

João Baptista Bayão Ribeiro

**TELECOMUNICAÇÕES**  
**8º Volume**

1ª Edição

Rio de Janeiro

J. B. Bayão

2013

## Curriculum do Autor

João Baptista Bayão Ribeiro é formado em Engenharia de Telecomunicações pela UFF (Universidade Federal Fluminense) em 1971. Trabalhou na Philips do Brasil como Engenheiro Instalador, na Divisão de Equipamentos Científicos e Industriais e simultaneamente como professor da UFF em tempo parcial. Depois ingressou no Laboratório de Desenvolvimento da antiga Telerj, onde trabalhou em Normas Técnica de Operação e de Sistemas. É pós-graduado em Engenharia Elétrica pelo COPPE-UFRJ, onde obteve o título de MsC em 1979. Na década de 80 trabalhou no CpqD em Campinas, na especificação do projeto Trópico, como Engenheiro da Telecom, de S. Paulo. De volta à Telerj, trabalhou no Planejamento de Redes Telefônicas e de Dados. Fez inúmeros trabalhos para a antiga Telebrás, tendo participado ativamente do processo de digitalização do Sistema Telefônico no Brasil. Participou de vários Congressos e foi Professor em várias turmas de técnicos e engenheiros do SBT no Centro Nacional de Treinamento da Telebrás, em Brasília. Aposentou-se como professor em DE pela Escola de Engenharia da UFF, onde lecionou por vários anos após a privatização do Sistema Telebrás e extinção da antiga Telerj. Foi também Professor Substituto no IME, e Professor do curso à distância “Tecnologias Modernas de Telecomunicações”, promovido pelo Centro de Estudos de Pessoal (CEP) do Exército Brasileiro em convênio com a UFF.

## Sumário

No Volume 8 apresentamos ao estudante de engenharia de Telecomunicações, alguns aspectos relativos a Sistemas de Múltiplo Acesso.

## Palavras Chave

Múltiplo Acesso, FDMA, TDMA, CDMA, PRMA, STMA, DAMA, Intelsat, MMA, DSSS

## Direitos Autorais

Este documento é protegido por Copyright © 2010 por seu autor listado abaixo. Você pode distribuir e/ou modificar este trabalho, tanto sob os termos da Licença Pública Geral GNU (<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>), versão 3 ou posterior, ou da Licença de Atribuição Creative Commons (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>), versão 3.0 ou posterior.

Autor: João Baptista Bayão Ribeiro

Feedback: [jribeiro@telecom.uff.br](mailto:jribeiro@telecom.uff.br)



## Índice

INTRODUÇÃO.....	7
FORMAS BÁSICAS DE MÚLTIPLO ACESSO.....	9
DIVISÃO EM FREQUÊNCIA – FDMA.....	10
TAXA DE BITS ENVIADA PELO CANAL FDMA.....	12
RETARDO MÉDIO NO ENVIO DE PACOTES.....	12
DIVISÃO NO TEMPO – TDMA .....	14
TAXA DE BITS ENVIADA PELO CANAL TDMA .....	15
RETARDO MÉDIO NO ENVIO DE PACOTES.....	16
CANALIZAÇÃO DOS RECURSOS DE COMUNICAÇÃO.....	18
MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE CÓDIGO.....	20
TÉCNICAS HÍBRIDAS DE MÚLTIPLO ACESSO.....	22
OUTRAS TÉCNICAS DE MÚLTIPLO ACESSO.....	23
RESUMO.....	25
EXERCÍCIOS .....	26
EXERCÍCIOS – SOLUÇÃO .....	31
CONTROLE NO MÚLTIPLO ACESSO – INTRODUÇÃO.....	37
FLUXO DA INFORMAÇÃO NO MÚLTIPLO ACESSO.....	38
ACESSO FIXO.....	40
DESIGNAÇÃO POR DEMANDA (DAMA).....	41
ALGORITMOS ALOHA.....	42
ALOHA PURO.....	42
Desempenho ALOHA PURO.....	43
ALOHA PARTICIONADO (SLOTTED ALOHA) – S-ALOHA .....	44
CARACTERÍSTICA TAXA NORMALIZADA $\times$ RETARDO.....	45
MELHORAMENTO DO ALGORITMO ALOHA.....	45
COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE S-ALOHA E R-ALOHA .....	47
ALGORÍTMOS DE ACESSO BASEADOS EM TÉCNICAS DE INTERROGAÇÃO (POLLING).....	49
RESUMO.....	52
EXERCÍCIOS.....	53
EXERCÍCIOS – SOLUÇÃO.....	55
TDMA EM APLICAÇÕES SATÉLITE.....	61
TDMA NO INTEL SAT.....	61
TÉCNICAS DE MÚLTIPLO ACESSO PARA REDES DE ÁREAS LOCAIS (LAN).....	63
SISTEMAS DE MÚLTIPLO ACESSO BASEADOS NA ESCUTA DO CANAL (CSMA/CD).....	63
SISTEMAS DE MÚLTIPLO ACESSO BASEADOS NA PASSAGEM DE PERMISSÕES (TOKEN).....	64
RESUMO.....	66
EXERCÍCIOS.....	67
EXERCÍCIOS – SOLUÇÃO.....	69
ESPALHAMENTO ESPECTRAL-INTRODUÇÃO.....	75
ESPALHAMENTO ESPECTRAL POR SEQUÊNCIA DIRETA (DSSS).....	76
MODULAÇÃO.....	77
DEMODULAÇÃO.....	80
DESEMPENHO NA PRESENÇA DE INTERFERÊNCIAS.....	82
INTERFERÊNCIA FAIXA ESTREITA.....	83
INTERFERÊNCIA FAIXA LARGA.....	84
INTERFERÊNCIA COM RUÍDO BRANCO, OU RUÍDO GAUSSIANO.....	85

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO DS-CDMA.....	86
RESUMO.....	89
EXERCÍCIOS.....	90
EXERCÍCIOS - SOLUÇÃO.....	93
ESPALHAMENTO ESPECTRAL POR SALTO EM FREQUÊNCIA (FHSS) .....	101
RESUMO.....	105
EXERCÍCIOS.....	106
EXERCÍCIOS – SOLUÇÃO.....	108

## INTRODUÇÃO

Um sistema de comunicações é na realidade composto de um conjunto de Recursos de Comunicações (RC), os quais devem ser utilizados da forma mais eficiente possível de modo a servir a um conjunto de usuários que desejam se comunicar com uma qualidade especificada a um custo adequado.

De um modo geral, um sistema de comunicações é um sistema multiusuário.

Podemos imaginar um sistema multiusuário como um sistema onde um conjunto finito de RC é disputado por um conjunto também finito de usuários. Quanto maior for o conjunto de usuários em relação ao conjunto de RC disponíveis, maior o impacto negativo na qualidade final do serviço prestado.

Conclui-se, portanto, que é muito importante a forma como os RC são alocados aos usuários, pois isto definirá parâmetros importantes de qualidade para o sistema.

Uma forma muito comum de alocação de RC é o compartilhamento de um meio de transmissão por vários usuários através de técnicas conhecidas como Multiplexação. Outra abordagem envolve o conceito de Múltiplo Acesso.

As técnicas de Múltiplo Acesso são em essência bastante semelhantes às de Multiplexação. Entretanto, conforme citado por Sklar, existe uma diferença sutil entre Multiplexação e Múltiplo Acesso.

Na *Multiplexação*, os requisitos de usuários ou planejamento de alocação de RC são fixos, ou no máximo, variam lentamente. A alocação dos RC é estabelecida a priori, e o compartilhamento é usualmente um processo que se realiza confinado a um local (p. ex., uma placa de circuito). *Múltiplo acesso*, entretanto, usualmente envolve o compartilhamento remoto de um recurso, tal com um satélite. Com um esquema de múltiplo acesso que pode mudar dinamicamente, um controlador ou gerente de um sistema pode reconhecer as necessidades de RC individuais de cada usuário, otimizando o uso do sistema. Entretanto, a quantidade de tempo necessária à transferência dessa informação de controle constitui uma sobrecarga e estabelece um limite superior na eficiência da utilização dos RC.

O tipo de controle utilizado irá variar de sistema para sistema e sua aplicação.

Um exemplo clássico de aplicação de técnicas de múltiplo acesso é na comunicação via

satélite, onde RC (equipamentos do satélite, tais com transponders, antenas, etc) devem ser utilizados por um grande número de usuários, que seriam as estações de comunicação espalhadas ao longo do globo terrestre.

Outro exemplo de utilização de técnicas de múltiplo acesso é na constituição de sistemas de telefonia móvel celular. Nesses sistemas, os RC disponíveis em uma ERB são disputados pelo conjunto de usuários momentaneamente alocados aquela ERB.

Para prover este controle de acesso a RC de comunicação deve ser implementado um *algoritmo de controle de acesso*.

## FORMAS BÁSICAS DE MÚLTIPLO ACESSO

A finalidade das técnicas de Múltiplo Acesso é tornar a alocação dos RC mais eficiente.

Existem 5 formas básicas de Múltiplo Acesso:

- 1- Divisão em Frequência (FD – Frequency Division) – sub-bandas específicas de frequência são alocadas.
- 2- Divisão no Tempo (TD – Time Division) – Intervalos de tempo periodicamente recorrentes são identificados. Em alguns sistemas, aos usuários é estabelecida uma designação fixa no tempo. Em outros, aos usuários é dado um acesso aleatório.
- 3- Divisão de Código (CD – Code Division) – Membros específicos de um conjunto ortogonal ou aproximadamente ortogonal de códigos de espalhamento espectral (usando cada um a totalidade da banda disponível) são alocados.
- 4- Divisão Espacial (SD – Spatial Division) – Antenas direcionais permitem o reuso de frequências separando espacialmente feixes de rádio em diferentes direções.
- 5- Divisão de Polarização (PD – Polarization Division) - Polarizações ortogonais são usadas para separar sinais, permitindo o reuso da mesma banda de frequências. Usado bastante em comunicações satélite.

## **DIVISÃO EM FREQUÊNCIA – FDMA**

A Figura 1 ilustra a idéia básica da divisão em frequência (que é exatamente a idéia básica que norteia a realização dos sistemas FDM – Multiplex por divisão em frequências). A cada usuário do sistema é dinamicamente alocada uma determinada banda de frequências, que permanece reservada ao uso deste usuário enquanto durar a conexão, constituindo assim um canal de comunicações.

Dentro da banda de frequências alocada, ou em outras palavras, no canal reservado ao usuário pelo sistema de múltiplo acesso baseado em divisão em frequências, pode ser, de um modo geral, utilizado qualquer tipo de modulação (AM, FM, etc), e qualquer uma técnica de multiplexação tal como FDM, TDM, etc , para melhor aproveitamento da banda disponível. A separação entre bandas é feita deixando-se um espaço vazio entre elas, chamado Banda de Guarda.

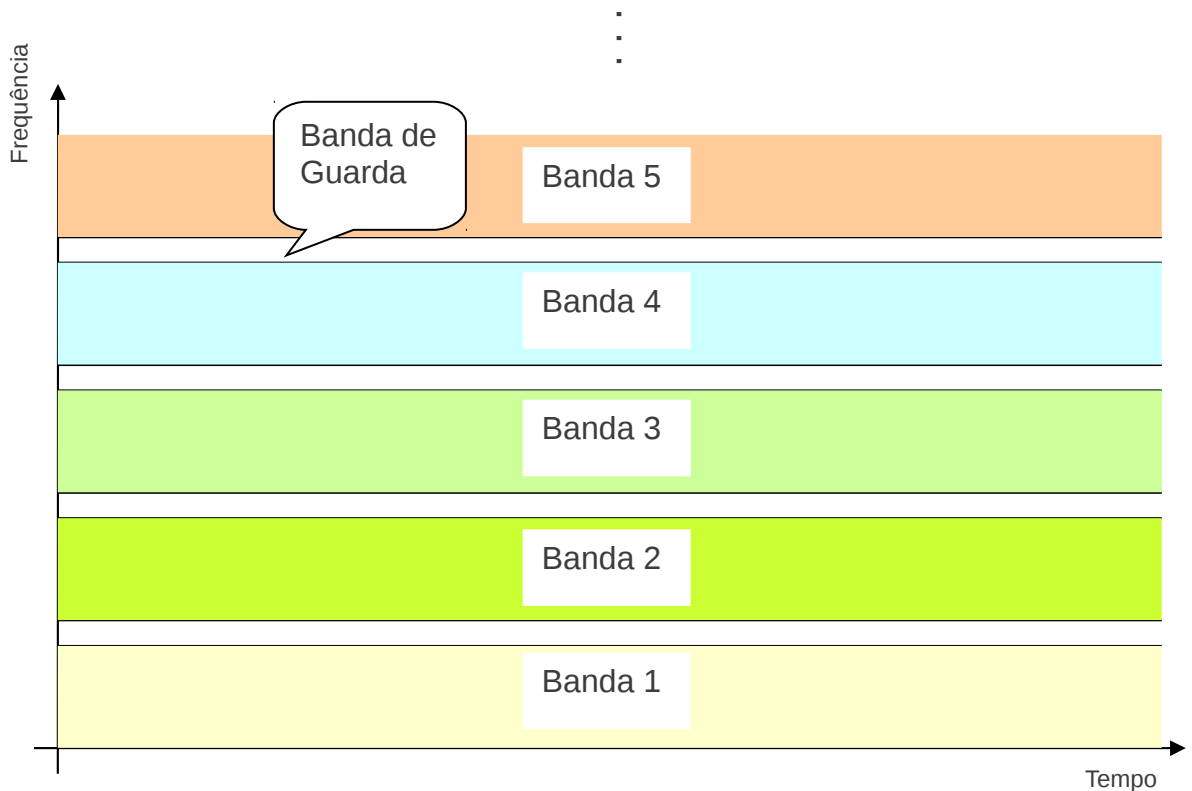


Figura 1  
Divisão em frequência

Por exemplo, na transmissão via satélite um tipo de múltiplo acesso é denominado FDM / FM / FDMA, significando ser um sistema de múltiplo acesso por divisão em frequência, empregando em cada sub-banda a modulação FM e técnicas de multiplexação FDM. Um sistema de controle coordena a alocação de cada sub-banda, de modo que o satélite possa ser compartilhado por vários usuários.

Cada usuário recebe uma banda específica, através da qual poderá acessar o satélite. Nessa banda, ele utilizará, nesse exemplo, uma portadora modulada em FM transmitindo um supergrupo Básico de 60 canais (312 a 552 kHz) correspondente a um sistema de multiplexação FDM.

A maior vantagem do esquema FDMA (comparado ao TDMA) é sua simplicidade. O canal FDMA não requer sincronismo ou temporização central. Cada canal é praticamente independente do outro.

## ***TAXA DE BITS ENVIADA PELO CANAL FDMA***

A Figura 2 ilustra simbolicamente a transmissão de informação gerada por uma fonte  $F_i$ ,  $i=1,2,3...M$ , usuária de um sistema FDMA que partilha um RC (Recurso de Comunicação) capaz de suportar uma taxa total de bits de  $R$  bit/s.

Na Figura 2, a largura de banda total do sistema é dividida em  $M$  bandas de frequência pelo sistema FDMA, sendo alocada uma banda a cada usuário. Nessa análise, por simplificação, não se leva em conta a banda de guarda.

Portanto a capacidade média total de cada fonte é  $R/M$  bit/s.

Supondo agora que a fonte  $F_i$  organize a informação a ser transmitida, em grupos de bits chamados pacotes, e que cada pacote contenha  $b$  bits.

Se cada pacote levar um tempo  $T$  para ser transmitido, evidentemente  $b/T = R/M$ , ou  $R = Mb/T$  bit/s.

O valor  $Mb/T$  pode ser interpretado como sendo a taxa de transmissão mínima requerida por um sistema FDMA para suportar  $M$  usuários, cada qual operando com uma taxa média de  $b/T$  bit/s.

## ***RETARDO MÉDIO NO ENVIO DE PACOTES***

Supondo o caso mais simples, de fontes de dados determinísticas, e que o RC seja 100% utilizado, de tal modo que todas as bandas de frequência estejam ocupadas, o retardo no envio de uma mensagem,  $D$ , pode ser definido como:

$$D = \delta + \tau,$$

Sendo  $\delta$  o tempo médio de espera para transmissão do pacote, e  $\tau$  o tempo de transmissão do pacote.

Conforme acima definido, o tempo de transmissão para o FDMA é simplesmente:

$$\tau_{\text{FDMA}} = T.$$

Uma vez que no FDMA todos os canais são continuamente disponíveis e os pacotes são enviados tão logo sejam gerados, o tempo de espera é  $\delta_{\text{FDMA}}=0$ .

Conclui-se portanto que  $D_{\text{FDMA}}=T$ .

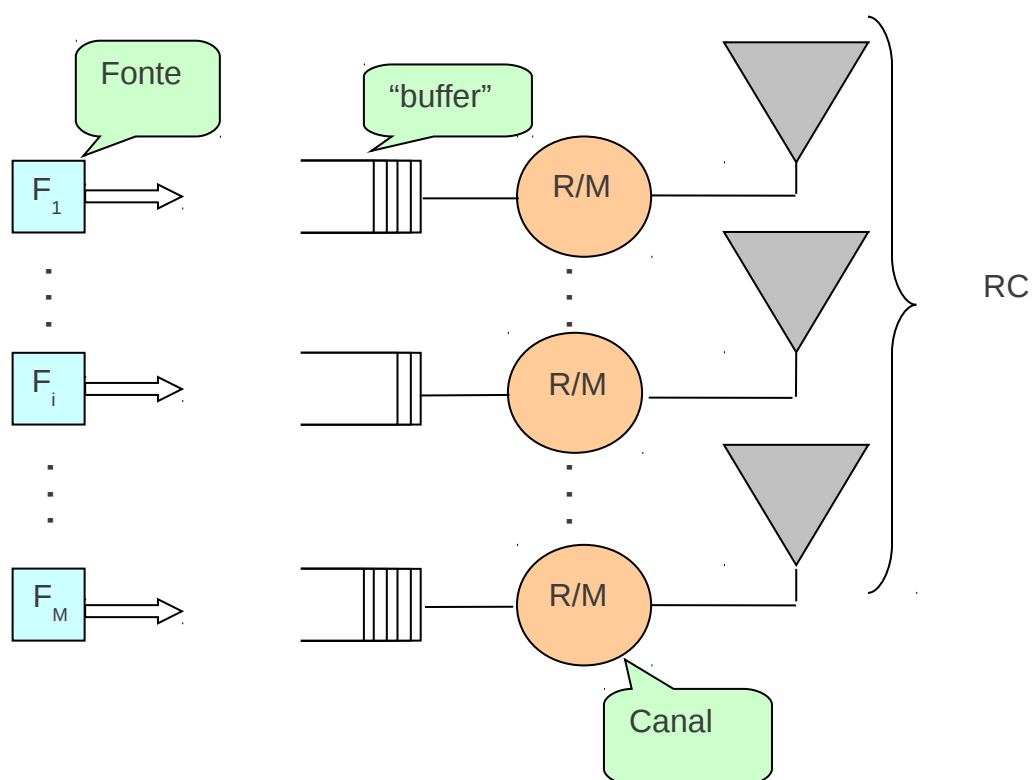


Figura 2  
FDMA

## DIVISÃO NO TEMPO – TDMA

No esquema de múltiplo acesso TDMA, cada usuário é alocado a um intervalo de tempo específico, durante o qual ele está livre para utilizar toda a banda disponível do canal. A Figura 3 ilustra essa idéia.

Observa-se que entre Intervalos de Tempo sucessivos é estabelecido um Tempo de Guarda, para levar em conta eventuais imprecisões na temporização.

Por exemplo, em uma aplicação satélite, um dos esquemas mais simples é o esquema TDM/TDMA, onde M intervalos de tempo, que constituem um Quadro, são pré-designados a longo termo a um determinado usuário. Durante cada Intervalo de Tempo, nesse caso, cada usuário tem acesso a toda a banda do satélite.

Como todo sistema TDM, o acesso TDMA exige sincronismo. Sob esse ponto de vista, ele é mais complexo do que um sistema baseado em FDMA.

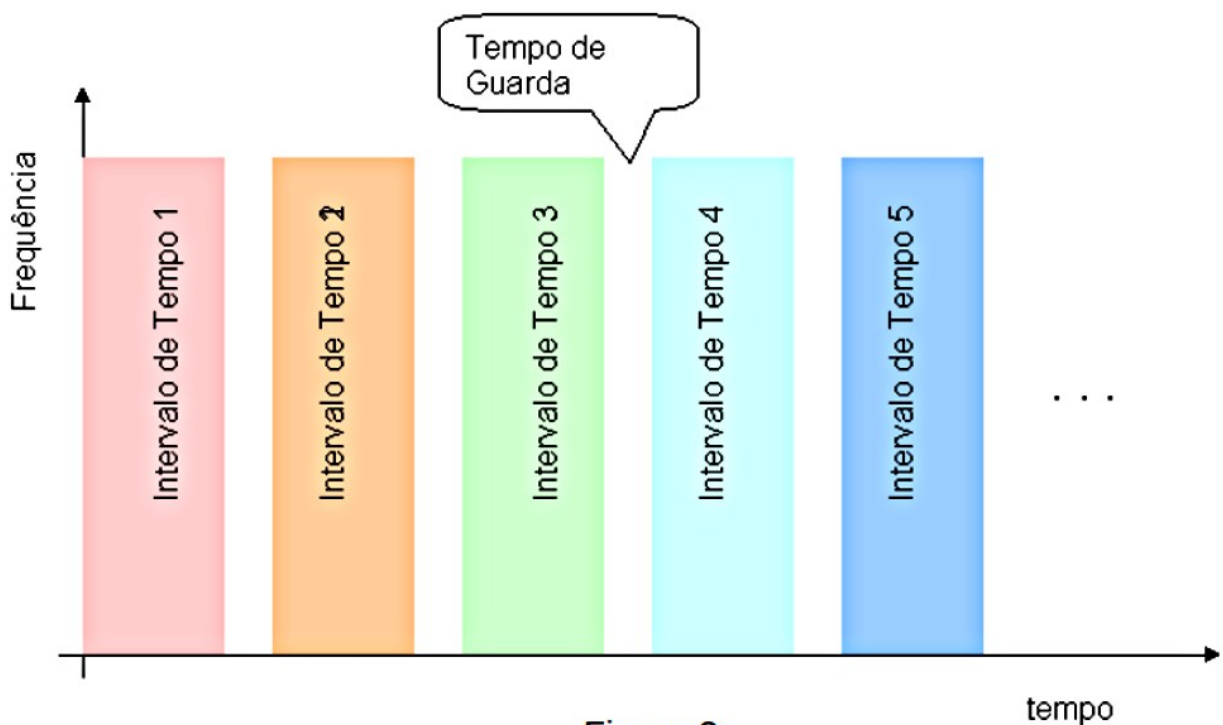


Figura 3  
Ilustração do TDMA

### **TAXA DE BITS ENVIADA PELO CANAL TDMA**

A Figura 4 ilustra simbolicamente a transmissão de informação gerada por uma fonte  $F_i$ ,  $i=1,2,3...M$ , usuária de um sistema TDMA que partilha um RC (Recurso de Comunicação) capaz de suportar uma taxa total de bits de  $R$  bit/s.

Nessa figura, o Quadro de transmissão total é dividido em  $M$  intervalos de tempo, sendo cada intervalo alocado a um usuário. A taxa média de bits, para cada fonte, é portanto  $R/M$  bit/s. Entretanto, como o RC trabalha a uma taxa de  $R$  bit/s, e a cada intervalo de tempo existe apenas 1 usuário utilizando o RC, a taxa de transmissão enviada nesse momento, pelo usuário, deve ser  $R$  bit/s. Portanto, a fonte transforma o seu fluxo contínuo de bits em rajadas mais rápidas, para compatibilizar sua taxa média de transmissão com a taxa requerida pelo RC.

Supondo que a fonte organize os bits a serem transmitidos em pacotes de tamanho  $b$  bits, e os armazene em “buffers” durante  $T$  segundos, é evidente que, da mesma forma que no FDMA,  $b/T=R/M$ . Portanto,  $R=Mb/T$ . Nessa condições, o tempo de transmissão necessário para que cada usuário, ou cada fonte envie os  $b$  bits sobre o RC é de  $T/M$ .

Nessa análise, por simplificação, o tempo de guarda foi ignorado.

Observe que no caso do TDMA existe necessidade de um esquema de sincronismo entre os diversos usuários, para que cada um transmita sua informação no instante de tempo correspondente ao intervalo de tempo a ele designado.

Na Figura 4, isto está indicado pelo bloco “multiplexadores por divisão de tempo”.

Conclui-se, portanto, que tanto no caso do FDMA quanto no caso do TDMA a taxa de transmissão global, requerida por um RC é  $R=Mb/T$  bit/s, para o partilhamento entre  $M$  fontes trabalhando à taxa média de  $b/T$  bit/s cada uma.

Assim, em relação à taxa total requerida, podemos dizer que o desempenho de sistemas TDMA é igual ao de sistemas FDMA.

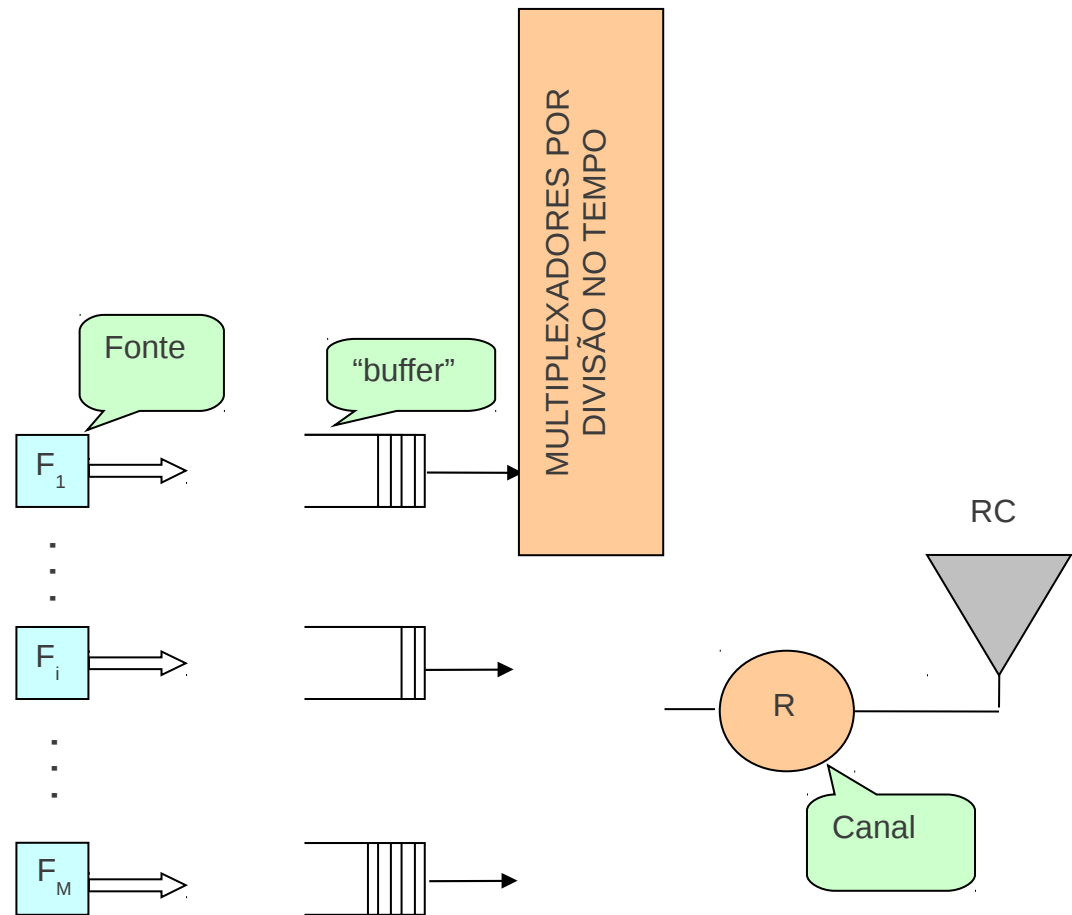


Figura 4  
TDMA

### ***RETARDO MÉDIO NO ENVIO DE PACOTES***

Como no FDMA, vamos supor o caso mais simples, de fontes determinísticas e ocupação de 100% em todos os canais (ou seja, todos os intervalos de tempo estão preenchidos com pacotes). Como no FDMA, o retardo no envio de uma mensagem,  $D$ , pode ser definido como:

$$D = \delta + \tau,$$

sendo  $\delta$  o tempo médio de espera para transmissão do pacote, e  $\tau$  o tempo de transmissão do

pacote.

Conforme definido no item anterior, o tempo de transmissão do pacote, no caso do TDMA, é  $\tau_{TDMA} = T/M = b/R$ .

No caso do TDMA, os pacotes são enviados através do canal a uma taxa de  $R = Mb/T$  bit/s. Entretanto, no TDMA, a disponibilidade de transmissão do canal ocorre apenas durante o intervalo de tempo designado para o canal. Isto faz com que tenhamos um tempo de espera para a transmissão, que varia em função da posição do intervalo de tempo na estrutura de Quadro definida para o TDMA.

Em relação ao início de cada Quadro, cada intervalo de transmissão inicia em  $(m-1)T/M$  segundos ( $m=1,2,\dots,M$ ), onde  $M$  é o número total de intervalos em que o Quadro foi dividido. Assim, o tempo médio de espera  $\delta$ , para o TDMA, pode ser estabelecido como:

$$\delta_{TDMA} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (m-1) \frac{T}{M} = \frac{T}{M^2} \sum_{n=0}^{M-1} n = \frac{T}{M^2} \frac{(M-1)M}{2} = \frac{T}{2} \left(1 - \frac{1}{M}\right)$$

Desta forma, para o TDMA o retardo  $D$  no envio de uma mensagem pode ser escrito como:

$$D_{TDMA} = \frac{T}{2} \left(1 - \frac{1}{M}\right) + \frac{T}{M} = T - \frac{T}{2} \left(1 - \frac{1}{M}\right)$$

Mas, do item V.1.2.1.2, vimos que  $D_{FDMA} = T$ , e portanto

$$D_{TDMA} = D_{FDMA} - \frac{T}{2} \left(1 - \frac{1}{M}\right), \text{ ou em termos da taxa } R = Mb/T,$$

$$D_{TDMA} = D_{FDMA} - \frac{b}{2R} \left(1 - \frac{1}{M}\right)$$

Este resultado indica que TDMA é superior ao FDMA, ao menos quanto ao retardo de envio de mensagens.

## CANALIZAÇÃO DOS RECURSOS DE COMUNICAÇÃO

Uma organização mais geral dos recursos de comunicação (RC) envolve a idéia de uma combinação das duas técnicas acima descritas, no que se chama FDMA / TDMA combinado. Nesse esquema, permite-se a designação de bandas de frequência durante períodos de tempo. A Figura 5 ilustra a idéia.

Vamos supor que cada usuário seja sincronizado no tempo e que os intervalos designados ocorrem de forma periódica nos Quadros. Cada usuário, em cada Banda de Frequência, só pode transmitir durante o Intervalo de Tempo a ele reservado, e só pode utilizar a banda correspondente.

Um Intervalo de Tempo é determinado como o m-ésimo intervalo dentro do n-ésimo Quadro, e pode ser descrito por:

$$\text{Intervalo de Tempo}(m, n) = nT + \frac{(m-1)T}{N} \leq t \leq nT + \frac{mT}{N}$$

$$n=0,1,2,\dots; \quad m=1,2,3,\dots,N.$$

Um Quadro, por sua vez, corresponde ao período de tempo de duração  $T$  s, contém  $N$  Intervalos de Tempo, e o Quadro  $n$  é determinado pelo período que vai desde  $nT$  até  $(n+1)T$ . Suponha que o sistema de codificação/modulação é escolhido de forma que a largura de banda total do RC,  $W$  Hz, possa suportar  $R$  bit/s.

Uma vez que cada usuário que partilha o RC pode acessar o sistema durante um Intervalo de Tempo de duração  $T/N$ , tendo disponibilidade de uma banda de  $W/M$ , onde  $M$  é o número de sub-bandas, durante cada intervalo a taxa de transmissão é de  $R/M$  bit/s. Existindo  $N$  Intervalos de Tempo em cada Quadro, e supondo que a cada usuário seja designado apenas um intervalo, temos um total de  $NM$  usuários, sendo a taxa de transmissão média de cada usuário  $R/MN$ .

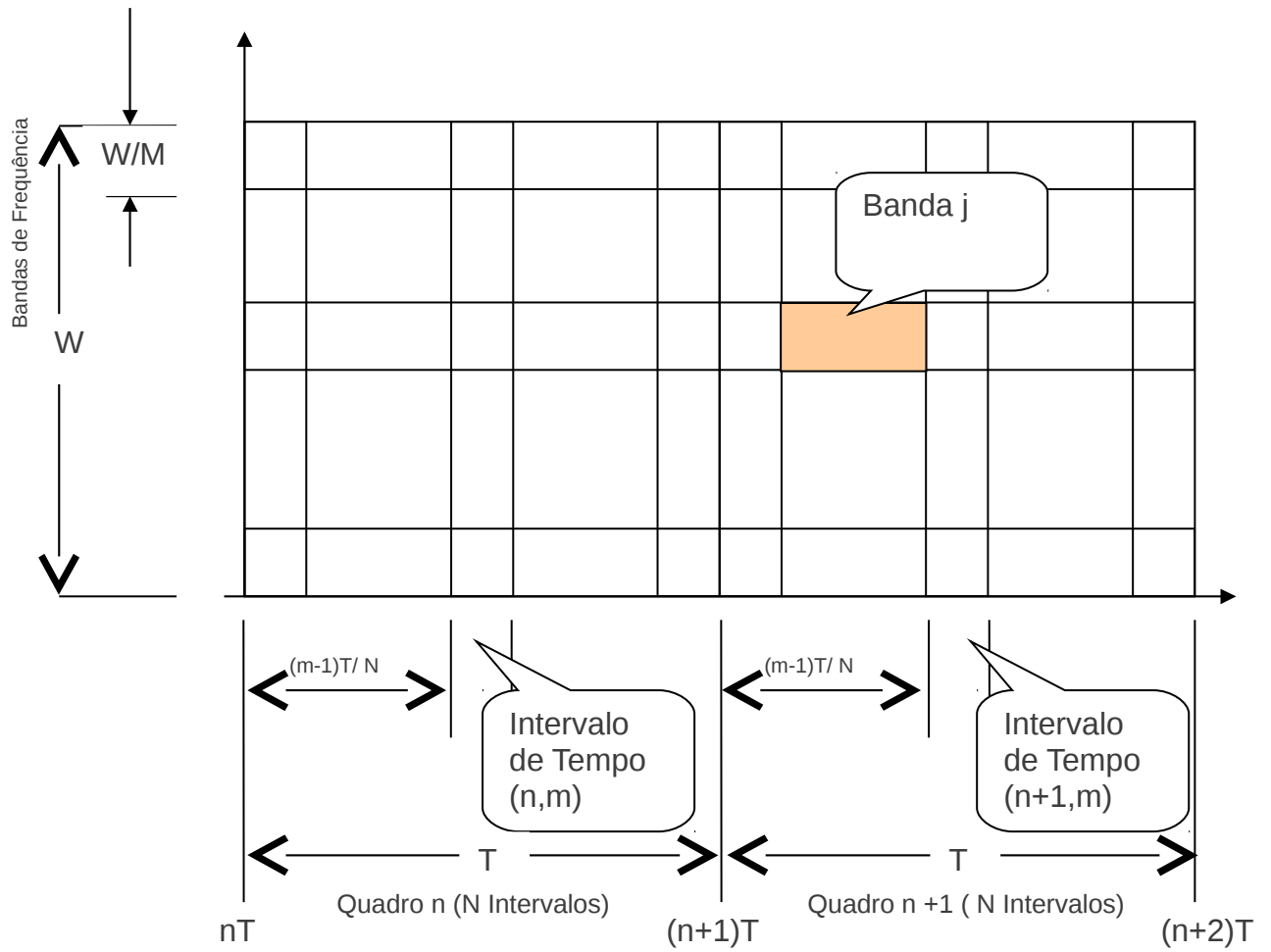


Figura 5  
Recursos de Comunicação  
Canalização Tempo-Frequência

## MÚLTIPLO ACESSO POR DIVISÃO DE CÓDIGO

A técnica de Múltiplo Acesso por Divisão de Código (CDMA), é uma aplicação da técnica de Espalhamento Espectral (SS – Spread Spectrum). Nesta técnica, utiliza-se sequência aleatórias (ou quase aleatórias – pseudo aleatórias) para espalhar a informação do sinal modulado original em uma banda do espectro que é bem maior do que a banda original do sinal modulado. Essas sequências são ortogonais entre si, e são chamadas de sequências PN (pseudo-noise).

Como base para o estudo da técnica de Múltiplo Acesso CDMA, vamos conceituar o espalhamento espectral.

O espalhamento espectral (em inglês Spread Spectrum – SS) é uma técnica na qual um código pseudo-aleatório (pn – pseudo noise), independente dos dados de informação, é empregado como uma forma de onda de modulação para espalhar a energia do sinal ao longo de uma largura de faixa muito maior do que a largura de faixa do sinal. No receptor o sinal é “desespalhado” utilizando-se uma réplica sincronizada do código pseudo-aleatório. O espalhamento espectral pode ser feito, basicamente, de duas formas:

- a) Espalhamento por sequência direta (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS)
- b) Espalhamento por salto de frequência (Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS)

As técnicas de CDMA oferecem algumas vantagens únicas, em relação ao TDMA e FDMA, entre as quais podemos citar:

- Privacidade: O código PN, sendo de conhecimento apenas dos usuários autorizados, provê privacidade na comunicação, pois a informação não pode ser facilmente decodificada por usuários não autorizados que não possuem o código.
- Imunidade a desvanecimentos: Se um pedaço particular do espectro é caracterizado por desvanecimentos, sinais naquela faixa de frequência são atenuados. No esquema FDMA, por exemplo, usuários que foram desafortunadamente alocados a partes desvanecidas do espectro experimentarão alta degradação da comunicação enquanto

persistir o desvanecimento. Já no CDMA, uma vez que a informação está espalhada ao longo do espectro, e a utilização da banda é comum a todos os usuários, o desvanecimento terá um efeito relativamente pequeno no total, e é partilhado por todos os usuários do sistema.

- Resistência a interferências: é uma decorrência do Espalhamento Espectral, que pela sua própria natureza torna o sistema mais imune a interferências, que ocorreriam de forma mais prejudicial em sistemas convencionais.
- Flexibilidade: A maior vantagem dos esquemas CDMA, comparado ao TDMA, é que não há a necessidade de sincronismo de tempo preciso entre os vários transmissores simultâneos. A ortogonalidade entre transmissões de usuários com códigos diferentes não é afetada por variações no instante de transmissão.

## **TÉCNICAS HÍBRIDAS DE MÚLTIPLO ACESSO**

As técnicas híbridas combinam as três técnicas citadas anteriormente. São elas:

FDMA/TDMA, FDMA/CDMA e TDMA/CDMA.

Na técnica híbrida FDMA/TDMA o espectro disponível é dividido em sub-faixas onde cada uma transporta a comunicação de um determinado número de usuários que compartilham essa sub-faixa em instante de tempo distintos.

Na técnica FDMA/CDMA o espectro disponível é dividido em sub-faixas onde cada uma transporta a comunicação de um determinado número de usuários, que compartilham essa sub-faixa ao mesmo tempo, porém utilizando sequências PN distintas (códigos distintos)

Na técnica TDMA/CDMA um determinado grupo de usuários é dado um mesmo código PN, sendo que a cada usuário do grupo é alocado um instante de tempo diferente.

## OUTRAS TÉCNICAS DE MÚLTIPLO ACESSO

Existem várias outras técnicas de múltiplo acesso, função da aplicação e do tipo específico de sistema. Entre eles, podemos citar:

- Acesso ALOHA

O acesso ALOHA é uma técnica de múltiplo acesso que permite a alocação dinâmica de recursos de rádio a um conjunto de terminais que apresentam tráfego tipicamente em rajadas (bursty traffic).

Historicamente, a técnica ALOHA foi originalmente empregada na Universidade do HÁWAI para interconectar em rede transmissores fixos em ilhas localizadas a dezenas de quilômetros. No sistema original, cada terminal é permitido transmitir a qualquer momento, sem levar em conta se o canal está ocupado ou não.

Se um pacote de dados é recebido corretamente, a estação base transmite uma mensagem de reconhecimento. Se nenhum reconhecimento é recebido pelo terminal móvel ele retransmite o pacote após esperar um período de tempo aleatório.

O retardo na comunicação é determinado pela probabilidade de um pacote de dados não ser recebido devido à interferência de outras transmissões (colisões) e pelo tempo médio esperado antes de uma retransmissão.

O acesso ALOHA, com certas variações e aperfeiçoamentos, é utilizado em quase todos os sistemas de telefonia celular, no processo de inicialização de chamadas.

- Acesso PRMA

O PRMA (Packet Reservation Multiple Access) é um método de acesso múltiplo que utiliza quadros com um determinado número fixo de Intervalos de Tempo. Se um terminal tem uma série de pacotes a transmitir ele compete com outros terminais por um intervalo livre. Tendo “capturado” um determinado intervalo, ao terminal são reservados os intervalos correspondentes nos próximos quadros, até que ele libere essa reserva.

A técnica de acesso PRMA é utilizada em conjunto com o método TASI (Time Assigned Speech Interpolation) ou DSI (Digital Speech Interpolation) como método de acesso em redes sem fio, e é semelhante a uma variação do método ALOHA.

- Acesso STRMA

O STRMA (Space-Time Reservation Multiple Access) combina o reuso de frequências com

múltiplo acesso e utiliza técnicas de interpolação digital de voz (DSI). O objetivo do STRMA é o de dar suporte ao tráfego de aplicações multimídia em sistemas moveis celulares.

O STRMA pode ser interpretado como uma extensão espacial da técnica PRMA. No PRMA células adjacentes, em sistemas celulares, utilizam frequências deferentes, de acordo com o planejamento de reuso do sistema celular, mas no STRMA há o sincronismo entre estação rádio base e equipamentos terminais celular a nível de Intervalo de Tempo. Os Intervalos de Tempo são comuns a todas as células e utilizam a mesma frequência de portadora. Entretanto, havendo a reserva de determinados Intervalos em uma célula, as estações de rádio base do primeiro conjunto de células vizinha proibirá a todos os outros terminais utilizarem os mesmos Intervalos de Tempo.. Assim, as reservas não ocorrem somente no domínio de tempo, como no PRMA, mas também no espaço.

## RESUMO

Nesta parte, foram abordados conceitos básicos envolvendo o múltiplo acesso, definindo FDMA (Múltiplo Acesso por Divisão na Frequência) e estudando algumas de suas características relevantes para a transmissão digital, o mesmo ocorrendo para o TDMA (Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo).

Um conceito importante, que foi destacado, é de que as técnicas do Acesso Múltiplo visam principalmente a alocação de RC (Recursos de Comunicação), finitos, a um conjunto de usuários, normalmente maior do que o conjunto dos RC disponíveis.

Este fato implica em que há necessidade de uma implantação de estratégias de controle, para alocação dos recursos de comunicação aos usuários.

Este controle consome tempo e uma parcela dos RC disponíveis, o que impõe um limite superior para o desempenho dos sistemas.

Nesta parte, foram também descritos brevemente outros tipos de sistemas de múltiplo acesso e citada suas aplicações, tais como os sistemas CDMA, PRMA e STRMA.

## EXERCÍCIOS

1) Complete as lacunas:

- a) Um sistema de comunicações é na realidade composto de um conjunto de \_\_\_\_\_, os quais devem ser utilizados da forma mais eficiente possível de modo a servir a um conjunto de usuários que desejam se comunicar com uma qualidade especificada a um custo adequado.
- b) Podemos imaginar um sistema \_\_\_\_\_ como um sistema onde um conjunto finito de RC é disputado por um conjunto também finito de usuários.
- c) Uma forma muito comum de alocação de RC é o \_\_\_\_\_ de um meio de transmissão por vários usuários através de técnicas conhecidas como multiplexação.
- d) Na \_\_\_\_\_, os requisitos de usuários ou planejamento de alocação de RC são fixos, ou no máximo, variam lentamente.
- e) \_\_\_\_\_ usualmente envolve o partilhamento \_\_\_\_\_ de um recurso, tal com um satélite. Com um esquema de \_\_\_\_\_ que pode mudar \_\_\_\_\_, um controlador ou gerente de um sistema pode reconhecer as necessidades de RC individuais de cada usuário, \_\_\_\_\_ o uso do sistema.

2) Escolha as alternativas corretas:

A finalidade das técnicas de Múltiplo Acesso é tornar a alocação dos RC mais eficiente. Existem 5 formas básicas de Múltiplo Acesso:

- a) Divisão em Frequência (FD – Frequency Division) – sub-bandas específicas de frequência são alocadas.
- b) Divisão no Tempo (TD – Time Division) – Intervalos de tempo periodicamente recorrentes são identificados. Em alguns sistemas, aos usuários é estabelecida uma designação fixa no tempo. Em outros, aos usuários é dado um acesso aleatório.

- c) Divisão de Código (CD – Code Division) – Membros específicos de um conjunto não ortogonal ou aproximadamente ortogonal de códigos de espalhamento espectral (usando cada um a totalidade da banda disponível) são alocados.
- d) Divisão Espacial (SD – Spatial Division) – Antenas bi-direcionais permitem o reuso de frequências separando espacialmente feixes de rádio em diferentes direções.
- e) Divisão de Polarização (PD – Polarization Division) - Polarizações ortogonais são usadas para separar sinais, permitindo o reuso da mesma banda de frequências. Usado bastante em comunicações satélite.
- 3) Um sistema de múltiplo acesso FDMA possui 60 canais, sendo cada canal de largura de banda nominal de 4 kHz, incluindo a banda de guarda. Qual a largura de banda total ocupada?
- 4) É possível existir um sistema múltiplo acesso PDH/FM/FDMA? Explique:
- 5) Um sistema de múltiplo acesso FDMA utiliza 100 canais, cada qual com uma largura de banda de 3 KHz e emprega uma banda de guarda de 500 Hz. Supondo que o sistema esteja 100% ocupado, qual seria a taxa máxima de transmissão esperada para cada usuário? Cada canal, teoricamente, utilizaria pulsos de Nyquist para a transmissão. Qual a taxa máxima,  $R$ , do sistema?
- 6) No sistema do exercício (5), qual o valor mínimo do retardo de transmissão?
- 7) No sistema do exercício (5), supondo a utilização de um pacote para armazenamento com 50 bits, qual o tempo de transmissão de um (1) pacote?
- 8) Interprete o termo “continuamente disponíveis” , no texto:  
 “Uma vez que no FDMA todos os canais são continuamente disponíveis e os pacotes são enviados tão logo sejam gerados, o tempo de espera é  $\delta_{\text{FDMA}}=0$ .”
- 9) Um sistema TDMA utiliza 128 canais, transmitindo à taxa de 8192 kbit/s. Supondo que o tempo reservado é o mesmo, para todos os canais, qual (a) a taxa média de transmissão?  
 (b) Supondo que o tempo máximo de espera para cada canal é de 128 ms, qual o tempo de transmissão máximo que pode ser alocado a cada canal?

(c) Nesse caso, qual o tamanho do pacote?

10) Para o sistema do exercício (9), com,  $b=8256$  bits, qual o tempo de guarda decorrente? Compare este valor ao tempo de transmissão de 1 bit.

11) Preencha as lacunas

a) A técnica de Múltiplo Acesso por Divisão de Código (CDMA), é uma aplicação da técnica\_\_\_\_\_.

b) Na técnica de Espalhamento Espectral (SS – Spread Spectrum), utiliza-se \_\_\_\_\_ para espalhar a informação do sinal modulado original em \_\_\_\_\_ que é bem maior do que a \_\_\_\_\_ do sinal modulado.

c) O espalhamento espectral (em inglês Spread Spectrum – SS) é uma técnica na qual um \_\_\_\_\_, independente dos dados de informação, é empregado como uma forma de onda de modulação para \_\_\_\_\_ a energia do sinal ao longo de uma \_\_\_\_\_ muito maior do que \_\_\_\_\_ do sinal.

d) No receptor o sinal é \_\_\_\_\_ utilizando-se uma réplica sincronizada do código pseudo-aleatório.

12) Escolha as alternativas corretas.

O espalhamento espectral pode ser feito, basicamente, das seguintes formas:

- a) Espalhamento por sequência direta (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS).
- b) Espalhamento por sequência indireta (Indirect Sequence Spread Spectrum – ISSS)
- c) Espalhamento por salto de fase (Phase Hopping Spread Spectrum – PHSS)
- d) Espalhamento por salto de frequência ( Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS)

13) Aponte os erros no texto abaixo, e indique a alternativa correta.

As técnicas de CDMA oferecem algumas vantagens únicas, em relação ao TDMA e FDMA,

entre as quais podemos citar:

- Privacidade: O código PN, sendo de conhecimento apenas dos usuários autorizados, provê privacidade na comunicação, pois a informação não pode ser facilmente decodificada por usuários autorizados que não possuem o código.
- Imunidade a desvanecimentos: Se um pedaço particular do espectro é caracterizado por desvanecimentos, sinais naquela faixa de frequência são reforçados. No esquema FDMA, por exemplo, usuários que foram desafortunadamente alocados a partes desvanecidas do espectro experimentarão pouca degradação da comunicação enquanto persistir o desvanecimento. Já no CDMA, uma vez que a informação está espalhada ao longo do espectro, e a utilização da banda é comum a todos os usuários, o desvanecimento terá um efeito relativamente pequeno no total, e é partilhado por todos os usuários do sistema.
- Favorecimento a interferências: é uma decorrência do Espalhamento Espectral, que pela sua própria natureza torna o sistema mais imune a interferências, que ocorreriam de forma mais prejudicial em sistemas convencionais.
- Flexibilidade: A maior vantagem dos esquemas CDMA, comparado ao TDMA, é que não há a necessidade de sincronismo de tempo preciso entre os vários transmissores simultâneos. A ortogonalidade entre transmissões de usuários com códigos diferentes não é afetada por variações no instante de transmissão.

14) Preencha as lacunas

- a) Na técnica \_\_\_\_\_ FDMA/TDMA o espectro disponível é dividido em sub-faixas onde cada uma transporta a comunicação de um determinado número de usuários que \_\_\_\_\_ essa sub-faixa em instante de tempo distintos.
- b) Na técnica FDMA/CDMA o \_\_\_\_\_ é dividido em sub-faixas onde cada uma transporta a comunicação de um determinado número de usuários, que compartilham \_\_\_\_\_ ao mesmo tempo, porém utilizando sequências PN distintas (códigos distintos).
- c) O acesso ALHOA é uma técnica de \_\_\_\_\_ que permite a alocação dinâmica de recursos \_\_\_\_\_ a um conjunto de terminais que apresentam tráfego tipicamente em rajadas (bursty traffic).
- d) O STRMA (Space-Time Reservation Multiple Access) combina o \_\_\_\_\_ de frequências com \_\_\_\_\_ e utiliza técnicas

\_\_\_\_\_ (DSI). O objetivo do STRMA é o de dar suporte ao tráfego de aplicações multimídia em sistemas\_\_\_\_\_.

## EXERCÍCIOS – SOLUÇÃO

1) Complete as lacunas:

- a) Um sistema de comunicações é na realidade composto de um conjunto de Recursos de Comunicações (RC), os quais devem ser utilizados da forma mais eficiente possível de modo a servir a um conjunto de usuários que desejam se comunicar com uma qualidade especificada a um custo adequado.
- b) Podemos imaginar um sistema multiusuário como um sistema onde um conjunto finito de RC é disputado por um conjunto também finito de usuários.
- c) Uma forma muito comum de alocação de RC é o partilhamento de um meio de transmissão por vários usuários através de técnicas conhecidas como multiplexação.
- d) Na multiplexação, os requisitos de usuários ou planejamento de alocação de RC são fixos, ou no máximo, variam lentamente.
- e) Múltiplo acesso, usualmente envolve o partilhamento remoto de um recurso, tal com um satélite. Com um esquema de múltiplo acesso que pode mudar dinamicamente, um controlador ou gerente de um sistema pode reconhecer as necessidades de RC individuais de cada usuário, otimizando o uso do sistema.

2) Escolha as alternativas corretas:

A finalidade das técnicas de Múltiplo Acesso é tornar a alocação dos RC mais eficiente.

Existem 5 formas básicas de Múltiplo Acesso:

**a) Divisão em Frequência (FD – Frequency Division) – sub-bandas específicas de frequência são alocadas.**

**b) Divisão no Tempo (TD – Time Division) – Intervalos de tempo periodicamente recorrentes são identificados. Em alguns sistemas, aos usuários é estabelecida uma designação fixa no tempo. Em outros, aos usuários é dado um acesso aleatório.**

c) Divisão de Código (CD – Code Division) – Membros específicos de um conjunto não ortogonal ou aproximadamente ortogonal de códigos de espalhamento espectral (usando

cada um a totalidade da banda disponível) são alocados.

d) Divisão Espacial (SD – Spatial Division) – Antenas bi-direcionais permitem o reuso de frequências separando espacialmente feixes de rádio em diferentes direções.

**e) Divisão de Polarização (PD – Polarization Division) - Polarizações ortogonais são usadas para separar sinais, permitindo o reuso da mesma banda de frequências.**

**Usado bastante em comunicações satélite.**

3) Um sistema de múltiplo acesso FDMA possui 60 canais, sendo cada canal de largura de banda nominal de 4 kHz, incluindo a banda de guarda. Qual a largura de banda total ocupada?

Solução:

Largura de banda igual a  $60 \times 4 = 240$  kHz.

4) É possível existir um sistema múltiplo acesso PDH/FM/FDMA? Explique:

Solução:

Sim, é possível. Esse sistema utilizaria várias sub-bandas, em cada sub-banda uma banda básica constituída por um sinal multiplexado no tempo, com a arquitetura PDH, o qual seria transladado para frequências da sub-banda usando técnicas de modulação FM.

5) Um sistema de múltiplo acesso FDMA utiliza 100 canais, cada qual com uma largura de banda de 3 KHz e emprega uma banda de guarda de 500 Hz. Supondo que o sistema esteja 100% ocupado, qual seria a taxa máxima de transmissão esperada para cada usuário? Cada canal, teoricamente, utilizaria pulsos de Nyquist para a transmissão. Qual a taxa máxima, R, do sistema?

Solução:

$M=100$ . Se cada canal enxerga uma banda de 3 KHz, e é capaz de utilizar pulsos de Nyquist, cada canal poderia utilizar uma taxa de transmissão máxima de 6 Kbit/s. Desta forma,  $R=100 \times 6 = 600$  kbit/s.

6) No sistema do exercício (5), qual o valor mínimo do retardo de transmissão?

Solução: O valor mínimo de T seria o necessário à transmissão de 1 bit. No caso,

$T=(1/6) \times 10^{-3}$  s.

7) No sistema do exercício (5), supondo a utilização de um pacote para armazenamento com 50 bits, qual o tempo de transmissão de um (1) pacote?

Solução:

$$T = 50 \times (1/6) \times 10^{-3} \cong 8,3 \times 10^{-3} \text{ s.}$$

8) Interprete o termo “continuamente disponíveis” , no texto:

“Uma vez que no FDMA todos os canais são continuamente disponíveis e os pacotes são enviados tão logo sejam gerados, o tempo de espera é  $\delta_{\text{FDMA}}=0$ .”

Solução:

O uso dessa expressão representa uma comparação implícita com o sistema TDMA, no sentido de que, no TDMA, cada usuário que já dispõe de um RC de comunicação alocado (ou seja, já tem um canal designado) tem que aguardar o seu instante de transmissão, pois os canais são multiplexados no tempo. No FDMA, como a multiplexação ocorre no domínio da frequência, com todos os canais transmitindo simultaneamente, não existe um tempo de espera.

9) Um sistema TDMA utiliza 128 canais, transmitindo à taxa de 8192 kbit/s. Supondo que o tempo reservado é o mesmo, para todos os canais, qual (a) a taxa média de transmissão?

(b) Supondo que o tempo máximo de espera para cada canal é de 128 ms, qual o tempo de transmissão máximo que pode ser alocado a cada canal?

(c) Nesse caso, qual o tamanho do pacote?

Solução:

(a)  $M=128$ .  $R=8192$  kbit/s. A taxa média é de  $R/M=64$  kbit/s.

(b) Em relação ao início de cada Quadro, cada intervalo de transmissão inicia em  $(m-1)T/M$  segundos ( $m=1,2,\dots,M$ ), onde  $M$  é o número total de intervalos em que o Quadro foi dividido. Portanto, o tempo de espera para cada canal pode variar de 0 ( $m=1$ ) até

$\frac{M-1}{M} \times T$  ( $m=M$ ). Portanto,  $\delta_{\text{max}} = \frac{M-1}{M} \times T$ . O tempo de transmissão é igual a  $T/M$ .

$$\text{Logo, } (T/M)_{\text{max}} = \delta_{\text{max}} / (M-1) = \frac{128 \times 10^{-3}}{127} = 1,007874 \text{ ms.}$$

(c)  $T/M = b/R$ , logo  $b = R \times (T/M)_{\text{max}} = 8,192 \times 10^6 \times 1,007874 \times 10^{-3} = 8256,51$

Como o tamanho do “buffer” tem que ser um inteiro (pois representa o número de bits de uma memória, e portanto não pode ser menor do que 1), e queremos respeitar o tempo

máximo de transmissão, escolhamos então  $b=8256$  bits.

10) Para o sistema do exercício (9), com,  $b=8256$  bits, qual o tempo de guarda decorrente? Compare este valor ao tempo de transmissão de 1 bit.

Solução:

$b$  bits a taxa  $R$  levam um tempo exato de  $b/R$  s para serem transmitidos. No caso, Tempo de Transmissão =  $8256/(8,192 \times 10^6) = 1,007812$  ms.

Como o valor nominal do tempo de transmissão é de 1,007874 ms, então o tempo de guarda é de 62 ns.

O tempo de transmissão de 1 bit, à taxa  $R$ , é de  $1/R = 122$  ns. Portanto, o tempo de guarda corresponde aproximadamente ao tempo para transmissão de 1 bit dividido por 2 (como não poderia ser diferente, pois em (9-c) foi abandonado aproximadamente 0,5 bit). A diferença (1 ns) corresponde a erros de aproximação nos cálculos.

11) Preencha as lacunas

a) A técnica de Múltiplo Acesso por Divisão de Código (CDMA), é uma aplicação da técnica de Espalhamento Espectral (SS – Spread Spectrum).

b) Na técnica de Espalhamento Espectral (SS – Spread Spectrum), utiliza-se sequência aleatórias (ou quase aleatórias – pseudo aleatórias) para espalhar a informação do sinal modulado original em uma banda do espectro que é bem maior do que a banda original do sinal modulado.

c) O espalhamento espectral (em inglês Spread Spectrum – SS) é uma técnica na qual um código pseudo-aleatório (pn – pseudo noise), independente dos dados de informação, é empregado como uma forma de onda de modulação para espalhar a energia do sinal ao longo de uma largura de faixa muito maior do que a largura de faixa do sinal.

d) No receptor o sinal é “desespalhado” utilizando-se uma réplica sincronizada do código pseudo-aleatório.

12) Escolha as alternativas corretas.

O espalhamento espectral pode ser feito, basicamente, das seguintes formas:

**a) Espalhamento por sequência direta (Direct Sequence Spread Spectrum – DSSS).**

- b) Espalhamento por sequência indireta (Indirect Sequence Spread Spectrum –ISSS)
- c) Espalhamento por salto de fase (Phase Hopping Spread Spectrum –PHSS)
- d) Espalhamento por salto de frequência ( Frequency Hopping Spread Spectrum – FHSS)**

13) Aponte os erros no texto abaixo, e indique a alternativa correta.

As técnicas de CDMA oferecem algumas vantagens únicas, em relação ao TDMA e FDMA, entre as quais podemos citar:

- Privacidade: O código PN, sendo de conhecimento apenas dos usuários autorizados, provê privacidade na comunicação, pois a informação não pode ser facilmente decodificada por usuários (inserir a palavra: não) autorizados que não possuem o código.
- Imunidade a desvanecimentos: Se um pedaço particular do espectro é caracterizado por desvanecimentos, sinais naquela faixa de frequência são ~~reforçados~~ (atenuados). No esquema FDMA, por exemplo, usuários que foram desafortunadamente alocados a partes desvanecidas do espectro experimentarão ~~pouca~~ (alta) degradação da comunicação enquanto persistir o desvanecimento. Já no CDMA, uma vez que a informação está espalhada ao longo do espectro, e a utilização da banda é comum a todos os usuários, o desvanecimento terá um efeito relativamente pequeno no total, e é partilhado por todos os usuários do sistema.
- ~~Favorecimento~~ (Resistência) a interferências: é uma decorrência do Espalhamento Espectral, que pela sua própria natureza torna o sistema mais imune a interferências, que ocorreriam de forma mais prejudicial em sistemas convencionais.
- Flexibilidade: A maior vantagem dos esquemas CDMA, comparado ao TDMA, é que não há a necessidade de sincronismo de tempo preciso entre os vários transmissores simultâneos. A ortogonalidade entre transmissões de usuários com códigos diferentes não é afetada por variações no instante de transmissão.

14) Preencha as lacunas

a) Na técnica híbrida FDMA/TDMA o espectro disponível é dividido em sub-faixas onde cada uma transporta a comunicação de um determinado número de usuários que compartilham essa sub-faixa em instante de tempo distintos.

- b) Na técnica FDMA/CDMA o espectro disponível é dividido em sub-faixas onde cada uma transporta a comunicação de um determinado número de usuários, que compartilham essa sub-faixa ao mesmo tempo, porém utilizando sequências PN distintas (códigos distintos).
- c) O acesso ALHOA é uma técnica de múltiplo acesso que permite a alocação dinâmica de recursos de rádio a um conjunto de terminais que apresentam tráfego tipicamente em rajadas (bursty traffic).
- d) O STRMA (Space-Time Reservation Multiple Access) combina o reuso de frequências com múltiplo acesso e utiliza técnicas de interpolação digital de voz (DSI). O objetivo do STRMA é o de dar suporte ao tráfego de aplicações multimídia em sistemas móveis celulares.

## **CONTROLE NO MÚLTIPLO ACESSO – INTRODUÇÃO**

O objetivo principal de um sistema de Múltiplo Acesso é prover serviço de telecomunicações aos usuários a tempo e de forma eficiente. Muitas vezes, para atingir esse objetivo, é preciso coordenar ações de controle entre os usuários participantes, para distribuição adequada dos RC's, principalmente em casos onde a disputa entre usuários é inevitável (isto é, vários usuários tentando acessar simultaneamente o mesmo RC).

Para isso, ele faz uso de algoritmos e protocolos de controle, que podemos denominar MMA (Multiple Access Algorithm) , que é a regra pela qual o usuário sabe como gerenciar o tempo, a frequência e as funções de código para utilizar de forma eficiente os RC's disponíveis.

## FLUXO DA INFORMAÇÃO NO MÚLTIPLO ACESSO

A Figura 6 é uma ilustração descrevendo o fluxo básico de informação entre o MMA e o sistema.

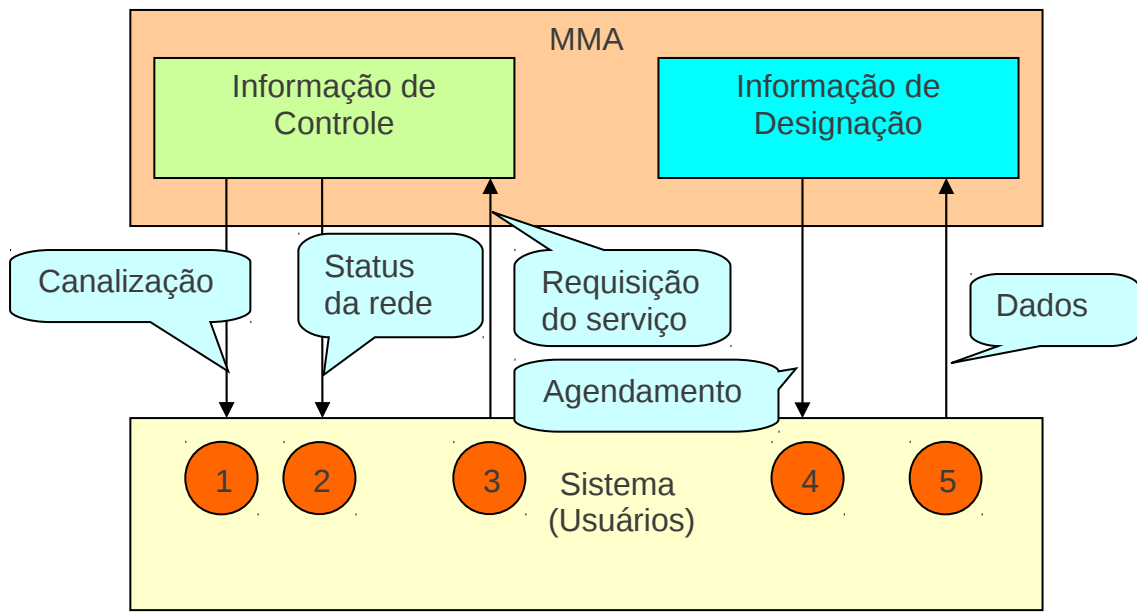


Figura 6  
Fluxo de Informação no Múltiplo Acesso

1. Canalização – Este termo refere-se à forma mais geral de informação de alocação.  
(p. ex., canais 1 a N podem ser alocados ao usuário A, canais de (N+1) a M para o usuário B, etc).
2. Status da Rede (NS) – Este termo refere-se à disponibilidade dos RC's e informa ao usuário a qual recurso (isto é, tempo, frequência, código) ele deve se posicionar para transmitir as requisições de serviço.
3. Requisição do serviço – Ocorre quando o usuário perfaz a requisição para o serviço pretendido (p. ex., alocação de um Intervalo de Tempo  $m$ ).

4. Agendamento- Um mapa, transmitido do MMA para o usuário, informando a este quando e onde posicionar seus dados para a utilização pretendida dos RC's.

5. Dados – Representa a transmissão da informação do usuário segundo o agendamento estabelecido.

## **ACESSO FIXO**

No acesso fixo, um determinado RC é estabelecido pelo MMA ao usuário e mantido alocado por um período definido por regras independentes da real utilização do RC pelo usuário.

Assim, por exemplo, pode ser designado ao usuário A o uso de uma determinada frequência em um sistema FDMA, e mantida esta frequência alocada enquanto o usuário não a dispensar. Assim, o usuário A poderá utilizar a frequência designada a qualquer tempo durante este período, inclusive permanecendo a ele alocada mesmo durante intervalos de tempo ociosos, durante os quais não há informação útil a ser transmitida pelo usuário A.

Este método de designação é utilizado quando o usuário A não tem controle sobre o instante preciso da transmissão da informação útil, e esta tem que ser feita obrigatoriamente em tempo real (isto é, não pode sofrer atrasos na transmissão devido ao armazenamento em filas de espera – “buffers”). É o caso, por exemplo, da transmissão de voz em sistemas analógicos.

## DESIGNAÇÃO POR DEMANDA (DAMA)

DAMA (Demand Assignment Multiple Access) é o contrário de acesso fixo, no qual um usuário tem acesso periódico ao canal independente de suas reais necessidades. O DAMA fornece o acesso ao canal somente quando o usuário precisa. Os procedimentos DAMA são bastante eficientes quando o acesso do usuário tende a ser intermitente ou este transmite por rajadas.

A utilização do controle tipo DAMA permite a um conjunto de RC com reduzida capacidade média lidar com usuários que apresentam características de alto tráfego, mas em rajadas, ao custo de algum retardo devido a filas de armazenamento em “buffers”.

Por exemplo, um sistema convencional para atender  $N$  usuários simultâneos, cada

usuário utilizando uma largura de banda  $W_n$ , precisa de uma banda total de  $\sum_{n=1}^N W_n$ . Já

um sistema DAMA, isto é, com alocação dinâmica, pode utilizar uma banda total

tipicamente  $N$  vezes menor, isto é,  $\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N W_n$ .

## ALGORITMOS ALOHA

Os algoritmos ALOHA são exemplos de MMA a ser utilizado em um sistema de comunicação multiusuário onde cada usuário transmite informação em pacotes sobre um canal comum a todos eles.

As informações dos usuários não estão espalhadas na frequência. Em consequência, transmissões simultâneas de sinais oriundas de múltiplos usuários não podem ser separadas no receptor, e portanto essa condição é destrutiva da informação, devendo ser estabelecida uma forma de resolução de conflitos na transmissão dos pacotes.

Os algoritmos de acesso abaixo descritos são classificados como “aleatórios”, porquê os pacotes são gerados de acordo com algum modelo estatístico.

Este tipo de acesso é muito empregado em transmissão de dados, onde não é possível ou desejado estabelecer um sincronismo entre os usuários. É o caso, por exemplo, dos sistemas celulares, na transmissão da sinalização para o processo de inicialização de chamadas.

### ***ALOHA PURO***

O algoritmo chamado ALOHA foi concebido inicialmente pela Universidade do Havaí, que iniciou sua operação em 1971. O objetivo era utilizar um satélite de comunicação para interligar diversos computadores, espalhados geograficamente por inúmeras ilhas.

O conceito do sistema era extremamente simples, e utilizava um protocolo de acesso aleatório, consistindo dos modos seguintes:

1. Modo de transmissão: Os usuários transmitiam a qualquer tempo que estes desejavam, codificando suas mensagens com um código detetor de erro.
2. Modo de escuta: Após a transmissão de uma mensagem, um usuário passa a esperar um sinal de confirmação (acknowledgment), ACK, ou não-confirmação (negative acknowledgment), NAK, vindo do receptor.

As transmissões oriundas de diferentes usuários algumas vezes se sobrepunham no tempo, causando erros na recepção dos dados nas mensagens disputadas. Nós dizemos que as mensagens, então, “colidiam”. Em tal caso, os erros eram detetados, e o usuário recebia uma mensagem de não-confirmação (negative acknowledgment), NAK.

3. Modo de Retransmissão: Quando um NAK era recebido, as mensagens simplesmente eram retransmitidas. Para evitar, ou minimizar o risco de uma nova colisão, a cada usuário era designado um tempo de espera (retardo) aleatório, antes de retransmitir a mensagem.

4 Modo de Tempo Esgotado (Time-out): Se, após uma transmissão, o usuário não recebe nenhum sinal (nem ACK nem NAK) em um intervalo de tempo especificado, o usuário retransmite a mensagem.

### ***Desempenho ALOHA PURO***

Definindo-se:

$\lambda$  – taxa média de chegada de mensagens com sucesso (mensagens/s)

$\lambda_r$  – taxa média de mensagens rejeitadas (devido a colisões, por exemplo) (mensagens/s)

$\lambda_t$  – tráfego total de chegada =  $\lambda + \lambda_r$

Seja cada mensagem de comprimento  $b$  bits. Daí, podemos definir  $b\lambda$  como sendo o valor médio do tráfego com sucesso, em bit/s, ou seja, o tráfego que conseguiu efetivamente ser enviado. Da mesma forma podemos definir o tráfego total  $b\lambda_t$ .

Supondo que a capacidade máxima do canal (taxa máxima) seja de  $R$  bit/s, vamos subsequentemente definir:

$\rho = \frac{b\lambda}{R}$  como sendo a taxa normalizada de envio de pacotes com sucesso, e

$G = \frac{b\lambda_t}{R}$  como o tráfego total normalizado.

Uma vez que os usuários transmitem sem restrição no sistema ALOHA, a probabilidade de que uma transmissão foi completada com sucesso pode se calculada usando-se distribuições estatísticas do tipo Poisson<sup>1</sup> - ref [1]. A aplicação de noções de probabilidade e a distribuição de Poisson leva à seguinte relação:

$$\rho = Ge^{-2G}$$

A equação acima relaciona a taxa normalizada de envio de pacotes com sucesso,  $\rho$ , com o tráfego total normalizado  $G$ , em um canal do sistema ALOHA PURO.

---

1 A distribuição de Poisson é aplicável a processos onde se estuda a probabilidade de chegada de eventos durante um determinado intervalo de tempo

A Figura 7 apresenta um gráfico da relação  $\rho = Ge^{-2G}$ . Interpretando-se este gráfico, vemos que conforme G aumenta,  $\rho$  aumenta até um certo valor, a partir do qual aumento subsequente de tráfego provoca um aumento nas colisões, diminuindo o valor de  $\rho$ , cujo valor máximo, em torno de 0,18 ocorre para  $G=0,5$ . Assim para o algoritmo ALOHA PURO apenas 18% dos RC's disponíveis podem ser usados. Simplicidade no controle é obtida à custa de desempenho.

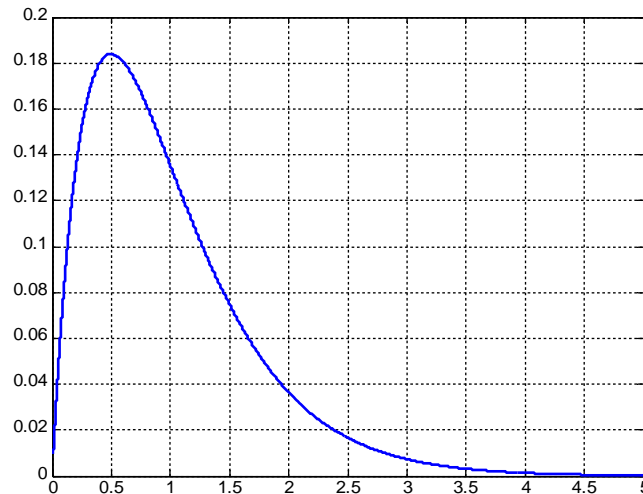


Figura 7  
Desempenho do Algoritmo  
Aloha

### ***ALOHA PARTICIONADO (SLOTTED ALOHA) – S-ALOHA***

O esquema ALOHA puro, visto no item anterior, pode ser melhorado, introduzindo-se uma pequena parcela de coordenação entre as estações, decorrendo daí o chamado S-ALOHA (Slotted ALOHA).

A idéia é enviar, a todas as estações, pulsos de sincronismo, de modo que as mensagens podem ser enviadas apenas durante um “slot” entre pulsos de sincronismo, tendo obrigatoriamente que iniciar no começo de um slot. Assim como no ALOHA puro, os pacotes de mensagens possuem comprimento constante.

Esta simples mudança reduz a taxa de colisões à metade, uma vez que apenas mensagens transmitidas no mesmo slot podem interferir uma com as outras. Pode ser demonstrado que para o S-ALOHA temos a seguinte relação:

$$\rho = Ge^{-G}$$

A Figura 8 apresenta um gráfico da relação acima.

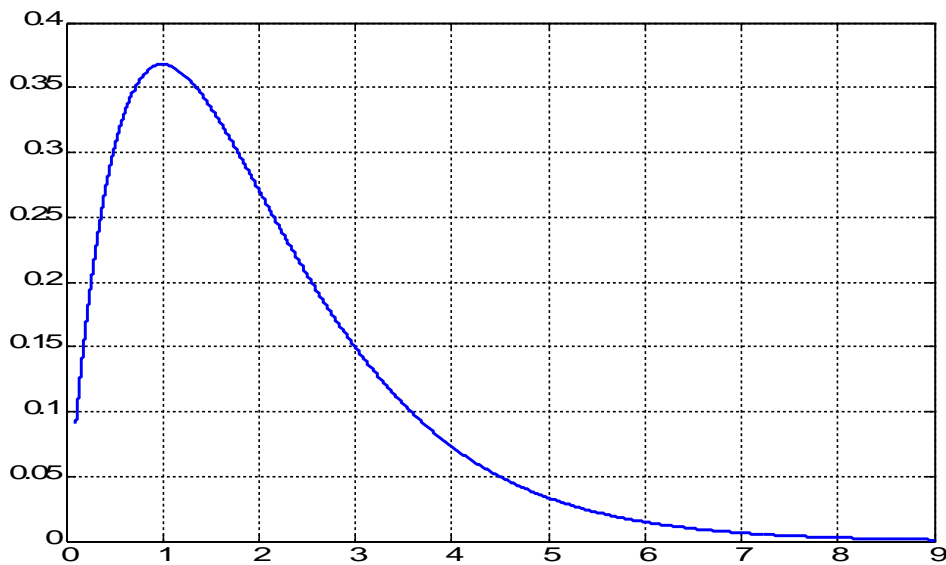


Figura 8  
Desempenho do S-Aloha

Pela Figura 8, vemos que agora temos maior capacidade de tráfego, sendo o pico máximo atingido para  $G=1$  (isto é, o tráfego total atinge o valor  $R$ ), no valor  $p=0,37$ , significando que agora 37% dos RC's podem ser efetivamente utilizados.

### ***CARACTERÍSTICA TAXA NORMALIZADA $\times$ RETARDO***

Para um sistema de modulação, uma característica que mede a qualidade total de um determinado esquema é a curva de  $P_B$  (probabilidade de erro de bit) versus  $E_b/N_0$ . Para sistemas de múltiplo acesso existe uma característica análoga, que é a curva de retardo médio no envio de pacotes ( $\tau$ ) versus taxa normalizada de envio ( $\rho$ ).

A Figura 9 apresenta um gráfico do retardo versus taxa de envio normalizada para um sistema S-ALOHA. Conforme vemos, o retardo tende a infinito para taxas de envio maiores do que 0,37, pois para valores acima a taxa de colisões impede a comunicação.

### ***MELHORAMENTO DO ALGORITMO ALOHA***

Aumentando-se a informação de coordenação entre as estações, pode-se conseguir melhoramentos no desempenho de algoritmos do tipo ALOHA.

Um melhoramento significativo é obtido adotando-se o esquema de reserva de canais, obtendo-se o chamado R-ALOHA (Reservation –ALOHA).

Neste esquema, o sistema pode estar em dois estados básicos: espera de reserva, ou modo não-reserva, e modo de reserva.

No primeiro estado, não há usuários se comunicando. O sistema está quieto. e todos os slots são subdivididos em um certo número de pequenos sub-slots de reserva. Os usuários podem então enviar pedidos de reserva a qualquer tempo.

Sendo feita uma reserva, o sistema se posiciona no modo reserva, onde M slots normais são destinados à transmissão de mensagens e um slot adicional é dividido em sub-slots de reserva. Essa estrutura se repete até que não hajam pedidos de reserva, em cujo caso o sistema reverte ao modo de espera de reserva.

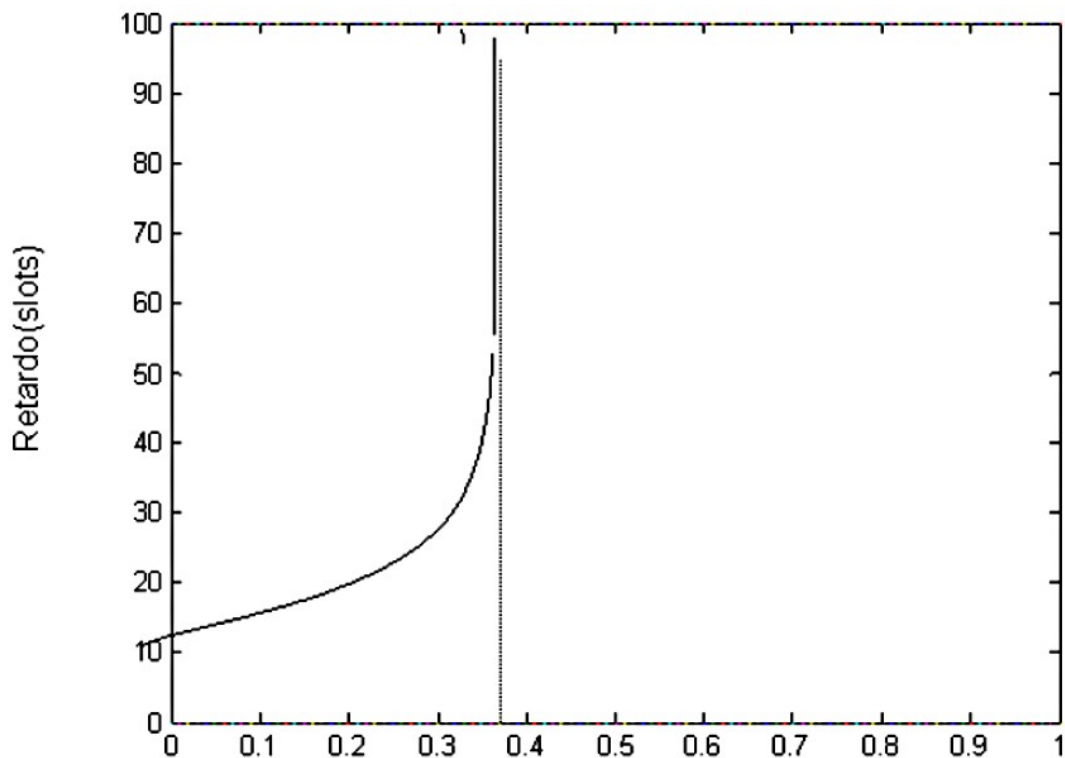


Figura 9  
Retardo versus taxa de envio normalizada para S-Aloha

O usuário ao fazer a reserva (o usuário pode reservar mais de um slot) espera por um ACK, onde está informado em qual slot ele deve iniciar a transmissão. Uma vez que o controle é distribuído, de modo que todos os participantes recebem as transmissões do sistema, e portanto estão avisados das reservas feitas e do valor de  $M$ , o ACK não precisa informar mais do que a localização do primeiro slot que deve ser transmitido. Os demais são subsequentes. Quando o tempo de propagação entre o RC e os usuários é significativo (como em comunicações satelitais), este tempo deve ser considerado para que o usuário transmita no instante correto. Quando não existem reservas ocorrendo, o sistema reverte para seu formato em espera, onde só existem sub-slots.

### **COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE S-ALOHA E R-ALOHA**

A Figura 10 compara o desempenho do S-ALOHA com o R-ALOHA.

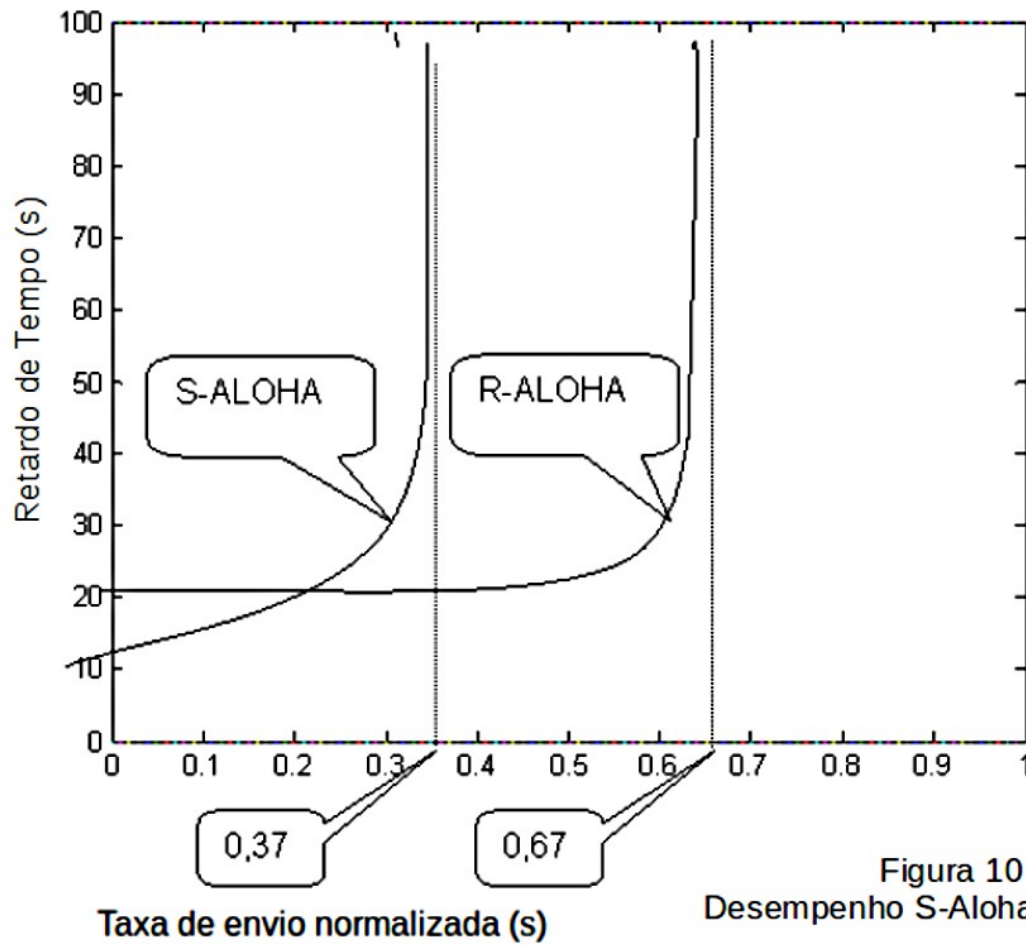


Figura 10  
Desempenho S-Aloha X R-Aloha

Para valores de  $\sigma$  entre 0,20 e 0,67, vê-se que R-ALOHA apresenta melhor desempenho. Para baixos valores de  $\sigma$ , paga-se o preço por um controle mais complexo, e desta forma o S-ALOHA, mais simples, apresenta melhor desempenho. Para o R-ALOHA, um retardo sem limites ocorre para  $\sigma=0,67$ .

## ALGORÍTMOS DE ACESSO BASEADOS EM TÉCNICAS DE INTERROGAÇÃO (POLLING)

A técnica de Polling (Sondagem ou interrogação) pode ser também utilizada por sistemas de múltiplo acesso como uma forma de resolução de contendas entre usuários que demandam simultaneamente um mesmo RC.

A idéia é constituir um controlador que periodicamente interroga a população de usuários para saber se existe alguma solicitação de serviço.

A técnica de polling pode consumir um tempo relativamente alto se a população de usuários for muito grande. Uma forma de interrogar rapidamente uma população é a técnica chamada “busca em árvore binária”, ilustrada pela **Figura V.4.5** para uma busca de uma população de 8 usuários. Vamos supor que 3 usuários (1, 4 e 6) estejam disputando o acesso ao mesmo RC. Os canais são identificados pelos números binários de 000 a 111.

O algoritmo procede de acordo com os seguintes passos (acompanhe pela  Figura 11):

- 1 – O MMA solicita a transmissão do 1º bit (bit mais à esquerda) dos números de identificação (ID) dos terminais em disputa.
- 2 – O terminal 001 transmite um “0”, e terminais 100 e 110 transmitem um “1” cada um. O MMA, baseado na intensidade do sinal recebido (relação sinal/ruído), seleciona 1 ou 0 como o bit que ele “escuta”. Neste exemplo o MMA escolhe bit 1 e informa esta escolha aos usuários. Os terminais que não foram escolhidos desistem da contenda durante esta passagem pela árvore.

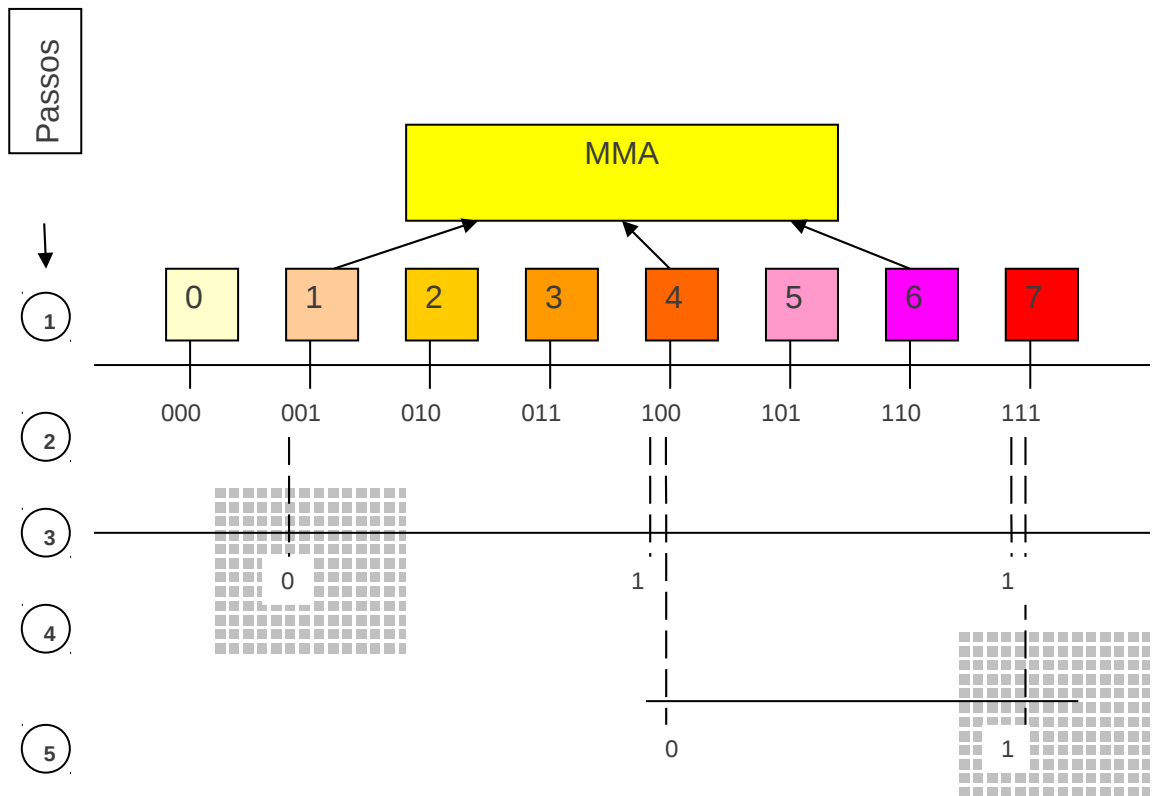


Figura 11

Busca em árvore binária para uma população de 8 usuários

- 3 – O MMA solicita a transmissão do 2º bit de identificação do ID dos terminais remanescente.
- 4 – Terminal 100 transmite um "0", e terminal 110 transmite um "1".
- 5 – Suponha que o MMA seleciona um 0 e notifica os terminais correspondentemente. O terminal 110 desiste, e o terminal 100 ganha a disputa, podendo acessar o RC.
- 6 – Quando o RC torna-se novamente disponível, os passos de 1 – 5 são repetidos.

Uma árvore binária requer  $n = \log_2 Q$  decisões para cada passagem através da árvore, sendo Q a população de usuários. Um ganho significativo no tempo de processamento do algoritmo de interrogação é possível com a árvore binária se a população de usuários for grande e a demanda para acesso dos RC's for pequena.

## RESUMO

Nesta parte, foi estudado o problema específico do acesso de uma população de usuários a um conjunto finito de RC's. Foi mostrada a arquitetura geral de um algoritmo para múltiplo acesso (MMA), a noção de acesso por demanda (DAMA) e descritos 3 algoritmos muito empregados, tanto em comunicações satélite como em comunicações celulares, ALOHA puro, S-ALOHA e R-ALOHA, comparando-se seu desempenho.

Diversas outras técnicas de múltiplo acesso existem, como a técnica de "polling", mas a idéia básica é sempre a mesma; a forma mais adequada para dividir entre os diversos usuário os RC,s de forma a mais eficiente possível. Aqui cabe ressaltar que geralmente existe uma disputa por um RC, e cabe ao MMA resolver essa disputa, de modo que no final todos os usuários tenham a oportunidade para acessar o sistema que disponibiliza o RC.

## EXERCÍCIOS

- 1- Qual o objetivo principal de um sistema de Múltiplo Acesso e como ele faz para atingir esse objetivo?
- 2- Descreva o fluxo básico de informação entre o MMA e o sistema, composto das seguintes partes:
  - a) Canalização
  - b) Status da Rede
  - c) Requisição do Serviço
  - d) Agendamento
  - e) Dados
- 3- Defina Acesso Fixo:
- 4- Quando é utilizado o Acesso Fixo?
- 5- O que quer dizer DAMA, e qual sua característica básica?
- 6- Descreva os modos de operação do algoritmo ALOHA PURO.
- 7- Um sistema de múltiplo acesso utiliza o algoritmo ALOHA PURO como forma de acesso dos usuários. A taxa global de transmissão é de 1 Mbit/s. Supondo que se deseja uma taxa de chegada de mensagens de 10k mensagens/s, dimensionar o tamanho máximo de cada mensagem (em bits), sabendo que o tráfego total normalizado  $G=0,2$ .
- 8- Repita o problema (7) para  $G=1$ .
- 9- Interprete os resultados obtidos em (7) e (8).
- 10- Em (7),  $G=0,2$ . Em (8),  $G=1$ . O que você acha que poderia causar esta diferença?
- 11- Faça uma estimativa para o número provável de usuários em (7).

12- Repita o exercício (7) supondo o uso de um sistema S-ALOHA.

13- Calcule a taxa normalizada de envio de um canal ALOHA que possui  $R=50$  Kbit/s e  $M=10$  usuários, cada usuário transmitindo em média  $\lambda = 2$  mensagens/s. O formato do sistema prevê  $b=1350$  bits/mensagem. Qual dos 3 esquemas (ALOHA –PURO, S-ALOHA ou R-ALOHA) poderia ser utilizado para este sistema?

14- Refaça o exercício (13) para  $\lambda=1$  mensagem/s, e calcule o tráfego total do sistema e o tráfego de colisões, em bit/s.

15- Um sistema possui 8 usuários, e utiliza a técnica de “polling” para resolver contendas entre eles. Descreva os passos do algoritmo de árvore binária para esse sistema, supondo uma disputa entre os terminais 1,2 e 5.

16- Calcule o tempo necessário para um “polling” direto de uma população de 4096 usuários, para prover disponibilidade de canal a 100 usuários em disputa. Compare o resultado com o tempo que seria necessário para realizar uma pesquisa usando uma árvore binária. Suponha que o tempo necessário para interrogar um terminal e o tempo requerido para uma decisão de busca em árvore binária são ambos iguais a 1 s.

## EXERCÍCIOS – SOLUÇÃO

1- Qual o objetivo principal de um sistema de Múltiplo Acesso e como ele faz para atingir esse objetivo?

Solução:

O objetivo principal de um sistema de Múltiplo Acesso é prover serviço de telecomunicações aos usuários a tempo e de forma eficiente.

Para isso, ele faz uso de algoritmos e protocolos de controle, que podemos denominar MMA (Multiple Access Algorithm) , que é a regra pela qual o usuário sabe como gerenciar o tempo, a frequência e as funções de código para utilizar de forma eficiente os RC's disponíveis.

2- Descreva o fluxo básico de informação entre o MMA e o sistema, composto das seguintes partes:

- a) Canalização
- b) Status da Rede
- c) Requisição do Serviço
- d) Agendamento
- e) Dados

Solução:

Conforme mostra a Figura 6, temos as ações acima relacionadas, que se descrevem:

1. Canalização – Este termo refere-se à forma mais geral de informação de alocação.

(p. ex., canais 1 a N podem ser alocados ao usuário A, canais de (N+1) a M para o usuário B, etc).

2. Status da Rede (NS) – Este termo refere-se à disponibilidade dos RC's e informa ao usuário a qual recurso (isto é, tempo, frequência, código) ele deve se posicionar para transmitir as requisições de serviço.

3. Requisição do serviço – Ocorre quando o usuário perfaz a requisição para o serviço pretendido (p. ex., alocação de um Intervalo de Tempo  $m$ ).

4. Agendamento- Um mapa, transmitido do MMA para o usuário, informando a este quando e onde posicionar seus dados para a utilização pretendida dos RC's.

5. Dados – Representa a transmissão da informação do usuário segundo o agendamento estabelecido.

3- Defina Acesso Fixo:

Solução:

No acesso fixo, um determinado RC é estabelecido pelo MMA ao usuário e mantido alocado por um período definido por regras independentes da real utilização do RC pelo usuário.

4- Quando é utilizado o Acesso Fixo?

Solução:

Este método de designação é utilizado quando o usuário A não tem controle sobre o instante preciso da transmissão da informação útil, e esta tem que ser feita obrigatoriamente em tempo real (isto é, não pode sofrer atrasos na transmissão devido ao armazenamento em filas de espera – “buffers”). É o caso, por exemplo, da transmissão de voz em sistemas analógicos.

5- O que quer dizer DAMA, e qual sua característica básica?

Solução:

DAMA (Demand Assignment Multiple Access) é o contrário de acesso fixo, no qual um usuário tem acesso periódico ao canal independente de suas reais necessidades. O DAMA fornece o acesso ao canal somente quando o usuário precisa.

A utilização do controle tipo DAMA permite a um conjunto de RC com reduzida capacidade média lidar com usuários que apresentam características de alto tráfego, mas em rajadas, ao custo de algum retardo devido a filas de armazenamento em “buffers”.

6- Descreva os modos de operação do algoritmo ALOHA PURO.

Solução:

1. Modo de transmissão: Os usuários transmitam a qualquer tempo que estes desejem, codificando suas mensagens com um código detetor de erro.

2. Modo de escuta: Após a transmissão de uma mensagem, um usuário passa a esperar um sinal de confirmação (acknowledgment), ACK, ou não-confirmação (negative acknowledgment), NAK, vindo do receptor.

As transmissões oriundas de diferentes usuários algumas vezes se sobrepõem no tempo, causando erros na recepção dos dados nas mensagens disputadas. Nós dizemos que as mensagens, então, “colidem”. Em tal caso, os erros são detetados, e o usuário recebe uma mensagem de não-confirmação (negative acknowledgment), NAK.

3. Modo de Retransmissão: Quando um NAK é recebido, as mensagens simplesmente são retransmitidas. Para evitar, ou minimizar o risco de uma nova colisão, a cada usuário é designado um tempo de espera (retardo) aleatório, antes de retransmitir a mensagem.

4. Modo de Tempo Esgotado (Time-out): Se, após uma transmissão, o usuário não recebe nenhum sinal (nem ACK nem NAK) em um intervalo de tempo especificado, o usuário retransmite a mensagem.

7- Um sistema de múltiplo acesso utiliza o algoritmo ALOHA PURO como forma de acesso dos usuários. A taxa global de transmissão é de 1 Mbit/s. Supondo que se deseja uma taxa de chegada de mensagens de 10k mensagens/s, dimensionar o tamanho máximo de cada mensagem (em bits), sabendo que o tráfego total normalizado  $G=0,2$ .

Solução:

$\rho = Ge^{-2G}$ . Se  $G=0,2$ ,  $\sigma=0,134$ . Mas  $\rho = \frac{b\lambda}{R}$ , daí  $b = \frac{R\rho}{\lambda} = \frac{10^6 \times 0,134}{10^4} = 13,4$ . Como não se pode ter um número fracionário de bits,  $b=13$  bits.

8- Repita o problema (7) para  $G=1$ .

Solução: Para  $G=1$ ,  $\sigma=0,135$ . Daí,  $b=13,5$ , ou seja,  $b=13$  bits.

9- Interprete os resultados obtidos em (7) e (8).

Solução:

Conforme podemos observar, em ambos os casos temos o mesmo valor de  $\sigma$ , que representa o tráfego útil normalizado. Entretanto, o tráfego total  $G$  é bem maior, o que significa que o tráfego de colisões, ou seja, o tráfego rejeitado, também é bem maior em (8) do que em (7).

Isto pode ser numericamente calculado, pois se  $G=1$ ,  $b=13$ ,  $\lambda_t=76.923$  mensagens/s. Como o tráfego útil é 10.000 mensagens/s, temos um valor de 66.923 mensagens/s de tráfego rejeitado. Em outras palavras, o sistema não está trabalhando com eficiência, pois apesar do tráfego total  $G$  ser elevado, grande parte dele é devido a tráfego rejeitado.

10- Em (7),  $G=0,2$ . Em (8),  $G=1$ . O que você acha que poderia causar esta diferença?

Solução:

$G$  representa o tráfego total normalizado à capacidade do canal. O tráfego absoluto é dado por  $b\lambda_t$ , em bit/s. Supondo um valor de  $b$  constante em ambos os casos, temos que em  $\lambda_{t(8)}/\lambda_{t(7)}=1/0,2=5$ . Concluimos, portanto, que em (8) temos 5 vezes mais usuários do que em (7).

11- Faça uma estimativa para o número provável de usuários em (7).

Solução:

$G=0,2$ . Como  $R=1$  Mbit/s,  $b\lambda_t=200$  kbit/s. A taxa média de mensagens é, portanto, 200.000/b mensagens/s no sistema. Supondo que cada usuário gere uma taxa média de mensagens de  $M$  mensagens/s, temos um total de 200.000/Mb usuários. Por exemplo, se  $b=13$ , e  $M=1.000$ , teríamos um total de 15,38 usuários, ou como não podemos ter um número fracionário, 15 usuários.

12- Repita o exercício (7) supondo o uso de um sistema S-ALOHA.

Solução:

Para o S-ALOHA,  $\rho = G e^{-G}$ . Para  $G=0,2$ ,  $\sigma=0,1637$ . Daí,  $b=16$  bits.

13- Calcule a taxa normalizada de envio de um canal ALOHA que possui  $R=50$  Kbit/s e  $M=10$  usuários, cada usuário transmitindo em média  $\lambda = 2$  mensagens/s. O formato do sistema prevê  $b=1350$  bits/mensagem. Qual dos 3 esquemas (ALOHA –PURO, S-ALOHA ou R-ALOHA) poderia ser utilizado para este sistema?

Solução:

$\rho = \frac{Mb\lambda}{R} = 0,54$ . Da Figura 10 vemos que apenas o R-ALOHA é capaz de fornecer essa taxa. Esse, portanto, seria o esquema escolhido.

14- Refaça o exercício (13) para  $\lambda=1$  mensagen/s, e calcule o tráfego total do sistema e o tráfego de colisões, em bit/s.

Solução:

Para  $\lambda=1$  mensagens/s,  $\rho = \frac{Mb\lambda}{R} = 0,27$ . Da Figura 10 vemos que o S-ALOHA poderia ser

utilizado. Nesse caso,  $\rho = Ge^{-G}$ , daí  $G=0,4$ . Como  $G = \frac{b\lambda_t}{R}$ , temos que  $\lambda_t=14,8$  mensagens/s.

Em bit/s, temos  $14,8 \times 1350 = 20$  kbit/s, sendo este o tráfego total. Como  $M\lambda=10$  mensagens/s, temos  $10 \times 1350 = 13,5$  kbit/s de tráfego útil. Portanto, o tráfego de colisões seria  $20 - 13,5 = 6,5$  kbit/s.

15- Um sistema possui 8 usuários, e utiliza a técnica de “polling” para resolver contendas entre eles. Descreva os passos do algoritmo de árvore binária para esse sistema, supondo uma disputa entre os terminais 1,2 e 5.

Solução:

- 1 – O MMA solicita a transmissão do 1º bit (bit mais à esquerda) dos números de identificação (ID) dos terminais em disputa.
- 2 – Os terminal 001 e 010 transmitem um “0”, e terminal 101 transmite um “1”. O MMA, baseado na intensidade do sinal recebido (relação sinal/ruído), seleciona 1 ou 0 como o bit que ele “escuta”. Vamos supor que o MMA escolhe bit 0 e informa esta escolha aos usuários. Os terminais que não foram escolhidos desistem da contenda durante esta passagem pela árvore.
- 3 – O MMA solicita a transmissão do 2º bit de identificação do ID dos terminais remanescente.
- 4 – Terminal 001 transmite um “0”, e terminal 010 transmite um “1”.
- 5 – Suponha que o MMA seleciona um 0 e notifica os terminais correspondentemente. O terminal 010 desiste, e o terminal 001 ganha a disputa, podendo acessar o RC.
- 6 – Quando o RC torna-se novamente disponível, os passos de 1 – 5 são repetidos.

16- Calcule o tempo necessário para um “polling” direto de uma população de 4096 usuários, para prover disponibilidade de canal a 100 usuários em disputa. Compare o resultado com o tempo que seria necessário para realizar uma pesquisa usando uma árvore binária. Suponha que o tempo necessário para interrogar um terminal e o tempo requerido para uma decisão de busca em árvore binária são ambos iguais a 1 s.

Solução:

“Polling” direto de 4096 terminais:

60

$$T=4096 \times 1 \text{ s} = 4096 \text{ s.}$$

Árvore binária requerendo 100 passagens através da árvore:

$$T'=(100 \times \log_2 4096 \times 1) = 1200 \text{ s.}$$

## **TDMA EM APLICAÇÕES SATÉLITE**

Os sistemas TDMA são importantes na aplicação via satélite, pela disponibilidade de fontes de sincronismo precisas e de elementos comutadores de alta velocidade. Uma desvantagem ou custo para a implementação de um esquema TDMA é a necessidade de prover sincronismo preciso entre as estações terrenas participantes e o satélite. Por isso, o equipamento TDMA para estações terrenas é mais sofisticado e portanto mais caro que equipamentos FDMA. Entretanto, para estações terrenas capazes de prover múltiplos canais ponta a ponta, o sistema FDMA requer conversões de frequência tanto no enlace de subida (up-conversion) quanto no enlace de descida (down-conversion). Assim, para FDMA, a quantidade de equipamento cresce com a quantidade de conexões simultâneas. Com TDMA, tal crescimento não acontece, uma vez que a seletividade do canal é feita no tempo, não na frequência. Portanto, para grandes estações terrenas, com múltiplas conexões, TDMA pode ser mais econômico do que FDMA. Em sistemas satélite com diversidade de antenas (múltiplos feixes), cada feixe necessita se intercomunicar com outros feixes. Nesse caso, TDMA é empregado como técnica básica de comutação, conforme ocorre no INTELSAT VI.

### ***TDMA NO INTELSAT***

A idéia básica permeando a utilização do TDMA é que um usuário a baixa taxa pode partilhar o RC com outros usuários semelhantes comprimindo em rajadas curtas (“bursts”) a transmissão, em taxas muito mais rápidas que as que foram geradas.

A Figura 12 apresenta a forma padrão adotada para o quadro de transmissão do Intelsat para a Europa.

O quadro começa com uma rajada de referência RB1, emitida por uma estação de referência. A rajada de referência fornece a informação necessária a outras estações para se posicionarem no quadro. Pode haver uma segunda rajada de referência, RB2, emitida por segurança. A seguir, vêm os “slots” de tráfego. Estes podem ser pré-designados, ou designados de acordo com um protocolo do tipo DAMA.

O sinal multiplex PCM com a taxa de bits  $R_0$  de 2048 kbit/s e um super quadro T de 2 ms (16 quadros de 125  $\mu$ s cada) é comprimido por um fator de 59 e transmitido usando modulação QPSK a uma taxa de  $R_T$  de 120.832 kbit/s (taxa de 60,416 Mbaud no QPSK). A duração do campo de tráfego de dados  $T_{td}$  no quadro de alta velocidade TDMA pode ser obtido como

segue:

$$T_{td} = \frac{R_0 T}{R_T} = \frac{2.048 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-3}}{120.832 \times 10^3} = 33,9 \mu s$$

Para a América do Norte, que usa o padrão PCM com um  $R_0$  de 1544 kbit/s, a duração de um campo de tráfego de dados é:

$$T_{td} = \frac{R_0 T}{R_T} = \frac{1.544 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-3}}{120.832 \times 10^3} = 25,6 \mu s$$

O aspecto mais crítico da operação TDMA descrita é o sincronismo preciso necessário para a inserção e retirada dos “slots” no instante correto.

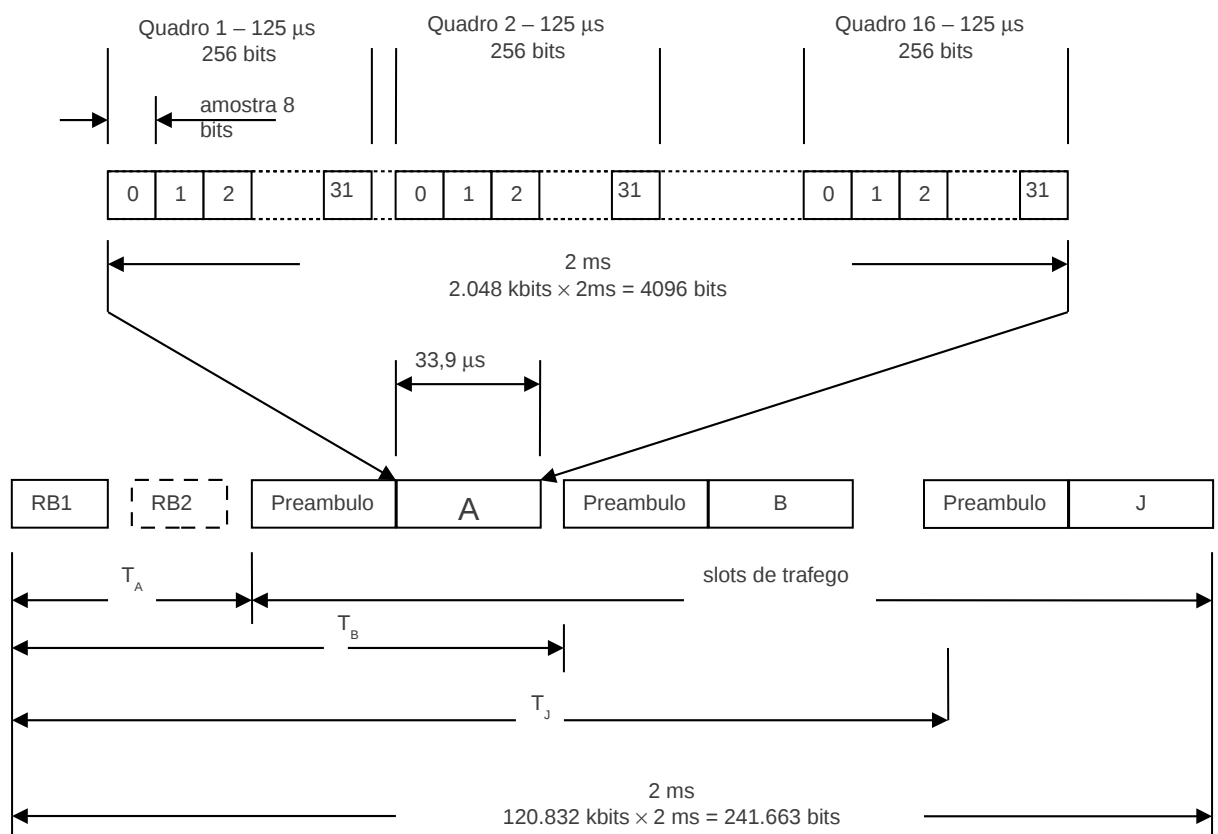


Figura 12

Padrão digital de transmissão Europeu para o Intelsat

## **TÉCNICAS DE MÚLTIPLO ACESSO PARA REDES DE ÁREAS LOCAIS (LAN)**

Uma rede de área local (LAN) pode ser usada para interconectar computadores, terminais, impressoras etc, localizadas em um edifício ou um pequeno conjunto de edifícios. Enquanto redes de longa distância (WAN) usam a rede telefônica pública por razões econômicas, as redes LAN usualmente lançam seus próprios cabos e meios de transmissão. Usualmente esses cabos e meios conseguem fornecer uma grande largura de banda. Pelo fato de não ser forçada a economizar banda, uma LAN geralmente pode utilizar algoritmos simples de acesso.

### ***SISTEMAS DE MÚLTIPLO ACESSO BASEADOS NA ESCUTA DO CANAL (CSMA/CD)***

Este protocolo é amplamente utilizado em rede LAN do tipo Ethernet. Ethernet é um esquema de acesso criado pela Xerox Corporation, e é baseado no pressuposto de que cada máquina local pode sentir o estado de um meio comum de transmissão, usualmente um barramento passivo, antes de tentar usá-lo. A sigla CSMA/CD deriva do termo em Inglês “Carrier-Sense Multiple Access with Collision Detection”. O termo “carrier” aqui, significa qualquer atividade elétrica no meio.

O protocolo CSMA/CD é simples. Todos os usuários escutam o canal, observando qualquer atividade no mesmo. Um usuário que deseja transmitir um pacote de dados ocupa o canal quando ele sente que o canal está livre. Colisões podem ocorrer quando dois ou mais usuários percebem o canal livre e iniciam a transmissão. Quando os usuários que estão transmitindo simultaneamente percebem a colisão, eles transmitem um sinal especial, denominado sinal “jam”, que serve para notificar todos os usuários da colisão e abortam suas transmissões. O usuário então espera um tempo aleatório (similar ao ALOHA) e tenta novamente a transmissão. Esta técnica é chamada também de CSMA/CD não persistente.

Chamando  $\tau_d$  o tempo máximo necessário a um usuário para “sentir” o canal (que corresponde ao retardo de propagação através do canal), e  $T_p$  o tempo de duração de um pacote, e  $G$  o tráfego normalizado através do canal, o tráfego útil normalizado através do canal é dado pela relação, dada por Kleinrock e Tobagi (1975):

$$\rho = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a) + e^{-aG}}, \text{ sendo } a = \tau_d / T_p.$$

Note que quando  $a=0$ ,  $\rho=G/(1+G)$ , e portanto tende a 1 quando  $G$  tende a infinito, isto é, quando o tempo para “sentir” o canal é muito pequeno em relação ao tempo de um pacote, o sistema tende a melhorar o comportamento. O retardo também foi estudado por Kleinrock e Tobagi, e em uma das simulações, para  $a=0,01$ , retardos normalizados da ordem de 2 pacotes foram encontrados para  $\sigma$  da ordem de 0,5. Geralmente, para  $\sigma=1$ , o retardo é muito grande.

### ***SISTEMAS DE MÚLTIPLO ACESSO BASEADOS NA PASSAGEM DE PERMISSÕES (TOKEN)***

Uma rede sensível à presença da portadora, como a Ethernet, geralmente consiste de um barramento comum no qual todas as estações são passivamente conectadas. Uma rede em anel, consiste de uma série de conexões ponto a ponto entre estações consecutivas. As interfaces entre as estações e o anel são usualmente ativas. Redes em anel utilizam um protocolo de acesso baseado na passagem de uma permissão (“token”), que percorre sequencialmente o anel. Apenas a estação que possuir a permissão pode transmitir. A permissão é definida como um padrão de bits especial (p. ex., 1 1 1 1 1 1 1), o qual circula no anel sempre que as estações estejam ociosas. O esquema de permissões funciona da seguinte forma:

- 1- Uma estação desejando transmitir monitora a presença da permissão aparecendo na interface. Quando o último bit da permissão aparece, a estação o inverte (p. ex., 1 1 1 1 1 1 0). A estação quebra a conexão da interface e introduz seus próprios dados no anel.
- 2- Conforme os bits circulam de volta no anel, são removidos pela própria estação que os enviou. Não existe limite ao tamanho dos pacotes, porque o pacote inteiro nunca aparece no anel em um dado instante.
- 3- Após transmitir o último bit de sua mensagem, a estação regenera a permissão. Após o último bit de dado haver circulado pelo anel e haver sido removido, a estação respectiva reverte ao modo de escuta.
- 4- Não pode existir contenção da transmissão em uma rede em anel. Durante tráfego pesado, tão logo uma permissão é regenerada, a próxima estação requerendo serviço perceberá e remove a permissão. Portanto, nestas condições, a permissão circulará mais lentamente pelo anel.

O anel por si só deve possuir retardo suficiente para permitir que uma permissão completa circule o anel quando todas as estações estiverem ociosas. Uma característica principal no projeto de uma rede em anel é a distância de propagação ou “comprimento” de um (1) bit. Se a taxa de transmissão de dados é  $R$  Mbit/s, um bit é emitido a cada  $1/R$  microssegundo. Uma vez que a velocidade de propagação ao longo de um cabo coaxial típico é de  $200 \text{ m}/\mu\text{s}$ , cada bit ocupa  $200/R$  metros no anel. Isto determina o comprimento mínimo que a circunferência do anel deve possuir.

Testes de simulação demonstram que para taxas efetivas normalizadas de transmissão da ordem de 0,2 redes em anel baseadas em permissões claramente manifestam melhor desempenho do que redes CSMA/CD, no tocante a características de retardo.

## RESUMO

Nesta parte foram apresentados exemplos simples de aplicações de múltiplo acesso TDMA em sistema satélite, que é normalmente utilizado na transmissão de canais telefônicos, e em sistemas de redes de comunicação de dados (LAN's), sendo abordado o algoritmo CSMA/CD, utilizado em redes Ethernet, e o algoritmo de passagem de permissão, utilizado em redes em anel (TOKEN-RING). Foi visto que o TDMA para aplicações satélite é baseado na reserva de intervalos de tempo ("slots"), cada slot correspondendo a compressão no tempo de um superquadro PCM a 2048 kbit/s, sendo que no padrão Europeu o superquadro, de 2 ms de duração, é comprimido em um slot de 33,9 microsegundos, e no padrão Norte Americano cada superquadro, a 1544 kbit/s e com duração de também 2 ms, é comprimido para 25,6 microssegundo. Em ambos os casos, a taxa de transmissão é de 120.832 kbit/s. A alocação de cada estação nos slots do quadro de alta velocidade pode seguir um esquema de pré-designação ou um esquema DAMA.

A intenção, aqui, não é fazer um tratamento exaustivo das técnicas de comunicação satélite, apenas apresentar um exemplo do uso do TDMA.

Na área de redes locais de computadores, foi apresentada a idéia do CSMA/CD utilizado no padrão ETHERNET e o algoritmo de passagem de permissão usado em redes em anel TOKEN-RING.

## EXERCÍCIOS

1- Num sistema satélite é empregado TDMA conforme a estrutura de quadro de alta taxa da Figura 12. Calcule a duração total de um “burst” de tráfego, se o preâmbulo é composto por 300 símbolos QPSK.

2- Um sistema TDMA opera a 100 Mbit/s com um quadro de 2 ms. Suponha que todos os slots tenham o mesmo comprimento e que um tempo de guarda de  $1 \mu\text{s}$  é requerido entre slots. Chamando N o número de slots do sistema e definindo a eficiência no uso dos RC's como a razão entre a quantidade de informação (em bits) transferida e a quantidade de bits gastos para isso, calcule o valor de N para a máxima eficiência, e o respectivo valor de eficiência máxima. Suponha ainda uma taxa de transmissão por usuário  $R_u=2048 \text{ kbit/s}$ .

3) Repita o exercício 2 supondo que um preâmbulo de 100 bits é requerido antes de cada slot.

4) Supondo que no exercício (3) o sistema seja dividido em 100 slots, para que valor se altera a eficiência nesse caso?

5) Se uma permissão de 8 bits deve ser usada numa rede token-ring a 5 Mbit/s, calcule a distância de propagação mínima necessária para a circunferência do anel. Suponha que a velocidade de propagação é  $200 \text{ m}/\mu\text{s}$ .

6) Discuta o que acontece numa rede Token-ring (Rede em anel com passagem de permissão) quando a circunferência do anel é menor do que a distância de propagação necessária á transmissão de todos os bits da palavra de permissão (token).

7) Qual a idéia básica da utilização da técnica TDMA em satélites?

8) Como se calcula o tempo de um slot no padrão Europeu para o TDMA empregado no INTELSAT IV?

9) qual o aspecto crítico da operação TDMA no satélite?

10) O que é CSMA/CD?

11) Como funciona o protocolo CSMA/CD?

12) Calcule o tráfego útil normalizado de uma rede Ethernet usando CSMA/CD operando a 1 Mbit/s, constituída por 150 estações transmitindo em média 10 pacotes por segundo. O comprimento médio de cada pacote é de 300 bits.

13) Calcule o tráfego total na rede do exercício (12), se a rede em questão tem um comprimento físico equivalente (barramento) de 600m. Considere a velocidade de propagação no cabo igual a  $200\text{m}/\mu\text{s}$ .

14) Para a rede do exercício (13), que parcela de tráfego corresponde a colisões?

15) Faça uma estimativa para o retardo médio encontrado por uma estação na transmissão de um pacote.

## EXERCÍCIOS – SOLUÇÃO

1- Num sistema satélite é empregado TDMA conforme a estrutura de quadro de alta taxa da Figura 12. Calcule a duração total de um “burst” de tráfego, se o preâmbulo é composto por 300 símbolos QPSK.

Solução:

Se o preâmbulo contém 300 símbolos QPSK, então isto corresponde a 600 bits. No quadro de alta taxa, isto corresponde a uma duração de  $600/120.832.000 \cong 5 \mu\text{s}$ . Portanto, no caso Europeu, temos um “burst” com duração total de  $33,9+5 = 38,9 \mu\text{s}$ , e no caso Norte Americano  $25,6+5 = 30,6 \mu\text{s}$ .

2- Um sistema TDMA opera a 100 Mbit/s com um quadro de 2 ms. Suponha que todos os slots tenham o mesmo comprimento e que um tempo de guarda de  $1 \mu\text{s}$  é requerido entre slots. Chamando N o número de slots do sistema e definindo a eficiência no uso dos RC's como a razão como a razão entre a quantidade de informação (em bits) transferida e a quantidade de bits gastos para isso, calcule o valor de N para a máxima eficiência, e o respectivo valor de eficiência máxima. Suponha ainda uma taxa de transmissão por usuário  $R_u=2048 \text{ kbit/s}$ .

Solução:

Um quadro de 2 ms a 100 Mbit/s contém  $2 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^6 = 200 \text{ kbit}$ . Se possui apenas 1 slot, todos esses 200 kbit seriam alocados a um (1) único usuário por vez. Evidentemente, se esse usuário utiliza uma taxa de transmissão  $R_u \text{ bit/s}$ , em 2 ms teríamos  $2 \times 10^{-3} \times R_u$  bits transmitidos. Supondo  $R_u=2048 \text{ kbit/s}$ , temos 4096 bits de informação a serem transmitidos. Não haveria necessidade de tempo de guarda, pois temos apenas 1 slot. Assim, a eficiência (que poderíamos chamar de  $\eta$ ) para 1 slot seria:

$$\eta_1 = 4096 / 200.000 = 2,048\%$$

Para N slots, teríamos N usuários simultâneos.. Haveria necessidade de tempo de guarda entre os slots, num total de (N-1) tempos de guarda, totalizando  $(N-1) \times 2$  microssegundos, que correspondem a  $(N-1) \times 2 \times 10^{-6} \times 10^8 = 200 \times (N-1)$  bits. Desta forma, sobrariam  $2 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^6 - 200 \times (N-1)$  bits para a transmissão de informação de usuários. Assim, definindo ainda a eficiência do uso dos RC's como a razão entre a quantidade de informação (em bits) transferida e a quantidade de bits gastos para isso, teríamos:

$$\eta_N = \frac{2 \times 10^{-3} \times R_u \times N}{2 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^6 - 200 \times (N-1)} = \frac{4096 \times N}{200.000 - 200 \times (N-1)}.$$

A eficiência máxima será atingida quando a relação acima for igual a 1., ou  $200200 = 44296 \times N$ , o que fornece  $N=46,60$ . Como  $N$  não pode ser fracionário, escolhemos  $N=46$ , o que fornece  $\eta_{\max} = 98,7\%$

3) Repita o exercício 2 supondo que um preâmbulo de 100 bits é requerido antes de cada slot.

Solução:

Se cada slot consome 100 bits de preâmbulo,  $N$  slots consomem  $100 \times N$  bits. Assim a eficiência se altera para:

$$\eta_N = \frac{2 \times 10^{-3} \times R_u \times N}{2 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^6 - 200 \times (N-1) - 100 \times N} = \frac{4096 \times N}{200200 - 300 \times N}$$

Para  $\eta_N=1$ , temos  $N=45,54$ .

Escolhendo  $N=45$ , temos  $\eta_N = 98,7\%$

4) Supondo que no exercício (3) o sistema seja dividido em 100 slots, para que valor se altera a eficiência nesse caso?

Solução:

Como cada usuário tem que transmitir 4096 bits em 2 ms, e cada slot (para  $N=100$ ), considerando o tempo de guarda de 2 microssegundos e o preâmbulo possui apenas

$\frac{(200000 - 200 \times (N-1) - 100 \times N)}{N} = 1702$  bits úteis, cada usuário terá que utilizar 3 slots para sua transmissão, deixando com isso 1010 bits sem utilização por usuário, em média.

Podemos dizer, portanto, que o rendimento cai para aproximadamente  $\frac{4096}{4096 + 1702} = 70,6\%$ .

5) Se uma permissão de 8 bits deve ser usada numa rede token-ring a 5 Mbit/s, calcule a

distância de propagação mínima necessária para a circunferência do anel. Suponha que a velocidade de propagação é 200 m/μs.

Solução:

$R = 5 \text{ Mbit/s}$ . O tempo necessário para emitir o token de 8 bit é  $\frac{8}{5} \times 10^{-6} \text{ s}$ . Assim, a distância

de propagação necessária é  $\frac{8}{5} \times 10^{-6} \times 200 = 320 \text{ m}$ .

6) Discuta o que acontece numa rede Token-ring (Rede em anel com passagem de permissão) quando a circunferência do anel é menor do que a distância de propagação necessária á transmissão de todos os bits da palavra de permissão (token).

Solução:

Uma estação que deseja transmitir necessita observar toda a palavra relativa à permissão (token), para que possa se apoderar desta e iniciar transmissão. Se a circunferência é menor que a distância necessária para a propagação integral do token, nenhuma estação o repetirá integralmente, assim nenhuma estação terá como saber quando a permissão foi passada realmente para ela.

:

7) Qual a idéia básica da utilização da técnica TDMA em satélites?

Solução:

A idéia básica permeando a utilização do TDMA é que um usuário a baixa taxa pode partilhar o RC com outros usuários semelhantes comprimindo em rajadas curtas (“bursts”) a transmissão, em taxas muito mais rápidas que as que foram geradas.

8) Como se calcula o tempo de um slot no padrão Europeu para o TDMA empregado no INTELSAT IV?

Solução:

O sinal multiplex PCM com a taxa de bits  $R_0$  de 2048 kbit/s e um super quadro T de 2 ms (16 quadros de 125 μs cada) é comprimido por um fator de 59 e transmitido usando modulação QPSK a uma taxa de  $R_T$  de 120.832 kbit/s (taxa de 60,416 Mbaud no QPSK). A duração do campo de tráfego de dados  $T_{td}$  no quadro de alta velocidade TDMA pode ser obtido como

segue:

$$T_{td} = \frac{R_0 T}{R_T} = \frac{2.048 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-3}}{120.832 \times 10^3} = 33,9 \mu s .$$

9) qual o aspecto crítico da operação TDMA no satélite?

Solução:

O aspecto mais crítico da operação TDMA descrita é o sincronismo preciso necessário para a inserção e retirada dos “slots” no instante correto.

10) O que é CSMA/CD?

Solução:

Este protocolo é amplamente utilizado em rede LAN do tipo Ethernet. Ethernet é um esquema de acesso criado pela Xerox Corporation, e é baseado no pressuposto de que cada máquina local pode sentir o estado de um meio comum de transmissão, usualmente um barramento passivo, antes de tentar usá-lo. A sigla CSMA/CD deriva do termo em Inglês “Carrier-Sense Multiple Access with Collision Detection”. O termo “carrier” aqui, significa qualquer atividade elétrica no meio.

11) Como funciona o protocolo CSMA/CD?

Solução:

O protocolo CSMA/CD é simples. Todos os usuários escutam o canal, observando qualquer atividade no mesmo. Um usuário que deseja transmitir um pacote de dados ocupa o canal quando ele sente que o canal está livre. Colisões podem ocorrer quando dois ou mais usuários percebem o canal livre e iniciam a transmissão. Quando os usuários que estão transmitindo simultaneamente percebem a colisão, eles transmitem um sinal especial, denominado sinal “jam”, que serve para notificar todos os usuários da colisão e abortam suas transmissões. O usuário então espera um tempo aleatório (similar ao ALOHA) e tenta novamente a transmissão. Esta técnica é chamada também de CSMA/CD não persistente.

12) Calcule o tráfego útil normalizado de uma rede Ethernet usando CSMA/CD operando a 1 Mbit/s, constituída por 150 estações transmitindo em média 10 pacotes por segundo. O

comprimento médio de cada pacote é de 300 bits.

Solução:

Por definição de tráfego útil normalizado (conforme parte V.4),  $\rho = \frac{b\lambda}{R}$ , sendo  $\lambda$  o tráfego médio do canal, em bit/s, e  $b$  o tamanho médio do pacote.

No caso,  $\lambda = 150 \times 10 \times 300 = 450$  kbit/s.

$$\text{Assim, } \rho = \frac{450 \times 10^3}{1 \times 10^6} = 0,45.$$

13) Calcule o tráfego total na rede do exercício (12), se a rede em questão tem um comprimento físico equivalente (barramento) de 600m. Considere a velocidade de propagação no cabo igual a 200m/μs.

Solução:

$\rho = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a) + e^{-aG}}$ , sendo  $a = \tau_d / T_p$ , sendo  $\tau_d$  o tempo máximo necessário a um usuário para “sentir” o canal (que corresponde ao retardo de propagação através do canal), e  $T_p$  o tempo de duração de um pacote.

Temos então:  $a = \frac{3 \times 10^{-6}}{300 \times 10^{-6}} = 0,01$ . Aplicando-se  $a$  e  $\rho$  à  $\rho = \frac{Ge^{-aG}}{G(1+2a) + e^{-aG}}$ , obtém-se

$G = 0,82$ . “Desnormalizando-se” este valor, tem-se finalmente o tráfego total de 820 kbit/s.

14) Para a rede do exercício (13), que parcela de tráfego corresponde a colisões?

Solução:

Tráfego de colisões =  $820 - 450 = 370$  kbit/s.

15) Faça uma estimativa para o retardo médio encontrado por uma estação na transmissão de um pacote.

Solução:

Conforme o texto, “O retardo também foi estudado por Kleinrock e Tobagi, e em uma das

simulações, para  $a=0,01$ , retardos normalizados da ordem de 2 pacotes foram encontrados para  $\sigma$  da ordem de 0,5”. Como, no caso,  $\rho=0,45$ , o retardo médio deve ser pouco inferior a 2 pacotes, ou 600 bits.

## ESPALHAMENTO ESPECTRAL-INTRODUÇÃO

O espalhamento espectral por sequência direta DSSS utiliza uma portadora modulada por uma combinação da mensagem com uma sinal de espalhamento (faixa larga) de alta velocidade. O sinal resultante tem a forma geral:

$s(t) = A \times d_n \times d \times \cos(\omega_c t)$ . Normalmente, a sequência de dados  $d$  pode ser eletricamente representada por um sinal bipolar, onde, por exemplo, +1 corresponde ao bit 1 e -1 ao bit 0.

O sinal de espalhamento é um sinal pseudo aleatório que constitui a sequência do código, gerada univocamente para cada usuário. Assim, se o código no receptor é exatamente igual ao código do transmissor, a saída do correlador no receptor é exatamente o sinal original desespalhado.

A taxa de transmissão da sequência de código  $p_n$  é muito maior que a taxa de transmissão da mensagem, de modo que a cada bit da mensagem correspondem vários bits da sequência. Para distinguir uma coisa da outra, os bits da sequência recebem a denominação especial de “chips”.

## ESPALHAMENTO ESPECTRAL POR SEQUÊNCIA DIRETA (DSSS)

A Figura 13 apresenta, de forma concisa, um diagrama em blocos de um modulador M-PSK utilizando espalhamento espectral por sequência direta.

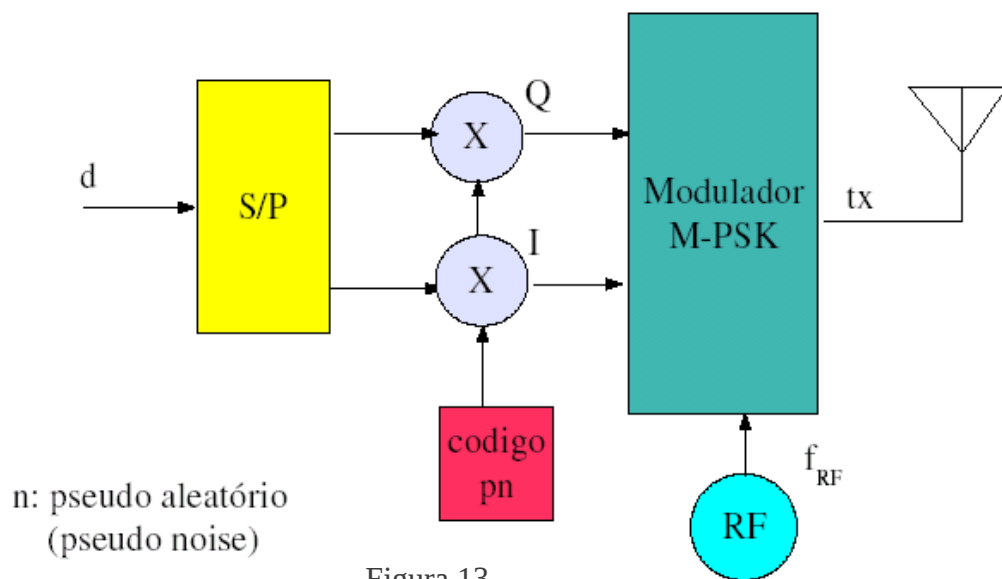


Figura 13

Modelo Simplificado de uma Modulação M-PSK com DSSS

Uma sequência pseudo aleatória pn, gerada no modulador, é utilizada em conjunção com um modulador M-PSK para deslocar aleatoriamente a fase do sinal PSK, a uma taxa  $R_c$  (taxa da sequência pseudo aleatória) também chamada taxa de “chip” ( $R_c = 1/T_c$ ), uma taxa que é um múltiplo inteiro da taxa de símbolos  $R_s = 1/T_s$ .

A largura de faixa do sinal transmitido é determinada pela taxa de chip e pela filtragem de RF.

A sequência pseudo aleatória pn pode ser longa, quando sua duração (período) é muito maior que a duração de um símbolo, ou curta, quando sua duração for equivalente à duração de um símbolo. No primeiro caso, uma sequência diferente é associada a cada símbolo, em um período de repetição que pode ser de alguns dias. No segundo caso, a mesma sequência é associada a cada símbolo.

## MODULAÇÃO

Para simplificar a descrição, o sistema spread spectrum é considerado BPSK, sem filtragem posterior, e um canal ideal. A Figura 14 apresenta um diagrama simplificado do sistema. A entrada do sistema consiste em uma sequência de dados binários  $\underline{d}$ , com taxa de símbolos  $R_s=R_b=1/T_s$  (taxa de bits para BPSK).

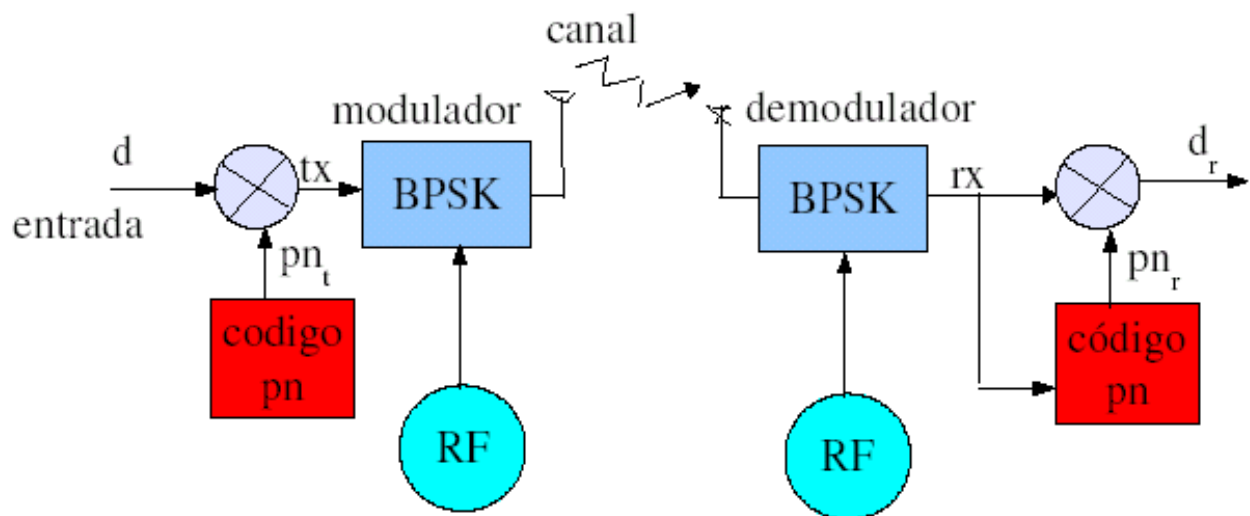


Figura 14

Diagrama simplificado de um sistema BPSK com espalhamento espectral

A sequência pseudo aleatória  $pn_t$ , que é independente da sequência de dados de entrada, possui uma taxa de chips  $R_c$ , que é utilizada para espalhar o espectro da sequência de dados de entrada. Isto é conseguido multiplicando-se os dois sinais para produzir o sinal de banda básica de transmissão  $tx = d \times pn_t$ , com taxa de transmissão  $R_{tx}=R_c$ . Assim, o efeito da multiplicação de  $\underline{d}$  pela sequência  $pn$  é espalhar a largura de banda  $R_s$  de  $\underline{d}$  para uma largura de banda de  $R_c$ , tal como mostra a Figura 15.

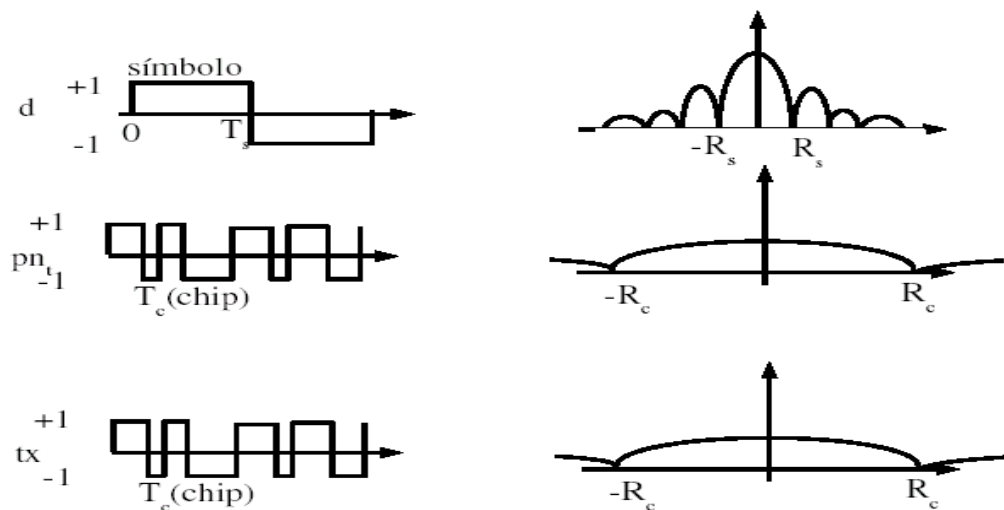


Figura 15  
Formas de onda e espectros no transmissor

Desta forma, um sistema Spread Spectrum espalha o sinal de informação  $\underline{d}$ , que possui uma largura de banda  $BW$ , sobre uma largura de banda muito maior  $BW_{SS}$ , de modo que:

$$BW \approx R_s \ll BW_{SS} \approx R_c$$

O sinal SS é muito parecido com ruído. A amplitude e consequentemente a potência do sinal SS tx é a mesma que a do sinal original de informação  $\underline{d}$ . Devido ao aumento da largura de banda do sinal SS sua densidade espectral de potência deve então ser menor. O fator de expansão de largura de banda, que é a razão entre a taxa de chip  $R_c$  e a taxa de símbolos  $R_s$ , é usualmente selecionado para ser um múltiplo inteiro, em sistemas SS na prática:

$$SF = G_p = \frac{BW_{SS}}{BW} = \frac{R_c}{R_s} = \frac{T_b}{T_c} = N_c$$

SF = Fator de expansão da largura de faixa

$G_p$  = Ganho de processamento

$BW_{SS}$  = Largura de banda do sinal spread spectrum

$BW$  = Largura de banda do sinal antes de ser espalhado

$R_c$  = Taxa de chip

$R_s$  = Taxa de bits do sinal

$T_b$  = Tempo de bit

$T_c$  = Tempo de chip

$N_c$  = Número inteiro

## DEMODULAÇÃO

No receptor, a detecção do sinal desejado é atingida correlacionando-se o sinal recebido com uma sequência local de referência  $pn_r$ .

Se  $pn_r = pn_t$ , e a sequência do receptor estiver sincronizada à sequência do transmissor, então a sequência binária original é reconstituída no receptor. O efeito de multiplicar no receptor o sinal spread-spectrum  $rx$  com a mesma sequência  $pn$  usada no transmissor é desespalhar o espectro recebido, retornando à uma largura de banda  $R_s$ , conforme ilustra a Figura 16.

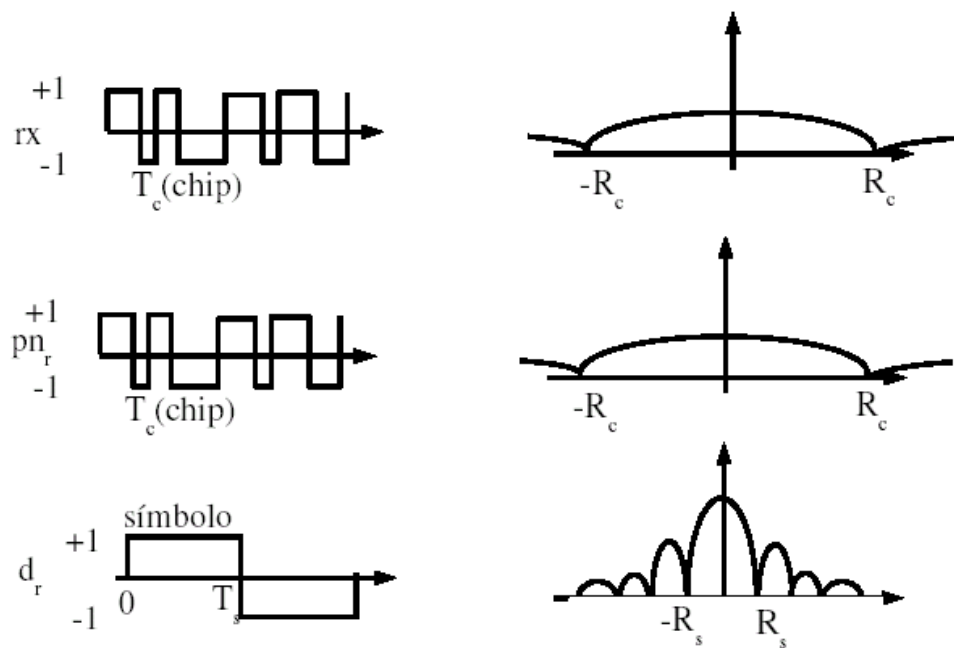


Figura 16  
Formas de Onda e Espectros no Receptor

A sequência de saída no receptor é então (desde que  $pn_r$  esteja sincronizado com  $pn_t$ ):

$$d_r = rx \cdot pn_r = (d \cdot pn_t) \cdot pn_t$$

A sequência  $pn_t$  alterna entre os níveis -1 e +1, por exemplo:

$$pn_t = +1 -1 +1 +1 -1 +1$$

A alternância é destruída quando a sequência  $pn$  é multiplicada por ela mesma

(sincronismo perfeito), porque:

$p_n \cdot p_n = +1$  para todo tempo  $t$ . Isto equivale a dizer que a autocorrelação  $R_{p_n}(0) = +1$ .

Assim, tem-se  $d_r = d$ .

Se a sequência  $p_n$  no receptor não estiver sincronizada à sequência  $p_n$  no transmissor, os dados não podem ser recuperados.

Se  $p_{n_i} \neq p_{n_r}$ , não há ação de desespalhamento. O sinal demodulado de saída  $d_r$  continua com o espectro espalhado. Um receptor que não conheça o código  $p_n$  do transmissor não pode reproduzir a sequência de dados enviada.

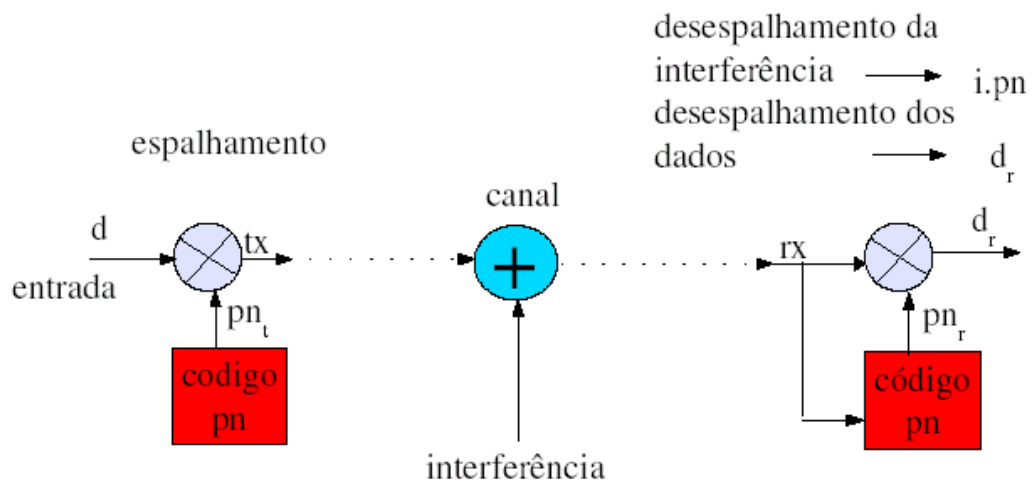
Para uma comunicação segura em um ambiente multiusuário, os dados transmitidos não podem ser recuperados por um usuário que não conhece a sequência  $p_n$  usada no transmissor. Assim, um requisito dessas sequências é que a correlação cruzada entre duas sequências diferentes seja sempre muito baixa, em qualquer instante de tempo, isto é:

correlação cruzada  $R_c(\tau) = \text{valor médio } (p_{n_i} \cdot p_{n_r}) \ll 1$  para todo  $\tau$ .

Isto equivale a dizer que os códigos empregados devem ser ortogonais (p. ex., Hadamard-Walsh). Esta propriedade de ortogonalidade dos códigos de espalhamento significa que a saída do correlador usado no receptor é aproximadamente zero para todas as transmissões, exceto a desejada.

## DESEMPENHO NA PRESENÇA DE INTERFERÊNCIAS

A Figura 17 apresenta um modelo de canal simplificado onde o espalhamento espectral é aplicado em um sistema conforme a Figura 14.



Figuta 17  
Modelo Simplificado de Canal

O sinal recebido  $rx$  consiste do sinal transmitido  $tx$  mais interferência aditiva  $i$  (ruído, outros usuários, etc.):

$$rx = tx + i = d \times pn_t + i$$

Para recuperar o sinal de dados original  $d$  o sinal recebido  $rx$  é multiplicado por uma sequência  $pn$  gerada localmente, a qual é uma réplica exata da utilizada no transmissor:

$$pn_r = pn_t$$

A saída do multiplicador é portanto:

$$d_r = rx \times pn_t = d \times pn_t \times pn_t + i \times pn_t$$

O sinal de dados  $d$  é portanto multiplicado *duas vezes* pela sequência  $pn_t$  enquanto a

interferência indesejada  $i$  é multiplicada apenas uma vez. Devido a propriedade das sequências pn :

$$pn_t \times pn_t = +1 \quad , \text{ para todo } t, \text{ temos então:}$$

A sequência de dados é reproduzida na saída do multiplicador no receptor, exceto a interferência representada pelo termo aditivo:

$$i \times pn_t$$

## INTERFERÊNCIA FAIXA ESTREITA

A multiplicação da interferência  $i$  pela sequência pn gerada localmente tem o mesmo efeito de espalhamento ocorrido com os dados no transmissor. Assim, a interferência é espalhada no espectro, enquanto o sinal desejado se concentra novamente. Este efeito está representado na Figura 18.

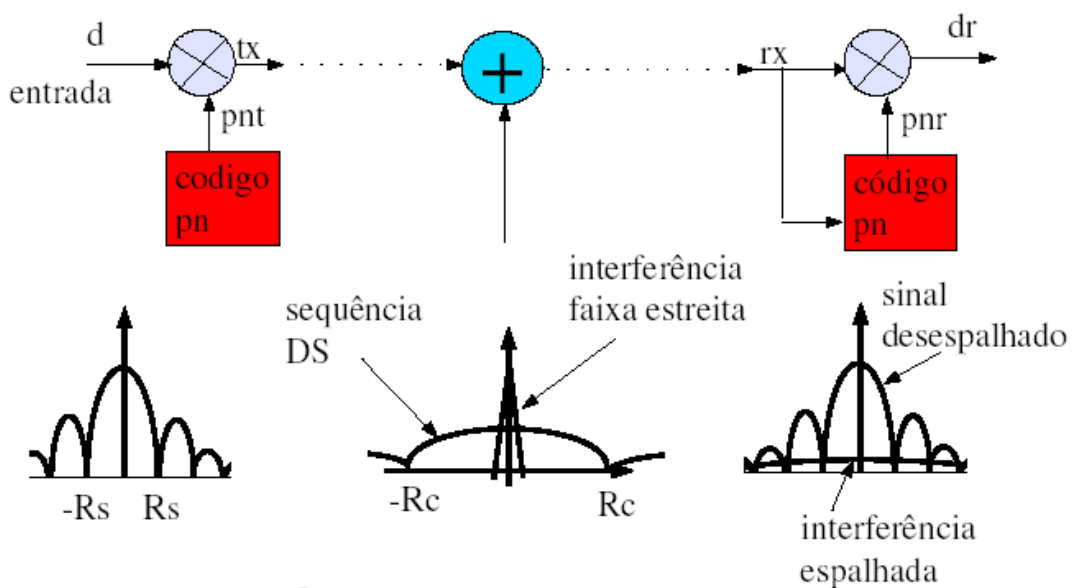


Figura 18  
Interferência Faixa Estreita

Após o espalhamento, a componente de dados possui um espectro de faixa estreita, enquanto a interferência é banda larga. Aplicando-se o sinal recebido  $d_r$  a um filtro passa baixas com uma largura de banda suficiente para permitir a recuperação dos dados originais, a maior parte da interferência é filtrada. O efeito da interferência é

reduzido pelo ganho de processamento ( $G_p$ ).

O interferência faixa estreita é espalhado pela multiplicação com a sequência pn no receptor, conforme mostra a Figura 18. A densidade de potência do ruído é reduzida com relação ao sinal desespalhado. Apenas  $1/G_p$  da potência original de ruído fica na banda básica ( $R_s$ ).

## INTERFERÊNCIA FAIXA LARGA

A interferência em faixa larga pode ser causada por outros usuários de um sistema realizando um mecanismo de múltiplo acesso, por exemplo. Nesse caso, a redução na interferência é devida ao processo de detecção das sequências, isto é, apenas a sequência síncrona é desespalhada. As demais sequências aparecem como ruído de faixa larga, sem terem sua densidade espectral reduzida. Entretanto, como após a demodulação ocorre uma filtragem de banda básica, apenas a porção do espectro dentro da faixa de passagem do filtro concorre para potência interferente no sinal, conforme mostra a Figura 19. Desta forma, podemos dizer que há redução na interferência, pois dois sinais chegando com mesma intensidade no receptor (relação de potências igual a 1) terão a relação alterada para maior, favorável ao sinal desejado. O índice não é  $G_p$ , mas ainda assim é maior do que 1

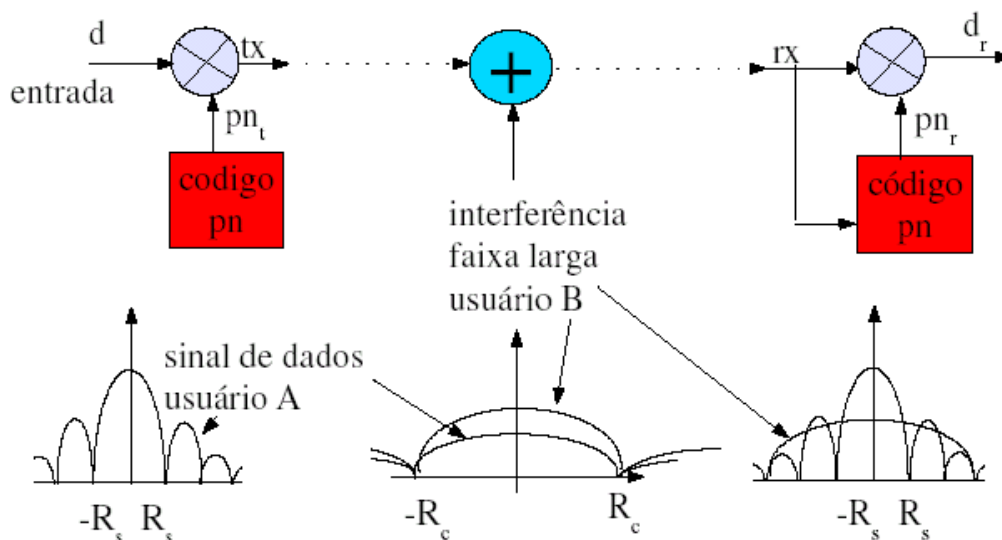


Figura 19  
Interferência Faixa Larga

## INTERFERÊNCIA COM RUÍDO BRANCO, OU RUÍDO GAUSSIANO

Neste caso, não há ganho na relação sinal ruído. A maior largura do canal ( $R_c$  ao invés de  $R_s$ ) aumenta a potência de ruído recebida:

$$N_{\text{info}} = N_0 \times BW_{\text{info}} \rightarrow N_{\text{ss}} = N_0 \times BW_{\text{ss}} = N_{\text{info}} \times G_p$$

onde

$N_{\text{info}}$ : Ruído na faixa de informação.

$N_0$ : Densidade espectral do ruído.

$BW_{\text{info}}$ : Largura de faixa de informação.

$N_{\text{ss}}$ : Potência de ruído espalhada.

$BW_{\text{ss}}$ : Largura de faixa espalhada.

$G_p$ : Ganho de processamento.

O efeito é como se não houvesse modulação, mas a transmissão direta com uma largura de banda  $R_c$ . A Figura 20 ilustra este fato.

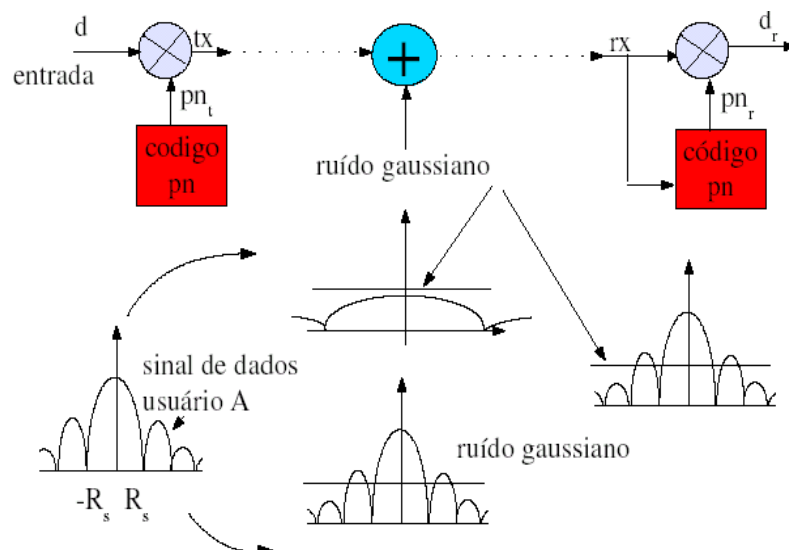


Figura 20  
Ruido Gaussiano

## CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO DS-CDMA

Em esquemas de múltiplo acesso por divisão de códigos utilizando espalhamento espectral por sequência direta DS-CDMA cada usuário:

- a) tem seu próprio código pn
- b) usa a mesma faixa de RF
- c) transmite simultaneamente

Os códigos de usuário são aproximadamente ortogonais, de modo que o coeficiente de correlação cruzada entre sequências diferentes é aproximadamente zero. A principal vantagem de um sistema CDMA é que todos os participantes podem partilhar o mesmo RC (Recurso de Comunicação) de forma assíncrona; isto é, o instante de transição de símbolos de diferentes usuários não precisa coincidir.

A Figura 21 ilustra um diagrama em blocos típico de um sistema DS-CDMA.

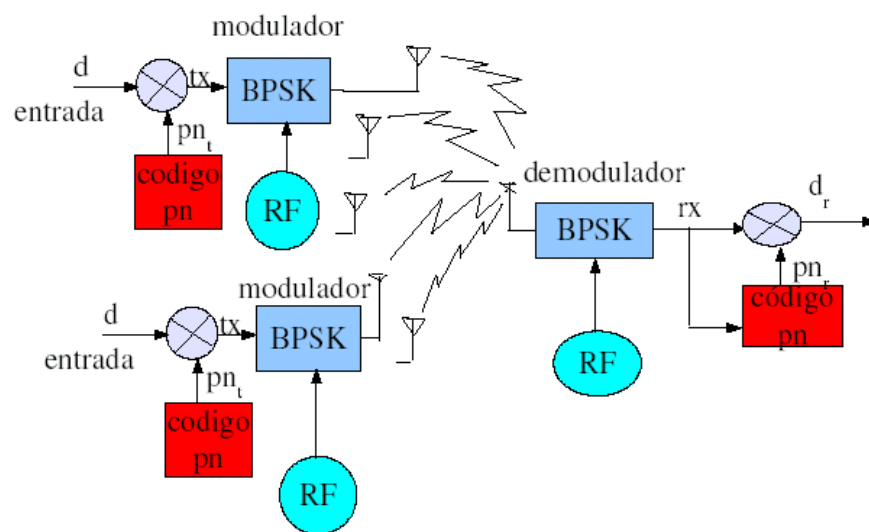


Figura 21  
Diagrama em blocos típico de um sistema DS-CDMA

Neste exemplo, a ilustração utilizou uma modulação BPSK, embora não exista, a rigor, restrição quanto ao tipo de modulação empregada.

A correlação dos espectros recebidos com a sequência  $p_{n_i}$  particular do receptor desespalha apenas o sinal do usuário  $i$ . Os outros usuários produzem apenas ruído para o usuário  $i$ . Entretanto, apenas a porção do ruído produzido pelos demais usuários que fica na faixa de passagem da informação ( $-R_s, R_s$ ) causará interferência ao sinal desejado, conforme ilustrado pela Figura 22. Como a potência média do sinal desespalhado é maior do que a potência média dos demais sinais, que continuam espalhados, após uma filtragem consegue-se separar eficientemente o sinal desejado.

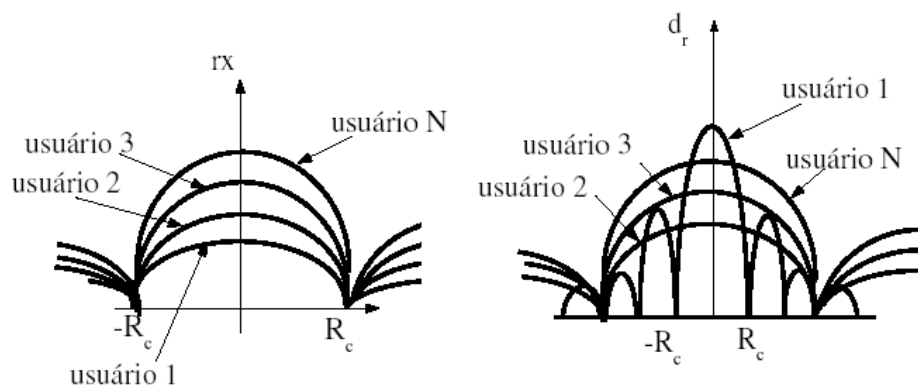


Figura 22

Ilustração, no domínio da frequência, do funcionamento de um sistema DS-CDMA

No sistema de múltiplo acesso DS-CDMA, uma preocupação principal diz respeito ao controle de potência de transmissão dos usuários. Nos sistemas FDMA e TDMA o controle de potência tem como principal objetivo a redução do consumo e das interferências. Os sistemas CDMA são bastante afetados pelo nível de potência interferente, causado pela quantidade de usuários usando simultaneamente o mesmo espaço espectral. Desta forma, um controle efetivo de potência é fundamental para dimensionamento da capacidade do sistema.

Por exemplo, uma aplicação bastante difundida para o uso de sistemas DS-CDMA é em sistemas celulares. Os sistemas celulares baseados em CDMA possuem um sistema de controle de potência bastante elaborado, que consegue controlar dinamicamente a potência transmitida em uma estação móvel (usuário móvel) a partir da estação rádio base em uma célula, de modo que se a quantidade de usuários que acessam simultaneamente uma determinada estação rádio base aumenta, a potência emitida em cada usuário diminui, mantendo a relação sinal/ruído dentro dos níveis adequados. Além disso, estando um usuário em silêncio, os modernos vocoders<sup>2</sup> conseguem reduzir a potência transmitida durante períodos de silêncio ou pausas na voz, conseguindo um aumento médio na capacidade do sistema de aproximadamente 35%.

---

2 Codificador de voz

## **RESUMO**

Nesta parte, foram vistas noções de espalhamento espectral (SS) e aplicações em sistemas de múltiplo acesso por divisão de códigos , utilizando sequência direta (DS-CDMA). Uma das principais aplicações é na constituição de sistemas celulares.

## EXERCÍCIOS

### 1) Complete as lacunas

- a) O espalhamento espectral por sequência direta \_\_\_\_\_ utiliza uma portadora modulada por uma \_\_\_\_\_ com uma sinal de espalhamento (faixa larga) de alta velocidade.
- b) O sinal de espalhamento é um sinal \_\_\_\_\_ que constitui a sequência do código, gerada \_\_\_\_\_ para cada usuário.
- c) Assim, se o código no \_\_\_\_\_ é exatamente igual ao código \_\_\_\_\_ a saída do correlador \_\_\_\_\_ é exatamente o sinal original desespalhado.
- d) A taxa de transmissão da sequência de código  $p_n$  é \_\_\_\_\_ que a taxa de transmissão da mensagem, de modo que a cada bit da mensagem \_\_\_\_\_
- e) Para distinguir os bits da mensagem dos bits \_\_\_\_\_, os bits da sequência recebem a denominação especial de \_\_\_\_\_.

### 2) Identifique a afirmação correta

A Figura 14 apresenta, de forma concisa, um diagrama em blocos de um modulador M-PSK utilizando espalhamento espectral por sequência direta.

- a) Uma sequência pseudo aleatória  $p_n$ , gerada no modulador, é utilizada em conjunção com um modulador QPSK para deslocar aleatoriamente a fase do sinal PSK, a uma taxa  $R_c$  (taxa da sequência pseudo aleatória) também chamada taxa de “chip” ( $R_c = 1/T_c$ ), uma taxa que é um múltiplo inteiro da taxa de símbolos  $R_s = 1/T_s$ .
- b) A largura de faixa do sinal transmitido é determinada pela taxa de chip e pela filtragem de RF
- c) A sequência pseudo aleatória  $p_n$  pode ser longa, quando sua duração (período) é

comparável à duração de um símbolo, ou curta, quando sua duração for menor que a duração de um símbolo.

d) No primeiro caso, uma sequência diferente é associada a cada símbolo, em um período de repetição que pode ser de alguns dias. No segundo caso, a mesma sequência é associada a cada símbolo.

3) Explique, usando conhecimentos de análise de sinal já aprendidos em outras Unidades, de que forma a sequência pseudo aleatória  $p_n$  consegue espalhar espectralmente o sinal da mensagem.

4) Explique, com mais detalhes, o trecho:

“A sequência pseudo aleatória  $p_n$  pode ser longa, quando sua duração (período) é muito maior que a duração de um símbolo, ou curta, quando sua duração for equivalente à duração de um símbolo. No primeiro caso, uma sequência diferente é associada a cada símbolo, em um período de repetição que pode ser de alguns dias. No segundo caso, a mesma sequência é associada a cada símbolo.”

5) Explique o trecho

“A amplitude e consequentemente a potência do sinal SS tx é a mesma que a do sinal original de informação  $d$ .”

6) Calcule o fator de expansão de um sinal SS onde a taxa de chips é de 1 Mchip/s e a largura de banda do sinal de mensagem é 10 kHz.

7) Complete as lacunas

a) No \_\_\_\_\_ a detecção do sinal desejado é atingida

\_\_\_\_\_ o sinal recebido com uma sequência local de referência  $pn_r$ .  
 b) Se  $pn_r = pn_t$ , e a sequência do receptor estiver \_\_\_\_\_ à sequência do transmissor, então a sequência binária original é reconstituída no receptor.

c) O efeito de \_\_\_\_\_ no receptor o sinal spread-spectrum rx com \_\_\_\_\_ é \_\_\_\_\_ o espectro recebido, retornando à uma largura de banda  $R_s$ .

8) Explique porque se  $pn_r = pn_t$ , o sinal original pode ser recuperado no receptor.

9) O que acontece se  $pn_r \neq pn_t$ ? E se  $pn_r = pn_t$ ?

10) Que requisitos os códigos  $pn$  devem satisfazer para uma comunicação segura em um ambiente multiusuário?

11) O que acontece com o sinal SS na presença de interferências?

12) O que acontece com o ruído?

Solução:

13) Quais são as características básicas do DS-CDMA?

14) Qual a principal vantagem de um sistema CDMA?

15) De um exemplo de controle de potência em sistemas celulares.

## EXERCÍCIOS - SOLUÇÃO

### 1) Complete as lacunas

- a) O espalhamento espectral por sequência direta DSSS utiliza uma portadora modulada por uma combinação da mensagem com uma sinal de espalhamento (faixa larga) de alta velocidade.
- b) O sinal de espalhamento é um sinal pseudo aleatório que constitui a sequência do código, gerada univocamente para cada usuário.
- c) Assim, se o código no receptor é exatamente igual ao código do transmissor, a saída do correlador no receptor é exatamente o sinal original desespalhado.
- d) A taxa de transmissão da sequência de código  $p_n$  é muito maior que a taxa de transmissão da mensagem, de modo que a cada bit da mensagem correspondem vários bits da sequência.
- e) Para distinguir os bits da mensagem dos bits da sequência de código, os bits da sequência recebem a denominação especial de “chips”.

### 2) Identifique a afirmação correta

A Figura 13 apresenta, de forma concisa, um diagrama em blocos de um modulador M-PSK utilizando espalhamento espectral por sequência direta.

- a) Uma sequência pseudo aleatória  $p_n$ , gerada no modulador, é utilizada em conjunção com um modulador QPSK para deslocar aleatoriamente a fase do sinal PSK, a uma taxa  $R_c$  (taxa da sequência pseudo aleatória) também chamada taxa de “chip” ( $R_c=1/T_c$ ), uma taxa que é um múltiplo inteiro da taxa de símbolos  $R_s = 1/T_s$ .**
- b) A largura de faixa do sinal transmitido é determinada pela taxa de chip e pela filtragem de RF**
- c) A sequência pseudo aleatória  $p_n$  pode ser longa, quando sua duração (período) é

comparável à duração de um símbolo, ou curta, quando sua duração for menor que a duração de um símbolo.

**d) No primeiro caso, uma sequência diferente é associada a cada símbolo, em um período de repetição que pode ser de alguns dias. No segundo caso, a mesma sequência é associada a cada símbolo.**

3) Explique, usando conhecimentos de análise de sinal já aprendidos em outras Unidades, de que forma a sequência pseudo aleatória  $pn$  consegue espalhar espectralmente o sinal da mensagem.

Solução:

O resultado da multiplicação da sequência pseudo aleatória  $pn$  pela sequência digital da mensagem é uma outra sequência pseudo aleatória que mantém a taxa de chips da sequência  $pn$  original. Desta forma, uma vez que a sequência de chips é muito mais rápida que a sequência de bits,  $T_c \ll T_s$ . Como o primeiro nulo do espectro ocorrerá para  $1/T_c$ , o espectro resultante ocupa uma largura de banda bem maior que o espectro original da mensagem. Portanto, diz-se que o espectro foi “espalhado” pela sequência  $pn$ .

4) Explique, com mais detalhes, o trecho:

“A sequência pseudo aleatória  $pn$  pode ser longa, quando sua duração (período) é muito maior que a duração de um símbolo, ou curta, quando sua duração for equivalente à duração de um símbolo. No primeiro caso, uma sequência diferente é associada a cada símbolo, em um período de repetição que pode ser de alguns dias. No segundo caso, a mesma sequência é associada a cada símbolo.”

Solução:

Uma sequência pseudo-aleatória é, na verdade, uma sequência periódica, com um determinado período de repetição. Após decorrido o intervalo de um período, toda a sequência se repete. Por isso ela é chamada “pseudo-aleatória.” Uma sequência que fosse verdadeiramente aleatória jamais se repetiria.. Durante a duração de um período da sequência pseudo-aleatória, ela tenta imitar uma sequência aleatória. Esta é uma maneira de gerar sequências que imitem a realidade, através de circuitos

determinísticos que podem ser facilmente construídos. Dependendo da forma como são geradas, as sequência pseudo-aleatórias podem ter períodos de repetição muito longos ou muito curtos. Quando o período de repetição é muito longo, bem maior que o tempo de duração de uma mensagem, cada mensagem ocupará um “pedaço” da sequência  $pn$ , e assim uma sequência diferente é associada a cada símbolo. Quando a duração, ou período da sequência  $pn$  for comparável, no tempo, à duração de um símbolo, então a cada símbolo temos associada praticamente a mesma sequência pseudo-aleatória. De qualquer modo, findo o período da sequência  $pn$ , toda ela se repete novamente.

#### 5) Explique o trecho

“A amplitude e consequentemente a potência do sinal SS tx é a mesma que a do sinal original de informação  $d$ .”

Solução:

Para um sinal bipolar de amplitude 1, a potência média é dada por  $2^2=4$ , qualquer que seja o tempo de bit. Portanto, a potência média do sinal espalhado é a mesma do sinal original.

- 6) Calcule o fator de expansão de um sinal SS onde a taxa de chips é de 1 Mchip/s e a largura de banda do sinal de mensagem é 10 kHz.

Solução:

O fator de expansão é dado por:

$$SF = G_p = \frac{BW_{ss}}{BW} = \frac{R_c}{R_s} = \frac{T_b}{T_c} = N_c$$

onde

SF = Fator de expansão da largura de faixa

$G_p$  = Ganho de processamento

$BW_{ss}$  = Largura de banda do sinal spread spectrum

BW = Largura de banda do sinal antes de ser espalhado

$R_c$  = Taxa de chip

$R_s$  = Taxa de bits do sinal

$T_b$  = Tempo de bit

$T_c$  = Tempo de chip

$N_c$  = Número inteiro

No caso,  $R_c = 1\text{MHz}$ , e  $R_s = 10\text{ KHz}$ . Logo,  $SF=100$ .

#### 7) Complete as lacunas

a) No receptor, a detecção do sinal desejado é atingida correlacionando-se o sinal recebido com uma sequência local de referência  $pn_r$ .

b) Se  $pn_r=pn_t$ , e a sequência do receptor estiver sincronizada à sequência do transmissor, então a sequência binária original é reconstituída no receptor.

c) O efeito de multiplicar no receptor o sinal spread-spectrum rx com a mesma sequência pn usada no transmissor é desespalhar o espectro recebido, retornando à uma largura de banda  $R_s$ .

8) Explique porque se  $pn_r=pn_t$ , o sinal original pode ser recuperado no receptor.

Solução:

O efeito de multiplicar no receptor o sinal spread-spectrum rx com a mesma sequência pn usada no transmissor é desespalhar o espectro recebido, retornando à uma largura de banda  $R_s$ ,

A sequência de saída no receptor é então (desde que  $pn_r$  esteja sincronizado com  $pn_t$ ):

$$d_r = rx \cdot pn_r = (d \cdot pn_t) \cdot pn_t$$

A sequência  $pn_t$  alterna entre os níveis -1 e +1, por exemplo:

$$pn_t = +1 -1 +1 +1 -1 +1$$

A alternância é destruída quando a sequência pn é multiplicada por ela mesma (sincronismo perfeito), porque:

$p_n \cdot p_n = +1$  para todo tempo  $t$ . Isto equivale a dizer que a autocorrelação  $R_{p_n}(0) = +1$ .

Assim, tem-se  $d_r = d$ .

9) O que acontece se  $p_{n_r} \cong p_{n_t}$ ? E se  $p_{n_r} \neq p_{n_t}$ ?

Solução:  $p_{n_r}$  só pode ser aproximadamente igual a  $p_{n_t}$  quando a taxa de erro no canal induz a modificações relevantes no código transmitido. Nesse caso, muito provavelmente a taxa de erro na informação recuperada será também elevada, atrapalhando ou mesmo impedindo a comunicação.

Se  $p_{n_r} \neq p_{n_t}$ , não há ação de desespalhamento. O sinal demodulado de saída  $d_r$  continua com o espectro espalhado. Um receptor que não conheça o código  $p_n$  do transmissor não pode reproduzir a sequência de dados enviada.

10) Que requisitos os códigos  $p_n$  devem satisfazer para uma comunicação segura em um ambiente multiusuário?

Solução:

Para uma comunicação segura em um ambiente multiusuário, os dados transmitidos não podem ser recuperados por um usuário que não conhece a sequência  $p_n$  usada no transmissor. Assim, um requisito dessas sequências é que a correlação cruzada entre duas sequências diferentes seja sempre muito baixa, em qualquer instante de tempo, isto é:

correlação cruzada  $R_c(\tau) = \text{valor médio } (p_{n_t} \cdot p_{n_r}) \ll 1$  para todo  $\tau$ .

Isto equivale a dizer que os códigos empregados devem ser ortogonais (p. ex., Hadamard-Walsh). Esta propriedade de ortogonalidade dos códigos de espalhamento significa que a saída do correlador usado no receptor é aproximadamente zero para todas as transmissões, exceto a desejada.

11) O que acontece com o sinal SS na presença de interferências?

Solução:

O sinal recebido  $rx$  consiste do sinal transmitido  $tx$  mais interferência aditiva  $i$  (ruído, outros usuários, etc.):

$$rx = tx + i = d \times pn_t + i$$

Para recuperar o sinal de dados original  $d$  o sinal recebido  $rx$  é multiplicado por uma sequência  $pn$  gerada localmente, a qual é uma réplica exata da utilizada no transmissor:

$$pn_r = pn_t$$

A saída do multiplicador é portanto:

$$d_r = rx \times pn_t = d \times pn_t \times pn_t + i \times pn_t$$

O sinal de dados  $d$  é portanto multiplicado *duas vezes* pela sequência  $pn_t$  enquanto a interferência indesejada  $i$  é multiplicada apenas uma vez. Devido a propriedade das sequências  $pn$ :

$$pn_t \times pn_t = +1, \text{ para todo } t, \text{ temos então:}$$

A sequência de dados é reproduzida na saída do multiplicador no receptor, exceto a interferência representada pelo termo aditivo:

$$i \times pn_t$$

A multiplicação da interferência  $i$  pela sequência  $pn$  gerada localmente tem o mesmo efeito de espalhamento ocorrido com os dados no transmissor. Assim, a interferência é espalhada no espectro, enquanto o sinal desejado se concentra novamente.

12) O que acontece com o ruído?

Solução:

A maior largura do canal ( $R_c$  ao invés de  $R_s$ ) aumenta a potência de ruído recebida:

$$N_{\text{info}} = N_0 \times BW_{\text{info}} \rightarrow N_{\text{ss}} = N_0 \times BW_{\text{ss}} = N_{\text{info}} \times G_p$$

onde

$N_{\text{info}}$ : Ruído na faixa de informação.

$N_0$ : Densidade espectral do ruído.

$BW_{\text{info}}$ : Largura de faixa de informação.

$N_{\text{ss}}$ : Potência de ruído espalhada.

$BW_{\text{ss}}$ : Largura de faixa espalhada.

$G_p$ : Ganho de processamento.

O efeito é como se não houvesse modulação, mas a transmissão direta com uma largura de banda  $R_c$ .

13) Quais são as características básicas do DS-CDMA?

Solução:

Em esquemas de múltiplo acesso por divisão de códigos utilizando espalhamento espectral por sequência direta DS-CDMA cada usuário:

- a) tem seu próprio código pn
- b) usa a mesma faixa de RF
- c) transmite simultaneamente

14) Qual a principal vantagem de um sistema CDMA?

Solução:

A principal vantagem de um sistema CDMA é que todos os participantes podem partilhar o mesmo RC (Recurso de Comunicação) de forma assíncrona; isto é, o

instante de transição de símbolos de diferentes usuários não precisa coincidir.

15) De um exemplo de controle de potência em sistemas celulares.

Solução:

Os sistemas celulares baseados em CDMA possuem um sistema de controle de potência bastante elaborado, que consegue controlar dinamicamente a potência transmitida em uma estação móvel (usuário móvel) a partir da estação rádio base em uma célula, de modo que se a quantidade de usuários que acessam simultaneamente uma determinada estação rádio base aumenta, a potência emitida em cada usuário diminui, mantendo a relação sinal/ruído dentro dos níveis adequados. Além disso, estando um usuário em silêncio, os modernos vocoders<sup>3</sup> conseguem reduzir a potência transmitida durante períodos de silêncio ou pausas na voz, conseguindo um aumento médio na capacidade do sistema de aproximadamente 35%.

---

3 Codificador de voz

## ESPALHAMENTO ESPECTRAL POR SALTO EM FREQUÊNCIA (FHSS)

O Espalhamento Espectral por Salto em Frequência pode ser visualizado considerando-se o modelo de canalização apresentado na Figura 5.

Nessa figura, tem-se a idéia de que cada usuário ocupa um Intervalo de Tempo e envia a informação em uma faixa de frequências  $j$  (Banda  $j$ ).

Na técnica do Salto em Frequência, a mesma idéia é realizada, porém a instantes pré-determinados cada usuário utiliza uma Banda diferente. Daí a denominação “Salto”, pois o transmissor associado a um usuário fica “saltando” de frequência em frequência, trocando a frequência da portadora dinamicamente a cada instante a ele reservado para transmissão.

Os RC podem ser inteiramente utilizados, mas os participantes, tendo suas faixas de frequência redesignadas a cada instante, parecem estar tocando “acordes musicais”.

A Figura 23 ilustra o diagrama em blocos de um processo de modulação utilizando Salto em Frequência. A cada instante de Salto, um gerador PN (Pseudo Noise – pseudo ruído) envia uma sequência de código a um dispositivo chamado “deslocador de frequência” – em inglês “*frequency hopper*.” O deslocador de frequência sintetiza uma das possíveis frequências deslocadas. Suponha que a modulação tenha um formato MFSK.

A diferença essencial entre um sistema convencional MFSK e um sistema FH-MFSK é que no sistema convencional, um símbolo de dados modula uma portadora que é *fixa* em frequência, mas no sistema de Salto em Frequência, o símbolo de dados modula uma portadora que se desloca através da banda total do RC.

No sistema MFSK convencional, o símbolo de dados modula uma portadora de frequência fixa; no sistema FH-MFSK, o símbolo de dados modula uma portadora cuja frequência é determinada de modo pseudo-aleatório.

Em cada instante de salto um único tom é transmitido.

A cada instante de salto, um gerador PN alimenta o sintetizador de frequências com uma palavra (que é composta por  $\gamma$  “chips<sup>4</sup>”) que determina uma das  $2^\gamma$  posições de conjunto de símbolos.

A largura de banda  $W_{ss}$  do sistema FH, e o espaçamento mínimo de frequência  $\Delta f$  entre duas

---

4 O termo “chip” significa um bit de código da sequência PN, genericamente o símbolo de duração mais curta (no tempo). Normalmente, corresponde a um estado lógico binário. A taxa de chips indica a velocidade com que a sequência PN é alterada. Como a cada sequência PN corresponde uma frequência sintetizada do salto, cada frequência tem a duração de uma sequência de  $\gamma$  chips e assim podemos dizer que um chip caracteriza a menor (de duração menor) forma de onda contínua do sistema.

posições consecutivas de salto, estabelecem o número mínimo de chips necessários na palavra de código.

Por exemplo, considerando uma largura de banda de espalhamento  $W_{ss}$  de 400 MHz e um passo de frequência de 100Hz, qual o número mínimo de chips PN necessários para cada palavra de frequência?

$$\text{Número de tons contidos em } W_{ss} = W_{ss}/\Delta f = 400 \text{ MHz}/100 \text{ Hz} = 4 \times 10^6$$

Portanto, o número mínimo de chips, nesse caso, é  $\log_2(4 \times 10^6) = 22$

Para um dado salto, a largura de banda de transmissão ocupada é idêntica a largura de banda de um sistema convencional MFSK, a qual é tipicamente bem menor do que  $W_{ss}$ .

Entretanto, realizando-se a média ao longo de vários saltos, o sistema FH-MFSK ocupa a largura total do espectro espalhado.

A tecnologia atual permite larguras de banda da ordem de centenas de gigahertz, que é uma ordem de grandeza maior do que larguras de banda realizáveis em sistemas DS, permitindo assim que sistemas FH tenham ganhos de processamento bem maiores do que sistemas DS. Uma vez que técnicas de salto em frequência utilizam larguras de banda tão largas, é difícil manter a coerência de fase de salto para salto. Em consequência, tais esquemas são usualmente configurados utilizando-se demodulação não coerente.

A Figura 24 apresenta o receptor que seria usado para recuperar o fluxo de dados enviado pelo transmissor da Figura 23. Conforme se observa, o receptor reverte os passos de processamento utilizados no transmissor.

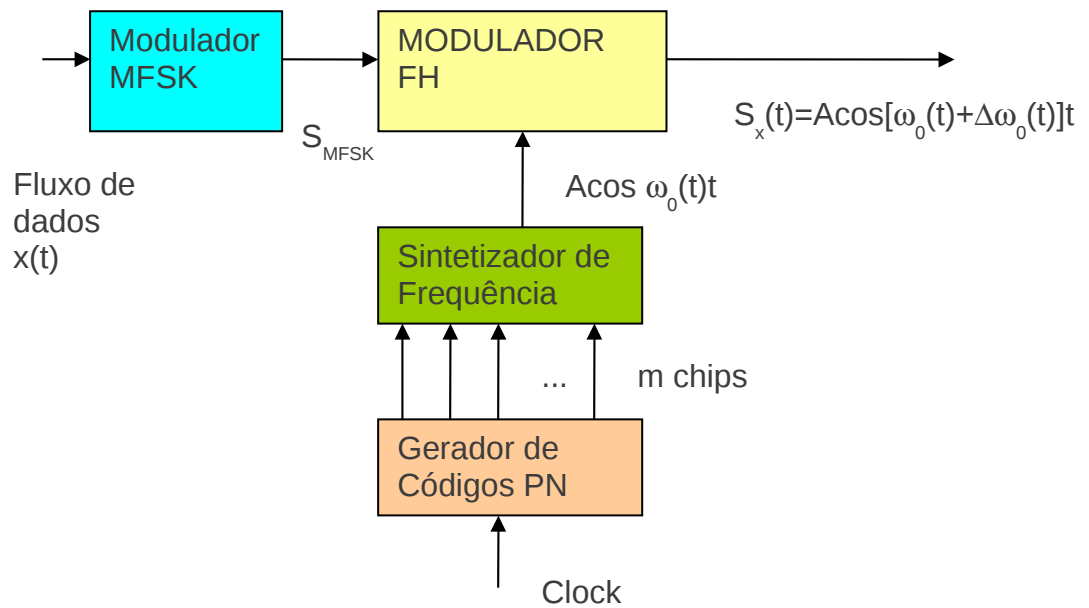


Figura 23

Processo de Espalhamento Espectral  
por Salto em Frequência

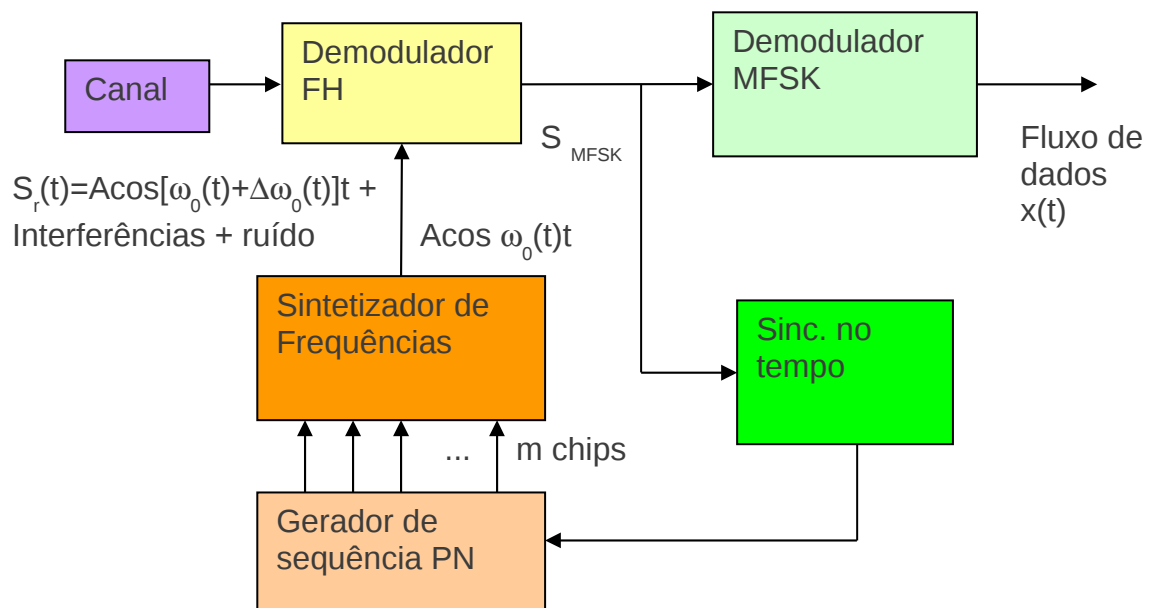


Figura 24

Parte de recepção de um sistema FH-MFSK

O sinal recebido é primeiramente desespalhado fazendo o batimento (conversão) com a mesma sequência pseudo aleatória de tons de frequência que foi utilizada no transmissor para realizar o espalhamento espectral, recuperando assim o sinal MFSK original. A seguir o sinal é aplicado a um banco de receptores não coerentes de energia para seleção do símbolo mais provável. Note que há necessidade, no receptor, de sincronismo com a sequência gerada no transmissor.

A sequência PN gerada no receptor deve se exatamente igual a sequência PN utilizada no transmissor, e deve estar em fase com esta. Este sincronismo é garantido através de processos de busca e apreensão de sinais, baseados em técnicas de correlação.

A igualdade das sequências será garantida desde que o código usado como base para geração das sequência PN seja o mesmo no transmissor e receptor.

A técnica de Espalhamento Espectral baseada em Salto em Frequência presta-se muito bem para a realização de sistemas CDMA.

Cada par de transmissor / receptor tem designado o seu próprio padrão pseudo-aleatório de saltos na frequência.

Ainda assim, apesar de terem esta característica que os distingue, os transmissores e receptores de todos os usuários podem ser idênticos, no sentido de que possuem codificadores, decodificadores, moduladores e demoduladores idênticos.

Sistemas CDMA baseados em FHSS são atraentes particularmente para usuários móveis (terrestres, aéreos, marítimos) porque os requisitos de temporização não são tão rigorosos quanto para sistemas baseados em DSSS.

Adicionalmente, técnicas de síntese de frequências e o hardware associado foram desenvolvidos de modo que é possível o salto de frequência sobre larguras de banda que são significativamente maiores do que aquelas atualmente possíveis com sistemas DSSS.

Conseqüentemente, os sistemas FHSS permitem a obtenção de maiores ganhos de processamento.

Um dos primeiros sistemas CDMA baseados em FHSS foi construído para prover múltiplo acesso em comunicações táticas via satélite para pequenos terminais móveis de usuários (ar, terra, água), cada um dos quais transmite mensagens relativamente curtas sobre o canal de modo intermitente. O sistema foi denominado TATS (Tactical Transmission System).

TATS foi projetado para transmitir informação a taxas de 75 e 2400 bit/s.

## **RESUMO**

Nesta parte, foram vistos conceitos básicos relacionados com a técnica de múltiplo acesso CDMA por salto em frequência, FH CDMA, comparando-s em alguns aspectos com a técnica utilizado DS (Sequência Direta), vista na parte V.3 desta Unidade, também chamada DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum).

## EXERCÍCIOS

Preencha as lacunas

- 1) Na técnica do Salto em Frequência o \_\_\_\_\_ associado a um usuário fica \_\_\_\_\_ de frequência em frequência, trocando a frequência da portadora dinamicamente a cada Intervalo de tempo a ele reservado para transmissão.
- 2) A cada instante de Salto, um gerador \_\_\_\_\_ envia uma sequência de código a um dispositivo chamado \_\_\_\_\_. O deslocador de frequência sintetiza uma das possíveis frequências deslocadas
- 3) A diferença essencial entre um sistema convencional MFSK e um sistema FH-MFSK é que no sistema convencional, um símbolo de dados modula uma portadora que é \_\_\_\_\_, mas no sistema de Salto em Frequência, o símbolo de dados modula uma portadora que \_\_\_\_\_.
- 4) A cada instante de salto, um gerador PN alimenta o sintetizador de frequências com \_\_\_\_\_ que determina uma das  $2^m$  posições de conjunto de símbolos.
- 5) A largura de banda  $W_{ss}$  do sistema FH, e \_\_\_\_\_ entre duas posições consecutivas de salto, estabelecem o número mínimo de chips necessários na palavra de código.
- 6) Para um dado salto, a largura de banda de transmissão ocupada é \_\_\_\_\_ a largura de banda \_\_\_\_\_, a qual é tipicamente bem menor do que  $W_{ss}$ . Entretanto, realizando-se a média ao longo de vários saltos, o sistema FH-MFSK ocupa a largura total do espectro espalhado.
- 7) A tecnologia atual permite larguras de banda da ordem de \_\_\_\_\_, que é uma ordem de grandeza maior do que larguras de banda realizáveis em sistemas DS, permitindo assim que sistemas \_\_\_\_\_ tenham ganhos de processamento bem maiores do que sistemas DS.
- 8) Uma vez que técnicas de salto em frequência utilizam larguras de banda tão largas, é difícil

manter a coerência de fase de salto para salto. Em consequência, tais esquemas são usualmente configurados utilizando-se \_\_\_\_\_

9) O sinal recebido é primeiramente \_\_\_\_\_ fazendo o \_\_\_\_\_ com a mesma sequência pseudo aleatória de tons de frequência que foi utilizada no transmissor para realizar o espalhamento espectral , recuperando assim o sinal MFSK original.

10) A seguir o sinal é aplicado a um banco de receptores não coerentes de \_\_\_\_\_ para seleção do símbolo mais provável. Note que há necessidade, no receptor, de \_\_\_\_\_ com a sequência gerada no transmissor.

11) A sequência PN gerada no receptor deve se exatamente igual a \_\_\_\_\_ utilizada no \_\_\_\_\_, e deve estar em fase com esta. Este sincronismo é garantido através de processos de \_\_\_\_\_ baseados em técnicas de \_\_\_\_\_.

12) A técnica de Espalhamento Espectral baseada em \_\_\_\_\_ presta-se muito bem para a realização de sistemas CDMA.

13) Cada par de transmissor / receptor tem designado o seu próprio padrão pseudo-aleatório de saltos na frequência.

Ainda assim, apesar de terem esta característica que os distingue, os \_\_\_\_\_ de todos os usuários podem ser idênticos, no sentido de que possuem codificadores, decodificadores, moduladores e demoduladores \_\_\_\_\_.

14) Sistemas CDMA baseados em \_\_\_\_\_ são atraentes particularmente para usuários móveis (terrestres, aéreos, marítimos) porque os requisitos de \_\_\_\_\_ não são tão rigorosos quanto para sistemas baseados em \_\_\_\_\_.

15) A capacidade de um sistema CDMA com FH também é relativamente grande. Viterbi (1978) mostrou que com o uso de códigos duais de comprimento  $k$  e modulação MFSK, é possível acomodar-se até \_\_\_\_\_, que transmitem a uma taxa de  $R$  bit/s sobre um canal com largura de banda  $W$

## EXERCÍCIOS – SOLUÇÃO

Preencha as lacunas

1) Na técnica do Salto em Frequência o transmissor associado a um usuário fica “saltando” de frequência em frequência, trocando a frequência da portadora dinamicamente a cada Intervalo de tempo a ele reservado para transmissão.

2) A cada instante de Salto, um gerador PN (Pseudo Noise – pseudo ruído) envia uma sequência de código a um dispositivo chamado “deslocador de frequência” – em inglês

“frequency hopper.”. O deslocador de frequência sintetiza uma das possíveis frequências deslocadas

3) A diferença essencial entre um sistema convencional MFSK e um sistema FH-MFSK é que no sistema convencional, um símbolo de dados modula uma portadora que é fixa em frequência, mas no sistema de Salto em Frequência, o símbolo de dados modula uma portadora que se desloca através da banda total do RC.

4) A cada instante de salto, um gerador PN alimenta o sintetizador de frequências com uma palavra (que é composta por m “chips”) que determina uma das  $2^m$  posições de conjunto de símbolos.

5) A largura de banda  $W_{ss}$  do sistema FH, e o espaçamento mínimo de frequência  $\Delta f$  entre duas posições consecutivas de salto, estabelecem o número mínimo de chips necessários na palavra de código.

6) Para um dado salto, a largura de banda de transmissão ocupada é idêntica a largura de banda de um sistema convencional MFSK, a qual é tipicamente bem menor do que  $W_{ss}$ .

Entretanto, realizando-se a média ao longo de vários saltos, o sistema FH-MFSK ocupa a largura total do espectro espalhado.

7) A tecnologia atual permite larguras de banda da ordem de centenas de gigahertz, que é uma ordem de grandeza maior do que larguras de banda realizáveis em sistemas DS, permitindo assim que sistemas FH tenham ganhos de processamento bem maiores do

que sistemas DS.

- 8) Uma vez que técnicas de salto em frequência utilizam larguras de banda tão largas, é difícil manter a coerência de fase de salto para salto. Em consequência, tais esquemas são usualmente configurados utilizando-se demodulação não coerente.
- 9) O sinal recebido é primeiramente desespalhado fazendo o batimento (conversão) com a mesma sequência pseudo aleatória de tons de frequência que foi utilizada no transmissor para realizar o espalhamento espectral, recuperando assim o sinal MFSK original.
- 10) A seguir o sinal é aplicado a um banco de receptores não coerentes de energia para seleção do símbolo mais provável. Note que há necessidade, no receptor, de sincronismo com a sequência gerada no transmissor.
- 11) A sequência PN gerada no receptor deve ser exatamente igual a sequência PN utilizada no transmissor, e deve estar em fase com esta. Este sincronismo é garantido através de processos de busca e apreensão de sinais, baseados em técnicas de correlação.
- 12) A técnica de Espalhamento Espectral baseada em Salto em Frequência presta-se muito bem para a realização de sistemas CDMA.
- 13) Cada par de transmissor / receptor tem designado o seu próprio padrão pseudo-aleatório de saltos na frequência.  
Ainda assim, apesar de terem esta característica que os distingue, os transmissores e receptores de todos os usuários podem ser idênticos, no sentido de que possuem codificadores, decodificadores, moduladores e demoduladores idênticos.
- 14) Sistemas CDMA baseados em FHSS são atraentes particularmente para usuários móveis (terrestres, aéreos, marítimos) porque os requisitos de temporização não são tão rigorosos quanto para sistemas baseados em DSSS.
- 15) A capacidade de um sistema CDMA com FH também é relativamente grande. Viterbi (1978) mostrou que com o uso de códigos duais de comprimento  $k$  e modulação MFSK, é possível acomodar-se até  $\frac{3}{8}W/R$  usuários simultâneos, que transmitem a uma taxa de  $R$  bit/s sobre um canal com largura de banda  $W$ .