

## A Tecnologia CDMA: Revisão Teórica e Aplicações em Sistemas *Wireless*

Diego Moreira da Rosa<sup>1</sup>, Fabio Irigon Pereira<sup>1</sup>, Juergen Rochol<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Informática – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)  
Caixa Postal 15.064 – 91.501-970 – Porto Alegre – RS – Brazil  
{diegoro, fip, juergen}@inf.ufrgs.br

**Abstract.** *The world is demanding more from wireless communications technologies than ever before. In this context, CDMA (Code Division Multiple Access) distinguishes itself from other technologies, being recently choosen to be the basis of third generation wireless systems. This paper presents a review of the basic concepts of the spread spectrum technique, over wich CDMA was built, as well as an overview of the applications of CDMA technology in wireless systems, from the IS-95 second generation standard to the third generation standards cdma2000 and WCDMA.*

**Resumo.** *O mundo tem exigido cada vez mais das tecnologias de comunicações wireless. Nesse contexto, desponta a tecnologia CDMA (Code Division Multiple Access), sendo recentemente escolhida para servir de base para os serviços de terceira geração. Esse trabalho apresenta uma revisão teórica dos conceitos básicos de spread spectrum, técnica sobre a qual está fundamentado o CDMA, bem como um panorama geral das aplicações de CDMA em sistemas celulares, do padrão IS-95 ou cdmaOne de segunda geração aos padrões de terceira geração cdma2000 e WCDMA.*

### 1. Introdução

O mundo tem exigido cada vez mais das tecnologias de comunicações *wireless*. Cada vez mais pessoas no mundo inteiro estão utilizando serviços baseados em comunicações móveis. Adicione-se a isso o advento da terceira geração (3G) de sistemas *wireless* com seus serviços de transmissão de dados e aplicações inovadoras e tem-se as tecnologias *wireless* sendo obrigadas a oferecer muito mais do que a alguns anos atrás.

É nesse contexto que a tecnologia CDMA desponta, sendo utilizada largamente em serviços celulares de segunda geração desde 1995 e recentemente sendo escolhida para servir de base para os serviços 3G. Baseados na técnica de espalhamento espectral ou *spread spectrum* (SS), os sistemas CDMA garantem o acesso de múltiplos usuários ao meio simultaneamente e utilizando a mesma banda de frequências através de um esquema de divisão por código. A robustez desses sistemas quanto a ruído e interferência estão entre as principais vantagens que levaram a tecnologia CDMA a atingir tamanho sucesso. O objetivo deste trabalho é apresentar uma revisão teórica dos conceitos básicos de SS bem como apresentar um panorama geral das aplicações de CDMA em sistemas celulares, passando pelo padrão IS-95 ou cdmaOne de segunda geração e pelos padrões de terceira geração cdma2000 e WCDMA.

Este trabalho está dividido em quatro seções incluindo esta introdução. Na seção 2, são apresentados os fundamentos de *spread spectrum*. Na seção 3, são apresentadas algumas características do padrão IS-95 ou cdmaOne de segunda geração bem como dos padrões de terceira geração. Por fim, na seção 4 são apresentadas conclusões e sumário.

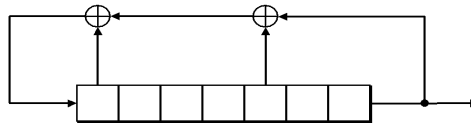
## 2. Fundamentos de *spread spectrum*

O sinal utilizado convencionalmente para a transmissão de dados, como, por exemplo, em sistemas com múltiplo acesso por divisão de frequência, utiliza toda sua potência em uma parcela estreita da largura de banda disponível para a transmissão, economizando assim recursos para outros rádio-transmissores operarem em outras faixas de frequência. O problema da banda estreita surge quando um segundo transmissor, intencionalmente ou não, transmite um sinal na - ou muito próximo da - faixa de frequência do primeiro transmissor, interferindo na comunicação.

SS é uma forma de modulação em que o sinal, com uma banda relativamente estreita, é espalhado em uma faixa de frequência mais larga através da utilização de um código independente dos dados, o qual é conhecido pelo receptor. A principal vantagem do uso de *spread spectrum* é sua resistência à interferência.

### 2.1. Sequências Pseudo-Aleatórias

O espalhamento de sinal se utiliza de uma sequência pseudo-aleatória (PN), binária e periódica, que pode ser gerada a partir de um registrador de deslocamento realimentado. A saída do registrador de deslocamento em cada ciclo de clock é denominada *chip*.



**Figura 1. Exemplo de um gerador de sequências pseudo-aleatórias implementado através de um registrador de deslocamento.**

Quando a lógica de realimentação é constituída apenas por somadores módulo 2 (função lógica “ou exclusivo”), o gerador é dito linear. Neste caso, o estado em que todas as entradas são zero é proibido, pois aí a saída da lógica de realimentação seria sempre zero e o registrador não sairia desse estado. Assim o maior período possível para um gerador linear é  $2^n - 1$  *chips*, onde  $n$  é o número de bits do registrador de deslocamento. Conforme [1], quando essa situação é atingida, garante-se que a sequência tem algumas características interessantes: em cada período, o número de zeros é igual ao número de 1s menos 1; metade dos dígitos 1 ou 0 estão isolados, um quarto em pares, um oitavo em trios e assim sucessivamente até que termine a sequência; a função de autocorrelação é periódica e se assemelha muito com a correlação de um sinal binário randômico em um período e a potência espectral tem o mesmo envelope ( $\text{sinc}^2$ ). A diferença é que, por ser periódica, a transformada de uma sequência PN é discreta, enquanto que a de uma sequência aleatória de bits é contínua.



Figura 2. Potência espectral de um sequência pseudo-aleatória

## 2.2. Espalhamento Espectral por Sequência Direta

Pode-se identificar dois tipos principais de espalhamento espectral: espalhamento espectral por sequência direta ou *direct sequence spread spectrum* (DS-SS) e espalhamento espectral por saltos de frequência ou *frequency hop spread spectrum* (FH-SS). O primeiro realiza o espalhamento através da modulação direta dos dados pela sequência binária. O segundo realiza o espalhamento através de saltos aleatórios da frequência de transmissão. Como a tecnologia CDMA utiliza DS-SS, este trabalho se restringirá à análise desta técnica.

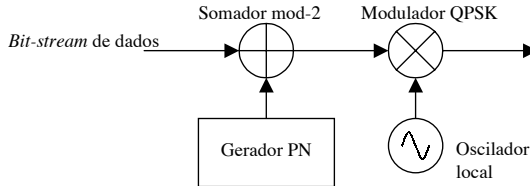
Na técnica DS-SS, proteção contra interferência é conseguida através do uso de uma banda muito superior à necessária para a transmissão. Como o sinal utilizará toda a banda, a densidade de potência em qualquer ponto será baixa, de modo que o sinal transmitido assume um comportamento de ruído, misturando-se no ambiente e dificultando a sua recepção por receptores indesejáveis. Este aumento de banda utilizada é conseguido através da modulação do sinal que se quer transmitir pela sequência PN (de banda mais larga) da seção anterior. Lembremos aqui que, ao multiplicarmos dois sinais, o espectro de frequência do sinal obtido será a convolução dos espectros dos dois sinais originais. Se a largura de banda desses sinais for muito diferente, a largura de banda do sinal resultante será muito próxima da largura da maior banda, ou seja, a sequência PN atuará como um “espalhador” do sinal original na faixa espectral disponível. Na prática, cada bit da mensagem transmitida será quebrado em vários outros dependendo do código utilizado.

Usualmente se utiliza uma taxa de chips entre 1 Mchips/s e 100 Mchips/s [2]. Pegamos como exemplo um sinal de informação de 10 KHz e 1 Watt de potência. A potência média desse sinal por unidade de banda é de 100  $\mu$ Watt/Hz. O mesmo sinal se espalhado com uma sequência PN de 10 Mchips/s (de banda 10 MHz) terá uma potência média de 0.1  $\mu$ Watt/Hz. O receptor multiplicará mais uma vez o sinal recebido pela sequência PN, reconstituindo o sinal original de banda estreita, que depois é filtrado por um filtro passa-baixas removendo o ruído adicionado pelo canal, que estará espalhado em toda a banda utilizada. Para que o sistema funcione corretamente, é necessário que a sequência PN no receptor esteja sincronizada com a do transmissor.

## 2.3. DS-SS com Phase-Shift Keying

No algoritmo anterior, apesar de utilizarmos uma forma de modulação, a transmissão foi realizada em banda-base. O padrão CDMA utiliza uma faixa de frequência pré-determinada, tornando uma segunda modulação necessária para deslocar o sinal já espalhado para a faixa de frequência do canal a ser utilizado. O padrão IS-95 da TIA

define a utilização de modulação em quadratura ou *quadrature phase shift keying* (QPSK) para a transmissão do sinal da estação base para os telefones móveis e a utilização de modulação em quadratura com offset (O-QPSK) para o sentido inverso. Essa diferença se deve à maior imunidade do sinal O-QPSK quanto à não-linearidades do amplificador utilizado na transmissão, facilitando o projeto dos telefones móveis [5].



**Figura 3. Diagrama de um transmissor DS-SS com QPSK**

#### 2.4. Ganho de Processamento

Como vimos no item 2.2, após a modulação, o sinal original é restaurado, enquanto o ruído continua com um espectro largo, que acaba por ser filtrado por um filtro passa-baixas. Segundo [2], o ganho em relação sinal ruído ou *signal to noise ratio* (SNR) obtido pelo uso de *spread spectrum* é:

$$PG = T_b/T_c \quad (1)$$

Onde  $T_b$  é o tempo de transmissão de um bit, e  $T_c$  o tempo de um chip. Isso quer dizer que um sinal espalhado com uma taxa de chips 1000 vezes maior do que a taxa de bits, terá sua SNR aumentada em 60 Db (1000 vezes) em relação ao mesmo sinal se não aumentado. Isso é que possibilita a utilização de potência tão baixa a ponto de não interferir na comunicação já existente ou permitir a sobreposição de vários transmissores na mesma banda no CDMA.

#### 2.5. Probabilidade de Erro e Margem de Interferência

Existem na literatura várias propostas de cálculo da probabilidade do erro em SS. Entre elas pode-se destacar *Standard Gaussian Approximation* (SGA) e *Improved Gaussian Approximation* (IGA) [3]. Aqui utilizaremos a forma mais simplificada de cálculo. A probabilidade de haver um erro como demonstrado em [2] pode ser expressada assim:

$$P_e = (1/2) * \text{erfc}((E_b/N_o)^{1/2}) \quad (2)$$

$$E_b = P * T_b \quad (3)$$

$$N_o = J * T_c \quad (4)$$

Onde  $E_b$  e  $N_o$  são energia e  $P$  e  $J$  são potência de bit e chip respectivamente. Pode-se reescrever a equação (1) substituindo o tempo de bit  $T_b = E_b/P$  e o tempo de chip  $T_c = N_o/J$ :

$$J/P = PG/(E_b/N_o) \quad (5)$$

E definir margem de interferência como sendo a relação entre a potência do ruído e a potência do sinal. Em escala logarítmica, a equação toma a seguinte forma:

$$M = J/P \quad (6)$$

$$M_{db} = 20 \cdot \log(PG) - 20 \cdot \log(E_b/N_o) \quad (7)$$

Supondo uma comunicação na qual o tempo de bit seja  $T_b = 102.4 \mu s$  e  $T_c = 100 \mu s$ , segundo a equação (1), tem-se  $PG = 1024$ . O que significa dizer que a sequência PN precisa ter um período mínimo de 1023 chips e o tamanho mínimo do registrador de deslocamento para gerá-la é 10 bits. Digamos que, para uma boa recepção, a probabilidade de erro não deve passar de  $10^{-5}$ . Da fórmula (2) tem-se que para  $E_b/N_o = 10$  a probabilidade do erro fica em  $0.387 \cdot 10^{-5}$ . Logo,

$$M = 20 \cdot \log(1024) - 20 \cdot \log(10) = 40,2 \text{ db}$$

O que significa dizer que, para esse caso, o sinal pode ser detectado com segurança, mesmo que o ruído seja 40 db ou 102,3 vezes mais potente que o sinal transmitido.

## 2.6. Interferência mútua e *gold codes*

O uso de *spread spectrum* em CDMA se justifica por permitir que vários transceptores utilizem o mesmo canal ao mesmo tempo. Porém, para minimizar o efeito mútuo entre transmissão, toma-se alguns cuidados ao escolher a sequência PN utilizada no espalhamento espectral. Para explicar esses cuidados, começaremos introduzindo o conceito de ortogonalidade: duas funções serão ortogonais se a média do produto entre elas for zero [4]. Em telecomunicações, diz-se que, se dois sinais são ortogonais, então é teoricamente possível construir um receptor que responda a um deles enquanto rejeita completamente o segundo. Exemplos de funções ortogonais são: senóides de diferentes frequências; senóides em quadratura (diferença de fase de  $90^\circ$ ); pulsos não sobrepostos (TDMA); e funções de Walsh, utilizadas no padrão IS-95.

Contudo, as funções ortogonais são limitadas. Além disso, a grande maioria não é ortogonal consigo mesma se atrasada no tempo, o que torna o fenômeno de caminhos múltiplos ou *multipath*, muito comum em sistemas wireless, um grave problema. Portanto, muitas vezes são utilizadas funções quase ortogonais muito mais numerosas e também quase ortogonais com cópias suas atrasadas no tempo. O preço que se paga pelo uso de sequências PN não completamente ortogonais é que acaba havendo interferência entre transmissores, a qual acaba sendo suprimida pelo ganho de processamento da seção 2.4. Contudo, há um limite para essa interferência, o que explica o famoso *near-far problem*, ou seja, um transmissor muito mais próximo da base pode acabar obstruindo a comunicação de outros agentes mais distantes, limitando o uso do meio. Esse problema é resolvido através de um controle da potência de transmissão.

## 3. Aplicações em Sistemas Celulares

Como descrito em [6], os primeiros estudos sobre SS datam do início do século passado, e suas primeiras aplicações em sistemas de comunicações de dados ocorreram no período da 2ª Guerra Mundial. Essas aplicações aconteceram em sistemas militares, nos quais a principal vantagem do espalhamento espectral é a imunidade à interferência de outros sinais. Nos anos 70 e 80 houve um crescimento no interesse pela aplicação de SS em sistemas comerciais e as primeiras propostas de sua utilização em sistemas celulares datam do final dos anos 70. No começo dos anos 90, a Qualcomm propôs um sistema de telefonia móvel baseado em CDMA (cdmaOne), o qual acabou sendo adotado, em julho

de 1993, pela TIA (*Telecommunications Industry Association*) no padrão IS-95 (*Interim Standard 95*). Entre as principais características do cdmaOne estão:

- compatibilidade com a antiga rede baseada no sistema AMPS;
- divisão da banda de 25 MHz em 10 canais duplex de RF com 1,25 MHz; cada canal de RF com 64 canais digitais de 9600 bps diferenciados através de códigos ortogonais baseados em *Walsh Code*; dos 64 canais, 55 de telefonia, 7 para serviço de mensagens e 2 para controle de acesso e sincronismo;
- modulação QPSK no downlink e O-QPSK no uplink;
- rígido controle de potência para minimizar o problema de interferência entre canais.

Em 1992, o ITU (*International Telecommunication Union*) iniciou um projeto no sentido de planejar a evolução dos chamados serviços 3G, os quais definiam uma rede celular para dados de alta velocidade e deveriam substituir os serviços 2G baseados principalmente nos sistemas D-AMPS, cdmaOne e GSM. Esse projeto é hoje conhecido como IMT-2000. Entre os sistemas 3G baseados no IMT-2000, destacam-se dois, ambos baseados na tecnologia CDMA: o cdma2000, definido pela TIA, e o WCDMA definido pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*). Esses dois sistemas possuem semelhanças herdadas do padrão IS-95; no entanto, possuem diferenças que os tornam incompatíveis. Entre as principais diferenças pode-se citar:

- cdma2000 possui compatibilidade com a rede cdmaOne, enquanto o WCDMA mantém compatibilidade com o sistema GSM;
- cdma2000 utiliza a técnica *multicarrier cdma* além da tradicional *direct sequence* a fim de obter taxas maiores mantendo compatibilidade com o sistema IS-95;
- taxa de 4.096 Mcips/s para o WCDMA e de 3.84 Mcips/s para o cdma2000;

#### 4. Conclusões

Foi apresentada uma revisão dos conceitos e características da técnica de espalhamento espectral utilizada na implementação das tecnologias CDMA, cobrindo seqüências binárias, DS-SS, modulação em fase, probabilidade de erro e imunidade a interferência. Também foi apresentado um panorama das aplicações de CDMA em sistemas celulares.

#### 5. Referências

- [1] Haykin, Simon (2001) "Communication Systems", 4ª ed., John Wiley & Sons Ltd.
- [2] Carne, E. Bryan (1999) "Telecommunications Primer", 2ª ed., Prentice Hall.
- [3] Lee, S. J., Kim, T. S. e Sung, D. K. (2001) "Bit Error Probabilities of DSSS Multiple Access Systems", IEEE Transactions on Communication Vol 49 No 1, John Wiley & Sons Ltd.
- [4] Karn, Phil (1997) "Introduction to Spread Spectrum", Digital Communications Conference.
- [5] Harte, Lawrence (1999) "CDMA IS-95 for Cellular and PCS", McGraw-Hill.
- [6] Goodman, David J. (1997) "Wireless Personal Communications Systems", Addison Wesley Longman, Inc.