

一种基于压缩感知的同频多辐射源 数量估计及定位方法

谷晓鹏, 谢树果, 常 青, 杨美玲
(北京航空航天大学, 北京 100083)

摘 要: 本文提出了一种基于压缩感知的多辐射源数量估计及定位方法, 能够较为准确地对未知的多个无线电辐射源的数量估计并定位. 方法通过移动监测, 在区域内部分位置上获取场强值. 在对场强值进行预处理后, 利用目标源的空间稀疏性, 结合传播模型及压缩感知方法进行粗定位, 用较少场强值重构计算出区域内未知同频辐射源数量. 在此基础上进行二次定位确定辐射源的位置, 提高了定位的准确度. 通过对算法进行仿真与实验验证, 证明了本文方法的有效性.

关键词: 定位算法; 移动监测; 场强; 压缩感知; 粗定位

中图分类号: TN97 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)05-1173-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.05.023

A Number Estimation and Location Method of Multiple Radiation Sources Based on Compressive Sensing

GU Xiao-peng, XIE Shu-guo, CHANG Qing, YANG Mei-ling
(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083, China)

Abstract: A location method based on compressive sensing about multi radiation source is proposed, which can accurately estimate the number of the unknown multiple radiation sources and locate them. In this method, the field strength values are obtained in the partial position of the determined region by mobile monitoring. Due to the spatial sparsity of the target source, the compressive sensing method combined with the propagation model is used for coarse location after the preprocessing of the field strength value. In this way, the number of unknown radiation sources in the region is reconstructed with less field strength values. On this basis, in order to improve the positioning accuracy, genetic algorithm is used to locate the position of the radiation source in second positioning. Through the simulation and experimental verification of the algorithm, it is proved that the method is effective.

Key words: location algorithm; mobile monitoring; field strength; compressive sensing; coarse location

1 引言

辐射源定位是无线电监测管理的一项重要内容^[1]. 目前, 无线电管理中主要的辐射源定位方法是通过多个站点测得的方位线进行交叉定位^[2,3]. 这种方法在城市中易受到多径、阴影等复杂电磁环境因素干扰而失准. 有文献研究了复杂环境下的定位工作, 但由于要求的定位系统条件复杂严苛, 现实中并不适合进行大规模部署^[4,5]. 文献^[6]提出了小型化的监测设备、快速机动的监测模式配合基于场强的定位方法, 提供

了一种有效的解决方案^[6]. 但是这种方法需要提前获知辐射源的数量, 存在缺陷. 本文提出的基于压缩感知的同频多辐射源数量估计及定位方法, 通过预处理提高场强数据可用性; 利用移动监测的场强数据, 粗定位确定辐射源数量、二次定位准确确定辐射源位置. 方法对设备要求低, 机动灵活, 适合大量部署, 为电磁频谱的管理提供了一种新的定位手段.

2 系统模型

如图 1, 为了实现未知同频多辐射源的估计与定

位,本文主要分为以下几步:移动监测并接收场强数据、场强值预处理、粗定位和二次定位.其中,粗定位可以确定未知辐射源的数量,是本文的重点.



图1 定位方法流程图

2.1 场强值预处理

基于场强的定位方法关键在于建立场强和空间位置的关系.现有的方法通常是利用空间传播损耗模型^[7],根据接收信号强度计算距离,对定位区域内的场强和位置空间进行描述,定位的精确性依赖于电波传播模型的准确程度.然而,在复杂的电磁环境下,接收信号强度会受到快衰落和慢衰落的影响^[8].如图2:

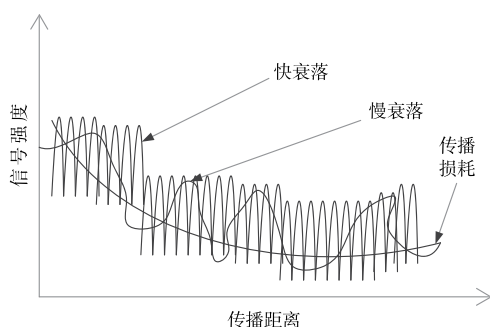


图2 信号场强衰落示意图

通过图2可以看出,当移动监测到的场强值在去除快衰落与慢衰落后,只与传播损耗相关时,其相邻场强是缓慢变化的^[9].因此可以将接收的场强值包络中复杂的非线性成分看成是噪声,然后对其进行消噪处理.这样就能有效的去除衰落,得到可信度、可用性更高的场强值序列.

本文提出了利用经验模态分解方法(Empirical Mode Decomposition, EMD)处理场强序列去除衰落^[10].该方法根据信号本身的特性自适应地产生合适的模态函数. EMD分解后的各本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量是按频率高低排列的^[11].根据这个特点,去掉若干个高频 IMF 分量再以其余分量重构序列,相当于剔除了快衰落与慢衰落的影响,得到的即为消噪后的场强序列.

2.2 粗定位

前面提到,基于场强定位的关键在于传播损耗模型.电波在自由空间传播的条件下,一个全向辐射源在接收天线处的功率为:

$$P_R = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (1)$$

其中, P_T 为发射功率, P_R 为接收功率, λ 为信号波长,

G_T 为发射天线增益, G_R 为接收天线增益, d 为辐射源与接收设备距离. 设 G_T, G_R 都为 1. 通过此公式,可以建立场强与空间位置的映射关系. 但是在进行定位时,由于辐射源没有先验信息,它的数量及特征都是未知的. 假设同频辐射源场强值满足线性叠加, 当一个监测区域内的不同位置有两个或两个以上的同频辐射源时, 利用传播模型与距离的关系进行定位的方法由于监测节点有限, 很容易无法对其进行区分而认为只有一个辐射源, 从而将对定位结果产生一定影响. 因此, 如何确定同频辐射源的数量是传播模型合理应用的前提条件.

移动监测具有灵活机动特性, 可以进行大范围移动监测采样. 当采样覆盖到的区域空间足够多时, 通过聚类方法可以得到极值点来估计辐射源数量与位置. 但是此方式对时间、路径要求过高, 在实际应用中利用价值较低, 实用性差.

近年来压缩感知(Compressive Sensing)理论受到广泛关注, 逐渐应用到了信号处理等领域^[12]. 它提供了一种在某种转换基下稀疏的信号用低维测量值重构的方法^[13]. 根据此理论, 由于辐射源数量在监测区域内空间上是稀疏的, 满足压缩感知稀疏性条件. 因此理论上可以以较少的移动获得的场强数据来实现辐射源目标的定位.

将待定位区域按照一定的网格尺寸划分为 N 个网格: $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, $N = i$, 对应的可能存在的空间目标向量 $\mathbf{S} = [s_1 s_2 \dots s_N]^T$. 根据自由空间传播模型, 区域内网格节点接收到的场强为

$$P_{ij} = \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{ij}^2} P_j, \quad 1 \leq i, j \leq N \quad (2)$$

其中, i 为接收设备所在的网格序号, j 为辐射源的网格序号, P_j 为空间目标向量 s_j 的大小, 即辐射源场强值. d_{ij} 为监测节点网格与辐射源所在网格的中心距离. 以此可构造矩阵:

$$\mathbf{X} = \Phi \Psi \mathbf{S} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (3)$$

其中,

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix}$$

代表移动采样共覆盖 M 个网格得到的网格场强值.

$$\Psi = \begin{bmatrix} \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{11}^2} & \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{12}^2} & \dots & \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{1N}^2} \\ \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{21}^2} & \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{22}^2} & \dots & \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{2N}^2} \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{N1}^2} & \dots & \dots & \frac{G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{NN}^2} \end{bmatrix}$$

为向量 \mathbf{S} 的稀疏变换基. 实现了对信号在空间域的稀疏变换.

Φ 为 $M \times N$ 维测量矩阵, 表示 M 个网格采样节点在目标区域中的位置所在. 当第 r ($1 \leq r \leq M$) 个采样节点所在的网格序号为 l ($1 \leq l \leq N$), 则 $\Phi(r, l) = 1$, 其余为 0.

$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为噪声矢量.

设目标区域中真实存在 K 个目标信号, $N \geq K$. 即向量 \mathbf{S} 中存在 K 个较大值, 对应存在的 K 个目标信号, 这 K 个值的大小代表对应信号的强度值, 序号代表网格位置. 其余 $N-K$ 个值代表其余网格不存在目标, 值较小或为零. 可以看出, 待定位目标只存在于目标区域网格划分中有限的几个网格上, 即是稀疏分布的. 因此可以利用得到的矩阵 \mathbf{X} , 通过一定的重构方法得到空间稀疏向量 \mathbf{S} 中 K 个目标信号的位置与大小. 设恢复矩阵 $\mathbf{A} = \Phi\Psi$

重构模型:

$$\hat{\mathbf{S}} = \operatorname{argmin} \|\mathbf{S}\|_1, \text{ s. t. } \|\mathbf{X}\mathbf{A}\mathbf{S}\|_2 \leq \sigma \quad (4)$$

其中, σ 是与噪声水平相关的参数.

这样, 问题转化为一个凸优化问题, 可以通过线性规划方法求解^[14]. 考虑低成本设备的计算处理能力, 本文选用正交匹配追踪算法 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP) 作为重构算法. 但是 OMP 本身与稀疏度 K 存在着密切关系, 且针对的是已知稀疏度的情况. 由于辐射源没有先验信息, 所以对于辐射源的数量即稀疏度是未知的. 需要对 OMP 算法进行改进, 使其适用于目标数量未知的定位. 在 OMP 算法的迭代过程中, 需要搜索的是 K 个最大值. 这 K 个最大值代表了区域内目标辐射源的发射强度. 在这 K 个最大值之外的残差代表了区域内其他位置不存在辐射源, 也就是等同于背景噪声. 因此设定以噪声为阈值的迭代搜索终止条件. 每次搜索使 $\mathbf{A}\mathbf{S}$ 最接近 \mathbf{X} 的单位稀疏阵, 即 $\|\mathbf{X}\mathbf{A}\mathbf{S}\|_2$ 最小的 l 稀疏阵, 用 \mathbf{X} 减去 $\mathbf{A}\mathbf{S}$, 得残差 \mathbf{X}' , 依次迭代搜索直到达到终止搜索条件即残差等于背景噪声大小时终止搜索. 这时所有存在的目标可以被搜索出. 至此, 便实现了以较少的移动节点监测实现对辐射源目标数量的确定与定位.

由于基于场强的定位方法定位精度很大程度上取决于传播损耗模型的精准程度, 自由空间传播模型是理想模型, 在实际应用中无法得到精确的定位结果. 通过比较其他较精准的定位模型可以看出, 模型间描述衰落的误差包括传播环境因素, 以及发射天线、接收天线、发射频率等关于辐射源与接收条件的影响因素. 在本文的定位场景中, 针对待定位区域内的各场强采样点, 辐射源与接收条件不变, 因此影响因素造成的衰落是一样的, 可以看作是常量. 就此推论, 运用压缩感知方

法得出的辐射源位置及发射强度大小结果与实际误差较大, 但得到的关于辐射源的数量是正确的. 基于压缩感知的定位可以看作是估计辐射源数量的粗定位.

2.3 二次定位

在获得辐射源数量后, 接下来需要研究利用更精准的传播模型, 通过二次定位方法, 得到更为精准的结果. 在较精准的电波传播损耗模型中, Egli 模型适合解决市区无线电辐射源位置估计^[15].

其传播损耗的具体经验公式为:

$$L = 78 + 20\lg f + 40\lg d - 20\lg h_t - 20\lg h_r \quad (5)$$

其中, L 为传播损耗, f 为辐射源的频率, d 为辐射源点与监测点的距离, h_t 为辐射源天线的高度, h_r 为接收天线的高度. 相比较自由空间模型, 此模型考虑了辐射源天线高度与接收天线高度等影响传播损耗的因素, 且更适合市区的传播损耗计算. 但是在现实情况中, 由于辐射源的未知特性, 辐射源天线高度信息无法获取, 因此与辐射源天线高度有关的损耗也无法得到. 本文提出处理未知损耗因素的二次定位方法.

根据辐射功率 P_T 与接收功率 P_R 间的关系:

$$P_R = P_T - L \quad (6)$$

将 Egli 模型带入传播损耗 L , 并把采样得到的场强值两两相减, 利用粗定位得出的辐射源的个数, 以及计算传播损耗公式的 f, h_t, h_r 对各采样点是相同的推论, 在不影响定位结果的情况下, 消除无法获知的损耗因素, 得到只剩距离 d 待求的一组非线性方程. 将距离 d 转化为未知的辐射源坐标与采样点坐标之差后, 再利用非线性方程组的求解方法求解未知的辐射源坐标进行二次定位, 提高定位精度^[16]. 在本研究的二次定位应用中, 当空间中存在多个辐射源时, 意味着辐射源坐标构成的解空间是一个高维解空间. 考虑到复杂度、收敛性等问题, 本文选择具有全局收敛性及较强的鲁棒性的遗传算法进行求解^[17].

遗传算法中的适应度函数是区分个体优劣的关键^[18]. 本文的适应度函数直接选择为优化目标函数, 即非线性方程组. 由于方程组是在各采样点得到的场强值两两相减所得. 在实际应用中, 场强值不可避免的会受到复杂环境影响而失准. 采样位置距离辐射源越远, 其传播路径上受到影响的概率越大. 因此, 在确定适应度函数时, 应使用较大的场强值作为建立非线性方程组的选择.

另外在本文的算法中, 由于是移动采样监测场强, 经过前面衰落消除过的场强序列具有缓变连续的特性. 而利用压缩感知方法计算时, 将场强序列网格化后, 可以在不降低定位精度的情况下降低遗传算法计算的复杂度, 更适合遗传算法的实际应用.

3 算法验证

3.1 仿真验证

假设坐标轴 x 从 0 到 1000、 y 从 0 到 1000 为监测区域,坐标系单位为 m . 有两个同频辐射源,频率为 800MHz. 两源分别位于坐标轴上 $A(500,100)$ 、 $B(200,700)$,功率分别为 60dBm、59dBm. 辐射源高度分别为 30m、40m. 接收天线高度为 2m.

假设采样设备按照每秒接收 10 组场强数据与相应坐标位置信息,从坐标 $(0,1000)$ 以 10m/s 的速度匀速移动开始监测,沿 x 轴正向直线移动到坐标 $(1000,1000)$,再沿 y 轴负向直线移动到坐标 $(1000,0)$. 不算起始点,共接收 2000 组场强与坐标位置信息,每 1 米 1 组. 利用 Egli 电波传播模型模拟生成移动路径上各点的无噪声情况下的场强值,并在此基础上模拟快、慢衰落进行叠加,模拟真实移动中不同位置地形接收到的场强序列情况.

对所接收的经过噪声叠加的场强序列利用 EMD 方法进行预处理,结果如图 3,得到可以用来定位的场强值序列. 经过对比,处理后的强值序列与原场强值的偏差均值为 0.703dBm,标准差为 0.586. 可见 EMD 方法对场强进行预处理可以有效去除快、慢衰落影响.

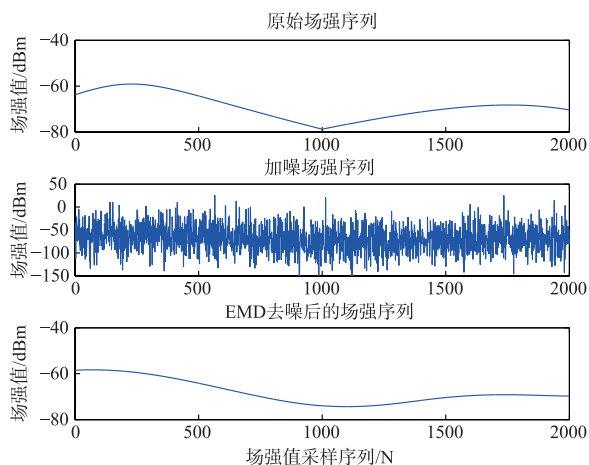


图3 场强序列加噪去噪对比

利用本文改进的压缩感知方法进行粗定位. 将区域网格按照 $50m \times 50m$ 的大小进行划分,总网格数 $N=400$. 二次定位的遗传算法设置初始种群大小为 200,初始种群向量范围为 $x \in [0,1000]$ 、 $y \in [0,1000]$,目标函数精度为 0.001,最大重复执行次数 400,停滞代数为 100 次. 结果如图 4:

经过二次定位求解后,辐射源数量估计正确,定位误差小于 150m.

我们在此区域内改变辐射源的位置、数量进行多次仿真实验,验证辐射源数量估计方法的可靠性.

设成功率为实验成功次数占总实验次数的比例.

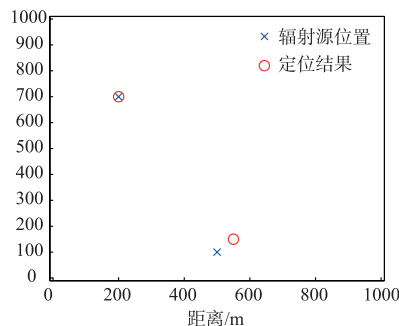


图4 基于遗传算法的二次定位

$$P = \sum_{i=1}^T S_i / T \quad (7)$$

其中,

$$S_i = \begin{cases} 1, & K_i = K \\ 0, & K_i \neq K \end{cases}$$

S_i 表示在某节点数量条件下 1 次实验中是否能成功定位. K 为实际目标源个数. T 为实验次数,设 T 为 50 次. 在实验中,辐射源数量在 1-5 之间设定,位置随机分布在区域网格内,不考虑位置重叠的情况.

估计结果如图 5:

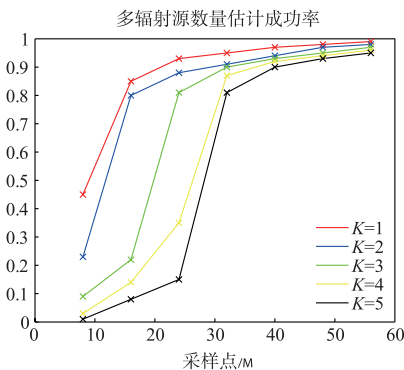


图5 辐射源数量估计成功率

可见,当采样覆盖的网格大于一定数量后,本方法可以以较高成功率估计辐射源数量. 且此数量仍然大大小于总网格数. 可见本文的辐射源估计方法较为可靠.

3.2 实验验证

实验在校内一处小公园进行. 公园遮挡物较多,有树木,假山,草丛. 在公园中设置两个同频全向辐射源,发射频率为 450MHz. 利用 USRP (Universal Software Radio Peripheral, 通用软件无线电外设)、GPS 及计算机组成的移动场强监测系统接收处理信号. USRP 作为接收设备进行场强采样处理;GPS 设备进行自身位置的测量;采样得到的场强数据及位置数据运用计算机进行计算. 沿公园路径移动采样,每秒采样一组场强数据及位置数据. USRP 采样接收及预处理后的场强序列如图 6 所示.

利用本文方法进行定位,结果如图 7 所示:

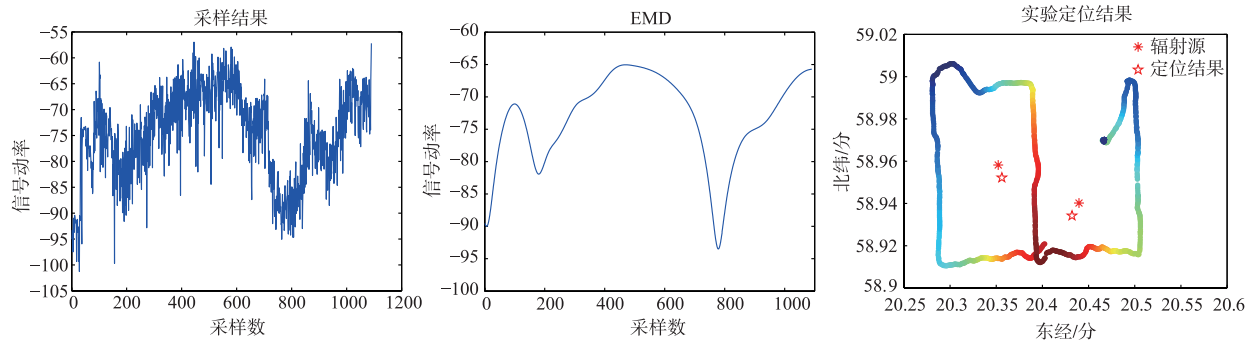


图6 采样及预处理后的场强值序列

图7 实验定位结果

粗定位估计结果为两个辐射源,估计正确.二次定位结果如图,较为准确的确定了辐射源位置,误差小于 20m.

可以看出本方法准确的估计出了同频辐射源数量,并且较为准确的定位出了辐射源位置.

4 结论

本文提出了基于压缩感知的同频多辐射源数量估计及定位方法,自适应去除噪声;基于压缩感知的粗定位准确估计未知同频辐射源数量,进而二次定位确定辐射源位置、场强信息.通过仿真、实验验证证明了本文方法可以对区域内多个未知同频辐射源进行定位,定位精度高,对设备要求低,为辐射源定位提供了一种有效的新方法.

参考文献

- [1] 彭勃.无线频谱监测与定位技术现状与未来趋势[J].中国无线电,2017,(1):35-37.
PENG Bo. Current status and future trends of wireless spectrum monitoring and positioning technology[J]. China Radio,2017,(1):35-37. (in Chinese)
- [2] 孙鹏,熊伟.测向交叉定位系统中的K-means聚类融合算法[J].电光与控制,2016,(10):36-40.
SUN Peng,XIONG Wei. K-means cluster and fusion algorithm for passive bearing-crossing localization system[J]. Electronics Optics & Control,2016,(10):36-40. (in Chinese)
- [3] 李晶,李冬海,赵拥军.利用角度和时差的单站外辐射源定位方法[J].武汉大学学报:信息科学版,2015,40(2):227-232.
LI Jing,LI Donghai,ZHAO Yongjun. Single-observer passive coherent location estimation based on DOA and TDOA [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2015,40(2):227-232. (in Chinese)
- [4] 俞春华.空间谱估计及其在短波测向定位中的应用研究[D].南京大学,2015,43-50.
- [5] 谢莹丽,施继红,蔡光卉,等.基于TDOA机场无线电监

管能力的仿真与优化[J].无线电工程,2015,(12):69-73.

- [6] 谢树果,叶知秋,王磊,等.一种基于场强测量的辐射源定位方法[J].电波科学学报,2013,28(6):1133-1138.
XIE Shuguo, YE Zhiqiu, WANG Lei, et al. Radio source locating method based on signal strength measurement[J]. Chinese Journal of Radio Science,2013,28(6):1133-1138. (in Chinese)
- [7] 张利军,王红光,康士峰,等.近海面电波传播试验与损耗模型分析[J].微波学报,2017,33(1):86-90.
ZHANG Lijun,WANG Hongguang,KANG Shifeng. An analysis of radio wave propagation experiment and loss model near the sea surface [J]. Journal of Microwaves,2017,33(1):86-90. (in Chinese)
- [8] 张文波,曹耀钦.电磁环境仿真中电波传播模型研究及仿真分析[J].电波科学学报,2012,(3):538-542+550.
ZHANG Wenbo,CAO Yaoqin. Research and simulation analysis on radio propagation model in electromagnetic environment simulation[J]. Chinese Journal of Radio Science,2012,(3):538-542+550. (in Chinese)
- [9] Lee, W C Y. Mobile Communications Engineering [M]. McGraw Hill, New York, 1985. 21-31.
- [10] 蔡念,黄威威,谢伟,等.基于互补自适应噪声的集合经验模式分解算法[J].电子与信息学报,2015,(10):2383-2389.
CAI Nian, HUANG Weiwei, XIE Wei, et al. Ensemble empirical mode decomposition base on complementary adaptive noises [J]. Journal of Electronics & Information Technology,2015,(10):2383-2389. (in Chinese)
- [11] 罗磊,黄博妍,孙金玮,等.基于总体平均经验模态分解的主动噪声控制系统研究[J].自动化学报,2016,42(9):1432-1439.
LUO Lei,HUANG Boyan,SUN Jinwei, et al. A new ANC system based on ensemble empirical mode decomposition [J]. Acta Automatica Sinica,2016,42(9):1432-1439. (in Chinese)
- [12] BI D,XIE Y,LI X, et al. A sparsity basis selection method for compressed sensing [J]. IEEE Signal Processing

- Letters, 2015, 22(10):1738-1742.
- [13] 裴立业, 江桦, 麻曰亮. 基于选择性测量的压缩感知去噪重构算法[J]. 通信学报, 2017, (2):106-114.
PEI Liye, JIANG Hua, MA Yueliang. Denoising recovery for compressive sensing based on selective measure[J]. Journal on Communications, 2017, (2):106-114. (in Chinese)
- [14] 虞泓波, 冯大政, 解虎. 采用序列二次规划求解的稳健波束形成新算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2016, 43(2):41-45.
YU Hongbo, FENG Dazheng, XIE Hu. Novel robust beamforming algorithm using sequential quadratic programming[J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(2):41-45. (in Chinese)
- [15] 谢益溪. 无线电波传播:原理与应用[M]. 北京:人民邮电出版社, 2008. 183-184.
- [16] SHARMA J R, GUPTA P. An efficient fifth order method for solving systems of nonlinear equations[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2014, 67(3):591-601.
- [17] 王越, 许全文, 黄丽丰. 基于改进遗传算法的连续函数优化[J]. 重庆理工大学学报:自然科学版, 2011, 25(2):62-67.
WANG Yue, XU Quanwen, HUANG Lifeng. Continuous function optimization based on improved genetic algorithm[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2011, 25(2):62-67. (in Chinese)

- [18] MERABTI H, MASSICOTTE D. Nonlinear adaptive channel equalization using genetic algorithms[A]. New Circuits and Systems Conference[C]. Piscataway, NJ; 2014. 209-212.

作者简介



谷晓鹏 男, 北京航空航天大学电子信息工程学院博士生, 主要从事信号源定位、电磁兼容、频谱管理等研究工作。
E-mail: guxiaopeng@buaa.edu.cn



谢树果 男, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 博士, 主要从事电波传播、天线及雷达信号处理、复杂系统电磁兼容预设计与评估、电磁兼容测试等研究工作。

常青 男, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授, 博士, 主要从事移动通信、音视频信息处理、卫星导航、数模混合集成电路设计等研究工作。

杨美玲 女, 北京航空航天大学电子信息工程学院硕士生, 主要从事电波传播, 信号源定位等研究工作。