

基于神经网络的高频地波雷达目标到达角估计

严颂华 吴世才 吴雄斌
(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

摘要: 该文利用神经网络进行高频地波雷达目标到达角估计。论文分别采用 RBFN 和 GRNN 构造了基于函数逼近和模式编码的到达角估计网络,介绍了网络结构、数据仿真的过程和应用于高频地波雷达目标定向的实际效果。数据仿真和现场实验的分析结果表明基于模式编码的 GRNN 网络到达角估计方法鲁棒性较好,在低信噪比时能够给出正确估计。

关键词: 神经网络; 到达角估计; 模式分类; 高频地波雷达

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0339-04

DOA Estimation Based on Neural Network for HFGWR

Yan Song-hua Wu Shi-cai Wu Xiong-bin
(School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Direction of Arrival (DOA) technology based on neural network is discussed. In the paper, the DOA method based on function approach and model classification with coding is presented and it employs two kinds of neural networks: Radial Basis Function Network(RBFN) and General Regression Neural Net (GRNN). The paper introduces the network structure, simulation and the application to High Frequency Ground Wave Radar(HFGWR). The simulation and real data processing verifies that the model classification method based on GRNN offers better performance than others, its performance is good even the signal-to-noise of the signal is low until 4 dB.

Key words: Neural network; DOA; Model classification; HFGWR(High Frequency Ground Wave Radar)

1 引言

到达角估计问题是通信、雷达、声纳等领域研究的热点问题。基于特征值分解的阵列测向技术因其高精度和超分辨的特点得到了广泛应用。如美国 Codar 公司研制的 Riversonde 雷达系统^[1],国内哈尔滨工业大学研制的高频地波雷达^[2]以及武汉大学研制的高频地波雷达 OSMAR2003 都采用了多重信号分类(MUSIC)方法^[3]进行目标的超分辨定向。近年来在此基础上更展开了高阶累计量特征分解法的研究^[4]。

但 MUSIC 算法在运用时需要对阵列中天线和通道进行精确的校准,确保每根天线及对应通道的幅相特性完全一致才能保证估计的准确性^[5]。而在海边恶劣的环境条件下,天线品质易发生变化; MUSIC 算法需要进行空间相关矩阵的特征值分解以及实现最大功率谱的搜索,运算量大,不适于实时处理。以上这些缺点限制了 MUSIC 算法的应用。

神经网络因其非线性映射及泛化功能可以用于到达角估计问题,其优点在于:(1)解决天线阵中天线出现幅相不一致情况下的到达角估计问题;(2)计算可以并行快速实现。传统的神经网络到达角估计方法多侧重于利用神经网络实现

特征值分解的快速解法^[6]。而另一种基于空间分割的方法把到达角估计问题作为一个优化问题映射到神经网络上^[7]。然而由于问题本身的组合特性,其求解计算量往往随问题规模扩大呈指数关系增长。此后一些有导师学习的估计法相继提出,但对输入信号信噪比的要求较高^[8,9]。

本文分别采用径向基函数网络(RBFN)和广义回归神经网络(GRNN)构造了两种有导师学习的到达角估计网络,从估计误差和对输入信号信噪比的要求两方面作了比较,择优应用于高频地波雷达实测数据。仿真和实测数据的处理结果表明:采用 GRNN 构造的基于模式编码的神经网络到达角估计方法,在高信噪比数据训练后,能够在较低信噪比下给出准确的角度估计。

2 阵列模型

2.1 高频地波雷达 OSMAR2003 的天线阵

高频地波雷达 OSMAR2003 的天线系统分为发射天线与接收天线。发射天线采用三元八木天线,由反射器,有源振子和引向器组成,工作频率范围为 7~8MHz,驻波比 ≤ 3 ,发射波束为 120°的宽波束。天线增益 $> 6\text{dB}$ 。接收天线阵列由 8 个电小天线构成均匀双排直线阵列,其半功率波束宽度约为 40°,阵增益大于 14dB。整个接收阵列占地面积为 20m \times

2006-07-28 收到, 2007-03-23 改回

国家自然科学基金(60571065)和国家 863 计划(20001AA631050)持续资助课题

40m。其中天线单元左右间距 13.3m，前后间距 8m。

2.2 数学模型

考虑单目标情况，阵列接收到窄带信号 $S_1(t)$ ，信号与阵列法向夹角是 θ ，信号来波都可看作是平面波。阵列输出端的第 k 个快拍可表示为矢量：

$$\mathbf{X}(k) = \mathbf{A}(\theta)\mathbf{s}_1(k) + \mathbf{n}(k) \tag{1}$$

其中 $\mathbf{A}(\theta)$ 是方向矩阵，噪声 $\mathbf{n}(k)$ 是独立于信号的白高斯过程。空间信号的角度信息全部包含在阵列接收信号矢量 $\mathbf{X}(k)$ 或阵列协方差矩阵 $\mathbf{R} = E[\mathbf{X}(k)\mathbf{X}(k)^H]$ 中。MUSIC 方法即对 \mathbf{R} 进行特征值分解。本文把归一化后的协方差矩阵作为网络的输入。

3 两种神经网络到达角估计方法

3.1 函数逼近法

一种直接的神经网络角度估计法是建立输入信号特征与到达角度之间的一一映射。若把到达角 $0-360^\circ$ 看成一个线性增加的函数 $f(\mathbf{R})$ ，其中 \mathbf{R} 是对应某个到达角的阵列接收信号协方差矩阵，则可以把神经网络看成对输出未知函数 $f(\mathbf{R})$ 的逼近器。然而，由于网络输出函数 $f(\mathbf{R})$ 在 $360-0^\circ$ 的转换时刻并不连续，这种不连续性会引起逼近误差^[10]。为了保证输出函数连续，本文采取对角度取正、余弦函数将网络输出值变为连续值，再进行函数逼近的方法，称为基于间接逼近的神经网络到达角估计方法。网络结构如图 1 所示，输入数据为归一化后的信号协方差矩阵，神经网络有两个输出节点，节点 1 输出到达角 θ 的正弦值，而节点 2 输出到达角 θ 的余弦值。真实的到达角输出结果则由下式求出：

$$\theta_{\text{doa}} = \arctg \left[\frac{\sin(\theta)}{\cos(\theta)} \right] \tag{2}$$

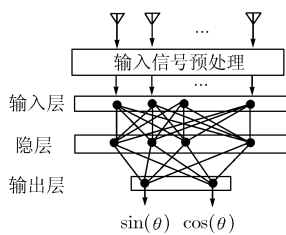


图 1 采用间接逼近法的神经网络

3.2 基于模式编码的神经网络到达角估计

角度估计问题也可以被视为一个模式分类问题， 360° 内某方向的到达角可以认为是 360 类中的一类。由于神经网络模式分类器兼有模式变换和特征提取的作用，其对输入模式信息的不完备或特征的缺损不太敏感^[11]，优于传统的模式识别方法。

本节采用对网络输出进行 0-1 编码的方式来进行到达角估计。具体网络结构如图 2 所示，将欲估计区域按角度 1 至 360° 分为 360 类，神经网络的输出层节点数等于类别数，一

个输出节点对应一个类。训练阶段若目标在哪个角度区域内存在，则该角度对应的节点输出为 1，而其余输出节点均为 0。在角度估计阶段，当一个未知角度的样本作用到输入端时，考查各输出节点的值，并将这个样本的到达角判定为与输出值最大的那个节点对应的角度。理论上，当目标处于某角度时，神经网络估计后对应的节点输出结果应为 1，但实际上，由于噪声的存在，该节点输出总是小于 1，节点输出值的大小与输入信号与对应该角度的训练数据的欧氏距离有关。输入信号越接近训练数据，则节点输出越大，因此节点输出值可以作为目标处于某个角度的可信度。

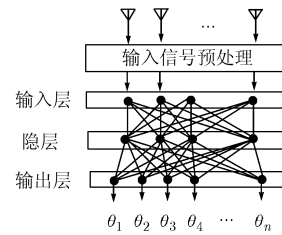


图 2 采用模式编码法的神经网络

4 仿真数据处理-性能分析与比较

4.1 数据仿真的过程

首先用 RBFN 和 GRNN 分别构造上述两种网络，然后进行仿真，此时假设天线阵为双排直线阵。仿真的具体过程如下：

(1)形成输入训练数据集 依次设定目标位于 0° 至 360° 之间间隔为 1° 的扇区，即 $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, \dots, +359^\circ, +360^\circ$ ，设定雷达接收到的目标回波信号信噪比为 20dB，噪声假定为高斯噪声，采样相应的数据并计算其协方差矩阵，对每个角度对应的协方差矩阵都利用 N 个样本点作平均，然后作归一化；

(2)采用 0-1 编码的方法形成输出矢量；

(3)训练 GRNN 或 RBF 神经网络 其中 GRNN 参数直接由训练数据集确定^[10]，而 RBFN 参数则由 Moody-Darken 算法^[12]得到；

(4)测试数据的获得 依次设定目标位于 0.5° 至 359.5° 之间间隔为 1° 的扇区，即 $0.5^\circ, 1.5^\circ, 2.5^\circ, \dots, +359.5^\circ$ ，协方差矩阵的处理与训练数据集类似，只是信噪比设定不同。

4.2 估计误差的比较

设定测试数据集和训练数据集具有相同的信噪比 20dB，图 3 给出了间接逼近法和模式编码法分别采用 RBFN 和 GRNN 的估计结果。其中横坐标为设定的目标到达角，而纵坐标则表示神经网络估计出来的到达角。在图 3(a)中可见，采用间接逼近法时 GRNN 出现较大偏差，而 RBFN 则给出了准确估计。间接逼近法的 GRNN 和 RBN 实现都存在的问题是由于正切函数的周期性，会出现角度的 180° 模糊。如图 3(a)所示，实际角度 220° 和 40° 都会被网络估计为 40° 。

图 3(b)中则显示在高信噪比(20dB)下，在 $0^\circ-360^\circ$ 范围内，由 GRNN 和 RBFN 实现的模式编码法都给出了正确的估计。

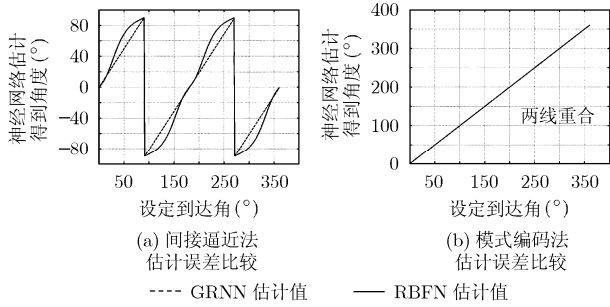


图 3 估计误差的比较

4.3 对输入信号信噪比要求的比较

实际应用中雷达接收到的数据信噪比常常很低。为了测试网络对不同信噪比数据的估计效果，首先用较高信噪比(20dB)的数据集训练网络，然后生成低信噪比的数据对网络进行测试。结果显示基于间接逼近法的神经网络在测试数据集和训练数据集具有大致相同的信噪比时效果最佳，而信噪比不一致时则估计值出现较大误差。而模式编码法中，RBFN网络和GRNN网络表现不同。图4(a)给出了训练数据信噪比为20dB，测试信号信噪比分别为15dB、17dB时的估计结果。由图可见测试信号信噪比越低，越偏离训练数据信噪比，出现错误估计的角度越多，估计误差越大。而图4(b)则显示在输入信号信噪比分别为5, 10, 15, 20dB时，GRNN网络的估计误差均为1°左右。考虑到测试角度与训练数据集的0.5°差别，说明该方法对信噪比不敏感。因此选择GRNN网络作为雷达使用的估计器。

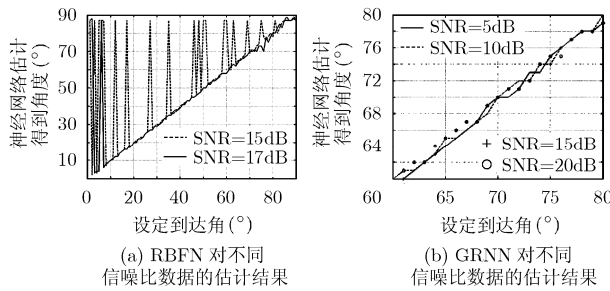


图 4 模式编码法对信噪比不同的数据估计的结果

4.4 均方根误差分析

Stoica 在 1989 年提出了方位估计的Cramer-Rao Bound (CRB)限^[13]，并证明了CRB是方位估计能够达到的理论误差的极限。为了将神经网络方法的精度与CRB进行对比，我们对到达角进行更为精确的细分，角度均分间隔为 0.01°，取 1.8° 范围内的 180 个点的回波数据作为训练数据集训练GRNN网络，然后利用网络估计该范围内的到达角，每次使用 600 次快拍，作 200 次Monte-Carlo仿真，计算估计值的均方根误差(RMSE)，并与MUSIC方法及CRB进行比较，结果如图5所示。图中显示输入信号信噪比低于4dB时，GRNN

网络估计误差较大，而在信噪比由 4dB至 30dB增大的过程中，GRNN网络估计的精度变化与MUSIC类似，并趋近于CRB。

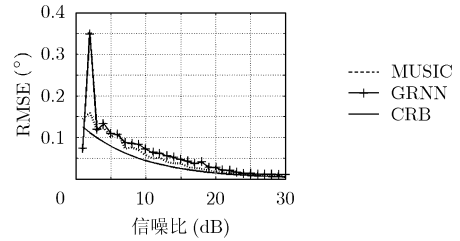


图 5 GRNN、MUSIC两种算法的RMSE与CRB

5 实测数据处理结果

神经网络一般采用获取实测数据的方法进行训练。在高频地波雷达系统中研制了相应的应答器，该设备可以模拟不同距离元上目标的回波信号，从而可以通过该设备获取训练数据。在无法获取实测数据的情况下，则可以待天线系统校正后，利用仿真数据来训练网络。此时主要利用神经网络的并行实时计算性能。

2004 年 6 月，高频地波雷达 OSMAR2003 在东海海域进行了跟踪目标的实验。由雷达接收回波进行目标检测和定向，并与舰载 GPS 接收机记录的舰只所在位置进行比对。图6(a)、6(b)显示对某日 11:30 与 13:40 的数据进行到达角估计的结果，上方显示的是 GRNN 网络估计的值，下方显示的是 MUSIC 方法估计的空间谱，从图上可见对信噪比高，噪声较平稳的信号(11:30)和信噪比低，噪声扰动剧烈的信号(13:40)，GRNN 网络估计结果分别为-20°和1°，与 MUSIC 方法估计结果和 GPS 纪录一致。图7则显示出GRNN 估计的航迹接近 GPS 纪录的航迹。

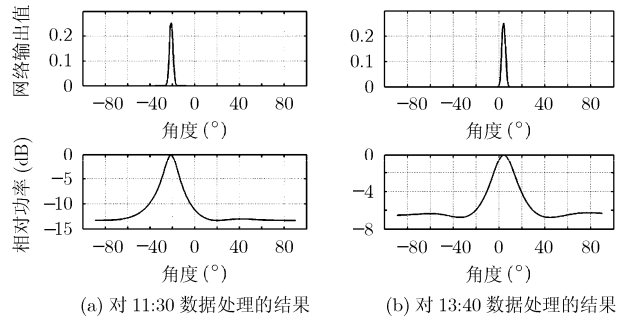


图 6 目标探测试验的结果

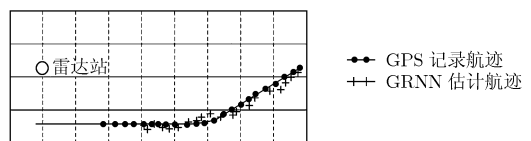


图 7 GRNN 估计航迹与 GPS 纪录航迹

6 结束语

文中比较了分别以 RBFN 和 GRNN 实现的间接逼近和模式编码两种神经网络到达角估计方法, 并通过仿真与实测结果说明, 采用 GRNN 网络基于模式编码的神经网络估计法稳健性好, 即使在较低的信噪比时也能给出正确的估计。结合神经网络能够学习阵列模型误差及快速并行处理的优点(限于篇幅, 本文不赘述), 采用 GRNN 实现的基于模式编码的神经网络到达角估计方法适于在高频地波雷达及其他类似场合应用。

参考文献

- [1] Barrick D, Teague C, Lilleboe P, Cheng R, and Gartner J. Profiling river surface velocities and volume flow estimation with bistatic UHF RiverSonde radar. Proceedings of the IEEE/OES Seventh Working Conference on Current Measurement Technology, San Diego, United States, 2003: 55-59.
 - [2] Xie Junhao, Yuan Yeshu, and Liu Yongtan. Super-resolution processing for HF surface wave radar based on pre-whitened MUSIC. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1998, 23(4): 313-321.
 - [3] Schmidt R O. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1986, 34(3): 276-280.
 - [4] 黄佑勇, 王激扬, 陈天麒. 一种基于高阶累积量的信号频率和到达角联合估计算法. *电子与信息学报*, 2001, 23(2): 140-146. Huang You-yong, Wang Ji-yang, and Chen Tian-qi. A new cumulants-based algorithm for estimation of frequencies and 2D-DOAS of spatial signals. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2001, 23(2): 140-146.
 - [5] 王兰美, 廖桂生, 王洪洋. 矢量传感器误差校正与补偿. *电子与信息学报*, 2006, 28(1): 92-95. Wang Lan-mei, Liao Gui-sheng, and Wang Hong-yang. Calibration and remedy for vector sensors. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(1): 92-95.
 - [6] 王哲, 李衍达, 罗发龙. 一种用于PCA与MCA的神经网络学习算法. *电子学报*, 1996, 24(4): 12-16. Wang Zhe, Li Yan-da, and Luo Fa-long. A neural network learning algorithm for PCA and MCA. *Acta Electronica Sinica*, 1996, 24(4): 12-16.
 - [7] 罗发龙, 李衍达. 神经网络信号处理. 北京: 电子工业出版社, 1993: 88-93.
 - [8] Southall L, Simmers A, and O'Donnell H. Direction finding in phased arrays with a neural network beam former. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 1995, 43(12): 1369-1374.
 - [9] Zooghy A H El, Christodoulou C G, and Georgiopoulos M. A neural network-based smart antenna for multiple source tracking. *IEEE Trans. on Antennas Propagation*, 2000, 48(5): 768-775.
 - [10] 阎平凡, 张长水. 神经网络与模拟进化计算. 北京: 清华大学出版社, 2000: 15-17.
 - [11] 胡守仁. 神经网络应用技术. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993: 77-78.
 - [12] Moody J and Darken C. Fast learning in networks of locally tuned processing units. *Neural Computation*, 1989, 1(1): 281-294.
 - [13] Stoica P and Nehorai A. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound. *IEEE Trans. on Acoust. Speech and Signal Processing*, 1989, 37(5): 720-741.
- 严颂华: 男, 1971年生, 博士, 副教授, 研究方向为高频雷达海洋环境监测技术、雷达信号处理。
吴世才: 男, 1941年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线电物理、高频雷达海洋环境监测技术。
吴雄斌: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电波传播理论、雷达信号处理。