

面向作战任务的多域异构网络泛在互联技术*

许道峰 田少鹏 徐以标

(中国电子科技集团公司第二十八研究所 南京 210023)

摘要: 针对当前通信网络技术体制众多、跨异构网络组织运用不灵活、端到端差异化通信保障能力弱等问题,提出了一种通过构建覆盖网络实现多域异构网络泛在互联的解决方案。通过信息网关屏蔽异构网络技术体制差异,实现融合接入;通过网络服务节点提供资源统一调度和应用驱动接口,实现面向作战任务的逻辑网络按需构建。原型测试结果表明,该方案在高效跨网互联、端到端时延和网络资源利用率等方面有较大能力提升,可以有效支撑杀伤链构建、跨域协同等多种新型作战样式和作战场景。

关键词: 任务驱动;覆盖网络;端到端;网络组织运用;软件定义

中图分类号: TN913;TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-909X(2023)01-0022-08

Task-Oriented Ubiquitous Interconnection Technique of Multidomain Heterogenous Networks

XU Daofeng TIAN Shaopeng XU Yibiao

(The 28th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Nanjing 210023, China)

Abstract: Aimed at problems such as numerous technical systems of current communication networks, nonflexibility in heterogenous network utilization, and poor end-to-end discriminated communication support capabilities, etc., a solution constructing overlay network is proposed to realize ubiquitous interconnection of multiple heterogenous networks. The difference among technical systems of heterogenous network is shielded with information gateway, thus converged access is realized. Unified network resource and application-driven interfaces are provided with network service nodes, and task-oriented logical network constructed on demand is realized. Prototype test results show that the solution has much capability improvement on multi-network interconnection, end-to-end delay, and network resource utilization, etc. And it can effectively support multi novel combat patterns and operation scenes, such as kill link construction and cross-domain cooperation.

Key words: task-oriented; overlay network; end to end; network utilization; software defined

0 引言

当前,通信网络基本采用核心网+承载网+接入网的架构,随着5G移动通信和网云融合等技术的

快速发展,基本实现了整网的IP化,网络、计算和存储资源的一体化编排也逐步成熟。相比之下,军事通信网络的发展较为缓慢,网络情况也相对复杂,仍然存在网系烟囱、接入不灵活、服务质量保障难、网

* 基金项目:装备发展部、电科集团发展资金资助项目。

收稿日期:2022-10-12

引用格式:许道峰,田少鹏,徐以标.面向作战任务的多域异构网络泛在互联技术[J].指挥信息系统与技术,2023,14(1):22-29.

XU Daofeng, TIAN Shaopeng, XU Yibiao. Task-oriented ubiquitous interconnection technique of multidomain heterogenous networks[J]. Command Information System and Technology, 2023, 14(1): 22-29.

络管控能力弱和规划配置时间长等问题,难以适应未来信息化战争的需要。

为此,美国国防高级研究计划局(DARPA)先后启动了体系综合技术和试验(SoSITE)^[1]、异构电子系统的体系技术集成工具链(STITCHES)、任务优化动态自适应网络(DyNAMO)^[2-4]、任务集成网络控制(MINC)^[5-6]等多个项目,旨在解决异构数据链系统、信息系统的互连互通互操作问题。

SoSITE项目^[1]目标:发展创新的体系架构以维持在对抗环境中的空中优势;验证将各类任务系统集成到体系架构中的能力以及该架构的作战效能和韧性,采用自动化工具链集成多个系统,形成一个动态体系,该体系由需要的作战能力确定,通过自动翻译系统间的消息提供全局互操作能力。

STITCHES是一种纯软件工具链,通过在系统间自动生成低延迟和高吞吐量的中介软件,在不需要升级硬件或破坏现有系统软件的情况下,即可快速集成跨任何领域的异构系统。STITCHES工具链不强制采用通用接口标准,而是基于已部署的能力快速创建需要的连接,可避免为了互操作而升级的需要。

DyNAMO项目^[3]目标是创建一个信息覆盖云,使战斗机能够在整个战区网络通过DyNAMO节点交换与任务相关的态势信息,以促进跨平台通信。DyNAMO解除了当前机载网络的3个重要限制,即现有战术数据链因缺乏互操作性而阻碍不同飞机间的信息共享、无法动态适应对抗环境以及因信息流管控能力不足而无法确保满足任务目标需求。

针对当前战术网络面临的大规模异构通信系统的网络互操作性欠缺、支持任务的网络能力不足以及不能自主配置和动态配置网络以满足任务目标等关键问题,MINC项目^[6]开发并集成3大关键能力,通过在网络之网络的编配中引入可选性、多样性和快速自适应性的“马赛克”概念来实现杀伤网要素间的按需连接。1)创建“始终在线”的网络覆盖,以访问可用网络与通信资源,并控制参数;2)使用跨网络方法,以优化并管理网络配置和信息流;3)创建任务驱动式方法,以确定杀伤网要素的关键信息流。MINC将使单个战术网络的手动静态配置以及有限互联能力成为历史。

军事通信网络由于使用环境、通信距离、抗干扰能力、通信带宽、网络容量和时延要求随着作战样式

和作战场景不同而存在巨大差异,难以通过一种通信手段普适各种作战应用^[7]。采用多种通信手段综合组网^[8-11],以充分发挥不同通信手段、不同通信频段和不同组网方式在抗干扰、气象无关性、传输距离和传输带宽等方面的局部优势,将导致在相当长一段时间内必然存在异构通信网络并存的局面^[12-14]。同时,大量现有异构通信网络资源也需尽可能地高效利用起来,以盘活存量资源。因此,研究任务驱动的泛在异构网络互联技术,可解决跨网跨平台互连互通、端到端通信传输保障、通信网络资源按需调度、网络体系抗毁抗扰^[15]等问题,是当前乃至相当长一段时间内、信息化战争条件下迫切需要解决的关键问题。

1 概述

针对当前各种类型通信网络存在的现实能力不足,以及跨域联合作战、动态杀伤链构建等新型作战样式带来的新需求,通过在现有通信网络基础上构建覆盖网络(overlay network)^[16-17]来提升体系能力,即不改变现有各类网络技术体制和运行机理,通过在跨网系节点部署信息网关(IGW),形成分布式接入系统,实现异构网络有机融合;通过部署网络服务节点(NSN),构建网络服务控制系统,实现资源高效组织应用。

参考DARPA的MINC项目研究方向,任务驱动的泛在异构网络互联主要功能如图1所示。覆盖网络主要实现以下3个方面功能:

- 1) 异构网络融合接入:通过网络状态信息获取感知网络资源,通过分发控制信息控制网络资源,通过集成传输服务接纳作战业务数据;
- 2) 分布式网络编排:基于作战任务对通信网络资源的需求以及当前通信网络状态,进行分布式、跨异构网络通信资源的优化调度计算,并生成相关的

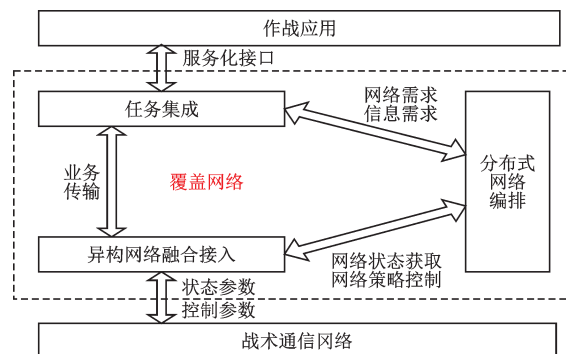


图1 任务驱动的泛在异构网络互联主要功能

资源预留策略、跨网转发策略和优先级策略,下发相关通信参数形成端到端通信保障;

3) 任务集成:面向作战应用提供服务化资源访问接口和业务传输接口,并具备将任务目标转化为网络和信息需求的能力。

2 系统架构

任务驱动的泛在异构网络互联采用软件定义网络^[18-19]的控制与转发分离、分布式集中控制以及流表统一下发等设计理念,通过部署 IGW 和 NSN,在骨干网络、接入网以及各类异构末端用户网等基础通信网络基础上,形成面向作战任务的信息覆盖网络,提升网络的兼容普适能力、资源动态调度能力和业务差异化保障能力。在不改变现有通信网络现状和技术体制的前提下,通过云网融合、全局流量工程^[20]、深度学习和端到端传输优化等关键技术,提升网络的精准感知、精细调控、任务驱动、智能敏捷和韧性抗毁能力,以及面向作战任务的随遇接入与端到端传输质量保障等能力。

NSN 构成信息覆盖网络的控制面,负责区域内部或区域之间通信资源保障策略和业务传输策略的生成,是覆盖网络的“大脑”和中枢;IGW、骨干网中的交换机与路由器以及各异构子网构成信息覆盖网络的转发面,负责作战业务数据按策略传输转发。任务驱动的泛在异构网络互联系统采用开放架构,支持 IGW 动态加入,可以实现网络整体规模的弹性扩展,其系统架构如图 2 所示。

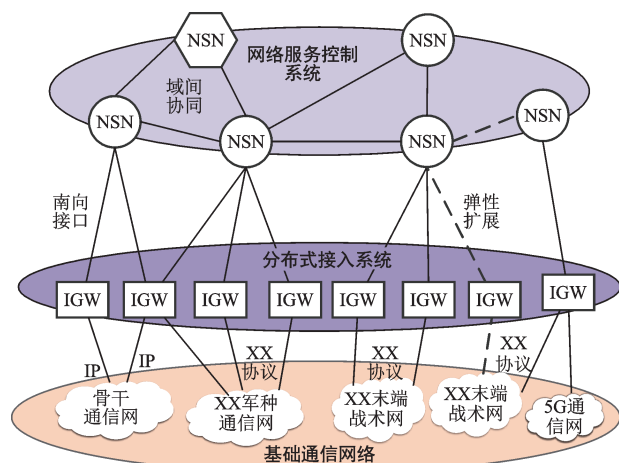


图 2 系统架构

3 系统组成

任务驱动的泛在异构网络互联构建的信息覆盖网络由分布式接入系统和网络服务控制系统构成,

分别实现信息覆盖网络的转发面和控制面功能。分布式接入系统由系列 IGW 构成,用于连接不同类型的基础通信网络,实现网络受控互连、通信虚拟化和信息分发控制等功能;网络服务控制系统由 NSN 构成,实现区域内和跨域异构通信网络资源编排、任务网络构建以及面向作战任务提供通信服务化等功能。

3.1 分布式接入系统

分布式接入系统基于网络服务控制系统下发的转发策略,实现跨异构网系的信息传输分发,由按需部署的 IGW 构成,屏蔽异构网络技术体制差异,接受统一管控,并融入体系,支持弹性扩展。

IGW 主要提供多链路综合组网、通信资源管理、传输控制、消息处理及格式转换等功能模块,其功能组成如图 3 所示。

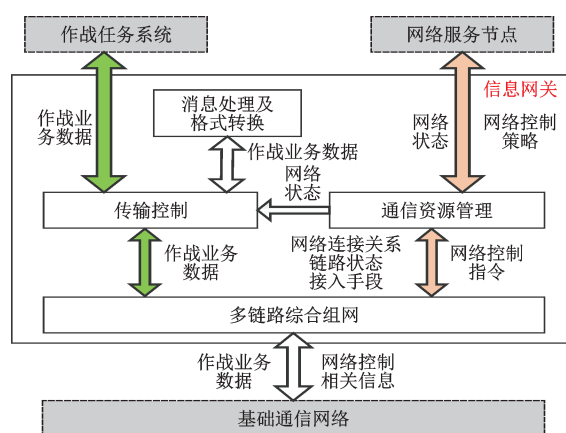


图 3 IGW 功能组成

3.2 网络服务控制系统

网络服务控制系统是实现全网拓扑的维护、状态采集、任务网络构建、资源预留策略和转发策略生成,以及特殊情况下报文的转发控制,是信息覆盖网络的决策中心。基于自动控制系统原理,通过状态感知、智能决策和敏捷控制,实现基于网络状态和作战任务的网络资源闭环控制,确保跨域异类网络资源调度即时高效。

网络服务控制系统由按需部署的 NSN 构成,通过分级分域控制 IGW,提供即时高效的区域和跨域网络资源调度服务,实现异构网络融合和跨域端到端通信传输保障能力。NSN 向下对接 IGW,实现网络状态采集和预测,支持对多个 IGW 进行管理;向上对接应用系统,提供任务需求分解和任务网络构建功能,实现区域内通信网络资源调度^[21],将任务网络映射到具体物理网络的节点和链路上。

为实现大规模组网,NSN支持无中心分布式多节点协同,以实现跨区域资源调度功能。也支持通过分布式自举算法,推选一个NSN行使网络服务中心(NSC)功能,承担全网跨域资源集中协同的功能。NSN主要提供任务网服务、通信能力服务化、资源编排服务和通信态势服务等功能,其功能组成如图4所示。

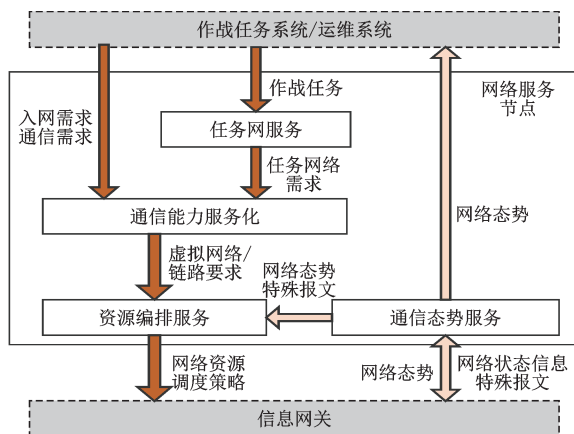


图4 NSN功能组成

4 工作机理

4.1 任务网络构建

任务网络是以参与任务的作战单元为网络节点,以其相互间的虚拟通信链路为边构成的逻辑网络。任务网络构建是针对特定作战任务分配通信

网络资源、按需打通异构网络、提供业务传输控制,为特定作战任务参与单元提供端到端通信资源保障和业务传输保障的过程。任务网络构建过程包括:

1) 接收任务:作战单元将作战任务需求发送给NSN;

2) 需求分解:NSN进行任务需求分解,确定作战任务参与单元、各参与单元所在物理通信网络、作战单元间信息交互关系及传输带宽需求等,并据此构建任务逻辑网络;

3) 资源调度:若任务逻辑网络的作战参与单元仅涉及区域内的通信网络,则由NSN进行区域内资源调度;若涉及跨区域通信网络,则由NSC或NSN协同进行跨区域资源调度;

4) 策略下发:NSN将资源调度策略下发至相关IGW;

5) 策略执行:IGW依策略执行资源调整,配置相关通信节点和通信链路,打通相关物理网络。

任务网络构建过程如图5所示。其中,CMU为通信管理单元。空中指挥平台至陆上装备之间需跨接多种异构网络,其虚拟链路则依次映射到数据链、地面骨干IP网和战术级末端网。在地面IP网部分链路和节点出现故障时,虚拟链路的映射关系可根据资源情况动态调整,有效避开受损受扰节点或链路,从而提升了体系抗毁抗扰能力。

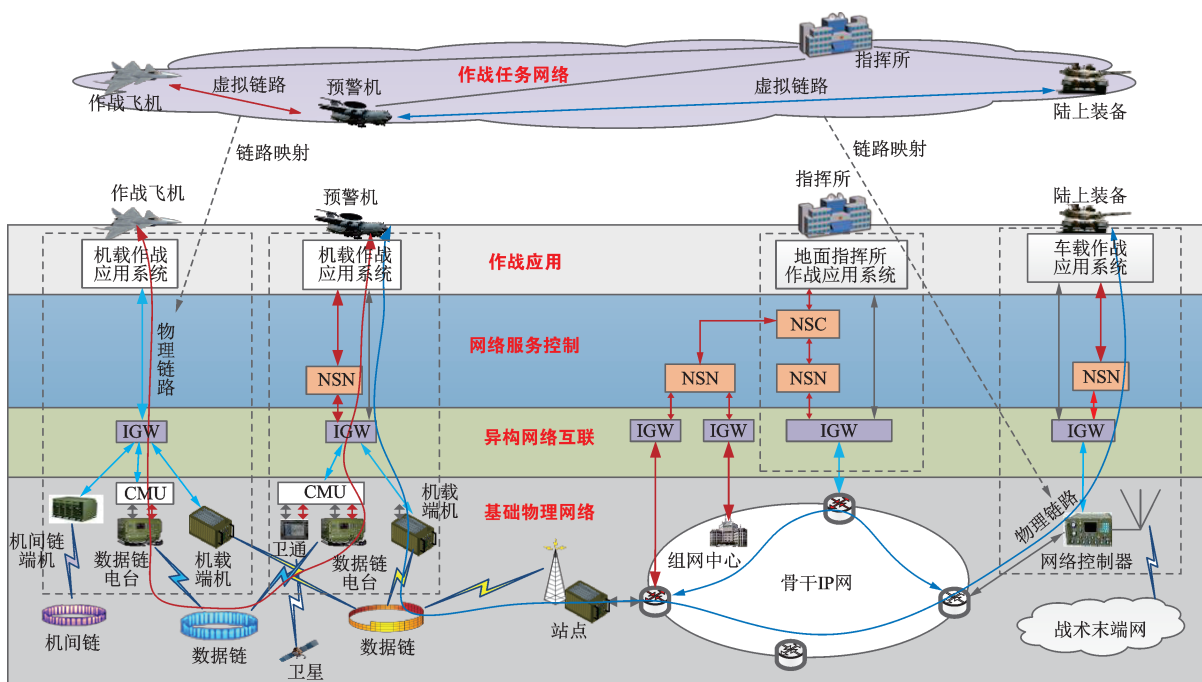


图5 任务网络构建过程

4.2 网络状态获取

网络状态获取主要包括生成全网拓扑关系和实时采集网络链路状态,为形成作战信息转发策略提供决策依据。

4.2.1 信息关关注册

IGW 采用混合注册方法,其入网注册流程如图 6 所示,具体包括:

- 1) 服务节点主动性周期发送入网信息;
- 2) 如 IGW 未接收到入网信息,则利用其宽带 IP 链路主动注册(点对点);
- 3) 成功注册的 IGW 通过其他通信手段,向外中继广播该网络分区的入网信息;
- 4) IGW 记录离服务节点的距离矢量(DV)最小值,并利用 DV 进行判断,舍弃重复入网信息帧;
- 5) IGW 利用注册信息判断其邻接关系,并更新邻接关系表。

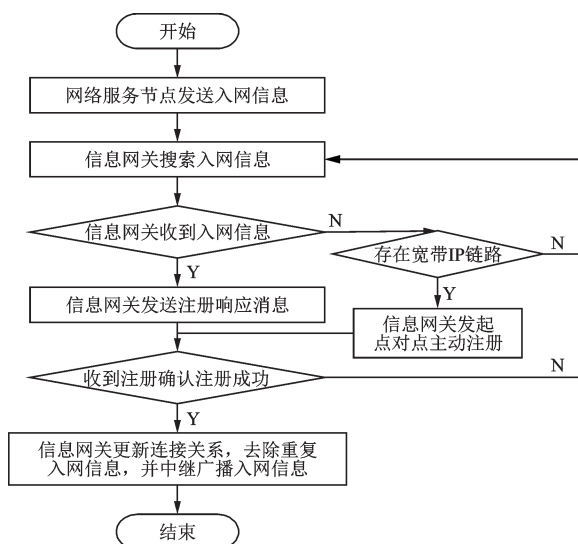


图6 IGW入网注册流程

4.2.2 拓扑生成

在 IGW 注册过程中,IGW 利用注册信息判断其邻接关系,并更新邻接关系表。NSN 通过各 IGW 上报的邻接关系,生成区域内 IGW 拓扑。以图 7 所示拓扑生成过程示例说明邻接关系及域内拓扑生成过程。

- 1) 以 IGW#2 为例,IGW#2 从 IGW#3 收到入网信息,记录邻接关系 $\langle \text{IGW}\#2, \text{IGW}\#3, \text{net} \rangle$;
- 2) IGW#2 向外广播入网信息,IGW#1、IGW#6 成功接收并向 IGW#2 发送响应消息;
- 3) IGW#2 通过响应消息获得邻接关系 $\langle \text{IGW}\#2, \text{IGW}\#1, \text{net} \rangle$ 和 $\langle \text{IGW}\#2, \text{IGW}\#6, \text{net} \rangle$;

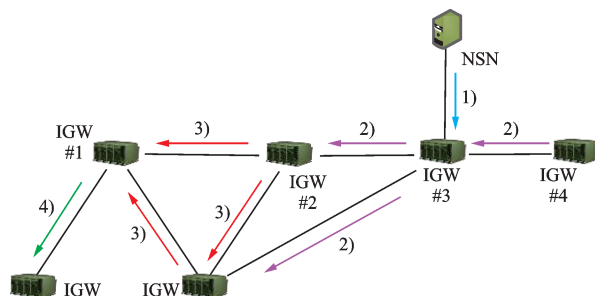


图7 拓扑生成过程示例

- 4) 同理,IGW#6 会形成邻接关系 $\langle \text{IGW}\#6, \text{IGW}\#3, \text{net} \rangle$ 、 $\langle \text{IGW}\#6, \text{IGW}\#2, \text{net} \rangle$ 和 $\langle \text{IGW}\#6, \text{IGW}\#1, \text{net} \rangle$,并以到达 NSN 的 DV 值进行排序;

- 5) 各 IGW 通过入网注册消息,将自身的邻接关系上报 NSN,中途的 IGW 对入网注册消息进行信息合并和转发,直至 NSN 获得网络分区内所有 IGW 以及它们的邻接关系表;

- 6) NSN 基于 IGW 的邻接关系表形成域内拓扑,并下发到各个 IGW。

IGW 的注册信息、状态上报信息,以各个 IGW 的邻接关系表,按照优先次序进行转发,确保最小跳数到达 NSN。

4.2.3 链路状态感知

当 IGW 成功注册到 NSN 后,网络链路负载情况和链路质量等状态信息也需上报给 NSN,以便基于业务负载和网络链路质量进行动态资源调度。链路状态信息通过与通信网络对接后采集实现,主要采集信息包括通信手段/通信网络 T 、额定带宽 B 、当前负载 R 、绝对延时 τ 和丢包率 γ 等。

链路状态信息可采用以下 2 种方式完成:

- 1) IGW 以固定的时间间隔主动上报。IGW 依据上报状态信息的链路带宽和上报信息的大小,周期上报状态信息。如上报状态信息的链路带宽为 1 Mb/s,上报信息大小为 200 B/次,上报周期为 30 ms。由于每条通信链路的两端上报的链路状态信息基本一致,因此该主动上报方式会有一倍的冗余开销。
- 2) NSN 查询后上报。该方式类似于 SDN 的网络状态采集,通过 SDN 控制器下发交换机的端口信息采集指令,并以此生成链路负载情况。由于需要 NSN 发送查询指令,故有一定的信息交互开销,同时时效性会受到一定影响。但该方式具有可避免 IGW 主动上报时冗余开销的优势。

4.3 信息转发

基于信息覆盖网络拓扑,任务驱动的泛在异构互联设计分级转发体系,即链路标识转发、转发表转发和中心节点转发。根据网络状态采集情况、作战任务需求按优先级确定转发策略,依次包括链路标识转发、转发表转发和中心节点转发。分级转发体系如表1所示。

表1 分级转发体系

转发策略	有无中心	有无任务	网络状态掌控	保障能力	优先级
链路标识转发	是	是	网系/网内	端到端资源预留	1
转发表转发	是	否	网系	尽力而为	2
中心节点转发	是	否	部分	尽力而为	3

IGW在收到作战信息后,其分级转发策略流程如图8所示。

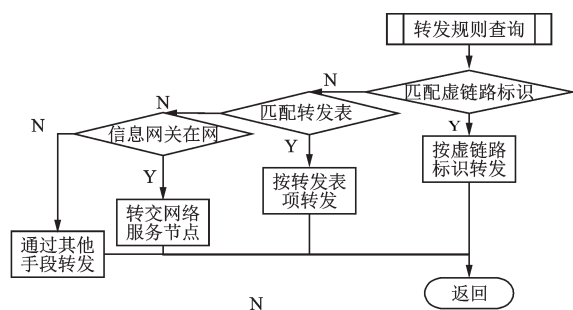


图8 IGW 分级转发策略流程

4.3.1 链路标识转发

链路标识转发是优先级最高的转发策略,可以在一个网络分区内部实现,也可以跨网络分区实现。网络服务控制系统会根据作战任务的通信需求,为作战平台端到端通信建立广义虚链路(GVL),并根据物理通信网络接口开放程度提供端到端或部分网络/链路的传输资源保障。

广义虚链路可连通不同类型、特性的物理通信网络,对不同物理通信网络预留相应的通信切片资源,并通过链路标识(VLI)进行区分。通信切片资源包括IP网络上基于五元组的网络切片资源、数据链系统的时隙分组资源、5G网络的空间、时间、频率资源,以及窄带通信系统、光纤传输系统的链路资源等。作战信息在广义虚链路的入口被IGW加上链路标识^[22],在广义虚链路的出口被IGW去掉链路标识,而广义虚链路的沿途IGW则通过链路标识进行快速、按序信息转发。

网络分区内部通过NSN计算最优的域内转发路径和资源预留策略,而跨网络分区则通过NSC计算,

或通过多个NSN协商,实现最优的跨域转发路径和资源预留策略。IGW基于网络服务控制系统下发的转发路径和资源预留策略,生成端到端广义虚链路,并基于作战信息的链路标识进行快速信息转发。

4.3.2 转发表转发

转发表基于IGW的信息转发表进行作战信息分发,是一种没有通信资源保障、尽力而为的转发策略,可在一个网络分区内部实现,也可跨网络分区实现。信息转发表的生成基于网络状态共识和转发的优化目标,可以采用分布式路径计算,也可通过网络服务控制系统进行集中式路径计算。

分布式路径计算由各个IGW根据NSN下发的域内拓扑信息进行,基于最小跳数、最短路径优先等准则,在相同网络拓扑信息下通过相同路径算法,分布式计算得到一致的转发路径,类似于路由信息协议(RIP)和最短路径优先(SPF)等路由协议的工作机制。

集中式路径计算采用软件定义网络理念,通过网络服务控制系统进行信息转发路径计算,并将计算结果下发给相应IGW。由于NSN或NSC掌握着区域内部和全域的网络状态信息,无需进行网络状态迭代收敛,可以进行快速路径计算。

4.3.3 中心节点转发

中心节点转发指IGW将待转发的作战信息上报给NSN,由NSN来决定信息如何转发的一种信息分发方式,是一种没有通信资源保障、尽力而为的转发策略,类似于软件定义网络中没有流表情况下的packet in和packet out报文。当IGW收到的作战信息,既不是本地接收,也查找不到链路标识和转发表表项时,会采用中心节点转发,通过NSN来决定作战信息的下一跳去向。

通常情况下,NSN掌握全面的网络状态信息,通过分析作战信息的目的地址以及当前的作战任务和平台部署情况,在本地查找平台地址与IGW的映射关系表,并依此将作战信息发送到对应的IGW。同时,NSN会将信息转发策略下发到相关的IGW,以便后续作战信息报文能够基于信息转发表直接转发。对于跨网络分区的信息转发,NSC会查询平台地址与网络分区的映射关系表,并依此将作战信息发送到对应的IGW(对应相应的网络分区)。

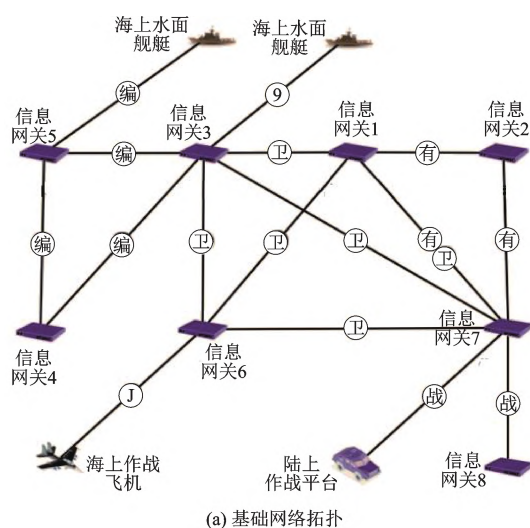
如果NSN在本地查找不到平台地址与IGW(或网络分区)的映射关系,则会向通信名录服务查询,获知作战平台关联的IGW或所属网络分区。NSN在得到该信息后,进行转发策略计算,并将计

算结果下发给相应的IGW,以便后续作战信息报文能够基于信息转发表直接转发。

5 原型测试结果

基于任务驱动的泛在异构网络互联设计理念,本文构建了原型系统,并验证了原型系统在任务网络构建、跨网跨军种信息自动流转和网络抗毁重构等方面的能力提升。测试结果表明,当前军事通信网络存在的几个重难点问题,通过任务驱动的泛在异构网络互联系统均可加以解决。

1) 任务网络动态构建。支持跨军种跨异构通



信网络构建任务网络。针对联合作战场景,通过任务驱动的泛在异构网络互联,临机构建如图9所示包括陆、海、空作战平台作为成员的作战任务网络。

2) 跨网信息自动流转。支持陆海平台间直接交互我方成员信息、目标态势信息、作战指令和自由文电等,实现跨军种作战协同。

3) 任务网络抗毁重构。在基础通信网络出现异常时,具备实时感知可用资源状态,并即时调整任务网络到物理网络资源的映射关系,提升任务网络体系抗毁能力。图10给出卫星通信受扰前后,任务网络中陆海平台间信息链路的重构映射调整过程。

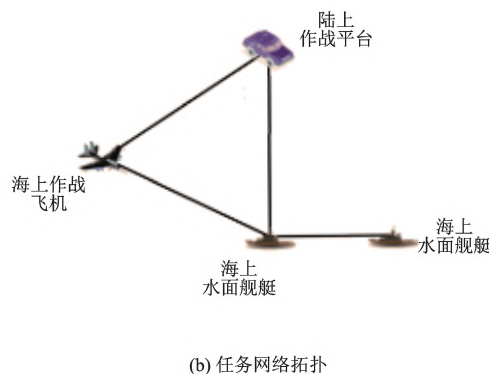


图9 联合作战场景跨军种跨异构网络构建任务网络

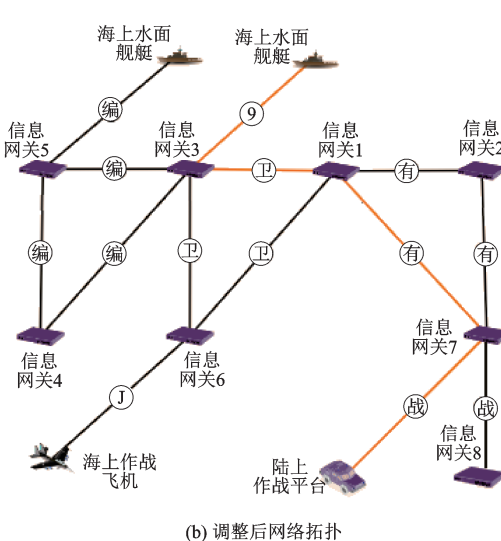
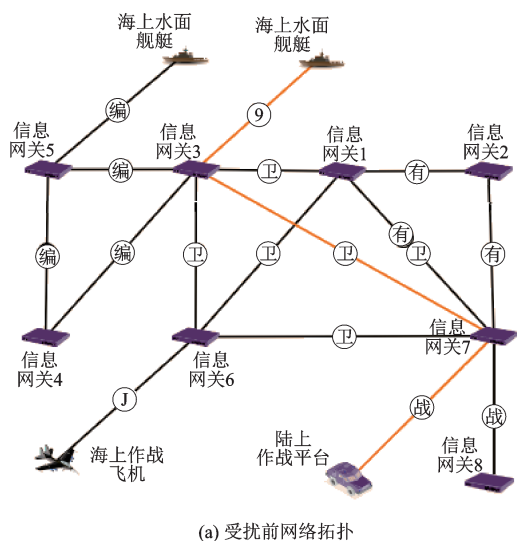


图10 任务网络重构

6 结束语

本文针对当前通信网络存在的跨网互联、端到端传输保障、任务网络构建以及体系抗毁等方面的能力

不足,开展了基于信息覆盖网络的任务驱动的泛在异构网络互联研究。研究方案中技术的主要特征和优势体现在以下2个方面:1) 不影响现有通信网络状态,可以最大限度盘活当前存量通信网络资源。部署

了IGW的物理网络或通信节点,具备了网络互通、资源调度和传输优化等能力,但在没有被NSN调度时,IGW并未发生作用,物理网络或通信节点的工作状态保持不变,通信保障能力保持不变;2) 增强作战任务保障能力,实现跨网跨域端到端保障。在作战应用驱动下,一旦相关IGW被NSN调度,其对应的物理网络或通信节点就会启动受控互通、切片适配和传输优化控制等功能,通过资源调度有效避免受损受扰通信链路和节点,为作战任务提供专用端到端通信资源保障和传输业务保障,增强通信保障能力和体系抗毁抗扰能力。原型系统的测试验证表明,任务驱动的泛在异构网络互联可以作为网络信息体系支撑技术,可提升面向作战任务通信网络的组织运用能力。

参考文献(References):

- [1] 王恽,严江江,陈晓东,等. 美军体系综合技术和试验(SoSITE)项目概况及启示[C]//第三届中国指挥控制大会论文集. 北京:知网,2015:131-135.
- [2] 余晓琼. DARPA推进马赛克再出新招:异构平台互连难题即将破解[EB/OL]. (2021-02-23) [2022-09-22]. https://m.163.com/news/article_so/G3KV5FAP0515E1BM.html.
- [3] STRAYER T, RAMANATHAN R, COFFIN D, et al. Mission-centric content sharing across heterogeneous networks[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Computing, Networking and Communications. Honolulu:IEEE,2019:1034-1038.
- [4] Strategic Technology Office. Dynamic network adaptation for mission optimization (DyNAMO): DARPA-BAA-16-06 [R]. Arlington: Strategic Technology Office,2015.
- [5] DARPA Strategic Technology Office (STO). Mission-integrated network control (MINC): HR001121S0028 [R/OL]. (2021-06-24) [2022-09-22]. <https://gov-tribe.com/file/government-file/hr001121s0028-mission-integrated-network-control-amendment-2-dot-pdf>.
- [6] STRAYER T, RAMANATHAN R, COFFIN D, et al. Mission-centric content sharing across heterogeneous networks[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Computing, Networking and Communications. Honolulu:[s.n.],2019:1034-1038.
- [7] 许道峰. 基于网络编码的抗干扰传输技术[J]. 指挥信息系统与技术,2019,10(2):56-61.
- [8] LI X F, CUTHBERT L. On-demand node-disjoint multipath routing in wireless Ad hoc networks[C]// Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks. Massachusetts: IEEE Computer Society,2004:419-420.
- [9] LEE S J, GERLA M. AODV-BR: backup routing in Ad hoc networks[C]//Proceedings of IEEE Conference on Wireless Communications and Networking. Chicago:IEEE,2000:1311-1316.
- [10] ZENG K, REN K, LOU W J. Geographic on-demand disjoint multipath routing in wireless Ad hoc networks[C]//Proceedings of 2005 IEEE Conference on Military Communications. Atlantic:IEEE,2005:1-7.
- [11] 陈宇,温欣玲,段哲民,等. 一种大规模IP网络多链路拥塞推理算法[J]. 软件学报,2017,28(7):1815-1834.
- [12] 刘建航,武万萍,王树庆,等. 一种异构网络多协议并行数据分发方法[J]. 电子与信息学报,2021,43(6):1715-1723.
- [13] 史上乐. 超密集异构网络中的跨层资源调度与优化[D]. 北京:华北电力大学,2019.
- [14] 许道峰,唐乾. 基于网络编码的多链路优化传输技术[J]. 指挥信息系统与技术,2020,11(1):46-49.
- [15] 潘乐炳,刘琪琪,袁永琼,等. 异构数据链参数化波形重构技术研究[J]. 火力与指挥控制,2018,43(5):143-147.
- [16] ANDERSEN D, BALAKRISHNAN H, KAASHOEK F, et al. Resilient overlay networks[C]//Proceedings of the 18th ACM Symposium on Operating Systems Principles. Banff:ACM,2001:131-145.
- [17] REAZ A, RAMAMURTHI V, GHOSAL D, et al. Enhancing multi-hop wireless mesh networks with a ring overlay[C]//Proceedings of 2008 the 5th IEEE Annual Communications Society Conference on Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks Workshops. San Francisco:IEEE Communications Society,2008:1-6.
- [18] 雷田颖,林子薇,何荣希,等. SDN中多链路状态路由算法[J]. 计算机与数字工程,2017,45(8):1582-1585.
- [19] 闫长江,吴东君,熊怡. SDN原理解析:转控分离的SDN架构[M]. 北京:人民邮电出版社,2016.
- [20] AHLWEDE R, CAI N, LI S Y R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2000,46(4):1204-1216.
- [21] 何克龙,迟欢. 服务于异构网络融合的虚拟网动态资源分配模型[J]. 电信快报,2013(1):35-39.
- [22] FILSFILS C, NAINAR N K, PIGNATARO C, et al. The segment routing architecture[C]//Proceedings of 2015 IEEE Global Communications Conference. San Diego:IEEE,2015:1-6.

作者简介:

许道峰,男(1977—),研究员级高级工程师,研究方向为指挥信息系统总体、通信网络总体、移动通信及软件定义网络。

田少鹏,男(1979—),高级工程师,研究方向为通信系统总体设计、通信指挥和通信服务。

徐以标,男(1987—),高级工程师,研究方向为通信与数据链系统总体和传输组网方案设计等。

(本文编辑:李素华)