

于子叶, 储日升, 盛敏汉, 马海超. 2020. 兼顾速度和精度的深度神经网络震相拾取. 地震学报, 42(3): 269–282. doi: 10.11939/jass.20190154.

Yu Z Y, Chu R S, Sheng M H, Ma H C. 2020. A new deep neural network for phase picking with balanced speed and accuracy. *Acta Seismologica Sinica*, 42(3): 269–282. doi: 10.11939/jass.20190154.

兼顾速度和精度的深度神经网络震相拾取^{*}

于子叶^{1,2,3)} 储日升^{1,2), †} 盛敏汉^{1,2)} 马海超^{1,2,3)}

1) 中国武汉 430077 中国科学院测量与地球物理研究所

2) 中国武汉 430077 大地测量与地球动力学国家重点实验室

3) 中国北京 100049 中国科学院大学

摘要 深度神经网络虽然在震相拾取中取得了良好效果, 但作为高复杂度的机器学习模型, 深度神经网络在取得较高精度的同时需要付出较高的计算代价, 而且试验研究表明震相拾取中并不需要过高的模型复杂度. 为此, 本文根据地震波形的特点设计了四种具有不同复杂度的深度神经网络改进模型, 可以综合具体的精度和速度需求从中选取合适的模型. 在此基础上, 将改进模型与现有四种到时拾取的深度学习网络模型进行了对比, 结果表明本文中的网络模型在到时拾取上具有较高的速度和精度. 同时, 本文的深度神经网络通过使用多种深度学习模型压缩手段可将震相拾取模型的大小压缩到 2.0 MB 以内, 从而使得模型可以在低功耗设备上完成高速震相拾取的同时尽可能地减少精度损失.

关键词 震相拾取 深度神经网络 编码解码结构 卷积神经网络 循环神经网络 模型压缩

doi: 10.11939/jass.20190154 中图分类号: P315.63 文献标识码: A

A new deep neural network for phase picking with balanced speed and accuracy

Yu Ziye^{1,2,3)} Chu Risheng^{1,2), †} Sheng Minhan^{1,2)} Ma Haichao^{1,2,3)}

1) Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430077, China

2) State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Wuhan 430077, China

3) University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The deep neural network (DNN) has achieved good results in phase picking. As a high complexity machine learning model, DNN suffers from high computational cost to achieve high accuracy. The experimental results show that there is no need to build a high complexity model for phase picking. So, we designed four network models with different complexity to improve speed and accuracy of phase picking based on characteristics of seismic waveforms, which offers a choice of accuracy and/or speed of the phase picking. And then we compared our results with those obtained from four existing DNN models, and verified the relative high speed and accuracy. More importantly, the DNN models can be compressed to within 2.0 MB after a variety of model compression methods, which allows the structure to perform high-speed phase

^{*} 基金项目 国家自然科学基金(41661164035)资助.
收稿日期 2019-10-11 收到初稿, 2020-01-03 决定采用修改稿.
[†] 通信作者 e-mail: chur@asch.whigg.ac.cn



picking with relatively high accuracy on low-power-consumption devices.

Key words: onset picking; deep neural work; encoder-decoder model; CNN (convolutional neural network); RNN (recurrent neural network); model compression

引言

随着神经网络的发展,越来越多的机器学习任务可以在深度学习算法框架内完成.深度学习模型由于具有较高的模型复杂度,可以完成多种类型的数据处理与分析任务.在地震震相拾取工作中使用神经网络算法可以直接以原始的三分量数据作为模型输入,这简化了震相拾取的数据预处理难度,并且可以对震相进行自动化拾取.现有可以用于震相拾取的神经网络结构包括全连接网络(fully connected network, 缩写为 FCN)、卷积神经网络(convolutional neural network, 缩写为 CNN)和循环神经网络(recurrent neural network, 缩写为 RNN).

由多层全连接网络搭建的多层感知器(multi-layer perceptron, 缩写为 MLP)是最早用于震相拾取的神经网络模型.多层感知器模型缺乏信号处理结构,在不对波形进行预处理的情况下难以取得良好结果. Zhao 和 Takano (1999)设计的多级全连接网络可以拾取不同尺度震相的特征,该网络带有卷积神经网络的特点,在美国地震学研究联合会(Incorporated Research Institutions for Seismology, 缩写为 IRIS)数据中可以拾取 95% 的初至.卷积神经网络是波形处理的结构,因此可以简化使用卷积神经网络提取波形到时的过程.之后发展了一些融合卷积神经网络与全连接网络的算法(Garcia *et al*, 2016; 于子叶等, 2018; Ross *et al*, 2018), Ross 等(2018)对原始波形进行分类的精度高达 95%.此外,使用卷积反卷积结构所搭建的编码解码模型(Zhu, Beroza, 2018; 赵明等, 2019; Hu *et al*, 2019)可实现点到点的输出,从而使到时提取精度得以提升.震相拾取工作中的编码解码模型使用了自稀疏编码器的结构,这使得编码解码模型对于噪声的鲁棒性更强.编码解码模型来源于图像分割领域所用的 U 形网络(U-Net)(Ronneberger *et al*, 2015).循环神经网络是为解决自然语言处理中的前后文问题而设计(Schuster, Paliwal, 1997).前后文指的是在分析某个字符的过程中综合考虑前后字符的信息.这与震相拾取相类似,在进行震相拾取的过程中需要综合其它震相进行判断,因此在处理原始信号的模型中可以使用融合卷积神经网络与循环神经网络的模型.一些研究人员使用了双向 RNN 单元来综合前后震相的信息进行拾取,这种融合结构在处理波形数据时与纯卷积神经网络模型的区别在于,卷积神经网络的感受野是有限的,而循环神经网络的感受野可以近似无限,因此可以处理更长时间的依赖,即可以综合更多的震相信息. Zhou 等(2019)使用门控循环网络单元(gated recurrent unit, 缩写为 GRU), Cho 等(2014)搭建了深度神经网络模型,其拾取 P 波和 S 波的精度分别达到 (-0.03 ± 0.48) s 和 (0.03 ± 0.56) s.因此,双向循环神经网络结构解决了浅层 CNN 感受野不足的问题,因而在提取 P 和 S 等震相到时过程中可以兼顾其它震相.

现有的深度学习模型使用不同神经网络结构,在多种地震震相拾取过程中均取得了良好的效果,但现有震相拾取神经网络的设计大多源自于图像、文本处理中的深度学习模型.因此在网络构建中并未充分考虑地震波形尺度等问题,这导致了网络深度过深、关系依赖不完整等问题.与此同时,模型设计过程中也并未考虑计算速度的因素,这导致模型复杂度过高(Hinton *et al*, 2015; Howard *et al*, 2017; Sandler *et al*, 2018),仅能在高性能计算设备上完成

波形拾取, 较高的模型复杂度限制了深度学习模型在震相拾取中的应用。

鉴于此, 本文综合考虑模型的合理性、精度和速度, 拟设计可用于不同场景的深度神经网络模型。在这些模型构建过程中综合考虑地震波形的特点, 形成适用于不同精度场景的四个深度学习模型, 并使用深度可分离卷积(Howard *et al*, 2017)进行模型压缩, 最终模型可以压缩至 2.0 MB 以内, 使得模型可以在低功耗、低内存设备上以较快速度进行震相拾取。

1 深度神经网络基本结构

在早期的神经网络结构设计中, 研究人员一般将其作为仿生学模型(van der Baan, Jutten, 2000), 例如将神经网络看作神经细胞的突触和轴突。但以现代的神经网络模型来看, 这种思路并不合理。模仿神经元的行为需要更加复杂的系统, 这是以脉冲神经网络为代表的第三代神经网络所研究的内容(Maass, 1997), 目前还无法用于到时拾取之中。而深度神经网络可以对信号、文本直接进行处理是因为其结构中包含信号、文本处理的结构, 即卷积神经网络和循环神经网络。因此用于震相拾取的深度学习算法更加接近信号处理算法。

现代的深度神经网络包含三种基本结构: 全连接层、卷积网络层、循环网络层。全连接网络所构建的多层感知器(Rumelhart *et al*, 1986)是最早的传统机器学习模型之一。由LeCun 等(1998)提出的卷积神经网络则是信号处理的延伸。循环神经网络结构可以用于自然语言处理, 由于其可以解决较长时间依赖问题, 因此可以用于波形到时拾取中。本文将测试多种深度神经网络结构用于确定兼顾精度和速度的网络, 在设计过程中主要考虑使用卷积神经网络和循环神经网络。

1.1 卷积神经网络

在震相拾取工作中卷积神经网络用于构建波形特征, 其本质是滑动互相关算法, 即:

$$\begin{aligned} h_{t_2, C_2} &= \sum_{k_1=1}^K \sum_{c=1}^{C_1} x_{t_1+k_1, c} w_{k_1, c, C_2} + b_{C_2}, \quad t_1 = t_2 S, \\ \left\{ \begin{aligned} T_2 &= \left\lceil \frac{T_1 - K + 1}{S} \right\rceil && \text{“补齐”,} \\ T_2 &= \left\lfloor \frac{T_1}{S} \right\rfloor && \text{“不补齐”,} \end{aligned} \right. \quad (1) \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{[T, C_1]}$ 代表本层输入, 分别代表[信号采样点数 T_1 , 通道数量 C_1]; 卷积核心 $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^{K \times C_1 \times C_2}$ 分别代表[卷积核心大小 K , 原始信号通道数 C_1 , 卷积后信号通道数 C_2]和偏置 $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^{C_2}$ 均是可训练的; \mathbf{h} 为本层输出, 代表卷积后的图像; 参数 S 为步长(stride), 这是对于信号的降采样, 降采样后信号长度为 T_2 。对于边界处理有两种方式可以选择: 第一种填充为不补齐, 第二种填充为补齐。不补齐时卷积计算仅限于原始信号范围内; 补齐时卷积计算会超过信号边界, 此时需要对图像补零。在卷积层中加入步长, 可以完成图像的降采样(down sampling)工作。在卷积神经网络中降采样工作可以由池化层完成。池化层分为平均池化和最大池化, 池化层的计算过程中允许信号具有平移不变性。在很多波形识别任务中, 模型需要能够处理特征的平移问题, 而池化层可以达到此目的。

在多层卷积神经网络搭建过程中需要解决感受野问题, 感受野相当于小波变换的小波基函数长度, 代表着卷积神经网络能够处理的信号特征长度。在卷积神经网络中感受野就是卷积后的信号中每个采样点所对应原始信号的采样点个数。感受野可以通过增加网络深度、

对信号进行降采样(池化层)或增加卷积核心长度的方式解决. 扩张(空洞)卷积(dilated/atrrous convolution)是传统卷积的改进形式之一. 扩张卷积中扩张率(dilated rate)为 1 时代表原始的卷积, 而当扩张率为 d 时代表着在原始的卷积核心间填充了 $d-1$ 个 0. 此时卷积核心所对应的可训练参数数量不变, 但实际卷积核心变大, 其计算方式为

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_{t_2, C_2} &= \sum_{k_1=1}^K \sum_{c=1}^{C_1} \mathbf{x}_{t_1+k_1 d, c} \mathbf{w}_{k_1, c, C_2} + \mathbf{b}_{C_2}, \quad t_1 = [t_2 S], \\ \begin{cases} T_2 = \left\lfloor \frac{T_1 - K + 1}{S} \right\rfloor & \text{“补齐”,} \\ T_2 = \left\lfloor \frac{T_1}{S} \right\rfloor & \text{“不补齐”,} \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 d 为扩张率, 其它参数与式(1)含义相同. 与传统卷积、池化降采样不同, 转置卷积是对图像进行上采样后再对上采样后的图像进行普通卷积, 转置卷积会使得特征图变大, 可以用于构建编码解码网络结构实现点到点的输出任务.

1.2 循环神经网络

循环神经网络可以处理前后文问题, 其网络结构源于马尔可夫(Markov)随机过程, 即网络的输出仅取决于上一步的输入. 使用 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_t$ 代表输入向量, 按照时间 t 顺序输入, $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_t$ 代表网络输出向量:

$$p(\mathbf{h}_t | \mathbf{x}_t, \dots, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_1) \xrightarrow{\text{马尔可夫随机过程}} p(\mathbf{h}_t | \mathbf{x}_t, \mathbf{h}_{t-1}). \quad (3)$$

由于向量 \mathbf{h}_{t-1} 携带有 $\mathbf{h}_{t-1}, \mathbf{x}_{t-1}$ 的信息, 由此模型中某个时间的输出 \mathbf{h}_t 携带有所有输入 $\{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_t\}$ 的信息. 本文使用循环神经网络的改进形式 GRU (Cho et al, 2014) 作为基本的计算单元, GRU 是 LSTM (Hochreiter, Schmidhuber, 1997) 的改进结构, 其计算方式为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= \text{concat}(\mathbf{x}_t, \mathbf{h}_{t-1}), \quad \mathbf{g}_1 = \sigma(\hat{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{w}^1 + \mathbf{b}^1), \quad \mathbf{g}_2 = \sigma(\hat{\mathbf{x}} \cdot \mathbf{w}^2 + \mathbf{b}^2), \quad \mathbf{c} = \mathbf{h}_{t-1} \odot \mathbf{g}_1, \\ \hat{\mathbf{h}} &= \tanh[\text{concat}(\mathbf{x}_t, \mathbf{c}) \cdot \mathbf{w}^3 + \mathbf{b}^3], \quad \mathbf{h}_t = (1 - \mathbf{g}_2) \odot \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{g}_2 \odot \hat{\mathbf{h}}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中: \mathbf{w} 为可训练参数, \mathbf{b} 为偏置, $\sigma(x) = 1/(1 + e^{-x})$ 为 S 函数, \odot 为哈达玛积即矩阵元素分别进行相乘, $\hat{\mathbf{x}}, \hat{\mathbf{h}}$ 和 \mathbf{c} 分别为中间向量. GRU 中 \mathbf{g}_1 和 \mathbf{g}_2 分别为重置门和更新门, 是激活函数为 S 函数的全连接网络, 其中: 重置门与 \mathbf{h}_{t-1} 相乘用于控制前一时刻向量的幅值大小; 更新门与新向量 $\hat{\mathbf{h}}$ 相乘用于控制新向量的幅值. 由此 GRU 单元可以根据输入控制记忆时间的长短. 网络结构在自然语言处理中表现出了较好的效果 (Cho et al, 2014).

1.3 批正则化层

在深度神经网络设计中, 正则化被广泛地使用, 从而避免网络训练过程中出现梯度消失问题. 其中重要的正则化方式即为批正则化(batch normalization, 缩写为 BN) (Ioffe, Szegedy, 2015). 批正则化改善了深度学习模型中的梯度消失问题, 并可以避免过拟合提升网络精度. 批正则化层对每层的输出均进行了归一化, 其计算式为

$$\mathbf{h} = \gamma \frac{\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}}{\sqrt{\text{var}(\mathbf{x})}} + \beta, \quad (5)$$

式中, γ 和 β 为可训练参数, \mathbf{x} 为本层神经网络的输入, \mathbf{h} 为本层神经网络输出. 在之后的网络设计中均加入批正则化层, 用于增加算法精度.

2 用于震相拾取的深度学习模型

2.1 到时拾取网络的设计与改进

一般认为地震波形的特征尺度较大, 即完整波形具有较多采样点. 人脸检测中典型的特征尺度为 24×24 (Zhang *et al.*, 2016), 因此在搭建卷积神经网络中, 以卷积核心大小为 3×3 , 在结合池化层降采样的情况下, 搭建 3—4 层网络即可. 以典型的 100 Hz 采样的地震波形数据为例, P 和 S 等常见震相的特征尺度会比人脸识别中的特征尺度大 1—2 个数量级. 因此, 简单地模仿图形处理中的网络结构会产生特征拾取不完整的问题. 于是一些研究人员将 RNN 用于解决长时间依赖问题, 结果表明在一定程度上改善了这种问题, 如图 1 所示.

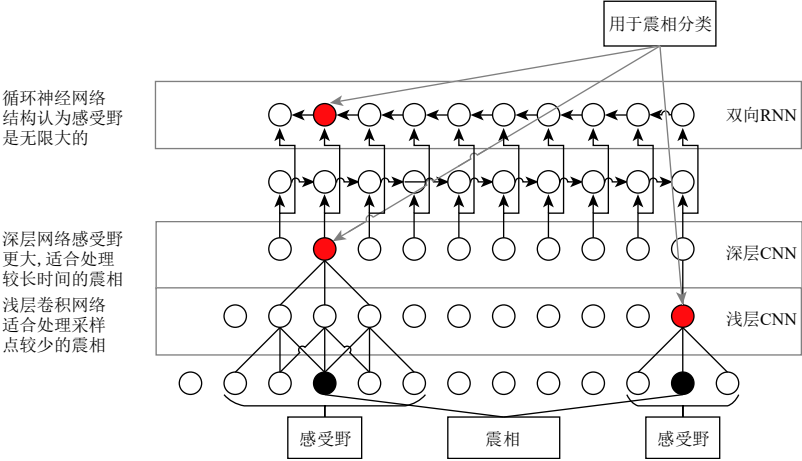


图 1 卷积神经网络和循环神经网络用于震相拾取的关系示意
Fig. 1 The relationship between CNN and RNN used for phase picking

图 1 用关系图的方式展示了这种关系: 卷积神经网络在层数较少(浅层网络)的情况下, 能处理的波形长度是有限的, 且无法处理多个震相之间的关系. 为了更加准确地拾取震相, 需要结合更多的波形信息进行处理. 此时需要一个较深的卷积神经网络或者使用 RNN 来处理多个震相之间关系, 但是 RNN 的训练和推断速度均较慢, 并且在采样点较多的情况下难以收敛. 卷积神经网络处理过程中需要叠加多个层进行处理, 这无疑会增加模型的复杂度. 为了使用卷积神经网络完成波形处理, 并尽可能地增加网络的感受野, 本文使用 WaveNet 模型(van den Oord *et al.*, 2016)的方式, 结合扩张卷积来处理感受野不足的问题, 如图 2 所示.

由图 2 可知, 在使用空洞卷积后, 可以在不增加可训练参数的情况下增加感受野, 使得纯 CNN 结构避免了速度较慢的 RNN 结构. 在性能分析过程中, 一般认为卷积神经网络的效率要优于循环神经网络. 震相拾取中的 WaveNet 是一个纯卷积结构, 这种结构可以完成实时拾取的工作. 文本使用的模型中, 卷积核心大小设置为 5, 相较人脸识别中的 3×3 更大, 同时由于是一维数据处理, 因此并不会显著增加模型复杂度.

另外, 卷积神经网络的问题在于未对输入进行筛选, 这可能导致网络容易受到噪声的影响, 即神经网络无法对自身输出的幅值进行有效控制. 因此在网络设计过程中使用了门控 CNN 单元(van den Oord *et al.*, 2016). 这种结构借鉴了 GRU 网络中门控单元的特点, 可以对部分特征进行加权, 即在重要的波形特征中门控单元给予接近 1 的输出值, 反之则接近 0. 本

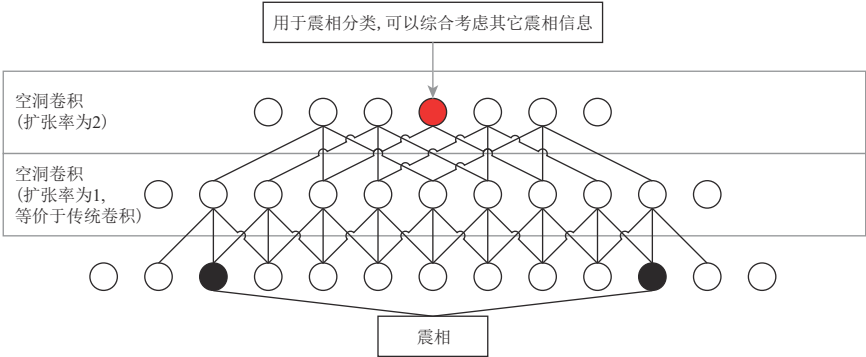


图 2 用于震相拾取的纯卷积结构设计

Fig. 2 Pure CNN structure designed for phase picking

质上讲, 这种结构增加了网络的非线性, 使得到时拾取对噪声的鲁棒性更强. 为了提高训练的有效性, 在 CNN 层中加入残差网络结构(He et al, 2016). 残差网络即在门控单元输出之上加入本层输入的结果, 可以提供训练过程中误差传播的支路, 减轻梯度消失问题, 从而加快训练过程. 最终用于波形拾取的网络结构如图 3 所示.

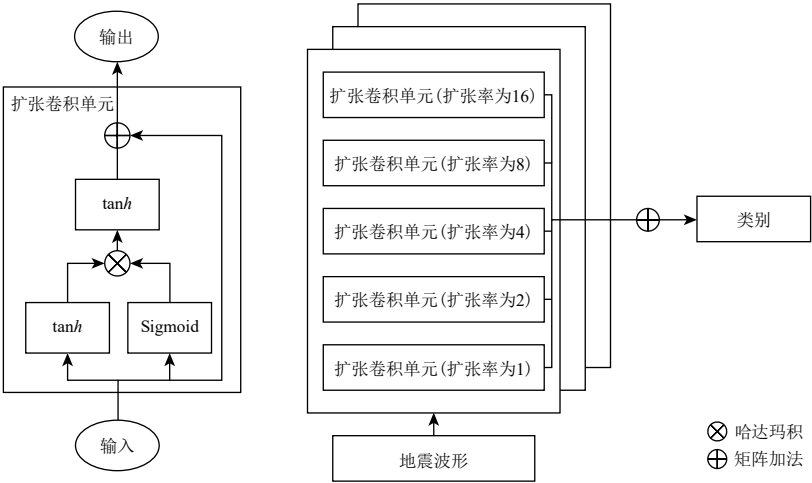


图 3 用于到时提取的 WaveNet 网络结构

Fig. 3 WaveNet structure used for phase picking

考虑到不同震级的震相持续时间并不相同, 简单地搭建多层神经网络的感受野较大, 对于较小地震的震相拾取会出现较大误差. 因此网络设计中将不同层的输出结果进行加和, 即最终输出向量保留了多个感受野的卷积网络结果. 这种建模方式更加符合不同震级震相拾取的需要.

现有到时拾取网络由于其设计过程中并未考虑计算效率的因素, 在震相拾取过程中难以在低功耗设备上推断, 为此本文将 WaveNet 模型简化为 7 层卷积神经网络. 这样的网络依然是一个纯卷积结构, 其结构如表 1 所示.

7 层卷积神经网络的结构是相对 WaveNet 模型的简化, 但依然可以满足感受野的需要. 在 7 层网络中使用空洞卷积对模型进行优化, 进一步增加了网络的感受野. 为进一步探

究网络结构的优化方案, 本文对于每层卷积均使用深度可分离卷积进行优化(Howard *et al*, 2017). 在卷积神经网络中由于传统卷积核心需要处理多个通道的信息, 这使得卷积核心中 $w \in \mathbb{R}^{K \times C_1 \times C_2}$ 可训练参数的数量为 $K \times C_1 \times C_2$. 深度可分离卷积分为深度卷积和逐点卷积, 其中: 深度卷积独立地对每个特征图进行处理, 此时卷积核心大小为 $K \times C_1$; 逐点卷积用

于处理通道信息, 其大小为 $C_1 \times C_2$. 可分离卷积可训练参数个数为 $K \times C_1 + C_1 \times C_2$, 此时卷积神经网络的可训练参数个数有效地减少. 网络中给定的激活函数 LeakyReLU 的形式为

LeakyReLU = max(0.25x, x).

(6)

在一些设备上, 单精度浮点计算与半精度浮点计算的效率不同, 而且极端情况下, 半精度浮点(FP16)的计算速度比单精度浮点计算要快一倍(Courbariaux *et al*, 2014). 而深度学习中数值精度对于分类性能的影响较小, 因此可以使用半精度代替单精度浮点用于震相拾取. 在使用半精度浮点结合优化的 7 层卷积神经网络的情况下, 模型大小可以控制在 2 MB 以内, 这对于低功耗的场景下完成震相拾取是有利的.

2.2 其它用于到时拾取的深度学习模型

本文选择两种普通卷积神经网络和一种循环神经网络用于对比. 传统卷积神经网络最早用于分类问题, 这是最有效的卷积神经网络形式之一, Zhu 和 Beroza (2018)曾将这种网络用于波形识别, 本文搭建 3 层网络用于波形到时的拾取. 以神经网络依赖关系来看, 形成的

波形分类向量的每个时间步依然仅与感受野相关, 因此与传统卷积神经网络并无区别. 循环神经网络使用双向 RNN 并融合了卷积神经网络单元处理信号.

三层网络使用普通的卷积, 在每层卷积中均使用批正则化, 用于加快训练速度的同时提升模型精度. 为尽可能地增加感受野, 本文将卷积核心大小设置为 5. 神经网络结构列于表 2. 表 2 所示的神经网络结构较为简单, 因此适合于快速检测场景. 为了更好地进行震相拾取, 本文搭建了稀疏编码模型作为对比. 该模型包含多层卷积网络和用于降采样的池化层, 同时包含多层转置卷积(Zeiler *et al*, 2010), 这

表 2 三层卷积神经网络

Table 2 Three-layer CNN

层号	基础网络	卷积核心	特征数量	激活函数	正则化
1	卷积	5	32	LeakyReLU	BN
2	卷积	5	64	LeakyReLU	BN
3	卷积	5	128	LeakyReLU	BN
4	全连接		3	无	无

表 3 编解码模型(U-Net)

Table 3 The encoder-decoder model (U-Net)

层号	基础网络	核心	特征数量	降采样率	激活函数	正则化
1	卷积×2+池化	3	32	2	LeakyReLU	BN
2	卷积×2+池化	3	64	2	LeakyReLU	BN
3	卷积×2+池化	3	128	2	LeakyReLU	BN
4	卷积×2+池化	3	256	2	LeakyReLU	BN
5	转置卷积+卷积×2	3	256, 128	0.5	LeakyReLU	BN
5	转置卷积+卷积×2	3	128, 64	0.5	LeakyReLU	BN
6	转置卷积+卷积×2	3	64, 32	0.5	LeakyReLU	BN
8	全连接		3		无	无

可以将信号长度还原为原始信号长度，从而完成点到点的输出任务。每层中均使用批正则化作为正则化。稀疏编码模型列于表 3。

表 4 双向循环神经网络用于到时拾取

Table 4 Bidirectional RNN used for phase picking

层号	基础网络	核心	特征数量	激活函数	正则化
1	卷积	3	32	LeakyReLU	BN
2	卷积	3	64	LeakyReLU	BN
3	卷积	3	128	LeakyReLU	BN
4	GRU (双向)	—	128	\tanh	无
5	GRU (双向)	—	128	\tanh	无
8	全连接		3	无	无

始波形。卷积网络中由于有循环神经网络处理时序信息，因此并不需要过大的感受野，其网络结构列于表 4。

以上四种典型的深度神经网络模型均被用于震相拾取中。下文将对多种神经网络模型进行测试，并对其速度和精度予以分析。

3 网络性能对比分析

3.1 训练和测试数据

本文使用波数法产生 14 万个地震数据用于训练，选取其中 1 500 个数据用于测试。测试数据来自于震中距处于 20—470 km 范围内的台站，台站为任意方位角；所选地震震源深度为 4—19 km，震级 M_w 3.0—6.0，其它震源参数是随机的。产生的单条数据采样点为 1 024 个，采样间隔为 0.2 s。产生的数据不过滤波，使用方差进行归一化。拾取到时为单一垂向分量波形，加入方差为 0—0.2 的噪声。测试数据的噪声方差为 0.1 和 0.3。

在对波形进行标注的过程中，将正确到时前后两个采样点作为正样本，其它作为负样本。以分类问题来看，负样本过多，因此对正样本以及 P 波与 S 波之间的波形加入权值 5，负样本加权值为 0.1，由此所得训练数据如图 4 所示。

对于训练数据采取不同的加权，将 P 波与 S 波之间的数据加权设为 5，这是因为在此区间的波形较难分类。标签数据使用独热编码(OneHot)对震相类型进行标注。

3.2 网络规模和推断速度测试

对于神经网络来说，网络的规模、深度直接影响内存大小。一般来说，内存需要越大，计算性能要求越高，同时完成相同任务需要的能量更多。本文对不同网络的可训练参数数量进行统计。对于不同的网络结构，在可训练参数规模相近的情况下，CNN 一般比 RNN 更高效。本文对推断过程中的速度进行统计，测试中使用的 CPU 为 E31225@3.3GHz，GPU 为 NVIDIA 的 K2200。将上述网络性能统计信息列于表 5。

在 GPU 环境中，对于 8 个网络模型，震相拾取速度最慢的网络为卷积神经网络与 RNN 融合的深度结构，其推断时长达到 1.0 s，这比纯卷积结构要慢。卷积结构计算速度与可训练参数数量呈正相关，其中三层卷积网络的推断时长比模型复杂度最高的 WaveNet 缩短了一个数量级，达到 0.008 8 s，在样本采样率为 100 Hz 的情况下相当于每秒钟可以处理 4 小时数据，这对于大型数据集来说效率差尤为明显。在进行到时拾取等机器学习任务的过

编码解码模型相比于传统分类问题的卷积网络更加复杂，该模型利用自稀疏编码器模型更加有效地提取特征并逐点输出类别，这样可以提升网络精度。为验证依赖关系对网络的影响，仿照 Zhou 等(2019)使用 GRU 搭建双向 RNN 网络。由于双向 RNN 难以处理原始波形，所以在双向 RNN 网络之前构建三层卷积神经网络用于处理原

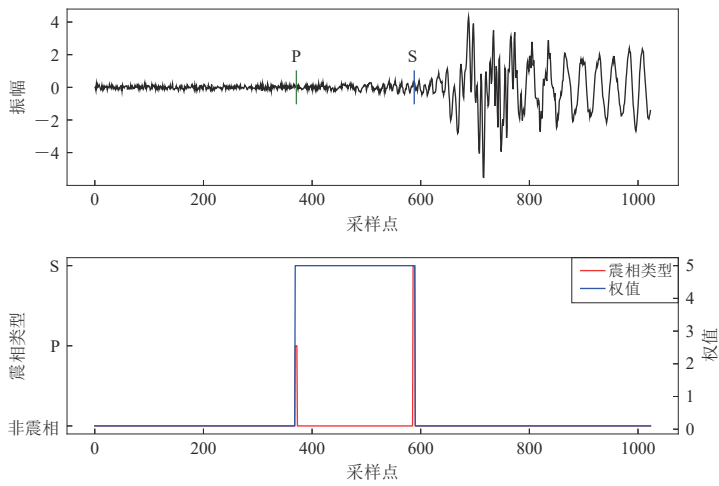


图4 训练数据

Fig. 4 Training data

程中，搭建过于复杂的网络并不合理，因为这样会显著地增加推断负担，而神经网络应当具备简单高效的特点。使用深度敏感卷积优化的卷积神经网络，推断时间与普通卷积近似，但是可训练参数数量减少了66%。

而在CPU中所有计算速度均呈现出一定程度的降低，其中RNN速度降低最少，使用深度可分离卷积的网络则表现出比传统卷积更好的性能，CPU的缓存系统更适合处理深度敏感

卷积。震相拾取过程中16位精度的计算达到16 s，这是因为Intel的CPU没有半精度计算单元，使得计算十分缓慢。因为GPU存在访存瓶颈，经过深度可分离卷积优化的网络速度并未得到明显提升。半精度计算适合于低功耗场景，而针对通过用场景设计的CPU和GPU难以发挥其高速性能。

3.3 分类性能测试

在分类性能测试中，选取非训练数据的1 500个样本进行测试，将到时拾取超过3个采样点的样本作为负样本，统计网络性能绘制成图5。

由图5可见：拾取结果中卷积神经网络与双向RNN融合模型和WaveNet结果最好，编解码模型效果次之，3层神经网络与16位精度的7层卷积优化网络近似。这说明波形拾取过程中，网络复杂度与波形拾取结果优劣呈正相关。循环神经网络与WaveNet属于不同类型的网络，二者具有相近的性能，这说明在波形拾取过程中综合考虑多种波形可以获得更好的结果，这既可以通过RNN也可以通过增加感受野的方式达到。在满足依赖关系的情况下，多种网络结构均可以达到理想的结果。从受试者工作特征(receiver operating characteristic, 缩写为ROC)曲线可以看出，不同网络对于S波提取的效果均好于P波，这是因为S波的振幅和

表5 CPU和GPU上的网络性能统计

Table 5 Performance statistics on CPU and GPU			
网络名称	可训练 参数个数	CPU环境15个 样本推断时长/s	GPU环境15个 样本推断时长/s
3层CNN	52 195	0.12	0.008 8
7层CNN	229 283	0.51	0.025
编解码结构	1 748 771	0.67	0.030
CNN+RNN	476 195	1.2	1.0
WaveNet	2 715 651	4.5	0.17
7层CNN (RE)	78 758	0.19	0.021
7层CNN (RE, FP16)	78 758	16	0.020
WaveNet (RE)	770 692	2.4	0.17

注：RE代表深度可分离卷积优化，FP16代表16位浮点计算。

持续时间相对较长，而 P 波由于振幅原因容易被噪声掩盖。对于到时提取误差，使用箱形图进行误差分析，结果如图 6 所示。

可见：P 波的到时误差相比于 S 波更小，这并非是因为 P 波在提取过程中误差较大的样本均作为负样本被剔除，但是这导致了较多 P 波未计入统计从而增加了正确提取到时的精度；八个网络中三层网络的精度最低，这与前面的分析类似；RNN 融合模型与 WaveNet 的误

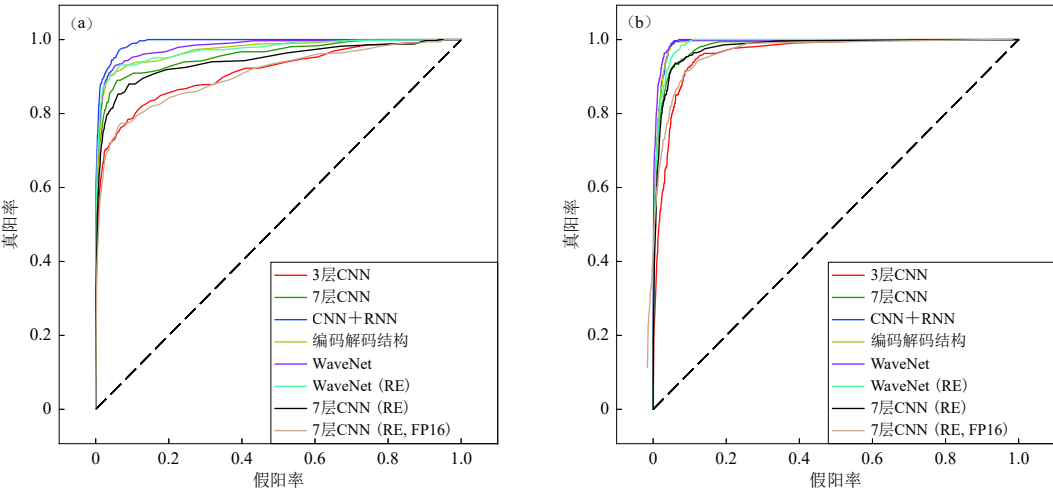


图 5 多个模型对于 P 波(a)和 S 波(b)拾取的受试者工作特征曲线(ROC)

RE 为使用深度可分离卷积代替传统卷积结构，FP16 为网络计算中使用 16 位浮点

Fig. 5 ROC curves of picking P phase (a) and S phase (b) based on eight DNN models

RE stands for separable CNN optimized network, FP16 stands for 16bit floating for computing

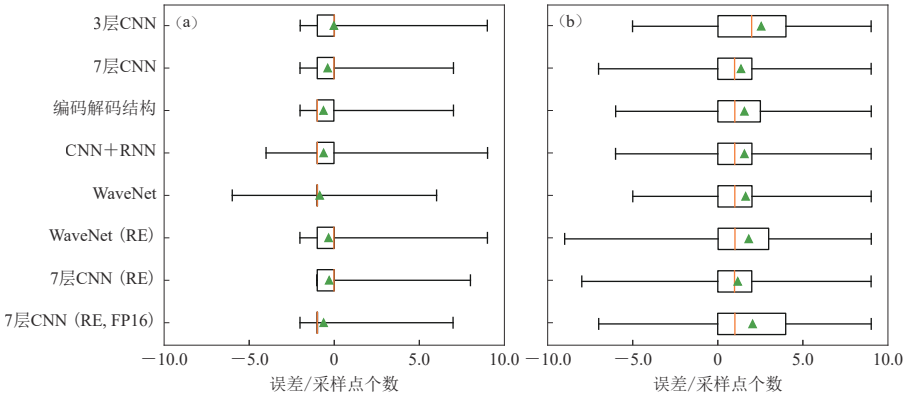


图 6 基于 P 波(a)和 S 波(b)的神经网络模型预测误差统计图

RE 为使用深度可分离卷积代替传统卷积结构，FP16 为网络计算中使用 16 位浮点。箱型图矩形边界为上下四分位数，绿色线条为中位数，三角形为均值，黑色短线为数值边界。矩形上下四分位数越接近，且均值越接近 0，效果越好

Fig. 6 The error statistics of different DNN models on P phase (a) and S phase (b)

RE stands for separable CNN optimized network, FP16 stands for 16bit floating for computing. The box rectangle is the upper and lower quartiles, the green line is the median, the triangle symbol is the mean value, and the black short line is the boundary. The closer the upper and lower quartiles of the rectangle are and the closer the mean is to zero, the better

差相差不大, 经过卷积和浮点精度优化后的七层模型与三层模型的精度相近.

3.4 抗干扰测试

本文选择不同噪声水平对误差进行测试分析. 定义信噪比 SNR 为地震波形的方差与噪声方差之比. 首先选择体波振幅较大的近震波形进行测试, 其网络输出概率如图 7 所示.

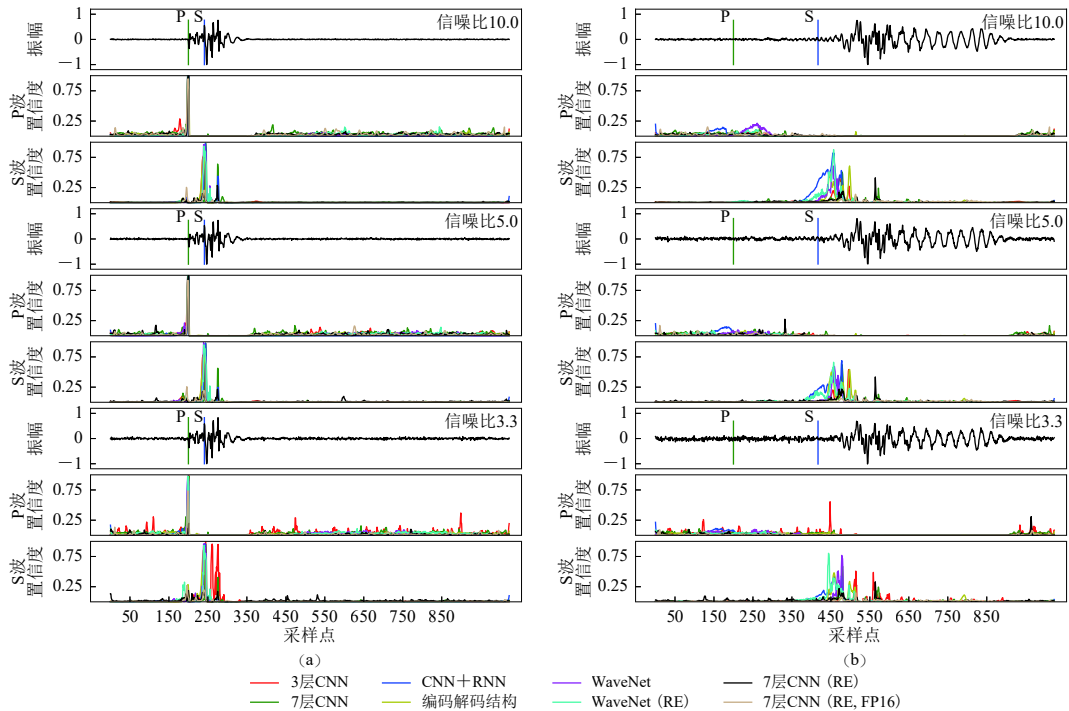


图 7 不同噪声对于模型预测的影响

RE 为使用深度可分离卷积代替传统卷积结构, FP16 为网络计算中使用 16 位浮点

(a) 近震波形分析; (b) 远震 P 波拾取失败分析

Fig. 7 Effect of different noises on model prediction

RE stands for separable CNN optimized network, FP16 stands for 16bit floating for computing

(a) Analysis of near-shock waveforms; (b) Analysis of failures on tele-seismics

由于近震波形中, 体波振幅相对较大, 不同网络对于到时预测均较为准确. 三层网络由于感受野较小, 受到噪声的影响相对更大. 在近震波形拾取过程中三层网络受限于感受野, 仅能覆盖一种波形, 因此将面波部分也识别为 S 波, 且无法综合其它波形判断. 具有较大感受野的卷积神经网络和 RNN 模型对于这些错误则可以有效地避免. 在远震波形测试中, P 波所有概率均未超过 0.25%, 也就是均未拾取成功, 这是因为体波相对较小, 容易被噪声覆盖; 而 S 波拾取相比于 P 波效果较好, 这是因为 S 波不仅振幅相对较大, 同时可以结合面波判断, 此即为具有较大感受野的 CNN 模型和 RNN 模型的优势所在. RNN 模型由于前后文更长(依赖更长), 因此拾取 P 波相比于其它神经网络效果要好. 我们测试 750 个波形并绘制 ROC 曲线进行更细致的分析, 结果如图 8 所示.

由图 8 可以看到: 不同网络本身均受到了噪声的影响, 不同网络对于 P 波拾取均劣于 S 波, 其中三层网络受到噪声影响最大; RNN 在拾取 P 波过程中则表现出了最好的性能, 这

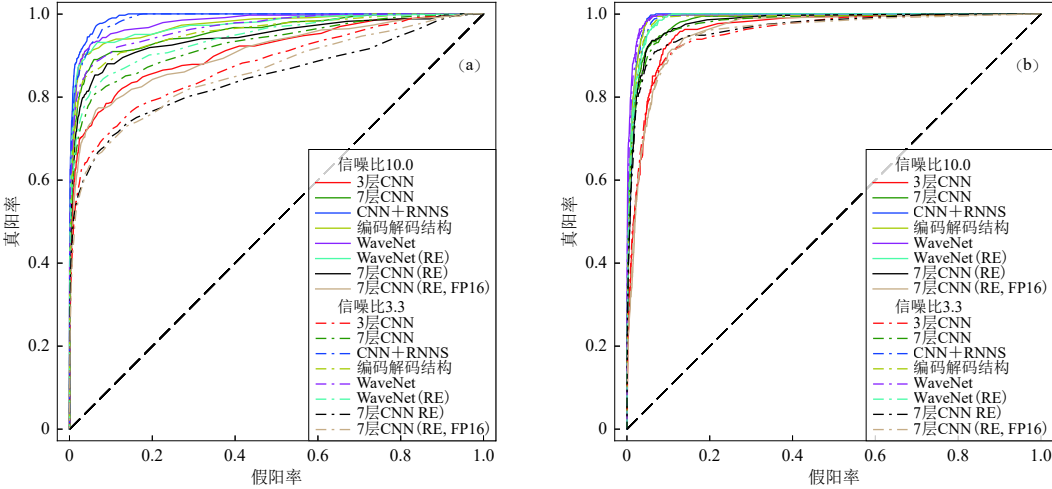


图 8 八个测试模型在不同噪声情况下的 ROC 曲线

ROC 曲线下方面积越大效果越好. RE 代表深度可分离卷积优化的网络, FP16 代表 16 位浮点精度计算结果

(a) P 波拾取的 ROC 曲线; (b) S 波拾取的 ROC 曲线

Fig. 8 ROC curves of eight DNN models with different signal to noise ratio (SNR)

The bigger area under ROC, the better. RE stands for separable CNN optimized network,

FP16 stands for 16bit floating for computing

(a) ROC curve of picking P phase; (b) ROC curve of picking S phase

与前面的分析类似; WaveNet 优化模型的精度降低较少, 这是因为原始模型可训练的参数数量较多; 深度敏感卷积与传统卷积在性能上相差较小; 16 位精度的模型和 32 位精度的模型对于结果影响较小, 因此在对于功耗敏感的场景, 应当选择 16 位精度完成震相拾取. 对于 S 波拾取, 编解码结构、RNN 网络和 WaveNet 在具有大感受野的网络中均可以有效地识别, 结果相差较小, 三层卷积神经网络由于感受野不足对于 S 波拾取错误较多.

4 讨论与结论

多种深度神经网络测试的结果表明 WaveNet 和 RNN 融合模型对于震相拾取的精度相近. RNN 融合模型善于处理时间依赖问题, 使得不同震相在拾取过程中可以互相参考; 而 WaveNet 结构中既有与 GRU 相似的门结构用于特征加权, 又具有较大的感受野能够处理多个震相, 这是二者能够达到相似精度的原因. 在速度对比上, 虽然 CPU 场景下 WaveNet 速度较慢, 但在 GPU 场景下 WaveNet 比 RNN 融合模型快了接近 6 倍, 这使得在经过优化之后的硬件上速度差距会更加明显. 在测试中发现七种 CNN 相比于 RNN 模型均有速度优势, 因此在速度敏感型的场景下应当考虑使用卷积神经网络代替循环神经网络. 文中出现的卷积神经网络模型均是纯卷积结构, 这意味着网络均可以实时推断, 而双向 RNN 由于需要反向输入, 在实现实时检测的过程中会遇到问题. 在不需要精度的场景下, 我们给出了优化的七层卷积神经网络. 这种网络模型参数较少, 可使得半精度浮点情况下的模型大小压缩到 2.0 MB 以内, 从而实现低功耗场景的推断工作, 但这需要硬件设计的配合.

因此在性能和精度兼顾的网络设计过程中, 首先应当考虑卷积神经网络模型, 这是因为该模型在训练速度和推断速度上均具有较大优势. 而实践中由于波形并非无限长, 因此并无

必要考虑无限长的前后文问题. 而卷积神经网络中由于有深度可分离卷积的存在, 可减少模型参数数量, 并进一步减少计算量. 同时, 网络计算精度可以减少至半精度浮点. 经过这种优化后, 模型大小在卷积核心大小为 3 的情况下可以减少至原有的 1/6. 虽然会牺牲部分精度, 但是在低功耗场景还是有利的.

本文的主要结论均是基于通用计算单元的 CPU、GPU 和合成地震波形数据上的测试, 因此无法真正发挥所有优化模型的优势. 在今后的工作中会考虑使用 FPGA 构建专用的计算硬件, 用以加速深度神经网络拾取震相速度, 并降低系统功耗.

文本所使用的网络均是基于单台震相拾取, 可以看到现有网络结构中在满足感受野的情况下均可以获得相近的结果. 这说明对于地震波形的复杂度而言, 不需要使用过于复杂的神经网络结构, 目前 7 层卷积神经网络即可满足需求. 因此, 今后工作中会融合传统的人工构建特征并联合拾取, 这会加快网络拾取速度. 再者, 继续增加网络层数会增加计算代价, 但并未带来精度的明显提升. 鉴于单台检测无法综合其它台站的波形信息, 未来需要结合其它台站预测结果进行震相关联, 以提升单台拾取的精度, 有利于远震震相识别.

参 考 文 献

- 于子叶, 储日升, 盛敏汉. 2018. 深度神经网络拾取地震 P 和 S 波到时 [J]. *地球物理学报*, **61**(12): 4873–4886.
- Yu Z Y, Chu R S, Sheng M H. 2018. Pick onset time of P and S phase by deep neural network[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **61**(12): 4873–4886 (in Chinese).
- 赵明, 陈石, 房立华, Yuen D A. 2019. 基于 U 形卷积神经网络的震相识别与到时拾取方法研究 [J]. *地球物理学报*, **62**(8): 3034–3042.
- Zhao M, Chen S, Fang L H, Yuen D A. 2019. Earthquake phase arrival auto-picking based on U-shaped convolutional neural network[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, **62**(8): 3034–3042 (in Chinese).
- Cho K, van Merriënboer B, Gulcehre C, Bahdanau D, Bougares F, Schwenk H, Bengio Y. 2014. Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation[Z]. arXiv preprint. arXiv: 1406.1078.
- Courbariaux M, Bengio Y, David J P. 2014. Training deep neural networks with low precision multiplications[Z]. arXiv preprint. arXiv: 1412.7024.
- García L, Álvarez I, Benítez C, Titos M, Titos M, Bueno Á, Mota S, De La Torre Á, Segura J C, Alguacil G, Díaz-Moreno A, Prudencio J, García-Yeguas A, Ibáñez J M, Zuccarello L, Cocina O, Patané D. 2016. Advances on the automatic estimation of the P-wave onset time[J]. *Ann Geophys*, **59**(4): S0434.
- He K M, Zhang X Y, Ren S Q, Sun J. 2016. Deep residual learning for image recognition[C]//*Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Las Vegas, NV, USA: IEEE: 770–778.
- Hinton G, Vinyals O, Dean J. 2015. Distilling the knowledge in a neural network[Z]. arXiv preprint. arXiv: 1503.02531.
- Hochreiter S, Schmidhuber J. 1997. Long short-term memory[J]. *Neural Comput*, **9**(8): 1735–1780.
- Howard A G, Zhu M L, Chen B, Kalenichenko D, Wang W J, Weyand T, Andreetto M, Adam H. 2017. Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications[Z]. arXiv preprint. arXiv: 1704.04861.
- Hu L L, Zheng X D, Duan Y T, Yan X F, Hu Y, Zhang X L. 2019. First-arrival picking with a U-net convolutional network[J]. *Geophysics*, **84**(6): 1–58.
- Ioffe S, Szegedy C. 2015. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift[Z]. arXiv preprint. arXiv: 1502.03167.
- LeCun Y, Bottou L, Bengio Y, Haffner P. 1998. Gradient-based learning applied to document recognition[J]. *Proc IEEE*, **86**(11): 2278–2324.
- Maass W. 1997. Networks of spiking neurons: The third generation of neural network models[J]. *Neu Networks*, **10**(9): 1659–1671.

- Ronneberger O, Fischer P, Brox T. 2015. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]//*International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*. Munich, Germany: Springer: 234–241.
- Ross Z E, Meier M A, Hauksson E. 2018. P wave arrival picking and first-motion polarity determination with deep learning[J]. *J Geophys Res: Solid Earth*, **123**(6): 5120–5129.
- Rumelhart D E, Hinton G E, Williams R J. 1986. Learning representations by back-propagating errors[J]. *Nature*, **323**(6088): 533–536.
- Sandler M, Howard A, Zhu M L, Zhmoginov A, Chen L C. 2018. MobileNetV2: Inverted residuals and linear bottlenecks [C]//*Proceedings of the 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Salt Lake City, UT, USA: IEEE: 4510–4520.
- Schuster M, Paliwal K K. 1997. Bidirectional recurrent neural networks[J]. *IEEE Trans Signal Process*, **45**(11): 2673–2681.
- van der Baan M, Jutten C. 2000. Neural networks in geophysical applications[J]. *Geophysics*, **65**(4): 1032–1047.
- van den Oord A, Dieleman S, Zen H G, Simonyan K, Vinyals O, Graves A, Kalchbrenner N, Senior A, Kavukcuoglu K. 2016. WaveNet: A generative model for raw audio[Z]. arXiv preprint. arXiv: 1609.03499.
- Zeiler M D, Krishnan D, Taylor G W, Fergus R. 2010. Deconvolutional networks[C]//*2010 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Francisco, CA, USA: IEEE: 2528–2535.
- Zhang K P, Zhang Z P, Li Z F, Qiao Y. 2016. Joint face detection and alignment using multitask cascaded convolutional networks[J]. *IEEE Signal Process Lett*, **23**(10): 1499–1503.
- Zhao Y, Takano K. 1999. An artificial neural network approach for broadband seismic phase picking[J]. *Bull Seismol Soc Am*, **89**(3): 670–680.
- Zhou Y J, Yue H, Kong Q K, Zhou S Y. 2019. Hybrid event detection and phase-picking algorithm using convolutional and recurrent neural networks[J]. *Seismol Res Lett*, **90**(3): 1079–1087.
- Zhu W Q, Beroza G C. 2018. PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method[J]. *Geophys J Int*, **216**(1): 261–273.