

# 无线传感器网络数据处理与能耗 优化策略研究

学 生：熊君武  
指导老师：李欢副教授



# 报告内容

- 研究背景
- 国内外研究现状
- 研究内容
- 仿真与性能分析
- 总结与展望





# 报告内容

- 研究背景
- 国内外研究现状
- 研究内容
- 仿真与性能分析
- 总结与展望



# 课题来源

- 教育部留学回国人员科研启动基金资助项目“传感网数据建模与融合技术”
- 国家自然科学基金项目“基于层叠网的可信网格服务组织与发现机制研究”（项目编号：60703056）
- 北航新进教师条件项目

# 无线传感器网络

## ● 网络构成

- 由大量部署到目标区域的具传感信息、数据采集等功能的传感器节点组成

## ● 传感器节点

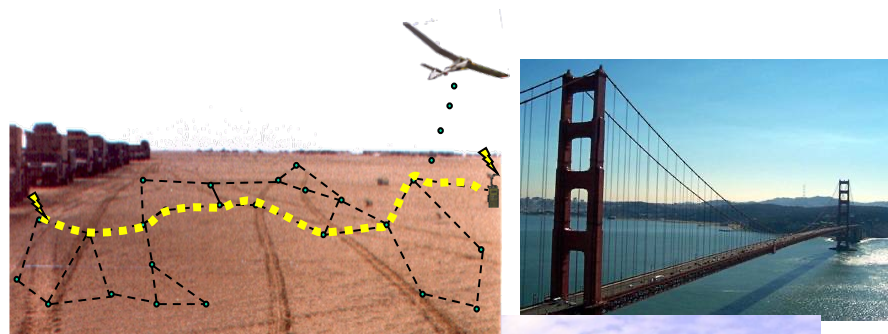
- 低成本、低功耗、部署灵活
- 功能：感知温、光、压强等
- 资源受限：节点能量, 运算能力, 存储能力



传感器节点

## ● 典型应用

- 国防军事监测
- 环境数据采集
- 运动跟踪、医疗保健等



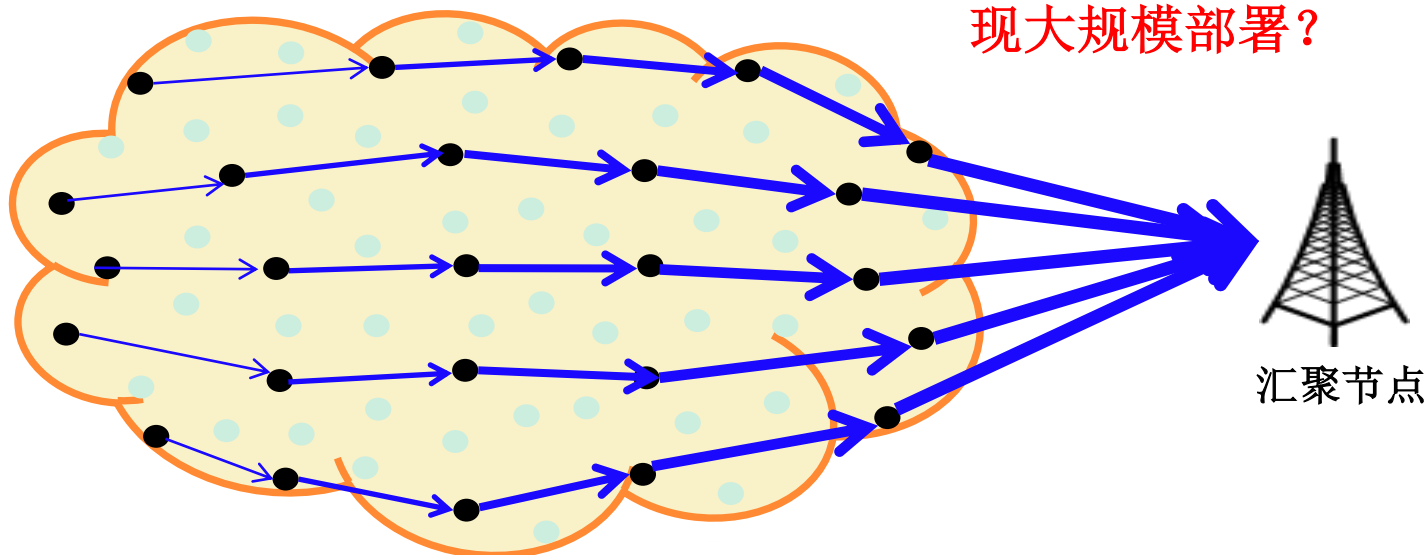
# 大规模无线传感器网络能耗问题

## ● 网络部署场景

- 节点能源有限
- 数据传输能耗大
- 不同区域能耗不均，离汇聚节点越近能耗越大

## ● 问题

- 怎样减少冗余数据，提高网络能量利用率？
- 怎样保证网络能耗均匀且最小化、延长网络生命？
- 怎样增强网络可扩展性、实现大规模部署？





# 报告内容

- 研究背景
- 国内外研究现状
- 研究内容
- 仿真与性能分析
- 总结与展望



# 国内外研究现状

数据处理	算法协议分类		特点及优点	不足
数据聚集	平面结构	SPIN <sup>[1]</sup> , Directed Diffusion <sup>[2]</sup> 等	消除冗余数据	网络耗能不均, 不支持节点异构
	结构化网络	分簇: LEACH <sup>[3]</sup> 、UCS <sup>[4]</sup> 、HEED <sup>[5]</sup> 、UCR <sup>[6]</sup> 、SCA <sup>[7]</sup> 等	支持节点异构, 由簇头或中转节点进行数据融合	分布式, 利于网络规模扩展
		链: PEGSIS <sup>[8]</sup> 等		链、树: 集中式, 不利于网络规模扩展
	树: PEDAP <sup>[9]</sup> 等			
数据汇聚	单跳传输	LEACH、PEGSIS等	网络结构简单、易部署	只适合小规模网络
	多跳传输	HEED、UCR、SCA等	提高网络扩展性, 适合大规模网络	汇聚节点附近区域能耗负载重
数据融合	融合方式	全网统一融合、局部融合等	减少冗余数据, 提高网络能量利用率	对节点功能要求较高或需要节点异构性
	融合技术	子网内数据融合、子网间数据融合		





# 报告内容

- 研究背景
- 国内外研究现状
- **研究内容**
- 仿真与性能分析
- 总结与展望



# 能量模型

## ● 发送端能耗( $q$ -bit, $d$ )

- 将长度为 $q$ -bit的数据包发送距离 $d$ 时耗能

$$E_{Tx}(q, d) = \begin{cases} qE_{elec} + q\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0 \\ qE_{elec} + q\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0 \end{cases}$$

- $E_{elec}$  : 电路消耗能量
- $\epsilon_{fs}d^2$  和  $\epsilon_{mp}d^4$  : 放大器能耗
- $d_0$  : 距离阈值
- 簇内通信:  $d^2$
- 簇间通信:  $d^4$

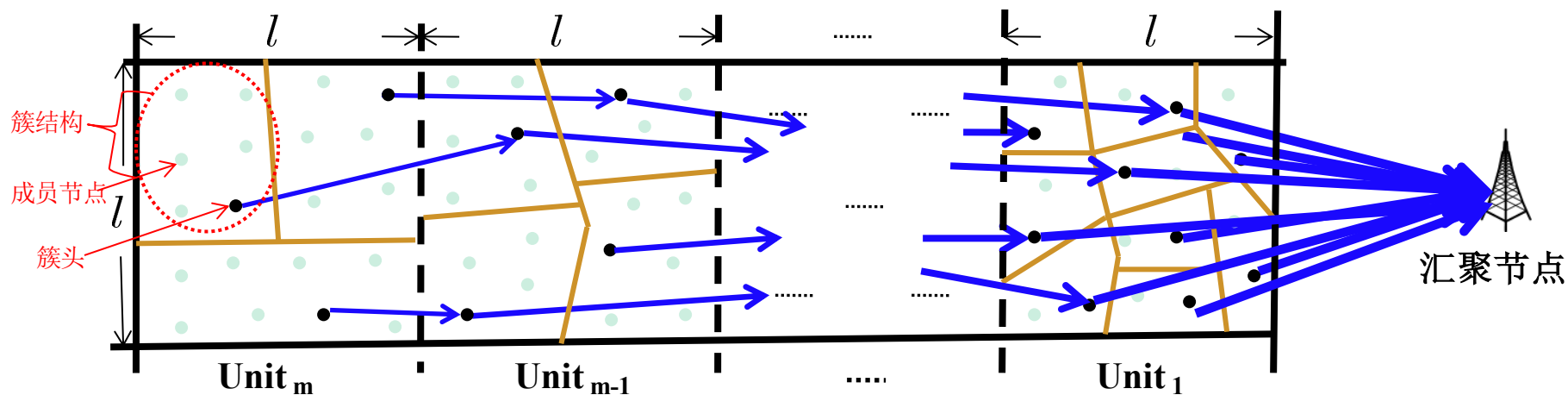
## ● 接收端能耗( $q$ -bit)

- 接收长度为 $q$ -bit的数据包时耗能

$$E_{Rx}(q) = qE_{elec}$$

# 网络模型

- 大面积矩形模型，由一系列虚构正方形子区域或子网构成
- 所有节点自组织成簇，数据由簇头多跳转发至汇聚节点
- 同一子网簇头之间不转发数据，直接向相邻子网转发





# 研究内容

- 方法1：求解簇间跳数或子网划分数，使网络簇头总能耗最小
- 方法2：寻找子网间簇头数分布，使网络能耗均衡
- 方法3：数据融合比与簇头数分布
- 方法4：结合方法1-3，综合已有策略进一步促进全网能耗均衡

# 1.1 簇头能耗分析

## ● 簇头能耗

- 数据接收:  $E_{Rx}(a, i)$
- 数据转发:  $E_{Tx}(a, i)$
- 数据融合:  $E_{agg}(a, i)$

## ● 簇头能耗平均负载

$$E_{CH_i}(a, i) = E_{Rx}(a, i) + E_{Tx}(a, i) + E_{agg}(a, i)$$

$$E_{Rx}(a, i) = \frac{\sum_{k=i+1}^m an_k q_0 + n_i q_0}{c_i} E_{elec} \quad E_{Tx}(a, i) = \frac{\sum_{k=i}^m an_k q_0}{c_i} (E_{elec} + \epsilon_{mp} d_i^4) \quad E_{agg}(a, i) = \frac{n_i q_0}{c_i} E_{DA}$$

## ● 主要决定因素

- 传输距离  $d_i = l$  or  $d_i = ?$
- 簇头数分布  $\vec{c} = (c_m, \dots, c_1)$

# 1.2 簇间传输距离

## ● 相邻子网簇间传输距离期望

- 定理1: 两个分别随机、均匀部署在相邻的两个单位正方形的点之间的欧氏距离的期望值为一个常数, 其值为  $\lambda = 1.088$ . [10-14]
- 网络工作初始, 每个节点当选簇头概率相同, 那么: 两个分别随机、均匀部署在相邻两个正方形子网内的簇头间的欧式距离期望值为  $d = \lambda l$ ,  $\lambda = 1.088$ ,  $l$  为正方形边长

## ● 多跳子网传输距离期望

- $d_i$ : 表示任意两相邻两子网内任意两簇头间平均传输距离
- 子网拓扑对称分布, 因此:

$$d = d_{m-1} = \dots = d_2 = \lambda l, \lambda = 1.088, i = m - 1, \dots, 2.$$

## ● 总簇间跳数上界

$$m_u = \begin{cases} 1, & 0 \leq S < \frac{2d^2}{\lambda^2} \\ \lfloor \frac{S\lambda^2}{d_0^2} \rfloor, & \text{others.} \end{cases}$$

# 1.3 总簇间跳数

## ● 全网簇头总能耗最小

- 为保证簇头总能耗最小的实际最优簇间跳数或子网数应为如下：

$$m_{opt} = \begin{cases} 1, & 0 \leq S < \lceil \frac{2d^2}{\lambda^2} \rceil \\ \lfloor m_{root} \rfloor, & \text{others.} \end{cases}$$

- 这里， $m_{opt}$  与全网的统一数据融合比  $a$  无关，

$$m_{root} = \frac{[6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2 (18 + \sqrt{\frac{324E_{elec} - 6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{E_{elec}}}) E_{elec}^2]^{\frac{1}{3}}}{6E_{elec}} + \frac{\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{[6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2 (18 + \sqrt{\frac{324E_{elec} - 6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{E_{elec}}}) E_{elec}^2]^{\frac{1}{3}}}$$

# 1.3 总簇间跳数

## ● 全网簇头总能耗

$$E_{CHtotal}(a, m) = \sum_{i=1}^m c_i E_{CH_i}$$

$$= \left\{ \left( \frac{m-1}{2} a + 1 \right) E_{elec} + \frac{m+1}{2} a \left[ E_{elec} + \epsilon_{mp} \left( \frac{\lambda^2 S}{m} \right)^2 \right] + E_{DA} \right\} Nq_0$$

$$\text{令 } g(a, m) = \left( \frac{m-1}{2} a + 1 \right) E_{elec} + \frac{m+1}{2} a \left[ E_{elec} + \epsilon_{mp} \left( \frac{\lambda^2 S}{m} \right)^2 \right] + E_{DA}$$

$$\frac{\partial g(a, m)}{\partial m} = 0 \Rightarrow \text{Minimize} \{ E_{CHtotal}(a, m) \}$$

$$m_{root} = \frac{[6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2 (18 + \sqrt{\frac{324E_{elec} - 6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{E_{elec}}}) E_{elec}^2]^{\frac{1}{3}}}{6E_{elec}} + \frac{\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{[6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2 (18 + \sqrt{\frac{324E_{elec} - 6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{E_{elec}}}) E_{elec}^2]^{\frac{1}{3}}}$$

又  $m_{root} = \lfloor \frac{S\lambda^2}{d^2} \rfloor$ ，根据簇间跳数上界，得

$$m_{opt} = \begin{cases} 1, & 0 \leq S < \lceil \frac{2d^2}{\lambda^2} \rceil \\ \lfloor m_{root} \rfloor, & \text{others.} \end{cases}$$



## 方法2-3：簇头分布规律与数据融合比

### ● 全网簇头总能耗均衡

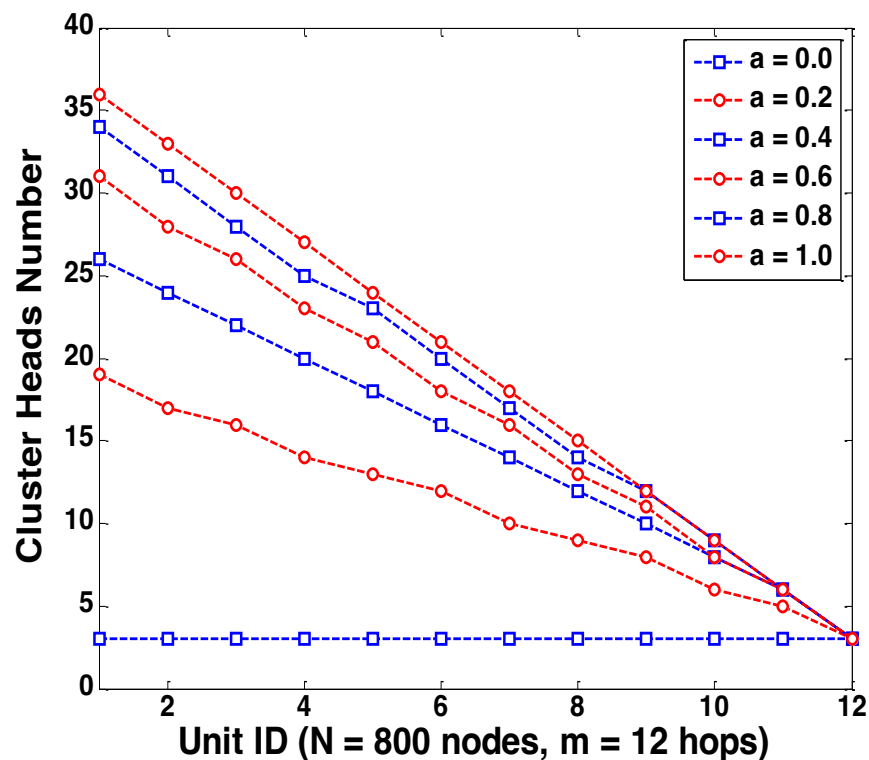
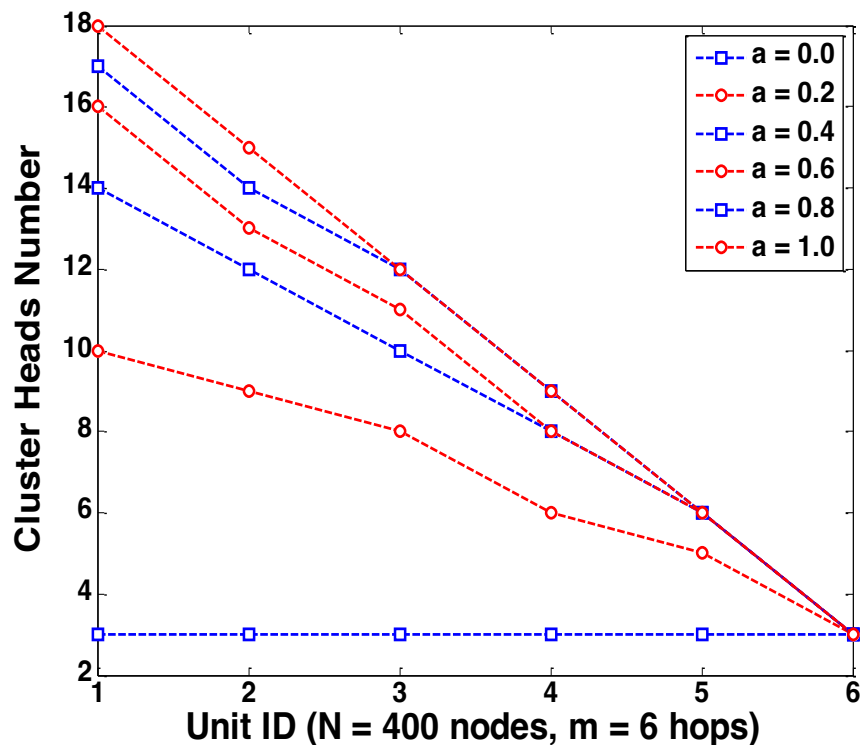
- 1) 为达到全网所有簇头能耗均衡，不同子网区域簇头离汇聚节点距离递减其数目**严格地线性递增**
- 2) 数据融合比越大，为了维持子网间簇头能耗均衡所需簇头数越多，而且**对于不同数据融合比，条件1)仍成立**

策略1：  
总簇间跳数

策略2：  
簇头数分布

策略3：  
数据融合比

# 方法2-3：簇头分布规律与数据融合比



为保持能耗均衡，离汇聚节点方向簇头数线性递增  
 对不同数据融合比保持一致

策略1：  
总簇间跳数

策略2：  
簇头数分布

策略3：  
数据融合比



# 报告内容

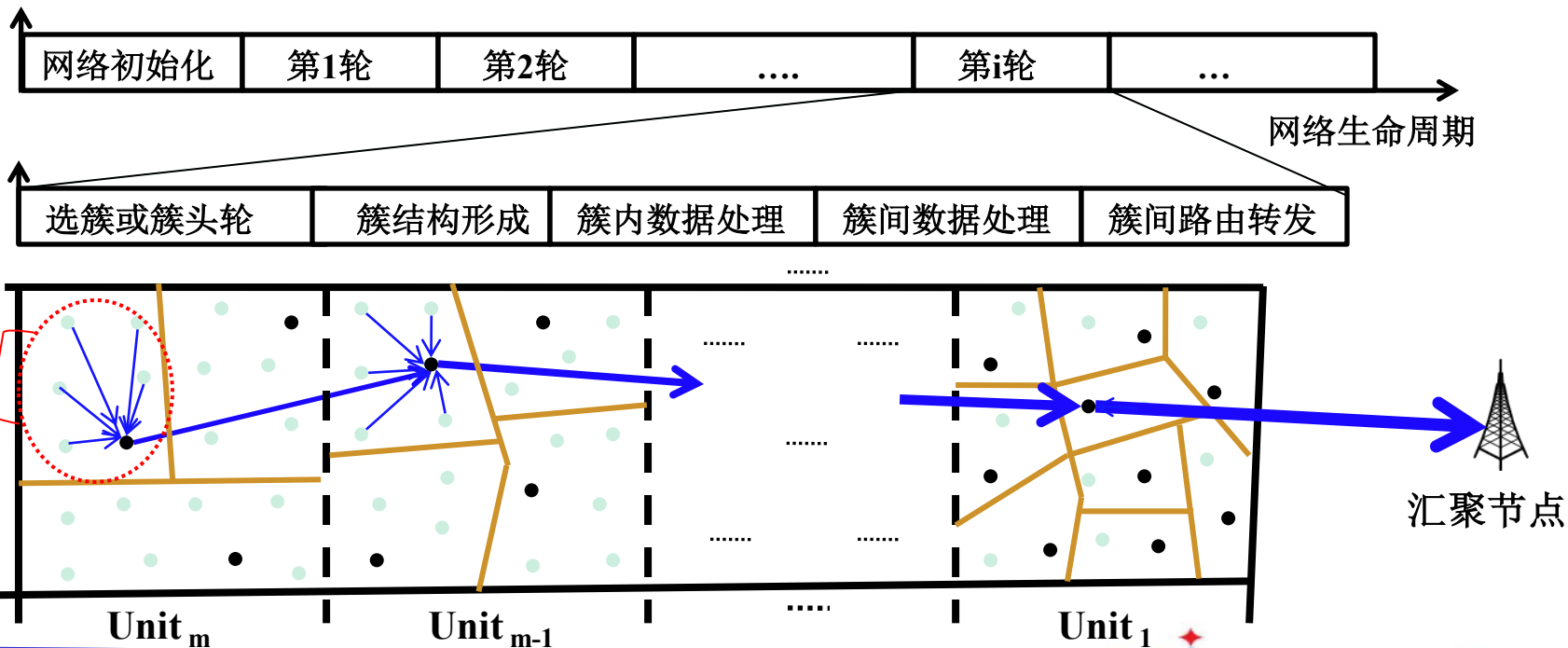
- 研究背景
- 国内外研究现状
- 研究内容
- 仿真与性能分析
- 总结与展望



# 仿真协议COCA (Constructing Unequal Clustering Architecture)

## ● 全网所有节点能耗均衡

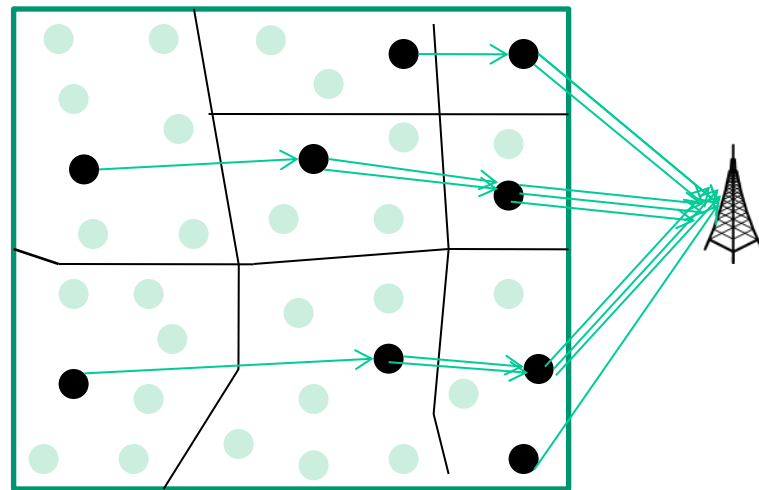
- 方法1-3得到的理论值
- 子网内簇头轮转
- 子网间簇头动态能量感知路由



# 对比协议UCR<sup>[6]</sup> (Unequal Cluster-based Routing protocol)

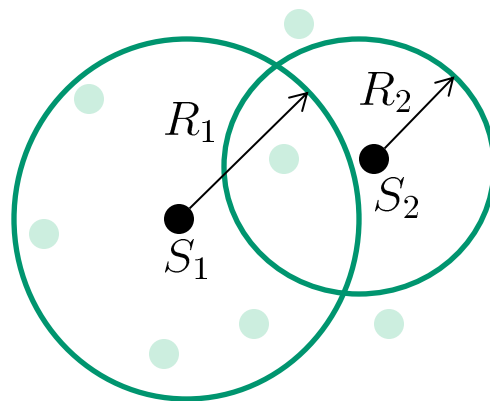
## ● 不等分簇节能算法

- 按指定概率选取候选簇头
- 候选簇头拥有各自竞争半径，竞争半径离汇聚节点越近半径越小
- 候选簇头通过竞争半径、剩余能量以及节点ID，竞争当选最终簇头



## ● 多跳簇间路由协议

- 选取剩余能量高且节点ID小的簇头作为转发簇头



# 协议参数设置

## ● 数据融合方式

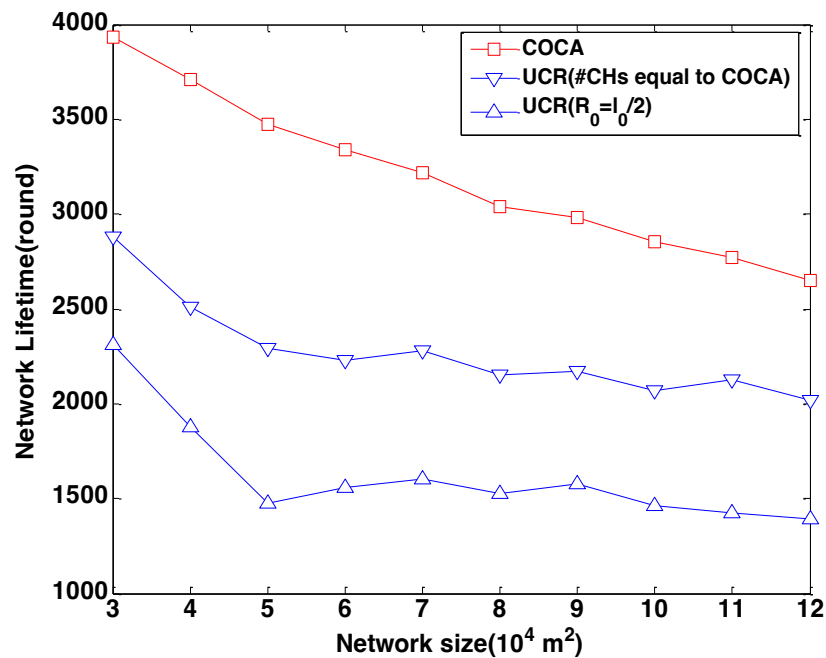
- 全网统一数据融合，簇内数据融合，簇间数据不融合

## ● 网络生命周期定义

- **头结点死亡**：网络中的一个簇头或一个成员节点不能继续处理数据时网络所持续工作的时间。
- **部分节点死亡**：离汇聚节点最近子区域内的存活节点数少于用于转发数据所需理论簇头数时网络持续工作的时间

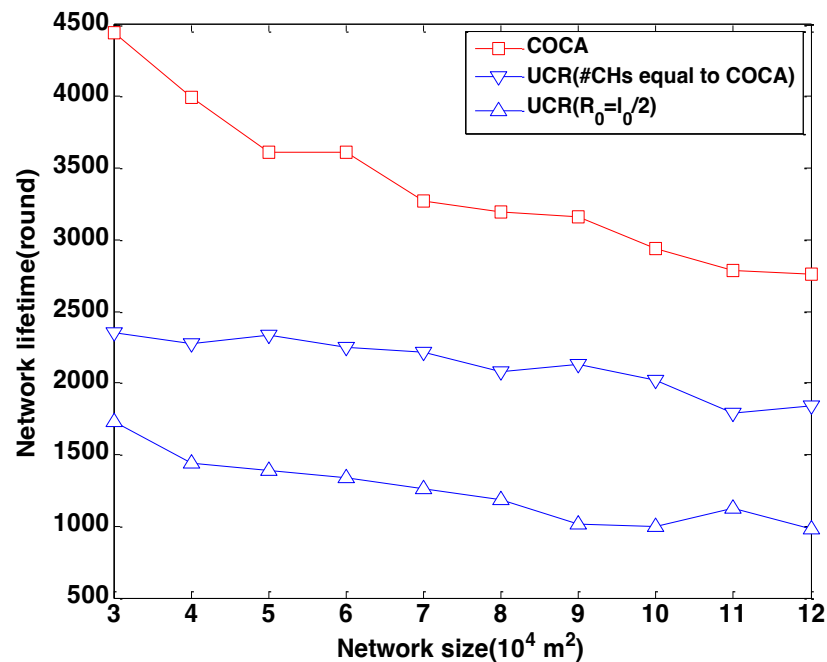
# 网络生命周期

## ● 头结点死亡



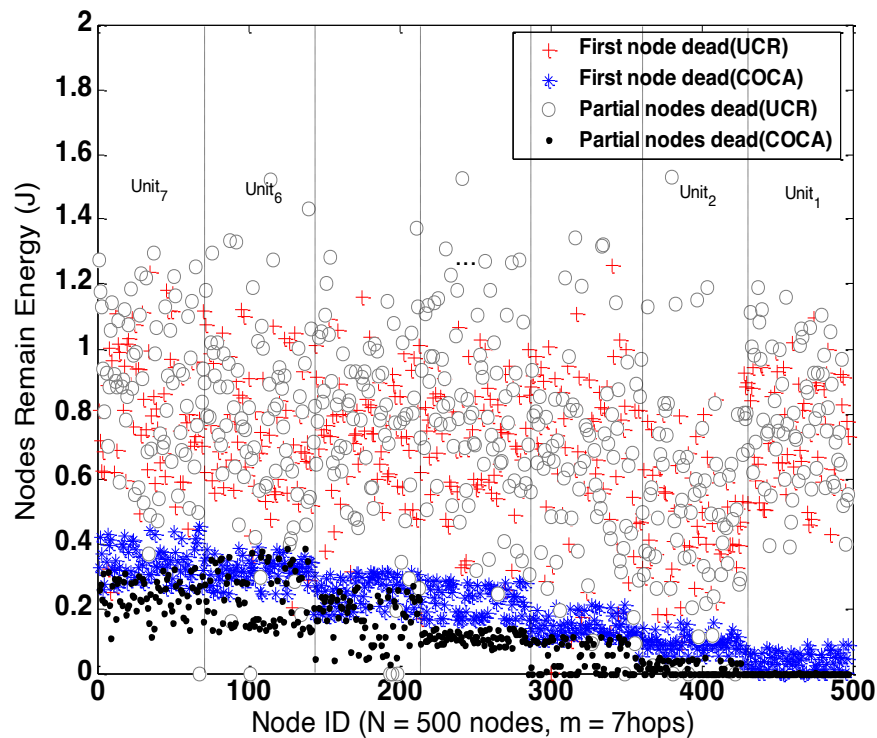
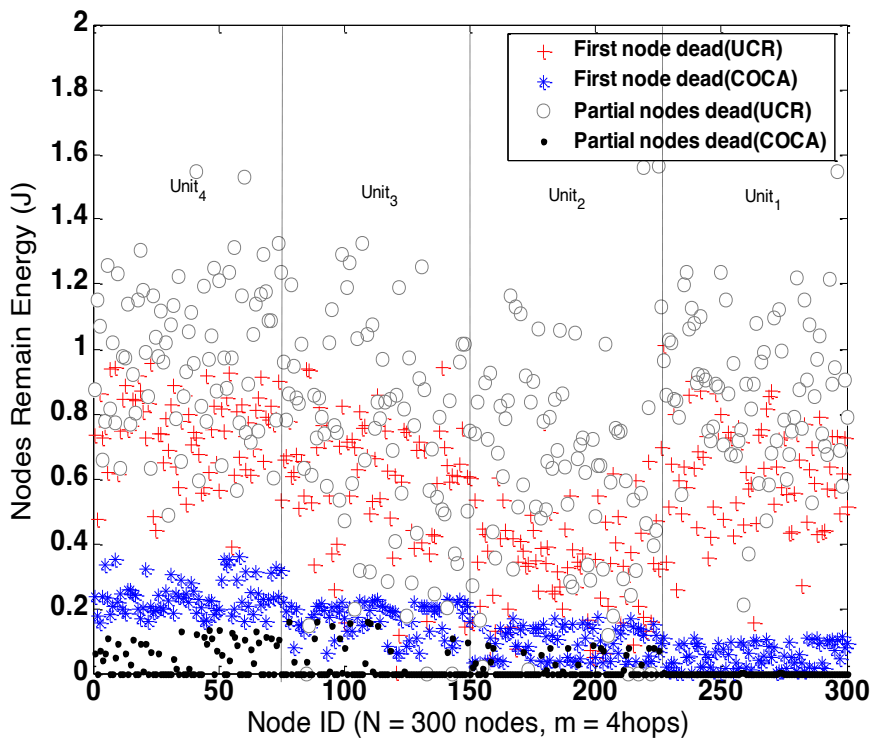
COCA比UCR延长14%~133%

## ● 部分节点死亡



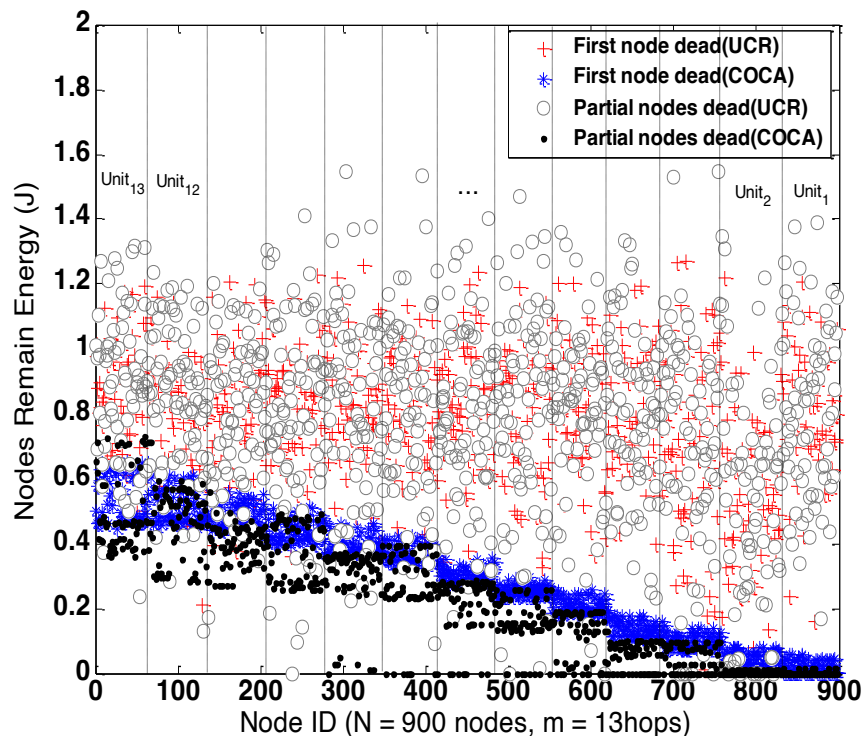
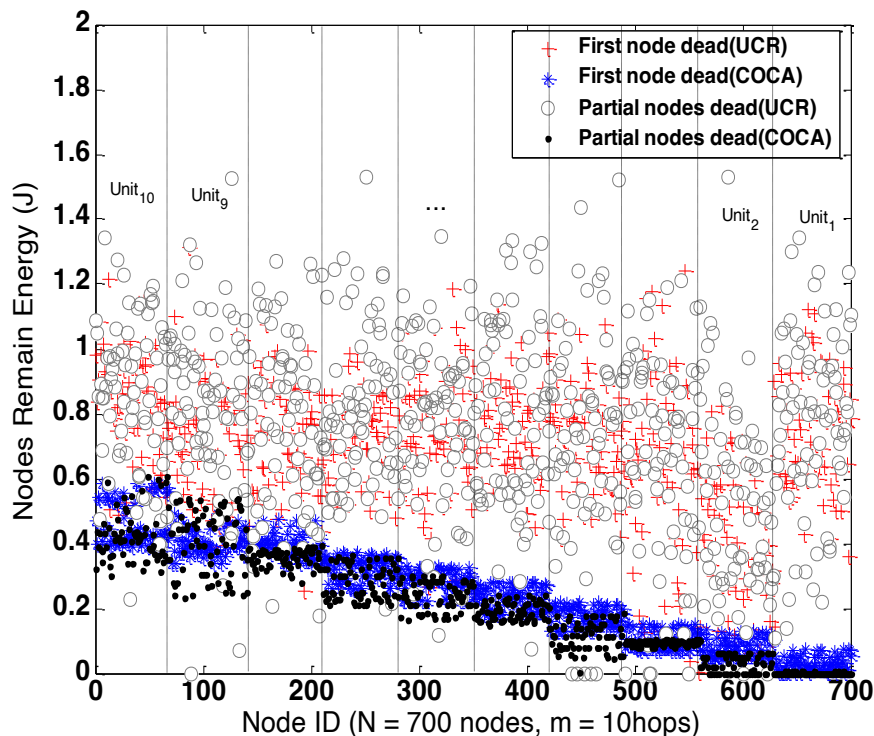
COCA比UCR延长53%~172%

# 不同网络规模节点剩余能量





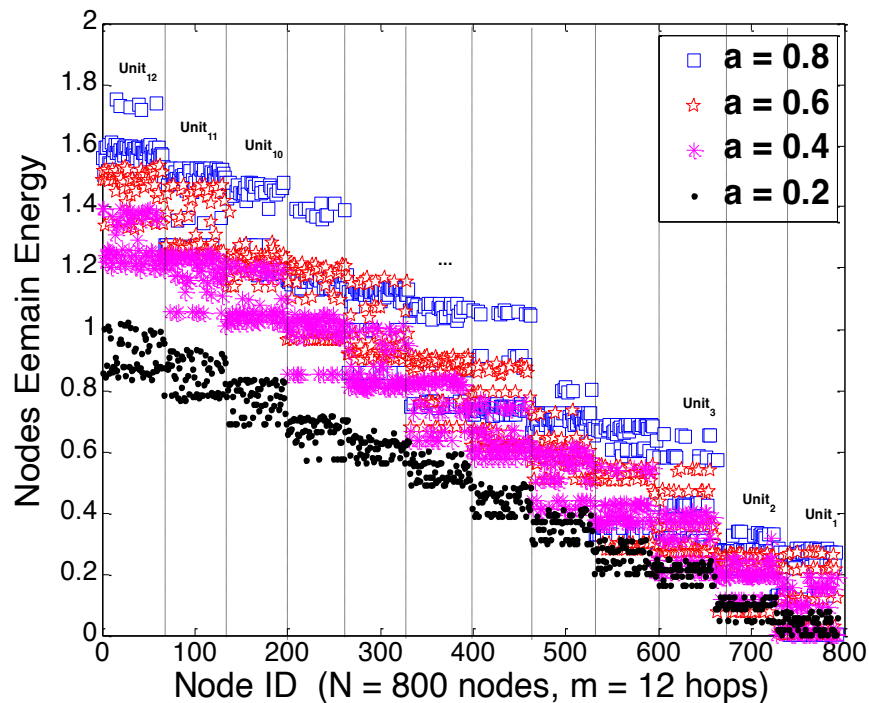
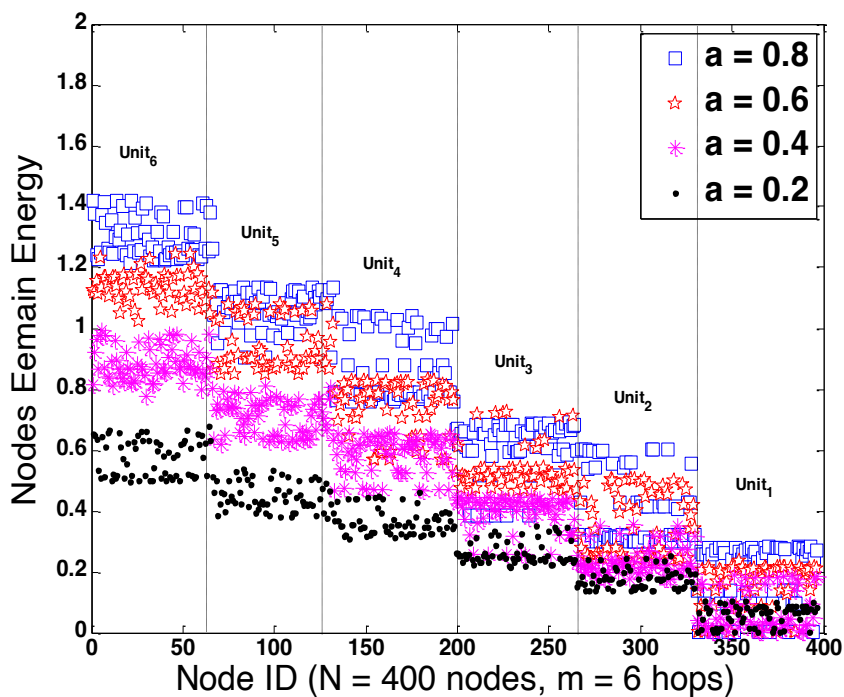
# 不同网络规模节点剩余能量



## COCA较UCR

- 1、剩余能量小，提高了能量利用率；
- 2、同一子网剩余能耗相同，不同子网能耗差值小，能耗均衡，延长网络生命和提高可扩展性
- 3、大多数节点剩余能量在部分节点死亡定义小较，实际部署性能和稳定性好

# 数据融合比与网络节点剩余能量



特定数据融合比，子网剩余能量相同  
数据融合比愈小时，网络能耗愈均衡



# 报告内容

- 研究背景
- 国内外研究现状
- 研究内容
- 仿真与性能分析
- 总结与展望



# 工作总结

## ● 针对大规模无线传感器网络能耗问题

- 1、求解最优簇间跳数或子网数，促使簇头总耗能最小
- 2、求解子网间最优簇头数分布，保证网络能耗均衡、延长网络生命
- 3、分析了数据融合比对簇头数分布及网络能耗的影响
- 4、结合已有能耗优化策略，进一步促使全网能耗均衡

# 硕士期间学术成果(已发表)

- Huan Li, Jierui Cao, and Junwu Xiong, “Constructing Optimal Clustering Architecture for Maximizing Lifetime in Large Scale Wireless Sensor Networks”, The Fifteenth International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS‘09), Shenzhen, China. (EI索引)

# 硕士期间学术成果(Working in progress)

- Li Huan, Xiong Junwu, and JiaWeijia, “COCA: Constructing Optimal Unequal Clustering Architecture for Maximizing Lifetime in Large-Scale Wireless Sensor Networks” (being revised.)

# 未来工作展望

- 进一步提高大规模无线传感器网络能量利用率可行方案
  - 簇头部署密度与簇头数分布规律
  - 数据融合规律和簇头数量分布规律
  - 异构节点、投入成本与网络能耗

# 参考文献

- [1] Heinzelman W., Kulik J., and Balakrishnan H..Adaptive Protocols for Information Dissemination in Wireless Sensor Networks[C].Proc. 5th ACM/IEEE Mobicom Conference, Seattle, WA,1999: 174-185.
- [2] Intanagonwiwat C., Govindan R. and Estrin D..Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks[C]. Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking(MobiCOM), 2000:56-67.
- [3] Heinzelman W. , Chandrakasan A., and Balakrishnan H..Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks[C].Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences,2000: 3005-3014.
- [4] Soro S. and Heinzelman W..Prolonging the Lifetime of Wireless Sensor Networks via Unequal Clustering[C] .Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS), 2005.
- [5] Younis O. and Fahmy S.. HEED: A Hybrid, Energy-Efficient, Distributed Clustering Approach for Ad-hoc Sensor Networks[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2004,V3(4): 660-669.
- [6] Chen G., Li C., Ye M. and Wu J.. An Unequal Cluster-Based Routing Strategy in Wireless Sensor Networks [J]. Wireless Networks, 2009,V15(2): 193-207.



# 参考文献

- [7] Li H., Cao J., and Xiong J.W..Constructing Optimal Clustering Architecture for Maximizing Lifetime in Large-scale Wireless Sensor Networks [C]. Proc. of the 15th Int'l Conf. on Parallel and Distributed Systems (ICPADS), 2009: 182-189.
- [8] Lindsey S., Raghavendra C., and Sivalingam K.M..Data Gathering Algorithms in Sensor Networks Using Energy Metrics[J].IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2002,V13(9):924-935.
- [9] Tan H. O. and Korpeoglu I..Power Efficient Data Gathering and Aggregation in Wireless sensor Networks[J].SIGMOD Record, 2003,V32(4):66-71.
- [10]Ghosh B..Random distances within a rectangle and between two rectangles[J].Bulletin of the Calcutta Mathematical Society,1951,V43:17-24.
- [11] Daley D. J..Problems in applied mathematics: selections from SIAM review[J/OL]. Society for Industrial Mathematics, 1990:77.
- [12] Vaughan R. J.Problems in applied mathematics: selections from SIAM review[J/OL]. Society for Industrial Mathematics, 1990:78-79.
- [13] Alagar V. S..The Distribution of the Distance between Random Points[J]. Journal of Applied Probability, 1976:V13(6):558-566.

# 参考文献

- [14] Oser H. J..Problems in applied mathematics: selections from SIAM review[J/OL]. Philadelphia, PA:Society for Industrial Mathematics, 1990:76.
- [15] Gaboun B. and Laporte G. and Soumis F..Expected Distances between Two Uniformly Distributed Random Points in Rectangles and Rectangular Parallelepipeds[J].The Journal of the Operational Research Society,1993,V44(5):513–519.
- [16] Lazoff D., Lazoff D. M. and Sherman A. T..An Exact Formula for the Expected Wire Length Between Two Randomly Chosen Terminals[R].University of Maryland Baltimore County report CS-94-08, 1994.
- [17] Mathai A.,Moschopoulos P. and Pederzoli G..Random Points Associated with Rectangles[J]. Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo, 1999,V48(1):163-190.
- [18] Miller L. E..Distribution of Link Distances in a Wireless Network[J].Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 2001,V106(2):401–412.

# 敬请各位老师批评指正 谢谢！

无线传感器网络数据处理与能耗优化策略研究

熊君武 北京航空航天大学 计算机学院

2010年12月28日

# 附录

- 定理1：两个分别随机、均匀部署在相邻的两个单位正方形的点之间的欧氏距离的期望值为一个常数，其值为  $\lambda = 1.088$ .<sup>[1]</sup>
- 推论1：多跳传输距离期望
- 推论2：簇间跳数或子网区域数的上界
- 定理2：最优簇间跳数
- 定理3：最优簇头分布规律与数据融合比
- 网络模型与协议扩展及实际部署应用

# 推论1:多跳传输距离期望

- 推论1: 假设  $d$  为任意两个分别随机、均匀部署在相邻两个正方形区域的簇头之间的平均距离期望值,  $l$  为正方形边长, 那么有:  $d = \lambda l, \lambda = 1.088$

- 证: 两个正方形子网内分别随机、均匀部署

相同数目的传感器节点, 首先考虑一个节点对:

$X, Y$  表示两个节点位置的随机变量,

$d(X, Y)$  表示这表示它们之间的欧氏距离,

$E(d(X, Y))$  表示该欧氏距离的期望值。

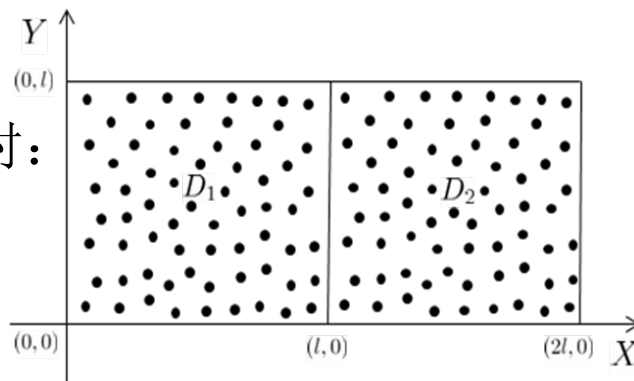
根据定理1, 可以得到  $E(d(X, Y)) = \lambda l$

推广到  $n$  个节点的情形:

$S$  表示分别位于这两个相邻子网内所有点对之间欧氏距离的总和, 有:

$$S = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d(X_i, Y_j), \text{ 其中: } \{X_i \in D_1, i = 1, \dots, n\}, \{Y_j \in D_2, j = 1, \dots, n\}$$

$$\implies E(S) = E\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d(X_i, Y_j)\right) = n^2 E(d(X, Y)) \implies d = \frac{E(S)}{n^2} = \lambda l, \lambda = 1.088. \text{ 证毕。}$$



$$D_1 = \{(x, y) | 0 \leq x \leq l, 0 \leq y \leq l\}$$

$$D_2 = \{(x, y) | l \leq x \leq 2l, 0 \leq y \leq l\}$$

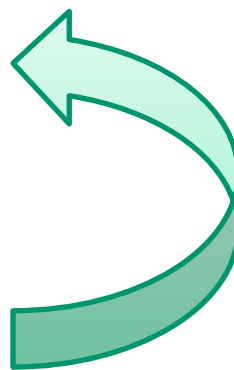
## 推论2：簇间跳数或子网区域数的上界

- 推论2：对于基于矩形拓扑的大规模多跳分簇无线传感器网络，网络中所有的节点均匀、随机部署，网络划分成多个正方形子区域，子区域边长均为  $l$ ，子网区域间簇头数据转发的平均距离大于或等于  $d_0$ ，如果网络部署面积为  $S$ ，簇间传输的平均距离为  $d$ ，则将该大规模无线传感器网络划分能够保证任意两相邻子网间的簇头能够通信的簇间跳数或子网区域数的上界  $m_u'$ ：

$$m_u = \begin{cases} 1, & 0 \leq S < \frac{2d^2}{\lambda^2} \\ \lfloor \frac{S\lambda^2}{d_0^2} \rfloor, & \text{others.} \end{cases}$$

- 证： $S = ml^2, d = \lambda l \implies m = \lfloor \frac{S\lambda^2}{d^2} \rfloor$   
 $d \geq d_0 \implies m \leq \lfloor \frac{S\lambda^2}{d_0^2} \rfloor \implies m_u = \lfloor \frac{S\lambda^2}{d_0^2} \rfloor$

特别  $\lfloor \frac{S\lambda^2}{d^2} \rfloor \leq 2$  即  $0 < S < \lfloor \frac{2d^2}{\lambda^2} \rfloor$  有  $m_u = 1$  所以



## 定理2：最优簇间跳数

- 定理2：为保证网络生命周期一轮中，所有簇头节点总能耗最小的实际的最优总簇间跳数或子网划分数  $m_{opt}$  可以由如下表达式计算：

$$m_{opt} = \begin{cases} 1, & 0 \leq S < \lceil \frac{2d^2}{\lambda^2} \rceil \\ \lfloor m_{root} \rfloor, & \text{others.} \end{cases}$$

- 这里  $m_{opt}$  与全网的统一数据融合比  $a$  无关，

$$m_{root} = \frac{[6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2 (18 + \sqrt{\frac{324E_{elec} - 6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{E_{elec}}}) E_{elec}^2]^{\frac{1}{3}}}{6E_{elec}} + \frac{\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{[6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2 (18 + \sqrt{\frac{324E_{elec} - 6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{E_{elec}}}) E_{elec}^2]^{\frac{1}{3}}}$$

# 定理2：最优总簇间跳数

## ● 证：全网簇头总能耗

$$E_{CHtotal}(a, m) = \sum_{i=1}^m c_i E_{CH_i}$$

$$= \left\{ \left( \frac{m-1}{2} a + 1 \right) E_{elec} + \frac{m+1}{2} a \left[ E_{elec} + \epsilon_{mp} \left( \frac{\lambda^2 S}{m} \right)^2 \right] + E_{DA} \right\} N q_0$$

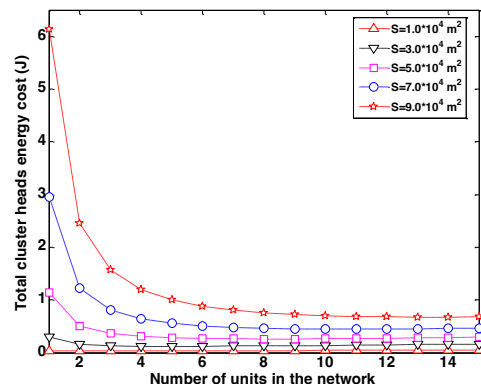
$$\text{令 } g(a, m) = \left( \frac{m-1}{2} a + 1 \right) E_{elec} + \frac{m+1}{2} a \left[ E_{elec} + \epsilon_{mp} \left( \frac{\lambda^2 S}{m} \right)^2 \right] + E_{DA}$$

$$\frac{\partial g(a, m)}{\partial m} = 0 \Rightarrow \text{Minimize} \{ E_{CHtotal}(a, m) \}$$

$$m_{root} = \frac{\left[ 6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2 \left( 18 + \sqrt{\frac{324E_{elec} - 6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{E_{elec}}} \right) E_{elec}^2 \right]^{\frac{1}{3}}}{6E_{elec}} + \frac{\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{\left[ 6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2 \left( 18 + \sqrt{\frac{324E_{elec} - 6\epsilon_{mp}\lambda^4 S^2}{E_{elec}}} \right) E_{elec}^2 \right]^{\frac{1}{3}}}$$

又  $m_{root} = \lfloor \frac{S\lambda^2}{d^2} \rfloor$ ，根据簇间跳数上界，得

$$m_{opt} = \begin{cases} 1, & 0 \leq S < \lceil \frac{2d^2}{\lambda^2} \rceil \\ \lfloor m_{root} \rfloor, & \text{others.} \end{cases}$$





## 定理3：最优簇头分布规律与数据融合比

- 定理3：对于基于矩形拓扑的大规模多跳分簇无线传感器网络，网络划分成若干个相同的正方形子区域，所有的节点随机、均匀部署在整个网络中，网络中所有传感器采集的数据流沿着一个方向经过多跳最终汇聚到网络部署区域外的一个汇聚节点。在网络生命周期的每一轮里，不同跳数的子网区域内所有的簇头将成员节点采集到的数据按照统一的数据融合比进行处理，融合后的数据量与该子区域内的节点数成正比。那么，我们有：
  - 1) 为了避免“热点区域”、达到全网所有簇头的能耗均衡，不同跳数的子网区域的簇头数随着离汇聚节点的距离递减而严格地线性递增；
  - 2) 对于不同的数据融合比，规律1) 仍然成立，而且数据融合比越大，为了维持不同跳数子网间簇头能耗均衡所需簇头数目越多。

# 定理3：最优簇头分布规律与数据融合比

- 证：为使整个网络不同子区域簇头能耗均衡，有

$$E_{CH_1}(a) = E_{CH_2}(a) = \dots = E_{CH_{m-1}}(a) = E_{CH_m}(a)$$

网间能耗负载差值最小

$$\Delta E_{CH}(a, c_{i-1}, c_i) = E_{CH_{i-1}}(a) - E_{CH_i}(a) = f(a, c_{i-1}, c_i) \frac{N}{m} q_0, \quad \text{这里}$$

$$f(a, c_{i-1}, c_i)$$

$$= \left( \frac{m-i+1}{c_{i-1}} - \frac{m-i}{c_i} \right) a \left[ 2E_{elec} + \epsilon_{mp} \left( \frac{\lambda^2 S}{m} \right)^2 \right]$$

$$+ \left( \frac{1}{c_{i-1}} - \frac{1}{c_i} \right) \left[ a(E_{elec} + \epsilon_{mp} \left( \frac{\lambda^2 S}{m} \right)^2) + E_{elec} + E_{DA} \right]$$

通常， $\Delta E_{CH}(a, c_{i-1}, c_i) \geq 0$ ，从而， $f(a, c_{i-1}, c_i) \geq 0$ ，因此：

$$\min \{ \Delta E_{CH}(a, c_{i-1}, c_i) \} = 0, f(c_{i-1}, c_i) = 0$$

## 定理3：最优簇头分布规律与数据融合比

假设  $E_1 = 2E_{elec} + \epsilon_{mp}\left(\frac{\lambda^2 S}{m}\right)^2$        $E_2 = E_{elec} + \epsilon_{mp}\left(\frac{\lambda^2 S}{m}\right)^2$        $E_3 = E_{elec} + E_{DA}$

$$c_{i-1}(a) = \left[ \left[ 1 + \frac{a(E_1 + E_2) + E_3}{a(m-i)E_2 + E_3} \right] \right] c_i(a).$$

计算出离汇聚节点最远端簇头最为迭代初始值

$$c_m = \sqrt{\frac{N}{2\pi m}} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \frac{l}{d^2} = \frac{1}{\lambda^2} \sqrt{\frac{N}{2\pi S}} \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}}, \quad n = \frac{N}{m}, d = \lambda l, S = ml^2$$

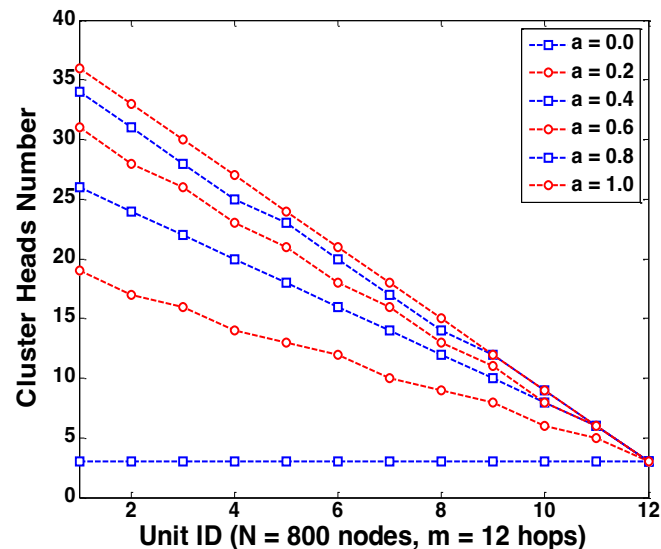
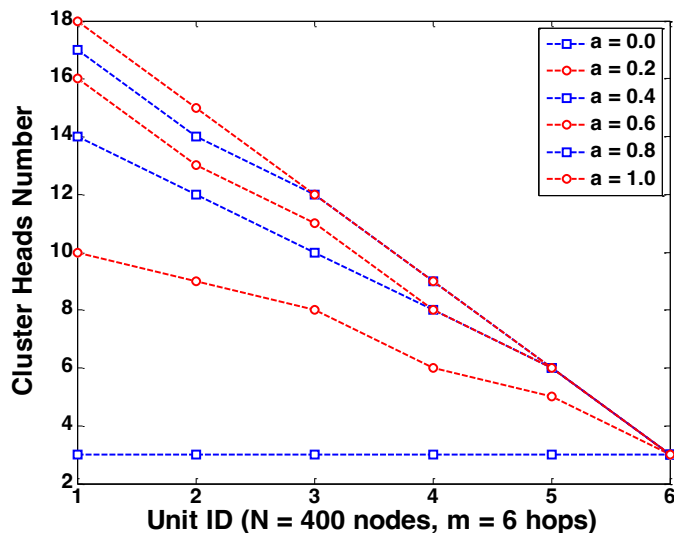
$$c_i(a) = \left[ 1 + \frac{a(m-i)E_1}{aE_2 + E_3} \right] c_m, \quad \forall i \in \{1, \dots, m\}.$$

# 定理3：最优簇头分布规律与数据融合比

$$\text{令： } H(a, \mu) = 1 + \frac{a(m - \mu)E_1}{aE_2 + E_3}.$$

$$\frac{\partial H(a, \mu)}{\partial \mu} = -\frac{aE_1}{aE_2 + E_3}, a \in (0, 1), \forall \mu \in \{1, \dots, m\}, \frac{\partial H(a, \mu)}{\partial \mu} < 0$$

可以得知不同子网内簇头与子网ID之间呈严格的线性关系：

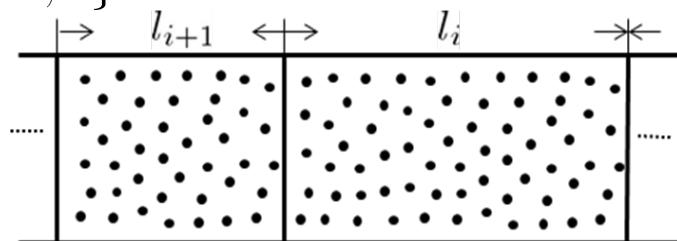


# 网络模型与协议扩展及实际部署应用

- 不同子网拓扑分析，基于矩形的各个子网的变化方式分为以下三种可能的基本拓扑原型：

- 递增子网模型  $l_{i+1} < l_i, \forall i \in \{m-1, \dots, 1\}$

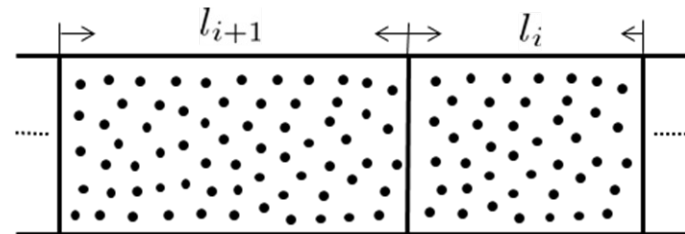
根据节点的能量模型，子网内节点之间的通信能量模型采取的  $d^2$  形式的能量模型，节点之间的通信距离必须小于阈值  $d_0$  和节点之间的最大传输距离  $t_x$



当子网的尺寸沿着汇聚节点方向逐渐增大，增大到一定程度后，尤其是处于子网对角线位置的节点之间的通信距离将不再能够通信，以至于沿着汇聚节点之的子网被分裂开来，因此不可取。

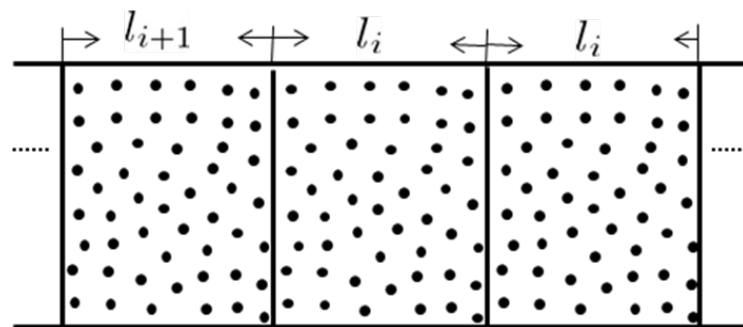
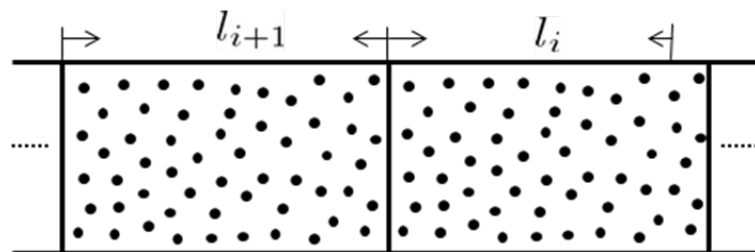
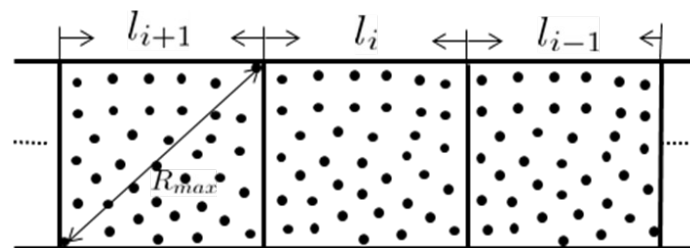
- 递减子网模型  $l_{i+1} > l_i, \forall i \in \{m-1, \dots, 1\}$

原理同递增子网模型，此外这种模型离汇聚节点越近节点平均能耗负载越重，更不可取



# 均匀子网模型 $l_{i+1} = l_i = l, \forall i \in \{m-1, \dots, 1\}$

- 子网尺寸必须保证所有的节点通信距离小于阈值  $d_0$  和节点最大传输距  $t_x$  ( $d_0 \ll t_x$ )
- $R_{max}$ : 节点之间的最大通信距离, 为  $\sqrt{2}l$
- 若  $R_{max} < \min\{d_0, t_x\} = d_0$  即  $l < \frac{d_0}{\sqrt{2}}$  便满足要求, 但此下界过于严格, 不适于大规模网络部署
- 两个节点之间的距离小于正方形边长的概率 [10,15-18]  
 $P(d(X, Y) \leq l) = 0.9749259333$
- 对于簇结构化网络, 正方形的边长只需要小于阈值就能在很大程度上保证所有节点通信距离小于阈值



# 大规模网络实际应用部署

## ● 分层的组织方式

- 大规模的网络划分成小规模网络, 每个部署一个汇聚节点
- 根据模型划分成不同数量正方形小子网
- 网络所有传感数据由经过汇聚节点收集后最终汇聚到数据中心

