

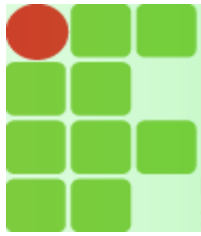
INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina
Campus São José – Área de Telecomunicações
Engenharia de Telecomunicações

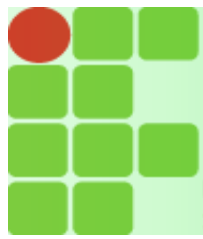
ESPALHAMENTO ESPECTRAL

Aula 1



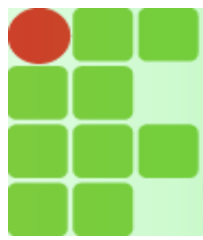
Introdução

- Embora a largura de banda seja uma “comódite” valiosa em sistemas sem fio, aumentar a largura de banda do sinal de transmissão às vezes pode melhorar o desempenho.
- O espalhamento espectral é uma técnica que aumenta a largura de banda do sinal além do mínimo necessário para a comunicação de dados.
- As técnicas de espalhamento espectral podem ocultar um sinal abaixo do nível de ruído, dificultando sua interceptação por terceiros.
- O espectro espectral também reduz a degradação do desempenho devido à interferência interssimbólica (ISI) e à interferência em banda estreita.



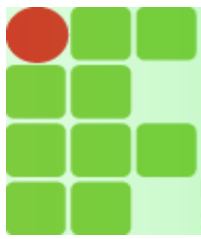
Introdução

- Em conjunto com um receptor RAKE, o espectro espalhado pode fornecer uma combinação coerente de diferentes componentes de múltiplos percursos.
- O espalhamento espectral também permite que vários usuários compartilhem a mesma largura de banda, uma vez que os sinais de propagação podem ser sobrepostos uns aos outros e demodulados com mínima interferência entre eles.



Princípios do espalhamento espectral

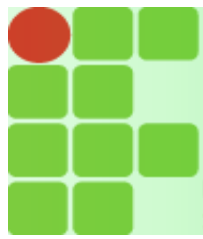
- O espalhamento espectral é um método de modulação aplicado a sinais modulados digitalmente que aumenta a largura de banda do sinal de transmissão para um valor muito maior do que o necessário para transmitir os bits de informação subjacentes.
- As três propriedades a seguir são necessárias para o espalhamento espectral:
 - O sinal ocupa uma largura de banda muito maior do que o necessário para o sinal de informação.
 - O espalhamento espectral é realizado usando um código de espalhamento que é independente da informação transmitida.



Princípios do espalhamento espectral

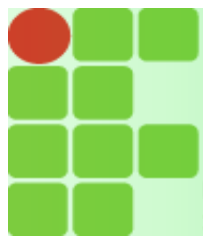
- A recuperação o sinal no receptor é feita correlacionando o sinal recebido com uma cópia sincronizada do código de espalhamento.
- Para tornar essas noções claras, vamos investigar a incorporação de um sinal de informação com largura de banda B em larguras de banda B_s muito maiores do que o necessário.
- Um conjunto de sinais linearmente independentes $s_i(t), i = 1, 2, \dots, M$, com largura de banda B e duração T podem ser escritos por meio de suas funções base:

$$s_i(t) = \sum_{j=1}^N s_{ij} \phi_j(t), \quad 0 \leq t \leq T$$



Princípios do espalhamento espectral

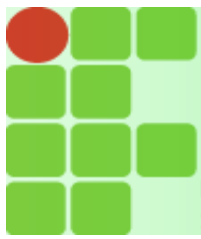
- $\phi_j(t) \rightarrow$ são ortonormais e abrangem um espaço N -dimensional.
- Um desses sinais é transmitido a cada T segundos para transmitir $\log_2 \frac{M}{T}$ bps.
- O número mínimo de funções base necessárias para representar esses sinais é $M \approx 2BT$.
- Portanto, para incorporar esses sinais em um espaço dimensional maior, escolhemos $N \gg M$.
- O receptor usa uma estrutura de ramificação M em que o i -ésimo ramo correlaciona o sinal recebido com $s_i(t)$.
- O receptor emite o sinal correspondente à ramificação com valor máximo.



Princípios do espalhamento espectral

- Suponha que geremos os sinais $s_i(t)$ usando sequências aleatórias, para que as sequências de coeficientes s_{ij} sejam escolhidas com base em uma geração de sequências aleatórias, em que cada coeficiente tenha média zero e variância $\frac{E_s}{N}$.
- Assim, os sinais $s_i(t)$ terão suas energias uniformemente distribuídas no espaço de sinal de dimensão N .
- Considere uma interferência ou um sinal interferente com este espaço de sinal. Este sinal pode ser representado como:

$$I(t) = \sum_{j=1}^N I_j \phi_j(t)$$



Princípios do espalhamento espectral

- Com energia total no intervalo $[0, T]$ dada por:

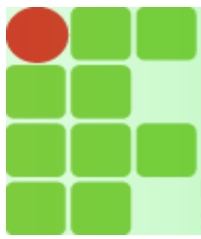
$$\int_0^T I^2(t) dt = \sum_{j=1}^N I_j^2 = E_J.$$

- Considere que o sinal $s_i(t)$ seja transmitido. Desconsiderando o ruído, o sinal recebido é a soma do sinal transmitido com a interferência:

$$x(t) = s_i(t) + I(t).$$

- A saída do correlator no i -ésimo ramo do receptor é então:

$$x_i = \int_0^T x(t) s_i(t) dt = \sum_{j=1}^N (s_{ij}^2 + I_j s_{ij}).$$

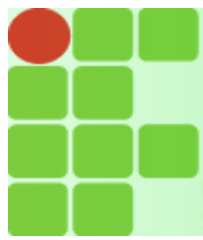


Princípios do espalhamento espectral

- Em que o primeiro termo nessa expressão representa o sinal e o segundo termo a interferência.
- A relação sinal-interferência (SIR) é:

$$\text{SIR} = \frac{E_s}{E_j} \times \frac{N}{M}.$$

- Este resultado é independente da distribuição da energia da interferência no espaço do sinal N -dimensional.
- Espalhar a potência de interferência sobre uma dimensão N maior que a dimensão de sinalização M necessária para a transmissão do sinal, a SIR cresce em $G = N/M$, em que G é chamado **ganho de processamento**.

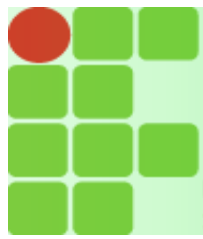


Princípios do espalhamento espectral

- Como $N \approx 2B_sT$ e $M \approx 2BT$, então temos

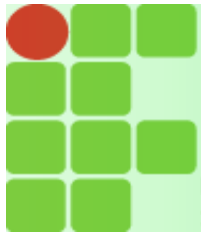
$$G = \frac{B_s}{B}$$

- $G \rightarrow$ relação entre a largura de banda do sinal espalhado com a largura de banda do sinal de informação.
- O ganho de processamento é geralmente definido como a relação de largura de banda ou algo semelhante.
- Mas seu significado subjacente geralmente está relacionado à melhoria de desempenho de um sistema com espalhamento espectral em relação a um sistema sem espalhamento na presença de interferência.



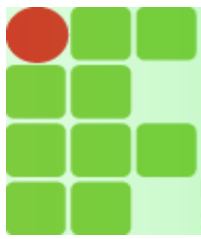
DSSS

- O espalhamento espectral é normalmente implementado de duas formas: **sequência direta (DS)** ou **saltos em frequência (FH)**.
- Na modulação por espalhamento espectral em sequência direta (DSSS), o sinal modulado $s(t)$ é multiplicado por um código ou sinal de espalhamento, com uma grande largura de banda, $s_c(t)$.
- $s_c(t) \rightarrow$ é constante durante um período de tempo T_c e tem uma amplitude igual a ± 1 .
- Os bits de código de espalhamento são geralmente chamados de **chips**, e $\frac{1}{T_c}$ é a taxa de chip.



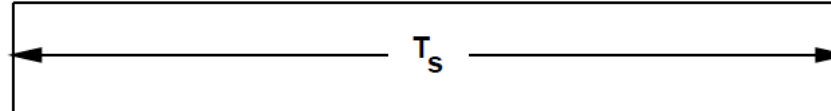
DSSS

- A largura de banda $B_c \approx 1/T_c$ de $s_c(t)$ é aproximadamente $\frac{B_c}{B} \approx \frac{T_s}{T_c}$ vezes maior que a largura de banda B do sinal modulado $s(t)$.
- O número de chips por bit, $\frac{T_s}{T_c}$, é um número inteiro aproximadamente igual a G , o ganho de processamento do sistema.
- Multiplicar o sinal modulado pelo sinal de espalhamento resulta na convolução desses dois sinais no domínio da frequência.
- Assim, o sinal transmitido $s(t)s_c(t)$ tem resposta em frequência $S(f) * S_c(f)$, que tem uma largura de banda de aproximadamente $B_c + B$.

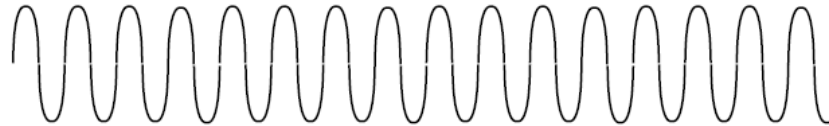


Multiplicação de um sinal de espalhamento com um sinal BPSK

Baseband Modulated Signal $x(t)$



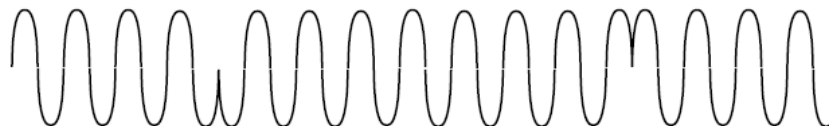
Passband Modulated Signal $s(t)$

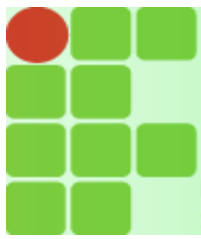


Spreading Signal $s_c(t)$



Transmitted Signal $s(t)s_c(t)$

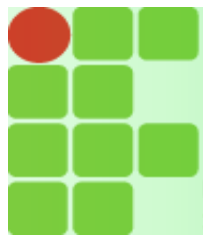




- Para um canal AWGN o sinal espalhado recebido é $r(t) = s(t)s_c(t) + n(t)$.
- Se o receptor multiplica $r(t)$ por uma réplica sincronizada do sinal de espalhamento $s_c(t)$, resulta em:

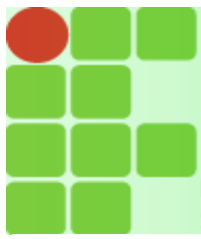
$$s(t)s_c^2(t) + n(t)s_c(t)$$

- Como $s_c(t) = \pm 1$, então $s_c^2(t) = 1$.
- $n'(t) = n(t)s_c(t)$ é aproximadamente estatisticamente igual a $n(t)$ se $s_c(t)$ tiver média zero e uma largura de banda suficientemente grande (com sua autocorrelação se aproximando da função delta).

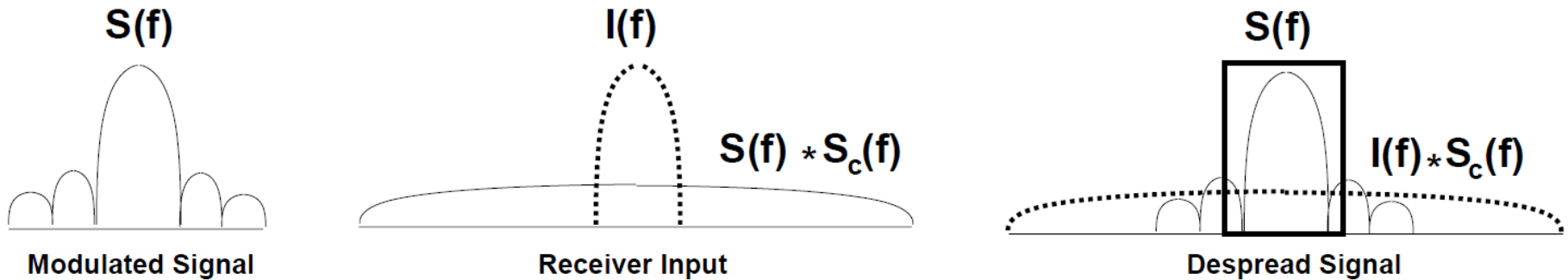


DSSS

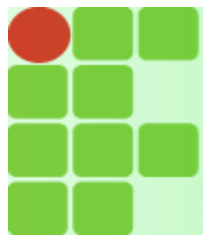
- Assim, o sinal recebido é $s(t)s_c^2(t) + n(t)s_c(t) = s(t) + n'(t)$, indicando que o espalhamento e o desespalhamento não têm impacto nos sinais transmitidos pelos canais AWGN.
- Isso mostra a robustez do DSSS quando o canal introduz interferência em banda estreita ou ISI.
- Vamos ilustrar as propriedades de interferência em banda estreita e rejeição de múltiplos caminhos do DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) no domínio da frequência.
- Primeiro vamos considerar a rejeição de interferência em banda estreita.



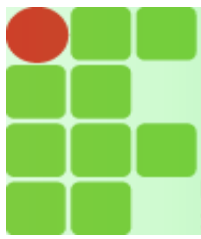
DSSS



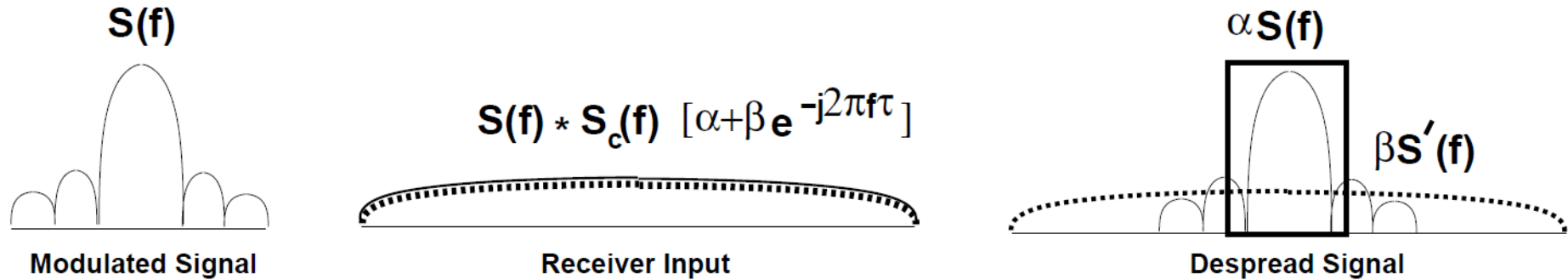
- Desconsiderando o ruído, vemos que o sinal na entrada do receptor consiste de um sinal modulado espalhado $S(f) * S_c(f)$ e da interferência em banda estreita $I(f)$.
- O desespalhamento no receptor recupera o sinal de informação $S(f)$.
- E o sinal de interferência em banda estreita $I(t)$ é multiplicado pelo código de espalhamento $s_c(t)$, resultando em: $I(f) * S_c(f)$.



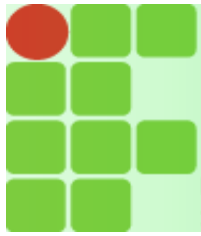
- Assim, o sinal interferente em banda estreita é espalhado na largura de banda do código de espalhamento, atuando como um pequeno nível de ruído sobre o sinal de informação recuperado.
- A demodulação do sinal $s(t)$ atua efetivamente como um filtro passa-baixas, removendo a maior parte da energia da interferência, o que reduz sua potência pelo ganho de processamento G .
- A rejeição ISI baseia-se em uma premissa semelhante.
- Suponha que o sinal de propagação $s(t)s_c(t)$ seja transmitido através de um canal com 2 caminhos com resposta ao impulso $h(t) = \alpha\delta(t) + \beta\delta(t - \tau)$.



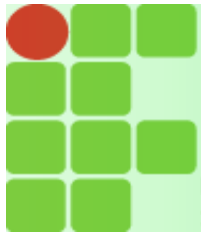
DSSS



- $H(f) = \alpha + \beta e^{-j2\pi f\tau}$, resultando em uma entrada do receptor na ausência de ruído igual a $H(f)[S(f) * S_c(f)]$ no domínio da frequência, ou no tempo $[s(t)s_c(t)] * h(t) = \alpha s(t)s_c(t) + \beta s(t - \tau)s_c(t - \tau)$.
- Suponha que o processo de desespalhamento no receptor multiplique esse sinal por uma cópia de $s_c(t)$ sincronizada com o primeiro caminho desse modelo de dois caminhos.

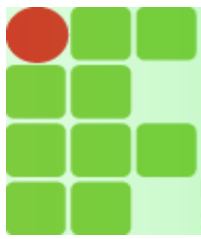


- Isso resulta no sinal: $\alpha s(t)s_c^2(t) + \beta s(t - \tau)s_c(t - \tau)s_c(t)$.
- Como a segunda componente de percurso, $\beta s'(t) = \beta s(t - \tau)s_c(t - \tau)s_c(t)$, inclui o produto de cópias não sincronizadas de $s_c(t)$, ele permanece espalhado sobre a largura de banda do código de espalhamento, e o processo de demodulação removerá a maior parte de sua energia.
- o processo de demodulação atenua efetivamente as componentes de múltiplos percursos pela autocorrelação $\rho_c(\tau)$ do código de espalhamento com o atraso τ .



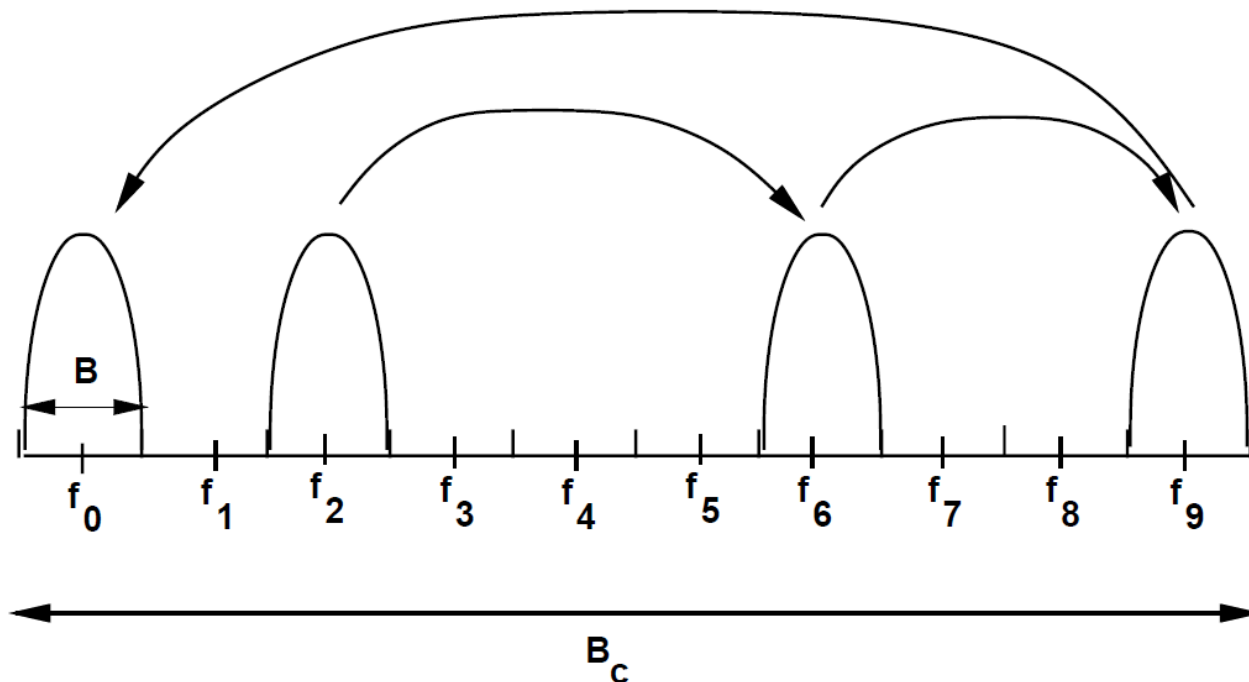
DSSS

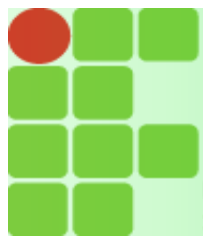
- Essa autocorrelação pode ser bem pequena quando $\tau > T_c$, na ordem de $\frac{1}{G} \approx \frac{T_c}{T_s}$, resultando em uma significativa rejeição da ISI quando o sinal modulado é espalhado por uma ampla largura de banda.
- Como a autocorrelação do código de dispersão determina a rejeição à ISI do sistema de espalhamento espectral, é importante usar códigos de espalhamento com boas propriedades de autocorrelação.



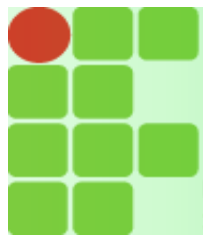
FHSS

- O fundamento básico do espalhamento espectral por saltos em frequência (FHSS) é saltar o sinal de informação em uma banda larga, mudando a frequência da portadora de acordo com um código de espalhamento $s_c(t)$.

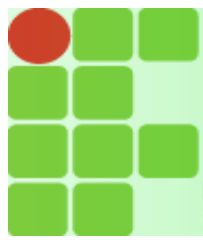




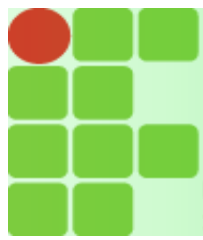
- O período de chip T_c define o tempo entre os saltos. Ou seja, a duração de tempo durante a qual o sinal de informação é centralizado em uma determinada portadora f_i antes de passar para uma nova portadora.
- O tempo de salto pode exceder o tempo de duração de um símbolo, na proporção $T_c = kT_s$, no qual é chamado de salto em frequência lento (SFH) e, k é um valor inteiro qualquer.
- A portadora também pode ser trocada múltiplas vezes durante a duração de um símbolo, assim $T_c = \frac{T_s}{k}$, com k sendo um valor inteiro. E esta é o salto em frequência rápido (FFH).



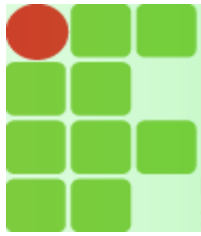
- No FFH, existe diversidade em frequência em todos os símbolos, o que protege cada símbolo contra interferências de banda estreita e nulos espectrais devido ao desvanecimento seletivo de frequência.
- A largura de banda do FHSS é aproximadamente igual a NB , em que N é o número de frequências portadoras disponíveis para salto e B é a largura de banda do sinal de informação.
- O sinal é gerado usando um sintetizador de frequência que determina a frequência portadora de modulação a partir da sequência de chips, normalmente usando uma forma de modulação FM, como CPFSK (*Continuous-phase frequency-shift keying*).



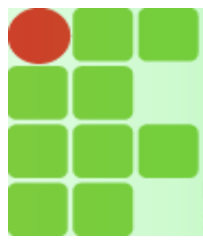
- No receptor, o sinal é demodulado usando um sintetizador de frequência semelhante, sincronizado com a sequência de chips $s_c(t)$, que gera a sequência de frequências portadoras dessa sequência de chips para conversão inversa.
- Como no DSSS, o FHSS não afeta o desempenho em um canal AWGN.
- No entanto, atenua os efeitos da interferência de banda estreita e do múltiplo percurso.
- Considere um sinal interferente de banda estreita com largura de banda B em uma frequência portadora f_i correspondente a uma das portadoras usadas pelo FHSS.



- O sinal interferente e o sinal de informação ocupam a mesma largura de banda somente quando a portadora f_i é gerada pela sequência de salto.
- Se a sequência de saltos gastar uma quantidade igual de tempo em cada uma das frequências portadoras, então a interferência ocorre com $\frac{1}{N}$ do tempo e, portanto, a potência da interferência é reduzida em aproximadamente $\frac{1}{N}$.
- No entanto, a natureza da redução de interferência é diferente nos sistemas FHSS e DSSS.
- Enquanto o DSSS resulta em uma redução da potência interferente durante todo o espectro de tempo, o FHSS ocorre em apenas uma fração do tempo.

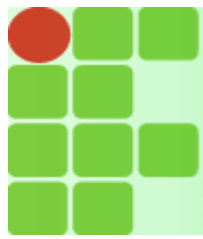


- Nos FFH (*Fast Frequency Hopping*), a interferência afeta apenas uma fração do tempo de símbolo, portanto, a codificação pode não ser necessária para compensar essa interferência.
- Nos sistemas SFH (*Slow Frequency Hopping*), a interferência afeta muitos símbolos; portanto, tipicamente a codificação com intercalação (*interleaving*) é necessária para evitar muitos erros simultâneos em uma única palavra código.



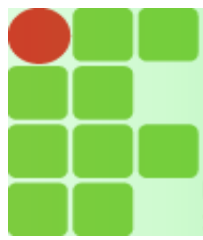
Múltiplos percursos no FHSS

- Para simplificar, consideramos um canal com dois percursos que introduz um componente de múltiplos percursos com atraso τ .
- Suponha que o receptor sincronize com a sequência de saltos associada ao percurso do sinal com linha de visada (LOS).
- Então o percurso com LOS é demodulado na frequência da portadora desejada.
- No entanto, os componentes de múltiplos percursos cheguem ao receptor com um atraso τ .
- Se $\tau > T_c$, o receptor terá pulado para uma nova frequência portadora $f_j \neq f_i$.



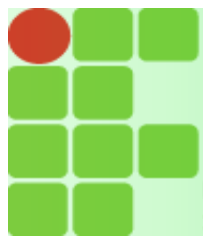
Múltiplos percursos no FHSS

- Como o componente de múltiplo percurso ocupa uma banda de frequência diferente da do componente de sinal no percurso de LOS, ele causa interferência desprezível no sinal demodulado.
- Portanto, o sinal demodulado não exhibe desvanecimento plano ou seletivo em frequência para $\tau > T_c$.
- Se $\tau < T_c$, o impacto do múltiplo percurso depende da largura de banda B do sinal de informação modulado, bem como da taxa de chip.



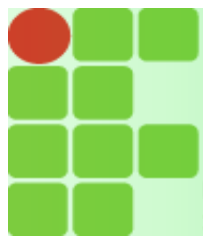
Múltiplos percursos no FHSS

- Primeiro, considere um sistema FFH em que $T_c \ll T_s$.
- Como também assumimos $\tau < T_c$, temos $\tau < T_c \ll T_s$.
- Como todo componente de múltiplo percurso o caminho múltiplo chega dentro de um tempo de símbolo, o múltiplo percurso introduz um ganho de amplitude complexo e o sinal sofre desvanecimento plano.
- Agora considere um sistema SFH em que $T_c \gg T_s$.
- Como também assumimos $\tau < T_c$, todos os múltiplos percurso chegam enquanto o sinal estiver na mesma frequência de portadora f_i , então o impacto do múltiplo percurso é o mesmo que se não houvesse salto de frequência.



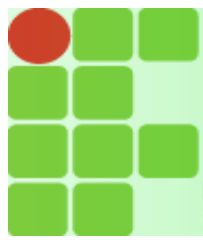
Múltiplos percursos no FHSS

- Para $B < \frac{1}{\tau}$, o sinal apresenta desvanecimento plano e para $B > \frac{1}{\tau}$, o sinal apresenta desvanecimento seletivo em frequência.
- O desvanecimento do canal também varia lentamente ao longo do tempo, pois o canal equivalente da banda base muda sempre que a portadora salta para uma nova frequência.
- Resumindo, o salto de frequência remove o impacto de múltiplos percursos na demodulação do componente com LOS sempre que $\tau > T_c$.



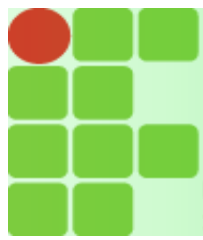
Múltiplos percursos no FHSS

- Para $\tau < T_c$, um sistema FFH terá desvanecimento plano, e um sistema SFH terá desvanecimento plano variando lentamente para $B < \frac{1}{\tau}$ e desvanecimento seletivo em frequência variando lentamente para $B > \frac{1}{\tau}$.
- Além das capacidades de rejeição à interferência e à ISI, o DSSS e o FHSS fornecem um mecanismo para acesso múltiplo, permitindo que muitos usuários compartilhem simultaneamente a mesma largura de banda de propagação com o mínimo de interferência entre os usuários.
- Nestes sistemas com múltiplos usuários, a interferência entre os usuários é determinada pela correlação cruzada de seus códigos de espalhamento $s_c(t)$.



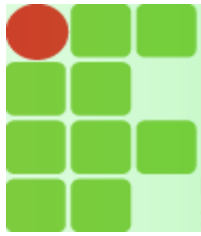
Múltiplos percursos no FHSS

- Os projeto de código de espalhamento normalmente têm boas propriedades de autocorrelação para reduzir a ISI ou boas propriedades de correlação cruzada para reduzir a interferência de múltiplos usuários.
- No entanto, geralmente há uma escolha, entre otimizar a autocorrelação e otimizar a correlação cruzada, que o engenheiro irá priorizar.
- Portanto, a melhor escolha do projeto do código de espalhamento depende do número de usuários no sistema e do quanto o múltiplo percurso e a interferência afetam o sistema.



Exemplo

- Considere um SFH com período de chip $T_c = 10 \mu s$ e período de símbolo $T_s = 1 \mu s$. Se o sinal FHSS é transmitido por um canal com múltiplo percurso, por aproximadamente qual faixa de propagação do atraso de múltiplos percursos o sinal recebido não espalhado sofreu desvanecimento seletivo de frequência?
- ✓ Com base na análise do modelo de dois percursos, o sinal exhibe apenas desvanecimento, plano ou seletivo de frequência, quando o espalhamento de atraso do canal $\tau < T_c = 10 \mu s$.
- ✓ Além disso, para o desvanecimento seletivo em frequência, $B \approx \frac{1}{T_s} = 10^6 > \frac{1}{\tau}$, ou seja, exigimos $\tau > 10^{-6} = 1 \mu s$.



Exemplo

- ✓ Portanto, o sinal não espalhado exibirá desvanecimento seletivo em frequência para faixas de espalhamento de atraso que variam de aproximadamente 1 a 10 μs .