

用于机载线阵三维 SAR 成像的 MIMO 阵列构型设计

吴子斌* 朱宇涛 粟毅 李禹 宋晓骥

(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 机载线阵 3 维 SAR 成像技术在军事和民用方面都有着广泛应用,是当前雷达成像领域的研究热点。其切航迹向分辨率是利用机翼上的线阵所获取,阵列分布直接影响到成像性能。受机翼体积的限制,机载线阵 3 维 SAR 系统的阵元数有限,可以采用 MIMO 技术来获取更多的目标信息,提高切航迹向的空间采样能力。该文研究了机载线阵 3 维 SAR 系统的阵列设计问题,即以空间卷积原理为基础,归纳出卷积逆运算的规律,从而通过卷积逆运算求解出多组 MIMO 线阵设计方案,并从机载线阵 3 维 SAR 成像的需求出发,分析了各组设计方案的优缺点,为实际构建机载线阵 3 维 SAR 成像系统提供了技术支撑。

关键词: 合成孔径雷达; MIMO; 3 维成像; 线阵; 阵列设计

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)11-2672-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00377

MIMO Array Design for Airborne Linear Array 3D SAR Imaging

Wu Zi-bin Zhu Yu-tao Su Yi Li Yu Song Xiao-ji

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Airborne linear array 3D SAR imaging technique is a research focus in the field of radar imaging, and has broad applications in military and civilian. It utilizes a linear antenna array on the wings to obtain an expected resolution in cross track direction. And imaging performance would be influenced by the array configuration directly. As the wings can not be long enough to carry many T/R elements, it is valid to acquire good imaging performance via MIMO radar array. In this paper, array design issue of airborne linear array 3D SAR system is investigated. Based on the spatial convolution principle, the operation law of inversed convolution is summed up. Multiple design methods of linear MIMO array for 3D SAR imaging system are proposed through inversed convolution operation. Then the advantages and disadvantages of each design method are analyzed in the view of imaging properties. The investigation can provide technical support to construction of airborne linear array 3D SAR imaging system.

Key words: SAR; MIMO; 3D imaging; Linear array; Array design

1 引言

目前合成孔径雷达技术在超高分辨率、全极化、大幅宽、组网、大频率覆盖等方向发展已较为成熟,3 维 SAR 成像技术逐渐成为研究热点之一^[1,2]。机载线阵 3 维 SAR 成像一般采用下视或前视的工作模式^[3,4],能够解决常规 2 维 SAR 由侧视所带来的遮挡阴影、几何失真等问题,且能还原 3 维场景,更加客观全面地反映地物信息,对于城区、峡谷、山区等容易产生遮挡阴影的地区以及对场景的变化有快速监测需求的领域,如对活跃的火山、雪山的坡度以及战场情况态势的信息获取都具有较大优势,因

此得到了国内外研究机构的广泛重视。

机载线阵 3 维 SAR 成像技术是在传统 2 维 SAR 系统的基础上,在机翼上加装一个线阵来获取构成第 3 维(切航迹方向)空间分辨能力的信息,线阵的阵元排列方式将直接影响到切航迹方向的成像分辨率。受机翼范围和天线尺寸、重量等限制,线阵的阵元数量一般不多,可采用 MIMO 技术来获取更多的目标信息。因此,在机载线阵 3 维 SAR 成像系统阵列设计中,可根据成像指标,利用 MIMO 雷达辐射接收特性开展阵列设计。

关于 MIMO 阵列设计,目前已有一些文献对此进行了研究。文献[5]推导了空间卷积原理并提出通过自卷积逆运算求解收发共用(T/R)线阵的阵元位置的阵列设计方法。ARTINO 系统利用相位中心近似(PCA)原理对切航迹向 MIMO 雷达阵列进行排

2013-03-26 收到, 2013-08-12 改回

国家自然科学基金(61171135)资助课题

*通信作者: 吴子斌 matinwu@163.com

布, 使用两端发射中间接收的方式得到虚拟均匀线性阵列^[6,7]。文献[8]通过将阵列方向图解析表达式进行变量替换与因式分解来实现均匀叠加等价阵列的设计。文献[9]将两个均匀线阵组成一个等效实均匀阵列, 增加了等效相位中心个数, 解决了大规模实均匀线阵的宽带 MIMO 雷达天线阵列系统实现较为困难的问题。然而, 对于收发分置的 MIMO 线阵, 其阵列设计仍主要依靠经验选取, 这是因为一个等效阵列可由多种物理收发阵列实现, 即给定一个空间采样阵列, 求解实际的物理阵列是个病态问题。对这类阵列设计, 既要确保求解得到所有有意义的解, 还需要从中选取最适合的阵列构型, 现有的一些阵列设计理论和方法尚未能全面地考虑这两点。本文基于空间卷积原理进行 MIMO 线阵设计, 首先归纳出逆卷积运算的一般规律, 从而通过逆卷积运算求出阵列设计的全部解, 然后在机载线阵 3 维 SAR 成像所需条件下, 对所求出的多组解进行分析, 依据不同需求选出合适的阵列构型, 完成机载线阵 3 维 SAR 成像系统的阵列设计。

本文第 2 节简述了机载线阵 3 维 SAR 成像信号模型, 提出了阵列设计的基本要求, 第 3 节则介绍了空间卷积原理及利用卷积逆运算进行阵列设计的方法, 总结了卷积逆运算阵列设计的规律, 提出了利用此规律来获取阵列设计全部解的方法, 第 4 节在机载线阵 3 维 SAR 成像的需求下分析了各组解的不同适用范围, 总结了阵列设计流程并给出了点扩散函数(PSF)的仿真实验, 第 5 节给出结论。

2 机载线阵 3 维 SAR 成像信号模型

单航过机载线阵 3 维 SAR 成像技术一般采用下视工作模式, 由于线阵垂直于地面发射波束, 因此其距离向即高度向, 可通过发射宽带信号获取高分

辨率。在沿航迹向其与传统 SAR 一样通过合成孔径原理获取方位高分辨率。切航迹方向则通过装在机翼上的线阵获取高分辨率。一个典型的机载线阵 3 维 SAR 成像场景如图 1(a)所示。

为便于后续表达和理解, 将场景设定为 3 维空间直角坐标系 $O-XYZ$, 场景中心为坐标原点 O , 如图 1(b)所示。假设载机飞行高度为 H , 沿 X 轴以速度 v 匀速飞行。机翼与 Y 轴平行, 切航迹向上的阵列为 M 个发射阵元和 N 个接收阵元组成的 MIMO 雷达阵列。机载线阵 3 维 SAR 成像系统的信号处理可借鉴“走-停-走”模式^[10,11], 第 u 个 ($u = 1, 2, 3, \dots, U, U = T_a f_p, T_a$ 是沿航迹向积累时间, f_p 是脉冲重复频率)脉冲时线阵往正下方发射一组 M 个的正交信号 $s_m(t)$, 共接收到 N 个回波, 忽略信号在空气中传播的衰减, 去载频后可表示为

$$y_{mn}(t, u) = \sum_{q=1}^Q s \left(t - \frac{r_{mnq}(u)}{c} \right) \exp \left\{ -j \frac{2\pi r_{mnq}(u)}{\lambda} \right\} \zeta_q, \quad (1)$$

$$u = 1, 2, \dots, U, m = 1, 2, \dots, M$$

$$n = 1, 2, \dots, N, q = 1, 2, \dots, Q$$

其中 $r_{mnq}(u)$ 是电磁波从第 m 个发射阵元到第 q 个散射中心再到第 n 个接收阵元的距离, λ 为发射信号波长, ζ_q 为第 q 个散射中心的后向散射系数。将回波进行重排处理后能够得到 MN 个不同的信号, 可等效为 MN 个虚拟阵元得到的回波。

MIMO 雷达阵列的等效虚拟阵元位置可由空间卷积原理^[12]或者相位中心近似原理^[13]求得, 系统等效发射阵元位置确定后, 一对实际发射/接收阵元唯一确定一个等效接收阵元。为了得到切航迹向的高分辨率, 获取良好聚焦的图像, 切航迹向的 MIMO 阵列设计需要满足以下要求:

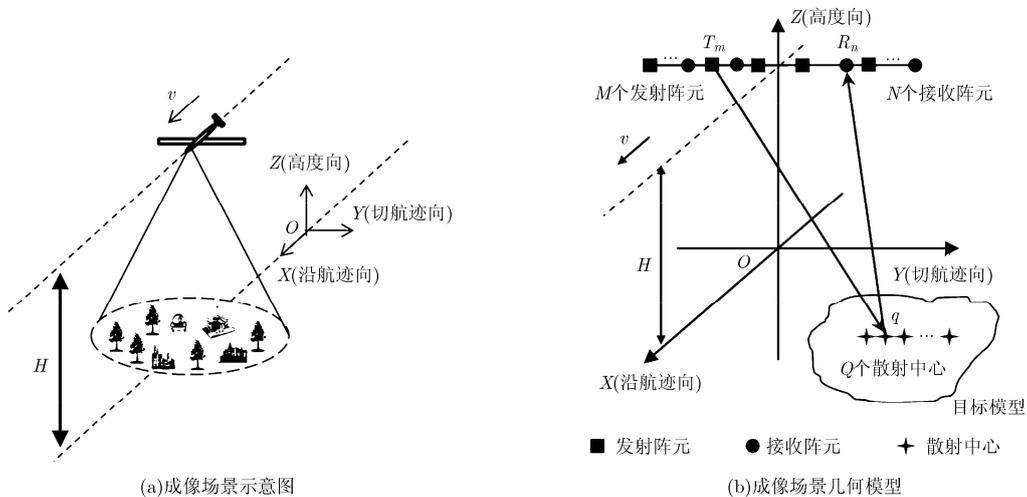


图 1 典型机载线阵 3 维 SAR 成像场景与几何模型

(1)首先,为了便于使用傅里叶变换工具,要求观测数据为空间均匀采样所得,即各等效阵元等间距分布于同一直线上,且辐射强度相同。其次,切航迹向的成像分辨率与等效阵列长度 L_A 有关,当发射信号波长以及载机飞行高度确定后,切航迹向的成像分辨率由等效阵列长度唯一确定,即需使 L_A 满足成像性能要求。

(2)空间采样率要求。阵列设计还应满足成像对采样率的要求,即等效阵元的空间分布应满足空间采样定律。对于单发多收的等效阵列形式,以采样波数 k_s 表示空间采样频率,当 $k_s = 2\pi/D > 2k \sin(\theta/2)$ 时不会产生混叠,不等式的右边表示回波信号在谱域中切航迹方向的填充范围,其中 D 表示等效接收阵元间隔, θ 表示波束在切航迹向的宽度, $k = 2\pi/\lambda$ 为信号的波数(λ 为信号波长)。则在Nyquist定理的限制下,等效接收阵元的间隔需满足

$$D < \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \quad (2)$$

(3)实际限制条件的要求。对于机载线阵3维SAR系统而言,切航迹向的阵列设计除了要考虑一般MIMO雷达阵列的设计条件外,还需综合考虑载机负荷(功率,重量)、雷达器件尺寸以及分布式POS^[14](Position and Orientation System)的测量精度等因素的影响。然而这些限制条件对雷达阵列设计的要求会相互产生矛盾,因而需要应用适应性强的阵列设计方法,使其能够对矛盾进行折中处理。

下面将介绍空间卷积原理,分析机载线阵3维SAR系统的线性MIMO雷达阵列与等效阵列的关系,阐述利用它进行机载线性3维SAR成像中阵列设计的一般方法。

3 空间卷积原理及逆卷积运算的规律

空间卷积原理指出^[5,12],在一定条件下,由发射阵元的空间位置与接收阵元的空间位置相卷积就可以得到MIMO雷达等效阵列的位置关系。从图1所示的成像场景来看,机载线阵3维SAR成像一般都处于远场,符合空间卷积原理的条件,因此可以采用空间卷积原理来进行阵列设计。

令切航迹向MIMO雷达阵列为 $L \cdot d$ 长度的共线直线阵,将其以间隔 d 离散化,可得发射阵元的位置矢量为 $\mathbf{t} = [t_0, t_1, \dots, t_L]$,其中 $t_i \in \{0,1\}$, $\text{card}\{t_i | t_i = 1\} = M, i = 0,1, \dots, L$, card 是泛函势。接收阵元的位置矢量为 $\mathbf{r} = [r_0, r_1, \dots, r_L]$,其中 $r_i \in \{0,1\}$, $\text{card}\{r_i | r_i = 1\} = N, i = 0,1, \dots, L$,此时等效接收阵列的位置矢量可表示为^[5]

$$\mathbf{e} = \mathbf{t} * \mathbf{r} \quad (3)$$

式(3)在 z 域可表示为

$$E(z) = T(z) \cdot R(z) \quad (4)$$

为了方便回波信号的成像处理,空间采样点均匀分布,即要求机载3维SAR系统在切航迹向的MIMO阵列为均匀的等效阵列。均匀是指各个等效阵元的辐射强度相同且等间隔分布,即要求各等效阵元的位置没有发生重叠,此时等效均匀阵列的位置矢量可表示为 $\mathbf{e} = [e_0, e_1, \dots, e_{2L-1}]$,其中 $e_i \in \{0,1\}$, $\text{card}\{e_i | e_i = 1\} = MN, i = 0,1, \dots, 2L-1$,则 \mathbf{e} 在 z 域上的表达式为

$$E(z) = \sum_{i=0}^{2L-1} e_i z^{-i} \quad (5)$$

为表述方便,可将位置矢量的第1个非零元素和最后1个非零元素定义为起始元素和终止元素,以 \mathbf{e} 为例,若 $e_i, e_j (i < j)$ 分别为起始元素和终止元素,那么 $\mathbf{e} = [e_i, e_{i+1}, \dots, e_j]$,设等效阵元之间的间隔为 $D = l \times d, l = 1,2, \dots, L$,则有

$$\begin{cases} e_k = 1, & \text{mod}(k-i, l) = 0 \\ e_k = 0, & \text{其它} \end{cases}, \quad k = i, i+1, \dots, j \quad (6)$$

式中 $\text{mod}(k-i, l) = 0$ 表示 $(k-i)$ 能被 l 整除,当且仅当此条件成立时 \mathbf{e} 中其相应的元素才为1,否则为0。去除系数为零的项,式(5)可另写为

$$E(z) = 1 + z^{-l} + z^{-2l} + \dots + z^{-(MN-1)l} \quad (7)$$

将式(7)做因式分解运算,便可得到不同组合形式的 $T(z)$ 和 $R(z)$,将 $T(z)$ 和 $R(z)$ 反变换为 \mathbf{t} 和 \mathbf{r} ,便可得到实际阵元的排布形式。考察式(7),可知 $E(z)$ 的最简因式形式只与 MN 的值有关,将 MN 另写为 I 个不同的质数相乘的形式,即

$$MN = \prod_{i=1}^I k(i)^{n(i)}, \quad i = 1,2, \dots, I \quad (8)$$

其中 $k(i)$ 为第 i 个质数且 $k(i) < k(i+1)$, $n(i)$ 为 MN 因式分解后 $k(i)$ 作为因子的个数,对式(7)进行因式分解可得

$$E(z) = \prod_{j=1}^J E_j(z) \quad (9)$$

此为 $E(z)$ 的最简因式,其中

$$\left. \begin{aligned} s(j) &= \prod_{j=1}^{j-1} m(j) \\ E_j(z) &= \sum_{w=1}^{m(j)} z^{-s(j)(w-1)l} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

其中 $m(j)$ 是指多项式 $E_j(z)$ 的项数。由式(9)可知 $E(z)$ 的因式数量为

$$J = \sum_{i=1}^I n(i) \quad (11)$$

可以证明,式(9)即为 $E(z)$ 所表示的MIMO雷

表 1 不同发射、接收位置矢量组合方式

组合方式	发射阵元数	接收阵元数	总阵元数	最小阵列长度	等效接收阵列长度
S1	2	32	34	32D	63D
S2	4	16	20	33D	63D
S3	8	8	16	35D	63D

表 2 机载 3 维 SAR 成像仿真参数

载机飞行高度 H	10000 m
波束角宽度 θ	5°
载机飞行速度 v	200 m/s
发射信号载频 f_c	6×10^9 Hz
脉冲重复频率 PRF	400 Hz
合成孔径长度 L_s	300 m
等效阵元间隔 D	1.5 m
点目标位置	(0, 0, 0), (0, 0, -50), (0, 40, 0), (60, 0, 0)

$T(z)$ 的最高次项次数的和为 $E(z)$ 最高次项次数的和，即 $R(z)$ 与 $T(z)$ 中必定有一项的最高次项次数大于 $E(z)$ 最高次项次数的一半。在物理意义上，这个规律便是指最小阵列长度大于等效接收阵列长度的一半。MIMO 雷达正交发射信号的设计是一个难题，所以阵列设计中发射阵元数一般不大于接收阵元数。等效阵元数一定，当发射阵元数与接收阵元数相同时，总阵元数最少。随着发射阵元数减少，接收阵元数会增加，总阵元数也会增加。

成像仿真参数如表 2 所示，各等效阵元回波在合成孔径长度内对成像场景中心点的波程误差最大值 E_{max} 分别为 0.002755 m, 0.002750 m, 0.002722 m，发射信号的波长 $\lambda = 0.05$ m，即有 $E_{max} \ll \lambda$ 。这证实了在远场条件下，基于空间卷积原理的等效阵列设计方法是合理的。

采用 RD 算法对回波信号进行成像处理，成像

结果如图 4 所示。从图 4 中可以粗略看出，3 个不同阵列构型的成像性能一致。进一步考察在原点处目标切航迹向上的点扩展函数(PSF)，如图 5 所示。可见虽然 3 种组合方式的旁瓣性质有细微差异，但峰值旁瓣比(PLSR)均为 -13.4 dB 左右，且这 3 种组合方式的成像分辨率基本一致，与理论分辨率相同。由于不同的阵列组合形式所构成的等效阵列各接收阵元的波程误差不同，对回波处理时没有考虑这一因素直接进行成像，导致旁瓣差异现象的出现。远场条件下，由逆卷积求出的任意一种阵列组合形式所收集的回波按一定规则重排之后都能直接进行成像处理，且各个阵列构型能够达到一致的成像性能，

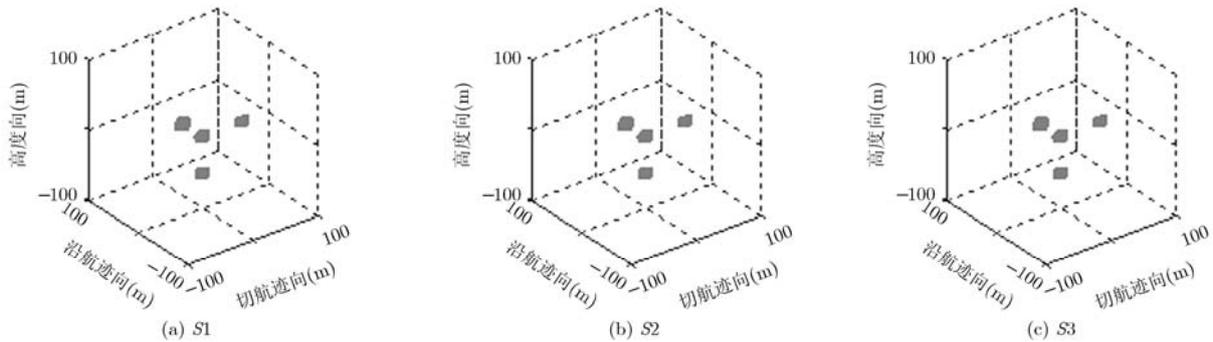


图 4 3 维成像效果

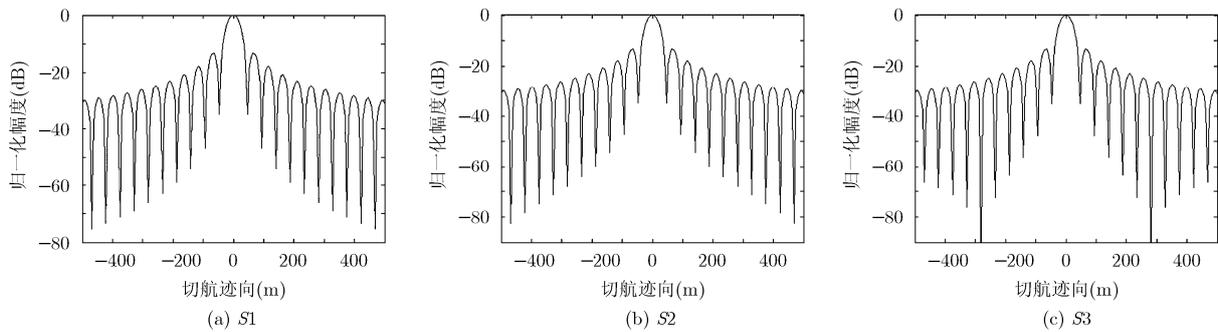


图 5 切航迹向点扩展函数

即本文所提出的机载 3 维 SAR 的阵列设计方法在成像意义上是有效的。

5 结束语

对于 3 维 SAR 成像系统, 3 个维度上的分辨率应基本相近, 从工程实现角度来看, 切航迹向维的分辨率最有可能成为总体成像性能的瓶颈。此时, 作为实现切航迹向分辨率的实孔径阵列设计是系统设计的一个基本问题。本文提出的等效均匀阵列设计方法能够由系统所需的等效阵列反推出多组物理实现的设计方案, 不仅克服了阵列设计需要依靠经验求解的困难, 还具有对实际情况较强的适应性。将硬件因素作为约束加以考虑时, 该方法作为一般性的阵列设计方法仍然有意义。

参考文献

- [1] Ender J H G, Brenner A R, Essen H, *et al.* Advances in radar imaging at Fraunhofer-FHR[C]. 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (AP SAR), Seoul, Korea, 2011: 1-2.
- [2] Ruault du Plessis O, Nouvel J, *et al.* ONERA SAR facilities[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2011, 26(11): 24-30.
- [3] Ren X, Sun J, and Yang R. A new three-dimensional imaging algorithm for airborne forward-looking SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(1): 153-157.
- [4] Gierull C H. On a concept for an airborne downward-looking imaging radar[J]. *AEU International Journal of Electronics and Communications*, 1999, 53(6): 295-304.
- [5] 栗毅, 朱宇涛, 郁文贤, 等. 多通道雷达天线阵列的设计理论与算法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2010, 40(10): 1372-1383.
Su Y, Zhu Y T, Yu W X, *et al.* Design theory and algorithm for MIMO radar array[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2010, 40(10): 1372-1383.
- [6] Klare J, Weiß M, Peters O, *et al.* ARTINO: a new high resolution 3D imaging radar system on an autonomous airborne platform[C]. Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'06), Denver, 2006: 3842-3845.
- [7] Ender J H G and Klare J. System architectures and algorithms for radar imaging by MIMO-SAR[C]. *IEEE Radar Conference*, Pasadena, 2009: 1-6.
- [8] Mitra S K, Mondal K, Tchobanou M K, *et al.* General polynomial factorization-based design of sparse periodic linear arrays[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2010, 57(9): 1952-1966.
- [9] 陈阿磊, 王党卫, 马晓岩, 等. 宽带 MIMO 雷达的阵列设计和成像方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2010, 32(12): 2541-2546.
Chen A-lei, Wang Dang-wei, Ma Xiao-yan, *et al.* Array design and imaging method for wide band MIMO radar[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2010, 32(12): 2541-2546.
- [10] Cumming I G and Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Norwood: Artech House, 2005: 76-80.
- [11] 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.
Peng Xue-ming, Wang Yan-ping, Tan Wei-xian, *et al.* Airborne downward-looking MIMO 3D-SAR imaging algorithm based on cross-track thinned array[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(4): 943-949.
- [12] Robey F C, Coultts S, Weikle D, *et al.* MIMO radar theory and experimental results[C]. 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Lexington, USA, 2004: 300-304.
- [13] Bellettini A and Pinto M A. Theoretical accuracy of synthetic aperture sonar micronavigation using a displaced phase-center antenna[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, 27(4): 780-789.
- [14] 房建成, 张舟, 宫晓琳. 机载分布式 POS 传递对准建模与仿真[J]. *中国惯性技术学报*, 2012, 20(4): 379-385.
Fang Jian-cheng, Zhang Zhou, and Gong Xiao-lin. Modeling and simulation of transfer alignment for distributed POS[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2012, 20(4): 379-385.

吴子斌: 男, 1989 年生, 硕士生, 研究方向为机载 3 维 SAR 高分辨成像。

朱宇涛: 男, 1980 年生, 博士后, 主要研究方向为阵列设计、遥感信息处理。

栗毅: 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号处理、雷达系统、遥感信息处理。