

智慧标识网络服务机理研究进展及安全性分析

支 婷, 刘 颖, 周华春, 张宏科

(北京交通大学下一代互联网互联设备国家工程实验室, 北京 100044)

摘要: 随着互联网规模的不断扩大以及应用场景的多元化,传统网络无法很好地满足新业务的动态多样化需求,因此国内外对未来网络展开了深入研究.本文首先介绍了未来互联网体系架构的研究现状.其次,介绍了具备“三层、两域”特征的智慧标识网络(Smart Identifier NETwork, SINET)体系架构,然后重点阐述了SINET服务机理在服务的命名与解析、路由机制、服务缓存、移动性、传输控制机制、可扩展性、绿色节能等关键技术方面取得的研究进展,并进一步详细分析了SINET服务机理的安全性.最后总结了SINET面临的挑战,对SINET服务机理在大规模场景部署中可能存在的问题做出讨论.

关键词: 智慧标识网络; 服务机理; 动态适配; 安全性

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2021)08-1653-12

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.12263/DZXB.20200416

Research Progress and Security Analysis of the Service Mechanism in Smart Identifier Network

ZHI Ting, LIU Ying, ZHOU Hua-chun, ZHANG Hong-ke

(National Engineering Lab on Next Generation Internet, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: With the continuous expansion of the scale of the Internet and the diversification of application scenarios, traditional networks cannot satisfy the dynamic and diverse needs of new services well. Therefore, future networks have been researched around the world. Firstly, research status of future Internet architectures are introduced. The architecture of smart identifier network (SINET) with the characteristics of ‘three layers and two domains’ is described. Then, the research progress of the key technologies of service mechanisms in SINET, including service naming and resolution, routing, service caching, mobility, transmission control, scalability and energy saving are discussed. The security of the service mechanisms in SINET are analyzed. Finally, the challenges of SINET are summarized, and the problems of deploying SINET in large-scale scenarios are discussed.

Key words: smart identifier network; service mechanism; dynamic adaptation; security

1 引言

随着互联网规模的不断扩大以及应用场景的多元化,传统网络架构在可扩展性、高效性、节能性以及安全性等方面显露出的局限性无法很好地满足多元化新业务所带来的通信需求,因此迫切需要研究更加灵活、高效、安全的未来网络架构,能在短期内满足不断增长的新业务需求,在长期内从根本上解决当前网络架构的不足,实现网络的可持续发展^[1].为了应对急剧扩增的网络规模给当前互联网发展带来的挑战,世界各国纷纷启动了未来网络研究项目,旨在研究未来网络体

系架构及其关键技术,探寻未来网络技术在工业互联网^[2]、车联网^[3]、天地一体化网络^[4]、数据中心^[5]等场景中的高效应用,实现新型网络的大规模部署.

美国自然科学基金委员会成立了全球网络创新环境(Global Environment for Network Innovations, GENI)^[6]、未来网络架构(Future Internet Architecture, FIA)^[7]、US Ignite^[8]等计划,目的是帮助未来互联网研究人员建立一个可进行大规模、复杂网络的实验平台,完成不同网络体系架构的设计、实现及评估.欧盟陆续启动了FIRE计划^[9]、Horizon 2020计划^[10]、Horizon 2020-Secure societies计划^[11]等,对未来互联网展开深入研究.此

外,国际电信联盟于2018年成立了网络2030焦点组^[12],目的是研究2030年及以后的未来网络架构、需求和网络功能等内容。

就国内而言,我国也开展了诸多未来网络体系的相关项目.国家“973”计划支持的SOFIA项目^[13]针对互联网面临的动态性、安全可控性等问题对未来网络体系结构展开研究.国家“863”计划支持的FINE项目^[14]通过提供描述具体网络体系的结构和协议来支撑网络新技术的研究.国家重大科技基础设施项目“未来网络试验设施”^[15]于2019年5月正式开通运行,为互联网的可持续发展提供了实验与验证平台.此外,于“十一五”期间启动的“一体化可信网络与普适服务体系基础研究”^[16]以及“十二五”期间启动的“智慧标识网络理论基础研究”^[17],针对新型信息网络的体系理论问题展开了研究.

目前,国内外各个项目在未来互联网体系架构方面已经取得了诸多研究成果.为了明确进一步的研究重点,需要不断地对各未来网络架构的研究发展情况进行总结与分析,以更好地满足与日俱增的互联网应用场景与用户需求.本文重点介绍智慧标识网络(Smart Identifier Network, SINET)的设计原理,阐述了SINET的服务机理,并详细论述SINET服务机理在服务的命名与解析、路由机制、服务缓存、传输控制机制、移动性、安全性、可扩展性、绿色节能等关键技术方面取得的研究进展.此外,对SINET服务机理的安全性进行具体分析.最后总结SINET面临的挑战,对SINET的大规模部署可能存在的问题进行讨论.

2 SINET架构及服务机理研究进展

随着互联网应用的不断扩展、5G与物联网的快速发展,以主机为中心的传统网络架构难以满足用户对服务多样化的需求^[18].SINET提出将网络中的服务位置和服务资源进行解耦,使得用户在服务请求过程中不再关心服务位置,而只需关注于服务本身.SINET构建智慧服务层,将服务进行标识,提出服务的注册与查找机制,通过服务标识完成数据包转发流程,旨在提高网络中服务资源获取的高效性、灵活性以及准确性,提升用户体验.

2.1 SINET体系架构模型

智慧标识网络通过解耦服务资源与服务位置、网络控制平面与数据平面,以及节点身份信息与位置信息,提出“三层、两域”的体系架构^[19,20].SINET的体系架构模型如图1所示,“三层”即智慧普适服务层(Smart Pervasive Service Layer, L-SPS)、动态资源适配层(Dynamic Resource Adaption Layer, L-DRA)和协同网络组件层(Collaborative Network Component Layer, L-CNC).

L-SPS负责服务标识和服务描述、服务查找与动态匹配;L-DRA负责感知来自L-SPS的服务需求与来自L-CNC的网络状态,并动态适配网络资源;L-CNC负责实现服务存储、服务传输,以及网络组件的行为感知与聚类等功能.“两域”指实体域(Entity Domain, D-EN)和行为域(Behavior Domain, D-BE).实体域负责标识网络服务、网络族群以及功能组件等具体执行单元;行为域负责动态表征网络服务、网络族群以及功能组件的属性特征.

SINET中,D-EN使用服务标识(Service ID, SID)标记服务,实现服务的资源与位置解耦;族群标识(Family ID, FID)用于标记族群功能模块;组件标识(Node ID, NID)用于标记网络组件^[21,22].D-BE使用服务行为描述(Service Behavior Description, SBD)信息来表征实体域中的服务标识具备的特征,如服务位置、服务缓存位置、服务类型等特征;使用族群行为描述(Family Behavior Description, FBD)信息来表征族群行为的显著特征,如核心族群和接入族群、高带宽族群和低延时族群等;此外,使用组件行为描述(Node Behavior Description, NBD)信息进一步描述网络组件的拓扑、功能等特征,如组件位置、组件中心度、组件电量、组件连通度等.

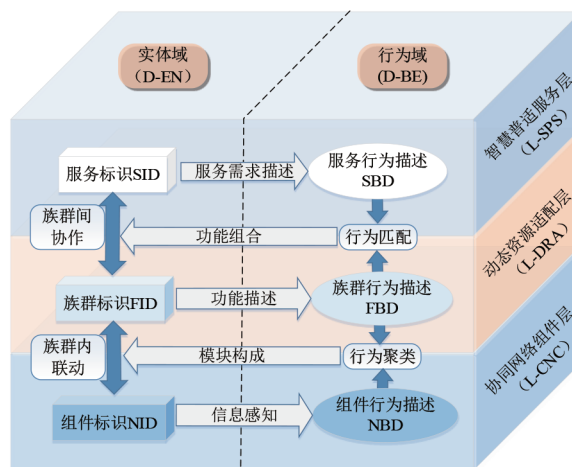


图1 智慧标识网络体系架构模型

2.2 SINET服务机理关键技术研究进展

SINET是在分析当今互联网关键技术及未来互联网需求的基础上被提出的.SINET不再以主机为中心,也不再以IP地址作为基本实体,而是将服务资源与位置进行解耦,通过服务标识进行服务的解析和路由.为了实现基于服务标识的数据包传输,SINET需要解决的关键技术主要包括:服务的命名与解析、路由机制、服务缓存、移动性、传输控制机制、可扩展性、绿色节能、实用性等.目前,研究人员已经针对SINET关键技术进行了相关研究并取得了相应研究成果,如表1所示.

表 1 SINET 服务机理关键技术研究进展

关键技术	研究重点	年份	关键技术	研究重点	年份
服务的命名与解析	SID的设计原理及解析映射 ^[23,24]	2007	传输控制机制	SINET控制平面的各模块设计 ^[36]	2015
	服务标识映射服务器的性能测试 ^[25]	2012		群智感知的SINET下车联网的负载均衡 ^[43]	2017
	层次化的SID ^[19]	2013		基于卡尔曼滤波的流量预测机制 ^[44]	2018
	L-SPS中SID与SBD的设计原理 ^[26]	2016		多源协作传输架构的子源配置策略 ^[45]	2018
	基于频谱信息服务属性的SID ^[27]	2016		高速铁路异构无线网络环境下的多路径传输机制 ^[46]	2018
	SID注册、查询系统 ^[28]	2017		移动边缘计算场景的集中控制方案 ^[47]	2019
路由机制	SINET域内路由与域间路由机制 ^[29]	2015	可扩展性	智慧协作自动化控制方案 ^[48]	2020
	基于Physarum觅食模型的路径优化 ^[30]	2015		层次化SID增强服务命名可扩展性 ^[19]	2013
	SINET中基于多参数的多路径路由算法 ^[31]	2015		SINET的族群分布式管理机制 ^[49]	2015
	SINET中状态感知消息的传输机制 ^[32]	2015		用户身份与位置绑定、控制与数据绑定对网络可扩展性的影响分析 ^[26]	2016
基于流量测算的SINET负载均衡路由算法 ^[33]	2016	绿色节能	基于网络与用户分离的无线通信架构 ^[50]	2017	
网络组件的服务存储和查询功能设计与实现 ^[34]	2015		基于路由标识的路由机制的可扩展性分析 ^[28]	2017	
缓存协作机制CoLoRCache ^[35]	2015		核心网中集中控制式的节能策略 ^[51]	2013	
SINET控制平面的模块设计 ^[36]	2015		SINET路由器功耗测试与分析 ^[52]	2015	
小型频谱监管网络的缓存机制 ^[27]	2016		网络组件服务存储、端口休眠模块的实现 ^[34]	2015	
SINET基于服务请求排序的缓存分配策略 ^[37]	2016		通过构建网络族群实现降低能耗 ^[26]	2016	
移动性	基于族群协作的缓存机制C2Cache ^[38]	2018	实用性	SINET工业无线传感器网络研究 ^[53,54]	2017
	一体化标识网络的移动性支持机制 ^[39]	2015		SINET与SFC、云平台、OpenStack等的融合 ^[55]	2019
	高铁场景中SINET高效、可靠的通信 ^[40]	2015		新型网络在大数据和人工智能方面的研究 ^[56]	2019
	SINET在工业无线互联网与高速移动网的应用 ^[41]	2016		基于智慧协同理论的天地一体化网络广义逻辑球建模方案 ^[57]	2019
	高速环境下的智慧动态监测系统 ^[42]	2016			
一种SINET的移动性管理机制 ^[22]	2018				

2.2.1 服务命名与解析

文献[23,24]提出使用服务标识对服务进行统一描述,引入服务标识管理器来完成服务的注册与查询,提供全局范围内的服务标识的统一管理,并完成了从服务到网络连接的映射.文献[25]对服务标识映射服务器进行了性能测试与分析,结果表明服务标识映射服务器的服务注册时延与服务查询时延都具有较好性能,且服务注册条目没有固定的容量限制,能满足用户的基本需求.文献[19]提出根据网络服务的属性对其进行分类,并根据服务的分类结果来生成层次化的服务标识.文献[26]指出在L-SPS中,SID用于唯一的标识服务,SBD表示其延伸属性,用于对各种服务进行分类和关联.因此,SINET不仅能保证服务的唯一性,还可通过SID与SBD的组合来指定服务的多种特性,从而可从根本上消除服务资源与服务位置的绑定特征.文献[27]提出在基于SINET的区域化小型频谱监管网络中,根据频谱信息服务的服务提供者所在区域、权限级

别、服务操作类型、服务具体名称等属性生成服务标识,实现了服务的注册与查询功能.文献[28]介绍了服务标识解析映射机制,提出通过唯一的SID来描述网络服务,同时用QoS等级、服务器位置、服务类型等信息描述SID.服务提供者将服务注册到SID注册系统,用户需向SID查询系统发送服务查询消息以获得服务信息.

2.2.2 路由机制

文献[29]提出将域内路由与域间路由分开,域内的路由机制可以由各自自治系统决定,而域间路由机制由自治系统之间互相协商决定,并介绍了此路由机制下的服务注册、查询及分组转发机制.文献[30]针对L-CNC的路由适配问题展开研究,采用Physarum觅食模型,根据组件负载、链路负载和服务需求等信息来优化路径,通过智慧标识网络原型系统验证了所提模型的有效性.文献[31]实现了基于多参数的多路径路由机制,采用网络的多种性能参数计算路径的权重值,根据得到的权重值分配流量,并在Mini-Net平台验证了所

提路由算法能够有效减少 SINET 的往返时延,提高网络吞吐量.文献[32]研究了 SINET 中状态感知消息的传输问题,通过仿真测试了自底向上的报告机制与自顶向下的查询机制的性能,结果表明自顶向下的查询机制准确性较高,而自底向上的报告机制开销较低.权衡了开销与准确性,指出自底向上的报告机制更适用于 SINET 中的状态消息传输.文献[33]将测算出的流量矩阵作为路由优化问题的流量守恒约束,实现了基于流量测算的负载均衡算法,并在 OMNET++ 仿真平台上验证了所提机制能够有效地避免 SINET 中的网络拥塞.

2.2.3 服务缓存

文献[34]提出网络组件应该同时具备转发功能与存储功能,并设计了基于 NetFPGA10G 的网络组件,实现对数据内容的存储和查询功能,降低查询分组的返回时延,提高网络资源利用率.文献[35]研究了 SINET 中的服务缓存机制,提出缓存协作机制 CoLoRCache,优先选择缓存命中次数最低的网络组件进行缓存,而当缓存命中次数相同时,优先选择位于拓扑中心的网络组件进行缓存,以降低获取缓存内容的成本,从而优化缓存性能.文献[36]设计实现了 SINET 的控制平面,指出服务资源的高效获取需要网络中具备缓存网络组件,并应具备能够制定缓存策略的控制平面,而资源适配机制需要组件行为描述包含组件存储状况等信息.文献[27]在提出的小型频谱监管网络中各层节点缓存本区域的资源,使得用户可以就近获取本区域资源,以减小本区域用户的服务获取时延.文献[37]提出在用户到服务提供者的传输路径上按照服务请求排序来缓存服务内容,保证请求率较高的服务内容得到优先缓存,从而减小了平均用户的平均服务获取距离,提高了网络的缓存性能.文献[38]提出了缓存机制 C2Cache,通过感知网络拓扑信息,动态性地选择具备缓存功能的网络族群,并以网络族群为单元计算及排序服务的缓存收益,实行最大收益缓存算法,最后通过实验床模拟系统 EmuStack 验证了所提机制在提高缓存命中率、降低用户的平均服务请求时延等方面具有良好效果.

2.2.4 移动性

文献[39]提出了基于一体化标识网络的移动性支持机制,实现了 IP 地址改变而连接不中断的功能,从而提高网络的移动性.测试结果显示内核通知链机制相较于内核定时器机制具有更小的时延.文献[40]提出了基于 SINET 的方案促进实现高铁场景中高效、可靠的通信.所提架构能灵活和快速地适应网络需求,并通过服务需求感知、族群协作和网络组件协作来完成服务的交付过程.实验结果证明该方案能够有效提升高铁环境下的网络资源利用率和服务质量.文献[41]介

绍了 SINET 在无线工业互联网和高速移动网中的应用.在智慧协同高速移动互联网中,设计并研制专用路由器,动态适配服务需求与网络资源,以提升网络服务的可靠性和稳定性.文献[42]设计实现了高速环境下基于 SINET 的智慧动态监测系统,通过多模链路子系统、链路监测子系统和日志子系统实现对网络组件的动态感知、链路状态的检测以及感知信息的存储.文献[22]介绍了 SINET 的研究动机及各层设计原则,说明了接入标识与路由标识对网络可移动性的影响,并提出一种移动性管理机制,设计了高铁网络中的 SINET 无线多链路移动路由器,可支持平均速度为 250 km/h 环境下的高效、可靠的移动通信.

2.2.5 传输控制机制

文献[36]设计了 SINET 的控制平面,实现了信息收集模块、资源适配模块以及 SINET 协议处理模块,从而可以将控制信息下发到网络组件,完成 SINET 中的资源适配.文献[43]提出了基于 SINET 的车联网络(SINET-Vehicular Networks, SINET-V),通过群智感知灵活选择虚拟功能切片,实际城市车辆场景下的实验结果表明,SINET-V 更加灵活可控,能够有效提高服务质量.文献[44]提出了 SINET 中基于卡尔曼滤波的流量预测机制,通过设计流量感知信息获取机制实时监测链路的流量信息,继而在资源管理器上预测链路流量,为实现流量工程、异常流量检测等提供基础.文献[45]针对多路径传输控制协议难以实现变化端之间路径协作的问题,提出了基于 SINET 的多源协作传输架构,在端与端之间加入子源进行相互协作与传输,并根据不同的网络状态动态地改变端与端之间的子源数量与优化配置策略,从而可以有效提升数据传输速率.文献[46]提出了解决高速铁路异构无线网络不可预测性的多路径传输算法,称为接收端自适应增量延迟算法.根据接收端的发送顺序自适应地增加无序数据包的延迟,使得发送到上层应用的数据包是有序的,从而实现多路径传输.文献[47]在移动边缘计算场景下提出了基于 SINET 的网络服务灵活适配方案,介绍了包含服务订阅层、资源管理适配层和网络基础设施层的基础框架,为实现服务的按需部署、高效适配提供了解决方案.文献[48]建立了考虑数据块丢失的传输系统数学模型,并给出了系统中临界条件,接着提出一种智慧协作自动化方案来增强接收缓冲区控制能力,并通过仿真验证了所提方案的性能.

2.2.6 可扩展性

文献[19]提出根据服务的分类结果来生成层次化的服务标识,可以避免扁平化的服务命名机制可能带来的可扩展性问题.文献[49]将网络按照不同的功能类型划分为不同族群,引入族群控制器,负责族群内部

的管理以及族群间的信息交互,采用分层方式来管理网络族群,并分析了该分布式网络系统的并发性和高效性.文献[26]指出传统网络中的用户的身份与位置绑定、控制与数据绑定给网络带来了可扩展性低的问题,而SINET通过引入SID、FID与NID实现了用户身份与位置、控制平面与数据平面的解绑,可以有效增强网络的可扩展性.文献[50]提出了一种基于网络与用户分离的分层标识的无线通信架构,通过标识之间的映射来完成通信过程,旨在为各种无线网络和终端提供多样化的接入,确保下一代无线网络的互操作性、灵活性和可扩展性.高速移动场景中的实验结果表明该架构能够改善多路径传输的用户体验,具有较好的可扩展性、灵活性和互操作性.文献[28]提出了网络接入标识的解析映射机制,分别使用接入标识和路由标识来表示终端主机的身份和位置,通过映射系统将接入标识映射为路由标识,根据路由标识转发数据包.通过对路由标识的聚合,可提高路由可扩展性.

2.2.7 绿色节能

文献[51]提出了基于一体化标识网络的节能策略,在接入网中分析用户流量信息对节能效果的影响,并通过缓存进行流量整形以达到节能的目的;在核心网中实现了集中控制式的节能策略部署方案,在保证网络流量分配均衡性的情况下取得了更好的节能效果.文献[52]考虑了SINET的绿色节能特性,通过Traceroute工具对传统的内容提供商构建的内容分发网络(Content Delivery Network, CDN)和SINET进行数据采集,并分别进行功耗估算,结果表明SINET能够提高网络中内容分发的效率,从而降低能耗.文献[34]基于NetFPGA10G开发平台设计并实现了SINET架构中网络组件的内容存储功能模块与物理端口的休眠功能模块.实验结果验证了存储模块能够实现数据包存储、内容匹配查找与结果反馈等功能,休眠模块能实现转发和休眠执行等功能,有助于达到实现绿色节能网络的目的.文献[26]提出SINET可以通过构建网络族群达到节能的效果.具体来说,当用户请求服务时,智慧控制节点分析服务需求并构建网络功能族群,如节能族群、多媒体流族群和路径内服务缓存族群等.通过族群间的互相协作可以完成服务的高效传输.

2.2.8 实用性

文献[53,54]介绍了智慧协同工业无线传感器网络(Smart-Industrial Wireless Sensor Network, Smart-IWSN),旨在保障工业通信的可靠性、实时性及确定性,满足工业服务的多样性与可定制性.目前已将Smart-IWSN成功应用到了大规模的焊机群监控系统中.文献[55]提出基于智慧标识网络的动态适配安全防护总体架构,结合了网络功能服务链、云平台、Open-

Stack平台等技术,说明SINET能够结合当前网络中的关键技术应用到实际中.文献[56]总结了国内外对新型互联网体系的研究现状并提供了进一步研究对策,指出未来网络迫切需要具备自主安全可控的特点,SINET等新型架构可继续在大规模、大数据和人工智能应用等方面进行理论研究与技术实现.文献[57]提出了一种基于智慧协同理论的天地一体化网络广义逻辑球(Generalized Logical Sphere, GLS)建模方案.对网络覆盖范围、传输机制和实践指南进行全面分析,以确保能够进行网络的全面组合.讨论了GLS的具体方法以及负载均衡、智慧路由、认知恢复和分级保护等特性,并建立原型平台验证了模型的功能性和实用性.

3 SINET 服务机理安全性分析

3.1 SINET 安全优势分析

传统的TCP/IP网络是基于端到端架构设计的,用户需要通过IP数据包从固定地址的服务提供者获得服务,这种依赖于端IP地址的通信很容易遭受到网络攻击.SINET对服务进行命名,网络中每个服务都会被分配一个唯一的SID,每个服务的SID与服务所在位置无关,实现了服务的资源与位置分离.因此,网络中的任意路由节点都可以放置相同SID的服务内容.具体来说,SINET依照制定的缓存策略将服务缓存到传输路径中,用户可以通过缓存的内容就近获得所需服务,提高了服务获取效率,同时一定程度上减小了传输路径中遭受攻击的可能性.由于SINET使用具有自认证功能的SID,且SID中含有服务提供者签名^[58],网络用户可以方便地验证收到的服务内容是否真实可信,提高了SINET应对服务内容欺骗攻击的能力.此外,SINET中的组件标识(NID)采用128位的扁平标识,具有自认证的功能,即每个网络组件都有拥有一组{公钥,私钥}对,NID为对应公钥的加密哈希值^[59].基于此加密机制,SINET对网络组件NID的认证不需要引入第三方认证机制,从而保护了网络设备的安全性.

为进一步说明SINET服务机理的安全性优势,本文分析了SINET抵御传统攻击的能力.传统网络中常见的攻击类型包括域名系统(Domain Name System, DNS)欺骗攻击^[60]、IP地址欺骗攻击^[61]、分布式拒绝服务(Denial of Service, DDoS)攻击^[62]、链路泛洪攻击(Link Flooding Attack, LFA)^[63]等.

3.1.1 DNS欺骗攻击

传统网络需要通过DNS进行域名解析完成从域名到IP地址的转换,从而实现一次完整的通信.如图2(a)所示,传统网络中,DNS欺骗攻击指攻击者将DNS服务器中域名对应目的地址篡改为伪造主机的IP地址,当用户A请求域名解析时,收到的是伪造目的主机

的地址,导致用户 A 的数据包无法正确到达真实目的主机.

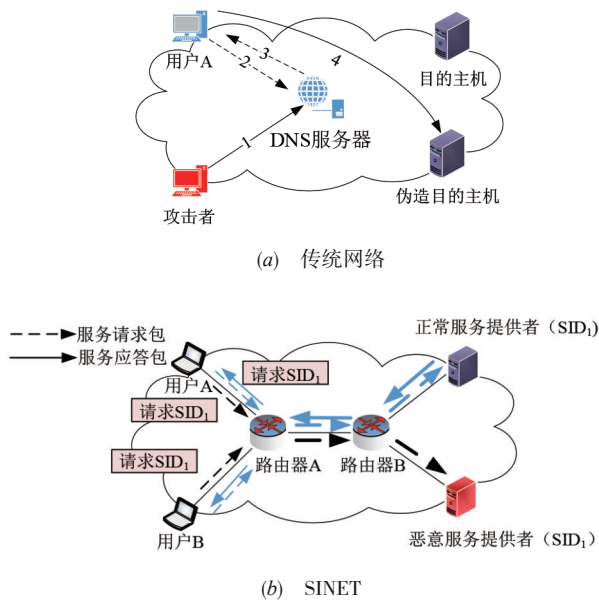


图2 DNS地址欺骗攻击示意图

SINET使用基于SID的服务解析机制,服务请求过程中没有从目的主机域名到目的IP地址的映射,但由于路由器需要根据SID前缀信息转发服务请求,攻击者可通过向网络中注册恶意服务来形成SID前缀欺骗攻击.如图2(b)所示,恶意服务提供者向网络中注册SID₁,导致用户A和用户B对SID₁的服务请求被转发至恶意服务提供者.相较于传统网络,SINET路由器记录了更多路由状态信息,能及时监控服务请求转发过程中的异常,因此通过检查服务请求的未满足率判断异常简便易行.并且,SINET可通过多路径转发策略采取冗余路径来获取服务,从而减小SID前缀欺骗攻击造成的影响.

3.1.2 IP地址欺骗攻击

传统网络中用户通过发送包含源IP地址和目的IP地址的数据进行服务请求.IP地址欺骗指攻击者将其发送的数据包中源IP地址设置为目标主机地址,中间主机收到伪造的数据包后,在返回的数据包中将收到的源IP地址作为目的地址.这种情况下,中间主机发出的响应数据包将到达目标主机.若攻击者使用大量的恶意主机构造包含虚假地址的数据包,将导致该虚假源IP地址对应的目标主机收到大量数据包,导致目标主机资源被占用,甚至无法正常工作.如图3(a)所示,攻击者将源IP地址设置为用户A的地址,当用户B收到攻击者发送的数据包时,会将用户A的IP地址作为目的地址返回数据包,导致用户A收到大量异常数据包.

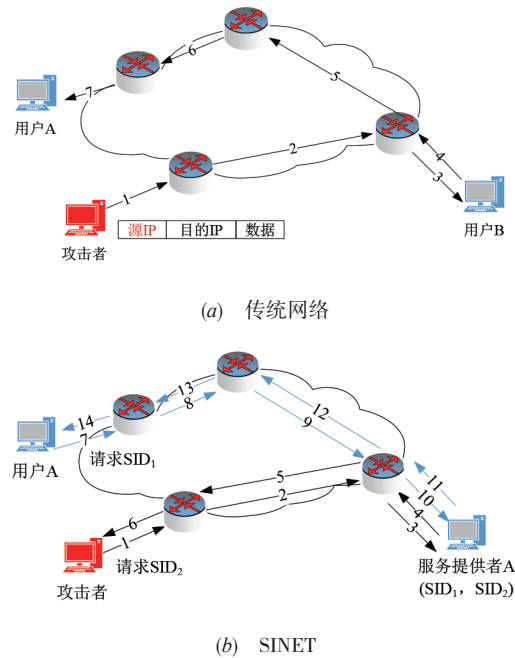


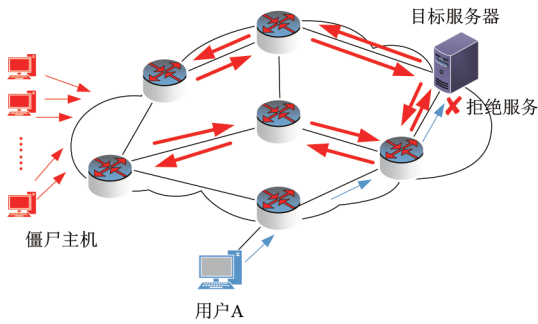
图3 IP地址欺骗示意图

SINET中,服务请求中包含的是目的服务标识信息,并且,当服务提供者收到请求时,会将服务应答包从收到该服务请求的接口返回,当中间路由器接收到服务应答包时,根据服务请求列表中记录的对应接口发往下一跳,服务应答包最终将到达发出该请求的主机.因此,在SINET中,无法通过中间主机发起IP地址欺骗攻击.如图3(b)所示,用户A和攻击者分别向服务提供者A发起服务标识为SID₁与SID₂的请求,服务提供者发出的服务应答消息将依据路由器中记录的服务请求信息原路返回至用户A和攻击者.

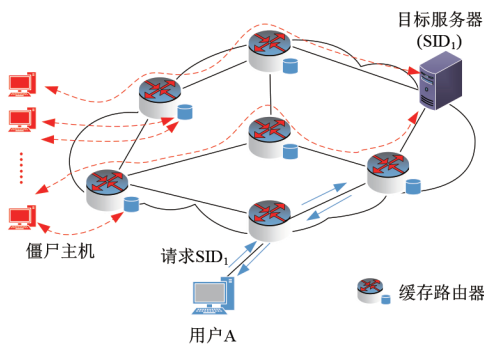
3.1.3 DDoS攻击

如图4(a)所示,传统网络中,攻击者形成僵尸网络向目标服务器发起大量请求,目标服务器需要消耗大量资源处理攻击请求,导致用户A发起的服务请求无法得到满足,从而影响网络的稳定运行.

SINET中,攻击者无法通过设置目的IP地址直接攻击目标服务器,只能通过设置服务请求包中的SID向服务提供者发出大量服务请求包.由于SINET引入了沿路缓存机制,传输路径上的缓存路由器会将收到的服务内容缓存到本地,路由器收到服务请求时,首先查询本地缓存,若本地缓存有该服务内容,则直接将该服务返回.这种情况下,尽管攻击者构造了僵尸网络发起大量服务请求,这些恶意服务请求将在到达目标服务器之前从路径中的缓存路由器获得服务内容,可减轻目标服务器的负担,在一定程度上减缓了DDoS攻击带来的影响.如图4(b)所示,僵尸主机向目标服务器发起服务标识为SID₁的请求,由于路径中的路由器会缓存



(a) 传统网络



(b) SINET

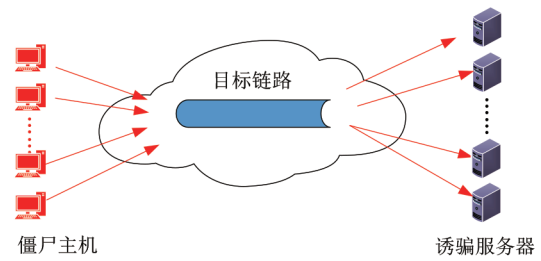
图4 DDoS攻击示意图

返回的服务内容,僵尸主机发起的大量服务请求将在路径中获得服务.当网络中的合法用户A发起SID₁的请求时,也将从缓存路由器中获得所需服务.

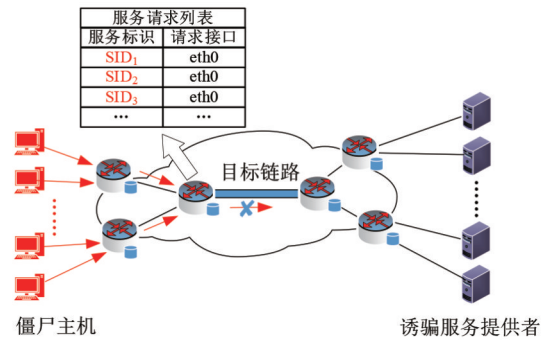
3.1.4 链路泛洪攻击

链路泛洪攻击(LFA)中,攻击者只在互相之间发送数据包,并不直接向某一个受害主机发送数据包.如图5(a)所示, N 个攻击者在互相之间发送数据包,就会造成网络中有 $O(N^2)$ 个连接,这将导致网络核心的严重拥塞.通常,LFA发起攻击的步骤如下:在网络中选择一条链路作为目标攻击链路;确定哪些主机对之间的通信可以生成经过目标攻击链路的数据流;在这些主机对之间发送数据包,让目标链路发生过载,从而导致网络无法正常工作.

SINET中的路由器比传统网络中的路由器记录了更多的信息,其中服务请求列表能够记录接收到的服务请求信息.当攻击者在SINET中发起LFA时,为了达到攻击效果,需要不断地在大量用户与服务提供者之间发送服务请求包和服务应答包,这将导致攻击路径上服务请求列表中出现大量异常条目,进而能够检测出数据转发过程中的异常情况,如图5(b)所示.此外,由于服务应答包需要沿着服务请求包的传输路径返回,很容易通过检查未被满足或超时的服务请求来判断网络中是否发生异常,以便于网络管理者采取进一



(a) 传统网络



(b) SINET

图5 链路泛洪攻击示意图

步防御措施.

3.2 SINET安全机制研究进展

SINET安全机制相关研究如表2所示.文献[64]分析了一体化标识网络对抗网络攻击的能力及其相比于传统网络架构在安全方面的优势.使用思博伦TestCenter测试仪验证了分离映射机制能抵御部分DDoS攻击,可以有效保护核心网络的安全性.文献[65]提出了一种身份与位置分离网络中基于可证明三元认证的安全接入协议,引入认证服务器,只有通过验证的接入设备才能连接到网络.证明了该协议可提供足够强度的安全性,并分析了其在认证时延、认证开销等方面的性能.文献[66]设计了基于路径标识的路由体系下的安全通信机制,在边界路由器判断数据包的合法性,如果不合法则直接丢弃,并搭建原型系统验证了路径标识加密机制防御数据包泛洪攻击的有效性.

表2 SINET安全机制研究进展

参考文献	研究重点	年份
[64]	分离映射机制抵御DDoS攻击的性能	2012
[65]	可证明三元认证的安全接入协议	2017
[66]	基于路径标识的SINET加密机制	2018
[55]	SINET动态安全防御管控云平台	2019
[67]	智慧标识铁路网中的高效认证机制	2019
[68]	高安全性的多维细粒度认证框架	2020

文献[55]提出在 OpenStack 中利用服务功能链(Service Function Chaining, SFC)生成动态的安全功能服务链,以快速检测异常流量;其次,设计实现了安全防御管控云平台,对资源实行统一管理,支持大规模拓扑动态变化的仿真实验.文献[67]提出了一种智慧协同铁路网络中基于混沌的随机数发生器(Random Number Generator, RNG)的高效认证机制,使用了两个逻辑映射来避免耗时的边界定位过程,使用 RNG 来生成和验证一次性密码.实验结果验证了所提机制的可行性和应对攻击的有效性,为铁路乘客提供了安全可靠和快速的网络环境.文献[68]提出了一种具备高安全性的多维细粒度认证框架,提出一种源端和目的端双向

管控机制,并将其融合到细粒度框架中,保证了服务传输过程中源端的可用性和目的端的有效性.通过理论分析和系统验证说明了该方案能够实现对用户的统一接入管控,优化认证时延.

4 SINET 面临挑战

目前,SINET 服务机理的关键技术已经取得了很多研究成果,其应用也已经扩展到了工业互联网及高铁移动网络等场景中,这验证了 SINET 的可行性及有效性.然而,随着网络用户、接入设备、服务内容、网络规模的不断扩增,SINET 的大规模应用和部署仍然面临着一些挑战,如图6所示.

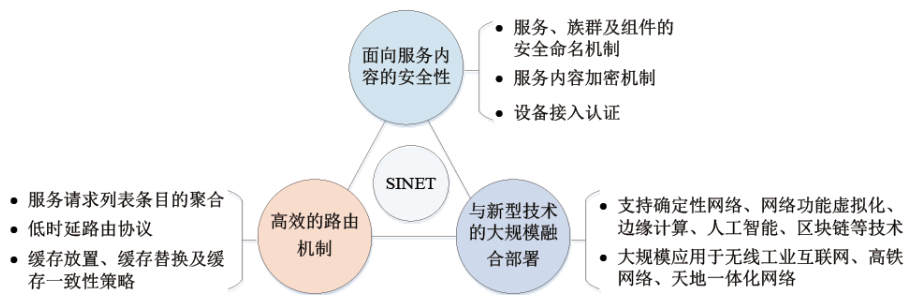


图6 SINET面临挑战

4.1 保障面向服务内容的安全性

尽管 SINET 在一定程度上避免或减轻了遭受传统网络中的攻击,攻击者仍然可以通过分析 SINET 架构开展针对性的攻击. SINET 中通过服务标识 SID、族群标识 FID 及组件标识 NID 进行服务的匹配与查询,因此,如何设计保密性高的服务、族群及组件的命名机制是未来研究的重点之一;此外,由于 SINET 支持路径中的缓存,服务内容可以通过网络被复制,这使得服务内容离网络边缘更近了,减少了网络负载和服务检索延迟,代价是服务生产者无法直接对缓存的服务内容进行管控.因此,SINET 中的接入控制也是面临的一项挑战,未来工作中需要对服务内容加密机制、用户身份认证、服务行为描述认证以及组件接入认证等方面展开研究,在有效缓存服务内容的同时防止非法接入.

4.2 设计高效的路由机制

由于 SINET 中通过服务请求列表、转发路由表和服务缓存表实现服务请求包和服务应答包的路由转发,而这些表项中的存储条目可能导致路由器内存的消耗,当内存被大量占用时将影响路由器服务合法的用户请求.因此,SINET 路由机制面临的挑战包括:如何将具有相同服务需求的请求聚合,降低服务请求列表的资源消耗;如何设计具备感知功能、能够为服务匹配最佳网络族群及网络组件、为用户提供低查找延迟的路由协议,以形成网络中的路由表项;如何根据网络

拓扑选择具备缓存功能的网络组件,设计高效的缓存放置策略、缓存替换策略以及缓存一致性策略,提高网络的缓存命中率.

4.3 SINET 与新型技术的大规模融合部署

随着未来网络前沿热点技术,如网络功能虚拟化、低时延确定性网络、边缘计算、区块链网络等技术的发展,未来互联网需要具备支持各类关键技术的能力.因此,如何设计并实现 SINET 的服务感知功能、网络族群与网络组件的高效适配功能,以更好地支持未来网络新型技术的部署与发展,是 SINET 的研究重点之一.此外,尽管目前 SINET 已经在无线工业互联网、高铁网络、天地一体化网络中取得了一些研究成果,仍然需要对 SINET 的大规模部署方案实行进一步研究,以提高大规模网络下服务资源与网络资源的感知能力,实现服务内容的高效传输.

5 结束语

本文重点介绍了具备“三层、两域”特征的 SINET 体系架构模型,详细阐述了 SINET 服务机理在服务的命名与解析、路由机制、服务缓存、移动性、传输控制机制、可扩展性、绿色节能等关键技术方面取得的最新研究进展.进一步分析了 SINET 服务机理的安全性优势及安全机制研究进展.最后总结了 SINET 面临的挑战,对 SINET 的大规模部署可能存在的问题进行讨论.

参考文献

- [1] Ambrosin M, Compagno A, Conti M, et al. Security and privacy analysis of national science foundation future internet architectures[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(2): 1418 – 1442.
- [2] Aazam M, Harras K A, Zeadally S. Fog computing for 5G tactile industrial Internet of Things: QoE-aware resource allocation model[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(5): 3085 – 3092.
- [3] Khelifi H, Luo S, Nour B, et al. Named data networking in vehicular Ad hoc networks: State-of-the-art and challenges [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2020, 22(1): 320 – 351.
- [4] Li J, Xue K, Liu J, et al. An ICN/SDN-based network architecture and efficient content retrieval for future satellite-terrestrial integrated networks [J]. *IEEE Network*, 2019, 34(1): 188 – 195.
- [5] Fan J Y, Jiang M L, Rottenstreich O, et al. A framework for provisioning availability of NFV in data center networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2018, 36(10): 2246 – 2259.
- [6] Elliott C. GENI-global environment for network innovations [A]. *Proceedings of the IEEE Conference on Local Computer Networks* [C]. Montreal, France: IEEE, 2008. 8 – 8.
- [7] Anderson T, Birman K, Broberg R, et al. A brief overview of the NEBULA future internet architecture[J]. *Computer Communication Review*, 2014, 44(3): 81 – 86.
- [8] US Ignite Website [EB/OL]. <https://www.us-ignite.org/>, 2014-05-13.
- [9] Gavras A, Karila A, Fdida S, et al. Future internet research and experimentation [J]. *ACM Sigcomm Computer Communication Review*, 2007, 37(3): 89 – 92.
- [10] Soldani D, Manzalini A. Horizon 2020 and beyond: on the 5G operating system for a true digital society [J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2015, 10(1): 32 – 42.
- [11] HORIZON 2020 – Work Programme 2016 - 2017 [EB/OL]. https://ec.europa.eu/research/participants/data/ref/h2020/wp/2016_2017/main/h2020-wp1617-security_en.pdf, 2016-07-26/2020-05-10.
- [12] FG-NET-2030 [EB/OL]. <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Pages/default.aspx#>, 2020-05-10.
- [13] Wu Q, Li Z, Zhou J, et al. SOFIA: Toward service-oriented information centric networking [J]. *IEEE Network*, 2014, 28(3): 12 – 18.
- [14] 毕军. SDN体系结构与未来网络体系结构创新环境 [J]. *电信科学*, 2013, 29(8): 7 – 15.
- Bi J. SDN architecture and future network innovation environment [J]. *Telecommunications Science*, 2013, 29(8): 7 – 15. (in Chinese)
- [15] 黄韬, 霍如, 刘江, 等. 未来网络发展趋势与展望 [J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(8): 941 – 948.
- Huang T, Huo R, Liu J, et al. Development trends and prospects of future networks [J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2019, 49(8): 941 – 948. (in Chinese)
- [16] 张宏科, 苏伟. 新网络体系基础研究——一体化网络与普适服务 [J]. *电子学报*, 2007, 35(4): 593 – 598.
- Zhang H K, Su W. Fundamental research on the architecture of new network——universal network and pervasive services [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(4): 593 – 598. (in Chinese)
- [17] 张宏科, 罗洪斌. 智慧协同网络体系基础研究 [J]. *电子学报*, 2013, 41(7): 1249 – 1254.
- Zhang H K, Luo H B. Fundamental research on theories of smart and cooperative networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(7): 1249 – 1254. (in Chinese)
- [18] Dong P, Zheng T, Yu S, et al. Enhancing vehicular communication using 5G-enabled smart collaborative networking [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(6): 72 – 79.
- [19] 苏伟, 陈佳, 周华春, 等. 智慧协同网络中的服务机理研究 [J]. *电子学报*, 2013, 41(7): 1255 – 1260.
- Su W, Chen J, Zhou H C, et al. Research on the service mechanisms in smart and cooperative networks [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(7): 1255 – 1260. (in Chinese)
- [20] 郜帅, 王洪超, 王凯, 等. 智慧网络组件协同机制研究 [J]. *电子学报*, 2013, 41(7): 1261 – 1267.
- Gao S, Wang H C, Wang K, et al. Research on cooperation mechanisms of smart network components [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(7): 1261 – 1267. (in Chinese)
- [21] Feng B H, Zhang H K, Zhou H C, et al. Locator/identifier split networking: A promising future internet architecture [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(4): 2927 – 2948.
- [22] Li H F, Zhang H K. A survey on smart collaborative identifier networks [J]. *China Communications*, 2018, 15(3): 168 – 185.
- [23] 董平, 秦雅娟, 张宏科. 支持普适服务的一体化网络研究 [J]. *电子学报*, 2007, 35(4): 599 – 606.

- Dong P, Qin Y J, Zhang H K. Research on universal network supporting pervasive services[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(4): 599 – 606. (in Chinese)
- [24] 杨冬, 周华春, 张宏科. 基于一体化网络的普适服务研究[J]. *电子学报*, 2007, 35(4): 607 – 613.
Yang D, Zhou H C, Zhang H K. Research on pervasive services based on universal network[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2007, 35(4): 607 – 613. (in Chinese)
- [25] 陈培根, 高德云, 苏伟. 服务标识映射服务器性能测试工具的设计与实现[J]. *计算机应用与软件*, 2012, 29(10): 48 – 51.
Chen P G, Gao D Y, Su W. Design and implementation of performance testing tool for SIDMS[J]. *Computer Applications and Software*, 2012, 29(10): 48 – 51. (in Chinese)
- [26] Zhang H K, Quan W, Chao H C, et al. Smart identifier network: A collaborative architecture for the future internet[J]. *IEEE Network*, 2016, 30(3): 46 – 51.
- [27] 陈雨丰, 关建峰, 许长桥, 等. 新型频谱监管网络模型研究[J]. *计算机应用与软件*, 2016, 33(8): 146 – 149, 171.
Chen Y F, Guan J F, Xu C Q, et al. Research on new spectrum monitoring and management network model[J]. *Computer Applications and Software*, 2016, 33(8): 146 – 149, 171. (in Chinese)
- [28] Song F, Zhou Y, Kong K, et al. Smart collaborative connection management for identifier-based network[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 7936 – 7949.
- [29] 罗洪斌, 张宏科. 智慧协同标识网络体系: 研究背景、思路与进展[J]. *电信科学*, 2015, 31(2): 17 – 27.
Luo H B, Zhang H K. Smart and cooperative networks: background, basic ideas and progress[J]. *Telecommunications Science*, 2015, 31(2): 17 – 27. (in Chinese)
- [30] 张明川, 许长桥, 关建峰, 等. 一种面向智慧协同网络的自适应路由策略研究[J]. *电子学报*, 2015, 43(7): 1249 – 1256.
Zhang M C, Xu C Q, Guan J F, et al. Adaptive allocation routing scheme for smart and cooperative networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(7): 1249 – 1256. (in Chinese)
- [31] 苗春尧, 苏伟, 张宏科, 等. 一种智慧协同网络多参数的多路径路由算法[J]. *电子学报*, 2015, 43(10): 1881 – 1887.
Miao C J, Su W, Zhang H K, et al. A multi-parameter multipath routing algorithm of smart and cooperative networks[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(10): 1881 – 1887. (in Chinese)
- [32] Jia R, Su W, Luo H B, et al. Status message transmission mechanism in smart identifier network[J]. *Journal of Internet Technology*, 2015, 16(4): 727 – 734.
- [33] 贾濡, 郜帅, 罗洪斌, 等. 智慧协同网络中基于流量矩阵的负载均衡路由机制[J]. *通信学报*, 2016, 37(4): 128 – 138.
Jia R, Gao S, Luo H B, et al. Traffic matrix-based load balancing routing in flow-based smart identifier network[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(4): 128 – 138. (in Chinese)
- [34] 张硕琳. 基于NetFPGA10G的网络组件休眠和存储功能的设计与实现[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
Zhang S L. Design and Implementation of Sleep and Storage Functions of Network Components Based on NetFPGA10G[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2015. (in Chinese)
- [35] 张萌, 周华春, 罗洪斌. CoLoRCache: 智慧协同网络中的协作缓存机制[J]. *中兴通讯技术*, 2015, 21(4): 58 – 62.
Zhang M, Zhou H C, Luo H B. CoLoRCache: cache cooperation mechanism in smart and cooperative networks[J]. *ZTE Technology Journal*, 2015, 21(4): 58 – 62. (in Chinese)
- [36] 丁杰, 郜帅. 智慧标识网络控制平面设计及实现[J]. *计算机技术与发展*, 2015, 25(10): 195 – 199.
Ding J, Gao S. Design and implementation of control plane in smart identity network[J]. *Computer Technology and Development*, 2015, 25(10): 195 – 199. (in Chinese)
- [37] 冯博昊, 周华春, 张宏科, 等. 智慧协同网络服务内容在传输路径上的缓存分配策略[J]. *通信学报*, 2016, 37(3): 129 – 138.
Feng B H, Zhou H C, Zhang H K, et al. Cache allocation policy of service contents along delivery paths for the smart collaborative network[J]. *Journal on Communications*, 2016, 37(3): 129 – 138. (in Chinese)
- [38] 李海峰, 权伟, 承楠, 等. 智慧标识网络中基于族群协作的缓存机制[J]. *物联网学报*, 2018, 2(4): 5 – 13.
Li H F, Quan W, Cheng N, et al. Crowd-based collaboration caching mechanism in smart identifier network[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2018, 2(4): 5 – 13. (in Chinese)
- [39] 谢婉君, 贾濡. Linux内核移动性支持机制与实现[J]. *计算机技术与发展*, 2015, 25(3): 103 – 107.
Xie W J, Jia R. Mechanism of mobility support in Linux

- kernel and its implementation[J]. *Computer Technology and Development*, 2015, 25(3): 103–107. (in Chinese)
- [40] Zhang H, Dong P, Quan W, et al. Promoting efficient communications for high-speed railway using smart collaborative networking [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2015, 22(6): 92–97.
- [41] 张宏科. 智慧协同网络系统及应用[J]. *北京交通大学学报*, 2016, 40(4): 60–64.
Zhang H K. Smart collaboration network system and applications [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2016, 40(4): 60–64. (in Chinese)
- [42] 袁冲, 郑涛, 董平, 等. 高速环境下智慧动态监测系统的设计与实现[J]. *计算机技术与发展*, 2016, 26(3): 5–8.
Yuan C, Zheng T, Dong P, et al. Design and implementation of intelligent dynamic monitoring system in high-speed environment[J]. *Computer Technology and Development*, 2016, 26(3): 5–8. (in Chinese)
- [43] Quan W, Liu Y, Zhang H K, et al. Enhancing crowd collaborations for software defined vehicular networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2017, 55(8): 80–86.
- [44] 贾濡, 潘沐铭. 基于卡尔曼滤波的流量预测机制[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2018, 13(6): 702–707.
Jia R, Pan S M. The mechanism of traffic prediction based on Kalman filter[J]. *Journal of CAEIT*, 2018, 13(6): 702–707. (in Chinese)
- [45] 权伟, 崔恩放, 张宏科. 多源协作的传输控制机制[J]. *电子学报*, 2018, 46(10): 2527–2533.
Quan W, Cui E F, Zhang H K. Multi-source collaborative transmission control mechanism[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(10): 2527–2533. (in Chinese)
- [46] Zhang Y, Dong P, Yu S, et al. An adaptive multipath algorithm to overcome the unpredictability of heterogeneous wireless networks for high-speed railway[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, 67(12): 11332–11344.
- [47] 冯博昊, 周华春. 移动边缘计算场景下网络服务灵活适配的解决方案[J]. *电信科学*, 2019, 35(3): 18–24.
Feng B H, Zhou H C. A solution for flexible adaption of network services in mobile edge computing[J]. *Telecommunications Science*, 2019, 35(3): 18–24. (in Chinese)
- [48] Song F, Ai Z, Zhou Y, et al. Smart collaborative automation for receive buffer control in multipath industrial networks [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(2): 1385–1394.
- [49] 苗春尧, 张宏科, 周华春. 智慧协同网络族群的分布式管理机制 [J]. *北京交通大学学报*, 2015, 39(5): 22–26.
Miao C J, Zhang H K, Zhou H C. A mechanism of family distributed management in smart and cooperative network [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2015, 39(5): 22–26. (in Chinese)
- [50] Zhang H, Dong P, Yu S, et al. A scalable and smart hierarchical wireless communication architecture based on network/user separation [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2017, 24(1): 18–24.
- [51] 朱世佳. 一体化标识网络绿色节能关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
Zhu S J. Research on The Key Technologies of Green Networking in Universal Identifier Networks [D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [52] 田津津, 苏伟, 陈佳. 智慧协同网络的能耗分析与研究 [J]. *计算机应用与软件*, 2015, 32(5): 136–140.
Tian J J, Su W, Chen J. Analysing and studying energy consumption of smart and cooperation network [J]. *Computer Applications and Software*, 2015, 32(5): 136–140. (in Chinese)
- [53] 杨冬, 马剑, 张宏科. 智慧协同工业无线传感器网络 [J]. *电子学报*, 2017, 45(6): 1537–1544.
Yang D, Ma J, Zhang H K. Smart and cooperative industrial wireless sensor network [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(6): 1537–1544. (in Chinese)
- [54] 张宏科, 程煜钧, 杨冬. 工业网络技术现状与展望 [J]. *物联网学报*, 2017, 1(1): 13–20.
Zhang H K, Cheng Y J, Yang D. State of the art of industrial network technologies: a review and outlook [J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2017, 1(1): 13–20. (in Chinese)
- [55] 于成晓, 刘刚, 张宏科. 智慧标识网络动态防御机制与应用 [J]. *中兴通讯技术*, 2019, 25(1): 42–46.
Yu C X, Liu G, Zhang H K. Dynamic defense mechanism and application for smart identifier networks [J]. *ZTE Technology Journal*, 2019, 25(1): 42–46. (in Chinese)
- [56] 吴根, 张宏科. 新型互联网体系研究现状与对策 [J]. *科技中国*, 2019, 3: 84–86.
- [57] Song F, Zhou Y, Chang L, et al. Modeling space-terrestrial integrated networks with smart collaborative theory [J]. *IEEE Network*, 2019, 33(1): 51–57.
- [58] 鄢欢. 命名数据网络缓存冗余优化机制研究 [D]. 北

- 京: 北京交通大学, 2016.
- Yan H. Research on The Optimization Mechanisms of Cache Redundancy in Named Data Networking [D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [59] 陈哲. 智慧协同网络基于路径标识的路由体系及安全性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
- Chen Z. Research on Path-identifier-based Routing Architecture and Its Security in Smart Identifier network [D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [60] Borgwart A, Boukoros S, Shulman H, et al. Detection and forensics of domains hijacking [A]. Proceedings of IEEE Global Communications Conference [C]. San Diego, USA: IEEE, 2015. 1 – 6.
- [61] Alkadi O S, Moustafa N, Turnbull B, et al. An ontological graph identification method for improving localization of IP prefix hijacking in network systems[J]. IEEE Transactions on Information Forensics and Security, 2020, 15: 1164 – 1174.
- [62] Alsirhani A, Sampalli S, Bodorik P. DDoS detection system: using a set of classification algorithms controlled by fuzzy logic system in apache spark [J]. IEEE Transactions on Network and Service Management, 2019, 16 (3): 936 – 949.
- [63] Wang J, Wen R, Li J, et al. Detecting and mitigating target link-flooding attacks using SDN [J]. IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing, 2019, 16 (6): 944 – 956.
- [64] 陆婷, 周华春, 苏伟, 等. 一体化标识网络安全性能测试[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(6): 118 – 121.
- Lu T, Zhou H C, Su W, et al. Security performance test for universal tagging network [J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(6): 118 – 121. (in Chinese)
- [65] 姚苏, 关建峰, 潘华, 等. 身份与位置分离网络中的可证明三元认证接入协议[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(S1): 58 – 62.
- Yao S, Guan J F, Pan H, et al. Provably secure three-elements peer access authentication protocol in identifier/locator separation network [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(S1): 58 – 62. (in Chinese)
- [66] 潘刚, 罗洪斌. CoLoR 架构中边界路由器的设计与开发 [J]. 中国科技论文, 2018, 13(2): 149 – 152.
- Pan G, Luo H B. Design and development of border router in CoLoR [J]. China Sciencepaper, 2018, 13 (2): 149 – 152. (in Chinese)
- [67] Xu T, Gao D, Dong P, et al. Improving the security of wireless communications on high-speed trains by efficient authentication in SCN-R [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 7283 – 7295.
- [68] Ai Z, Liu Y, Chang L, et al. A smart collaborative authentication framework for multi-dimensional fine-grained control [J]. IEEE Access, 2020, 8: 8101 – 8113.

作者简介



支 婷 女, 1993 年 3 月生, 贵州安顺人. 北京交通大学电子信息工程学院博士研究生, 主要研究方向为未来互联网体系架构、网络安全与信息中心网络等.
E-mail: 15111048@bjtu.edu.cn



刘 颖(通讯作者) 女, 1978 年 8 月生, 山东寿光人. 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为未来互联网体系架构、网络安全与确定性网络等.
E-mail: yliu@bjtu.edu.cn



周华春 男, 1965 年 8 月生, 安徽池州人. 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为未来互联网体系架构、移动互联网、网络安全、空间网络等.
E-mail: hchzhou@bjtu.edu.cn



张宏科 男, 1957 年 9 月生, 山西大同人. 北京交通大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 主要研究方向为下一代信息网络关键理论与技术. 国家 973 项目“一体化可信网络与普适服务体系基础研究”与“智慧协同网络理论基础研究”首席科学家.
E-mail: hkzhang@bjtu.edu.cn