基于权值与平均连接度的导弹组网设计

刘春玲 施玉鑫 张 然
(大连大学信息工程学院 辽宁 大连 116600)

摘 要 为了实现导弹侦打一体化,针对导弹机动能力强、发射平台多样、节点分布分散等特点,要求作战节点之间能够建立高速、可靠、低时延的通信网络。为了提高作战节点的通信效率,在保证网络的稳定性和抗毁性的前提下,优化通信节点选取和最大化通信覆盖范围,提出了基于通信权值与平均连接度的组网算法。当主弹与从弹能够正常通信时,由主弹管理通信网络;当主弹无法完全覆盖从弹时,从弹之间自行通过计算节点通信能力的强弱和节点在网络拓扑中的平均连接度对节点的综合通信能力进行评估,选取出能够满足网络通信需求的中心节点。通过 MATLAB 仿真软件中的 Truetime 扩展工具箱对其进行了建模仿真,通过与最小 ID 算法和基于平均连接度的算法进行对比,验证了其可行性与可靠性。

关键词 弹载数据链,通信权值,平均连接度,组网,网络负载平衡因子
中图法分类号 TP393 **文献标识码** A

Design of Missile Networking Based on Weights and Average Connectivity

LIU Chun-ling SHI Yu-xin ZHANG Ran
(College of Information Engineering, Dalian University, Dalian, Liaoning 116600, China)

Abstract In order to realize the integration of missile detection and combat, a high-speed, reliable and low-latency communication network between nodes is required to meet the characteristics of strong maneuverability of missiles, diversification of launch platforms, and distributed nodes. This paper designed a data link networking scheme based on communication weights and average connectivity to improve the communication efficiency of nodes, ensure the stability and resistance of the network by optimizing the selection of communication nodes and maximizing the communication coverage. The main missile manages communication network when the main missile can communicate with slave missiles. When the main missile cannot completely cover slave missiles, slave missiles select the center node to meet the requirement of the communication network by calculating the strength of the communication capacity of the computing node and the average of the nodes in the network topology. The design was modeled and simulated through the Truetime expansion toolbox in MATLAB. Compared with other networking algorithms, the feasibility and reliability of the proposed algorithm the scheme were verified.

Keywords Missiledata link, Communication weights, Average connectivity, Networking, Network load balancing factor

1 引言

现代战争的实质是信息化战争,信息的有效传输极为重要[1],达成信息优势的核心要素是数据链[2-3]。数据链能将战场上的指挥中心、各级指挥所、各参战部队和武器平台相连接,构成陆、海、空、天一体化的全维信息网络[4-5]。基于数据链的精确制导武器大幅度提升了对目标的打击精度,实现了对时敏目标的精确打击。

弹载数据链是制导武器发展的主要方向,能够协同多个弹头共同完成精确打击目标的任务[6-8]。弹载数据链与一般的战术数据链有着很大的区别,弹载数据链的节点长期处于高速移动状态并且随时会被敌方击毁,因此要求弹载数据链网络拥有一定的抗毁能力,节点的入退网灵活,节点之间可以相互替代[9-10]。主从式组网体系结构是以主弹为中心,从弹都与主弹进行通信,主弹与从弹之间有双向数据传输链路,从弹之间无通信链路,但是某些情况下,主弹不能有效地覆盖所有从弹;导弹之间要互联互通,也可以采用弹间自组织组网技术,由于导弹的高速运动,导弹节点的拓扑信息必须不断进行更新和交换[11],使网络能适时调整其拓扑结构,以保证通信的连续性,难度较大。组网方案的好坏会影响弹载数据链网络的稳定性和网络性能。针对弹载数据链高速、可靠、低时延的需求,结合弹载节点拓扑变化快且发射平台多样的特性,提出了基于通信权值与平均连接度的弹载数据链组网方案。

2 基于权值与平均连接度的导弹组网算法

根据弹载数据链网络的特性,不同平台发射的导弹因为其任务目的不同,装载的设备与性能也会有区别。开始组网时,若主弹通信范围能够完全覆盖从弹,则直接由主弹管理网络通信。但是主弹位置较差,不能完全覆盖从弹,完成通信任务时,弹与弹之间自行组网。组网时将网络分为若干个通信组,每个通信组中有一个中心节点与若干个成员节点。中心节点需要承担较重的任务,管理从属的成员节点,处理成员节点的请求,与其他中心节点互相联系,转发和发布来自指挥中心的命令等。成员节点只向所属的中心节点报告状态和信

刘春玲(1971—),女,博士,教授,硕士生导师,CCF 会员,主要研究方向为卫星通信、信号处理等,E-mail:liuchunling@dlu.edu.cn(通信作者)。

息。因此,在组网过程中,部分通信功能强的节点在选举中心节点时优先级会高于普通节点,以此提高网络内部通信的性能和效率。但是,在实际作战过程中,由于任务不同可能出现节点间距离较大的情况,导致通信节点无法直接与其他节点进行通信,因此需要综合考虑实际网络拓扑情况选举中心节点。

2.1 通信权值

由于弹载节点发射平台多样,节点可能来源于陆海空多个平台,各节点的性能也不同。因此,根据节点通信能力的强弱,为节点设置一个指定的优先级权值,这个权值表示该节点在网络中心节点选举中的优先级与适合程度,节点的权值越大表示其越适合担任中心节点。

节点通信能力的强弱涉及节点多个方面的性能,包括通信覆盖能力、通信传输能力、信息处理能力和抗干扰能力等,无法简单地从几个指标判断节点通信能力的强弱。因此,节点的通信能力等级需要根据相关专家的意见进行评定。通信能力等级对应的通信权值如表 1 所列。

表 1 通信能力等级与通信权值的关系

通信能力等级	通信权值
最差	0.2
差	0.4
一般	0.6
强	0.8
最强	1

2.2 平均连接度

由于弹载节点长期处于高速移动的状态,因此网络拓扑变化快,为了构建能够稳定的通信网络,需要选取拓扑位置能够完成通信任务的节点。基于平均连接度的组网方案,通过衡量节点周围的节点资源,来综合考量选取中心节点,在保障网络功能的同时减小控制开销。在拓扑快速变化的网络中,中心节点拥有相对较多的通信资源能够保障网络的稳定。

节点在组网开始时向周围节点周期性地发送握手消息以确定各自的邻居节点和连接度,并根据邻居节点的连接度计算出自己的平均连接度,之后根据平均连接度选取中心节点。

平均连接度的计算公式为:

$$p_n=\frac{\sum_{i=1}^{d_n} d_{ni}+d_n}{d_n+1} \tag{1}$$

其中,d_{ni} 表示节点 n 的第 i 个邻居节点的连接度。平均连接度计算示意图如图 1 所示。

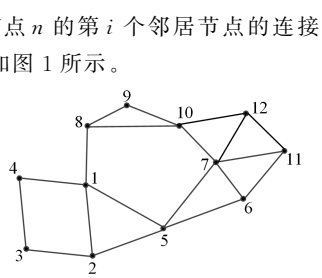

图 1 平均连接度计算示意图

以节点 1 为例,节点 1 的连接度 $d_1=4$,它的邻居节点为 2,4,5 和 8,分别对应的连接度为 3,2,4,3,则节点 1 的平均连接度为:

$$p_1=\frac{3+2+4+3+4}{4+1}=3.2 \tag{2}$$

为了解决在组网方案中计算总权值时平均连接度数值与通信权值数值相差较大,缺少可比性的问题,需要对数据进行归一化处理。对原始数据进行线性变化,使结果映射到[0,1]内,转换函数如下:

$$x^*=\frac{x-\min}{\max-\min} \tag{3}$$

其中,max 为样本数据的最大值,min 为样本数据的最小值。为了避免新节点加入时可能导致 max 和 min 的变化和重定义,考虑极限情况下,在 12 个节点的组网过程开始时,节点的最大连接度为 11,最小连接度为 0。某个节点拥有 11 个邻居节点,而它的邻居节点之间并不是邻居节点,此时平均连接度的最大值为 5.5,同理平均连接度的最小值为 0。

2.3 组网方案

弹载数据链的组网方案是基于通信权值和平均连接度权值的算法,图 2 为组网过程示意图。

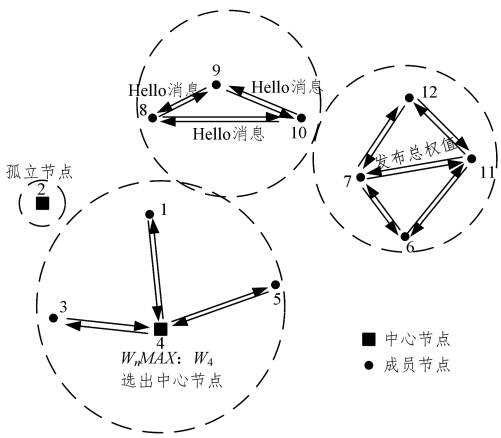

图 2 组网过程示意图

组网的具体实现过程如下:

(1)在组网的开始阶段,假设已知各个节点的 ID 和通信权重值 ω_n,节点的 ID 号是全局唯一的,指定优先级权重值则是由指挥中心直接指定,根据节点的发射平台特性决定。

(2)各个节点周期性地发送握手消息,一方面告知周围邻居节点自己的存在,另一方面通过周期性的握手消息确定各自的直接邻居节点数,将其记为节点 n 的连接度,用 d_n 表示。

(3)在各个节点确定自己的直接邻居节点数后,向周围节点发布自己的连接度,同时接收邻居节点的连接度信息。每个节点 n 通过周期性的握手消息确定其直接邻居节点的连接度 p_n,并计算出自己的平均连接度和平均连接度归一化值 p_n^*。

(4)各个节点 n 计算各自基于指定优先级权值和平均连接度的总权值 $W_n=s_1 p_n^*+s_2\omega_n$。其中,$s_1$ 和 s_2 为权重因子,表示某个参数的重要程度,某个参数越重要,相应的权重因子就越大,且满足 $s_1+s_2=1$ 的关系。各个节点将计算得到的总权值发布给自己的邻居节点。

(5)各个节点将自己的总权值与直接邻居节点互相比较,若发现自己的总权值为最大,则该节点自动成为中心节点,其邻居节点就成为成员节点;如果两个节点的权值相等,就选择全局唯一的节点 ID 号较小的节点作为中心节点;已经从属于某个中心节点的普通节点不能再参与中心节点的选举。

(6)与其他节点距离较远的孤立节点则自动成为中心节点。

(7)成为中心节点的节点向其他中心节点发送确认消息,通知其他中心节点,完成组网汇合确认。

3 仿真模型建立及结果分析

3.1 仿真模型的建立

Truetime 是基于 MATLAB/Simulink 的联合仿真工具,包含 6 个模块,分别为:实时内核模块、网络模块、电源模

块、无线网络模块、发送消息模块和接收消息模块[12-15]。网络模型如图 3 所示。

该模型由 12 个节点子系统与 1 个无线网络子系统组成。无线网络子系统通过无线网络模块实现，这个模块可以设置网络协议类型、网络内部节点个数、网络传输速率、传输功率、路径损耗函数及最大允许重传次数等网络参数。其中的动画模块实时更新显示 12 个节点的位置坐标信息，表现节点在移动中组网的过程。

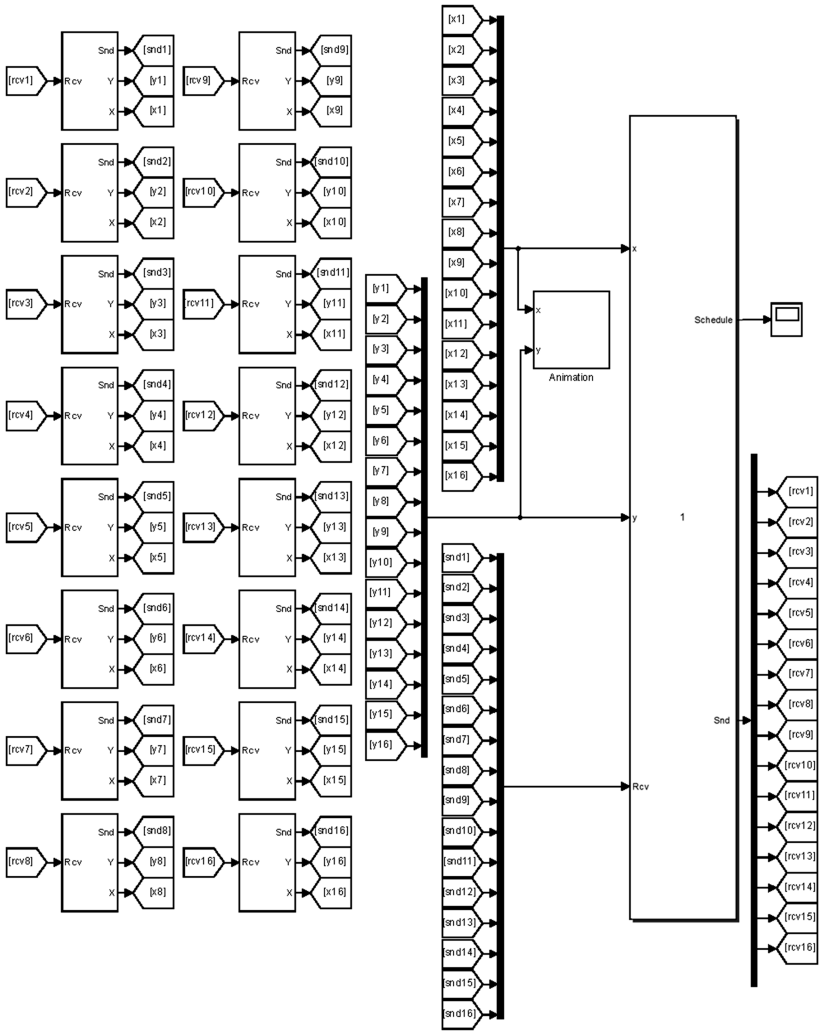

图 3　基于通信权值与平均连接度的弹载数据链仿真模型

为了体现不同发射平台的节点的通信能力不同，将其中的节点 1，5，8 和 11 4 个节点的指定优先级权值设为 1，将其他节点的指定优先级权值设为 0.6。12 个节点状态设定为随机移动，节点在 t 时刻的移动方向与其在 $t-1$ 时刻的移动方向有关。节点的移动速度设定为 882 km/h，整个仿真区域大小为 500 km * 500 km，仿真时间为 300 s，节点间的数据传输速率设定为 16M bps。考虑到弹载节点执行任务的时间短，因此不把节点的电池损耗等因素纳入考虑范围。

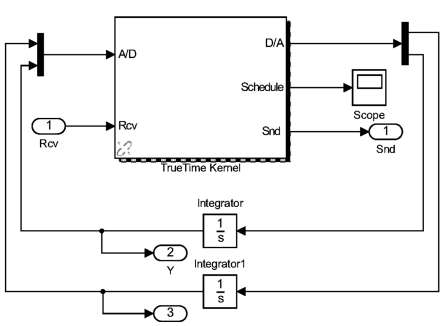

图 4　节点子系统模型

节点子系统的内部结构如图 4 所示，采用了 Truetime 工具箱中的实时内核模块，用于模拟节点在通信网络中数据发送及接收的过程。每个节点都有数据接收端、发送端，用于接收和发送节点的通信权值与平均连接度信息。节点的输入输出端口用于处理自身坐标位置的变化。

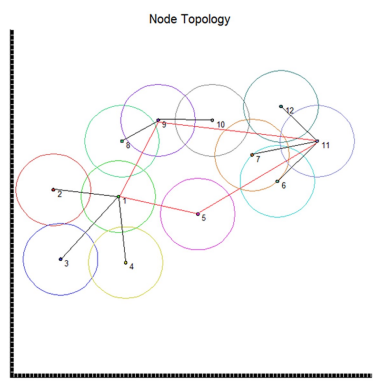

图 5　节点移动位置示意图

仿真过程中节点移动位置如图 5 所示。在网络构建过程中，12 个节点分为了 4 个簇，其中节点 1，2，3，4 构成了以节点 1 为中心节点的簇，节点 5 单独成簇，节点 8，9，10 构成了以节点 9 为中心节点的簇，节点 6，7，11，12 构成了以节点 11

为中心节点的簇。4 个簇之间的中心节点保持通信，实现了节点之间的组网。

3.2 仿真结果分析

在比较不同算法之间的性能时，通常考虑中心节点数占总节点数的比例和网络负载平衡因子(LBF)这两个指标。

中心节点数直接反映了网络的结构和特性，网络分簇后的中心节点不能过多也不能过少，需要在满足网络要求的情况下尽量减少控制开销。

网络负载平衡因子反映了网络的负载平衡度。网络负载平衡因子的计算公式为：

$$LBF=\frac{n_c}{\sum_{i=1}^{n_c}(x_i-u)^2} \tag{4}$$

其中，n_c 为簇的数量，x_i 为第 i 个簇内成员节点数，$u=\frac{N-n_c}{n_c}$ 为每个簇头的平均邻居节点数。LBF 的值越大，网络负载的平衡度越好。

根据图 6 可以得出结论，随着传输距离的增加，中心节点占总体节点数不断减少，当传输距离大于 70 km 时，中心节点数占比减小，速度逐渐减慢。最小 ID 算法选取最小 ID 作为中心节点的标准，而平均连接度的权值使得算法倾向于提高网络的控制能力和减少中心节点个数，因此最小 ID 算法的中心节点个数大于基于权值与平均连接度的算法。基于平均连接度的算法倾向于选取拥有较多邻居节点的节点成为中心节点，但是当簇内节点数过多时，每个节点的平均吞吐量会下降，因此基于平均连接度的算法在传输距离增加时性能会有所下降。

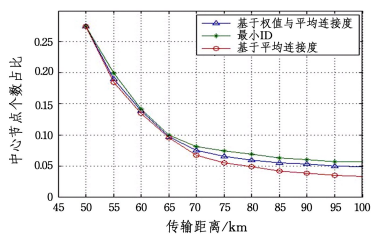

图 6 传输距离与中心节点占比的关系

根据图 7 可以得出结论，随着节点个数的增加，基于权值与平均连接度的组网方案相较于最小 ID 算法与基于平均连接度的算法能够取得更好的效果，网络的负载平衡度高。这是由于最小 ID 算法虽然实现方式简单，但是簇头的选取具有一定的随机性，而且可能会出现簇头密集区和稀疏区，影响网络的通信效率。基于平均连接度的算法性能稍优于最小 ID 算法，但是与基于权值和平均连接度的算法相比还存在一定的差距。

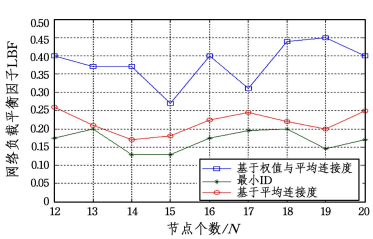

图 7 节点数与网络负载平衡因子的关系

结束语 本文提出了基于通信权值与平均连接度的组网方案，该方法结合有中心的主从式网络和自组网的优点，在有中心的网络无法达到全覆盖时，通过考虑节点特性的不同和在网络拓扑中的平均连接度因素选取网络中的通信节点，并验证了该方案的合理性，与最小 ID 算法与基于平均连接度的算法进行比较，基于通信权值与平均连接度的组网方案的簇头数更合理，网络负载平衡因子更大，网络的性能更好。本文提出的组网方案能完成通信网络的初始化与节点间的通信等任务，但是未能考虑到实战中节点损毁等特殊情况，因此需要在以后的研究工作中，提出相应的节点接入与节点损毁应对策略来满足通信网络的需求。

参 考 文 献

[1] 孟强勇，王丽欣. TTNT 数据链研究[J]. 飞航导弹，2014，7(14)：76-81.

[2] 梁炎. 网络中心战的实施与应用分析[M]. 北京：国防工业出版社，2011.

[3] 冯拓宇，刘春义. 数据链的发展与网络中心战[J]. 飞航导弹，2012，4(2)：41-45.

[4] 周鹏. 美军数据链发展研究[J]. 物联网技术，2015，5(6)：38-39.

[5] 姜思晓，房红征. 数据链组网与数据传输仿真技术[J]. 计算机测量与控制，2016，24(6)：278-281.

[6] 程永茂，陈望达，刘皞. 弹载数据链技术应用及其发展趋势[J]. 飞航导弹，2011，12(19)：29-33.

[7] 张翼麟，文苏丽，陈英硕. 导弹协同作战的自组织网络技术发展[J]. 飞航导弹，2015(4)：69-72.

[8] 王海涛，田畅，郑少仁. 一种新型的 Ad Hoc 网络分簇算法及其性能仿真[J]. 系统仿真学报，2003，15(2)：193-197.

[9] WANG H，CHEN H，SONG L. Improved AOW clustering algorithms for wireless self-organized network and performance analysis[C]// Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference. IEEE，2012：142-146.

[10] 唐李，刘改霞，钟汶娟. 移动 adhoc 网络多参数加权分簇算法[J]. 重庆大学学报，2014，37(2)：106-112.

[11] MUTHURAMALINGAM S，RAJARAM R，PETHAPERUMAL K. A Dynamic Clustering Algorithm for MANETs by modifying Weighted Clustering Algorithm with Mobility Prediction[C]// International Journal of Computer and Electrical Engineering. 2010(2)：709-714.

[12] 沈永增，贾莲莲，陈宣扬. 基于 Truetime 的无线网络仿真模型研究[J]. 机电工程，2011，28(7)：855-858.

[13] COLANDAIRAJ J，SCANLON W，IRWIN G. Understanding wireless networked control systems through simulation[J]. Computing & Control Engineering，2005，16(2)：26-31.

[14] WANG H，YAN B，ZHOU X，et al. Route Simulation Research of Wireless Sensor Networks Based on Truetime[C]// IEEE Circuits and Systems International Conference on Testing and Diagnosis. IEEE，2009：1-4.

[15] CARDOSO A，SANTOS S，SANTOS A，et al. Simulation platform for Wireless Sensor Networks based on the TrueTime toolbox[C]// Industrial Electronics，2009. IEEE，2009：2115-2120.