

氏 名 Mingmei LI

学位（専攻分野） 博士（情報学）

学位記番号 総研大甲第 1050 号

学位授与の日付 平成 19 年 3 月 23 日

学位授与の要件 複合科学研究科 情報学専攻
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 Strategic Pricing to Stimulate Node Cooperation in
Wireless Ad Hoc Networks

論文審査委員	主 査 教授	山田 茂樹
	教授	米田 友洋
	助教授	計 宇生
	助教授	阿部 俊二
	助教授	山岡 克式（東京工業大学）

論文内容の要旨

In wireless ad hoc networks, all nodes cooperate to provide network services. Due to the limited radio transmission range, data packets are usually forwarded through multiple relay nodes before they reach the destinations. If a node always serves as a relay to transmit the packets, it may quickly use up its own energy and other resources. Therefore, some nodes use a selfish approach: they try to avoid forwarding the packets. Such selfish behavior would probably cause the network to break down. Selfish nodes are common within ad hoc networks because they are managed by different authorities.

In this thesis, the node cooperation problems are analyzed in two steps:

- 1) a game theoretic analysis is provided to stimulate node to cooperate;
- 2) a price-demand function based incentive model is proposed to optimize the nodes' service demand and service provision, and encourage the relay nodes to be honest.

Firstly, a game theoretic analysis is proposed to study node cooperation. In the related chapter, I use a "payment and compensation" scheme as a less-aggressive way to avoid nodes' non-cooperative behaviors. It is assumed that once a packet is sent from a source node, the packet is associated with a sending fee, i.e., when a node needs sending the packets as a source node, a sending fee is required (e.g. reasonably some money). The fee is adjustable according to the network status, whereas the node can also accept or reject the fee. In order to induce voluntary forwarding, the network will also compensate the nodes who consume their energy in forwarding the packets for others. If I think the sending fee as the penalties to the source nodes and the compensation fee as the encouragement to relay nodes, then local optimization of the node, (the desired performance plus the compensation then minus the cost to be paid) will yield an optimal point. Each node can only select its own packet generation strategy, however the final utility of each node is determined by the strategy set constituted by the other nodes. With the game theoretic analysis, I found that by introducing an incentive pricing policy "payment and compensation", the relay nodes have less motivation to drop the packets. However, I also found that game theoretic literature may not be directly applicable in the scenario where cheating nodes exist and how to reasonably charge the source nodes and compensates the relay nodes.

Therefore, secondly, a price-demand function based incentive model (PDM) is proposed. In the PDM model, the network is modeled as a market, where the pricing is determined by the source node's demand and the relay node's service supply. The source nodes make use of a price-demand function, which allocates payments to the service provider (relay nodes). The relay nodes are encouraged to cooperate in the PDM model, which is based on the assumption that each relay node wishes to maximize its payoff. Then the source nodes can optimize their prices and the number of sending packets to satisfy the relay nodes' payoff requirement. Once the payoff requirements of the relay nodes are satisfied, the relay nodes have no reason to be selfish. In the PDM model, a source node that has packets to send initially broadcasts RREQ in the network. Once the relay node(s) are selected, each relay node replies to the source node for its forwarding cost. Then the source node calculates the price of the sending packets it will pay for each relay node and the number of packets it will send. According to the source nodes' demand, it chooses the route with the lowest payment or the route with the largest number of sending packets. The PDM pricing model seeks to address two main issues:

- 1) to determine how much to charge the source nodes and how much to compensate the relay nodes;
- 2) to avoid the relay nodes to dishonestly report their forwarding costs. Hence, the contributions are summarized as follows:
 - 1) The relay nodes intend to dishonestly report their forwarding cost to gain a high payoff from

the source nodes, which obviously contradicts with the motivation to stimulate cooperation. In the PDM model, however, the relay nodes will have no reason to report a false forwarding cost, since only telling the truth guarantees the relay nodes' final payoff. Such a property is shown by the proof.

2) The PDM pricing model reflects the relationship between the service demand of the source nodes and the service supply of the relay nodes. The PDM model can save money for the source nodes for sending the packets, which is indicated by the simulation results.

本博士論文は、ワイヤレスアドホックネットワークにおいてパケット送信ノードと受信ノードの間に介在する中継ノードが、送信ノードから支払われるお金をインセンティブとしてパケット中継を行う際、経済学における価格と需要の関係を定めた関数を基に、中継ノードの利得関数が最大になるようにパケット転送量を定める戦略的価格モデル(PDM: Price Demand Function Model)の研究成果をまとめたものである。PDMモデルはパケットの中継に非協力的(利己的)なノードがパケット中継により多く協力するよう促す仕組みを提供することを目的としている。本論文による技術的な貢献内容は(1) 戦略的価格モデル PDM を提案し、中継ノードが偽の中継コストの申告をすると中継ノードの利得が減るので、中継ノードは正直な申告をする方が得策であることを理論的に示したこと、(2) ノードが静止あるいは移動するネットワーク環境において PDM モデルが従来方式モデル(Sprite モデル)に比較してパケット送信ノードの支払額を少なくできることをシミュレーションによって明らかにしたことである。本論文は6章より構成されている。

本論文の第1章では利己的なプレイヤー(動作主体)に協力的に仕事をさせる方法としてインセンティブの考えに基づく戦略的価格モデルの研究の動機と目的を述べている。

第2章では戦略的価格モデルPDMの適用対象であるアドホックネットワークに関してパケットの中継転送に影響を与える技術要因を分類、整理し、その中でノード間協力がアドホックネットワーク実現を左右する重要課題であることと、及び、このような工学的課題に対して経済学的手法による解決の可能性を述べている。

第3章ではノード間協力に関わる種々のモデルや手法とそれらの比較を行い、本研究ではノード間協力の理論分析手法として、「ゲーム理論的手法」と、経済学的手法の1つでインセンティブに基づく「戦略的価格モデル」を用いることを述べている。

第4章ではゲーム理論に基づくワイヤレスアドホックネットワークの定式化を行うと共に、シミュレーションと組み合わせてノード間協力度を定量的に分析している。しかし、このゲーム理論的手法ではノードが偽の申告をする場合も含めて広く適用できるように発展させることは困難と考えられる。

第5章では、この問題を解決するために PDM モデルを導入している。PDM モデルでは送信ノードを「コスト支払い側」、中継ノードを「支払われる側」として、価格・需要曲線、中継コスト、中継ノードの利得関数を定式化し、各中継ノードの利得関数が最適あるいは0以上になるように送信ノードがパケット転送量を決定している。そして1つのセッションに中継ノードが1個以上存在する場合、中継ノードが偽のコスト申告をすると利得関数の値が最適値より低下して損をするので、中継ノードは正直な申告をすることが得策であることを理論的に示している。さらに、ノードが静止あるいは移動するネットワーク環境(ネットワークのノード数は10個または30個)のいずれの場合においても PDM モデルが従来方式モデル(Sprite モデル)に比較してパケット送信ノードの支払額を少なくできることをシミュレーションによって明らかにしている。また、中継ノードが偽の申告をした場合に余計に支払った金額や各ノードの

資金バランス等の値等もシミュレーションで求め、分析、評価している。

第6章で結論と将来課題をまとめている。

出願者は、本研究に関わる査読付きジャーナル論文と国際会議論文にそれぞれ1件ずつ発表を行っている。

試験は、出願者に提出博士論文の内容の発表をしてもらい、論文内容を中心に、これに関連した分野ならびに基礎知識の内容も含め、審査委員全員からの口頭試問で行った。これらの質疑応答を通して、出願者から納得できる回答を得ることができた。

本論文の提案内容は、既存技術に対する新規性、有効性、信頼性、学術的価値が認められる。また、アドホックネットワークを世の中へ導入展開する上で参考となる考え方や示唆を与えている。

以上により、本学位請求論文が複合科学研究科における博士授与の基準に達していると判断し、合格とした。