

Compartilhamento de Canais

- O compartilhamento de canais ocorre quando um canal de transmissão é utilizado por mais do que um usuário, ao mesmo tempo.
- Historicamente, o compartilhamento de linhas iniciou a partir do interesse das companhias telefônicas em prover serviço em regiões rurais, devido ao elevado custo das longas rotas envolvidas e ao pequeno número de assinantes para suportar o custo da instalação e da manutenção da infra-estrutura necessária.
- No passado, uma forma comum de reduzir este custo era utilizar linhas compartilhadas, o que envolvia o compartilhamento do par telefônico entre múltiplos assinantes. Uma linha compartilhada é uma solução útil para prover serviço em rotas em que não há pares de reserva, no entanto é uma solução obviamente indesejável, devido à falta de privacidade e à falta de disponibilidade do serviço a qualquer tempo.
- **A solução para este problema surgiu por meio de sistemas concentradores e sistemas multiplexadores.**

Sistemas Concentradores

- Um sistema concentrador é mostrado na Fig. 5.1 (a).
- Este tipo de sistema provê concentração através do chaveamento de um nº (N) de pontos ativos (no contexto de sistemas telefônicos: linhas telefônicas de usuários ou fontes) em um nº menor de linhas de saída compartilhadas (canais).

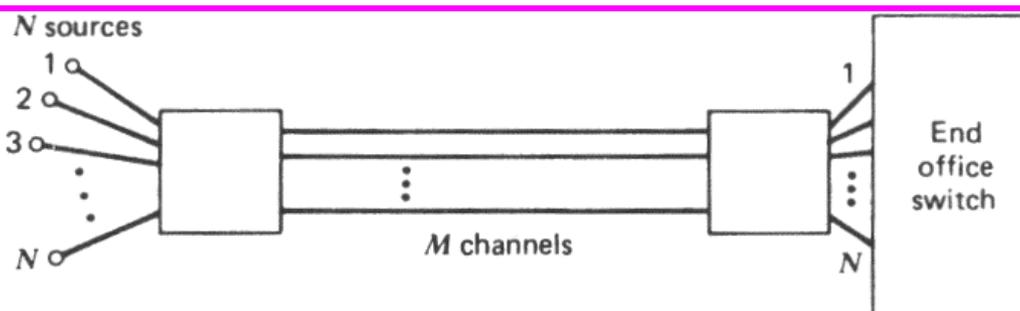


Figura 5.1 (a): Sistema concentrador ($N > M$).

- No outro lado do sistema concentrador ocorre a expansão, através do chaveamento das linhas compartilhadas em entradas individuais da central de comutação local, correspondentes aos N usuários ativos.
- Este modelo permite que o sistema seja operacionalmente transparente para o usuário.
- No entanto, como um sistema concentrador é incapaz de prover conexão para todas as linhas de usuários (ou fontes) ao mesmo tempo, um determinado grau de bloqueio é necessariamente introduzido pelo sistema.
- Quando a atividade das fontes é suficientemente baixa, uma razão de concentração significativa pode ser obtida, a aceitáveis probabilidades de bloqueio.
- Por exemplo, 40 fontes que são ativas apenas 7.5% do tempo (cada uma delas) podem ser concentradas em 10 linhas, com uma probabilidade de bloqueio de 0.001, que é considerada uma degradação aceitável, quando imposta ao serviço.

Sistemas Multiplexadores

- Em um sistema telefônico convencional, a largura de banda inerente a um típico par telefônico é consideravelmente maior do que a largura de banda necessária para o transporte de um único sinal de voz. Em situações como esta pode-se empregar a técnica de multiplexação FDM para transportar múltiplos usuários (canais de voz) sobre um único canal de transmissão (par de fios).
- A Figura 5.1 (b) exemplifica a técnica de multiplexação por divisão em frequência (FDM - *Frequency Division Multiplexing*).

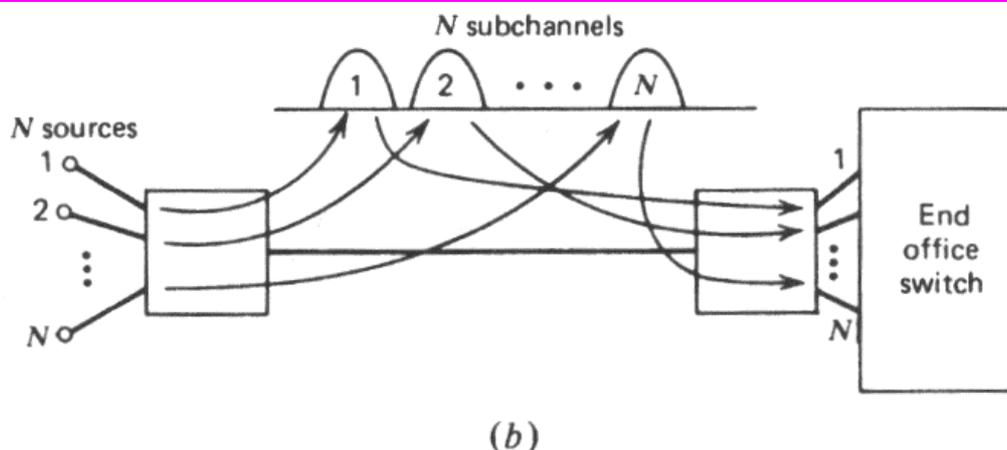


Figura 5.1 (b): Sistema multiplexador.

- Conforme mostra a Figura 5.1 (b), diferentemente do que ocorre em sistemas concentradores, há uma relação de um para um entre a linha do usuário e os sub-canais do multiplexador.
- Em um sistema multiplexador não há possibilidade de bloqueio, nem a necessidade de transferência de informação de chaveamento entre os dois lados do sistema.
- No entanto, um problema inerente ao sistema FDM ilustrado na Figura 5.1 (b) é a possibilidade de sub-canais serem altamente inutilizados se as fontes forem relativamente inativas. Nesta situação, que também ocorre em outras formas de multiplexação, uma combinação de concentração e multiplexação é aconselhável.

Sistemas Baseados em Detecção de Atividade de Voz

- Sistemas baseados em detecção de atividade de voz objetivam minorar a má utilização de sub-canais em sistemas multiplexadores (FDM e TDM, por exemplo).
 - Em sistemas baseados em detecção de atividade de voz (denominados *Time Assignment Speech Interpolation - TASI*), os canais são atribuídos dinamicamente a um circuito, somente quando existe atividade de voz.
 - Tais sistemas sentem a atividade de voz de um determinado número de fontes (N), atribuem as fontes ativas aos M canais disponíveis (M é tipicamente a metade de N) e sinalizam os dois lados do sistema sobre as conexões.
 - Normalmente, cada participante de uma conversação está ativo por apenas 40% do tempo, o que indica que, se $M = N/2$, haverá uma determinada capacidade de reserva para acomodar atividade em excesso em uma direção.
 - Se uma fonte começa a falar quando todos os canais estão utilizados, o começo daquele segmento de fala fica cortado até que um canal se torne disponível.
-
- As aplicações iniciais de sistemas TASI foram destinadas à melhora da utilização de cabos sub-aquáticos (o custo elevado dos sistemas sub-aquáticos justificou a introdução de técnicas de multiplexação mais elaboradas).
 - A mesma técnica básica tem sido utilizada em numerosas aplicações de voz digitalizada, tanto para comunicações por satélite quanto para comunicações terrestres. Estes sistemas geralmente são chamados DSI (*Digital Speech Interpolation*).

Trunking e Grau de Serviço

Os sistemas de comunicações são baseados no conceito de *trunking* (ou troncalização), o qual permite o acesso compartilhado e sob demanda a um grande número de usuários, dos canais disponíveis ao sistema.

Em um sistema de rádio baseado no conceito de *trunking*, por exemplo, cada usuário recebe um canal a cada chamada e, após a finalização da chamada, o canal previamente ocupado é imediatamente devolvido ao conjunto de canais disponíveis.

O sistema de *trunking* explora o comportamento estatístico dos usuários, de tal forma que um número fixo de canais podem acomodar um número grande e aleatório de usuários.

As companhias telefônicas utilizam a teoria de *trunking* para determinar o número de circuitos telefônicos que necessitam ser alocados para prédios de escritórios com centenas de telefones. Este mesmo princípio é utilizado no projeto de sistemas rádio celulares.

Em sistemas baseados no princípio da troncalização, há um compromisso entre o número de circuitos de telefones disponíveis e a probabilidade de um particular usuário não encontrar circuitos disponíveis durante o período de pico de ocorrência de chamadas.

À medida que o número de linhas telefônicas diminui, se torna mais provável que todos os circuitos estejam ocupados para um particular usuário que tente acessar o serviço.

Em um sistema de comunicações baseados no conceito de *trunking*, quando um particular usuário solicita o serviço e todos os canais já estão em uso, o usuário é bloqueado, ou o acesso ao sistema é negado.

Em alguns sistemas é utilizada uma fila para reter os usuários solicitantes, até que um canal se torne disponível.

Para projetar sistemas de comunicações baseados no conceito de *trunking*, capazes de lidar com uma capacidade específica, a um determinado grau de serviço, é essencial compreender a teoria de *trunking* e a teoria de filas.

Os fundamentos da teoria de *trunking* foram desenvolvidos por Erlang, um matemático dinamarquês que, no final do século XIX, estudou como um grande número de fontes de informação poderia transmitir através de um número limitado de canais de transmissão.

A medida de intensidade de tráfego, leva o nome de Erlang.

Um Erlang representa a quantidade da intensidade de tráfego transportada por um canal que está completamente ocupado.

Por exemplo, um canal de rádio que está ocupado por trinta minutos durante uma hora transporta um tráfego de 0.5 Erlangs.

Grau de Serviço

O Grau de Serviço (GOS) é uma medida da habilidade de um usuário em acessar um sistema baseado em *trunking* durante a hora mais ocupada.

A hora ocupada é definida como aquela mais ocupada durante a semana, mês ou ano.

O grau de serviço é uma referência utilizada para definir o desempenho desejado de um particular sistema baseado no conceito de *trunking*, através da especificação da probabilidade de um usuário obter acesso a um canal, dentre um específico número de canais disponíveis no sistema.

É uma tarefa do projetista de sistemas de comunicações estimar a capacidade máxima requerida e alocar um n° apropriado de canais para atingir o GOS.

O GOS é tipicamente dado como:

- a probabilidade de uma chamada ser bloqueada, ou
- a probabilidade de uma chamada ser submetida a um atraso maior do que um determinado tempo de espera em uma fila.

A Tabela abaixo apresenta um conjunto de definições que são utilizadas no universo da teoria de *trunking*, para fazer estimativas a respeito da capacidade de sistemas baseados no conceito de *trunking*.

<i>Set-up Time</i>	O tempo requerido para alocar um canal para um usuário solicitante em um sistema baseado na teoria de <i>trunking</i> .
<i>Blocked Call</i>	A chamada que não pode ser completada no momento da solicitação, devido a congestionamento. Esta chamada é também referida como "chamada perdida".
<i> Holding Time</i>	Duração média de uma chamada típica. Denotada por H (em segundos).
<i>Traffic Intensity</i>	Medida do tempo de utilização do canal, a qual representa a ocupação média do canal, medida em Erlangs. Esta quantidade é adimensional e pode ser utilizada para medir o tempo de utilização de canais simples ou múltiplos. Denotada por A .
<i>Load</i>	Intensidade do tráfego em um sistema de comunicações baseado no conceito de <i>trunking</i> , medida em Erlangs.
<i>Grade of Service (GOS)</i>	Uma medida de congestionamento, a qual é especificada como a probabilidade de uma chamada ser bloqueada (para o modelo Erlang B), ou a probabilidade de uma chamada ser atrasada por um tempo maior que um tempo pré-estabelecido (para o modelo Erlang C).
<i>Request Rate</i>	O número médio de chamadas solicitadas por unidade de tempo. Denotada por λ segundos ⁻¹ .

Definições de termos comuns usados na teoria de *trunking*.

A **intensidade de tráfego gerada por cada usuário** é igual à taxa de solicitação de chamadas, multiplicada pela duração média de uma chamada típica (*holding time*).

→ Ou seja, cada usuário pode gerar uma intensidade de tráfego de A_u Erlangs dada por $A_u = \lambda H$, onde H é duração média de uma chamada e λ é o número médio de solicitações de chamada por unidade de tempo para cada usuário.

→ Para um sistema que contenha U usuários e um n° de canais não especificado, o **total de intensidade de tráfego gerado** (A) será $A = UA_u$.

→ Ainda, em um sistema baseado em *trunking* com C canais, se o tráfego é igualmente distribuído entre os canais, então a **intensidade de tráfego por canal** (A_c) é dada por

$$A_c = \frac{UA_u}{C}.$$

- ◆ Quando o tráfego gerado excede a capacidade máxima do sistema, o tráfego transportado será limitado, devido ao número limitado de canais.

Há dois tipos de sistemas baseados em *trunking* comumente utilizados:

- (1) O primeiro tipo **não oferece a possibilidade de espera em uma fila para as chamadas solicitadas** e não atendidas.
- (2) O segundo tipo é aquele em **que é formada uma fila para conter as chamadas que são bloqueadas**.

Sistemas baseados em *trunking* que não oferecem a possibilidade de espera em uma fila para as chamadas solicitadas.

- Neste tipo de sistema, para cada usuário que solicita um serviço, é assumido que não há um tempo de *setup* e que o usuário recebe imediatamente o acesso ao canal, se há um canal disponível.
- Se não há canais disponíveis, o usuário solicitante é bloqueado, ficando sem acesso e devendo tentar novamente mais tarde.

Este tipo de sistema de *trunking* é chamado *Blocked Calls Cleared* e assume que as chamadas que chegam são regidas por uma distribuição de Poisson.

Observação:

- * Um processo de Poisson é um processo em que as ocorrências são variáveis aleatórias independentes.
- * Este tipo de processo descreve fenômenos tais como a ocorrência de falhas em componentes de um sistema e a demanda por serviços que envolvem a espera em filas.

Além disso, é assumido que há um número infinito de usuários, da seguinte maneira:

(a) as solicitações de acesso ao sistema são sem memória, implicando que todos os usuários (incluindo os usuários bloqueados) possam requisitar uma chamada a qualquer tempo, sem qualquer prioridade;

(b) a probabilidade de um usuário ocupar um canal é exponencialmente distribuída, de tal forma que chamadas mais demoradas são menos prováveis de ocorrer (conforme seria descrito por uma distribuição exponencial);

(c) há um número finito de canais disponíveis, em um grupo de canais.

Este tipo de sistema conduz à derivação da fórmula Erlang B (também conhecida como a fórmula *Blocked Calls Cleared*).

A fórmula Erlang B determina **a probabilidade de uma chamada ser bloqueada e é medida pelo GOS**, para um sistema baseado no conceito de *trunking* que **não** provê uma fila para chamadas bloqueadas.

A fórmula Erlang B é expressa por

$$\Pr[\text{bloqueio}] = \frac{\frac{A^C}{C!}}{\sum_{k=0}^C \frac{A^k}{k!}} = GOS$$

onde C é o número de canais de um sistema de comunicações baseado no conceito de *trunking* e A é o tráfego total gerado.

- É possível modelar um sistema baseado no conceito de *trunking* considerando-se um número finito de usuários, no entanto:
 - as expressões resultantes acabam por ser muito mais complicadas do que as expressões para o modelo Erlang B,
 - o modelamento se torna inadequado para casos em que o número de usuários é muitas ordens de magnitude maior do que o de canais disponíveis e
 - a expressão Erlang B para um número finito de usuários provê uma estimativa conservadora do GOS, à medida que os resultados sempre predizem uma menor probabilidade de bloqueios do que aquela que pode, de fato, ocorrer.

A capacidade de um sistema de comunicações baseado no conceito de *trunking*, onde as chamadas bloqueadas são perdidas é mostrada na Tabela abaixo (**Capacidade de um Sistema Erlang B**), para vários possíveis valores de GOS e n^{os} de canais.

Número de Canais C	Capacidade (Erlangs) para GOS			
	= 0.01	= 0.005	= 0.002	= 0.001
2	0.153	0.105	0.065	0.046
4	0.869	0.701	0.535	0.439
5	1.36	1.13	0.900	0.762
10	4.46	3.96	3.43	3.09
20	12.0	11.1	10.1	9.41
24	15.3	14.2	13.0	12.2
40	29.0	27.3	25.7	24.5
70	56.1	53.7	51.0	49.2
100	84.1	80.9	77.4	75.2

Sistemas baseados em *trunking* em que é formada uma fila para conter as chamadas que são bloqueadas.

- ⇒⇒ Se um canal não está disponível imediatamente, a solicitação de chamada pode ser atrasada até que um canal se torne disponível.

Este tipo de sistema de *trunking* é chamado *Blocked Keys Delayed*, e sua medida de GOS é definida como a probabilidade de que uma chamada seja bloqueada após esperar um intervalo de tempo específico na fila.

- ⇒⇒ Para determinar o GOS, primeiro é necessário determinar a probabilidade de uma chamada ter o acesso ao sistema inicialmente negado.
- ⇒⇒ A probabilidade de uma chamada não receber acesso imediato a um canal é determinada pela expressão denominada Erlang C, expressa na Equação abaixo.

$$\Pr[\text{atraso} > 0] = \frac{A^C}{A^C + C! \left(1 - \frac{A}{C}\right) \sum_{k=0}^{C-1} \frac{A^k}{k!}}$$

- ⇒⇒ Se não há canais imediatamente disponíveis, a chamada é atrasada.
- ⇒⇒ **A probabilidade de que a chamada atrasada seja forçada a esperar mais do que t segundos é dada pela probabilidade de uma chamada ser atrasada multiplicada pela probabilidade condicional de o atraso ser maior do que t segundos.**
- ⇒⇒ O GOS de um sistema *trunked* onde chamadas bloqueadas são atrasadas é, então, dada por

$$\Pr[\textit{atraso} > t] = \Pr[\textit{atraso} > 0] \Pr[\textit{atraso} > t \mid \textit{atraso} > 0] = \\ = \Pr[\textit{atraso} > 0] \exp(-(C - A)t/H)$$

onde H é a duração média de uma chamada, C é o nº de canais de um sistema de comunicações baseado no conceito de *trunking* e A é o tráfego total gerado.

- ⇒⇒ O atraso médio D para todas as chamadas em um sistema que opera por meio de filas é dado por

$$D = \Pr[\textit{atraso} > 0] \frac{H}{C - A}$$

onde o atraso médio para aquelas chamadas que são colocadas na fila é dado por $H/(C - A)$.

As fórmulas Erlang B e Erlang C são plotadas graficamente nas Figuras abaixo.

Os **gráficos** mostrados nas figuras são úteis para determinar o GOS de forma rápida, embora **simulações** computacionais sejam freqüentemente utilizadas para determinar comportamentos transientes experimentados por usuários particulares em sistemas de comunicações móveis.

Para usar as famílias de curvas, procede-se de acordo com o seguinte algoritmo:

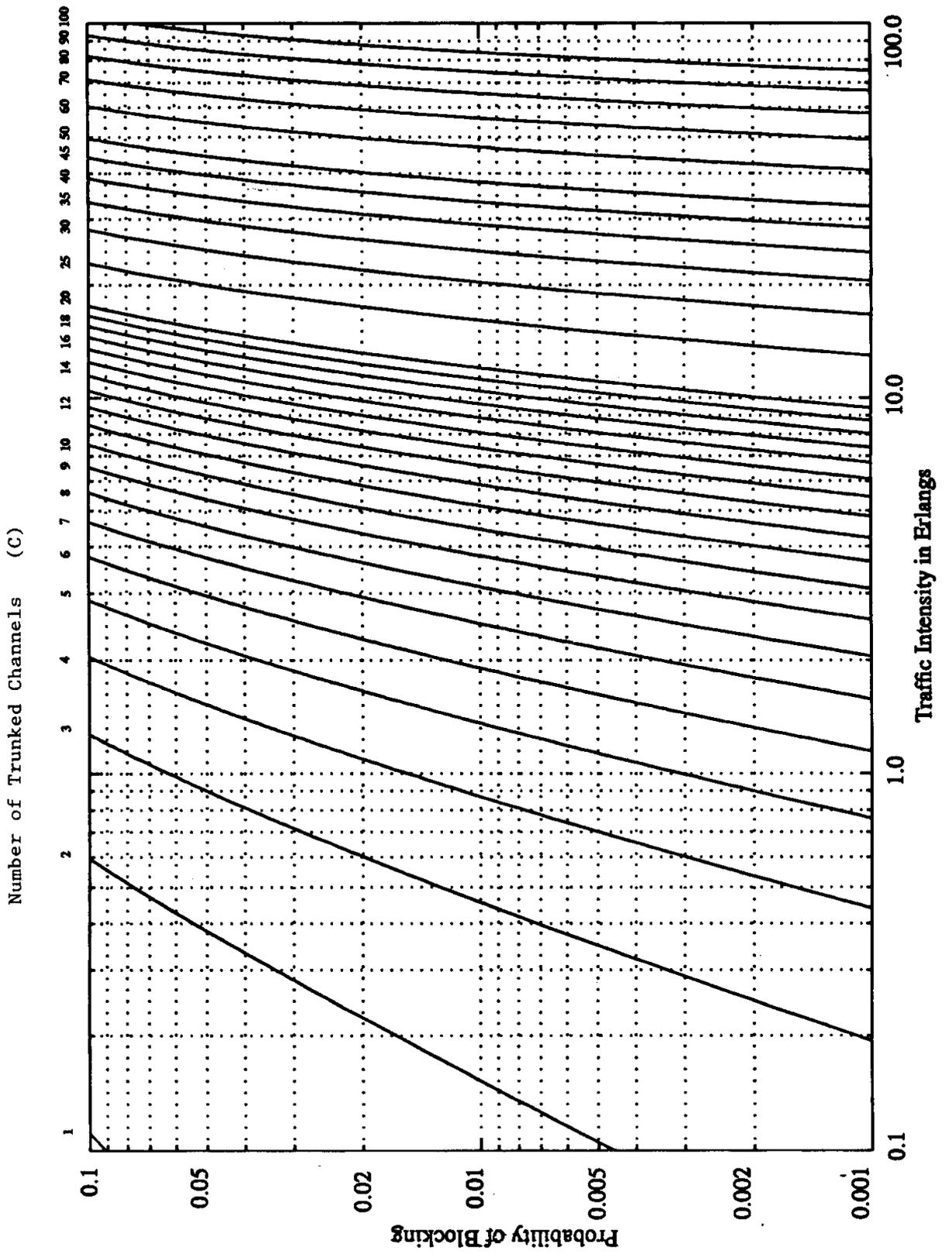
- (1) localiza-se o número de canais na parte superior do gráfico;
- (2) localiza-se a intensidade do tráfego do sistema na base do gráfico;
- (3) encontra-se, na abcissa dos gráficos, a probabilidade de bloqueio $P_r[\text{bloqueio}]$ ou a probabilidade de uma chamada não receber acesso imediato ao sistema $P_r[\text{atraso}] > 0$.

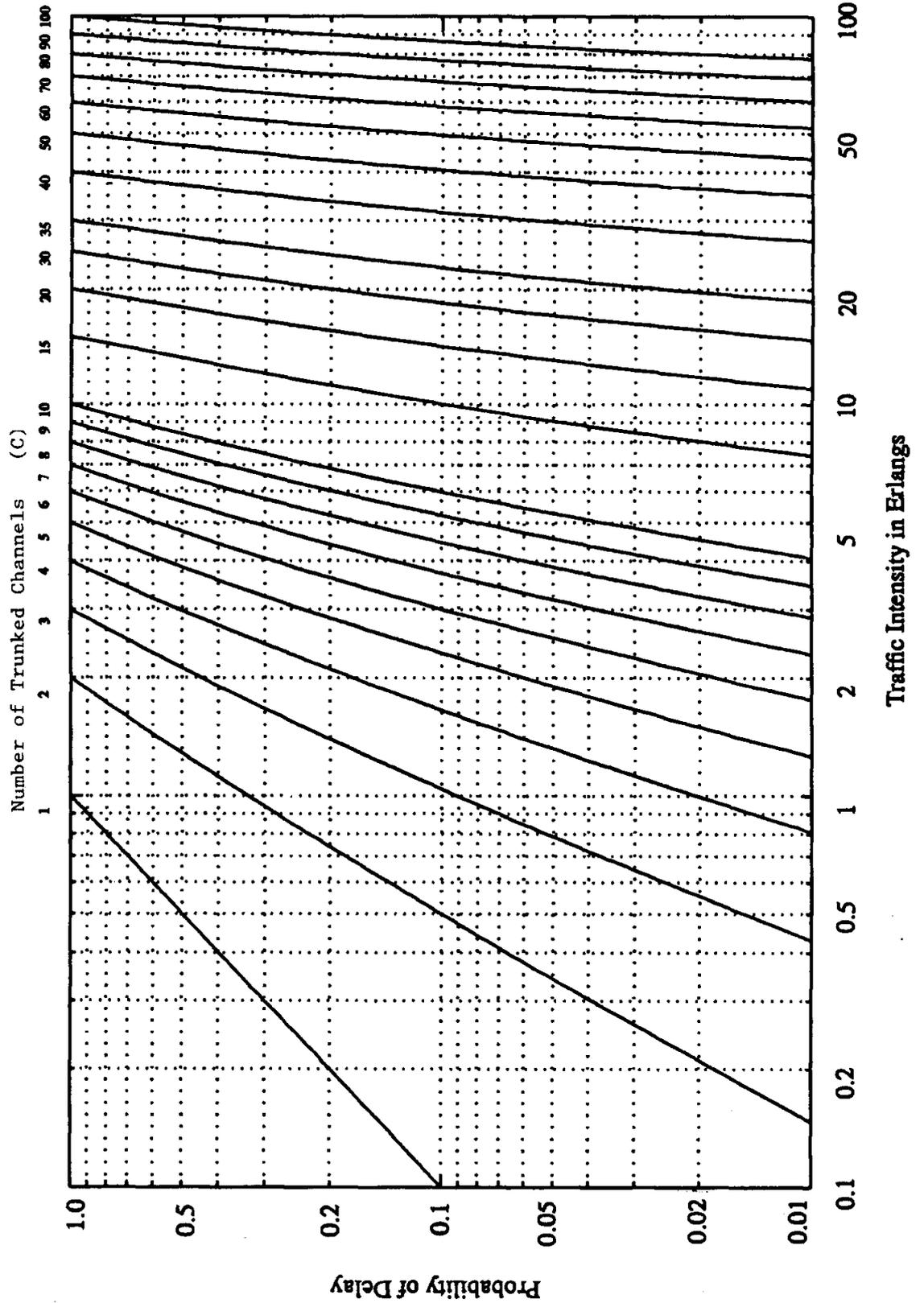
- A eficiência de *trunking* é uma medida do número de usuários aos quais pode ser oferecido um particular GOS, com uma particular configuração de canais fixos.
- A forma pela qual os canais são agrupados altera substancialmente o número de usuários que podem ser atendidos por um sistema baseado na técnica de *trunking*, e é um fator de grande impacto na capacidade global do sistema.

Por exemplo, pode-se verificar na Tabela abaixo que:

- 10 canais operando sob a filosofia de *trunking* a um GOS de 0.01 podem suportar 4.46 Erlangs de tráfego, enquanto que
- 2 grupos de 5 canais podem suportar 2×1.36 Erlangs, ou 2.72 Erlangs de tráfego.
- Ou seja, 10 canais operando de acordo com a filosofia de *trunking* suportam 60% mais tráfego, a um dado GOS, do que 2 sistemas com 5 canais cada, operando da mesma forma.

Número de Canais C	Capacidade (Erlangs) para GOS			
	= 0.01	= 0.005	= 0.002	= 0.001
5	1.36	1.13	0.900	0.762
10	4.46	3.96	3.43	3.09





Multiplexação

- Técnicas de multiplexação são utilizadas para permitir a múltiplos usuários dividirem simultaneamente uma porção finita do espectro, resultando em alta capacidade para o sistema de comunicações.
- A alocação da banda disponível a múltiplos usuários precisa ser realizada sem degradar severamente o desempenho do sistema.
- Técnicas de acesso múltiplo constituem a base para as redes de comunicações *wired* e *wireless* presentes e futuras, tais como redes de satélites, redes de comunicações móveis e celulares.
- O sistema telefônico *wired*, por exemplo, utiliza técnicas elaboradas de multiplexação para transmitir mais do que um circuito de voz dentro da largura de banda destinada originalmente a um único circuito. O custo de instalação e manutenção de um tronco entre duas centrais telefônicas é o mesmo, independente da banda, por ser decorrente principalmente de outros fatores que não o custo dos cabos de cobre ou de fibras ópticas (licenças para passar cabos em propriedades públicas e privadas, cavar, estender cabos, ...)
- No sistema de telefonia *wireless*, muitas vezes, os padrões de telefonia adotados são "apelidados" pela denominação da técnica de acesso múltiplo empregada. Por exemplo, o padrão IS-95 é popularmente denominado "CDMA", enquanto que o padrão USDC é popularmente denominado "TDMA".

As técnicas de multiplexação mais freqüentemente utilizadas são abaixo relacionadas:

1. **FDM – Frequency Division Multiplexing**
2. **WDM – Wavelength Division Multiplexing**
3. **TDM – Time Division Multiplexing**
4. **CDM – Code Division Multiplexing**
5. **SDM – Space Division Multiplexing**

FDM - Frequency Division Multiplexing

- Multiplexação analógica por divisão em frequência, amplamente utilizada em transmissões de rádio, em transmissões por cabos coaxiais e demais sistemas *wired*.
- Um sistema FDM divide a largura de banda disponível no meio de transmissão em um número de bandas ou sub-canais mais estreitos.
- Para atender ao compromisso de multiplexar o maior número possível de canais de voz em um sistema e manter fidelidade de voz aceitável, as companhias telefônicas estabeleceram inicialmente 4 kHz como a largura de banda padrão de um circuito de voz.
- Atualmente a largura de banda atribuída é 3 kHz por canal de voz. No entanto, quando muitos canais são multiplexados, uma banda de 4 kHz é alocada para cada canal, para mantê-los devidamente separados.
- A Figura 5.2 mostra como três canais telefônicos são multiplexados utilizando a técnica FDM: Os canais de voz são primeiramente deslocados ou "levantados" (*raised*), cada um deles em diferentes frequências, sendo posteriormente combinados (deve-se notar que, desta forma, não há dois canais ocupando a mesma porção do espectro).

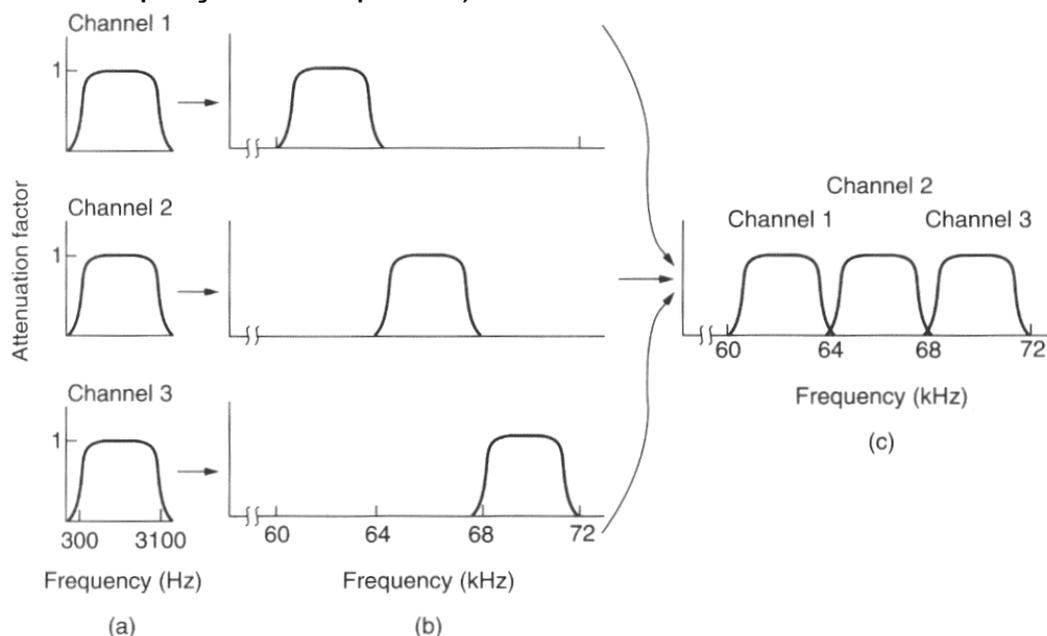
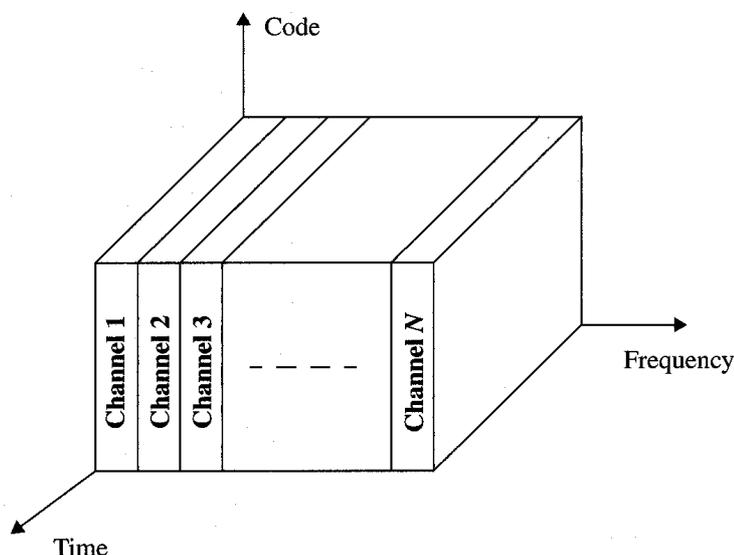


Figura 5.2: Multiplexação por Divisão em Frequência. (a) Bandas originais. (b) Bandas "levantadas" em frequência. (c) O canal multiplexado.

- A Figura abaixo ilustra a técnica de multiplexação FDM. Observe que uma parcela da banda de frequência (ou sub-canal) é alocada a cada usuário.



Técnica de acesso FDM, onde diferentes canais são atribuídos a diferentes bandas de frequência.

- Seja um sistema de K usuários que utiliza FDM. Cada um dos K usuários deseja transmitir sobre um canal, gerando f_b bits por segundo.
- Cada um dos K usuários poderá transmitir todo o tempo, devendo usar uma porção B_u da largura de banda total B , tal que $B_u = \frac{B}{K} = f_b$ Hz.

Hierarquia FDM

Para padronizar os equipamentos de vários sistemas de transmissão das redes analógicas originais, o Sistema Bell estabeleceu uma hierarquia para os esquemas de multiplexação FDM, conforme Tabela 5.1. Por exemplo:

- Um padrão amplamente utilizado conta com 12 canais de voz de 4 kHz (3 kHz para o usuário + 2 bandas de guarda de 500 Hz cada) multiplexados na banda de 60 a 108 kHz. Esta unidade é chamada grupo.
- A banda de 12 a 60 kHz é usada para outro grupo.
- Cinco grupos (60 canais de voz) podem ser multiplexados para formar um super-grupo.
- A próxima unidade constitui um master-grupo, formado por 5 super-grupos ou 10 super-grupos.

Nível de Multiplexação	Nº de Circuitos de Voz	Formação	Banda de Freqüência (kHz)
Canal de Voz	1		0-4
Grupo	12	12 circuitos de voz	60-108
Super-grupo	60	5 grupos	312-552
Master-grupo	600	10 super-grupos	564-3084
Mux Master-grupo	1200-3600	variada	312 ou 564-17548
Jumbo-grupo	3600	6 master-grupos	564-17548
Mux Jumbo-grupo	10800	3 jumbo-grupos	3000-60000

Tabela 5.1: Hierarquia FDM da Rede Bell.

- Cada nível de hierarquia é implementado usando um conjunto de módulos padrão FDM.
- O equipamento de multiplexação é independente do meio de transmissão.
- Todos os equipamentos de multiplexação na hierarquia FDM usam modulação SSB (≈ 4 kHz de BW / circuito de voz).
- O bloco de menor nível hierárquico é um grupo que consiste de 12 canais de voz utilizando, no total, 48 kHz.

- A Figura 5.3 apresenta o diagrama de blocos de um multiplexador de canais A5, o mais comum banco de canais tipo A usado para multiplexação de primeiro nível.

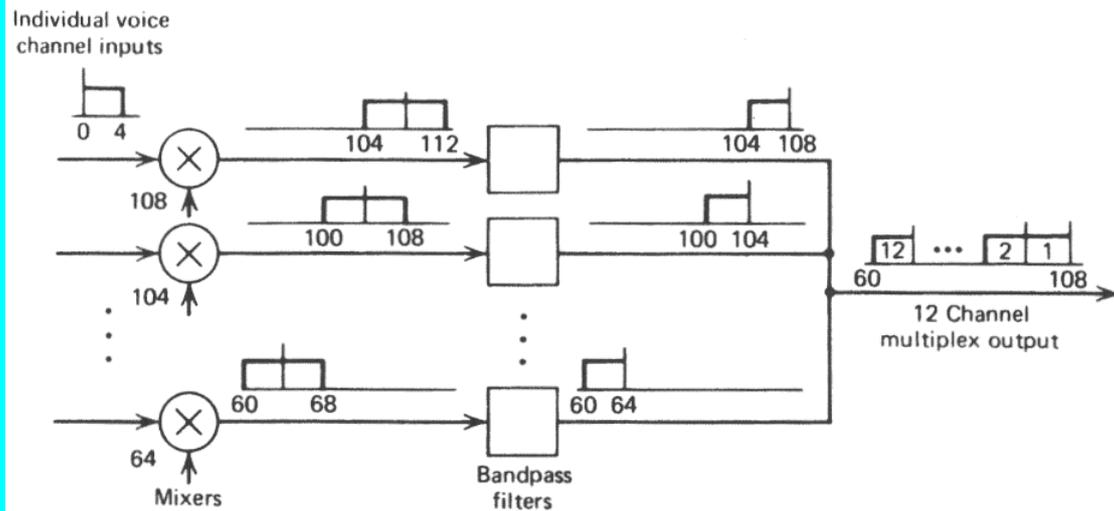


Figura 5.3: Banco de multiplexadores de canais A5.

- Na Figura, são vistos 12 moduladores usando 12 portadoras separadas, gerando 12 sinais *double-sideband*.
- Cada canal é filtrado em banda passante para selecionar apenas a banda lateral inferior de cada sinal *double-sideband*.
- O sinal multiplexado composto é produzido pela superposição das saídas dos filtros.
- Equipamentos demultiplexadores no receptor utilizam o mesmo processamento básico, em ordem reversa.
- Note que um filtro de separação de banda lateral remove a banda lateral superior, restringindo a largura de banda do sinal resultante.
- Estes filtros, portanto, representam um fator básico na rede telefônica analógica, por definirem a largura de banda do circuito de voz.

- De acordo com a Tabela 5.1, um segundo nível de hierarquia FDM é constituído por um multiplexador de 60 canais chamado de super-grupo.
- A Figura 5.4 mostra a implementação básica de um banco LMX que multiplexa 5 grupos de canais de primeiro nível (5 x 1 grupo = 5 x 12 circuitos de voz = 240 kHz).

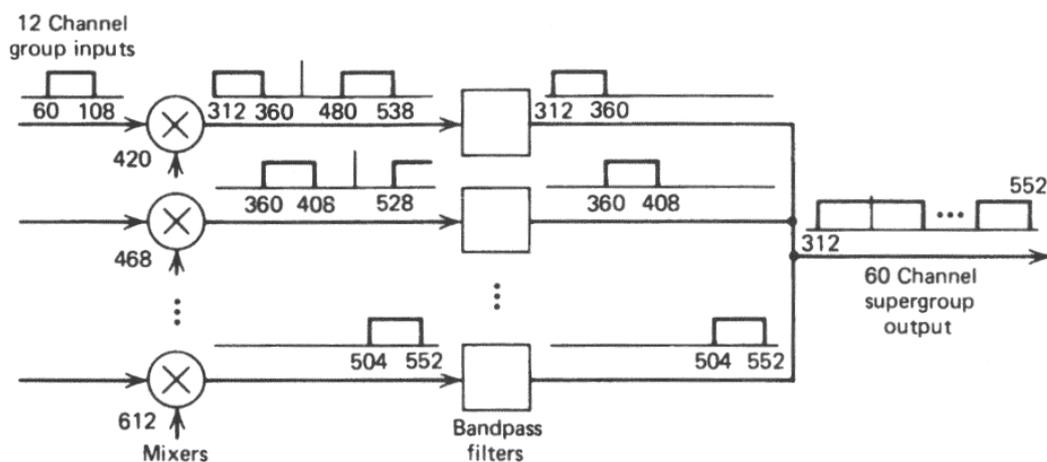


Figura 5.4: Banco de multiplexadores de canais LMX.

- Os 60 canais multiplexados resultantes na saída são idênticos aos obtidos quando os canais são individualmente transladados em bandas de 4 kHz, de 312 a 552 kHz.
- A translação direta requer 60 sistemas SSB separados com 60 portadoras distintas.
- O banco LMX, entretanto, usa apenas 5 sistemas SSB, mais cinco módulos de nível inferior (5 grupos).
- Como um multiplexador de segundo nível agrupa sinais individuais de primeiro nível sem bandas de guarda, as frequência portadoras e os filtros passa-banda no banco de LMX devem ser mantidas de forma acurada.
- Multiplexadores de mais alto nível guardam uma maior distância entre sinais de nível inferior.

WDM - *Wavelength Division Multiplexing*

- Quando a luz se propaga em um tubo de material opticamente transparente ela é guiada pelo tubo e segue a curvatura do tubo.
- Materiais opticamente transparentes são aqueles que permitem a propagação de toda a energia da luz (todos os fótons), sem absorver qualquer porção desta energia.
- Materiais transparentes não causam, portanto, atenuação da potência óptica da luz. Exemplo: vidro transparente.
- Por esta razão, fibras de vidro foram escolhidas para transmissão de comunicações terrestres e submarinas de longa distância, alta velocidade e alta confiabilidade.
- Uma fibra óptica típica consiste de um núcleo de sílica ultrapura misturada com elementos dopantes utilizados para ajustar o índice de refração da sílica e, assim, suas características de propagação da luz.
- Um cabo de fibra óptica é constituído de um único núcleo de fibra (fio) de muitas milhas de comprimento, recoberto por camadas de diferentes materiais para proteção do núcleo (sílica com outros dopantes, plástico...).
- Os cabos usados em transmissão são constituídos de um feixe de fibras ópticas (podendo chegar a ter mais do que 432 fibras).
- Taxas de bits da ordem de mais de 40 Gigabits por segundo são atingidas em uma única fibra.

- Para canais de fibra óptica é utilizada a multiplexação por comprimento de onda, WDM - *Wavelength Division Multiplexing*, que é uma variação da multiplexação por divisão em frequência (FDM).
- Para um número elevado de canais (comprimentos de onda) multiplexados, a técnica WDM é chamada DWDM - *Dense Wavelength Division Multiplexing*.
- WDM (ou DWDM) é uma tecnologia óptica que acopla muitos comprimentos de onda na mesma fibra, aumentando efetivamente a largura de banda agregada da fibra à soma das taxas de bits de cada comprimento de onda acoplado.

Uma aplicação potencial da técnica WDM a Sistemas Telefônicos corresponde a expandir a rede óptica até a rede de acesso local ou mesmo até o usuário final:

- ◆ Uma companhia telefônica pode instalar uma única fibra óptica de uma central local até uma caixa de junção em uma determinada vizinhança, onde é conectada com os pares torcidos vindos das unidades dos usuários.
- ◆ Anos mais tarde, quando o custo da fibra óptica tiver diminuído e a demanda aumentado, os pares torcidos poderão ser substituídos por fibras e todos os *loops* locais unidos à fibra que chega da central local através da técnica WDM.

- A Figura 5.5 descreve de forma simplificada o conceito de multiplexação WDM, em que cada canal representa um cadeia de bits que é transportada sobre um diferente comprimento de onda (λ_i).
- Diferentes canais podem transportar dados a diferentes taxas de bits e pertencentes a diferentes serviços (voz, dados, vídeo, ...).

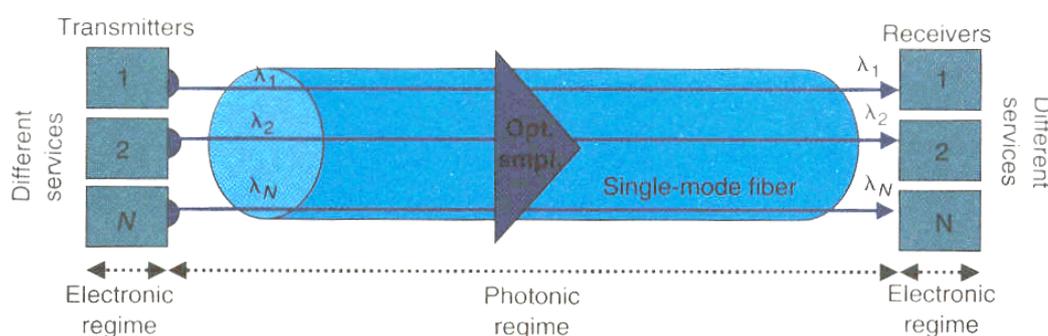
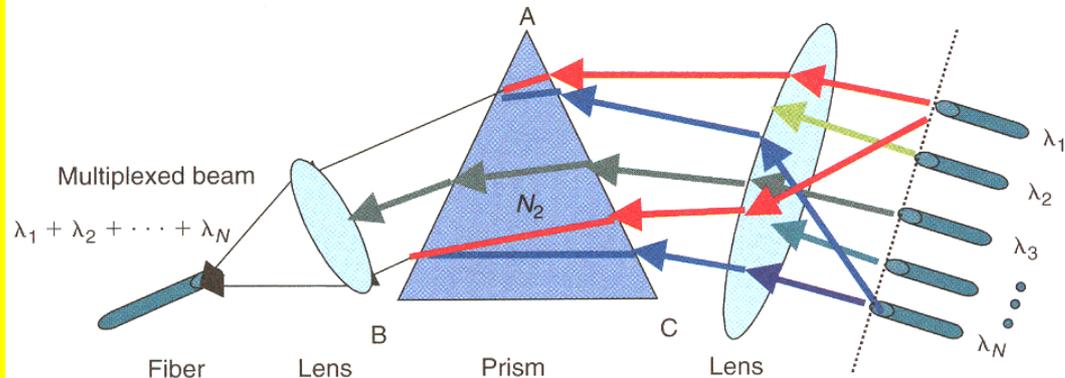


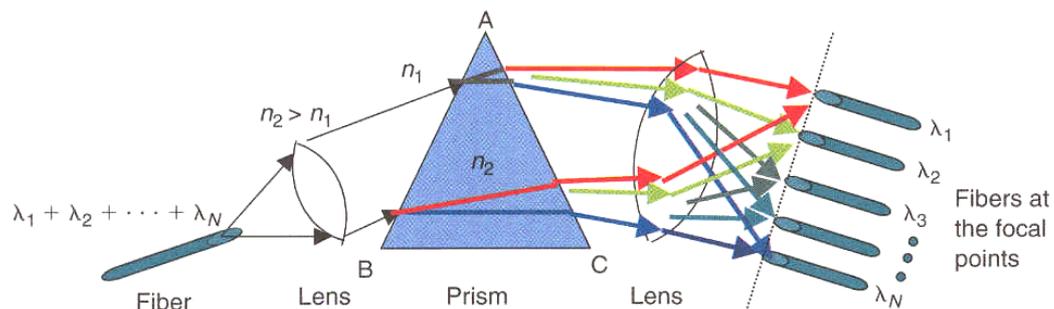
Figura 5.5: Sistema WDM com muitos canais (muitos λ) na mesma fibra.

- Multiplexadores ópticos recebem, na entrada, uma multiplicidade de fibras carregando sinais ópticos de diferentes comprimentos de onda.
- Todos os comprimentos de onda são focados no mesmo ponto focal e são acoplados em uma única fibra de saída.
- A maior parte dos multiplexadores ópticos podem também ser utilizados como demultiplexadores ópticos.
- Nesta categoria encontram-se os prismas e *gratings*, cuja operação como multiplexadores/demultiplexadores é descrita pelas Figuras 5.6 e 5.7, a seguir.

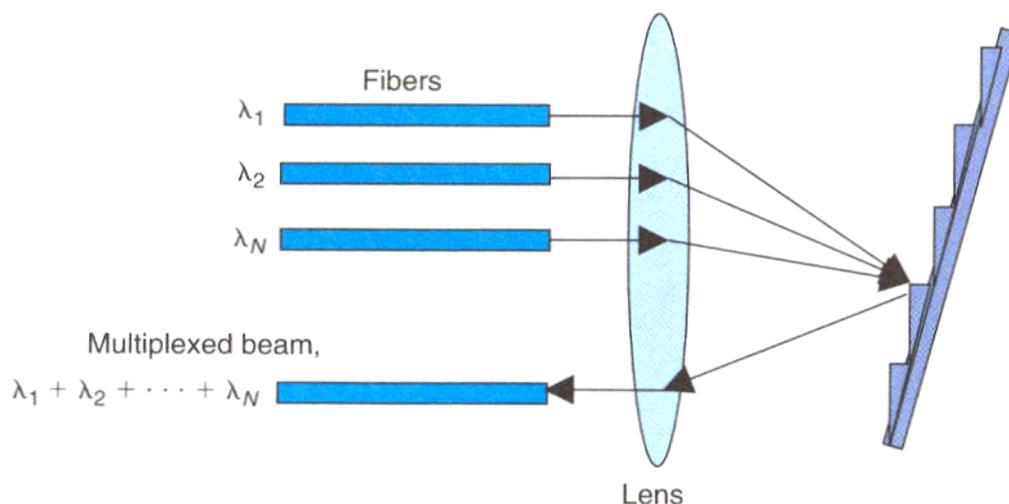
- A Figura 5.6 (a) descreve a utilização de um prisma como multiplexador DWDM.



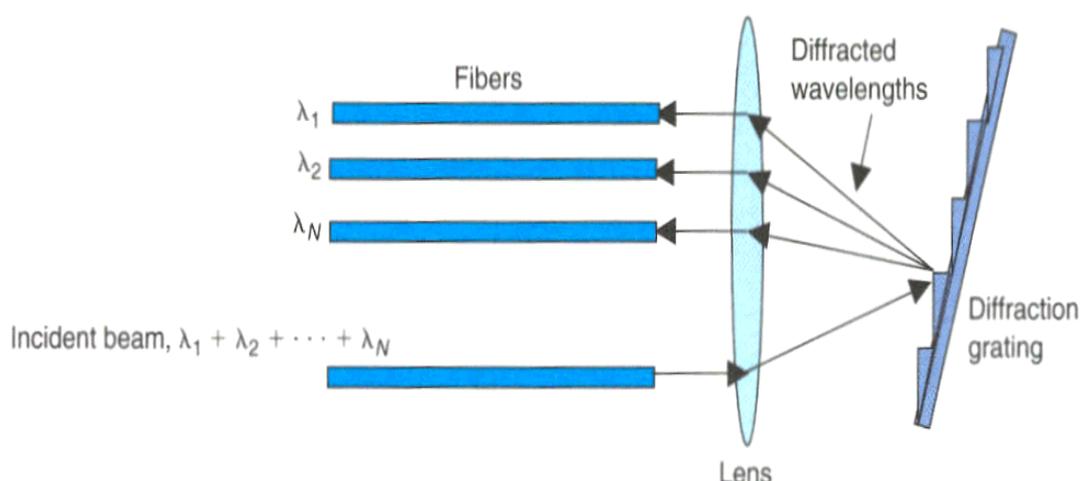
- Na Figura 5.6 (b) um prisma é utilizado para demultiplexar os canais.
- Quando um feixe paralelo de luz policromática colide com uma das superfícies do prisma (AB, na Figura), cada componente de frequência é refratado de forma diferente.
- A luz que sai na outra superfície do prisma (AC, na Figura) consiste dos componentes de frequência separados uns dos outros por um pequeno ângulo.
- Uma lente foca cada comprimento de onda em um diferente ponto onde fibras receptoras são colocadas, uma fibra para cada canal (ou comprimento de onda).



- A Figura 5.7 (a) descreve a utilização de um *grating* como multiplexador DWDM.



- Na Figura 5.7 (b) um *grating* (grade ou retícula) de difração é utilizado para demultiplexar os canais.
- Quando um feixe paralelo de luz policromática colide com um *grating* de difração, cada componente de frequência é difratado e dirigido para um diferente ponto no espaço.
- Uma fibra é colocada nos pontos focais de cada comprimento de onda.
- A focalização dos comprimentos de onda difratados pode ser obtida por meio de um sistema de lentes ou de um *grating* de difração côncavo.



- Com a técnica DWDM, a largura de banda atingida excede um Terabit por segundo.
- Sistemas DWDM práticos podem multiplexar mais do que 128 comprimentos de onda. (Testes realizados provaram ser possível a multiplexação de 206 comprimentos de onda.)
- Um sistema DWDM com 40 comprimentos de onda, a 10 Gigabits por segundo por λ , possui uma banda total de 400 Gbits/s (suficiente p/ transportar em uma única fibra o conteúdo de mais do que 11000 volumes de uma enciclopédia em 1s.
- Sistemas DWDM com 40 Gbits/s por λ já são realizáveis e a tendência continua sendo aumentar tanto a densidade de comprimentos de onda multiplexados, quanto a taxa de bits por comprimento de onda.
- A Figura 5.8 apresenta dados sobre a evolução do crescimento da densidade de comprimentos de onda multiplexados, e da taxa de bits por comprimento de onda.

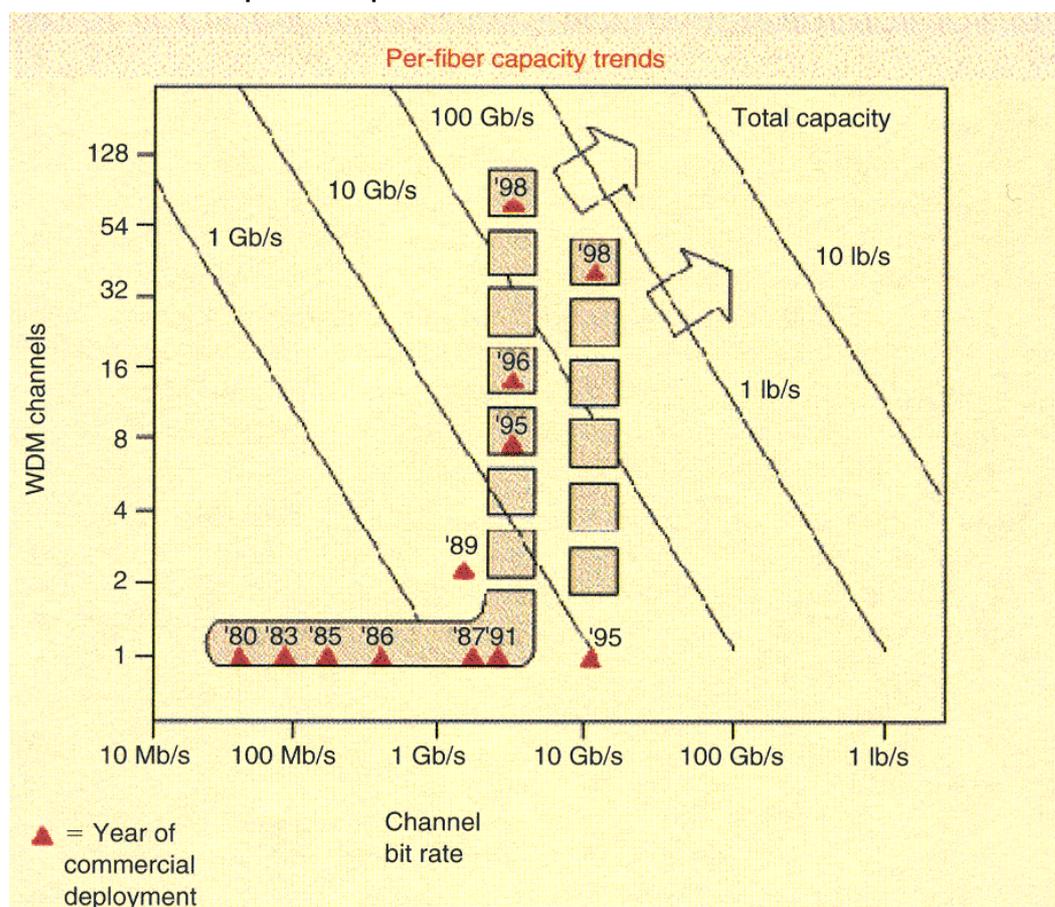


Figura 5.8: Tendência da evolução da capacidade por fibra.

TDM - Time Division Multiplexing

- A técnica que consiste de multiplexação digital por divisão do tempo é a forma dominante de multiplexação usada em redes telefônicas digitais.
- A multiplexação por divisão no tempo envolve o compartilhamento do meio de transmissão através do estabelecimento de uma seqüência de *slots* de tempo durante os quais fontes individuais podem transmitir sinais.
- A totalidade da banda disponível pode ser utilizada periodicamente por cada fonte, por um intervalo restrito de tempo. (Em contraste com a técnica FDM, em que os sistemas atribuem uma banda restrita a cada fonte por todo o tempo.)
- Normalmente, todos os *slots* de tempo de um sistema TDM são de igual tamanho.
- Usualmente, a cada sub-canal é atribuído um *slot* de tempo com um período de repetição comum, chamado intervalo de *frame*.
- Esta forma de TDM (mostrada na Figura 5.9) é conhecida por TDM Síncrono, para especificar que a cada sub-canal é atribuída uma certa capacidade de transmissão, determinada pela duração do *slot* de tempo e pela taxa de repetição.

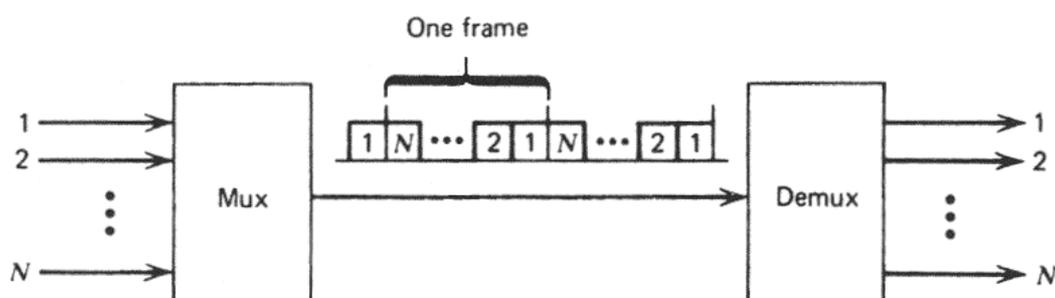
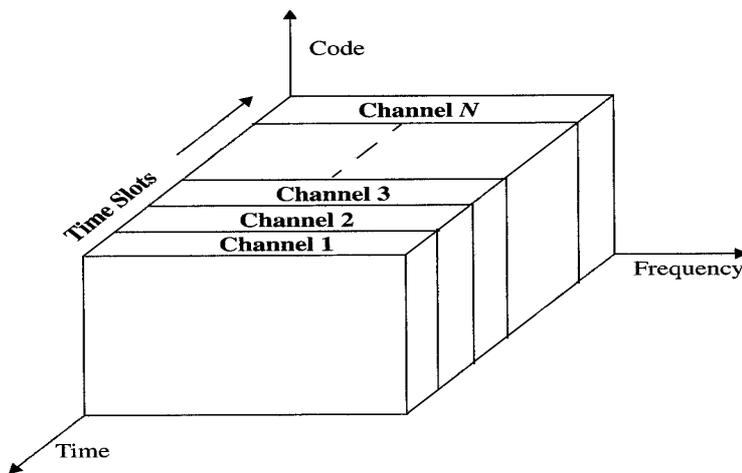


Figura 5.9: Sistema de Multiplexação TDM Síncrono.

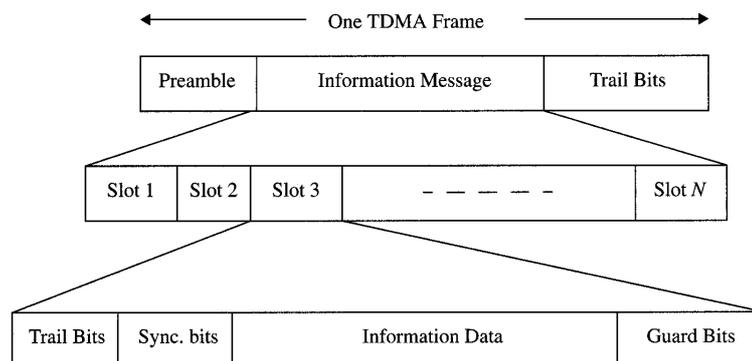
- O *backbone* dos *links* digitais da rede pública de telefonia usam uma variedade síncrona de TDM.
- Em uma outra forma de TDM, chamada estatística ou assíncrona, as taxas dos sub-canais podem variar de acordo com as necessidades individuais das fontes.
- Em um sistema telefônico móvel celular que utiliza o padrão de Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDM/TDD), vários usuários móveis se revezam, no tempo, na transmissão/recepção sob uma mesma freqüência compartilhada.

- ★ Sistemas TDM são baseados em *time slots*, em que apenas um usuário pode tanto transmitir quanto receber (*time slot* = intervalo ou espaço de tempo).
- ★ Conforme pode ser visto na Figura abaixo, cada usuário ocupa um *time slot* que se repete em ciclos, de tal forma que um canal pode ser visto como um particular *time slot* que ocorre novamente a cada *frame*, onde *N time slots* constituem um *frame*.



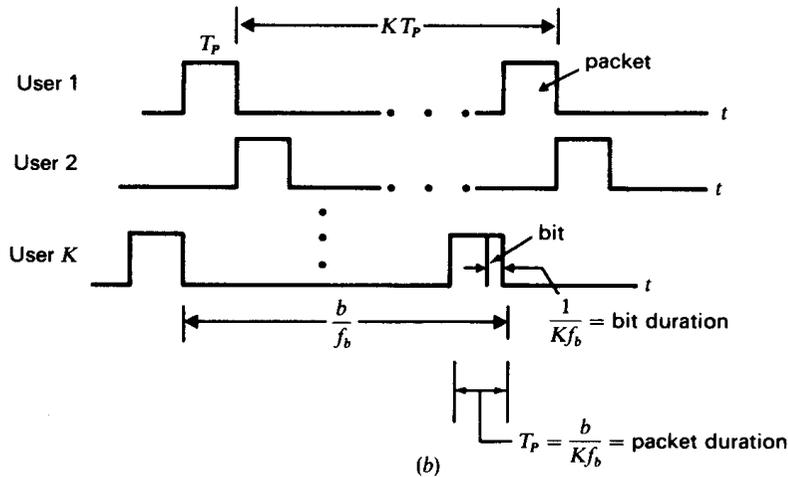
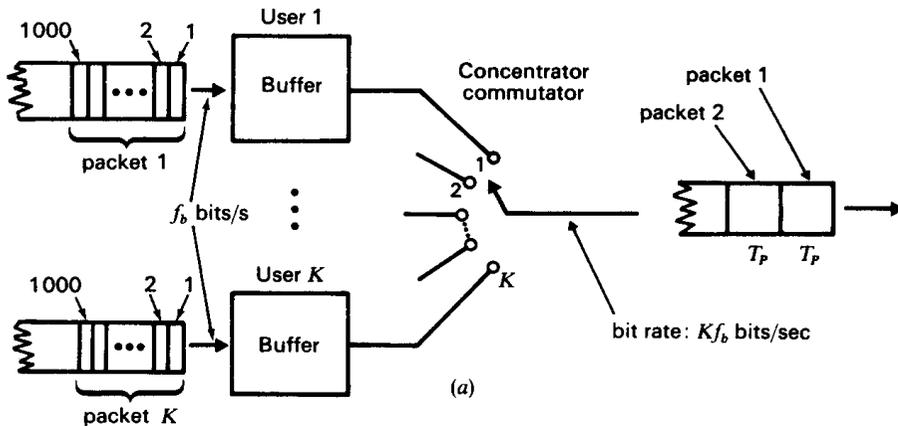
Técnica de multiplexação TDM, onde cada canal ocupa um *time slot* que se repete ciclicamente.

- A transmissão de vários usuários é entrelaçada em uma estrutura de *frames* que se repete ciclicamente no tempo. Pode ser observado na Figura abaixo que cada *frame* é constituído de um determinado nº de *slots* e é composto de um cabeçalho, uma mensagem (informação) e bits de cauda.



- Em um *frame* TDM, o cabeçalho contém o endereço e a informação de sincronização.
- Intervalos de guarda são usados para permitir sincronização dos receptores entre diferentes *slots* e *frames*.
- Diferentes padrões TDM possuem diferentes estruturas de *frames*.

- Em sistemas TDM/TDD metade dos *slots* de tempo na mensagem de informação são usados para os canais do *link* direto e metade para os canais do *link* reverso.
- Em sistemas TDM/FDD estruturas de *frame* iguais ou similares são usadas para a transmissão direta e reversa, mas as frequências da portadora devem ser diferentes para os *links* direto e reverso.
- Em geral, os sistemas TDM/TDD induzem intencionalmente vários *time slots* de atraso entre os *time slots* direto e reverso para um particular usuário, de tal forma que não sejam necessários duplexadores na unidade do usuário.
- A eficiência de um sistema TDM é uma medida da porcentagem de dados transmitidos que efetivamente contêm informação, com relação à necessidade de *overhead*.
- O número de *slots* de canais TDM que podem ser providos em um sistema TDM é determinado multiplicando-se o número de slots TDM por canal pelo número de canais disponíveis.



Note: $KT_p = b/f_b$

Sistema TDM típico e Padrões de Tempo para Diferentes Usuários

- Cada um dos K usuários deseja transmitir f_b bits/s, em pacotes de b bits ($b \cong 1000$ bits).
- Cada pacote é armazenado em um *buffer*, com taxa de entrada de f_b bits/s.
- Uma chave comutadora seleciona um particular *buffer*.
- O *buffer* é esvaziado e os bits retirados são enviados para o canal comum, a uma taxa de Kf_b bits/s, portanto a duração de um bit no canal é $1/Kf_b$.
- Como há b bits no pacote, o tempo de pausa do comutador sobre cada *buffer* é $b/Kf_b \cong T_p$, onde T_p é a duração de um pacote.
- O comutador retorna a cada *buffer* individual a cada $KT_p \cong b/f_b$ segs.

A Tabela abaixo exemplifica, a título de ilustração, as diferentes técnicas de acesso múltiplo que são presentemente utilizadas em vários sistemas de comunicações *wireless*.

Sistema Celular	Técnica de Acesso Múltiplo
<i>Advanced Mobile Phone System (AMPS)</i>	FDMA/FDD
<i>Global System for Mobile (GSM)</i>	TDMA/FDD
<i>US Digital Cellular (USDC)</i>	TDMA/FDD
<i>Pacific Digital Cellular (PDC)</i>	TDMA/FDD
<i>CT2 (Cordless Telephone)</i>	FDMA/TDD
<i>Digital European Cordless Telephone (DECT)</i>	FDMA/TDD
<i>US Narrowband Spread Spectrum (IS-95)</i>	CDMA/FDD
W-CDMA (3GPP)	CDMA/FDD CDMA/TDD
cdma2000 (3GPP2)	CDMA/FDD CDMA/TDD

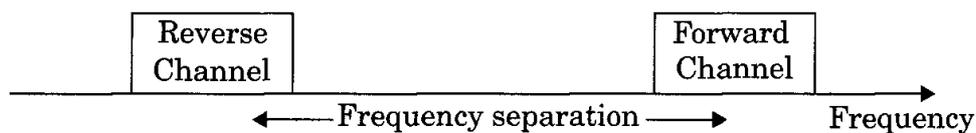
Técnicas de acesso múltiplo usadas em vários sistemas de comunicações *wireless*.

Em sistemas de comunicações, freqüentemente é desejável permitir ao usuário enviar simultaneamente informação para a estação base enquanto, ao mesmo tempo, recebe informação enviada pela estação base.

As operações de multiplexação, no caso, duplexação podem ser efetuadas por técnicas no domínio tempo ou no domínio freqüência.

Duplexação por Divisão em Freqüência (FDD - *Frequency Division Duplexing*)

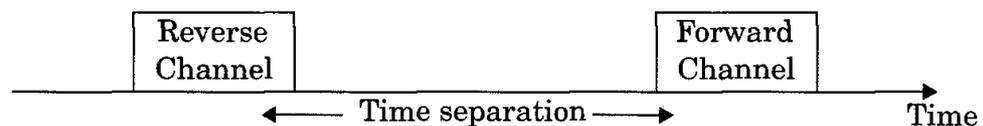
- ★ A duplexação por divisão em freqüência provê duas bandas de freqüências distintas para cada usuário. (Por exemplo, no sistema de telefonia móvel celular, a banda direta provê tráfego no sentido da estação base para a estação móvel, e a banda reversa provê tráfego no sentido da estação móvel para a estação base).



(FDD provê dois canais simplex ao mesmo tempo.)

Duplexação por Divisão no Tempo (TDD - *Time Division Duplexing*)

- ★ A duplexação por divisão no tempo utiliza o domínio tempo ao invés do domínio freqüência para prover tanto um *link* direto quanto um *link* reverso.



(TDD provê dois *slots* de tempo simplex na mesma freqüência.)

- ★ Em TDD, múltiplos usuários dividem um único canal de rádio, utilizando "em turnos" o tempo.
- ★ O acesso aos canais é permitido a usuários individuais em *time slots* designados, e cada canal tem tanto um *time slot* direto quanto um *time slot* reverso, para facilitar comunicação bidirecional.

Sistemas T

- Os sistemas T (*T-Carrier*) foram inicialmente desenvolvidos como uma forma efetiva de expansão do número de circuitos para transmissão entre centrais. A utilização de tais sistemas permite, ainda, a instalação de novos cabos, bem como a diminuição do tráfego em cabos sobrecarregados entre centrais.
- Um diagrama de blocos de um sistema T (*T-Carrier*) é mostrado na Figura 5.10.

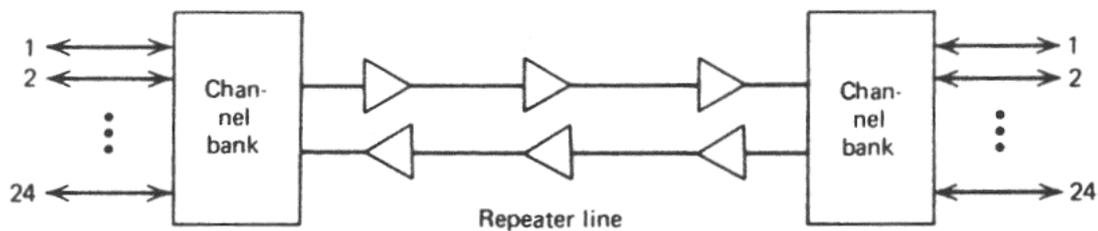


Figura 5.10: Sistema T1 (*T1-Carrier*).

- Uma linha T1 implica na necessidade de converter sinais de voz para o formato digital em um lado da linha e converter de volta a sinais analógicos no outro lado.
- Apesar da necessidade da conversão dos sinais, a conversão e o custo de multiplexação de um terminal TDM digital eram inferiores ao custo de um terminal FDM analógico comparável, fator que justificou sua implantação.

- O primeiro sistema T consistia de equipamentos nos terminais da linha e de um número de repetidores regenerativos em pontos intermediários da linha, como mostra a Figura 5.10.
 - A função de cada repetidor regenerativo é restaurar a seqüência de bits digital (*digital bit stream*) à sua forma original antes que a degradação gerada pela transmissão possa obliterar a identidade dos pulsos digitais.
 - A linha, incluindo os repetidores regenerativos, era referida como uma linha *span* (*span line*).
 - O equipamento original necessário nos terminais era chamado Banco de Canais Tipo-D (D: digital), os quais possuíam numerosas versões.
 - As linhas de transmissão eram pares de condutores, usando cabos com bitolas de 16 AWG a 26 AWG.
- O primeiro sistema T1 usava bancos de canais D1A para interfaceamento, conversão e multiplexação de 24 circuitos analógicos.
- Um banco de canais em cada fim de uma linha *span* provia interfaceamento para ambas as direções de transmissão.
- Sinais analógicos recebidos eram multiplexados no tempo e digitalizados para transmissão. Quando recebidas no outro lado da linha, as *bit streams* eram decodificadas em amostras analógicas, demulti-plexadas e filtradas para reconstruir os sinais originais.
- A cada canal TDM individual eram atribuídos 8 bits por *time slot*. Assim, havia $(24 \text{ circuitos analógicos})(8 \text{ bits por } time \text{ slot})=192$ bits de informação em um *frame*. Um bit era adicionado a cada *frame* para identificar os limites do *frame*, totalizando, assim, 193 bits por *frame*.
- Como o intervalo de *frame* é $125 \mu\text{s}$, a taxa básica da linha T1 se torna $\approx 1.5 \text{ Mbps} = (192 \text{ bits/frame}) \times (1 \text{ frame}/125 \mu\text{s})$. Esta taxa de linha foi estabelecida como o padrão fundamental para transmissão digital na América do Norte e no Japão (padrão DS1 (*Digital Signal 1*)).

- Um padrão similar, de ≈ 2 Mbps (2.048 Mbps) foi estabelecido pela ITU-T para o resto dos países.
 - Este padrão evoluiu a partir de um sistema parecido com o sistema T1 e provê 32 canais à mesma taxa que os canais americanos.
 - O padrão, chamado E1, utiliza apenas 30 canais de voz. Os outros 2 canais são usados para sincronismo de *frame* e sinalização.
 - Informações de sinalização e controle para sistemas T1 são inseridas em cada canal de voz.
-
- Na frequência de um padrão DS1 (frequência central=772 kHz) a atenuação sofrida no percurso demanda o uso de amplificação em pontos intermediários de uma linha T1 *span*.
 - Em contraste com um sinal analógico, entretanto, um sinal digital pode não apenas ser amplificado, mas também ser detectado e regenerado. Ou seja, se um pulso pode ser detectado, pode ser restaurado à sua forma original e retransmitido para o próximo segmento de linha.
 - Por esta razão, repetidores T1 são ditos regenerativos. As funções básicas destes repetidores são: equalização, recuperação de *clock*, detecção de pulsos e transmissão.
-
- A operação de equalização é requerida porque os cabos introduzem certas distorções (em fase e amplitude) que causam interferência inter-simbólica, se não forem compensadas.
 - Recuperação de *clock* é requerida para dois propósitos básicos: estabelecer um sinal de temporização para amostrar os pulsos que são recebidos e transmitir pulsos de saída à mesma taxa de entrada na linha.

- Repetidores regenerativos são normalmente espaçados a cada 6000 ft em uma linha T1 *span*.
 - Uma exceção é que o primeiro repetidor regenerativo está tipicamente espaçado 3000 ft de uma central telefônica, para manter um sinal relativamente forte na presença do ruído impulsivo gerado por dispositivos antigos de chaveamento, que ainda possam estar operando.
- A experiência de operação de sistemas T1 foi tão favorável que os sistemas T foram continuamente atualizados e expandidos.
 - Uma das melhoras iniciais produziram Sistemas T1C que proviam taxas de transmissão superiores sobre cabos de bitola 22 AWG. Uma linha T1C opera a ≈ 3 Mbps (3.152 Mbps) para 48 canais de voz, 2 vezes mais do que sistemas T1.
- Outro nível de transmissão digital se tornou disponível em 1972, quando o sistema T2 foi introduzido.
 - Este sistema foi projetado para conexões em redes *toll*. Em contraste, sistemas T1 foram originalmente projetados somente para transmissão em áreas de troca.
 - O sistema T2 permite 96 canais de voz a distâncias maiores do que 500 milhas.
 - A taxa da linha era ≈ 6 Mbps (6.312 Mbps), a qual é conhecida como padrão DS2.
 - O meio de transmissão consistia de cabos separados para cada direção de transmissão, permitindo usar repetidores espaçados a mais do que 14800 ft, em ambientes de baixo nível de ruído.
 - A emergência de sistemas baseados em fibras ópticas tornou os sistemas T2 baseados em cobre, obsoletos.

Hierarquia TDM

- Analogamente à hierarquia FDM, a AT&T estabeleceu uma hierarquia TDM que se tornou o padrão para a América do Norte.
- Começando com um sinal DS1 como o bloco básico de construção, todos os outros níveis hierárquicos são implementados como uma combinação de algum número de sinais de nível mais baixo.
- A designação dos multiplexadores digitais de alto nível refletem os respectivos níveis de entrada e saída. Por exemplo, um multiplexador M12 combina quatro sinais DS1 para formar um único sinal DS2.
- A Tabela 5.2 lista os vários níveis de multiplexação, suas taxas de bits, e o meio de transmissão usado por cada nível.

Nº do Sinal Digital	Nº de Círcs. de Voz	Designação do Multiplexador	Taxa de Bits (Mbps)	Meio de Transmissão
DS1	24	Banco de canais D (24 entradas analógicas)	1.544	Pares de cabos T1
DS1C	48	M1C (2 entradas DS1)	3.152	Pares de cabos T1C
DS2	96	M12 (4 entradas DS1)	6.312	Pares de cabos T2
DS3	672	M13 (28 entradas DS1)	44.736	Rádio, Fibra
DS4	4032	M34 (6 entradas DS3)	274.176	T4M coaxial, Onda guiada, Rádio.

Tabela 5.2: Sinais TDM Digitais Americanos e Japoneses.

- Note que a taxa de bits de um sinal multiplexado de nível mais alto é levemente superior do que taxas combinadas das entradas de níveis inferiores. Os bits excedentes são incluídos para funções de controle e sincronismo.

- Uma hierarquia digital similar foi estabelecida pelo ITU-T (*International Telecommunications Union - Telecommunications Standardization Sector*) como padrão internacional.
- Esta hierarquia é similar ao padrão norte americano, mas envolve n^{os} diferentes de circuitos de voz, em todos os níveis.

Nº do Nível	Nº de Circuitos de Voz	Designação do Multiplexador	Taxa de Bits (Mbps)
E1	30		2.048
E2	120	M12	8.448
E3	480	M23	34.368
E4	1920	M34	139.264
E5	7680	M45	565.148

Tabela 5.3: Hierarquia Digital ITU.

A Figura 5.11 mostra um exemplo de multiplexação de seqüências T1 em sistemas T de hierarquia superior.

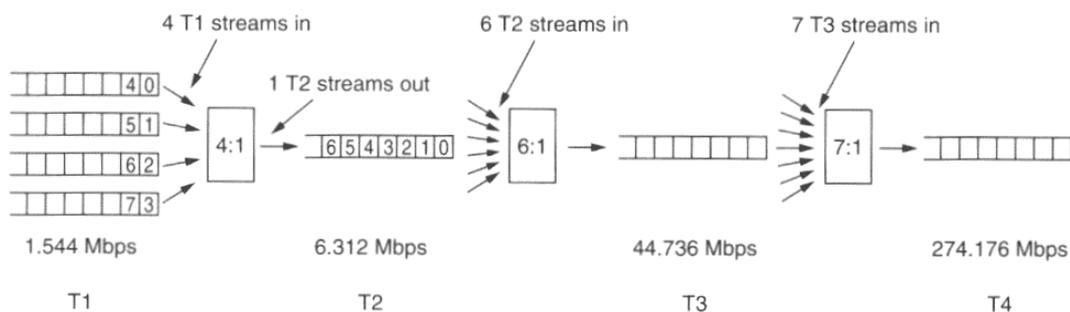


Figura 5.11: Multiplexação de sistemas T1 em sistemas de hierarquia superior.

- ⇒ À esquerda vemos 4 canais T1 sendo multiplexados em um canal T2. A multiplexação no nível hierárquico T2 e em níveis superiores é realizada bit a bit, e não byte a byte, com os 24 canais de voz que constituem um *frame* T1. Quatro seqüências T1 a 1.544 Mbps deveriam gerar 6.176 Mbps, no entanto, geram 6.312 Mbps. Os bits extra são usados para funções de controle.
- ⇒ No próximo nível, 6 seqüências T2 são combinadas bit a bit para formar uma seqüência T3. No nível seguinte, 7 seqüências T3 são reunidas para formar uma seqüência T4.
- ⇒ A cada passo, uma pequena quantidade de *overhead* é adicionada para compor e recuperar *frames*.

SONET/SDH

- ◆ No começo da utilização de fibras ópticas, cada companhia telefônica tinha seu próprio sistema óptico TDM, o que conduziu à necessidade de padronização.
- ◆ Em 1985 o Bellcore iniciou a elaboração de um padrão, chamado SONET (*Synchronous Optical NETWORK*).
- ◆ Mais tarde, o CCITT (*Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique*) juntou-se ao esforço, resultando em um padrão SONET e em um conjunto de recomendações CCITT paralelas (G.707, G.708 e G.709), em 1989.
- ◆ As recomendações CCITT são chamadas SDH (*Synchronous Digital Hierarchy*), mas diferem muito pouco do padrão SONET.
- ◆ Praticamente todo o tráfego telefônico de longa distância nos USA utiliza o padrão SONET na camada física.

O projeto SONET tinha quatro objetivos principais:

1. Tornar possível a operação entre diferentes sistemas. Para isso, tornava-se necessário definir um padrão de sinalização comum com respeito à comprimento de onda, temporização, estrutura de *frame*, etc.
2. Unificar os sistemas digitais Americano, Europeu e Japonês, todos os quais eram baseados em canais PCM de 64 kbps, mas combinados de formas diferentes e incompatíveis.
3. Prover uma forma de multiplexar múltiplos canais digitais. Quando o padrão SONET estava sendo idealizado, o sistema digital de maior velocidade mais amplamente utilizado nos USA era o sistema T3, a 44.736 Mbps. O sistema T4 estava definido, mas ainda pouco utilizado. Parte da missão do padrão SONET era expandir a hierarquia para Gigabits/s ou mais. Uma forma padrão para multiplexar canais mais lentos em um canal SONET também era necessária.
4. Prover suporte para operação, administração e manutenção. (Os sistemas anteriores não desempenhavam adequadamente estas tarefas.)

- A decisão inicial era fazer do padrão SONET um sistema TDM tradicional, com a banda toda da fibra devotada a um canal contendo *time slots* para os vários sub-canais.
- Projetado desta forma, o padrão constituiria um sistema síncrono, em que os bits em uma linha SONET são enviados a intervalos de tempo muito precisos, controlados por *clocks* extremamente precisos.
- Mais tarde quando o chaveamento por célula foi proposto como a base para um sistema ISDN de banda larga, o conceito de operação assíncrona foi estabelecido.
- Neste conceito, são permitidos intervalos irregulares para o envio das células (como em ATM, por exemplo).

Um sistema SONET consiste de chaves, multiplexadores e repetidores, todos conectados por fibra.

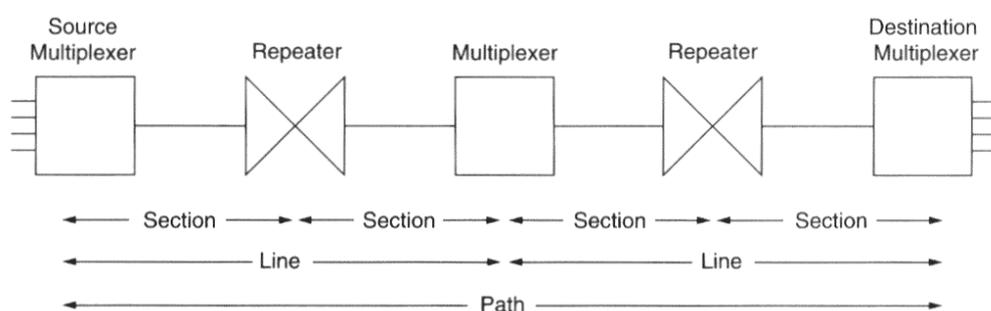


Figura 5.14: Um caminho **SONET**.

- ◆ A Figura 5.14 mostra um caminho **fonte - destino** com um multiplexador intermediário e repetidores intermediários.
- ◆ Na terminologia **SONET**, uma fibra indo diretamente de qualquer dispositivo a qualquer outro dispositivo, com nada entre eles é chamada **seção**.
- ◆ Um caminho entre dois multiplexadores (possivelmente com um ou mais repetidores no meio) é chamado **linha**.
- ◆ A conexão entre a fonte e o destino (possivelmente com um ou mais multiplexadores e repetidores) é chamada **caminho**.
- ◆ A topologia SONET pode ser uma malha, mas é frequentemente um anel duplo (*dual ring*).

- ◆ Um *frame* básico SONET é um bloco de 810 bytes, enviado a cada $125\ \mu\text{s}$.
- ◆ Como a tecnologia SONET é síncrona, *frames* são emitidos caso haja ou não haja conteúdo útil para ser enviado, a uma taxa de 8000 *frames/s*.
- ◆ Os *frames* SONET de 810 bytes são melhor descritos como um retângulo de bytes, de 90 colunas por 9 linhas, conforme mostrado na Figura 5.15.
- ◆ Assim, $8 \times 810 = 6480$ bits são transmitidos 8000 vezes por segundo, para uma taxa total de dados de 51.84 Mbps.
- ◆ Este é o canal básico SONET e é chamado STS-1 (*Synchronous Transport Signal-1*). Todos os troncos SONET são um múltiplo do canal básico STS-1.

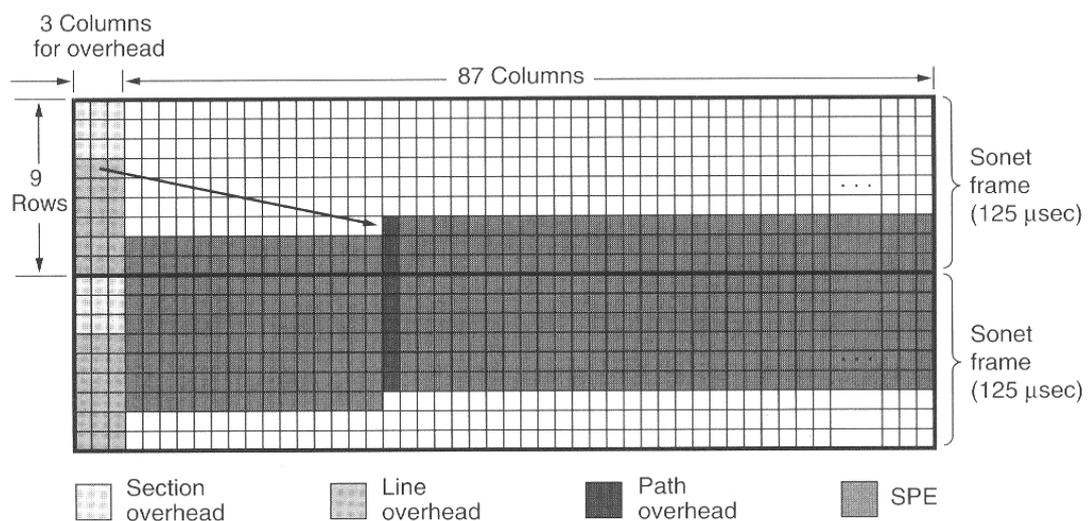


Figura 5.15: Dois *frames* SONET.

- As primeiras três colunas de cada *frame* são reservadas para informação de gerenciamento do sistema, conforme ilustrado na Figura 5.15.
- As primeiras três linhas contêm o cabeçalho da seção; as próximas seis contêm o cabeçalho de linha.
- O cabeçalho de seção é gerado e verificado no começo e no final de cada seção, ao passo que o *overhead* de linha é gerado e verificado no começo e no final de cada linha.

- As restantes 87 colunas contêm $87 \times 9 \times 8 \times 8000 = 50.112$ Mbps de dados do usuário.
- Entretanto, os dados do usuário, chamados SPE (*Synchronous Payload Envelope*), nem sempre começam na linha 1, coluna 4.
- O SPE pode começar em qualquer lugar dentro do *frame*.
- Um ponteiro para o primeiro byte é contido na primeira linha do cabeçalho de linha.
- A primeira coluna do SPE é o *overhead* do caminho.
- A habilidade do SPE em poder começar em qualquer lugar dentro do *frame* SONET, e mesmo criar dois *frames*, como mostrado na Figura 5.15, proporciona flexibilidade extra ao sistema.
- Por exemplo, se uma *payload* chega na fonte enquanto um *frame* SONET está sendo construído, ela pode ser inserida no *frame* corrente, ao invés de esperar até o começo do próximo.
- Esta característica também é útil quando a *payload* não cabe exatamente em um *frame*, como no caso de uma seqüência ATM, com células de 53 bytes. A primeira linha do cabeçalho de linha pode então apontar para o começo da primeira célula completa, para prover sincronismo.
- Os *overheads* de seção, linha e caminho contêm uma profusão de bytes usados para operação, administração e manutenção (são usados para *framing*, paridade, monitoramento de erros, IDs, *clocking*, sincronismo e outras funções).

- A multiplexação de várias seqüências de dados – chamadas tributários – é uma característica importante no padrão SONET. A multiplexação é mostrada na Figura 5.16.

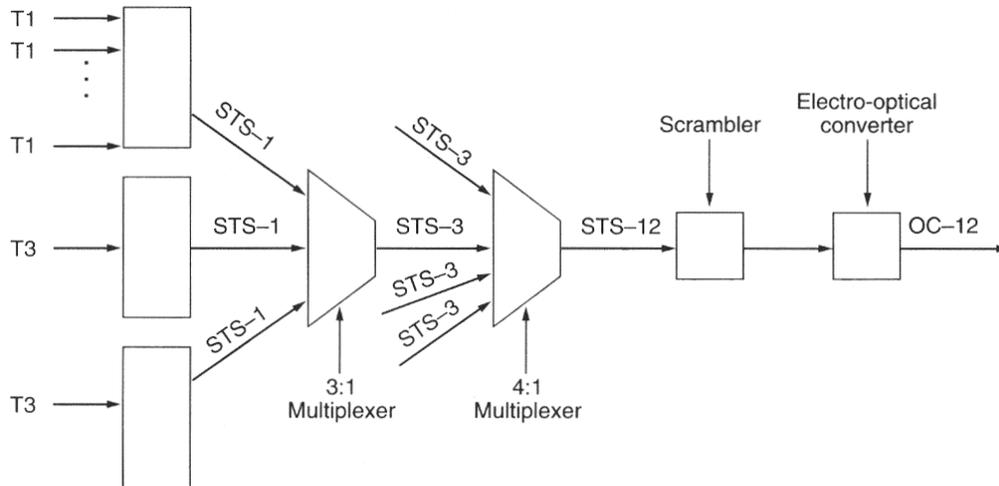


Figura 5.16: Multiplexação no padrão SONET.

- À esquerda vemos várias seqüências de entrada de baixa velocidade, as quais são convertidas para a taxa básica SONET STS-1 (na maior parte dos casos sendo preenchidas visando o arredondamento para 51.84 Mbps).
- A seguir, três tributários STS-1 são multiplexados em uma saída STS-3 de tamanho de seqüência 155.52 Mbps.
- Esta seqüência de dados, por sua vez, é multiplexada em uma saída final que tem 12 vezes a capacidade da seqüência STS-1.
- Neste ponto o sinal é embaralhado e é convertido de sinal elétrico para sinal óptico.
- A multiplexação é feita byte por byte. Por exemplo, quando 3 tributários STS-1 a 51.84Mbps são multiplexados em seqüências STS-3 de 155.52 Mbps, o multiplexador primeiro entrega 1 byte do tributário 1, então 1 byte do tributário 2, e finalmente 1 do tributário 3, antes de voltar para o tributário 1.
- A Figura análoga STS-3, equivalente à Figura 5.16 mostra, da esquerda para a direita, colunas de tributários 1, 2 e 3, nesta ordem, seguida de outra coluna de tributários 1, 2 e 3 e assim por diante, até a coluna 270.
- Um destes *frames* de 270 x 9 bytes é enviado a cada 125 μ s, equivalendo a uma taxa de dados de 155.52 Mbps.

- A hierarquia de multiplexação SONET é mostrada na Tabela 5.4. São definidas taxas para padrões STS-1 a STS-48.

SONET		SDH	Taxa de Dados (Mbps)		
Elétrico	Óptico	Óptico	Total	SPE	Usuário
STS-1	OC-1		51.84	50.112	49.536
STS-3	OC-3	STM-1	155.52	150.336	148.608
STS-9	OC-9	STM-3	466.56	451.008	445.824
STS-12	OC-12	STM-4	622.08	601.344	594.432
STS-18	OC-18	STM-6	933.12	902.016	891.648
STS-24	OC-24	STM-8	1244.16	1202.688	1188.864
STS-36	OC-36	STM-12	1866.24	1804.032	1783.296
STS-48	OC-48	STM-16	2488.32	2405.376	2377.728

Tabela 5.4: Hierarquia de multiplexação SONET.

- A portadora ótica correspondente à STS-*n* SONET é chamada OC-*n* pelo padrão SDH.
- Os nomes SDH são diferentes, e começam em OC-3 porque os sistemas baseados na CCITT não têm uma taxa próxima de 51.84 Mbps.
- A portadora OC-9 está presente porque se aproxima muito da velocidade dos troncos de maior velocidade usados no Japão. OC-18 e OC-36 serão usados no Japão no futuro.
- A taxa de dados total inclui todo cabeçalho.
- A taxa de dados SPE exclui o cabeçalho de linha e de seção.
- A taxa do usuário exclui todo o cabeçalho e somente conta as 86 colunas disponíveis para a *payload*.

Quando uma portadora, por exemplo, OC-3 não é multiplexada, mas transporta dados de apenas uma única fonte, a letra *c* (que significa concatenado) é adicionada à designação.

Assim, OC-3 indica uma portadora de 155.52 Mbps, consistindo de 3 portadoras OC-1 separadas, mas OC-3c indica uma seqüência de dados de uma única fonte a 155.52 Mbps.

As 3 seqüências OC-1 dentro de uma seqüência OC-3c são intercaladas por colunas, primeiro a coluna 1 da seqüência 1, depois a coluna 1 da seqüência 2, depois a coluna 1 da seqüência 3, seguida pela coluna 2 da seqüência 1, e assim por diante, conduzindo a um *frame* de 270 colunas por 9 linhas.

A quantidade de dados do usuário em uma seqüência OC-3c, é levemente superior à quantidade de dados em uma seqüência OC-3 (149.760 Mbps versus 148.608 Mbps) porque a coluna de cabeçalho de caminho é incluída apenas dentro do SPE, ao invés das 3 vezes que seria incluída, no caso de 3 seqüências OC-1 independentes.

Em outras palavras, 260 das 270 colunas são disponíveis para dados do usuário no OC-3c, enquanto apenas 258 colunas são disponíveis para dados do usuário no OC-3.

Frames concatenados de ordem superior (por exemplo: OC-12c) também existem.

A camada física SONET é dividida em 4 sub-camadas, como mostrado na Figura 5.17.

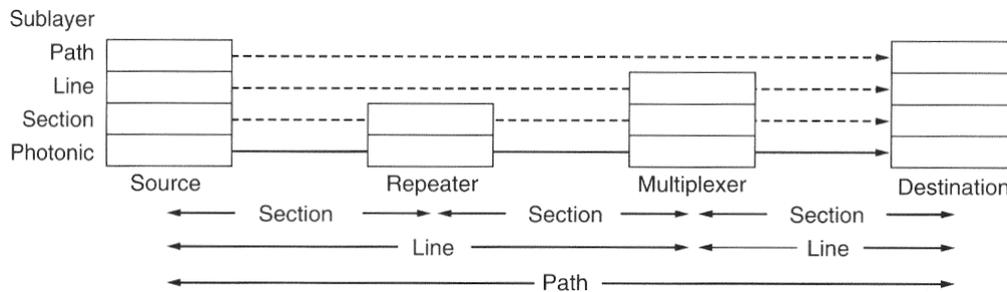


Figura 5.17: Arquitetura SONET.

A **sub-camada inferior** é a sub-camada fotônica, que especifica as propriedades físicas da luz e da fibra, a serem utilizadas.

As 3 sub-camadas remanescentes correspondem às seções, linhas e caminhos.

A **sub-camada de seção** lida com uma única fibra ponto-a-ponto, gerando um *frame* padrão em um lado e processando-o no outro.

Seções podem começar e terminar em repetidores, os quais apenas amplificam e regeneram os bits.

A **sub-camada de linha** é dedicada a multiplexar tributários múltiplos em uma linha e a demultiplexá-los no outro lado.

Para a sub-camada de linha, os repetidores são transparentes.

Quando um multiplexador entrega bits sobre uma fibra, espera-se que os bits cheguem no próximo multiplexador inalterados, não importa quantos repetidores sejam usados no caminho.

O protocolo na sub-camada de linha é estabelecido entre 2 multiplexadores e lida com aspectos tais como: quantas entradas estão sendo multiplexadas e de que forma.

Em contraste, a **sub-camada de caminho** lida com aspectos fim-a-fim.

CDM - Code Division Multiplexing

Classe SSMA

(Spread Spectrum Multiple Access):

- **Frequency Hopped Multiple Access (FH)**
- **Direct Sequence Multiple Access (DS) ou Code Division Multiple Access (CDMA)**

- A técnica Acesso Múltiplo por Divisão de Código pertence à classe das técnicas de múltiplo acesso denominadas SSMA - *Spread Spectrum Multiple Access*.
- As técnicas pertencentes a este grupo utilizam sinais que têm uma largura de banda de transmissão muitas ordens de grandeza maior do que a largura de banda de RF mínima requerida.
- Uma seqüência pseudo-aleatória (PN - *pseudo-noise sequence*) converte um sinal de banda estreita em um sinal semelhante a ruído, de banda-larga, antes da transmissão.

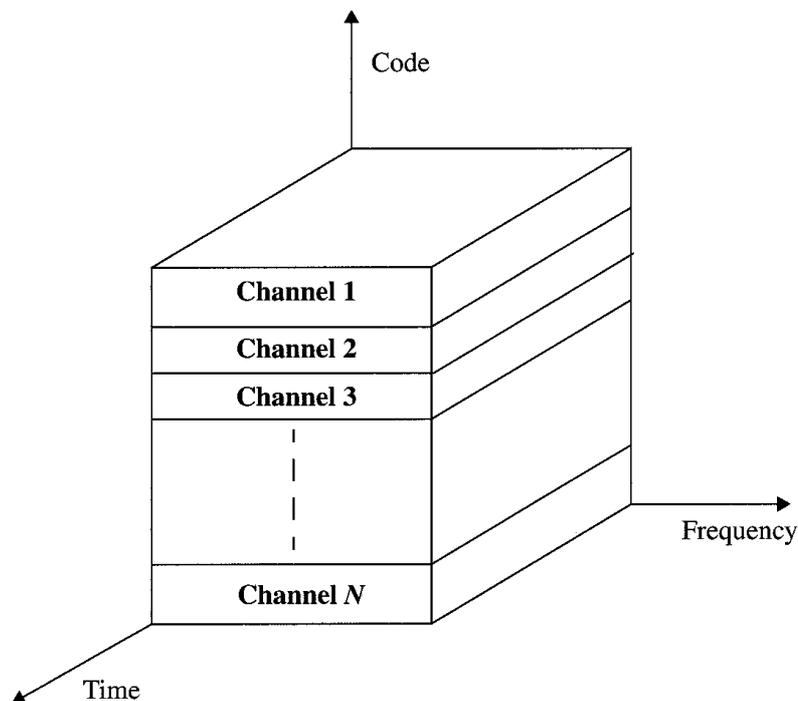
As técnicas SSMA permitem:

- imunidade à interferência,
- robusta capacidade de múltiplo acesso e
- eficiência no aproveitamento espectral (porque muitos usuários podem compartilhar a mesma banda em *spread spectrum* sem interferirem uns com os outros. Esta característica é de especial interesse no projeto de sistemas *wireless*).

Frequency Hopped Multiple Access (FHMA)

Frequency Hopped Multiple Access (FHMA) é um sistema de acesso múltiplo digital no qual **as frequências portadoras dos usuários individuais são variadas de forma pseudo-aleatória dentro de um canal de banda larga**, ao invés de permanecerem dentro de uma única banda, como em sistemas convencionais de comunicações.

A Figura abaixo ilustra como a técnica FHMA permite a múltiplos usuários ocuparem simultaneamente o mesmo espectro, **cada usuário ocupando um canal específico de banda estreita, em um particular instante de tempo, baseado no código particular daquele usuário.**



SSMA, em que cada canal recebe um código PN único, o qual é ortogonal ou aproximadamente ortogonal aos códigos PN utilizados por outros usuários.

A informação digital de cada usuário é quebrada em **blocos de tamanho uniforme**, os quais são transmitidos sobre **diferentes canais**, dentro da banda espectral alocada.

A mudança pseudo-aleatória das freqüências dos canais dos usuários torna aleatória a ocupação de um canal específico, a qualquer dado instante de tempo, permitindo o múltiplo acesso sobre uma larga gama de freqüências.

Se, eventualmente, dois usuários ocuparem o mesmo canal em um dado instante de tempo, o efeito perceptível para o usuário é irrelevante porque isto acontece durante um intervalo muito pequeno de tempo.

No receptor FH, um código PN localmente gerado é usado para sincronizar a freqüência instantânea do receptor com a freqüência instantânea do transmissor.

A qualquer instante no tempo, um sinal *frequency hopped* (pulado ou saltado em freqüência) somente ocupa um único e relativamente estreito canal.

Se a taxa de mudança da freqüência portadora é maior do que a taxa de símbolo (ou seja, **a freqüência da portadora muda mais de uma vez no intervalo de duração de um símbolo**), então o sistema é dito um *Fast Frequency Hopping System*.

Se o canal muda a uma taxa menor ou igual à taxa de símbolos (ou seja, **a freqüência da portadora muda após a duração de múltiplos símbolos**), o sistema é chamado *Slow Frequency Hopping*.

Um sistema *Frequency Hopped* permite um adequado nível de segurança, especialmente quando um grande número de canais são usados.

Neste caso, um receptor não intencionado (ou interceptador) que não conheça a seqüência pseudo-aleatória de *slots* de freqüência precisará ajustar o receptor para a freqüência correta tão rapidamente quanto necessário, de forma a buscar o sinal que deseja interceptar.

Code Division Multiple Access (CDMA)

O padrão CDMA é um padrão digital americano que foi desenvolvido pela Qualcomm, em San Diego, Califórnia e é intitulado *Interim Standard 95 (IS-95)*.

O padrão CDMA foi desenvolvido para uso em comunicações onde a necessidade de sigilo é extrema, porque é muito difícil, se não impossível, interceptar transmissões feitas por sistemas que empregam a tecnologia CDMA.

Assim, tecnologias *spread spectrum* foram originalmente empregadas em aplicações militares, onde um aumento na complexidade de implementação era justificado por duas particulares características:

1. É relativamente difícil detectar a presença de um sinal *spread spectrum* devido ao fato de que a energia do sinal é espalhada no espectro, através de uma larga banda (o sinal detectado se confunde com o ruído térmico de fundo, de baixa potência).
2. É mais difícil impedir que uma transmissão seja corretamente recebida através da transmissão de um forte ruído de interferência na mesma frequência (*jamming signal*), porque a energia do sinal usado para tal fim precisa também ser espalhada através de uma larga banda, não podendo ser focada em uma banda relativamente estreita.

- A tecnologia CDMA é uma tecnologia de banda larga *spread spectrum* que consiste na transmissão de sinais por espalhamento espectral, em que os usuários utilizam a mesma faixa de frequência durante todo o intervalo de tempo.
 - Os sinais de todas as chamadas são "espalhados" através de um amplo espectro de frequência.
 - Na recepção, os sinais são extraídos de um sinal que se assemelha ao ruído térmico de fundo do canal, por meio de um receptor que conhece o código para a específica chamada que deseja decodificar.
 - Esta técnica permite que inúmeras chamadas telefônicas sejam transmitidas simultaneamente sobre uma única frequência de rádio.
 - Como resultado, sistemas CDMA podem lidar com 10 a 20 vezes a capacidade de chamadas de sistemas celulares convencionais.
-
- Quando uma chamada telefônica é feita usando a tecnologia CDMA, o som da voz do usuário é convertido em um sinal digital.
 - O sinal digital é primeiro correlacionado com um código com características estatísticas semelhantes às de um ruído branco, chamado código pseudo-aleatório (*pseudo-noise code* - PN).
 - O correlator conduz a uma representação digital encriptada do sinal original, que será "espalhada" sobre um espectro de frequência de banda muito larga (1.25MHz).

Cada usuário tem sua própria seqüência de código PN, a qual é aproximadamente ortogonal a todas as outras seqüências PN.

Para detecção do sinal relativo à mensagem, o receptor necessita saber a seqüência PN usada pelo transmissor, pois o decorrelator usará esta seqüência de código única PN para extrair apenas a informação desejada.

Todas as outras palavras-código aparecem como ruído após a operação de decorrelação.

Cada usuário opera independentemente, sem qualquer conhecimento dos outros usuários.

Um sinal correlacionado com uma seqüência PN e decorrelacionado com a mesma seqüência PN retorna ao sinal digital original.

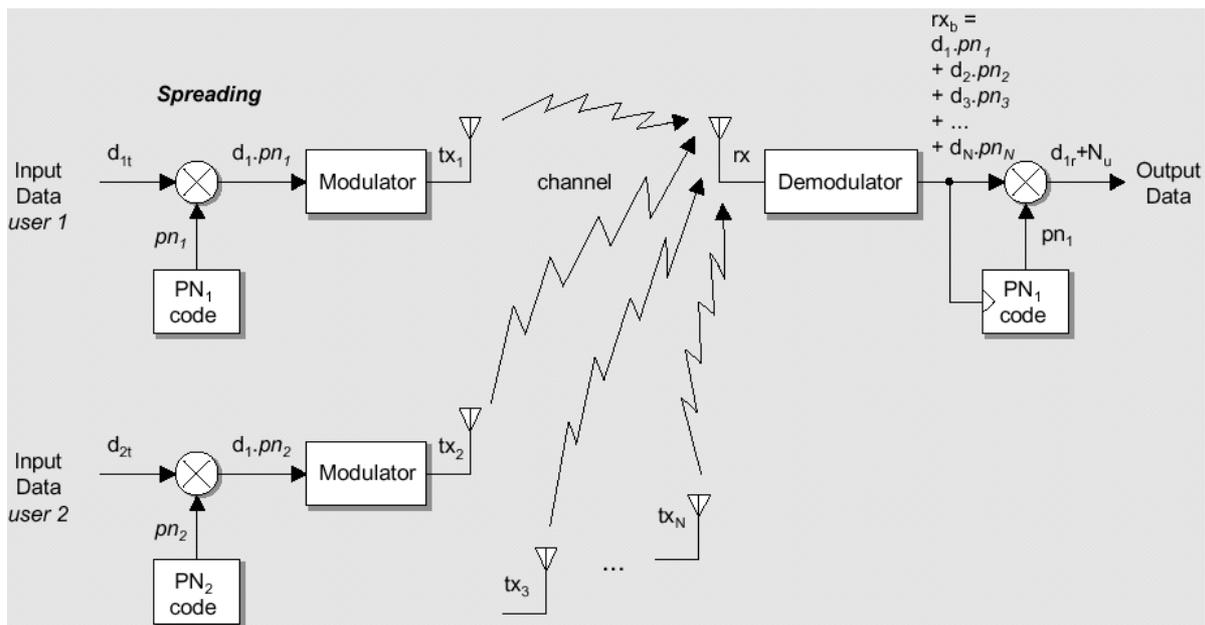
Uma operação de decorrelação do sinal com o código PN não associado ao usuário resultará em puro ruído, contendo informação não discernível.

Apesar de determinística, uma seqüência PN comporta-se como uma portadora com características de ruído branco, a qual é usada para espalhar a energia do sinal ao longo da banda.

A seleção de um bom código é importante, porque o tipo e o tamanho do código limitam a capacidade do sistema.

Usualmente são utilizados códigos conhecidos por códigos de Walsh.

Uma seqüência PN é uma seqüência pseudo-aleatória composta de 0s e 1s.



Blocos básicos de um sistema CDMA.

- Observe que no transmissor os dados binários dos N diferentes usuários $(d_{1t}, d_{2t}, \dots, d_{Nt})$ são diretamente multiplicados (correlação no tempo) pelas seqüências PN $(pn_1, pn_2, \dots, pn_N)$ para produzir os sinais a serem transmitidos.
- O efeito da multiplicação dos dados do usuário por cada seqüência PN associada é espalhar a banda original do sinal em uma banda resultante muito maior.
- A operação "XNOR" (ou exclusivo negado) é realizada entre cada bit dos dados a serem transmitidos pelo usuário e a seqüência PN associada a este usuário.
- Se o bit proveniente do usuário é "0" então a palavra-código gerada é o complemento dos bits da seqüência PN.
- Se o bit proveniente do usuário é "1" então a palavra-código gerada é a própria seqüência PN.
- Esta operação é denominada **spreading**.

Se uma palavra código contém n bits, o espectro ocupado pelo sinal transmitido é n vezes mais largo do que seria se um único bit fosse transmitido.

Isto ocorre porque a operação de multiplicação de cada bit de dado do usuário pela seqüência de n bits do gerador PN estreita a largura dos pulsos elétricos por um fator n , o que alarga seu espectro na mesma proporção.

Os sinais de outros canais CDMA ocupam a mesma banda de freqüências, mas utilizando diferentes códigos, o que permite a separação dos sinais no receptor.

Todos os usuários transmitem ao mesmo tempo, e a cada um é alocado todo o espectro de freqüência disponível para transmissão.

Um usuário CDMA tem todo o tempo e toda a banda disponíveis, diferentemente dos usuários FDMA e TDMA, mas a qualidade da comunicação CDMA diminui com o aumento do número de usuários (pois a taxa de erros de bits aumenta, para este caso, devido à interferência entre os sinais dos usuários).

⇒ Resumindo, em sistemas CDMA cada usuário tem seu próprio código PN, transmitindo sobre a mesma banda de RF, simultaneamente.

- ★ O processo básico de separação dos canais CDMA no receptor envolve a correlação do sinal recebido com cada uma das várias palavras-código (ou canais, em CDMA) atribuídos à célula.
- ★ O correlator produz uma medida de correlação através da operação $\rho = M - \bar{M}$ onde M representa o número de casamentos (*matches*) entre a seqüência PN do canal em questão e a seqüência do canal desejado e \bar{M} representa o número de descasamentos (*mismatches*) entre a seqüência PN do canal em questão e a seqüência do canal desejado, conforme exemplificado na Tabela abaixo.

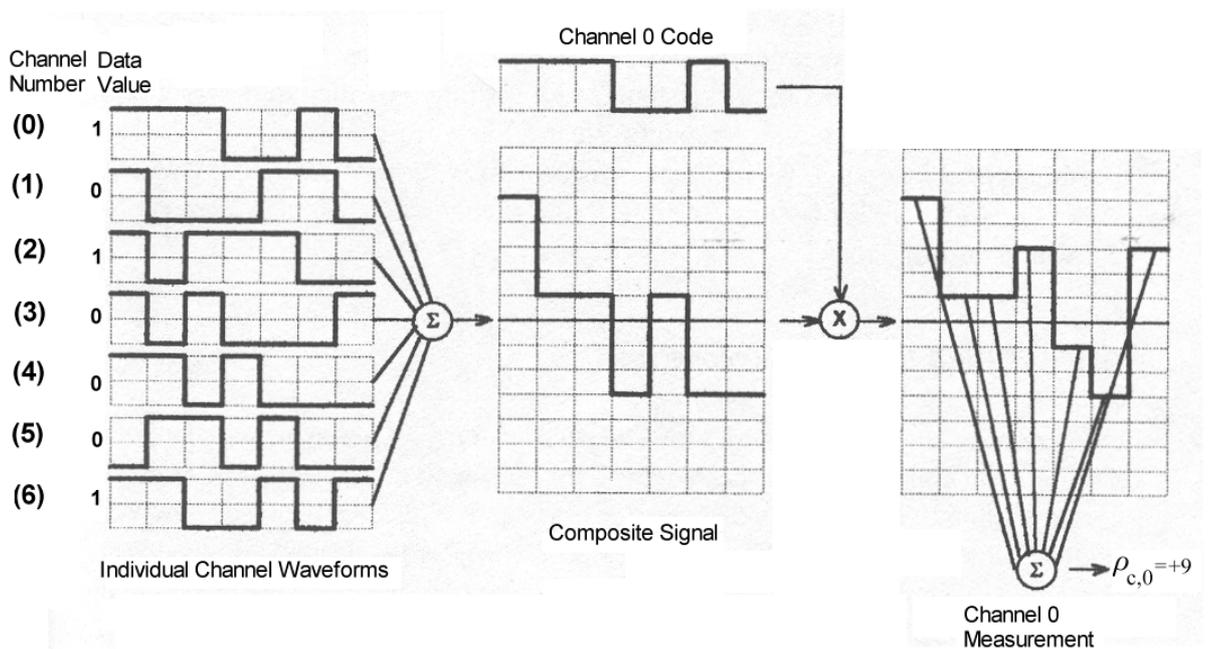
Nº do Canal	Código do Canal	Nº de <i>matches</i> M	Nº de <i>mismatches</i> \bar{M}	Correlação $\rho = M - \bar{M}$
0	1110010	7	0	+7
1	0111001	3	4	-1
2	1011100	3	4	-1
3	0101110	3	4	-1
4	0010111	3	4	-1
5	1001011	3	4	-1
6	1100101	3	4	-1

Exemplo de Códigos DSSS
 (*Direct Sequence Spread Spectrum*).

Código do canal desejado (Canal 0): 1110010.

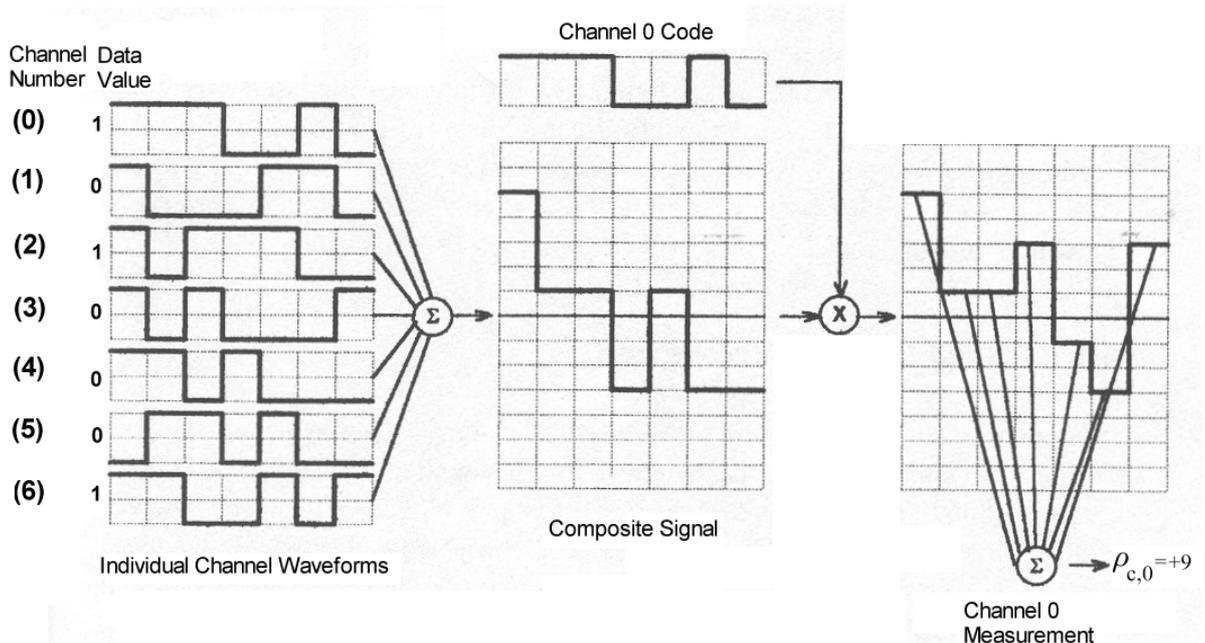
- ★ Como pode ser visto na Tabela, a palavra código do Canal 0 (canal desejado) tem 7 *matches* com ela própria e nenhum *mismatch* com ela própria, resultando em uma medida de correlação +7.
- ★ Por outro lado a palavra código do Canal 1 tem 3 *matches* com a seqüência do canal desejado e 4 *mismatches* com a seqüência do canal desejado, resultando em uma medida de correlação -1.
- ★ Note que as mesmas propriedades de correlação existem para todos os códigos de canais com respeito aos outros códigos presentes na Tabela.
- ★ Exemplos de formas de onda para os sete canais CDMA mostrados na Tabela são mostrados na Figura abaixo.

- ★ No exemplo são transmitidos simultaneamente os bits de dados 1 0 1 0 0 0 1, cada um deles codificado, respectivamente, pelo código (canal), 1110010 (0), 0111001 (1), 1011100 (2), 0101110 (3), 0010111 (4), 1001011 (5) e 1100101 (6).
- ★ No bloco de bits de dados 1010001, o bit de ordem 0 é codificado pelo Canal 0 e pertence ao usuário 0, o bit de ordem 1 é codificado pelo Canal 1 e pertence ao usuário 1, e assim sucessivamente.



Exemplo de codificação e decodificação CDMA para 7 canais.

- ★ Todas as formas de onda são somadas, resultando no sinal composto (*composite signal*), que é o sinal efetivamente transmitido.
- ★ Na etapa de decodificação, no receptor, o sinal composto é multiplicado por cada um dos 7 possíveis códigos, para separar os dados que foram codificados. Esta operação é denominada **despreading**.



- ★ Na operação de **despreading** mostrada na Figura o sinal composto é multiplicado pela seqüência PN associada ao Canal 0.
- ★ A soma dos valores na seqüência resultante indica uma medida de correlação $\rho_{c,0}$ entre o sinal composto e a seqüência PN associada ao Canal 0.
- ★ Se o valor absoluto desta medida for maior ou igual ao limiar definido pelo valor máximo de ρ ($|\rho_{c,0}| \geq 7$) então isto significa que o um bit do usuário de Canal 0 está sendo decodificado.
- ★ Se $\rho_{c,0} > 0$ o bit do usuário 0 será decodificado como tendo o valor lógico 1 e se $\rho_{c,0} < 0$ o bit do usuário 0 será decodificado como tendo o valor lógico 0.
- ★ De fato, no exemplo $\rho_{c,0} = +9$, significando que o bit do usuário 0 será decodificado com valor lógico 1.

- No padrão CDMA IS-95, os códigos são compostos por 64 palavras-código, cada uma com 64 bits, significando um limiar $|\rho_c| \geq 64$ para a medida de correlação utilizada na decisão de qual usuário está sendo decodificado no receptor.
- Devido à natureza da tecnologia *spread spectrum*, sistemas CDMA empregam o formato de reuso $N = 1$.
- Uma estação-base CDMA pode usar mais de uma portadora *spread spectrum* ao mesmo tempo, cada uma delas com frequências centrais distintas e ocupando uma banda de 1.25 MHz.
- Além de serem diferenciadas em frequência, cada uma das portadoras possui um conjunto diferente de códigos.
- Quando são utilizados Códigos Walsh, há um máximo de 64 possíveis códigos Walsh pseudo-aleatórios por portadora de 1.25 MHz.
- Teoricamente, podem existir 9 portadoras CDMA por célula.
- Alguns sistemas que empregam CDMA utilizam com sucesso 11 frequências por célula para PCS e de 2 a 4 frequências por célula para sistemas celulares.
- Em sistemas celulares, teoricamente, cada uma das portadoras pode lidar com 22 a 40 chamadas de voz.
- Entretanto, tanto em sistemas celulares quanto em sistemas PCS, o número médio de chamadas por portadora está situado entre 12 e 16.

Tolerância a Multi-percurso em Sistemas CDMA

Uma interessante característica dos sistemas CDMA é que estes sistemas são tolerantes e até beneficiados pelo desvanecimento resultante de multi-percurso ocorrido no canal de transmissão.

A razão básica para a tolerância dos sistemas CDMA a multi-percurso pode ser apreciada examinando o exemplo de códigos mostrado na Tabela abaixo.

Código do Canal	Note que cada código constitui um deslocamento cíclico com relação a todos os outros códigos presentes na Tabela.
1110010	
0111001	
1011100	Como os códigos selecionados possuem, por definição, baixa correlação entre eles, uma versão atrasada de qualquer código particular terá a mesma baixa correlação com uma versão não atrasada de si próprio.
0101110	
0010111	
1001011	
1100101	

Então, o efeito do atraso por multi-percurso em um ou mais bits *spread spectrum* representa nada mais do que o efeito da interferência intersimbólica de outro canal CDMA, efeito desprezível portanto, mesmo que a versão atrasada tenha o mesmo nível de potência do que o sinal primário.

No sistema CDMA, sinais atrasados resultantes de multi-percurso transportam a mesma informação contida no sinal primário e os sinais multi-percurso não geram interferência intersimbólica sobre o sinal primário, então é altamente vantajoso somar as potências dos sinais multi-percurso à potência do sinal primário através de um *rake receiver*.

Um *rake receiver* é um dispositivo que reagrupa a fase de sinais recebidos com diferenças de fase entre si (alinhando a fase de diferentes sinais recebidos sob reflexão (ecos)) em canais de transmissão com desvanecimento resultante de multi-percurso.

SDM - *Space Division Multiplexing*

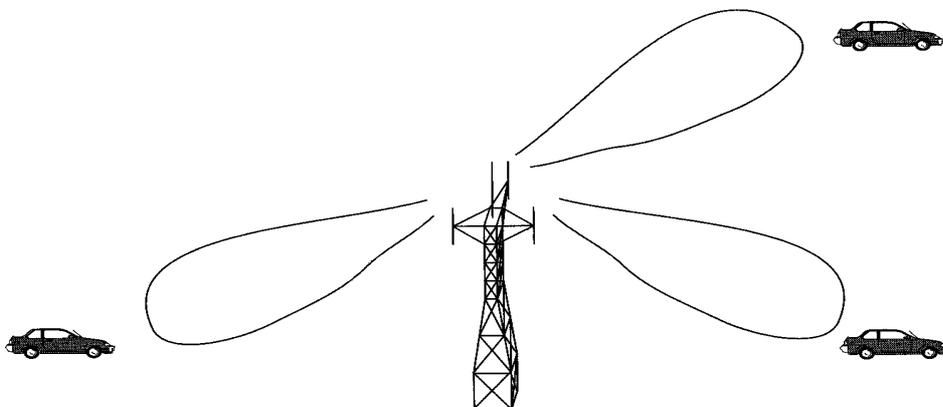
A tecnologia SDMA emprega técnicas avançadas de processamento para localizar as coordenadas e rastrear terminais fixos ou móveis, concentrando adaptativamente o sinal do sistema irradiante na direção dos usuários e afastando dos interferentes.

Esta tecnologia adaptativa permite atingir níveis superiores de supressão de interferência, melhorando o reuso de freqüências comparativamente às técnicas padrão de reuso de freqüências.

A técnica SDMA adapta a alocação de freqüências de acordo com a localização da maior parte dos usuários.

Através de técnicas de processamento espacial, a tecnologia de acesso SDMA pode criar dinamicamente um diferente setor para cada usuário, realizando uma alocação de freqüências/canal em tempo real.

- A técnica de Acesso Múltiplo por Divisão de Espaço (SDMA) controla a energia irradiada pelo sistema irradiante para cada usuário no espaço.
- Pode ser visto na Figura abaixo que a técnica SDMA serve a diferentes usuários através do uso de antenas *spot beam* (antenas de feixe pontual).
- As diferentes áreas cobertas pelo feixe da antena podem ser servidas pela mesma freqüência (em um sistema TDMA ou CDMA) ou diferentes freqüências (em um sistema FDMA).



Uma antena espacialmente filtrada, em uma ERB celular, servindo a diferentes usuários através do uso de *spot beams*.

- ★ No caso limite de largura de banda de feixe infinitesimal e infinita capacidade de rastreamento, antenas adaptativas implementam uma técnica SDMA ótima, provendo um único canal que é livre da interferência de todos os outros usuários na célula.

- ★ Na técnica SDMA todos os usuários dentro do sistema podem estar aptos a comunicar ao mesmo tempo, usando o mesmo canal.

- ★ Em adição, um sistema de antenas adaptativas perfeito deve poder rastrear componentes de multi-percurso individuais para cada usuário e combiná-los de forma ótima para coletar toda a energia do sinal disponível de cada usuário.

- ★ O sistema de antenas adaptativas perfeito não é realizável porque requer antenas infinitamente grandes, entretanto ganhos podem ser obtidos usando *arrays* de tamanhos razoáveis, com diretividade moderada.