



Consultoria e Comércio Ltda
Rua Euclides Miragaia, 433 – s/302 – Centro
São José dos Campos – SP – Cep.12245-550
Fone : 012 341 50 54 Fone/Fax : 012 322 91 81
E-mail : beta@iconet.com.br

Parte 1

Esta é a primeira parte do artigo BT.466/01.

***ESPALHAMENTO ESPECTRAL :
CONCEITOS BÁSICOS E CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA***

Eng. Wilton J. Fleming, MSc.

Ref. BT.466/01	Data : 08/03/01
Revisão Técnica	Eng. Benjamim Galvão, MsC – chefe do Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética do LIT – INPE - SJC Campos

I - INTRODUÇÃO

A tecnologia de Espalhamento Espectral é hoje um dos processos mais utilizados para interligação de sistemas sem fio com confiabilidade e sigilo^{[1][2]}. A principal razão disso é a sua capacidade de codificação inerente, que faz com que seja muito difícil a interpretação ou interceptação dos sinais emitidos por unidades não autorizadas. Por outro lado, devido à sua própria natureza, os canais de rádio que operam em Espalhamento Espectral conseguem funcionar adequadamente em ambientes agressivos, do ponto de vista eletromagnético, onde os sistemas com modulação tradicional tendem a falhar^{[3][4]}. Este é, por exemplo, o caso de ambientes industriais, saturados por interferências causadas pelo funcionamento de máquinas e sistemas de comunicações mal dimensionados.

As técnicas de Espalhamento Espectral foram desenvolvidas durante a Segunda Guerra Mundial, para aperfeiçoar a confiabilidade das comunicações militares e mantê-las com baixo nível de detecção por forças inimigas. Naquela época os Aliados e os componentes do Eixo estavam travando uma guerra tecnológica, paralela aos campos de batalha, em várias áreas da ciência. A principal delas era na parte das comunicações seguras. A utilização de interferências propositas era usada por ambos os lados e, portanto, uma tecnologia que fosse imune às interferências era desesperadamente procurada^[5]. Muitas evidências existem de que a tecnologia por Espalhamento Espectral foi desenvolvida, principalmente, nos Estados Unidos, no notável Laboratório Lincoln, que funcionou no MIT durante a Segunda Guerra Mundial, sendo creditado a este laboratório a construção do primeiro sistema de Espalhamento Espectral que realmente funcionou^[5].

Existem poucas citações a respeito do estudo dessa tecnologia fora dos EUA, sendo a principal delas uma patente do suíço Gustav Guanella da “Brown, Boven and Company” que em 1938 apresentou uma patente de radar que continha detalhes técnicos de um sistema por Espalhamento Espectral. Contudo, atualmente, algumas publicações consideram que a patente da primeira idéia do sistema, datada de Agosto de 1942, é de uma atriz de cinema de Hollywood, Hedy Lamarr^[6], e do pianista George Antheil. Hedy Lamarr ainda é viva e, em março de 1997, recebeu nos EUA, através do seu filho Anthony, o prêmio “Electronic Frontier Foundation”, pela sua grande contribuição à sociedade.

Enquanto os militares continuavam a aperfeiçoar essa tecnologia para evitar as interferências propositais, os projetistas de satélites começaram a adotar sinais espalhados espectralmente para evitar que transeptores analógicos fossem saturados por portadoras de alta potência.

Liderado pelas aplicações do GPS ^[7], os conceitos de Espalhamento Espectral saíram de sua ostra de segredo, e começaram a serem utilizados por sistemas em aplicações não militares.

Por outro lado, percebendo o potencial para o uso comercial da tecnologia de Espalhamento Espectral, o FCC (Federal Communications Commission) americano começou a estudar regras para operação desse sistema em meados dos anos 80 ^[8]. Esse conjunto de regras foi adotado em

14 de junho de 1990 e emitido em 9 de julho de 1990, no "General Docket Nº 89-354". Sob a denominação FCC Part 15/47, foram então definidas as condições de operação comercial de sistemas por Espalhamento Espectral nas faixas industrial, científica e médica (ISM) ^[9]. Atualmente a codificação dos equipamentos por Espalhamento Espectral nos Estados Unidos está definida na norma IEEE 802.11^[10], que foi elaborada pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) para compatibilizar os equipamentos dos vários fabricantes.

No Brasil existe também uma legislação para regular os sistemas de Espalhamento Espectral. Esse conjunto de regras foi inicialmente definido na Norma 002/93, aprovada pela Portaria 046 do Ministério das Comunicações de 28 de janeiro de 1993, modificado pela Portaria 814 de 12 de julho de 1996, e atualizado pelo anexo à Resolução 209 da Anatel, emitido em 14/01/2000^[11]. É importante salientar que aqui no Brasil, como em vários outros países, a operação do sistema por Espalhamento Espectral não necessita de licença governamental para instalação e operação, desde que as regras e requisitos da Resolução 209 sejam obedecidos.

As faixas de frequências estabelecidas no Brasil e nos Estados Unidos, para operação com Espalhamento Espectral, estão definidas na Tabela I.1, a seguir :

Tabela I.1 - Faixa de Frequências para operação com Espalhamento Espectral no Brasil

Frequência	Faixa
902 - 928 MHz	26 MHz
2400 - 2483,5 MHz	83,5 MHz
5725 - 5850 MHz	125 MHz

O Anexo à Resolução 209 da Anatel especifica, além das bandas descritas na Tabela I-1, os máximos níveis de potência que podem ser utilizados. Nas bandas de 902 a 928 MHz e 2400 a 2483,5 MHz a potência máxima permitida do transmissor é de 1W e a EIRP nos sistemas ponto-multiponto é limitado em 4W (6dBW ou 36dBm).

Nessas condições o ganho máximo da antena de transmissão fica limitado em 6dBi. Para operação em enlaces ponto a ponto, pode-se aumentar o ganho da antena de 3dB acima de 3dBi, para cada diminuição de 1dB na potência de pico de 1W do transmissor.

Nas aplicações ponto a ponto e na banda de 5725 MHz a 5850 MHz, de acordo com o Anexo à Resolução 209, pode-se utilizar antenas com ganho superior a 6dBi sem a necessidade de redução da potência de 1 W do transmissor.

II - CONTEÚDO BÁSICO

A tecnologia de Espalhamento Espectral, como todas as grandes inovações é, no seu âmago, muito simples ^{[12][13][14]} :

- O primeiro passo do processo é codificar a informação de modo que ela tenha formato de ruído, transmiti-la e, no ponto de recepção, recuperá-la sem erro.

Nos sistemas convencionais de modulação ocorre uma tentativa de maximizar a concentração de energia para uma dada mensagem. O sistema de Espalhamento Espectral toma a direção oposta, espalhando o sinal por uma faixa muito maior que a faixa de frequência original da mensagem. Ou seja, o espectro de frequência do sinal codificado é muito maior que o espectro de sinal da informação (ver Figura II.1).

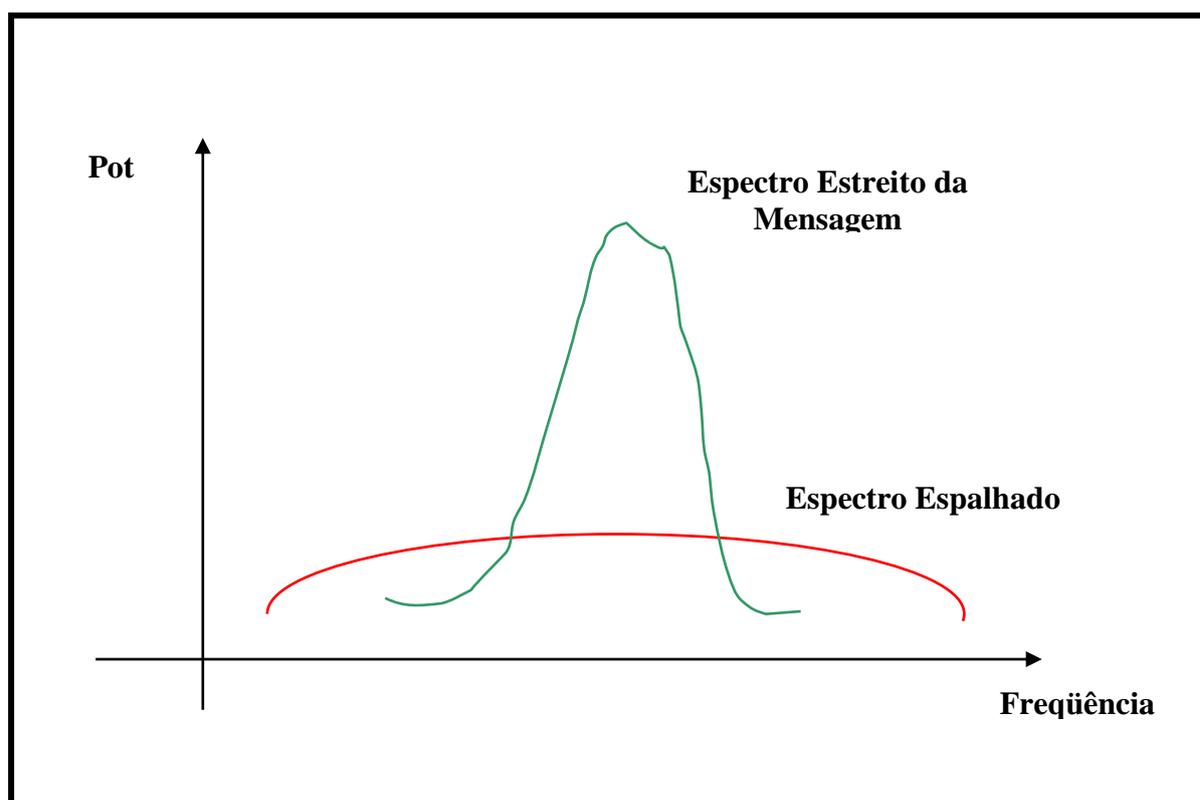


Figura II.1 - Relação entre o espectro da mensagem e o espectro espalhado

Por outro lado, como o sistema distribui a energia em uma grande faixa de frequências, a relação sinal/ruído na entrada do receptor é baixa, chegando mesmo, em alguns casos, abaixo do nível de ruído dos receptores convencionais e, portanto, tornando-se invisível para os mesmos ^[15]. No receptor do sistema de Espalhamento Espectral o processo recíproco ao espalhamento é realizado, restaurando o nível adequado das mensagens. Define-se como parâmetro de comparação a grandeza Ganho de Processamento, que indica a melhoria da relação sinal/ruído que o sistema é capaz de obter sobre um sistema que não utiliza Espalhamento Espectral.

Existem dois processos principais para a codificação da informação e geração do Espalhamento Espectral :

O primeiro é chamado de "Salto de Frequência" (Frequency Hopping - FH) e o segundo é a "Seqüência Direta"(Direct Sequence - DS). No FH a informação simplesmente "pula" de um canal de frequência para outro, de forma codificada no tempo. Nesse caso, o receptor só poderá encontrar o sinal nos vários canais se ele souber onde sintonizar, ou seja, se souber previamente as posições de frequência onde o transmissor vai "pular" Se algumas frequências estiverem sofrendo interferência por sinais espúrios, a informação ainda pode ser recuperada pelo processamento dos outros canais da seqüência dos "pulos".

O código FH, que determina a seqüência de "pulos de frequência", é gerado por um circuito chamado gerador de pulsos Pseudo-Aleatórios. O mesmo código deve ser usado no transmissor e no receptor, de modo que os dois saibam a próxima frequência a ser usada. O gerador de código deve ser síncrono no transmissor e receptor, o que é obtido por um sinal piloto de sincronização. Geradores de código Pseudo-Aleatórios (também chamados de códigos "Pseudo-Noise" ou PN) produzem códigos com aproximadamente o mesmo número de "zeros" e "uns", e seqüência definida. Após um dado número de bits, chamado de comprimento de código, eles se repetem. Códigos que são completamente aleatórios, e não se repetem, não podem ser realizados e não são distinguíveis do ruído.

Nos sistemas comerciais, atualmente disponíveis, a eficiência dos sistemas FH baseia-se mais em evitar a interferência do que na supressão da mesma. O FCC Americano e a Resolução 209 prevêm ainda que, o número mínimo de canais para os "pulos" de frequência seja de 50 na faixa de 902 - 928 MHz (máxima largura de banda a 20 dB no canal de salto é 500 KHz) e 75 nas outras duas bandas. O tempo médio de ocupação de qualquer frequência não deve ser maior que 0,4 segundos, dentro de um período de 30 segundos ^[11].

O Ganho de Processamento para o FH é uma função direta do número de canais de saltos nos quais está sendo espalhada a informação transmitida.

Na técnica de seqüência direta (DS) a codificação em Espalhamento Espectral é implementada pela mistura da informação com um sinal de código de alta taxa de bits. A saída do modulador conterà, portanto, a informação espalhada pelo sinal codificador.

Os tipos de modulações geralmente utilizados na DS são o chaveamento binário por deslocamento de fase (BPSK), ou o chaveamento por quadratura de fase (QPSK). O sinal codificador para a DS é gerado por um circuito similar ao FH, com a diferença que o fator de Espalhamento Espectral obtido na DS (Ganho de Processamento) é a razão entre a taxa do código Br (conhecido como "chip rate") e a taxa de bits da informação R_c .

O sinal DS é recuperado no receptor por uma modulação complementar usando um código similar ao do transmissor, e sincronizado com o mesmo.

Um sistema Ds bem projetado pode rejeitar interferências por uma quantidade relacionada ao valor do Ganho de Processamento.

Potenciais sinais interferentes que chegarem ao receptor são "espalhados" em frequência pelo mesmo processo que recupera o sinal desejado. Desse modo, o receptor consegue recuperar a informação mesmo na presença de sinais interferentes de faixa estreita, e com densidades de potências muito maiores que a do sinal desejado.

Nos dois casos, FH e DS, a recepção é impossível para receptores que não conhecem o código do transmissor.

Adicionalmente, uma das características dos códigos Pseudo-Aleatórios usados é a propriedade de ortogonalidade ^[11] : múltiplos transmissores e receptores podem ocupar a mesma porção do

espectro utilizando códigos diferentes, até que o limite da relação Portadora/Interferência (P/I) dos receptores seja atingido. Este é o princípio dos sistemas CDMA, que serão analisados no item VII. Uma variação dessa tecnologia é, por exemplo, utilizado no sistema GPS, onde todos os satélites da constelação transmitem na mesma faixa de frequências (os sinais espalhados das mensagens são transmitidos aos usuários em duas portadoras: L1 de 1575.42 MHz e L2 de 1227.6 MHz) e o nível do sinal que chega à Terra está perto do nível de ruído. A codificação inerente do sistema (códigos PN) é que permite "arrancar" o sinal de dentro do ruído ^[7]. A Figura II.2, a seguir, apresenta de forma gráfica o comportamento dos sistemas FH e DS.

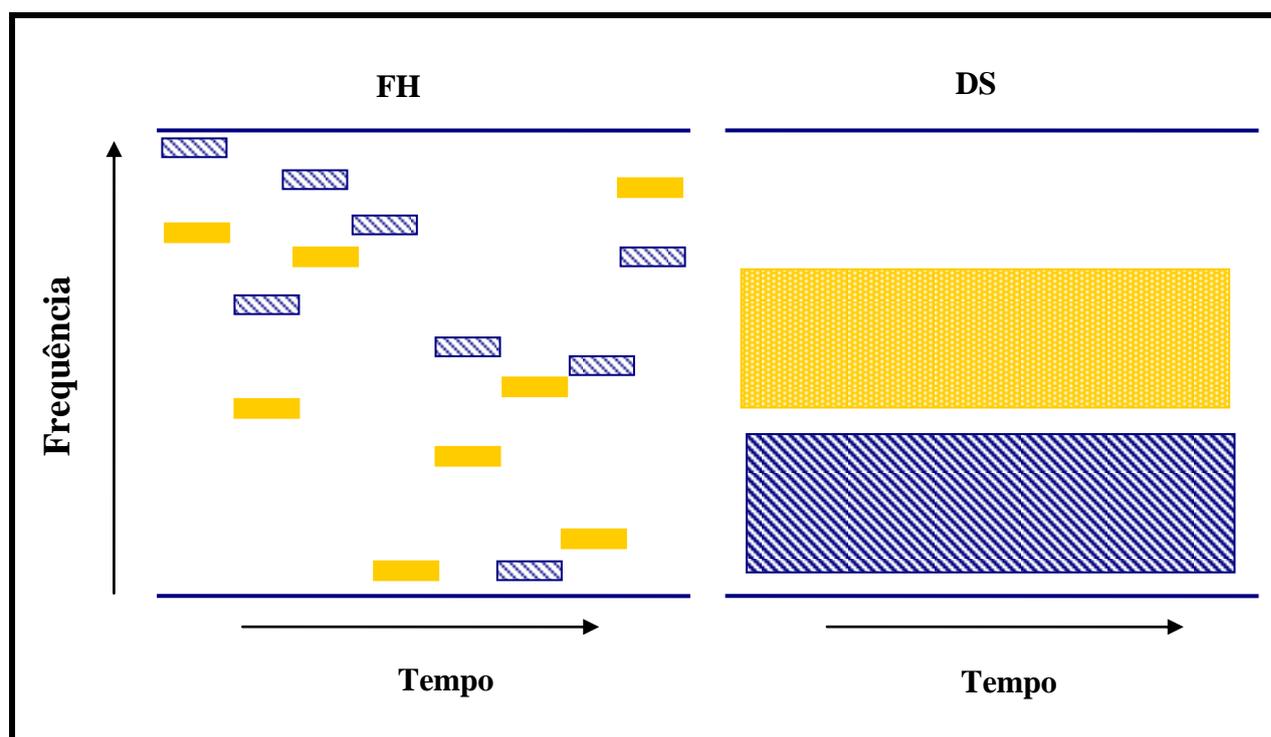


Figura II.2 – FH e DS para dois canais

Existe ainda um terceiro tipo de Espalhamento Espectral, chamado CHIRP, que é muito utilizado em sistemas de radares ^{[2] [13][16]}. Nesse caso não é utilizada uma seqüência Pseudo-Aleatória para controlar o espectro de saída. Em vez disso, o sinal CHIRP é gerado fazendo com que a portadora seja variada dentro de uma certa faixa de frequência de forma linear (ou de outra maneira conhecida), dentro da duração de um período fixo de pulso do radar.

A idéia por trás dos sistemas CHIRP é que o receptor pode usar um filtro casado, de projeto relativamente simples, para receber a portadora dispersada no tempo, de forma a criar um somatório coerente e, assim, prover uma melhora na relação sinal / ruído do sistema.

Essa tecnologia é usada em sistemas de radares para solucionar o conflito técnico entre alcance e precisão de resolução de alvos ^[16]. Ou seja, no sistema tradicional de radar o alcance está diretamente relacionado com energia do pulso, que é calculada pelo produto da potência de pico vezes a largura do pulso. Contudo, a resolução de alvos é cada vez melhor quanto menor for a largura do pulso. Esses dois parâmetros, conflitantes com relação à largura do pulso, são

otimizados fazendo-se o pulso longo na transmissão, através de uma expansão codificada, e comprimindo-o na recepção, de tal modo que sua largura final atenda aos requisitos de resolução exigidos pelo sistema.

As bases teóricas para a avaliação da tecnologia de Espalhamento Espectral encontram-se no famoso teorema da Capacidade de Canal^{[12][13][17][18][19][20]}, apresentado por Shannon - Hartley em 1949. Shannon e Hartley demonstraram, rigorosamente, que em um canal perturbado por um ruído aditivo branco Gaussiano, pode-se transmitir informação a uma taxa de C bits por segundo, onde C é a capacidade do canal dada por :

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad [\text{bps}] \quad (\text{II.1})$$

onde :

B é a largura de faixa do canal em Hz

S é a potência do sinal (W)

N é a potência de ruído(W)

Para outros tipos de ruído que não o ruído branco Gaussiano, a Expressão II.1 deve sofrer modificações. Em canais com “fading” do tipo Rayleigh a capacidade do canal é sempre menor que aquela calculada pela expressão (II.1)^[21].

Em todo canal de comunicações o ruído é um fator limitante para a transmissão dos sinais. A experiência demonstra que a modelagem deste ruído por um outro, branco e “Gaussiano”, atende à maioria dos problemas da vida real. O adjetivo “branco” significa que o ruído tem uma distribuição uniforme de energia no espectro de frequências. A palavra “Gaussiano” significa que a função de densidade de probabilidade de amplitude do ruído segue uma curva gaussiana^[17]. Há alguns casos, porém, em que tal modelagem do ruído não atende às necessidades. Por exemplo, suponha o caso da interferência causada por multicaminhos da onda transmitida, os conhecidos “fantasmas” da televisão. Esse tipo de “ruído”, ou interferência, é um exemplo típico de um ruído que não é nem branco e nem Gaussiano, e sua influência no sinal recebido é tratado de maneira particular.

A Expressão II.1 mostra, portanto, que a capacidade de um canal para transmitir informações está limitada pela faixa do canal e pelo nível de ruído.

Se existisse um sistema sem ruído a capacidade de canal seria infinita. Por outro lado, o teorema de Shannon – Hartley mostra também que para uma determinada quantidade de informações a serem transmitidas pode-se reduzir a potência do sinal transmitido se a largura de faixa for aumentada correspondentemente. Na tecnologia de Espalhamento Espectral essa condição é utilizada, fazendo com que a informação seja espalhada em uma faixa bastante grande, o que permite operação do sistema com relações sinal/ruído muito baixas.

Quando a relação S/N é pequena ($< 0,1$) a Expressão II.1 pode ser simplificada para^{[12][13][22]} :

$$C = 1,44 \frac{S}{N} B \quad (\text{II.2})$$

Um exemplo de utilização da Expressão II.2 é determinar qual a faixa necessária para transmitir 32 kbps com uma relação S/N de -30dB.

O valor de B é facilmente obtido, resultando em:

$$B = \frac{CN}{1,44S} = \frac{32 \cdot 10^3 \cdot 1000}{1,44} = 22,22MHz$$

O cálculo direto pela Equação II.1 fornece B=22,19MHz.

Deve-se observar, também, que vários sistemas de modulação se utilizam do aumento do espectro e, portanto, do aumento de faixa para transmitir a informação. Esse é o caso, por exemplo, da modulação FM onde o sinal modulante é diretamente responsável pela largura de faixa do espectro. Na tecnologia de Espalhamento Espectral, contudo, além da faixa de transmissão ser muito maior que a faixa de informação, outra função, que não seja a própria informação, define a faixa de transmissão ou Espalhamento Espectral.

Nessas condições modulações especiais, tais como a FM, não são consideradas de tecnologia por Espalhamento Espectral.