

稀疏阵时分多相位中心孔径综合及其应用

侯颖妮^{①②} 李道京^① 洪文^①

^①(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100190)

摘要: 为了降低机载三维成像雷达系统的复杂度, 该文研究了基于稀疏阵三维成像雷达系统中的重要问题。提出了稀疏阵时分多相位中心孔径综合方法, 通过运动补偿, 该方法使综合后的相位中心数量和分布情况和满阵天线的相同, 从而避免了稀疏阵旁瓣较高的问题; 利用模拟退火算法对阵列进行了优化, 以使实际使用的阵元最少; 由于交轨阵列尺寸远小于场景宽度, 系统采用了子孔径三维成像算法。实例分析和仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: 稀疏天线; 多相位中心; 三维成像; 阵列优化

中图分类号: TN959.73

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-0798-05

The Application of Thinned Array Time Division Multiple Phase Center Synthesis

Hou Ying-ni^{①②} Li Dao-jing^① Hong Wen^①

^①(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, CAS, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The three-dimensional imaging radar system based on thinned array is investigated to reduce the system complexity. The multiple phase center aperture synthesis method in time division mode is proposed to eliminate the high side lobes of thinned array. Combine with motion compensation, the synthesized phase center both in quantity and distribution are same as the full array. Using simulated annealing algorithm to optimize the location of antennas, so as to minimize the number of antennas used. For the array length of cross-track is far small than the scene width, the sub-aperture three-dimension imaging method is adopted. The simulation results denote the validity of the method proposed in the paper.

Key words: Thinned array; Multiple phase center; Three-dimensional imaging; Array optimization

1 引言

具有三维成像能力的合成孔径雷达(SAR)在基础测绘和战场侦察领域具有广阔的应用前景。常用的 InSAR 通过交轨方向上两幅复图像的干涉相位来反演地物的高程, 可生成三维 DEM 图像, 但不具备地物高程上的分辨能力, 只能称为 2.5 维成像系统。

在 2004 年的欧洲雷达年会上, Giret^[1]提出了机载下视毫米波 3D-SAR 概念, 它采用宽波束天线发射宽带信号, 在交轨方向利用机翼上的多个均匀分布的子天线实施接收, 在顺轨方向以合成孔径方式接收, 其距离(高程)分辨率由发射信号带宽决定, 顺轨方向分辨率由合成孔径长度决定, 交轨方向分辨率由多个子天线构成的阵列天线的长度决定。由于 3D-SAR 的天线垂直指向地面, 这种系统不仅可避开地物阴影的影响, 小的入射角使 SAR 的发射功率也可较小。显然,

3D-SAR 可称为一种三维雷达成像系统。

基于上述概念, 2007 年德国 FGAN 研究所开展了低空无人机载毫米波 3D-SAR 研究工作^[2], 国内也开展了相关的跟踪研究工作^[3]。与之类似, 德国宇航院 DLR 研制的 SIREV 系统^[4]用多个子天线构成的交轨阵列天线解决前视成像问题。

3D-SAR 和前视 SAR 的交轨分辨率都是由交轨天线的长度决定的, 在高空作业为了获得足够高的交轨分辨率, 就需要较长的交轨天线, 由此会产生大量的子天线和接收通道, 这使得其应用受到限制。为此, 迫切需采用稀疏综合孔径天线技术来降低系统的复杂性。目前, 稀疏综合孔径天线在地基/星载/机载成像辐射计^[5]和地基对空观测雷达^[6]都获得了广泛的应用。

基于稀疏综合孔径天线概念, 本文研究了机载三维雷达成像系统中的重要问题。

2 系统设计

考虑到机载三维雷达成像系统的应用条件, 为减少系统的体积重量并获得较好的对地三维成像性能, 一个工作在毫

2008-01-09 收到, 2008-09-17 改回

微波成像技术国家重点实验室基金(9140C1903050804)和国家自然科学基金(60772103)资助课题

米波段，交轨阵列子天线(阵元)采用固态发射，全阵为稀疏综合孔径天线(阵列)，顺轨采用合成孔径工作方式的雷达系统应是一个合理的选择，其工作示意图如图 1 所示。设交轨向为 x 方向，顺轨向为 y 方向， z 为垂直距离(高度)方向，由此形成 xyz 直角坐标系，并假定慢时间为 0 时，高度为 z_0 的载机位置处于坐标系原点。

稀疏阵列的旁瓣比较高，不适于在对地观测条件下使用。接收等效相位中心原理^[7]可以产生新的相位中心，如图 2 所示，当阵元 A 发射，阵元 A 和阵元 C 同时接收时，等效于阵元 A 和等效虚拟阵元 B 同时自发自收，其中虚拟阵元 B 是新产生的相位中心， R_1, R_2, R_3 分别代表场景中心到不同阵元的斜距。利用这个原理，可以考虑优化稀疏天线阵列单元的位置，使在各阵元轮流发射，全阵接收的条件下，所产生的相位中心经去掉冗余数据(保持接收信号幅度均匀)综合处理后，其数量和分布情况和满阵天线相同。

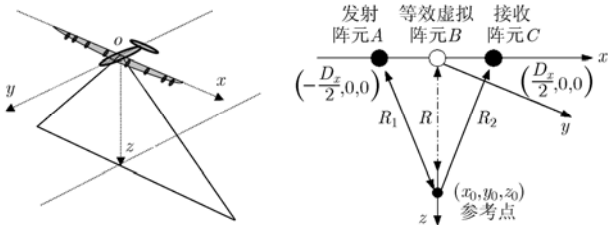


图 1 机载三维雷达成像系统工作示意图

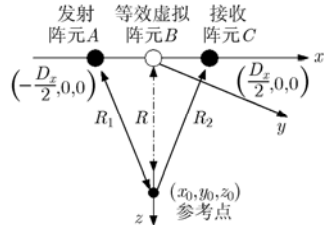


图 2 接收等效相位中心原理

为了得到时分工作方式下的最优阵列，文中采用模拟退火算法^[8]对稀疏阵进行优化排列。目标函数设计思想为：在一个给定大小的等效满阵天线位置上进行稀疏布置阵元，当各阵元轮流发射，全阵接收的情况下，在一个孔径综合周期获得的相位中心可形成满阵时，使得采用的真实阵元最少。具体设计方法如下：

假设优化后的阵列在 1 到 N 位置不等间隔存在阵元， M 为阵元数， \mathbf{P} 为优化后 M 个阵元的位置向量 $\mathbf{P} = [1, \dots, N]_{1 \times M}$ ， \mathbf{J} 为全一向量 $\mathbf{J} = [1, 1, \dots, 1]_{1 \times M}$ ，则目标函数为 $\min(M)$ ，约束函数为元素 $1, 1.5, 2, \dots, N - 0.5, N \in F(M)$ ，其中， N 为阵列以阵元尺寸间隔均匀布阵时，需要的阵元数目。

$$F(M) = (\mathbf{P}_{1 \times M}^T \mathbf{J}_{1 \times M} + \mathbf{J}_{1 \times M}^T \mathbf{P}_{1 \times M}) / 2 \quad (1)$$

容易看出， $F(M)$ 是一个孔径综合周期获得所有相位中心的集合。

优化后得到的稀疏阵列减少了系统复杂度，在一个周期内综合处理稀疏阵列接收的数据，相当于得到了满阵天线的数据，解决了传统稀疏阵列旁瓣较高问题。图 3 为系统收发工作模式，一个孔径综合周期由 M 个脉冲收发周期组成，在每个脉冲收发周期中只有一个阵元发射信号，全阵接收，且发射阵元每次各不相同。

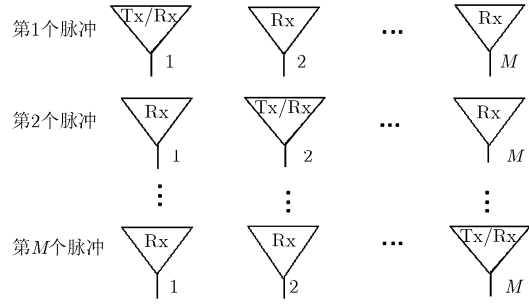


图 3 系统收发工作模式

3 信号处理方法

3.1 等效相位中心相位补偿

接收等效相位中心原理适用于目标和阵列关系满足远场的条件下，当不满足时就需要根据视场和各收发等效阵元的位置对接收信号进行相位补偿，进行相位补偿的目的是使等效阵元的接收相当于真实阵元在此位置的接收。

在图 2 中，等效前后的相位差为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(R_1 + R_2) - \frac{4\pi}{\lambda}R = \frac{2\pi}{\lambda}(\sqrt{(x_0 + D_x/2)^2 + y_0^2 + z_0^2} + \sqrt{(x_0 - D_x/2)^2 + y_0^2 + z_0^2}) - \frac{4\pi}{\lambda}\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2} \quad (2)$$

其中 λ 为雷达工作波长，令 $r^2 = y_0^2 + z_0^2$ ，则式(2)可写成

$$\Delta\varphi \approx \frac{2\pi}{\lambda} \left(r + \frac{(x_0 + D_x/2)^2}{2r} + r + \frac{(x_0 - D_x/2)^2}{2r} \right) - \frac{2\pi}{\lambda} \left(r + \frac{x_0^2}{2r} \right) = \frac{\pi D_x^2}{2r\lambda} \quad (3)$$

从式(3)可以看出，所补偿相位的大小与真实收发单元的间距平方成正比，由于在相位补偿中是以场景中的一点(如场景中心)为参考，对整个场景内的所有目标回波进行补偿，因此只有参考点处是精确补偿的，为了减小场景其它位置的补偿误差，在冗余数据处理时采用的准则为：对于各相位中心，保留收发单元距离最短时获得的数据。例如，对于某真实阵元所在位置处，就有可能同时存在其它两个位置的收发产生的相位中心和自发自收的相位中心，此时根据准则就保留自发自收时数据，显然，真实阵元所在位置处的接收数据对于整个场景内的目标都无误差存在。

3.2 运动补偿

系统采用时分多相位孔径综合法，存在阵元数和脉冲重复周期之积决定的孔径综合周期，由于平台的运动，使得不同脉冲下得到的等效相位中心，在平台运动方向发生相对移动。这样一个孔径综合周期获得的等效相位中心将不在同一直线上，为了使其等效成满阵的相位中心，就需要进行相应的补偿。

运动补偿分为两部分进行：第 1 步是在等效相位中心相位补偿中进行，设 y 为平台运动方向， m_e, m_r 分别为发射阵元和接收阵元的位置， $m = (m_e + m_r) / 2$ 为等效接收阵元的位置，则在第 k 个顺轨采样点，第 m 个等效相位中心处所补

偿相位应为

$$\Delta\varphi_{k,m} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\sqrt{(x_0 + m_e)^2 + (y_0 + \Delta y_i)^2 + z_0^2} + \sqrt{(x_0 + m_r)^2 + (y_0 + \Delta y_i)^2 + z_0^2} - \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(x_0 + m)^2 + (y_0 + \Delta y_i)^2 + z_0^2} \right) \quad (4)$$

其中

$$\Delta y_i = \frac{M \cdot V}{\text{PRF}}(k - L) + \frac{V}{\text{PRF}}(i - 1), \quad k = 1, \dots, 2L - 1, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (5)$$

$2L-1$ 为顺轨采样数, Δy_i 为在第 k 个顺轨采样点, 第 i 个脉冲时刻相对于第一个脉冲时刻平台移动的距离, V 为平台运动速度, PRF 为脉冲重复频率。

第 2 步是在第 1 步基础上, 对由于阵元相对位置差造成的接收回波超前或滞后的相位进行补偿, 则对各相位中心处的数据所补偿的相位应为

$$\Delta\phi_{k,j} = \frac{4\pi}{\lambda} \left[\sqrt{x_0^2 + \left(y_0 + \frac{M \cdot V}{\text{PRF}}(k - L) + \Delta y_j \right)^2 + z_0^2} - \sqrt{x_0^2 + \left(y_0 + \frac{M \cdot V}{\text{PRF}}(k - L) \right)^2 + z_0^2} \right], \quad j = 1, 2, \dots, 2N - 1 \quad (6)$$

Δy_j 为在平台的运动方向, 第 j 个相位中心相对于第 1 个相位中心的位置移动量。

经过上述处理, 就补偿了由于平台运动造成的等效相位中心不在同一直线上的影响, 使得补偿后的数据等效于由运动平台上的均匀线阵接收的数据。

3.3 成像处理

对于运动平台上稀疏阵接收的数据, 经过运动补偿, 就可认为是由运动平台上的满阵天线获取的信号。考虑到交轨稀疏阵列尺寸远小于波束宽度决定的场景宽度, 其成像处理可利用基于子孔径数据(只对于交轨向)的三维成像算法^[9,10]完成。

在图 1 坐标系中, 设空间目标位于 (x_n, y_n, z_n) , 则 SAR 回波信号为

$$s(t, v, u) = \sum_n \sigma_n p \left[t - \frac{2\sqrt{(x_n - v)^2 + (y_n - u)^2 + z_n^2}}{c} \right] \quad (7)$$

其中 u 为顺轨距离, v 为交轨距离, 相对于 t, u, v 的傅里叶变换为

$$S(w, k_u, k_v) = P(w) \sum_n \sigma_n \exp \left[-j\sqrt{4k^2 - k_u^2 - k_v^2} z_n - jk_u y_n - jk_v x_n \right] \quad (8)$$

位于空间 $(x, y, z) = (0, 0, Z_n)$ 处单个目标回波信号三维傅里叶变换为

$$S_0(w, k_u, k_v) = P(w) \exp(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2 - k_v^2} Z_n) \quad (9)$$

由式(8)和式(9)可得

$$F(w, k_u, k_v) = S(w, k_u, k_v) S_0^*(w, k_u, k_v) = \sum_n \sigma_n \exp \left(-j\sqrt{4k^2 - k_u^2 - k_v^2} (z_n - Z_n) - jk_u y_n - jk_v x_n \right) \quad (10)$$

令

$$k_z(w, k_u, k_v) = \sqrt{4k^2 - k_u^2 - k_v^2}, \quad k_y(w, k_u, k_v) = k_u, \quad k_x(w, k_u, k_v) = k_v \quad (11)$$

式(10)可写成

$$F(k_z, k_y, k_x) = \sum_n \sigma_n \exp(-jk_z(z_n - Z_n) - jk_y y_n - jk_x x_n) \quad (12)$$

可以看出, 式(12)通过三维反傅里叶变换就可以重建空间目标。

4 实例分析

下面考虑一分辨率约为 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 的三维成像系统。当雷达工作在 Ka 波段, 交轨阵列尺寸为 6m , 平台飞行高度 800m 时, 地面目标的交轨分辨率约 0.5m 。设置其信号带宽为 300MHz , 其高程分辨率可达 0.5m 。

为了获得适当的视场宽度, 选取子阵天线的交轨向尺寸为 2.5cm , 交轨向视场宽度(幅宽)约 250m 。从工程实现考虑, 选取子阵天线的顺轨向尺寸为 40cm , 此时的顺轨理论分辨率为 20cm , 实际应用中可做二视处理, 在改善图像质量的同时, 使其顺轨分辨率与交轨和距离分辨率基本匹配。

对于 6.05m 长的综合孔径阵列天线, 当阵元间隔为天线尺寸时, 需要天线单元数目 242 个, 且不满足天线尺寸和天线间隔的约束关系; 当系统采用文中的工作模式时, 对阵元位置进行优化后仅需 40 个阵元, 一个孔径综合周期综合的相位中心为 483 个, 各相位中心间隔 0.0125m , 优化后各天线单元位于 $1, 2, 4, 6, 7, 8, 13, 16, 18, 22, 25, 36, 37, 44, 50, 63, 76, 89, 102, 115, 128, 141, 154, 167, 180, 193, 206, 211, 212, 219, 221, 230, 231, 233, 235, 236, 239, 240, 241, 242$ 位置。

当载机平台的最大飞行速度为 50m/s 时, 对应顺轨向尺寸为 40cm 子阵天线, SAR 为保证顺轨向信号不模糊的最小脉冲重复频率为 250Hz 。当子阵数量为 40 个时, 考虑到一个交轨孔径综合周期将由 40 个脉冲重复周期组成, 系统脉冲重复频率设置为 10kHz (对应的不模糊距离为 15km), 此时顺轨合成孔径向等效脉冲重复频率为 250Hz 。

Ka 波段三维雷达成像系统详细的参数和性能指标如表 1 所示。

在上述系统参数下, 时分多相位中心孔径综合实现过程如图 4 所示, 其中纵坐标数字 $1-40$ 为脉冲数。最下面一行 40 个点表示的是优化后稀疏阵元的位置, 中间 40 行分别表示的是稀疏阵 $1-40$ 号阵元轮流发射, 每次全阵接收所获得的等效相位中心, 最上面一行表示的是从中间 40 行选取的相位中心。

5 仿真结果

系统采用时分多相位孔径综合法, 平台的运动, 使得一

表 1 系统参数和性能指标

中心频率	37.5GHz	脉冲重复频率	10kHz
交轨稀疏综合孔径 天线长度	6.05m	信号带宽	300MHz
子阵数量	40	距离(高程) 分辨率	0.5m
子阵天线 尺寸(交轨 ×顺轨)	2.5cm×40cm	顺轨分辨率	0.4m(二视)
子阵交轨 波束宽度	18.3°	交轨分辨率 方向, 高度 800m)	0.53m(法线 方向, 高度 800m)
成像幅宽 (高度 800m)	256m	顺轨合成孔径向 等效脉冲 重复频率	250Hz
平台最大 速度	50m/s	交轨孔径 综合周期	4ms

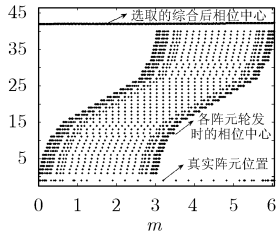


图4 稀疏阵时分多相位中心孔径综合示意图

个孔径综合周期内不同脉冲下得到的等效相位中心,不在同一直线上,从而会对成像产生影响,针对此情况,文中给出了运动补偿方法。由于等效相位中心相位补偿、运动补偿的精度都和参考点的位置有关系,在下面的仿真中,设参考点位于场景边缘(125,0,800)m处,目标位于(0,0,800)m处,分析参考点的选取对成像影响,并对运动补偿方法的有效性进行验证。

表 1 参数下,当平台速度为 50m/s 时,一个脉冲间隔平台向前运动 0.005m,一个综合孔径周期平台向前运动 0.2m,即系统顺轨向空间等效采样间隔为 0.2m。

从图 5 可以看出,平台运动主要影响了顺轨和交轨的脉冲响应;从图 6 可以看出,经过运动补偿后,系统各方向的脉冲响应均达到了理想结果。这个仿真结果,不仅表明了文中给出的运动补偿方法的有效性,而且表明在上述参数下,参考点的选取对成像结果的影响可以忽略。

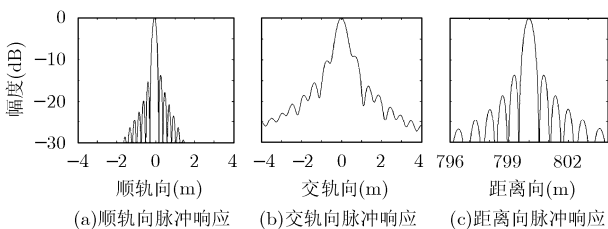


图 5 未进行运动补偿脉冲响应

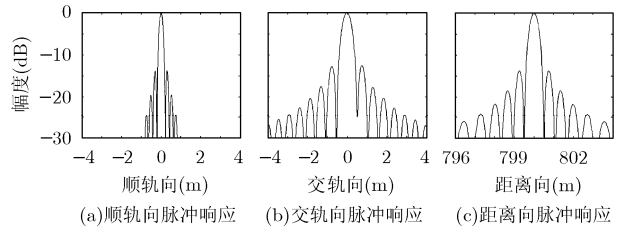


图 6 进行运动补偿后脉冲响应

下面的仿真中,参数如表 1 所示,在图 2 的 xyz 坐标系中存在 7 个目标,分别位于(0,0,800)m,(0,0,794)m,(0,0,788)m,(-4,-2,794)m,(-4,2,794)m,(4,-2,794)m,(4,2,794)m处,空间分布情况如图 7 所示。选择参考点为(0,0,800)m,获得的三维成像结果和二维剖面图,如图 8,图 9 和图 10 所示,图 9 和图 10 的垂直向表征了目标的归一化幅值。

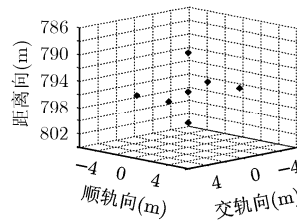


图 7 点目标空间分布图

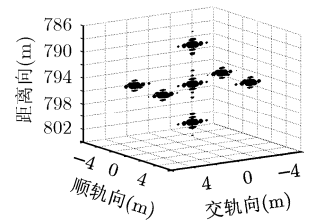


图 8 点目标三维成像结果

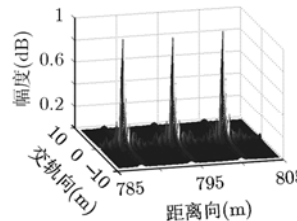


图 9 顺轨 0 m 处二维剖面图

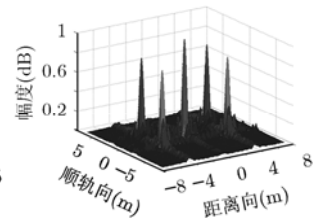


图 10 距离向(高程) 794m 处二维剖面图

从上述仿真结果可看出,采用稀疏阵时分多相位中心孔径综合法,可以获得较理想的三维成像结果。

6 结束语

本文系统地研究了基于综合孔径天线的机载三维雷达成像系统对地成像观测问题。提出了稀疏阵天线时分多相位中心孔径综合方法,该方法减少了传统满阵天线中的实际阵元数目,从而大大减少了系统的复杂性,且避免了稀疏阵天线旁瓣较高的问题;利用模拟退火算法优化了阵列位置,以使实际使用的阵元最少;针对平台运动对相位中心综合的影响,给出了具体的补偿算法,使得补偿后的数据相当于由运动平台上的均匀线列阵接收的数据。由于综合孔径天线阵列长度远小于场景宽度,系统采用了子孔径的三维成像方法。结合一系统实例的仿真结果表明了本文方法的有效性。

参考文献

- [1] 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, 2004: 201-204.
- [2] FGAN. Experimental system ARTINO. http://www.fhr.fgan.de/fhr/fhr_c594_fl_de.htm1, 2007.
- [3] Du Lei, Wang Yanping, and Hong Wen. Analytic modeling and three-dimensional imaging of downward-looking SAR using bistatic uniform linear array antennas [C]. APSAR, China, 2007: 49-53.
- [4] DLR. SIREV Executive Summary. http://www.dlr.de/hr/Portaldata/32/Resources/dokumente/SIREV_Executive_Summary.pdf, 2007.
- [5] Markus P, Helmut S, and Stephan D. Imaging technologies and applications of microwave radiometry [C]. European Radar Conference, Amsterdam, 2004: 269-273.
- [6] Chen Duofang, Chen Baixiao, and Zhang Shouhong. Muti-input Muti-output radar and sparse array synthetic impulse and aperture Radar [C]. International Conference on Radar, China, 2006: 28-31.
- [7] Li Zhenfang, Bao Zheng, and Wang Hongyang. Performance improvement for constellation SAR using signal processing techniques [J]. *IEEE Trans. on AES*, 2006, 42(2): 436-452.
- [8] Ruf C S. Numerical annealing of low-redundancy linear arrays [J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1993, 40(1): 85-90.
- [9] Soumekh M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms [M]. New York, Wiley-Interscience, 1999: 195-204.
- [10] 李道京, 张麟兮, 俞卞章. 近程合成孔径雷达子孔径数据的成像处理[J]. *数据采集与处理*, 2003, 18(3): 282-286.
- Li Dao-jing, Zhang Lin-xi, and Yu Bian-zhang. Subaperture data imaging of short-range SAR [J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2003, 18(3): 282-286.
- 侯颖妮: 女, 1982年生, 博士生, 研究方向为阵列信号处理及雷达成像技术.
- 李道京: 男, 1964年生, 研究员, 主要研究方向为雷达系统和雷达信号处理.
- 洪文: 女, 1968年生, 研究员, 主要研究领域为雷达信号处理理论、合成孔径雷达成像算法、微波遥感图像理解及其应用等.