



二维谱估计算法的空间探测性能分析及验证

李婷

(中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

摘要:针对二维谱估计算法的空间探测性能分析的需求,从计算速度、计算量、顽健性、计算精度以及实际工程应用的角度出发,对基于L型阵列的二维MUSIC、二维干涉仪、二维增广矩阵束的谱估计算法进行了简要介绍,并对上述二维谱估计算法的性能进行了仿真分析,得到了3种算法的角度RMSE的对比分析,可知在同样仿真条件下,二维增广矩阵束算法最优,二维MUSIC算法次之,二维干涉算法最差。同时,构建了相应的试验场景,通过试验分析上述二维谱估计算法的空间探测性能,得到的试验结论与仿真结论一致。在此基础上,提出了二维增广矩阵束算法可扩展应用到雷达测控一体化系统的思路。

关键词:空间探测;二维谱估计;阵列流型;角度RMSE;非协作目标探测;测控系统

中图分类号:TN911

文献标识码:A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016117

Analysis and verification on space probe performance of 2-D spectrum estimation algorithm

LI Ting

Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China

Abstract: According to the analysis requirement of the space probe performance of 2-D spectrum estimation algorithm, a brief introduction of the 2-D spectrum estimation algorithms was given in the view of calculating speed, calculating volume, stability, accuracy and practical application. These algorithms were the spectrum estimation algorithms of the 2-D MUSIC, the 2-D interference and the 2-D MEMP with the L-shaped array. The estimation performance of the algorithms were analyzed by simulations, the angle root mean square error of three algorithms were compared and analyzed. Simulation results show that the performance of the 2-D MEMP is the best, the performance of the 2-D interference algorithm is the worst, and the performance of the 2-D MUSIC is moderate. Meanwhile, the experimental scene was constructed, and the space probe performance of the 2-D spectrum estimation algorithm was analyzed by real data. The experimental results were consistent with the simulation results. Based on this, the 2-D MEMP algorithm may be further applied in the radar and TT&C system.

Key words: space probe, 2-D spectrum estimation, array manifold, angle root mean square error, non-cooperative target detection, TT&C system



1 引言

二维谱估计一般采用 L 型阵列、面阵和平行阵列或矢量传感器实现二维参数的估计,多数有效的二维谱估计算法是在一维谱估计算法的基础上,直接针对空间二维谱提出的。

二维谱估计广泛应用于雷达、通信、声纳、导航、地震、生物医学工程、射电天文等领域,用以实现对目标的探测、测向、定位等功能^[1-4]。通过二维谱估计,可得到目标相对于接收点的方位与仰角参数,实现单站对非协作目标的定位。这一技术可扩展应用到空间目标的探测、定位领域,对空间目标进行被动探测与定位,而来波可能是被探测目标主动发射的射频信号,也可能是目标反射的非协作目标信号,如移动基站发射的通信信号等。

二维谱估计主要包含方位角估计和仰角估计两个方面。在众多定位方法中,谱估计法是应用最多的定位方法。主要原因是方向测量是电子侦察设备的基本功能之一,且方向参数是辐射源最可靠的参数之一,特别是在现代复杂信号环境下,方向参数几乎成了唯一可靠的参数,因此方向测量法一直是定位方法的主要研究内容。

谱估计方法经历了几个阶段的发展,已经有了长足的进步。20 世纪 70 年代开始,出现了一系列用于估计谱的空间谱估计算法,其中有代表性的算法有谐波分析算法^[5]、Burg 的最大熵法(maximum entropy method, MEM)^[6]、CAPON 的最小方差法(minimum variance method, MVM)^[7]。这些经典算法都要在线性预测模型的基础上才成立,但线性预测理论不能有效利用加性噪声的统计特性,导致其分辨性能相对较差,因此在实际应用中均具有一定的局限性。20 世纪 70 年代末,又产生了子空间分解类算法,是通过对阵列接收数据的特征进行分解的一类方法。这类方法可以突破线性预测理论中谱估计方法的传统瑞利极限限制,从而在很大程度上提高了算法的分辨力,较其他方法有明显优势。最具代表性的算法,一种是 1979 年美国 Schmidt R O^[8,9] 提出的多重信号分类(multiple signal classification, MUSIC)算法;另一种是 1986 年 Roy 等人^[10,11] 提出的旋转不变子空间(estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, ESPRIT)算法。然而,上述常规的空间谱估计方法都忽略了信号的时间特性,无法充分利用信号中的有用信息。1973 年,美国的 Brennan L E 教授^[12,13] 提出了空时二维自适应信号处理技术,基于常规方法进行空域处理,同时适当地引入时域信息处理。该技

术可降低对阵列结构的约束,提高算法的抗噪能力,更充分地利用信号中的有用信息。此外, Gardner 和 Franks 研究员^[14,15] 考虑信号、雷达信号在特定条件下循环平稳的特性,将循环平稳信号处理技术与传统空间谱估计方法相结合,提出了一系列循环平稳信号谱估计方法,比如循环 MUSIC(cyclic MUSIC)、循环 ESPRIT(cyclic ESPRIT)方法; Sanjay 和 Tariq 研究员^[16] 考虑到语音、雷达等信号在非特殊情况下,均表现非平稳的特性(持续时间有限且时变)。据此,研究人员在谱估计中使用了人工神经网络方法。近年来,随着技术的不断发展和进步,根据信号的特性以及不同阵列形式特性,应运而生了一系列新的改进算法,为特定领域的应用需要提供了技术支撑。

根据以往的实验分析,选取性能较好的 L 型阵列作为后续的研究基础。选取 L 型阵列为阵列流型,仿真分析二维 MUSIC 算法、二维干涉法^[17-19] 以及二维增广矩阵束算法^[20], 并比较各算法的性能。在仿真基础上,通过使用二维 MUSIC 算法、二维干涉法以及二维增广矩阵束算法(MEMP)分析实测数据,比较 3 种算法的性能。基于 9 单元 L 型阵列的二维阵列谱估计方法获得了对探测目标的方位角估计和仰角估计,来实现对非协作目标的单站二维探测定位,对相应技术的性能进行了分析与比较,为空间目标探测的被动定位提供了理论仿真和试验数据支撑。

2 信号模型和 L 型阵列流型

假设空间源信号为窄带信号,因此在同一时刻,各个阵列单元接收信号只存在相位差异,而该相位差异仅取决于信号到达各阵元的不同波程。空间波的来波方向由三维空间中常用的仰角 θ 和方位角 φ 来表征。

假设 L 型阵列由 x 轴上阵元数为 N 的均匀线阵 X 和 y 轴上阵元数为 M 的均匀线阵 Y 构成,原点处的阵元为两个线阵共有,如图 1 所示。线阵 X 的阵元间距为 d_x 、线阵 Y 的阵元间距为 d_y ,且均不大于半波长。阵列的输出噪声是均值为 0、方差为 σ^2 的高斯白噪声,用 $n(t)$ 表示且与信号源不相关。假设空间有 K 个统计独立的同中心频率的窄带信号源照射到此阵列上,其二维谱为 $\{(\theta_k, \varphi_k) (k=1, 2, \dots, K)\}$, 其中, θ_k 和 φ_k 分别表示信号源的仰角和方位角。可以得到:

$$X(t) = A_x s(t) + n_x(t), \quad Y(t) = A_y s(t) + n_y(t) \quad (1)$$

其中, $s(t)$ 为信号模型。 x 轴上 N 个阵元对应的阵列导向阵为:

$$A_x = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{-j2\pi d \sin \theta_1 \cos \varphi_1 / \lambda} & e^{-j2\pi d \sin \theta_2 \cos \varphi_2 / \lambda} & \cdots & e^{-j2\pi d \sin \theta_k \cos \varphi_k / \lambda} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j2\pi d (N-1) \sin \theta_1 \cos \varphi_1 / \lambda} & e^{-j2\pi d (N-1) \sin \theta_2 \cos \varphi_2 / \lambda} & \cdots & e^{-j2\pi d (N-1) \sin \theta_k \cos \varphi_k / \lambda} \end{bmatrix} \quad (2)$$

y 轴上 M 个阵元对应的阵列导向阵为:

$$A_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ e^{-j2\pi d \sin \theta_1 \sin \varphi_1 / \lambda} & e^{-j2\pi d \sin \theta_2 \sin \varphi_2 / \lambda} & \cdots & e^{-j2\pi d \sin \theta_k \sin \varphi_k / \lambda} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j2\pi d (M-1) \sin \theta_1 \sin \varphi_1 / \lambda} & e^{-j2\pi d (M-1) \sin \theta_2 \sin \varphi_2 / \lambda} & \cdots & e^{-j2\pi d (M-1) \sin \theta_k \sin \varphi_k / \lambda} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, d 为天线单元之间的间距, λ 为波长。

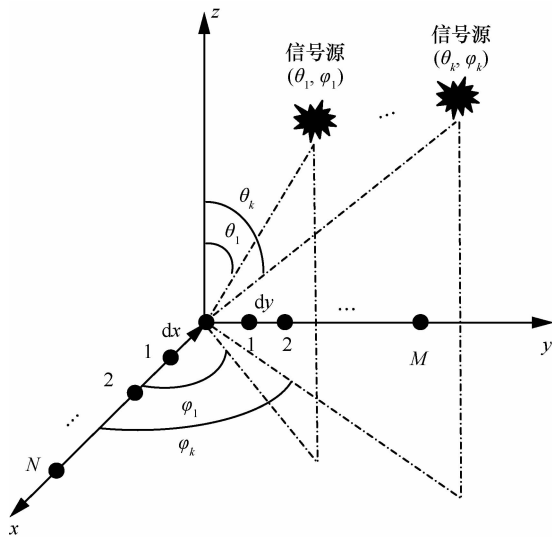


图1 L型阵列示意

3 3种二维谱估计算法

3.1 基于 MUSIC 算法的二维谱估计

基于 MUSIC 算法的谱估计的基本思想是构建一个合适的伪谱峰,即对任意阵列输出数据的协方差矩阵进行特征分解,可以得到信号子空间和噪声子空间,然后,利用阵列导向向量和噪声子空间的正交性可以得到伪谱峰,从而实现到达角估计的目的。二维 MUSIC 算法采用上述仿真信号模型和 L 型阵列流型,得到的伪谱峰为:

$$P_{\text{MUSIC-L}} = \frac{1}{[A_y(\theta, \varphi) \otimes A_x(\theta, \varphi)]^H E_N E_N^H [A_y(\theta, \varphi) \otimes A_x(\theta, \varphi)]} \quad (4)$$

其中, E_N 由噪声子空间对应的特征矢量构成。

3.2 基于干涉算法的二维谱估计

相位干涉仪测向算法具有数据处理时间短、技术成熟

的优点,是实施辐射源无源测向定位的主要手段之一,大量应用在对辐射源的测向中。

假设 x 轴上阵元数 $N=2R$, y 轴上阵元数 $M=2R$ 。在 x 轴和 y 轴上由两个基线距离分别为 $D_x, D_y (D_x, D_y \ll \lambda/2)$ 的干涉阵构成,二维干涉算法的阵列导向向量表述为:

$$A_x = [a(u_1), \dots, a(u_k)], \quad A_y = [b(v_1), \dots, b(v_k)] \quad (5)$$

基于以上假设,求解两个干涉阵的协方差矩阵的最大似然估计,并对实值协方差矩阵进行特征值分解。

在此基础上,通过二维谱估计和方向余弦正确配对的解模糊方法,可以计算方位角与仰角分别为:

$$\varphi_k = \arctan \frac{v_k}{u_k}, \quad \theta_k = \arcsin \sqrt{u_k^2 + v_k^2} \quad (6)$$

3.3 基于增广矩阵束的二维谱估计

采用上述信号模型和 L 型阵列流型的二维增广矩阵束的二维谱估计的阵列导向向量为:

$$A_x = [a_x(\theta_1, \varphi_1), a_x(\theta_2, \varphi_2), \dots, a_x(\theta_k, \varphi_k)] \quad (7)$$

$$A_y = [a_y(\theta_1, \varphi_1), a_y(\theta_2, \varphi_2), \dots, a_y(\theta_k, \varphi_k)] \quad (8)$$

$$a_x(\theta_k, \varphi_k) = [1, u_k, \dots, u_k^{N-1}]^T, \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (9)$$

$$a_y(\theta_k, \varphi_k) = [1, v_k, \dots, v_k^{M-1}]^T, \quad (k=1, 2, \dots, K) \quad (10)$$

为了便于算法的描述,先不考虑噪声项。求解协方差矩阵,并构造增广矩阵。

通过估计 u_k, v_k 以及配对算法的 3 个步骤,可以得到仰角与方向角的估计。也就是利用估计的 (u_k, v_k) 计算出相应的仰角与方位角,即:

$$\begin{cases} \theta_k = \arctan \frac{\text{angle}(v_k)}{\text{angle}(u_k)} \\ \varphi_k = \arcsin \sqrt{[\text{angle}(u_k) \lambda / 2\pi d]^2 + [\text{angle}(v_k) \lambda / 2\pi d]^2} \end{cases} \quad (11)$$



4 谱估计算法的仿真分析

4.1 仿真性能分析比较

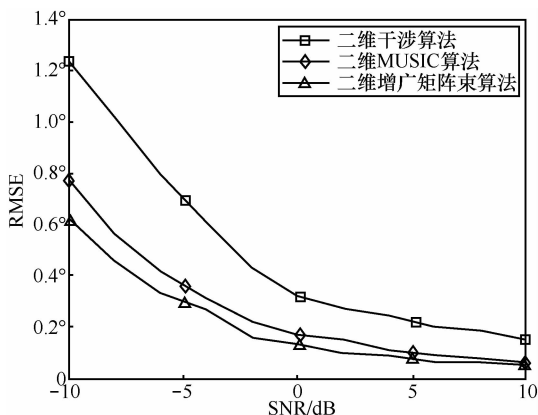
针对二维谱估计,比较二维 MUSIC 算法、二维干涉算法以及二维增广矩阵束算法的性能。

在 9 单元 L 型阵列中,阵元之间的距离为半个波长,阵列数据采集的快拍数为 1 000。目标信号源为单信号源的非相干信号,且各阵元的噪声相互独立。随着 SNR 在 $-10 \sim 10$ dB 之间变化,得到各 SNR 对应的仿真角度值,如图 2 所示。在每一个 SNR 下,采用蒙特利尔算法,连续重复探测 300 次,得出角度估计的均方根误差 (root mean square error, RMSE)。若重复 n 次仿真得到仰角 $\theta_i (i=1,2,\dots,n)$ 和方位角 $\varphi_i (i=1,2,\dots,n)$, 对应仰角和方位角估计的 RMSE 分别为 θ_{RMSE} 和 φ_{RMSE} 。

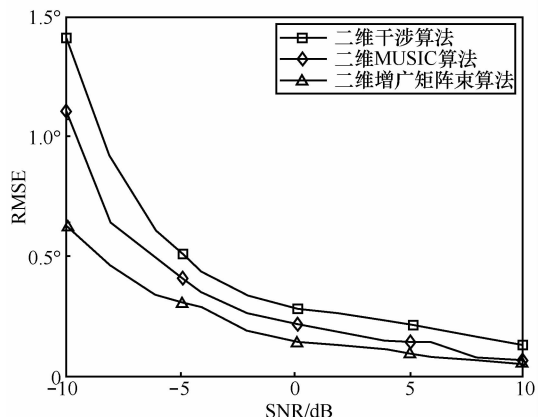
$$\theta_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta) / n}, \quad \varphi_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\varphi_i - \varphi) / n} \quad (12)$$

最后根据式 (12) 得到方位角和仰角的 RMSE。

在同一算法下,方位角/仰角的 RMSE 都是随着 SNR



(a) 方位角 RMSE 的性能对比



(b) 仰角 RMSE 的性能对比

图 2 3 种算法对应的角度 RMSE 随 SNR 变化的性能对比

的增大而减小;在同一 SNR 下,方位角/仰角的 RMSE 从小到大的排列顺序依次是二维增广矩阵束算法、二维 MUSIC 算法、二维干涉算法。可知,在同样的仿真条件下,二维增广矩阵束算法最优,二维 MUSIC 算法次之,二维干涉算法最差。

4.2 试验性能分析比较

4.2.1 试验介绍

如图 3 所示,实验采用 9 单元 L 型阵列探测从北京、河北石家庄、陕西蒲城 3 地电台发射的广播信号。实验从 2014 年 12 月 9 日开始,到 2014 年 12 月 13 日结束,实验目标是通过不同算法来分析实际探测数据,以比较各种算法的性能。

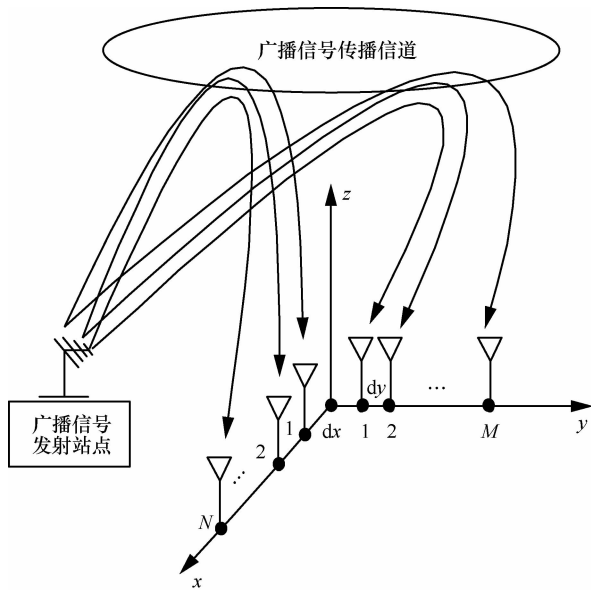


图 3 实验探测示意

天线接收阵列是位于江苏省昆山市 (120.95°E , 31.5°N) 的 9 单元 L 型阵列,9 个通道均满足时频同步和幅相一致的特性。场地选择的综合要求为空旷的范围(视线内基本上看不到遮挡物)、有电输入、可以架天线等。相关参数见表 1。

4.2.2 试验数据分析

在开展算法处理之前,为了有效地消除各个阵列通道之间的幅相误差对算法性能的影响,先进行通道幅相校准。然后分别采用 3 种算法对广播信号数据进行处理,得到到达角估计的均方根误差,在此基础上分析比较上述算法在实际工程应用中的算法性能。

方位角和仰角总的 RMSE 为:

表 1 广播电台信号的相关参数

地点	经纬度	频率/MHz	大圆距离/km	方位
北京	东经:116°27'	15.5	1 016	338°
	北纬:39°57'			
河北石家庄	东经:114°28'	9.5	933	323°
	北纬:38°04'			
陕西蒲城	东经:109°33'	10	1 130	293°
	北纬:34°57'			

$$TOTAL_RMSE = \sqrt{(\theta_{RMSE}^2 + \varphi_{RMSE}^2)/2} \quad (13)$$

针对不同探测频段的广播信号重复探测 300 次,并采用上文所述的二维 MUSIC 算法、二维干涉算法以及二维增广矩阵束算法对广播信号进行信号和信息处理分析,根据式(13)得到不同广播信号下的 3 种算法的性能,即方位角和仰角总的 $RMSE(TOTAL_RMSE)$,具体见表 2。根据表 2 的处理结果,可知 3 种算法性能优劣排序依次是:二维增广矩阵束算法最优,二维 MUSIC 算法次之,二维干涉算法最差。这个结论和仿真数据的结论一致。

此外,从算法复杂度的角度进行分析,二维 MUSIC 算法需要二维谱峰搜索,增加了算法的复杂度,限制了其在实际中的应用;二维干涉法具有数据处理时间短、技术成熟的优点,但是需要解决相位模糊的问题,增加了算法复杂度;二维增广矩阵束只需要少量的数据且计算速度快、精度高、复杂度低,因此得到了广泛的关注和深入的研究。综上所述,二维增广矩阵束算法的性能最优,二维 MUSIC 算法次之,二维干涉算法最差。

5 结束语

在采用 9 单元 L 阵列开展的二维谱估计算法研究中,通过仿真数据分析和比较二维到达角算法的性能,得出二维增广矩阵束算法最优,二维 MUSIC 算法次之,二维干涉算法最差的结论。在此基础上,设计了相应的试验,进一步验证了仿真结论,在 3 种算法中二维增广矩阵束算法最优,可应用到利用已知目标信号以及移动通信反射信号的来波估计被动探测系统中,实现了对非协作空间目标的探

测与定位,扩展了传统测控系统的应用范畴。

参考文献:

[1] BLACKMAN R B, TUKEY J W. The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering-part 1[J]. Bell System Technical Journal, 1958, 37(1): 185-282.

[2] ZHENG Z, ZHANG J, WU Y. Multi-target localization for bistatic MIMO radar in the presence of unknown mutual coupling [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012, 23(5): 708-714.

[3] ZHOU B, ZOU X, ZHANG X. An improved algorithm for noise-robust sparse linear prediction of speech [J]. Chinese Journal of Acoustics, 2015(1): 84-95.

[4] QIN G D, BAO D, LIU G G, et al. Cross-correlation matrix root-MUSIC algorithm for bistatic multiple-input multiple-output radar[J]. Science China Information Sciences, 2015, 58(2): 1-10.

[5] PISARENKO V F. The retrieval of harmonics from a covariance function [J]. Geophysical Journal International, 1973, 33(3): 347-366.

[6] BURG J P. The relationship between maximum entropy spectra and maximum likelihood spectra [J]. Geophysics, 1972, 37(2): 375-376.

[7] CAPON J, GREENFIELD R J, KOLKER R J. Multidimensional maximum-likelihood processing of a large aperture seismic array[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(2): 192-211.

[8] SCHMIDT R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.

[9] LIAO F C, LI P, LIU W J. Auditory filter based broadband MUSIC algorithm for sound source localization [J]. Chinese Journal of Acoustics, 2013, 37(4): 439-453.

表 2 不同广播信号下 3 种算法性能

地点	频率/MHz	二维干涉算法的 $TOTAL_RMSE$	二维 MUSIC 算法的 $TOTAL_RMSE$	二维增广矩阵束算法的 $TOTAL_RMSE$
河北石家庄	9.5	3.28	2.68	1.69
北京	15.5	2.95	2.44	1.27
陕西蒲城	10	3.46	2.63	1.82



- [10] ROY R, KAILATH T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1989, 37(7): 984-995.
- [11] HE Z, LI Y, HUANG Z. A method for solving DOA estimation ambiguity in esprit algorithm [J]. Journal of Electronics (China), 2000, 17(4): 325-330.
- [12] BRENNAN L E, REED I S. Theory of adaptive radar [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1973(2): 237-252.
- [13] LIANG G L, MA W, WANG Y L. Time-space transform: a novel signal processing approach for an acoustic vector-sensor[J]. Science China Information Sciences, 2013, 56(4): 1-11.
- [14] GARDNER W A, NAPOLITANO A, PAURA L. Cyclostationarity: half a century of research [J]. Signal Processing, 2006, 86(4): 639-697.
- [15] WANG B H, HUI H T, LEONG M S. Decoupled 2D direction of arrival estimation using compact uniform circular arrays in the presence of elevation-dependent mutual coupling [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58 (3): 747-755.
- [16] JHA S, DURRANI T. Direction of arrival estimation using artificial neural networks [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1991, 21(5): 1192-1201.
- [17] LI T, HU J. Analysis of space probe performance of different array manifold spectrum estimation [M]//27th Conference of Spacecraft TT&C Technology in China, November 9-12, 2014, Guangzhou, China. Berlin: Springer, 2015: 113-122.
- [18] LEPETIT L, JOFFRE M. Two-dimensional nonlinear optics using fourier-transform spectral interferometry[J]. Optics Letters, 1996, 21(8): 564-566.
- [19] GOLDSTEIN R, ZEBKER H, WERNER C. Satellite radar interferometry-two-dimensional phase unwrapping[J]. Radio Science, 1988, 23(4): 713-720.
- [20] 陈根华, 陈伯孝, 杨明磊, 等. 干涉式 L 形阵的二维高精度方向估计[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(1): 17-23.
CHEN G H, CHEN B X, YANG M L, et al. High accuracy 2-D direction finding using interferometric-like L-shaped array [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(1): 17-23.
- [21] 张小飞, 汪飞, 徐大专. 阵列信号处理的理论 and 应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
ZHANG X F, WANG F, XU D Z. Theory and application of array signal processing [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.

[作者简介]



李婷(1986-),女,博士,中国西南电子技术研究所工程师,主要从事二维谱估计、阵列信号处理以及飞行器测控通信系统总体技术方面的研究工作。