

Esquema STBC Cooperativo com Eleição Nebulosa Aplicado a Redes de Sensores de Vídeo sem Fio

Marcelo Portela Sousa, Jimmy Felipe G. dos Santos, Virgínio Velloso Freire,
Waslon Terllizzie A. Lopes e Marcelo Sampaio de Alencar
Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom), Campina Grande, Brasil
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Brasil
E-mails: {marcelo.portela,jimmy.santos,virginio.freire}@ee.ufcg.edu.br
{waslon,malencar}@dee.ufcg.edu.br

Resumo—Redes de Sensores de Vídeo sem Fio (*Wireless Video Sensor Networks* – WVSNs) têm se popularizado devido a diversas aplicações como, vigilância por vídeo, monitoramento ambiental e de *habitat*, etc. Transmissões de vídeo por WVSNs necessitam de uma ampla largura de banda, além de que o tempo de vida da rede precisa ser suficientemente longo para suprir as necessidades da aplicação projetada. Neste artigo, os autores apresentam um sistema integrado para WVSNs, utilizado para vigilância, que combina o uso da diversidade cooperativa adaptativa e lógica nebulosa (*fuzzy logic*) para a eleição de coordenadores de grupo. Os Códigos de Bloco Espaço-Temporais (*Space-Time Block Codes* – STBC) Cooperativos são utilizados para alcançar a diversidade completa com um simples algoritmo de decodificação por máxima verossimilhança. A comparação do desempenho entre o sistema proposto e um esquema não-cooperativo é apresentada, considerando o tempo de vida da rede, a qualidade dos vídeos transmitidos, e o número de retransmissões necessárias em diversos cenários de propagação. Resultados de simulações demonstram a superioridade de desempenho do sistema proposto.

I. INTRODUÇÃO

Recentemente, nós sensores têm sido equipados com pequenas câmeras, de baixo custo e que utilizam pouca energia, para capturar e transmitir vídeos por meio de Redes de Sensores de Vídeo sem Fio (*Wireless Video Sensor Networks* – WVSNs), o que resulta em captura e processamento de vídeo de melhor qualidade do que as aplicações em que dispositivos de sensores isolados são utilizados. Tipicamente, sensores de vídeo possuem dimensões físicas reduzidas e se comunicam por distâncias curtas. Cada nó sensor captura cenas de vídeo e as transmite para uma estação base central ou nó destino [1].

Uma cenário de aplicação interessante para WVSNs são os sistemas de monitoramento [2], [3], [4]. Por exemplo, sensores de vídeo e áudio podem ser utilizados para complementar sistemas existentes de vigilância contra o crime e ataques terroristas. Uma rede de sensores de vídeo em larga escala pode aumentar a capacidade de instituições policiais em monitorar áreas de acesso, eventos públicos, propriedades privadas e fronteiras [5].

Entretanto, as limitações em termos de suprimento de energia, capacidade de memória e poder de processamento implicam na necessidade de protocolos com a utilização eficaz de recursos. A taxa de geração de dados em um sensor de vídeos é alta, além de que a largura de banda e o consumo de energia para transmissão sem fio são grandes. Em geral, redes

de sensores devem ter um tempo de vida suficiente para suprir as necessidades da aplicação projetada. Diversos métodos para prolongar o tempo de vida das redes de sensores sem fio têm sido propostos [6].

Protocolos baseados em agrupamento (*clustering*) são métodos eficazes para a economia de energia, em que os nós formam grupos [7]. Em cada grupo, um nó sensor é eleito o coordenador (*cluster head*), o qual coleta informações sensorizadas dos outros nós dentro do grupo, agrega esses dados e envia os dados processados ao nó destino. Em estratégias de agrupamento, o processo de eleição de um coordenador de grupo é uma questão fundamental e tem impacto significativo no consumo geral de energia da rede. Estratégias que utilizam lógica nebulosa (*fuzzy logic*) [8], [9] para essa eleição podem estender a vida útil de uma rede de sensores de vídeo sem fio. Kim *et. al.* apresentaram um mecanismo da eleição de coordenadores de grupo usando lógica nebulosa (*Cluster Head Election mechanism using Fuzzy logic* – CHEF) [10], um esquema para eleição localizada que utiliza regras **SE-ENTÃO** da lógica nebulosa e reduz os cabeçalhos computacionais. Considerando as variáveis nebulosas *Energia* e *Distância local*, CHEF define a variável *Chance*, que indica a probabilidade de um nó eleger-se coordenador de grupo naquela rodada e estender o tempo de vida da rede. Kim *et. al.* demonstraram que CHEF supera o esquema clássico *Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy* (LEACH) [11], pois a eleição dos coordenadores, diferentemente da proposta do LEACH, não é apenas baseada em escolhas aleatórias.

Além da limitação dos recursos de energia e de processamento, o desvanecimento causado por múltiplos percursos de propagação pode degradar, significativamente, o desempenho dos sistemas de comunicações em WVSNs [12]. Nesse contexto, o protocolo de Pedido de Repetição Automática (*Automatic Repeat Request* – ARQ) é uma maneira efetiva para combater o desvanecimento do canal, no qual a Verificação da Redundância Cíclica (*Cyclic Redundancy Check* – CRC) é usada para detectar erros e retransmissões são solicitadas se o pacote for recebido de maneira incorreta. Na prática, o número máximo de retransmissões é limitado para minimizar o atraso fim a fim e o tamanho do *buffer*, e essa variante de ARQ é denominada protocolo ARQ truncado [13].

As técnicas de diversidade também podem melhorar o

desempenho dos sistemas de comunicações, visto que réplicas dos sinais transmitidos são disponibilizadas para o nó destino. Uma maneira de utilização de esquemas de diversidade é pelo uso dos Códigos de Bloco Espaço-Temporais (*Space-Time Block Codes* – STBC), um paradigma para comunicações em canais com desvanecimento Rayleigh, que utiliza múltiplas antenas [14], [15]. STBC provê a diversidade completa com baixa complexidade de codificação e de decodificação [16].

Todavia, devido ao reduzido tamanho dos nós sensores e das restrições de energia presentes na rede, a aplicação das técnicas de diversidade pelo uso de múltiplas antenas pode ser inviável. Para superar essa limitação novas formas de diversidade espaço-temporal, em que ganhos de diversidade são encontrados por meio da cooperação dos nós, têm sido apresentadas [17], [18]. Lin *et. al.* propuseram o esquema de diversidade cooperativa seletiva com ARQ (*Selective Cooperative diversity with ARQ* – SCA), no qual o ganho de diversidade cooperativa adaptativa pode ser alcançado e a propagação do erro é evitada [19].

Neste artigo, os autores aplicam e avaliam o desempenho de um esquema STBC Cooperativo em uma rede de sensores de vídeo sem fio para aplicações de vigilância. O sistema opera de forma distribuída e colaborativa, permitindo retransmissões apenas quando erros ocorrem e apenas os coordenadores de grupo que recebem os pacotes corretamente são habilitados a cooperar. O processo de eleição dos coordenadores de grupo utiliza a lógica nebulosa para otimizar o consumo de energia da rede. O desempenho relativo ao tempo de vida da rede, qualidade dos vídeos transmitidos e o padrão de retransmissões são avaliados e comparados com um esquema de transmissão não-cooperativo.

O restante do artigo está organizado da seguinte maneira: a Seção II provê uma visão geral do processo de eleição nebulosa utilizado. A Seção III descreve as configurações do sistema projetado. A operação do STBC Cooperativo está descrita na Seção IV. Resultados de simulações são discutidos na Seção V e as conclusões e perspectivas de trabalhos futuros são mostradas na Seção VI.

II. LÓGICA NEBULOSA PARA ELEIÇÃO DE COORDENADORES DE GRUPO

A lógica nebulosa é uma ferramenta matemática que se baseia em variáveis qualitativas (*e.g.*, alto e baixo), em contraste com a natureza quantitativa dos valores *crisp* (*i.e.*, valores numéricos não nebulosos). Esta é uma abordagem adequada para lidar com incertezas de medidas realizadas em sistemas de comunicações, que são afetados por erros em precisão e exatidão. Outra vantagem importante da lógica nebulosa é que ela, tipicamente, requer poucos recursos computacionais [20].

Na lógica nebulosa, as decisões são baseadas em *inferências nebulosas*. O processo de inferência nebulosa opera com *proposições* SE-ENTÃO ou *regras de produção*, que são utilizadas para determinar o valor de variáveis de saída por meio de um raciocínio aproximado [9]. As condições SE são formadas por predicados da forma “X é A”, em que X é uma variável linguística (*e.g.*, SNR, energia, atraso) e A é um termo

linguístico (*e.g.*, alto, baixo, muito baixo), e operadores lógicos (E, OU e NÃO), enquanto que as sentenças ENTÃO são predicados básicos que indicam o atributo da saída nebulosa.

As regras de produção são projetadas para atuar sobre as variáveis linguísticas [9]. Na prática, a medição de variáveis corresponde a números reais, o que requer um processo de transcrição de números reais para termos linguísticos (processo de *fuzzificação*), assim como a transformação de termos linguísticos para números reais (processo de *defuzzificação*).

Para a eleição de coordenadores de grupo, o sistema proposto utiliza o protocolo CHEF. Por meio da lógica nebulosa, o custo envolvido com a formação e transmissão de cabeçalhos computacionais pode ser reduzido e o tempo de vida da rede de sensores de vigilância pode ser prolongado.

No protocolo CHEF, os nós calculam o valor da variável *chance* utilizando regras nebulosas SE-ENTÃO [10] e anunciam uma mensagem para os nós candidatos, denotada *Candidate_Message*, que contém a variável *chance*. Isso significa que o nó sensor é um candidato a coordenador de grupo com o valor de *chance*. Após o nó sensor anunciar sua *Candidate_Message*, ele aguarda *Candidate_Message* dos outros nós. Se sua própria chance de eleição for maior do que as chances de outros nós, este nó sensor anuncia uma declaração de liderança do grupo, denotada *CH_Message*, o que significa que o nó sensor se elegeu coordenador do grupo. Se um nó que não é um coordenador de grupo receber a mensagem *CH_Message*, o nó seleciona o coordenador de grupo mais próximo como seu coordenador e envia uma mensagem para associar-se ao grupo, denotada *Cluster_Join_Message*.

Para calcular o valor de *chance*, CHEF utiliza dois conjuntos nebulosos e as regras nebulosas SE-ENTÃO. A primeira variável nebulosa usada para determinar *chance* é a energia residual do nó sensor. A segunda variável é *Distância local*, que é a soma das distâncias entre o nó candidato e outros nós que estão dentro de um raio de alcance específico de transmissão [10].

Energia possui uma prioridade maior do que *Distância local*, conforme está mostrado nas regras nebulosas SE-ENTÃO da Tabela I. Um maior valor de *chance* significa que o nó apresenta maior probabilidade de se tornar um coordenador de grupo. Por exemplo, na Regra 3 o nó tem baixa energia residual e a soma das distâncias entre o nó candidato e outros nós é um valor baixo (os outros nós do grupo estão perto). Então a chance de ser eleito um coordenador de grupo é levemente baixa. Por outro lado, na Regra 7 o nó apresenta valores altos de energia residual e distância local (os outros nós estão menos concentrados). Logo, a chance de ser eleito um coordenador de grupo é levemente alta. O motivo é que *Energia* é mais importante do que *Distância local*, já que apresenta um impacto mais direto no tempo de vida da rede. Por simplicidade, a variável nebulosa *chance* é defuzzificada (transformada em um número *crisp*) pelo uso do método Centro da Área (*Center of Area* – CoA) [9], o que corresponde a calcular o centróide da saída nebulosa. As funções de pertinência adotadas para as variáveis nebulosas são triangulares e trapezoidais, por causa do requisito de

Tabela I
REGRAS NEBULOSAS (SE-ENTÃO)

Regra	SE		ENTÃO
	Energia	Distância Local	Chance
1	Baixa	Distante	Muito Baixa (MB)
2	Baixa	Média	Baixa (B)
3	Baixa	Próxima	Pouco Baixa (PB)
4	Média	Distante	Pouco Média (PM)
5	Média	Média	Média (M)
6	Média	Próxima	Muito Média (MM)
7	Alta	Distante	Pouco Alta (PA)
8	Alta	Média	Alta (A)
9	Alta	Próxima	Muito Alta (MA)

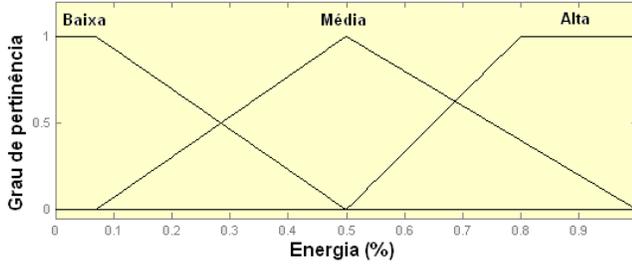


Figura 1. Funções de pertinência para a variável *Energia*.

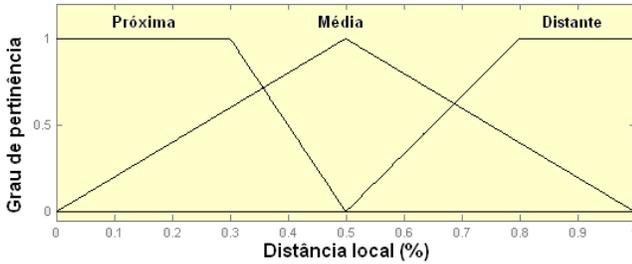


Figura 2. Funções de pertinência para a variável *Distância local*.

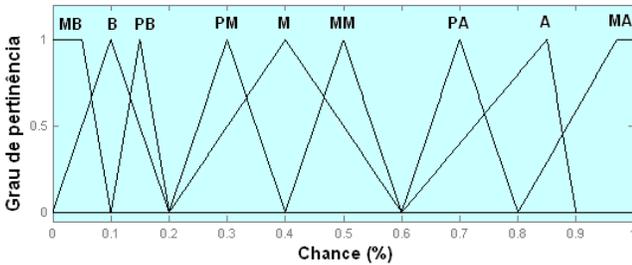


Figura 3. Funções de pertinência para a variável *Chance*.

simplicidade de processamento, e estão representadas nas Figuras 1, 2 e 3.

III. A CONFIGURAÇÃO DA REDE

Considere uma rede que utiliza a transmissão ortogonal para alcançar o ganho de diversidade [16]. Cada nó tem um ou mais parceiros. O nó e seus parceiros são responsáveis não só pela sua própria informação, mas também pela informação proveniente de seus parceiros. Portanto, um arranjo virtual de antenas é obtido com o uso de antenas de nós de cooperação

(uma única antena por nó sensor), sem a necessidade de um projeto mais complexo utilizando várias antenas em apenas um único nó [19]. A propagação de erros pode ser evitada, já que apenas os candidatos a parceiros que detectam corretamente o pacote recebido são selecionados para assumirem a função de cooperação (os nós que podem participar da retransmissão). Além disso, a cooperação de nós é adotada apenas quando o receptor falha em detectar o pacote corretamente. Portanto, a diversidade cooperativa é empregada de uma maneira seletiva e adaptativa.

A rede de sensores de vídeo projetada para aplicações de vigilância é homogênea e a distância entre os nós pode ser medida baseada na potência do sinal de rádio sem fio [21]. Além disso, é considerado que o nó destino está dentro do alcance de transmissão de todos os nós. A rede é formada por K nós e cada nó é equipado com uma antena e uma câmera. Entre os K nós, Q são coordenadores de grupo na rodada correspondente, eleitos pelo algoritmo CHEF. $Q - 1$ coordenadores de grupo ociosos ficam disponíveis como possíveis nós de cooperação para o coordenador fonte durante a transmissão do pacote.

O coordenador fonte transmite o pacote de dados com um CRC anexado e o nó destino detecta o CRC. O reconhecimento positivo (ACK) ou negativo (NACK) é enviado de volta para o coordenador fonte, a partir do nó destino. Ao mesmo tempo, todos os $Q - 1$ candidatos a parceiros (*relay candidates*) verificam o CRC do pacote recebido e os que detectam resultados positivos são selecionados coordenadores parceiros. Se o pacote é corretamente detectado pelo nó destino (com retorno ACK), o coordenador fonte continua a transmitir um novo pacote de dados e o processo anterior é repetido. Caso contrário, a retransmissão é iniciada. Ambos o coordenador fonte e os parceiros retransmitem conjuntamente o pacote, utilizando um STBC ortogonal cooperativo adequado. A comunicação entre o coordenador fonte e o nó destino está sujeita ao desvanecimento Rayleigh plano.

A retransmissão continua até o pacote ser entregue com sucesso, ou o número de retransmissões exceder N_r^{\max} , que é um parâmetro pré-selecionado que indica o máximo número de retransmissões permitidas por pacote. O valor de N_r^{\max} depende da aplicação projetada. Geralmente, WVSNs precisam prover serviços diferenciados entre aplicações de tempo-real/tolerante-a-atraso, e aplicações tolerantes -à-perda/não-tolerantes-à-perda [5].

IV. CÓDIGOS DE BLOCO ESPAÇO-TEMPORAIS COOPERATIVOS

O esquema de Alamouti [15] é o primeiro STBC a prover uma diversidade completa para sistemas com duas antenas transmissoras. Nessa seção, a operação do STBC cooperativo é descrita, com base na comunicação entre dois coordenadores de grupo transmissores e um nó destino receptor, utilizando a codificação STBC. Cada um deles utiliza apenas uma antena, para atender às limitações em tamanho e energia dos nós sensores, e o esquema de modulação adotado é o QPSK.

Inicialmente, um dos coordenadores de grupo mapeiam o símbolo x_1 da constelação e o outro mapeia o símbolo x_2 .

Então, eles transmitem esses respectivos símbolos no período de tempo um e, no período de tempo dois, eles transmitem $-x_2^*$ e x_1^* , respectivamente. A palavra-código transmitida é dada por:

$$\mathcal{X} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Os coeficientes de ganho dos percursos provenientes dos coordenadores transmissores um e dois para o nó destino são α_1 e α_2 , respectivamente. Desse modo, o decodificador no nó destino recebe os sinais y_1 e y_2 nos períodos de tempo um e dois, respectivamente, de modo que

$$\begin{cases} y_1 = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \eta_1 \\ y_2 = -\alpha_1 x_2^* + \alpha_2 x_1^* + \eta_2. \end{cases} \quad (2)$$

Para um esquema de detecção coerente, em que o nó destino conhece os ganhos de percursos do canal α_1 e α_2 , a detecção por máxima verossimilhança precisa minimizar a métrica de decisão

$$|y_1 - \alpha_1 x_1 - \alpha_2 x_2|^2 + |y_2 + \alpha_1 x_2^* - \alpha_2 x_1^*|^2, \quad (3)$$

sobre todos os possíveis valores de x_1 e x_2 . Esse esquema de decodificação necessita de uma busca completa sobre todos os pares possíveis (x_1, x_2) e geralmente sua complexidade cresce exponencialmente com o número de coordenadores transmissores. Expandindo a função custo (3), é possível ignorar o termo em comum $|y_1|^2 + |y_2|^2$. Logo, a métrica (3) é decomposta em duas partes, em que uma delas, dada por [16]

$$|x_1|^2 \sum_{n=1}^2 |\alpha_n|^2 - [y_1 \alpha_1^* x_1^* + y_1^* \alpha_1 x_1 + y_2 \alpha_2^* x_1 + y_2^* \alpha_2 x_1^*], \quad (4)$$

é uma função apenas de x_1 , e a outra, dada por

$$|x_2|^2 \sum_{n=1}^2 |\alpha_n|^2 - [y_1 \alpha_2^* x_2^* + y_1^* \alpha_2 x_2 - y_2 \alpha_1^* x_2 - y_2^* \alpha_1 x_2^*], \quad (5)$$

depende de x_2 . Então, em vez de minimizar a função custo (3) sobre todos os valores possíveis de (x_1, x_2) , o receptor pode minimizar simultaneamente as funções custo (4) e (5) sobre todos os valores possíveis de x_1 e x_2 , respectivamente. O resultado é o crescimento linear da complexidade de decodificação com relação ao número de coordenadores de grupo transmissores, em vez de exponencialmente. Além disso, já que os símbolos da constelação possuem a mesma energia, por ser um esquema QPSK, os termos $|x_1|^2 \sum_{n=1}^2 |\alpha_n|^2$ e $|x_2|^2 \sum_{n=1}^2 |\alpha_n|^2$ podem ser ignorados. De fato, o nó destino precisa minimizar

$$|x_1 - y_1 \alpha_1^* - y_2^* \alpha_2|^2 \quad (6)$$

para decodificar x_1 e minimizar

$$|x_2 - y_1 \alpha_2^* + y_2^* \alpha_1|^2 \quad (7)$$

para decodificar x_2 . Portanto, a decodificação consiste, inicialmente, em calcular a seguinte equação

$$\begin{cases} \tilde{x}_1 = y_1 \alpha_1^* + y_2^* \alpha_2 \\ \tilde{x}_2 = y_1 \alpha_2^* - y_2^* \alpha_1. \end{cases} \quad (8)$$

Para decodificar x_1 o nó destino aloca o símbolo mais próximo de \tilde{x}_1 na constelação. Similarmente, a decodificação de x_2 consiste em alocar o símbolo mais próximo de \tilde{x}_2 na constelação [16].

V. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A rede de sensores projetada é composta de 50 nós. Os nós são depositados aleatoriamente sobre uma área de 50×50 metros. O nó destino está localizado nas coordenadas $x = 25$ e $y = 150$ metros. O projeto considera que cada nó possui uma energia inicial de 3 mJ. O modelo de dissipação de energia consumida pelo rádio usado para as simulações é baseado no modelo apresentado em [11]. O rádio gasta $E_{elec} = 50$ nJ/bit para a utilização dos circuitos de transmissão e recepção e $\epsilon_{amp} = 100$ pJ/bit/m² para o amplificador de transmissão atingir uma determinada energia por bit aceitável $\frac{E_b}{N_0}$ (é considerada a perda de energia relacionada com o quadrado da distância r^2). Usando este modelo de rádio, para transmitir uma mensagem de k bits por uma distância d , o rádio gasta [11]

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec} \cdot k + \epsilon_{amp} \cdot k \cdot d^2 \quad (9)$$

e para receber essa mensagem, o rádio gasta:

$$E_{Rx}(k) = E_{elec} \cdot k. \quad (10)$$

A avaliação de desempenho das transmissões de vídeo sobre a WWSN de vigilância considera que câmeras digitais estão embarcadas nos nós, que são depositados na área monitorada. Os vídeos de um grupo específico são concentrados e processados no coordenadores de grupo correspondentes. As simulações consideram que após a agregação e processamento dos vídeos no coordenador de grupo, os dados resultantes correspondem ao vídeo Hall, com 300 quadros, e sob o formato QCIF (176×144). O quadro de número 104 do vídeo Hall está apresentado na Figura 5. Uma comparação entre o sistema proposto (STBC Cooperativo) e um sistema não-cooperativo é utilizada na avaliação de desempenho. O sistema não-cooperativo utiliza transmissões diretas (sem STBC). Ambos os sistemas utilizam um esquema de ARQ truncado e o processo de eleição nebulosa descrito na Seção II. Um CRC com $C = 16$ bits é utilizado, com um gerador polinomial cíclico de $G_{CRC16}(D) = D^{16} + D^{12} + D^5 + 1$. QPSK é o esquema de modulação adotado e o número máximo de retransmissões nas simulações é $N_r^{max} = 4$. Todos os algoritmos foram implementados em Matlab 7.

O número de rodadas para a primeira e última inativação de nós, como função de valores de SNR do canal considerado, está apresentada na Figura 4. Para melhores condições do canal (maiores valores de SNR), o tempo de vida é estendido, já que menos erros ocorrem e menos retransmissões são necessárias. Para todas as condições de propagação, o esquema STBC Cooperativo apresenta um desempenho melhor, pois maiores valores de tempo de vida são alcançados.

Para avaliar a qualidade dos vídeos transmitidos sobre a rede, a métrica Razão Sinal-Ruído de Pico (*Peak Signal-to-Noise Ratio* – PSNR) é utilizada, como função de sete valores

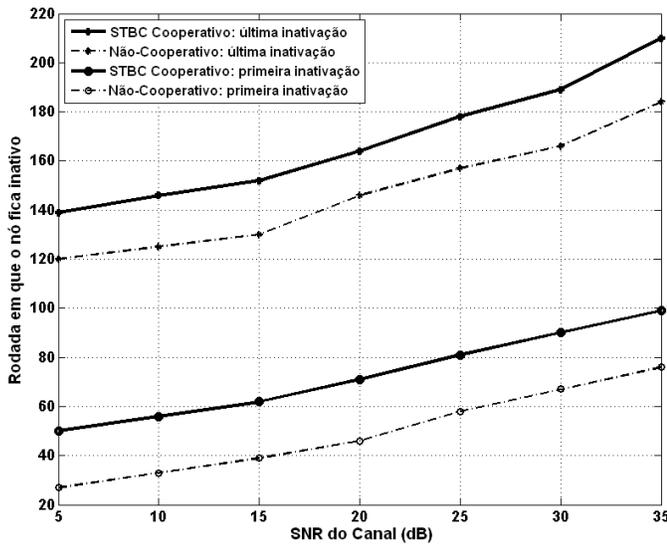


Figura 4. Número de rodadas para a primeira e última inativação de nós, como uma função dos valores de SNR do canal considerado.

de SNR do canal considerado. Exemplos de quadros recebidos para a SNR de 15 dB estão ilustrados nas Figuras 6 and 7. Pode ser percebido que os quadros transmitidos pelo sistema proposto apresentam melhor qualidade subjetiva nas condições de propagação consideradas. A avaliação objetiva por meio da PSNR está apresentada na Figura 8. Para todos os cenários, o sistema STBC Cooperativo apresenta melhor desempenho, já que maiores valores de PSNR indicam superioridade na relação entre a potência do sinal e a potência do ruído.



Figura 5. Quadro 104 do vídeo Hall.



Figura 6. Quadro recebido sob um esquema não-cooperativo e o canal com SNR=15 dB.



Figura 7. Quadro recebido sob o esquema STBC Cooperativo e o canal com SNR=15 dB.

A avaliação do número necessário de retransmissões como uma função da SNR do canal e de N_r^{\max} é mostrada na

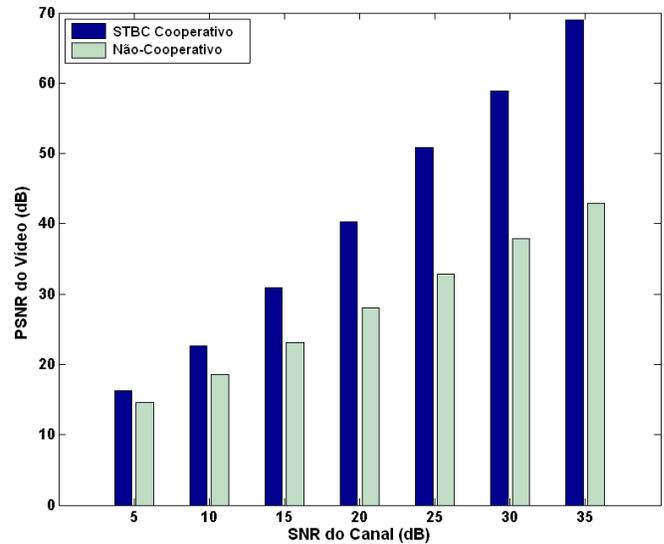


Figura 8. PSNR do vídeo Hall como uma função da qualidade do canal.

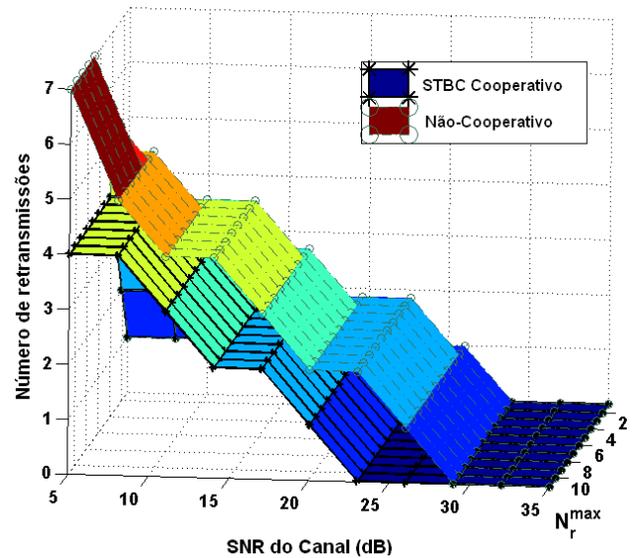


Figura 9. Número de retransmissões necessárias, para a entrega correta do pacote, como função da SNR do canal e do número máximo de retransmissões permitidas.

Figura 9. Para baixos valores de N_r^{\max} e de SNR, o desempenho dos sistemas sob comparação é similar. Entretanto, ao aumentar N_r^{\max} ou a SNR do canal, o sistema STBC Cooperativo requer menos retransmissões do que o sistema não-cooperativo, o que indica um melhor desempenho do sistema proposto. Essa métrica de avaliação está bastante relacionada com o atraso fim a fim de transmissão e com a vazão (*throughput*) do sistema. Um número maior de retransmissões necessárias aumenta o atraso para a correta entrega do pacote e diminui a vazão da rede. Logo, o esquema STBC Cooperativo apresenta menor atraso fim a fim, assim como maior vazão de dados.

Neste artigo, os autores propuseram um sistema de Rede de Sensores de Vídeo sem Fio para fins de vigilância. O sistema utiliza Códigos de Bloco Espaço-Temporais Cooperativos com um processo de eleição nebulosa para melhorar a qualidade dos vídeos transmitidos, aumentar o tempo de vida da rede e diminuir o atraso fim a fim das transmissões. O sistema combina o uso da diversidade cooperativa adaptativa e o protocolo CHEF. A melhoria de desempenho do sistema integrado está relacionada ao fato de que o STBC auxilia no combate aos efeitos indesejáveis do desvanecimento presente nos canais de comunicações sem fio, o que também otimiza a utilização de energia na rede, já que menos retransmissões são necessárias para a transmissão correta dos pacotes. Por sua vez, o protocolo CHEF reduz os cabeçalhos computacionais e aumenta o tempo de vida da rede. Cada nó é equipado com um dispositivo de câmera. O projeto é baseado na arquitetura de agrupamento e, para cada rodada, coordenadores de grupo são eleitos seguindo o algoritmo de eleição nebulosa do protocolo CHEF. O sistema proposto garante que a diversidade cooperativa (pelo uso de STBC) seja executada apenas quando o nó destino recebe incorretamente um pacote proveniente do coordenador fonte. Coordenadores parceiros são selecionados com base nos resultados do processo de ARQ truncado. A análise de desempenho considerou um canal com desvanecimento Rayleigh plano. A rede de sensores simulada foi composta por 50 nós, dispostos em uma área de 50×50 metros. Os desempenho dos sistemas STBC Cooperativo e do não-cooperativo para Redes de Sensores de Vídeo sem Fio foram comparados com base em três métricas: o tempo de vida da rede, considerando sete cenários de propagação com diferentes valores de SNR; a PSNR entre os vídeos gerados e transmitidos na rede; e o número necessário de retransmissões em função da SNR do canal e do número máximo de retransmissões permitidas. O sistema proposto demonstrou um melhor desempenho, quando comparado a um sistema não-cooperativo, por permitir que a WWSN projetada desempenhe as funções de monitoramento de vigilância sob um maior tempo de vida, maiores valores de PSNR dos vídeos transmitidos e menor atraso fim a fim.

Na continuação deste trabalho, os autores pretendem entender o sistema proposto para atender redes de sensores de vídeo com múltiplos saltos. Essa característica é especialmente desejada se o nó destino não está ao alcance de transmissão de todos os nós da rede. A implementação física do esquema proposto também será realizada, de modo a melhorar os sistemas de vigilância existentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom), à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por apoiarem esse trabalho.

- [1] A. Fallahi and E. Hossain. QoS provisioning in wireless video sensor networks: a dynamic power management framework. *IEEE Wireless Communications*, 14(6):40–49, December 2007.
- [2] M. Chitnis, Y. Liang, J. Zheng, P. Pagano, and G. Lipari. Wireless line sensor network for distributed visual surveillance. In *Proceedings of the 6th ACM symposium on Performance evaluation of wireless ad hoc, sensor, and ubiquitous networks (PE-WASUN'09)*, pages 71–78, 2009.
- [3] T. He, S. Krishnamurthy, J. Stankovic, T. Abdelzaher, L. Luo, R. Stoleru, T. Yan, and L. Gu. Energy-efficient surveillance system using wireless sensor networks. In *International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (MobiSys'04)*, pages 270–283, 2004.
- [4] D. Dudek, C. Haas, A. Kuntz, M. Zitterbart, D. Kruger, P. Rothenpieler, D. Pfisterer, and S. Fischer. A wireless sensor network for border surveillance. In *SenSys '09: Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 303–304, 2009.
- [5] I. F. Akyildiz, T. Melodia, and K. R. Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Computer Networks*, 51(4):921 – 960, 2007.
- [6] G. Anastasi, M. Conti, M. Francesco, and A. Passarella. Energy conservation in wireless sensor networks: A survey. *Ad Hoc Networks*, 7(3):537–568, May 2009.
- [7] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, 38:393–422, 2002.
- [8] Lotfi A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3):338–353, 1965.
- [9] Lotfi A. Zadeh. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning – I. *Information Sciences*, 8(3):199–249, 1975.
- [10] J. Kim, S. Park, Y. Han, and T. Chung. CHEF: Cluster Head Election mechanism using Fuzzy logic in Wireless Sensor Networks. In *10th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT'08)*, pages 654–659, 2008.
- [11] W. R. Heinzelman, A. Chandrakasan, and H. Balakrishnan. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2:10 pp., Jan. 2000.
- [12] B. Liu, B. Otis, S. Challa, P. Axon, C. Chou, and S. Jha. On the fading and shadowing effects for wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Mobile Adhoc and Sensor Systems (MASS'06)*, pages 51–60, Oct. 2006.
- [13] E. Malkamaki and H. Leib. Performance of truncated type-II hybrid ARQ schemes with noisy feedback over block fading channels. *IEEE Transactions on Communications*, 48(9):1477–1487, Sep 2000.
- [14] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank. Space-time block codes from orthogonal designs. *IEEE Transactions on Information Theory*, 45:1456–1467, 1999.
- [15] S. M. Alamouti. A simple transmit diversity technique for wireless communications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(8):1451–1458, 1998.
- [16] H. Jafarkhani. *Space-time coding. Theory and Practice*. Cambridge University Press, 2005.
- [17] M. P. Sousa, C. Regis, W. T. A. Lopes, and M. S. Alencar. Diversidade cooperativa adaptativa aplicada a redes de sensores sem fio. In *8th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS'09)*.
- [18] M. P. Sousa, A. Kumar, M. S. Alencar, and W. T. A. Lopes. Scalability in an adaptive cooperative system for wireless sensor networks. In *IEEE International Conference on Ultra Modern Telecommunications Workshops (ICUMT 2009)*, St. Petersburg, Russia, 2009.
- [19] Lin Dai and K. Letaief. Throughput maximization of ad-hoc wireless networks using adaptive cooperative diversity and truncated ARQ. *IEEE Transactions on Communications*, 56(11):1907–1918, November 2008.
- [20] N. Baldo and M. Zorzi. Fuzzy logic for cross-layer optimization in cognitive radio networks. *Communications Magazine, IEEE*, 46(4):64–71, April 2008.
- [21] A. Boukerche, H. A. B. F. Oliveira, E. F. Nakamura, and A. A. F. Loureiro. A novel lightweight algorithm for time-space localization in wireless sensor networks. In *Proceedings of the 10th ACM Symposium on Modeling, analysis, and simulation of wireless and mobile systems (MSWiM '07)*, pages 336–343, 2007.