



Hélcio Bezerra de Mello

**Propostas de Roteamento para Redes
Veiculares (VANETs) em Ambientes Urbanos**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção Do título de Doutor em Informática

Orientador: Prof. Markus Endler

Rio de Janeiro
Janeiro de 2009



Hélcio Bezerra de Mello

**Propostas de Roteamento para Redes
Veiculares (VANETs) em Ambientes Urbanos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Markus Endler

Orientador

Departamento de Informática — PUC–Rio

Prof. Luiz Fernando Gomes Soares

Departamento de Informática — PUC–Rio

Prof. Marcus Vinícius Soledade Poggi de Aragão

Departamento de Informática — PUC–Rio

Prof. Jean-Marie Alexandre Farines

Universidade Federal de Santa Catarina — UFSC

Prof. Luis Henrique Maciel Kosmalski Costa

Universidade Federal do Rio de Janeiro — UFRJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC–Rio

Rio de Janeiro, 28 de Janeiro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Hélcio Bezerra de Mello

Graduou-se em Engenharia de Computação na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) em 2002. Obteve o título de Mestre em Informática na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) em 2004.

Ficha Catalográfica

Mello, Hélcio Bezerra de

Propostas de roteamento para redes veiculares (VANETs) em ambientes urbanos / Hélcio Bezerra de Mello ; orientador: Markus Endler. — 2009.

v., 125 f: il. ; 30 cm

Tese (Doutorado em Informática)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia.

1. Informática – Teses. 2. Roteamento. 3. Geocast. 4. VANETs. 5. Redes Veiculares. 6. Semáforos. 7. Grafo Multiplanar. I. Endler, Markus. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por tudo o que Ele já me concedeu e pelo que ainda me reserva.

À família, pelo amor e incentivo.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelo apoio financeiro aos meus estudos.

Ao meu orientador, prof. Markus Endler, pela paciência, compreensão e dedicação.

Aos funcionários do Departamento de Informática e das bibliotecas, por seus incansáveis esforços que tornaram a PUC-Rio a grande universidade que é hoje.

Aos colegas, pela amizade, companherismo e pelos momentos de alegria que me proporcionaram.

Resumo

Mello, Hécio Bezerra de; Endler, Markus. **Propostas de Roteamento para Redes Veiculares (VANETs) em Ambientes Urbanos**. Rio de Janeiro, 2009. 125p. Tese de Doutorado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Redes veiculares (VANETs — Vehicle Ad Hoc NETWORKs) constituem um caso especial de redes *ad hoc* em que os nós são veículos equipados com uma interface de comunicação sem fio. Esses veículos podem se mover a velocidades elevadas, e a transmissão de dados em cenários urbanos pode ser facilmente bloqueada por prédios ou outros obstáculos. Tais fatores contribuem para tornar a comunicação inter-veicular intermitente, e dificultar o roteamento de pacotes. Um dos principais desafios dos protocolos de roteamento em VANETs é evitar as ruas onde o volume de tráfego esteja baixo, uma vez que a escassez de veículos nessas ruas tende a impossibilitar a propagação de pacotes através delas. Por esse motivo, a informação sobre o volume de tráfego em cada rua é fundamental para se determinar a melhor rota entre dois veículos. Especificamente em cenários urbanos, a mudança de estado dos semáforos provoca uma flutuação do tráfego de veículos ao longo do tempo. Em vista disso, esta tese propõe o TLAR (Traffic Light Aided Routing), um novo algoritmo de roteamento para VANETs que explora a variação de estado dos semáforos para inferir quais ruas oferecerão uma maior probabilidade de sucesso de propagação de pacotes. Resultados de simulação mostram que o algoritmo apresenta um bom desempenho comparado ao de propostas existentes.

Palavras-chave

Roteamento. Geocast. VANETs. Redes Veiculares. Semáforos. Grafo Multiplanar.

Abstract

Mello, Hécio Bezerra de; Endler, Markus(advisor). **Routing Proposals for Vehicular Networks (VANETs) in Urban Environments**. Rio de Janeiro, 2009. 125p. DSc Thesis — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

VANETs (Vehicle Ad Hoc NETWORKs) are a special case of mobile ad hoc networks where vehicles are equipped with wireless communication interfaces. These vehicles may move at high speeds and data transmission in urban scenarios may easily be blocked by buildings and other sort of obstacles. Such factors contribute to make inter-vehicle communication intermittent and packet routing more difficult. One of the main challenges faced by routing protocols is avoiding low-traffic streets, where the lack of vehicles tend to make packet forwarding impossible. For this reason, traffic information on each street is essential for the computation of the best route between any given two vehicles. Specifically in urban scenarios, traffic light transitions cause significant fluctuations on traffic flow over time. Given this fact, this thesis proposes TLAR (Traffic Light Aided Routing), a new routing algorithm for VANETs that exploits traffic light transition timings in order to determine which streets will offer the greatest probabilities for successful packet forwarding. Simulation results indicate a good performance of this algorithm compared to existing approaches.

Keywords

Routing. Geocast. VANETs. Vehicular Networks. Traffic Lights. Multilayer Graphs.

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Roteamento Geocast	14
1.2	Contribuições	17
2	Redes Veiculares	19
2.1	Propagação de Radiofrequência	20
2.2	Aplicações	25
2.3	Aplicação de VANETs Considerada	29
3	Roteamento em VANETs	30
3.1	SAR	30
3.2	GyTAR e A-STAR	31
3.3	VADD	32
3.4	GeOpps	33
3.5	GPSR	35
3.6	STAR	37
3.7	Resumo	40
4	Propostas de Algoritmos de Roteamento	42
4.1	Modelo de VANETs	42
4.2	TLAR	46
4.3	U-GPSR	64
5	Experimentos	67
5.1	Ambiente de Simulação	67
5.2	Experimentos	80
5.3	Análise e Discussão	107
6	Conclusão	111
	Referências Bibliográficas	113

Lista de figuras

2.1	Propagação no modelo <i>two-ray ground</i> .	21
2.2	Propagação de sinal por difração sobre prédios.	24
2.3	Exemplo do uso da técnica de <i>raytracing</i> .	24
2.4	Uso do radar no controle de cruzeiro adaptativo.	26
2.5	Controle de cruzeiro cooperativo agilizando a reação do veículo de trás.	26
2.6	Mesclagem de fluxos de veículos em uma auto-estrada.	27
3.1	Determinando o ponto mais próximo da rota de um veículo ao destinatário de um pacote.	34
3.2	Um exemplo de ótimo local.	35
3.3	Aplicação da regra da mão direita.	36
3.4	A regra da mão direita falhando em grafo não-planar.	36
3.5	Região que contém os vizinhos a serem eliminados.	37
4.1	Redução do tamanho dos obstáculos para fins de propagação.	44
4.2	(a) Exemplo de cenário para conversão em grafo. (b) Representação tradicional em grafo. (c) <i>Grafo multiplanar</i> correspondente	52
4.3	Uma situação onde $CC(X)$ é ajustada para 100%.	54
4.4	Exemplo de ajuste para <i>conectividades retas</i> .	55
4.5	Selecionando o próximo <i>hop</i> de uma rota.	56
4.6	Exemplo de situação em que pode ocorrer a quebra da seqüência de super-vizinhos.	62
4.7	Prédios podem impedir a detecção de arestas que se cruzam.	64
4.8	Exemplo de aplicação da estratégia de reparo do U-GPSR.	65
5.1	Exemplo de arquivo de cruzamentos do SUMO.	68
5.2	Exemplo de arquivo de <i>segmentos</i> do SUMO.	68
5.3	Exemplo de topologia no SUMO.	69
5.4	Exemplo de descrição de fluxos de veículos.	69
5.5	Trecho de um relatório gerado por simulação do SUMO.	70
5.6	Exemplo de configuração de mobilidade no NS-2.	71
5.7	Procedimento adotado nas simulações.	72
5.8	Rotas a serem seguidas por veículos injetados na topologia em <i>A</i> .	73
5.9	Aglomerção de veículos próximos de um cruzamento. <i>Veículos equipados</i> estão indicados em vermelho.	74
5.10	Cálculo da largura da calçada para efeito de propagação.	76
5.11	Quantidade de pacotes entregues pelo TLAR em função de seus tempos de vida para alguns valores da constante de penalidade. A <i>taxa de penetração</i> é de 40%, o intervalo de chegada de veículos é de 3s e o alcance de comunicação é de 200 m.	80
5.12	Quantidade de pacotes entregues pelo STAR em função de seus tempos de vida para alguns valores da constante SREG_HIGH. A <i>taxa de penetração</i> é de 40%, o intervalo de chegada de veículos é de 3s e o alcance de comunicação é de 200 m.	81

5.13	Quantidade de pacotes entregues pelo STAR em função de seus tempos de vida para alguns valores da constante <i>SPROP_HIGH</i> . A taxa de penetração é de 40%, o intervalo de chegada de veículos é de 3s e o alcance de comunicação é de 200 m.	82
5.14	Quantidade de pacotes entregues pelo STAR em função de seus tempos de vida para alguns valores da constante <i>TIMEOUT</i> . A taxa de penetração é de 40%, o intervalo de chegada de veículos é de 3s e o alcance de comunicação é de 200 m.	82
5.15	Cruzamento usado para análise das <i>conectividades</i> .	83
5.16	(a) Ângulo de visão dos veículos em um cruzamento. (b) Cálculo da <i>visibilidade cruzada</i> .	84
5.17	Efeito da variação dos parâmetros de simulação na <i>conectividade cruzada</i> : (a) Intervalo de chegada de veículos (b) Taxa de penetração (c) Alcance de comunicação.	87
5.18	Calculando a <i>conectividade reta</i> de <i>AB</i> .	88
5.19	Efeito da variação dos parâmetros de simulação na <i>conectividade reta</i> : (a) Intervalo de chegada de veículos (b) Taxa de penetração (c) Alcance de comunicação.	89
5.20	Quantidade de pacotes entregues em função de seus tempos de vida para algumas <i>taxas de penetração</i> . O intervalo de chegada de veículos é de 3s e o alcance de comunicação é de 200 m.	91
5.21	Amostras de <i>veículos equipados</i> para algumas taxas de penetração (<i>p</i>). <i>Veículos equipados</i> são mostrados em vermelho. (a) $p = 30\%$. (b) $p = 40\%$. (c) $p = 40\%$ (superconjunto da amostra de (a)).	93
5.22	Quantidade de pacotes entregues em função de seus tempos de vida para alguns intervalos de chegada de veículos. A taxa de penetração é de 40% e o alcance de comunicação é de 200 m.	95
5.23	Quantidade de pacotes entregues em função de seus tempos de vida para algumas margens de erro ϵ . O intervalo de chegada de veículos é de 3s, a taxa de penetração é de 40% e o alcance de comunicação é de 200 m.	99
5.24	Quantidade de pacotes entregues em função de seus tempos de vida para diferentes velocidades, acelerações e desacelerações. O intervalo de chegada de veículos é de 3 s, a taxa de penetração é de 40% e o alcance de comunicação é de 200 m.	102
5.25	Quantidade de pacotes entregues em função de seus tempos de vida para semáforos sincronizados (a) e dessincronizados (b e c). A defasagem dos semáforos é de no máximo 30 s (b) e 60 s (c). O intervalo de chegada de veículos é de 3 s, a taxa de penetração é de 40% e o alcance de comunicação é de 200 m.	105
5.26	Um cenário para a demonstração de uma possível melhoria para a estratégia de reparo do TLAR.	109

Lista de tabelas

2.1	Parâmetros do modelo de <i>shadowing</i> calculados em uma área urbana.	23
3.1	Comparação dos protocolos de roteamento para VANETs.	40
4.1	Formato do cabeçalho de um pacote do TLAR.	55
5.1	Parâmetros das camadas física e MAC.	78
5.2	Desempenho dos algoritmos para <i>taxa de penetração</i> de 30%, alcance de transmissão de 200 m e intervalo de chegada de veículos de 3s.	90
5.3	Desempenho dos algoritmos para <i>taxa de penetração</i> de 40%, alcance de transmissão de 200 m e intervalo de chegada de veículos de 3s.	92
5.4	Desempenho dos algoritmos para <i>taxa de penetração</i> de 50%, alcance de transmissão de 200 m e intervalo de chegada de veículos de 3s.	92
5.5	Desempenho dos algoritmos para intervalo de chegada de veículos de 2s, <i>taxa de penetração</i> de 40% e alcance de transmissão de 200 m.	96
5.6	Desempenho dos algoritmos para intervalo de chegada de veículos de 3s, <i>taxa de penetração</i> de 40% e alcance de transmissão de 200 m.	96
5.7	Desempenho dos algoritmos para intervalo de chegada de veículos de 4s, <i>taxa de penetração</i> de 40% e alcance de transmissão de 200 m.	97
5.8	Taxas de chegada de <i>veículos equipados</i> nos experimentos.	98
5.9	Desempenho do TLAR para várias margens de erro nas <i>conectividades</i> . Intervalo de chegada de veículos: 3s, <i>taxa de penetração</i> : 40%, alcance de transmissão: 200 m.	100
5.10	Desempenho dos algoritmos para <i>taxa de penetração</i> de 40%, alcance de transmissão de 200 m e intervalo de chegada de veículos de 3s. A velocidade máxima dos veículos pertence ao intervalo $[15, 0; 20, 0]m/s$, enquanto a aceleração e desaceleração se encontram, respectivamente, nos intervalos $[0, 7; 0, 9]m/s^2$ e $[4, 0; 5, 0]m/s^2$.	101
5.11	Desempenho dos algoritmos para <i>taxa de penetração</i> de 40%, alcance de transmissão de 200 m e intervalo de chegada de veículos de 3s. A velocidade máxima dos veículos pertence ao intervalo $[15, 0; 20, 0]m/s$, enquanto a aceleração e desaceleração se encontram, respectivamente, nos intervalos $[0, 5; 1, 0]m/s^2$ e $[3, 5; 5, 5]m/s^2$.	103
5.12	Desempenho dos algoritmos para semáforos sincronizados, a uma <i>taxa de penetração</i> de 40%, alcance de transmissão de 200 m e intervalo de chegada de veículos de 3s.	104

- 5.13 Desempenho dos algoritmos para semáforos dessincronizados, a uma *taxa de penetração* de 40%, alcance de transmissão de 200 m e intervalo de chegada de veículos de 3s. A defasagem máxima é de 30 s. 106
- 5.14 Desempenho dos algoritmos para semáforos dessincronizados, a uma *taxa de penetração* de 40%, alcance de transmissão de 200 m e intervalo de chegada de veículos de 3s. A defasagem máxima é de 60 s. 106