



Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Ciências Exatas e da Natureza  
Centro de Informática

Pós-Graduação em Ciência da Computação

**MITIGAÇÃO ADAPTATIVA DE  
INTERFERÊNCIA MULTI-USUÁRIO EM  
REDES TH-PPM-UWB**

Átila Medeiros Bezerra

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Recife

28 de agosto de 2008

Universidade Federal de Pernambuco  
Centro de Ciências Exatas e da Natureza  
Centro de Informática

Átila Medeiros Bezerra

**MITIGAÇÃO ADAPTATIVA DE INTERFERÊNCIA  
MULTI-USUÁRIO EM REDES TH-PPM-UWB**

*Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em  
Ciência da Computação do Centro de Informática da Uni-  
versidade Federal de Pernambuco como requisito parcial  
para obtenção do grau de Mestre em Ciência da Com-  
putação.*

Orientador: *Prof. Dr. Paulo André da Silva Gonçalves*

Recife

28 de agosto de 2008

*Eu dedico este trabalho para as pessoas mais importantes da minha vida. A minha mãe Antônia, que sempre me encorajou a buscar novos desafios e correr atrás de meus ideais. A meu pai Eudes, que sempre fez de tudo para que seus filhos fossem honestos e responsáveis. A minha esposa Pollyanna, que me deu forças e me ajudou a continuar nos momentos de maiores dificuldades.*

## **AGRADECIMENTOS**

A minha tia Duci, que além de estar presente em várias passagens da minha vida me ajudou com a revisão desta dissertação. Aos meus amigos de trabalho e a Partec, por compreenderem quando precisei me ausentar para resolver assuntos relacionados ao mestrado. Ao meu orientador Paulo, pela dedicação e pelo aprendizado que ele me proporcionou.

*Nossas dúvidas são traidoras e nos fazem perder o bem que poderíamos  
conquistar, se não fosse o medo de tentar.*

—WILLIAM SHAKESPEARE

## RESUMO

A tecnologia UWB (Ultra-WideBand) é uma das mais promissoras para a comunicação em redes sem fio de curto alcance. Esta afirmação é reforçada pelo fato dos sinais UWB ultrapassarem facilmente obstáculos e pelo fato da tecnologia permitir uma banda passante ultra-larga associada a um baixo consumo de energia. As interferências multi-usuário (MUI) em redes UWB são um dos principais fatores que contribuem para uma degradação rápida da qualidade da comunicação na rede. Assim sendo, a adoção de um mecanismo de mitigação de interferências multi-usuário se faz necessário. Esta dissertação propõe um método de mitigação adaptativa de MUI para redes UWB TH-PPM (Time Hopping - Pulse Position Modulation). O método proposto, chamado de MSS-UWB, se baseia nos sistemas de múltiplos códigos com o objetivo de criar vários enlaces entre um mesmo par transmissor-receptor e realizar adaptação da taxa de dados através da seleção adaptativa destes enlaces. Simulações realizadas com o auxílio do Matlab demonstraram que a utilização de múltiplas seqüências TH para a mitigação adaptativa da MUI traz benefícios com relação à utilização do canal de comunicação.

### **Palavras-chave:**

UWB, TH-PPM, Mitigação de interferência, Adaptação, Desempenho.

## **ABSTRACT**

UWB (Ultra-WideBand) is one of the most promising technologies for communication in short-range wireless networks. That is enforced by the fact that UWB waves are able to easily cross physical obstacles. UWB also allows an extreme wide broadband with low energy consumption. On the other hand, multi-user interference (MUI) in UWB is one of the main factors that contribute for a fast degradation of communication quality in the network. Therefore, the adoption of an approach to control multi-user interferences is more than desired. This thesis proposes an adaptive MUI mitigation method for UWB TH-PPM (Time Hopping - Pulse Position Modulation), named MSS-UWB, based on multi-code systems. It aims at creating several links between a transmitter-receiver pair and performing data rate adaptation through adaptive selection of such links. Simulations performed with the aid of the Matlab tool demonstrate that the use of multiple TH sequences for the adaptive mitigation of MUI presents improvements to the communication channel.

**Keywords:**

UWB, TH-PPM, Interference Mitigation, Adaptation, Performance.

# SUMÁRIO

<b>Capítulo 1—Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos Gerais . . . . .	3
1.2 Estrutura da Dissertação . . . . .	3
<b>Capítulo 2—Ultra-wideband</b>	<b>5</b>
2.1 Visão Geral . . . . .	5
2.2 Rádio-Impulsivo . . . . .	8
2.3 Vantagens e Desvantagens . . . . .	8
2.3.1 Vantagens . . . . .	8
2.3.2 Desvantagens . . . . .	12
2.4 Técnicas de Modulação . . . . .	13
2.5 Técnicas de Acesso Múltiplo . . . . .	13
2.5.1 Time Hopping UWB . . . . .	16
2.5.2 Direct Sequence UWB . . . . .	17
2.6 Sistemas Multiband . . . . .	18
2.7 Camada MAC . . . . .	19
2.8 Aplicações . . . . .	24
2.8.1 Imagem e Radar . . . . .	24
2.8.2 Radar Veicular . . . . .	25
2.8.3 Comunicação Sem Fio . . . . .	26
2.9 Considerações Finais . . . . .	27



<b>Capítulo 3—Mitigação e Controle da Interferência Multi-usuário</b>	<b>28</b>
3.1 Conceitos básicos . . . . .	28
3.1.1 Modelo de sistema multi-usuário para UWB . . . . .	28
3.1.1.1 Modelo de sinal para SUD/iC . . . . .	32
3.1.1.2 Modelo de sinal para MUD . . . . .	34
3.2 Técnicas de mitigação de interferência no transmissor . . . . .	34
3.2.1 Comunicações síncronas (SUD/IC) . . . . .	34
3.2.1.1 Seqüência TH ortogonal . . . . .	34
3.2.1.2 Espalhamento de bloco em múltiplos estágios . . . . .	35
3.2.1.3 Ganho de processamento adaptativo . . . . .	36
3.2.1.4 Pré-Rake e filtragem da mitigação de MUI . . . . .	37
3.2.2 Comunicação assíncrona (MUD) . . . . .	38
3.2.2.1 Projeto da seqüência usando equações de congruência . . . . .	38
3.2.2.2 PCTH . . . . .	40
3.2.2.3 Espalhamento de blocos Assíncronos e zonas de correlação zero . . . . .	40
3.3 Detector ML . . . . .	41
3.4 Receptores lineares e técnicas de combinação de pulsos . . . . .	42
3.4.1 Receptor decorrelator . . . . .	42
3.4.2 Receptor MMSE . . . . .	43
3.4.3 Pulse discarding receivers and hard pulse combining . . . . .	44
3.4.3.1 Blinking receiver . . . . .	44
3.4.3.2 Chip Discriminator . . . . .	44
3.4.3.3 Combinação de Pulso Hard vs. Combinação de Pulso Soft	45
3.5 Cancelamento da Interferência de forma Iterativa e/ou Subtrativa . . . . .	45
3.6 Técnicas adaptativas de detecção de multi-usuário . . . . .	46
3.7 Considerações Finais . . . . .	47
<b>Capítulo 4—MSS-UWB</b>	<b>48</b>

4.1	Características . . . . .	48
4.2	Descoberta de Vizinhos . . . . .	50
4.3	Sincronização e comunicação . . . . .	52
4.3.1	Transmissão com sucesso . . . . .	53
4.3.2	Transmissão adiada . . . . .	54
4.3.3	Condição de disputa . . . . .	54
4.3.4	Colisão verdadeira . . . . .	55
4.4	Modelo de taxa de enlace diferenciada . . . . .	56
4.5	Algoritmo de adaptação . . . . .	57
4.5.1	Passo-a-Passo . . . . .	59
4.6	Considerações Finais . . . . .	60
<b>Capítulo 5—Simulação e Resultados</b>		<b>62</b>
5.1	Simulação . . . . .	62
5.1.1	Parâmetros de Simulação . . . . .	63
5.1.1.1	Taxa de Enlace Diferenciada . . . . .	63
5.2	Resultados . . . . .	64
5.2.1	UWB Convencional . . . . .	65
5.2.2	UWB com múltiplas seqüências . . . . .	67
5.2.3	MSS-UWB . . . . .	68
5.2.4	Comparação dos resultados . . . . .	71
5.3	Considerações finais . . . . .	75
<b>Capítulo 6—Conclusões e Trabalhos Futuros</b>		<b>77</b>
6.1	Trabalhos Futuros . . . . .	78

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Cenário de uma rede UWB em um casa digital . . . . .	2
2.1	Espectro de frequência e potência de transmissão do UWB . . . . .	6
2.2	Potência de transmissão de sinais UWB . . . . .	6
2.3	Ciclo de trabalho do UWB . . . . .	7
2.4	Sinal do UWB . . . . .	9
2.5	Esquemas de modulação binária . . . . .	14
2.6	Sinal do UWB . . . . .	14
2.7	MUI no detector de energia do receptor. . . . .	15
2.8	Divisão do espectro em sistemas multi-bandas UWB . . . . .	19
2.9	Aplicação UWB para rastreamento e localização. . . . .	25
2.10	Sistema automotivo de controle de colisões utilizando UWB . . . . .	25
2.11	Aplicação UWB para transferência de conteúdo multimídia . . . . .	26
3.1	Principais técnicas de mitigação e controle da MUI em redes UWB . . . . .	29
3.2	Estrutura de sinalização de uma sistema TH-UWB . . . . .	30
3.3	Receptor MF . . . . .	31
3.4	Sinal TH-PPM-UWB . . . . .	35
3.5	Seqüências de três usuários com diferentes ganho de processamento em um sistema TH-PPM SUD/IC. . . . .	37
3.6	Funções de auto-correlação e correlação cruzada dos códigos TH para os primeiros dois usuários. . . . .	38
4.1	Modelo de comunicação com múltiplas seqüências TH. . . . .	49

4.2	Modelo de comunicação com múltiplas seqüências TH. . . . .	49
4.3	Esquema TH utilizando múltiplas seqüências por usuários. . . . .	50
4.4	Cenário MSS-UWB mostrando esquemas de THSs . . . . .	51
4.5	Cenário MSS-UWB mostrando esquemas de THSs . . . . .	52
4.6	Transmissão com sucesso . . . . .	54
4.7	Transmissão adiada . . . . .	55
4.8	Sistema UWB usando múltiplas seqüências . . . . .	56
4.9	Sistema UWB usando múltiplas seqüências com diferentes taxas de dados para cada enlace . . . . .	57
4.10	Pulsos transmitidos em um sistema UWB usando o modelo de taxa de enlace diferenciado . . . . .	57
4.11	Adaptação do link à interferência. . . . .	58
5.1	Vazão do UWB convencional em diferentes níveis de MUI . . . . .	65
5.2	BER do UWB convencional em diferentes cenários de MUI . . . . .	66
5.3	Vazão de um sistema UWB utilizando múltiplas seqüências . . . . .	67
5.4	BER obtido do sistema UWB com múltiplas seqüências em diferentes cenários de MUI . . . . .	69
5.5	Vazão obtida com o MSS-UWB em diferentes cenários de MUI . . . . .	70
5.6	BER obtido com o MSS-UWB em diferentes cenários de MUI . . . . .	71
5.7	Comparação entre o melhor resultado de vazão dos três sistemas UWB . . . . .	73
5.8	Comparação entre resultados de BER dos três sistemas UWB . . . . .	74

## LISTA DE TABELAS

2.1	Classificação dos sinais baseada na largura de banda fracional . . . . .	7
3.1	Construções de seqüências e número máximo de colisões em funções de correlação aperiódicas para FH e TH. . . . .	39
5.1	Parâmetros utilizados para as simulação . . . . .	63
5.2	Parâmetros utilizados para as simulação . . . . .	64
5.3	Possíveis taxa de dados em Mbps utilizando 5 THSs . . . . .	64
5.4	Vazão em Mbps de um sistema UWB convencional em diferentes cenários de MUI . . . . .	66
5.5	BER do UWB convencional em diferentes cenários de MUI . . . . .	67
5.6	Vazão em Mbps de um sistema UWB utilizando múltiplas seqüências em diferentes cenários de MUI . . . . .	68
5.7	BER obtido do sistema UWB com múltiplas seqüências em diferentes cenários de MUI . . . . .	69
5.8	Vazão em Mbps obtida com o MSS-UWB em diferentes cenários de MUI	71
5.9	BER obtido com o MSS-UWB em diferentes cenários de MUI . . . . .	72
5.10	Comparação entre o melhor resultado de vazão dos três sistemas UWB .	73
5.11	Comparação entre resultados de BER dos três sistemas UWB . . . . .	75

# INTRODUÇÃO

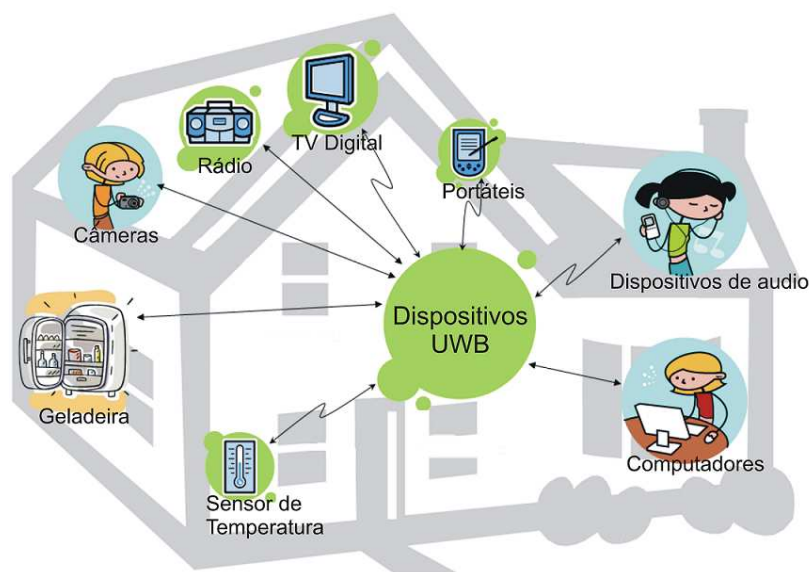
Atualmente, as pessoas tanto em seus relacionamentos inter-pessoais quanto profissionais precisam ter acesso a todo tipo de informação. Essa necessidade tem gerado uma busca crescente por conectividade e estimulado a utilização de redes sem fio. Quando a necessidade de acesso a conteúdos multimídia está presente a capacidade da rede sem fio prover uma alta vazão de dados se torna essencial. Dentre as tecnologias de redes sem fio atuais, a UWB (Ultra-WideBand) [54] é uma das mais promissoras no que diz respeito à taxa de transmissão de dados. O excesso de banda passante é uma de suas características principais.

De acordo com [50] o uso do UWB em sistemas de comunicação não é recente. A tecnologia UWB foi primeiramente utilizada por Guglielmo Marconi em 1901 para transmitir seqüências de código Morse sobre o oceano atlântico usando transmissores de rádio spark-gap. Aproximadamente cinqüenta anos depois, os militares aplicaram a transmissão baseada em pulso no desenvolvimento de radares.

Dos anos 60 aos anos 90, esta tecnologia foi de uso restrito das forças armadas e do Departamento de Defesa Americano (DoD), sendo utilizada para o desenvolvimento de sistemas de comunicações com altos requisitos de segurança. Entretanto, os recentes avanços nos microprocessadores e no método de chaveamento da tecnologia de semicondutores possibilitou o uso do UWB em aplicações comerciais. Com o interesse em comercializar o UWB, em 2002, a FCC divulgou um relatório de aceitação da tecnologia, liberando-a para fins comerciais em um espectro de frequência não-licenciado [56]. Tradicionalmente os sistemas UWB transmitem dados através de pulsos extremamente curtos, da ordem de nanossegundos ou menos. Cada pulso é transmitido sem portadora e ocupa instantaneamente toda a faixa de frequência UWB.

UWB é um tema atual que carece de pesquisas científicas. Até o momento, não existe um padrão definido embora o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) e a indústria estejam tentando desenvolver uma especificação. Dentre as principais carências de pesquisas relacionadas a UWB, se encontra a definição e o estudo de protocolos de acesso múltiplo ao meio de comunicação.

O cenário de casas digitais é um dos mais promissores para o uso da tecnologia UWB. Nele é encontrado uma grande variedade de sub-sistemas, como o de comunicação, de entretenimento, de segurança e vigilância, de controle de temperatura, de controle de energia e de iluminação, que fazem um uso constante da rede. Além disso, grande parte do tráfego é de conteúdo multimídia, necessitando de uma grande largura de banda. Na Figura 1.1 é ilustrado um cenário de uma casa digital com diferentes dispositivos se comunicando através de uma rede UWB.



**Figura 1.1** Cenário de uma rede UWB em um casa digital

Para compartilhar o meio de comunicação de forma eficiente entre vários dispositivos em uma rede UWB é necessário mitigar a interferência causada pelo acesso simultâneo ao meio de comunicação compartilhado. Esta interferência é conhecida por MUI (*Multi-User Interference*). A falta de um sistema de mitigação de interferências pode acarretar em

uma má utilização do canal de comunicação, causando muitas colisões na transmissão dos pacotes e diminuindo drasticamente a vazão de dados na rede. Isto pode inviabilizar a execução de aplicações multimídia quanto o meio estiver sendo compartilhado com um maior número de usuários.

Esta dissertação propõe um mecanismo de mitigação adaptativo de MUI para redes UWB que utilizam modulação PPM (*Pulse Position Modulation*) e TH (*Time Hopping*) como técnica de acesso ao meio. Em particular, o mecanismo proposto é denominado MSS-UWB (*Multi-Sequence Selection*) por ser baseado em redes que utilizam múltiplas seqüências TH-PPM para a comunicação a fim de realizar a adaptação da taxa de transmissão de dados através da combinação entre as seqüências TH utilizadas na transmissão.

## 1.1 OBJETIVOS GERAIS

Os objetivos gerais desta dissertação são descritos a seguir:

- Apresentar as características da tecnologia UWB;
- Apresentar o estado da arte sobre controle e mitigação de interferência no UWB;
- Identificar as características necessárias para uma solução de tratamento de interferência multiusuário para a tecnologia UWB;
- Propor um mecanismo de mitigação de MUI;
- Avaliar o desempenho do mecanismo proposto.

## 1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O restante desta dissertação está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentada a tecnologia UWB em detalhes. O Capítulo 3 apresenta conceitos sobre interferências em redes sem fio e o estado da arte sobre controle e mitigação de interferência em redes UWB. O Capítulo 4 apresenta o mecanismo de MUI proposto. Os resultados de avaliação de desempenho do mecanismo proposto são apresentados no Capítulo 5.



Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais desta dissertação e os trabalhos futuros a serem realizados.

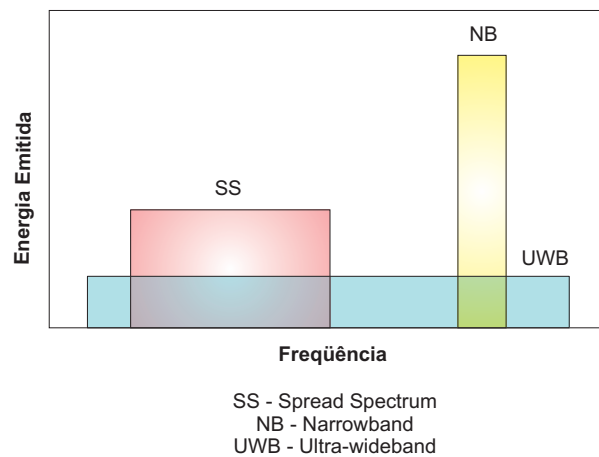
# ULTRA-WIDEBAND

Este capítulo apresenta inicialmente os conceitos básicos da tecnologia UWB, suas principais vantagens e desvantagens, as principais técnicas de modulação utilizadas na tecnologia UWB, bem como as técnicas de acesso múltiplo TH (*Time Hopping*) e DS (*Direct Sequence*) que podem ser utilizadas. Em seguida é apresentada uma abordagem que particiona o espectro UWB em múltiplas bandas e logo após são apresentadas propostas de MAC para a tecnologia UWB. E por fim, são apresentadas algumas das inúmeras aplicações da tecnologia UWB.

## 2.1 VISÃO GERAL

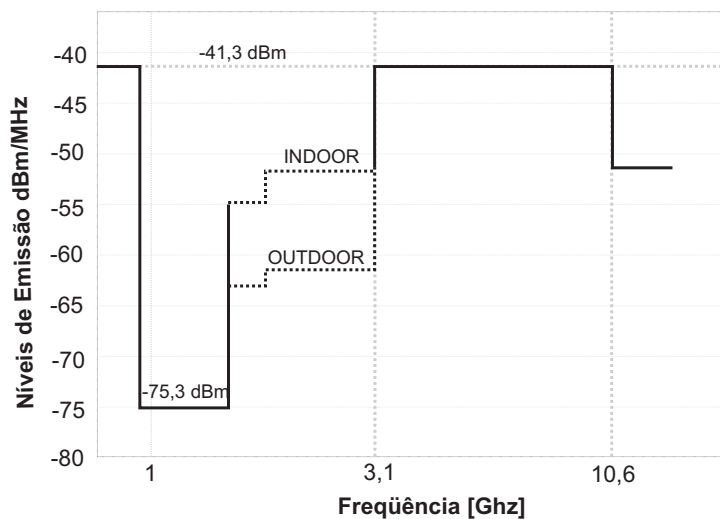
A UWB é uma tecnologia para a comunicação sem fio de curto alcance que pode ser utilizada tanto em ambientes *indoor* quanto *outdoor*. Em sistemas UWB, os dados são transmitidos através de pulsos extremamente curtos, da ordem de nanosegundos ou menos. Como ilustrado na Figura 2.1, a tecnologia UWB tradicional difere substancialmente de tecnologias que utilizam técnicas de espalhamento de sinal (*Spread Spectrum*) ou ainda daquelas que utilizam banda estreita (*Narrowband*). A potência de transmissão é significativamente menor e se utiliza uma ultra-larga faixa ou banda do espectro de rádio-freqüência (RF) para a transmissão de dados.

A FCC (*Federal Communication Commission*) [56] define várias categorias de transmissões, cada qual com restrições na potência de emissão. Estas restrições são apresentadas na Figura 2.2. O espectro de freqüência não-licenciado de 3,1 GHz a 10,6 GHz foi definido para uso em ambientes *indoor* e a potência de transmissão dos sinais UWB está a restrita a -41,3 dBm/MHz. Esta baixa potência de transmissão tem como objetivo



**Figura 2.1** Espectro de frequência e potência de transmissão do UWB

minimizar interferências em sistema de comunicação sem fio já existentes.



**Figura 2.2** Potência de transmissão de sinais UWB

A FCC definiu também a tecnologia UWB em termos de banda passante ocupada pelo sinal transmitido. Em um sistema UWB a banda passante ocupada pelo sinal é superior a 500 MHz ou a largura de banda fracional é superior a 20% [53]. A largura de banda fracional é definida como a razão entre a largura de banda sobre a frequência central, como mostrado na Equação 2.1:

$$B_f = \frac{BW}{f_c} = \frac{(f_H - f_L)}{\frac{(f_H + f_L)}{2}} \quad (2.1)$$

onde  $f_H$  e  $f_L$  representam, respectivamente, a frequência superior e inferior do espectro de frequência utilizado [56]. A frequência central de transmissão é definida como a média entre essas duas frequências, ou seja,  $\frac{(f_H + f_L)}{2}$ . A largura de banda fracional é um fator usado para classificar sinais em três tipos [50]: banda estreita, banda larga e banda ultra-larga conforme apresentado na Tabela 2.1.

Banda estreita	$B_f < 1\%$
Banda larga	$1\% < B_f < 20\%$
Banda ultra-larga	$B_f > 20\%$

**Tabela 2.1** Classificação dos sinais baseada na largura de banda fracional

Outra característica do UWB, é o seu baixo ciclo de trabalho (menor que 0,5%) para a recepção da informação [50]. O ciclo de trabalho é definido como a razão do tempo de transmissão do pulso ( $T_{on}$ ) sobre o tempo total entre transmissões ( $T_{on} + T_{off}$ ) conforme apresentado na Equação 2.2.

$$\text{Ciclo de Trabalho} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (2.2)$$



**Figura 2.3** Ciclo de trabalho do UWB

A Figura 2.3 ilustra o baixo ciclo de trabalho do UWB. Este baixo ciclo de trabalho permite que sistemas UWB utilizem uma potência de média de transmissão muito baixa,

da ordem de microwatts embora a potência instantânea de transmissão de um pulso UWB possa ser relativamente alta [50].

## 2.2 RÁDIO-IMPULSIVO

Diferente dos sistemas de comunicação de banda estreita tradicionais, que utilizam um sinal contínuo, denominado portadora, em uma frequência específica para modular informações a serem transmitidas [50], o UWB utiliza um sistema de transmissão de ondas eletromagnéticas capaz de emitir seqüências de pulsos extremamente curtos conhecida como o rádio impulsivo. O forma de pulso comumente utilizado pelos sistemas de rádio impulsivo é gerada a partir da segunda derivada da curva gaussiana apresentada na Equação 2.3

$$w_g(t, \sigma) = \frac{1 - \left(\frac{t^2}{\sigma^2}\right)}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(\frac{-t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (2.3)$$

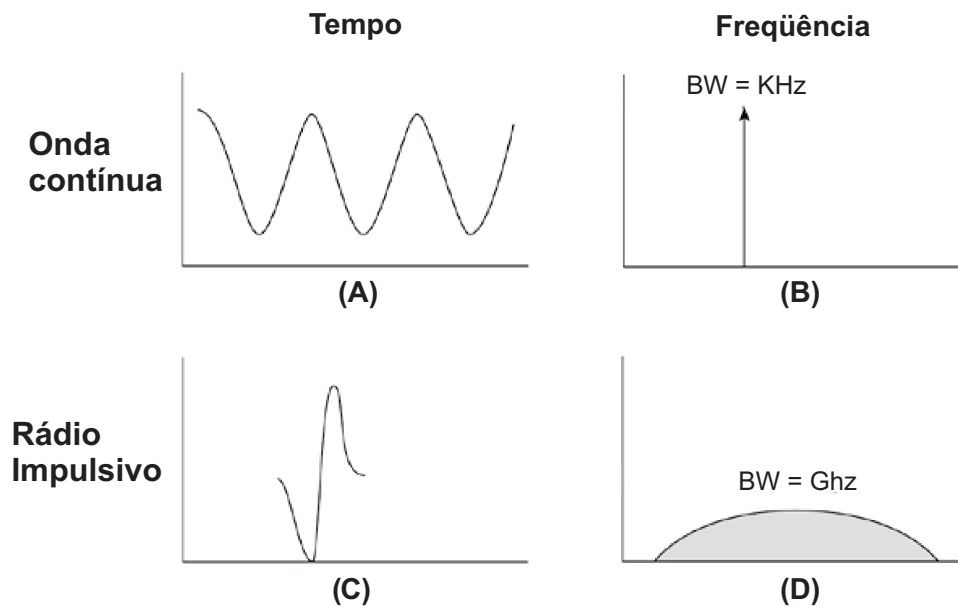
onde  $\sigma$  é um fator de escala no tempo. Na Equação 2.3 o valor de  $\sigma$  é igual a  $10^{-10}$ .

Na Figura 2.4 é comparado um sinal contínuo de banda estreita com um sinal de rádio impulso no domínio do tempo e no domínio da frequência. A comparação realizada no domínio do tempo mostra que diferente da onda contínua o radio impulsivo é enviado em intervalos de tempo. Quando comparadas no domínio da frequência é visto que o radio impulsivo espalha sua energia em um largo espectro de frequência, enquanto que ondas contínuas a energia é captada somente em um pequeno intervalo de frequência.

## 2.3 VANTAGENS E DESVANTAGENS

### 2.3.1 Vantagens

De acordo com [25] as características do UWB como: banda ultra-larga; sinal livre de portadoras e largura de pulsos ultra pequena trás uma série de vantagens e algumas



**Figura 2.4** Sinal do UWB

desvantagens e serão apresentadas a seguir.

**Alta taxa de dados:** O canal é definido como o espectro RF o qual a informação é transmitida. A equação de limite de capacidade de Shannon, Equação 2.4, mostra que a capacidade do canal aumenta mais rapidamente em função do tamanho da largura de banda ( $BW$ ) do que em função da relação sinal ruído ( $SNR$ ).

$$C = BW \times \log_2(1 + SNR) \quad (2.4)$$

onde,  $C$  é a capacidade do canal em bits/s;  $BW$  é a largura de banda em  $MHz$  e  $SNR$  é a razão sinal ruído que é calculado utilizando a Equação 2.5.

$$SNR = \frac{P}{BW} \times N \quad (2.5)$$

onde,  $P$  é a energia do sinal recebido e  $N$  é a densidade espectral da energia do ruído em ( $W/Hz$ ).

A equação de Shannon mostra que é possível aumentar a capacidade do canal aumentando a largura de banda. Entretanto esse aumento da largura de banda acarreta um aumento exponencial da energia necessária para a transmissão. A tecnologia UWB

é capaz de conseguir altas taxas de dados usando uma quantidade de energia muito baixa.

**Comunicações com múltiplos acessos:** A grande largura de banda do UWB possibilita o compartilhamento do espectro com uma grande quantidade de usuários. Além disso, o acesso múltiplo é realizado normalmente usando multiplexação por divisão de código em conjunto com o esquema de modulação PPM que possibilita uma boa correlação entre os códigos gerados e isola o multi-caminho.

**Geolocalização e facilidade de penetração:** os sinais das comunicação de banda estreita usam uma grande quantidade de portadoras, divididas em diferentes frequências, para conseguir implementar uma maior largura de banda. Ao se aumentar a frequência destes sinais é aumentada também as perdas relacionadas a propagação. Por causa da baixa frequência central do UWB e possível ter um alto potencial para atravessar obstáculos como paredes. Isto se justifica primeiramente pela dependência da frequência na penetração de materiais pelos sinais RF.

**Baixa probabilidade de interceptação e detecção:** a probabilidade de interceptação e detecção de um sinal UWB é reduzida devido à necessidade de monitorar uma faixa de frequência ampla e devido à baixa potência do sinal transmitido.

**Simplicidade e custo do hardware:** As tecnologias baseadas em portadoras tradicionais modulam e demodulam complexas portadoras analógicas. Elas fazem uso de amplificadores que usam uma energia significativa para tratar as ondas em diferentes portadoras. Os dispositivos UWB não necessitam de amplificadores e seus transmissores podem modular diretamente o sinal de banda base eliminando componente e reduzindo a quantidade de circuitos.

**Baixa energia de operação:** Uma outra razão para o baixo consumo de energia dos dispositivos UWB é a transmissão de pequenos impulsos constantemente em contraste

com a transmissão sobre ondas contínuas utilizadas pela maioria dos sistemas de comunicação. Por causa disto, os *chipsets* UWB não precisam converter o sinal RF (*Radio Frequency*) em sinais IF (*Intermediate frequency*), o que dispensa a necessidade de osciladores, mixadores e outros componentes que requerem energia.

**Componentes multi-caminho do UWB podem ser resolvidos diretamente:** A interferência multi-caminho acontece em sistemas de comunicação sem fio quando ecos ocasionados pela reflexão do sinal em obstáculos chegam no receptor imediatamente depois do sinal original. O uso de pequenos pulsos pelo UWB minimiza a possibilidade de multi-caminho, pois estes pulsos em diferentes multi-caminhos tendem a não se sobrepor no tempo, não interferindo entre si. Nos sistemas de onda contínua os sinais pertencentes a um mesmo componente multi-caminho sempre se sobrepõem causando o desvanecimento do seu próprio sinal.

**Acurácia para localização:** permite que sistemas de localização baseados em rádios UWB alcancem uma boa acurácia<sup>1</sup> pelo fato de serem utilizados pulsos de curta duração que são transmitidos sequencialmente em curtos intervalos de tempo. O sistema de localização baseado em rádios UWB proposto em [61] alcança uma acurácia de 15 a 30 cm.

**Persistência para comunicações NLOS:** Geralmente, sistemas de localização utilizando sinais RF apresentam melhores resultados sobre condições de LOS (*Line Of Sight*) onde é minimizada a interferência dos componentes multi-caminho. Utilizar técnicas convencionais pode se tornar difícil em alguns ambientes como a bordo de navios onde estrutura de metal do navil aumenta os efeitos de multi-caminho. Porém os sinais UWB se propagam bem a bordo de navios, ou dentro de objetos redondos por causa de suas baixas frequências.

---

<sup>1</sup>Define o quão próxima uma estimativa de localização de um objeto está de sua localização real.



### 2.3.2 Desvantagens

**Potencial de interferência em sistemas existentes:** A máscara de emissão de energia definida pela FCC deu uma proteção extra para os dispositivos UWB. Entretanto, a grande largura de banda do UWB sobrepõem frequências já utilizadas por outras tecnologias como é o caso da faixa de frequência de  $2,4\text{ GHz}$  que atualmente já é utilizada por sistemas de comunicação sem fio de alcance local (WLAN), como o IEEE 802.11, e sistemas de comunicação sem fio de alcance pessoal (WPAN), como o Bluetooth. Na maioria das vezes o sinal UWB é tido como um ruído para muitos receptores por causa do espalhamento da energia do sinal sobre uma banda ultra-larga. Entretanto estudos como os de [2, 59, 33] avaliaram que sistemas UWB podem tanto causar interferência como ser alvo de interferência causada por outros sistemas de comunicação, como GPSs (*Global Position System*) e sistemas de navegação de aviões.

**Complexo tratamento do sinal:** O projeto de dispositivos para sistemas de banda estreita que usam portadoras multiplexadas por divisão de frequência apresenta um claro desenvolvimento, ou seja, os dispositivos precisam considerar somente as faixas de frequência diretamente afetadas minimizando assim a interferência fora da faixa de recepção do sinal, utilizando por exemplo técnicas de filtragem. Em transmissões e recepções livre de portadoras, todos os sinais de banda estreita são interferidores em potencial, bem como, os sinais de outros sistemas livre de portadoras. Isto implica que qualquer sistema livre de portadoras precisa utilizar técnicas de processamento de sinal relativamente complexas para recuperar o dado neste ambiente propício a ruídos.

**Projeto complicado do receptor:** Enquanto o projeto do transmissor é simples, a codificação de pulsos em picosegundos do sinal UWB resulta em um projeto complicado do receptor, que o torne apto a processar o sinal e sincronizar com o transmissor.

**Longo tempo de sincronização:** Por causa da precisão em picosegundo dos pulsos usados no UWB, o tempo de sincronização entre o transmissor e o receptor pode ser

muito elevado, chegando a milissegundos. Portanto, o tempo de aquisição da canal pode se tornar muito elevado afetando significativamente a performance, especialmente para comunicações intermitentes.

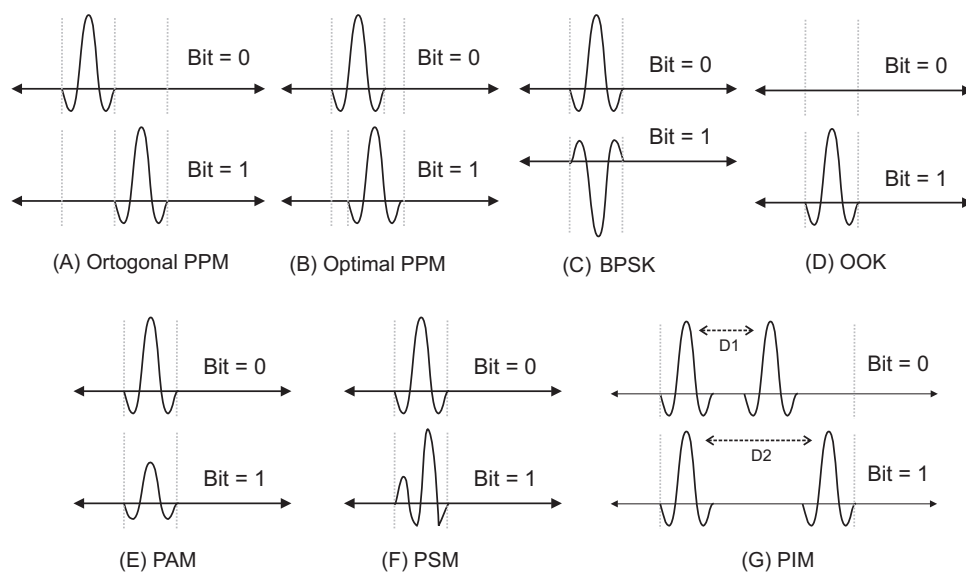
## 2.4 TÉCNICAS DE MODULAÇÃO

Basicamente é possível dividir as técnicas de modulação em binárias e M-árias. As técnicas de modulação binárias se destinam a transmitir um bit a cada símbolo enquanto que as técnicas M-árias transmitem mais de um bit por pulso. Algumas das possíveis opções de modulação binárias de dados para UWB IR são: PPM (*Pulse Position Modulation*), BPSK (Binary Phase Shift Keying), OOK (On Off Keying), PAM (Pulse Amplitude Modulation) binário, PSM (*Pulse shape Modulation*) [47] e PIM (*Pulse Interval Modulation*)[10].

A Figura 2.5 ilustra estas técnicas de modulação. Na PPM, a posição de cada pulso é modulada dependendo do bit transmitido enquanto que a fase e a amplitude do pulso permanecerem a mesma. A modulação PAM envolve modular a amplitude do pulso de acordo com os bits de dados. As técnicas de modulação OOK e BPSK são casos especiais da PAM. Na OOK, a presença ou a ausência de sinal transmitido determinam um 1 ou um 0, respectivamente e na BPSK envolve mudar a polaridade do pulso de acordo com o bit. Na técnica PIM, a modulação é realizada alterando-se a distância entre pulsos. Outra técnica de modulação é a PSM na qual polinômios de Hermite modificados são usados para construir pulsos ortogonais e representar os diferentes símbolos [47]. As técnicas de modulação M-árias se destinam a transmitir mais de um bit por símbolo. Dentre elas podemos citar M-ary PPM, M-Ary PAM, Biortogonal Signaling, multilevel PSM [4].

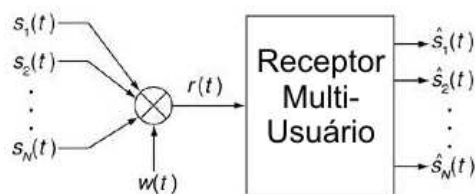
## 2.5 TÉCNICAS DE ACESSO MÚLTIPLO

Um dos maiores limitantes do desempenho de comunicação em enlaces sem fio compartilhados é a interferência causada pelo acesso múltiplo dos usuários (MUI). Ela é causada



**Figura 2.5** Esquemas de modulação binária

pela correlação cruzada do sinal indesejável. A Figura 2.6 ilustra um diagrama de bloco de um sistema de comunicação com acesso múltiplo. Nesta Figura,  $s_k(t)$  e  $t$  ( $k \in [1, N]$ ) representam respectivamente o sinal original e o sinal estimado para o usuário desejado. O ruído do canal é representado por  $w(t)$  e é geralmente considerado como um ruído branco gaussiano (AWGN). O sinal recebido é representado por  $r(t)$ , sendo uma combinação do sinal desejado mais o MUI e o AWGN, de acordo com a Equação 2.6.

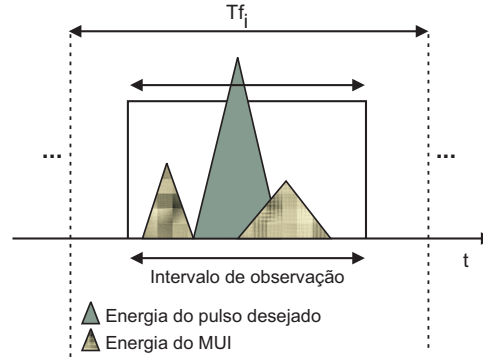


**Figura 2.6** Sinal do UWB

$$r(t) = s_k(t) + MUI + w(t) \quad (2.6)$$

No UWB a MUI é determinada por colisões temporais entre pulsos e pode ser detectada analisando a potência média captada no receptor. Desta forma, mesmo que pulsos não se sobreponham fisicamente pode ser considerado como uma colisão. Uma colisão de

pulso não é considerada como um evento de sobreposição temporal exata, mas como um evento de pulsos interferindo no intervalo de observação do receptor [52], como pode ser visto na Figura 2.7.



**Figura 2.7** MUI no detector de energia do receptor.

Os efeitos da MUI são mais severos em um sistema UWB por causa da forte restrição de potência de transmissão. Cada técnica de modulação pode ser utilizada de forma diferente a fim de combater a MUI. A modulação OOK geralmente não é utilizada para canais com acesso múltiplo dado a sua suscetibilidade a falsas mensagens por usuários indesejáveis. Entretanto esquemas de modulação como PAM, *Biphase*, TR e PPM são geralmente utilizados [53].

Tomando como exemplo a modulação PPM, ela pode ser modificada para acomodar múltiplos usuários, designando um único índice de modulação,  $\delta$ , para cada usuário. O modelo de sinal para esta versão do sinal PPM-UWB em um canal com múltiplos usuários é dada pela Equação 2.7

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M P(t - mT - b_m^{(n)} \delta^{(n)}) \quad (2.7)$$

onde  $\delta^{(n)}$  é o índice da modulação que prove um único intervalo de tempo para representar bits digitais para cada usuário,  $N$  representa o número máximo de usuários,  $M$  é o número máximo de bits transmitidos,  $P(t)$  é o pulso UWB,  $b_m \in [0, 1]$  representa os dados  $m$ -ésimo bit, e  $T$  é o período de repetição do pulso.

Para evitar colisões catastróficas entre os usuários no meio compartilhado, técnicas

de acesso múltiplo como TH (*Time Hopping*) ou DS (*Direct Sequence*) podem ser utilizadas [29].

### 2.5.1 Time Hopping UWB

A técnica originalmente proposta para acesso múltiplo no UWB foi o THSS (*Time Hopping Spread Spectrum*) combinada com o esquema de modulação PPM. O PPM-TH é uma técnica de acesso múltiplo onde os pulsos são transmitidos intermitentemente dentro de quadros de tempo,  $T_f$ , divididos em sub-unidades chamadas de *slots* com duração  $T_c$ , onde o pulso é transmitido em com duração  $T_p$ . Neste método, cada usuário transmite em um intervalo de tempo diferente em cada quadro definido por um código/seqüência pseudo-randômica, também conhecida como THS (*Time Hopping Sequence*) ou código PRN (*Pseudo Random Noise*). Uma seqüência TH pode ser vista como a assinatura de um usuário. Em um meio de comunicação de acesso múltiplo ideal, cada usuário possui uma seqüência de tempo única ou ortogonal. Em um cenário real, a manutenção da ortogonalidade da seqüência depende do sincronismo dos transmissores e de efeitos de multicaminho sofrido pelos sinais transmitidos.

No TH-PPM a diferença de tempo entre a transmissão do pulso e o instante de referencia de tempo define se o bit é '1' ou '0'. As mudanças na polaridade do pulso, PAM, ou da variação do tempo, PPM, modificam os intervalos regulares dos pulsos, diminuindo a linearidade da transmissão dos pulsos no espectro. Por causa desta característica do TH, o ciclo de trabalho  $D_c$  da transmissão é pequeno pois os períodos silenciosos são introduzidos dentro do trem de pulsos irradiado. O ciclo de trabalho pode ser calculado de acordo com a Equação 2.8.

$$D_c = \frac{T_p}{T_f} < 100\% \quad (2.8)$$

Utilizando a estrutura de frame organizada como descrita acima, com os THSs sendo gerados de forma ortogonal, a quantidade de usuários que podem transmitir simultaneamente sem causar colisões é tido com a razão de  $T_f$  sobre  $T_c$ . É possível também utilizar um esquema de modulação PAM [15]. Neste caso, a modulação dos dados é realizada

modificando a polaridade do pulso transmitido, e o instante de transmissão é definido pela seqüência TH. O ganho de processamento  $G_{TH}$  utilizando TH-UWB, independente da modulação utilizada, pode ser definido pela Equação 2.9.

$$G_{TH} = 10 \lg N + 10 \lg D_c \quad (2.9)$$

onde  $N$  é o número de pulsos usados para enviar um bit de dado. Outros esquemas de modulações podem ser utilizados em conjunto com TH, como o uso da modulação M-ary PPM, que possibilita o envio de mais pulso por frame. Pode ser usado também uma combinação de PPM e PAM, chamada de PPAM (*Pulse Position Amplitude Modulation*) [67, 39]. Outra abordagem é apresentada como BPPM (*Biorthogonal PPM*) [68], o sinal modulado é composto de  $2^N$  sinais PPM ortogonais junto com seu sinal antipodal formando um conjunto de  $2^{N+1}$  sinais BPPM. Utilizando este esquema de modulação com múltiplos níveis a capacidade do sistema pode ser aumentada.

### 2.5.2 Direct Sequence UWB

Em sistemas UWB que utilizam a técnica DS (DS-UWB), a repetição do pulso é aplicada utilizando um código PNR, igual aos sistemas DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) convencionais [19]. Os pulsos utilizados para a transmissão dos dados cobrem todo o espectro UWB, onde a polaridade é definida pela polaridade do pulso. Isto implica que em um caso extremo a transmissão do DS-UWB poderia ser contínua e apresentar um ciclo de trabalho de até 100%.

Existem várias formas de gerar códigos PRN para o DS-UWB, como os códigos Walsh [22] ou seqüências ortogonais com fator de espalhamento variável apresentadas em [64]. Estas técnicas podem ser aplicadas também em sistemas TH e utilizadas em conjunto com esquemas de modulações M-ary, onde o tamanho dos códigos podem ser facilmente associado com o nível da modulação. O ganho de processamento para sistemas DS-UWB puros é definido pela Equação 2.10

$$G_{DS} = 10 \lg(N) \quad (2.10)$$

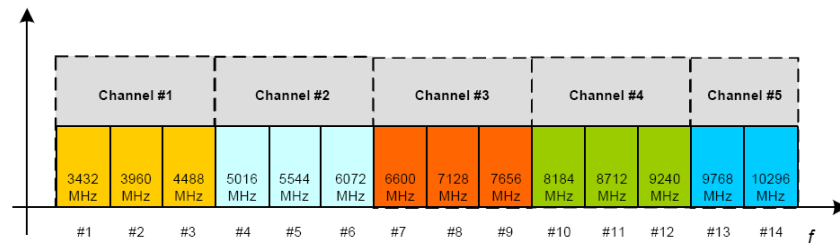
## 2.6 SISTEMAS MULTIBAND

Devido a grande largura de banda definida pela FCC para ser usada pela tecnologia UWB, é possível particionar o espectro em bandas com faixas de frequência maiores que  $500\text{ MHz}$ . A utilização de múltiplas bandas permite uma boa coexistência com outras tecnologias de comunicação sem fio e facilita a portabilidade do dispositivo de acordo com o espectro de frequência disponível em cada país. Quando há interferências em uma banda específica ou quando ela já está alocada para outros fins, é possível então deixar de utilizá-la facilmente. Esta divisão em bandas permite o desenvolvimento de sistemas baseados em OFDM, tecnologia de multiplexação madura e já muito utilizado comercialmente que possibilita um sinal livre de interferência entre as bandas.

Uma desvantagem da abordagem multi-bandas é a necessidade de mixadores e amplificadores no transmissor tornando sua estrutura mais complexa quando comparada com os transmissores usados em sistemas de banda única, que não necessita destes componentes. Isto os torna os transmissores de banda única mais baratos e proporciona um menor consumo de energia. Por outro lado, sistemas multi-bandas podem oferecer alta taxa de dados para médias distâncias diferente de sistemas de banda única.

Existem várias abordagens utilizando múltiplas bandas em sistemas UWB. A mais conhecida é a MB-OFDM (*multiband-OFDM*) apresentada pela MBOA (*Multiband OFDM Alliance*) [45]. No sistema MB-OFDM as bandas são divididas em quatorze sub-bandas de  $528\text{ MHz}$  cada, sem sobreposição entre elas e utilizando a multiplexação OFDM. A Figura 2.8 ilustra a divisão em sub-bandas do sistema MB-OFDM com suas respectivas frequências centrais. A taxa de dados média definida pela MBOA varia de  $55\text{ Mbps}$  à  $480\text{ Mbps}$ .

No sistema MB-OFDM, são utilizadas 110 sub-portadoras por banda, onde 100 portadoras são para o envio de dados e as outras 10 são portadoras de guarda. É possível obter taxas de dados diferenciadas utilizando técnicas de espalhamentos no domínio da frequência, espalhamentos no domínio do tempo e codificação FEC (*Forward Error Correction*) transmitidos sobre códigos convolucionais com taxas de codificação  $\frac{1}{3}$ ,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{5}{8}$  e  $\frac{3}{4}$  [1, 58]. Além do dado codificado poder ser espalhado na frequência utilizando uma



**Figura 2.8** Divisão do espectro em sistemas multi-bandas UWB

única banda ele pode ser entrelaçado sobre três bandas distintas utilizando a técnica (*timefrequency interleaving*).

## 2.7 CAMADA MAC

A principal função da camada MAC (*Medium Access Control*) é gerenciar o acesso ao meio de comunicação compartilhado. Os protocolos MAC baseados no CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) e em suas variações são inadequados para o uso em sistemas UWB por causa das seguintes razões:

- No CSMA/CA, a detecção de potência pode ser usada por possibilitar uma clara avaliação do canal antes de tentar uma transmissão. No caso do UWB, a avaliação de canal por detecção de potência é difícil por causa da potência de emissão ser muito baixa;
- O protocolo CSMA não é apropriado para o sinal de espectro de cobertura com alto ganho de processamento como o TH-IR (*Time Hopping Impulse Radio*) por causa da falta de correlação entre a energia de interferência média entre o transmissor e a energia de interferência entre o receptor [17]. Se o preâmbulo de sincronização é perdido é difícil detectar o sinal por causa da difusão do sinal;
- Voz e vídeo são aplicações alvo da tecnologia UWB e não podem tolerar altos atrasos e *jitter*;
- O tempo elevado de aquisição do canal por causa do longo processo de sincronização entre o transmissor e o receptor faz com que a utilização do canal com o CSMA/CA



seja baixa para o envio de pacotes pequenos. Assim, protocolos baseados no padrão IEEE 802.11 são ineficientes quando utilizados em sistemas UWB, principalmente no modo *ad hoc* onde o *overhead* de sinalização para a sincronização pode ser muito alto. Em ambientes de comunicação sem fio, o tamanho dos pacotes não pode ser grande por causa da alta propensão a erros de transmissão do meio de comunicação sem fio [18];

Ainda que a MAC do *Bluetooth* ou de outras redes sem fio possam ser utilizadas com modificações para a MAC do UWB, elas não se aproveitarão das vantagens da UWB como: localização, alta segurança, baixo consumo de energia e alta largura de banda. Assim sendo, a tecnologia UWB requer uma MAC com características adicionais não existentes nos protocolos MAC convencionais de comunicação sem fio de banda estreita.

Atualmente, não há nenhum padrão de camada MAC para sistemas UWB definido pelo IEEE. Contudo, existem diversas propostas na literatura, sendo que as principais são apresentadas a seguir [25].

**UCAN MAC:** Protocolo criado pelo grupo de pesquisa europeu UCAN [36, 7], focaliza principalmente as aplicações de curto alcance (WPAN) e de médio alcance (WLAN). O UCAN MAC é uma modificação do padrão IEEE 802.15.3 e permite transferência de dados de forma assíncrona e isócronas com tratamento de QoS. Utiliza o código de divisão por saltos de tempo (TH) em contraste com a multiplexação por divisão na frequência para uma melhor coexistência de múltiplas WPANs.

**CC-CDMA MAC:** Em [72] é apresentado o protocolo MAC denominado CC-CDMA (*Complementary Code - Code Division Multiple Access*) para WPANs UWB. Este protocolo também é inspirado no padrão IEEE 802.15.3 e usa a arquitetura de *piconets*. A tecnologia CDMA é usada para prover canais ortogonais e mudanças de fases são usadas para identificar múltiplos usuários.

**THBD MAC:** O projeto WHYLESS [16] apresenta uma proposta de MAC distribuído baseado em saltos no tempo, sendo referenciado nesta dissertação como THBD MAC (Time-Hopping Based Distributed MAC). Neste projeto, a forma de onda UWB é implementada como impulsos de rádio usando modulação por posição de pulso (PPM). O acesso múltiplo ao recurso de rádio é estabelecido usando códigos de saltos de tempo (THS) escolhidos de forma pseudo-randômica. As colisões são evitadas e compensadas pela transmissão de uma maior quantidade de pulsos para definir um o bit. Algumas características para o projeto da MAC UWB definidas pela WHYLESS são: 1) permitir que as redes sem fio sejam compostas por um grande número de nós; 2) possibilitar que os nós possam ser facilmente reconfigurados e a rede ser alto-organizável; 3) permitir a co-existência com outros sistemas de rádio; 4) e dar suporte à qualidade de serviço (QoS).

**MAC com suporte a multimídia:** As características dos protocolos MAC usados em aplicações multimídia incluem suporte a alta taxa de dados e QoS em termos de garantia de largura de banda. A capacidade da rede e conseqüentemente a capacidade do canal é um importante fator em aplicações multimídia. A capacidade do canal para o UWB depende da potência de transmissão e é limitada pela relação sinal-ruído (SNR - Signal to Noise Ratio) mínima no receptor para a correta recepção de dados. Essa relação mínima depende do ganho de caminho entre o transmissor e o receptor.

Em [14] são propostos dois protocolos MAC para sistemas UWB, sendo um centralizado e outro distribuído. Visando dar suporte a aplicações multimídia foi necessário obter uma alta taxa de dados e satisfazer restrições de SNR. Isto foi conseguido adaptando-se a potência de transmissão de acordo com o nível de interferência. Os protocolos propostos dão suporte a duas classes de tráfego, uma para tráfego de *best effort* e outra para tráfego de QoS. O uso de classes de tráfego possibilita que seja dado privilégio aos pacotes de QoS quando a capacidade da rede chegar ao seu limite e surgir a necessidade de descarte de pacotes, ou seja, a classe de tráfego de QoS tem privilégios sobre a de *best effort* de forma que os pacotes marcados como tráfego de *best effort* são descartados deixando os pacotes de QoS serem transmitidos.

É considerada uma rede homogênea onde todos os nós se encontram a um salto de distância de todos os outros nós e eles conhecem o ganho do caminho de cada outro nó. O ganho de caminho pode ser calculado medindo a potência de transmissão que chega no receptor ou através do cálculo da distância entre os nós. Um canal de controle foi necessário para resolver questões de sinalização.

**U-MAC:** É apresentado em [34] um protocolo MAC para sistemas UWB chamado de U-MAC (*Ultra-wideband MAC*) que possibilita a otimização da taxa de transmissão de forma pró-ativa e adaptativa. O protocolo U-MAC dá suporte a duas classes de serviços, uma é chamada de RB (*Reserved Bandwidth*) utilizada para tráfego multimídia e a outra é chamada de DB (*Dynamic Bandwidth*) utilizada para tráfego *best effort*. Uma fração da interferência máxima sustentável (*MSI - Maximum Sustainable Interference*) é separada para o tráfego RB e o resto para o tráfego DB. Toda vez que um novo enlace DB é adicionado a rede, a taxa MSI de todos os enlaces DB atuais são ajustados a fim de controlar a interferência causada ao tráfego de RB.

Para realizar esse controle, os nós enviam periodicamente mensagens de "Hello" contendo suas informações de estado. As informações contidas nestas mensagens são: o tempo médio entre falhas que server como medidor de confiança do nó; a máxima interferência sustentável (MSI); nível de energia agregada de todos os enlaces ativos; a fração de MSI atribuída a classe de tráfego utilizada. A periodicidade no envio destas mensagens é adaptada de acordo com estabilidade relativa do nó que é obtida de acordo com o tempo em que o nó permanece com as mesmas configurações.

Fatores como mobilidade do dispositivo e interferências do meio físico podem levar a mudanças de estado. Se o nó está estável a periodicidade do envio das mensagens aumenta até ele alcançar um valor máximo definido. Por outro lado, se o nó estiver instável a periodicidade é diminuída até alcançar um valor mínimo definido. Toda vez que uma mudança de estado ocorre o nó envia para todos os seus vizinhos uma mensagem de "Hello" anunciando seu novo estado. Baseado nessa informação, os nós vizinhos calculam o nível de interferência e se necessário se reconfiguram de acordo com o novo estado do

seu vizinho.

**DCC-MAC:** Em contraste com o protocolo U-MAC, onde a potência varia dependendo da interferência e da relação sinal ruído, em [35, 46] é apresentado um protocolo MAC distribuído para redes UWB *ad hoc* com um baixo consumo de energia (na ordem de  $1 \mu\text{W}$ ) chamado de DCC-MAC (*Dynamic Channel Coding-based MAC*). Ele é baseado em codificação dinâmica do canal combinando a camada física e MAC a fim de realizar a adaptação dinâmica da taxa de codificação do canal dependendo do nível de interferência, tornando possível a transmissão simultânea de fontes interferentes fora da região de exclusão do destino.

A interferência dentro da região de exclusão, definida através de mensagens RTS/CTS, é tratada usando o conceito de MAC privado, onde seqüências TH específicas são geradas para cada enlace a fim de evitar a interferência de outros nós tentando transmitir para o mesmo receptor. O DCC-MAC utiliza a modulação PPM e a transmissão é realizada utilizando sempre a potência máxima disponível. A adaptação da taxa de codificação do canal é realizada sempre que se apresentar a necessidade de controlar a interferência. Dependendo da taxa de codificação utilizada a taxa de dados pode variar entre  $1 \text{ Mbps}$  e  $18 \text{ Mbps}$ .

**MAC utilizando múltiplas bandas:** Em [8] são utilizadas múltiplas bandas para controlar a transmissão de dados e o acesso múltiplo, onde é alocada uma banda para cada par de fonte/destino. A largura disponível é dividida em uma banda de requisição e em várias bandas de dados onde cada banda possui largura de 500 MHz. A banda de requisição é utilizada como um canal de controle. Utiliza saltos no tempo para o compartilhamento do canal de controle entre múltiplos usuários.

## 2.8 APLICAÇÕES

O *Radio Spectrum Management* [44] divide as aplicações UWB em três grupos: i) sistemas de imagem incluindo radares que penetram na superfície terrestre e em paredes, sistemas de vigilância e dispositivos de imagens médicas; ii) sistemas de radar veicular e iii) sistemas de comunicação e medição. O detalhamento de algumas aplicações é apresentado a seguir.

### 2.8.1 Imagem e Radar

A detecção de objetos camuflados ou enterrados foi o foco do desenvolvimento de sistemas de radar UWB. O uso destes sistemas tem se expandido da área militar para a área de segurança pública. Os sistemas de radar UWB podem ser usados para encontrar pessoas escondidas em lugares subterrâneos ou atrás de objetos ou paredes em situações de perigo e salvamento. Esses sistemas são conhecidos como GPR (*Ground Penetrating Radar*).

Existem aplicações em que é muito valioso ter acesso a um inventário atualizado de bens e à localização dos mesmos. Uma possibilidade para isto é dotar cada bem com capacidade de comunicação sem fio através de rádios UWB. Uma outra aplicação seria o uso da tecnologia UWB em sistemas de rastreamento de pessoas em ambientes internos. Na Figura 2.9 é ilustrado um cenário onde um bombeiro usa um sistema de rastreamento UWB para localizar uma criança em perigo. A tecnologia UWB também encontra uso na medicina (diagnóstico) e na indústria. A indústria de construção a utiliza para localizar e medir, por exemplo, barras de reforço e tubulações de concreto ou elétricas dentro de fundações espessas e paredes.

Na área da medicina, a tecnologia UWB pode ser utilizada para detectar a respiração e funções cardíacas dos pacientes. Embora tal aplicação tenha sido proposta desde a década de 70, ela foi rejeitada por diversas razões, inclusive segurança, tamanho, custo e conveniência dos equipamentos. Entretanto, com os avanços da tecnologia esta aplicação vem se tornando mais viável. Existe também a possibilidade de empregar a tecnologia UWB como uma ferramenta de imagem médica do mesmo jeito que é usada como GPR.



**Figura 2.9** Aplicação UWB para rastreamento e localização.

A idéia seria localizar corpos estranhos em pacientes. Existem outras sugestões para o uso da tecnologia UWB no campo da medicina mas se encontram em fase de pesquisa.

### 2.8.2 Radar Veicular

Os sistemas de radar veicular ou automotivo são tidos como os primeiros sistemas UWB para a uso civil. Estes sistemas se utilizam da característica de precisão de localização alcançado com o uso do UWB para melhorar a segurança automotiva. Alguns exemplos incluem sistemas anti-colisões, sistemas de acionamento inteligente de airbags, sistemas de auxílio de estacionamento e sistemas de suspensão que se adaptam às condições das estradas. A Figura 2.10 apresenta um cenário de uso de um sistema de anti-colisão UWB instalado em um veículo. Ao identificar a aproximação do veículo de um obstáculo (*e.g.* pessoa), o sistema aciona automaticamente os freios do veículo de forma a evitar a colisão.



**Figura 2.10** Sistema automotivo de controle de colisões utilizando UWB

### 2.8.3 Comunicação Sem Fio

O uso da tecnologia de UWB em sistemas de comunicação aumentou durante os anos 80 para satisfazer as necessidades de agências governamentais dos EUA com relação à segurança: baixa probabilidade de detecção e dificuldade de interceptação. Atualmente, o foco principal das comunicações através de rádios UWB é voltado para o desenvolvimento de redes de comunicação sem fio pessoais e locais para o público em geral. Essas redes poderão ser utilizadas para a comunicação entre eletro-eletrônicos como televisores, aparelhos de DVD, filmadoras, computadores, monitores e alto-falantes. O intuito principal é permitir conectividade com banda passante elevada e simplificar a instalação dos aparelhos eliminando a necessidade de fios. A Figura 2.11 ilustra uma sistema de comunicação usando UWB para transferir dados de um celular para uma TV digital. Neste exemplo, o celular transmite um vídeo para ser apresentado na TV.



**Figura 2.11** Aplicação UWB para transferência de conteúdo multimídia

No evento *Consumer Electronics Show* [11], realizado em 2005, foi demonstrado um protótipo de telefone celular com suporte à comunicação via UWB. A interface de comunicação UWB foi utilizada para conectar o celular a um portátil e transferir fotos tiradas pelo telefone ou baixadas pela Internet. Este tipo de possibilidade de conectividade em celulares pode se tornar comum futuramente.

## 2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como mostrado neste capítulo, a tecnologia UWB tem características muito especiais que possibilita uma série de aplicações. Este trabalho está focado no uso do UWB em aplicações de comunicação de dados. Também foram mostradas várias vantagens da tecnologia UWB sobre as tecnologias convencionais de banda estreita, porém há alguns pontos desafiadores que necessitam de muito estudo a fim de obter o melhor proveito da tecnologia UWB.

Basicamente existem duas abordagens principais para implementar a tecnologia UWB, sendo uma utilizando uma banda única e outra utilizando múltiplas bandas para a transmissão do sinal UWB. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens, entretanto a abordagem utilizando uma única banda é mais carente de estudos e ainda apresenta muitos desafios, ou seja, apresenta um grande potencial em relação a abordagem utilizando múltiplas bandas que se utiliza de técnicas já maduras em sistemas de comunicações com é o caso do uso de OFDM.

É importante perceber que as possibilidades da tecnologia UWB são enormes, entretanto como ela é uma tecnologia relativamente recente ainda há muito que se aperfeiçoar a fim de conseguir se aproveitar de todas as vantagens que a tecnologia proporciona. Os principais desafios da tecnologia UWB é permitir o acesso múltiplo ao meio de comunicação de forma otimizada, ou seja, que apresente uma baixa quantidade de colisões, alta taxa de dados, justiça no acesso e QoS. Uma forma de conseguir isso é utilizando técnicas de mitigação e controle da interferência multi-usuário, como serão mostradas a seguir.



# MITIGAÇÃO E CONTROLE DA INTERFERÊNCIA MULTI-USUÁRIO

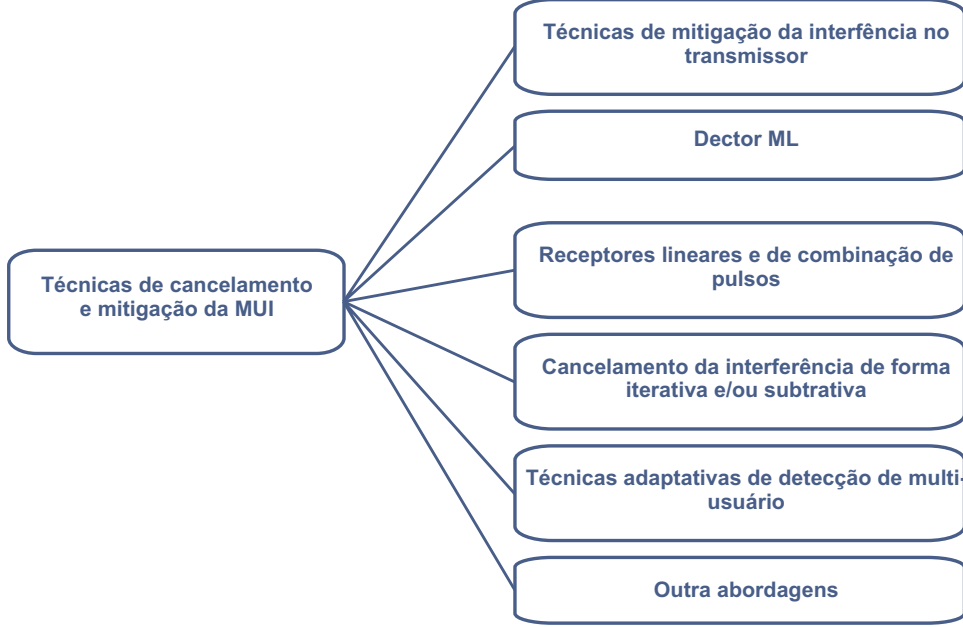
Neste capítulo, são apresentadas as principais técnicas de mitigação e controle da MUI (*Multi-User Interference*) encontradas na literatura endereçadas a tecnologia UWB. Inicialmente são apresentadas técnicas de mitigação da interferência realizadas no transmissor, tanto para comunicações síncronas quanto assíncronas. Depois são mostradas técnicas de controle de interferência no receptor, as quais são classificadas e analisadas utilizando a seguinte categorização: métodos ML, receptores lineares e de combinação de pulsos, métodos iterativos e subtrativos, técnicas adaptativas. E por fim são apresentadas outras abordagens utilizando diferentes linhas de pesquisas na área de mitigação e controle da MUI. A classificação destas técnicas podem ser visualizadas na Figura 3.1.

### 3.1 CONCEITOS BÁSICOS

#### 3.1.1 Modelo de sistema multi-usuário para UWB

Dois modelos de sinais para o sistema TH-UWB são apresentados: um com um único usuário e outro que considera os efeitos de MUI. Onde  $N_s$  pulsos são transmitidos por cada símbolo, podendo ser ajustado de acordo com o BER ou a taxa de dados desejada.

No TH-UWB cada pulso é transmitido individualmente dentro de um quadro de tempo  $T_f = N_h T_c$ . Este quadro  $T_f$  é dividido em vários *slot* de duração  $T_c$  ( $\geq$  que a duração do pulso), sendo  $N_h$  o número de *slots* por quadro. A expressão matemática que representa um sinal TH-UWB que chega na antena do usuário  $k$  sem MUI, é definida pela Equação 3.1 e o sinal considerando a MUI, é definido pela Equação 3.2.



**Figura 3.1** Principais técnicas de mitigação e controle da MUI em redes UWB

$$s^{(k)}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{j=0}^{N_s-1} A^{(k)} \beta_j^{(k)} b^{(k)}(n) \omega(t - (nN_s + j)T_f - c_j^{(k)}T_c - \delta d^{(k)}(n)) \quad (3.1)$$

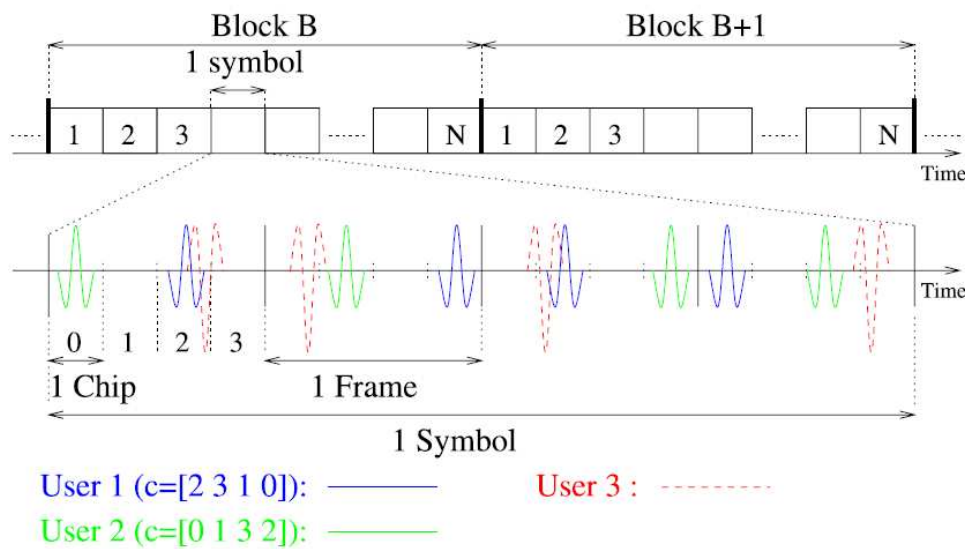
$$\tilde{s}(t) = \sum_{k=1}^{N_u} \sum_{l=-1}^L \gamma_l^{(k)} s^{(k)}(t - \tau_l^{(k)}) + \tilde{n}(t) \quad (3.2)$$

onde,  $n$  é o índice do bit,  $0 \leq j \leq N_s - 1$  é o índice do quadro de tempo, o atraso e amplitude do usuário  $k$  é representado por  $\tau_l^{(k)}$  e  $A^{(k)}$ , respectivamente,  $\tilde{n}(t)$  é o ruído Gaussiano branco (AWGN) com o dobro da energia da densidade espectral  $N_0/2$ , e a forma do pulso recebida é representada por  $\omega(t)$ .

A técnica de modulação binária PPM e BPSK é a mais utilizada com TH-UWB. Na modulação PPM a precisão do tempo do pulso varia de acordo com o intervalo  $\delta$  e depende do *stream* binário  $d^{(k)}(n)$ . No caso da modulação BPSK, os bits de dados são representados com a polaridade dos pulsos determinada por  $b^{(K)}(n) = 2d^{(k)}(n) - 1$ , enquanto que utilizando a modulação OOK, é usado  $b^{(K)}(n) = d^{(k)}(n) - 1$ . A modulação Bi-ortogonal é obtida através da combinação das modulações PPM com BPSK. A seqüência TH  $c_j^{(k)}$  ( $1 \leq c_j^{(k)} \leq N_h$ ) é o conjunto de códigos inteiros que especifica o posicionamento no

tempo de cada pulso dentro de cada quadro do usuário  $k$ . A seqüência de polaridade  $\beta_j^{(k)}$  pode ser usada também em conjunto com o TH.

Um exemplo da estrutura de sinalização do sistema TH-UWB para três usuários utilizando a modulação BPSK é ilustrado na Figura 3.2. Esta figura não leva em consideração os efeitos multi-caminho. Os usuários 1 e 2 estão sincronizados entre si e utilizando seqüências ortogonais, enquanto que o usuário 3 está totalmente assíncrono com os outros dois usuários. É observado que dois pulsos do usuário 1 são corrompidos por pulsos do usuário 3, causando a MUI.



**Figura 3.2** Estrutura de sinalização de uma sistema TH-UWB

No caso dos sistemas TH-PPM, o seu esquema de sinalização possibilita uma implementação eficiente e de baixa complexidade de métodos de controle de interferência. O ponto chave que faz a arquitetura do TH-PPM diferente dos esquemas de acesso múltiplo DS é que nem todos os usuários interferem uns com os outros por causa do esquema de sinalização realizado no tempo. Se existir interferência de um certo usuário em outro, esta afetará somente alguns pulsos deste último. Portanto é suficiente considerar somente a interferência de certos usuários e determinados pulsos no desenvolvimento de um método de controle de interferência. Diminuindo, desta forma, a complexidade do receptor.

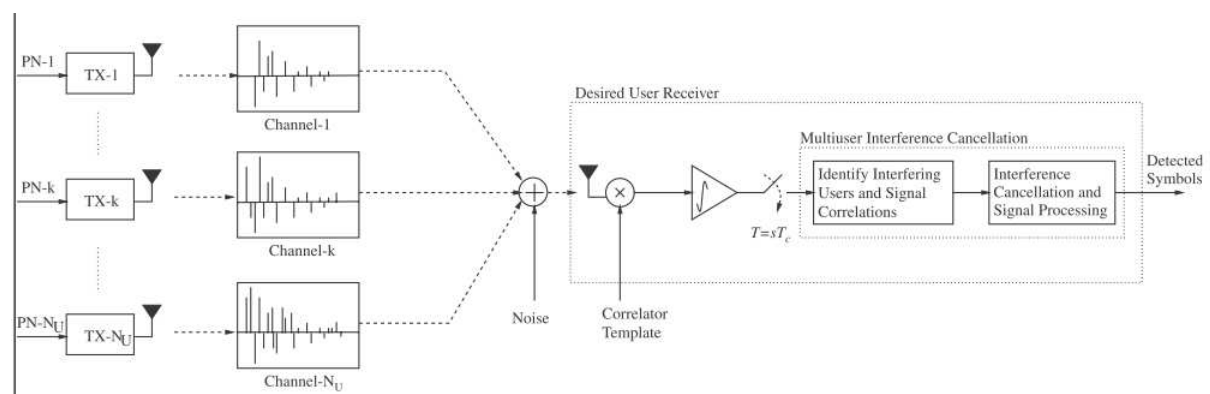
Considerando a maneira como o sinal é demodulado no receptor há a necessidade de

se fazer uma divisão em dois cenários distintos a fim de abordar o acesso múltiplo, como descritos a seguir.

**Cenário de SUD/iC:** No cenário de SUD/iC (*Single User Detection with Interference Cancellation*) o receptor apresenta a capacidade de demodular somente o sinal do usuário desejado. Desta forma, no sinal transmitido pelo usuário desejado, é importante somente a interferência do sinal de outros usuários. O modelo do sistema não precisa obter a correlação entre o sinal de todos os usuários, precisa somente capturar a interferência do sinal de outros usuários ao sinal do usuário desejado.

**Cenário de MUD:** No cenário MUD (*Multi-User Detection*) o receptor demodula conjuntamente os sinais de todos os usuários. Conseqüentemente, o modelo de sistema deve capturar a correlação entre todos os pares de usuários.

Nesta dissertação é considerado que nos cenários multi-usuários apresentados acima será utilizado um receptor MF (*Matched-Filter*). Este receptor possibilita a demodulação seletiva do sinal do usuário desejado apresentando somente a captura da interferência do sinal de outros usuários. Esta decisão é tomada pelo componente do receptor chamado de correlator, como mostrado na Figura 3.3.



**Figura 3.3** Receptor MF

### 3.1.1.1 Modelo de sinal para SUD/iC

Assumindo a existência de um sincronismo perfeito, o uso de quadros espaçados no tempo, característico do TH-PPM, proporciona uma forma eficiente de detecção dos sinais recebidos pelo usuário desejado [62]. É certo que o receptor já está sincronizado com um dos componentes multi-caminho do sinal do usuário desejado. Desta forma, a saída do correlator pode ser obtida uma vez a cada quadro, somando  $N_s$  amostras por símbolo. Empilhando as saídas de  $N$  símbolos é gerada uma matriz de correlação como mostrado na Equação 3.3.

$$Y = \underbrace{\begin{bmatrix} \gamma_{1,1} & \gamma_{1,2} & \cdots & \gamma_{1,N} \\ \gamma_{2,1} & \gamma_{2,2} & \cdots & \gamma_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \gamma_{N_s,1} & \cdots & \cdots & \gamma_{N_s,N} \end{bmatrix}}_{N_s \times N_u} \quad (3.3)$$

Em um ambiente multi-usuário, a saída do correlator em uma posição do pulso também irá incluir os efeitos de interferência causada por pulsos que pertencem a outros usuários que colidem com os pulsos do usuário desejado. Então, as correlações dos outros usuários podem ser expressadas pela matrix apresentada na Equação 3.4 e pela função apresentada na Equação 3.5.

$$S^{(1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} A^{(1)}\gamma_{1,l} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,N_u} \\ A^{(1)}\gamma_{1,l} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,N_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{(1)}\gamma_{1,l} & \cdots & \cdots & s_{N_s,N_u} \end{bmatrix}}_{N_s \times N_u} \quad (3.4)$$

$$S_{j,k} = \begin{cases} 0 & \text{se o pulso } j\text{th não foi corrompido} \\ A^{(k)}b^{(k)}\gamma_l^{(k)}R_j^{(k)} & \text{se o pulso } j\text{th foi corrompido} \end{cases} \quad (3.5)$$

onde, a função de correlação normalizada  $R^{(k)}$  caracteriza a interferência de um pulso  $K$ th de um usuário para o pulso  $J$ th do usuário desejado. Note que a Equação 3.5 considera

somente a interferência de outros usuários sobre o usuário desejado, que na equação é representado como o usuário  $k = 1$ .

A Equação 3.6 representa a saída do decorrelator sobre os blocos de  $N$  campos dos símbolos, onde  $Z$  é a matriz de ruído e  $D$  é a matriz de bits do usuário desejado e dos interferidores. É certo que as estatísticas dos usuários, como localização das colisões e canais, não mudam sobre o bloco.

$$\underbrace{Y}_{N_s \times N} = \underbrace{\begin{bmatrix} A^{(1)}\gamma_{1,l} & s_{1,2} & \cdots & s_{1,N_u} \\ A^{(1)}\gamma_{1,l} & s_{2,2} & \cdots & s_{2,N_u} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{(1)}\gamma_{1,l} & \cdots & \cdots & s_{N_s,N_u} \end{bmatrix}}_{N, N_s \times N_u} \times \underbrace{\begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdots & b_{1,N} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \cdots & b_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{N_u,1} & \cdots & \cdots & b_{N_u,N} \end{bmatrix}}_{D, N_u \times N} + \underbrace{Z}_{N_s \times N} \quad (3.6)$$

O receptor convencional torna igualmente pesadas as  $N_s$  saídas do MF por símbolo para realizar decisões sobre quais bits pertencem ao usuário desejado, definida pela Equação 3.7

$$\hat{b}^{(1)} = \text{sgn}(1_{N_s} Y) \quad (3.7)$$

onde,  $\hat{b}$  é um vetor  $1 \times N$  de bits estimados para o usuário 1, e  $\text{sgn}(x) = x/\|x\|$  representa o sinal da variável  $x$ . Outras abordagens mais sofisticadas de mitigação do MUI podem ser usadas para o processo de decisão apresentado na Equação 3.3. Essas abordagens geralmente necessitam de alguma informação previamente sobre a matrix de correlação  $S$ , que pode ser provida por mensagens de *feedback*. Se somente um bit for considerado, a Equação 3.6 pode ser simplificada para Equação 3.8.

$$r_1 = SAb + n \quad (3.8)$$

onde,  $r_1$  é um vetor  $N_s \times 1$  contendo a amostra dos quadros para o usuário 1,  $b$  é um vetor  $N_u \times 1$  de bits de diferentes usuários,  $A$  é uma matrix diagonal  $N_u \times N_u$  de amplitudes dos usuários (assumindo o desvanecimento da amplitude definida em na Equação 3.5) e  $n$  é um vetor de ruídos  $N_s \times 1$ .

### 3.1.1.2 Modelo de sinal para MUD

Quando há necessidade de caracterizar a interferência mútua entre diferentes usuários, o modelo de sinal representado na Equação 3.6 não se aplica. Isto acontece porque a informação é coletada de acordo com os códigos de espalhamento do usuário desejado, o que exclui as informações dos demais usuários. Neste cenário, para detectar a interferência mútua em um cenário MUD, modelos bem conhecidos como definido pela Equação 3.9 podem ser utilizados [62].

$$y = RA b + \tilde{n} \quad (3.9)$$

onde, este tempo  $y$  é um vetor  $N_u \times 1$  de amostras de símbolos,  $R$  é uma matriz  $N_u \times N_u$  que caracteriza a correlação cruzada entre as sequências de diferentes usuários. Várias técnicas MUD são possíveis para detectar os símbolos de diferentes usuários baseados nas características da matriz de correlação cruzada  $R$ .

## 3.2 TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO DE INTERFERÊNCIA NO TRANSMISSOR

As técnicas de mitigação de interferência que são realizadas pelo transmissor serão apresentadas juntamente com as técnicas para comunicações síncronas e assíncronas.

### 3.2.1 Comunicações síncronas (SUD/IC)

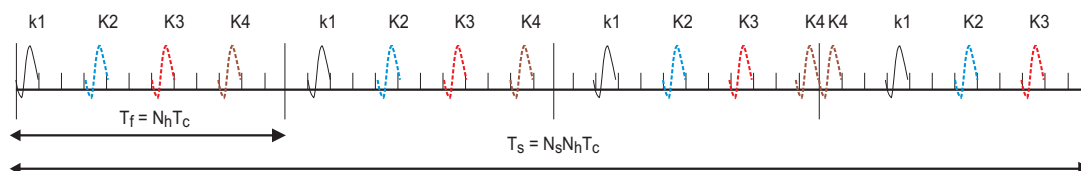
#### 3.2.1.1 Seqüência TH ortogonal

Em um canal síncrono não-dispersivo é possível projetar códigos TH ortogonais para que não haja nenhuma interferência entre os usuários. Este tipo de canal é realístico para sistemas TH-PPM-UWB somente sob o cenário SUD/IC.

Por causa da pequena duração dos pulsos usados na comunicação dos sistemas UWB, seus receptores observam canais extremamente dispersivos. Várias cópias de um mesmo sinal podem chegar em tempos diferentes porque o número de caminhos percorridos pelo sinal pode ser muito grande. Estes tempos podem se sobrepor ao tempo em que um outro

usuário transmite seu pulso, portanto, mesmo em uma transmissão síncrona a dispersão do canal introduz MUI e degrada a performance do canal, aumentando o BER. Contudo, é possível tratar este problema em um cenário SUD/IC atribuindo de forma adequada as seqüências TH. Conhecendo o número de usuários e o excesso máximo de atraso do canal, um nó central pode atribuir códigos para os usuários. Para que isso seja possível é necessário introduzir espaços suficientemente grandes entre os pulsos [26, 27].

A Figura 3.4 ilustra um exemplo simples de uma transmissão no cenário SUD/IC, onde um nó central constrói códigos ortogonais para quatro usuários, prevenindo a interferência causada pelo acesso múltiplo. O nó central é capaz de configurar o tamanho do quadro a fim de estabelecer um tamanho ideal para que todos os usuários transmitam seus dados sem interferência e também possam transmitir o próximo pulso com agilidade. Por outro lado, quando este número de usuários é excedido, sinais de novos usuários ocuparão esses espaços de tempo, resultando em uma interferência. Ao utilizar um nó central capaz de realizar estimativas periódicas do atraso máximo e do número total de usuários na rede, é possível atribuir códigos para os usuários, minimizando os efeitos de multi-caminho e MUI.



**Figura 3.4** Sinal TH-PPM-UWB

### 3.2.1.2 Espalhamento de bloco em múltiplos estágios

Uma análise detalhada da transmissão do sinal em um cenário SUD/IC foi apresentada em [26] no contexto de MSBS (*Multistage Block Spreading*). Os autores mostram que sistemas TH-PPM-UWB que usam suporte a codificação polarizada apresentam ondas ortogonais.

Para preservar a ortogonalidade mútua entre os usuários, mesmo em canais multi-



caminho, o transmissor primeiramente espalha um bloco de símbolos que é seguido pela intercalação dos pulsos (*chip interleaving*). No receptor, o sinal captado é reunido por um filtro linear. Em sua essência, esta técnica divide o canal de acesso múltiplo em um conjunto de canais com um único usuário em cada canal; sendo assim, um equalizador pode ser utilizado para a detecção de símbolos sem a necessidade de nenhum outro algoritmo de processamento de sinal.

### 3.2.1.3 Ganho de processamento adaptativo

O ganho de processamento em sistemas TH-PPM-UWB pode ser ajustado de acordo com a taxa de dados, a taxa de erros (BER - *Bit Error Rate*) e com os requisitos de alcance [28] desejado. Conhecendo a qualidade dos enlaces dos usuários, um nó central pode determinar o ganho de processamento  $N_s^{(k)}$  a ser assinado para um dado usuário  $K$ . Para comunicações síncronas em cenário de SUD/IC, a construção de códigos ortogonais em conjunto com o ganho de processamento adaptativo para diferentes usuários, pode ser desenvolvida para aumentar a taxa de dados agregada.

A Equação 3.10 é utilizada para o cálculo de BER em esquema de modulação ortogonal (como PPM ortogonal) e foi necessária para cumprir as exigências de BER dos usuários com diferentes qualidades de enlace.

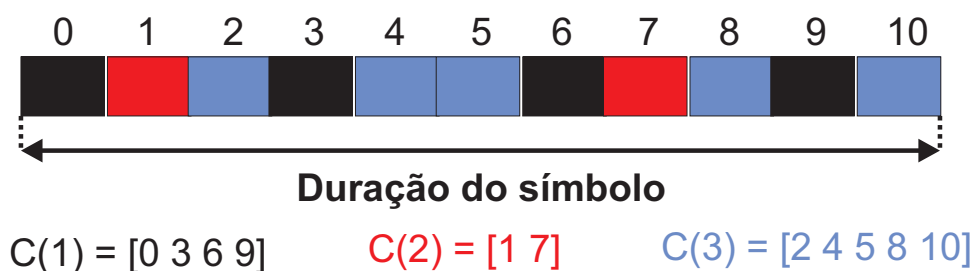
$$BER = Q \left( \sqrt{\frac{N_s^{(k)} E^{(k)}_{rx}}{N_0}} \right) \quad (3.10)$$

onde  $E_{rx}^{(k)}$  é a energia por pulso recebida do usuário  $k$ ,  $N_s^{(k)}$  é o ganho de processamento usado na comunicação com o usuário  $Kth$  e  $Q(x)$  é dado por  $\frac{1}{2}erfc(\frac{x}{\sqrt{2}})$ . Onde *erfc* é a função de erro complementar.

Para conhecer os requisitos de BER dos usuários com diferentes qualidades de enlace é necessário que o nó central envie uma maior quantidade de pulsos para enlaces considerados mais fracos. E para a construção ortogonal das seqüências dos usuários é realizado um cálculo periódico da duração dos símbolos dos usuários no meio de comunicação. Depois, as seqüências dos usuários podem ser construídas ortogonalmente utilizando um

algoritmo simples

Na Figura 3.5 temos um exemplo simples de seqüências TH de três usuários utilizando diferentes ganhos de processamento em um cenário SUD/IC. Os códigos propostos são similares aos códigos utilizados pelo OVSF (*Orthogonal Variable Spreading Factor*) que é uma implementação do CDMA onde antes de cada sinal transmitido, o espectro é espalhado utilizando os códigos dos usuários. Onde os códigos dos usuários são escolhidos para ser mutuamente ortogonais.



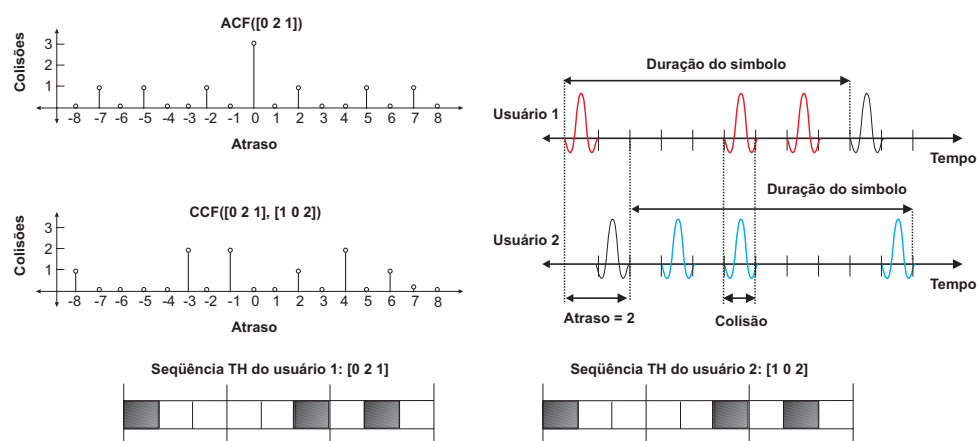
**Figura 3.5** Seqüências de três usuários com diferentes ganho de processamento em um sistema TH-PPM SUD/IC.

#### 3.2.1.4 Pré-Rake e filtragem da mitigação de MUI

O receptor Pré-Rake apresentado em [13] é baseado em equalização do canal e supressão da MUI. Ele se utiliza do conhecimento da resposta de impulso no canal para transmitir a forma do sinal revertida no tempo (*time-reversed*) depois do multi-caminho. Isso possibilita o uso de um simples receptor MF, onde a complexidade é passada do receptor ao transmissor. Ainda que o Pré-Rake mitigue o efeito multi-caminho, ele não combate os efeitos de ISI (Inter-Symbol Interference). Em [65] é apresentado um esquema *zero-forcing pré-equalization* no transmissor com o objetivo de mitigar o efeito ISI. O inconveniente da abordagem proposta pelos autores é a necessidade do transmissor de conhecer as seqüências utilizadas pelos outros usuários da rede.

### 3.2.2 Comunicação assíncrona (MUD)

Em um cenário MUD, ou em arquiteturas descentralizadas, os sinais dos diferentes usuários são captados no receptor com um atraso arbitrário. Isto implica que seqüências TH não podem ser construídas ortogonalmente, ou seja, não é possível haver comunicação livre de interferência. Quanto mais usuários entram no sistema a interferência aumenta e assim degrada a qualidade do link do usuário. A Figura 3.6 demonstra o atraso em função da autocorrelação (ACF) e da correlação cruzada (CCF) de seqüências TH para os dois primeiros usuários.



**Figura 3.6** Funções de auto-correlação e correlação cruzada dos códigos TH para os primeiros dois usuários.

#### 3.2.2.1 Projeto da seqüência usando equações de congruência

O uso de seqüências com uma boa correlação cruzada pode diminuir a interferência em ambientes multi-usuários. A função de auto-correlação (ACF - *Auto Correlation Function*) da seqüência caracteriza quanto o sinal é afetado pelo multi-caminho. Enquanto isto, a função de correlação cruzada (CCF - *Cross Correlation Function*) define quanto o sinal é afetado pela MUI.

Com a abordagem *chip synchronism*, que possibilita analisar o pior de interferência multi-caminho, a correlação entre a seqüência de dois usuários é medida pelo número

de espaços entre os seus pulsos. Obter uma baixa auto-correlação implica em um canal mais propício a interferência multi-caminho. No caso de se obter um grande número de colisões na função de correlação cruzada (*cross-correlation*) de duas seqüências implica que a seqüência é mais suscetível a MUI.

A forma de construção destas seqüências já foi bastante investigada no passado [48] e pode ser aplicada também nos sistemas TH-PPM. Uma boa revisão das aplicações destas seqüências para sistemas TH-PPM-UWB pode ser encontrada em [21, 30]. Em particular foram avaliados os códigos congruentes: linear, quadrático, cúbico e hiperbólico (LCC, QCC, CCC, HCC).

A Tabela 3.1 apresenta formas de construção de seqüências e o número máximo de colisões em funções de correlações aperiódicas para sistemas FH (*Frequency Hooping*) e TH (*Time Hopping*).

-	LCC	QCC	CCC	HCC
Construção do Cód. $f(k, j)$	$(k_j)$	$(k_j^2)$	$(k_j^3)$	$(k/j)$
Máx. Acertos (FH-ACF)	$p - 1$	1	2	2
Máx. Acertos (TH-ACF)	$p - 1$	2	4	4
Máx. Acertos (FH-CCF)	1	2	3	2
Máx. Acertos (TH-CCF)	2	4	6	4

**Tabela 3.1** Construções de seqüências e número máximo de colisões em funções de correlação aperiódicas para FH e TH.

onde,  $J$  é o índice do quadro, e o atraso é representado em relação a duração do quadro e do pulso. Os resultados obtidos para os códigos LCC demonstram uma excelente característica de correlação cruzada. E os códigos QCC tiveram uma ótima combinação de auto-correlação e de correlação cruzada.

### 3.2.2.2 PCTH

O PCTH (*Pseudo-chaotic time hopping*) é apresentado em [43], onde cada usuário pode transmitir vários pulsos dentro de um mesmo quadro ao contrário do que ocorre convencionalmente que é transmitir um único pulso por quadro. A vantagem do PCTH é que a chegada de inter-pulsos randomicamente ganha um smooth spectrum, ou seja, sem tantos chaveamentos entre as transmissões dos usuários, cada usuário pode transmitir seus pulsos utilizando todo o quadro e não somente um pulso por quadro. Por outro lado, a principal desvantagem é que a interferência inter-pulso dada pelos componentes multi-caminho do pulso anterior e de todos os pulsos transmitidos no mesmo quadro tem um aumento relevante.

### 3.2.2.3 Espalhamento de blocos Assíncronos e zonas de correlação zero

O objetivo maior, ao se buscar um modelo adequado, é conseguir uma recepção livre de MUI. Em [26] foi utilizado MSBS (*Multistage Block Spreading*), mas isto só é possível em sistemas síncronos. Yang apresenta, em [60], uma técnica de espalhamento de bloco assíncrono utilizando ZCZ (*Zero Correlation Zone*). Esta técnica removeu completamente o MAI e manteve o código ortogonal mesmo com usuários assíncronos.

Primeiramente, o autor apresenta a construção de seqüências com ZCZ, que permite recepção livre de MAI com certo assincronismo entre os usuários. Depois, a MUI é completamente removida usando códigos ZCZ e, um esquema de equalização de canal FFT (*Fast Fourier Transform*) é proposto para mitigar a interferência inter-simbólica do usuário desejado.

Além da proposta de [30] que utiliza a construção de códigos ZCZ em diferentes sistemas UWB, outras referências como [71, 70] propõem que os códigos ZCZ sejam utilizados em sistemas TH-UWB e em [12] estes códigos são usados em sistemas DS-UWB.

É importante ressaltar que a idéia geral da construção de códigos ZCZ em todas estas referências é utilizar a construção das seqüências de modo a manter certo intervalo

de tempo (*time shift*) entre alguns pares de seqüências. Esses sistemas são comumente referenciados na literatura como sistemas "quase-síncrono" (*quasi-synchronous*), onde é compreendido que a sincronização deve ser mantida em certa margem, diminuindo assim os períodos de sincronização.

### 3.3 DETECTOR ML

A proposta de um Detector ML (*Maximum Likelihood*) foi analisado para um ambiente UWB em [66]. O detector ML é conhecido como um ótimo receptor que minimiza a probabilidade de detecção de erros para todos os usuários, propriedade conhecida como detecção de seqüência ML. O receptor ML otimiza a decisão de todos os usuários estimando a seqüência de bits que tem a distancia mais próxima do sinal recebido no espaço Euclidiano [62], apresentando assim uma grande complexidade . O detector ML utiliza um algoritmo centralizado, e necessita das informações de amplitude e seqüência TH de todos os usuários do sistema. Dada está necessidade este algoritmo se torna impraticável para sistemas que apresentam uma grande quantidade de usuários.

Vários trabalhos foram realizados no intuito de minimizar a complexidade deste algoritmo, como por exemplo o apresentado em [23], onde um algoritmo quasi-ML, de menor complexidade, utiliza o fato de que nem todos os usuários no sistema interferem um com o outro. Partindo desta premissa é utilizado um bit de decisão pelo detector quasi-ML que considera somente usuários onde os pulsos estão colidindo com o usuário desejado. Uma importante limitação do algoritmo utilizado pelo quasi-ML é que, dada à característica dispersiva do canal UWB, é muito provável haver interferência dos componentes multi-caminho de outros usuários. Entretanto, em um canal multi-caminho realístico, a maioria dos outros usuários irão interferir com o usuário desejado. Por outro lado, nem todos os pulsos (ou componentes multi-caminho) dos usuários interferindo colidem com o usuário desejado.

Em [3] é proposto um algoritmo que não precisa de informações prévias da seqüência TH ou qualquer tipo de sincronismo, por outro lado, ele obtém estatísticas para diferentes posições de pulsos e é necessário um grande treinamento do algoritmo. O algoritmo

explora estimativas de SNR (*Signal Noise Ratio*), sobre cada posição de pulso para estimar os canais desejados e usuários. Então, uma junção de métricas ML é usada para detectar os bits do usuário desejado. Um algoritmo de detecção ML recursivo foi proposto por Zhang, em [69], onde os autores diminuíram a complexidade computacional relaxando o modelo do sistema.

### 3.4 RECEPTORES LINEARES E TÉCNICAS DE COMBINAÇÃO DE PULSOS

Dada à alta complexidade dos receptores multi-usuário ML, receptores multi-usuário lineares são mais utilizados [69, 41, 49, 20, 9]. A idéia básica do algoritmo de detecção de multi-usuários linear é conseguir um modelo linear para o sinal recebido a fim de obter valores iniciais de bits de forma leve, e então usar esses valores para mapear dentro dos símbolos atuais que dependem de um alfabeto finito. A ênfase é que receptores lineares operam de forma diferente para MUD (*Multiuser Detection* - MUD) e SUD/IC (*Single User Detection with Interference Cancellation* - SUD/IC).

O objetivo dos receptores é combinar os pulsos por símbolo usando correlação de interferência sobre diferentes pulsos. As duas abordagens mais utilizadas para detectores multi-usuários lineares são: receptor decorrelator (também chamado de *receptor Zero-forcing* - ZF) e receptor MMSE (*Minimum Mean Squared Error*).

#### 3.4.1 Receptor decorrelator

Este modelo tem uma complexidade bem menor que o melhor algoritmo ML, não requer o conhecimento da amplitude dos usuários e, pode ser facilmente implementado de forma descentralizada, detectando os usuários um por um. Na ausência de ruído, o decorrelator cancela completamente a interferência de outros usuários.

Duas desvantagens encontradas no detector decorrelator: ele aumenta o ruído no canal e torna necessário uma operação de cálculo da inversão da matriz de correlação. Isto vem a aumentar a complexidade do algoritmo, criando a necessidade de re-calcular  $R$  a cada bit (se a seqüência de código mudar de tempo em tempo, ou depois da ativação de novos

usuários). Esta pesquisa é direcionada ao desenvolvimento de algoritmos que diminuam o custo de re-computação, utilizando algoritmos adaptativos que atualizam os coeficientes do decorrelator. Um quasi-decorrelator é apresentado para sistemas UWB em [66] em um cenário SUD/IC. Eles consideram somente a interferência de usuários colidindo a fim de diminuir a complexidade do algoritmo.

Em [31] apresenta um decorrelator iterativo que evita a inversão da matriz, onde a convergência é feita de forma iterativa.

### 3.4.2 Receptor MMSE

O receptor decorrelator tem uma ótima performance para ambientes com auto SNR, mas pode ter uma performance inferior aos detectores convencionais se todos os interferidores forem muito simples. Para isso pode ser utilizado o MMSE decorrelator, que pode diminuir a expectativa de erros de detecção.

Em [66] é apresentado um receptor MMSE (*Minimum Mean Squared Error*) com baixa complexidade para ser usado em sistemas TH-UWB, onde somente os usuários que detectaram colisões de pulsos com o usuário desejado são considerados.

Já em [38, 37], consideraram o MMSE ótimo para sistemas DS-UWB, combinando coeficientes para o componente multi-caminho na presença de MUI de banda estreita. O tempo de escuta para componentes multi-caminho é ajustado adaptativamente, utilizando LMS (Least Mean Squares) ou o algoritmo RLS (*Recursive Least Squares*). Este modelo é mostrado por simulação que receptores Rake convencionais falham para rejeitar grandes interferências enquanto que receptores adaptativos MMSE evitam os efeitos da interferência com sucesso.

Uma abordagem mais completa é apresentada por Jung e Park em [42]. Eles consideram tanto a combinação de quadro e/ou combinação multi-caminho, e assim conseguem tratar tanto interferência entre os quadros e MUI. Eles mostram que o receptor MMSE combina todos os componentes multi-caminho correspondentes a todos os pulsos por símbolo.



### 3.4.3 Pulse discarding receivers and hard pulse combining

Em termos de complexidade do receptor, provavelmente o mais praticável para o cancelamento de MUI para TH-IR são os receptores de descarte de pulso. A idéia básica deste tipo de receptor é simplesmente descartar os pulsos que estão corrompidos, e demodular a informação usando pulsos não corrompidos. Estes receptores trabalham bem se o número de pulsos por símbolos ( $N_s$ ) for grande e, se o número de pulsos corrompidos for relativamente baixo. Outros dois receptores são discutidos na literatura: Blinking Receiver e Chip Discriminator. Uma outra abordagem que combate interferências severas sem descartar os pulsos é o Hard Pulse Combining.

#### 3.4.3.1 Blinking receiver

Receptor Blinking [66] é um receptor de baixa complexidade baseado em descarte de todos os pulsos que estão corrompidos. Ele é projetado para sistemas centralizados, onde o BS (*Base Station*) conhece a seqüência TH de todos os usuários, e pode identificar os pulsos corrompidos. Sem levar em consideração a força da interferência, um pulso é descartado se ele estiver corrompido, e o bit de decisão é executado baseado no pulso que ficou.

#### 3.4.3.2 Chip Discriminator

Quando o número de colisões é grande ou a interferência é alta, o receptor *Blinking* não tem um desempenho muito bom, sendo assim, ele acaba descartando uma grande quantidade de informações. Em [40] é apresentado um receptor utilizando a técnica *chip discriminator* que é primeiramente projetado para compensar os efeitos do cenário *Near/Far*, onde a energia da fonte interferidora é maior que a energia do sinal do transmissor que está chegando ao receptor. Se os pulsos recebidos por esses usuários colidem com os pulsos do usuário desejado, o ganho de processamento pode não ser capaz de compensar a interferência. A idéia do chip discriminator é detectar essa grande inter-

ferência adotando um limiar, e descartando os pulsos corrompidos por esses interferidores na demodulação. Note que o chip discriminator não precisa conhecer as seqüências TH dos usuários passíveis de interferência. Entretanto, uma estimativa do canal é necessária para calcular o limiar.

### 3.4.3.3 Combinação de Pulso Hard vs. Combinação de Pulso Soft

A idéia apresentada em [5] é utilizar uma técnica de detecção de pulso mais leve para um cenário com menor interferência e utilizar uma mais pesada para um ambiente com MUI mais acentuado, onde o receptor adaptativo troca entre *soft/hard* combining dependendo do MUI.

## 3.5 CANCELAMENTO DA INTERFERÊNCIA DE FORMA ITERATIVA E/OU SUBTRATIVA

Em alternativa aos receptores do grupo não linear podem ser utilizados os receptores iterativos e/ou subtrativos. O princípio básico destes detectores é a criação, no receptor, de estimativas separadas do MUI contribuído por cada usuário a fim de subtrair algum ou todo o MUI considerado por cada usuário. Tais detectores são implementados frequentemente com múltiplos estágios, onde a expectativa é que as decisões serão melhoradas na saída de sucessivos estágios de forma que o desempenho do algoritmo venha a melhorar no decorrer do tempo até se estabilizar, não precisando assim, passar por nenhuma fase inicial de treinamento.

Um sistema de cancelamento de interferência iterativo que utiliza códigos convolucionais foi proposto em [6]. Este modelo foi proposto em oposição ao modelo Iterative-Turbo descrito anteriormente, onde o algoritmo trabalha entre dois estágios: (1) a detecção do acesso múltiplo é implementada sobre SICLC (*Soft Interference Canceler Likelihood Calculation*), e a saída é alimentada dentro de um decodificador convolucional SISO (*Soft-Input Soft-Output*) em forma de taxa de log-likelihood, em Monteiro Caeiro; (2) o decodificador SISO processa a saída do SICLC. A informação decodificada é realimentada

no estágio SICLC e, algumas iterações do algoritmo cancelam a MUI.

Uma abordagem que beneficia o TH-IR com pouca sinalização (considera somente usuários passíveis de interferência) é o método iterative-Turbo, onde a recepção de código inerente ao TH-IR possibilita a implementação com um código adicional [66, 23]. Ao invés de códigos convolucionais específicos, como nos casos anteriores, o código de repetição de pulso atualiza as informações prévias.

Dada a alta complexidade de calcular a informação intrínseca ao estágio de detecção de pulso, duas abordagens menos complexas são apresentadas em [5]. Outra forma de diminuir a complexidade computacional da detecção do pulso do detector Turbo iterative é apresentado em [23], ele utiliza cancelamento da interferência e um filtro MMSE.

### 3.6 TÉCNICAS ADAPTATIVAS DE DETECÇÃO DE MULTI-USUÁRIO

A natureza dinâmica do canal de acesso múltiplo implica em diversos fatores como por exemplo, os usuários podem entrar e sair do sistema a qualquer momento, o nível de energia dos usuários pode variar e as características multicaminho podem ser alteradas. Entretanto, certos parâmetros usados no algoritmo de cancelamento do MUI podem ser modificados (ex: matriz de correlação, variação do ruído etc) e eles precisam ser atualizados de tempos em tempos. Em outras palavras, o algoritmo de cancelamento de MUI deve se adaptar às mudanças de ambiente.

Um receptor multiusuário adaptativo pode ser implementado utilizando-se seqüências de treinamento e *blinking*. De acordo com [42, 55], ao se utilizar seqüências de treinamento é possível obter uma implementação adaptativa dos receptores MMSE. A matriz de correlação pode ser atualizada sem utilizar nenhuma seqüência de treinamento, como por exemplo, utilizando a forma blindada apresentada por Wang e Poor, em [63]. Técnicas de blindagens (*blind*) demonstram que serão consideradas somente informações do usuário desejado. Como exemplo, podemos citar algumas abordagens de detecção de múltiplos usuários utilizando blindagem: Técnicas de subspace, Winer Filters, Minimum Variance e algoritmos Power-of-R.

### 3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise deste estado da arte é possível ressaltar que alguns dos requisitos desejáveis para uma técnica de controle e mitigação de interferência em sistemas UWB são: 1) ser simples em relação: à implementação, à complexidade de processamento e à quantidade de mensagens de controle gerada na rede; 2) dar suporte ao maior número de usuários possível de usuários na rede, considerando sempre o suporte a uma alta taxa de dados; 3) considerar o contexto do ambiente e se adaptar as mudanças a fim de proporcionar um uso mais adequado do canal de comunicação.

A partir desta análise, concluiu-se que existem propostas muito boas para o controle e mitigação da interferência, mas que não são capazes de suprir todos os três requisitos listados acima. Muitas das propostas apresentam alguns deles, mas não todos. Então, foi identificada a oportunidade de contribuir com a solução deste problema propondo um método simples, com boas taxas de dados, que trabalha de forma adaptativa, nomeado de MSS-UWB.

## CAPÍTULO 4

# MSS-UWB

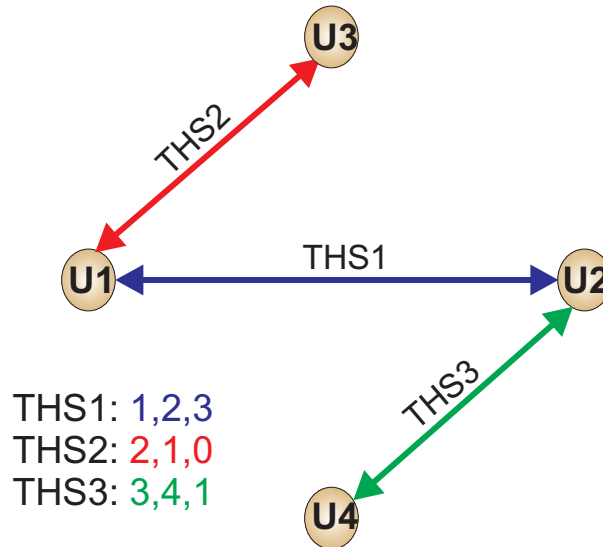
Neste capítulo é apresentado um modelo de MAC adaptativa capaz de mitigar a MUI em sistemas TH-PPM-UWB, chamado de MSS-UWB (*Multi-Sequence Selection-UWB*). Primeiramente, são apresentadas as características do MSS-UWB. Depois é apresentado o algoritmo de descoberta de vizinhos. Em seguida é apresentado o esquema de sincronização e troca de mensagens para realizar a comunicação. Depois é apresentado o modelo de taxa de enlace diferenciada, usado para aumentar as possíveis taxas de transmissão de dados, suavizando a adaptação. E por fim, é apresentado o algoritmo de adaptação utilizado.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS

O MSS-UWB é baseado em sistemas que utilizam múltiplos códigos. Essa abordagem foi utilizada primeiramente em sistemas DS-CDMA [17] e atualmente alguns trabalhos como o de [32] já a utilizou em sistemas UWB. No caso de sistemas TH-PPM-UWB geralmente os códigos são chamados de seqüências TH ou THSs (*Time Hopping Sequences*). A principal característica deste tipo de sistema é a possibilidade de se criar vários enlaces ao mesmo tempo com diferentes usuários. Desta forma, o controle da atribuição dos códigos se torna mais complexo, pelo fato de que cada nó da rede pode apresentar uma grande quantidade de códigos (enlaces) simultaneamente.

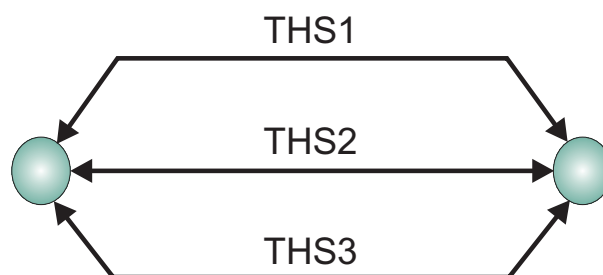
As principais pesquisas relacionadas a sistemas multi-códigos tendem a resolver o problema de atribuição automática dos códigos com o objetivo de minimizar o *overhead* de mensagens de controle e manter uma boa correlação entre os códigos gerados para os usuários da rede [57, 24]. A Figura 4.1 ilustra um sistema utilizando múltiplos códigos,

onde o usuário 1 (U1) se comunica simultaneamente com os usuários 2 (U2) e 3 (U3) e o usuário 2 (U2) se comunica simultaneamente com os usuários 1 (U1) e 4 (U4).



**Figura 4.1** Modelo de comunicação com múltiplas seqüências TH.

O MSS-UWB (*Multi-Sequence Selection UWB*) se aproveita da característica multi-códigos para criar múltiplas seqüências TH em uma mesma comunicação entre um par de usuários, o que possibilita obter uma maior taxa de dados a medida que se aumenta a quantidade de THSs utilizadas na comunicação. A Figura 4.2 ilustra um cenário onde um par de usuários se comunicam utilizando três THSs, definindo assim três enlaces simultâneos para a comunicação.

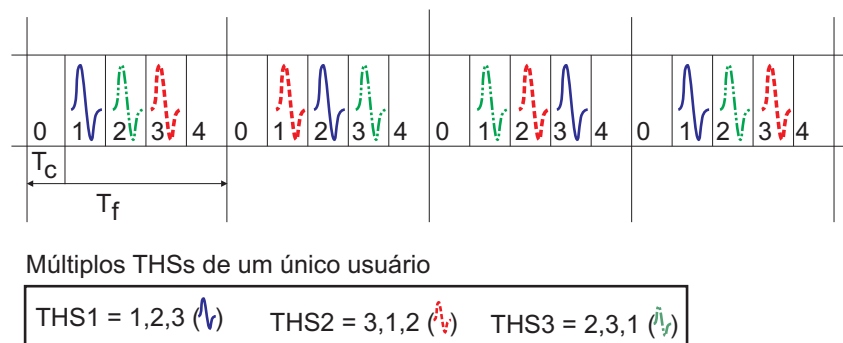


**Figura 4.2** Modelo de comunicação com múltiplas seqüências TH.

Como mostrado no Capítulo 3, um sistema TH-PPM-UWB convencional é dividido em quadros de tempo ( $T_f$ ) e estes são divididos em *slots* de tempo ( $T_c$ ) onde os pulsos

são enviados. Nestes sistemas os usuários transmitem um único pulso por quadro e usa uma THS para definir em qual *slot* de tempo  $T_c$  o usuário vai transmitir o pulso em cada quadro.

Diferente do sistema TH-PPM-UWB convencional, ou seja, que não utiliza múltiplas seqüências, os usuários do MSS-UWB conseguem transmitir mais de um pulso por quadro, pelo fato de poderem transmitir por vários enlaces simultaneamente em suas comunicações, como ilustrado na Figura 4.3.



**Figura 4.3** Esquema TH utilizando múltiplas seqüências por usuários.

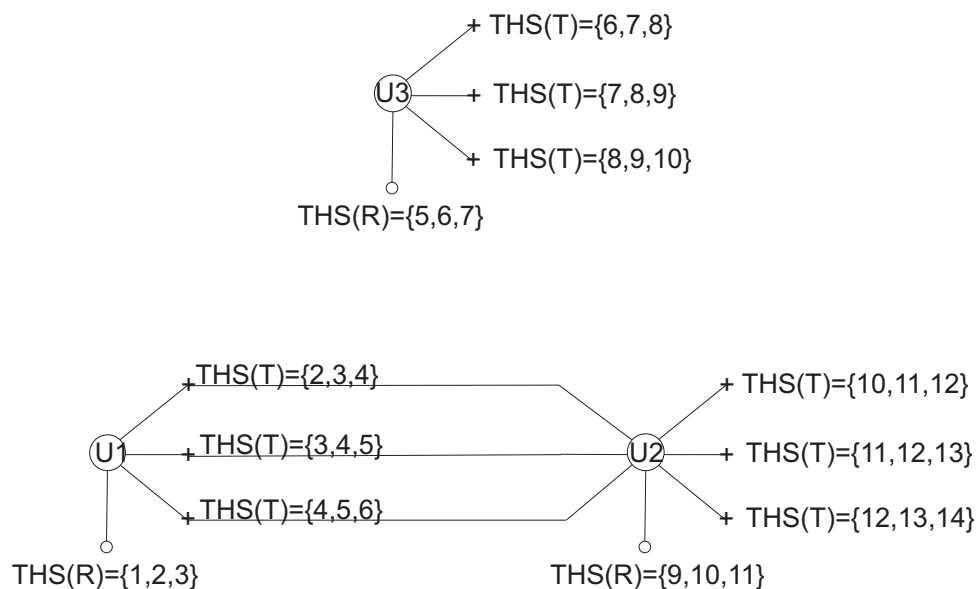
A característica da transmissão dos pulsos do MSS-UWB apresentado na Figura 4.3 possibilita adaptar a quantidade de pulsos que o usuário vai transmitir em cada quadro. Desta forma, é possível adaptar a taxa de dados na camada MAC utilizando diferentes quantidades de enlaces em uma mesma comunicação receptor-transmissor. Esta abordagem é mais simples e portátil, quando comparada com a abordagem *cross-layer* que necessita de ciência dos parâmetros utilizados na camada física, como utilizada em [35].

## 4.2 DESCOBERTA DE VIZINHOS

Para viabilizar uma comunicação entre um par de usuários em um sistema utilizando a técnica de acesso ao meio TH, primeiramente é necessário que o usuário conheça a THS do outro usuário ao qual ele deseja se comunicar. Desta forma, é obrigatório o uso de um algoritmo de descoberta de vizinhos, capaz de deixar todos os usuários cientes dos THSs de seus vizinhos. Só depois deste processo de descoberta de vizinhos é possível

estabelecer uma comunicação entre eles.

No MSS-UWB os THSs podem ser divididos em THS de requisição e os THSs de transferência. Cada usuário fica escutando no seu THS de requisição durante todo o momento em que se encontrar ocioso possibilitando que os demais usuário iniciem o processo de comunicação através do envio de uma mensagem de requisição de transmissão para o THS de requisição de algum outro usuário. No caso dos THSs de transmissão, eles são usados durante o processo de transmissão dos dados. Na Figura 4.4 é ilustrado cenário onde o usuário um (U1) se comunica com o usuário dois (U2), onde os THSs de requisição são apresentados como THS(R) e os de transmissão como THS(T).



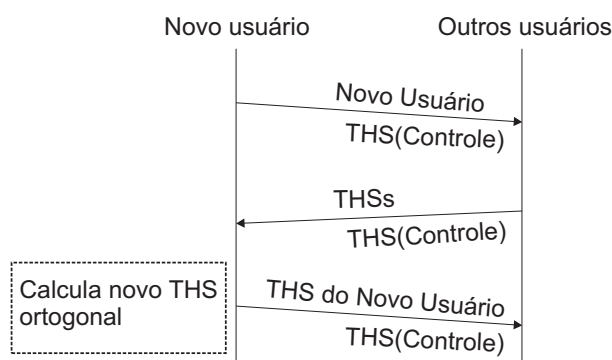
**Figura 4.4** Cenário MSS-UWB mostrando esquemas de THSs

Para que o cenário ilustrado na Figura 4.4 seja possível é necessário o uso de um algoritmo de descoberta de vizinhos capaz de realizar a configuração automática das THSs de requisição dos usuários da rede possibilitando o conhecimento do THS dos usuários para todos os seus vizinhos, detectar a inacessibilidade de vizinhos e possibilitar a atribuição de THSs ortogonais entre os vizinhos na rede, tanto para o THS de requisição quanto para os THSs de transmissão.

Quando um novo usuário entra na rede e deseja descobrir os THSs dos vizinhos ele envia uma mensagem para todos os usuários que estão em seu alcance de transmissão



usando um canal de controle definido por uma THS padrão conhecida por todos os usuários. Nesta mensagem contem a informação da THS deste usuário que acabou de entrar na rede. Ao receber essa mensagem os demais usuários esperam um tempo de *backoff* e enviam seus THSs no canal de controle, de forma que todos os seus vizinhos recebam a mensagem, possibilitando que não só que o novo usuário atualize sua tabela de vizinhos, mas que todos os outros também. No caso da THS definida pelo novo usuário não apresentar uma boa correlação em relação as THSs dos outros usuários o novo usuário gera um novo THS utilizando a tabela de THSs do vizinho como parâmetro para gerar um THS ortogonal aos demais e a envia aos seus vizinhos, como ilustrada na Figura 4.5.



**Figura 4.5** Cenário MSS-UWB mostrando esquemas de THSs

Além disso, periodicamente os usuários enviam suas THSs na rede a fim de que os outros usuários atualizem suas tabelas de vizinhos. Esse procedimento é importante para descobrir se algum usuário está inacessível, pois se ele passar muito tempo sem enviar uma mensagem informando sua THS ele é removido da tabela dos seus vizinhos, passando a não fazer mais parte logicamente da rede.

### 4.3 SINCRONIZAÇÃO E COMUNICAÇÃO

Diferente do modelo de comunicação TH-PPM-UWB tradicional, onde a mesma THS do usuário é usada tanto no processo de sincronização quanto no envio dos dados, no MSS-UWB são criadas novas THSs para cada comunicação entre um par de usuários. O MSS-UWB é baseado no conceito de MAC privado e usa a THS de requisição para a

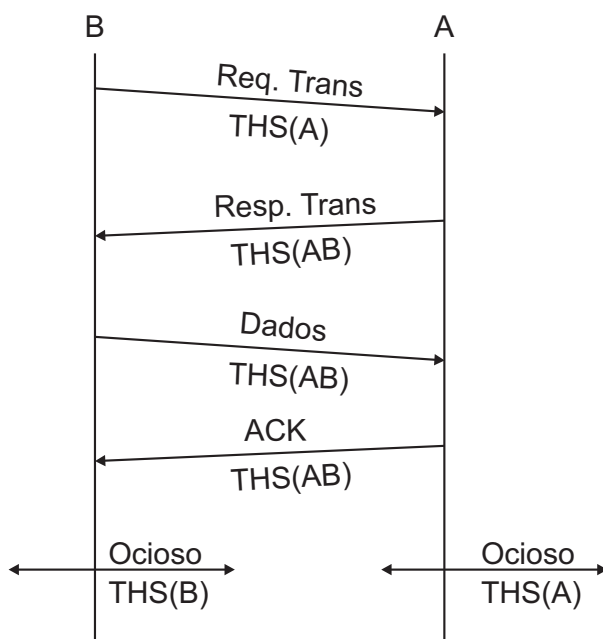
sincronização e define THSs de transmissão privadas para a transferência dos dados para o resto do processo de comunicação. Esta abordagem evita a interferência causada por nós que desejam transmitir ao mesmo receptor ao mesmo tempo dentro da região de exclusão definida pelo uso de mensagens RTS/CTS (*Request To Send/Clear To Send*) [35, 46].

#### 4.3.1 Transmissão com sucesso

Uma transmissão realizada com sucesso consiste em:

1. uma transmissão de uma requisição pelo transmissor;
2. recebimento da resposta do receptor a essa requisição
3. o envio dos dados
4. recebimento do ACK

Assumindo um cenário onde existe um usuário  $B$  que deseja transmitir para o usuário  $A$ , e nenhum outro usuário está enviando dados para  $A$ . O usuário ocioso  $A$  fica constantemente escutando na sua THS a espera de alguma requisição de transmissão. O usuário  $B$  envia uma mensagem de requisição de transmissão utilizando o THS de  $A$ . Recebendo essa requisição,  $A$  responde usando o THS privado entre  $A$  e  $B$ , criado randomicamente por  $B$ , passado junto com a mensagem de requisição de transmissão, indicando que ele está ocioso. Quando  $B$  recebe a resposta ele inicia a transmissão dos dados utilizando o THS privado entre  $A$  e  $B$ . Depois da transmissão,  $B$  espera por um *feedback* de  $A$ , ou seja, um ACK (*Acknowledge*) indicando que os dados enviados foram recebidos corretamente. Se o ACK é recebido e  $B$  tiver mais informações para transferir para  $A$ , ele continua o envio dos dados. Se o ACK não for recebido (NACK),  $B$  tenta enviar os dados novamente após intervalo de tempo de *backoff*, até chegar a um certo limite de tentativas de retransmissão. Uma nova transmissão requer uma nova requisição de transmissão. Esse cenário é ilustrado na Figura 4.6



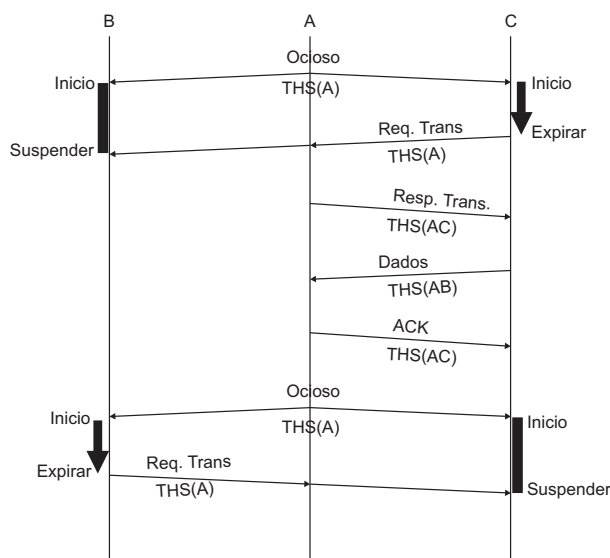
**Figura 4.6** Transmissão com sucesso

### 4.3.2 Transmissão adiada

Assumindo um cenário onde  $C$  deseja transmitir dados para  $A$  enquanto que  $A$  está ocupado em uma comunicação com  $B$ .  $C$  envia uma requisição de comunicação no THS de  $A$ . Isto causa interferência, mas não impossibilita a comunicação entre  $A$  e  $B$ .  $C$  então fica escutando o THS de  $A$ , a espera de uma mensagem avisando que ele está ocioso. Ao final da transmissão, com sucesso ou não, tanto  $A$  quanto  $B$  enviam uma mensagem em seus respectivos THSs dizendo que estão ociosos. Quando  $C$  recebe a mensagem de  $A$  dizendo que ele está ocioso, ele espera um tempo de *backoff* e transmite uma nova mensagem de requisição de transmissão para  $A$ . Este cenário é ilustrado na Figura 4.7.

### 4.3.3 Condição de disputa

Este é o cenário mais geral, onde dois transmissores disputam pela transmissão. O primeiro envio para o transmissor é imediato; se o receptor estiver ocioso não haverá atraso no acesso. Se o receptor estiver ocupado, a transmissão falha (possivelmente sem co-



**Figura 4.7** Transmissão adiada

lisões). O não recebimento da mensagem de ocioso de *A*, faz com que *B* fique escutando no THS de *A* e calcula um tempo de *backoff* mas não o inicia. Quando é recebida uma mensagem de ocioso, o tempo de *backoff* é iniciado. Quando esse tempo é expirado uma nova mensagem de requisição é enviada. Se a requisição de transmissão falhar novamente o tempo de *backoff* é parado e ele volta a escutar no THS do receptor esperando uma nova mensagem de ocioso.

#### 4.3.4 Colisão verdadeira

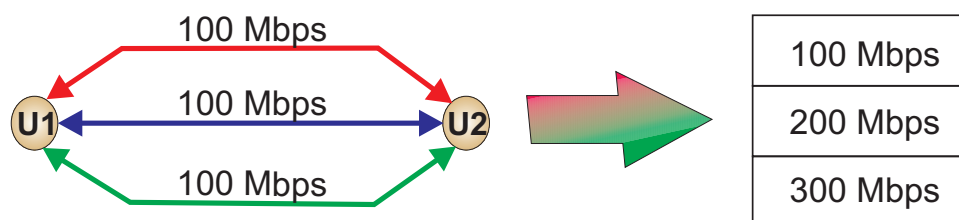
Assumindo que *A*, *B* e *C* estão ociosos, e *B* e *C* enviam uma mensagem de requisição para *A* exatamente ao mesmo tempo. Uma colisão ocorre em *A*, somente se o preâmbulo de sincronização de ambas as requisições se sobreporem. De outra forma, *A* sincroniza com uma das duas requisições e a outra é tida como uma interferência.

Embora ambos os pedidos sejam emitidos no mesmo THS, eles não são sincronizados. Assim a janela da disputa é limitada ao tempo de sincronização (isto é  $10\text{ ms}$ ). Este é menor do que o  $51.2\text{ ms}$  da janela da disputa no Ethernet em  $10\text{ Mb/s}$ , sendo assim muito baixo. Portanto, é encontrada uma janela pequena na disputa sem detecção das

portadoras.

#### 4.4 MODELO DE TAXA DE ENLACE DIFERENCIADA

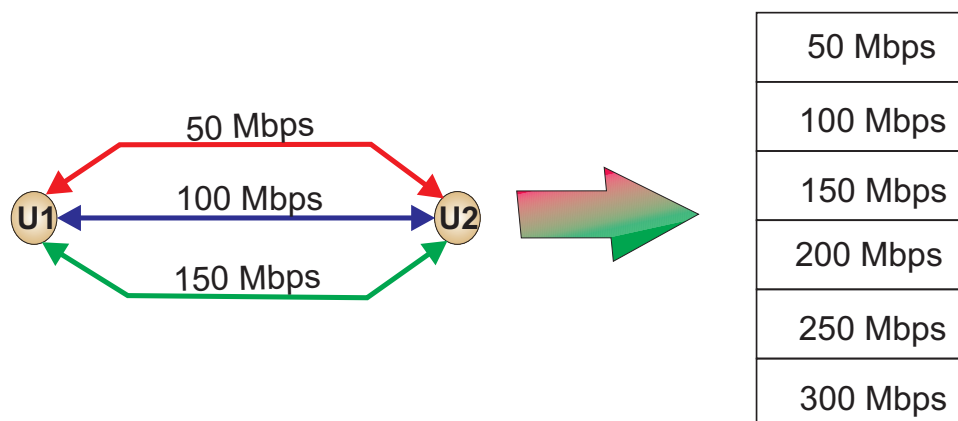
A taxa de dados máxima de uma comunicação entre um par receptor-transmissor MSS-UWB depende da quantidade de seqüências TH utilizadas na comunicação entre eles. Na Figura 4.8 é mostrado uma comunicação entre um par receptor-transmissor em um sistema UWB utilizando três seqüências TH, onde é mostrado também que a quantidade de taxas de dados deste sistemas é igual a quantidade de seqüências TH utilizadas, que neste caso são três.



**Figura 4.8** Sistema UWB usando múltiplas seqüências

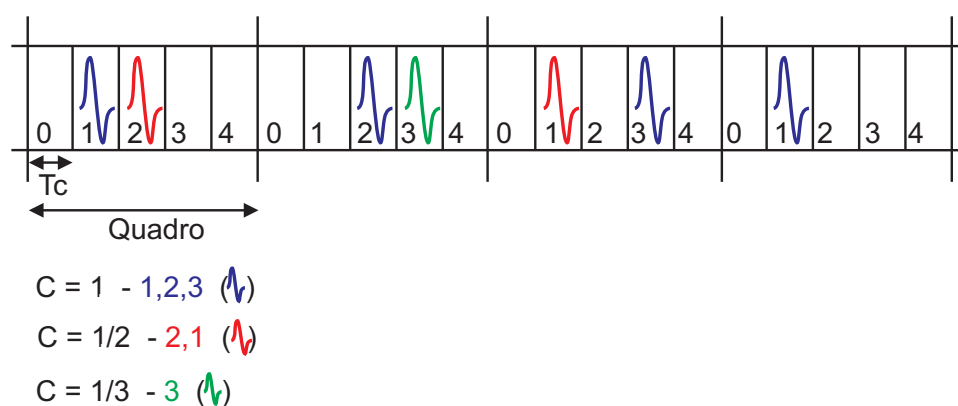
Para aumentar a quantidade de possíveis taxas de transmissão foi criado um modelo de taxa de enlace diferenciada, onde cada enlace pode apresentar uma taxa de dados diferente. Com isso é possível gerar uma maior quantidade de taxas de dados diferentes, onde as taxas são geradas não só através da quantidade de enlaces que estão sendo utilizados para a comunicação, mas também pelas diversas combinações entre esses enlaces, como mostrado na Figura 4.9.

Utilizando este modelo de transmissão, cada enlace criado entre o par receptor-transmissor pode apresentar uma taxa de dados diferente da taxa dos demais enlaces. Na Figura 4.10 é ilustrado como os pulsos são transmitidos nos quadros a fim de gerar diferentes taxas de dados para cada enlace. Para isso, a forma seqüencial do envio de um pulso a cada quadro é modificada de acordo com a taxa de dados que se espera obter, de forma que o pulso não seja transmitido em todos os quadros e sim intervalando sua



**Figura 4.9** Sistema UWB usando múltiplas seqüências com diferentes taxas de dados para cada enlace

transmissão entre os quadros.



**Figura 4.10** Pulsos transmitidos em um sistema UWB usando o modelo de taxa de enlace diferenciado

## 4.5 ALGORITMO DE ADAPTAÇÃO

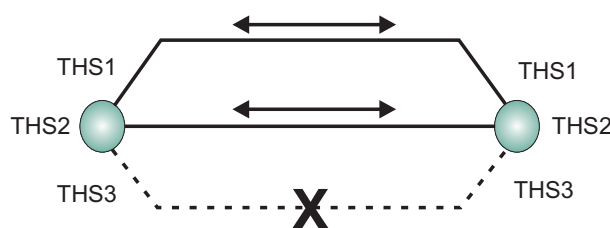
Partindo do princípio que os recursos de rede são limitados (e.g. largura de banda da rede), quando a demanda está próxima de exceder a capacidade dos recursos é denominada uma ocorrência de congestionamento da rede. Esta situação é herdada das redes de melhor esforço devido à alocação de recursos sem coordenação.

Uma forma de controlar o congestionamento da rede é adaptar a taxa de transmissão

de dados de acordo com as condições do canal de comunicação. Essa adaptação pode ser implementada tanto no receptor quanto no transmissor. Uma forma simples de possibilitar essa adaptação é implementar a medição da qualidade do enlace no transmissor e ele próprio tomar as decisões sobre a adaptação, desta forma, os usuários tratam a rede simplesmente como uma caixa preta que descarta pacotes.

O algoritmo de adaptação é responsável por tomar a decisão pela adaptação e decidir qual taxa de dados será usada para a transmissão. Para isso, ele avalia as informações de BER (*Bit Error Rate*) dos seus enlaces durante um determinado período de tempo e dependendo da quantidade de erros detectados neste período o algoritmo toma a decisão de qual a taxa de dados será usada nas próximas transmissões a fim de se adequar as novas condições do ambiente.

O MSS-UWB realiza a adaptação da taxa de dados combinando as seqüências TH entre si, possibilitando a transmissão em diferentes taxas de dados. A adaptação tem a finalidade de controlar a MUI da rede minimizando a quantidade de colisões de bits, aumentar a taxa de transmissão quando o canal está sendo pouco utilizado e apresentando poucos erros e diminuir esta taxa de dados quando o canal estiver sendo compartilhado com uma maior quantidade de usuários. A Figura 4.11 ilustra um cenário após a adaptação, onde um enlace deixou de ser utilizado a fim de diminuir a taxa de dados por causa do aumento do número de colisões detectadas.



**Figura 4.11** Adaptação do link à interferência.

O algoritmo de adaptação foi projetado para trabalhar de forma simples com o objetivo de não causar um *overhead* de sinalização na rede. Por isso, decidiu-se levar em consideração somente os erros decorridos de sua transmissão, não necessitando de uma avaliação cooperativa das condições do canal, onde seria necessário uma grande quanti-

dade de troca de mensagens entre os demais usuários da rede.

Essa característica foi levada em consideração no projeto do algoritmo de adaptação que também considerou a própria natureza do meio de comunicação sem fio que por si só é muito propícia a perda de pacotes. O algoritmo de adaptação tem como principais objetivos: minimizar os erros de bit decorridos da MUI e transmitir utilizando a maior taxa de dados possível para a transmissão.

#### 4.5.1 Passo-a-Passo

Após a sincronização, a transmissão dos dados é iniciada utilizando somente um THS, capaz de transmitir um pulso a cada quadro. Durante a transmissão informações sobre a taxa de erros de bits são coletadas e utilizadas para a tomada de decisão de adaptação da taxa de transmissão. Se durante um determinado intervalo de tempo  $T$  os erros de bits estiverem abaixo do limiar pré-definido de erros aceitáveis na comunicação, o algoritmo aumenta a taxa de dados para a próxima maior taxa escolhendo uma nova combinação entre seus THSs.

Se a quantidade de erros ocorrido for maior ou igual ao limiar, a taxa de dados é diminuída para uma taxa menor, anterior a taxa utilizada que gerou esses erros de bits. Se na próxima adaptação os erros de bits forem menor que o limiar a taxa de dados volta a aumentar.

Com o objetivo de diminuir os erros com colisões de bits quando o canal de comunicação já se encontra no seu limite e qualquer aumento da taxa de transmissão leva ao aumento da quantidade de erros de bits foi utilizado um array de tempos com os valores (1 2 4 8 16 32) que define quantos intervalos de tempo  $T$  serão necessários para ocorrer a próxima adaptação. Ele é incrementado quando a quantidade de erros de bits ultrapassa o limiar e volta a ser incrementado quando o próximo aumento da taxa vem seguido de uma diminuição da mesma. Seu valor somente é reiniciado quando ocorrerem dois acréscimos de taxa consecutivos.

Quando o último elemento do array de tempos é atribuído a  $T$ , é identificado que o ambiente se apresenta com uma certa estabilidade. Entretanto, ainda se faz necessário



testar uma maior taxa de dados, pois é possível que novos usuários tenham saído da rede e que a taxa de transmissão possa ser incrementada. Esse passo a passo é mostrado no Pseudo-código 1.

#### **4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A principal diferença entre o MSS-UWB e as demais propostas de controle de interferência em ambientes UWB é o fato de se basear nos sistemas que utilizam múltiplos códigos para realizar a adaptação de taxa de dados. No MSS-UWB são criadas várias seqüências TH entre um mesmo par de usuários, onde a taxa de dados é escolhida dinamicamente através da combinação entre as seqüências TH que serão utilizadas para comunicação. Foi criado também um modelo de taxa de enlace diferenciada com o intuito de suavizar a adaptação da taxa de dados e possibilitar a escolha de um maior número de taxas de dados para diferentes contextos de MUI no canal de comunicação.

Técnicas adaptativas convencionais usadas para a mitigação de interferência, como por exemplo a técnica de codificação do canal como apresentada em [35], possibilitam uma comunicação mais robusta através da inclusão de bits redundantes na transmissão. Esse tipo de abordagem diminui a quantidade de retransmissões de bits em caso de erros na comunicação, entretanto não se preocupa em diminuir a quantidade de colisões que estão ocorrendo.

---

**Algorithm 1** Algoritmo de adaptação

---

*AdaptTime* : Tempo definido para a análise de necessidade de adaptação do algoritmo

*AtualTime* : Tempo atual

*ErrorBits* : Erros de bits ocorridos entre a última adaptação e a atual

*Limiar* : Limiar de erros aceitos sem a necessidade de diminuir a taxa de dados

*Index* : Índice que guarda a posição do Array de tempos de adaptação

*TArray* : Array que contém os intervalos de tempo para as próximas adaptações

*PreviousTx* : Guarda a taxa de utilizada na transmissão anterior

*AtualTx* : Tem a informação da taxa de transmissão atual

*IntervalAdapt* : Intervalo de tempo entre uma adaptação e outra

*GetPreviousTx()* : Retorna a taxa de transmissão menor, mais próxima da *AtualTx*

*GetNextTx()* : Retorna a taxa de transmissão maior, mais próxima da *AtualTx*

*CorrectTHSError()* : Cria uma nova seqüência TH substituindo as seqüências do usuário que tiveram erros de bits.

```
1: if AdaptTime = AtualTime then
2:   if ErrorBits ≤ Limiar then
3:     if PreviousTx < AtualTx then
4:       Index = 1
5:     end if
6:     PreviousTx ← AtualTx
7:     AtualTx ← GetNextTx()
8:   else
9:     if Index < TArray.Count And PreviousTx < AtualTx then
10:      Index = Index + 1
11:    end if
12:    PreviousTx ← AtualTx
13:    AtualTx ← GetPreviousTx()
14:    CorrectTHSError()
15:  end if
16:  AdaptTime ← AtualTime + (IntervalAdapt × TArray[Index])
17: end if
```

---

## CAPÍTULO 5

# SIMULAÇÃO E RESULTADOS

Neste capítulo é apresentado primeiramente informações de como foram realizadas as simulações (ferramentas e parâmetros utilizados) e em seguida quais resultados foram obtidos a partir destas simulações. Na apresentação dos resultados, são mostrados os resultados de vazão e de BER de um sistema UWB convencional, depois são mostrados os resultados de um sistema UWB que utiliza múltiplas seqüências, mas sem nenhum mecanismo de adaptação e em seguida são mostrados os resultados do MSS-UWB. Depois de avaliar os resultados, é selecionado o melhor resultado de cada sistema UWB e eles são comparados entre si.

### 5.1 SIMULAÇÃO

O objetivo das simulações é avaliar o desempenho do MSS-UWB e comparar os resultados obtidos com o MSS-UWB com outros sistemas UWB. Para isso foram implementados o MSS-UWB, um sistema TH-PPM-UWB e um sistema que utiliza múltiplas seqüências TH, porém não apresentando as características adaptativas do MSS-UWB. Estes sistemas são detalhados abaixo.

- **TH-PPM-UWB:** sistema UWB que utiliza a técnica de acesso ao meio TH, com modulação PPM. Neste sistema é utilizado o conceito de MAC privado apresentado em [46], onde é gerado um novo THS para cada novo enlace criado na rede;
- **UWB com múltiplas seqüências TH:** além das características do sistema TH-PPM-UWB, ele utiliza múltiplas seqüências TH para cada enlaceS;

- **MSS-UWB:** o sistema MSS-UWB (Multi-Sequence Selection UWB), como apresentado no capítulo anterior, utiliza múltiplas seqüências TH para cada enlace, e apresenta também a capacidade de se reconfigurar de acordo com as condições de interferência encontradas no ambiente.

Estes sistemas foram simulados utilizando o Matlab, onde foram implementadas suas principais funcionalidades e características. Algumas características mais específicas destes sistemas não foram levadas em consideração, como: o algoritmo de descoberta de vizinho; o modelo de propagação (responsável por modelar o desvanecimento do sinal transmitido), a interferência multi-caminho e a troca de mensagens de sincronização.

### 5.1.1 Parâmetros de Simulação

Os parâmetros utilizados pelos três sistemas UWB são apresentados na Tabela 5.1.1.

Tamanho de cada slot de tempo de transmissão do pulso ( $T_c$ )	1 nanosegundo
Tamanho do quadro utilizado para a transmissão dos pulsos ( $T_f$ )	10 nanosegundos
Tempo utilizado para a simulação	1000 nanosegundos

**Tabela 5.1** Parâmetros utilizados para as simulação

O intervalo de tempo entre uma adaptação e outra utilizado pelo sistema MSS-UWB é um valor definido randomicamente entre 7ns e 12ns.

Utilizando os parâmetros acima mencionados é possível obter a capacidade da rede que é igual a 1Gbps (Um gigabit por segundo), ou seja, essa capacidade será compartilhada entre todos os usuários da rede que desejarem transmitir dados.

#### 5.1.1.1 Taxa de Enlace Diferenciada

A escolha da quantidade de THSs utilizadas para a comunicação e da taxa de dados de cada enlace foi determinada com o objetivo de possibilitar uma alta taxa de dados para os usuários sem causar muitas colisões na rede. Tendo como base o cenário de casas

digitais foi definido que uma rede UWB residencial teria que dar suporte a transmissões multimídia que necessitaria de uma vazão média por usuário de 20Mbps.

Para satisfazer essa necessidade foi definida a taxa de enlace diferenciada como descrito na Tabela 5.2. Ela demonstra qual a taxa de envio de pulsos por quadro para cada THS, de acordo com a quantidade de THSs utilizados para a transmissão.

	THS 1	THS 2	THS 3	THS 4	THS 5
2 THSs	1	$\frac{1}{2}$			
3 THSs	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$		
4 THSs	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	
5 THSs	1	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{5}$

**Tabela 5.2** Parâmetros utilizados para as simulação

Ao se utilizar 5 THSs podem ser utilizadas 15 diferentes taxas de dados, através das diferentes combinações entre os 5 THSs utilizando, os valores de taxa de dados em Mbps estão apresentados na Tabela 5.3.

228,33	208,33	183,33	150,00	128,33
108,33	100,00	83,33	78,33	58,33
50,00	45,00	33,33	25,00	20,00

**Tabela 5.3** Possíveis taxa de dados em Mbps utilizando 5 THSs

A quantidade de diferentes taxas de transmissão é calculada através da Equação 5.1.

$$\left( \sum_{i=1}^n i \right) \quad (5.1)$$

onde  $n$  é a quantidade de THSs utilizados para a comunicação.

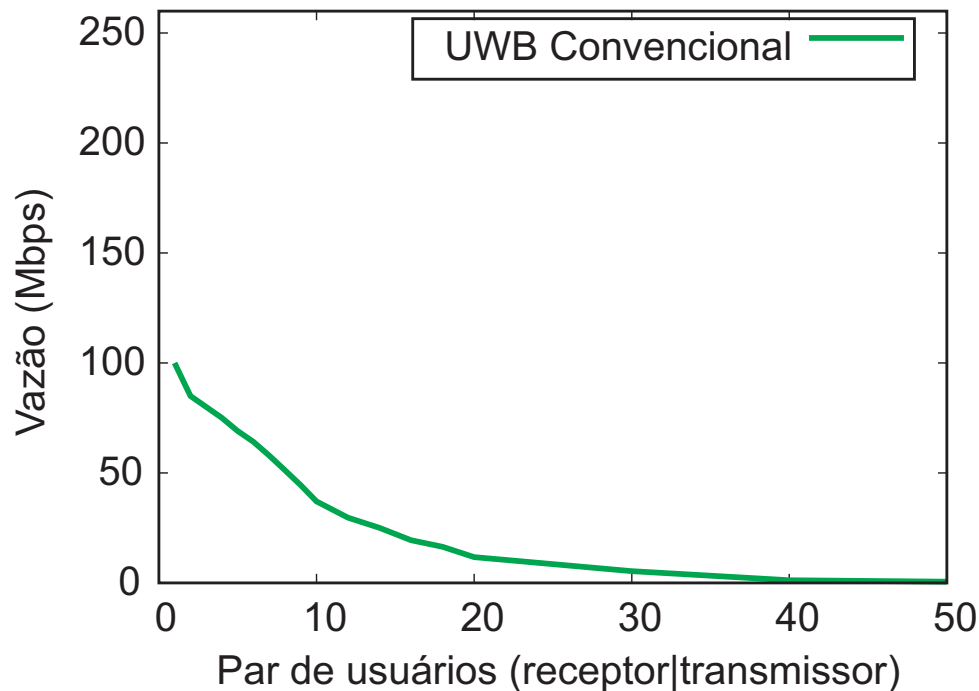
## 5.2 RESULTADOS

Nas seguintes subseções serão avaliadas as taxas de BER e a vazão dos três sistemas UWB definidos anteriormente. Esses cenários serão avaliados individualmente e depois

comparados entre si. O BER é calculado pela razão entre a quantidade de erros de pulsos ocorridos sobre a quantidade total de pulsos transmitidos na rede. A vazão calculada através da soma de todos os pulsos que chegam corretamente no receptor no intervalo de tempo de um segundo.

### 5.2.1 UWB Convencional

Na Figura 5.1 é apresentado o gráfico de vazão em diferentes cenários de MUI, ou seja, com diferentes quantidades de pares transmissor-receptor transmitindo ao mesmo tempo em um sistema UWB convencional. Neste gráfico é possível verificar que a vazão máxima alcançada por esse sistema é de 100 *Mbps* no cenário onde um par receptor-transmissor estão livres de MUI. É possível perceber também que esse sistema não tira proveito do canal de comunicação nem quando existem poucos usuários concorrendo pelo acesso ao meio e nem quando tem muitos usuários. Os dados usados para plotar esse gráfico podem ser visualizados na Tabela 5.4.

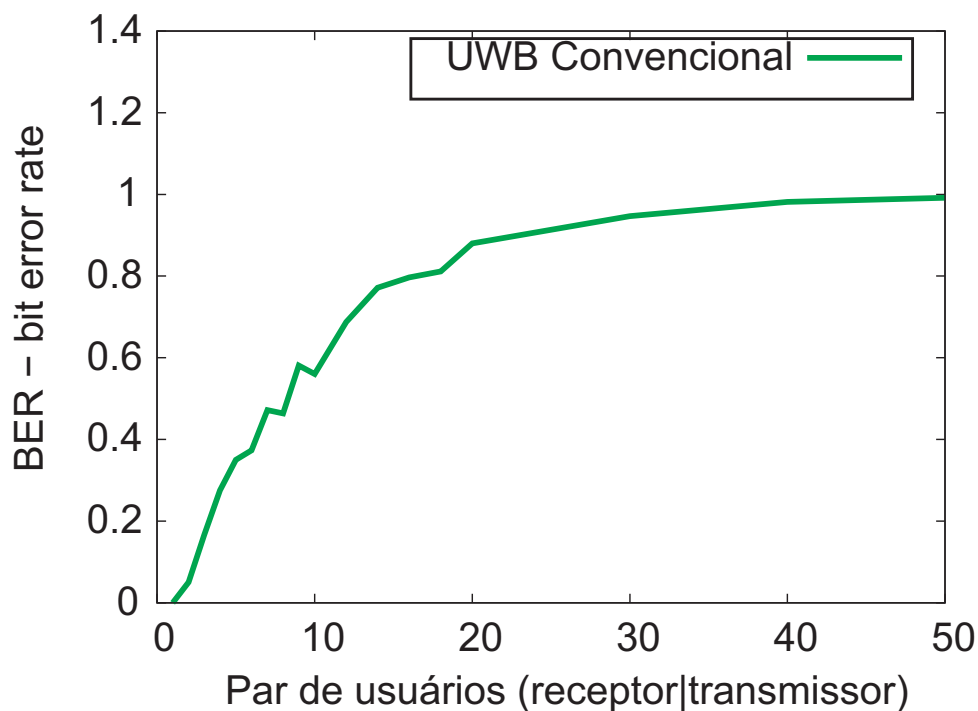


**Figura 5.1** Vazão do UWB convencional em diferentes níveis de MUI

Qtd. Usuários	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Vazão (Mbps)	100,00	85,00	80,00	75,00	69,00	64,16	57,85	51,25	44,44
Qtd. Usuários	10	12	14	16	18	20	30	40	50
Vazão (Mbps)	37,00	29,58	25,00	19,37	16,38	11,75	5,33	1,25	0,50

**Tabela 5.4** Vazão em Mbps de um sistema UWB convencional em diferentes cenários de MUI

Um outro gráfico importante para perceber o comportamento da transmissão e o efeito da MUI, é o gráfico de BER que é mostrado na Figura 5.2. Nele é possível perceber o aumento do BER a medida que se aumenta a quantidade de usuários transmitindo ao mesmo tempo na rede. Os dados usados para plotar esse gráfico podem ser visualizados na Tabela 5.5.



**Figura 5.2** BER do UWB convencional em diferentes cenários de MUI

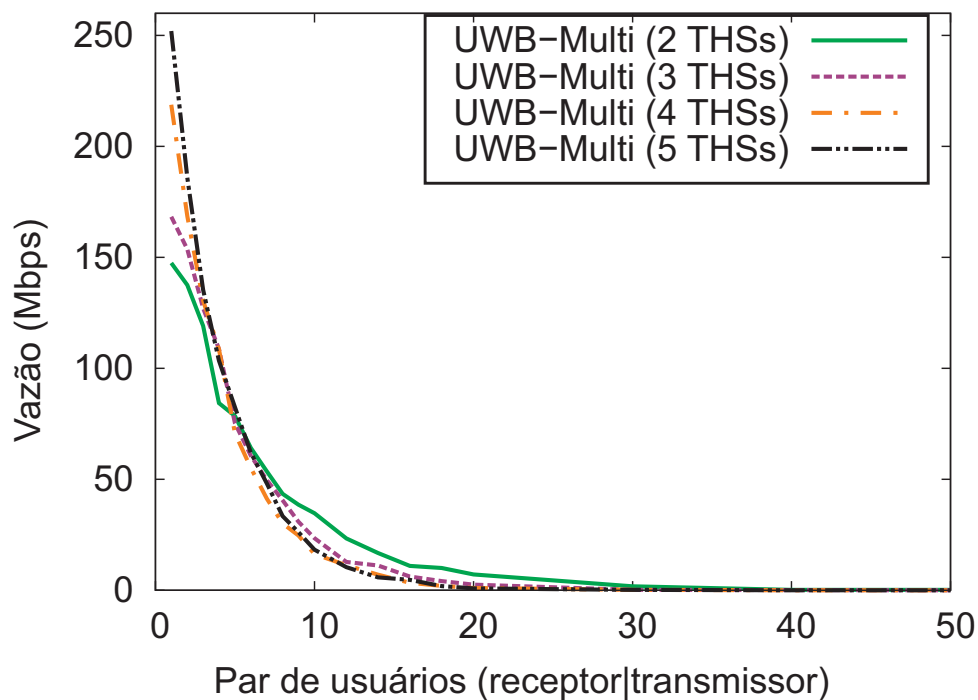
A partir do gráfico de BER apresentado na Figura 5.2 é possível perceber o aumento considerável do BER a medida que é aumentado o número de usuários compartilhando o meio.

Qtd. Usuários	1	2	3	4	5	6	7	8	9
BER	0,00	0,05	0,16	0,27	0,35	0,37	0,47	0,46	0,58
Qtd. Usuários	10	12	14	16	18	20	30	40	50
BER	0,56	0,68	0,77	0,79	0,81	0,88	0,94	0,98	0,99

**Tabela 5.5** BER do UWB convencional em diferentes cenários de MUI

### 5.2.2 UWB com múltiplas seqüências

Ao se utilizar múltiplas seqüências TH por usuário, é o mesmo de se está alocando uma maior largura de banda do canal para cada usuário, ou seja, cada usuário vai transmitir uma maior quantidade de pulsos por quadro. Os resultados de vazão deste sistema utilizando diferentes quantidades de THSs para a transmissão dos dados e a avaliação deste sistema em diferentes cenários de MUI são ilustrados na Figura 5.3 utilizando os dados da Tabela 5.6.



**Figura 5.3** Vazão de um sistema UWB utilizando múltiplas seqüências

O BER obtido utilizando diferentes quantidades de seqüências em diferentes cenários



Qtd. Usuários	1	2	3	4	5	6	7	8	9
UWB Multi(2THSs)	147,50	137,50	119,16	84,33	78,49	64,17	53,56	43,44	38,60
UWB Multi(3THSs)	168,34	153,74	127,13	108,72	75,26	60,65	49,57	40,51	30,84
UWB Multi(4THSs)	218,75	168,57	130,49	108,59	70,77	55,10	41,26	30,11	24,60
UWB Multi(5THSs)	252,00	186,00	135,33	103,50	82,40	62,01	48,16	33,38	26,13

Qtd. Usuários	10	12	14	16	18	20	30	40	50
UWB Multi(2THSs)	34,75	23,34	16,79	10,93	10,01	7,12	1,75	0,12	0,10
UWB Multi(3THSs)	23,44	12,77	11,12	6,22	4,13	2,52	0,17	0,04	0
UWB Multi(4THSs)	16,31	11,22	6,98	3,35	1,95	1,04	0,16	0	0
UWB Multi(5THSs)	18,33	10,42	5,78	4,69	1,83	0,80	0,10	0	0

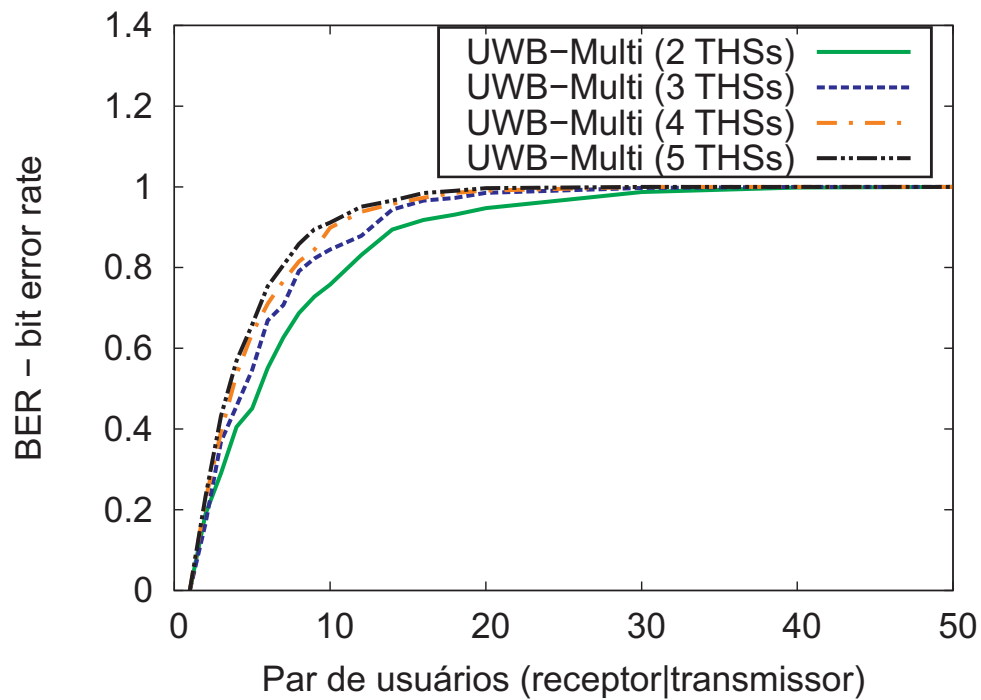
**Tabela 5.6** Vazão em Mbps de um sistema UWB utilizando múltiplas seqüências em diferentes cenários de MUI

de MUI é ilustrado na Figura 5.4, o qual utilizou os dados da Tabela 5.7. Nela é possível perceber que o BER aumenta muito rapidamente quando outros pares de transmissor-receptor são adicionados a rede.

Avaliando os resultados dos gráficos de BER e vazão é possível perceber que quanto maior é a quantidade de THSs utilizadas pelos usuários é maior também a vazão obtida quando um único par receptor-transmissor estão se comunicando. Entretanto a vazão diminui rapidamente a medida que novos pares de usuários são inseridos na rede. Desta forma o tempo de vida da rede é minimizado drasticamente.

### 5.2.3 MSS-UWB

O MSS-UWB (Multi-Sequence Selection UWB) usa múltiplas seqüências TH por usuário e apresenta também a capacidade de seleção adaptativa destas múltiplas seqüências, dependendo das condições de MUI, como apresentado no Capítulo 4. No gráfico da Figura 5.5, são apresentados os resultados de throughput, utilizando diferentes quantidades de THSs em diferentes cenários de MUI. Quando novos usuários são inseridos na rede, é



**Figura 5.4** BER obtido do sistema UWB com múltiplas seqüências em diferentes cenários de MUI

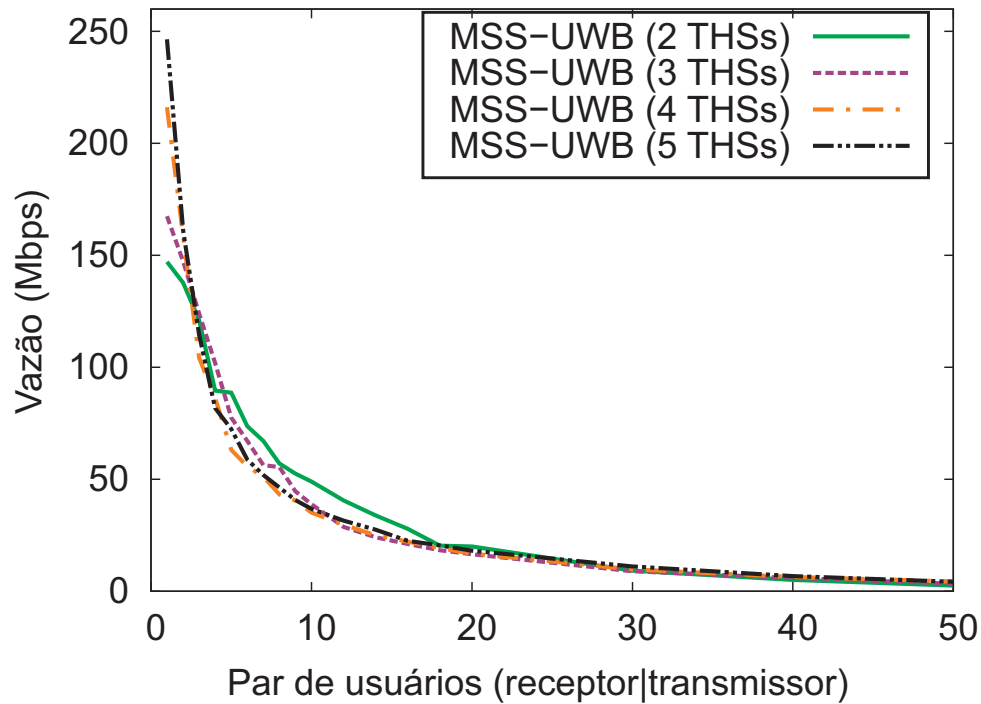
Qtd. Usuários	1	2	3	4	5	6	7	8	9
UWB Multi(2THSs)	0,00	0,18	0,29	0,40	0,45	0,55	0,62	0,68	0,72
UWB Multi(3THSs)	0,00	0,16	0,36	0,45	0,54	0,66	0,70	0,79	0,82
UWB Multi(4THSs)	0,00	0,22	0,39	0,53	0,63	0,71	0,76	0,81	0,84
UWB Multi(5THSs)	0,00	0,23	0,43	0,56	0,65	0,75	0,80	0,85	0,89

Qtd. Usuários	10	12	14	16	18	20	30	40	50
UWB Multi(2THSs)	0,75	0,83	0,89	0,91	0,93	0,94	0,98	0,99	1,00
UWB Multi(3THSs)	0,84	0,87	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00
UWB Multi(4THSs)	0,89	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00
UWB Multi(5THSs)	0,91	0,95	0,96	0,98	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00

**Tabela 5.7** BER obtido do sistema UWB com múltiplas seqüências em diferentes cenários de MUI

possível perceber que a capacidade adaptativa do MSS-UWB consegue aumentar a vazão diminuindo a taxa de transferência, o que acarreta na diminuição do BER. Os dados utilizados para plotar o gráfico são apresentados na Tabela 5.8.



**Figura 5.5** Vazão obtida com o MSS-UWB em diferentes cenários de MUI

Para se obter melhores resultados de vazão, se faz necessário minimizar o BER e aumentar a taxa de bits. Na Figura 5.6 é apresentado o gráfico de BER utilizando várias quantidades de seqüências diferentes em diferentes cenários de MUI. Os dados utilizados para plotar o gráfico são apresentados na Tabela 5.9.

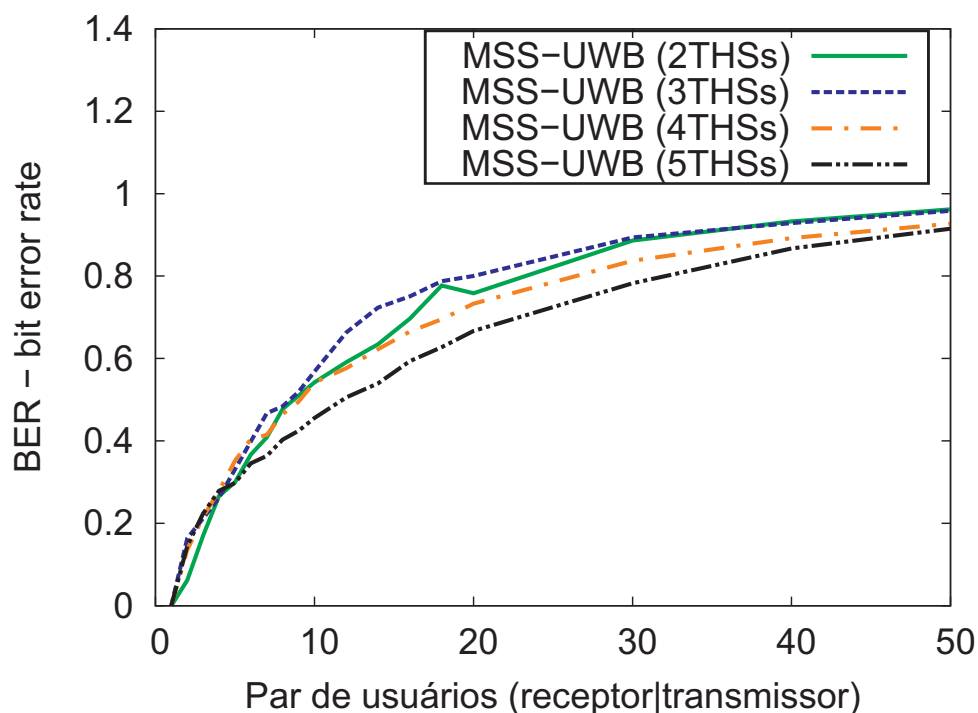
É possível perceber também que o MSS-UWB faz um melhor proveito do canal de comunicação, pois ele consegue alocar o espectro do canal que não está em uso para os usuários que desejam transmitir. Ele consegue também aumentar o tempo de vida da rede, possibilitando que mesmo com 50 pares transmissor-receptor utilizando o canal de comunicação ao mesmo tempo consiga ter um BER de 0,91% e uma vazão de 4,25 *Mbps* no caso em que foram utilizados 5 THSs.

Qtd. Usuários	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MSS-UWB (2THSs)	147,05	137,75	121,14	89,57	88,70	73,77	67,03	57,00	52,48
MSS-UWB (3THSs)	167,44	147,28	123,99	101,95	77,46	67,18	56,31	55,40	44,66
MSS-UWB (4THSs)	216,11	158,46	104,17	86,43	63,13	55,78	51,08	43,18	40,48
MSS-UWB (5THSs)	246,50	161,06	114,52	81,78	72,42	58,82	51,88	46,35	40,74

Qtd. Usuários	10	12	14	16	18	20	30	40	50
MSS-UWB (2THSs)	48,92	40,43	33,80	27,80	20,30	20,01	9,19	5,07	2,46
MSS-UWB (3THSs)	38,84	28,66	24,11	21,04	18,28	16,50	8,84	5,92	3,34
MSS-UWB (4THSs)	35,04	29,69	24,87	22,12	19,25	16,73	9,72	6,34	4,37
MSS-UWB (5THSs)	36,73	31,44	27,47	22,46	20,49	18,03	11,05	6,70	4,25

**Tabela 5.8** Vazão em Mbps obtida com o MSS-UWB em diferentes cenários de MUI



**Figura 5.6** BER obtido com o MSS-UWB em diferentes cenários de MUI

#### 5.2.4 Comparação dos resultados

Nesta seção são comparados os melhores resultados de vazão e BER do MSS-UWB, do UWB utilizando múltiplas seqüências e do UWB convencional. Para a escolha do melhor

Qtd. Usuários	1	2	3	4	5	6	7	8	9
MSS-UWB (2THSs)	0,00	0,06	0,17	0,26	0,29	0,36	0,40	0,47	0,50
MSS-UWB (3THSs)	0,00	0,16	0,21	0,26	0,33	0,39	0,46	0,48	0,51
MSS-UWB (4THSs)	0,00	0,13	0,21	0,27	0,35	0,40	0,41	0,46	0,49
MSS-UWB (5THSs)	0,00	0,14	0,22	0,27	0,29	0,34	0,36	0,40	0,42
Qtd. Usuários	10	12	14	16	18	20	30	40	50
MSS-UWB (2THSs)	0,54	0,59	0,63	0,69	0,77	0,75	0,88	0,93	0,96
MSS-UWB (3THSs)	0,56	0,66	0,72	0,75	0,78	0,80	0,89	0,92	0,95
MSS-UWB (4THSs)	0,54	0,57	0,62	0,66	0,69	0,73	0,83	0,89	0,92
MSS-UWB (5THSs)	0,45	0,50	0,53	0,59	0,62	0,66	0,78	0,86	0,91

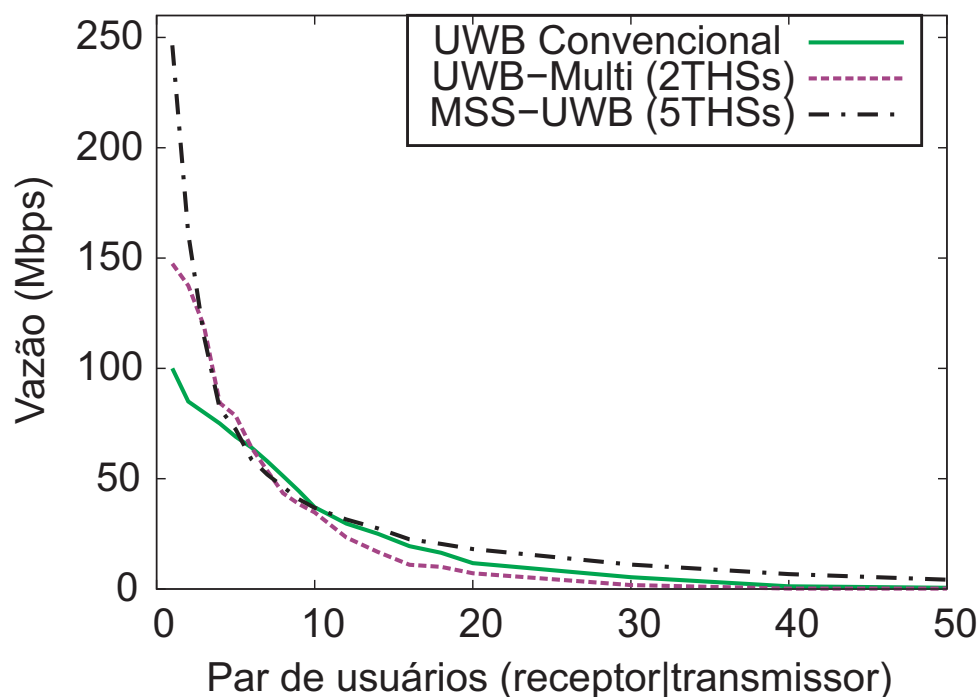
**Tabela 5.9** BER obtido com o MSS-UWB em diferentes cenários de MUI

resultado do MSS-UWB e do UWB com múltiplas seqüências foi levado em consideração a necessidade de se ter um sistema que apresente uma alta taxa de dados e um maior tempo de vida.

Primeiramente é apresentada a comparação entre os resultados de vazão ilustrado no gráfico apresentado na Figura 5.7, o qual foi plotado utilizando os resultados de simulação apresentados na Tabela 5.10.

É percebido que quando a quantidade de pares de usuários é pequena os dois sistemas que utilizam múltiplas seqüências conseguem melhor vazão do que o sistema UWB convencional. Entretanto, quando a quantidade de usuários aumenta, o sistema UWB utilizando múltiplos códigos tende a ter uma grande quantidade de colisões e acarretando a uma drástica diminuição de sua vazão. No caso do MSS-UWB, por causa de sua característica adaptativa ele consegue ter uma alta taxa de dados tanto quando o MUI está baixa quanto quando elas alta.

Comparando os resultados do MSS-UWB com o UWB Convencional é visto que o MSS-UWB obteve maior vazão de 1 a 5 pares compartilhando a rede, ficando com a vazão menor quando o meio está compartilhado com 6 à 9 pares de usuários e volta a obter uma maior vazão a partir de 10 pares de usuários, continuando assim até 50 pares de usuários.



**Figura 5.7** Comparação entre o melhor resultado de vazão dos três sistemas UWB

Qtd. Usuários	1	2	3	4	5	6	7	8	9
UWB Convencional	100,00	85,00	80,00	75,00	69,00	64,16	57,85	51,25	44,44
UWB Multi(2THSs)	147,50	137,50	119,16	84,33	78,49	64,17	53,56	43,44	38,60
MSS-UWB (5THSs)	246,50	161,06	114,52	81,78	72,42	58,82	51,88	46,35	40,74

Qtd. Usuários	10	12	14	16	18	20	30	40	50
UWB Convencional	37,00	29,58	25,00	19,37	16,38	11,75	5,33	1,25	0,50
UWB Multi(2THSs)	34,75	23,34	16,79	10,93	10,01	7,12	1,75	0,12	0,10
MSS-UWB (5THSs)	36,73	31,44	27,47	22,46	20,49	18,03	11,05	6,70	4,25

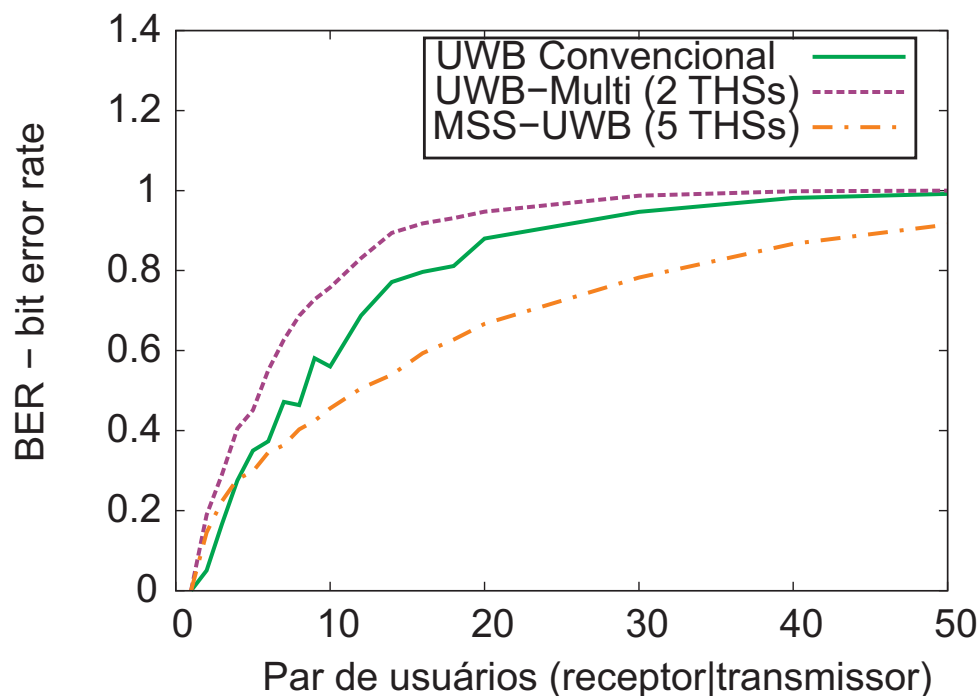
**Tabela 5.10** Comparação entre o melhor resultado de vazão dos três sistemas UWB

Pode ser observado também que quando o meio está livre de interferência a vazão máxima do UWB convencional foi de 100 *Mpbs* e a do MSS-UWB foi de 246,50 *Mpbs*, ou seja, de 146,50% maior. Compartilhando o meio com 50 pares de usuários o UWB convencional obteve 0,50 *Mpbs* enquanto que o MSS-UWB obteve 4,25 *Mbps*.

Comparando o MSS-UWB com o UWB com múltiplas seqüências é visto que ele apre-

sentou maior vazão quando o meio de comunicação estava compartilhado entre 1 e 3 pares de usuários e entre 8 em diante também. Sendo assim o UWB com múltiplas seqüências apresentou uma maior vazão somente quando o meio estava sendo compartilhado entre 4 e 7 pares de transmissor-receptor. No cenário em que existe somente um par de usuários se comunicando na rede foi verificada uma diferença de vazão de 99 *Mbps* a mais para o MSS-UWB, ou seja, o MSS-UWB apresentou uma vazão 67,11% maior. No cenário onde o meio estava compartilhado com 50 pares de usuários a vazão do MSS-UWB foi de 4,25 *Mbps*, enquanto que do UWB com múltiplas seqüências foi de somente 0,10 *Mbps*.

A comparação entre o BER dos três sistemas UWB é apresentada na Figura 5.8, onde foram utilizados os dados da Tabela 5.11 para plotar o gráfico.



**Figura 5.8** Comparação entre resultados de BER dos três sistemas UWB

Comparando os resultados do MSS-UWB com o UWB Convencional é visto que o MSS-UWB obteve o mesmo BER quando o meio está compartilhado entre 4 pares de usuários e partir daí ele apresentou um BER menor, de forma que o UWB convencional obteve um menor BER somente entre 1 e 3 pares de usuários. Comparando o MSS-UWB com o UWB com múltiplas seqüências é visto que ele apresentou um BER menor em

Qtd. Usuários	1	2	3	4	5	6	7	8	9
UWB Convencional	0,00	0,05	0,16	0,27	0,35	0,37	0,47	0,46	0,58
UWB Multi(2THSs)	0,00	0,18	0,29	0,40	0,45	0,55	0,62	0,68	0,72
MSS-UWB (5THSs)	0,00	0,14	0,22	0,27	0,29	0,34	0,36	0,40	0,42

Qtd. Usuários	10	12	14	16	18	20	30	40	50
UWB Convencional	0,56	0,68	0,77	0,79	0,81	0,88	0,94	0,98	0,99
UWB Multi(2THSs)	0,75	0,83	0,89	0,91	0,93	0,94	0,98	0,99	1,00
MSS-UWB (5THSs)	0,45	0,50	0,53	0,59	0,62	0,66	0,78	0,86	0,91

**Tabela 5.11** Comparação entre resultados de BER dos três sistemas UWB

todos os cenários simulados.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da avaliação de desempenho realizada, podemos afirmar que o MSS-UWB apresenta ótimos resultados de vazão e principalmente de BER, possibilitando assim ter altas taxas de bits por utilizar múltiplas seqüências e possibilita ter um maior tempo de vida por adaptar sua taxa de dados e assim conseguir diminuir o BER.

A técnica de adaptação do MSS-UWB utilizando seleção de múltiplas seqüências TH, possibilitou uma melhor utilização do canal de comunicação e possibilitou um melhor controle do BER gerado pelas múltiplas transmissões dos usuários. Os resultados do MSS-UWB obteve uma vazão média de 246,50 *Mbps* em uma ambiente livre de interferência e apresentou também uma maior vazão de dados quando um grande número de usuário estão concorrendo pelo meio de transmissão.

Os principais benefícios do MSS-UWB são:

- utiliza melhor o espectro de transmissão, alocando maior banda para os usuários quando o meio de transmissão se encontra ocioso;
- obtém uma maior vazão de dados em quase todos os cenários estudados;



- obtém um menor BER, diminuindo assim a necessidade de retransmissão de bits errados e possibilitando também uma maior quantidade de usuário compartilhando o meio de comunicação.
- realiza um controle de interferência através da adaptação da taxa de bit, baseado em um simples mecanismo de seleção de múltiplos THSs.

# CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A tecnologia UWB (*Ultra-WideBand*) é uma tecnologia que apresenta uma faixa de banda ultra-larga e utiliza impulsos de rádio para a transmissão de dados. Essas características tornam a tecnologia muito interessante para sistemas de transmissão sem fio que necessitam de uma alta taxa de dados e uma maior quantidade de usuários acessando a rede ao mesmo tempo. A banda ultra-larga, por si só, não é suficiente para garantir uma alta taxa de dados em um cenário onde há muitos usuários acessando o meio ao mesmo tempo. O acesso múltiplo ocasiona uma interferência entre os usuários na rede, MUI, e pode ser tratada utilizando uma técnica de mitigação ou controle de interferência apropriada.

A falta de um sistema de mitigação de interferências pode acarretar em uma má utilização do canal de comunicação, causando muitas colisões na transmissão dos pacotes e diminuindo drasticamente a vazão de dados na rede. Pensando nesta necessidade, foi criado um método adaptativo de mitigação da interferência nomeado de MSS-UWB. Ele é baseado em sistemas que utilizam múltiplas seqüências para um comunicação receptor-transmissor e possibilita adaptação da taxa de dados realizando combinações entre essas múltiplas seqüências.

Os resultados obtidos através de simulações realizadas no Matlab mostraram que o modelo de mitigação de interferência do MSS-UWB possibilita uma melhor utilização da rede, aumentando a taxa de dados dos usuários quando a quantidade de pares receptor-transmissor compartilhando a rede é pequena e consegue diminuir o BER quando a quantidade de pares de receptor-transmissor está elevada. Através da análise do BER, o MSS-UWB consegue identificar que o meio está sendo pouco ou muito compartilhado, possibilitando o aumento ou diminuição da taxa de dados do usuário.

No MSS-UWB a vazão máxima obtida foi de 246,50 *Mbps* quando o meio se encontra

livre de MUI, enquanto que no sistema UWB convencional obteve somente 100 *Mbps* e do sistema UWB com múltiplas seqüências que obteve 147,50 *Mbps*, ou seja, o MSS-UWB apresentou vazão 46,50% maior que o convencional e 67,11% em um cenário livre de MUI. Além de maior vazão de dados o MSS-UWB apresentou os melhores resultados de BER comparados com os demais sistemas UWB apresentados, de forma que ele conseguiu controlar a MUI, obtendo um BER inferior ao dos demais sistemas.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros poderiam ser realizados em um simulador de redes como o NS-2 [51], o que possibilitaria avaliar outras características que não foram possíveis de serem avaliados utilizando o Matlab, como por exemplo o mecanismo de troca de mensagens de sincronização, o algoritmo de descoberta de vizinhos e o modelo de detecção de colisão.

Visto que o modelo de decisão do algoritmo de adaptação é muito importante para os resultados obtidos no MSS-UWB, como trabalho futuro poderia ser avaliado o uso de outros algoritmos de adaptação de taxa de dados com a finalidade de verificar como outros algoritmos de adaptação poderiam ser utilizados em conjunto com o modelo de seleção adaptativa de THSs do MSS-UWB. Um exemplo disso seria o uso de teoria de jogos para ajudar na tomada de decisão do algoritmo, como apresentado em [52].

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WiMedia Alliance, *Multiband ofdm physical layer proposal for ieee 802.15 task group 3a (2004) multiband ofdm alliance*, online, july 2008.
- [2] D.S. Anderson, E.F. Drocella, S.K. Jones, and M.A. Settle, *Assessment of compatibility between ultrawideband (uwb) systems and global positioning system (gps) receivers*, Tech. report, Defense Technical Information Center, 2001.
- [3] H. Arslan, *Multi-access interference cancellation receiver for time-hopping ultra wide-band communication*, *Wireless Personal Communications* **42** (2007), no. 4, 479–490.
- [4] H. ARSLAN, I. GUVENQ, and S. AHMED, *Ultra wideband wireless communication*, Wiley-Interscience, 2006.
- [5] E. Baccarelli and M. Biagi, *A simple adaptive coding scheme for multiuser interference suppression in ultra-wideband radio transmissions*, *Transactions on Communications* **53** (2005), no. 8, 1283–1287.
- [6] A. Bayesteh and M. Nasiri-Konari, *Iterative interference cancellation and decoding for a coded uwb-th-cdma system in awgn channel*, *Proceedings of ISSSTA (Prague, Czech)*, vol. 1, September 2002, pp. 263–267.
- [7] S. Biaz and Y. Ji, *A glance at mac protocols for ultra wideband*, *Proceedings of TOC (Alabama, USA)*, April 2004, pp. 94–95.
- [8] I. Broustis, S. Krishnamurthy, M. Faloutsos, M. Molle, and J. Foerster, *A multiband mac protocol for impulse-based uwb ad hoc networks*, *Proceedings of SECON (Santa Clara, USA)*, September 2005, pp. 26–29.

- [9] RM Buehrer, NS Correal-Mendoza, and BD Woerner, *A simulation comparison of multiuser receivers for cellular cdma*, Proceedings of VTC (Tokyo, Japan), vol. 49, May 2000, pp. 1065–1085.
- [10] G. Cariolaro, T. Erseghe, and L. Vangelista, *Exact spectral evaluation of the family of digital pulse intervalmodulated signals*, Transactions on Information Theory **47** (2001), no. 7, 2983–2992.
- [11] CES, *International consumer electronics show*, 2005.
- [12] J. Cha, K. Kwak, J. Lee, and C. Lee, *Novel interference-cancelled zcd-uwfb system for wpan*, Proceedings of ICC (Glasgow, Scotland), vol. 1, June 2004, pp. 95–99.
- [13] M. Chen and X. Li, *Transmitter-based channel equalization and mui suppression for uwfb systems*, Proceedings of TCSET (Lviv-Slavsko, Ukraine), February 2004, pp. 501–504.
- [14] Y. Chu and A. Ganz, *Mac protocols for multimedia support in uwfb-based wireless networks*, Proceedings of Broad-wim (California, USA), October 2004, pp. 1–9.
- [15] JT Conroy, JL LoCicero, and DR Ucci, *Communication techniques using monopulse waveforms*, Military Communications Conference Proceedings, 1999. MILCOM 1999. IEEE **2** (1999).
- [16] F. Cuomo and C. Martello, *Mac principles for an ultra wide band wireless access*, Proceedings of Globecom (Texas, USA), vol. 6, November 2001, pp. 3548–3552.
- [17] L. De Nardis and MG Di Benedetto, *Medium access control design for uwfb communication systems: Review amd trends*, Journal of Communications and Networks **5** (2003), no. 4, 386–393.
- [18] J. Ding, L. Zhao, S.R. Medidi, and K.M. Sivalingam, *Mac protocols for ultra-wide-band (uwfb) wireless networks: impact of channel acquisition time*, Proceedings of SPIE (Lugano, switzerland), vol. 4869, February 2003, pp. 1–97.

- [19] R.C. Dixon, *Spread Spectrum Systems John Wiley & Sons*, New York (1984).
- [20] A. Duel-Hallen, J. Holtzman, and Z. Zvonar, *Multiuser detection for cdma systems*, *Personal Communications* **2** (1995), no. 2, 46–58.
- [21] T. Erseghe, *Time-hopping patterns derived from permutation sequences for ultra-wideband impulse-radio applications*, *Proceedings of WSEAS (Creete, Greek)*, vol. 1, October 2002, pp. 109–115.
- [22] K. Eshima, Y. Hase, S. Oomori, F. Takahashi, and R. Kohno, *M-ary UWB system using Walsh codes*, *Ultra Wideband Systems and Technologies*, 2002. Digest of Papers. 2002 IEEE Conference on (2002), 37–40.
- [23] E. Fishler and HV Poor, *Low-complexity multiuser detectors for time-hopping impulse-radio systems*, *Transactions on Signal Processing* **52** (2004), no. 9, 2561–2571.
- [24] JJ Garcia-Luna-Aceves and J. Raju, *Distributed assignment of codes for multihop packet-radio networks*, *Proc. IEEE MILCOM* **1** (1997).
- [25] A. Gupta and P. Mohapatra, *A survey on ultra wide band medium access control schemes*, *Computer Networks* **51** (2007), no. 11, 2976–2993.
- [26] I. Guvenc and H. Arslan, *Design and performance analysis of time hopping sequences for uwb-ir systems*, *Proceedings of WCNC (Atlanta, USA)*, vol. 2, March 2004, pp. 914–919.
- [27] I. Guvenc and H. Arslan, *Th-sequence construction for centralised uwb-ir systems in dispersive channels*, *Electronics Letters* **40** (2004), no. 8, 491–492.
- [28] I. Guvenc, H. Arslan, S. Gezici, and H. Kobayashi, *Adaptation of multiple access parameters in time hopping uwb cluster based wireless sensor networks*, *Proceedings of MASS (Florida, USA)*, vol. 1, October 2004, pp. 235–244.

- [29] M. Hämäläinen, *Singleband UWB Systems. Analysis and Measurements of Coexistence with Selected Existing Radio Systems*, Ph.D. thesis, Doctoral thesis, Acta C240.
- [30] MS Iacobucci and M.G. Di Benedetto, *Multiple access design for impulse radio communication systems*, Proceedings of ICC (New York, USA), vol. 2, April 2002, pp. 817–820.
- [31] S. Im and EJ Powers, *An iterative decorrelating receiver for ds-ssb multiple access systems using biphase modulation*, October 2004, pp. 59–64.
- [32] K.T. Jin and D.H. Cho, *Multi-code MAC for multi-hop wireless ad hoc networks*, Vehicular Technology Conference, 2002. Proceedings. VTC 2002-Fall. 2002 IEEE 56th **2** (2002).
- [33] S. K. Jones, *Measured emissions data for use in evaluating the ultra-wideband (uwb) emissions limits in the frequency bands used by the global positioning system (gps)*, Tech. report, Office of Engineering and Technology, 2002, Project TRB.
- [34] R. Jurdak, P. Baldi, and C.V. Lopes, *U-mac: A proactive and adaptive uwb medium access control protocol*, Wireless Communications **5** (2005), no. 5, 551–566.
- [35] J.Y. Le Boudec, R. Merz, B. Radunovic, and J. Widmer, *A mac protocol for uwb very low power mobile ad-hoc networks based on dynamic channel coding with interference mitigation*, Tech. report, Technical Report IC/2004/02, EPFL-DI-ICA, 2004.
- [36] F. Legrand, I. Bucaille, S. Héthuïn, L. De Nardis, G. Giancola, M.G. Di Benedetto, L. Blazevic, and P. Rouzet, *Uwb ultra wide band system: Mac and routing protocols*, Proceedings of IWUWBS (Oulu, Finland), June 2003, pp. 1–4.
- [37] Q. Li and LA Rusch, *Multiuser detection for ds-ssb uwb in the home environment*, Journal on Selected Areas in Communications **20** (2002), no. 9, 1701–1711.
- [38] Q. Li and LA Rusch, *Multiuser receivers for ds-ssb uwb*, Proceedings of UWBST (Baltimore, USA), May 2002, pp. 163–167.

- [39] W. Li, TA Gulliver, and H. Zhang, *Performance of ultra-wideband transmission with pulse position amplitude modulation and rake reception*, Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics, 2005. IEEE/ACES International Conference on (2005), 1–4.
- [40] WM Lovelace and JK Townsend, *Chip discrimination for large near far power ratios in uwb networks*, Proceedings of Milcom (California, USA), vol. 2, October 2003, pp. 868–873.
- [41] R. Lupas and S. Verdu, *Linear multiuser detectors for synchronous code-division multiple-access channels*, Transactions on Information Theory **35** (1989), no. 1, 123–136.
- [42] U. Madhow, ML Honig, and M. Bellcore, *Mmse interference suppression for direct-sequence spread-spectrum cdma*, Transactions on Communications **42** (1994), no. 12, 3178–3188.
- [43] GM Maggio, N. Rulkov, and L. Reggiani, *Pseudo-chaotic time hopping for uwb impulse radio*, Transactions on Circuits and Systems **48** (2001), no. 12, 1424–1435.
- [44] Radio Spectrum Management, *An engineering discussion paper on spectrum allocations for ultra wide band devices*, August 2008.
- [45] MBOA, *Wimedia alliance*, July 2008.
- [46] R. Merz, J.Y. Le Boudec, J. Widmer, and B. Radunovic, *A rate-adaptive mac protocol for low-power ultra-wide band ad-hoc networks*, Proceedings of Ad-Hoc Now (Vancouver, Canada), July 2004, pp. 1–6.
- [47] L.B. Michael, M. Ghavami, and R. Kohno, *Effect of timing jitter on hermite function based orthogonal pulses for ultra wideband communication*, Proceedings of WPMC (Aalborg, Denmark), September 2001, pp. 441–444.
- [48] O. Moreno and SV Maric, *A new family of frequency-hop codes*, Transactions on Communications **48** (2000), no. 8, 1241–1244.



- [49] S. Moshavi and R.B. Bellcore, *Multi-user detection for ds-cdma communications*, Communications Magazine **34** (1996), no. 10, 124–136.
- [50] F. Nekoogar, *Ultra-wideband communications: fundamentals and applications*, Prentice Hall, 2006.
- [51] *The Network Simulator NS-2*, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>, 2008.
- [52] M.D. Perez-Guirao and K. Jobmann, *Cognitive resource access scheme for ir-wwb autonomous networks*, Proceedings of WPNC (Hannover, USA), March 2007, pp. 267–271.
- [53] D. Porcino and W. Hirt, *Ultra-wideband radio technology: potential and challenges ahead*, Communications Magazine **41** (2003), no. 7, 66–74.
- [54] C. Ramesh and V. Vaidehi, *Performance analysis of uwb channels for wireless personal area networks*, Wireless Personal Communications **41** (2007), no. 2, 169–178.
- [55] PB Rapajic and BS Vucetic, *Adaptive receiver structures for asynchronous cdma systems*, Journal on Selected Areas in Communications **12** (1994), no. 4, 685–697.
- [56] First report and order, *Revision of part 15 of the commission rules regarding ultra-wideband transmission systems washington*, DC: FCC, ET Docket 98-153, 2002.
- [57] ES Sousa and JA Silvester, *Spreading code protocols for distributed spread-spectrum packetradio networks*, Communications, IEEE Transactions on **36** (1988), no. 3, 272–281.
- [58] E. Standard, *High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard*, ECMA International **6** (2005).
- [59] T. Stansell, *Uwb coexistence with gps*, Tech. report, Intel-USC, 2002, UWB Workshop.

- [60] Y. Tang, B. Vucetic, and Y. Li, *Wc34-4: An fft-based multiuser detection for asynchronous block-spreading cdma ultra wideband communication systems*, Proceedings of ICC, vol. 5, 2005, p. 2872.
- [61] M. Tüchler, V. Schwarz, and A. Huber, *Location accuracy of an uwb localization system based on a cmos-based chip set*, Proceedings of WPNC (Hannover, Germany), March 2005, pp. 1–4.
- [62] S. Verdú, *Multiuser detection*, Cambridge University Press, 1998.
- [63] X. Wang and HV Poor, *Blind multiuser detection: a subspace approach*, Transactions on Information Theory **44** (1998), no. 2, 677–690.
- [64] W. Xu, R. Yao, Z. Guo, W. Zhu, and Z. Zhou, *A power efficient M-ary orthogonal pulse polarity modulation for TH-UWB system using modified OVSF codes*, Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM'03. IEEE **1** (2003).
- [65] L. Yang and GB Giannakis, *Multistage block-spreading for impulse radio multiple access through isi channels*, Selected Areas in Communications **20** (2002), no. 9, 1767–1777.
- [66] YC Yoon and R. Kohno, *Optimum multi-user detection in ultra-wideband (uwb) multiple-access communication systems*, Proceedings of ICC (New York, USA), vol. 2, April 2002, pp. 812–816.
- [67] H. Zhang and TA Gulliver, *Pulse position amplitude modulation for time-hopping multiple access UWB communications*, Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE **2** (2004).
- [68] H. Zhang and TA. Gulliver, *Biorthogonal pulse position modulation for time-hopping multiple access UWB communications*, Wireless Communications, IEEE Transactions on **4** (2005), no. 3, 1154–1162.
- [69] Y. Zhang, W.S. Lu, and T.A. Gulliver, *Recursive multiuser detection for ds-uwb systems*, Proceedings of PACRIM (Victoria, Canada), August 2005, pp. 534–537.

- [70] Z. Zhang, F. Zeng, and L. Ge, *Correlation properties of time-hopping sequences for impulse radio*, Proceedings of ICASSP (Hong Kong, China), vol. 4, April 2003, pp. 141–144.
- [71] Z. Zhang, F. Zeng, and L. Ge, *Time-hopping sequences construction with few-hit zone for quasi-synchronous thss-uwB systems*, Proceedings of VTC (Stockholm, Sweden), vol. 3, June 2005, pp. 1998–2002.
- [72] J. Zhu and A.O. Fapojuwo, *A complementary code-cdma-based mac protocol for uwB wpan system*, EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking **2005** (2005), no. 2, 249–259.

