

# 动态组网场景下的自规划算法

## Self-Planning Algorithm for Dynamic Network Scenarios

陈国伟,李涛,李晋,张丁全,张婧(中国移动通信集团云南有限公司,云南昆明 650103)

Chen Guowei, Li Tao, Li Jin, Zhang Dingquan, Zhang Jing (China Mobile Communications Group Yunnan Co., Ltd., Kunming 650103, China)

### 摘要:

提出一种网络拓扑调整规划算法,该算法将通信节点群组成的网络,抽象建模成“基环内向树”,结合该模型的基本属性,将调整网络节点动态连接的实际问题转化成数学模型上最短路径的数学问题,进而给出算法设计和实现,保证网络在节点动态变化时能够以最快最优的方式进行拓展和调整。

### 关键词:

内向基环树;有向图;BFS;DFS;最短路径

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2026.02.009

文章编号:1007-3043(2026)02-0045-05

中图分类号:TN929.5

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

A network topology adjustment planning algorithm is proposed, which abstractly models the network composed of communication nodes as a “base ring inward tree”. Combining the basic properties of the model, and the practical problem of adjusting the dynamic connection of network nodes is transformed into the mathematical problem of the shortest path on the mathematical model. Then the algorithm design and implementation are given to ensure that the network can be expanded and adjusted in the fastest and optimal way when the nodes change dynamically.

### Keywords:

Inward base ring tree; Directed graph; BFS; DFS; Shortest path

引用格式:陈国伟,李涛,李晋,等. 动态组网场景下的自规划算法[J]. 邮电设计技术,2026(2):45-49.

## 1 业务背景

本文描述的是没有固定基站提供网络服务的场景,多见于没有架设基站的山区和地震等地质活动后的灾区,该场景下可使用移动网络通信节点提供局域网络服务(见图1)。在这样的通信节点组网场景中,网络需要根据通信节点的相对位置变化来提供局部最大通信能力,离散的通信节点或小的网络需要自动组成大的网络。

此种网络需要具备自发现和自规划能力。自发现<sup>[1]</sup>是指网络中每个节点都能够自动检测发现周围的其他通信节点,自规划则是指每个通信节点或小的通

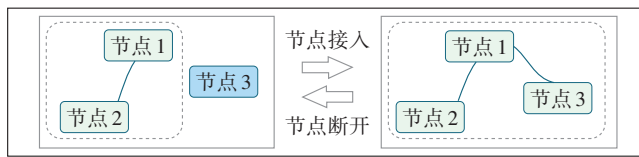


图1 离散通信节点网络

信网络能够在发现周边新节点时自动规划如何连接上新节点,从而完成网络的扩张。自规划是让网络能够持续具备连接新节点的能力,重点就在于网络拓扑规划<sup>[2]</sup>算法,它以当前网络的连接关系和各个节点的测量可连接关系为输入,输出网络连接调整方式。整体工作流程如图2所示。

如图3所示,有这样一种移动通信节点:每个通信节点包含核心网(5GC)、基站(gNB)和CPE(互联CPE)3个网元,节点自身的CPE不会接入自身的gNB,不同

收稿日期:2026-01-21

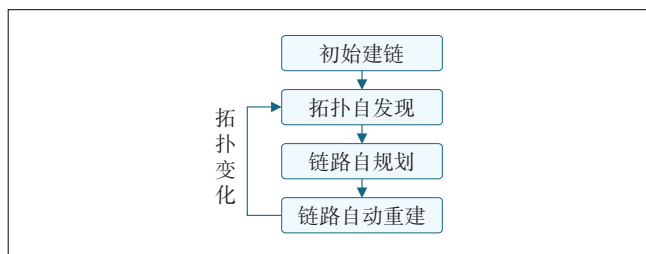


图2 整体工作流程

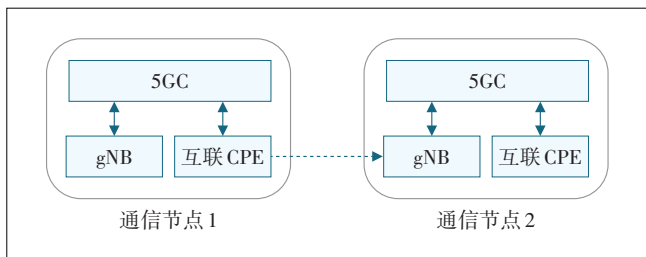


图3 通信节点示意

节点之间可以通过CPE和基站gNB间的空口互联,由于这个CPE用来连接其他通信节点,所以称这个CPE为互联CPE。互联CPE可以不断测量周围可连接的邻区,基于此可以实现自发现功能,互联CPE的检测结果显示到网络内某一节点处,由此节点实现对网络连接的规划。

在此种通信节点组网场景中,节点接入网络有2种方式:一种是由其他节点的互联CPE接入本节点的基站gNB网络(即被动接入),另一种是通过本节点的互联CPE主动接入别的节点(即主动接入)。由于每个节点只有一个互联CPE,因此,每个节点同一时刻最多只能主动接入一个网络,即互联CPE成为制约组网的关键因素,如果某网络内所有互联CPE都已经接入(即网络某处存在环),那么此网络将无法再主动接入其他网络。

本文所描述算法即是针对基于此种通信节点所组成的动态网络的自发现、自规划算法,下文所提到的“通信节点”或“节点”都是指此种通信节点。

## 2 传统方法与瓶颈

### 2.1 传统方法

一种朴素直接的方法是在测量到新节点时,由距离该新节点最近的节点发起连接,具体流程如下。

- 遍历所有通信节点的测量关系,记录新节点和与该节点间的信号强度。
- 选择与新节点间信号强度最大的网络拓扑中

的节点,将其原有连接断开,指定其连接新节点。

### 2.2 缺陷与瓶颈

经分析可以发现这个朴素的方法在本项目中并不适用,主要存在如下2个问题。

a) 网络拓扑“乒乓”<sup>[3]</sup>变化。由于每个节点仅有一个互联CPE,也就意味着一个通信节点仅能主动连接一个其他的通信节点,若通信节点断开了原有连接并连接到新节点时,也就脱离了原有的网络拓扑,此时该节点与原有网络拓扑的通信功能也可能会因此丢失;而该节点新加入网络拓扑也会进行测量规划的流程,又可能会导致该节点重新连接到原有的网络拓扑中。当这个过程不断的重复时,整个网络就处于一种“乒乓”变化的状态。

b) 网络连接调整耗时过长。由于网络可能陷入到乒乓变化过程中,整个网络的建立过程变得极为不可控,在这个过程中通信功能不可用的时间太长,导致设备可用性大幅度降低。

针对以上缺陷,需要提出更为合适的算法来解决这些问题,具体来说,新算法需要解决如下2个问题。

- 如何调整网络连接才能避免“乒乓”现象,在网络调整后原有网络拓扑中的连接不丢失?
- 如何调整网络连接才能使网络调整时间最短?

## 3 问题建模

### 3.1 抽象建模

通信节点之间通过CPE与基站的空口完成互联,这种连接是由互联CPE发起的,天然是有方向性的,因此通信节点的连接可以抽象为有向图<sup>[4]</sup>。建模过程如下。

- 通信节点 → 节点。
- 节点连接 → 连边。
- 信号强度 → 边权值。

如图4所示,箭头方向为互联CPE主动接入方向,即节点4主动接入节点3。在该数学模型中,通信节点仅有一个互联CPE也就转化为图中节点出度小于等于1,当节点出度为0时,表明该通信节点没有互联CPE或者该互联CPE没有连接到其他节点。这一特性符合基环内向树的特征。

### 3.2 基环内向树的特性

首先来看基环树的概念。基环树定义为由 $n$ 个点 $n$ 条边组成的无向连通图。基环树相当于在树<sup>[5]</sup>的基础上加入了一条边,因此被称作树,严格意义上来说,

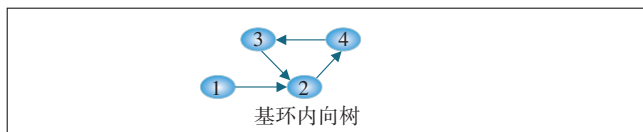


图4 通信节点网络结构示意图

基环树只是一种特定的图<sup>[6]</sup>,并不是树(见图5)。

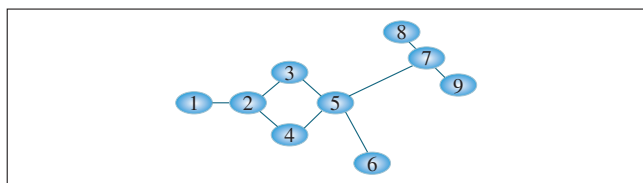


图5 基环树

基环树中的边是无向的,当其中的边全部都为出边时,被称为基环内向树(见图6)。

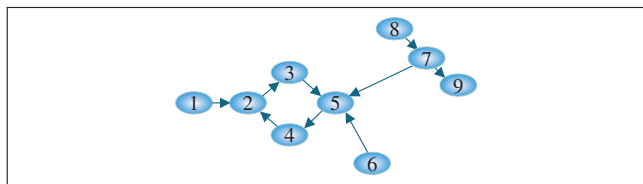


图6 基环内向树

基环树是在树的基础上添加了一条边形成的,所以基环树必定存在一个环,而内向树中,所有的节点都指向这个环,通过任意节点的出度,都能通过dfs<sup>[7]</sup>遍历到环上。

从基环内向树的这个基本性质可以知道,若图中有 $n$ 条边,则图中有且只有一个环,如图7所示,对应于实际连接中,这表示每个通信节点的互联CPE都连接上了其他的基站。若将图中环上的边拆除一个,基环树就退化为树,满足所有节点连通的最小边数要求,如图8所示,在这个情况下,有且仅有一个点的出度为0,对应于实际连接中,表示有一个通信节点的CPE处于空闲状态,即节点D的互联CPE未使用。

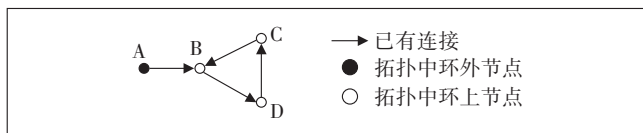


图7 有环的基环内向树

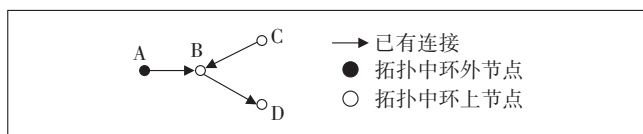


图8 拆环后的基环内向树

### 3.3 问题转化与求解

结合上述基环内向树的基本特征,可以将算法需要解决的问题转化为该模型中的数学问题。

3.3.1 问题1:如何调整网络连接才能在保持原有通信功能的同时还能接入新的通信节点?

通过以上对组网关系的抽象建模分析过程可知,一个连通的组网拓扑中最多存在一个空闲的互联CPE,而通信节点就是使用互联CPE连接新节点的,所以规划调整过程就是要在网络中存在环路时调整连接,以使一个节点互联CPE空闲。

所以,问题就转化为在基环内向树中挑选一个节点,调整连接方式,在保证连通性的条件下,使其出度为0<sup>[8]</sup>。

这里从基环树的基本属性出发,由于基环树中有且只有一个环,那么仍然从这个环来分析。

a) 节点位于环上。对于一个环,从满足连通性的角度来说,显然存在一条冗余的边,所以要使环上节点出度为0,只需要将其出边断开即可。如图7中节点D,要使其出度为0,直接将其指向节点C的连接断开即可,断开后网络拓扑更新为图8所示结构,仍能满足连通性需求。

b) 节点位于环外。当节点位于环外时,由于其连通性靠其出度来保证,所以如果断开其出边的同时还要保证连通性,就需要另外一个点的出度指向该节点,同理,对后续节点的处理也要满足相同的需求。显然这是一个递归的过程,那么递归何时结束呢,从前文内向树的属性可知,通过节点的出度遍历可找到图中的环,所以递归到节点处于环上时,就规约到了上一种情况。如图7中节点A,要使得节点A出度为0,其指向节点B的连接需要断开,而要保证A的连通性,就需要另一节点来连接A,这里假设是B节点,将节点B指向节点D的连接断开后连接到节点A,整体即可保持连通性。调整后网络拓扑如图9所示。

综上所述,对于一个节点,其调整连接的方式就是找到该节点连接到环路中节点的路径,将该路径上

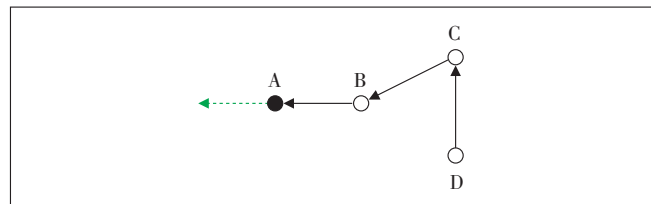


图9 节点A断开后预期结果

的节点断开,并将该路径上的节点重新连接。

### 3.3.2 问题2:如何调整才能保证调整次数最少?

在问题1中,计算了基环内向树中某一节点指向其环上的一条路径,实际上,并不一定需要将这一路径上所有点的连接给完全断开并反向重连。在重连的过程中,更关注的是可能建立的连接关系。

如图10所示,选择节点D,将其指向节点C的连接断开,此时由于节点B可以建立直接指向节点D的连接,那么直接将B节点断开并指向节点D即可。

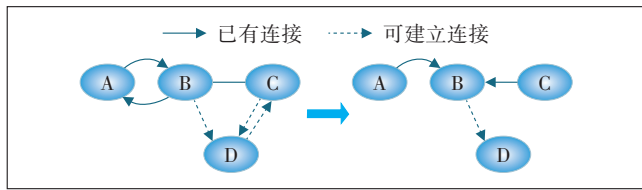


图10 节点D断开后预期结果

结合问题1的结论,调整次数最少就转化为环上的节点到环上节点路径最短。此处路径最短指的是在测量可建立连接关系图中的路径。显而易见,这种最短路径可以用BFS<sup>[9]</sup>来计算。

测量可连接关系图是一个有向图,没有出度入度<sup>[10]</sup>的限制。从环上节点开始广度优先遍历,计算出环上节点到其他所有环外节点的最短路径及前驱节点,即可得到每个节点到环上节点的最短更改后路

径。选择最短的那条路径,将该路径上节点原先的连接断开,重新建立起该条路径对应的连接,即可满足场景所要求的最少调整次数。

## 4 算法设计与实现

### 4.1 算法设计

综合前文的分析过程,该场景的算法设计如下。

a) 首先通过DFS在已连接网络拓扑图中找出环路节点。

b) 在测量可建立连接关系图中计算拓扑外新节点。

c) 在测量可建立连接关系图中通过BFS计算每个节点到环路节点的最短路径,随后选择最短的一条,该路径即为目标拓扑中需要建立的连接。

d) 在已连接网络拓扑中,根据该路径上的连接关系计算新的网络拓扑,并计算需要断开的连接,最后返回这2个结果。

### 4.2 算法实现

从以上分析可知,算法流程主要涉及2个数据结构<sup>[11]</sup>,即已连接关系图对应的基环内向树和测量可建立连接关系图对应的有向图,而两者都是有向图,所以抽象出有向连通图基类<sup>[12]</sup>,这个基类派生出对应2个类,此外还需要一个算法类,用来实现算法。类图设计示意如图11所示,算法流程如图12所示。

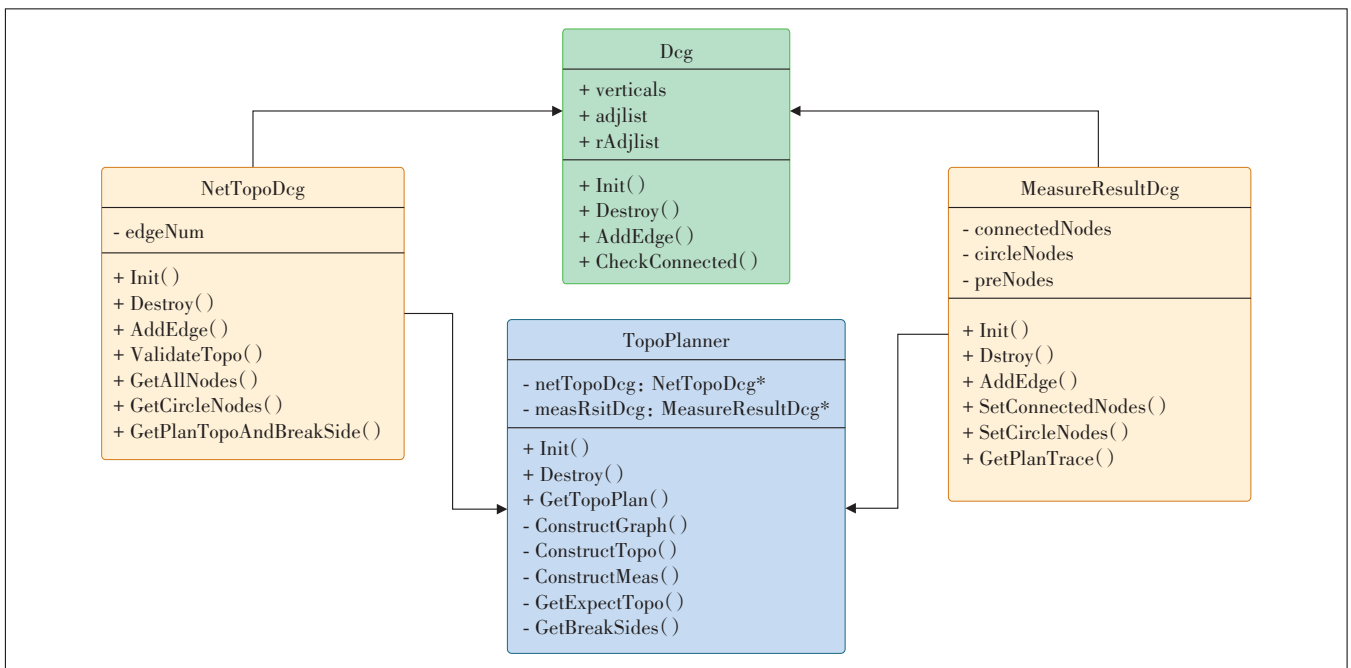


图11 类图设计示意

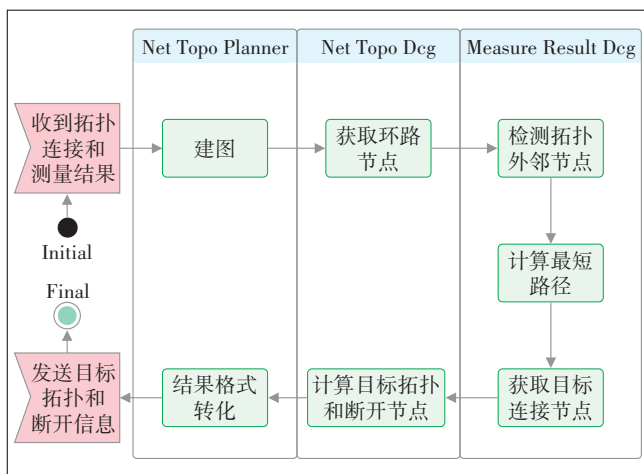


图 12 算法流程

## 5 应用效果

本项目目前处于第1阶段,通信节点规模为4个。如图13所示,在实际的测试中,涉及自规划功能的测试场景主要有2种,实测结果如表1所示。

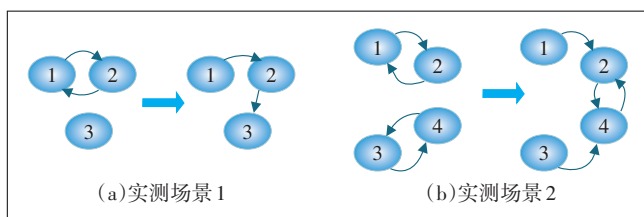


图 13 实测场景

表 1 实测结果

测试场景	测试次数	是否符合预期	自发现耗时/s	自规划耗时/ms	网络重连耗时/s	总耗时/s
实测场景1	1	是	2.00	15.0	6.0	11.0
	2	是	4.00	16.0	5.0	16.0
	3	是	2.00	15.0	5.0	13.0
	平均		2.70	15.3	5.3	13.3
实测场景2	1	是	1,2节点:3 3,4节点:2	1,2节点:16 3,4节点:16	5.0	10.0
	2	是	1,2节点:3 3,4节点:1	1,2节点:16 3,4节点:16	7.0	11.0
	3	是	1,2节点:2 3,4节点:2	1,2节点:15 3,4节点:16	10.0	15.0
	平均		2.17	15.8	7.3	12.0

由于自发现和自规划都是定时任务,所以这里的总耗时会比这里统计的各个时段加和更大。从自规划耗时这一列可以看到算法耗时很稳定,在节点数量

较少时耗时很小,在整体的自发现自规划重连过程中耗时几乎可以忽略不计。

## 6 总结

本文针对包含5GC、gNB和CPE网元功能的通信节点所组成的动态网络提出一种规划算法,该规划算法将“已连接网络关系”和“测量可连接网络关系”抽象为基环内向树和有向图数学模型,将实际问题转化为数学问题,并综合使用DFS、BFS等算法,给出该规划问题的最优解,满足了动态组网场景下节点组网关系动态调整的需求,并使得调整时间最优。

### 参考文献:

- [1] 日立楼宇技术(广州)有限公司. 网络拓扑自发现方法、装置、网络设备及计算机存储介质:CN201711309405.3[P]. 2018-04-20.
- [2] 中国移动通信集团北京有限公司. 一种进行网络拓扑规划的方法及装置:CN200810115489.1[P]. 2011-01-26.
- [3] 三星电子株式会社. 防止移动通信系统中的乒乓效应的小区重选方法和设备:CN201310187355.1[P]. 2018-01-05.
- [4] 王桂平,王衍,任嘉辰. 图论算法理论,实现及应用[M]. 北京:北京大学出版社,2011:2-3.
- [5] 卢开澄,卢华明. 图论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1995:41-43.
- [6] 王桂平,王衍,任嘉辰. 图论算法理论,实现及应用[M]. 北京:北京大学出版社,2011:1.
- [7] THOMAS H. CORMEN, CHARLES E. LEISERSON, RONALD L. RIVEST,等. 算法导论[M]. 3版. 殷建平,徐云,王刚,等译. 北京:机械工业出版社,2013:349-350.
- [8] 王桂平,王衍,任嘉辰. 图论算法理论,实现及应用[M]. 北京:北京大学出版社,2011:3.
- [9] THOMAS H. CORMEN, CHARLES E. LEISERSON, RONALD L. RIVEST,等. 算法导论[M]. 3版. 殷建平,徐云,王刚,等译. 北京:机械工业出版社,2013:343-345.
- [10] 王桂平,王衍,任嘉辰. 图论算法理论,实现及应用[M]. 北京:北京大学出版社,2011:3-4.
- [11] THOMAS H. CORMEN, CHARLES E. LEISERSON, RONALD L. RIVEST,等. 算法导论[M]. 3版. 殷建平,徐云,王刚,等译. 北京:机械工业出版社,2013:5-6.
- [12] STEPHEN PRATA. C++ Primer Plus(第)中文版[M]. 6版. 张海龙,袁国忠,译. 北京:人民邮电出版社,2012:481-483.

### 作者简介:

陈国伟,毕业于英国纽卡斯尔大学,工程师,硕士,主要从事移动无线网络优化和运维工作;李涛,工程师,硕士,主要从事移动无线网络优化和运维工作;李晋,工程师,硕士,主要从事移动无线网络优化和运维工作;张丁全,工程师,硕士,主要从事移动无线网络优化和运维工作;张婧,工程师,硕士,主要从事移动无线网络优化和运维工作。