

一种无线传感器网络的多 Agent 系统模型

陈 志¹, 王汝传^{1,2}, 孙力娟¹

(1. 南京邮电大学计算机学院, 江苏南京 210003; 2. 南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 江苏南京 210093)

摘 要: 针对无线传感器网络缺乏普遍的理论模型, 提出一种多 Agent 系统模型, 包括形式化语言、模型、语义以及相应的公理和模型约束。该模型将无线传感器网络抽象为由具有特定信念、期望、意图和能力等认知成分的 Agent 组成的认知系统, 所有这些认知成分构成多 Agent 系统认知模型。本文将为独立于内部结构和具体实现来理解、分析和预测无线传感器网络行为提供形式化的理论基础和分析工具。

关键词: 无线传感器网络; 多 Agent 系统; BDI 模型

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 02-0240-04

Multi-Agent System Model for Wireless Sensor Networks

CHEN Zhi¹, WANG Ru-chuan^{1,2}, SUN Li-juan¹

(1. College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210003 China;

2. State Key Lab for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093, China)

Abstract: A multi-agent system model is proposed for Wireless Sensor Networks (WSN) to address the lack of a generalized theoretic model, which includes the formalized language, model, semantics and important axioms and model constraints. The proposed model abstracts WSN as a cognitive system composed of agents with specific cognitive ingredients, such as belief, desire, intention and ability, which together constitute the multi-agent system cognitive model. This paper provides formalized theoretic foundation and analysis tools for understanding, analyzing and forecasting of WSN behaviors independent of internal structures and practical implementations.

Key words: wireless sensor networks; multi-agent system; BDI model

1 引言

无线传感器网络^[1]是由具有感知、处理和无线通信能力的传感器节点通过自组织方式形成的网络。无线传感器网络的建立和节点间通信不依赖于固定的通信基础设施, 传感器节点通过分布式网络协议实现组网。无线传感器网络能够使我们延伸至更广阔的交互空间, 获得围绕我们周围动态的状态信息, 实现对于外围世界更加精确而深邃的认识和控制^[2], 因而在军事、环境、健康、家庭、商业以及空间探索和灾难拯救等领域有着广阔的应用前景。在面向雷达系统的分布式传感器网络研究领域, 研究人员已经采用多 Agent 系统的理论和解决传感器网络中分布式资源分配、分布式协调、目标跟踪等关键问题^[3]。在美国 DARPA 的 ANTs (Autonomous Negotiating Teams) 项目的支持下, 研究人员将雷达传感器节点作为自治实体 Agent, 构建了基于多 Agent 的雷达传感器网络仿真平台、试验床、可视化和调试工具, 尤其对分布式资源分配体

系结构和协议做出了详尽的研究。从多 Agent 系统的角度对分布式传感器网络的研究在一定意义上验证了基于 Agent 的传感器网络模型提出和研究的可行性。但相对于更大规模、更加动态的无线传感器网络, 目前的研究和已取得的成果面向特定的领域而具有一定的局限性, 还缺乏普遍的理论模型。本文将在已有多 Agent 逻辑系统的基础上, 针对无线传感器网络的特性, 构建一种特定的基于 BDI 的多 Agent 系统模型。

2 无线传感器网络的特性和逻辑分析

无线传感器网络是自组织的、动态的、以数据为中心的、应用相关的系统, 每个节点能够通过拓扑控制机制和网络协议自动转发监测数据, 但其电源能量、通信能力、计算能力和存储能力有限^[4]。一个经过良好设计的无线传感器网络节点作为独立的、具有符合设计目标的自治行为的实体, 既是信息的采集和发出者, 也充当信息的路由者^[5,6]。无线传感器网络在不同应用领域的成功运行一方面涉及到节点自身内在的能

收稿日期: 2006-02-06; 修回日期: 2006-05-20

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60573141, No. 70271050); 江苏省自然科学基金 (No. BK2005146); 江苏省高技术研究计划 (No. BG2004004, No. BC2005038); 国家 863 高科技研究发展计划 (No. 2006AA01z201, No. 2006AA01z219, No. 2006AA01z439); 江苏省计算机信息处理技术重点实验室基金 (No. kjs050001, No. kjs06006); 江苏省高校自然科学基金研究计划 (No. 04KJB520095)

力,例如电源能量大小、通信、计算和存储能力强弱,另一方面还取决于外在的机会,例如网络所在环境以及系统的状态是否允许或触发执行某项动作。

从确定的系统问题域和系统边界来看,无线传感器网络是由具有特定信念、期望、意图和能力的 Agent 组成的,每一节点在部署后通过自身或与其他节点交互决策其在特定情形下的行为。在无线传感器网络中,每个 Agent 为在一个变化的世界内起作用都会建立其世界内部的模型。对应于不同的应用、网络协议和算法以及个体的能力,一些 Agent 能够清晰地建立其世界模型,并对有关的模型进行推理;而另一些 Agent 的模型可能与硬件相联系且分布于整个 Agent 的网络体系结构中。可将无线传感器网络的组成 Agent 视为状态、控制逻辑、感知器和执行器等四部分组成。每个 Agent 都有自己的状态;每个 Agent 都拥有一个控制逻辑,即构成自己的行为意识,现有的无线传感器网络节点都是自治的计算实体;每个 Agent 都拥有一个感知器来感知环境,即利用传感器来感知环境信息,或者通过无线通信模块接收控制消息和其他节点的环境信息;每个 Agent 都拥有一个执行器作用于环境,现有的无线传感器网络节点只是将感知到的(接收到的)信息通过无线通信模块发送(转发)给邻居节点,以传送至最终目标节点,在网络层次上间接作用于环境。目前 MEMS 技术的发展已经把执行器直接集成到无线传感器网络节点芯片上,从而为信息空间到物理空间的状态映射形式提供了一种新的可能,即直接改变物理世界中的某些物理参数,因而无线传感器网络节点有能力直接作用于环境。

BDI 模型是目前描述和分析 Agent 自主行为的一个重要认知模型,该模型表明 Agent 的自主行为依赖于 Agent 所拥有的信念、期望和意图^[7]。Rao 和 Georgeff 研究和提出了一种 BDI 逻辑系统^[8],旨在从语义特性的角度分析信念、期望和意图这三者之间关系,通过公理化以及模型约束的方式来分析和规约这种关系,但在该逻辑系统中,Agent 的信念被假定为总是正确的,Agent 的期望是一致的。这对于具有有限资源和能力的无线传感器网络 Agent 而言,它拥有的关于世界的信念可能是不完整的、甚至是不正确的,所以 Rao 和 Georgeff 的 BDI 逻辑系统不适合于无线传感器网络。Linder 等人提出了 KARO 框架^[9],旨在建立一个严格的、表达能力强大的逻辑系统来分析 Agent 的行为,研究 Agent 执行动作的前提和结果。Wooldridge 研究与提出了一种称为 LORA 的 BDI 模型^[10],除了一般的 BDI 组件外,还包含代表 Agent 和其环境动态性的时序组件和代表 Agent 动作和动作结果的动作组件,LORA 表达了信念、期望和意图以及能力的概念和关系。基于这些一般的 Agent 逻辑系统,面向无线传感器网络的多 Agent 逻辑系统在刻画信念、期望、意图和能力等方面需要考虑到无线传感器网络节点 Agent 的资源和能力的有限性,特别要与无线传感器网络的能源高效使用的首要设计目标相一致。

3 无线传感器网络多 Agent 系统模型的形式化描述

3.1 形式化语言

无线传感器网络的多 Agent 逻辑系统形式化语言 L_{WSN} 主

要建立在 Rao 和 Georgeff 的 BDI 逻辑系统^[8]、Linder 等人的 KARO 框架所对应逻辑系统^[9]和 Wooldridge 的 LORA^[10]基础上。 L_{WSN} 的语法部分是一个一阶、多模态词的分支时序逻辑,其定义如图 1 所示。与 Wooldridge 的 LORA^[10]相比, L_{WSN} 主要增加了 Can、Does、Done、Succeeded、Failed 等模态逻辑算子和等时序逻辑算子。Can 表示无线传感器网络 Agent 的能力,公式 $\text{Can } i$ 表示 Agent i 具有能力导致 成立,Does $i \theta$ 表示 Agent i 正在执行动作 θ ,Does $i \theta$ 表示 Agent i 执行完动作 θ ,Succeeded $i \theta$ 表示 Agent i 成功执行完动作 θ ,Failed $i \theta$ 表示 Agent i 执行动作 θ 失败。时序逻辑算子 表示“有时”时序概念。另外,Bel i 还表示 Agent i 具有知识 或 Agent i 知道 , $\text{do } i a$ 表示 Agent i 具有机会执行动作 a ,且动作 a 的执行导致 成立。

- (1) 设 term 表示任意项
- (2) 设 p 表示任意原子谓词符号
- (3) 设 var 表示任意变量
- (4) 设 ag-term 表示任意 Agent 项
- (5) 设 ac-term 表示任意原子动作项
- (6) ac-expr 表示组合动作,定义为:

$$\text{ac-term} \mid \text{ac-expr} ; \text{ac-expr} \mid \text{ac-expr} " \mid \text{ac-expr}$$

$$\mid \text{if state-fmla then ac-expr else ac-expr}$$

$$\mid \text{while state-fmla do ac-expr}$$
- (7) state-fmla 表示状态公式,定义为:

$$\text{true} \mid p(\text{term}, \dots, \text{term}) \mid (\text{Bel ag-term state-fmla})$$

$$\mid (\text{Des ag-term state-fmla}) \mid (\text{Int ag-term state-fmla})$$

$$\mid (\text{can ag-term state-fmla}) \mid (\text{Does ag-term ac-expr})$$

$$\mid (\text{Done ag-term ac-expr}) \mid (\text{Succeeded ag-term ac-expr})$$

$$\mid (\text{Failed ag-term ac-expr}) \mid (\text{term} = \text{term})$$

$$\mid (\text{ag-term gr-term}) \mid A \text{ path-fmla} \mid \text{state-fmla}$$

$$\mid \text{state-fmla state-fmla} \mid \forall(\text{var}). \text{state-fmla}$$
- (8) path-fmla 表示路径公式,定义为:

$$(\text{Happens ac-expr}) \mid \text{path-fmla path-fmla}$$

$$\mid \text{state-fmla} \mid \text{path-fmla} \mid O \text{ path-fmla}$$

$$\mid \text{path-fmla} \mid \text{path-fmla path-fmla}$$

$$\mid \forall(\text{var}). \text{path-fmla} \mid \text{do ag-term}(\text{ac-term}) \text{ path-fmla}$$

图 1 L_{WSN} 的语法

3.2 形式化模型

无线传感器网络的多 Agent 逻辑系统的形式化模型主要建立在 Rao 和 Georgeff 的 BDI 逻辑系统^[8]、Linder 等人的 KARO 框架所对应逻辑系统^[9]和 Wooldridge 的 LORA^[10]的基础上,它是一个结构 $M = \langle T, W, \cdot, U, B, D, I, \text{Act}, C, \cdot \rangle$ 其中,

- (1) T 是所有时间点集合。
- (2) W 是 T 上的非空可能世界集合, W 中的任何元素表示一个可能世界。
- (3) \cdot 是 T 上的二元关系,并且假定 \cdot 满足完全、传递和过去线性的性质,它刻画了一个过去线性、将来分支的时序结构。
- (4) $U = U_{Ag} \cup U_{Ac} \cup U_{Gr} \cup U_{Obj}$,其中 U_{Ag} 是 Agent 集合, U_{Ac} 是原子动作集合, $U_{Gr} = \wp(U_{Ag}) / \emptyset$, U_{Obj} 是其他对象的集合。

(5) B 表示 Agent 的信念可达关系, $B \subseteq W \times T \times W$, 用于定义 Bel 的语义, 形式化模型假定 B 满足连续、传递和欧几里德性质.

(6) D 表示 Agent 的目标可达关系, $G \subseteq W \times T \times W$, 用于定义 Des 的语义, 形式化模型假定 D 是连续的.

(7) I 表示 Agent 的意图可达关系, $I \subseteq W \times T \times W$, 用于定义 Int 的语义, 形式化模型假定 I 是连续的.

(8) Act 表示动作的执行导致状态迁移, $Act: U_{Ag} \times \wp(U_{Ac}) \rightarrow W \times W$, 其中 $\wp(U_{Ac})$ 是指 U_{Ac} 子集的集合, 包含所有原子动作的组合, $w = Act(i, \delta)(w)$ 是指 Agent i 在世界 w 执行动作 δ , 动作的执行使得模型进入后续世界 w . 形式化模型假设动作执行所产生的结果是确定和惟一的, 在任意世界 Agent 执行动作将导致模型进入一个惟一的后续世界.

(9) C 表示 Agent 执行动作的能力, $C: U_{Ag} \times \wp(U_{Ac}) \rightarrow W \times Bool$, 用于定义 Can 的语义. 其中, $Bool = \{1, 0\}$ 表示真假, $C(i, \delta)(w) = 1$ 是指在世界 w , Agent i 具有能力执行动作 δ ; $C(i, \delta)(w) = 0$ 是指在世界 w , Agent i 不具有能力执行动作 δ .

(10) 是对原子谓词符号的解释.

3.3 形式化语义

L_{WSN} 语法成分的形式化语义定义在 Wooldridge 的 LORA^[10] 基础上增加了如图 2 所示部分. 其中, 状态公式 $M, V, w, t \models_S$ 表示形式化模型 M 、变量赋值 V 、世界 w 和时间点 t 满足公式; 路径公式 $M, V, w, p \models_P$ 表示形式化模型 M 、变量赋值 V 、世界 w 和路径 p 满足公式.

状态公式的语义	
(1)	$M, V, w, t \models_S \phi$ iff $M, V, w, p \models_S \phi$, 且 $M, V, w, p \models_S \phi$
(2)	$M, V, w, t \models_S (Can i)$ iff $\exists \delta (U_{Ac}) : ((C(i, \delta)(w) = 1) \wedge A(\delta) i \delta)$
(3)	$M, V, w, t \models_S (Done i \delta)$ iff $M, V, w, t \models_S (Succeeded i \delta)$, 或 $M, V, w, t \models_S (Failed i \delta)$
(4)	$M, V, w, t \models_S \exists x \cdot \phi$ iff $\exists d U, M, V(d, x), w, t \models_S \phi$, 其中 d 和 x 同类路径公式的语义
(1)	$M, V, w, p \models_P \phi$ iff $M, V, w, p \models_P \phi$, 且 $M, V, w, p \models_P \phi$
(2)	$M, V, w, p \models_P \neg \phi$ iff $\exists v N, M, V, w, p^{(v)} \models_S \phi$
(3)	$M, V, w, p \models_P (Can i \delta)$ iff $\exists w W, w = Act(i, \delta)(w)$, 并且 $M, V, w, p(0) \models_S \phi$

图 2 L_{WSN} 语法元素的形式化语义定义

4 无线传感器网络的认知模型

无线传感器网络节点 Agent 可以认为是由信念、期望、意图和能力所构成的认知系统. 无线传感器网络作为多 Agent 系统, 所有节点 Agent 的信念、期望、意图和能力的集合构成了其认知模型. 其中, 信念描述了无线传感器网络及其组成 Agent 对自身和外部环境的理解和认识, 期望体现了无线传感器网络及其组成 Agent 希望未来达到某种状态, 意图则体现了无线传感器网络及其组成 Agent 对其未来行为的某种选择, 而能力是无线传感器网络及其组成 Agent 成功地实现其意图的一个重要条件. 在无线传感器网络中, 足够的电源能量大小、通信、计算和存储能力是其具体能力的表现. 在无线传

感器网络的实际应用中, 能力会随着意图的实现而逐渐丧失, 能力的最终丧失将使信念、期望和意图不再成立.

构成无线传感器网络认知模型的这些成分对于理解和分析 Agent 的自主行为是重要的, 其取值定义了 Agent 的内部状态. 在无线传感器网络 $\phi, Agent$ 的信念通过两个方面获得, (1) Agent 的所有者预先或在运行时设定, (2) Agent 通过传感器或无线通信获得对外部环境和其他 Agent 的认识而形成信念; Agent 的期望一般表现为 (1) 完成既定的任务, (2) 帮助其他 Agent 完成既定的任务, (3) 维持自身的能力; Agent 的意图一般表现以高效的、满足一定的服务质量的要求选择未来行为来完成任务. 良好的无线传感器网络协议和算法的设计不应要求期望总是一致的, 在现实世界中, 无线传感器网络节点 Agent 可以拥有不一致的期望, 甚至可能是相互冲突的. 但是意图最终体现了无线传感器网络及其组成 Agent 的某种选择特征且是 Agent 实施动作的起因. 对无线传感器网络来说, Agent 必须根据其意图和能力行事, 成功地实现其意图还必须满足其他条件, 首要的是 Agent 必须具有相应的能力. Agent 的能力影响和约束了 Agent 的行为决策. 在多 Agent 系统模式中, 能力概念是描述无线传感器网络设计目标以及理解和分析相应协议和算法表现出的行为决策的一个重要抽象概念. Agent 的能力将影响和约束 Agent 的行为决策, 是 Agent 成功地实现其意图的重要条件. 另外, 安全性是无线传感器网络一些应用的关键要求^[5], 在认知模型中主要体现在信念的警惕性以及期望和意图的非恶意性, 因此无线传感器网络的多 Agent 系统模型可通过这些认知成分抽象和分析各种协议和算法的安全要素.

从无线传感器网络的特性来看, 其认知模型具有以下重要的公理和模型约束:

公理 1 对于所有的 $i \in U_{Ag}, \delta, \delta_1, \delta_2 \in \wp(U_{Ac})$, 任意的 $\phi \in L_{WSN}$, 算子 Can 有以下的公理:

- (1) $\models_S (Can i(\phi)) \leftrightarrow ((Can i) \wedge (Can i \phi))$
- (2) $\models_S (Can i) \leftrightarrow (Bel i) \wedge (Des i) \wedge (Int i)$
- (3) $\models_S A \wedge (Can i)$
- (4) $\models_S (Can i(Succeeded i(\delta_1; \delta_2))) \leftrightarrow (Can i(Succeeded i \delta_1)) \wedge (Succeeded i \delta_1) \wedge (Can i(Succeeded i \delta_2))$
- (5) $\models_S (Can i(Succeeded i(\delta_1; \delta_2))) \leftrightarrow (Can i(Succeeded i \delta_1)) \wedge (Can i Succeeded i \delta_2)$
- (6) $\models_S (Can i(Succeeded i(if \delta_1 then \delta_2 else \delta_1))) \leftrightarrow (Can i(Succeeded i \delta_1)) \wedge (Can i)$
- (7) $\models_S (Can i(Succeeded i(if \delta_1 then \delta_2 else \delta_2))) \leftrightarrow (Can i) \wedge (Can i(Succeeded i \delta_2)) \wedge (Can i)$

公理 1(1) 描述了正规模式逻辑中的 K 公理; (2) 表明无线传感器网络节点 Agent 没有能力完成既定任务, 将会使任务本身及对其信念、期望和意图不再成立; (3) 表明无线传感器网络节点 Agent 在所有的演化路径上最终都会因电源等资源不足, 不能完成任何任务而停止工作. (4) 至 (7) 类似于 Linder 等人的 KARO 框架^[9] 所对应逻辑系统中 Can 算子的性质.

公理 2 对于所有的 $i \in U_{Ag}$, 任意的 $\phi \in L_{WSN}$ 算子 Bel,

Des 和 Int (设 X 为其中任意一个算子) 有以下的公理:

- (1) $\vDash_S (X i(\phi)) (X i X i \phi)$
- (2) $\vDash_S (X i) (X i \phi)$
- (3) 如果 \vDash_S , 那么 $\vDash_S (X i)$
- (4) $\vDash_S (\text{Int } i) (\text{Des } i)$
- (5) $\vDash_S (\text{Des } i) (\text{Bel } i \phi)$
- (6) $\vDash_S (\text{Int } i) A ((\text{Int } i))$

公理 2(1) 至 (3) 类似于 Wooldridge 的 LORA^[10] 中 Bel, Des 和 Int 算子的性质. (4) 和 (5) 描述了 Bel, Des 和 Int 之间的关系, 表明无线传感器网络节点 Agent 的期望和意图兼容、信念和期望兼容. (6) 是指在无线传感器网络中, Agent 因电源等资源不足而最终会放弃其意图, 停止执行既定任务.

模型约束 1 时间的非永久性.

无线传感器网络的多 Agent 逻辑系统的形式化模型中任意时刻存在一个将来终止时刻, 而在这个终止时刻之前存在其将来时刻, 即

$\forall t T: (\exists T: (t < T) (\exists t' T: (t < t') (t' = T))) (t < T)$, 任何路径都不能无限向前演化. 这一约束与无线传感器网络可持续运行, 但存在有限的生命周期是一致的.

模型约束 2 原子动作的执行需要时间, 且可并发和分割.

无线传感器网络节点在完成既定任务时, 在一定的时间区间内执行动作, 使世界从一个状态到另一个状态演化, 即 $\forall i U_{ag}, a U_{Ac}, t, t' T: [t, t'] \text{Act}(i, a) (t < t')$. 无线传感器网络节点的设计^[1,4,5,11] 可以允许原子动作在同一时刻并发执行, 而结合节点操作系统 (如 TinyOS^[12], MANTIS OS^[13]) 的运行机制, 原子动作可被中断而不是必然被完成, 也就是说其执行是可分割的.

5 结束语

基于意向观点思想将各种认知成分赋予无线传感器网络将会更好理解和监控其行为. 无线传感器网络作为具有监测、控制和无线通信能力的网络系统, 表现为大规模、自组织、动态、面向任务等特性, 因而通过信念、期望、意图和能力等认知概念从高层抽象其个体和系统是自然而可行的. 基于此, 本文所提出的无线传感器网络的多 Agent 系统模型, 包括形式语言、模型和语义以及相应的公理和模型约束, 将有助于建立逻辑分析工具, 以独立于无线传感器网络的具体内部结构和实现细节的方式, 理解、分析和预测无线传感器网络及其组成实体的状态和行为. 下一步的工作将在此基础上进一步建立无线传感器网络的多 Agent 系统通信和合作模型, 研究无线传感器网络社会状态和行为.

参考文献:

[1] IL YAS M, MAHGOUB I. Handbook of Sensor Networks: Com-

pact Wireless and Wired Sensing Systems [M]. USA: CRC Press, 2005.

- [2] ESTRIN D, et al. Connecting the physical world with pervasive networks [J]. IEEE Pervasive Computing, 2002, 1(1): 59 - 69.
- [3] LESSER V, et al. Distributed Sensor Networks: A Multiagent Perspective [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [4] AKYILDIZ I F, et al. Wireless sensor networks: a survey [J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393 - 422.
- [5] 孙利民, 等. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [6] AKKAYA K, YOUNIS M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks [J]. Ad Hoc Networks, 2005, 3(3): 325 - 349.
- [7] 毛新军. 面向主体的软件开发 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [8] RAO A S. Modeling rational agents within a BDI-architecture [A]. GEORGEFF M P. 1991 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning Proceedings [C]. Cambridge: Morgan Kaufmann Publishers, 1991. 473 - 484.
- [9] LINDER B V, et al. Formalising abilities and opportunities of agents [J]. Fundamenta Informaticae 1998, 34(1 - 2): 53 - 101.
- [10] WOOLDRIDGE M. Reasoning about Rational Agents [M]. Cambridge: The MIT Press, 2000.
- [11] HANDZISKI V. Flexible hardware abstraction for wireless sensor networks [A]. POLASTRE J, et al. 2005 2nd European Workshop on Wireless Sensor Networks Proceedings [C]. Berlin: Springer, 2005. 145 - 157.
- [12] HILL J. A software architecture supporting networked sensors [D]. Berkeley: University of California Berkeley, 2000.
- [13] BHATTI S, et al. MANTIS OS: An embedded multithreaded operating system for wireless micro sensor platforms [J]. ACM/ Kluwer Mobile Networks & Applications (MONET) Journal, 2005, 10(4): 563 - 579.

作者简介:

陈 志 男, 1978 年生于江苏淮安, 南京邮电大学博士生, 目前主要研究方向为无线传感器网络、Agent 和多 Agent 系统、普适计算等.

王汝传 男, 1943 年生于安徽合肥, 南京邮电大学教授、博士生导师, 目前主要研究方向为计算机软件、计算机网络、信息安全、移动 Agent 和虚拟现实技术等. E-mail: wangrc@njupt.edu.cn

孙力娟 女, 1963 年生于江苏南京, 南京邮电大学教授、计算机学院副院长, 目前主要研究方向是计算机网络、计算机软件在通信中应用和智能优化方法等.