

• 信号/数据处理 •

中图分类号: TN911.7

文献标志码: A

文章编号: 1004-7859(2014)01-0030-05

一种基于平行辅助基线的干涉仪测向算法

桂新涛, 蒲刚, 程婷, 何子述

(电子科技大学 电子工程学院, 成都 611731)

摘要: 针对平面阵测向中存在的相位模糊问题, 提出一种基于平行基线的干涉仪测向算法。该算法利用平行基线中短基线相位差可能的模糊数获得长基线的一系列可能相位差, 通过相关运算实现解模糊, 并利用最小二乘解确定最终的入射信号方向。算法中引入的平行基线有效降低了解模糊运算量, 而最小二乘解则提高了算法测向精度。计算机仿真结果验证了算法解相位模糊的正确性和测向的高效性。

关键词: 相位模糊; 平行基线; 干涉仪; 相关运算; 最小二乘

An Interferometer Direction Finding Algorithm Based on Parallel Auxiliary Baseline

GUI Xintao, PU Gang, CHENG Ting, HE Zishu

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: An interferometer direction finding algorithm based on parallel baselines is proposed for the DOA estimation of plane array with phase ambiguity. A series of possible phase difference of the long baselines are obtained through the ambiguity values of phase difference corresponding to the short baselines in parallel baselines. The ambiguity of measured phase difference is solved by correlation and the DOA is finally given by the Least Square (LS) method. The parallel baselines introduced in the algorithm significantly reduce the computation while the LS increase the accuracy of DOA estimation. Computer simulation verifies the correctness and effectiveness of proposed algorithm in both solving phase ambiguity and direction estimation.

Key words: phase ambiguity; parallel baselines; interferometer; correlation; least square

0 引言

干涉仪测向^[1-4]通过直接或间接测量不同天线阵元之间的相位差, 计算来波的方位角和仰角。该测向技术因其算法简单、精度高、实时性好等优点已经被广泛应用于无线电管理、频谱检测、射电天文等领域^[5]。但是随着测向精度的提高, 天线孔径要相应增大, 而大孔径天线会导致相位模糊^[6]。因此, 如何解决好测向精度与相位模糊之间的矛盾, 是相位干涉仪测向的关键。

为了解决相位模糊问题, 目前大多采用多基线相位干涉仪^[7], 常见的解模糊方法有: 长短基线法^[8]、参差基线法^[9]、虚拟基线法^[10-11]、立体基线法^[12]等。长短基线法要求保证短基线的长度小于来波信号的半波长, 高频段时短基线长度太小而难以物理实现, 因而不适用于宽带测向系统; 参差基线法和虚拟基线法很好地解决了宽带测向中高频端短基线尺寸受到限制的问题, 但是要求天线阵列具有特定的摆放形式, 因而难以广泛应用; 立体基线法的天线各阵元间距不受高频端信号波长限制, 摆放形式灵活, 但是抗噪声能力差。此

外, 有学者提出了一种基于相关运算的解模糊算法^[13]。该算法与立体基线算法类似, 也是先通过测量值得到一组模糊值, 然后通过比较确定真实值。由于充分利用了各阵元的相位信息, 因此有效地提高了测向抗噪声能力。

本文意在将相关解模糊算法推广应用到平面阵二维测向, 并在此基础上引入平行基线, 提出一种利用平行基线解相位模糊的算法。该算法在平面阵中利用两组平行基线中的短基线可能的模糊数确定长基线的可能模糊数, 利用相关运算实现解模糊, 最后通过求解最小二乘解进一步提高方位的估计精度。

1 阵列信号模型

考虑如图1所示的 M 元均匀圆阵, 阵元半径为 R , 以圆心作为参考点, 对于单个远场目标, 设阵元 m 接收到的入射信号为 $x_m(t)$, 其入射方向为 (φ, θ) , 载波频率为 f , 波长为 $\lambda = c/f$, 其中 c 为光速, 则第 m 个阵元相对于参考点的相位为^[14]

$$\phi_m = \frac{2\pi R}{\lambda} \sin\theta \cos\left(\varphi - \frac{2\pi}{M}m\right) \quad (1)$$

设阵元 m, n 间距为 d_{mn} , 由平面几何知识有

基金项目: 中央高校基本业务费项目 (ZYGX2013J021); 国家自然科学基金项目 (61101171)

通信作者: 桂新涛 Email: gxt200701469@163.com

收稿日期: 2013-08-24 修订日期: 2013-10-26

$$d_{mn} = 2R \sin \frac{(n-m)\pi}{M} \quad (\text{假设 } n > m) \quad (2)$$

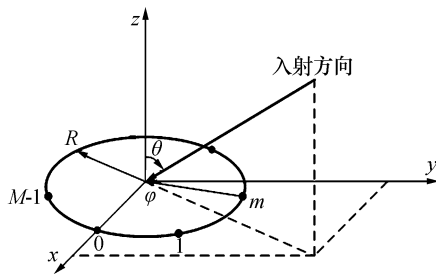


图1 阵列模型

第 n 个阵元与第 m ($n \neq m$) 个阵元之间的相位差为

$$\phi_{mn} = \phi_n - \phi_m = \frac{2\pi R}{\lambda} \sin \theta \left[\cos \left(\varphi - \frac{2\pi n}{M} \right) - \cos \left(\varphi - \frac{2\pi m}{M} \right) \right] = \frac{2\pi d_{mn}}{\lambda} \left[\beta \cos \frac{(n+m)\pi}{M} - \alpha \sin \frac{(n+m)\pi}{M} \right] \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} \alpha = \sin \theta \cos \varphi \\ \beta = \sin \theta \sin \varphi \end{cases} \quad (4)$$

根据鉴相器特性可知,当 m, n 超出 $[-\pi, \pi]$ 的范围时,就会出现相位模糊。

2 基于辅助基线的平面阵测向算法

传统辅助基线算法用于线阵可测量入射信号的方位角,对于平面阵,需要将传统算法进行拓展以测得入射信号的方位角和俯仰角。这里以 7 元均匀圆阵进行说明,但该思想可用于任何平面阵。图 2 所示为半径为 R 的 7 元均匀圆阵,假设窄带远场信号 $s(t)$ 的入射方向为 θ , 频率为 f , 波长为 λ 。根据传统辅助基线算法选取长基线作为辅助基线的思想,这里选取两组长基线 L_{03} 和 L_{15} 作为辅助基线,设两条辅助基线的长度为 d , 则

$$d = 2R \sin \frac{3\pi}{7} \quad (5)$$

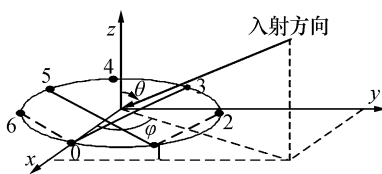


图2 辅助基线算法原理图

当 $d/\lambda > 0.5$ 时出现相位模糊,此时阵元 L_{03} 和阵元 L_{15} 之间的相位差可分别表示为

$$\begin{cases} \phi_{03} = \Delta\phi_{03} + 2k_1\pi = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\beta \cos \frac{3\pi}{7} - \alpha \sin \frac{3\pi}{7} \right] \\ \phi_{15} = \Delta\phi_{15} + 2k_2\pi = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\beta \cos \frac{6\pi}{7} - \alpha \sin \frac{6\pi}{7} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\Delta\phi_{03}, \Delta\phi_{15}$ 为实测相位差, k_1, k_2 为整数,其范围

可表示为^[13] $k_1, k_2 \in \left[-\frac{1}{2} \frac{d}{\lambda}, \frac{1}{2} \frac{d}{\lambda} \right]$ 。由式(6)可推导出信号方向余弦为

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \frac{\lambda}{2\pi d} \begin{bmatrix} -\sin \frac{3\pi}{7} & \cos \frac{3\pi}{7} \\ -\sin \frac{6\pi}{7} & \cos \frac{6\pi}{7} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\phi_{03} + 2k_1\pi \\ \Delta\phi_{15} + 2k_2\pi \end{bmatrix} \quad (7)$$

设 $M_1 = \lfloor \frac{1}{2} \frac{d}{\lambda} \rfloor$ ($\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整), 则由相位

差测量值 $\Delta\phi_{03}, \Delta\phi_{15}$ 通过式(7)可得到 $Q_1 = (2M_1 + 1)^2$ 个可能的方向余弦向量 (α, β) , $i = 1, 2, \dots, Q_1$, 其中有且仅有一组是正确的, 即与正确的模糊数组合对应的那组。将其分别代入式(3)求解长基线的相位差并构成矢量样本, 记 $\Phi^i = (\phi_{03}^i, \phi_{14}^i, \dots, \phi_{62}^i)^T$, $i = 1, 2, \dots, Q_1$ 。最后, 将长基线的实测相位差矢量 $\Delta\Phi = (\Delta\phi_{03}, \Delta\phi_{14}, \dots, \Delta\phi_{60})^T$ 与所有的 Φ_i 进行相关运算, 相似度函数为

$$R(i) = \sum_{n=1}^7 \cos(\phi_n^i - \Delta\phi_n) \quad (8)$$

式中: ϕ_n^i 和 $\Delta\phi_n^i$ 分别代表向量 Φ^i 和 $\Delta\Phi$ 第 n 个元素。

设 $(\alpha, \beta)_i$, $i = 1, 2, \dots, Q_1$ 中正确的方向余弦为 (α_0, β_0) , 其对应的相位差矢量样本为 Φ_0 , 那么易知 $\Phi_0 = \Delta\Phi + 2n\pi$, n 为一矢量, 其所有元素都为整数。因此, 当式(8)中 Φ^i 取 Φ_0 时, 相似度 $R(i)$ 的理想值为 7。因而在非理想条件下, 根据式(8)得到的相似度中的最大值对应的样本为 Φ_0 的最优估计 $\hat{\Phi}_0$, 与之对应的方向余弦为正确值 (α_0, β_0) 的最优估计, 记为 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$, 根据式(4)就可得到方向的估计值 $(\hat{\theta}, \hat{\varphi})$, 计算式为

$$\begin{cases} \hat{\varphi} = \arctan \frac{\hat{\beta}}{\hat{\alpha}} \\ \hat{\theta} = \arcsin \sqrt{\hat{\alpha}^2 + \hat{\beta}^2} \end{cases} \quad (9)$$

3 基于平行辅助基线的干涉仪算法

由式(3)可知, 对于远场信号来说, 两条相互平行的基线其相位差存在一个固定的倍数关系, 也就是说它们的相位模糊数也存在一个对应关系。

3.1 平行基线的引入

图 2 中虚线为引入的平行基线, 其中 $L_{12} // L_{03}$, $L_{06} // L_{15}$ 。设其长度为 d_1 , 则图中四条基线的相位差分别为

$$\begin{cases} \phi_{12} = \Delta\phi_{12} + 2n_1\pi = \frac{2\pi d_1}{\lambda} \left[\beta \cos \frac{3\pi}{7} - \alpha \sin \frac{3\pi}{7} \right] \\ \phi_{03} = \Delta\phi_{03} + 2n_2\pi = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\beta \cos \frac{3\pi}{7} - \alpha \sin \frac{3\pi}{7} \right] \\ \phi_{06} = \Delta\phi_{06} + 2n_3\pi = \frac{2\pi d_1}{\lambda} \left[\beta \cos \frac{6\pi}{7} - \alpha \sin \frac{6\pi}{7} \right] \\ \phi_{15} = \Delta\phi_{15} + 2n_4\pi = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[\beta \cos \frac{6\pi}{7} - \alpha \sin \frac{6\pi}{7} \right] \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta\phi_{12}, \Delta\phi_{03}, \Delta\phi_{60}, \Delta\phi_{15}$ 分别为对应基线的相位差测量值。由式(10)可以得到

$$\begin{cases} n_2 = \text{round}\left(\frac{1}{2\pi}\left[\frac{\Delta\phi_{12} + 2\pi n_1}{d_1} \cdot d - \Delta\phi_{03}\right]\right) \\ n_4 = \text{round}\left(\frac{1}{2\pi}\left[\frac{\Delta\phi_{06} + 2\pi n_3}{d_1} \cdot d - \Delta\phi_{15}\right]\right) \end{cases} \quad (11)$$

设 $M_2 = \lfloor \frac{1}{2} + \frac{d_1}{\lambda} \rfloor$, 穷举 n_1, n_3 , 可得到 $Q_2 = (2M_2 +$

$1)^2$ 个可能的 n_1, n_3 组合。通过式(11)便可计算出与之对应的 Q_2 个 n_2, n_4 组合。由式(7)可以得到 Q_2 组方向余弦, 将其分别代入式(3)求解长基线的相位差并构成矢量样本, 记为 $\Phi^i = (\phi_{03}^i, \phi_{14}^i, \dots, \phi_{62}^i)^T, i=1, 2, \dots, Q_2$ 。同理, 将所有 Φ^i 与 $\Delta\Phi$ 按式(8)做相关运算, 找出其中相似度最大值就可以确定来波方向。

与第2节中的传统辅助基线算法比较可以看到, 在引入平行基线以后, 由于 $d_1 < d$, 从而 $M_2 < M_1, Q_2 < Q_1$, 即通过引入较短的平行基线, 减少了长基线可能模糊组合数, 从而减少了算法的运算量。

3.2 方向余弦的最小二乘解

从上述讨论可知, 最终的入射信号方向估计是由 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 确定的, 而 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 是由所选取的两组平行基线的实测相位差 $\Delta\phi_{12}, \Delta\phi_{03}, \Delta\phi_{60}, \Delta\phi_{15}$ 确定的, 因此没有充分利用阵列中其他阵元的信息。在无噪声环境下, $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 与真实值没有偏差, 平行基线测向算法能够得到入射信号方向的精确估计; 而在有噪声环境下, 当所选取的两组平行基线受噪声影响较大时, $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 将偏离真实值较大, 因而难以获得较高的方向估计精度。

为了充分利用阵列中其它阵元的相位信息, 在获得 $\hat{\Phi}_0$ 后, 利用实测相位差向量 $\Delta\Phi$ 对 $\hat{\Phi}_0$ 进行进一步的修正, 最后通过求解方向余弦的最小二乘解确定信号的入射方向。具体步骤如下:

首先, 按照下式计算模糊数矢量, 注意其中的模 2π 运算是将各相位差减去 2π 的整数倍, 使之落在 $[-\pi, \pi]$ 内。

$$n = (\hat{\Phi}_0 - \hat{\Phi}_0 \bmod 2\pi) / 2\pi \quad (12)$$

其次, 利用模糊数 n 和实测相位差向量 $\Delta\Phi$ 获得无模糊相位差向量估计 $\hat{\Phi}$,

$$\hat{\Phi} = \Delta\Phi + 2n\pi \quad (13)$$

最后, 将 $\hat{\Phi}$ 的各分量分别代入式(3), 得到关于 (α, β) 的如下方程组,

$$\begin{cases} \hat{\phi}_{03} = \frac{2\pi d_2}{\lambda} \left[\beta \cos \frac{3\pi}{7} - \alpha \sin \frac{3\pi}{7} \right] \\ \hat{\phi}_{14} = \frac{2\pi d_2}{\lambda} \left[\beta \cos \frac{5\pi}{7} - \alpha \sin \frac{5\pi}{7} \right] \\ \vdots \\ \hat{\phi}_{62} = \frac{2\pi d_2}{\lambda} \left[\beta \cos \frac{15\pi}{7} - \alpha \sin \frac{5\pi}{7} \right] \end{cases} \quad (14)$$

设其系数矩阵为 A , 那么方程组的最小二乘解为

$$(\hat{\alpha}, \hat{\beta})^T = (A^H A)^{-1} A^H \hat{\Phi} \quad (15)$$

获得 $(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ 后, 将其代入式(9)即可确定入射信号的方向 $(\hat{\theta}, \hat{\varphi})$ 。综上所述, 基于平行辅助基线的算法通过引入平行基线来降低了算法计算量, 同时采用最小二乘处理来充分利用所有阵元信息, 以进一步提高测向精度。

4 算法仿真与分析

4.1 算法有效性验证

基于辅助基线的平面阵测向算法将文献[13]中在线阵上介绍的辅助基线算法推广到平面阵, 现在以如图2所示的7元均匀圆阵为例仿真验证推广的有效性。

仿真条件1: 阵列半径为 R , 信号来波方向方位角 107° , 俯仰角 65° , 采样率 $f_s = 1\,000$ Hz, 信号积累次数 $L = 8$ 。半径波长比 R/λ 变化范围 $[0.2, 5]$, 信噪比 $\text{SNR} = 10$ dB。分别在每个半径波长比下做 5 000 次 Monte-carlo 试验, 分别画出方位角和俯仰角测向精度与半径波长比的关系曲线如下。

由图3可知, 算法在 10 dB 的测向精度全都在 1° 以下, 说明将算法推广到平面阵上同样能正确测向。

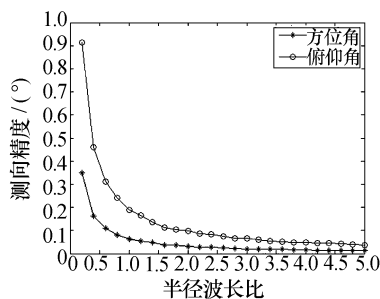


图3 算法二维测向精度曲线图

4.2 算法性能比较

本节将对基于平行辅助基线和基于传统辅助基线算法的运算量和测向性能, 由于这两种算法均是基于解模糊技术的, 因此, 测向性能主要取决于其解模糊概率。

无论是传统的辅助基线算法还是改进后的平行基线算法, 其运算量主要集中在相关运算和用于相关运算的相位差向量样本的计算上。而这两方面的运算量

都是与模糊数个数成正比的。以图2所示圆阵为例,表1中列出了在不同半径波长比下传统算法(只选取两条长基线)和改进算法(引入平行基线)的模糊值范围和相位差向量样本个数。通过表中比较可知,改进的算法确实能大大减小运算量,提高算法效率。

表1 两种算法的运算量比较

R/λ	传统算法	改进算法	传统算法	改进算法
	模糊数	模糊数	样本数	样本数
3	-6:6	-3:3	169	49
2	-4:4	-2:2	81	25
1	-2:2	-1:1	25	9

接下来比较两个算法的解模糊概率,信号来波方向方位角 107° , 俯仰角 85° 。半径波长比 R/λ 变化范围 $[0.1, 5]$, 分别在信噪比为 0 dB、5 dB 下对传统算法和改进算法做 5 000 次 Monte-carlo 试验,得到的正确解模糊概率与半径波长比的关系,如图4所示。

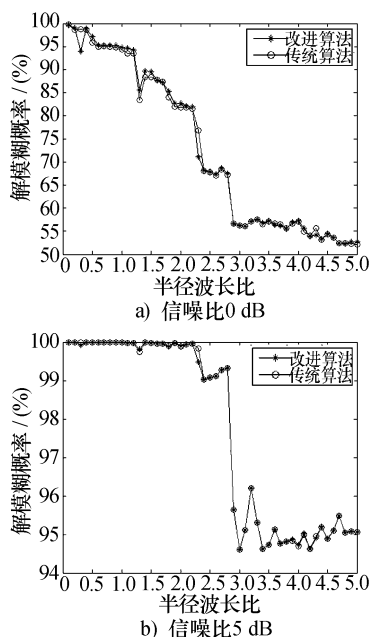


图4 两种算法解模糊性能比较

由以上仿真可以看出,改进算法同传统算法一样,能够很好的解决相位模糊问题,即它们在解模糊性能上基本相同。

4.3 最小二乘对测向精度的影响

仿真条件2: 天线阵采用如图2所示的7元均匀圆阵,辅助基线选择 L_{12} 、 L_{03} 和 L_{06} 、 L_{15} , 两组平行基线。信号来波方向方位角 165° , 俯仰角 45° , 采样率 $f_s = 1\,000$ Hz, 半径波长比 $R/\lambda = 2.5$, 信号积累次数 $L = 8$, 信噪比范围为 -5 dB ~ 10 dB, 每个信噪比下做 5 000 次 Monte-carlo 试验,比较算法中使用最小二乘与不使用最小二乘得到的测向精度,画出测向精度与信噪比的关系曲线,如图5所示。

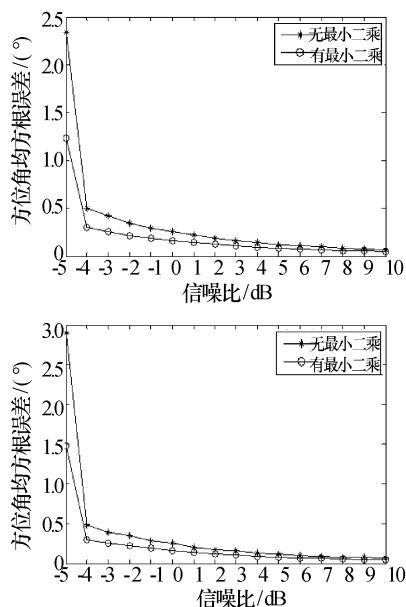


图5 半径波长比-测向精度曲线

由图5可知,采用最小二乘解作为测向结果能提高算法的测向精度,获得更好的测向性能,特别是在信噪比较小时效果更加明显。

5 结束语

本文将一种用于线阵的基于相关运算解模糊的干涉仪测向算法进行推广,将其用于平面阵同时测得信号入射方位角和俯仰角信息。在推广算法的基础上提出了一种基于平行基线的干涉仪测向算法,通过引入平行基线减少了可能模糊组合数,从而减少相关运算的样本数;最终利用最小二乘求解方向估计,进一步提高了算法的测向精度。仿真结果验证了该算法的有效性和高效性,在实际干涉仪测向系统中,具有较高的应用意义。在今后的工作中,应该重点研究如何提高算法在低信噪比时的测向精度,以及圆阵中平行基线的选取问题。

参考文献

- [1] Sundaram K R, Mallik R K, Murthy U M S. Modulo conversion method for estimating the direction of arrival [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(4): 1391-1396.
- [2] Penno R P, Pasala K M, Schneider S. An improved hybrid interferometer [J]. IEEE Proceedings on Aerospace Conference, 2004, 2(11): 940-946.
- [3] Macphie R H, Yoon T H. On using the compound interferometer to obtain the power pattern of a conventional receiving array [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 10(57): 3356-3359.
- [4] Liang Junli. Joint azimuth and elevation direction finding using cumulant [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(4):

- 690-698.
- [5] 田德明. 影响干涉仪测向接收机测向精度的因素分析[J]. 舰船电子对抗, 2010, 32(2): 45-48.
Tian Deming. Analysis on the factors influencing the direction finding precision of interferometer direction-finding receiver[J]. Shipboard Electronic Countermeasure, 2010, 32(2): 45-48.
- [6] Jacobs E, Ralston E W. Ambiguity resolution in interferometry[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1981, 17(6): 766-780.
- [7] Zhen Wei, Zuo xiangang, Ma Yukun, et al. Algorithm of multi-baseline interferometer phase difference in fuzzy circumstance[C]// 2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2011: 3902-3905.
- [8] 魏 星, 万建伟, 皇甫堪. 基于长短基线干涉仪的无源定位系统研究[J]. 现代雷达, 2007, 29(5): 22-25, 35.
Wei Xing, Wan Jianwei, Huangfu Kan. Study of passive location system based on multi base-line interferometers[J]. Modern Radar, 2007, 29(5): 22-25, 35.
- [9] 周亚强, 陈 翥, 皇甫堪, 等. 噪声条件下多基线相位干涉仪解模糊算法[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(2): 259-261.
Zhou Yaqiang, Chen Zhu, Huangfu Kan, et al. Algorithm of solving multi-baseline interferometer phase difference ambiguity in noisy circumstance[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2005, 27(2): 259-261.
- [10] 董国英, 陶海红, 廖桂生. 虚拟阵元解模糊的可行性分析[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(6): 1493-1496.
Dong Guoying, Tao Haihong, Liao Guisheng. The feasibility analysis of ambiguity solving with virtual arrays[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(6): 1493-1496.
- [11] 崔 旭. 基于虚拟基线的干涉仪测向改进方法[J]. 通信技术, 2011, 44(7): 89-91.
Cui Xu. Phase interferometer improvement based on virtual baseline[J]. Communications Technology, 2011, 44(7): 89-91.
- [12] 司伟建, 万良田. 立体基线算法的测向误差研究[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(4): 13-17.
Si Weijian, Wan Liangtian. The research on direction-finding error of direction finding with spatial baseline[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(4): 13-17.
- [13] 韩 广, 王 斌, 王 成. 相关运算在相位干涉仪解模糊中的应用[J]. 声学技术, 2010, 29(5): 538-542.
Han Guang, Wang Bin, Wang Cheng. Application of correlation to resolving interferometer ambiguity in direction finding[J]. Technical Acoustics, 2010, 29(5): 539-542.
- [14] 何子述, 夏 伟. 现代数字信号处理及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
He Zishu, Xia Wei. Modern digital signal processing and application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.

桂新涛 男, 1989年生, 硕士研究生. 研究方向为阵列信号处理。

蒲 刚 男, 1987年生, 硕士研究生. 研究方向为阵列信号处理。

程 婷 女, 1982年生, 博士, 副教授, 硕士生导师. 研究方向为雷达资源管理和阵列信号处理。

何子述 男, 1962年生, 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为阵列信号处理、相控阵雷达技术等领域。

(上接第29页)

- [14] Vasylyshyn V I. Closed-form DOA estimation with multi-scale Unitary ESPRIT algorithm[C]// Conference Proceedings. 1st European Radar Conference. Amsterdam, Netherlands: IEEE Press, 2004.
- [15] Stoica P, Babu P, Li Jian. New method of sparse parameter estimation in separable models and its use for spectral analysis of irregularly sampled data[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2011, 59(1): 35-47.
- [16] Stoica P, Nehorai A. Performance study of conditional and unconditional direction-of-arrival estimation[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1990, 38(10): 1783-1795.
- [17] Chen G H, Chen B X. Eigenstructure-based ambiguity resolution algorithm for distributed subarray antennas VHF radar[J]. Electronics Letters, 2012, 48(13): 788-789.
- [18] Kassis C E, Picheral J, Mokbel C. Advantages of nonuniform arrays using root-MUSIC[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 90(2): 689-695.
- 王 玉 女, 1989年生, 硕士研究生. 研究方向为分布式阵列雷达、阵列信号处理等。
- 杨明磊 男, 1981年生, 博士, 副教授, 硕士生导师. 研究方向为新体制雷达系统、极化信号处理和阵列信号处理等。
- 陈伯孝 男, 1966年生, 博士, 教授, 博士生导师. 研究方向为新体制雷达系统设计、阵列信号处理、精确制导与目标跟踪等。