

# BP神经网络天线方向图获取方法研究

姜正茂, 杨建宇, 李良超

(电子科技大学电子工程学院 成都 610054)

**【摘要】**焦平面阵列成像体制是实现无源毫米波实时成像的主要途径。焦平面体制存在馈源偏焦的问题, 导致成像系统的点扩展函数(PSF)具有空变特性。为研究毫米波焦平面阵列成像点扩展函数的空变规律, 提出采用BP神经网络生成偏焦位置的空变方向图。通过分析天线方向图数据的特点, 研究了BP神经网络的结构形式和输入输出数据格式的设计方法, 并通过实验方法确定了网络的隐层形式。实验结果表明, 采用双隐层BP神经网络生成的方向图可以达到99.75%的精度。

**关键词** 方向图; BP神经网络; 焦平面; 无源毫米波

**中图分类号** TN911.73

**文献标识码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2010.01.009

## Antenna Pattern Generation by BP Neural Network

JIANG Zheng-mao, YANG Jian-yu, and LI Liang-chao

(School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** Focus plane array has been widely used in real-time Passive millimeter wave (PMMW) imaging. But its antenna pattern nonhomogeneity because of feed lateral displacement results in space variance of point spread function (PSF) in PMMW image. In order to study the complicated space-variant law of PSF, an approach is proposed to generate antenna patterns of offset feeds by back propagation (BP) neural network. By analyzing the characteristics of data of antenna pattern, the structure with its input/output data formats of the BP network are discussed. Experimental results demonstrate that the antenna pattern generated by the neural network with double hidden layers exhibits a precision no less than 99.75%.

**Key words** antenna pattern; BP neural network; focus plane; passive millimeter wave

无源毫米波焦平面阵列成像体制采用多波束天线, 它在焦平面上使用多个接收通道并行工作, 因此能够实现快速成像<sup>[1-4]</sup>。由于馈源处于偏焦位置, 造成波束之间增益和方向图存在差别(即非均匀性), 导致成像系统点扩展函数具有空变性<sup>[5]</sup>。毫米波焦平面阵列获得的图像是空变图像, 需要采用空变超分辨算法处理, 这就需要掌握天线方向图的空变规律。目前, 波束非均匀性的研究主要采用电磁传播理论。使用口径场法对抛物面偏焦特性的分析表明, 馈源偏焦时波束将发生偏转, 波束偏转随馈源偏焦呈现非线性变化规律<sup>[6-7]</sup>。由于这种规律的复杂性, 严重制约了空变超分辨算法的发展。

针对偏焦方向图规律直接公式化所面临的困难, 本文提出采用具有知识学习能力的BP神经网络。神经网络从对象的输入输出信息中抽取规律而获得关于对象的知识, 并将知识分布在网络的连接

中予以存储。神经网络的知识抽取能力, 使其能够在没有任何先验知识的情况下, 自动从输入数据中提取特征, 发现规律, 并通过自组织过程使自身构建成具有表达复杂规律的系统<sup>[8-10]</sup>。

### 1 焦平面阵列的馈源偏焦分析

焦平面阵列偏焦示意图如图1所示。

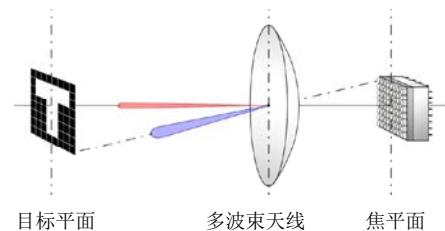


图1 焦平面阵列偏焦示意图

焦平面阵列体制采用焦平面上的多个接收通道并行工作, 每个通道接收被测场景一个较小范围的毫米波辐射信号, 从而得到整个被测场景的图像。

收稿日期: 2008-06-08; 修回日期: 2008-09-10

基金项目: 国家自然科学基金(60632020、60776823)

作者简介: 姜正茂(1976-), 男, 博士生, 主要从事无源毫米波成像数学模型和超分辨算法等方面的研究。

在毫米波阵列成像系统中,阵元(除焦点位置以外)均放置在偏焦区域,因此存在偏焦的问题。偏焦造成波束增益下降,从而降低图像信噪比;偏焦时天线方向图发生形变,造成系统的PSF具有空变性。

焦平面体制必须将偏焦程度控制在一定的范围内,才有利于系统成像和后端的图像恢复处理。对天线偏焦特性分析的结果表明:当波束偏离轴向 $10^\circ$ 时,波束增益下降约3 dB,副瓣抬高10 dB以上,波束呈现明显的非均匀性。在1 dB增益损失的情况下,最大的扫描3 dB波束宽度数<sup>[11]</sup>为:

$$n_{\max} = 0.44 + 22(f/D)^2 \quad (1)$$

计算表明,10倍波长偏焦位置的增益损失约为1 dB,本文针对该范围内的偏焦方向图进行BP神经网络的设计。

## 2 BP神经网络设计方法

### 2.1 BP神经网络原理

BP前馈网络是一类强有力的学习系统。从信息处理观点看,它可使网络实现特定的刺激——反应式的感知、识别和推理,广泛应用于函数逼近、模式识别和分类等领域。

BP神经网络由输入层、隐层和输出层构成,其中隐层可为一层或多层。各层由多个神经元组成,相邻层之间以权重形式完全连接,同一层和不相邻层不直接相连。BP神经网络的学习过程由正向传播和反向传播组成。在正向传播过程中,输入信息从输入层经隐层逐层处理,并传向输出层。每一层神经元的状态只影响下一层神经元的状态。如果输出层得不到期望的输出,则转入反向传播,将误差信号沿原来的连接通道返回,通过修改各层神经元的权值,使得误差最小。

### 2.2 BP神经网络设计

BP神经网络的设计过程包括输入层、隐层和输出层设计。输入层与输出层节点数量与训练数据的形式密切相关,因此必须结合天线方向图的数据讨论设计过程。隐层设计包括隐层的层数和每层的节点数两个方面,隐层的具体结构只能通过实验确定,因此将隐层的设计放到实验中讨论。

#### 2.2.1 输入层设计和输入数据预处理

毫米波成像系统通常采用径向对称的圆孔径天线,以下针对这种情况展开分析。图2为径向对称圆孔径天线的方向图,A、B和C点到焦点O的距离均为 $d$ ,此时只需知道A点的方向图,B、C点的方向图通过极坐标旋转就可以得到。因而计算OY轴上的点(也即

计算时只考虑馈源排列在OY轴上),就可以得到整个焦平面的偏焦方向图。由此可知,方向图函数可以用3个参数描述,即 $F(\theta, \varphi; d)$ 。这是一个含有3个变量的函数,因此输入节点为3。

毫米波无源成像需要天线具备窄波束、低副瓣、高增益等特性。对于直径 $D=500$  mm口径的透镜天线,它的艾里斑为:

$$\gamma = 1.22 \frac{\lambda}{D} \quad (2)$$

式中 $\lambda$ 为波长。毫米波成像设备的工作频率选择为91.5 GHz时,艾里斑的角度 $\gamma$ 为 $0.6^\circ$ 。本文使用的数据为中心指向 $3^\circ \times 3^\circ$ 范围内的方向图,它包含第4副瓣的数据,增益衰减为22 dB。方向图角度采样间隔为 $0.05^\circ$ 时,一个方向图的计算点数为 $61 \times 61$ 。

由于口径采用径向对称形式,方向图也存在对称性,利用这种对称性可以减小训练数据的规模而不损失知识量,从而提高BP网络的训练速度。由馈源排列在OY轴上,可知方向图数据关于 $\varphi = 90^\circ$ 对称,因此只保留 $\varphi = 90^\circ$ 某一侧的数据,恢复时计算这一侧的数据,再根据对称性还原另一侧的数据。

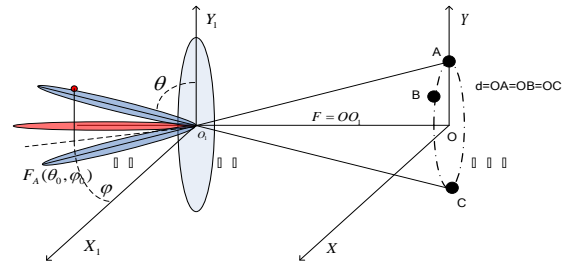


图2 径向对称圆孔径天线的方向图

此外,还可以进一步减小输入数据的动态范围。减小动态范围可以减小样本的空间体积,提高样本的空间密度,增强网络的学习能力。方向图的中心指向 $\theta_0$ 和偏焦距离 $d$ 之间存在如下关系:

$$\theta_0 = \arctg(d/F) \quad (3)$$

式中 $F$ 为焦距。本文提出以 $(\theta - \theta_0, \varphi - \varphi_0, d)$ 作为输入数据,简记为 $(\Delta\theta, \Delta\varphi, d)$ ,这种输入格式可以降低第一维的动态范围。两种输入数据格式之间可以根据式(3)相互转换,因此信息量是等价的。 $\Delta\theta$ 始终保持在 $0^\circ \sim 1.5^\circ$ 之间,而 $\theta$ 的范围却在 $90^\circ \sim 91.5^\circ + \theta_1$ 之间,其中 $\theta_1$ 为最大偏焦位置的方向图的中心指向。因此采用 $(\Delta\theta, \Delta\varphi, d)$ 能够降低第一维数据的动态范围。

#### 2.2.2 输出层设计

当使用的数据为 $3^\circ \times 3^\circ$ 范围内的方向图时, $F(\theta, \varphi; d)$ 的最大值和最小值相差约 $10^4$ 倍,针对输出

动态范围很大的特点, 可以用如下两个步骤解决。

首先,  $F(\theta, \varphi, d)$  采用dB的数据形式, 这样将动态范围限制在40 dB左右。文中以方向图最大增益为0 dB, 其余值均取负值。对数据作对数压缩后, 有利于保持拟合方向图的相对精度。其次, 方向图数据采用7位编码。其中前6位为2进制(也即输出只取0或1), 描述方向图数据的整数部分, 最后一位描述小数部分。例如输出值为-44.2 dB, 则前6位为101 100, 最后一位为0.2。因此, 输出节点数取为7。在进行BP网络的训练前, 需要将方向图转变为7位的目标输出数据。

### 3 实验

实验包括两方面的内容, 首先通过实验得到隐层的结构; 其次验证神经网络方法对偏焦PSF拟合的能力。实验中使用两组数据, 训练数据是偏焦距离为  $d = 0, 1, 2, \dots, 10\lambda$  整数倍波长位置的方向图数据, 用于网络权值学习; 监督数据为  $d = 0.5, 1.5, \dots, 9.5\lambda$  半波长位置的方向图, 用于考察网络的泛化能力。

#### 3.1 隐层结构的确定

研究表明, 对于任何在闭区间内的一个连续函数, 都可以用一个隐层的BP网络来逼近<sup>[12]</sup>。因而一个单隐层BP网络可以完成任意的  $n$  维到  $m$  维的映照。但是单隐层并不一定是最合理的设计形式, 多层网络也许会更加有效<sup>[13]</sup>。隐层通常不超过两层, 因此针对单隐层和双隐层展开对比。

网络设计合理性需要性能指标的衡量, 实验中选择方向图的拟合误差作为性能指标。常温下, 毫米波辐射计参量的物体辐射温度范围在50~300 K之间, 当天线方向图的拟合精度高于99.75%时, 由方向图拟合引入的亮温误差小于0.75 K。目前, 狄克式辐射计的温度灵敏度大致在1 K左右<sup>[14]</sup>, 因此拟合精度选择为99.75%。拟合误差的计算公式为:

$$FE = \frac{\sum_{\theta, \varphi} |F(\theta, \varphi, d) - F_m(\theta, \varphi, d)|}{\sum_{\theta, \varphi} |F(\theta, \varphi, d)|} \quad (4)$$

式中  $F_m$  为拟合方向图; FE应该低于0.25%。

神经网络设计的难点是没有可遵循的最佳设计方法, 往往是通过试探法寻找到某个满足要求的结构。隐层结点数可根据式(4)从某个初始值开始, 采用逐步增长或逐步修剪的试探方法求得:

$$m = \sqrt{n + n_1} + \alpha, 1 \leq \alpha \leq 9 \quad (5)$$

式中  $n$  和  $n_1$  为输入和输出节点数。在MSE大于指

标时, 采用逐步增长法增加隐层节点数量, 反之则采用逐步修剪法。

从表1可以看到, 单隐层神经网络使用的节点数量大于双隐层, 而且泛化能力很低。采用双隐层, 并逐步调整双隐层的节点数量, 最终选择(16 32)这种形式。

表1 隐层实验数据

隐层形式	训练数据MSE	监督数据MSE
单隐层86	0.023 2	0.032 8
双隐层(15 30)	0.023 2	0.026 1
双隐层(16 30)	0.022 9	0.025 9
双隐层(16 31)	0.022 9	0.025 3
双隐层(16 32)	0.022 8	0.024 8
双隐层(17 31)	0.022 6	0.025 2

#### 3.2 BP神经网络生成方向图

实际偏焦方向图和采用(16 32)双隐层结构的BP神经网络得到的偏焦方向图, 如图3所示。

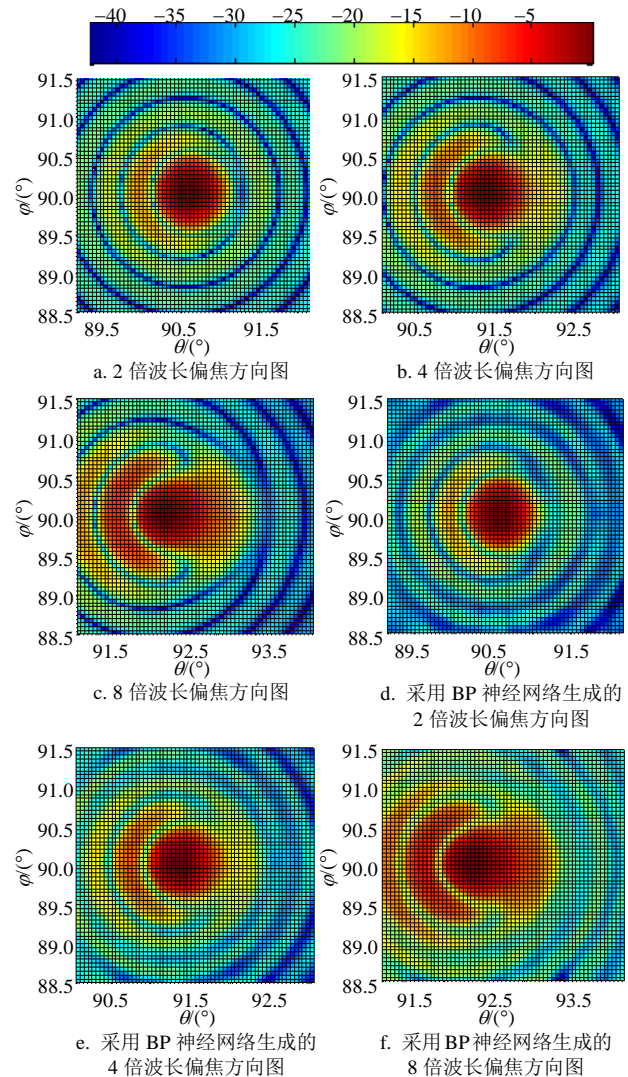


图3 BP神经网络生成方向图

实验结果表明, 在10倍偏焦范围内, FE小于0.24%。

## 4 结束语

BP神经网络具有强大的学习能力, 可以获取偏焦方向图中的知识规律, 从而实现偏焦方向图的高精度快速生成。该方法可用于焦平面馈源阵列设计、毫米波空变图像的仿真工作和毫米波空变图像算法研究等领域, 具有广泛的应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] KARL F W, MICHAEL A J. Effects of mutual coupling on interference mitigation with a focal plane array[J]. IEEE Trans on AP, 2005, 53(8): 2490-2498.
- [2] LUTHI T, MATZLER C. Passive millimeter-wave imaging and ranging[J]. IEEE Trans on MTT, 2005, 53: 2594-2599.
- [3] APPLER R, ANDERTON R N. Mechanically scanned real time passive millimeter wave imaging at 94 GHz[C]//The International Society for Optical Engineering. [S.l.]: SPIE, 2003.
- [4] CLARK S, MARTIN C, COSTIANES J C, et al. A real-time wide field of view passive millimeter-wave imaging camera[C]//IEEE Proc of the 32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop. [S.l.]: IEEE, 2003.
- [5] ITO T, ICHIKAWA R, KOISHI R, et al. Measurement of space variant PSF and its application to restoring severely degraded images[C]//SICE Annual Conference. [S.l.]: SICE, 2007, 142-145.
- [6] LEE K H, CHEN C C, LEE R. UWB dual-linear polarization dielectric horn antennas as reflector feeds[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2007, 55: 798-804.
- [7] VARDANYAN A V, POGOSYAN K A, ALOYAN G S, et al. Energy distribution on the focal plane of a parabolic cylindrical concentrator with angular defocusings[J]. Applied Solar Energy, 2007, 43: 21-24.
- [8] REN Ji-ping, LI Zuo-yong, JIANG Chun-hua, et al. Uncertain relation suited to overfitting of BP neural network [J]. Journal of Electronic Science and Technology of China, 2004, 2(1): 53-57.
- [9] EMMANUEL B, STEFAN D, ROSSITZA S. Knowledge acquisition techniques for feature recognition in CAD models[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2008, 19(1): 21-32.
- [10] 孙 剑, 许家珩. 神经网络算法在智能体IDS系统中的应用[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(3): 289-292.  
SUN Jian, XU Jian-yi. Research of neural network algorithm in agent-based intrusion detection system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2004, 33(3): 289-292.
- [11] JOHN R. Lateral-feed displacement in a paraboloid[J]. IEEE Trans on AP, 1965, 13: 660-665.
- [12] HORNIK K H, STINCHCOMBE M, WHITE H. Multilayer feed forward networks and universal approximators[J]. Neural Networks, 1989, 2(5): 359-366.
- [13] YANG Y W. A new neuron model based on multilayer perceptron and radial basis transfer function[C]//Proc ICNNB'05. Proceedings of 2005 International Conference on Neural Networks and Brain. [S.l.]: [s.n], 2005.
- [14] 郑 鑫, 杨建宇, 李良超, 等. 3毫米波便携式辐射计信号采集与测试系统[J]. 仪器仪表与传感器, 2008, 2: 24-26.  
ZHENG Xin, YANG Jian-yu, LI Liang-chao, et al. Data collection and measurement system for portable 3mm wave radiometer[J]. Instrument Technique and Sensor, 2008, 2: 24-26.

编辑 税 红