

基于蚁群优化的无线传感器网络数据融合算法

李 丽, 降爱莲

(太原理工大学 计算机科学与技术学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 提出了一种基于蚁群优化的无线传感器网络数据融合算法, 利用蚁群算法在寻找最短路径方面的优势, 构造一棵最短路径树, 同时考虑无线传感器网络节点能量消耗、网络能量均衡以及数据传输延迟等问题, 用 C++ 对无线传感器网络模型和算法进行仿真, 实验证明该算法能有效地减少网络中的数据传输量, 提高数据融合效率, 延长网络生存时间。

关键词: 无线传感器网络; 数据融合; 蚁群优化; 网络生命期

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000—7180(2016)06—0068—05

Ant Colony Optimized Wireless Sensor Networks Data Aggregation Algorithm

LI Li, JIANG Ai-lian

(College of Computer Science and Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The paper proposed a wireless sensor network data aggregation method based on the improved ant colony algorithm; making use of the advantages of ant colony algorithm in searching for the shortest path, the paper construct the shortest path tree. At the same time, the energy consumption, network energy balance and data transmission delay should be considered. Simulate the network model and algorithm with C++. Experimental results show that the algorithm can effectively reduce the amount of data transmission network, improve the efficiency of data integration and extend the network lifetime.

Key words: wireless sensor network; data aggregation; ant colony algorithm; network lifetime

1 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 是由部署在监测区域内大量的微型传感器节点组成, 通过无线通信方式形成一个多跳的自组织网络系统, 被广泛地应用于战场目标定位、生理数据收集、智能交通系统和海洋探测等领域^[1], 在 WSN 中, 降低数据传输消耗的能量是节能的关键。数据融合通过一定的算法将传感器节点采集到的大量原始数据进行各种网内处理, 去除其中的冗余信息, 只将少量有意义的处理结果传输给汇聚节点, 从而达到节省能量, 延长网络生命周期的目的。

目前有很多研究者通过构造优化的数据融合树

来实现数据融合, 不仅能够降低这个网络的通信能耗, 并且在一定程度上降低了网络延迟, 提高了数据融合的效率。文献[2]提出了构造自适应能量感知的数据融合树 (AEDT) 进行传感器网络的数据融合, 但是不能达到节能和均衡各节点间能量的目的。

文献[3]提出了多路径数据融合路由算法, 提高了数据融合的效率, 然而此种方法未能充分地考虑网络能耗负载均衡。文献[4]提出了一种基于蚁群算法 (ACA) 的传感器数据融合算法, 此算法存在收敛速度慢的缺点, 找到最优融合路径以后, 没有考虑数据传输过程中的能耗问题以及路径的动态更新。

为了减少网络数据传输量, 降低网络传输延迟并且均衡网络能耗负载, 提出了基于蚁群优化的无

线传感器网络数据融合算法 (Ant Colony Optimized Wireless Sensor Networks Data Aggregation Algorithm, ACODAA).

2 系统模型和假设

将无线传感器网络中节点划分为两种:一种是汇聚节点,即 sink 节点,负责将网络中其他节点收集到的数据进行处理,另一种是普通节点,它负责采集网路中的原始数据或者作为中间节点对其他节点的数据进行转发,网络中的节点大多为普通节点.假设在无线传奇网络中,节点的位置是固定,一旦确定将不再移动, sink 节点保存整个网络拓扑信息;普通节点的性能具有一致性,例如初始能量、发射功率、节点最大通信半径等;普通节点的能量受限,但 sink 节点能量不受限制;网络中所有节点的能量模型是相同的,且节点的能耗与通信距离成正比,一次传送的数据包大小一致.

无线传感器网络可以抽象为一个无向加权连通图用 G 表示,则 $G = \{V, E\}$. 其中, V 表示传感器网络的节点集合, E 表示节点间的链路集合, 若节点 v_m, v_n 可直接通信, 则称存在链路 $e = (v_m, v_n)$, 且 $v_m \in V, v_n \in V, m \neq n$. 源节点集合用 S 表示并且 $S \subset V$, 源节点采集到的数据通过反向组播树的形式定期传送到 sink 节点. 图 1 是一个数据融合树模型.

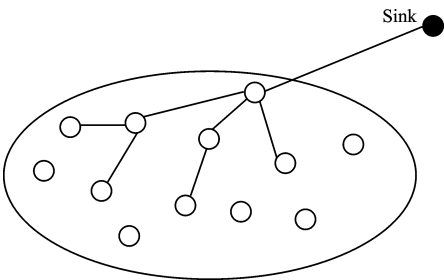


图 1 数据融合树模型

3 算法描述

反向组播树即数据融合树 (aggregation tree), 树上的每个中间节点都对收到的数据进行融合处理, 源节点采集到的原始数据就得到了及时的且最大限度的融合^[5]. 在传感器网络中构造最短路径树 (shortest paths tree, SPT)^[6] 进行数据传输减少了大量源节点至 sink 节点的跳数, 缩短传输时间, 降低节点能耗. 一般可以使用 dijkstra 算法构造最短路径树, 但是在无线传感器网络中此方法没有考虑

节点剩余能量, 不能满足对节能要求高的网络, 因此, 采用蚁群算法求解最短路径树^[7-8], 并且对算法进行改进, 进一步提高数据融合的算法性能.

ACODAA 算法将网络中的传感器节点生成一个或多个最短路径树分支, 无线传感器网络采集到的数据在生成的网络结构中进行数据融合, 最终被传送到汇聚节点.

(1) 设置节点邻居列表信息. 网络中每个节点维护一张邻居列表保存邻居节点信息, 表中的信息可以通过周期性地对邻节点发送 hello 数据包进行更新. 表中包含如下信息: 本节点的位置信息、邻节点的位置信息、汇聚节点的位置信息. 本文中采用 RSSI 技术求得节点间距离和节点的位置信息. RSSI 是目前常用的距离测量方法, 它根据节点发射和接收信号的强度计算出信号在传播过程中的损耗, 测得的损耗值经过各类模型将其转换成节点之间的距离. 网络初始阶段, 需要传播数据的节点以一定的功率向外发射连接请求, 接收到信号的邻居节点通过其接收到的信号强度计算两节点之间的距离. 同样 sink 节点也可通过此方法广播请求包获得其他网络节点的位置信息.

(2) 选择最优路径. 蚁群算法运用邻居节点转发概率公式搜寻最优路径, 主要包括路径信息素和启发因子两部分. 信息素由蚂蚁经过此段路径的频率决定, 人为不能改变. 启发因子需要根据算法的应用环境的不同而改变. ACODAA 算法在启发因子中综合考虑邻居节点的距离、能量和偏转角进行下一跳父节点的选取. 偏转角定义如下:

设节点 v 和节点 u 相邻, 称 $\theta < v, u >$ 为边 $e < v, u >$ 在点 u 相对于 sink 节点的偏转角. 图 2 是一个偏转角的示意图.

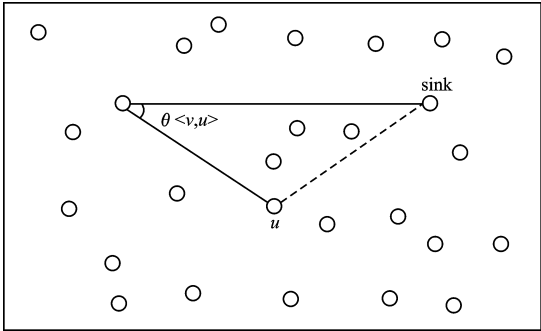


图 2 偏转角

在选择下一跳节点时, 若选择节点 v 在各邻居节点处相对于 sink 节点的偏转角越小的邻居节点作为下一跳节点, 最终到达 sink 节点的路径就越逼

近于源节点到 sink 节点的直线距离. 在传感器网络中, 偏转角的价值可由各节点的位置信息求得. 为搜寻路径, 采集到信息的源节点向 sink 节点发送蚂蚁数据包, 每个蚂蚁数据包中维护一个禁忌表用来记录蚂蚁选择的下一跳路由信息, 用 tabu_k ($k = 1, 2, 3, \dots, m$) 表示, m 为蚂蚁个数, 禁忌表初始为空. 鉴于传统蚁群算法收敛速度慢、易陷入局部最优解的不足, 本文分别对基本蚁群算法的转移概率公式和信息素更新公式进行了改进.

首先对转移概率公式进行改进. 蚁群算法的转移概率选择公式为:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{\mu \in \text{allowed}_k} \tau_{i\mu}^\alpha (\eta_{i\mu})^\beta}, & j \in \text{allowed}_k \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $p_{ij}^k(t)$ 为第 k 只蚂蚁数据包从节点 i 转移到节点 j 的概率; τ_{ij} 表示路径 ij 上残留的信息量; η_{ij} 是启发因子; α, β 分别表示信息素和启发因子的相对重要程度; allowed_k 表示蚂蚁下一步允许选择的节点集合.

在传统蚁群算法中, 启发因子 $1/d_{ij}$ 把将要选择路径的长短作为唯一先验知识, 优先选择较短的路径, 这可能会导致蚂蚁贪图当前一小步而选择偏离行进方向的下一个节点, 从而形成局部最优解. 因此, 在启发因子中加入偏转角的排序值对概率选择公式进行改进, 同时综合考虑节点剩余能量设计了启发因子如式(2)所示.

$$\eta_{ij} = \frac{1}{E_0 - e_j} \gamma_1 + \frac{1}{d_{ij}} \gamma_2 + \frac{1}{\omega_{ij}} \gamma_3 \quad (2)$$

式中, E_0 为节点初始能量值, e_j 为节点 j 的当前能量, ω_{ij} 表示节点 i 在节点 j 处相对于 sink 节点偏转角的排序值, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 分表示权重因子, 且 $\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 1$. 由式(1)、(2)可知, 当邻居节点的剩余能量越多, 距离当前节点距离越短, 并且相对于 sink 节点偏转角越小, 则被选中的概率越大.

其次对信息素更新公式进行改进. 信息素更新公式为:

$$\tau_{ij}(t+n) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (3)$$

式中, $\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k$, 且

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{蚂蚁 } k \text{ 在本次循环中经过路径 } ij \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

式中, $\Delta\tau_{ij}$ 表示本次循环中留在路径 ij 上的信息量. ρ ($0 < \rho < 1$) 是信息素挥发因子, 避免路径上的信

息素无限增长. $\Delta\tau_{ij}^k$ 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中留在路径 ij 上的信息量, 式中 Q 是常数, L_k 表示第 k 只蚂蚁在本次循环中所走过的路径长度.

在蚁群算法中, ρ 的设定直接影响着算法的全局搜索能力及其收敛速度, 如果 ρ 的取值较大, 路径上的信息素挥发较快, 信息素的正反馈作用使算法过早收敛于局部最优解; ρ 的取值较小, 信息素挥发慢, 正反馈作用不明显, 导致收敛速度明显降低. 对 ρ 进行动态自适应调节策略, 初始时 ρ 取一个相对较大的值 ρ_{init} , 经过 T_1 时间后对 ρ 进行动态自适应调节, 逐渐减小 ρ 的取值. 为避免 ρ 的取值过小, T_2 时间之后均使用最小值 ρ_{min} . 对信息素更新公式改进如式(4)所示.

$$\rho(t) = \begin{cases} \rho_{\text{init}}, & t \leq T_1 \\ \lambda\rho(t-1), & T_1 < t \leq T_2 \\ \rho_{\text{min}}, & T_2 < t \end{cases} \quad (4)$$

在更新策略上, 因为最终是为了获取一条最优路径, 每次循环过后对所有路径上的信息素都进行更新是没有必要的. 但是如果只对最优路径上的信息素进行更新, 则会导致算法过早陷入当前的局部最优解, 限制了以后寻找全局最后解的可能. 因此, 在一次循环结束后, 对蚂蚁找到的最优及次优路径上的信息素进行更新, 在寻找全局最优解的前提下加快算法的收敛速度.

(3) 数据传输过程. 路由过程结束后, 形成一棵优化后的最短路径树, 源节点即叶子节点将探测到的有用数据逐步发送到上一层的父节点, 若此父节点仅有一个子节点, 则无须融合操作直接将此数据继续上传; 若此父节点有多个子节点, 待所有子节点的数据都到达时进行相应的融合操作. 重复此步骤直到数据到达 sink 节点.

在数据传输过程中, 中间节点既要对于节点传送的数据进行融合又要将融合后的数据传输至上一层父节点, 因此需要消耗较多的能量. 为了均衡网络能耗负载, 设置能量阈值 E_{aver} , 计算公式为:

$$E_{\text{aver}} = \sum_{j=1}^M E_j / M \quad (5)$$

式中, E_j 为节点 j 的剩余能量; M 为当前节点 i 的邻居节点总数. 在进行数据传输时, 若节点 i 的能量达到或低于阈值 E_{aver} , 则触发路由更新, 节点 i 的所有子节点各自重新寻找除此节点以外的新的父节点, 如果找不到满足条件的新的父节点则直接与 sink 节点相连. 如图 3 所示, 当节点 A 的能量阈值到达 E_{aver} 时, A 的子节点 B 和 C 重新寻找父节点. 节点 B

直接和 sink 节点相连,节点 C 找到新的父节点 D,D 再和 sink 节点相连.此过程结束后形成一棵新的数据融合树.此方法能有效地平衡网络能耗负载,延长网络生命周期.

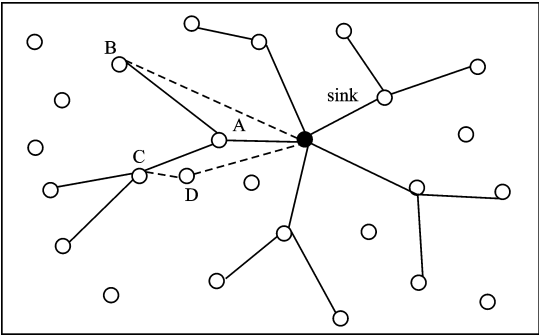


图3 路由更新

4 算法实现

- 基于蚁群优化的数据融合树构造过程:
- (1) 无线传感器网络初始化,包括网络中每个节点信息初始化和公式中的参数初始化.
 - (2) 每个源节点上放置 m 只蚂蚁,每只蚂蚁都将自己所在源节点加入禁忌表中,蚂蚁从源节点出发搜寻到达 sink 节点的最短路径.
 - (3) 设某个蚂蚁当前所在节点为 v , N 表示节点 v 的邻居节点集合.选择下一跳节点:
 - ① 如果 v 为 sink 节点,停止路径的探索并将 sink 节点加入禁忌表.
 - ② 对集合 N 中的邻居节点逐一进行探测.若为 sink 节点,则直接将其作为下一跳节点;若不为 sink 节点,根据改进的转移概率公式进行下一跳节点即父节点的选择.
 - (4) 对于某个源节点,当 m 只蚂蚁的禁忌表中都存在 sink 节点时,对蚂蚁找到的最优及次优路径上的信息素进行更新.
 - (5) 清空禁忌表,重复此过程,直到到达设定的迭代次数.

路由过程的实现流程图如图 4 所示.

5 仿真实验及分析

5.1 仿真环境

为了检测算法的有效性,采用 C++ 来进行 WSN 环境仿真.网络仿真区域为 $100\text{ m}\times100\text{ m}$,传感器节点在该区域中随机生成.将 CDG 算法、TOD 算法和 AEDT 算法作为本次实验的对比算法.

在蚁群算法中各参数的作用是紧密耦合的,不

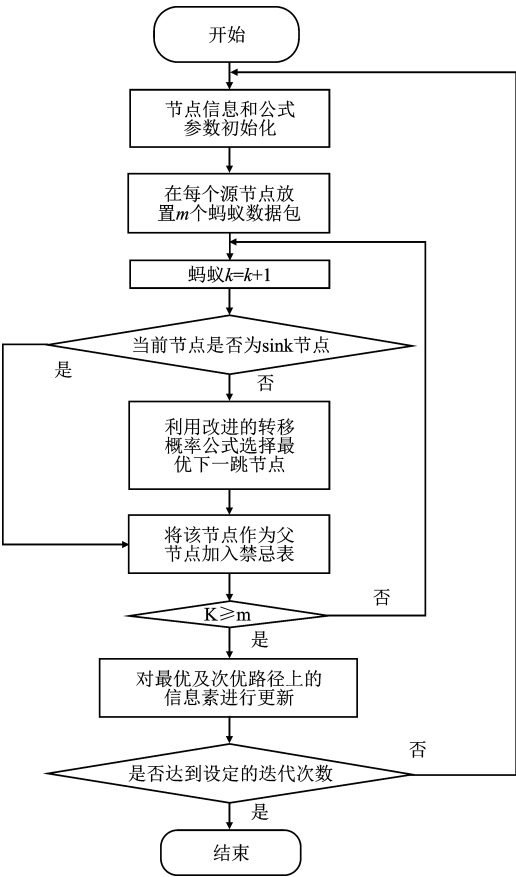


图4 路由过程实现流程图

同的参数组合会影响算法的收敛速度以及解的质量.最佳组合参数配置需通过对具体问题的分析并且进行实验求得.表 1 是经过多次实验所确定的符合本算法的最佳参数配置.

表 1 仿真实验参数

参数	取值	参数	取值
m	30	ρ_{init}	0.97
E_0	1 000	λ	0.95
α	0.5	ρ_{min}	0.4
β	5	T_1	20
γ_1	0.4	T_2	40
γ_2	0.3	Q	100
γ_3	0.3	iter_cnt	100

5.2 结果与分析

(1)网络生命周期对比.实验表明,AEDT 算法在构造数据融合树时将节点能量作为唯一选择标准,只对节能进行研究,因此其网络生命周期优于 CDG 算法和 TOD 算.而本文的 ACODAA 算法在考虑节点能量的同时关注网络负载均衡,因此网络生命周期最长,如图 5 所示.

(2)平均网络能耗对比. CDG 算法、TOD 算法、AEDT 算法和本文 ACODAA 数据融合算法的能量

消耗,如图 6 所示.

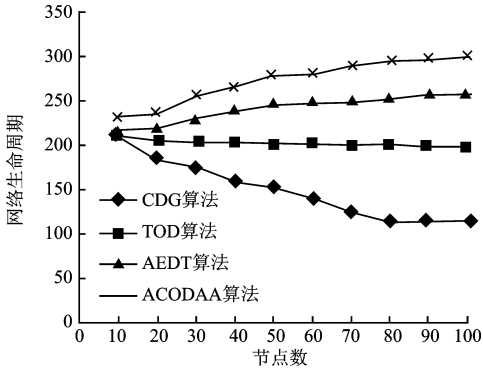


图 5 网络生命周期

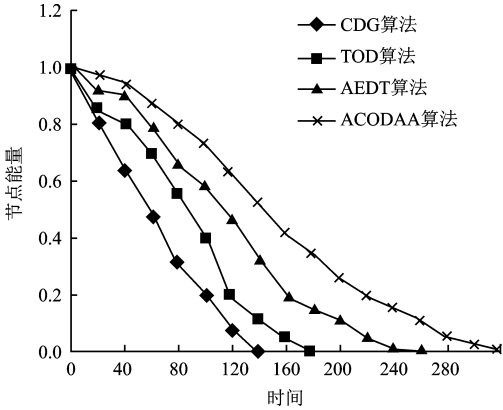


图 6 平均能耗

由图 6 可知,随着时间的增加,节点平均能量逐渐减少. CDG 算法在 140 s 时能量为 0. TOD 算法在接近 180 s 处节点平均能量耗尽, AEDT 算法在大约 250 s 时剩余能量趋近于 0. 相比于其他三种算法, ACODAA 算法的节点平均能量消耗较慢, 在 310 s 左右能量耗尽, 生命期更长. 实验表明改进后的蚁群算法在下一跳节点选取时倾向于选择剩余能量较多的节点, 并且在传输过程中设定能量阈值均衡网络负载, 避免某些节点被多次选中导致能量消耗过快, 提前死亡.

(3) 节点数不同时各算法能耗对比. 图 7 表示节点数不同时四种算法的能量消耗变化曲线.

实验表明, 节点数越多, 能量消耗越大. CDG 算法和 TOD 算法在节能方面考虑不, 因此能量消耗最多, AEDT 算法仅次于 TOD 算法, 节能效果不明显. 相比其他两种算法, 本文的 ACODAA 数据融合算法能量消耗较小, 而且曲线变化更加平缓, 说明算法稳定性好, 性能更优.

(4) 网络延时比较. 网络延时是衡量一个数据融合算法的重要指标, 四种算法的网络延时对比如

图 8 所示.

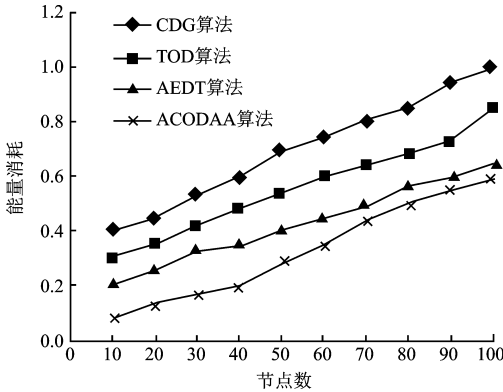


图 7 节点数不同时各算法能耗对比

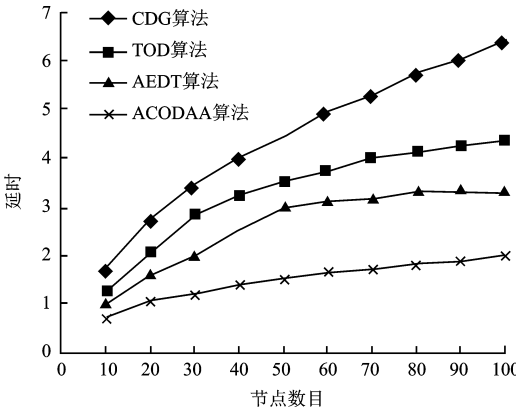


图 8 算法延时

在不同节点数的情况下, 本文算法数据融合的延时小于 CDG 算法、TOD 和 AEDT 算法, 这是因为本文算法在寻找源节点到 sink 节点的路径时通过选择相对于 sink 节点偏转角较小的节点, 使路径趋近于一条直线, 很大程度上减少了中间的跳数, 降低了网络延时.

6 结束语

本文提出的基于蚁群优化的无线传感器网络数据融合算法能有效地减少网络能耗, 降低网络延时, 延长网络的生命周期. 无线传感器网络应用范围十分广泛, 随着周围环境的不同算法性能会有一些的差异, 需要根据具体的环境及应用场合综合考虑, 这些问题都还有待于进一步研究.

参考文献:

[1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks, 2008, 52 (12): 2292 -2330.

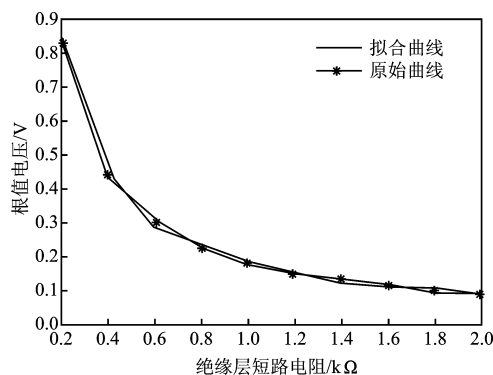


图6 绝缘层故障拟合效果图

互连方式,其高频条件下的信号完整性已经成为不容忽视的问题。随着频率的升高,趋肤效应的影响是相当大的,传输性能也越来越差。本文针对 TSV 互连结构物理模型建立了等效电路,在等效电路的基础上建立故障模型,通过故障电压检测,以对应频率下无故障电压为基准,以最小二乘法方差平方和最小为准则,可以有效地区分低频率大故障和高频率小故障出现的误测试问题,尤其对微小故障比较适用。

参考文献:

- [1] BOGATIN E. 信号完整性分析[M]. 李玉山,李丽平,译. 北京:电子工业出版社,2005:74-151.
- [2] HO S W, Yoon S W, Zhou Q E, et al. High RF performance TSV silicon carrier for high frequency application [C]// Proceedings of 58 th Electronic Components and Technology Conference. New York, USA: IEEE, 2008: 1946-1952.
- [3] Pak J S, Ryu C, Kim J. Electrical characterization of

through silicon via (TSV) depending on structural and material parameters based on 3D full wave simulation [C]// Proceedings of International Conference on Electronic Materials and Packaging. New York, USA: IEEE, 2007: 1-6.

- [4] 李琰. TSV 建模与耗散分析 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
- [5] 蒋剑锋,赵振宇,邓全,等. 3DSRAM 中的 TSV 开路故障模型研究[J]. 计算机工程与科学, 2014, 36(12): 2331-2338.
- [6] 庞诚,王志,于大全. TSV 结构的几种 SPICE 模型仿真[J]. 半导体技术, 2013, 38(10): 770-775.
- [7] Chen Po-yuan, Wu Cheng-wen, Kwai Ding-ming. On-chip testing of blind and open-sleeve TSVs for 3D IC before bonding[C]// Proceedings of 28th IEEE VLSI Test Symposium. Santa Cruz, USA: IEEE, 2010: 263-268.
- [8] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

作者简介:

尚玉玲 女, (1977-), 博士, 副研究员. 研究方向为集成电路测试、信号完整性分析方面的研究.

钱伟 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为信号完整性分析研究.

李春泉(通讯作者) 男, (1975-), 博士后, 教授, 硕士研究生导师. 研究方向为微电子制造工程、先进制造技术、信号完整性分析研究, E-mail: lichunquan@gmail.com.

豆鑫鑫 男, (1990-), 硕士研究生. 研究方向为信号完整性分析研究.

(上接第 72 页)

- [2] Deepali Virmani, Tanu Sharma, Ritu Sharma. Adaptive energy aware data aggregation tree for wireless sensor networks[J]. International Journal of Hybrid Information Technology, 2013, 6(1): 26-36.
- [3] ShanLiqun, Wang Jinkuan, Du Ruiyan, et al. Multipath data aggregation routing in wireless sensor networks[J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2012, 4(8): 344-351.
- [4] Sinha Adwitiya, Lobiyal D K. Data aggregation in wireless sensor networks using ant colony algorithm [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2008, 31(4): 387-401.
- [5] Liu Binghong, Jhuang Yinghong, Tung Liping, et al. An improved method of constructing a data aggregation tree in wireless sensor networks[C]// ICGEC 2012. Washington;

IEEE Computer Society, 2012: 344-347.

- [6] Yilmaz Onur, Demirci Sercan, Kaymak Yagiz, et al. Shortest hop multipath algorithm for wireless sensor networks[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2012, 63(1): 48-59.
- [7] 姚仲欢,王高才,孙野,等. 传感器网络中基于最短路径树的低延时节能路由算法[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(9): 174-177.
- [8] 殷新春,徐力杰. WSN 中一种基于数据融合的能量高效分簇路由协议[J]. 微电子学与计算机, 2007, 24(9): 116-119.

作者简介:

李丽 女, (1989-), 硕士研究生. 研究方向为无线传感器网络. E-mail: lili0855@163.com.

降爱莲 女, (1969-), 博士, 副教授. 研究方向为无线传感器网络.