

文章编号:1007-2861(2004)02-0119-03

基于神经网络智能天线的一种波达方向估计方法

孙绪宝^{1,2}, 钟顺时¹

(1. 上海大学 通信与信息工程学院, 上海 200072; 2. 山东科技大学 基础部, 山东泰安 271019)

摘要: 该文提出利用径向基函数神经网络来估计无线通信中智能天线的信号到达方向。为了减少输入, 利用信号相关阵的对称性质, 仅考虑相关阵中的上三角或下三角的部分元素作为网络的输入量, 计算量较小。计算机模拟结果表明, 该方案是有效的。

关键词: 智能天线; 神经网络; 到达方向

中图分类号: TN 911.25 文献标识码: A

Estimation of Signal Arrival Direction for Smart Antennas Based on Neural Networks

SUN Xu-bao^{1,2}, ZHONG Shun-shi¹

(1. School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China;
2. Department of Basic Courses, Shandong University of Science and Technology, Shandong Tai'an 271019, China)

Abstract: This paper proposes an estimation method for direction of signal arrival (DOA) of smart antennas based on radial basis function neural networks for wireless mobile communications applications. In order to reduce the dimension of input vectors, the symmetry property in the correlation matrix is utilized. Only the upper or lower triangular half of the correlation matrix is used in processing. The estimation results with reduced computational complexity confirm the validity of this method.

Key words: smart antennas; neural networks; direction of arrival

智能天线是当今移动通信系统的一个重要研究课题^[1,2], 也是为进一步增加系统容量实现空分多址(SDMA)的关键技术之一。移动通信中的智能天线近期主要是用于无线蜂窝系统的基站。它吸取了原有的多址(CDMA, TDMA, FDMA)^[3]方式的优点, 能将空间资源更有效地再利用起来。智能天线的功能主要是表现在它能够自适应地判断信号方向和数量, 并跟踪期望信号, 然后通过下行链路进行波束赋形, 将在期望信号方向产生最大增益, 并使干扰方向增益最小, 从而抑制了干扰信号。由于智能天线所接收的往往都是多径信号, 并且信号源数可能多于

天线阵元数, 因此, 信道的复杂性, 对判断及跟踪信号的到达方向(DOA)算法提出了更高的要求, 这也是上行链路得以实际应用的技术关键。近年来, 信号到达方向的估计及跟踪方面的研究已有很多报道^[4,5]。主要的DOA算法有最大似然法、传播算子法、MUSIC算法^[6,7]和ESPRIT算法^[8]等。随着DSP(数字信号处理)技术的发展, 这些算法都能够借助于硬件数字化来实现。然而, 许多算法尽管有很高的分辨率, 但计算量普遍较大, 收敛速度慢。在需要高速实时处理的环境下难以实现有效的信号跟踪。而且一般不能处理信号源数多于天线阵元时的

情况.最近,文献[9]和[10]中避开了传统的算法,已采用神经网络算法分别进行了单信号源的方向估计及波束形成抑制干扰的计算.本文建立以径向基函数作为神经元上的网络进行多信号源的DOA估计.目的是利用径向基函数网络具有快速收敛、运算量小及较强的非线性逼近能力等特点.同时,我们只考虑天线输出信号相关阵中的部分元素作为网络输入,减少了计算量,计算机模拟结果说明了该方法的有效性.

1 基于神经网络的智能天线计算模型

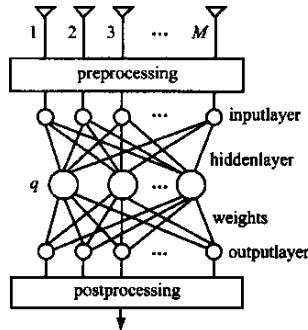


图1 神经网络波达方向估计系统

Fig.1 Neural-network direction of arrival estimation system

如图1所示, M 个天线单元等间距 d 构成直线天线阵,信号经过预处理后输入三层网络(输入层、隐层、输出层),再进行后处理,即可得到信号入射方向的估计值.隐层上的传递函数为高斯径向函数:

$$G(x) = \exp(-x^2/\sigma^2), \quad (1)$$

其中 σ 是径向基函数的宽度.输入层与隐层之间只进行数据输入,只在隐层和输出层之间加权.设来自空间有 K ($K < M$)个窄带信号,等间距线天线阵接收到的信号为:

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) e^{-j\lambda m-1 \cdot 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta_k} + n_m(t), \quad (2)$$

$$m = 1, 2, \dots, M$$

式中 s_k 及 θ_k 分别是第 k 个入射信号及其波达角, λ 为载波波长, $n_m(t)$ 是第 m 阵元的零均值的高斯白噪声, d 是天线阵元间间隔,也可将(1)式表示为矩阵形式:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{AS}(t) + \mathbf{N}(t), \quad (3)$$

\mathbf{A} 是 $M \times K$ 信号导向矩阵为:

$$\mathbf{A} = [a(\theta_1) \ a(\theta_2) \ \dots \ a(\theta_K)], \quad (4)$$

$a(\theta_k)$ 数据为 $1 \ e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta_k} \ e^{-j4\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta_k} \ \dots \ ,$

$$e^{-j\lambda M-1 \cdot 2\pi \frac{d}{\lambda} \sin \theta_k}], \quad (5)$$

$$\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_M(t)]^T, \quad (6)$$

$$\mathbf{N}(t) = [n_1(t) \ n_2(t) \ \dots \ n_M(t)]^T, \quad (7)$$

$$\mathbf{S}(t) = [s_1(t) \ s_2(t) \ \dots \ s_K(t)]^T. \quad (8)$$

空间信号到达方向的估计问题,实质是解决天线输出信号空间 $\{\mathbf{X}(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_M(t)]^T\}$ 到信号方向空间 $\{\boldsymbol{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_K]\}$ 的映射问题,需计算接收信号的相关阵:

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{X}(t)\mathbf{X}(t)^H\}$$

$$= \mathbf{AE}[\mathbf{S}(t)\mathbf{S}(t)^H]\mathbf{A}^H + \mathbf{E}[\mathbf{N}(t)\mathbf{N}(t)^H], \quad (9)$$

由此获得 $M \times M$ 维的相关阵, $E(\cdot)$ 表示统计平均值, H 表示共轭转置.由于相关矩阵中包含了入射信号的所有信息,且 \mathbf{R} 是厄米(Hermite)阵,元素 $R(i, j)$ 与 $R(j, i)$ 的信息相同,而对角元素又不包含信号方向信息.因此本文仅考虑上三角部分的元素,获得一个向量为:

$$\mathbf{r} = [R_{12} \ R_{13} \ \dots \ R_{1M} \ R_{23} \ R_{24} \ \dots \ R_{M-1M}]^T, \quad (10)$$

考虑到天线接收的是并非理想的窄带信号,提取出来的元素必需按实部和虚部分成两个元素,这样向量 \mathbf{r} 中的每一元素均变为两个,形成维数为原来2倍的新向量 \mathbf{r}' ,并将其归一化后的向量作为网络数入:

$$\mathbf{V} = \mathbf{r}' / \|\mathbf{r}'\|, \quad (11)$$

$\|\cdot\|$ 表示欧氏范数,当数据由输入层靠近隐层时,隐层径向基函数被激活,产生输出为:

$$G_{lk} = e^{-\frac{\sum_{l=1}^L (\mathbf{V}_{ll} - \mathbf{D}_{kl})^2}{\sigma^2}}, \quad (12)$$

\mathbf{D}_{kl} 表示第 t 时刻第 k 个期望信号的向量, $k = 1, 2, \dots, K$ 数, $l = 1, 2, \dots, L$, L 是向量 \mathbf{V} 的维数.隐层直接到输出并不能得到角度估计值,必须进行加权处理产生期望输出:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \mathbf{G}^T \mathbf{W}, \quad (13)$$

$\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 为网络输出信号角度向量, \mathbf{W} 是隐层与输出层的连接权.

于是采用网络训练步骤如下:

- (1)计算信号相关阵,获得归一化向量;
- (2)以等角度间隔对 K 个信号形成输入输出对 $[\mathbf{V}, \boldsymbol{\theta}]$;
- (3)用回归最小二乘法逐角搜索,产生最后输出.

2 仿真结果

采用元距离 $d = \lambda/2$ (λ 为真空中波长)8 元均匀线阵天线进行仿真。首先用本文的方法与传统的 MUSIC 算法进行计算量大小的模拟比较, 分别选用 2 个和 3 个期望信号的情况, 比较这两种方法的处理时间。经多次模拟对比获得一组平均处理时间, 如表 1 所示, 是在 800 MHz 处理器的计算机上获得的。显然, 本文的方法优于 MUSIC 算法, 具有较快的处理速度, 这是由于该网络的训练与工作是分开的, 网络经训练后方可直接工作, 其处理时间主要用在获取信号相关阵的部分元素上, 由元素输入可直接产生方向估计输出, 权值已在训练中完成。而 MUSIC 算法要对信号相关阵进行分解, 功谱分析后方可输出方向估计。该方法另一不足之处是特征分解也会增添了硬件实现的复杂度。

表 1 计算时间

Tab. 1 Computational time

算 法	MUSIC		本文	
期望信号数	2	3	2	3
平均时间/s	0.460	0.560	0.012	0.022

图 1 是用这两种算法方向估计的情况, 设 3 个期望信号方向分别为 -70° 、 -50° 和 0° , 信噪比均为 10 dB。由图 1 可知, 两种算法都具有较高的精度, 能够满足一定条件下的方向估计要求, 但神经网络算法逼近更优些。图 1 中看出, 除 0° 方向的信号外, 其它两个方向 MUSIC 算法没有神经网络的精度, 反映了该网络具有较强的逼近能力。

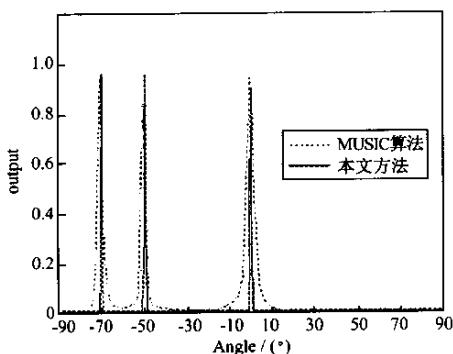


图 1 两种方法的方向估计

Fig. 1 DOA estimation by two methods

3 结 论

本文采用了径向神经网络搜索信号的波达方向, 提取了接收信号相关阵的部分元素, 作为三层网络的输入, 并与传统的算法进行了性能比较。模拟仿真结果证明了这一方法的有效性。

参考文献:

- [1] Barrett M, Amott R. Adaptive antennas for mobile communications [J]. *Electronics and Communications Engineering Journal*, 1994, 6(4): 203–214.
- [2] Bellofiore Salvatore, Balanis Constantine A, Foutz Jeffrey, et al. Smart-antenna systems for mobile communication networks part 1 [J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002, 44(3): 145–154.
- [3] Liberti J C, Rappaport T S. Smart antennas for wireless communications: IS-95 and third-generation CDMA applications [M]. NJ: Prentice Hall, 1999. 30–112.
- [4] Josef Johannes Blanz, Apostolos Papathanassiou. Smart antennas for combined DOA and joint channel estimation in time-slotted CDMA mobile radio systems with joint detection [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2000, 49(2): 293–306.
- [5] Weber R, Nossek J A. Efficient DOA tracking for TDMA-based SDMA mobile communications [A]. In: *Proceeding of the IEEE Vehicular Technology Conference* [C]. 1999. 2099–2103.
- [6] Schmidt R Q. Multiple emitter location and signal parameter estimation [J]. *IEEE Trans Antennas Propagation*, 1986, 34(3): 276–280.
- [7] Stoica P, Nehorai A. MUSIC, maximum likelihood and cramer-raobound [J]. *IEEE Trans ASSP*, 1989, 37(5): 720–741.
- [8] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques [J]. *IEEE Trans on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, 1989, 37: 984–995.
- [9] Southall Hugh L, Simmers Jeffrey A, Donnell Teresa H O'. Direction finding in phased arrays with a neural network beamformer [J]. *IEEE Transactions Antennas and Propagation*, 1995, 43(12): 1369–1374.
- [10] Elkamchouchi Hassan M. Space fitting the uncorrelated interference patterns in constrained adaptive antenna arrays using neural networks [A]. In: *Eighteenth National Radio Science Conference* [C]. Mansoura Univ, Egypt, March, 2001. 27–29; 105–111.

(编辑 刘志强)

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 ADS、HFSS 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>