

Esquema de Transmissão Alamouti em Rádio Definido por Software

Cláudio Ferreira Dias e Gustavo Fraidenraich

Resumo—Este trabalho tem o objetivo de implementar um esquema de transmissão com duas antenas transmissoras e uma antena receptora baseado em Rádio Definido por Software para fins educacionais. Para mostrar como isso foi possível, começamos estudando alguns conceitos fundamentais da teoria, seguindo por uma descrição geral do sistema e, finalmente, a implementação. A ênfase do texto é dada às estruturas de codificação, decodificação, sincronismo e estimação das condições de canal.

Palavras-Chave—Rádio Definido por Software, Alamouti, MIMO, Sincronismo de Portadora, Estimação de Canal.

Abstract—This work aims to implement a two transmit and one receive antennas scheme based on Software Defined Radio for educational purpose. In order to show how to accomplish it, we start studying some concepts of the theory, followed by a general description of the system and, finally, the implementation. The emphasis of text is over the coding, decoding structures, time synchronism and estimation of channel state.

Keywords—Software Defined Radio, Alamouti, MIMO, Carrier Tracking, Channel Estimation.

I. INTRODUÇÃO

A evolução dos microprocessadores revolucionou diversas áreas da tecnologia. Esta evolução afetou significativamente a maneira de se desenvolver aplicações na área de telecomunicações. No passado, o desenvolvimento de um novo produto era marcado por um processo demorado e custoso. Hoje, o desenvolvimento destas aplicações tornou-se muito produtivo graças ao conceito de Rádio Definido por Software (SDR).

Além disso, o maior conhecimento dos aspectos de propagação também permitiu uma grande evolução nos sistemas de comunicação sem fio. O resultado disso pode ser conferido em um estudo marcante [1] que mostrou como é possível obter um enorme ganho na taxa de transferência de dados com a utilização de múltiplas antenas no enlace de comunicação quando este está sob o efeito de desvanecimento.

Sob a perspectiva destes conceitos, este artigo discute como implementar um sistema de comunicação por múltiplas antenas baseado na utilização de rádio definido por software[2][3]. O esquema de transmissão adotado para esta implementação trabalha com duas antenas de transmissão e uma para recepção. A motivação para o uso desse esquema foi pela simplicidade e a baixa exigência com relação à capacidade de processamento.

De antemão, explicita-se aqui que a proposta deste artigo não é introduzir nenhum novo conceito ou algoritmo e simplesmente mostrar os desafios de uma implementação

prática de um algoritmo conhecido na literatura. Além de servir como comprovação de vários conceitos teóricos, o esquema montado tem a proposta educacional (será usado como laboratório em uma disciplina da graduação de engenharia elétrica) ilustrando os desafios e particularidades de um sistema de comunicação real.

Do ponto de vista comercial, a utilização de múltiplas antenas em produtos de mercado ainda está sendo implementada visto que a norma 802.11n [4] só foi aprovada em 2009.

II. EMBASAMENTO TEÓRICO

A. Rádio Definido por Software

O SDR é um conceito de sistema de rádio comunicação em que os componentes que são tipicamente implementados em hardware (mixers, filtros, amplificadores, moduladores/demoduladores e detectores) são implementados por meio de um software em um computador pessoal ou em computadores embarcados em dispositivos [5].

O SDR representa uma grande mudança no paradigma de projeto para rádio convencional que torna possível a substituição de uma grande porção dos componentes em hardware por códigos de programas. Esta característica permite a alteração dos parâmetros de operação do rádio para acomodar novas características e capacidades. Além disso, o uso de software aumenta a produtividade durante o desenvolvimento de uma aplicação visto que a prototipagem de hardware é bem mais complexa do que a reformulação de códigos de programas. Atualmente é bastante comum as aplicações usarem este conceito e é motivado por muitas vantagens, dentre as quais estão:

- 1) Fácil de projetar
- 2) O hardware é padronizado e de uso geral
- 3) Permite o uso de técnicas avançadas de processamento de sinal
- 4) Exige poucos componentes discretos
- 5) Possui flexibilidade para adicionar funcionalidades extras

B. Codificação e Decodificação Alamouti

O esquema Alamouti [6] é uma técnica simples de diversidade de transmissão que melhora a qualidade do sinal no receptor. Este esquema utiliza duas antenas para transmitir e uma antena para receber. A ordem de diversidade obtida é igual àquela aplicada ao receptor de combinação de máxima razão (MRC)[7] com duas antenas no receptor. O esquema é facilmente generalizado para duas antenas transmissoras e M antenas receptoras para prover uma ordem de diversidade

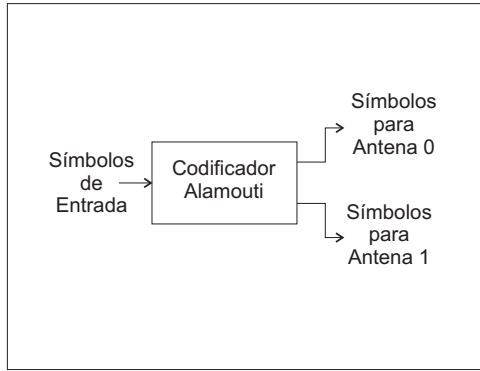


Fig. 1. Diagrama de codificação

de $2M$. Isso é feito sem qualquer realimentação do receptor para o transmissor e com uma complexidade computacional reduzida. O esquema não requer expansão na largura de banda e isso é justificado pela aplicação de redundância no espaço através das múltiplas antenas. A estratégia de transmissão para o esquema Alamouti é mostrado na Figura 1.

A transmissão e codificação de uma sequência ocorre, inicialmente, em um dado período de símbolo. A codificação é feita a cada dois símbolos, sendo que dois sinais são transmitidos simultaneamente a partir de duas antenas. Como resultado temos s_0 na saída da Antena 0 e s_1 na saída da Antena 1, no primeiro intervalo de símbolo. No segundo intervalo de símbolo, tem-se $-s_1^*$ na saída da Antena 0 e s_0^* na saída da Antena 1. A notação s_k^* define o operador conjugado. A sequência é resumidamente mostrada na tabela I.

Tempo	Antena 0	Antena 1
t	s_0	s_1
$t + T$	$-s_1^*$	s_0^*

 TABELA I
 CODIFICAÇÃO ALAMOUTI.

A etapa do decodificador Alamouti recorre a um esquema de combinação de máxima razão [6]. Este esquema pode ser visualizado na Figura 2 que apresenta os sinais de recepção sendo processados por uma estrutura de estimação de canal e um combinador. A saída destas estruturas alimentam um Detector de Máxima Verossimilhança.

No receptor, temos que os sinais recebidos podem ser escritos da seguinte maneira

$$r_0 = r(t) = h_0 s_0 + h_1 s_1 + z_0 \quad (1)$$

$$r_1 = r(t + T) = -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + z_1 \quad (2)$$

onde r_0 e r_1 são os sinais recebidos no tempo t e $t + T$ e z_0 e z_1 são as variáveis aleatórias complexas representando o ruído no receptor. Desta forma, é possível escrever uma combinação dos sinais os quais podem ser enviados para um detector de máxima verossimilhança da seguinte maneira:

$$\tilde{s}_0 = h_0^* r_0 + h_1 r_1^*$$

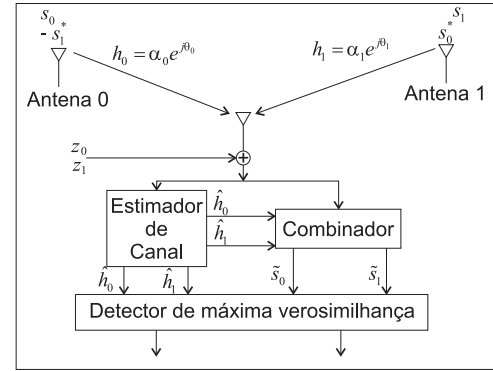


Fig. 2. Estrutura de recepção da codificação Alamouti

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_0 - h_0 r_1^* \quad (3)$$

O trabalho da referência [6], assume que o receptor tem o conhecimento perfeito do canal. A informação do canal pode ser obtida, por exemplo, utilizando símbolos piloto no sinal transmitido [8], [9].

C. Aspectos do Sistema de Comunicação

1) *Rastreamento de Portadora*: O rastreamento de portadora é feito utilizando uma estrutura de algoritmo que extrai do sinal recebido informações sobre a portadora. Este algoritmo é baseado na minimização polinomial [10]. A função de iteração é dada pela seguinte equação.

$$\theta[k + 1] = \theta[k] - \mu \frac{dJ(x)}{dx} \quad (4)$$

Em que $\theta[k + 1]$ é a fase a corrigir, $\theta[k]$ é o último valor calculado, μ é o peso da iteração e $J(x)$ é a função polinomial relacionada ao erro quadrático médio entre o sinal recebido e o sinal rastreador. O sinal rastreador parte de um valor inicial e tende a se igualar ao sinal de portadora que está no sinal recebido. Para este sistema a função para $J(x)$ foi derivada do conhecido algoritmo *Costas Loop*. Assim, $J(x)$, de acordo com [10], pode ser escrita da seguinte maneira:

$$J(\theta) = E \{ (LPF \{ r(kT_s) \cos(2\pi f_0 kT_s + \theta) \})^2 \} \quad (5)$$

onde $E(\cdot)$ indica a função esperança, $LPF(\cdot)$ indica a operação de filtragem por um filtro passa baixas, T_s é o tempo de amostragem e f_0 representa a frequência da portadora gerada no receptor. Sendo assim, a função de iteração para o algoritmo *Costas Loop* pode ser desenvolvida de forma muito semelhante a (4) e pode ser escrita da seguinte forma

$$\theta[k + 1] = \theta[k] - \mu \frac{dJ(\theta)}{d\theta} \quad (6)$$

2) *Estimação de Canal*: A estimação ($\hat{h}[n]$) dos coeficientes do canal ($h[n]$) é feita pelo algoritmo *Least Mean Squares*. A figura 3 ilustra a formulação do problema em um diagrama de blocos:

Assim, temos dois sistemas em paralelo em que $h[n]$ é um filtro (neste caso canal) desconhecido e $\hat{h}[n]$ um filtro adaptativo. A idéia deste algoritmo é encontrar $\hat{h}[n]$ minimizando

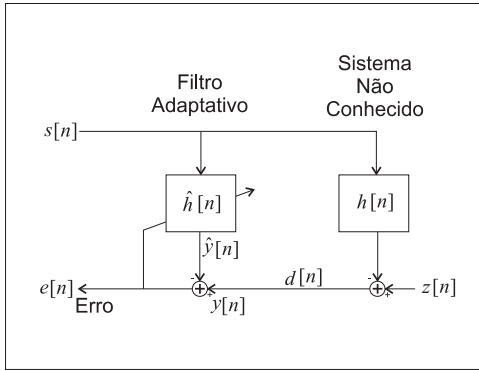


Fig. 3. Diagrama de blocos do estimador de canal.

a média do erro quadrático médio $E[(d[n] - \hat{y}[n])^2]$, onde $\hat{y}[n] = \hat{h}[n] * s[n]$ [11]. Definindo

$$\begin{aligned} y_a[n] &= r_{2n}, & y_b[n] &= r_{2n+1} \\ x_a[n] &= s_{2n}, & x_b[n] &= s_{2n+1} \end{aligned} \quad (7)$$

Em que os subscritos a e b indicam o primeiro e o segundo intervalo de símbolo, respectivamente. As variáveis $x_{a,b}[n]$ e $y_{a,b}[n]$ representam os símbolos de dados transmitidos e recebidos, respectivamente. Este algoritmo pode ser adaptado para o esquema de transmissão Alamouti. Desta forma, o erro pode ser escrito da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} e_a[n] &= \hat{h}_0[n]x_a[n] + \hat{h}_1[n]x_b[n] \\ e_b[n] &= -\hat{h}_0[n]x_b[n] + \hat{h}_1[n]x_a[n] \end{aligned} \quad (8)$$

O algoritmo LMS aplicado neste caso produz as seguintes equações para a estimação dos coeficientes \hat{h}_0 e \hat{h}_1 :

$$\begin{aligned} \hat{h}_0[n+1] &= \hat{h}_0[n] + \mu((y_a[n] - e_a[n])x_a[n] - (y_b[n] - e_b[n])x_b[n]) \\ \hat{h}_1[n+1] &= \hat{h}_1[n] + \mu((y_a[n] - e_a[n])x_b[n] + (y_b[n] - e_b[n])x_a[n]) \end{aligned} \quad (9)$$

onde μ é o passo do algoritmo.

III. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Uma vez descritos os algoritmos básicos do sistema, pasaremos agora a descrever o hardware envolvido no projeto.

O sistema de comunicação conta com dois equipamentos da empresa *National Instruments* dedicados para aplicações em rádio frequência. Um gerador de sinais vetorial PXI-5670 foi usado para a transmissão e um analisador vetorial de sinais PXI-5661 foi usado para a recepção. A Figura 4 mostra a configuração da implementação do esquema de transmissão Alamouti por duas antenas transmissoras e uma antena receptora.



Fig. 4. Equipamentos utilizados

A. Transmissor

O transmissor é um equipamento que consta de um módulo de controle, um módulo processador de sinais e um módulo de rádio. O módulo de controle é um computador do tipo *Personal Computer* (PC) que tem um sistema operacional instalado e um ambiente de programação (*LabVIEW* ou *Matlab*). Nesta etapa os símbolos são carregados, codificados e modulados para uma frequência intermediária. O módulo processador de sinais transforma os sinais processados pelo módulo de controle do domínio discreto para o contínuo. Nesta etapa, os sinais tem uma largura de banda centrado em uma frequência intermediária. O módulo de rádio recebe esses sinais, os transpõe em uma frequência de 2.4GHz e os transmite pelas antenas acopladas ao equipamento.

B. Receptor

O receptor tem características parecidas com o transmissor com exceção dos módulos de rádio e processamento de sinais. O módulo de controle é um computador PC que possui um sistema operacional com o ambiente de programação *LabVIEW*. O módulo receptor de rádio, sintonizado em uma frequência de 2.4GHz, recebe os sinais das antenas e os transpõe para uma frequência intermediária. Este sinal alimenta o módulo processador de sinais transforma os sinais do domínio contínuo para o discreto. O módulo de controle recebe os sinais na forma discreta e executa os algoritmos de sincronização, rastreamento de portadora e decodificação.

IV. RESULTADOS

A. Desempenho do Rastreamento de Portadora

Aqui demonstramos a importância de haver sincronismo entre o transmissor e o receptor para garantir o funcionamento de um enlace de comunicação. Para relembrar, a saída do *Downconverter* entrega um sinal banda passante centrado em uma frequência intermediária (FI). Esta frequência pode ser aferida por instrumentos de medição. Ao utilizar um sistema de malha aberta, isto é, configurar a frequência manualmente no oscilador local do receptor, conseguimos o diagrama de constelação ilustrado pela Figura 5. Nesta constelação utilizou-se uma modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*).

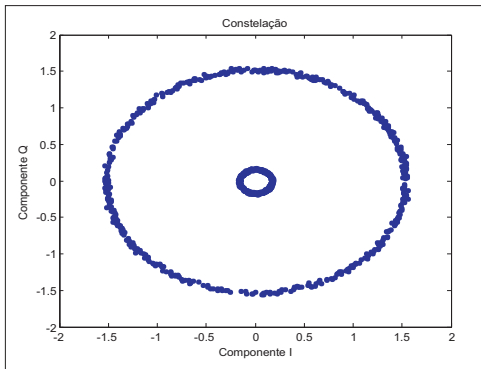


Fig. 5. Teste de convergência para uma constelação Alamouti em malha aberta

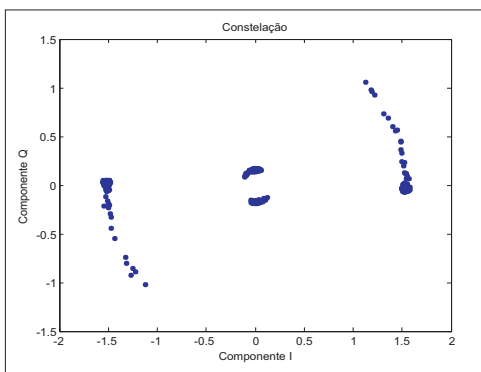


Fig. 6. Teste de convergência para uma constelação Alamouti usando o Algoritmo Costas Loop

Note no gráfico uma formação de dois círculos concêntricos formado por vários pontos. Os pontos são os símbolos recuperados e estes formam um círculo devido à diferença de frequências entre o transmissor e o receptor. Este fenômeno é conhecido como movimentação linear de fase [12]. Ao aplicar o algoritmo de rastreamento de fase *Costas Loop*, os símbolos detectados convergem para uma pequena nuvem de pontos. A formação característica desta constelação é resultado da codificação Alamouti sobre a modulação BPSK. A Figura 6 ilustra o funcionamento do algoritmo *Costas Loop*.

Observe que o algoritmo faz com que os símbolos converjam para um ponto fixo ilustrando o sucesso no rastreamento da portadora corrigindo assim o erro de frequência e erro de fase.

B. Probabilidade de Erro de Bit x SNR

A primeira etapa de experimentos visou comprovar o funcionamento do sistema. Neste momento o transmissor e o receptor foram colocados em pontos fixos em uma sala com espalhadores imóveis. Visto que a potência do sinal não varia devido a ausência de movimentação que causa o desvanecimento, espera-se um desempenho em probabilidade de erro de bit do sistema próxima a P_b de um canal AWGN [12]:

$$P_b = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) \tag{10}$$

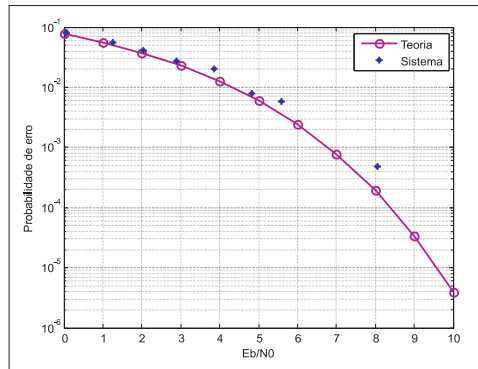


Fig. 7. Probabilidade de erro de bit com antenas

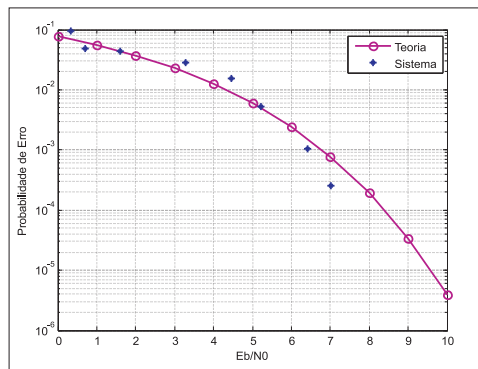


Fig. 8. Probabilidade de erro de bit sem antenas

onde a função $Q(\cdot)$ representa a integral da cauda de uma distribuição Gaussiana. Neste modelo consideramos o uso de um alfabeto binário com modulação BPSK.

Na sequência, foram realizados dois testes para avaliar o funcionamento do sistema. O primeiro teste usou um cabo conectando o transmissor com o receptor diretamente. Para analisar diversos valores de SNR, o receptor contou com um atenuador programável que permite atenuar o sinal em um valor desejado. O objetivo deste primeiro teste era o de avaliar o sistema sem a presença da degradação do canal. A resposta esperada para este primeiro teste foi uma curva de P_b próxima a de um canal AWGN, como apresentado na Figura 8.

No segundo teste o cabo foi removido e substituído por antenas omni-direcionais. Considerando a transmissão e recepção do sinal sem movimento (caso estático), a curva P_b também se aproxima da curva de um canal AWGN teórico, conforme era esperado. A P_b experimental é ilustrada na Figura 7 comprovando o correto funcionamento das estruturas de estimação de canal e recuperação da frequência de portadora.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho, com fins educacionais, vimos que o desenvolvimento de uma aplicação para a comunicação sem fio engloba uma grande quantidade de partes que devem funcionar em conjunto. Enfatizou-se aqui a necessidade de um conhecimento amplo sobre o funcionamento conjunto de sistemas para se conseguir atingir o objetivo de prover uma comunicação confiável e com alta taxa de transmissão de dados. Além disso,

fizemos uma breve discussão sobre comunicação MIMO e enfatizamos o assunto de maior importância do trabalho: O esquema de comunicação Alamouti 2x1. Sabe-se que este esquema foi escolhido devido a simplicidade de implementação e, também, devido ao pequeno custo de processamento.

Como foi observado na discussão da seção II-C uma aplicação real funciona de maneira adequada somente na presença de um subsistema que mantém a mesma base de tempo entre as pontas do enlace de comunicação. Testamos o desempenho do algoritmo *Costas Loop* com sucesso.

Não obstante, firmamos a necessidade de utilizar SDR como a melhor forma para possibilitar o desenvolvimento de projetos de rádio. Deste modo, o trabalho ilustra o ganho de flexibilidade o qual permite avaliar uma infinidade de parâmetros sem ter que arcar com o processo moroso de reformulação do projeto existente nas técnicas tradicionais.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Foschini and M. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *IEEE Transactions on Education*, 1998.
- [2] S. Wee, M. Ros, and P. Vial, "Comparison of alamouti and STS implementations using a Software Defined Radio test bed," *Signal Processing and Communication Systems*, p. 1, 2009.
- [3] A. Gupta, A. Forenza, and J. Heath, R.W., "Rapid MIMO-OFDM Software Defined Radio system prototyping," *Signal Processing Systems*, p. 182, 2004.
- [4] "Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput," LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, Standard, <http://www.ieee.org>.
- [5] Markus Dillinger, Kambiz Madani, Nancy Alonistioti, "Software Defined Radio: Architectures, Systems and Functions". MIT Press, 2003.
- [6] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Transactions on Education*, 1998.
- [7] David Tse, Pramod viswanath, "Fundamentals of Wireless Communication"). Cambridge University Press, 2005.
- [8] J. Cavers, "An analysis of pilot symbol assisted modulation for Rayleigh fading channels," *IEEE Transactions Vehicular Technology*, vol. 40, pp. 686-693, 1991.
- [9] S. Sampei and T. Sunaga, "Rayleigh fading compensation method for 16 QAM in digital land mobile radio channels," *IEEE Vehicular Technology Conference, San Francisco, CA*, pp. 640-646, 1989.
- [10] C. Richard Johnson and Jr. and William A. Sethares, *Telecommunication Breakdown*. Pearson Education, 2003.
- [11] S. S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*. Prentice-Hall, 2002.
- [12] John G. Proakis, "Digital Communications". McGraw-Hill, 2007.