

航空作战平台定向天线通信网络构型效能评估

王锦江¹, 王玉冰², 尹忠海³

(1. 空军工程大学科研部, 陕西西安, 710051; 2. 93861部队, 陕西三原, 713800;
3. 空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051)

摘要 为解决航空平台定向天线通信中网络构型效能评估的问题, 针对作战平台对通信网络需求的特殊性, 建立了航空作战平台定向天线通信网络构型的效能评估模型。该模型首先给出了网络构型的定义, 分析了网络构型对网络性能的影响, 提出了网络传输速率、传输时延、网络健壮性、隐身性和特殊链路需求等效能评价指标体系; 然后对体系指标进行逐一分析, 给出了相应的量化计算公式。最后使用该模型对给定的一个评估实例进行了仿真评估。实验表明该模型对作战平台机载定向天线通信网络构型的效能有效、可行。

关键词 网络构型; 效能模型; 无线组网; 定向天线

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.02.014

中图分类号 TN92 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2013)02-0061-05

Combat Aircraft Directional Antenna Communication Network Formation Efficiency Evaluation

WANG Jin-jiang¹, WANG Yu-bing², YIN Zhong-hai³

(1. Scientific Research Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Unit 93861, Sanyuan 713800, Shaanxi, China; 3. Science College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to solve the problem of wireless network formation efficiency optimization and evaluation based on aircraft onboard directional antenna, a quantification evaluation model is proposed considering the particularities requirements of war-craft wireless network application. The use of the model firstly defines the network formation, analyzes the factors of network formation efficiency, then picks up evaluation indexes of transmission speed, time delay, network robust, stealth and special data link requirements, followed with respective quantification formulas for each index. Finally, a given network example is defined and evaluated using the model. Experiment shows that the network efficiency evaluation model proposed in this paper is effective and feasible.

Key words: network formation; efficiency evaluation; wireless network; directional antenna

定向天线是指具有辐射强度及接收增益各向异性特性的天线。把定向天线引入移动无线组网的研究最早见于上世纪80年代末, N. Pronios 率先提出了此项技术^[1]。由于定向天线在发射时能够汇聚波

束能量、在接收时能够对特定来向的波束提供高增益, 故与全向天线相比, 由定向天线构成的通信系统具有空间高利用率、功率高增益和射频隐身等优势。因此, 该技术对于提高航空器尤其是作战飞机的无

收稿日期: 2012-08-26

基金项目: 陕西省重点实验室基金资助项目(2011Y13)

作者简介: 王锦江(1980—), 男, 陕西富平人, 讲师, 博士, 主要从事航空通信网络技术研究. E-mail: wjjemail@126.com

线组网效能具有广泛应用前景和重大意义^[2-3]。

由于定向天线窄波束的低空间覆盖特性,其网络中的物理链路能够以空间分离的方式最大程度的并行工作,此时网络中各节点的连接关系、链路模式和天线资源分配等网络构型因素将在很大程度上影响通信系统的整体效能。故这些因素具体是如何影响网络系统整体效能的,以及如何对这种影响进行量化评估,就成为定向天线通信网络管理技术中一个重要课题^[4-5]。由于定向天线近几年才得以在航空平台上使用,故对其网络效能评估的研究文献较少。现有文献^[1,5-7]多基于全向天线的有线网络的评估。而定向天线通信网络和全向天线和有线网络的通信系统在系统功能需求和特点上具有较大不同,现有基于全向天线或有线通信网络的评估模型不能直接应用于定向天线通信网络。

1 网络构型效能评估

1.1 网络构型的定义

本文中网络构型由链路工作模式、网络拓扑和网络路由等3个要素组成。其中,链路工作模式包含每条物理链路(物理直接连接)的天线选择、链路通信模式等内容,其影响各物理链路的最大通信距离、传输速率带宽、传输时延等;网络拓扑是指网络中各节点的物理连接关系;网络路由是节点之间的数据转发规则,决定网络中各逻辑链路的数据路由转发关系。

在网络组织和维护的过程中,这3个因素中任何一个的变化均会对网络效能构成影响,因此在评估网络效能时,要综合考虑这三部分的内容后进行评估。

1.2 网络构型效能评估的目的

本文的网络效能评估是指在信道编码算法、调制波形设计、最大发射功率、射频带宽、天线的波束特性及接收灵敏度等物理层和链路层性能参数一定的情况下,对于一个给定的网络构型,其对执行作战任务所能够提供的相关功能和性能的衡量和评价。

其效能评估模型至少有以下两方面的应用:①对已经确定的网络构型进行效能对比或量化评估;②作为网络优化模型和算法的目标函数,求解网络形式的最优或满意解。

2 评估模型

针对航空作战平台的应用需求,根据层次分析法原理,由多个评价指标按属性不同分组,每组作为一个层次,按照最高层(目标层)、中间层(一级评价指标)和最低层(二级评价指标)的形式排列起来组成3层评价指标体系。

在使用定向天线的通信系统中,平台之间的各物理链路可以完成同频同时工作,甚至能够在2个节点之间建立多条并行工作的物理链路。由于航空平台的特定,各节点位置及姿态均不固定,故链路模式的选择要能够满足各节点之间的不同距离的通信要求,而这种选择将影响物理链路的数据带宽、通信时延等网络性能指标。而定向天线通信网络的拓扑通信特性使得网络中节点之间通信在很大程度上要依靠数据转发,故网络的拓扑结构和路由规则将同样对网络的整体数据速率和通信时延等网络性能指标有很大的影响。并且,考虑到平台可能失效或被摧毁的情况下,拓扑结构和路由方式还是网络健壮性的一个重要影响因素。此外,为了完成射频隐身通信,还要在规划网络拓扑和路由规则时考虑天线指向波束的优化配置,尽可能地以最低的能量、空间和时间向敌目标活动区域辐射波束,将敌射频截获的可能性降至最低。此外,由于作战协同的特殊性,网络中的一些链路配置会存在高优先级的预先制定,故在考虑通信组网构型时还应优先满足这些要求。

综上所述,本文选取与网络构型相关的网络传输速率、传输时延、健壮性、隐身性和特殊链路需求等5项因素作为一级评价指标,然后再细分形成相应的二级指标,从而得到了图1的网络构型效能指标体系。

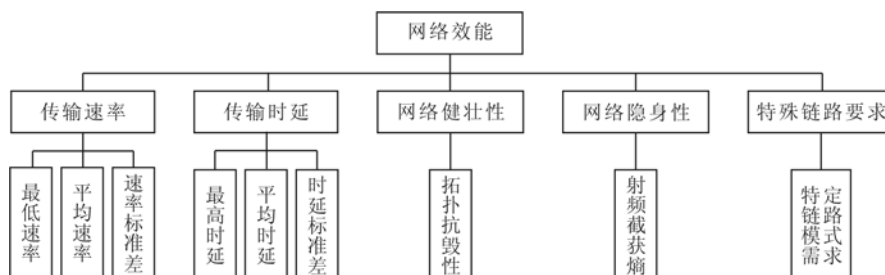


图1 评估指标体系

Fig. 1 Indexes framework of evaluation

2.1 网络传输速率

为了衡量网络整体传输速率性能的优劣,选取最低传输速率指标、平均传输速率和传输速率标准差等3个指标,来共同评估一个网络系统的整体传输速率性能。

设网络中共有 N 个节点,记为 n_i ,其中 $i=1,2,\dots,N$ 。对于一种特定的网络,所有节点之间网络层协议的逻辑链路集合记为 $L=\{l_k, k=1,2,\dots,M\}$ 。一般的,网络中应不存在孤立节点,即任意2个节点之间均存在逻辑链路(可能是物理直连的链路,也可能是通过路由转发形成的链路)。若逻辑链路均是双向对等链路,则 $M=N(N-1)/2$;否则 $M=N(N-1)$ 。将各条链路的传输速率记为 $TS(l_k)$ 。

2.1.1 最低传输速率指标

因网络中任意2个节点之间都要保持基本的通信传输速率以保证诸如指向跟踪、网络维护、态势共享和话音通信等基本通信要求,设其最低传输速率要求为 TS_{\min} 。则网络最低传输速率指标为:

$$TS_{\min} = \min TS(l_k) \quad (1)$$

式中 $k=1,2,\dots,M$ 。

该指标属达标型指标,其值满足要求则记“合格”,否则记“不合格”。

2.1.2 平均传输速率

平均传输速率表征了整个网络中各节点之间传输速率的整体平均性能,可衡量网络对全网传输速率的影响因素。表示为:

$$TS_{\text{Mean}} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \alpha_k TS(l_k) \quad (2)$$

式中 $k=1,2,\dots,M$, α_k 为各链路的权重系数,有 $\sum \alpha_k = 1$ 。一般的可取 $\alpha_k = 1/M$ 。

该指标属效益型指标,其值越大越好。

2.1.3 传输速率标准差

传输速率均方差表征了个节点之间网络传输速率的差异性,引入此指标意在构建网络时尽可能使得网络中各节点的传输速率大致相当,尽量避免出现“好的很好,差的很差”的情况。此指标表示为:

$$TS_{\text{Std}} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M [TS(l_k) - TS_{\text{Mean}}]^2} \quad (3)$$

式中 $k=1,2,\dots,M$ 。

该指标属成本型指标,其值越小越好。

2.2 传输时延

类似传输速率指标的3个二级指标定义,传输时延也可分为最大传输时延 TD_{\max} 、平均传输时延 TD_{Mean} 和传输时延标准差 TD_{Std} 3个二级指标。分别定义如下:

$$TD_{\max} = \max TD(l_k) \quad (4)$$

$$TD_{\text{Mean}} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \alpha_k TD(l_k) \quad (5)$$

$$TS_{\text{Std}} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{k=1}^M [TD(l_k) - TD_{\text{Mean}}]^2} \quad (6)$$

式中: $TD(l_k)$ 表示逻辑链路 l_k 的传输时延; TD_{\max} 为达标型指标, TD_{Mean} 和 TD_{Std} 为成本型指标。

2.3 网络健壮性

当网络中的部分节点被摧毁后,由于节点的消失,所有以这些节点为起点和终点物理链路将全部失效。更重要的是,需经由这些被摧毁节点进行路由转发的逻辑链路也将全部失效,而这正是网络节点被摧毁后对整个网络的真正影响所在。故本文采用节点失效后对其它仍正常工作节点链路的连通性影响来度量网络健壮性。

设网络中的任意 c 个节点 ($c=1,2,\dots,N$) 被摧毁而失效后,逻辑链路断开的最大数量记为 $LD_{\Lambda}(c)$,其中 $c=1,2,\dots,M$ 。定义有效断链数为:

$$LD(c) = LD_{\Lambda}(c) - T(c) \quad (7)$$

式中 $T(c)$ 表示所有链路中以这 c 个节点为源节点和目的节点的链路个数。若逻辑链路均是双向对等链路,则:

$$T(c) = \sum_{i=1}^c (N-i) \quad (8)$$

否则:

$$T(c) = 2 \sum_{i=1}^c (N-i) \quad (9)$$

可知,当 $c=0$ 时, $LD(c)=M$; $c=N$ 时, $LD(c)=0$ 。当 c 从1依次取值到 N 时,就形成了一条下降曲线。通过度量这条曲线下降速度可衡量网络的抗毁健壮性。该曲线下降得越平缓,则网络健壮性越好。

2.4 网络隐身性

当系统完成组网后,由于各节点之间的波束互相指向,在不同的网络构型下增加该网络向外辐射电磁波的覆盖范围也不同。通信波束向对方探测平台活动区域的空间辐射范围覆盖率越大,被截获概率则越高,反之亦然。设对方射频探测系统的空间活动区域为 A_E ,网络建立后辐射的可截获电磁波束与 A_E 的重叠区域为 A_R ,则网络隐身性用如下射频截获熵函数来衡量:

$$NH = -\log \left(\frac{V(A_R)}{V(A_E)} \right) \quad (10)$$

式中 $V(\cdot)$ 为求体积函数。即当空间 A_R 占空间 A_E 的体积比例越小时,通信波束被对方截获的概率越小,通信网络隐身性则越好。反之亦然。特殊的,当

空间 A_R 与空间 A_E 相同,即对方活动区域中任意位置均可截获通信信号,则 $NH=0$,表明该通信网络无隐身性;反之当 A_R 不存在(体积为零)时, $NH=+\infty$,即在对方活动区域不可能探测到网络中的任何通信信号,则该网络的隐身性能为最优。

2.5 特殊链路需求

在组网中,根据具体战术应用需求,需要在链路中建立某些特殊模式的工作链路。这些特殊链路在通信模式和性能指标上有特殊要求,比如其冗余性、传输速率、时延指标、连接方式或同步指标等有特殊要求,因此反映在组网构建拓扑和逻辑链路中就存在特殊要求。这些链路在作战中很有可能是起到关键作用的。因此在构建网络时,这些因素是需要优先考虑和保证的。故这些因素也必须作为达标型指标考虑进去。当其中的某项指标不满足时,则可认为该网络无法满足应用。鉴于此类指标依应用场合不同而差异较大,故在此不再赘述。

3 实例仿真

根据一般的定向天线的通信参数,作如下设定:

- 1) 节点之间的距离小于 50 km 时,通信速率 2 Mbps;大于 50 km 速率为 500 kbps;
- 2) 通信均使用 10° 圆锥形波束,并忽略旁瓣辐射;
- 3) 链路模式包括普通链路和低时延链路 2 种

模式,普通链路模式下,单节点处理延时为 5 ms,通信速率 2 Mbps 或 500 kbps(依距离而定);低时延链路单节点处理延时为 $500 \mu s$,通信速率为固定 500 kbps。

4) 节点路由表采用最大带宽原则,即通过最大带宽的链路进行转发;

5) 所有逻辑链路均为双向对等链路。

仿真环境采用 MATLAB 进行数据计算和曲线生成,使用 VC 进行完成图形用户界面和功能集成。

图 2 给出了同编队位置下的两种不同的网络构型图。两种网络下均包含 7 个物理链路连接。图中以加粗线条表示低时延链路;其余为普通链路;实线表示 2 Mbps 速率链路,虚线表示 500 kbps 链路;粗虚线表示速率为 500 kbps 的低时延链路。

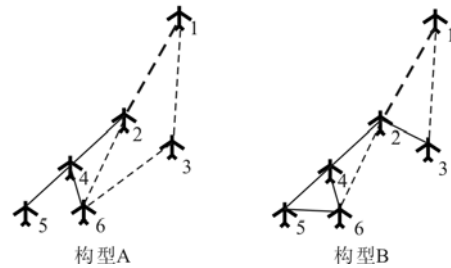


图 2 2 种网络形式下的物理拓扑

Fig. 2 Two network formation to be evaluated

首先计算模型中“传输速率”和“传输时延”2 个一级指标下属的二级指标。根据网络构型,求出所有网络中逻辑链路的速率和时延,并根据 2.1 节和 2.2 节中给出的公式求出相应的指标值,见表 1。

表 1 2 种网络的数值型指标对比

Tab. 1 Comparison between numeric indexes in two network formation

指标	传输速率/kbps			传输时延/ms		
	Min	Mean	Sd	Max	Mean	Sd
A	512	1 504	726.1	30.501	16.0	8.3
B	512	1 100.8	760.0	30.668	15.3	7.37

由表中可见,最小传输速率和最大传输时延 2 个达标型指标均为合格,而网络 A 的传输速率指标较优而传输时延指标稍差。其原因是由于构型 A 的 2 M 速率链路呈星形排列而构型 B 的呈串状分布,在最大带宽路由规则下,构型 A 可获得较高的转发效率;而由于构型 B 下在转发对低时延链路的使用效率稍高,故其平均时延指标稍高一些。

然后计算模型一级指标“网络健壮性”及其下属二级指标“拓扑抗毁性”。

根据 2.3 节的评估方法,网络健壮性指标曲线见图 3。

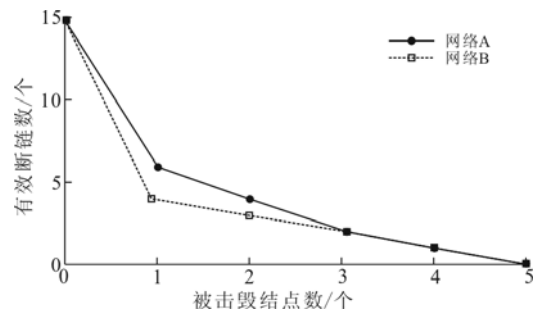


图 3 网络健壮性指标曲线

Fig. 3 Network robust index polylines

可见,网络 A 的网络健壮性较好。从拓扑图中亦可直观的看出构型 A 的连通性较好,在节点失效时能较好地保持其他链路的工作。直观的来看,构型 B 中存在一个较为关键 2 号机节点,在此节点被

机会后网络将收到较大影响,而构型 A 对于节点失效则相对容忍度较高。

接着计算模型一级指标“网络隐身性”及其下属二级指标“射频截获熵”。本文以平面覆盖面积率进行简化计算。设定对方探测平台活动范围为编队前方的一个矩形区域,见图 4。

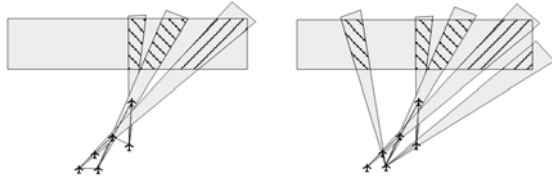


图 4 2 种网络的隐身性对比示意

Fig. 4 Stealth comparison between tow network formation

计算得到,网络 A、B 的辐射面积覆盖率分别为 29.02% 和 40.26%,对应隐身性指标为 0.537 3 和 0.395 2,网络 A 隐身性较好。通过图 4 也可直观的看到此项指标的差异。

最后分析“特殊链路需求”这一指标。该 2 种网络的特殊链路需求指标为均“合格”(满足低时延链路特殊链路模式要求)。

综上所述,2 种方案的合格性指标均为满足,而方案 A 的网络总传输速率指标、网络健壮性指标和隐身性指标均较优,而方案 B 的网络传输总时延指标较优。在实际工程应用中,可根据具体的任务需要采用文献[6]中给出的算法综合考虑各指标的权重系数后进行方案选择进行求解和决策,此不赘述。

4 结语

本文给出了一种针对作战平台机载定向天线通信组网的网络构型效能评估模型,将网络构型效能的对网络性能的影响因素进行的分析,给出了指标体系和量化计算公式。分析和实验表明,该模型对网络效能能够完成对网络构型的量化评估作用,其评估结构与主观的分析一致,具有一定的有效性和可行性。

该模型的量化结果维数较多,如作为优化的目标函数,还应通过采用多属性决策模型(Multi-Attributes Decision Model, MADM)等方法^[6]对该模型的输出进行简化归并,最终形成一个单一的效能量化指标,以便于在工程中进行应用。

参考文献(References):

[1] Pronios N. Performance considerations for slotted spread-spectrum random access network with directional antennas [C]//IEEE GLOBECOM '89. NJ, USA: IEEE press, 1989: 1613-1617.

- [2] Freebersyser James A, Macher Joseph P. Realizing the network-centric warfare vision; network technology challenges and guidelines[C]//Military communications conference. Arlington: IEEE press, 2001: 267-271.
- [3] Hrishikesh Gossain, Tarun Joshi, Carlos De Moraes Cordeiro, et al. DRP: an efficient directional routing protocol for mobile ad hoc networks[J]. IEEE trans on parallel and distributed system, 2006, 17(12): 1438-1541.
- [4] Ramanathan R. On the performance of Ad hoc networks using beam forming antennas[C]//Proceedings of ACM mobi-hoc. Long Beach, CA: ACM, 2001: 95-105.
- [5] 孙永平, 刘元, 毛建舟. 舰载 C³I 系统通信网络可靠性效能分析[J]. 光电技术应用, 2004, 19(6): 65-67. SUN Yongping, LIU Yuan, MAO Jianzhou. Reliability analysis of shipborne C³I systems of communication networks[J]. Electro-optic technology application[J]. 2004, 19(6): 65-67. (in Chinese)
- [6] 吴坚, 梁昌勇, 李文年. 基于主观与客观集成的属性权重求解方法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3): 383-387. WU Jian, LIANG Changyong, LI Wennian. Method to determine attribute weights based on subjective and objective integrated[J]. Systems engineering and electronics, 2007, 29(3): 383-387. (in Chinese)
- [7] Erik O, Luca M, Thiemo V. Evaluation of an electronically switched directional antenna for real-world low-power wireless networks [C]//REALWSN. [S. l.]: IEEE press, 2010: 113-125.
- [8] Qin Liu, Xiaohua Jia, Yuan Zhou. Topology control for multi-channel multi-radio wireless mesh networks using directional antennas[J]. Wireless network, 2011, 17(1): 41-51.

(编辑:徐楠楠)