

NETRCA: 一种有效的网络故障原因定位算法

一、论文基本信息

论文 *NETRCA: AN EFFECTIVE NETWORK FAULT CAUSE LOCALIZATION ALGORITHM*

作者 *Chaoli Zhang , Zhiqiang Zhou , Yingying Zhang , Linxiao Yang , Kai He , Qingsong Wen , Liang Sun.*

二、项目背景

这篇论文是 ICASSP 2022 5G 网络故障根因定位挑战赛中，阿里达摩学院的第一名论文。ICASSP 全称 International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. 即国际声学、语音与信号处理会议，是由 IEEE 主办的全球最大、最全面的信号处理及其应用方面的顶级会议。本次 5G 网络故障根因定位挑战赛是由香港中文大学（深圳）-深圳市大数据研究院-华为未来网络系统优化创新实验室在 ICASSP 2022 会议上组织进行的。

举办本次挑战赛的目的是为了集结业界各人才的智慧，集思广益，着力应对 5G 新技术架构的引入和业务场景的多样性给智能化网络运维（AIOps）所带来的新的挑战。早在 2016 年，Garter 公司就提出了 AIOps（Artificial Intelligence for IT Operations）的概念，AIOps 是人工智能和运维的结合，主要的思想就是基于系统中已有的运维数据，包括工作日志、监控信息、应用信息等大数据，通过机器学习的方式来解决，提升运维能力。目的就是为了解实现运维的无人化、完全自动化。AIOps 的应用范围很广，其中便包括了在根因分析方面的应用。AIOps 基于机器学习的故障树挖掘，定位故障发生的根源以及其原因。首先实现故障精准定位，在多指标情况下的业务异常，出现异常的原因具体是哪个指标导致的；然后根据故障树挖掘和知识图谱，实现故障的精准根因分析与定位。

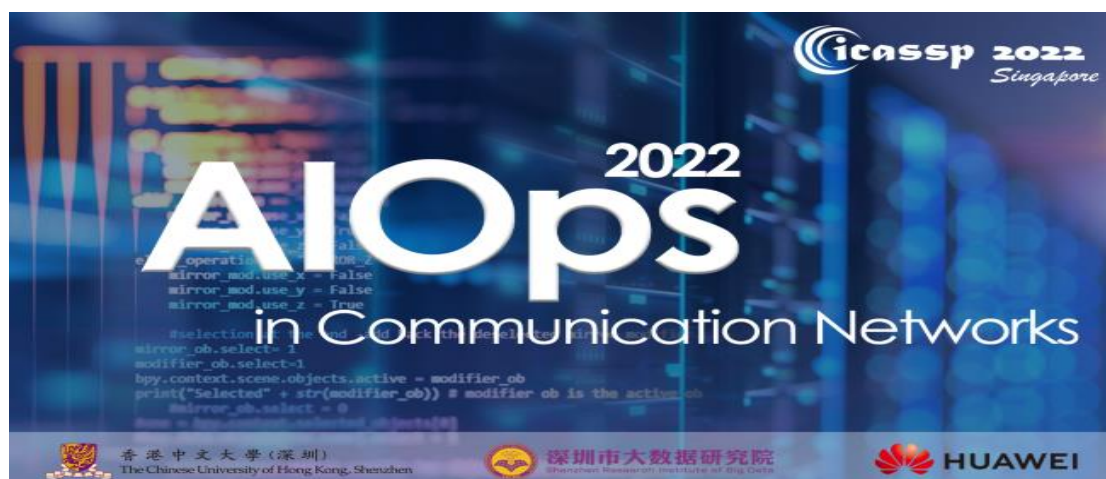


图 1 挑战赛

AIOps 在网络运维中发挥的重要作用显而易见，而在 5G 网络的新架构与新的业务场景之下，无线通信系统和网络部署极为复杂，当我们对网络故障进行根因定位时，会遇到网络故障样本的缺少以及在多种应用场景下故障的表征不同等问题，这使得我们在使用 AIOps 技术时，缺少统计学习的数据，算法也就不能很好地收敛，智能化运维的收到极大的挑战。

三、赛题描述

对于网络运维来说，定位网络故障根源是极其重要的一步。当我们能够灵活准确地识别故障的根本原因时，就能够及时迅速地采取措施对核心问题进行修复，同时也能节省大量的运营费用。但现如今无线通信网络环境与网络架构错综复杂，在缺乏良好标记的样本、数据容易丢失的情况下，如何充分运用专业知识与小部分标好的数据，诉诸数据分析与机器学习进行自动化网络运维，是目前网络运维面临的重大挑战。

本次赛题着重解决的就是网络故障的根因定位，其难点在于如何根据变量之间的影响程度来确定主要的影响因素，从而推导出导致当前故障的主要原因。也就是说，能否正确衡量变量之间的关系是根因定位的关键所在。

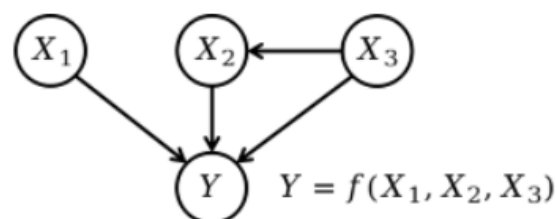


图 2 关系简图

如上图所示，Y 变量受到 X1、X2、X3 的影响，当 Y 发生故障时，我们就需要分析 X1、X2、X3 中哪一个因素对 Y 的影响最大，从而推断出故障的主要原因。难点在于在网络运维中，这样的关系是错综复杂的，而目前所有因素间的影响程度依赖于专家经验，灵活性较低，同时由上图可以看到，Y 受到 X1、X2、X3 的影响，而 X3 也影响了 X2，因此我们在考虑 X2 对 Y 的影响时，不得不将 X3 对 X2 的影响也考虑在内，采用独立判断的原则是容易使故障分析陷入误区的，要进行联合考虑。

本次比赛为参赛选手提供了变量之间的关系参考图（见图 3），希望参赛选手根据给出的关系图，结合比赛提供的数据集，编写程序，对多个不同场景下的模型进行分析，得出故障的主要原因。

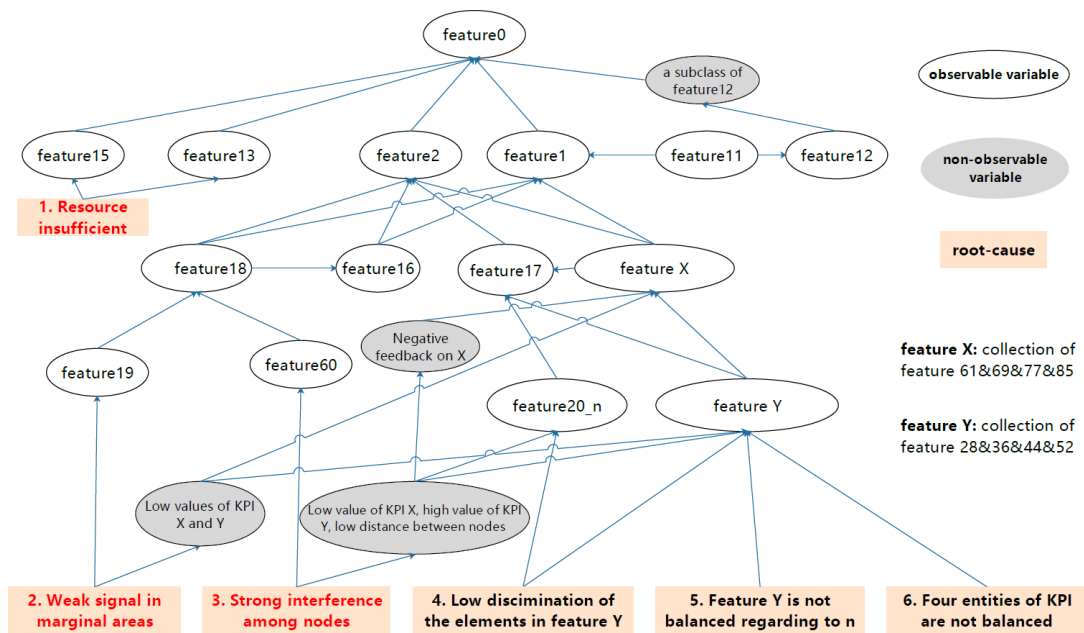


图 3 因果关系图

图中 feature0 是我们关注的重点，电信网络中 feature0 偏低一直是客户关心的问题，本次比赛就是要解决 feature0 值偏低的根因定位问题，在已知 feature0 的值小于 200 的情况下，需要根据图中提供的关系，通过分析影响 feature0 的各种因素，从而找到其值偏低的原因。图中每个 feature 可以看做电信网络中一个关键绩效指标（KPI），这些 KPI 的取值会随时间而变化并且相互影响。图中无颜色的表示可以采集观测到的数据，灰色代表不可预测的中间计算变量，方框表示对根因的描述。Feature0 表示用户关心的结果变量。

本次比赛提供的数据集包含 2984 个样本，每个样本为来自不同的 5G 路测场景的长度不固定的时间片段，其包含 23 个可观测特征变量（图 3 无色椭圆形）在该时间片段内随时间变化的信息。在这 2984 个样本中，只有少数数据（45%）是标注根因的已知异常数据，其余数据未知。

四、论文主要思想/实现方法

这篇论文提出了一种名为 NetRCA 的新算法，首先通过考虑时间、方向、属性和交互特征等因素从原始数据中提取有效的派生特征。其次，采用多元时间序列的相似性和标签传播的方式，从标记和未标记的数据中生成新的训练数据，以克服标记样本缺乏的难题。最后，为了充分利用所有数据信息并提高性能，结合 XGBoost、规则集学习、归因模型和图算法设计了一个集成模型。在 ICASSP 2022 AIOps Challenge 的真实数据集进行实验和分析后，证明了改算法的优越性和有效性。

NetRCA 算法由 3 个主要部分组成，包括特征工程、数据增强以及模型集成。框架图如图 4 所示。

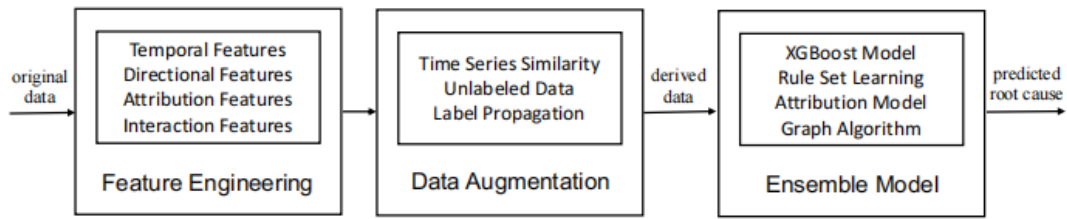


图 4 NetRCA 算法框架图

(1) 特征工程

这一部分的主要工作，就是从样本中提取四类特征来训练算法的模型，包括时间特征、方向相关特征、归因特征和交互特征。

其中时间特征指的是基于数据统计的每个时间戳的数据，比如平均值、最大最小值等。方向相关特征描述的是在 5G 网络中采用的 MIMO 和波束赋形中，波束形成的方向和每个节点之间的距离。归因特征通过分析因果关系图得到，由前面的概述我们可以知道，这些根因导致了 feature0 值偏低，也就是说，真正的根因及其衍生的后代会在 feature0 的当前值上发挥比其他根因更明显的作用，那么我们可以生成一个新的 feature 来作为每个特征在预测 feature0 上的重要性分数的估计。交互特征指的是生成 X 与 Y 的二阶交互特征，由关系图我们可以看到，feature X 与 feature Y 与某些位置因素密切相关，生成一个 X 与 Y 的交互特征来衡量这些未知因素的影响。

(2) 数据增强

论文提出，要解决标记样本缺乏的问题，可以通过采用多元时间序列的相似性和标签传播的方式从标记和未标记的数据中生成新的训练数据，以此对训练样本个数进行扩容。

为了测量不同长度的多元时间序列之间的相关性，应用 Eros (Extended Frobenius norm) 算法来计算相似度。Eros 通过使用主成分并基于特征向量计算相似性来扩展 Frobenius 范数。通过 Eros 算法得到两个训练样本之间的相似性，通过从那些与标记数据相似度高的未标记数据中选择样本来丰富训练集，并根据与它们相似的训练样本的真正根因进行标记。

除了根据时间序列的相似度来进行数据增强，传播具有相似时间戳的训练样本的根本原因标签也是一种重要的方法。按照所有训练样本的时间戳对齐了

所有的训练样本，并将它们的真实标签作为所有根本原因标签的联合集进行了扩充。

(3) 模型集成

NetRCA 算法采用集成化的模型来预测根因，由 XGBoost 获得初始结果，结合规则集学习、归因模型、图算法对结果进行细化获得最终结果

1) XGBoost

回顾本次的赛题，我们可以发现寻找正确的根因其实可以看做分类问题，也就是区分引起 feature0 变化的因素属于哪一类根因。由于 XGBoost 拥有良好的性能，论文中应用其作为模型基础。XGBoost 是华盛顿大学博士陈天奇创造的开源框架，它是一个优化的分布式梯度增强库，在梯度提升 (Gradient Boosting) 框架下实现机器学习算法。XGBoost 提供并行树提升，可以快速准确地解决许多数据科学问题。树提升是一种高效且广泛使用的机器学习方法。XGBoost 是可扩展端到端树增强系统，该系统被数据科学家广泛用于在许多机器学习挑战中实现最先进的结果。

2) 规则集学习

前面提到，我们将要解决的问题看做分类问题，而构建一个功能强大的分类器要面临的一个挑战就是特征交互，也就是某些特征值相互影响时产生的交互，也就对应了我们要解决的通信网维护问题中各种复杂因素之间的相互影响。决策规则集由一组特定的逻辑规则组成，可以很好地处理特征交互。

3) 预测归因模型

在图 3 所示的因果关系图中，我们可以利用节点之间的相互关系来估计一个 feature 的重要性，它所衡量的是将这个 feature 加入到因果图后获得的收益。直观来说，上游（更靠近 feature0）的节点的异常数据会使 feature0 的值产生很大的变化，这可以帮助我们确定真正的根因。将前面提到的“一个 feature 的重要性”作为一个新的特征 (feature)，集成到模型中进行训练。

4) 图算法

论文提出一种基于单变量时间系列相似性的专用图算法，具体来说就是利用主流的 PageRank 算法来分析所给的因果关系图。主要思想是从 feature0 开始，基于相似度分数对因果关系图进行随机游走。

五、实验结论

下表显示的数据中，前 3 列表示模型在属于每个根本原因（根因 1、2 和 3）的训练集上的性能准确性，而第四列表示在测试数据上的性能准确性。

Table 1: Ablation studies of the proposed NetRCA model.

Models	Root1 acc	Root2 acc	Root3 acc	Final Score
XGB	0.9828	0.97849	0.9957	0.78139
XGB+FE	0.9957	0.97849	0.9914	0.86611
XGB+FE+Graph	0.9957	0.97849	0.9914	0.87917
Proposed NetRCA	0.9957	0.98495	0.9914	0.91778

从上表可以看出所有 4 个模型在训练集中都展现了出色的准确性，但最终的测试结果说明，训练与测试数据的分布之间存在一定的差距。

前三个消融模型展示了不同程度的过拟合，也就是在训练集与测试数据得到的结果存在较大差距，这也说明了训练数据，也就是能够提供的有良好标记的样本比较少。同时，我们也看到，NetRCA 算法在防止过拟合方面提供了比较稳健的解决方案，过拟合的程度有所降低。

注意到图算法的加入没有使训练集数据得到改善，但最终的结果准确性提高了 1% 以上，这也说明图模型可以帮助我们更好地处理各种 feature 之间的因果关系。

特征工程和图模型对于根因 2 的准确性看起来没有什么影响，这是因为属于根因 2 的样本很少，另一个原因是根因 2 与其他根因同时存在，会影响根因 2 的判别。但从表中可以看出，NetRCA 的数据增强部分可以解决数据样本缺少的问题，规则集学习以及归因模型减少了各种特征之间的相互影响，进一步提高了模型的性能。

补充说明一下该表格展现的性能比较使用的方法 ablation study（消融研究）。简单来说，这是一种控制变量的研究方法。比如为了提升 baseline 的性能，给它加了两个模块 A, B，加完之后效果果然提高了很多，但是尽管 AB 同时加上对模型有提升效果，但是并不能证明 A、B 两个模块分别都是有意义的。所以为了验证 A、B 两个模块是不是真的都有用，则需要做 ablation study。

- (1) 在 baseline 的基础上加上模块 A，看效果
- (2) 在 baseline 的基础上加上模块 B，看效果
- (3) 在 baseline 的基础上同时加上模块 AB，看效果

结果可能是，实验 1 和实验 2 的结果都不如实验 3，那么说明 AB 都是有用的；可能会发现实验 1 的结果和实验 3 一样，甚至更好。这就说明模块 B 其实并没有起到作用，提升只来自于模块 A。

综上所述，ablation study 就是在同时提出多个思路提升某个模型的时候，为了验证这几个思路分别都是有效的，做的控制变量实验的工作。

六、感想

终于写到最终的感想与体会，回过头发现自己已经洋洋洒洒码了 4000 个字，其实很多都是在介绍我之前不了解的知识以及阐述论文的主要实验方法，并没有全部都看懂。因为关于机器学习的内容，还是很硬核的，并不是一时半会可以理解的。我所做的就是基本知道论文在讲什么，为什么要做这个研究，要实现怎样的目标，实现这个目标需要做什么努力，最终达到了什么效果。

为了看懂一篇全英文的论文，还是这样硬核的内容，我决定先看看这个比赛的简介，了解了相关的背景，才知道论文到底在讲啥。把比赛的相关资料看明白之后，也提高了阅读的速度，根据比赛的相关资料，有疑问，有目标地去阅读，就觉得整个论文的整体框架都非常清晰，根据想知道的去看就好，比如论文所提到的算法究竟是怎样，或者是最终的预测结果是啥，都一目了然。比如我读到最后，看到结果的性能比较那部分，感觉通篇有点难懂，有点不知道它想表达什么，就再返回去看了一眼赛题的相关要求，就明白了最终要实现怎样的目标，输入输出是啥，要进行怎样的比较，就能够看懂文章内容了。所以一句话总结就是读了比赛的简介，就读懂了一半的论文，要有目的地去阅读。

这篇文章我并没有完全读懂，因为知识的储备不足以支撑我去真正读透它。但我觉得写这个阅读报告的目的，并不单单是为了写一份老师交代作业，也没有要求我自己把这个论文完完全全研究透彻，更多的是自己在进行专业论文阅读时的一份笔记，里面记录了一些之前我并不了解的知识，比如 AI0ps，比如 XGBoost，都是在网络运维领域中很普遍的常识，但对我我这样的外行人来说，难免有些不知所云。

所以说，尽管这篇论文的阅读报告我可能写得不够好，内容有很多，看起来有点杂，但这都是从我的角度去写的，是我对这篇论文内容的一个理解和总结，而我从中也收获了很多，了解了自己从未涉及的领悟，磕磕绊绊把一篇英文文献读完，收获满满。

总的来说，读完这篇论文，深感自己的专业能力不够硬，里面的很多知识我还没有完全理解，还需要努力，多多阅读，提升自己。

参考资料

- [1] 知乎文章 <https://www.zhihu.com/question/430000480>
- [2] 百度文章
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1724093317160506239&wfr=spider&for=pc>
- [3] 竞赛官网简介 <https://www.aiops.sribd.cn/home/statement>
- [4] 黄伟. 基于机器学习的 AIops 技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [5] 知乎文章
https://zhuanlan.zhihu.com/p/142437971?from_voters_page=true
- [6] 陈天奇博士论文 <https://arxiv.org/pdf/1603.02754.pdf>
- [7] 知乎文章 <https://www.zhihu.com/question/60170398/answer/673961942>