



群集运动引发的智慧网络发展思考：情景网络

邬江兴，胡宇翔，李玉峰

(国家数字交换系统工程技术研究中心，河南 郑州 450002)

摘要：探寻面向用户体验的互联网资源全局协调控制之道，是当前网络智慧化发展亟待解决的难题。从自然界群集运动中获得启迪，提出一种基于节点自我感知、自主决策、自动调整的智慧网络全域资源协调拟合方案——情景网络，给出了情景网络的基本概念，讨论了情景感知建模、情景拟合决策以及业务自适应承载等核心机理，为智慧网络发展提供了一种可能的解决思路。

关键词：智慧网络；情景网络；群集运动；智慧拟合

中图分类号：TP393

文献标识码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018174

Thinking of the smart network development caused by collective motion: situational-section fitting network

WU Jiangxing, HU Yuxiang, LI Yufeng

National Digital Switching System Engineering and Technological R&D Center, Zhengzhou 450002, China

Abstract: Exploring the way of global coordinated controlling of internet resources for the consistency of user experience, is a difficult problem to be solved urgently in the development of smart network at present. Inspiration was got from the natural collective motion, and a coordinated fitting scheme of globe-domain resources based on node self perception, autonomous decision and automatic adjustment——situational-section fitting network (SiFiNet) was proposed. The basic concept of situational network was given, and the core mechanisms of scene perception modeling, scene fitting decision and service adaptive loading were discussed, which provided a possible solution for the development of smart network.

Key words: smart network, situational-section fitting network, collective motion, smart fitting

收稿日期：2018-03-20；修回日期：2018-05-09

基金项目：国家自然科学基金创新研究群体项目 (No.61521003)；国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (No.2015AA016102)；中国工程科技中长期发展战略研究项目 (No.2016-ZCQ-04)；上海市科学技术委员会科研计划课题 (No.16DZ1120503)；河南省科技攻关计划课题 (No.162102210034)

Foundation Items: The Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (No.61521003), The National High Technology Research and Development Program (863 Program)(No.2015AA016102), The Medium and Long-Term Development Strategy Research of National Engineering Science and Technology of China (No.2016-ZCQ-04), The Program of Shanghai Science and Technology Committee (No.16DZ1120503), The Program for Science and Technology Development of Henan Province (No.162102210034)



1 网络智慧化的背景、目标与面临的问题

随着信息通信网络技术的不断发展,互联网已成为与国民经济和社会发展高度相关的重要基础设施,对提高社会生产力、助推经济社会转型升级、创造新的经济增长点与就业机会等具有深远影响。互联网在当前社会中扮演的角色日益增多,多元化终端类型、接入方式不断发展,人一人、人一机、机—机、网—网通信等成为常态,要求网络必须为海量业务提供多元、个性、高效等服务。

然而,现有互联网的数据传输、资源管理和运行维护方式僵化,其单一固定甚至基于人工的配置管理和调度等机制已无法满足网络快速发展带来的泛在用网场景需求,导致网络复杂性倍增,运行与维护开销巨大。同时,现有用于刻画网络功能、性能等的模型和评价体系及由此构建的资源提供和业务承载方法均面临深刻变化,使得网络效率低下、用户体验差^[1]。

如何使互联网具备面向泛在用网场景的智慧化“无人驾驶”能力,在结构优化、资源配置、功能管理与业务承载等方面逐渐摆脱对人力或僵化运行机制的一味依赖,充分吸收和利用人工智能、大数据分析等技术的发展成果,提升用户体验,降低网络运行和维护成本,同时使得网络具备自我优化能力,改善因为人对复杂网络环境的认知局限造成的服务体验差和运营效率低等不利局面,引导传统简单、粗放的网络资源管理和运营模式升级,已成为当前信息网络技术发展的重要趋势^[2,3]。

网络智慧化的目标是借助人工智能等技术的蓬勃发展以及网络资源的性能提升与广泛普及,以网络传输效能、节点运行效能、业务承载效能和服务提供效能等为约束,在结构优化、资源配置、功能管理与业务承载等方面进行智能控制并自我优化,使网络具备面向泛在用网场景的智慧化“无人驾驶”能力^[4,5]。此时,用户将不再关注

“用网过程”和“用网体验”的问题,而是将其归结为简单的“用网目的”二元问题。网络自主地根据用户的“用网目的”决定网络资源的配置方案和服务提供方式等,并智能动态适应用户需求的变化,在数以亿计的用户、网元和业务之间进行适配协调,使得网络不仅使用便捷而且用户无感,从而在根本上为各种类型和各种层次的业务提供多元、个性、高效的服务。

现有互联网以分布式通信为理论基石,在此基础上构建了以传输协议、转发方式和路由控制三大基线技术为基础的互联网核心技术体系^[6]。基于分布式网络获得的高度可扩展性和顽健性优势是互联网取得巨大成功的原因之一。然而,受限于广域分布式网络环境下网络计算、感知等能力,全局化的网络视图获取以及优化决策等一直无法实现,网络智慧化难以发挥预期效果。同时,广域网络知识的表示和利用、规模化组织、知识传递等问题依然未能得到有效解决。如何在分布式互联网中引入智慧化机制设计,探寻面向用户体验的互联网资源全局协调控制之道,是当前网络智慧化发展亟待解决的难题。

2 来自生物界的启迪: 群集运动

群集运动是自然界中常见的现象,如编队迁徙的鸟群、结队巡游的鱼群、协同工作的蚁群、聚集而生的细菌群落等^[7,8]。群集运动的共同特征是一定数量的自主个体通过相互合作和自组织,在集体层面上呈现出有序的复杂协同运动和行为等“群体智能”,表现出确定的集体“意向”或“目的”。这种集体合作能够使生物群体在觅食生存、逃避天敌等方面获得单独个体所难以实现的优势,完成复杂的运动任务。

图1所示为沙丁鱼的群集运动现象。沙丁鱼通过感知水流、温度等环境信息以及邻居状态的变化,个体自主变化并最终使得群体形态发生适应性变化;在遭受威胁时,仍能形成大规模有序

的群集运动。图2所示为棕鸟的群集运动现象，成千上万只棕鸟在空中集体行动，根据需要时而汇集时而散开，少数个体在发现觅食地或掌握归巢迁徙路线时，可引导整个群集向指定方向行动。

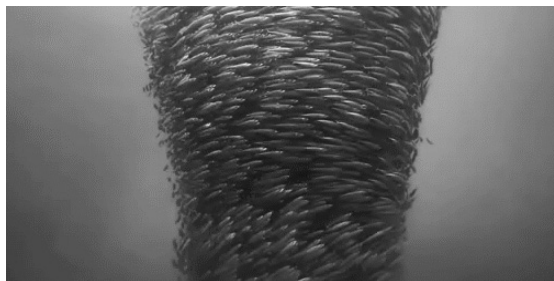


图1 沙丁鱼群集运动现象



图2 棕鸟群集运动现象

群集运动这种高度协调且有序的集体运动模式内在机制如下。

首先，群体系统在结构上具有“个体动态+通信拓扑”的特点。群体系统的整体运行动力由个体的动态和个体间的通信拓扑所决定，系统中个体之间通过局部信息交换相互作用，调整自身动态行为：组成群体系统的每个个体都具有一定的自主能力，包括一定程度的自我运动控制、局部范围内的信息传感、处理和通信能力等；同时，由于个体的自主运动和局部信息传感能力，当个体间进入或离开彼此的传感区域和通信范围时，它们之间的关联特性会发生改变，从而导致整个系统的通信拓扑结构随时间不断变化。

其次，群体系统的运行动力是由简单的个体行为规则和局部交互信息产生的。从自然界中的种种群体现象来看，群体行为完全可以在简单个体行为的基础上，通过系统的自组织而实现全局

有序收敛，不会出现“撞击、踩踏”等现象。群体中的每个个体都遵循相同或相似的简单运动规则，这些规则通常只规定个体如何根据所获得的局部信息做出相应的基本反应，而与群体运动行为或目标一般并无直接的关系。群体行为是所有个体通过关联合作而涌现出的自组织运动，不同的关联方式会产生不同的群体行为。

最后，群体系统协调控制的基本任务是实现期望的系统构形和整体运动方式，如以确定的队形按照预期的速度和方向前进，进而完成躲避攻击、寻找食物、长途迁徙等任务。实际群集中的个体是完全独立和自主的，它们执行运动决策和状态更新时会受到视线遮蔽、自身信息处理能力局限等因素的影响，个体对于邻居状态的了解是不全面的，加之行为决策的随机性或动作执行误差等不确定性因素的存在，必然导致个体的实际运动协同过程具有很强的随机性。因此在特定任务（如躲避攻击等）下，除了个体之间的相互作用规则外，有时需要赋予某些“需求”最强烈的个体以特殊的规则和信息，引导群体完成任务。

综上所述，生物界的群集运动现象带来的启示可以总结为以下4个方面：

- 群集行为本质上是群体内相邻个体间的信息交互并自主变化，从而实现群体形态变化的过程；
- 个体需具备基本的智能属性，即感知、决策和执行；
- 即便个体资源有限、智能有限，群体依然能够实现全局有序收敛，不会出现“撞击、踩踏”等现象；
- 个体的调整结果向邻域的传递效应表现出几何级传递规模、爆炸式传递速度特性，使整体快速收敛。

当前，生物界群集运动已经在人类社会中有初步实践和应用，典型案例就是无人驾驶汽车技术：个体车辆通过感知周围状态、实时分析决



策实现实际的加速、拐弯、刹车等动作调整,完成车辆个体的自动驾驶,而所有车辆完成感知、决策到调整 3 步过程后,将实现整体交通系统的高效、有序行驶。

生物界群集运动给智慧网络发展带来了启迪:能否在分布式网络中导入群集运动模式,在网络节点之间建立简单的协作机制,使互联网具备面向泛在用网场景的智慧化“无人驾驶”能力,在结构优化、资源配置、功能管理与业务承载等方面具备自我优化能力,改善因为人对复杂网络环境的认知局限造成的服务体验差和运营效率低等不利局面。

3 情景网络的基本概念

将群集运动应用到互联网需要满足 3 个条件:第一,网络个体间需要进行信息交互并根据交互信息自主决策;第二,网络个体需要具备基本的智能属性,即感知、决策和执行;第三,网络个体按照某种一致性规则相互作用,且节点状态随着时间演化而趋于一致。

本文从自然界群集运动获得启迪,提出一种基于节点自我感知、自主决策、自动调整的智慧网络全域资源协调拟合方案——情景网络(situational-section fitting network, SiFiNet),网络节点感知邻域节点及自身状态(情景),采用数学拟合方法对感知的情景进行分析并依据给定的规则形成决策,驱动柔性网络资源执行相应调整,并将这种机制向邻域扩散,自动实现全网域范围内的群体目标一致性,在无业务模型条件下改善全网域用户端到端体验并提升资源利用率等。图 3 和图 4 表示群集运动中生物个体之间交互模式和情景网络中网络个体之间交互模式的类比关系,鸟类个体感知邻居的位置为 $X_{i,j}$,依据 $X_{i,j}$ 和自身位置 X_i 进行自身位置调整,实现规模有序的群体移动;相似地,情景网络中的智能节点感知邻居节点的带宽资源 $X_{i,j}$,依据 $X_{i,j}$ 和自身情况 X_i 进行流量调整,实现全网域流量均衡。

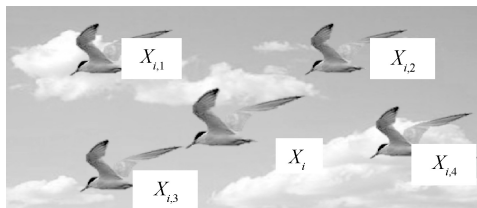


图 3 群集运动交互模式

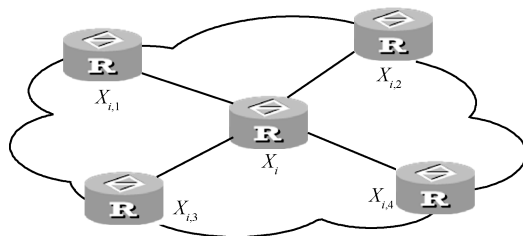


图 4 情景网络交互模式

情景网络是一种由情景拟合驱动网络资源自适应分配的智慧网络,其在给定分布式网络资源和拓扑关系条件下,使得网络资源依据不同业务的暂态需求而自适应分配,在时/空两个维度上进行细粒度逼近式情景拟合,进而驱动网络以柔性变化的内在结构和虚拟化的资源管理等手段实现网络服务能力与业务客观要求尽可能相匹配的效果,即使没有精确的业务或服务分布模型,情景网络也可以通过部署有限数量“情景拟合自动驾驶”网元节点达成“资源利用率和服务质量优化”之目标。

结合当前网络智慧化发展的需求和制约,情景网络借用群集运动思想,基于复杂网络控制、群体动力学、混沌运动与混沌控制等领域的丰富理论研究成果,提出分布式网络协作解决之道,实现网络节点的智慧表达、感知—决策—执行和端到端时延保障的一致性模式,改变 Internet 尽力而为的标准服务模式,实现全网域、端到端范围内网络服务自动优化。情景网络并不是对现有互联网架构“推倒重来”,而是通过增量式添加节点决策协议和节点间感知协议等“基因修补”方式,为互联网引入分布式协调的新基因,实现基于服务体验的网络资源自动协调与优化目标。

4 情景网络核心机理

为实现网络服务能力与业务客观要求相匹配的效果,对于分布式网络中的每个智能网络节点,需要通过感知邻域节点及自身的情景、分析情景形成决策并按照决策对网络资源执行相应调整。在此以群集运动的一阶连续一致性模型为例进行网络带宽调整,如图5所示,其中 ρ_i 表示节点 i 的带宽资源, $\rho_{i,j}$ 表示周围个体的带宽资源, r_{ij} 表示个体间的期望参数, α_{ij} 为权重参数。节点感知邻居节点的带宽资源,按图5中所示决策函数进行运算,做出接近期望值的决策并执行,以实现带宽均衡的目的。

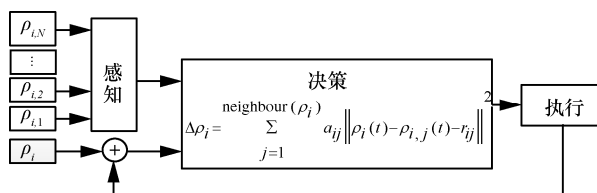


图5 智能网络节点工作流程

情景网络的核心机理主要包括情景感知建模、情景拟合决策和业务自适应承载3个方面,具体介绍如下。

4.1 情景感知建模

在情景网络中,情景是复杂不确定的,感知对象是时变多样的,要求各智能网络节点能够根据相应的感知对象来执行感知动作。为了明确各类感知对象和感知动作在情景网络中的物理意义,需要建立合理的模型来估计、刻画网络业务和资源分布特征的变化规律。其中网络资源模型表示网络中当前的资源使用情况,是建立在计算、存储和传输资源基础上的网元功能的资源描述,详细说明每个节点所支持的功能和受到的约束;网络业务分布模型则指根据网络中情景片段的流量特征所划分的业务种类、业务的分布以及业务的资源需求,实时、准确和完备地描述业务向量特征。通过对网络中的所有资源向量以及网络支

持的各种业务向量进行有效的建模和划分,为情景拟合驱动的网络传送能力和智慧化管理能力提供支撑。

4.2 情景拟合决策

情景网络通过情景拟合的方式在业务和网络之间形成决策闭环,实现网络的柔性组织,最大程度地弥合网络资源与业务需求之间的时变鸿沟。情景网络的情景拟态决策过程本质上就是复杂网络的协同控制决策,其拟合收敛能力仅与个体能力和个体间耦合强度有关。在协作完成共同任务的过程中,各个独立的智能体要不断地与局部环境、其他智能体进行交互作用,通过这种交互作用进行复杂协作行为的动态演化,最终实现共同的目标。这是一个包含局部的和全局的复杂交互作用、涌现群体智能的复杂过程。互联网是一种典型的无标度网络,因此情景网络只需要在传统分布式网络中增量部署少量的网络智能节点即可体现出基于用户体验的网络资源全局协调控制和全网服务的整体优化。

情景拟合决策具有3个重要性质:渐变跟随,动态适应网络应用的传送要求并保证网络资源效率之间的一种折中,屏蔽业务特性在小时间尺度上的天然随机波动,基于服务效果对服务需求进行稳定偏离的资源调整;自主驱动,情景网络自主驱动网络资源管控,以符合应用要求和服务效果之间固有动力学规律的自然方式,有效把握资源改变的时间、空间尺度,实现业务网队暂态情景的最佳拟合,形成自主反馈、循环控制结构;聚类拟合,情景网络对业务进行聚类拟合,使得网络资源调整只针对特定的目标业务类,而不影响其他任何非目标业务类的服务效果。

4.3 业务自适应承载

情景网络的业务自适应承载体现在节点和网络两个层面。

在节点层面,情景网络从网元结构对业务需求的适应性出发,建立基于统一资源描述的网元



模型和网元功能集合,通过网元功能的组合和映射实现网元的高效灵活设计;同时,智能节点采用转发与控制分离机制、柔性重构机制和功能组合机制,增强网元的业务适应性和可扩展性,使其具有柔性组织能力和持续演进能力。情景网络通过设计可重构的报文解析器和细粒度可组合的元处理单元,实现对数据报文解析—匹配—执行处理流程的全可编程;同时,情景网络支持服务差异化定制的复杂情景拟合多模式数据转发,支持网络资源安全隔离机制和高效分配,从而获得对网元资源的稳态分配和高效利用。

在网络层面,情景网络通过设计可适配、可扩展、可优化的自适应服务网络生成、路由优化、流量调度、业务功能编排与新功能快速部署等机制,实现信息网络资源的高效利用。首先,在保证可扩展和网络顽健性的基础上,将承载业务属性与动态变化的网络情景融合,制定节点间信息渗透的路由策略,通过个体路由选择的自主变化实现全网路由的有序适应性变化。其次,以提高业务质量一致性为驱动,设计情景网络功能动态编排与组合机制,通过群智感知实现预留资源节点的资源复用,在保证业务质量的同时提高资源利用率。最后,根据基础网络状态的多样化情景,拟合生成可便捷部署的大规模服务网络,实现服务网络与异构基础网络高效资源映射的统一。

5 结束语

本文从自然界群集运动中获得启迪,对互联网资源全局协调控制机制进行了初步探索,提出一种基于节点自我感知、自主决策、自动调整的智慧网络全域资源协调拟合方案——情景网络,为智慧网络发展提供了一种可能的解决思路。目前已完成了一阶连续一致性模型在网络资源调配中的应用,下一步将围绕高阶多种群环境下的情景网络建模和资源智慧拟合进行深入研究。

参考文献:

- [1] 邬江兴, 兰巨龙, 程东年, 等. 新型网络体系结构[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
WU J X, LAN J L, CHENG D N, et al. Novel network architecture[M]. Beijing: Posts&Telecom Press, 2014.
- [2] CLARK D D, PARTRIDGE C, RAMMING J C, et al. A knowledge plane for the internet[C]//The SIGCOMM'03, August 25-29, 2003, Karlsruhe, Germany. New York: ACM Press, 2003.
- [3] MESTRES A, RODRIGUEZNATAL A, CARNER J, et al. Knowledge-defined networking[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2016, 47(3): 2-10.
- [4] 杨震. 自动驾驶技术进展与运营商未来信息服务架构演进[J]. 电信科学, 2016, 32(8): 16-20.
YANG Z. Progress of automatic driving technology and future information service architecture evolution of telecom operators[J]. Telecommunications Science, 2016, 32(8): 16-20.
- [5] 王志宏, 杨震. 人工智能技术研究及未来智能化信息服务体系的思考[J]. 电信科学, 2017, 33(5): 1-11.
WANG Z H, YANG Z. Research on artificial intelligence technology and the future intelligent information service architecture[J]. Telecommunications Science, 2017, 33(5): 1-11.
- [6] BECKER T, BURGHART C, NAZEMI K, et al. Core technologies for the internet of services[J]. Cognitive Technologies, 2014(39): 59-88.
- [7] 刘明雍, 雷小康, 杨盼盼, 等. 群集运动的理论建模与实证分析[J]. 科学通报, 2014, 59(25): 2464-2483.
LIU M Y, LEI X K, YANG P P, et al. Theoretical modeling and empirical analysis of cluster movement[J]. Chinese Science Bulletin, 2014, 59(25): 2464-2483.
- [8] FRASER G M, HUGHES C. Swarming motility[J]. Current Opinion in Microbiology, 1999, 2(6): 630-635.

[作者简介]



邬江兴(1953-), 男, 中国工程院院士, 国家数字交换系统工程技术研究中心主任、教授、博士生导师, 主要研究方向为新一代信息网络理论与技术。

胡宇翔(1982-), 男, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为新型网络体系结构与核心技术。

李玉峰(1975-), 男, 博士, 国家数字交换系统工程技术研究中心副研究员、硕士生导师, 主要研究方向为新型网络体系结构与核心技术。