

VIABILIZANDO LABORATÓRIOS DE APOIO A PESQUISA NO PROGRAMA DE MESTRADO EM TELECOMUNICAÇÕES DO INATEL

Luciano Leonel Mendes¹, Maurício Silveira², Wilton Ney do Amaral Pereira³
José A. Justino Ribeiro⁴, Adonias Costa da Silveira⁵

Resumo — O objetivo deste artigo é poder comprovar a eficiência no aprendizado dos alunos de um programa de pós-graduação "stricto sensu" dependendo dos recursos laboratoriais implementados, e as conseqüências diretas na qualidade dos trabalhos de tese apresentados. Restringiu-se a apresentação de somente dois roteiros laboratoriais desenvolvidos pelos alunos relativos a conceitos de fundamental importância dentro da área de sistemas de comunicação. Este trabalho tem proporcionado uma melhor sedimentação por parte dos alunos dos conceitos teóricos apresentados nos cursos do programa. Entre os equipamentos mais importantes usados no laboratório pode-se destacar: modulador de sinais genéricos SMIQ, analisador vetorial de sinais FSIQ, analisador espectral e de redes e osciloscópios digitais de faixa larga. O laboratório conta também com rádios digitais Microstar 7,5GHz, 18 GHz e Aurora 2,4 GHz para ensaios com equipamentos em condições operacionais. Essa associação de instrumentos e equipamentos permite realizar testes nas mais diversas condições, possibilitando estudar novas configurações, determinar suas limitações e buscar inovações na área de sistemas de comunicações.

Palavras Chave — Medidas Experimentais, Modulação de Sinais, Análise Espectral, e Análise de Sinais.

INTRODUÇÃO

Neste artigo serão abordados dois roteiros laboratoriais de extrema utilidade na análise dos sistemas de comunicações digitais. O primeiro deles trata dos diversos tipos de espalhamento espectral, sendo que em cada exemplo citado é apresentado um diagrama em blocos completo do hardware que está sendo estudado. Neste roteiro, o aluno realiza um levantamento do desempenho do sistema DS-SS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) [1] perante a interferências propositais de faixa estreita e de faixa larga. O segundo roteiro apresenta um estudo minucioso do modulador complexo em fase e quadratura (IQ), abordando as influências do filtro cosseno elevado, do ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) [2], e dos múltiplos percursos [3] no sinal transmitido. Estas análises são

realizadas tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, abordando também uma análise do diagrama da constelação recebida e do diagrama de olho.

ESPALHAMENTO ESPECTRAL

A técnica de espalhamento espectral foi desenvolvida primordialmente para permitir comunicações militares com grande robustez a interferências propositais, prática muito comum em tempos de guerra. Porém, as características desta técnica de comunicação acabou por demonstrar uma grande vantagem para o uso comercial, pois permitiu um novo método de múltiplo acesso ao canal de comunicação: o múltiplo acesso por divisão por código (CDMA – *Code Division Multiple Access*) [1].

A literatura aborda a existência de três técnicas de espalhamento espectral, cabendo destacar: Espalhamento Espectral por Seqüência Direta, Espalhamento Espectral por Salto em Frequência, e Espalhamento Espectral por Salto no Tempo.

Espalhamento Espectral por Seqüência Direta

A técnica de espalhamento espectral por seqüência direta representa um dos principais segmentos no estudo de espalhamento espectral, devido a sua aplicação no padrão de telefonia celular CDMA, padronizada pelo IS-95 [4]. Nesta técnica, os bits de dados são multiplicados por uma seqüência pseudo aleatória (*PN*) de comprimento *N*. A taxa da seqüência *PN* (taxa de *chip*, *R_c*) é muito maior do que a taxa de bit (*R_b*). Desta forma, o espectro do sinal de saída ocupa uma largura de faixa muito maior do que a largura de faixa ocupada pelo sinal original.

Após o canal, o sinal recebido deve ser multiplicado pela seqüência *PN* em fase, para que o sinal possa ser recuperado. Caso as seqüências estejam defasadas, o sinal não é recuperado sendo interpretado como ruído pelo circuito de decisão. A Figura 1 mostra o diagrama em blocos de um sistema *DS-SS* em banda básica. Utilizando os rádios digitais *DS-SS* em conjunto com o Modulador Digital SMIQ [5] é possível levantar o desempenho desta técnica perante interferências intencionais de faixa larga e de faixa estreita.

¹ Luciano Leonel Mendes, INATEL, Av. João de Camargo, 510 - Santa Rita do Sapucaí – MG, Brazil, 37540-000, lucianol@inatel.br.

² Maurício Silveira, INATEL, Av. João de Camargo, 510 - Santa Rita do Sapucaí – MG, Brazil, 37540-000, msilveira@inatel.br.

³ Wilton Ney do Amaral Pereira, INATEL, Av. João de Camargo, 510 - Santa Rita do Sapucaí – MG, Brazil, 37540-000, wilton@inatel.br.

⁴ José Antônio Justino Ribeiro, INATEL, Av. João de Camargo, 510 - Santa Rita do Sapucaí – MG, Brazil, 37540-000, justino@inatel.br.

⁵ Adonias Costa da Silveira, INATEL, Av. João de Camargo, 510 - Santa Rita do Sapucaí – MG, Brazil, 37540-000, adonias@inatel.br.

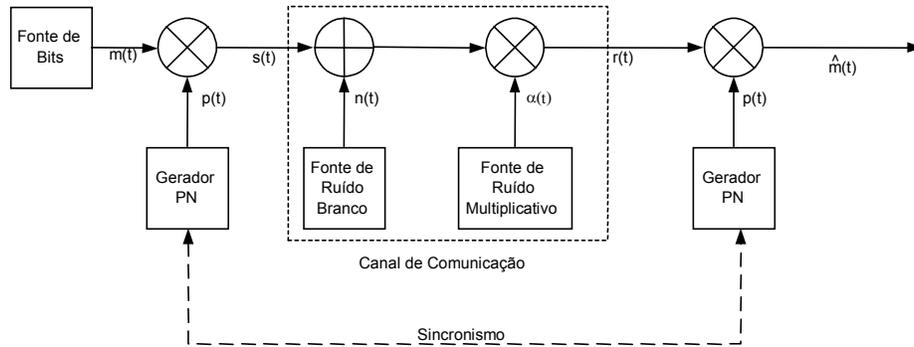


FIGURA 1
DIAGRAMA EM BLOCOS DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO *DS-SS*

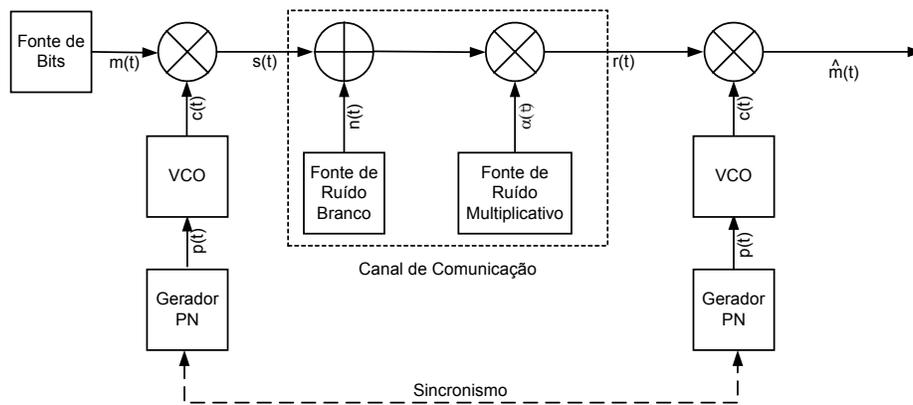


FIGURA 2
DIAGRAMA EM BLOCOS DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO *FH-SS*

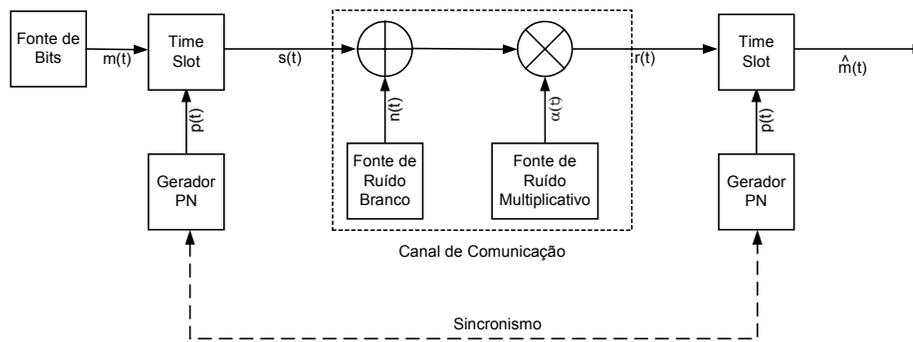


FIGURA 3
DIAGRAMA EM BLOCOS DE UM SISTEMA DE TRANSMISSÃO *TH-SS*

Espalhamento Espectral por Salto em Freqüência

O Espalhamento Espectral por Salto em Freqüência (*FH-SS Frequency Hope Spread Spectrum*) [1] representa outra técnica de espalhamento espectral que vem sendo bastante utilizada para transmissão de sinais digitais em meios perturbados. Neste caso, o Oscilador Controlado por Tensão (*VCO*) tem sua freqüência de operação definida por uma seqüência *PN*, ou seja, a cada instante de tempo, a

freqüência utilizada para modular o sinal a ser transmitido é definida por uma seqüência *PN*. A Figura 2 mostra o diagrama básico para a transmissão e recepção de um sinal *FH-SS*.

Espalhamento Espectral por Salto no Tempo

O Espalhamento Espectral por Salto no Tempo (*SS-TH*) [1] é a ultima das técnicas de importância referenciada neste artigo. Neste tipo de sistema, o slot de tempo que o usuário

ocupa em cada quadro é definido por uma seqüência *PN*. A Figura 3 mostra um diagrama básico para este sistema.

Os sistemas de transmissão que utilizam técnicas de espalhamento espectral possuem um melhor desempenho referente a interferências propositalis. Esta melhoria de desempenho é denominada de Ganho de Processamento (*Gp*). Utilizando os recursos do laboratório, os alunos podem corroborar os resultados teóricos com as medidas práticas realizadas. O objetivo com este experimento é explorar o sistema *DS-SS*, pois esta é a técnica utilizada por um dos rádios digitais que o laboratório possui. Com este sistema, vários usuários utilizam a mesma faixa espectral ao mesmo tempo. Isso é possível pois cada usuário possui um código de espalhamento único, ou seja, cada usuário utiliza uma seqüência de espalhamento conhecida apenas pelo transmissor e pelo receptor.

Uma das grandes vantagens que pode-se observar é que este tipo de análise das técnicas de espalhamento espectral pode ser adotado utilizando diferentes tipos arquiteturas de rádios digitais, além de verificar o desempenho contra interferências intencionais de faixa estreita e ruído de faixa larga.

MODULAÇÃO DIGITAL COMPLEXA

As técnicas de modulação digital que transportam os bits de informação na fase e/ou na amplitude de uma portadora podem ser representadas através de um diagrama vetorial chamado de Diagrama de Constelação ou simplesmente Constelação [2]. Este diagrama utiliza bases ortogonais para representar os símbolos da modulação em um plano vetorial. A base desse plano é constituída pelas funções seno e cosseno, pois estas funções respeitam o princípio de ortogonalidade, dado por :

$$\int_0^T \text{sen}(\omega_o t) \cdot \cos(\omega_o t) dt = 0 \quad (1)$$

onde ω_o é a freqüência angular da portadora e T é o período da portadora.

Desta forma, qualquer modulação que utilize variações de fase e de amplitude podem ser representadas neste plano. A Figura 4 mostra a constelação de um sinal *QPSK* (*Quadrature Phase Shift Keying*) [3].

Os vetores que terminam nos vértices do quadrado pontilhado representam os símbolos que compõe a modulação. A circunferência pontilhada possui raio $\sqrt{E_s}$, onde E_s é a energia do símbolo. Fazendo a projeção dos símbolos nos eixos, é possível perceber que cada símbolo da constelação pode ser representado por coordenadas cartesianas. Sendo assim, o sinal modulado pode ser obtido através de dois sinais; um modulando a portadora em fase e outro modulando a portadora defasada de 90° (*sinal em quadratura*). Desta forma, os sinais *I* (*In Phase*) e *Q*

(*Quadrature*) definem quais são os símbolos transmitidos ao longo do tempo e representam o sinal modulado em banda-básica. A Figura 5 mostra como obter modulação *QPSK* utilizando a representação vetorial.

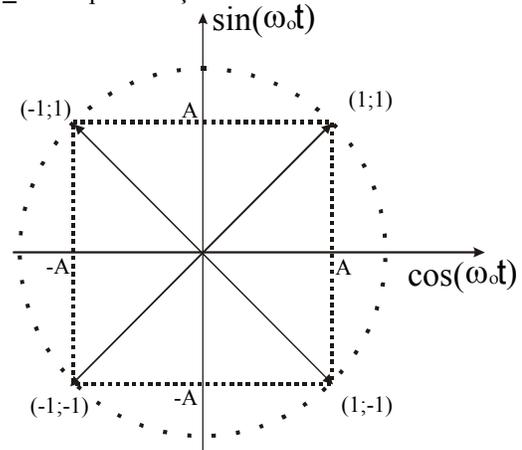


FIGURA 4
CONSTELAÇÃO QPSK

A Figura 5a mostra uma seqüência de bits à ser transmitida enquanto que a Figura 5b mostra os sinais *I* e *Q* obtidos a partir dos bits de entrada. Observando a projeção dos símbolos nos eixos na Figura 4, pode-se concluir que um sinal *QPSK* nada mais é do que a soma vetorial de dois sinais *BPSK*. Por este motivo, os sinais *I* e *Q* são sinais binários que assumem os valores $+A$ ou $-A$. Como cada símbolo representa dois bits, o período dos sinais *I* e *Q* é duas vezes maior do que o período do sinal de entrada. De uma maneira geral, pode-se definir que o tempo de símbolo de um sistema *M-ário* como:

$$T_s = \log_2(M) \cdot T_b \quad (2)$$

Onde T_s é o tempo de símbolo, M é a ordem da modulação em fase e quadratura e T_b é o tempo de bit do sinal a ser transmitido.

A Figura 5c mostra um modulador vetorial, onde o sinal *IQ* em banda-básica é translado para a freqüência de canal. O sinal *I* é modulado utilizando a função cosseno e o sinal *Q* é modulado utilizando a função seno. A soma vetorial desses sinais gera o sinal *QPSK*, representado através de uma portadora com quatro fases distintas. O princípio mostrado aqui pode ser extrapolado para gerar sinais *M-PSK* (*M – Phase Shift Keying*) e *M-QAM* (*M – Quadrature Amplitude Modulation*), alterando apenas a lei de formação dos sinais *I* e *Q*. Desta forma é possível construir um modulador digital genérico, mudando apenas o mapeador *IQ*. No caso do *SMIQ* o mapeador *IQ* é implementado utilizando *DSP* com um programa que permite selecionar o tipo de modulação desejada.

Esta experiência permite ao aluno explorar os recursos do modulador digital genérico *SMIQ* e do analisador de sinais *FSIQ* [6] para verificar o princípio de funcionamento da

modulação digital, além de estudar a influência dos filtros e do canal no sinal modulado.

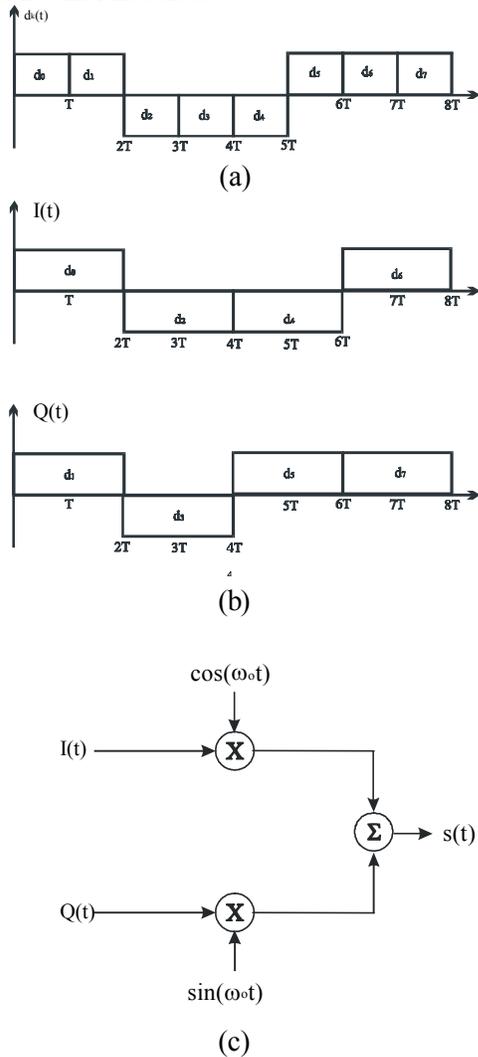


FIGURA 5
MODULAÇÃO EM FASE E QUADRATURA

Canal com Ruído Branco Aditivo Gaussiano

Uma vez conhecida a lei de formação do sinal modulado, pode-se analisar a influência do ruído *AWGN* (*Aditive White Gaussian Noise*) [2] no sistema de comunicação. O ruído branco ou ruído térmico está sempre presente no canal de comunicação sendo um dos principais responsáveis pela causa de erros de recepção, se o mesmo não for bem analisado e dimensionado. O ruído branco pode ser modelado como uma variável aleatória (*VA.*) de média nula e variância σ^2 com distribuição Gaussiana. A média de uma *VA* representa o nível *DC* presente no sinal, enquanto que a variância representa a potência AC do sinal aleatório. Desta forma é possível determinar a relação sinal ruído através da potência do sinal desejado e da variância do sinal de ruído.

A Figura 6 mostra a constelação de um sistema *QPSK* transmitida através de um canal *AWGN* com relação sinal-ruído (*SNR*) de 4dB.

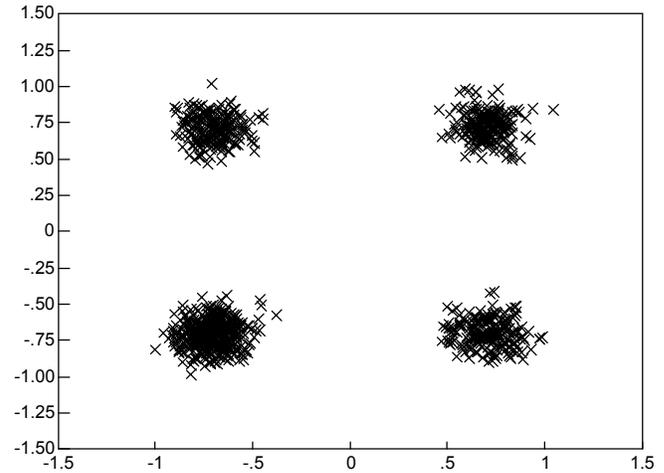


FIGURA 6
CONSTELAÇÃO QPSK

Canal com Desvanecimento Seletivo

Outro fator responsável pela degradação do desempenho dos sistemas digitais é a Interferência Intersimbólica (*ISI*) [3], introduzida por canais com múltiplos percursos. Esta interferência causa, no domínio da frequência, nulos espectrais, denominado de desvanecimento seletivo. A resposta ao impulso de um canal com múltiplos percursos pode ser expressa por:

$$h(t) = A_0 \delta(t) + A_1 \delta(t - \tau_1) + \dots + A_n \delta(t - \tau_n) \quad (3)$$

Onde A_n e τ_n são a amplitude e o atraso de cada percurso, respectivamente.

Para um canal com apenas dois percursos, pode-se escrever a resposta impulsiva como:

$$h(t) = A_0 \delta(t) + A_1 \delta(t - \tau_1) \quad (4)$$

A Resposta em Frequência deste canal é obtida através da Transformada de Fourier de (4), conforme apresentado em (4).

$$H(j2\pi f) = \mathfrak{F}\{h(t)\} = A_0 + A_1 e^{j2\pi f \tau_1} \quad (5)$$

A Figura 7 mostra a Resposta de Amplitude e Fase do canal modelado a partir de (4) e (5), com $A_0 = A_1 = 1$ e com $\tau_1 = 1$ s.

Pode-se perceber que a distâncias entre os nulos espectrais ocorrem a cada 1Hz, que representa o inverso do atraso sofrido pelo segundo canal. Deste modo pode-se definir a largura de faixa do canal, BW_{canal} , como sendo:

$$BW_{canal} = \frac{1}{\tau_1} \quad (6)$$

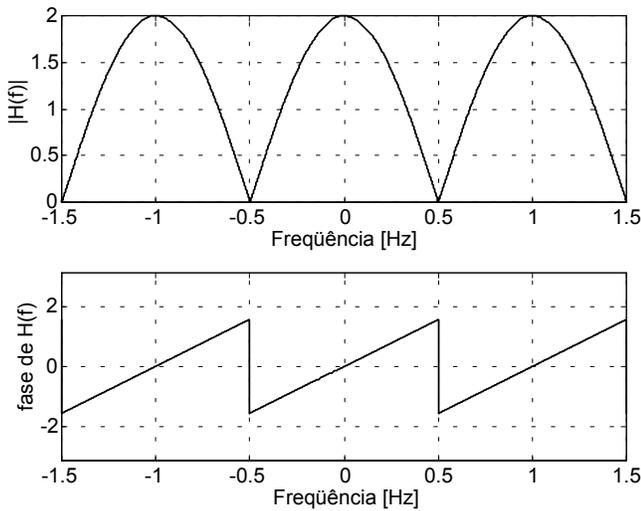


FIGURA 7

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA E EM FASE DO CANAL COM DESVANECIMENTO

A banda de coerência do canal, BW_c , é definida como a largura de faixa do canal no qual o mesmo pode ser considerado plano e pode ser expressada como:

$$BW_c = \frac{1}{5BW_{canal}} = \frac{1}{5BW_c} \quad (7)$$

Deste modo, caso a largura de faixa do sinal a ser transmitido for menor do que a banda de coerência do canal, pode-se afirmar que o sinal sofre desvanecimento plano, ou seja, não ocorrem nulos espectrais dentro da faixa de interesse.

CONCLUSÕES

A necessidade de atualização e especialização exigida pelos alunos de Mestrado em Telecomunicações demanda a aprendizagem de um vasta gama de informações em um curto intervalo de tempo. Desta forma, se faz necessário utilizar abordagens diferentes técnicas de ensino para que este aprendizado se torne eficiente, como o uso de ferramentas computacionais e de laboratórios para simulações de sistemas de telecomunicações.

Este artigo apresentou duas experiências que facilitam o aprendizado de conceitos envolvidos em transmissão digital. A primeira experiência aborda a técnica de transmissão digital que utiliza espalhamento espectral. Nesta experiência, o aluno levanta o desempenho do sistema de comunicação DS-SS em canais que apresentam interferências intencionais de faixa larga ou faixa estreita, medindo o Ganho de Processamento efetivo do sistema. Já na segunda experiência, o aluno realiza um estudo sobre as modulações

digitais em fase e quadratura, explorando a estrutura de geração de sinais digitais através de portadoras ortogonais. Realiza-se uma análise da influência do filtro cosseno elevado na modulação QPSK, bem como o desempenho do sistema em canais AWGN e com desvanecimento. Estas análises são realizadas tanto no domínio do tempo e da frequência, além de apresentar o diagrama de constelação do sinal recebido.

Com isso, o aluno é capaz de corroborar os resultados apresentados na teoria com os dados obtidos nas medições práticas realizadas em laboratório, o que permite um aprendizado dinâmico e bem fundamentado.

REFERENCES

- [1] Cooper, G, R, *Modern Communications and Spread Spectrum*, McGraw Hill, 1986.
- [2] Sklar, B, *Digital Communications Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, 1988.
- [3] Haykin, S, *Communications Systems*, 2nd Edition, Wiley, 2000.
- [4] Garg, V, K, *IS-95 CDMA and cdma2000*, Prentice Hall, 2000.
- [5] Operating Manual, *Vector Signal Generator SMIQ*, Rohde & Schwarz, Germany.
- [6] Operating Manual, *Vector Signal Analyzer FSQ*, Rohde & Schwarz, Germany.