

# Cooperação com Codificação de Rede Aplicada a Redes Veiculares MIMO com Enlaces Assimétricos

Ohara Kerusauskas Rayel, João Luiz Rebelatto, Richard Demo Souza e Bartolomeu F. Uchôa-Filho

**Resumo**—Este artigo avalia a aplicação de codificação de rede não-binária a uma rede veicular cooperativa *ad hoc* (VANET), cujos veículos são providos de múltiplas antenas (MIMO). Considera-se desvanecimento Nakagami- $m$ , possibilitando avaliar a confiabilidade do esquema proposto com destaque para o caso em que a condição do canal é crítica (sub-Rayleigh com  $m < 1$ ). Os benefícios tanto de códigos espaço-temporais, como de comunicação cooperativa são utilizados para aumentar a ordem de diversidade da rede, e conseqüentemente proporcionar comunicação mais confiável. A probabilidade de *outage* é obtida analiticamente, inclusive em cenários com canais interusuário desbalanceados e resultados numéricos mostram que codificação de rede pode aumentar consideravelmente a confiabilidade do sistema.

**Palavras-Chave**— Comunicação cooperativa, MIMO, codificação de rede, redes veiculares.

**Abstract**—This paper evaluates nonbinary network coding applied to a cooperative vehicular ad hoc network (VANET). We consider that all the vehicles in the network are provided with multiple antennas (MIMO), under Nakagami- $m$  fading, aiming to evaluate the reliability of the proposed scheme mainly in scenarios where the channel condition is critical (sub-Rayleigh scenario with  $m < 1$ ). The benefits of both space-time codes and cooperative communication are used to increase the network diversity order and consequently provide more reliable communication. The network outage probability is obtained analytically including in scenarios where the interuser links are unbalanced, and numerical results shows that network coding can substantially increase the system's reliability.

**Keywords**— Cooperative communication, MIMO, network coding, vehicular networks.

## I. INTRODUÇÃO

Com o intuito de aumentar a segurança e a eficiência de transportes veiculares terrestres, sistemas de transporte inteligente deverão se tornar realidade em um futuro próximo. Nesses sistemas, os veículos deverão trocar informações, estabelecendo uma *rede veicular ad hoc* (VANET) [1]–[5]. Apesar de muitas similaridades, VANETs têm algumas vantagens sobre redes *ad hoc* comuns, que incluem a possibilidade de instalação de processadores com alta capacidade computacional, energia disponível e padrões de mobilidade restritos [1]. Entretanto, criar uma comunicação sem fio extremamente confiável entre veículos que podem estar se movendo rapidamente por si só é um grande desafio.

Ohara Kerusauskas Rayel, João Luiz Rebelatto e Richard Demo Souza, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil, e-mails: {ohara@eletrica.eng.br, jlrebelatto@utfpr.edu.br, richard@utfpr.edu.br}

Bartolomeu F. Uchôa-Filho, GPqCom, EEL, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil, e-mail: uchoa@eel.ufsc.br

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq, pela CAPES e pela Fundação Araucária.

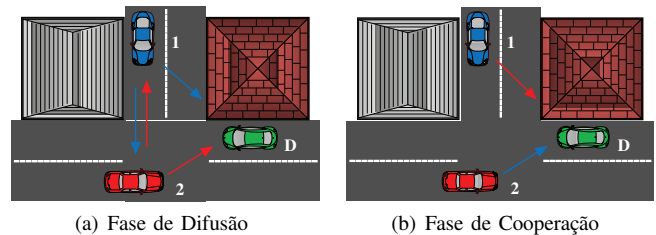


Fig. 1. VANET cooperativa com 2 veículos. (a) Cada veículo difunde sua própria informação (b) Cada veículo encaminha a mensagem de seu parceiro.

Uma possibilidade para combater o desvanecimento característico do canal sem fio é utilizar códigos espaço-temporais na camada física [6], [7], aplicando o conceito de múltiplas antenas de transmissão/recepção (MIMO), por exemplo [2]. Porém, mesmo sem a restrição de tamanho que existe no caso de redes de sensores, por exemplo, redes veiculares também possuem algumas restrições de tamanho, já que a área reservada para as antenas em veículos é limitada por normas impostas pelos fabricantes de carros [8].

Técnicas de *comunicação cooperativa* também têm sido amplamente estudadas recentemente [9], [10], ajudando a aumentar a confiabilidade da rede. Em redes cooperativas, como ilustrado na Fig. 1, a transmissão é usualmente dividida em duas fases: a *fase de difusão*, na qual os usuários difundem suas próprias mensagens, e a *fase de cooperação*, na qual os usuários atuam como retransmissores, ajudando a encaminhar a informação de outros usuários para o destino. Recentemente, vários trabalhos têm aplicado o conceito de *codificação de rede* [11] em redes cooperativas, com o objetivo de diminuir a taxa de erro [12]–[14]. Em sistemas com codificação de rede, os usuários são capazes de transmitir combinações lineares das informações disponíveis, ao invés de apenas atuarem como roteadores. No esquema apresentado em [14], chamado de *Codificação de Rede Dinâmica Generalizada* (GDNC), cada usuário é capaz de difundir um certo número de blocos na fase de difusão e então transmitir outro número de combinações lineares na fase de cooperação. A ordem de diversidade alcançada pelo esquema GDNC se mostrou ser maior do que a de outros esquemas, como os apresentados em [12], [13].

Trabalhos recentes também têm aplicado os conceitos de MIMO e codificação de rede a VANETs [2]–[4]. Em [2], algumas perspectivas sobre o uso de múltiplas antenas em redes veiculares são apresentadas, e vários benefícios são mostrados, como extensão de cobertura, aumento de taxa e de confiabilidade. Em [3], codificação de rede binária é aplicada a VANETs com o objetivo de recuperar blocos perdidos. Em [4],

os autores consideram uma codificação de rede a nível de símbolo como uma alternativa para difundir informação em redes veiculares. No entanto, até onde é de conhecimento dos autores, os benefícios da utilização simultânea de codificação de rede não-binária e de múltiplas antenas ainda não foram avaliados em VANETs.

Neste trabalho, aplicaremos os conceitos de comunicação cooperativa com codificação de rede (mais especificamente o esquema GDNC) sobre códigos espaço-temporais (explorando múltiplas antenas), fazendo com que os benefícios trazidos por ambas as técnicas em ordem de diversidade sejam obtidos. Considera-se desvanecimento Nakagami- $m$  [15], o mais apropriado para modelar uma rede veicular [5], já que o desvanecimento em VANETs pode variar de sub-Rayleigh (quando os veículos estão separados por esquinas, por exemplo) ao Gaussianos (cenários com forte linha de visada (LOS)). Leva-se em conta situações em que todos os canais interusuário possuem mesmo perfil de desvanecimento, bem como cenários em que o desvanecimento possui valores de  $m$  distintos entre os usuários. A probabilidade de *outage* do esquema proposto MIMO-GDNC é obtida analiticamente para essas situações, e avaliada em resultados numéricos. Uma comparação entre a diversidade obtida na camada física (proporcionada por múltiplas antenas) e a obtida numa camada superior (proporcionada pela comunicação cooperativa/codificação de rede) também é realizada.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção II apresenta o modelo do sistema. Na Seção III as técnicas de comunicação cooperativa e de codificação de rede são revisadas. A Seção IV apresenta o esquema proposto MIMO-GDNC. Resultados numéricos são apresentados na Seção V. Finalmente, a Seção VI apresenta as conclusões do artigo.

## II. MODELO DO SISTEMA

Este trabalho considera a parte de múltiplo acesso de uma rede VANET cooperativa, onde  $M$  veículos possuem informações independentes para transmitir a um destino em comum, que pode ser outro veículo ou uma estação à beira da rodovia [2]–[4]. Também se considera que todos os usuários da rede possuem  $N_t$  antenas transmissoras e  $N_r$  antenas receptoras, e que as transmissões são realizadas por canais ortogonais no tempo. Blocos são vetores de comprimento  $N$ . O período de tempo correspondente à transmissão de um bloco é chamado de *subslot*. Um *slot* de tempo (TS) é definido como o período de tempo contendo  $M$  *subslots*, ou seja, um TS corresponde a  $M$  transmissões individuais, todas realizadas em sistema de rodízio entre os usuários e através de canais ortogonais no tempo. Omitindo o índice de tempo, o sinal recebido pelo usuário  $j$  é dado por

$$\mathbf{y}_{i,j} = \sqrt{P_i} \mathbf{H}_{i,j} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_{i,j}, \quad (1)$$

em que  $i \in \{0, \dots, M-1\}$  representa o índice do transmissor,  $j \in \{0, 1, \dots, M\}$  é o índice do receptor ( $M$  corresponde ao destino),  $P_i$  é a potência de transmissão por antena transmissora (considerada ser a mesma para todas as antenas),  $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^{N_t \times N}$  e  $\mathbf{y}_{i,j} \in \mathbb{C}^{N_r \times N}$  são os  $N_t$  e  $N_r$  blocos transmitidos

e recebidos, respectivamente, ambos de comprimento  $N$ , e  $\mathbf{n}_{i,j} \in \mathbb{C}^{N_r \times N}$  é o ruído AWGN de média zero e variância  $N_0/2$  por dimensão. A matriz  $\mathbf{H}_{i,j} \in \mathbb{C}^{N_r \times N_t}$  representa o desvanecimento do canal  $h_{n_t n_r}$  entre a antena de transmissão  $n_t$  para a antena de recepção  $n_r$ , assumido ser independente e identicamente distribuído (i.i.d.) (tanto no espaço quanto no tempo), com distribuição Nakagami- $m$  e variância unitária. Estes pressupostos estão de acordo com a caracterização de canal feita em [5], onde o canal móvel veículo-a-veículo foi descrito como Nakagami- $m$ , com o parâmetro  $m$  variando de sub-Rayleigh ( $m < 1$ ) a cenários com linha de visada ( $m > 1$ ). Considera-se o modelo de desvanecimento em bloco onde o canal fica constante durante  $N$  amostras, e assume-se que os receptores têm conhecimento perfeito do estado do canal (CSI), mas os transmissores não possuem CSI algum.

Considerando inicialmente que todos os usuários na rede são providos de uma única antena (SISO) e não cooperam entre si, e que todos os canais possuem uma mesma relação sinal-ruído (SNR) média, a probabilidade de *outage* para o canal entre o usuário  $i$  e o usuário  $j$  (também chamada de probabilidade de *outage* da camada física), assumindo desvanecimento Nakagami- $m$  é dada por<sup>1</sup> [15], [16]

$$\mathcal{P}_{o,PL} = \Pr \left\{ |h_{i,j}|^2 < \frac{(2^r - 1)}{\text{SNR}} \right\} = \frac{\Gamma(m, \frac{m(2^r - 1)}{\text{SNR}})}{\Gamma(m)}, \quad (2)$$

em que  $\Gamma(a, b) = \int_0^b y^{a-1} \exp(-y) dy$  é a função gama incompleta inferior e  $\Gamma(a) = \int_0^\infty y^{a-1} \exp(-y) dy$  é a função gama completa,  $r$  é a taxa de informação entre o usuário  $i$  e o usuário  $j$  (assumida ser a mesma em toda a rede).

Para uma dada probabilidade de *outage*  $\mathcal{P}_o$ , a ordem de diversidade é definida como [15]

$$D \triangleq \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{-\log \mathcal{P}_o}{\log \text{SNR}}. \quad (3)$$

Aplicando (2) em (3), pode se mostrar que a ordem de diversidade da camada física com uma única antena na transmissão direta com desvanecimento Nakagami- $m$  é dada por  $D_{PL} = m$ .

## III. CAMADA DE REDE

Nesta seção, protocolos cooperativos que utilizam apenas uma antena serão apresentados. São esquemas bem estabelecidos na literatura, como o chamado decodifica-e-encaminha (DF) [10], codificação de rede dinâmica (DNC) [13] e a codificação de rede dinâmica generalizada (GDNC) [14].

### A. Cooperação Simples (Decodifica-e-encaminha)

No esquema decodifica-e-encaminha (DF), como ilustrado na Fig. 1, cada usuário primeiramente difunde um único bloco, e depois retransmite o bloco do seu parceiro (depois de decodificar e recodificá-lo). A taxa da rede (definida como a razão entre número de blocos de informação e o número total de blocos transmitidos) no esquema DF é dada por

<sup>1</sup>Note que, neste trabalho,  $P$  representa potência, enquanto  $\mathcal{P}_o$  se refere a probabilidade de *outage*.

$$R_{DF} = \frac{\text{Número de blocos de informação}}{\text{Número total de blocos}} = \frac{M}{2M} = \frac{1}{2}. \quad (4)$$

Assumindo que todos os canais da rede são sujeitos a falhas, a probabilidade de *outage* do esquema DF com 2 usuários apresentado na Fig. 1 é [10]

$$\mathcal{P}_{o,DF} = 1.5\mathcal{P}_{o,PL}^2, \quad (5)$$

em que  $\mathcal{P}_{o,PL}$  corresponde à probabilidade de *outage* da camada física. Aplicando (5) em (3), percebe-se que a ordem de diversidade do esquema DF com 2 usuários é  $D_{DF} = 2D_{PL}$ , já que cada bloco de informação é transmitido por 2 canais com desvanecimento independente.

### B. Codificação de Rede Dinâmica (DNC)

Em [13], Xiao *et al.* propuseram um protocolo cooperativo onde os usuários da rede são capazes de realizar combinações lineares de todos os blocos disponíveis e transmitir essas combinações para o destino ao invés de apenas retransmitir cada bloco individualmente. No esquema proposto em [13], chamado de *Codificação de Rede Dinâmica* (DNC), cada usuário transmite  $M - 1$  combinações lineares sobre um Campo de Galois  $GF(q)$  durante a fase de cooperação, após difundir um único bloco na fase de difusão, o que faz com que a rede tenha taxa  $R_{DNC} = 1/M$ .

No esquema DNC, se as combinações lineares forem realizadas sobre um campo finito grande o suficiente  $GF(q)$ , pode-se mostrar que a ordem de diversidade de uma rede SISO com  $M$  usuários pode ser aumentada para  $2M - 1$  [13]. Mais especificamente, para uma rede cooperativa com 2 usuários, a probabilidade de *outage* para o esquema DNC é [13]

$$\mathcal{P}_{o,DNC} = 4\mathcal{P}_{o,PL}^3, \quad (6)$$

com ordem de diversidade obtida através de (3)  $D_{DNC} = 3D_{PL}$ , que supera o esquema DF, mantendo a taxa da rede em  $1/2$ . A grande desvantagem fica por conta da taxa  $R_{DNC}$ , que diminui à medida que o número de usuários  $M$  aumenta.

### C. Codificação de Rede Dinâmica Generalizada (GDNC)

Em [14], através de uma analogia entre codificação de rede e códigos corretores de erros clássicos, uma generalização do esquema DNC foi proposta. Além de ser mais flexível em termos de taxa de código, também é capaz de atingir simultaneamente tanto taxa quanto ordem de diversidade mais elevados que no esquema DNC. Esta generalização, chamada de codificação de rede dinâmica generalizada (GDNC), considera que cada usuário da rede difunde  $k_1$  blocos de informação (ao invés de um único bloco no caso do DNC) durante a fase de difusão. Na fase de cooperação, cada usuário transmite  $k_2$  blocos de paridade para o destino, compostos de combinações lineares de toda a informação disponível, combinações estas realizadas sobre um campo finito  $GF(q)$  suficientemente grande.

De acordo com a Fig. 2, que ilustra o protocolo GDNC, a taxa do código de rede é

$$R_{GDNC} = \frac{Mk_1}{Mk_1 + Mk_2} = \frac{k_1}{k_1 + k_2}, \quad (7)$$

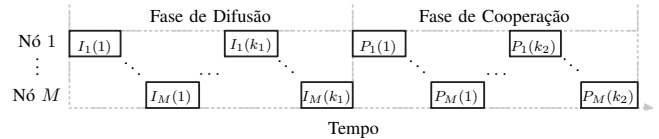


Fig. 2. Protocolo GDNC. Cada usuário primeiramente difunde  $k_1$  blocos de informação  $I_i(t)$  durante a fase de difusão e depois transmite  $k_2$  blocos de paridade  $P_i(t')$  durante a fase de cooperação.

já que  $M(k_1 + k_2)$  blocos são transmitidos, porém somente  $Mk_1$  efetivamente carregam novas informações.

Considerando que todos os canais da rede possuem mesmo valor de  $m$ , a probabilidade de *outage* do esquema GDNC é dada por [14]

$$\mathcal{P}_{o,GDNC} \approx \mu \mathcal{P}_{o,PL}^{M+k_2} \quad (\text{para } k_2 \geq 2), \quad (8)$$

em que  $\mu = \binom{k_1+k_2-1}{k_2}$  corresponde ao coeficiente binomial. Aplicando (8) em (3), percebe-se que a ordem de diversidade do esquema GDNC é

$$D_{GDNC} = D_{PL}(M+k_2). \quad (9)$$

Porém, em redes veiculares, não é real assumir que todos os canais possuem mesmo valor de  $m$ . A Fig. 1 ilustra uma situação em que  $M = 2$  veículos cooperam. O veículo 1 não possui linha de visada para o veículo D, mas possui para o veículo 2, que por sua vez tem linha de visada para o veículo D. Portanto, neste caso é necessário calcular a probabilidade de *outage* total da rede através da combinação das probabilidades de cada canal entre os usuários. Para clarificar o procedimento para o cálculo da probabilidade de *outage*, considere o exemplo a seguir, utilizando o esquema GDNC, para uma rede com  $M = 2$  nós e  $k_1 = k_2 = 2$ .

*Exemplo 1:* Pretende-se calcular a probabilidade de *outage* para a informação do veículo 1, na primeira rodada de transmissão,  $I_1(1)$ . Para o caso em que o canal entre os veículos 1 e 2 falha, com probabilidade  $\mathcal{P}_{o,12}$ , para ocorrer *outage* do bloco  $I_1(1)$  no destino, é necessário que a transmissão direta entre 1 e D também falhe, o que ocorre com probabilidade  $\mathcal{P}_{o,1D}$ , além de  $k_2$  blocos dentre os  $k_2 + k_1 - 1$  restantes do veículo 1, já que existem  $k_1$  informações distintas, e para que uma falha na decodificação ocorra o destino pode receber no máximo  $k_1 - 1$  blocos. Isto resulta em uma probabilidade de *outage*

$$\mathcal{P}_{1,out} = \mathcal{P}_{o,1D}(3\mathcal{P}_{o,1D}^2). \quad (10)$$

Entretanto, quando o canal entre os veículos 1 e 2 não falha, para ocorrer *outage* do bloco  $I_1(1)$ , é necessário que a transmissão direta falhe, além de  $2k_2$  blocos dos  $2(k_2 + k_1) - 1$  blocos restantes dos veículos 1 e 2, com probabilidades  $\mathcal{P}_{o,1D}$  e  $\mathcal{P}_{o,2D}$ , respectivamente, já que existem  $2k_1$  informações distintas, e para que uma falha ocorra nesta situação, o destino pode receber no máximo  $2k_1 - 1$  blocos. A probabilidade de *outage* pode ser aproximada por

$$\mathcal{P}_{1,nout} = \mathcal{P}_{o,1D}(\mathcal{P}_{o,2D}^4 + 4\mathcal{P}_{o,2D}\mathcal{P}_{o,1D}^3). \quad (11)$$

A probabilidade de *outage* total, para o caso de uma rede com  $M = 2$  nós e enlaces assimétricos, seria então dada por

$$\begin{aligned} \mathcal{P}'_{o,\text{GDNC}} &= \mathcal{P}_{1,\text{out}} + \mathcal{P}_{1,\text{nout}} \\ &\approx \mathcal{P}_{o,12}(3\mathcal{P}_{o,1D}^3) + \mathcal{P}_{o,1D}\mathcal{P}_{o,2D}^4 + \\ &\quad 4\mathcal{P}_{o,2D}\mathcal{P}_{o,1D}^4. \end{aligned} \quad (12)$$

A partir de (12) e (3), percebe-se que a ordem de diversidade do esquema GDNC com 2 nós, e com  $m$  não necessariamente igual entre os canais (enlaces assimétricos) é

$$D'_{\text{GDNC}} = D_{\text{PL}} \min(m_{12} + 3m_{1D}, m_{1D} + 4m_{2D}, m_{2D} + 4m_{1D}). \quad (13)$$

Sem perda de generalidade, a mesma análise pode ser realizada para os demais veículos da rede, resultando na mesma expressão (12).

#### IV. MIMO-GDNC

Como apresentado na Seção III, a ordem de diversidade dos esquemas cooperativos depende da ordem de diversidade da camada física. Nesta seção, uma extensão do esquema GDNC será proposta, buscando aumentar  $D_{\text{PL}}$  e consequentemente aumentar a ordem de diversidade da rede. Para tal, considera-se que todos os usuários da rede são equipados com múltiplas antenas. Mais especificamente, devido às restrições de tamanho mencionadas anteriormente, o número de antenas será limitado a  $N_t, N_r \in \{1, 2\}$ . O código espaço-temporal de Alamouti [6] é aplicado sob o esquema GDNC. Optou-se por Alamouti ao invés de *beamforming* ou seleção de antena de transmissão (TAS) [15] por um cenário de difusão estar sendo considerado, além da simplicidade na codificação/decodificação.

Aplicando o código espaço-temporal de Alamouti ao esquema GDNC, seja  $\mathbf{x}_i = [x_i^0 \ x_i^1 \ \dots \ x_i^N]$  o bloco de comprimento  $N$  a ser transmitido pelo usuário  $i$  no esquema GDNC. Para projetar o código espaço-temporal de acordo com o esquema Alamouti, primeiramente divide-se o bloco  $\mathbf{x}_i = [\mathbf{x}_i^0 \ \mathbf{x}_i^1]$  em dois blocos menores, com  $\mathbf{x}_i^0 = [x_i^0 \ \dots \ x_i^{N/2}]$  e  $\mathbf{x}_i^1 = [x_i^{N/2+1} \ \dots \ x_i^N]$ , ambos com comprimento  $N/2$ . Assim, considera-se que os blocos transmitidos  $\mathbf{x}_i$  em (1) são formados da seguinte maneira [6]

$$\mathbf{x}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i^0 & -\mathbf{x}_i^1* \\ \mathbf{x}_i^1 & \mathbf{x}_i^0* \end{bmatrix}_{2 \times N}, \quad (14)$$

em que  $*$  é o complexo conjugado. Considerando combinação de máxima razão (MRC) no receptor, todos os canais sem interferência e mesma SNR média, a probabilidade de *outage* na camada física quando um sistema MIMO  $2 \times 2$  baseado em Alamouti é considerado, é dada por [17]

$$\mathcal{P}_{o,\text{PL}} = \frac{\Gamma\left(4m, \frac{2m(2^r-1)}{\text{SNR}}\right)}{\Gamma(4m)}. \quad (15)$$

Aplicando (15) em (3), é possível mostrar que a ordem de diversidade da camada física se torna  $D_{\text{PL}} = 4m$ .

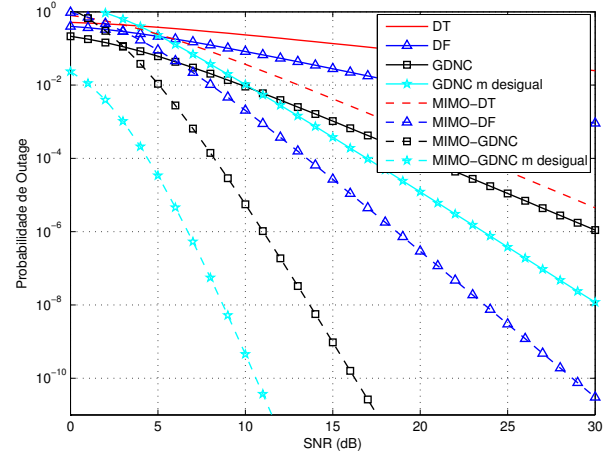


Fig. 3. Probabilidade de *outage* em função da SNR considerando desvanecimento Nakagami  $m = 0.5$  (sub-Rayleigh) para as versões MIMO e não-MIMO dos esquemas DT, DF, GDNC, além de GDNC com  $m_{1D} = 0.5$ ,  $m_{12} = 1.5$ ,  $m_{2D} = 1.5$ , (os 2 últimos com  $k_1 = k_2 = 2$  e  $M = 2$ )

#### A. Probabilidade de Outage e Ordem de Diversidade

A probabilidade de *outage* do esquema MIMO-GDNC proposto pode ser obtida ao aplicar (15) em (8):

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{o,\text{MIMO-GDNC}} &\approx \mu \mathcal{P}_{o,\text{PL}}^{M+k_2} \\ &= \mu \left( \frac{\Gamma\left(4m, \frac{2m(2^r-1)}{\text{SNR}}\right)}{\Gamma(4m)} \right)^{M+k_2}. \end{aligned} \quad (16)$$

De (16) e (3), pode-se mostrar que a probabilidade de *outage* do esquema MIMO-GDNC proposto é dada por

$$\begin{aligned} D_{\text{MIMO-GDNC}} &= D_{\text{PL}}(M + k_2) \\ &= 4m(M + k_2) \end{aligned} \quad (17)$$

$$= 4D'_{\text{GDNC}}. \quad (18)$$

Pode-se perceber que, nesse esquema, os benefícios de códigos espaço-temporais e de codificação de rede são multiplicados, já que a ordem de diversidade é aumentada tanto na camada física, como na camada de rede. Quando  $m$  varia nos canais, pode-se mostrar a a ordem de diversidade é  $D'_{\text{MIMO-GDNC}} = 4D'_{\text{GDNC}}$ .

Para obter a probabilidade de *outage* do esquema MIMO-DF com 2 usuários, basta aplicar (15) em (5), resultando em

$$\mathcal{P}_{o,\text{MIMO-DF}} = 1.5\mathcal{P}_{o,\text{PL-MIMO}}^2 \quad (19)$$

De (19) e (3), percebe-se que a ordem de diversidade é aumentada para  $D_{\text{MIMO-DF}} = 8m$ .

#### V. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, resultados numéricos gerados pelas expressões analíticas previamente obtidas serão apresentados. A potência de transmissão total  $P$  de todos os esquemas é igual, ou seja, cada antena transmite com potência  $P/N_t$ , para fins de comparação justa com demais esquemas.

Como o canal em VANETs pode ser modelado como sub-Rayleigh em algumas situações [5], se torna essencial

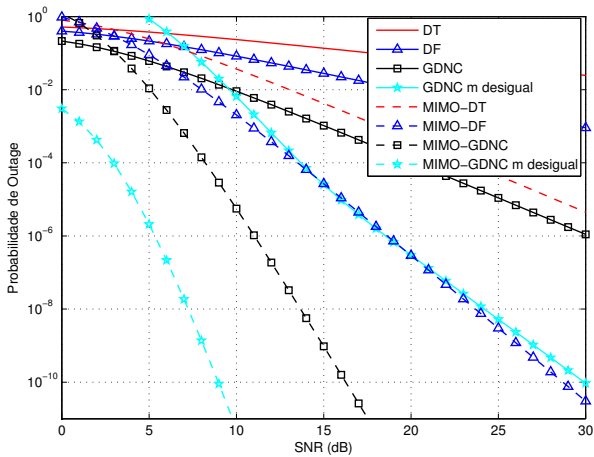


Fig. 4. Probabilidade de *outage* em função da SNR considerando desvanecimento Nakagami  $m = 0.5$  (sub-Rayleigh) para as versões MIMO e não-MIMO dos esquemas DT, DF, GDNC, além de GDNC com  $m_{1D} = 1.5, m_{12} = 1.5, m_{2D} = 0.5$ , (os 2 últimos com  $k_1 = k_2 = 2$  e  $M = 2$ )

projetar esquemas que apresentam desempenho confiável neste cenário. Este caso é avaliado na Fig. 3, que apresenta a probabilidade de *outage* em função da SNR para uma rede com  $M = 2$  veículos cooperadores, com desvanecimento Nakagami  $m = 0.5$ , considerando as versões MIMO e não-MIMO dos esquemas DT, DF, GDNC, além de GDNC com  $m_{1D} = 0.5, m_{12} = 1.5, m_{2D} = 1.5$ , chamado de GDNC com  $m$  desigual. O cenário que possui  $m$  fixo entre todos os veículos é puramente sub-Rayleigh, e o que possui  $m$  variando entre os veículos ilustra o caso da Fig.1, em que o veículo 1 possui um canal sub-Rayleigh com o veículo D, mas possui linha de visada para o veículo 2, que por sua vez possui visada para o veículo D. Percebe-se que o esquema MIMO-GDNC proposto possui o melhor desempenho (assim como ordem de diversidade) em comparação com os demais, além do benefício em ordem de diversidade criado pela cooperação no caso com  $m$  desigual. A aplicação dos valores de  $m$  em (13) resulta em  $D'_{GDNC} = 3$ , superando os esquemas que possuem  $m = 0.5$  em todos os canais:  $D_{GDNC} = m(M + k_2) = 2$ ,  $D_{DF} = 2m = 1$  e  $D_{DT} = m = 0.5$ .

A segunda situação, avaliada na Fig. 4, consiste em uma simples alteração no cenário, mais especificamente em alterar os valores  $m_{1D}$  para 1.5 e  $m_{2D}$  para 0.5, ou seja, o veículo parceiro passa a ter um canal pior com o destino, enquanto o canal direito entre o veículo 1 e o destino passa a ter alguma linha de visada. Percebe-se que o ganho em desempenho e diversidade do GDNC é ainda maior, e mesmo se a comparação fosse realizada com DT e DF com  $m = 1.5$  em todos os canais, o GDNC com  $m$  desigual seguiria em vantagem, já que a ordem de diversidade obtida através de (13) é de  $D'_{GDNC} = 3.5$ , maior que  $D_{DF} = 2m = 3$  e  $D_{DT} = m = 1.5$ .

## VI. COMENTÁRIOS FINAIS

Neste trabalho, avaliou-se o desempenho da utilização de codificação de rede não-binária, aplicada sobre a utilização

códigos espaço-temporais com múltiplas antenas em VANETs cooperativas. Considerou-se desvanecimento Nakagami- $m$ , buscando aumentar a confiabilidade da rede principalmente em diferentes cenários onde a condição do canal é crítica (sub-Rayleigh com  $m < 1$ ), e levou-se em conta inclusive situações em que os canais entre os usuários não são balanceados. Mostrou-se que, para todas os cenários avaliados, cooperação com codificação de rede não-binária e múltiplas antenas (código de Alamouti) aumenta a ordem de diversidade de forma distribuída, superando os demais esquemas existentes na literatura, resultando em uma rede mais confiável.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. M. Artimy, W. Robertson, and W. J. Philips, *Algorithms and Protocols for Wireless, Mobile Ad Hoc Networks*. John Wiley & Sons Inc., 2008, ch. 14, pp. 405–432.
- [2] A. El-Keyi, T. ElBatt, F. Bai, and C. Saraydar, “MIMO VANETs: Research challenges and opportunities,” in *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC'12)*, February 2012, pp. 670–676.
- [3] Z. Wang and M. Hassan, “Network coded repetition: A method to recover lost packets in vehicular communications,” in *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, June 2011.
- [4] Q. Yan, M. Li, Z. Yang, W. Lou, and H. Zhai, “Throughput analysis of cooperative mobile content distribution in vehicular network using symbol level network coding,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 2, pp. 484–492, February 2012.
- [5] L. Cheng, B. Henty, D. Stancil, F. Bai, and P. Mudalige, “Mobile vehicle-to-vehicle narrow-band channel measurement and characterization of the 5.9 ghz dedicated short range communication (dsrc) frequency band,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 8, pp. 1501–1516, oct. 2007.
- [6] S. Alamouti, “A simple transmit diversity technique for wireless communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458, October 1998.
- [7] V. Tarokh, N. Seshadri, and A. Calderbank, “Space-time codes for high data rate wireless communication: performance criterion and code construction,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 44, no. 2, pp. 744–765, mar 1998.
- [8] C. Mecklenbrauker, A. Molisch, J. Karedal, F. Tufvesson, A. Paier, L. Bernado, T. Zemen, O. Klomp, and N. Czink, “Vehicular channel characterization and its implications for wireless system design and performance,” *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 7, pp. 1189–1212, July 2011.
- [9] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, “User cooperation diversity: Part I and Part II,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1948, November 2003.
- [10] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, December 2004.
- [11] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. Yeung, “Network information flow,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, 2000.
- [12] L. Xiao, T. Fuja, J. Kliewer, and D. Costello, “A network coding approach to cooperative diversity,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3714–3722, October 2007.
- [13] M. Xiao and M. Skoglund, “Multiple-user cooperative communications based on linear network coding,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 12, pp. 3345–3351, December 2010.
- [14] J. L. Rebelatto, B. F. Uchôa-Filho, Y. Li, and B. Vucetic, “Multi-user cooperative diversity through network coding based on classical coding theory,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 60, no. 2, pp. 916–926, February 2012.
- [15] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [16] Z. Wang and G. Giannakis, “A simple and general parameterization quantifying performance in fading channels,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 8, pp. 1389–1398, August 2003.
- [17] A. Mehdodniya and S. Aissa, “Outage and ber analysis for ultrawideband-based wpan in nakagami- $m$  fading channels,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 7, pp. 3515–3520, September 2011.