



短波单站一维定位性能分析及验证

李婷

(中国西南电子技术研究所, 四川 成都 610036)

摘要: 针对波束域算法分辨率低和高分辨空间谱估计算法对噪声敏感而导致的复杂电磁环境下定位精度低的问题, 提出一种 Capon 和 Root-MUSIC 的联合算法 (CRMU), 用于短波单站一维定位技术的研究。该算法不仅能避免谱峰搜索带来的高运算量, 还能在实际探测中, 抑制噪声对信号的影响, 从而降低方位角估计均方根误差。在仿真模型中, CRMU 算法的输出方位角角度估计的均方根误差至少比 Root-MUSIC 算法小 0.2° 。在短波单站一维定位实际应用中, CRMU 算法的定位误差均在 3% 以下, 满足了定位误差 5% 以内的实际工程需求。

关键词: 定位技术; 短波单站定位; 空间谱估计; 波达方向估计

中图分类号: TN911

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018228

Analysis and verification on one-dimensional location performance of shortwave single station

LI Ting

Southwest China Institute of Electronic Technology, Chengdu 610036, China

Abstract: With the low sensitivity of beam field and noise-sensitive of high resolution spatial spectrum algorithm, the low location precision under the complex electromagnetic environment becomes a severe problem. The Capon and Root-MUSIC (CRMU) joint algorithm was proposed to research the one-dimensional location technology. The proposed algorithm could not only avoid the high operation caused by the peak search but also suppress the noise, which contributed to reduce the root mean square error (RMSE) of azimuth. Then, the simulation results demonstrate that the RMSE of the proposed algorithm is at least 0.2° less than that of the Root-MUSIC algorithm. In addition, the location error of the proposed algorithm is less than 3% in the practical application of one-dimensional location of shortwave single station, which satisfies the demand that the location error should be below 5%.

Key words: location technology, short wave single station location, spatial spectrum estimation, DOA estimation

收稿日期: 2017-11-13; 修回日期: 2018-08-03

基金项目: 中国西南电子技术研究所技术创新基金资助项目 (No.H17015.1)

Foundation Item: The Creative Technology of Southwest China Instituted of Electronic Technology (No.H17015.1)



1 引言

波达方向 (direct of arrival, DOA) 估计是空间谱估计研究的核心问题, 波达方向估计广泛应用于诸如雷达、通信、声纳、导航、地震、生物医学工程、射电天文等领域^[1-2], 实现对目标的探测、测向、定位等。通过对波达方向的估计, 可得到目标相对于接收点的方位与俯仰参数, 实现单站对来波目标的定位。这一技术可扩展应用到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第三方信号, 如移动基站发射的通信信号等^[3-5]。

波达方向估计是空间谱估计研究的核心问题, 也是雷达、通信等许多领域的重要研究任务之一。它主要包含方位角估计和仰角估计两个方面, 其中通过方位角估计可开展短波单站一维定位技术研究。

在众多定位方法中, 波达方向估计法是研究最早、最多, 也是应用最多的定位方法。其主要原因是, 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。

波达方向估计方法经历了几个阶段的发展, 已经有了长足的进步。在发展早期, 波达方向估计 (空间信号) 方法远不如频率估计 (时间信号) 方法成熟, 但由于波达方向估计和频率估计的原理十分类似, 于是, 时域非线性信号处理技术经常被应用到空域处理上, 早期波达方向估计的算法^[6]也基本上都是采取这种处理方式。20 世纪 70 年代开始, 出现了一系列用于估计波达方向的空间谱估计算法, 其中, 比较代表性的经典算法有: 谐波分析算法、Burg 的最大熵法 (maximum entropy method, MEM)、

CAPON 的最小方差法 (minimum variance method, MVM)^[7-8]。这些经典算法都是在线性预测模型基础上才成立的, 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。另外, 非线性估计方法都要满足一定前提条件才能成立, 比如设定空间中的信号源需连续分布, 信号需满足平稳随机特性, 但在实际探测时, 这个前提是不成立的, 因此, 这些经典算法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波达方向估计方法的传统瑞利极限限制, 从而很大程度地提高了算法的分辨率, 较其他方法有明显优势。

子空间分解类算法最具代表性的算法有两种: 一种是 1979 年美国 Schmidt R O^[9-10]提出的多重信号分类 (multiple signal classification, MUSIC) 算法, 它的核心思想是利用噪声子空间和信号子空间的正交特性构造出“针状”空间谱峰, 从而实现波达方向的估计; 另一种是 1986 年 Roy 等人^[11]提出的旋转不变子空间 (estimation of signal parameters via rotational invariance techniques, ESPRIT) 算法。它的核心思想是根据初始阵列, 构建两个几何结构具有不变性的子阵。在此基础上, 利用子阵间的旋转不变性来实现波达方向的估计。在子空间分解类算法的基础上, Roy 等人^[12-15]又提出了改进的算法 Root-MUSIC 算法, 该算法相较传统的子空间分解类算法, 不仅具有 MUSIC 算法高分辨性能的优势, 还具有求根算法运算量小的优势。

综上所述, 为了进一步研究和改进算法的性能, 本文提出了一种新算法, 即 CRMU 算法。CRMU 算法是经典的 Root-MUSIC 算法和波束域 Capon 算法的联合算法, 在以下 4 个方面具有明显优势: 第一, 它不仅延续了波束域对噪声和系统误差敏感度低, 能降低信噪比 (signal to noise

ratio, SNR) 门限等优点, 而且还具有抑制噪声、提高放大信号接收方向功率等优点; 第二, 它不仅具有 MUSIC 算法高分辨性能的优势, 还具有求根算法运算量小的优势; 第三, 在同等试验条件下, 它的性能优于上述 4 种算法; 第四, 与其他算法在同等精度条件下相比, CRMU 算法降低了阵列数目要求, 从而节约了场地空间、面积和成本, 同时也降低了 SNR 门限要求, 能更好地处理现实情况中受到各种噪声影响的信号, 并且在仿真和试验方面都得到了很好的验证。

2 CRMU 算法

针对短波单站定位需要适应复杂电磁环境的问题, 提出一种改进的短波单站定位算法 (CRMU)。该算法是基于波束域的求根高分辨谱估计定位方法, 不仅具有高分辨的定位性能, 而且算法的计算量小, 估计精度高, 在实际探测中, 还能抑制噪声对信号的影响, 降低波达方向估计均方根误差 (root mean square error, RMSE), 提高角度估计性能, 以用于短波单站定位技术的研究。

CRMU 算法原理的基本步骤如下所述。

步骤 1 根据阵列阵元数据、波束数目以及相应的物理参量, 可以得到波束转换矩阵 T 。通过波束转换矩阵 T 处理后, 阵元域中的输出数据转换为波束域输出数据。假设均匀线列阵列的阵元数目为 M 个, 对应的波束数目为 $B(B < M)$ 个, 则构成了 $M \times B$ 的波束转换矩阵 T 。假定阵元域的输出数据为 $x(t)$, 后端信号处理分系统将 T 矩阵进行共轭转置为矩阵, 矩阵与阵元域中的输出数据通过矩阵相乘转换为波束域输出数据, 计算式如下:

$$y(t) = T^H x(t) \quad (1)$$

其中, 波束转换矩阵 $T = [a_1, a_2, \dots, a_B]$ 。

$$a_i = [w_1 e^{-j\gamma_{i1}}, w_2 e^{-j\gamma_{i2}}, \dots, w_M e^{-j\gamma_{iM}}]^T, i = 1, 2, \dots, B \quad (2)$$

其中, $a_i (i = 1, 2, \dots, B)$ 为接收矩阵在 $\theta_i (i = 1, 2, \dots, B)$ 方向上各阵元的相位移量, $w_j (j = 1, 2, \dots, M)$ 为各阵元的加权系数。

$$\gamma_{ij} = 2\pi(M-1)d \sin \theta_j / \lambda \quad (3)$$

其中, d 为阵元间距, λ 为信号波长。同时证明波束转换矩阵 T 满足正交性。 $T^H T = I$ 。因此, 可以得到波束域协方差矩阵为:

$$R_B = E[y(t)y^H(t)], T^H T = I \quad (4)$$

步骤 2 后端信号处理分系统对波束域输出数据进行处理和分析。根据波束域协方差矩阵求解出相应的特征值, 并按降序排列 $\xi_1 \geq \xi_2 \geq \dots \geq \xi_B$ 对应的特征向量为 $v_1, v_2, \dots, v_D, v_{D+1}, \dots, v_B$ 。根据特征值判断是否存在信号源, 再采用信号源数目估计的方法, 可知信号源数目的特征向量为 D 。后端信号处理分系统将信号源对应的信号子空间和噪声子空间设为:

$$V_S = [v_1, v_2, \dots, v_D], V_N = [v_{D+1}, v_{D+2}, \dots, v_B] \quad (5)$$

波束域的方向矢量计算式如下:

$$d(\theta) = T^H a(\theta) \quad (6)$$

其中, $a(\theta)$ 为阵元的方向矢量。

为了从所有噪声特征矢量中同时提取信息, 在此基础上, 假定一个多项式为:

$$f(z) = p^H(z) V_N V_N^H p(z) \quad (7)$$

其中, $p(z) = [1 \quad z \quad \dots \quad z^{M-1}]^T$ 。

然而, 式(7)还不是 z 的多项式, 因为存在 z^* 的幂次项。由于只需求解单位圆上的 z 值, 所以可以用 $P^T(z^{-1})$ 代替 $p^H(z)$, 这就给出了短波单站定位方法的求根多项式, 根据式(9)可以把多项式修正为:

$$f(z) = z^{M-1} p^T(z^{-1}) V_N V_N^H p(z) \quad (8)$$

可知多项式 $f(z)$ 的阶数为 $2(M-1)$, 相当于该多项式有 $(M-1)$ 对根, 且每对根符合相互共轭的特性, 在上述 $(M-1)$ 对根中存在 D 个根



$z_1, \dots, z_D$ 分布在单位圆上, 且:

$$z_i = e^{j2\pi\theta_i}, 1 \leq i \leq D \quad (9)$$

式(9)考虑的是在协方差矩阵非常精确时获取的结果, 而在实际探测中, 当协方差矩阵存在误差时, 只需求出 D 个无限趋近于单位圆上的值, 该趋近单位圆上的根作为信号源波达方向 θ :

$$\theta_i = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d} \arg\left\{z_i\right\}\right), i=1, \dots, D \quad (10)$$

通过式(10)求解出 θ , 即信号的入射方向。

根据 CRMU 算法核心思想, 画出其对应的流程, 如图 1 所示。

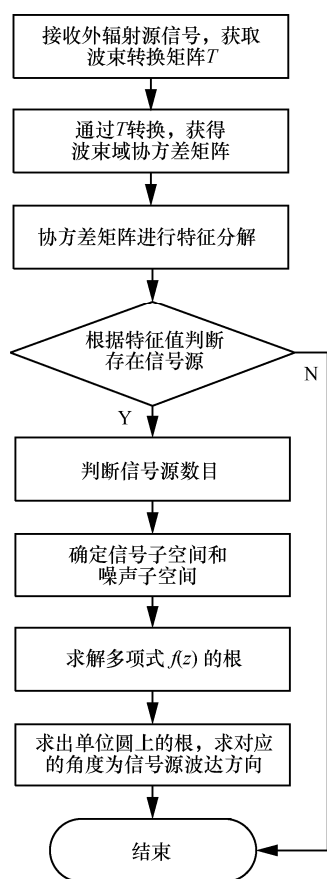


图 1 CRMU 算法的流程

3 仿真分析

比较 Root-MUSIC 算法和 CRMU 算法的角度估计误差性能。现采用仿真实例为七阵列单元均

匀线阵, 阵元之间距离 d 为半个波长, 阵列数据采集的快拍数为 1 024。采用单个信号方向 θ 为 50° , 角频率 ω 为 314 rad/s 的复正弦信号, 其中包含功率为 0.1 W 的高斯白噪声, 各阵元间的噪声相互独立。

在每一个 SNR 下, 又采用蒙特利尔算法, 连续重复探测 300 次, 得出角度估计的 RMSE。若重复 n 次仿真得到角度 $\theta_i (i=1, 2, \dots, n)$, 对应角度估计的 RMSE 计算式如式(11)所示:

$$\theta_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\theta_i - \theta)^2} / n \quad (11)$$

如图 2 所示, 在相同仿真条件下, CRMU 算法的 RMSE 小于 Root-MUSIC 算法。换言之, 在同等的仿真条件下, CRMU 算法的性能优于 Root-MUSIC 算法的性能。

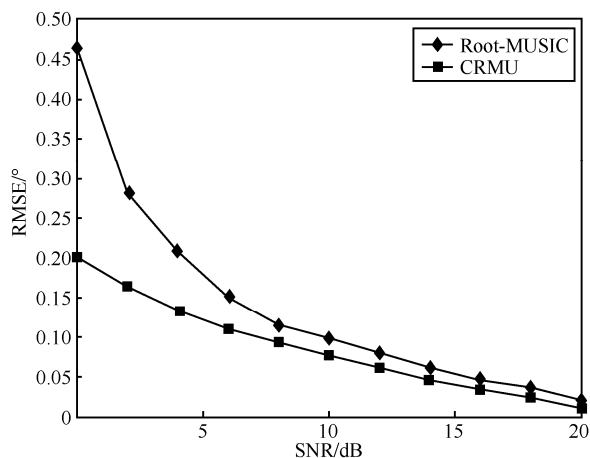


图 2 Root-MUSIC 和 CRMU 算法的角度随 SNR 变化对比

4 短波单站一维定位技术的试验

4.1 试验介绍

如图 3 所示, 试验采用五单元均匀线阵分别探测从北京、河北石家庄、陕西蒲城三地电台发射的广播信号。实验从 2014 年 12 月 15 日开始, 到 2014 年 12 月 17 日结束, 试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。

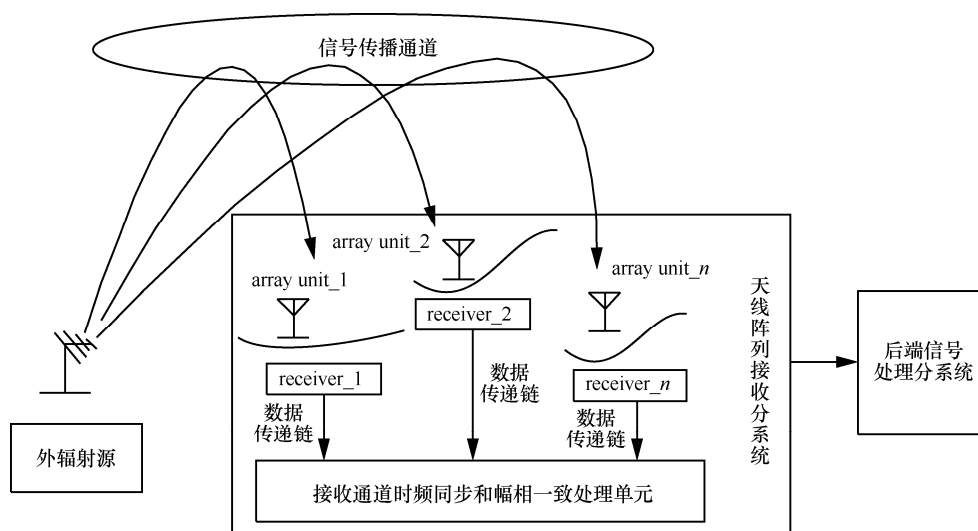


图 3 试验探测示意图

短波单站定位系统由接收外辐射源的天线阵列接收分系统、后端信号处理分系统构成,其中,天线阵列接收系统包括带有信号传播通道的天线阵列单元 array_unit_1 , array_unit_2 , $\dots$, array_unit_n , 对应天线阵列单元 array_unit_1 , array_unit_2 , $\dots$, array_unit_n 的数据传递链接收通道 receiver_1 , receiver_2 , $\dots$, receiver_n , 数据传递链接收通道连接的接收通道时频同步和幅相一致性处理单元。当空间外辐射源发射信号时,短波单站定位系统中的天线阵列接收分系统通过天线阵列单元 array_unit_1 , array_unit_2 , $\dots$, array_unit_n , 接收经过信号传播通道传播的外辐射源信号,外辐射源信号数据传递链接收通道 receiver_1 , receiver_2 , $\dots$, receiver_n 送入接收通道时频同步和幅相一致性处理单元进行处理,并将阵列阵元数据、波束数目以及相应物理参量的处理结果送入后端信号处理系统,后端信号处理系统结合阵列阵元数据、波束数目以及相应物理参量,进行

外辐射信号源波达方向估计,实现短波单站定位。

短波单站定位系统的天线阵列接收分系统是位于江苏省昆山市(经纬度为: 120.95°E , 31.5°N) 的五单元均匀线阵,在后端信号处理分系统中,首先通过时频和幅相一致性算法的调整,使 5 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如下: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,探测频率需根据场地大小适当调整。五单元阵列通过分别接收来自北京、河北石家庄和陕西蒲城的广播信号,进行方位角估计试验。相关参数见表 1。

4.2 试验数据分析

以河北石家庄电台发射的信号为例,对比 Root-MUSIC 和 CRMU 算法的短波单站的定位性能,对比结果如图 4、图 5 所示。

如图 4(a) 和图 5(a) 所示,分别通过一维 Root-MUSIC 和一维 CRMU 算法处理实际探测数据,可以得到实际探测方位角趋近真实值

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
河北石家庄	东经: $114^\circ28'$, 北纬: $38^\circ04'$	9.5	933	323°
北京	东经: $116^\circ27'$, 北纬: $39^\circ57'$	15.5	1 016	338°
陕西蒲城	东经: $109^\circ33'$, 北纬: $34^\circ57'$	10	1 130	293°

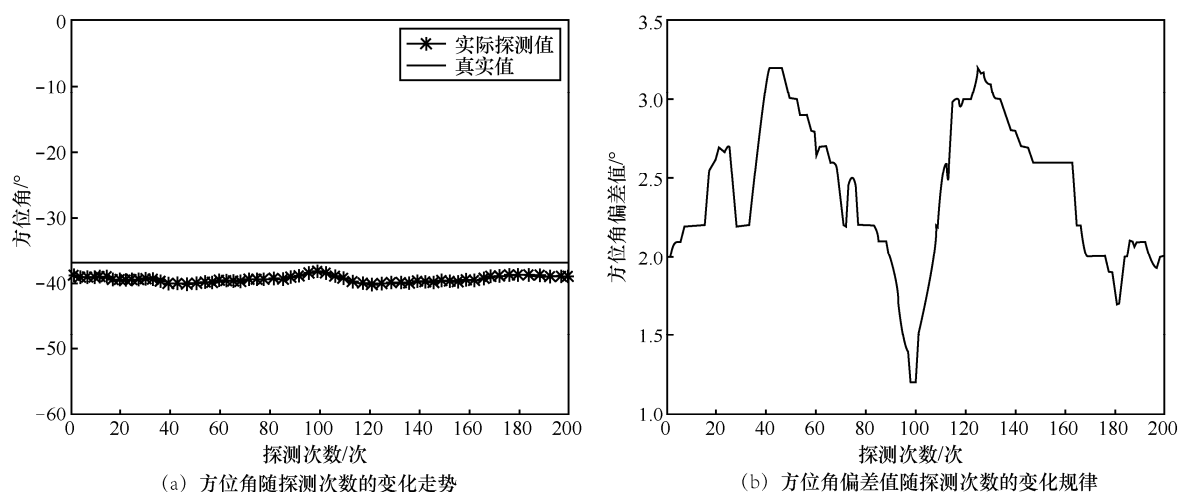


图4 一维 Root-MUSIC 算法的仿真方位角的信息

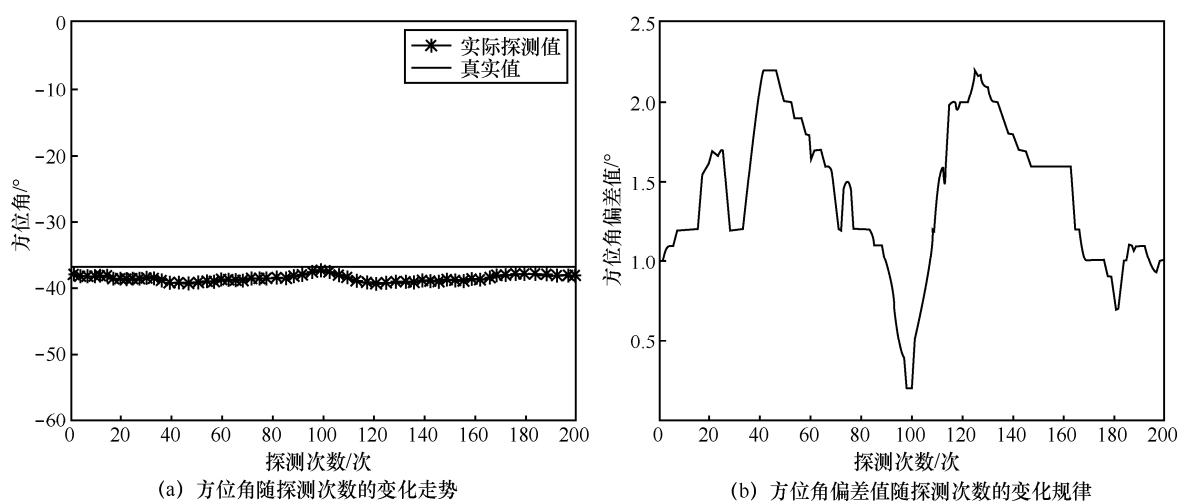


图5 一维 CRMU 算法的仿真方位角的信息

的情况。基于前面分析的基础，从图 4 (b) 和图 5 (b) 中，可以得到一维 Root-MUSIC 和一维 CRMU 算法的方位角偏差值随探测次数的变化规律。

通过对实际探测数据的分析，CRMU 算法处理得到的探测方位角更接近真实值，即表明 CRMU 算法的性能更好。

根据不同算法分析实测数据，得到相应的方位角，结合接收站点经纬度和大圆距离的信息，反算出一维广播信号源的经纬度。联合此经纬度和实际广播电台的经纬度，得到距离差 Dis_Dif。根据 Dis_Dif 和表 1 中大圆距离 D 的比值，可以得到一维短波单站定位的定位误差

PE。计算式如下：

$$PE = \text{Dis_Dif} / D \times 100\% \quad (12)$$

不同广播信号下的 Root-MUSIC 和 CRMU 两种算法的定位误差见表 2。从表 2 中可知，较 Root-MUSIC 算法而言，本文提出的 CRMU 算法的定位误差较小，且其定位误差均在 3% 以下。

表2 不同广播信号下的 Root-MUSIC 和 CRMU 两种算法的定位误差

地点	频率/MHz	PE_Root MUSIC	PE_CRMU
河北石家庄	9.5	5.29%	2.6%
北京	15.5	4.87%	1.9%
陕西蒲城	10	6.39%	2.9%

5 结束语

采用“一发五收”的方式,联合探测北京、河北石家庄和陕西蒲城的广播信号,实现了短波单站一维定位。通过仿真分析,改进算法 CRMU 的仿真性能得到提高,通过实际试验和实测数据的分析,可知 CRMU 的定位误差较小,且其定位误差均在 3% 以下,有效地提高了短波单站一维定位性能,从而满足了短波单站一维定位误差 5% 以内的实际工程需求。相应的算法和技术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,实现对非协作空间目标的探测与定位,扩展传统测控系统的应用范畴。

参考文献:

- [1] XU B, ZHAO Y, CHENG Z, et al. A novel unitary PARAFAC method for DOD and DOA estimation in bistatic MIMO radar[J]. *Signal Processing*, 2017, 13(8): 273-279.
- [2] 毕志明, 匡镜明, 王华. 认知无线电技术的研究与发展[J]. *电信科学*, 2006, 22(7): 57-60.
BI Z M, KUANG J M, WANG H. Research status and development trend of cognitive radio[J]. *Telecommunications Science*, 2006, 22(7): 57-60.
- [3] BAROUTIS N, YOUNIS M. Load-conscious maximization of base-station location privacy in wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2017, 12(4): 126-139.
- [4] 陈旭彬, 任培明, 戴慧玲. 空间谱估计无线电测向系统[J]. *电信科学*, 2017, 33(7): 183-188.
CHEN X B, REN P M, DAI H L. Radio direction finding system based on spatial spectrum estimation[J]. *Telecommunications Science*, 2017, 33(7): 183-188.
- [5] 包志强, 崔妍蕊, 徐笑. 一种关于空间谱的两级多天线盲频谱检测[J]. *电信科学*, 2018, 34(3): 59-66.
BAO Z Q, CUI Y R, XU X. A two level multi-antenna blind spectrum detection about spatial spectrum[J]. *Telecommunications Science*, 2018, 34(3): 59-66.
- [6] BLACKMAN R B, TUKEY J W, TUKEY J W, et al. The measurement of power spectra: from the point of view of communications engineering[M]. New York: Dover, 1959.
- [7] BURG J P. The relationship between maximum entropy spectra and maximum likelihood spectra[J]. *Geophysics*, 1972, 37(2): 375-376.
- [8] CAPON J. Maximum-likelihood spectral estimation [M]. Berlin: Springer, 1979: 614-626.
- [9] SCHMIDT R. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1986, 34(3): 276-280.
- [10] 李婷. 二维谱估计算法的空间探测性能分析及验证[J]. *电信科学*, 2016, 32(5): 173-178.
LI T. Analysis and verification on space probe performance of 2-D spectrum estimation algorithm [J]. *Telecommunications Science*, 2016, 32(5): 173-178.
- [11] ROY R, PAULRAJ A, KAILATH T. ESPRIT-A subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise[J]. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, 1986, 34(5): 1340-1342.
- [12] ZHANG D, ZHANG Y, ZHENG G, et al. Improved DOA estimation algorithm for co-prime linear arrays using root-MUSIC algorithm[J]. *Electronics Letters*, 2017, 53(18): 1277-1279.
- [13] QIN G D, BAO D, LIU G G, et al. Cross-correlation matrix Root-MUSIC algorithm for bistatic multiple-input multiple-output radar[J]. *China Information Sciences*, 2015, 58(2): 1-10.
- [14] MARAN S, JAHNAVI R, GUNASEELAN K. New real time location sensing system using direction of arrival based multilateration technique[J]. *Wireless Communication*, 2017, 9(1): 15-20.
- [15] PATWARI A, REDDY G R, GUPTA H, et al. Suitability of conventional 1D noise subspace algorithms for DOA estimation using large arrays at millimeter wave band[J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, 12(8): 1591-1597.

[作者简介]



李婷(1986-),女,博士,中国西南电子技术研究所高级工程师,主要从事阵列信号处理、飞行器测控通信系统总体技术、空间移动互联网等方面的研究工作。