

Alocação de Potência e Emparelhamento de Subportadoras em Sistemas Multicanais de 2 Saltos

José Mairton Barros da Silva Júnior

Orientador: Prof. Dr. Francisco Rodrigo P. Cavalcanti

Co-orientador: Prof. Dr. Tarcisio Ferreira Maciel

Co-orientador: Prof. Dr. Yuri Carvalho Barbosa Silva

Universidade Federal do Ceará

5 de novembro de 2012

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação Teórica
- 3 Desenvolvimento do Problema
- 4 Resultados Computacionais e Discussões
- 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Elementos da Comunicação

- A comunicação faz parte de nossa rotina diária:
 - chamada de telefone fixo ou móvel;
 - e-mail na Internet;
 - um programa de TV ou de rádio.

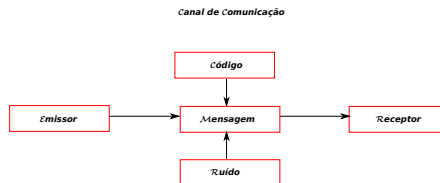


Figura: Elementos do Processo de Comunicação.

Sistemas de Comunicações Atuais

- Como exemplo de sistemas de comunicações sem fio atuais, temos:
 - WLAN, Bluetooth, WiMAX
- Como exemplo de sistemas de comunicações móveis sem fio atuais, temos:
 - 2G, 3G, 4G.

Motivação

- O canal de comunicações móveis sem fio é cheio de desafios, desde a propagação até os serviços oferecidos.
- Para isso, é necessário um avanço nas técnicas utilizadas e nos dispositivos eletrônicos:
 - OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output).
 - Microeletrônica.
- A potência de transmissão é um fator limitante em qualquer sistema de comunicações.

Motivação

- Para a nova geração, 4G, espera-se a utilização de técnicas de cooperação em conjunto com OFDM.
- É possível combinar técnicas de multiplexação e cooperação para um aumento da taxa de transmissão e um controle eficiente da potência de transmissão.
- Originam-se problemas atuais e relevantes do ponto de vista prático.

Objetivos

- União de duas técnicas, multiplexação e cooperação:
 - utilização eficiente da potência de transmissão
 - aumento da taxa.
- É formulado um problema de otimização
 - Objetivo:
 - maximização da taxa
 - Restrições:
 - potência em cada enlace (chamado na literatura de salto);
 - emparelhamento dos canais (chamados de subportadoras).

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação Teórica**
- 3 Desenvolvimento do Problema
- 4 Resultados Computacionais e Discussões
- 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Canal de um Sistema de Comunicações Móveis

- O canal móvel sem fio apresenta muitos desafios, pois são muitos os fenômenos envolvidos na transmissão do sinal.
- Os principais efeitos que atrapalham o canal são:
 - Ruído.
 - Desvanecimento de larga e pequena escala

Critérios de Desempenho de um Sistema de Comunicações Móveis

- Ao desenvolver um sistema de comunicações, o objetivo é enviar o sinal ao usuário com eficiência e confiabilidade.
- Os recursos são limitados:
 - potência de transmissão;
 - largura de banda;
 - custo/complexidade envolvido para criar o sistema.

Critérios de Desempenho de um Sistema de Comunicações Móveis

- Confiabilidade \Rightarrow taxa de erro de bit (BER, *Bit Error Rate*).
- O teorema da capacidade de informação de Shannon

$$C = B \log_2 (1 + SNR) \quad \text{bits/s} \quad (1)$$

onde B é largura de banda do canal, SNR é a relação sinal-ruído e C é a capacidade de informação do canal, definida como a máxima taxa de informação que pode ser transmitida através de um canal sem erros, medida em bits/s.

OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing

- OFDM é uma modulação de multiportadoras que transmite *streams* de banda larga em canais paralelos de banda estreita, chamados de subportadoras.
- Vantagens:
 - Alta eficiência espectral.
 - Fácil implementação.
 - Resistência ao desvanecimento e interferência.
- Desvantagens:
 - Sensibilidade a deslocamentos de frequência.
 - Problema PAR (*Peak-to-Average Ratio*)

Comunicações Cooperativas

- Caminhos independentes entre o usuário e a ERB (Estação Rádio Base) são gerados através da introdução de um repetidor (*relay*).

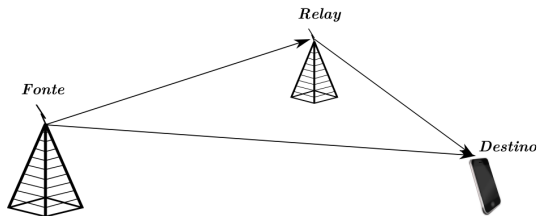


Figura: Um modelo simplificado de comunicação cooperativa.

Comunicações Cooperativas

- Ao transmitir diversas cópias do sinal, é gerada diversidade espacial que pode ser explorada para combater os efeitos do desvanecimento.
- Existem duas principais estratégias de cooperação:
 - AF - Amplify and Forward.
 - DF - Decode and Forward.

Problemas de Otimização

- Um problema de otimização padrão possui a forma:

$$\min f_0(x) \quad (2)$$

$$\text{sujeito a: } f_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \quad (3)$$

$$h_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, p, \quad (4)$$

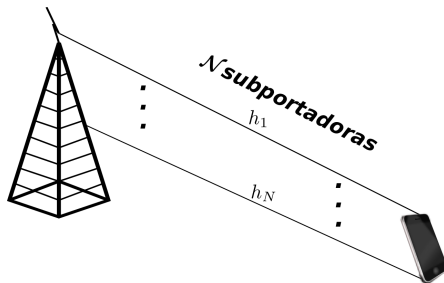
- O vetor x^* é dito uma solução do problema (2), se possuir o menor valor para a função objetivo dentre todos os vetores que satisfazem as restrições.
- Um problema de otimização convexa é aquele onde a função objetivo e funções de restrição são convexas, ou seja, satisfazem à inequação:

$$f_i(\alpha x + \beta y) \leq \alpha f_i(x) + \beta f_i(y) \quad (5)$$

$$\alpha + \beta = 1, \quad \alpha \geq 0, \quad \beta \geq 0. \quad (6)$$

Alocação de Potência

- Um problema clássico em sistemas de comunicações é o da maximização da capacidade ou eficiência espectral em múltiplos canais paralelos



Alocação de Potência

- O problema recai em um problema de alocação de potência, onde deseja-se maximizar a taxa tendo como recurso escasso a potência de transmissão.
- Para o problema de otimização, é importante assumir:
 - O transmissor tem perfeito conhecimento das informações de coeficientes do canal.
 - N é o número de subportadoras, h_n os coeficientes de ganho de canal associados com a subportadora n , p_n é a potência do n -ésimo canal, p_r é a potência do ruído e que a restrição total de potência do transmissor é

$$\sum_{n=1}^N p_n = p_t. \quad (7)$$

Alocação de Potência

- O problema de otimização na forma padrão é escrito como

$$\min \quad -C(p_1, \dots, p_N) = -\sum_{n=1}^N \ln \left(1 + \frac{p_n}{p_r} \|h_n\|^2 \right) \quad (8a)$$

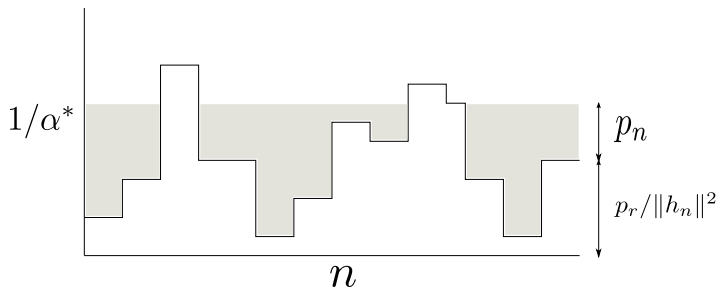
$$\text{sujeito a:} \quad \sum_{n=1}^N p_n = p_t \quad (8b)$$

$$-p_n \leq 0, \quad n = 1, \dots, N. \quad (8c)$$

- O problema é convexo e pode ser solucionado utilizando Otimização Convexa.

Algoritmo Water-Filling

- Chamamos de *water-filling* a solução para o problema (8).



Algoritmo Water-Filling

- A solução pode ser escrita na forma de um algoritmo iterativo e com complexidade polinomial, chamado de *water-filling*.
- Primeiramente é feita a ordenação em ordem decrescente dos canais através de seus ganhos.
- Através de no máximo N iterações o algoritmo encontra a solução ótima para a potência de todas as subportadoras.

Algoritmo Water-Filling

Algorithm 2.1: WATERFILLING(N, p_t, p_r, \mathbf{h})

```

p  $\leftarrow -1$ 
while  $p(N) < 0$ 
    do  $\left\{ \begin{array}{l} \lambda \leftarrow N / (p_t + \sum_{n=1}^N p_r / h^2) \\ \quad \textbf{for } n \leftarrow 0 \rightarrow N \\ \quad \quad \textbf{do } p(n) \leftarrow 1/\lambda - p_r h(n)^2 \\ \quad \quad \textbf{if } p(N) < 0 \\ \quad \quad \quad \textbf{then } N \leftarrow N - 1 \\ \quad p(N) \leftarrow 0 \end{array} \right.$ 
return (p)
  
```

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação Teórica
- 3 Desenvolvimento do Problema**
- 4 Resultados Computacionais e Discussões
- 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Modelo de Sistema

- Considera-se um ambiente multi-canal OFDM com dois saltos, consistindo de uma ERB, uma ER (estação repetidora) fixa e uma EA (estação assinante)
- A estratégia de cooperação utilizada é DF.
- É considerado AWGN, com variância σ^2 percebida por todas as subportadoras em todos os enlaces.
- A eficiência espectral de cada subportadora, e.g. , no enlace ERB-ER é dada por

$$R_i^s(P_i^s) = \frac{1}{2N} \log_2 \left(1 + P_i^s g_i^s \right). \quad (9)$$

Modelo de Sistema

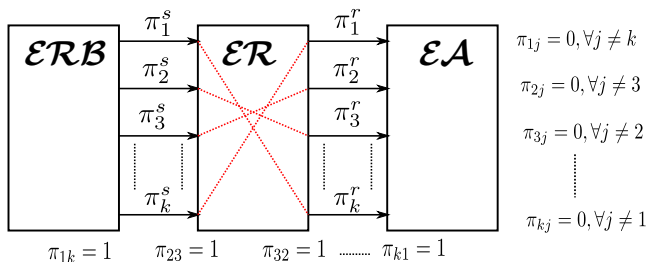


Figura: Esquemático de um ambiente OFDM com dois saltos.

Modelo de Sistema

- O prefixo cíclico OFDM e o tempo de coerência são considerados suficientemente longos e é assumido que todos os nós possuem sincronização de tempo e frequência perfeitos.
- Assume-se conhecimento total das informações do canal na ER.
- O desvanecimento em cada subportadora é independente.
- Consideramos comunicação entre as subportadoras de um para um.

Formulação do Problema

- O problema de otimização conjunto do emparelhamento de subportadoras e alocação de potência pode ser escrito como

$$\min_{P_i^s, P_i^r, \pi_{ij}} - \sum_{i=1}^N \min \left\{ R_i^s(P_i^s), \sum_{j=1}^N \pi_{ij} R_i^r(P_i^r) \right\}, \quad (10a)$$

$$\text{s.t.} \sum_{i=1}^N P_i^s \leq P_t^s, \quad \sum_{j=1}^N P_j^r \leq P_t^r, \quad (10b)$$

$$-P_i^s \leq 0, \forall i, \quad -P_j^r \leq 0, \forall j, \quad (10c)$$

$$\sum_j \pi_j = 1, \forall \quad 1 \leq j \leq N, \quad (10d)$$

$$\pi_{i,j} \in \{0, 1\}. \quad (10e)$$

Alocação de Potência para o Emparelhamento Ótimo

- Após a solução do emparelhamento e utilizando essa relação, o problema pode ser reescrito como:

$$(Q) : \max \sum_{i=1}^N \ln(1 + P_i^s \cdot g_i^s) \quad (11a)$$

$$\text{su}j : \sum_{i=1}^N P_i^s \leq P_t^s, \quad (11b)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{g_i^s}{g_i^r} P_i^s \leq P_t^r, \quad (11c)$$

$$P_i^s \geq 0, \forall i. \quad (11d)$$

Algoritmos Sub-ótimos

- A fim de simplificar a solução do problema (11), foram propostos dois algoritmos sub-ótimos:
 - Water-Filling com Escalonamento de Potência.
 - Water-Filling Mínimo.
- Quando as restrições (11b) ou (11c) não são consideradas, as relaxações propostas são as seguintes:

$$\begin{aligned}
 (Q^s) : \max \sum_{i=1}^N \ln(1 + P_i^s g_i^s) \quad & (Q^r) : \max \sum_{i=1}^N \ln(1 + P_i^r g_i^r) \\
 \text{subj : } \sum_{i=1}^N P_i^s \leq P_t^s, \quad & \text{subj : } \sum_{i=1}^N P_i^r \leq P_t^r, \\
 P_i^s \geq 0, \forall i, \quad & P_i^r \geq 0, \forall i.
 \end{aligned}$$

Water-Filling com Escalonamento de Potência

- A ideia do algoritmo é resolver um dos problemas sugeridos acima, (Q^s) ou (Q^r) , e então escalonar a potência do outro salto.
 - i) Ordene as subportadoras nos enlaces ERB-ER e ER-EA em ordem decrescente e então emparelhe-as em pares pela ordem do ganho.
 - ii) Resolva o problema (Q^s) através do método *water-filling*
 - iii) Ache P_i^s, P_i^r . Verifique se a restrição de potência do enlace ER-EA é violada. Se for violada, escale ambas as potências P_i^s e P_i^r pelo fator $P_t^r / \sum_{i=1}^N P_i^r$.
 - iv) Agora, a eficiência espectral da subportadora i pode ser calculada.
 - v) Repita os passos 2-4 para o enlace ER-EA.
 - vi) Escolha a alocação de potências que maximiza a eficiência espectral entre os enlaces ERB-ER e ER-EA;

Water-Filling Mínimo

- A ideia é solucionar o problema com a menor restrição de potência, e então escalonar a potência do outro enlace, se necessário.
 - i) Ordene as subportadoras nos enlaces ERB-ER e ER-EA em ordem decrescente e então emparelhe-as em pares pela ordem do ganho.
 - ii) Tome a mínima restrição de potência de (Q^s) , (Q^r) e solucione o problema através do método *water-filling*.
 - iii) Verifique se a restrição de potência do outro salto é violada. Se for violada, escale ambos P_i^s e P_i^r por seu respectivo fator.
 - iv) Por fim, a eficiência espectral total do sistema é calculada através da equação:

$$R_i^{s,r}(P_i^{s,r}) = \frac{1}{2N} \log_2(1 + P_i^{s,r} g_i^{s,r}). \quad (12)$$

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação Teórica
- 3 Desenvolvimento do Problema
- 4 Resultados Computacionais e Discussões**
- 5 Conclusão e Trabalhos Futuros

Parâmetros dos Modelos

- Simulações computacionais foram utilizadas para avaliar o modelo proposto.
- A métrica de desempenho utilizada para comparar as diferentes abordagens é a eficiência espectral total entre os saltos ERB-EA.
- Para uma melhor compreensão e análise dos algoritmos propostos, serão utilizadas as siglas EAS (Emparelhamento Aleatório de Subportadoras), EOS (Emparelhamento Ótimo de Subportadoras), AUP (Alocação Uniforme de Potência), EP (Escalonamento de Potência), APM (Alocação de Potência Mínima) e AOP (Alocação Ótima de Potência).

Parâmetros dos Modelos

- Os esquemas comparados são os seguintes:
 - EAS+AUP
 - EOS+AUP
 - EOS+APM
 - EOS+EP
 - EOS+AOP

- Assumimos que cada subportadora experimenta um desvanecimento de Rayleigh independente, com variância unitária e a média do ganho de canal do salto ERB-ER ($E[h_i^s]$) é unitária.
- A eficiência espectral é estimada utilizando a fórmula de Shannon.
- A potência total disponível para todas as subportadoras depende da SNR disponível para cada salto, sendo definida como

$$P_t^s = N_s \overline{\text{SNR}}^s \sigma_N^2 \quad (13)$$

$$P_t^r = N_s \overline{\text{SNR}}^r \sigma_N^2 \quad (14)$$

- Um total de 3000 realizações de canal independentes foram simulados.

Impacto do Número de Subportadoras

- O intervalo de variação do número de subportadoras é $[16, 256]$.
- Em relação à variação do número de subportadoras, foram considerados mais três cenários possíveis:
 - i) Ambiente com $\overline{\text{SNR}} = 5\text{dB}$ em ambos os saltos, onde $\overline{\text{SNR}}$ é a SNR média.
 - ii) Ambiente com $\overline{\text{SNR}} = 20\text{dB}$ em ambos os saltos.
 - iii) Desbalanço de SNR entre os saltos, onde o salto ERB-ER possui $\overline{\text{SNR}} = 20\text{dB}$ e o salto ER-EA $\overline{\text{SNR}} = 15\text{dB}$.

Impacto do Número de Subportadoras

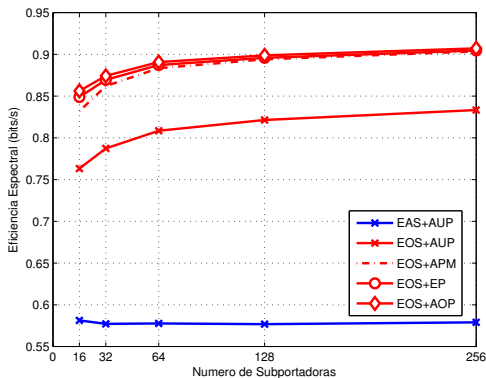
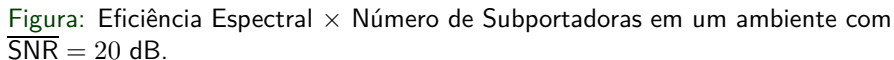


Figura: Eficiência Espectral \times Número de Subportadoras em um ambiente com $\text{SNR} = 5$ dB.



Impacto do Número de Subportadoras

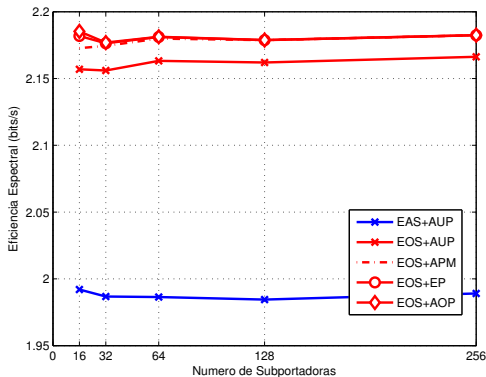


Figura: Eficiência Espectral \times Número de Subportadoras em um ambiente com desbalanço de SNR.

Impacto do Número de Subportadoras

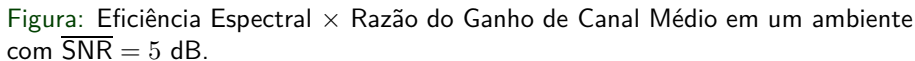
- O algoritmo EOS+EP tem o melhor desempenho dentre todos os algoritmos subótimos analisados e em todos os cenários.
- Ao haver desbalanço de SNR, o algoritmo EOS+APM obtém seus melhores resultados.
- Percebemos que o maior impacto na eficiência espectral é o emparelhamento de subportadoras.

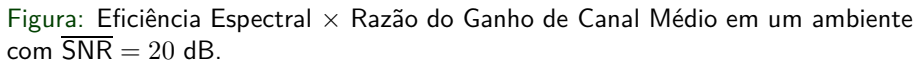
Impacto do Ganho de Canal Médio

- É feito agora a variação dos ganhos de canais médios de ER-EA, avaliando a razão $E[h_i^r]/E[h_i^s]$, mantendo $E[h_i^s] = 1$.
- O intervalo de variação é $[0.1, 5]$ e contém 20 pontos espaçados de forma logarítmica.
- O número de subportadoras foi mantido fixo em 64.

Impacto do Ganho de Canal Médio

- Em relação à variação da razão do ganho de canal médio, foram considerados mais dois cenários possíveis:
 - i) Ambiente com $\overline{\text{SNR}} = 5dB$ em ambos os saltos.
 - ii) Ambiente com $\overline{\text{SNR}} = 20dB$ em ambos os saltos.





Impacto do Ganho de Canal Médio

- É possível perceber o impacto do emparelhamento de suportadoras observando a saturação do algoritmo EAS+AUP.
- O algoritmo EOS+EP obtém novamente os melhores resultados dentre todos os algoritmos subótimos.

- 1 Introdução
- 2 Fundamentação Teórica
- 3 Desenvolvimento do Problema
- 4 Resultados Computacionais e Discussões
- 5 Conclusão e Trabalhos Futuros**

Conclusão

- Problema conjunto de emparelhamento de subportadoras e alocação de potência para sistemas multicanais.
- Separamos em dois subproblemas independentes: emparelhamento de subportadoras e alocação de potência.
- Após o tratamento independente, é possível unificá-los de forma sequencial
emparelhamento de subportadoras \Rightarrow alocação de potência
- Duas relaxações do problema de alocação de potência, permitindo desenvolver dois algoritmos subótimos baseados em Water-Filling.
- Os algoritmos alcançaram ótimos resultados em todos os cenários analisados.

Perspectivas futuras

- Sistemas de transmissão e recepção MIMO com conhecimento perfeito da CSI.
- Esperamos poder dividir o problema em dois independentes e após propor uma solução, unificá-los novamente.

OBRIGADO