

TE903 – Comunicação Digital

Comunicação sem Fio em Canais com Desvanecimento

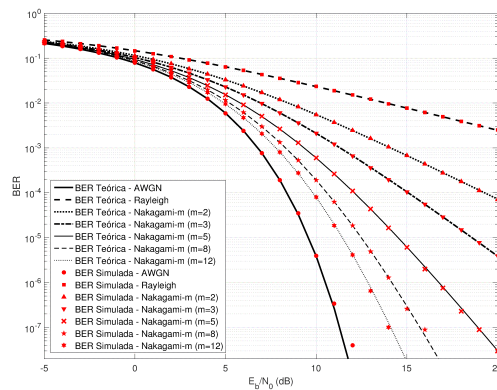
Evelio M. G. Fernández

21 de outubro de 2019

Evelio M. G. Fernández

TE903 – Comunicação em Canais com Desvanecimento

Desempenho da Modulação BPSK em Canais com *Fading*



Evelio M. G. Fernández

TE903 – Comunicação em Canais com Desvanecimento

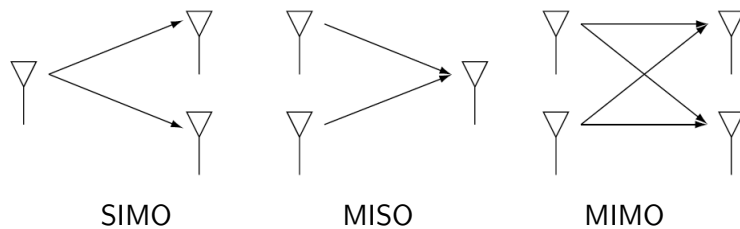
Notes

Notes

- Diversidade Temporal
 - Codificação de canal e entrelaçamento (*interleaving*) dos símbolos codificados com uma separação temporal superior ao tempo de coerência do canal
- Diversidade Espacial
 - Uso de múltiplas antenas transmissoras e/ou receptoras (sistemas MIMO, *Multiple Input Multiple Output*)
- Diversidade em Frequência
 - Utilização de uma largura de banda maior que a largura de banda de coerência do canal

Notes

Diversidade Espacial



- Codificação espaço-temporal → esquema de Alamouti.

Notes

- **Sistemas de portadora única com equalização.** Exemplo: GSM;
- **Sistemas com Modulação por Espalhamento Espectral-Sequência Direta.** Exemplo: IS-95 CDMA e IEEE 802.11b;
- **Sistemas Multiportadoras:** *Discrete Multi-Tone* (DMT) ou *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Exemplo: IEEE 802.11a, *Asymmetric Digital Subscriber Line* (ADSL), DVB-T, ISDB-T.

Modulação por Espalhamento Espectral – Motivação

- Rejeição de interferências intencionais;
- Redução da densidade espectral de potência (*low probability of detection, LPD, communication systems*);
- Redução do efeito de interferências por múltiplos percursos;
- Acesso múltiplo.

Notes

Notes

- ❶ O sinal ocupa uma banda muito maior do que a banda mínima necessária para enviar a informação;
 - ❷ O espalhamento é feito por meio da utilização de um código independente dos dados de informação;
 - ❸ No receptor o sinal original é recuperado através de uma operação de correlação entre o sinal recebido e uma réplica sincronizada do código utilizado na transmissão.
- Dois tipos fundamentais de espalhamento espectral:
 - ❶ Sequência direta – *Direct Sequence Spread Spectrum*, (DSSS);
 - ❷ Saltos de frequência – *Frequency Hopping Spread Spectrum*, (FHSS).

Sequências PN – Propriedades

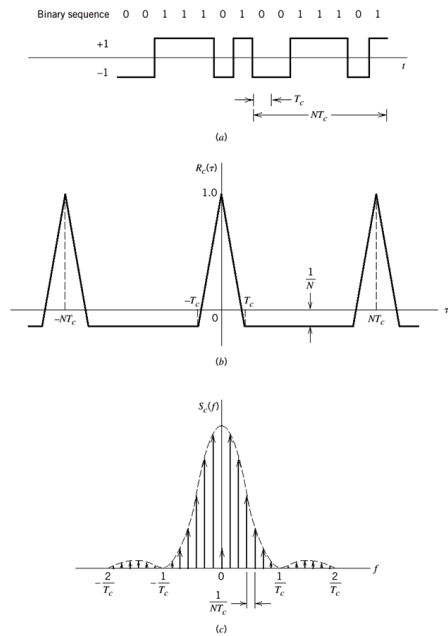
Seja a sequência PN: $\{c_k\} = c_0, c_1, \dots, c_{N-1}$,

- ❶ Balanceamento ou equilíbrio: Em cada período, o número de uns é sempre um a mais do que o número de zeros, isto é,

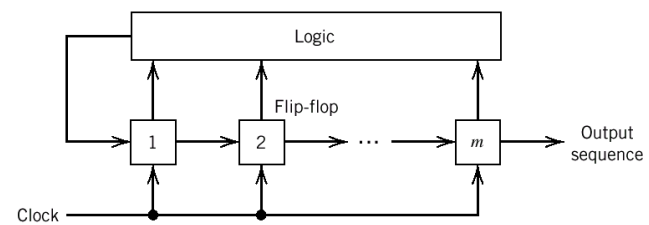
$$\sum_{k=0}^{N-1} c_k \approx 0;$$

- ❷ Propriedade da série ou *run*: Entre as séries de 1's e 0's em cada período, metade das séries de cada tipo tem tamanho um, um quarto tem tamanho dois, um oitavo tem tamanho três e assim por diante;
- ❸ Propriedade da correlação: A função de autocorrelação é periódica e tem valor binário, isto é,

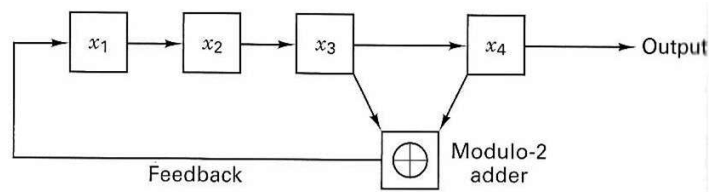
$$\sum_{k=0}^{N-1} c_k c_{k+i} \approx \begin{cases} N, & i = 0, \\ 0, & \text{fora.} \end{cases}$$



Geração de Sequências PN



Exemplo de Sequência PN

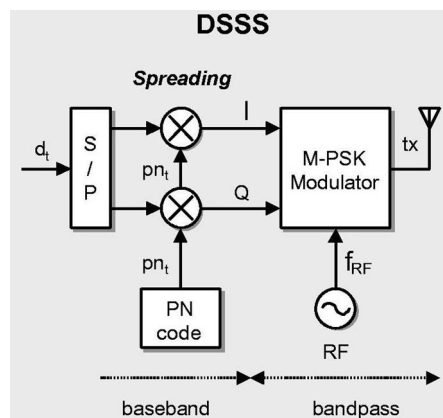


1000 0100 0010 1001 1100 0110 1011 0101
1010 1101 1110 1111 0111 0011 0001 1000

$$\{c_k\} = 00010011010111$$

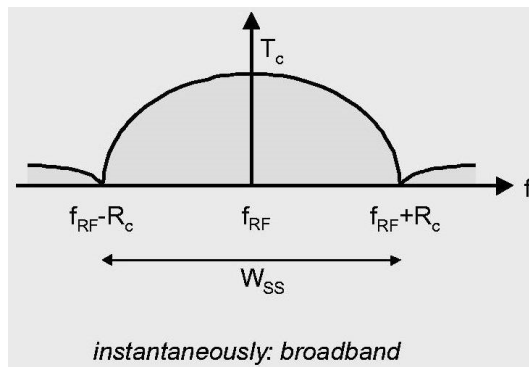
Notes

Espalhamento Espectral-Sequência Direta



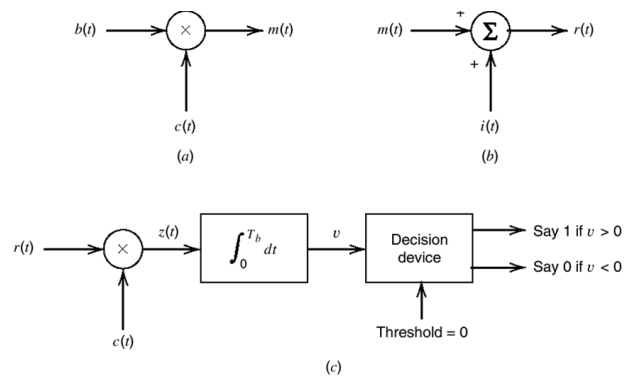
Notes

Espalhamento Espectral-Sequência Direta

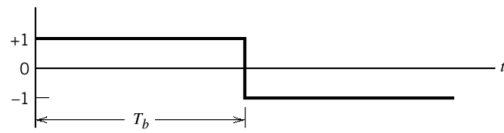


Notes

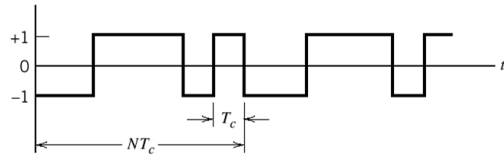
Equivalente Banda Base de um Sistema com Espalhamento Espectral



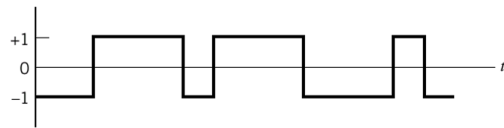
Notes



(a) Data signal $b(t)$



(b) Spreading code $c(t)$

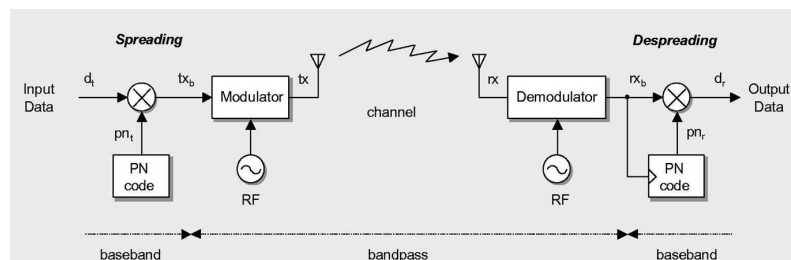


(c) Product signal $m(t)$

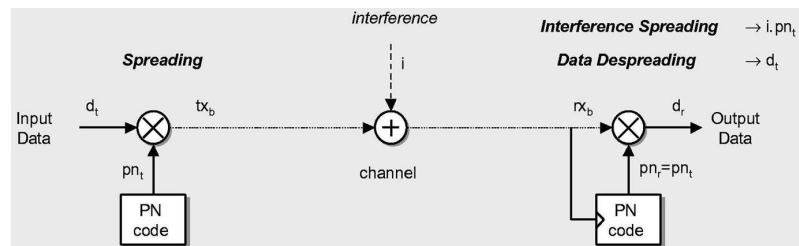
Notes

DSSS-BPSK

Notes



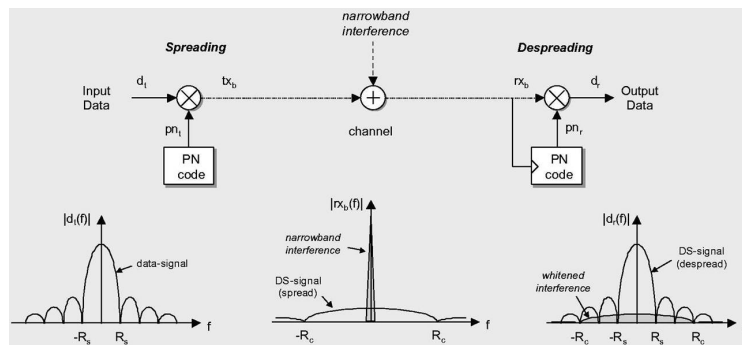
Desempenho na Presença de Interferências



Evelio M. G. Fernández

TE903 – Comunicação em Canais com Desvanecimento

Interferência de Banda Estreita



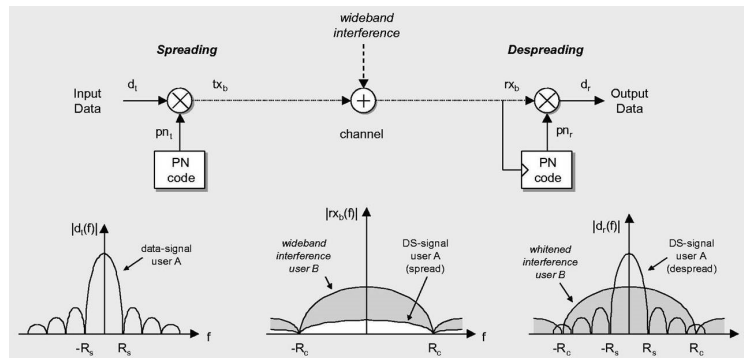
Evelio M. G. Fernández

TE903 – Comunicação em Canais com Desvanecimento

Notes

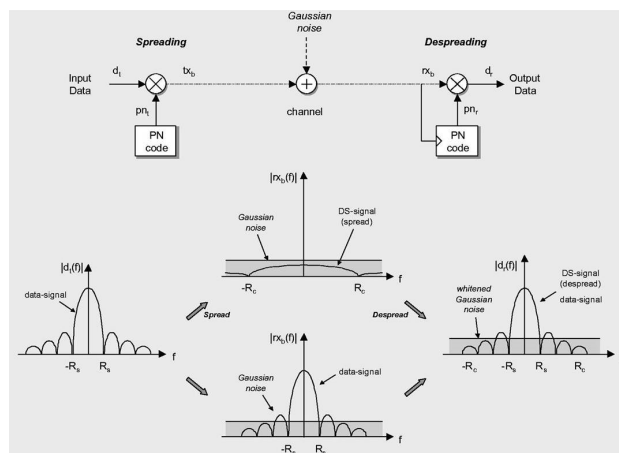
Notes

Interferência de Banda Larga



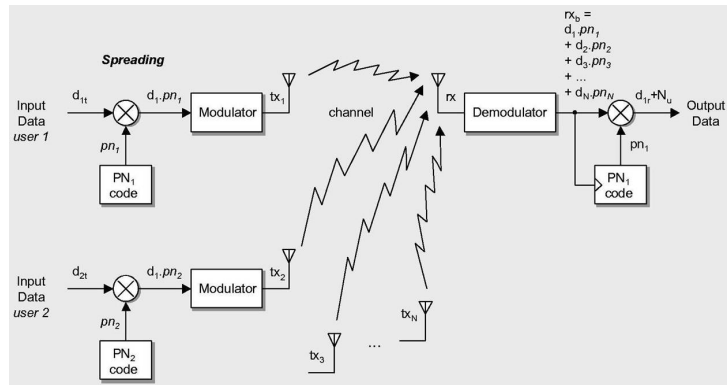
Notes

Desempenho na Presença de Ruído Gaussiano



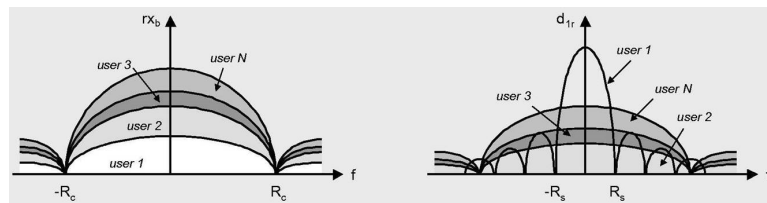
Notes

CDMA

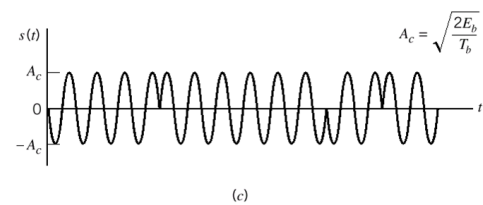
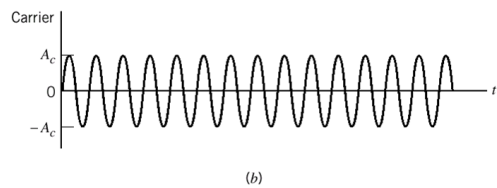
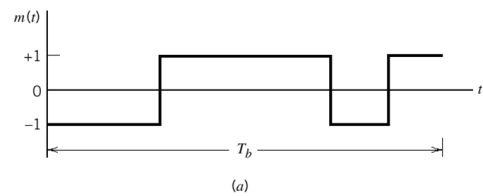
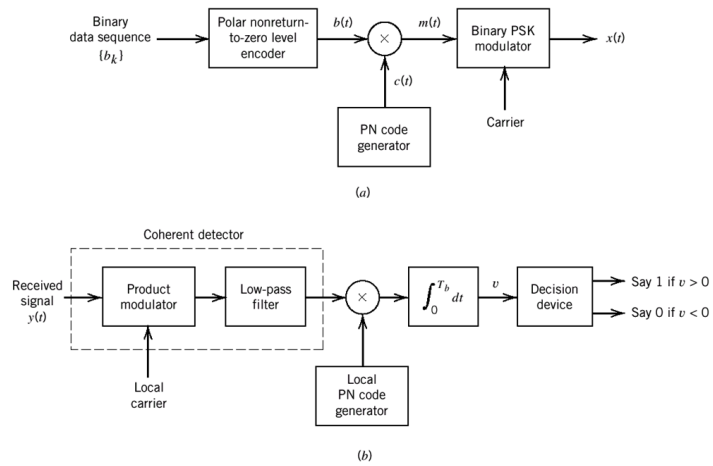


Notes

CDMA

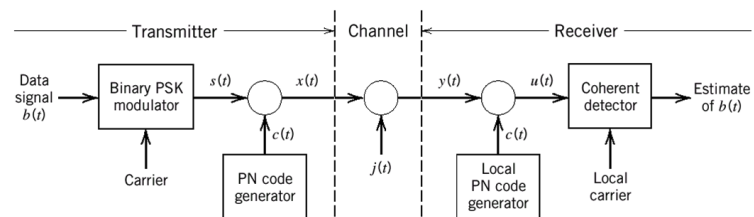


Notes



Notes

Notes



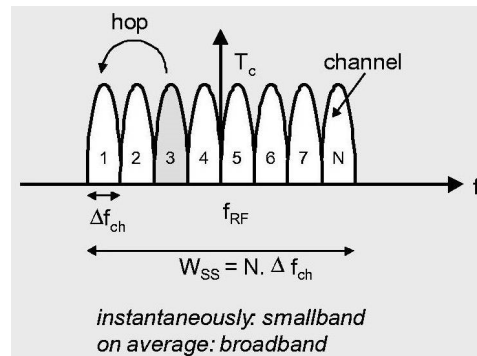
Notes

Exercícios

- 1 Considere um sistema DSSS com uma taxa de transmissão de informação de 1000 bits/s na presença de um sinal interferente. A potência média do sinal interferente é 20 dB maior que a potência média de sinal requerida no receptor. A relação sinal-interferência requerida no receptor é $\frac{E_b}{J_0} = 10$ dB. Determine a razão mínima entre a largura de banda do sinal com espectro espalhado, B_s , e a taxa de transmissão de informação.
- 2 Um sistema DSSS-BPSK deve operar com uma taxa de erro de bits na recepção de $\text{BER} \leq 10^{-5}$ e deve satisfazer ainda $\frac{E_c}{J_0} \leq -20$ dB. Detrmine o número mínimo de chips/bit requerido para este sistema.

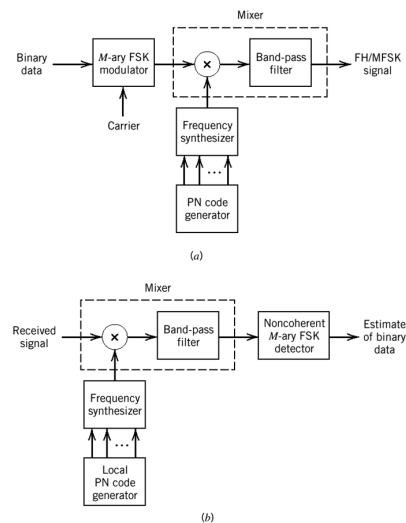
Notes

Espalhamento Espectral – *Frequency Hopping*



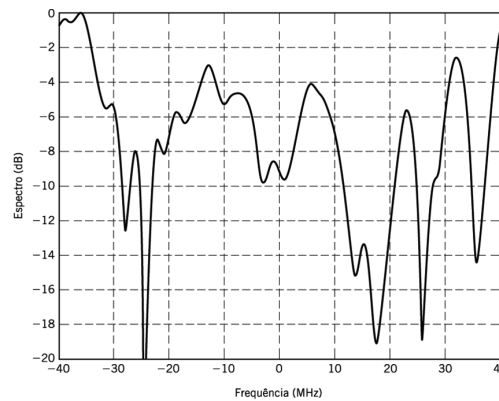
Notes

Chaveamento de Frequência M-ário Espalhado por Salto de Frequência



Notes

Notes



Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM

OFDM é utilizada nos seguintes sistemas:

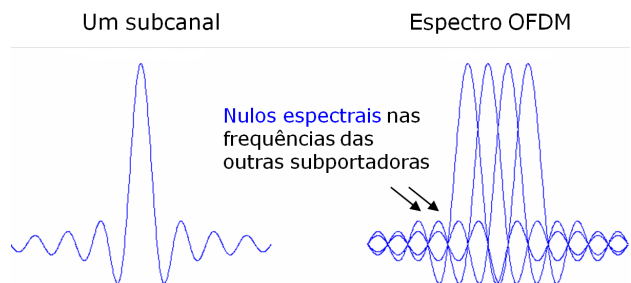
- IEEE 802.11a&g, WiFi (~ 54 Mbps)
- IEEE 802.16a, WiMAX (~ 100 Mbps)
- *Asymmetric Digital Subscriber Lines*, ADSL (~ 6 Mbps)
- *Very-high-speed Digital Subscriber Lines*, VDSL (~ 100 Mbps)
- *Digital Audio Broadcasting*, DAB
- *Digital Video Broadcasting*, DVB-T (~ 31 Mbps), DVB-S
- *Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial*, ISDB-T (~ 23 Mbps)
- *Long Term Evolution*, LTE (~ 171 Mbps)

OFDM é espectralmente eficiente, mas não é eficiente em termos de potência devido aos requerimentos de linearidade dos amplificadores de potência (PAPR: *Peak-to-Average Power Ratio*).

Notes

Notes

Ilustração de Subcanais no Domínio da Frequência



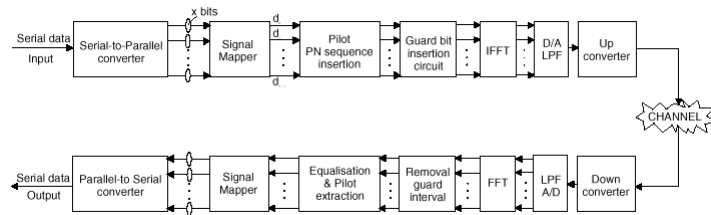
Portadora Única vs. Multiportadora em Termos de Seletividade em Frequência

Parâmetros de projeto para ambientes exteriores	Taxa de bits requerida	1 Mbps
	Espalhamento do atraso rms, σ_τ	10 μ s
	Largura de banda de coerência, $B_c = \frac{1}{5\sigma_\tau}$	20 kHz
	Condição de seletividade em frequência	$\sigma_\tau > \frac{T_s}{10}$
Sistema de portadora única	Duração do símbolo, T_s	1 μ s
	Seletividade em frequência	10 μ s $> \frac{1\mu s}{10} \Rightarrow$ SIM
Sistema multiportadora	Número de subportadoras	128
	Taxa de bits por subportadora	7,8125 kbps
	Duração do símbolo por subportadora	$T_{sub} = 128\mu s$
	Seletividade em frequência	10 μ s $> \frac{128\mu s}{10} \Rightarrow$ NÃO

Notes

Notes

Diagrama de Blocos de um Sistema OFDM



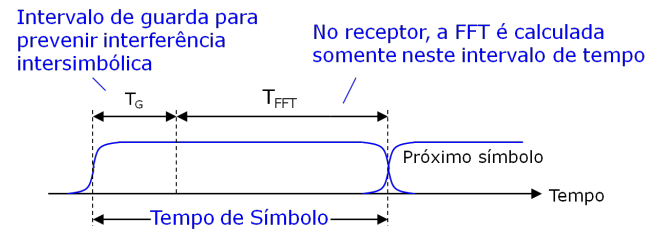
Modulação das Subportadoras e Codificação

- N subportadoras ou subcanais carregam N símbolos em paralelo. Um símbolo pode carregar 1 bit (BPSK), 2 bits (QPSK), 4 bits (16-QAM), ou 6 bits de dados (64-QAM). N símbolos em paralelo formam um símbolo OFDM.
- Para cada método de modulação existem diferentes opções de codificação para controle de erros. O código utilizado será determinante no cálculo da taxa de transmissão de dados. Ex: códigos convolucionais de taxa $1/2$, e puncionados com taxas $2/3$ e $3/4$.

Notes

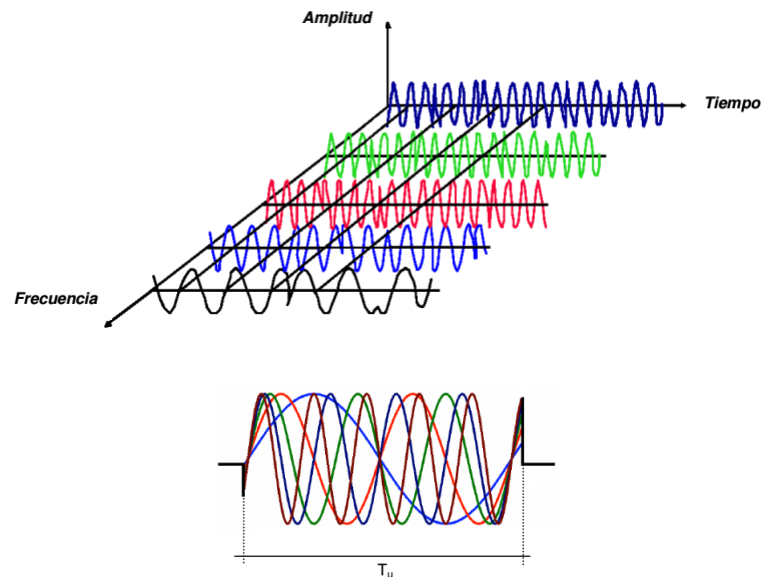
Notes

Sinal de uma Subportadora no Domínio do Tempo



- IEEE 802.11a&g: $T_G = 0.8\mu s$, $T_{FFT} = T_u = 3.2\mu s$
- IEEE 802.16a oferece alocação de banda flexível (i.e. símbolos de comprimento variável) e escolha de T_G :
 $T_G/T_u = 1/4, 1/8, 1/16$ ou $1/32$

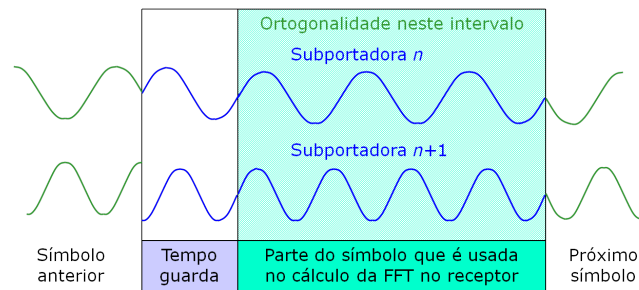
Subportadoras Ortogonais



Notes

Notes

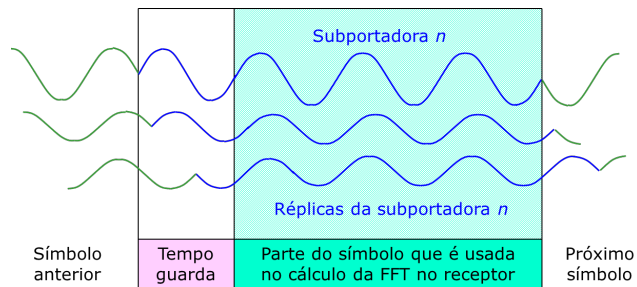
Subportadoras Ortogonais



Cada subportadora tem um número inteiro de ciclos no intervalo de cálculo da FFT. Se esta condição é válida, o espectro de um subcanal contém nulos espectrais nas frequências de todas as outras subportadoras.

Efeito do Multi-Percurso na Subportadora n

Tempo de guarda não excedido

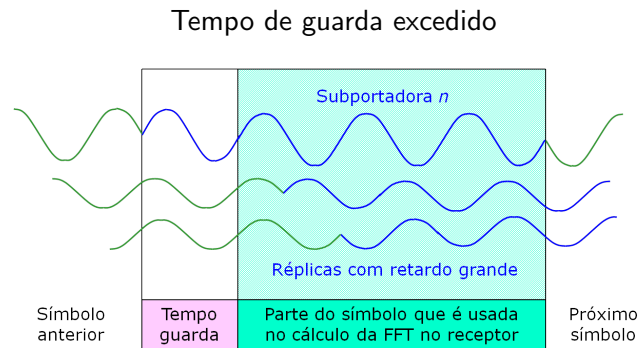


As réplicas não afetam as propriedades de ortogonalidade da subportadora no domínio da frequência. Ainda há nulos espectrais nas frequências das outras subportadoras.

Notes

Notes

Efeito do Multi-Percurso na Subportadora n



As réplicas afetam as propriedades de ortogonalidade dos subcanais no domínio da frequência. Não haverão mais nulos espectrais nas frequências das outras subportadoras → interferência inter-portadoras.

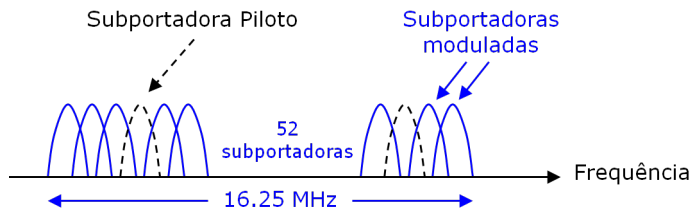
Resumo: Características da Modulação OFDM

- O desvanecimento devido à propagação por múltiplos percursos (*fading*) não provoca interferência intersimbólica ou interferência inter-portadoras se o intervalo de guarda é suficientemente longo.
- Porém, o *fading* provoca seletividade em frequências na banda de transmissão. Portadoras piloto são utilizadas para corrigir (equalizar) a magnitude e a fase das subportadoras recebidas nas frequências das portadoras piloto.

Notes

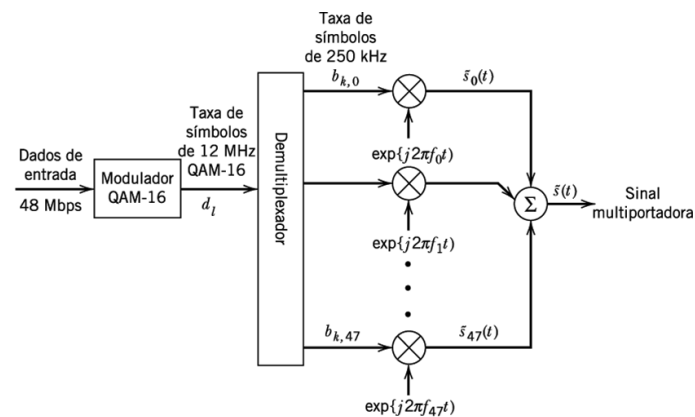
Notes

OFDM Exemplo 1: IEEE 802.11a (WLAN)



48 subportadoras moduladas + 4 subportadoras piloto. Centrado em cada subportadora há um subcanal de 312,5 kHz de largura de banda transportando dados com taxa de transmissão baixa (taxa de transmissão baixa $\Rightarrow$ sem interferência intersimbólica).

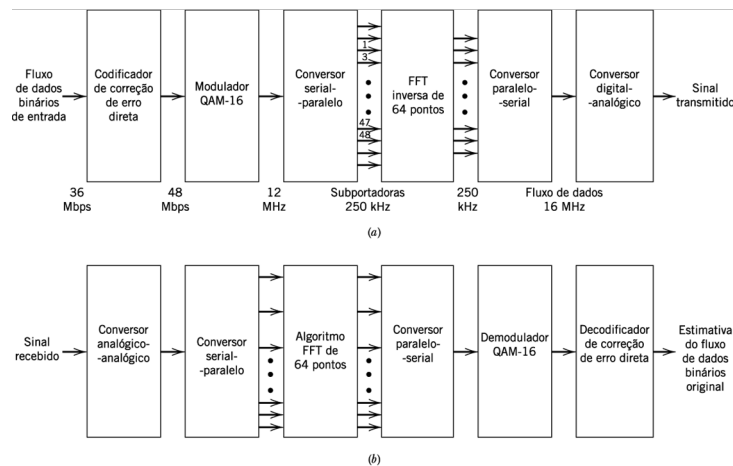
Processo de Modulação OFDM em IEEE 802.11a (WLAN)



Notes

Notes

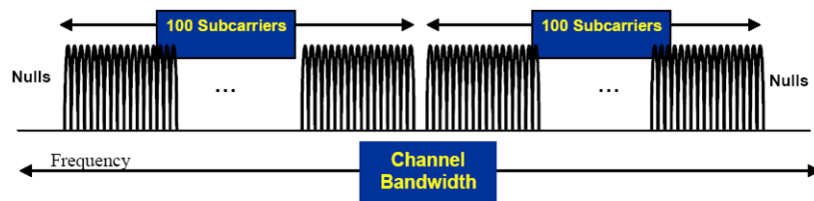
Transmissor e Receptor OFDM em IEEE 802.11a (WLAN)



Evelio M. G. Fernández

TE903 – Comunicação em Canais com Desvanecimento

OFDM Exemplo 2: IEEE 802.16a (WiMAX)



Somente 200 das 256 subportadoras são usadas:
192 subportadoras moduladas + 8 portadoras piloto.

Evelio M. G. Fernández

TE903 – Comunicação em Canais com Desvanecimento

Notes

Notes

Exercício 3

Considere uma rede WLAN utilizando modulação OFDM. A taxa de transmissão requerida é 32 Mbits/s. Suponha que a duração máxima da resposta impulsiva do canal é de 800 ns.

- a) Determine a separação entre subportadoras sabendo que o tempo de guarda é igual a 20% da duração total de um símbolo OFDM.
- b) Calcule a perda de SNR devida à inserção do intervalo de guarda.
- c) Sabendo que a largura de banda do canal é 20 MHz, quantas subportadoras compõem o sinal OFDM transmitido?
- d) Dentre os métodos de modulação BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-QAM e 64-QAM, selecione o mais apropriado para satisfazer a taxa de transmissão requerida.

Notes

Exercício 4

O padrão LTE utilizado na quarta geração de redes de comunicação móveis especifica uma largura de banda máxima de 30,72 MHz e tamanho da FFT $N = 2048$. A duração do símbolo útil OFDM é 66,67 μ s e a duração do prefixo cíclico 16,67 μ s.

- a) Determine o espaçamento entre subportadoras, Δf , e a eficiência de largura de banda, β . Qual deverá ser o máximo espalhamento de retardo do canal para que não ocorra interferência intersimbólica?
- b) Quantas subportadoras deverão ser desligadas ou moduladas com zeros se a largura de banda não puder exceder 18 MHz? Determine a máxima taxa de bits que pode ser transmitida por esta largura de banda sabendo que as subportadoras são moduladas em 16-QAM.

Notes

Exercício 5

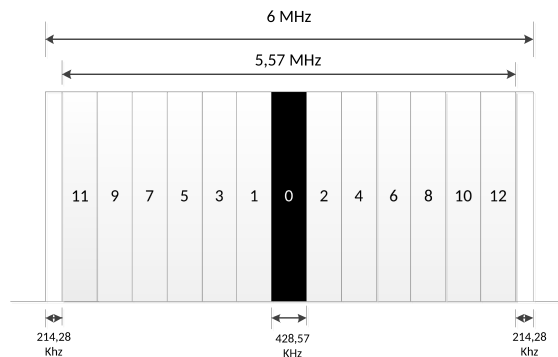
Deseja-se implementar um sistema OFDM capaz de transmitir uma taxa de bits mínima $R_b = 10$ Mbits/s. Devido à seletividade de frequência do canal, a separação entre subportadoras não deve exceder $\Delta f = 10$ kHz. Uma perda na SNR devida à utilização de prefixo cíclico de $\gamma^2 = -1$ dB é permitida.

- Determine a duração máxima do prefixo cíclico.
- Cada subportadora é modulada usando QPSK. Determine o número de subportadoras necessárias para atingir a taxa de bits desejada.
- Por questões práticas na implementação, o tamanho da FFT é selecionado como sendo uma potência de dois. Qual será neste caso a máxima taxa de bits que pode ser atingida?

Notes

Estudo de Caso: Sistema ISDB-T

ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial)



$$B_s = \frac{6 \text{ MHz}}{14} = \frac{3000 \text{ kHz}}{7} = 428,57 \text{ kHz}$$

$$B_w = N_s B_s = 13 \times \frac{3000}{7} = 5,571 \text{ MHz}$$

Notes

Parâmetros Modo 1 (2k):

- Portadoras por segmento: $L_s = 108$;
- Total de portadoras: $L = L_s \times N_s + 1 = 1405$;
- Espaçamento entre portadoras: $\Delta f = \frac{3000/7}{108} = \frac{250}{63} = 3,968$ kHz;
- Duração (útil) do símbolo OFDM: $T_u = \frac{1}{\Delta f} = 252 \mu s$;
- Frequência de amostragem da IFFT:

$$f_{IFFT} = \frac{2^n}{T_u} = \frac{2048}{252 \times 10^{-6}} = \frac{512}{63} \times 10^6 = 8,126 \text{ MHz}$$

Notes

Parâmetros do Sistema de Transmissão ISDB-T

Parâmetros	Valores
1 Número de segmentos	13
2 Largura do segmento	6 000/14 = 428,57 kHz
3 Banda ocupada	5,575 MHz (modo 1) 5,573 MHz (modo 2) 5,572 MHz (modo 3)
4 Número de portadoras	1 405 (modo 1) 2 809 (modo 2) 5 617 (modo 3)
5 Método de modulação	DQPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
6 Duração dos símbolos ativos	252 μs (modo 1) 504 μs (modo 2) 1 008 μs (modo 3)
7 Espaçamento de portadoras	Bws/108 = 3,968 kHz (modo 1) Bws/216 = 1,984 kHz (modo 2) Bws/432 = 0,992 kHz (modo 3)
8 Duração do intervalo de guarda	1/4, 1/8, 1/16, 1/32 da duração do símbolo ativos 63; 31,5; 15,75; 7,875 μs (modo 1) 126; 63; 31,5; 15,75 μs (modo 2) 252; 126; 63; 31,5 μs (modo 3)
9 Duração total dos símbolos	315; 283,5; 267,75; 259,875 μs (modo 1) 628; 565; 533,5; 517,75 μs (modo 2) 1 260; 1 134; 1 071; 1 039,5 μs (modo 3)
10 Duração do quadro de transmissão	204 símbolos OFDM
11 Codificação de canal	Código convolucional, taxa = 1/2 com 64 estados Puncionado para as taxas 2/3, 3/4, 5/6, 7/8
12 Entrelaçamento interno	Entrelaçamento intra e intersegmentos (entrelaçamento em frequência) Entrelaçamento convolucional com profundidade de interleaving 0; 380; 760; 1.520 símbolos (modo 1) 0; 190; 380; 760 símbolos (modo 2), 0; 95; 190; 380 símbolos (modo 3)

Notes

Parâmetros do Segmento OFDM – ISDB-T

Modo		Modo 1		Modo 2		Modo 3	
Largura da banda		3000/7 = 428,57 kHz					
Espaçamento entre frequências portadoras		250/63 kHz		125/63 kHz		125/126 kHz	
Número de portadoras	Total	108	108	216	216	432	432
	Dados	96	96	192	192	384	384
	SP ^a	9	0	18	0	36	0
	CP ^a	0	1	0	1	0	1
	TMCC ^b	1	5	2	10	4	20
	AC1 ^c	2	2	4	4	8	8
	AC2 ^c	0	4	0	9	0	19
Esquema de modulação das portadoras		QPSK 16QAM 64QAM	DQPSK	QPSK 16QAM 64QAM	DQPSK	QPSK 16QAM 64QAM	DQPSK
Símbolos por quadro		204					
Tamanho do símbolo efetivo		252 µs		504 µs		1008 µs	
Intervalo de guarda		63 µs (1/4),		126 µs (1/4),		252 µs (1/4),	
		31,5 µs (1/8),		63 µs (1/8),		126 µs (1/8),	
		15,75 µs (1/16),		31,5 µs (1/16),		63 µs (1/16),	
		7,875 µs (1/32)		15,75 µs (1/32)		31,5 µs (1/32)	
Comprimento do quadro		64,26 ms (1/4),		128,52 ms (1/4),		257,04 ms (1/4),	
		57,834 ms (1/8),		115,668 ms (1/8),		231,336 ms (1/8),	
		54,621 ms (1/16),		109,242 ms (1/16),		218,484 ms (1/16),	
		53,0145 ms (1/32)		106,029 ms (1/32)		212,058 ms (1/32)	
Frequência de amostragem da IFFT		512/63 = 8,12698 MHz					
Codificador interno		Código convolucional (1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8)					
Codificador externo		RS (204,188)					

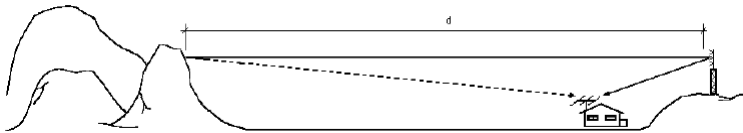
^a SP e CP são usados pelo receptor para fins de sincronização e demodulação.

^b TMCC é informação de controle.

^c AC é usado para transmitir informação adicional. AC1 é disponível em igual número em todos os segmentos, enquanto que AC2 é disponível somente em segmento de modulação diferencial.

Notes

Robustez contra Efeito Doppler e Multipercursos



Modo 1		
T_G	d	
$1/4 T_U$	63 μs	18,9 km
$1/8 T_U$	31,5 μs	9,45 km
$1/16 T_U$	15,75 μs	4,72 km
$1/32 T_U$	7,875 μs	2,36 km

Modo 2			Modo 3		
$T_{U2} = 2 \cdot T_{U1}$	T_G	d	$T_{U3} = 2 \cdot T_{U2}$	T_G	d
504 μs	$1/4 T_U$	126 μs	1008 μs	$1/4 T_U$	252 μs
	$1/8 T_U$	63 μs		$1/8 T_U$	126 μs
	$1/16 T_U$	31,5 μs		$1/16 T_U$	63 μs
	$1/32 T_U$	15,75 μs		$1/32 T_U$	31,5 μs
		37,8 km			75,6 km
		18,9 km			37,8 km
		9,45 km			18,9 km
		4,72 km			9,45 km

Notes

Taxa (máxima) de Transmissão de Dados – ISDB-T

Modulação da portadora	Código convolucional	Número de TSP transmitidos (Modos 1/2 3)	Taxa de dados Mbps			
			Intervalo de guarda	Intervalo de guarda	Intervalo de guarda	Intervalo de guarda
			1/4	1/8	1/16	1/32
DQPSK	1/2	156/312/624	3,651	4,056	4,295	4,425
	2/3	208/416/832	4,868	5,409	5,727	5,900
	3/4	234/468/936	5,476	6,085	6,443	6,638
	5/6	260/520/1040	6,085	6,761	7,159	7,376
	7/8	273/546/1092	6,389	7,099	7,517	7,744
16QAM	1/2	312/624/1248	7,302	8,113	8,590	8,851
	2/3	416/832/1664	9,736	10,818	11,454	11,801
	3/4	468/936/1872	10,953	12,170	12,886	13,276
	5/6	520/1040/2080	12,170	13,522	14,318	14,752
	7/8	546/1092/2184	12,779	14,198	15,034	15,489
64QAM	1/2	468/936/1872	10,953	12,170	12,886	13,276
	2/3	624/1248/2496	14,604	16,227	17,181	17,702
	3/4	702/1404/2808	16,430	18,255	19,329	19,915
	5/6	780/1560/3120	18,255	20,284	21,477	22,128
	7/8	819/1638/3276	19,168	21,298	22,551	23,234

[illegible][illegible]