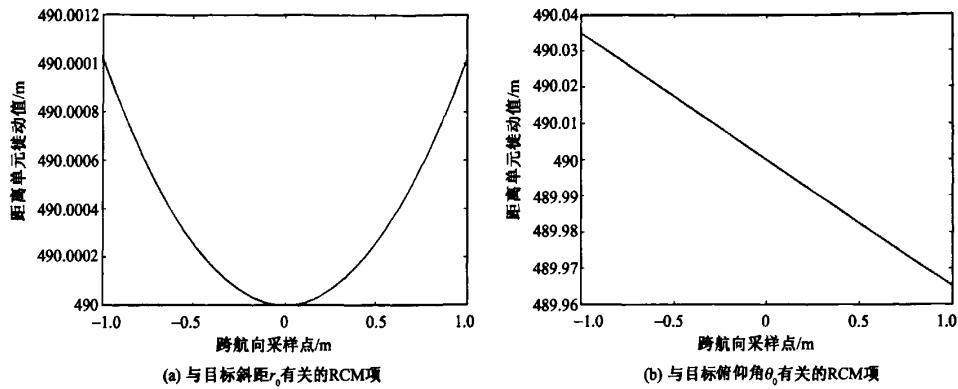


图 6 跨航向距离单元徙动值

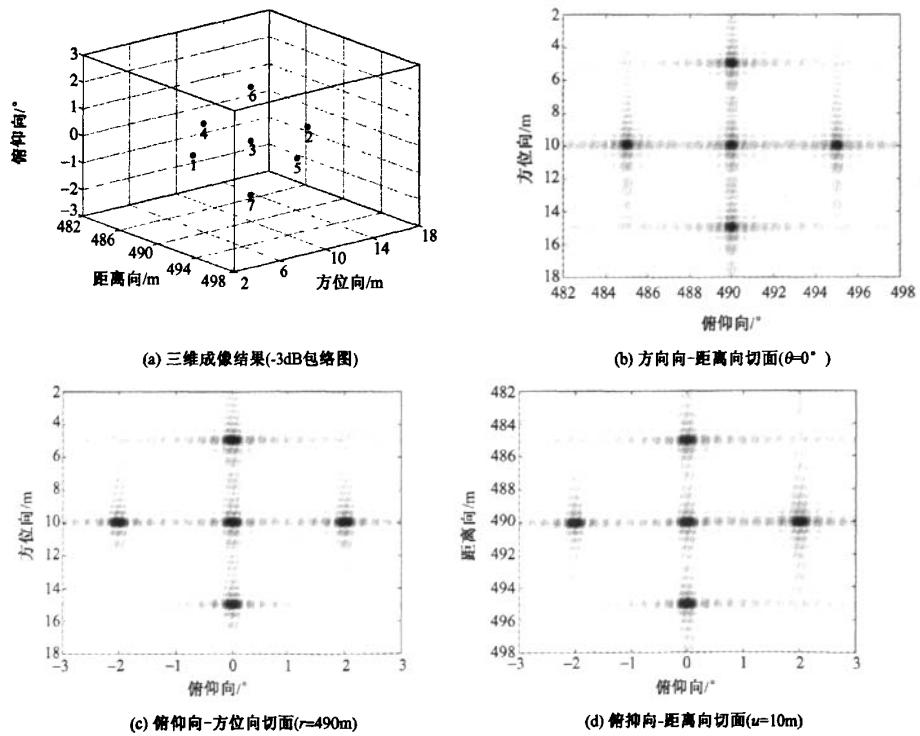


图 7 仿真实验成像结果图(柱面坐标系)

表3 成像性能指标

点目标	分辨率			峰值旁瓣比			积分旁瓣比		
	方位向/m	距离向/m	俯仰向/°	方位向/dB	距离向/dB	俯仰向/dB	方位向/dB	距离向/dB	俯仰向/dB
1	0.43	0.40	0.23	-13.01	-13.25	-13.18	-9.96	-10.46	-10.12
2	0.42	0.40	0.24	-12.98	-13.41	-13.20	-9.98	-10.39	-10.21
3	0.41	0.40	0.24	-13.16	-13.28	-13.23	-10.05	-10.24	-10.16
4	0.41	0.41	0.23	-13.12	-13.22	-13.17	-10.12	-10.36	-10.22
5	0.42	0.41	0.25	-13.07	-13.32	-13.21	-10.01	-10.42	-10.14
6	0.41	0.40	0.23	-13.11	-13.30	-13.15	-10.10	-10.27	-10.20
7	0.41	0.40	0.23	-13.18	-13.30	-13.11	-10.08	-10.30	-10.18

5 结束语

阵列天线 SAR 是一种全新的 SAR 体制,它具有下视观测、三维分辨成像等特点。本文从阵列天线 SAR 的回波信号模型出发,提出了一种基于俯仰角压缩的阵列天线 SAR 三维成像处理算法,给出了各个 RCM 项的校正因子表达式以及整个算法的实现步骤。利用该方法进行了计算机仿真试验,模拟了下视阵列天线 SAR 的原始回波数据,采用本文所提出的三维成像算法完成了阵列天线 SAR 的三维成像处理,分辨率、峰值旁瓣比和积分旁瓣比等成像性能指标与理论值基本吻合,验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] 保 靖,邢孟道,王 彤.雷达成像技术[M].北京:电子工业出版社,2005.
- [2] Du L, Wang Y P, Hong W, et al. Analysis of 3D-SAR based on angle compression principle [C]//IGARSS2008, Boston, USA, 2008: 1324-1327.
- [3] 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.
- [4] 谭维贤.合成孔径雷达三维成像理论与方法研究[D].北京:中国科学院电子学研究所,2009.
- [5] Nouvel J F, Roques S, Ruault du Plessis O. A low-cost imaging radar: DRIVE on board ONERA motorglider [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2007, Barcelona, Spain, July 23-27, 2007.
- [6] Nouvel J F, Ruault du Plessis O, Svedin J, et al. ONERA DRIVE project [C]//7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2008.
- [7] Klare J, Brenner A R, Ender J H G. A new airborne radar for 3D imaging - image formation using the ARTINO principle - [C]//6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden, Germany, 2006.
- [8] Weiss M, Ender J, Peters O, et al. An airborne radar for three dimensional imaging and observation - technical realisation and status of ARTINO [C]//6th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Dresden, Germany, 2006.
- [9] Weiss M, Peters O, Ender J. First flight trials with ARTINO [C]//7th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Friedrichshafen, Germany, 2008, 187-190.
- [10] Cumming I G. 合成孔径雷达成像—算法与实现[M].洪 文,胡东辉,译.北京:电子工业出版社,2007.
- [11] 张澧波.综合孔径雷达—原理、系统分析与应用[M].北京:科学出版社,1989: 39-40.

Three-dimensional imaging algorithm for synthetic aperture radar with linear array antennas based on elevation angle compression principle

DU Lei^{1,2}, WANG Yan-Ping¹, HONG Wen¹, WU Yi-Rong¹

(1 National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Based on the signal model of SAR with linear array antennas, a three-dimensional imaging algorithm using elevation angle compression principle is proposed. Range cell migration correction (RCMC) is incorporated in the three-dimensional imaging algorithm. The three-dimensional imaging principle of SAR with linear array antennas is analyzed from the point of view of elevation angle compression principle. The simulation results support the signal model and three-dimensional imaging algorithm.

Key words synthetic aperture radar (SAR), range cell migration (RCM), three-dimensional imaging, linear array antennas, elevation angle compression

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>