

均匀圆阵空间谱估计 对多目标信号分离方法的研究

国家无线电监测中心乌鲁木齐监测站 胡荣飞 林自豪

摘要：本文介绍了基于均匀圆形天线阵列模型的空间谱估计测向技术原理，并利用经典 MUSIC 算法给出了其对于三个同频和非同频信号的 MATLAB 理论仿真分析。模拟结果表明经典 MUSIC 算法能同时有效地对多目标信号进行测向。

关键词：均匀圆阵 空间谱估计 MUSIC 算法 同频信号

0 引言

短波通信频率资源十分有限，目前全球只能容纳 7700 多个可用信道。随着无线电技术的飞速发展，人们对无线电的依赖程度越来越高，这使得有限的短波信道变得更加拥挤，电台之间的相互干扰问题层出不穷。在日常的短波无线电监测测向工作中，经常会遇到强弱不同的两个或多个同频信号叠加在一起传输的情况，这严重干扰正常的无线电通信业务。因此，开展多目标信号测向分辨技术的研究对无线电监测工作至关重要^[1]。基于阵列接收信号处理的空间谱估计测向技术是一种不同于传统的振幅测向法和相位测向法的新的测向方法。它具有多信号测向能力、测向分辨力高、测向精度高和测向灵敏度高优点，成为现代无线电测向技术领域的研究热点。

1 空间谱估计的测向技术

1.1 空间谱估计测向技术简介

阵列信号处理是信号处理领域内的一个重要分支^[2]，近几十年得到了迅速发展。阵列信号处理是将多个传感器设置在空间不同位置组成阵列，并利用这一阵列对空间信号进行接收和处理，利用信号的空域特征来增强信号并有效提取信号空域信息，同时抑制干扰和噪声等不感兴趣的信息。空间谱估计属于阵列信号处理的重要组成部分，这种测向技术采用了先进的数字信号处理方法，可同时对空域中多个目标进行超分辨测向。

1.2 系统组成和测向原理

图 1 为空间谱估计测向的系统框图。均匀圆阵天线单元接收外界空间辐射来的信号，包括接收信号的方位角、仰角、距离和极化等信息，由于环境的变化，同时还应该包括空间

环境噪声、干扰等信息。测向天线切换器接收天线共用器输出的信号和自校源信号，实现天线阵元对接收信号的切换，输出射频信号。多通道测向接收机对射频信号进行预选、变频、滤波、放大，输出中频信号至测向处理单元。测向处理单元对中频信号进行 A/D 采样、数字下变频和 FFT 等相关处理后，实现对信号的测向，最终在测向席上显示测向结果。

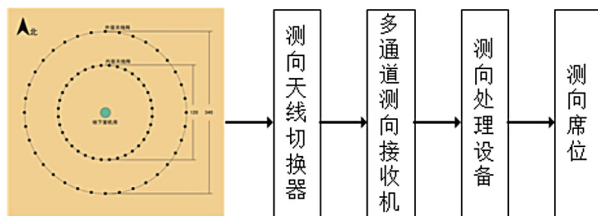


图 1 空间谱估计测向系统框图

1.3 DOA 估计的 MUSIC 算法介绍

1.3.1 均匀圆阵的信号接收模型

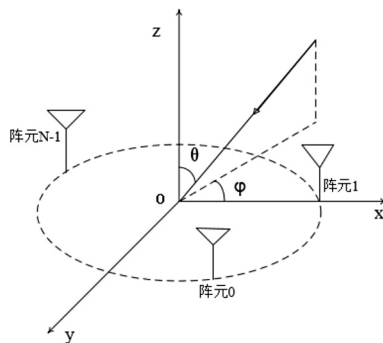


图 2 均匀圆阵的阵列模型

天线阵的种类十分繁多，性能也各不相同。实际应用中通常采用等距线阵、均匀圆阵和平面阵。空间谱估计中的均匀线阵只能提供 180° 无模糊的方位角信息。相比于均匀线

阵, 均匀圆阵有以下优势^[3]: 均匀圆阵可同时提供方位角、俯仰角信息, 可以满足 360° 全方位、无模糊角度估计的要求; 无论在哪个方向上, 均匀圆阵都具有近似相同的估计精度和分辨力。

图 2 为均匀圆阵的阵列模型示意图。阵元个数为 N , 阵元间距为 d , 阵元半径为 R 。设一载波频率为 f_0 的窄带信号 $\tilde{s}(t)$ 以入射方向 (φ, θ) 到达天线阵元, 其中 φ 为信号方位角, θ 为仰角。则信号 $\tilde{s}(t)$ 可表示为^[4]:

$$\tilde{s}(t) = s(t) \exp(j2\pi f_0 t) \quad (1)$$

其中, $s(t)$ 为 $\tilde{s}(t)$ 的复包络。设坐标原点为参考点, 且接收信号为 $\tilde{s}(t)$, 由于 $\tilde{s}(t)$ 为窄带信号, $s(t) \approx s(t - \tau_m)$, 则阵元 m 接收到的信号为:

$$\tilde{x}_m(t) = \tilde{s}(t) \exp(-j2\pi f_0 \tau_m), \quad m=0, 1, 2, \dots, N-1 \quad (2)$$

其中, τ_m 表示信号到达阵元 m 相对于参考点信号的传播时延, 阵元 m 接收信号的空间相位为:

$$\Phi_m(\varphi, \theta) = \frac{-2\pi R}{\lambda} \cos(\varphi - 2\pi m/N) \sin \theta \quad (3)$$

定义阵列接收信号向量和阵列流导向向量分别为:

$$\tilde{x}(t) = [\tilde{x}_0(t), \tilde{x}_1(t), \dots, \tilde{x}_{N-1}(t)]^T \quad (4)$$

$$a(\varphi, \theta) = [e^{j\Phi_0(\varphi, \theta)}, e^{j\Phi_1(\varphi, \theta)}, \dots, e^{j\Phi_{N-1}(\varphi, \theta)}]^T \quad (5)$$

则对于单个方向为 (φ, θ) 的入射信号, 均匀圆阵阵列的接收信号表达式为:

$$x(t) = a(\varphi, \theta) \tilde{s}(t) \quad (6)$$

当 K 个信号 $\tilde{s}_1(t), \tilde{s}_2(t), \dots, \tilde{s}_K(t)$ 从不同方向 $(\varphi_1, \theta_1), (\varphi_2, \theta_2), \dots, (\varphi_K, \theta_K)$ 入射到天线阵时, 则阵列接收信号表示为:

$$x(n) = A s(n) + v(n) \quad (7)$$

其中, $A = [a(\varphi_1, \theta_1), a(\varphi_2, \theta_2), \dots, a(\varphi_K, \theta_K)]$ 为信号的方向矩阵, $v(n)$ 为矢量噪声, $s(n) = [s_1(n), s_2(n), \dots, s_K(n)]^T$ 为辐射源信号向量。

1.3.2 经典 MUSIC 算法

多重信号分类 (MUSIC) 算法^[5] 的提出开创了空间谱算法研究的新时代, 促进了特征结构算法的兴起和发展, 该算法已经成为空间谱估计理论体系中的标志性算法。MUSIC 算法的基本思想是将任意阵列输出数据的自相关矩阵进行特征分解, 从而得到信号子空间和噪声子空间, 然后利用这两个子空间的正交性来估计信号的参数, 比如入射方向和信号强度等。

定义阵列接收数据的自相关矩阵为:

$$R = E\{x(n) x^H(n)\} = AR_s A^H + R_N \quad (8)$$

由于信号和噪声相互独立, 阵列数据可分解为信号、噪声相关的两部分, 其中, R_s 为信号自相关矩阵, $AR_s A^H$ 为信号部分。对 R 进行特征分解有:

$$R = U_s \Sigma_s U_s^H + U_N \Sigma_N U_N^H \quad (9)$$

其中, Σ_s 是 R 的特征值组成的对角阵, U_s 是由大特征值对应的特征矢量构成的子空间, 即信号子空间。 U_N 是小特征值对应的特征矢量构成的子空间, 即噪声子空间。理想条

件下, 信号入射方向的阵列流矢量与噪声子空间正交, 即:

$$a(\varphi, \theta) U_N^H = 0$$

实际运算中, 接收数据阵有限, 自相关矩阵用 R 的最大似然估计 \hat{R} 来表示。因而给定的入射方向 (φ_k, θ_k) , 其对应的阵列流矢量 $a(\varphi_k, \theta_k)$ 与 \hat{U}_N 并不严格正交, 式子右边接近于 0。构造如下空间谱函数:

$$P_{MUSIC}(\varphi, \theta) = \frac{1}{a^H(\varphi, \theta) \hat{U}_N \hat{U}_N^H a(\varphi, \theta)} \quad (10)$$

通过对 (φ, θ) 进行二位扫描, 搜索 $P_{MUSIC}(\varphi, \theta)$ 的 K 个峰值位置, 即可确定信号的 K 个入射方向。

2 仿真实验

模拟仿真取均匀圆阵的阵元数为 36, 快拍数为 1000, 三个窄带相互独立的远场信号方位角分别为 60°、50°、120°, 圆阵半径与波长之比取 3.5, 信噪比分别为 5dB、20dB、15dB。图 3 模拟三个载波频率分别为 4.99MHz、5MHz、5.01MHz 的空间信号, 运用经典 MUSIC 算法生成 MATLAB 空间谱图, 从图中可以看出 MUSIC 算法能给出三个信号的方位角信息。图 4 模拟三个相同载波频率均为 10MHz, 运用控制变量法, 取信号仰角均为 30° 时模拟方位角的空间谱图, 从图中可以看出, 对于同频的三个信号仍能分离。图 5 为信号方位角分别为 60°、50°、120°, 仰角分别为 15°、30°、60°, 三个同频信号的三维空间谱图。仿真结果表明, 理论上, MUSIC 算法能对多个目标信号同时测向, 能分离不同来波方向的同频信号。

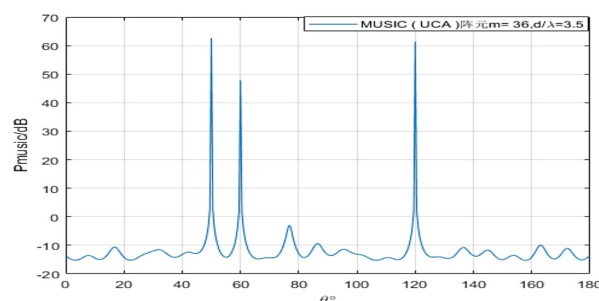


图 3 36 阵元不同载波频率 MUSIC 谱

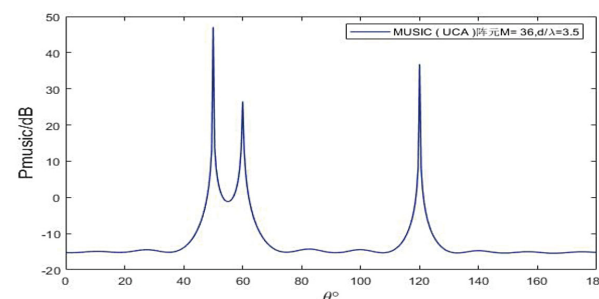


图 4 36 阵元相同载波频率 MUSIC 谱

(下转第 56 页)

挖掘”四个智能化数据处理阶段，分别完成“基于人工智能技术和深度学习能力”的数据分类和信号识别；从时域、空域、频域三个维度进行监测数据融合、除冗。通过定性分析和整理，形成“信号样本”“设备样本”“合法台站”“非法台站”“违规台站”“不明台站”“工作日志”“设备状态”等一系列信号比对、分析需要的数据库。最后通过基于大数据处理理念的“相关性分析”“时序预测”“综合评价”等技术手段，进行监测数据的深度分析应用（监测数据处理流程如图4所示）。

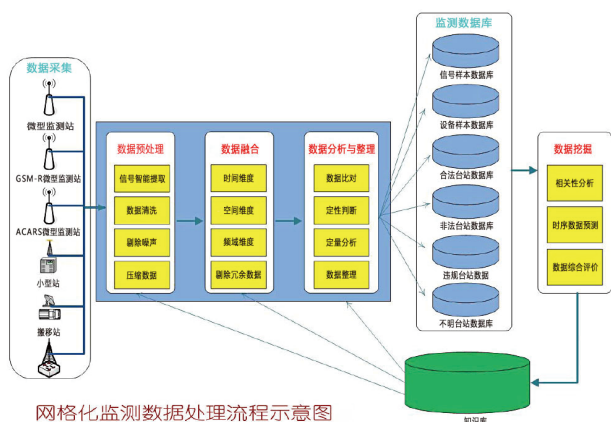


图4 网格化监测数据处理流程示意图

三是智能化的监测站点调度和SOI信号提取。为保证获取数据的多元性和完备性，网内设备的任务是根据实际情况由监测指挥控制中心来调度完成的。为完成调度，系统具备SOI信号提取和自动调度两大功能，系统可自动搜索关注频

段内出现的信号特征，智能分配、调度相邻站点对信号声音进行协同监测，采用智能“声音模式识别”技术，自动识别出高频度出现的信号或敏感内容信号，自动追踪平时鲜见的无线电异动，并依据“非法信号监测识别模型”，对该信号自动进行相关性分析、判断和自动测量、录音、定位、追踪、取证等作业，对达到设定“门限”以短信、声音等多种方式进行告警。实现基于“无线电异动”情况的无线电监测自动预警功能。

3 小结

喀什市网格化无线电监测网络项目是自治区无线电管理部门针对新疆实际，摸索地市级城市无线电管理技术设施建设路子的一次探索和尝试。其中既取得了许多可圈可点的成绩，也存在着一些需要进一步改进、完善的地方。实践证明：将自动化控制、人工智能、大数据、“互联网+”、云计算等现代新技术、新概念应用于无线电管理技术设施建设，对于实现我国及新疆地区无线电管理现代化、有效解决地市级无线电部门人少任务重的窘境、进一步提高无线电管理工作的质量和效益，具有十分重要的意义。同时，通过这个项目建设使用，也再次提醒我们，无线电管理技术设施的现代化仍然离不开基层无线电管理部门一线工作者高度的职业责任感和对工作积极、认真、负责的态度。“人的主观能动性+设备的现代化+长期的工作实践经验积累”三者的有机结合，仍将是做好基层无线电管理工作的最佳模式。

（上接第49页）

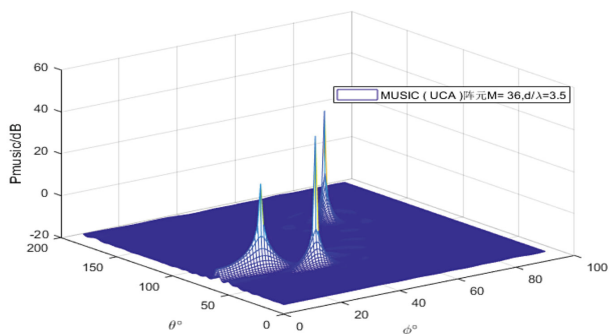


图5 36阵元均匀圆阵的三维MUSIC谱

3 结束语

本文首先介绍了空间谱估计测向系统的基本组成结构，给出了基于均匀圆阵阵列接收信号模型的理论分析。在此基础上，利用经典MUSIC算法给出了均匀36阵元圆阵对于三个同频和非同频信号的MATLAB模拟仿真，仿真结果表明经典的MUSIC算法能同时有效地对多目标

信号进行测向。

参考文献：

- [1] 樊严, 李炳荣. 空间谱估计阵列测向研究[J]. 弹箭与制导学报, 2008: 28(5)
- [2] Cheng T, Gui X, Zhang X. A dimension separation-based two-dimensional correlation interferometer algorithm[J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2013(1): 1~10
- [3] 王永良. 空间谱估计理论与算法[M]. 清华大学出版社, 2004
- [4] 何子述, 夏威. 现代数字信号处理及其应用[M]. 清华大学出版社, 2009
- [5] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. IEEE Trans. on AP, 1986, 34(3):276~280