Topology Control for Wireless Ad Hoc Networks

无线Ad Hoc网络拓扑控制研究

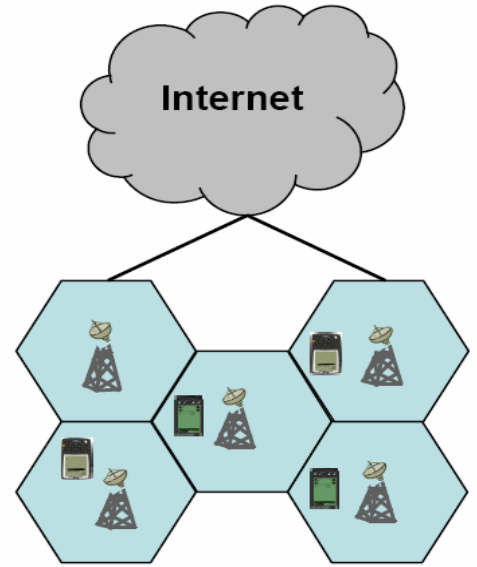
南京理工大学网络中心

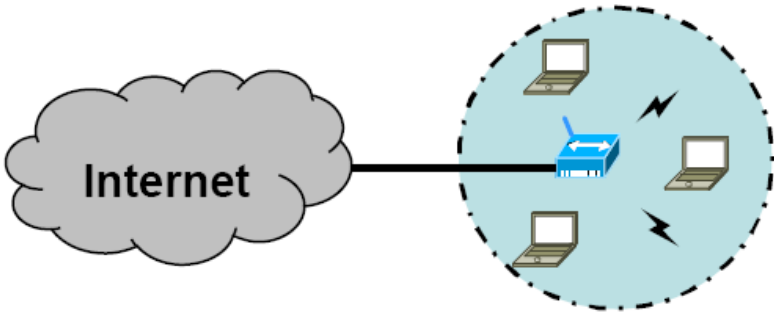
2008.10

主要内容

- **Ad Hoc**网络简介
- 网络拓扑控制概述
- 典型拓扑控制算法
- 小结

有固定基础设施的无线网络



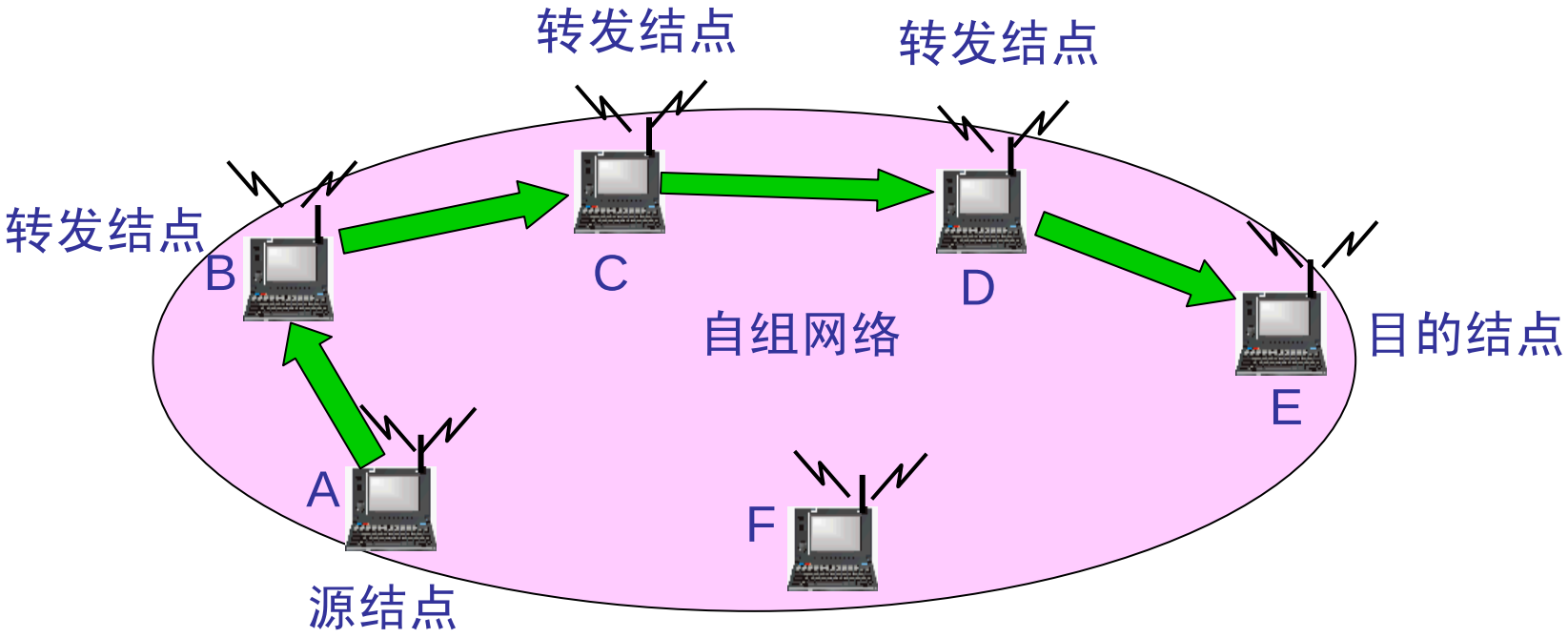


- 蜂窝网络
  - 移动终端通过基站接入移动通信网络
- 无线局域网
  - 移动终端通过无线接入点接入**Internet**

依赖于基站、无线接入点等现有基础设施网络

无固定基础设施的无线网络

- 自组网络(ad hoc network)由一些处于平等状态的移动站之间相互通信组成的临时网络



Ad hoc网络定义

- 由一组带有无线通信收发装置的(移动)终端节点组成的一个多跳临时性自治系统
- 每个(移动)终端同时具有路由器和主机两种功能
  - 作为主机，终端需要运行面向用户的应用程序
  - 作为路由器，终端需要运行相应的路由协议
- 节点间路由通常由多跳(Hop)组成
- 不需要网络基础设施，可以在任何地方、任何地点快速构建

多跳无线网络、自组织网络、无固定设施的网络或者对等网络

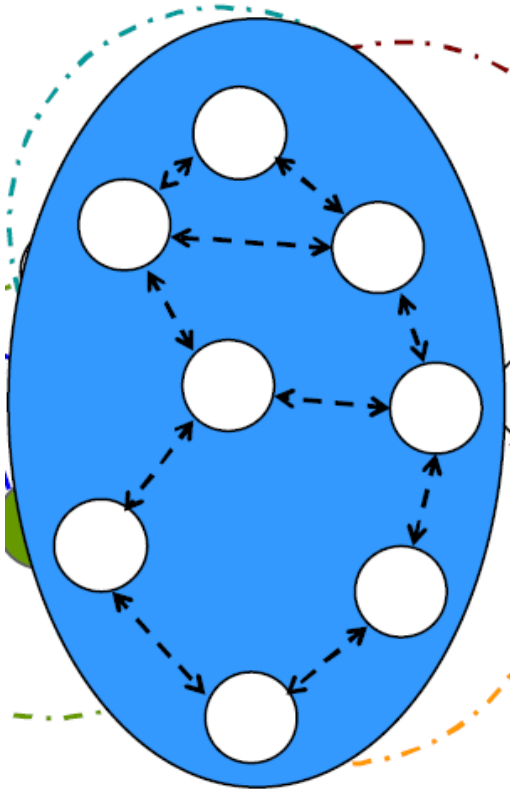
Ad hoc网络特点(1)

- 独立组网
  - 不需要任何预先网络基础设施
- 动态拓扑
  - 节点移动/开机/关机
  - 节点无线发送功率变化、无线信道干扰或者地形等因素影响
- 自组织
  - 无控制中心
  - 节点故障不会影响到整个网络

节点之间通过无线连接形成的网络拓扑结构随时可能发生变化，而且变化的方式和速度可能都是无法预测的

Ad hoc网络特点(2)

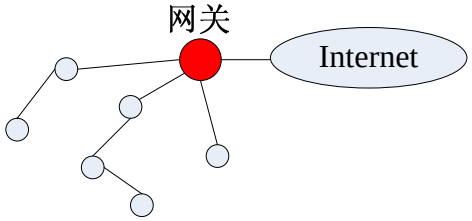
- 多跳路由
  - 接收端和发送端可使用比两者直接通信小得多的功率进行通信，因此节省了能量消耗
  - 通过中间节点参与分组转发，能够有效降低对无线传输设备的设计难度和成本，同时扩大了自组织网络的覆盖范围



Ad hoc网络特点(3)

- 特殊的无线信道特征
  - 无线信道提供的网络带宽比有线信道低得多
  - 竞争无线共享信道产生碰撞
  - 信号衰落、噪声干扰以及信道之间的干扰等
- 终端的局限性
  - 能量、存储、计算等资源受限
- 安全性差
  - 无线链路的开放性
  - 移动性导致节点之间信任关系的变化
- 可扩展性不强
  - 节点之间的相互干扰造成网络容量下降
  - 各节点吞吐量随网络节点总数的增加而下降
- 存在单向无线信道
  - 终端发射功率的不同及地形环境的影响

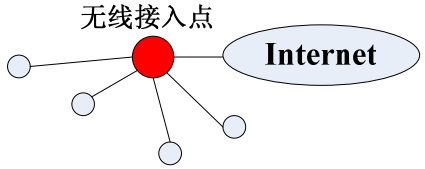
Ad Hoc网络与Sensor网络



- Sensor网络
  - 可以看作是一种特殊类型的Ad Hoc网络
  - 各个无线节点静态地随机分布在某一区域。传感器负责收集区域内的传感信号，将它们发到网关节点
  - 网关具有更大的处理能力，能进一步处理信息，并且具有更大的发送范围，可将信息送往某个大型网络（Internet）并且到达最终的用户

- 与一般**Ad Hoc**网络相比：
  - 节点数量多、分布稠密
  - 节点的能量、计算、存储等资源进一步受限

Ad Hoc网络与无线局域网



- 单跳与多跳

无线局域网为单跳网络，不存在路由问题

- 研究重点不同

主要研究集中在物理层和数据链路层

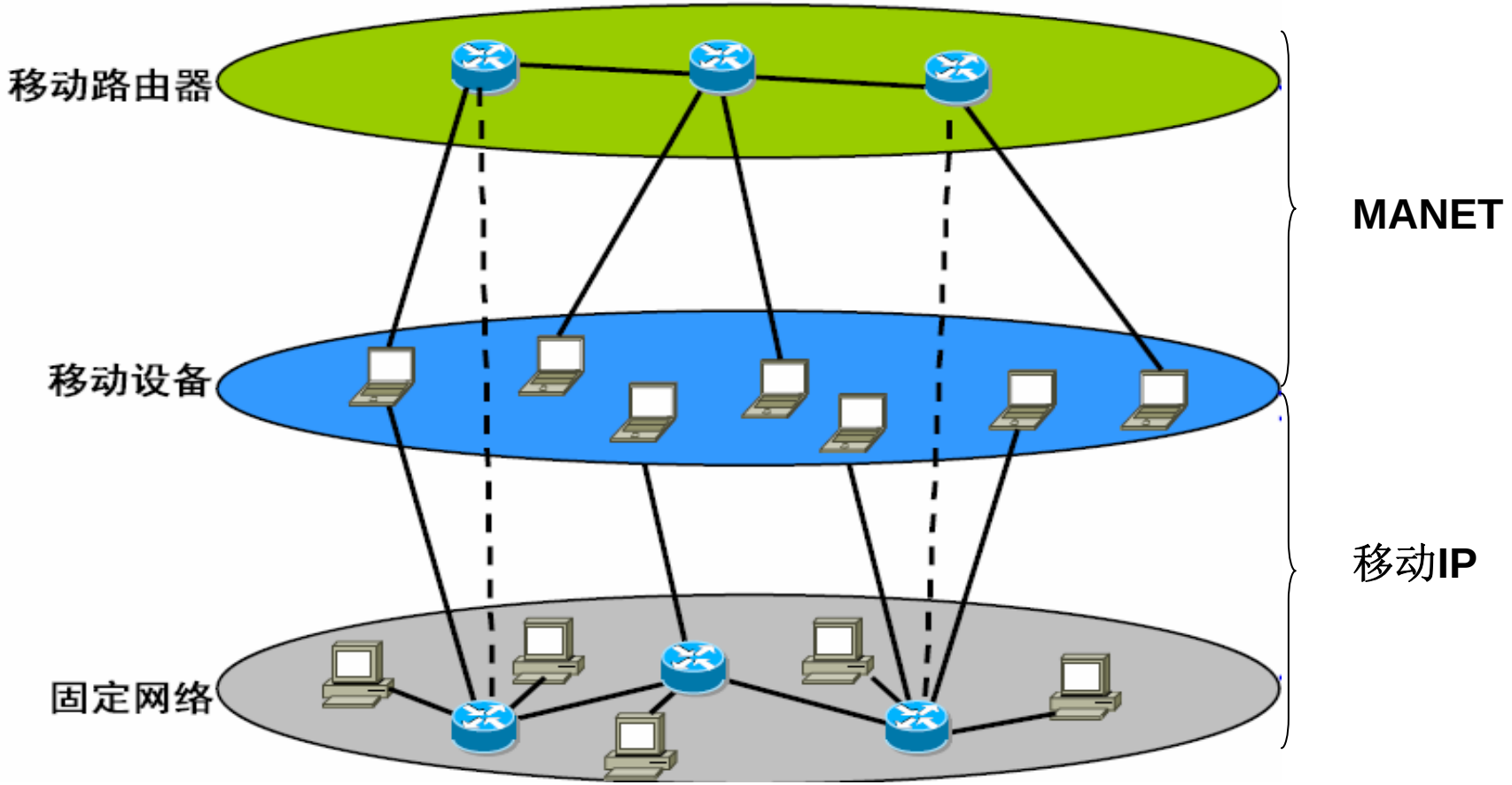
Ad Hoc网络的研究内容主要以路由协议为核心的网络层设计

- 通信模式不同

移动终端的所有通信必须经过无线接入点进行

Ad Hoc网络中移动终端的通信是对等的

移动Ad Hoc网络(MANET)与移动IP



Ad Hoc网络所面临的问题(1)

- 特殊的信道共享方式
  - 共享信道
  - 隐藏节点问题/暴露节点问题
- 动态变化网络拓扑
  - 传统路由协议花较高代价获取的路由信息可能已经陈旧
- 有限的无线传输带宽
  - 减少节点之间的交换的消息
  - 减少控制消息带来的额外开销
- 有限的能量
  - 能量管理机制，各层考虑能量控制，包括网络层路由
- 安全问题
  - 无线信道的开放性更容易受到各种攻击
  - 移动性使得节点的信任关系不断变化
  - 由于节点资源受限，安全机制应该是分布式的

RTS/CTS，CSMA/CA

网络路由时需考虑

Ad Hoc网络所面临的问题(2)

- 网络管理
  - 拓扑管理
    - 确定将一组节点组织成网络的机制
  - 移动性管理
    - 跟踪网络中移动节点的位置
  - 服务质量管理
    - 多跳拓扑动态变化的移动Ad Hoc网络使得服务质量保证更加困难
  - 自动配置
  - …

实现Ad Hoc网络的关键技术

- 路由协议
  - 感知网络拓扑结构的变化
  - 维护网络拓扑的连接
  - 高度自适应性
  - 能量、服务质量等约束
- 服务质量管理
- 功率控制
  - 信道接入技术
  - 节能机制
- 传输层性能
- Ad Hoc网络互联
  - 多个Ad Hoc网络互联
  - Ad Hoc内部节点访问Internet
- 安全问题
- 网络管理

Ad hoc网络历史(1)

- 源自军事领域
- 1972年 分组无线网（PRNET, Packet Radio Network）
  - 战场环境下的数据通信
- 1983年 抗毁自适应网络（SURAN, SURvivable Adaptive Network）
  - 支持大规模网络
  - 适应战场快速变化环境需要的自适应网络协议
- 1994年 全球移动通信系统（GloMo, Globle Mobile Information Systems）
  - 满足军事应用需要的、可快速展开、高抗毁星的移动信息系统
- 1996年 联合战术无线网系统（JTRS, Joint Tactical Radio System）

Ad hoc网络历史(2)

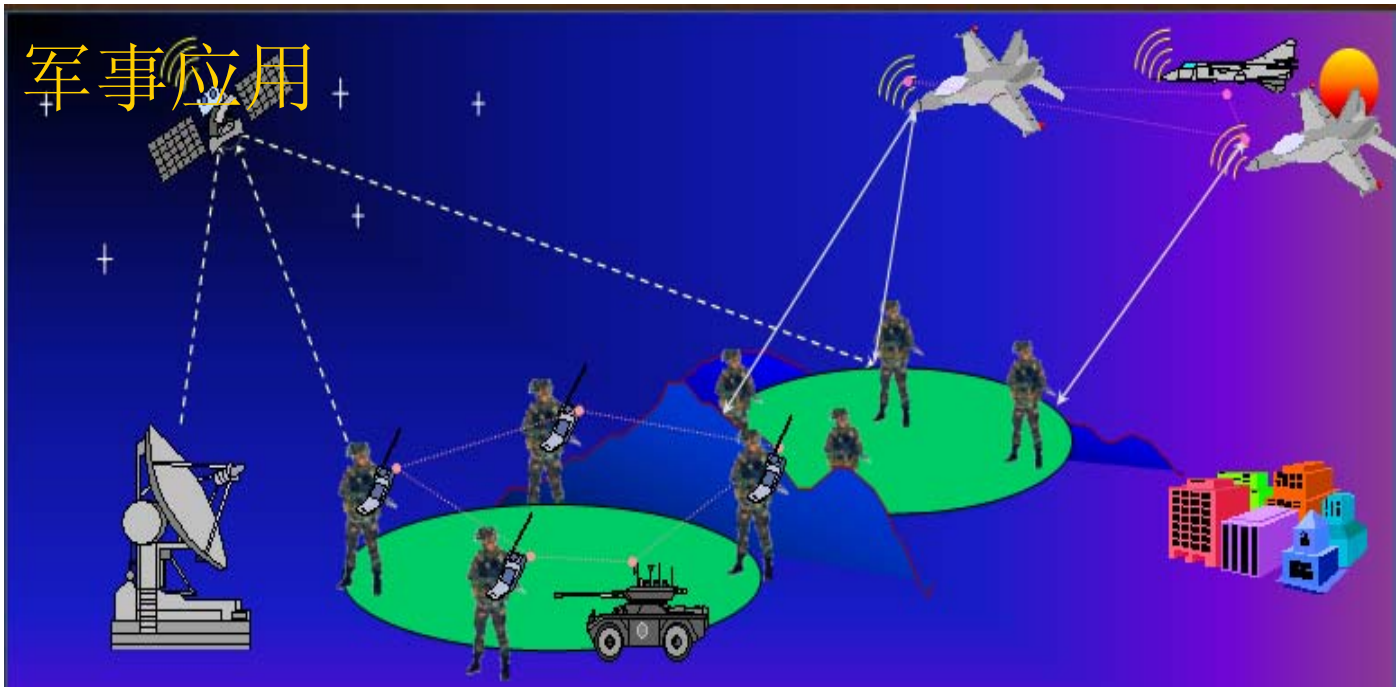
- 1991年 IEEE 802.11首次提出Ad Hoc网络
  - 自组织、对等式、多跳无线移动通信网络
- 1997年 IETF成立MANET(Mobile Ad-hoc Networks)工作组
  - 基于IP的无线多跳网络路由
- 1999年 RFC 2501给出了MANET的应用场合
- 2000年 IETF在公布了一系列有关Ad hoc 路由的草案
- 2000年 IEEE成立Ad hoc技术分委员会
- 2003年 IRTF成立ANS(ad hoc network scalability)研究组

Ad hoc研究现状

- 国外
  - 加州大学洛杉矶分校 WAM(Wireless Adaptive Mobility)
  - 康奈尔大学 WNL(Wireless Networks Laboratory)
  - 伊利诺基大学Urbana-Champaign分校 Ad Hoc网络研究小组
  - 马里兰大学 MCML(The Mobile Computing and Multimedia Laboratory)
- 国内
  - 国内对Ad Hoc网络的研究处于理论和技术跟踪分析的初级阶段
  - 研究的机构主要是在高校和研究所
  - 目前成果主要集中在路由协议及MAC协议的研究

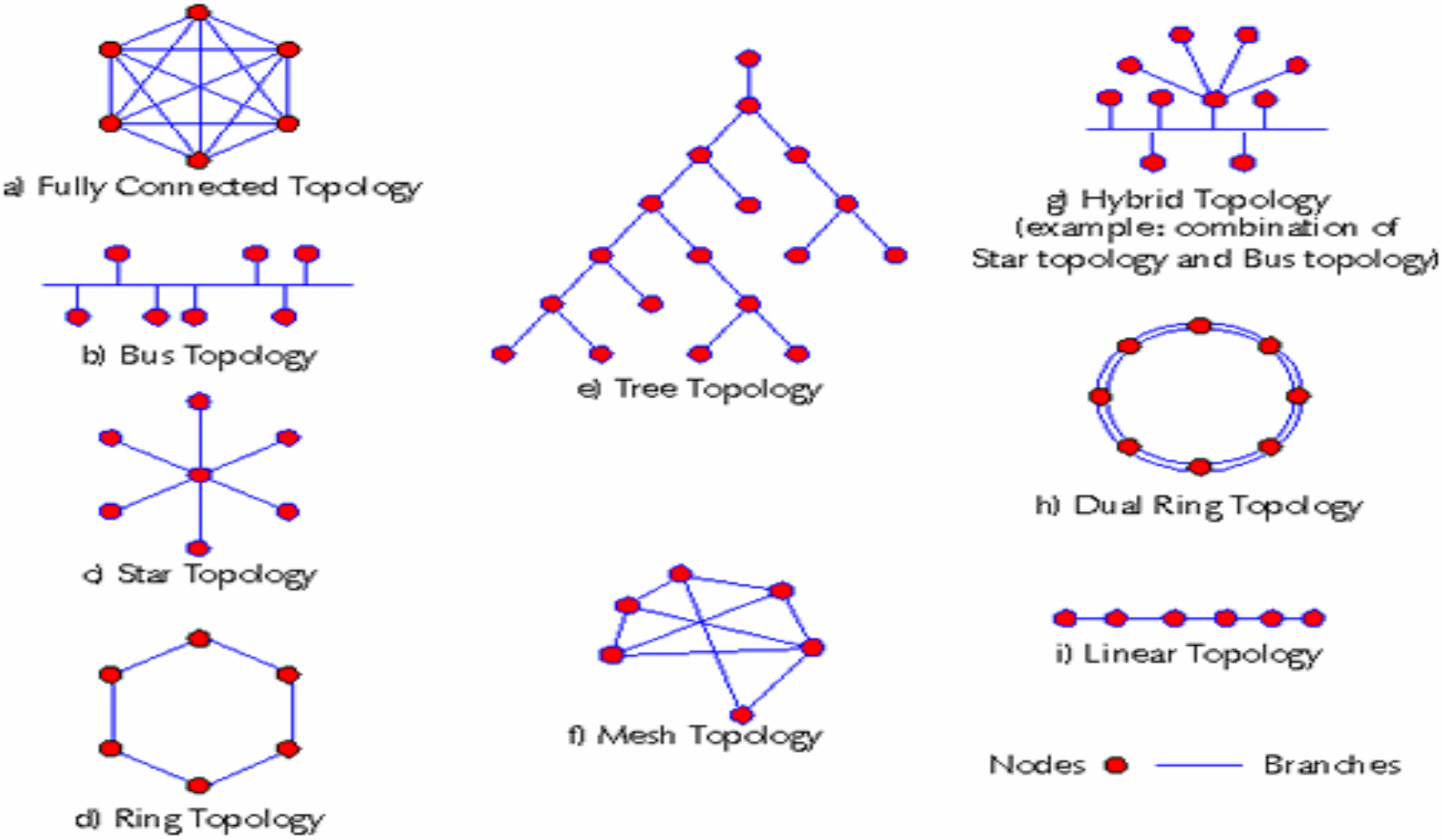
Ad hoc应用领域

- 军事应用



- 紧急和临时场合
- 个人通信

网络常见拓扑结构


a) Fully Connected Topology
b) Bus Topology
c) Star Topology
d) Ring Topology
e) Tree Topology
f) Mesh Topology
g) Hybrid Topology
(example: combination of
Star topology and Bus topology)
h) Dual Ring Topology
i) Linear Topology
Nodes
Branches

拓扑控制涵义

- Topology Control研究的问题
  - 在保证一定的网络连通质量和覆盖质量的前提下，一般以延长网络的生命期为主要目标，兼顾通信干扰、网络延迟、负载均衡、简单性、可靠性、可扩展性等其他性能，形成一个优化的网络拓扑结构。

拓扑控制重要性

- 拓扑控制是一种重要的节能技术
- 拓扑控制保证覆盖质量和连通质量
- 拓扑控制能够降低通信干扰
- 延长网络的生存时间
- 提高MAC(media access control)协议和路由协议的效率
- 为数据融合提供拓扑基础
- 提高网络的可靠性、可扩展性等其他性能
- 拓扑控制对网络性能具有重大的影响

拓扑控制研究主流方向

- 功率控制
  - 为节点选择合适的发射功率
  - 通过降低节点的发射功率来延长网络的生存时间
- 睡眠调度
  - 控制节点在工作状态和睡眠状态之间的转换
  - 对于节点密集型和事件驱动型的网络十分有效

拓扑控制形式

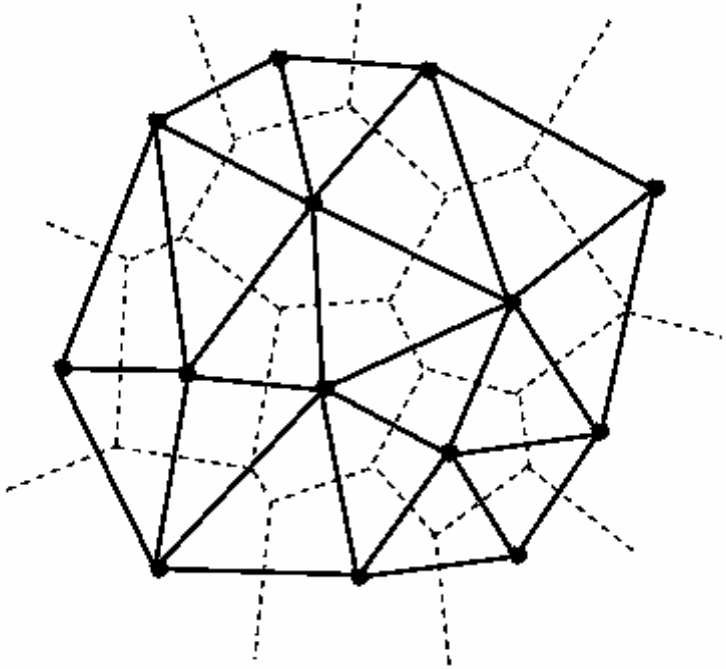
静态节点 不可控部署	静态节点随机地部署到给定的区域; 稀疏网络的功率控制和对密集网络的睡眠调度是两种主要的拓扑控制技术;
静态节点 可控部署	节点通过人或机器人部署到固定的位置. 拓扑控制主要是通过控制节点的位置来实现的,功率控制和睡眠调度虽然可以使用,但已经是次要的了
动态节点 不可控部署	移动自组织网络(mobile ad hoc network,简称MANET) 其挑战是无论独立自治的节点如何运动,都要保证网络的正常运转. 功率控制是主要的拓扑控制技术
动态节点 可控部署	移动节点能够相互定位. 拓扑控制机制融入到移动和定位策略中.因为移动是主要的能量消耗,所以节点间的能量高效通信不再是首要问题. 因为移动节点的部署不太可能是密集的,所以睡眠调度也不重要.

相关概念(1)

- 覆盖
  - 看成是对网络服务质量的度量.
  - 区域覆盖：研究对目标区域的覆盖(监测)问题;
  - 点覆盖：　研究对一些离散的目标点的覆盖问题;
  - 栅栏覆盖：研究运动物体穿越网络部署区域被发现的概率问题.
- *k*-覆盖/覆盖度为*k*
  - 如果目标区域中的任何一点都被*k*个节点监测.
- 部分覆盖
  - 渐近覆盖:当网络中的节点数趋于无穷大时,完全覆盖目标区域的概率趋于1
  - 完全覆盖
- Voronoi图是常用的覆盖分析工具

相关概念(2)

- Voronoi图/泰森多边形/Dirichlet图
  - 它是由一组由连接两邻点直线的垂直平分线组成的连续多边形组成，N个平面上有区别的点，按照最邻近原则划分平面；每个点与它的最近领区域相关联。



虚线为Voronoi图

- 应用
  - 图形学、机械工程、虚拟现实、地理信息系统、机器人、图像处理、CAD等
  - 解决距离计算、碰撞检测、路径规划、Delaunay三角化、骨架计算、凸包计算以及可见性计算等计算几何其它问题的有效工具

相关概念(3)

- 连通
  - *k*-连通/连通度为*k*:如果至少要去掉*k*个节点才能使网络不连通
  - 讨论渐近意义下的连通,亦即当部署区域趋于无穷大时,网络连通的可能性趋于1
- 网络生命期
  - 定义为直到死亡节点的百分比低于某个阈值时的持续时间;可以通过对网络的服务质量的度量来定义网络的生命期.
- 吞吐能力:
  - 目标区域是一个凸区域,每个节点的吞吐率为 λ bits/s.

$$\lambda \le \frac{16AW}{\pi\Delta^2 L}\cdot\frac{1}{nr}\ \text{bits/s}.$$

*A*是目标区域的面积;
*W*是节点的最高传输速率;
π 是圆周率;
Δ 是大于0的常数;
*L*是源节点到目的节点的平均距离;
*n*是节点数;
*r*是理想球状无线电发射模型的发射半径

通过功率控制减小发射半径和通过睡眠调度减小工作网络的规模,在节省能量的同时,可以在一定程度上提高网络的吞吐能力.

相关概念(4)

- 干扰和竞争
  - 减小通信干扰、减少MAC层的竞争和延长网络的生命期基本上是一致的
  - 网络无线信道竞争区域的大小与节点的发射半径*r*成正比,所以减小*r*就可以减少竞争.
- 网络延迟
  - 当网络负载较低时,高发射功率减少了源节点到目的节点的跳数,所以降低了端到端的延迟
  - 当网络负载较高时,节点对信道的竞争是激烈的,低发射功率由于缓解了竞争而减小了网络延迟.
- 拓扑性质
  - 除了连通性之外,对称性、平面性、稀疏性、节点度的有界性、有限伸展性(spanner property)等,都是希望具有的性质,还要考虑诸如负载均衡、简单性、可靠性、可扩展性等其他方面.拓扑控制的各种设计目标之间有着错综复杂的关系.对这些关系的研究也是拓扑控制研究的重要内容.

拓扑控制算法比较

Table 1 Comparison of topology control algorithms for wireless sensor networks

表 1 无线传感器网络拓扑控制算法的比较

Algorithms	Connectivity	Synchronization required	Based on location or direction	Complexity	Node density	Network scale	Heterogeneity
COMPOW	Yes	No	No	Medium	Sparse	Medium	No
CLUSTERPOW	Yes	No	No	High	Sparse	Medium	No
LMA	No	No	No	Low	Sparse	Large	Possible
LMN	No	No	No	Low	Sparse	Large	Possible
CBTC	Yes	No	Yes	Low	Sparse	Large	No
DRNG	Yes	No	Yes	Medium	Sparse	Large	Possible
DLMST	Yes	No	Yes	Medium	Sparse	Large	Possible
XTC	Yes	No	No	Low	Sparse	Large	Possible
RIS	No	Yes	No	Low	Dense	Large	Possible
MSNL	No	No	Yes	Medium	Dense	Large	No
LDAS	No	No	No	Medium	Dense	Large	No
ASCENT	No	No	No	Low	Dense	Large	Possible
PEAS	No	No	No	Low	Dense	Large	Possible
PECAS	No	No	No	Medium	Dense	Large	Possible
CCP	Yes	No	Yes	High	Dense	Large	No
SPAN	Yes	No	No	Medium	Dense	Large	Possible
LEACH	–	Yes	No	Medium	Dense	Small	No
EECS	–	Yes	No	Medium	Dense	Small	No
LDS	–	No	Yes	Medium	Dense	Small	No
GAF	Yes	No	Yes	Medium	Dense	Large	No
GBR	Yes	No	Yes	High	Dense	Large	No
TopDisc	Yes	No	No	High	Dense	Medium	No
HEED	No	Yes	No	High	Dense	Large	No

功率控制(RA)

设$N=\{u_1,\ldots,u_n\}$是$d(d=1,2,3)$维空间中代表网络节点位置的点的集合,$r(u_i)$代表节点u_i的发射半径.RA问题就是要在保证网络连通的前提下, 使网络的发射功率(各节点的发射功率的总和)最小.

Min $\sum_{u_i \in N} (r(u_i))^{\alpha}$ α是大于 2 的常数

一维: $O(n^4)$ 二维/三维: **NP-Hard .**

试图寻找功率控制问题的最优解是不现实的,应该从实际出发,寻找功率控制问题的实用解/可行解;

功率控制算法分类

- 与路由协议结合的功率控制
- 基于节点度的功率控制
- 基于几何拓扑的功率控制
- 基于能量有效性的功率控制
- XTC算法

与路由协议结合的功率控制(1)

- COMPOW (Common Power)

基本思想:
所有的节点使用一致的发射功率,在保证网络连通的前提下,将功率最小化.

基本步骤:

COMPOW 建立各个功率层上的路由表,在功率 P_i 层上,通过使用功率 P_i 交换 HELLO 消息建立路由表 RT_{P_i},所有可达节点都是路由表中的表项.COMPOW 选择最小的发射功率 P_{com},使得 $RT_{P_{com}}$ 与 $RT_{P_{max}}$ 具有相同数量的表项,其中,P_{max} 是最大发射功率.

优缺点:

- 在节点分布均匀的情况下,COMPOW具有较好的性能.
- 但是,一个相对孤立的节点会导致所有的节点使用很大的发射功率,所以在节点分布不均的情况下,它的缺陷是明显的.

与路由协议结合的功率控制(2)

- CLUSTERPOW (Cluster Power) 对COMPOW的改进

基本思想

当转发一个包到目的节点d时,CLUSERPOW选择出现d的最低层次的路由表设为$RT_{P_{\min}}$, 然后以功率$P_{\min}$而不是P_{com}将其发送到下一跳节点.

优缺点:

- 在CLUSTERPOW中，分簇是隐含的，且不需要任何簇头节点，分簇通过给定功率层的可达性来实现，分簇的层次由功率的层次数来决定，分簇是动态的、分布的.
- 节点周期性发送探测信息和更新路由信息，开销太大

基于节点度的功率控制

- LMA: Local Mean Algorithm
- LMN: Local Mean of Neighbors Algorithm
  - 基本思想
    - 一个节点的度数是指所有距离该节点一跳的邻居节点的数目
    - 给定节点度的上限和下限,每个节点动态地调整自己的发射功率,使得节点的度数落在上限和下限之间
    - 它们之间的区别在于计算节点度的策略不同。在LMN 算法中，节点定期检测邻居数量，并根据邻居数量来调节发射功率；而在LMA 算法中节点是将该节点邻居的邻居数求平均值作为自己的邻居数
  - 特点
    - 这类算法利用少量的局部信息达到了一定程度的优化效果,它们不需要很强的时钟同步
    - 但是算法中还存在一些明显的不足。例如，需要进一步研究合理的邻居判断条件，对从邻居节点得到的信息是否需要根据信号的强弱给予不同的权重
    - 算法一般难以保证网络的连通性

基于几何拓扑的功率控制(1)

- 基本思想

  设所有节点都使用最大发射功率发射时形成的拓扑图是G,按照一定的邻居判别条件求出该图的邻近图G'，每个节点以自己所邻接的最远节点来确定发射功率

- 特点
  - 能够保证网络的连通性
  - 在平均功率和节点度等方面具有较好的性能
  - 基于邻近图的功率控制一般需要精确的位置信息

基于几何拓扑的功率控制(2)

- 经典邻近图模型
  - Minimum Spanning Tree
    最小生成树 MST
  - Constrained Relative Neighborhood Graph
    限定相关邻居图 RNG
  - Constrained Gabriel Graph
    限定加百利图 GG
  - Constrained Yao Graph
    限定YG图
  - Delaunay Triangulation Graph
    Delaunay三角剖分

基于几何拓扑的功率控制(3)

- MST (Minimum Spanning Tree)
  - MST构建的网络拓扑是以节点间的欧几里德距离为度量的最小生成树，又称为EMST(Euclidean Minimum Spanning Tree)
  - 定义了一个图中边的最小子集，该子集可以保持图的连通
  - 在分布式环境下构造MST开销巨大

- LMST(Local Minimum Spanning Tree)
  - 基本思想

    每个节点根据其本地拓扑结构计算最小生成树，然后仅保留同该节点只有1跳距离的叶子节点作为其逻辑邻居节点
  - 特点

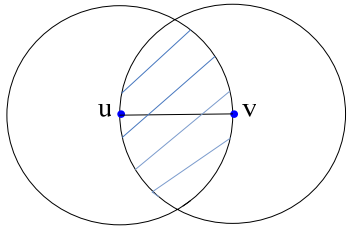
    维护了网络的连通性

    节点的平均发射半径小，拓扑结构具有较好的能量有效性

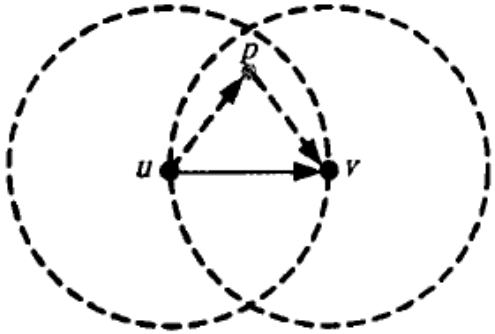
    链路冗余度低，不利于路径失效恢复，维护困难.

基于几何拓扑的功率控制(4)

- RNG (Constrained Relative Neighborhood Graph)
  - 如果两圆重叠的部分存在节点w，则u，v之间不存在边，如果不存在这样的点，则u，v在RNG(V)中有一条边相连

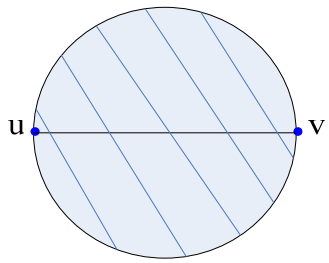


- DRNG(Directed Relative Neighborhood Graph)
  - 基本思想
    - 它们针对节点发射功率不一致问题提出了拓扑解决方案
    - 在DRN G算法中给出了确定邻居节点的标准。d 表示距离, w 表示权重, R 表示节点发射半径,假设节点u、v 满足条件d (u , v) ≤Ru ,且不存在另一节点p 同时满足w (u , p) < w (u , v) 、w (p , v) < w (u , v) 且d (p , v) ≤Rp 时,节点v 则被选为节点u 的邻居节点。
  - 特点
    - 经过执行DRNG算法后,节点确定了自己的邻居集合,然后将发射半径调整为到最远邻居节点的距离。
    - 算法以原始的网络拓扑是双向连通为前提,保证优化后的拓扑也是双向连通的



基于几何拓扑的功率控制(5)

- GG (Constrained Gabriel Graph)
  - 如果阴影部分存在第三点w，则u，v之间不会有边相连，否则u，v在GG(V)中互为邻居节点



- PLA算法(purely localized algorithm)
  - 基本思想：结合RNG(V)和GG(V)

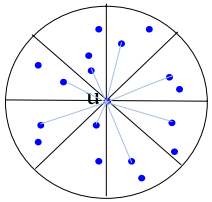
对于某个优化目标 $f(.)$，一个可调整的结构 $S_k(V)$ 称为部分有界的，当且仅当至少存在一个 k_0 使得 $f(S_{k_0}(V))$ 有界。

结合 RNG(V)和 GG(V)的思想，Andy[17]等提出了一种节点度部分有界和满足能量有效性的本地化算法 PLA，构建的拓扑图记为 $NG_r(V)$， $0<r<1$，该图的功率扩展因子在 r 取值于某个范围内时是有界的，也即部分有界，至于最大节点度也给出了一个上界，但这是基于网络中任何一个节点都不存在两个距离相等的邻居节点的假设。

作者在后面给出了一个扩展的 $NG_r(V)$图，记为 $NG_r^*(V)$，该图不需要以上假设都能保证其部分有界性。

基于几何拓扑的功率控制(6)

- YG (Constrained Yao Graph)
  - 以点u为原点发出的k条射线将u的周围空间平分为k(k≥6)个圆锥，u在每个圆锥中寻找离自己最近的1跳邻居，如果找到，设为点v，则在u，v间连一条有向边

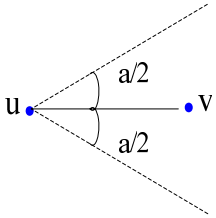


- CBTC: (Cone-based distributed topology-control)
  - 能够保证网络连通性的基于方向的算法
  - 基本思想

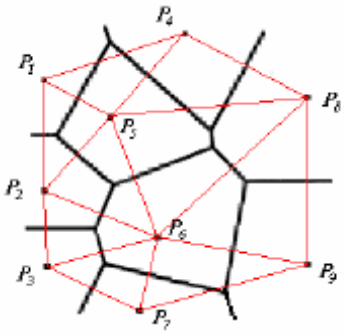
    类似YG,节点u选择最小功率 $p_{u,\alpha}$,使得在任何以u为中心的角度为α的锥形区域内至少有一个邻居. 作者证明了当α ≤5π/6时,可以保证网络的连通
  - 特点:

    不需要节点的位置信息和确定的无线传播模型,在两个节点互换了Hello消息后,便可知道对方相对于自己的方向,这可通过使用多个定向天线来实现.

    基于方向的算法需要可靠的方向信息,因而需要很好地解决到达角度问题,节点需要配备多个有向天线,因而对节点提出了较高的要求.



基于几何拓扑的功率控制(7)



- Delaunay三角剖分 (Delaunay Triangulation Graph)
  - Delaunay三角剖分是很早就提出来的一种几何结构，具有很好的理论基础和数学特性
  - 在有限元分析、计算机辅助建模、计算机图形显示和地理学等领域有广泛的应用
  - 近年来人们将它引入到拓扑控制领域中，取得了良好的效果。
- 两个重要性质
  - 空外接圆性质：每个三角形的外接圆均不包含点集中其他任意点
  - 最大最小角性质：所有三角形的最小角度是最大的
- 不能直接用于拓扑控制
  - 三角形中含有长度大于1单位的边，而根据UDG(V)的定义，距离大于1单位的两个节点间不能直接通信
  - 构造满足空外接圆性质的三角形需要全局信息，不适用于无中心控制节点的Ad Hoc网络
- UDel (Unit Delaunay Triangulation Graph)
  - 图的Delaunay三角剖分中去掉所有边长大于1单位的边所得到的图
  - 不能本地化构建

基于几何拓扑的功率控制(8)

- k-本地化Delaunay图
  - 构造近似UDel的本地化算法

k-本地化 Delaunay 三角形：

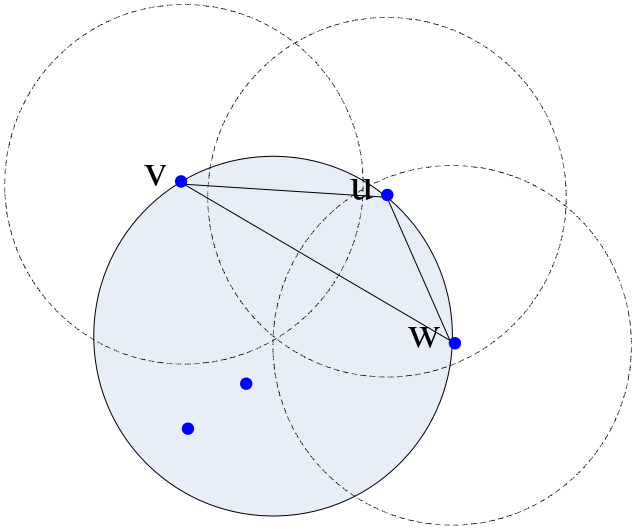
若三角形△uvw 的外接圆 $disk(u,v,w)$ 内部不包含节点 u，v，w 的 k 跳邻居节点，且△uvw 中边的长度均不大于 1 单位，则称△uvw 满足 k-本地化 Delaunay 性质，三角形△uvw 被称为 k-本地化 Delaunay 三角形。

k-本地化 Delaunay 图：

节点集 V 上的 k-本地化 Delaunay 图用 $LDel^{(k)}(V)$ 表示，它包含了 GG(V)图中的边和所有 k-本地化 Delaunay 三角形的边。

基于几何拓扑的功率控制(9)

- 1-本地化Delaunay三角形
  - 三角形△uvw是1-本地化Delaunay三角形，虽然△uvw的外接圆中包含有其它的点，但这些点均不是u，v，w的1跳邻居节点，所以△uvw满足1-本地化Delaunay性质



基于几何拓扑的功率控制(10)

- 构建Delaunay三角剖分
  - 采用经典的Bowyer-Watson算法
  - 算法描述

输入：一个点集 PS

输出：点集 PS 的 Delaunay 三角剖分 $Del(PS)$

1. 生成一个包含点集 PS 中所有点的大三角形 T_0，将其作为初始三角剖分 $Del(PS)$。记下 T_0 的顶点。
2. 对 PS 中所有的点 P：

   （2.1）将外接圆包含点 P 的三角形全部找出，记下这些三角形所组成的区域（Delaunay 空洞）边界，并删除这些三角形。

   （2.2）将点 P 和空洞边界上每一条边的端点相连，形成新的三角形，并加入三角剖分 $Del(PS)$ 中。
3. $\forall T \in Del(PS)$，如果 T 中还有 T_0 的顶点，将 T 从 $Del(PS)$ 中删除。

基于几何拓扑的功率控制(11)

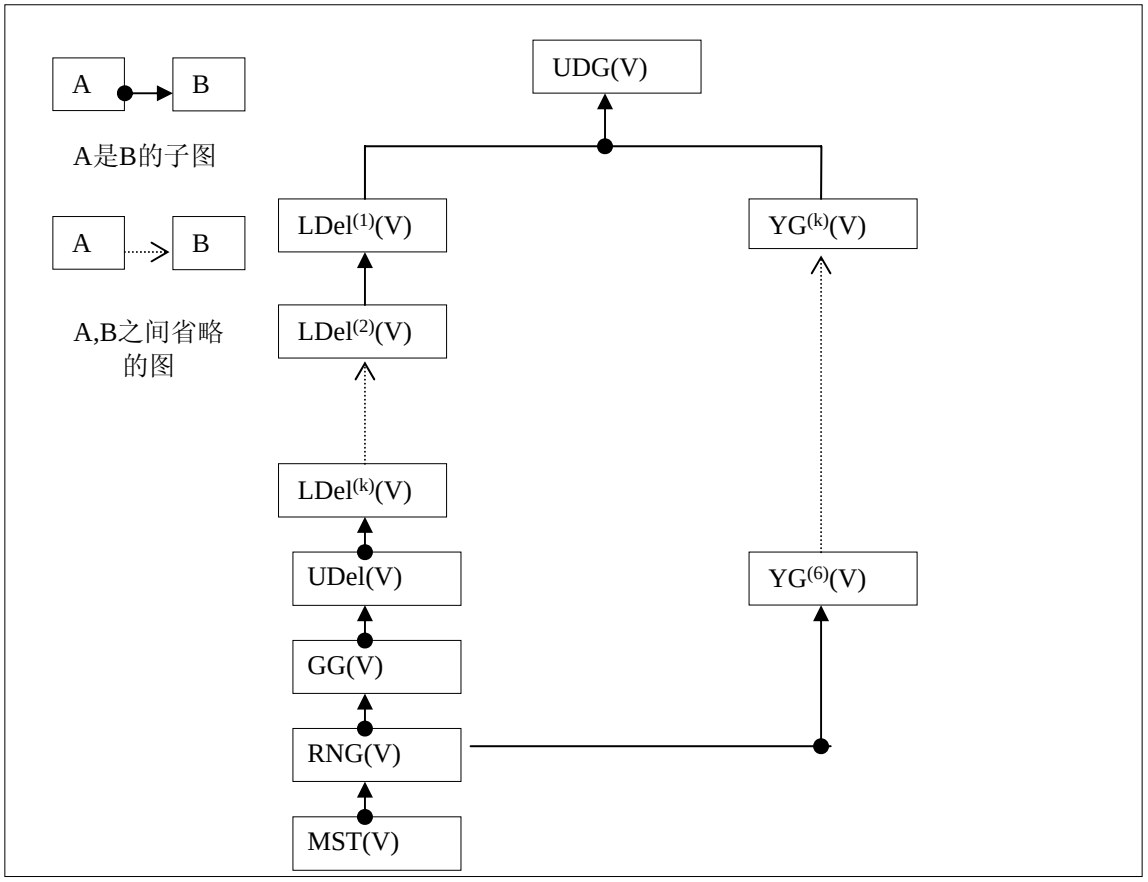
- 算法特点

根据$LDel^{(k)}(V)$的定义，随着 k 的增大，$LDel^{(k)}(V)$越来越稀疏，也愈加接近于 UDel(V)。但构造$LDel^{(k)}(V)$需要收集 k 跳邻居节点的信息，其通信消耗随 k 的增大而增大。

构建$LDel^{1}(V)$只需要 1 跳邻居节点信息，通信消耗少，但$LDel^{1}(V)$不是平面图。$LDel^{2}(V)$的构造只需收集 2 跳内邻居节点的信息，通信消耗相对较少且构建出的网络拓扑具有平面性以及功率支撑性等优秀性质。

基于几何拓扑的功率控制(12)

- 5种几何拓扑结构关系图



基于能量有效性的功率控制(1)

- 主要有三个优化目标
  - 1 最小化最大功率分配问题（min-max assignment problem）
  - 2 最小化总功率分配问题（min-total assignment problem）
  - 3 保留UDG(V)图中任意一对节点之间的最小能量路径。

基于能量有效性的功率控制(2)

- min-max assignment problem
  - Ramanathan.R、M. Sanchez等对优化目标(1)进行了研究，目的在于寻找一种功率分配方案，使得节点的最大功率值最小，同时保证网络的连通性
  - 其主要思想是利用最小生成树EMST算法

基于能量有效性的功率控制(3)

- min-total assignment problem
  - Kirousis、Clementi等对优化目标(2)作了研究，目的在于寻找一种功率分配方案使得所有节点的功率之和最小，同时保证网络的连通性。
  - 然而Kirousis证明了三维空间上求min-total问题的解是NP-完全问题，Clementi[26-27]则证明了在二维空间上同样如此
  - 因此试图寻找该问题的最优解是不现实的，只能将其作为一个优化目标，研究其近似算法，如基于最小生成树和基于功率增量的算法，然而这些算法均为集中式算法，不具有实用性

基于能量有效性的功率控制(4)

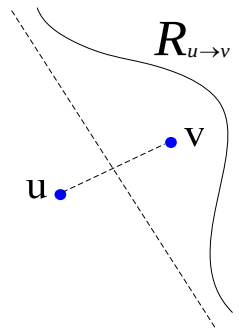
- 保留最小能量路径
  - MECN(Minimum Energy Communication Network)
  - SMECN(Small Minimum Energy Communication Network)
  - SPTTC(Shortest Path Tree based Topology Control)

基于能量有效性的功率控制(5)

- MECN/SMECN
  - MECN
    - 是一种基于节点位置信息的拓扑控制算法，通过GPS，网络中的节点都可以获取自己的位置信息。
  - SMECN是在MECN协议基础上改进的。
    - 通过构建具有最小能量属性的子图来降低传输数据所消耗的能量，保证子图中任意一对通信节点选择的路径在传输数据中所消耗的能量最小，从而更好地满足了对节能性的需求，在拓扑变化不太频繁的网络中能够很好地应用
    - 可以自维护网络的最小能量特征。算法设计时考虑了拓扑的控制与维护，在算法确定的传输半径以外发生的拓扑变化都不会影响到该节点的功率值，因此，只要那些检测到网络变化的节点重新运行SMECN算法，就可以维护网络的最小能量特征
    - 缺点是拓扑控制后还存在仍以最大功率通信的节点

基于能量有效性的功率控制(6)

- SMECN算法
  - 依赖区域(Relay Region)



节点对(u，v)的依赖区域定义为二维平面上的坐标点集，使得节点 u 直接与该集合中的某点 w 通信比通过节点 v 中继然后到节点 w 需要更多的功率，即：

$$R_{u\to v} \equiv \{(x,y) \mid p_{u\to v\to(x,y)} < p_{u\to(x,y)}\}$$

$p_{u\to v\to(x,y)}$ 表示由 u 发送信息经过 v 转发到达处于位置(x，y)的节点所需的功率

$p_{u\to(x,y)}$ 表示 u 发送信息直接到达处于位置(x，y)的节点所需的功率

基于能量有效性的功率控制(7)

- SMECN算法
  - 基本思想

    令$F(u,p)$表示节点u的发射功率为p时信号所能覆盖的区域。SMECN算法的思想是计算一个直接通信区域η，使得节点u与该区域内的节点直接通信需要的功率小于通过$F(u,p)$内某个节点转发需要的功率。

    - 节点u决定是否把某个节点v加入到其Neighbor Set 中，准则在于判断该节点v是否在其已有邻居节点的依赖区域内。若不在，则v是节点u 的邻居。
  - 算法描述
    - 1 确定节点u 最大搜索区域D，在这个区域内的所有节点都能正确接收到u 发出信号；
    - 2 设置搜索区域，找到新的节点；
    - 3 判断新的节点是否在已有邻居的依赖区域内，如果不是则把该节点加入到其Neighbor Set 当中；
    - 4 检查已搜索区域加上已有邻居的依赖区域是否已经覆盖了最大搜索区域，如果是则算法停止，反之重复2～3步。

基于能量有效性的功率控制(8)

- 基于最短路径树的拓扑控制方法SPTTC
  - 基本思想
    - 与LMST类似，每个节点建立本地拓扑结构，执行单源最短路径树算法(如Dijkstra算法)求出以它为根的最短路径树，然后把功率设定为到达树中最远的1跳邻居节点所需的功率
  - 特点
    - SPTTC算法导出的拓扑具有强连通性，并且保留了任意一对节点之间的最小能量路径。
    - 注重如何在初始控制时尽量减少节点的传输功率，具有较高的效率有效性。
    - 但当网络动态变化时，为了维护连通性和最小能量特性，需要较大的开销。

XTC算法(1)

- 微软亚洲研究院的Wattenhofer等人提出的XTC算法
  - 对传感器节点没有太高的要求
  - 对部署环境也没有过强的假设
  - 提供了一个面向简单、实用的研究方向
  - XTC代表了功率控制的发展趋势
- 基本思想
  - 是用接收信号的强度作为RNG(relative neighborhood graph)中的距离度量

XTC算法(2)

- 补充概念
  - 偏序：若集合X上的关系R是自反的、反对称的和传递的，则称只是集合X上的偏序关系。(如：实数集上的<=关系,>=关系)
  - 全序：设R是集合X上的偏序(Partial Order)，如果对每个x,y∈X必有xRy或yRx，则称R是集合X上的全序关系。
  - 直观地看，偏序指集合中仅有部分成员之间可比较，而全序指集合中全体成员之间均可比较。
- 算法描述

(1) 邻居排序:节点 u 对其所有的邻居计算一个反映链路质量的全序 $\prec_u$.在 $\prec_u$ 中,如果节点 w 在节点 v 的前面,则记为 $w \prec_u v$.节点 u 与 $\prec_u$ 中出现越早的节点之间的链路,其质量越好.

(2) 信息交换:节点 u 向其邻居广播自己的 $\prec_u$,同时接收邻居节点建立的 $\prec$.

(3) 链路选择:节点 u 按顺序遍历 $\prec_u$,先考虑好邻居,后考虑坏邻居.对于 u 的邻居 v,如果节点 u 没有更好的邻居 w,使得 $w \prec_v u$,那么 u 就和 v 建立一条通信链路.

XTC算法(3)

- XTC的优缺点:
  - 不需要位置信息
  - 对传感器节点没有太高的要求
  - 适用于异构网络
  - 也适用于三维空间
  - 与大多数其他算法相比,XTC更简单,更实用
  - XTC与实用化要求仍然有一定的距离(如:XTC并没有考虑到通信链路质量的变化)

存在的问题

- 模型过于理想化,没有考虑实际应用中的诸多困难
  - 二值感知模型不符合实际
  - 发射模型、同构网络、异构网络
  - 节点定位、链路模型、随机链路
- 对拓扑控制问题缺乏明确的定义和实用的算法
  - 需要在最小能耗意义、最小干扰意义、负载均衡意义以及在综合网络性能等其他意义下定义并分析或解决拓扑控制问题
- 对网络性能缺乏有效的度量
  - 各种网络性能：覆盖质量、连通质量、能量消耗、通信干扰、网络延迟、可靠性、可扩展性等。对这些网络性能却缺乏有效的度量
  - 对网络性能的度量问题,特别是综合网络性能的度量问题以及网络性能之间的关系与权衡问题,都是拓扑控制研究的重要内容
- 拓扑控制在协议栈中的位置尚难明确
  - 拓扑控制直接影响物理层、链路层、网络层和传输层
  - 拓扑控制可以放在MAC 层,可以放在网络层,也可以放在MAC 层之上、网络层之下
  - 拓扑控制与介质访问、路由、数据融合、数据存储等其他方面相结合的研究
- 研究结果没有足够的说服力
  - 大多数的研究对拓扑控制算法只作理论上的分析和小规模的模拟
  - 小规模的模拟又不能仿真大规模的网络及其复杂的部署环境
  - 还没有进入实用阶段.这使得目前的研究结果普遍缺乏足够的说服力

展望

- 拓扑控制已经取得了初步的研究成果
- 大多数的拓扑控制算法还只停留在理论研究阶段,没有考虑实际应用的诸多困难.
- 拓扑控制还存在许多问题,这些问题构成了拓扑控制研究的丰富内容.这些研究内容之间有着极为密切的关系,它们是相互制约、相互促进、不可分割的整体
- 特别是需要探索更加实用的拓扑控制技术.以实际应用为背景、多种机制相结合、综合考虑网络性能将是拓扑控制研究的发展趋势

- Thanks!