

基于分层分域的战术互联网网络架构与关键技术研究

云超, 鲁航, 黄立刚, 蒋攀攀, 郑腾, 钱一鸣

(中国人民解放军 63891 部队, 河南 洛阳 471000)

摘要: 未来战场作战模式由传统的以“平台”为中心转变为以“网络”为中心, 战术互联网已成为战场的“神经系统”, 它连接了战场的各作战单元并实现了信息共享和无缝连接, 其网络架构是其主要能力实现的基础, 它对保障战场通信网络稳定、可靠、高效的通信服务起到了至关重要的作用; 美军战术互联网(如美军联合战术通信系统(JTRS)、战术级作战人员信息网(WIN-T)等)网络架构均采用了混合式架构, 通过梳理分析战术互联网发展现状, 针对影响战术互联网主要性能的体系结构提出了分层分域的网络架构, 即 Mesh+Ad-hoc 的体系架构, 并对该架构下的关键技术进行了深入研究, 基于分层分域的网络架构能够更好的提升战术互联网整体鲁棒性和抗毁性, 网络的运行效率和管理能力, 更加适合于未来复杂多变的战场环境。

关键词: 战术互联网; 网络架构; 分层分域; 关键技术

Network Structure and Key Technology Research Based on Layers and Domains

YUN Chao, LU Hang, HUANG Ligang, JIANG Panpan, QIAN Yiming

(Unit 63891 of PLA, Luoyang 471000, China)

Abstract: Future battlefield operation mode is changed from platform centered to network centered, tactical Internet has become the nerve center of battlefield, it connects various combat units in the battlefield and realizes information sharing and seamless connection. Its network structure is the basis for its function realization, the network structure has played a vital role in the system stable, reliable and efficient operation. The network architecture of US army tactical internet (US army joint tactical radio system, warfighter information network-tactical) adopts a hybrid network architecture. By sorting out and analyzing the current situation of the tactical internet, and then a new network structure based on layers and domains is proposed, namely the architecture of Mesh+Ad-hoc, and the key technology is deeply studied under the architecture, the network structure based on layers and domains can promote the robustness, survivability, operational efficiency and management ability for the network, which is more suitable for complex and changeable battlefield environments.

Keywords: tactical Internet; Internet architecture; hierarchical domain; key technology

0 引言

信息化条件下, 制信息权已成为战争胜负的关键所在, 有效的指挥控制必然要求信息的高效获取、可靠传递、高效处理、及其分发, 信息的传递与分发作为中间环节显得尤为重要。战术互联网作为战场上互联的通信网络, 能够为作战部队之间提供无缝连接, 并将战场上态势感知信息、指挥控制信息无缝融合^[1]。

战术互联网网络架构根据其隶属关系和指挥需求, 在网络结构上, 根据其上下级隶属关系其结构也突出分层结构^[1]。战术互联网中的网络节点具有动态随遇接入和高机动特点, 而传统的战术互联网网络架构已经很难适应战术通信网的发展需求, 针对上述问题本文提出了基于分层分域的战术互联网网络架构, 将其分为多个层(如骨干层+接入层), 不通层采用不同技术体制, 每个层还可分为若干域, 通过分层分域的网络架构更好实现网络的运行与管理, 提升了整个网络的运行管理效率, 更加适应未来战场环境

下战术互联网的高效使用与管理要求。

1 战术互联网发展现状

战术互联网以互联网和自组网为基础, 基于路由器和战术多网网关(TMGM), 并采用标准的 TCP/IP 协议, 把不同种类的战术电台进行无缝连接, 为作战部队不同平台单元之间提供一个可靠、稳定、安全的通信网络, 为战场环境中指挥控制信息的上传下达提供通信保障^[3]。

1.1 概述

战术互联网就是在战术一级构成的互联网, 与当前民用领域非常成熟的国际互联网, 又称因特网(Internet)技术同源, 但其应用厂所不同。技术同源是指战术互联网的协议体制基本来源于商用互联网, 它基本沿用了 Internet 的网际协议(internet protocol, IP)整体架构, 将其进行适当裁剪而成; 应用场合上, 战术互联网属于一种专业网络, 主要应用于战场, 而因特网是一种通用、开放的网络^[1], 战术互联网能够满足未来数字化战场多层次、多模式、广

收稿日期: 2022-08-15; 修回日期: 2022-09-12。

作者简介: 云超(1983-), 男, 河南西平人, 博士, 工程师, 主要从事通信与信息系统、通信及通信对抗方向的研究。

引用格式: 云超, 鲁航, 黄立刚, 等. 基于分层分域的战术互联网网络架构与关键技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 194-198.

覆盖的通信需求, 为战术作战单元提供有力的通信保障和高效的战场感知能力^[2]。

1.2 功能特点

战场环境下部队通常处于机动状态下, 敌我双方地理位置随时间快速变化, 区域界限模糊, 从而要求战术互联网在强对抗战场环境下快速展开并开通, 进而保障战场态势信息的实时共享, 其主要功能和特点如下:

1.2.1 主要功能

战术互联网主要功能如下^[2]:

- 1) 能够提供战场环境下态势信息共享, 为战场态势信息提供快速、可靠的上传和下发链路;
- 2) 网络中各个用户单元之间能够互联互通, 各用户单元能够实现无缝连接;
- 3) 网络具备管理功能、安全防护、抗毁能力;
- 4) 网络满足部队快速机动的要求, 能够保“动中通”能力。

1.2.2 主要特点

战术互联网主要特点如下^[3]:

- 1) 各子系统具有良好的互联互通能力, 各通信子网通过统一的通信接口和接口协议, 进而实现互联互通;
- 2) 网络结构灵活、易于扩展, 适用于快速变化的拓扑;
- 3) 网络具有良好的鲁棒性和安全性, 为适应恶劣的战场环境, 战术互联网还需具备抗干扰、防入侵的安全防护措施。
- 4) 具备快速部署能力, 支持各通信节点间的高速机动, 这要求战场通信能够支持节点间的移动性, 是得各通信节点具备移动性, 能够进行“动中通”。

1.3 发展趋势

经过多年的研究建设, 美军的战术互联网已经得到实战的检验, 截至到 2021 年年底, 美军已建设了联合战术通信系统 (JTRS)、战术级作战人员信息网 (WIN-T) 等系统并将其成功运用到实战当中。以上计划正在以增量集的方式进行推进, 并通过不断迭代升级进一步发展完善。为适应未来战争的需求, 美军相继出台了相关研究开发计划 (如综合战术网 ITN 计划、CS 能力集计划等), 这些计划的实施代表了战术互联网最新的发展方向^[4-5]。

2 战术互联网架构

战术互联网网络架构对于保证其提供高质量、可靠、稳定的通信服务起到了至关重要的作用, 其架构的优劣直接影响系统的整体性能, 网络体系架构是网络组织运行的基础, 它决定了整个网络运行的复杂度、鲁棒性和兼容性^[6]。基于分层分域的战术互联网网络架构包含了层和域的两个概念: 层是指按照一定的原则, 如网络类型、指挥关系和区域位置等进行的层次划分, 根据战术互联网的组成结构可将其分为骨干层和接入层, 亦可分为: 上层、中层和底层 (又称骨干层、接入骨干层和底层接入层); 域是指地域分布比较接近的网络节点的集合。

战术互联网通常包含 4 种基本的网络架构: 1) 中心控制式; 2) 分层中心控制式; 3) 完全分布控制式; 4) 分层

分布控制式^[3]。基于战术通信背景下的网络不易更适合采用集中式的控制结构, 因此, 战术互联网的网络架构通常采用分布式控制架构 (即后两种方式): 完全分布控制式和分层分布控制式。

2.1 网络架构分类

战术互联网络要求通信组网具备足够的动态性和抗毁性, 无线组网体制中, Ad-hoc 技术以及 Mesh 技术广泛应用于军用、专用领域。Ad-hoc 网络和 Mesh 网络都采用分布式、自组织、自愈合方式, 网络能力和特征在很大程度上互相重叠。

1) 完全分布式架构: 完全分布式架构的特点是所有的节点在网络控制、路由选择和流量管理等方面是平等的, 通常从源节点到目的节点存在多条路径, 能够较好的实现负载均衡和最优路由选择^[3]。完全分布式架构适用于构建中小型 (节点数量较少) 网络。

2) 分层分布式架构: 分层分布式架构中网络分为群 (又称“域”), 每个群由一个群首和若干群成员组成, 群首负责群间业务的转发, 分层分级结构又分为单频分层和双频分层两种结构^[4]。例如, 在战术互联网中美军使用 NT-DR 电台组网时, 采用的就是双频分层结构^[5]。

2.2 典型架构分析

Mesh 网络由于其构造准静态的特征, 适合用于在骨干侧提供可靠接入链路; Ad-hoc 由于其动态特性, 可以用于子网侧构造随机性强, 移动性强的小规模无线网络。

1) Mesh 网络架构: Mesh 网络 (wireless mesh networks, 又称“无线网状网络”) 能够实现网络自组织、自愈合的动态配置, 并保持自组网的连通性。Mesh 网络由两种节点组成^[6-7]: Mesh 路由器和 Mesh 客户端。除了网关/桥函数的路由功能外, 网格路由器还包含支持网格网络的附加路由功能, Mesh 网络的典型架构如图 1 所示。

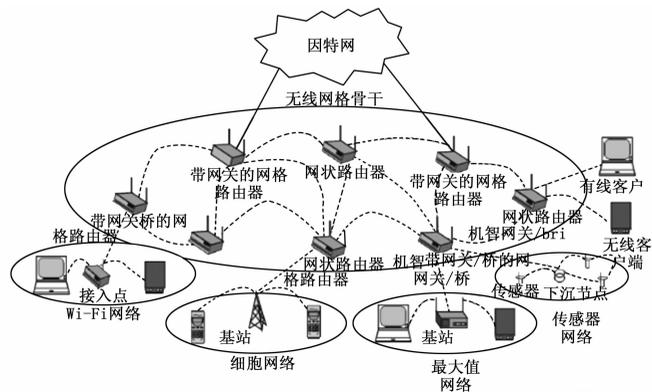


图 1 Mesh 网络架构示意图

Mesh 网络主要特点^[8-10]: 1) 融合了移动自组网和无线局域网的优点; 2) 结构灵活, 易于扩展; 3) 快速部署和安装; 4) 有多条并行链路, 具有较强的健壮性; 5) 通过多条接力传输能够提高通信距离, 实现超视距传输。

2) Ad-hoc 网络架构: 无线移动自组织网络 (Mobile Ad-hoc Network, MANET) 网络架构如图 2 所示, 与通常

的网络相比, MANET 具有自组织、动态拓扑、节点对等、多跳通信、扁平网络等特点。

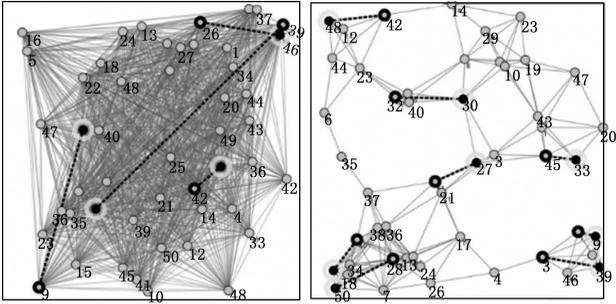


图 2 Ad-hoc 网络架构示意图

Ad-hoc 网络主要特点^[6]: (1) 分布性、无中心; (2) 自组织、自愈合; (3) 动态拓扑; (4) 多跳路由; (5) 网络中链路容量动态变化。

3) 混合网络架构: 目前主流战术互联网系统中, 规模较大的战术网络通常采用分层分布式结构, 而层和域的划分与管理通常与作战单元相适应, 不同域节点之间的通信通常借助于群间网关的转发来实现^[3]。

联合战术通信系统 (joint tactical radio system, 简称 JTRS) 通过构建模块化、多波段、多模式的 MANET 网络实现基于 IP 的战术无线电系统^[11-12], JTRS 混合网络架构如图 3 所示。

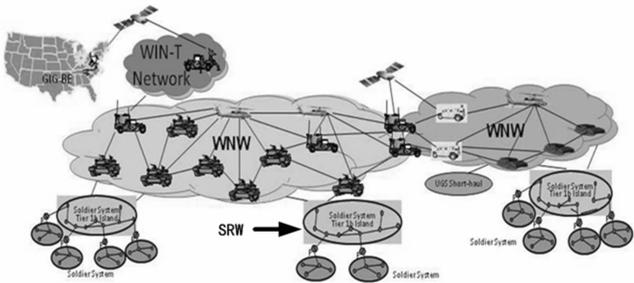


图 3 JTRS 混合网络架构示意图

JTRS 网络是一个混合网络, 采用 Ad-hoc 技术实现了局部子网内部的灵活、机动的自组织、自愈合的战术通信网络 (如 WNW 子网、SRW 子网等); 采用无线 Mesh 技术将各种异构的网络按照分层分簇的形式连接到一起, 形成栅格化的网络架构, 骨干网负责大容量、广域的数据传输, 次级骨干网负责区域的宽带数据传输, 子网则保证末端的战术级网络连接^[13-16]。

战术级作战人员信息网 (WIN-T, warfighter information network-tactical)^[17]系统地面层网络架构如图 4 所示, 美陆军将 WIN-T 系统网络架构分为三层: 师/旅网络 (上层)、营/连网络 (中层) 和排一班一单兵网络 (下层)。

3 分层分域网络架构关键技术

针对组织架构复杂、节点规模大、路由协议开销大、网络拓扑变化快、业务类型多等特点的复杂网络, 需要从信道

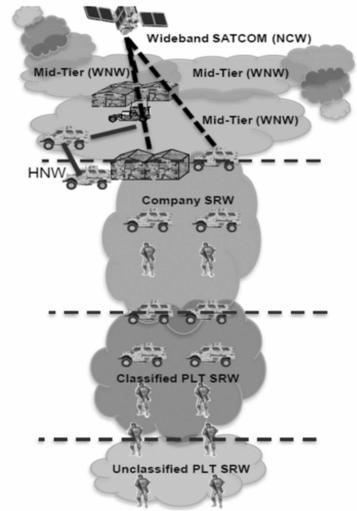


图 4 WIN-T 系统地面层网络架构示意图

复用技术、跨层网络架构、网络路由协议等方面突破基于分层分域架构下无线通信的关键技术, 实现混合网络架构的无缝融合、顺畅通信、抗毁自愈。在分层分域的网络架构中, 采用了 Ad-hoc 技术与 Mesh 技术相结合的分层网络构造方式, 可以适应多变的战术环境, 并提供一个兼具弹性能力和健壮性的大规模广覆盖的自组织网络服务。该架构下需要解决的关键技术主要包括: 1) 多维多址的信道复用技术; 2) 跨层弹性路由的网络架构; 3) 无线路由协议。

3.1 多维多址的信道复用技术

在高密度场景中, 由于带宽资源的受限, 一般的时分多址 (TDMA) 系统中其单一多址方式已经不足以支撑大规模节点的数据并发, 因此就要求链路层协议在多个资源角度采用复合手段来扩充系统容量。采用多通道方案, 即能够在时间-频率-天线等多个维度上同时提供链路层协议的多址能力, 从而大大提升通信系统的接入容量。

3.1.1 通道并发与频率捷变技术

针对高带宽和抗干扰并存的需求, 简单的频谱扩展方案势必会和复杂的频谱环境构成矛盾。为了追求更高的业务速率, 可以在现有系统的天线维度和频率维度上进行通道数量扩展。在带宽层面, 这种方案提高了系统的并发度和分集度; 在抗干扰层面, 利用频道捷变技术的多信道方案可以灵活对抗实时干扰。

3.1.2 动态多信道技术

采用动态多信道技术和跨层资源调度机制, 结合先进的时频感知、复用技术将通信协议栈和环境 (频谱资源、合作者、竞争者) 进行深度整合, 减少了各层独立设计带来的通信冗余, 提高了协议栈的效率和能力。

动态多信道技术的主要优势包含: 1) 采用多信道方案增强数据并行传输能力; 2) 采用多维分集提高业务的端到端到达率; 3) 采用信道捷变提高了干扰场景、富噪场景下系统的健壮性; 4) 采用分布式动态 TDMA 协议对时频资源进行高效利用。

3.1.3 动态路由协议跨层设计

在高密度场景中, 由于带宽资源的受限, 一般的网络系统单一多址方式已经不足以支撑大规模节点的数据并发。这就要求链路层协议在多个资源角度采用复合手段来扩充系统容量。采用动态路由协议跨层设计方案, 如图 5 所示, 在时间-频率-天线等多个维度上同时提供链路层协议的多址能力, 从而大大提升通信系统的接入容量。

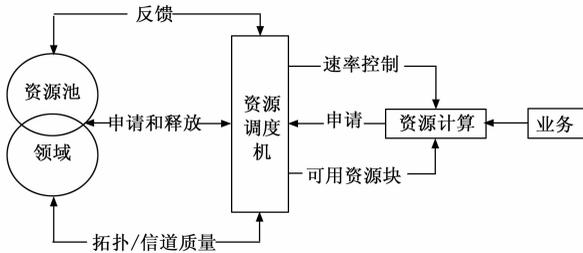


图 5 动态路由跨层设计

综上采用通道并发与频率捷变技术、动态多信道技术、动态路由协议跨层设计相结合的 MAC 层技术体制, 可以在时间-频率-天线 3 个维度对信道资源进行整合与复用, 大大加深了链路层资源池的广度和深度, 同时也有效的提升了资源复用的灵活性。

3.2 跨层弹性路由的网络架构

大规模的自组网参与节点数众多, 传统路由协议仅在各自单层独自实现路由发现、维护、查询等功能, 带来开销大、收敛速度慢、时延长等问题, 无法应用于大规模动态网络中。

传统战术互联网路由架构无法适用于快速移动的战术无线环境, 因此, 针对基于分层分域架构下的战术互联网必须设计跨层弹性路由架构, 其跨层路由架构如图 6 所示, 将路由协议分散到各个层当中, 充分共享利用网络底层的信息, 将自组网的 MAC 层和路由层进行一体化设计, MAC 层多址协议负责实现邻居发现、骨干选择、拓扑变化弹性触发等机制; 路由层负责路由洪泛、路由选择的功能, 从而实现快速发现、低开销、大规模组网的路由功能。

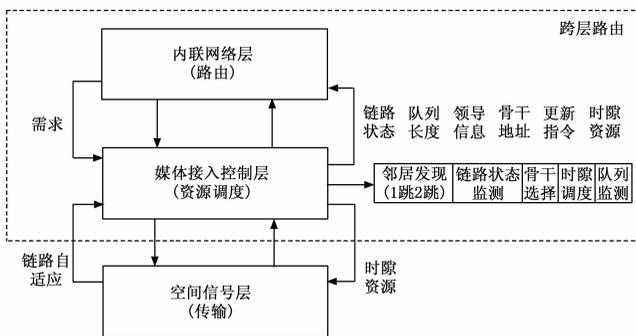


图 6 跨层弹性协作路由架构

3.2.1 跨层动态骨干网构造算法

无线路由的核心是在大规模节点网络中构造骨干网, 骨干的选择必须满足最小覆盖全网, 最优的网络吞吐量条

件, 采用基于连通图理论研究跨层动态骨干网构造算法, 并融合 MAC 层信令解决分布式、快速、高效骨干选择, 从而实现跨层动态骨干网构建。

3.2.2 快速路由选择技术

自组网中的路由是典型的多链路多速率路由选择问题, 通过研究基于媒体占用时间度量的快速路由选择技术, 进而解决在大量多跳多速率的端到端路径中快速选择一条网络吞吐量大、时延最小的最优路径问题, 从而实现快速路由选择。

3.2.3 基于模糊视觉效应的路由更新算法

在保证路由收敛速度的前提下, 减少路由洪泛的开销, 研究基于模糊视觉效应的路由更新算法, 进而降低路由更新分组洪泛的距离, 减小全网因路由变化更新带来的负载上升的问题, 从而实现路由的快速更新。

3.3 无线路由协议

战术互联网中全局网络 IP 层路由协议采用了链路状态协议 OSPF, 在该协议中, 一旦节点的相邻链路状态发生变化, 就需要将更新后的链路状态信息 LSU 进行全网洪泛。ROSPF 协议是对 OSPF 在无线上的应用改进, 实现将所有节点映射到 IP 层, 参与全局网络 IP 路由, 同时又控制洪泛的范围, 降低开销, 将子网内的路由交给子网内路由由自行决策。

3.3.1 路由过程

中层网络(如美军中层 WNW 电台网络或 ANW2 电台网络)在子网之间以及参与全局路由时采用基于 IP 寻址的 OSPF 路由协议来实现与全网的互联互通, 但是子网内部(WNW 或 ANW2)的节点同时又参与子网内部的路由来进行多跳中继, 于是需要将两种路由协议进行分工, 普通的 WNW 节点优先参与子网内部二层路由, 在 IP 层的全局路由则进行简化。

网络拓扑结构如图 7 所示, 子网 1 与子网 2 之间通过网关节点 1 和网关节点 7 进行连接。子网 1 的节点 12 到子网 2 的节点 10 之间的路由过程如下:

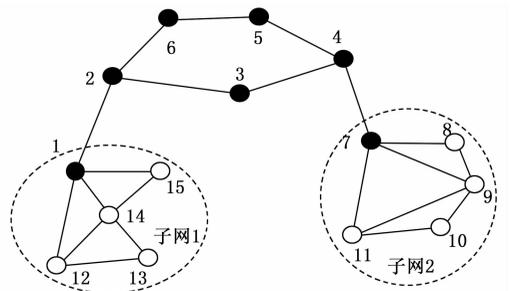


图 7 网络拓扑结构

- 1) 节点 12 在子网路由表查找节点 10 的地址, 发现节点 10 不在自身子网 1 内;
- 2) 节点 12 将下一跳 IP 地址发送网关节点 1;
- 3) 网关节点 1 查找 IP 路由表, 将下一跳地址设置为节点 2;
- 4) 节点 2 依次转发至节点 3 至节点 7;

5) 网关节点 7 发现节点 10 在其自身子网 2 内, 使用两层子网内部路由, 将数据包经节点 9 转发至节点 10。

3.3.2 洪泛控制

无线 OSPF 协议为节约开销, 对 OSPF 协议进行了改进。在洪泛时子网内部的节点不参与洪泛, 只需接收本子网网关节点的广播分组, 得到网内其他节点的地址。网关节点的 LSA 将自身子网内的其他节点的地址以虚拟拓扑映射的形式一并广播出去。如图 7 网络拓扑结构所示, 当子网内部节点发生链路状态变化, 但不影响与网关的连接时, 网关节点的洪泛内容不变; 当子网内部发生节点上线或下线时, 网关节点更新 LSA 报文内容, 新增或删除对应的节点, 而后洪泛全网; 子网 1 的网关接收到其他网关节点的 LSA 广播时, 不对其所在子网转发。

3.3.3 子网间路由抽象

网关节点在向全网广播其自身域的信息时, 需要将其所在子网的所有节点的地址一并广播出去, 供其他全局节点使用, 需要对子网内部的拓扑进行虚拟映射, 虚拟映射的原则是将子网内所有节点间的拓扑抽象为与网关的一跳拓扑。

子网间的路由抽象后网拓扑结构如图 8 所示, 在 ROSPF 协议上, 各节点判断相互间的连接关系。子网内部节点都是跟网关节点一跳直连, 子网间都通过网关节点多跳中继。子网内部按照二层子网链路状态运行路由。

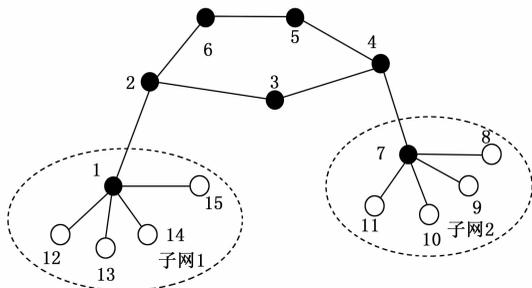


图 8 抽象后网络拓扑结构

4 结束语

针对大规模、复杂动态、强对抗特性的战场环境需求, 为解决战术互联网络在频谱受限、干扰环境复杂等问题, 本文提出了一种基于 Ad-hoc 技术与 Mesh 技术相结合的分层分域的战术互联网网络构建方法, 并采用一体化的自组网跨层协议体制, 即上层采用 Mesh 构建骨干网, 下层采用 Ad-hoc 构架接入网络, 结合了 Ad-hoc 网络和 Mesh 网络各自的优点, 从而适应多变的战术环境, 并兼顾通信距离、容量和移动性, 进而提供一个具备弹性能力和兼顾健壮性的大规模广覆盖的网络架构, 这种混合架构更加适合未来基于战场环境下战术互联网络的应用需求, 通过采用分层分域的战术互联网体系架构, 能够更好地实现战术互联网在战场环境下的综合使用效能。

参考文献:

[1] 王海. 战术互联网 [J]. 无线电通信技术, 2002, 28 (6): 30

- 31.

[2] 梁文伟. 基于自组网的战术通信网的互联技术 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[3] 聂敏. 战术自组网的关键技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004.

[4] 王海涛, 宋丽华. 一种军用自组织网络体系结构的设计 [J]. 通信世界, 2003 (6): 41.

[5] 李耐国. 美军数字化部队的编成及运作 [J]. 外国军事学术, 2003 (8): 64-66.

[6] 郑少仁, 王海涛, 赵志峰, 等. Ad Hoc 网络技术 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.

[7] 隋沛君. 战术接入网资源分配算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[8] 李娅. 无线网状网技术研究 [J]. 电脑知识与技术, 2006 (5): 56-58.

[9] 秦磊. 无线 Mesh 网络路由协议研究 [J]. 现代电信科技, 2009 (12): 31-34.

[10] 王林. 基于 Mesh 网络的战术互联网组网研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008.

[11] 张小娟, 刘洪昌. 无线网格网技术初探 [J]. 通信与信息技术, 2008 (4): 49-50.

[12] 阎瑾. 美军战术互联网体系架构研究 [J]. 通信技术, 2011, 44 (9): 105-107.

[13] 刘传辉, 周新力, 等. 战术互联网体系结构 [J]. 海军航空工程学院学报, 2008, 23 (1): 43-48.

[14] 石睿. 战术互联网的研究及其性能评估 [D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[15] 夏钢. 战术互联网组网方案设计与关键技术研究 [D]. 湖南: 国防科学技术大学, 2006.

[16] 齐艳平, 葛强, 赵安娜. 无线网络技术与军事战术互联网 [J]. 无线电通信技术, 2002, 28 (6): 30-31.

[17] 张春磊, 李子富, 陈柱文, 等. 作战人员战术信息网指挥官手册 [M]. 弗吉尼亚州: 通用动力公司, 2014.

[18] MAJ T M. WIN-T; Increasing the power of battlefield communication JTRS/WIN-T networking waveform quick reference [C] // Voice of the Signal Regiment, 2008, 33 (3): 1311-1319.

[19] HOSSAIN E, LEUNG K K. Wireless mesh networks architectures and protocols [M]. 易燕, 李强, 刘波, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2009.

[20] 何明, 姜志平, 赵勇. 美军下一代高级战术互联网体系结构发展研究 [J]. 指挥控制与仿真, 2010, 32 (6): 121-123.

[21] SANTOSH A, AGRE J, AOKI H, et al. Simple efficient extensible mesh (SEE-Mesh) proposal [Z]. IEEE P802.11 Wireless LANs, Document IEEE 802.11-05/0562r0, 2005.

[22] 云超, 谭志强. 美军 WIN-T 系统建设及其应用研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2022, 17 (3): 75-79.

[23] LIM A O, WANG X D, KADO Y, et al. A hybrid centralized routing protocol for 802.11s WMNs [J]. Mobile Network Application, 2008, 13 (2): 117-122.

[24] KIM B, KIM K, ROH H K B. Tactical network design and simulator with wireless mesh network-based backbone architecture [Z]. IEEE 978-1-4244-5550-8/10, 2010.