Método Distribuído de Seleção de *Relays* em Redes Cooperativas Utilizando Lógica *Fuzzy* para Otimização da Vazão e Tempo de Vida

Guilherme de Santi Peron, Glauber Gomes de Oliveira Brante, Richard Demo Souza

Resumo— Este artigo apresenta um novo algoritmo de seleção de *relays* utilizando lógica *fuzzy*. O algoritmo proposto é distribuído, sem necessidade de uma entidade central, e multiobjetivo, uma vez que busca maximizar tanto o tempo de vida da rede quanto a vazão fim-a-fim. O método baseia-se em duas informações de entrada: informação instantânea do canal entre o *relay* e o destino e a energia residual de sua bateria. Como resultado, o algoritmo atribui um grau de relevância a cada *relay*, de forma que o *relay* com maior grau de relevância é escolhido para retransmitir a mensagem da fonte. Os resultados demonstram que um aumento considerável no tempo de vida da rede pode ser obtido, sem comprometer a vazão fim-a-fim.

Palavras-Chave—Redes Cooperativas, Vazão, Tempo de Vida, Lógica *Fuzzy*.

Abstract— This paper presents a new relay selection algorithm using fuzzy logic. The proposed algorithm is distributed, without the need of a central entity, and multi-objective, since it aims to maximize both network lifetime and end-to-end throughput. The method is based on two inputs: instantaneous channel state of the relay-destination link and the residual energy of its battery. As a result, the algorithm assigns a relevance degree to each relay, such that the relay with a higher relevance is chosen to forward the source message. Results show that a considerable increase in the network lifetime can be obtained without compromising the end-to-end throughput.

Keywords— Cooperative Networks, Throughput, Network Lifetime, Fuzzy Logic.

I. INTRODUÇÃO

Devido à facilidade de instalação e mobilidade, o uso de sistemas de comunicações sem-fio vem aumentando. Entretanto, distorções introduzidas pelo canal, como o desvanecimento, são comuns nestes sistemas [1]. Para combater os efeitos do desvanecimento, utiliza-se técnicas como a exploração da diversidade espacial [2]. Uma das maneiras de se atingir tal diversidade é por meio do uso de múltiplas antenas de transmissão e/ou recepção, mas elas devem estar devidamente espaçadas no transmissor e no receptor. Porém, dispositivos com tamanho reduzido não dispõem de área para a implantação de muitas antenas devidamente espaçadas. Por sua vez, comunicação cooperativa [3]–[5] é capaz de obter diversidade espacial sem a necessidade de múltiplas antenas. Comunicação cooperativa está baseada no modelo canal *relay* [6], que é composto por: uma fonte, o destino e um nó *relay*, que auxilia a comunicação entre a fonte e o destino.

Quando múltiplos usuários estão disponíveis na rede semfio, pode-se permitir que todos os nós atuem de maneira cooperativa, de forma que não haja apenas um, mas múltiplos relays. Assim, um maior número de caminhos independentes para a comunicação estará disponível e, consequentemente, a probabilidade que algum dos relays esteja em boas condições de retransmitir aumenta. Por outro lado, a complexidade do protocolo de comunicação também aumenta, uma vez que é necessária a coordenação eficaz entre a fonte e os múltiplos relays para uma comunicação sem colisões. Em um sistema cooperativo que opera de forma ortogonal no tempo, assumese que fonte e *relay* transmitem em instantes diferentes e que apenas um relay é escolhido para transmitir. Logo, deve-se estabelecer um critério para escolher qual relay irá transmitir. Dentre os critérios existentes, pode-se citar a abordagem oportunista [7], [8], que prioriza a vazão do sistema, em que o relay com melhor canal é escolhido para cooperar; bem como a abordagem aleatória [9], que prioriza o tempo de vida da rede, em que o relay é escolhido de forma aleatória de modo a distribuir o consumo. No algoritmo oportunista há uma perda considerável no tempo de vida para um alto ganho na vazão fim-a-fim. Já no algoritmo aleatório há uma perda considerável na vazão fim-a-fim para um alto ganho no tempo de vida.

Neste artigo, propõe-se um algoritmo de seleção multiobjetivo que, além de buscar uma alta vazão, também procura aumentar o tempo de vida da rede. O algoritmo proposto é do tipo distribuído, roda de forma independente em cada nó, sem necessidade de uma entidade central, levando em conta tanto a informação instantânea do canal quanto a informação da energia restante em cada nó. O algoritmo de seleção de *relays* proposto é capaz de priorizar tanto o tempo de vida da rede quanto a vazão fim-a-fim. Como estas duas características são bastante importantes em uma rede sem-fio, buscou-se otimizá-las em conjunto, sem o comprometimento de uma para beneficiar a outra. Os resultados obtidos mostram que o algoritmo proposto atinge tempo de vida bastante próximo do algoritmo aleatório, ao mesmo tempo apresentando valores de vazão fim-a-fim muito próximos ao esquema oportunista.

O restante do artigo é organizado da seguinte maneira: na Seção II é apresentado o modelo do sistema. A Seção III descreve técnicas de seleção de *relays*, enquanto a Seção IV introduz o método proposto. Os resultados numéricos são mostrados na Seção V. Por fim, a Seção VI conclui o artigo.

Guilherme de Santi Peron, Glauber Gomes de Oliveira Brante e Richard Demo Souza, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil, E-mails: guiperon@gmail.com, gbrante@ieee.org, richard@utfpr.edu.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.

II. MODELO DO SISTEMA

Considera-se um sistema composto por K nós sensores denotados por S_k , $1 \le k \le K$, e um destino (D) fixo. Assumese que os nós estejam aleatoriamente distribuídos sobre um segmento de reta de comprimento unitário, em que o destino se encontra em uma das extremidades. Todos os nós sensores podem assumir o papel de fonte ou *relay*, sendo que todos os nós atuam como fonte por um certo período. O canal é modelado como sendo Rayleigh quase-estático e assumese que a informação sobre o estado instantâneo do canal é disponível nos receptores. O ruído é aditivo Gaussiano branco (AWGN), com variância $N_0/2$ por dimensão. Por fim os nós são do tipo *half-duplex* e operam de forma ortogonal no tempo.

A transmissão cooperativa é feita usando o protocolo IDF (*Incremental Decode-and-Forward*) [3] em que há um canal de retorno entre o destino e os demais nós. O nó $i \in$ $\{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ funcionando como fonte transmite um bloco de dados **x**, que é recebido simultaneamente pelos demais nós $j \neq i, j \in \{S_1, S_2, \dots, S_K, D\}$. O sinal recebido pelo nó j é dado por:

$$\mathbf{y}_{ij} = \sqrt{Pg_{ij}\mathbf{x}} + \mathbf{w},\tag{1}$$

onde P é a potência de transmissão usada pelos nós, $g_{ij} = \sqrt{\left(\frac{1}{d_{ij}}\right)^{\alpha}} \times h_{ij}, d_{ij}$ é a distância entre os nós $i \in j, \alpha$ é o coeficiente de perda de percurso, h_{ij} é uma variável aleatória Rayleigh, e **w** é o ruído.

O destino detecta se a palavra recebida contém erros. Em caso afirmativo envia um pedido de retransmissão pelo canal de retorno, o qual é assumido livre de erros. O nó que vai retransmitir é determinado por um algoritmo de seleção, que pode envolver critérios de desempenho, consumo, etc.

Uma falha, ou *outage*, na transmissão do nó *i* para *j* ocorre se $\mathcal{I}_{ij} < R$, onde \mathcal{I}_{ij} é a informação mútua entre os nós *i* e *j* e *R* é a taxa de transmissão. Supondo símbolos pertencentes a uma distribuição Gaussiana e banda unitária [2]:

$$\mathcal{I}_{ij} = \log_2 \left(1 + \frac{P|g_{ij}|^2}{N_0} \right),$$
(2)

A probabilidade de *outage* entre os nós $i \in j \notin [2]$:

$$\mathcal{P}_{ij} = \Pr{\{\mathcal{I}_{ij} < R\}} = 1 - \exp\left(\frac{N_0(2^R - 1)}{P|g_{ij}|^2}\right),$$
 (3)

onde $Pr{\theta}$ é a probabilidade do evento θ ocorrer.

Uma métrica importante nesta análise é a vazão fim-a-fim, que é a taxa útil média vista pelo destino. Como no protocolo IDF há um canal de retorno entre o destino e os demais nós, nem sempre uma retransmissão é necessária. Desta forma, a vazão instantânea pode assumir os valores R, R/2 ou 0. Se a transmissão original da fonte (transmissão direta) for realizada com sucesso, a vazão instantânea é R. Se a transmissão direta falhar e o *relay* reencaminhar o pacote corretamente para o destino, a vazão é R/2. Para os demais casos a vazão é nula. Supondo que tenha sido possível selecionar um nó para atuar como *relay* e que este nó tenha conseguido decodificar com sucesso o pacote enviado pela fonte, a vazão fim-a-fim é:

$$\mathcal{T} = R(1 - \mathcal{P}_{iD}) + \frac{R}{2} \mathcal{P}_{iD} \left(1 - \mathcal{P}_{kD}\right), \qquad (4)$$

onde $i \in \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ representa o nó que está funcionando como fonte, e $k \neq i, k \in \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ representa o nó que foi selecionado para atuar como *relay*.

Outra métrica importante é o tempo de vida da rede, que pode ser definido de várias maneiras. Neste trabalho adota-se a definição de tempo de vida como sendo o tempo até que o primeiro nó deixe de operar, ou seja, até que algum nó tenha sua bateria completamente drenada [10], [11].

III. SELEÇÃO DE RELAYS

Os algoritmos de seleção de *relays* em redes cooperativas com múltiplos usuários têm sido foco de diversos trabalhos [12]–[15]. Um tutorial sobre diversos algoritmos de seleção de *relays* propostos na literatura é apresentado em [12], onde se compara os algoritmos em termos de eficiência energética, complexidade e desempenho.

O algoritmo aleatório [9] é o que possui a menor sofisticação. O *relay* é escolhido de forma aleatória entre os usuários disponíveis na rede. Em termos de consumo de energia, este algoritmo tem a vantagem de não sobrecarregar nenhum nó que esteja em boas condições de transmissão, distribuindo igualmente o tráfego de dados. Porém este algoritmo não é ótimo tanto em termos de vazão quanto em taxa de erro de bit. Outra estratégia de seleção mais elaborada para maximizar o tempo de vida da rede é aquela apresentada em [13], onde os nós são modelados como vendedores de energia e cada nó estabelece um preço para sua transmissão de acordo com a quantidade de energia residual. Desta forma, o *relay* é selecionado de modo a minimizar o custo total de transmissão. Os resultados demonstram que um aumento significativo no tempo de vida pode ser alcançado.

Algoritmos de seleção que buscam diminuir a taxa de erro são estudados em, por exemplo, [14], em que os autores se baseiam apenas na relação sinal-ruído média vista pelo receptor. Os algoritmos propostos possuem taxas de erro consideravelmente menores que o algoritmo de seleção aleatório, porém nenhuma consideração é feita em relação ao consumo de energia dos nós. Recentemente, o uso de lógica fuzzy em algoritmos de seleção foi considerado em [15], onde considerase uma rede celular em que um conjunto de relays em boas condições são selecionados de acordo com a relação sinalruído no enlace relay-destino e com o atraso médio. Neste caso, a comunicação é estabelecida utilizando todos os relays selecionados, usando a técnica de códigos espaço-temporais distribuídos [16]. Entretanto, os relays são modelados como torres fixas, portanto sem limitações de energia, de modo que o consumo não é analisado.

Quando códigos espaço-temporais distribuídos não são utilizados, o algoritmo oportunista [7], [8] é o que proporciona o desempenho ótimo em termos da vazão¹. A escolha do melhor *relay* no algoritmo oportunista é feita da seguinte forma: considerando-se que os enlaces são simétricos ($g_{ij} = g_{ji}$), é possível que cada *relay* S_i estime seu canal g_{S_iD} através da mensagem de NACK recebida do destino. De posse

¹O uso de códigos espaço-temporais distribuídos não será considerado neste artigo, visto que tais códigos demandam grande complexidade em termos de sincronização, o que é bastante difícil de ser alcançado na prática.

desta informação, cada *relay* aguarda um intervalo de tempo $t_{S_i} \propto \frac{1}{g_{S_iD}}$ antes de retransmitir. Desta forma, o nó com a melhor condição de canal será o primeiro a retransmitir. Os demais nós, ao perceberem que uma transmissão já está em curso, permanecem ociosos, evitando colisão de pacotes. Este algoritmo é bastante eficiente em termos de vazão, visto que sempre o *relay* com melhores condições é escolhido para retransmissão. Entretanto, *relays* em boas condições serão constantemente requisitados para retransmitir, de forma que o tempo de vida destes nós tende a ser reduzido.

Portanto, os algoritmos encontrados na literatura em geral maximizam ou o tempo de vida da rede ou a vazão. Considerando que tanto vazão quanto tempo de vida são duas características bastante importantes em redes sem-fio, neste trabalho propõe-se um algoritmo de seleção de *relays* multiobjetivo, que busca otimizar as duas métricas em conjunto.

IV. MÉTODO PROPOSTO

O algoritmo proposto leva em conta duas variáveis de entrada: a informação do estado instantâneo do canal (g_{S_iD}) e a energia residual de cada nó (E_i) . Como variável de saída, classifica-se o nó atribuindo-lhe um grau de relevância, $f(g_{S_iD}, E_i)$, para a sua atuação como *relay*. Dado que a otimização a ser realizada é multi-objetivo, optou-se por utilizar lógica *fuzzy*, uma vez que pode-se estabelecer níveis de abstração, facilmente modificáveis, para as duas variáveis a serem otimizadas [17], [18].

Para a informação do estado instantâneo do canal, utilizase três níveis de classificação: Ruim, Médio e Bom, conforme a Figura 1. A partir da figura pode-se observar que para $g_{S_iD} \leq 2$ o canal é classificado como *Ruim*, para $g_{S_iD} \geq 6$ o canal é classificado como Bom e para qualquer valor entre 2 e 6 é feita uma combinação entre as classificações Ruim, Médio e Bom, ponderadas por suas pertinências (eixo das ordenadas). Por exemplo, se $g_{S_iD} = 3,5$ esta variável é classificada como Ruim com pertinência 0,3 e Média com pertinência 0,7, e ambas são levadas em conta no processo. A definição dos limites para estas regiões se baseia na distribuição do canal. Primeiro considerou-se o ponto médio como sendo 50% da função densidade de probabilidade no nosso cenário, $\bar{g}_{S_iD} = 1, 5$. Porém, como a relação entre a realização do canal e a vazão fim-a-fim é não-linear, resultados numéricos mostraram que $g_{S_iD} = 4$ como ponto médio apresenta um melhor resultado do ponto de vista de vazão, com um mínimo comprometimento do tempo de vida. De forma semelhante, a energia residual é expressa de forma percentual, classificada como Baixa, Média e Alta conforme a Figura 2. Como considera-se que a relação entre a energia consumida da bateria e a potência de transmissão efetivamente utilizada é linear, o ponto médio foi projetado para 50% de carga da bateria.

De acordo com as classificações obtidas para g_{S_iD} e E_i , determina-se o grau de relevância do *relay* $f(g_{S_iD}, E_i)$, de acordo com a Tabela I, também ilustrado na Figura 3. Por exemplo, considere que para um dado *relay* $g_{S_iD} = 3,5$ e $E_i = 80$. O canal é classificado como *Ruim* com pertinência 0,3 e *Médio* com pertinência 0,7. Já a energia é classificada como *Alta* com pertinência 1. A saída será dada



Fig. 1. Variável de entrada: estado instantâneo do canal (g_{S_iD}) .



Fig. 2. Variável de entrada: energia residual (E_i) .

pela combinação dos dois pares *Ruim-Alta* e *Médio-Alta*, que conforme a Tabela I resultam em *Médio* e *Alto*, respectivamente. O grau de pertinência de cada uma das combinações geradas pela tabela será dado pelo menor grau do par g_{S_iD} - E_i , neste exemplo em particular será *Médio* com pertinência 0,3 e *Alto* com pertinência 0,7, que são representados pela regiões hachuradas da Figura 3. O resultado numérico final desta operação, $f(g_{S_iD}, E_i)$, é dado pelo cálculo do centro de gravidade da união das áreas hachuradas [17].

TABELA I TABELA DE REGRAS

| $E_i \setminus g_{S_iD}$ | Ruim | Médio | Bom |
|--------------------------|-------------|-------|------------|
| Baixa | Muito Baixo | Baixo | Baixo |
| Média | Baixo | Médio | Alto |
| Alta | Médio | Alto | Muito Alto |

No demais, o algoritmo proposto funciona de forma semelhante ao oportunista, exceto que, antes de se realizar uma retransmissão, cada *relay* aguarda um intervalo de tempo $t_{R_i} \propto \frac{1}{f(g_{S_iD}, E_i)} + \zeta$, em que ζ é uma variável Gaussiana



Fig. 3. Variável de saída: grau de relevância do relay $(f(g_{S_iD}, E_i))$.

de média nula e variância pequena em relação ao grau de relevância médio, para evitar colisão caso mais de um *relay* tenha o mesmo valor de grau de relevância². Dessa forma, o algoritmo proposto faz a seleção de *relays* de forma distribuída, uma vez que cada nó decide sobre sua própria atuação.

V. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, compara-se o desempenho do algoritmo aleatório, do algoritmo oportunista e do algoritmo proposto em termos de tempo de vida e vazão. Definiu-se a energia inicial $E_i = 1000$ J, igual para todos os nós, a potência usada para cada transmissão é fixa, dada por P = 1 W e o coeficiente de perda de percurso é $\alpha = 3$. Os três algoritmos foram simulados utilizando-se o método de Monte Carlo, e usou-se $\sigma_c^2 = 0, 1$.

A Figura 4 mostra os resultados obtidos em termos de tempo de vida quando varia-se o número de nós de K = 5 até K = 20, e R = 1b/s. A relação sinal-ruído normalizada no enlace fonte-destino é 0dB. A partir da figura, pode-se perceber que o algoritmo proposto obteve um resultado bastante satisfatório, melhorando consideravelmente o tempo de vida com relação ao algoritmo oportunista, se aproximando do algoritmo aleatório. Também pode-se perceber que o algoritmo oportunista tem o pior resultado, porque relays em melhores condições tendem a ser mais requisitados, consumindo mais rapidamente suas baterias. O aumento expressivo do tempo de vida ao se utilizar o método proposto se deve ao fato deste algoritmo também levar em consideração a energia residual dos nós, priorizando não somente relays com boas condições de transmissão, mas também nós que estejam com maior carga restante. De forma semelhante, a Figura 5 mostra os resultados obtidos quando R = 3b/s. Pode-se observar que as mesmas conclusões se mantêm, com o algoritmo proposto obtendo tempo de vida ainda mais próximo do algoritmo aleatório.

A Figura 6 mostra os resultados obtidos em termos da vazão fim-a-fim para K = 5 nós e R = 1b/s, em função da relação sinal-ruído normalizada. A partir da figura, pode-se perceber que o algoritmo proposto se aproxima bastante do



Fig. 4. Tempo de vida da rede para taxa de transmissão R = 1b/s.



Fig. 5. Tempo de vida da rede para taxa de transmissão R = 3b/s.

algoritmo oportunista, melhorando consideravelmente a vazão em relação ao algoritmo aleatório. Na Figura 7, apresenta-se a mesma comparação quando o número de nós é K = 20. A partir da figura pode-se notar que o algoritmo oportunista tem um pequeno ganho na região de baixa e média relação sinal-ruído normalizada. Entretanto, a partir de -13dB pode-se perceber que o desempenho do algoritmo proposto é muito próximo do algoritmo oportunista. Desta forma, observa-se que o algoritmo proposto tem um ganho considerável no tempo de vida sem perder em termos de vazão, especialmente em média e alta relação sinal-ruído normalizada, que é em geral a região de operação que se deve buscar em um sistema de comunicações³. Considerando-se outros valores para R as mesmas conclusões podem ser obtidas, conforme ilustrado pela Figura 8 quando R = 3b/s e K = 20 nós.

VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentou-se um algoritmo distribuído de seleção de *relays* utilizando lógica *fuzzy*, que não requer a

²Note que para combinações *Ruim-Baixa* e *Bom-Alta*, mesmo para diferentes g_{S_iD} e E_i o resultado final da operação *fuzzy* pode ser igual.

³Operar em baixa Eb/N0 com uma taxa R em geral é pior do que operar em média-alta Eb/N0 para uma outra taxa R' < R. Este é o princípio da modulação adaptativa [2].



Fig. 6. Vazão fim-a-fim do sistema com K = 5 nós e R = 1b/s.



Fig. 7. Vazão fim-a-fim do sistema com K = 20 nós e R = 1b/s.

participação de uma entidade central de controle ou troca de informações entre os nós. O algoritmo é multi-objetivo e leva em conta tanto o estado instantâneo do canal entre os nós e o destino quanto a energia residual de cada nó. O algoritmo proposto permite que se obtenha tempo de vida muito próximo ao obtido pelo algoritmo aleatório, e vazão fim-a-fim muito próxima daquela obtida pelo algoritmo oportunista em média e alta relação sinal-ruído. Assim, é possível estender o tempo de vida da rede, ao mesmo tempo em que o desempenho não é sensivelmente afetado.

REFERÊNCIAS

- [1] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. Prentice-Hall, 2002.
- [2] A. Goldsmith, Wireless Communications, 1st ed. Cambridge University Press, 2005.
- [3] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dec. 2004.
- [4] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity - part I: System description," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, Nov. 2003.



Fig. 8. Vazão fim-a-fim do sistema com K = 20 nós e R = 3b/s.

- [5] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74–80, October 2004.
- [6] E. C. van der Meulen, "Three-terminal communication channels," Advances Applied Probability, vol. 3, pp. 120–154, 1971.
- [7] A. Bletsas, A. Khisti, D. Reed, and A. Lippman, "A simple cooperative diversity method based on network path selection," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 659 – 672, Mar. 2006.
- [8] A. Bletsas, H. Shin, and M. Z. Win, "Cooperative communication with outage optimal opportunistic relaying," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no. 9, pp. 3450 – 3459, Sep. 2007.
- [9] K. Zarifi, M. Abuthinien, A. Ghrayeb, and S. Affes, "Relay selection schemes for uniformly distributed wireless sensor networks," pp. 237–242, 2009. [Online]. Available: http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1688345.1688388
- [10] Z. Zhou, S. L. Zhou, and J. H. Cui, "Energy-efficient cooperative communication based on power control and selective single-relay in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 8, pp. 3066–3078, August 2008.
- [11] Y. Chen and Q. Zhau, "On the lifetime of wireless sensor networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 9, no. 11, pp. 976–978, November 2005.
- [12] S. Abdulhadi, M. Jaseemuddin, and A. Anpalagan, "A survey of distributed relay selection schemes in cooperative wireless ad hoc networks," *Wireless Personal Communications*, pp. 1–19, 2010, 10.1007/s11277-010-0174-6. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/s11277-010-0174-6
- [13] F. Ke, S. Feng, and H. Zhuang, "Relay selection and power allocation for cooperative network based on energy pricing," *IEEE Communications Letters*, vol. 14, no. 5, May 2010.
- [14] Z. Lin and E. Erkip, "Relay search algorithms for coded cooperative systems," in *IEEE Global Telecommunications Conference*, 2005.
- [15] M. S. Kaiser, I. Khan, F. Adachi, and K. Ahmed, "Fuzzy logic based relay search algorithm for cooperative systems," in *First International Communication Systems and Networks and Workshops*, Jan. 2009, pp. 1–7.
- [16] J. Laneman and G. Wornell, "Distributed space-time coded protocols for exploiting cooperative diversity in wireless networks," in *IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 1, Nov. 2002, pp. 77–81.
- [17] G. Klir and T. Forger, Fuzzy Sets, Uncertainty and Information. Prentice Hall, 1988.
- [18] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," Information and Control, vol. 8, pp. 338–352, 1965.