

2

Modelo Vetorial dos Sistemas de Transmissão

Neste capítulo são descritos os modelos matemáticos dos sistemas abordados neste trabalho. Inicialmente é descrita, de forma sucinta, a técnica de acesso ao meio por divisão de código DS CDMA e a modulação em múltiplas portadoras ortogonais OFDM. A seguir são apresentados, nas respectivas seções, os modelos matemáticos do canal de propagação, do sistema MC CDMA e do sistema MC DS CDMA.

2.1

DS CDMA

Esta técnica é considerada uma das mais promissoras para integrar os padrões das comunicações móveis atuais [43, 50, 57, 89]. Nesse sistema todos os usuários ativos podem transmitir ao mesmo tempo utilizando toda a faixa disponível alocada ao sistema. A cada usuário ativo é designado um código ou assinatura única que espalha o sinal transmitido por toda a faixa disponível. Dessa forma, o sinal espalhado torna-se mais imune aos diversos tipos de interferências inerentes ao ambiente de propagação [52]. No receptor ocorre a separação dos sinais de cada usuário de acordo com a ortogonalidade ou quase ortogonalidade dos códigos de espalhamento associados [42].

Dentre os modelos de sinais baseados nesta técnica existem dois cenários de interesse: o enlace direto ou *downlink* e o enlace reverso ou *uplink* [67]. No enlace direto os sinais são enviados da Estação Rádio Base (ERB) para as diversas estações móveis (ES) dos K usuários ativos do sistema, por isso, os sinais transmitidos para um dado receptor experimentam o mesmo canal de comunicações, neste estudo representado por uma matriz Toeplitz $\mathbf{H}$, assim $\mathbf{H}_1 = \mathbf{H}_2 = \dots = \mathbf{H}_K$, conforme ilustra a Figura 2.1.

No enlace reverso os sinais são enviados das respectivas estações móveis (ES) de cada um dos K usuário ativos para a ERB e, em geral, os sinais experimentam diferentes canais de propagação $\mathbf{H}_1 \neq \mathbf{H}_2 \neq \dots \neq \mathbf{H}_K$, como representado na Figura 2.2.

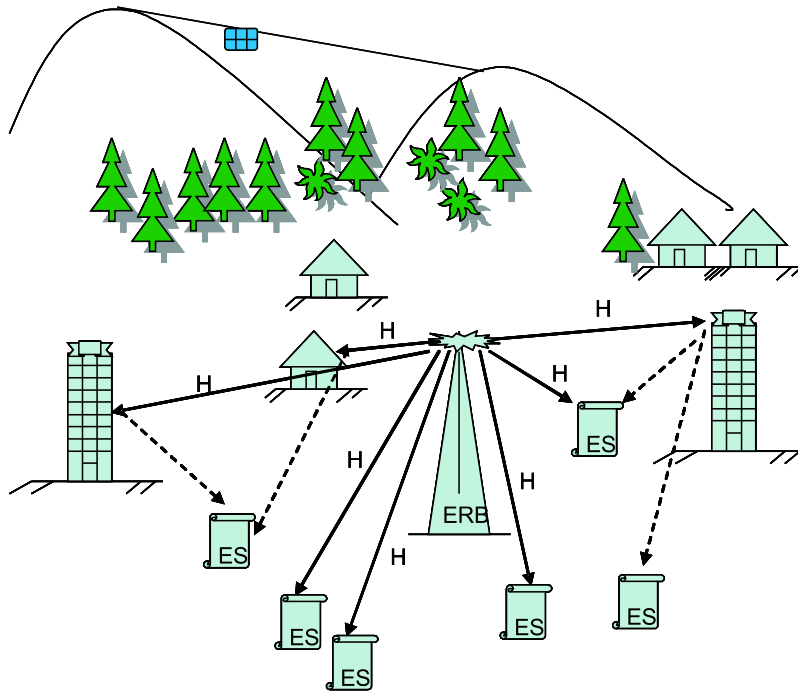


Figura 2.1: Enlace Direto

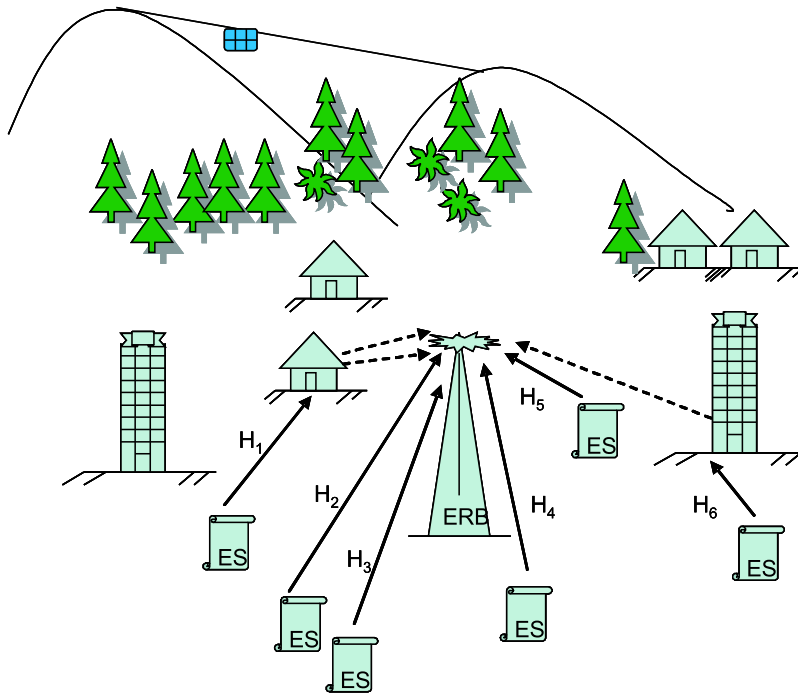


Figura 2.2: Enlace Reverso

2.2 OFDM

A modulação em múltiplas portadoras ortogonais OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [68, 80, 83] é considerada uma engenhosa técnica utilizada para eliminar os efeitos adversos provocados pelo multipercurso dos canais

de transmissão. Basicamente, OFDM utiliza a aplicação da transformada inversa de Fourier (IDFT) em conjunto com a adição de intervalos de guarda a cada bloco de símbolos transmitidos. No receptor o intervalo de guarda de cada bloco pode ou não ser descartado e o bloco resultante é alimentado na entrada da transformada direta de Fourier (DFT). Esses procedimentos permitem converter o canal seletivo em frequência em um conjunto de subcanais planos e paralelos, cada um deles correspondendo a uma diferente subportadora [59]. Com isso, o processo de equalização da resposta ao impulso do canal, modelada por um filtro FIR (*Finite Impulse Response*), é bastante simplificado permitindo o emprego de equalizadores *single-tap* [4].

Sob o ponto de vista da transmissão usando múltiplas portadoras, uma das principais vantagens da técnica de transmissão OFDM é a possibilidade de mitigar o espalhamento de retardo do canal (τ_{rms}), através do aumento de duração dos símbolos transmitidos. Para cancelar a interferência entre blocos de símbolos (IEB) sobre o sinal recebido é inserido um intervalo de guarda de comprimento G , maior que o valor do comprimento L do canal. Neste trabalho são considerados dois tipos de intervalos de guarda. O primeiro tipo, denominado de prefixo cíclico CP (*Cyclical Prefix*) corresponde à inserção, no início de cada símbolo OFDM, de uma cópia do bloco formado pelas G últimas amostras deste símbolo; no receptor, as informações contidas no intervalo de guarda são descartadas antes da aplicação da Transformada Direta de Fourier [59, 90]. No segundo tipo de intervalo de guarda, denominado sufixo de zeros ZP (*Zero Padded*) considera-se a inserção de um intervalo de comprimento G , composto de zeros, ao final de cada símbolo; no receptor este intervalo acrescentado não é descartado e, portanto, é utilizado na operação de DFT [59].

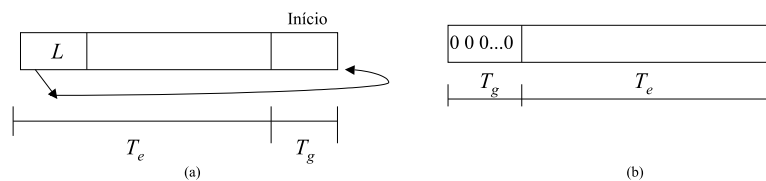


Figura 2.3: Símbolo OFDM: a) Prefixo Cíclico (CP) b) Sufixo de Zeros *Zero Padding* (ZP)

2.3

O Canal de Propagação

O canal de propagação considerado pode ser modelado por um filtro FIR com L taps, cujos ganhos são amostras da resposta ao impulso do canal [45] (o valor L é considerado como sendo o comprimento do canal e a ordem do canal é $O = L - 1$). O vetor de coeficientes do canal é dado por: $\mathbf{h}_c(i) = [h_0(i) \dots h_{L-1}(i)]^T$. Com

o objetivo de investigar o desempenho dos sistemas em distintos ambientes de transmissão foram considerados canais fixos e randômicos. Os canais fixos são modelados como filtros FIR com um número fixo de L coeficientes ou *taps*. Três tipos de canais fixos são utilizados nas simulações. Para diferenciá-los foram atribuídos nomes: Canal A, Canal B e Canal C. O vetor da resposta ao impulso do canal fixo A, apresenta $L=11$ coeficientes [66]. Na Figura 2.4 está ilustrada a sua resposta em frequência.

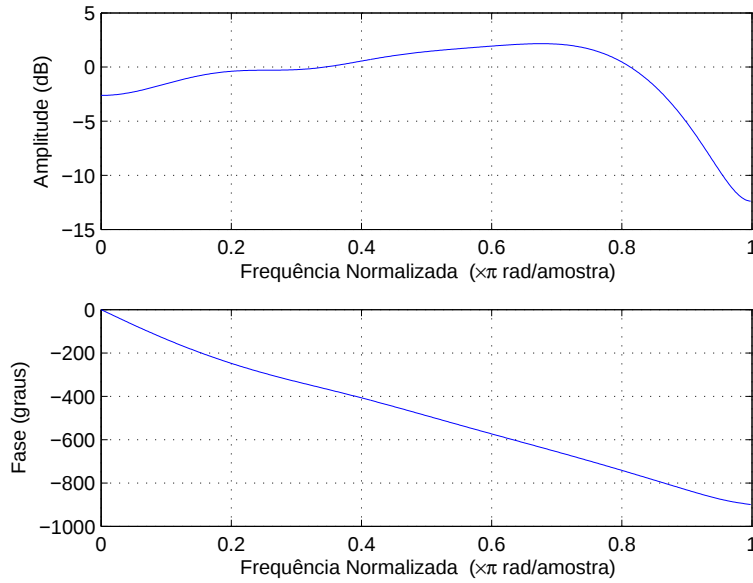


Figura 2.4: Resposta em Frequência do Canal A

Na Figura 2.5 está ilustrada a resposta em frequência do canal B que apresenta $L=6$ coeficientes [69]. Esse canal possui um nulo espectral pronunciado, o que pode ser melhor observado na Figura 2.6 na qual estão detalhadas, para um esquema de transmissão com $M=32$ subportadoras, as respectivas amplitudes da resposta em frequência do canal.

O canal C apresenta $L=4$ coeficientes complexos [66], a sua resposta em frequência está ilustrada na Figura 2.7.

O canal randômico é modelado por um filtro FIR com L coeficientes do tipo:

$$q_k = p_k \alpha_k; \quad k = 1, 2, \dots, L \quad (2-1)$$

onde α_k é uma variável gaussiana complexa de média nula e $\mathbb{E}[|\alpha_k|^2] = 1$. Convém, antecipadamente, ressaltar que nos experimentos os valores de α_k serão sorteados no início de cada simulação e mantidos fixos ao longo de cada teste. Os pesos p_k satisfazem a $\sum_{k=1}^L |p_k|^2 = 1$.

Para permitir as modelagens matemáticas dos sinais, que serão descritas nos próximos capítulos, é necessário que as variações do canal ocorram somente entre

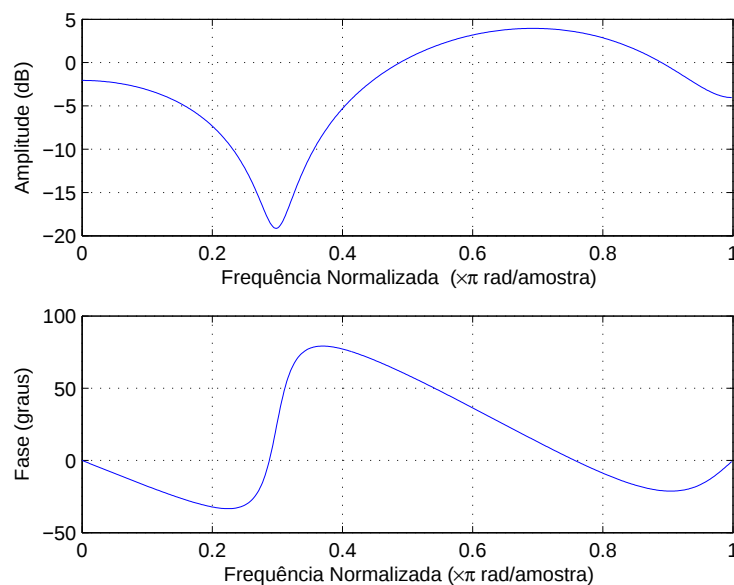
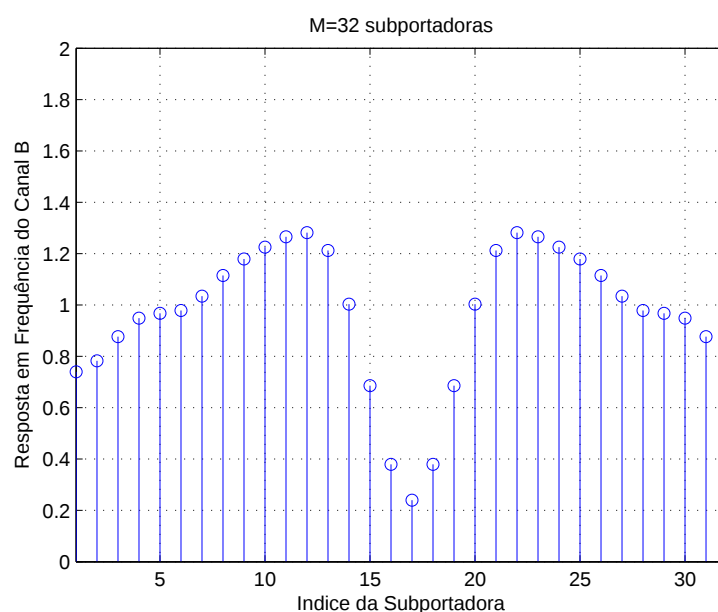


Figura 2.5: Resposta em Frequência do Canal B

Figura 2.6: Resposta em Frequência do Canal B *versus* Índice da Subportadora

os blocos de símbolos transmitidos, de forma que durante o período correspondente a um bloco (símbolos de informação e intervalo de guarda) o canal se mantenha fixo. Isto permite, modelar o canal através de uma matriz circulante e após a operação da transformada direta de Fourier no receptor a matriz do canal pode ser expressa por uma matriz diagonal. Tal fato não ocorreria se o canal variasse durante o período de símbolo, pois nesse caso o canal não poderia mais ser modelado por uma matriz circulante e, posteriormente, torná-la diagonal, invalidando a modelagem matemática proposta.

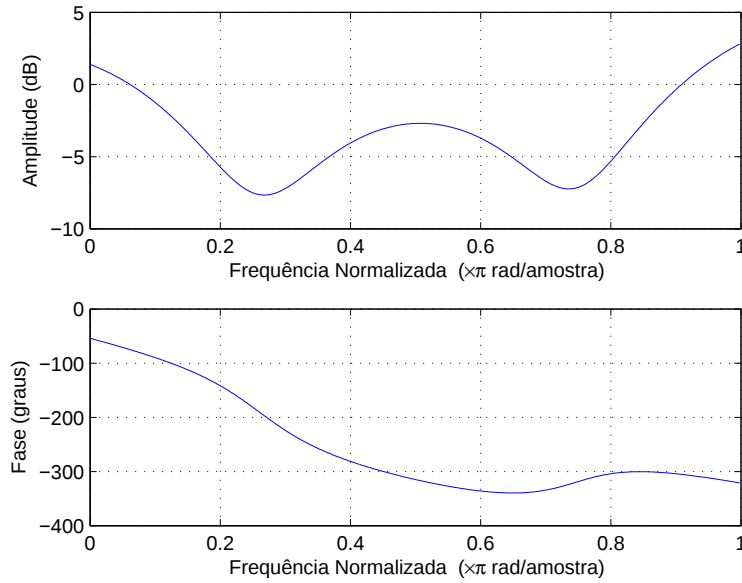


Figura 2.7: Resposta em Frequência do Canal C

2.4

Os Sistemas Multiportadoras

Nos últimos anos os sistemas de transmissão em blocos, com única ou múltiplas portadoras, vêm sendo amplamente estudados em conjunto com esquemas de acesso com múltiplos usuários [26, 37, 44, 45]. A combinação de DS CDMA (*Direct Sequence Code Division Multiple Access*) e transmissão com múltiplas portadoras foi, primeiramente, proposta em 1993 [27, 35, 48, 87]. Desde então diversas pesquisas podem ser encontradas na literatura [5, 25, 71, 60, 61, 64]. As principais vantagens desses sistemas são a alta eficiência espectral, a robustez aos efeitos adversos do canal seletivo em frequência e a flexibilidade para suportar aplicações integradas [36]. Este trabalho se concentra nos sistemas MC CDMA e MC DS CDMA descritos nas próximas subseções.

2.4.1

MC CDMA

Neste sistema, cada símbolo de dados binários, referente a um dos K usuários ativos, é replicado em M cópias, onde M é o número de subportadoras adotado. A seguir, cada cópia é espalhada por um código, ou sequência de assinatura, composto de N chips, sendo N , o ganho de processamento. Cada chip da sequência multiplicado pela cópia de um mesmo símbolo, é transmitido em uma subportadora, formando blocos de chips, de dimensões M , que são alimentados na entrada da IDFT normalizada de M pontos, representada pela matriz $\mathbf{F}_{M,M}^H$, tal que $\mathbf{F}_{M,M}^H \mathbf{F}_{M,M} = \mathbf{F}_{M,M} \mathbf{F}_{M,M}^H = \mathbf{I}_{M,M}$. Neste esquema para que cada chip seja envi-

ado em uma distinta subportadora é necessário que $M = N$ [87]. A fim de evitar a interferência entre blocos (IEB), um período de guarda do tipo CP ou ZP, com comprimento suficiente G (no mínimo igual a ordem do canal) é inserido antes da transmissão [59, 90]. O bloco resultante, de dimensão $P = M + G$ é, então, transmitido através do canal multipercurso. A transmissão pode ser representada por uma matriz de convolução Toeplitz triangular inferior $\mathbf{H}$ de dimensão $P \times P$, na qual a primeira coluna é a resposta ao impulso do canal estendida com zeros $\mathbf{h}_{est} = [h_0 \dots h_{L-1} 0 \dots 0]^T$ [4].

A Figura 2.8 ilustra o diagrama em blocos deste sistema.

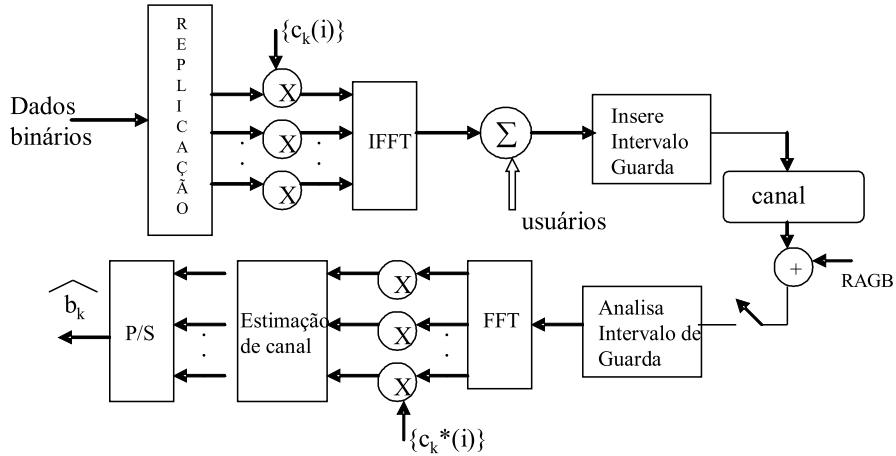


Figura 2.8: Diagrama em Blocos do Sistema MC CDMA

Na entrada do receptor, o sinal transmitido sofre a adição de ruído gaussiano branco e na etapa seguinte, é analisado se o intervalo de guarda é descartado, no caso CP, ou mantido, se for ZP. No caso de adição de intervalo de guarda CP, após a aplicação da DFT de M -pontos, o sinal recebido pode ser descrito pela seguinte expressão [59]:

$$\mathbf{r}_{CP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{Q} \mathbf{c}_k b_k(i) + \mathbf{n}(i) \quad (2-2)$$

onde $\mathbf{Q} = \text{diag}(\mathbf{q})$ é uma matriz diagonal, de dimensões $M \times M$, contendo a resposta em frequência do canal $\mathbf{q} = \sqrt{M} \mathbf{F}_{M,M} \mathbf{h}$. A matriz unitária $\mathbf{F}_{M,M}$ implementa uma DFT de $M \times M$ pontos. A resposta em frequência do canal, também, pode ser escrita em função do vetor de coeficientes do canal $\mathbf{h}_c$ de comprimento L , $\mathbf{q} = \sqrt{M} \mathbf{F}_{M,L} \mathbf{h}_c$, onde a matriz $\mathbf{F}_{M,L}$, de dimensões $M \times L$, é composta pelas primeiras L colunas da matriz de Fourier $\mathbf{F}_{M,M}$ de $M \times M$ pontos; $b_k(i)$ é o i -ésimo símbolo transmitido pelo terminal móvel do k -ésimo usuário, $\mathbf{c}_k = [c_{k,0}, \dots, c_{k,N-1}]^T$, $\|\mathbf{c}_k\| = 1$, é a sua sequência de espalhamento e $\mathbf{n}(i) = [n_0(i) \dots n_{N-1}(i)]^T$ é o vetor de ruído aditivo gaussiano branco complexo,

com matriz covariância dada por: $E[\mathbf{n}(i)\mathbf{n}^H(i)] = \sigma^2\mathbf{I}_M$. Esse sinal é válido para o enlace direto, mas pode ser facilmente adaptado para o enlace reverso:

$$\mathbf{r}_{CP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{Q}_k \mathbf{c}_k b_k(i) + \mathbf{n}(i) \quad (2-3)$$

No caso de intervalo de guarda do tipo ZP, ao final de cada bloco, são adicionados G zeros. O bloco resultante de dimensão P , onde $P = M + G$ é transmitido através do canal multipercurso, modelado através de uma matriz de convolução Toeplitz $P \times P$ triangular inferior, na qual a primeira coluna é a resposta ao impulso do canal estendida com zeros $\mathbf{h}_{est} = [h_0 \dots h_{L-1} 0 \dots 0]^T$. Na recepção o intervalo de guarda não é descartado e após a aplicação da DFT de P pontos, o sinal recebido pode ser expresso por [59]:

$$\mathbf{r}_{ZP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{Q} \mathbf{V} \mathbf{c}_k b_k(i) + \mathbf{n}(i) \quad (2-4)$$

onde $\mathbf{Q} = \text{diag}[\mathbf{q}]$, sendo

$$\mathbf{q} = \sqrt{P} \mathbf{F}_{P,P} \mathbf{h} = \sqrt{P} \mathbf{F}_{P,L} \mathbf{h}_c \quad (2-5)$$

A matriz unitária $\mathbf{F}_{P,P}$ implementa uma DFT de $P \times P$ pontos ($\mathbf{F}_P^H \mathbf{F}_P = \mathbf{F}_P \mathbf{F}_P^H = \mathbf{I}_P$), a matriz $\mathbf{F}_{P,L}$ de dimensões $P \times L$ contém as primeiras L colunas da matriz $\mathbf{F}_P$. A matriz $\mathbf{V}$, dita estruturada, de dimensão $P \times M$, é definida por $\mathbf{V} = \mathbf{F}_{P,M} \mathbf{F}_{M,M}^H$; o símbolo transmitido pelo k -ésimo usuário $b_k(i)$ é modulado pela sua respectiva sequência de espalhamento $\mathbf{c}_k = [c_{k,0}, \dots, c_{k,N-1}]^T$, que satisfaz $\|\mathbf{c}_k\| = 1$. O vetor $\mathbf{n}(i) = [n_0(i) \dots n_{P-1}(i)]^T$ corresponde, neste trabalho, ao ruído gaussiano branco complexo com matriz covariância $E[\mathbf{n}(i)\mathbf{n}^H(i)] = \sigma^2\mathbf{I}_P$. Para o enlace reverso, a expressão pode ser expressa por:

$$\mathbf{r}_{ZP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{Q}_k \mathbf{V} \mathbf{c}_k b_k(i) + \mathbf{n}(i) \quad (2-6)$$

2.4.2 MC DS CDMA

Neste sistema, a sequência de símbolos de dados é convertida de serial para paralelo, formando blocos de comprimento M . Os símbolos em cada bloco de dados são espalhados pela mesma sequência de espalhamento, composta por N chips onde N é o ganho de processamento. Note que, o número de subportadoras não é, necessariamente, igual ao ganho de processamento [27]. A seguir, os símbolos

são transmitidos *chip-a-chip* usando uma modulação OFDM. Dessa forma, cada símbolo espalhado no tempo é transmitido em distintas portadoras. O símbolo transmitido pelo k -ésimo usuário na j -ésima transmissão de *chip* ($j = 0, 1, \dots, N-1$) do seu i -ésimo bloco de dados $\mathbf{b}_k(i)$ é dada por $\mathbf{b}_k(i)c_{k,j}$ onde $c_{k,j}$ é o j -ésimo *chip* da sequência de espalhamento do referido usuário. Após a adição do período de guarda, o símbolo OFDM resultante é transmitido através do canal multipercurso.

No receptor, após a análise de descartar ou não o intervalo de guarda é computada a DFT de M -pontos, no caso de intervalo de guarda do tipo CP, ou de P -pontos ($P = M + G$) no caso de período de guarda do tipo ZP. A Figura 2.9 ilustra o diagrama em blocos do sistema.

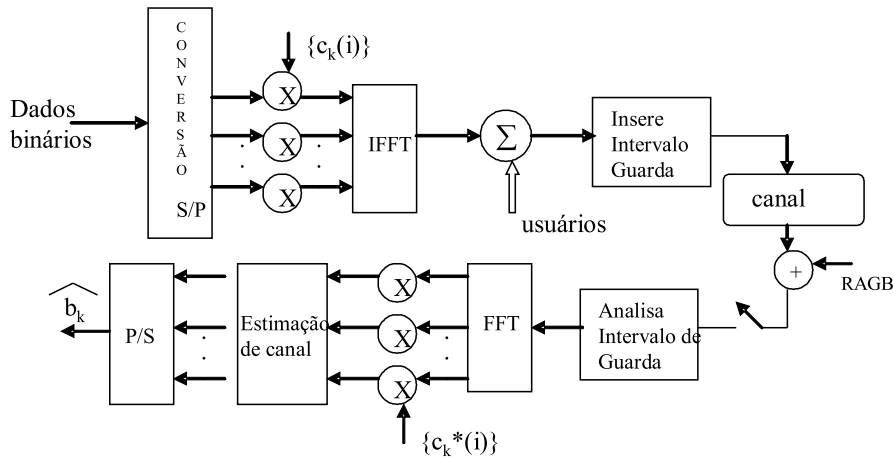


Figura 2.9: Diagrama em Blocos do Sistema MC DS CDMA

O sinal recebido na estação móvel, considerando todos os K usuários e intervalo de guarda CP, correspondendo à transmissão do j -ésimo *chip* do i -ésimo bloco pode ser expresso por:

$$\mathbf{x}_{CP}(i; j) = \sum_{k=1}^K \mathbf{Q} \mathbf{b}_k(i) c_{k,j} + \mathbf{n}(i; j) \quad (2-7)$$

onde $\mathbf{Q}$ é uma Matriz diagonal de dimensão $M \times M$ contendo a resposta em frequência ao impulso do canal $\mathbf{q}$, $\mathbf{n}(i; j)$ é o vetor de ruído aditivo gaussiano branco complexo com matriz covariância $\mathbf{E}[\mathbf{n}(i; j) \mathbf{n}^H(i; j)] = \sigma^2 \mathbf{I}_M$. Coletando N blocos de *chip* consecutivos forma-se uma matriz de dimensões $M \times N$. Para o i -ésimo bloco de símbolos, no enlace direto, a matriz pode ser expressa por:

$$\mathbf{X}_{CP}(i) = [\mathbf{x}(i, 0) \dots, \mathbf{x}(i, N-1)] = \sum_{k=1}^K \mathbf{Q} \mathbf{b}_k(i) \mathbf{c}_k^T + \mathbf{N}(i) \quad (2-8)$$

onde $\mathbf{N}(i) = [\mathbf{n}(i; 0) \dots, \mathbf{n}(i; N-1)]$ contém os vetores de ruído presentes em cada recepção de *chip* do i -ésimo bloco.

Para o enlace reverso a expressão é dada por:

$$\mathbf{X}_{CP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{Q}_k \mathbf{b}_k(i) \mathbf{c}_k^T + \mathbf{N}(i) \quad (2-9)$$

No caso de inserção de período de guarda do tipo ZP no receptor o intervalo de guarda não é removido e do símbolo OFDM resultante é computada a DFT de P pontos, onde $P = M + G$. Após coletar N blocos de *chips* consecutivos é possível formar, para o i -ésimo bloco de símbolos, a matriz $P \times N$:

$$\mathbf{X}_{ZP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{Q}_k \mathbf{V} \mathbf{b}_k(i) \mathbf{c}_k^T + \mathbf{N}(i) \quad (2-10)$$

onde $\mathbf{V}$, da mesma forma que em (2-4) é a matriz estruturada dada por $\mathbf{V} = \mathbf{F}_{P,M} \mathbf{F}_{M,M}^H$ de dimensões $P \times M$. Para o enlace reverso, a expressão pode ser facilmente adaptada para:

$$\mathbf{X}_{ZP}(i) = \sum_{k=1}^K \mathbf{Q}_k \mathbf{V} \mathbf{b}_k(i) \mathbf{c}_k^T + \mathbf{N}(i) \quad (2-11)$$