



República Federativa do Brasil  
Ministério da Economia  
Instituto Nacional da Propriedade Industrial

**(11) PI 0315535-8 B1**



**(22) Data do Depósito: 24/10/2003**

**(45) Data de Concessão: 17/09/2019**

**(54) Título:** SISTEMA MIMO COM MÚLTIPLOS MODOS DE MULTIPLEXAÇÃO ESPACIAL

**(51) Int.Cl.:** H04L 1/00; H04L 1/06.

**(30) Prioridade Unionista:** 23/10/2003 US 10/693,429; 25/10/2002 US 60/421,309.

**(73) Titular(es):** QUALCOMM INCORPORATED.

**(72) Inventor(es):** JAY RODNEY WALTON; JOHN W. KETCHUM; MARK WALLACE; STEVEN J. HOWARD.

**(86) Pedido PCT:** PCT US2003034519 de 24/10/2003

**(87) Publicação PCT:** WO 2004/038984 de 06/05/2004

**(85) Data do Início da Fase Nacional:** 20/04/2005

**(57) Resumo:** "SISTEMA MIMO COM MODOS MÚLTIPLOS DE MULTIPLEXAÇÃO ESPACIAL". Um sistema MIMO apóia múltiplos modos de multiplexação espacial para performance aperfeiçoada e maior flexibilidade. Estes modos podem incluir (1) um modo de comando de usuário simples que transmite fluxos de dados múltiplos em canais espaciais ortogonais até um receptor simples, (2) um modo não-comandado de usuário simples que transmite fluxos de dados múltiplos de antenas múltiplas para um receptor simples sem processamento espacial no transmissor, (3) um modo comandado de multi-usuário que transmite fluxos de dados múltiplos simultaneamente a receptores múltiplos com processamento espacial em uma transmissor, e (4) um modo não-comandado de multi-usuário que transmite fluxos de dados múltiplos de antenas múltiplas (co-localizados e não co-localizadas), sem processamento espacial nos transmissores para receptores, tendo antenas múltiplas. Para cada conjunto de terminais de usuário selecionados para transmissão de dados no link direto e/ou no link reverso, um modo de multiplexação espacial é escolhido para o conjunto de terminal de usuário entre os modos de multiplexação espacial suportados pelo sistema.

**"SISTEMA MIMO COM MÚLTIPLOS MODOS DE MULTIPLEXAÇÃO  
ESPACIAL"  
FUNDAMENTOS**

I. CAMPO

5               A presente invenção refere-se, geralmente, a comunicações e, mais especificamente, a um sistema de comunicação por múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO) com múltiplos modos de transmissão.

II. FUNDAMENTOS

10               Um sistema MIMO emprega múltiplas ( $N_T$ ) antenas transmissoras e múltiplas ( $N_R$ ) antenas receptoras para transmissão de dados, e é denotado como um sistema ( $N_T$ ,  $N_R$ ). Um canal MIMO formado pelas  $N_T$  antenas transmissoras e  $N_R$  receptoras pode ser decomposto em  $N_s$  canais espaciais, 15 onde  $N_s \leq \min \{N_T, N_R\}$ . Os  $N_s$  canais espaciais podem ser utilizados para transmitir  $N_s$  fluxos de dados independentes para alcançar maior capacidade de transmissão total. Geralmente, o processamento espacial pode ou não ser realizado em um transmissor e é normalmente realizado em um 20 receptor para transmissão e recuperação simultânea de múltiplos fluxos de dados.

Um sistema MIMO convencional tipicamente utiliza o esquema específico de transmissão para transmitir simultaneamente múltiplos fluxos de dados. Este esquema de 25 transmissão pode ser selecionado com base em uma compensação de vários fatores, tais como a exigência de sistema, a quantidade de realimentação do receptor para o transmissor, as capacidades do transmissor e do receptor, e assim por diante. Os transmissor, receptor e sistema são, 30 então, designados para suportar e operar de acordo com o sistema de transmissão selecionado. O esquema de transmissão tipicamente possui aspectos favoráveis bem como desfavoráveis, que podem impactar o desempenho do sistema.

Existe, portanto, uma necessidade na técnica de um sistema MIMO que seja capaz de alcançar um desempenho aperfeiçoado.

### SUMÁRIO

- 5 Um sistema MIMO que suporta múltiplos modos de multiplexação espacial para desempenho aperfeiçoado e maior flexibilidade é aqui descrito. A multiplexação espacial refere-se à transmissão de múltiplos fluxos de dados simultaneamente via múltiplos canais espaciais de um canal
- 10 MIMO. Os múltiplos modos de multiplexação espacial podem incluir (1) um modo direcionado de único usuário que transmite múltiplos fluxos de dados em canais espaciais ortogonais para um único receptor, (2) um modo não direcionado de único usuário que transmite múltiplos fluxos
- 15 de dados de múltiplas antenas para um único receptor sem processamento espacial em um transmissor, (3) um modo direcionado de multi-usuário que transmite múltiplos fluxos de dados simultaneamente para múltiplos receptores com processamento espacial em um transmissor, e (4) um modo não
- 20 direcionado de multi-usuário que transmite múltiplos fluxos de dados a partir de múltiplas antenas (co-localizadas ou não co-localizadas) sem processamento espacial no(s) transmissor(es), para o(s) receptor(es) tendo múltiplas antenas.
- 25 Um conjunto de pelo menos um terminal de usuário é selecionado para transmissão de dados no downlink e/ou no uplink. Um modo de multiplexação espacial é selecionado para o conjunto de terminal de usuário dentre múltiplos modos de multiplexação espacial suportados pelo sistema.
- 30 Múltiplas taxas são também selecionadas para que múltiplos fluxos de dados sejam transmitidos via múltiplos canais espaciais de um canal MIMO para o conjunto de terminal de usuário. O conjunto de terminal de usuário é programado

para transmissão de dados no downlink e/ou no uplink com as taxas selecionadas e com o modo de multiplexação espacial selecionado. Posteriormente, múltiplos fluxos de dados são processados (isto é, codificados, intercalados e modulados) de acordo com as taxas selecionadas e adicionalmente processadas espacialmente de acordo com o modo de multiplexação espacial selecionado para transmissão via múltiplos canais espaciais.

Vários aspectos e modalidades da invenção são descritos abaixo com maiores detalhes.

#### **BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS**

A figura 1 mostra um sistema MIMO de acesso múltiplo;

A figura 2 mostra uma estrutura de quadro e canal para o sistema MIMO;

A figura 3 mostra um ponto de acesso e dois terminais de usuário no sistema MIMO;

A figura 4 mostra um processador de dados de transmissão (TX) no ponto de acesso;

A figura 5 mostra um processador espacial TX e moduladores no ponto de acesso;

A figura 6 mostra demoduladores e um processador espacial de recepção (RX) em um terminal de usuário de multi-antena;

A figura 7 mostra um processador de dados RX no terminal de usuário de multi-antena;

A figura 8 mostra um processador espacial RX e um processador de dados RX que implementam uma técnica de cancelamento sucessivo de interferência (SIC);

A figura 9 mostra as cadeias de transmissão/recepção no ponto de acesso e terminal de usuário;

A figura 10 mostra um mecanismo de controle de taxa de malha fechada (closed loop);

A figura 11 mostra um controlador e um programador para programação de terminais de usuário;

5 A figura 12 mostra um processo para programação de terminais de usuário para transmissão de dados;

A figura 13 mostra um processo para transmissão de dados no dowlink;

A figura 14 mostra um processo para recepção de  
10 dados no uplink.

#### **DESCRIÇÃO DETALHADA**

A palavra "exemplar" é aqui utilizada para significar "servir como um exemplo, instância ou ilustração". Qualquer modalidade aqui descrita como  
15 "exemplar" não deve ser necessariamente interpretada como sendo preferida ou vantajosa em relação a outras modalidades.

Um sistema MIMO pode utilizar uma única portadora ou múltiplas portadoras para transmissão de dados.  
20 Múltiplas portadoras podem ser providas pela multiplexação por divisão ortogonal de frequência (OFDM), outras técnicas de modulação multiportadora, ou algumas outras construções. OFDM efetivamente divide a largura de banda total do sistema em múltiplas ( $N_F$ ) sub-bandas ortogonais, que também  
25 são comumente referidas como tons, faixas, portadoras e canais de frequência. Com OFDM, cada sub-banda está associada a uma portadora respectiva que pode ser modulada por dados. A descrição seguinte é para um sistema MIMO que emprega o OFDM. Todavia, os conceitos aqui descritos são  
30 igualmente aplicáveis a um sistema MIMO de única portadora.

O sistema MIMO suporta múltiplos modos de multiplexação espacial para desempenho aperfeiçoado e maior

flexibilidade. A tabela 1 relaciona os modos de multiplexação espacial suportados e sua breve descrição.

Tabela 1

<b>MODO DE MULTIPLEXAÇÃO ESPACIAL</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
Único usuário direcionado	Múltiplos fluxos de dados são transmitidos em canais espaciais ortogonais para um único receptor.
Único usuário não direcionado	Múltiplos fluxos de dados são transmitidos a partir de múltiplas antenas para um único receptor sem processamento espacial em um transmissor.
Multi-usuário direcionado	Múltiplos fluxos de dados são transmitidos simultaneamente (1) a partir de um único transmissor para múltiplos receptores ou (2) a partir de múltiplos transmissores para um único receptor, ambos com processamento espacial no(s) transmissor(es).
Multi-usuário não direcionado	Múltiplos fluxos de dados são transmitidos simultaneamente (1) a partir de múltiplos transmissores para um único receptor ou (2) a partir de um único transmissor para múltiplos receptores, ambos sem processamento espacial no(s) transmissor(es).

O sistema MIMO pode também suportar outros e/ou diferentes modos de multiplexação espacial, o que está dentro do escopo da presente invenção.

Cada modo de multiplexação espacial tem diferentes capacidades e exigências. Os modos de multiplexação espacial direcionados podem tipicamente alcançar melhor desempenho, mas podem apenas ser utilizados se o transmissor tiver suficiente informação de estado de canal para ortogonalizar os canais espaciais via decomposição ou de alguma outra técnica, conforme abaixo descrito. Os modos de multiplexação espacial não direcionados requerem muito pouca informação para transmitir simultaneamente múltiplos fluxos de dados, porém

o desempenho pode não ser tão bom quanto ao dos modos de multiplexação espacial direcionados. Um modo de multiplexação espacial adequado pode ser selecionado para utilização, dependendo da informação de estado de canal disponível, das capacidades dos transmissor e receptor, exigências de sistema e assim por diante. Cada um destes modos de multiplexação espacial é descrito abaixo.

#### 1. MODO DE MULTIPLEXAÇÃO ESPACIAL DIRECIONADO DE ÚNICO USUÁRIO.

Um canal MIMO de frequência seletiva formado por  $N_T$  antenas transmissoras e  $N_R$  antenas receptoras pode ser caracterizado por  $N_F$  matrizes resposta de canal de frequência de domínio  $\underline{H}(k)$ , para  $k = 1 \dots N_F$  cada qual com dimensões  $N_R \times N_T$ . A matriz resposta de canal para cada sub-banda pode ser expressa como:

$$\underline{\mathbf{H}}(k) = \begin{bmatrix} h_{1,1}(k) & h_{1,2}(k) & \dots & h_{1,N_T}(k) \\ h_{2,1}(k) & h_{2,2}(k) & \dots & h_{2,N_T}(k) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R,1}(k) & h_{N_R,2}(k) & \dots & h_{N_R,N_T}(k) \end{bmatrix} \quad \text{Eq (1)}$$

onde a inserção  $h_{i,j}(k)$ , para  $i = 1 \dots N_R$ ,  $j = 1 \dots N_T$ , e  $k = 1 \dots N_F$ , é o acoplamento (isto é, ganho complexo) entre a antena transmissora  $j$  e antena receptora  $i$  para sub-banda  $k$ .

A matriz resposta de canal  $\underline{H}(k)$  para cada sub-banda pode ser "diagonalizada" para obter  $N_S$  automodos para aquela sub-banda. Esta diagonalização pode ser alcançada realizando-se tanto uma decomposição de valor singular da matriz resposta de canal  $\underline{H}(k)$  quanto decomposição de autovalor de uma matriz de correlação de  $\underline{H}(k)$ , que é  $\underline{R}(k) = \underline{H}^H(k)\underline{H}(k)$ , onde "H" denota a transposta conjugada.

A decomposição de valor singular da matriz resposta de canal  $\underline{H}(k)$  para cada sub-banda pode ser expressa como:

$$\underline{H}(k) = \underline{U}(k) \underline{\Sigma}(k) \underline{V}^H(k), \quad \text{Eq (2)}$$

5 onde  $\underline{U}(k)$  é uma matriz unitária ( $N_R \times N_R$ ) de autovetores esquerdos de  $\underline{H}(k)$ ;

$\underline{\Sigma}(k)$  é uma matriz diagonal ( $N_R \times N_T$ ) de valores singulares de  $\underline{H}(k)$ ; e

10  $\underline{V}(k)$  é uma matriz unitária ( $N_T \times N_T$ ) de autovetores direitos de  $\underline{H}(k)$ .

Uma matriz unitária  $\underline{M}$  é caracterizada pela propriedade  $\underline{M}^H \underline{M} = \underline{I}$ , onde  $\underline{I}$  é a matriz identidade. As colunas de uma matriz unitária são ortogonais umas com as outras.

15 A decomposição de autovalor da matriz de correlação de  $\underline{H}(k)$  para cada sub-banda pode ser expressa como:

$$\underline{R}(k) = \underline{H}^H(k) \underline{H}(k) = \underline{V}(k) \underline{\Lambda}(k) \underline{V}^H(k) \quad \text{Eq (3)}$$

onde  $\underline{\Lambda}(k)$  é uma matriz diagonal ( $N_T \times N_T$ ) de autovalores de  $\underline{R}(k)$ . Conforme mostrado nas equações (2) e (3), as colunas de  $\underline{V}(k)$  são autovetores de  $\underline{R}(k)$ , bem como autovetores direitos de  $\underline{H}(k)$ .

25 A decomposição de valor singular e decomposição de autovalor são descritas por Gilbert Strang no livro intitulado "Linear Algebra and Its Applications", Segunda Edição, Academic Press 1980. Um modo de multiplexação espacial direcionado de único usuário pode ser implementado tanto com a decomposição de valor singular quanto com a decomposição de autovalor. Para maior clareza, a



decomposição de valor singular é utilizada para a seguinte descrição.

Os autovetores direitos de  $\underline{H}(k)$  são também referidos como vetores de "direcionamento" e podem ser utilizados para processamento espacial por um transmissor para transmitir dados nos  $N_s$  automodos de  $\underline{H}(k)$ . Os autovetores esquerdos de  $\underline{H}(k)$  podem ser utilizados para processamento espacial por um receptor para recuperar os dados transmitidos nos  $N_s$  automodos. Os automodos podem ser vistos como canais espaciais ortogonais obtidos através de decomposição. A matriz diagonal  $\underline{\Sigma}(k)$  contém valores reais não negativos ao longo da diagonal e zeros em outra parte. Estas inserções diagonais são referidas como valores singulares de  $\underline{H}(k)$  e representam os ganhos de canal para os  $N_s$  automodos de  $\underline{H}(k)$ . Os valores singulares de  $\underline{H}(k)$ ,  $\{\sigma_1(k)\sigma_2(k)\dots\sigma_{N_s}(k)\}$ , são também as raízes quadradas dos autovalores de  $\underline{R}(k)$ ,  $\{\lambda_1(k)\lambda_2(k)\dots\lambda_{N_s}(k)\}$ , onde  $\sigma_i(k) = \sqrt{\lambda_i(k)}$ . A decomposição de valor singular pode ser realizada independentemente na matriz resposta de canal  $\underline{H}(k)$  para cada uma das  $N_F$  sub-bandas para determinar os  $N_s$  automodos para aquela sub-banda.

Para cada sub-banda, os valores singulares na matriz  $\underline{\Sigma}(k)$  podem ser ordenados de maior para menor, e os autovetores nas matrizes  $\underline{V}(k)$  e  $\underline{U}(k)$  podem ser ordenados correspondentemente. Um automodo "de banda larga" pode ser definido como o conjunto de automodos da mesma ordem de todas as  $N_F$  sub-bandas após a ordenação (isto é, automodo  $m$  de banda larga inclui automodo  $m$  de todas as sub-bandas). De modo geral, todas ou menos do que  $N_F$  sub-bandas podem ser utilizadas para transmissão, com as sub-bandas não utilizadas sendo preenchidas com valores de sinal nulos.

Por razões de simplicidade, a seguinte descrição pressupõe que todas as  $N_F$  sub-bandas estão sendo utilizadas para transmissão.

O modo de multiplexação espacial direcionado de  
5 único usuário (ou simplesmente o "modo direcionado de único usuário") transmite  $N_s$  fluxos de símbolos de dados nos  $N_s$  automodos do canal MIMO. Isto requer processamento espacial tanto pelo transmissor quanto pelo receptor.

O processamento espacial no transmissor para cada  
10 sub-banda do modo direcionado de único usuário pode ser expresso como:

$$\underline{x}_{su-s}(k) = \underline{V}(k)\underline{s}(k), \quad \text{Eq (4)}$$

onde  $\underline{s}(k)$  é um vetor ( $N_T \times 1$ ) com  $N_s$  inserções diferentes de zero para  $N_s$  símbolos de dados a serem  
15 transmitidos nos  $N_s$  automodos para a sub-banda k; e

$\underline{x}_{su-s}(k)$  é um vetor ( $N_T \times 1$ ) com  $N_T$  inserções para  $N_T$  símbolos de transmissão a serem enviados a partir das  $N_T$  antenas transmissoras para sub-banda k.

As  $N_s$  inserções de  $\underline{s}(k)$  podem representar  $N_s$   
20 fluxos de símbolos de dados e as inserções restantes de  $\underline{s}(k)$ , caso existam, são preenchidos com zeros.

Os símbolos recebidos obtidos pelo receptor para cada sub-banda podem ser expressos como:

$$\underline{r}_{su-s}(k) = \underline{H}(k)\underline{x}_{su-s}(k) + \underline{n}(k) = \underline{H}(k)\underline{V}(k)\underline{s}(k) + \underline{n}(k) \quad \text{Eq(5)}$$

25 onde  $\underline{x}_{su-s}(k)$  é um vetor ( $N_R \times 1$ ) com  $N_R$  inserções para  $N_R$  símbolos recebidos, obtidos via as  $N_R$  antenas receptoras para sub-banda k; e

$\underline{n}(k)$  é um vetor de ruído para sub-banda k.

O processamento espacial no receptor para  
30 recuperar o vetor de dados  $\underline{s}(k)$  para cada sub-banda pode ser expresso como:

$$\begin{aligned}
\hat{\underline{s}}_{su-s}(k) &= \underline{\Sigma}^{-1}(k) \underline{U}^H(k) \underline{r}_{su-s}(k) , \\
&= \underline{\Sigma}^{-1}(k) \underline{U}^H(k) (\underline{H}(k) \underline{V}(k) \underline{s}(k) + \underline{n}(k)) , \\
&= \underline{\Sigma}^{-1}(k) \underline{U}^H(k) (\underline{U}(k) \underline{\Sigma}(k) \underline{V}^H(k) \underline{V}(k) \underline{s}(k) + \underline{n}(k)) , \\
&= \underline{s}(k) + \underline{n}_{su-s}(k) ,
\end{aligned} \tag{Eq (6)}$$

$$\text{ou } \tilde{\underline{s}}_{su-s}(k) = \underline{U}^H(k) \underline{r}_{su-s}(k) \text{ e } \hat{\underline{s}}_{su-s}(k) = \underline{\Sigma}^{-1}(k) \tilde{\underline{s}}_{su-s}(k) ,$$

onde  $\tilde{\underline{s}}_{su-s}(k)$  é um vetor  $(N_T \times 1)$  com  $N_s$  símbolos de dados detectados para sub-banda  $k$ ;

$\hat{\underline{s}}_{su-s}(k)$  é um vetor  $(N_T \times 1)$  com  $N_s$  símbolos de dados recuperados para sub-banda  $k$ ; e

$\underline{n}_{su-s}(k)$  é um vetor de ruídos pós-processado para sub-banda  $k$ .

O vetor  $\tilde{\underline{s}}_{su-s}(k)$  é uma estimativa não normalizada do vetor de dados  $\underline{s}(k)$ , e o vetor  $\hat{\underline{s}}_{su-s}(k)$  é uma estimativa normalizada de  $\underline{s}(k)$ . A multiplicação por  $\underline{\Sigma}^{-1}(k)$  na equação (6) considera os ganhos (possivelmente diferentes) dos  $N_s$  canais espaciais e normaliza a saída do processamento espacial de receptor, de maneira que os símbolos de dados recuperados com a magnitude apropriada sejam fornecidos para uma unidade de processamento subsequente.

Para um modo direcionado de único usuário, a matriz  $\underline{F}_{su-s}(k)$  de vetores de direcionamento utilizada pelo transmissor para cada sub-banda pode ser expressa como:

$$\underline{F}_{su-s}(k) = \underline{V}(k) \tag{Eq (7)}$$

A matriz de filtro espacial utilizada pelo receptor para cada sub-banda pode ser expressa como:

$$\underline{M}_{su-s}(K) = \underline{U}^H(k) \tag{Eq (8)}$$

O modo direcionado de único usuário pode ser utilizado se o transmissor tiver informação de estado de

canal tanto para a matriz resposta de canal  $\underline{H}(k)$  quanto a matriz  $\underline{V}(k)$  de autovetores direitos de  $\underline{H}(k)$ , para  $k = 1 \dots N_F$ . O transmissor pode estimar  $\underline{H}(k)$  ou  $\underline{V}(k)$  para cada sub-banda com base em um piloto transmitido pelo receptor, conforme abaixo descrito, ou pode ser provido com esta informação pelo receptor via um canal de realimentação. O receptor pode tipicamente obter  $\underline{H}(k)$  ou  $\underline{U}^H(k)$  para cada sub-banda com base em um piloto transmitido pelo transmissor. A equação (6) indica que os  $N_s$  fluxos de símbolos de dados  $\underline{s}(k)$ , distorcidos apenas por ruído de canal pós-processado  $\underline{n}_{su-s}(k)$ , podem ser obtidos para o modo direcionado de único usuário com o processamento espacial adequado tanto no transmissor como no receptor.

A relação sinal/ruído-e-interferência (SNR), para o modo direcionado de único usuário pode se expressa como:

$$\lambda_{su-s,m}(k) = \frac{P_m(k)\lambda_m(k)}{\sigma^2}, \quad m=1\dots N_s, \quad \text{Eq(9)}$$

Onde:  $P_m(k)$  é a potência de transmissão utilizada para o símbolo de dados transmitido na sub-banda  $k$  de automodo  $m$  de banda larga;

$\lambda_m(k)$  é o autovalor para sub-banda  $k$  do automodo  $m$  de banda larga, que é o  $m$ -ésimo elemento diagonal de  $\underline{\Lambda}(k)$ ; e

$\gamma_{su-s,m}(k)$  é a SNR para sub-banda  $k$  do automodo  $m$  de banda larga.

## 2. MODO DE MULTIPLEXAÇÃO ESPACIAL NÃO DIRECIONADO DE ÚNICO USUÁRIO

O modo de multiplexação espacial não direcionado de único usuário (ou simplesmente o "modo não direcionado de único usuário") pode ser utilizado se o transmissor não possuir suficiente informação de estado de canal ou se o

modo direcionado de único usuário não puder ser suportado por quaisquer razões. Um modo não direcionado de único usuário transmite  $N_s$  fluxos de símbolos de dados de  $N_T$  antenas transmissoras sem qualquer processamento espacial no transmissor.

Para um modo não direcionado de único usuário, a matriz  $\underline{K}_{ns}(k)$  de vetores de direcionamento utilizada pelo transmissor para cada sub-banda pode ser expressa como:

$$\underline{K}_{ns}(k) = \underline{I} \quad \text{Eq(10)}$$

O processamento espacial no transmissor para cada sub-banda pode ser expresso como:

$$\underline{x}_{ns}(k) = \underline{s}(k), \quad \text{Eq(11)}$$

onde  $\underline{x}_{ns}(k)$  é um vetor de símbolos de transmissão para o modo não direcionado de único usuário. Um canal espacial de "banda larga" para este modo pode ser definido como canal espacial correspondente a uma dada antena transmissora (isto é, canal espacial  $m$  de banda larga para o modo não direcionado de único usuário inclui todas as sub-bandas das antenas transmissoras  $m$ ).

Os símbolos recebidos obtidos pelo receptor para cada sub-banda, podem ser expressos como:

$$\underline{r}_{ns}(k) = \underline{H}(k)\underline{x}_{ns}(k) + \underline{n}(k)\underline{s}(k) + \underline{n}(k) \quad \text{Eq(12)}$$

O receptor pode recuperar o vetor de dados  $\underline{s}(k)$  utilizando várias técnicas de processamento de receptor tais como uma inversão de matriz de correlação de canal (CCMI) (que é também comumente referida como uma técnica de zero forcing), uma técnica de mínimo erro quadrático médio (MMSE), um equalizador de realimentação de decisão (DFE), uma técnica de cancelamento sucessivo de interferência (SIC), e assim por diante.

### A. PROCESSAMENTO ESPACIAL CCMI

O receptor pode utilizar a técnica CCMI para separar os fluxos de símbolos de dados. Um receptor CCMI utiliza um filtro espacial tendo uma resposta de  $\underline{M}_{ccmi}(k)$ ,  
 5 para  $k = 1 \dots N_F$ , que pode ser expressa como:

$$\underline{M}_{ccmi}(k) = [\underline{H}^H(k) \underline{H}(k)]^{-1} \underline{H}^H(k) = \underline{R}^{-1}(k) \underline{H}^H(k) \quad \text{Eq (13)}$$

O processamento espacial pelo receptor CCMI para o modo não direcionado de único usuário pode ser expresso como:

$$\begin{aligned} \hat{\underline{s}}_{ccmi}(k) &= \underline{M}_{ccmi}(k) \underline{r}_{ns}(k) , \\ &= \underline{R}^{-1}(k) \underline{H}^H(k) (\underline{H}(k) \underline{s}(k) + \underline{n}(k)) , \\ &= \underline{s}(k) + \underline{n}_{ccmi}(k) , \end{aligned} \quad \text{Eq (14)}$$

Onde:  $\hat{\underline{s}}_{ccmi}(k)$  é um vetor ( $N_T \times 1$ ) com  $N_s$  símbolos de dados recuperados para sub-banda k; e

15  $\underline{n}_{ccmi}(k) = \underline{M}_{ccmi}(k) \underline{n}(k)$  é ruído filtrado CCMI para a sub-banda k.

Uma matriz de autocovariância  $\underline{\varphi}_{ccmi}(k)$  do ruído filtrado CCMI para cada sub-banda pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} \underline{\varphi}_{ccmi}(k) &= E[\underline{n}_{ccmi}(k) \underline{n}_{ccmi}^H(k)] , \\ 20 \quad &= \underline{M}_{ccmi}(k) \underline{\varphi}_{nn}(k) \underline{M}_{ccmi}^H(k) , \\ &= \sigma^2 \underline{R}^{-1}(k) , \end{aligned} \quad \text{Eq (15)}$$

onde  $E[x]$  é valor esperado de  $x$ . A última igualdade na equação 15 pressupõe que o ruído  $\underline{n}(k)$  seja ruído branco aditivo Gaussiano (AWGN) com média zero, uma variância de  
 25  $\sigma^2$  e uma matriz de autocovariância de  $\underline{\varphi}_{nn}(k) = E[\underline{n}(k) \underline{n}^H(k)] = \sigma^2 \underline{I}$ .  
 Nesta hipótese, a SNR para o receptor CCMI pode ser expressa como:

$$\lambda_{ccmi,m}(k) = \frac{P_m(k)}{r_{mm}(k) \sigma^2} , \quad m = 1 \dots N_s, \quad \text{Eq (16)}$$

onde  $P_m(k)$  é a potência de transmissão utilizada para os símbolos de dados transmitidos na sub-banda  $k$  do canal espacial  $m$  de banda larga;

$r_{mm}(k)$  é o  $m$ -ésimo elemento diagonal de  $\underline{R}(k)$  para a sub-banda  $k$ ; e

$\gamma_{ccmi,m}(k)$  é a SNR para a sub-banda  $k$  de canal espacial  $m$  de banda larga.

Devido a estrutura de  $\underline{R}(k)$ , a técnica CCMI pode amplificar o ruído.

#### 10 B. PROCESSAMENTO ESPACIAL MMSE

O receptor pode utilizar a técnica MMSE para suprimir diafonia (crosstalk) entre os fluxos de símbolos de dados e para maximizar as SNRs de fluxos de símbolos de dados recuperados. Um receptor MMSE utiliza um filtro espacial tendo uma resposta de  $\underline{M}_{mmse}(k)$ , para  $k=1 \dots N_F$ , que é derivado de tal maneira que o erro médio quadrático entre o vetor de dados estimado a partir do filtro espacial e o vetor de dados  $\underline{s}(k)$  seja minimizado. O critério MMSE pode ser expresso como:

$$\min_{(\underline{M}_{mmse}(k))} E[(\underline{M}_{mmse}(k)\underline{r}_{ns}(k) - \underline{s}(k))^H (\underline{M}_{mmse}(k)\underline{r}_{ns}(k) - \underline{s}(k))] \quad \text{Eq (17)}$$

20 A solução para o problema de otimização proposta na equação (17) pode ser obtida de várias maneiras. Em um método exemplar, a matriz de filtro espacial MMSE  $\underline{M}_{mmse}(k)$  para cada sub-banda pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} \underline{M}_{mmse}(k) &= \underline{H}^H(k) [\underline{H}(k)\underline{H}^H(k) + \underline{\varphi}_{nn}(k)]^{-1}, \\ &= \underline{H}^H(k) [\underline{H}(k)\underline{H}^H(k) + \sigma^2 \underline{I}]^{-1}. \end{aligned} \quad \text{Eq (18)}$$

A segunda igualdade na equação (18) pressupõe que o vetor de ruído  $\underline{n}(k)$  seja AWGN com média zero e variância de  $\sigma^2$ .

O processamento espacial pelo receptor MMSE para o modo não direcionado de único usuário é constituído de

duas etapas. Na primeira etapa, o receptor MMSE multiplica o vetor  $\underline{r}_{ns}(k)$  com os  $N_R$  fluxos de símbolos recebidos com a matriz de filtro espacial MMSE  $\underline{M}_{mmse}(k)$  para obter um vetor  $\underline{\tilde{s}}_{mmse}(k)$  para  $N_s$  fluxos de símbolos detectados, como segue:

$$\begin{aligned} \underline{\tilde{s}}_{mmse}(k) &= \underline{M}_{mmse}(k) \underline{r}_{ns}(k), \\ &= \underline{M}_{mmse}(k) (\underline{H}(k) \underline{s}(k) + \underline{n}(k)), \\ &= \underline{Q}(k) \underline{s}(k) + \underline{n}_{mmse}(k), \end{aligned} \quad \text{Eq(19)}$$

onde  $\underline{n}_{mmse}(k) = \underline{M}_{mmse}(k) \underline{n}(k)$  é o ruído filtrado MMSE e  $\underline{Q}(k) = \underline{M}_{mmse}(k) \underline{H}(k)$ . Os  $N_s$  fluxos dos símbolos detectados são estimativas não normalizadas dos  $N_s$  fluxos de símbolos de dados.

Na segunda etapa, o receptor MMSE multiplica o vetor  $\underline{\tilde{s}}_{mmse}(k)$  com uma matriz de escalonamento  $\underline{D}_{mmse}^{-1}$  para obter um vetor  $\underline{\hat{s}}_{mmse}(k)$  para os  $N_s$  fluxos de símbolos de dados recuperados, como segue:

$$\underline{\hat{s}}_{mmse}(k) = \underline{D}_{mmse}^{-1}(k) \underline{\tilde{s}}_{mmse}(k), \quad \text{Eq(20)}$$

onde  $\underline{D}_{mmse}(k)$  é uma matriz diagonal cujos elementos diagonais são os elementos diagonais de  $\underline{Q}(k)$ , isto é,  $\underline{D}_{mmse}(k) = \text{diag}[\underline{Q}(k)]$ . Os  $N_s$  fluxos de símbolos de dados recuperados são estimativas normalizadas dos  $N_s$  fluxos de símbolos de dados.

Utilizando a identidade inversa da matriz, a matriz  $\underline{Q}(k)$  pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \underline{Q}(k) &= \underline{H}^H(k) \underline{\phi}_{nn}^{-1}(k) \underline{H}(k) [\underline{H}^H(k) \underline{\phi}_{nn}^{-1}(k) \underline{H}(k) + \underline{I}]^{-1}, \\ &= \underline{H}^H(k) \underline{H}(k) [\underline{H}^H(k) \underline{H}(k) + \sigma^2 \underline{I}]^{-1}. \end{aligned} \quad \text{Eq(21)}$$

A segunda igualdade na equação (21) pressupõe que o ruído seja AWGN com média zero e variância de  $\sigma^2$ .



A SNR para o receptor MMSE pode ser expressa como:

$$\gamma_{mmse,m}(k) = \frac{q_{mm}(k)}{1 - q_{mm}(k)} P_m(k), \quad m = 1 \dots N_s, \quad \text{Eq (22)}$$

onde  $q_{mm}(k)$  é o  $m$ -ésimo elemento diagonal de  $\underline{Q}(k)$  para sub-banda  $k$ ; e

$\gamma_{mmse,m}(k)$  é a SNR para sub-banda  $k$  do canal espacial  $m$  de banda larga.

#### C. PROCESSAMENTO DE RECEPTOR DE CANCELAMENTO SUCESSIVO DE INTERFERÊNCIA

O receptor pode processar os  $N_R$  fluxos de símbolos recebidos, utilizando a técnica SIC para recuperar  $N_s$  fluxos de símbolos de dados. Para a técnica SIC, o receptor inicialmente realiza o processamento espacial dos  $N_R$  fluxos de símbolos recebidos (por exemplo, utilizando CCMI, MMSE ou alguma outra técnica) e obtém um fluxo de símbolos de dados recuperado. O receptor adicionalmente processa (por exemplo, demodula, deintercala e decodifica) este fluxo de símbolos de dados recuperado para obter um fluxo de dados decodificados. A seguir, o receptor estima a interferência que é causada por este fluxo em relação a outros  $N_s - 1$  fluxos de símbolos de dados e cancela a interferência estimada dos  $N_R$  fluxos de símbolos recebidos para obter  $N_R$  fluxos de símbolos modificados. O receptor, então, repete o mesmo processamento nos  $N_R$  fluxos de símbolos modificados para recuperar um outro fluxo de símbolos de dados.

Para um receptor SIC, os fluxos de símbolos de entrada (isto é, recebidos ou modificados) para o estágio  $\ell$ , onde  $\ell = 1 \dots N_s$ , podem ser expressos como:

$$\underline{r}_{sic}^{\ell}(k) = \underline{H}^{\ell}(k) \underline{x}_{ns}^{\ell}(k) + \underline{n}(k) = \underline{H}^{\ell}(k) \underline{s}^{\ell}(k) + \underline{n}(k), \quad \text{Eq (23)}$$

onde  $\underline{r}_{sic}^{\ell}(k)$  é um vetor de  $N_R$  símbolos modificados para sub-banda  $k$  no estágio  $\ell$ , e  $\underline{r}_{sic}^{\ell}(k) = \underline{r}_{ns}(k)$  para o primeiro estágio;

$\underline{s}^{\ell}(k)$  é um vetor de  $(N_T - \ell + 1)$  símbolos de dados  
5 ainda não recuperados para sub-banda  $k$  no estágio  $\ell$ ; e

$\underline{H}^{\ell}(k)$  é uma matriz resposta de canal reduzida  $N_R \times (N_T - \ell + 1)$  para sub-banda  $k$  no estágio  $\ell$ .

A equação (23) pressupõe que fluxos de símbolos de dados recuperados nos  $(\ell - 1)$  estágios anteriores são  
10 cancelados. A dimensionalidade da matriz resposta de canal  $\underline{H}(k)$  sucessivamente se reduz por uma coluna para cada estágio, à medida que o fluxo do símbolo de dados é recuperado e cancelado. Para o estágio  $\ell$ , a matriz resposta de canal reduzida  $\underline{H}^{\ell}(k)$  é obtida por remoção de  
15  $(\ell - 1)$  colunas na matriz original  $\underline{H}(k)$  correspondente aos  $(\ell - 1)$  fluxos de símbolos de dados previamente recuperados, isto é  $\underline{H}^{\ell}(k) = [\underline{h}_{j_{\ell}}(k) \underline{h}_{j_{\ell+1}}(k) \dots \underline{h}_{j_{N_T}}(k)]$ , onde  $\underline{h}_{j_n}(k)$  é um vetor  $N_R \times 1$  para a resposta de canal entre a antena transmissora  $j_n$  e as  $N_R$  antenas receptoras. Para o estágio  $\ell$ , os  $(\ell - 1)$   
20 fluxos de símbolos de dados recuperados nos estágios anteriores recebem índices de  $\{j_1 j_2 \dots j_{\ell-1}\}$ , e os  $(N_T - \ell + 1)$  fluxos de símbolos e dados ainda não recuperados recebem os índices de  $\{j_{\ell} j_{\ell+1} \dots j_{N_T}\}$ .

Para o estágio  $\ell$ , o receptor SIC deriva uma  
25 matriz de filtro espacial  $\underline{M}_{sic}^{\ell}(k)$ , para  $k = 1 \dots N_F$  com base na matriz resposta de canal reduzida  $\underline{H}^{\ell}(k)$  (ao invés da matriz original  $\underline{H}(k)$ ) utilizando uma técnica CCMI conforme mostrado na equação (13), a técnica MMSE conforme mostrada na equação (18) ou alguma outra técnica. A matriz

$\underline{M}_{sic}^{\ell}(k)$  possui uma dimensionalidade de  $(N_T - \ell + 1) \times N_R$ . Como  $\underline{H}^{\ell}(k)$  é diferente a cada estágio, a matriz de filtro espacial  $\underline{M}_{sic}^{\ell}(k)$  também é diferente para cada estágio.

O receptor SIC multiplica o vetor  $\underline{r}_{sic}^{\ell}(k)$  para os  
 5  $N_R$  fluxos de símbolos modificados com a matriz de filtro espacial  $\underline{M}_{sic}^{\ell}(k)$  para obter um vetor  $\underline{\tilde{s}}_{sic}^{\ell}(k)$  para  $(N_T - \ell + 1)$  fluxos de símbolos detectados como segue:

$$\begin{aligned}\underline{\tilde{s}}_{sic}^{\ell}(k) &= \underline{M}_{sic}^{\ell}(k) \underline{r}_{sic}^{\ell}(k), \\ &= \underline{M}_{sic}^{\ell}(k) (\underline{H}^{\ell}(k) \underline{s}^{\ell}(k) + \underline{n}^{\ell}(k)), \\ 10 \quad &= \underline{Q}_{sic}^{\ell}(k) \underline{s}^{\ell}(k) + \underline{n}_{sic}^{\ell}(k),\end{aligned}\tag{Eq (24)}$$

onde  $\underline{n}_{sic}^{\ell}(k) = \underline{M}_{sic}^{\ell}(k) \underline{n}^{\ell}(k)$  é o ruído filtrado para sub-banda  $k$  do estágio  $\ell$ ,  $\underline{n}^{\ell}(k)$  é um vetor reduzido de  $\underline{n}(k)$  e  $\underline{Q}_{sic}^{\ell}(k) = \underline{M}_{sic}^{\ell}(k) \underline{H}^{\ell}(k)$ . O receptor SIC seleciona, então, um dos fluxos de símbolos detectados para recuperação. Como apenas  
 15 um fluxo de símbolos de dados é recuperado em cada estágio, o receptor SIC pode simplesmente derivar um vetor-linha de filtro espacial  $(1 \times N_R)$ ,  $\underline{m}_{j_t}^{\ell}(k)$ , para o fluxo de dados de símbolo  $\{s_{j_t}\}$  a ser recuperado no estágio  $\ell$ . O vetor-linha  $\underline{m}_{j_t}^{\ell}(k)$  é uma linha da matriz  $\underline{M}_{sic}^{\ell}(k)$ . Neste caso, o  
 20 processamento espacial para o estágio  $\ell$  para recuperar o fluxo de símbolos de dados  $\{s_{j_t}\}$  pode ser expresso como:

$$\underline{\tilde{s}}_{j_t}^{\ell}(k) = \underline{m}_{j_t}^{\ell}(k) \underline{r}_{sic}^{\ell}(k) = \underline{q}_{j_t}^{\ell}(k) \underline{s}^{\ell}(k) + \underline{m}_{j_t}^{\ell}(k) \underline{n}^{\ell}(k)\tag{Eq (25)}$$

onde  $\underline{q}_{j_t}^{\ell}(k)$  é a linha de  $\underline{Q}_{sic}^{\ell}(k)$  correspondente ao fluxo de símbolos e dados  $\{s_{j_t}\}$ .

25 De qualquer maneira, o receptor escalona o fluxo de símbolos detectados  $\{\underline{\tilde{s}}_{j_t}^{\ell}\}$  para obter um fluxo de símbolos

de dados recuperado  $\{\hat{s}_{j_t}\}$  e adicionalmente processa (por exemplo, demodula, deintercala e decodifica) o fluxo  $\{\hat{s}_{j_t}\}$  para obter um fluxo de dados decodificados  $\{\hat{d}_{j_t}\}$ . O receptor também forma uma estimativa da interferência que este fluxo causa aos outros fluxos de símbolos de dados ainda não recuperados. Para estimar a interferência, o receptor re-encodifica, intercala e mapeia por símbolos o fluxo de dados decodificados  $\{\hat{d}_{j_t}\}$  da mesma maneira como realizado pelo transmissor e obtém um fluxo de símbolos "remodulado"  $\{\tilde{s}_{j_t}\}$ , que é uma estimativa do fluxo de símbolos de dados que acabou de ser recuperado. A seguir, vincula o fluxo de símbolos remodulado com cada um dos  $N_R$  elementos no vetor resposta de canal  $\underline{h}_{j_t}(k)$  para o fluxo  $\{\tilde{s}_{j_t}\}$ , para obter  $N_R$  componentes de preferência  $\underline{i}_{j_t}(k)$  causadas por este fluxo.  $N_R$  componentes de interferência são, depois, subtraídos dos  $N_R$  fluxos de símbolos modificados  $\underline{r}_{sic}^\ell(k)$  para o estágio  $\ell$  para obter  $N_R$  fluxos de símbolos modificados  $\underline{r}_{sic}^{\ell+1}(k)$  para o próximo estágio  $\ell+1$ , isto é,  $\underline{r}_{sic}^{\ell+1}(k) = \underline{r}_{sic}^\ell(k) - \underline{i}_{j_t}(k)$ . Os fluxos de símbolos modificados  $\underline{r}_{sic}^{\ell+1}(k)$  representam os fluxos que teriam sido recebidos se os fluxos de símbolos de dados  $\{\tilde{s}_{j_t}\}$  não tivessem sido transmitidos (isto é, pressupondo-se que o cancelamento de interferência foi efetivamente realizado).

O receptor SIC processa os  $N_R$  fluxos de símbolos recebidos em  $N_s$  estágios sucessivos. Para cada estágio, o receptor SIC (1) realiza processamento espacial tanto nos  $N_R$  fluxos de símbolos recebidos quanto nos  $N_R$  fluxos de símbolos modificados a partir do estágio precedente, para obter um fluxo de símbolos de dados recuperado, (2) decodifica este fluxo de símbolos de dados recuperado para

obter um fluxo de dados decodificados correspondente, 3) estima e cancela a interferência causada por este fluxo e (4) obtém  $N_R$  fluxos de símbolos modificados para o próximo estágio. Se a interferência devido a cada fluxo de dados  
 5 puder ser estimada com maior precisão e cancelada, então fluxos de dados posteriormente recuperados experimentam menor interferência e podem ser capazes de alcançar SNRs mais altas.

Para a técnica SIC, a SNR de cada fluxo de  
 10 símbolos de dados recuperado depende (1) da técnica de processamento espacial (por exemplo, CCMI ou MMSE) utilizada para cada estágio, (2) do estágio específico em que o fluxo de símbolos de dados é recuperado e (3) da quantidade de interferência causada por fluxos de símbolos  
 15 de dados recuperados em estágios posteriores. A SNR para o receptor SIC com CCMI pode ser expressa como:

$$\gamma_{sic-ccmi,m}(k) = \frac{P_m(k)}{r_{mm}^\ell(k)\sigma^2}, \quad m=1 \dots N_s \quad \text{Eq (26)}$$

onde  $r_{mm}^\ell(k)$  é o  $m$ -ésimo elemento diagonal de  $[\underline{R}^\ell(k)]^{-1}$  para a sub-banda  $k$ , onde  $\underline{R}^\ell(k) = [\underline{H}^\ell(k)]^H \underline{H}^\ell(k)$ .

20 A SNR para o receptor SIC com MMSE pode ser expressa como:

$$\gamma_{sic-mmse,m}(k) = \frac{q_{mm}^\ell(k)}{1 - q_{mm}^\ell(k)} P_m, \quad m=1 \dots N_s \quad \text{Eq (27)}$$

onde  $q_{mm}^\ell(k)$  é o  $m$ -ésimo elemento diagonal de  $\underline{Q}_{sic}^\ell(k)$  para a sub-banda  $k$ , onde  $\underline{Q}_{sic}^\ell(k)$  é derivado conforme mostrado na  
 25 equação (21), porém com base na matriz resposta de canal reduzida  $\underline{H}^\ell(k)$ , ao invés da matriz original  $\underline{H}(k)$ .

De uma maneira geral, a SNR melhora progressivamente para fluxos de símbolos de dados recuperados em estágios posteriores, por que a

interferência de fluxos de símbolos de dados recuperados em estágios anteriores é cancelada. Isto permite, então, que sejam utilizadas taxas mais altas para fluxos de símbolos de dados recuperados posteriormente.

5 3. MODO DE MULTIPLEXAÇÃO ESPACIAL DIRECIONADO DE MULTI-USUÁRIO

O modo de multiplexação espacial direcionado de multi-usuário (ou simplesmente o "modo direcionado de multi-usuário") suporta transmissão de dados de um único transmissor para múltiplos receptores simultaneamente, com base em "assinaturas espaciais" dos receptores. A assinatura espacial para um receptor é dada por um vetor resposta de canal (para cada sub-banda) entre  $N_T$  antenas transmissoras e cada antena receptora do lado do receptor.

10 O transmissor pode obter essas assinaturas espaciais para os receptores conforme abaixo descrito. O transmissor poderá, então, (1) selecionar um conjunto de receptores para transmissão de dados simultânea e (2) derivar vetores de direcionamento para os fluxos de símbolos de dados a serem transmitidos para os receptores selecionados, de maneira que a diafonia de fluxos de transmissão seja adequadamente suprimida pelos receptores.

15 20

Os vetores de direcionamento para o modo direcionado de multi-usuário poderão ser derivados de várias maneiras. Dois esquemas exemplares são abaixo descritos. Por motivos de simplicidade, a seguinte descrição é para uma sub-banda e pressupõe que cada receptor esteja equipado com uma antena.

25

Em um esquema de inversão de canal, o transmissor obtém os vetores de direcionamento para múltiplos receptores, utilizando a inversão de canal. Inicialmente, o transmissor seleciona  $N_T$  receptores de única antena para transmissão simultânea. O transmissor obtém um vetor-linha

30

de resposta de canal  $1 \times N_T$ ,  $\underline{h}_i(k)$ , para cada receptor selecionado e forma uma matriz resposta de canal  $N_T \times N_T$ ,  $\underline{H}_{mu-s}(k)$ , com os  $N_T$  vetores de linha para os  $N_T$  receptores. O transmissor, então, utiliza a inversão de canal para obter  
 5 uma matriz  $\underline{F}_{mu-s}(k)$  de  $N_T$  vetores de direcionamento para os  $N_T$  receptores selecionados como segue:

$$\underline{F}_{mu-s}(k) = \underline{H}_{mu-s}^{-1}(k). \quad \text{Eq (28)}$$

O processamento espacial no transmissor para cada sub-banda para o modo direcionado de multi-usuário pode ser  
 10 expresso como:

$$\underline{x}_{mu-s}(k) = \underline{F}_{mu-s}(k)\underline{s}(k). \quad \text{Eq (29)}$$

onde  $\underline{x}_{mu-s}(k)$  é o vetor de símbolos de transmissão para o modo direcionado de multi-usuário.

Os símbolos recebidos nos  $N_T$  receptores  
 15 selecionados para cada sub-banda podem ser expressos como:

$$\begin{aligned} \underline{r}_{mu-s}(k) &= \underline{H}_{mu-s}(k)\underline{x}_{mu-s}(k) + \underline{n}(k), \\ &= \underline{H}_{mu-s}(k)\underline{F}_{mu-s}(k)\underline{s}(k) + \underline{n}(k), \\ &= \underline{s}(k) + \underline{i}(k) + \underline{n}(k), \end{aligned} \quad \text{Eq (30)}$$

onde  $\underline{r}_{mu-s}(k)$  é um vetor de símbolos recebido ( $N_T \times 1$ ) para  
 20 a sub-banda  $k$  nos  $N_T$  receptores selecionados, e  $\underline{i}(k)$  representa uma interferência de diafonia devido à estimativa imperfeita de  $\underline{F}_{mu-s}(k)$  no transmissor. Cada receptor selecionado obterá apenas uma inserção do vetor  $\underline{r}_{mu-s}(k)$  para cada antena receptora. Se o processamento  
 25 espacial no transmissor for eficaz, então a potência em  $\underline{i}(k)$  é reduzida, e cada fluxo de símbolos de dados recuperado experimenta pouca diafonia proveniente de  $(N_T - 1)$  além de fluxos de símbolos de dados enviados para outros receptores.

O transmissor pode também transmitir um piloto direcionado para cada receptor selecionado, conforme abaixo descrito. Cada receptor processaria, então, seu piloto direcionado para estimar o ganho de canal e fase e demodularia, de modo coerente, os símbolos recebidos a partir de sua única antena com o ganho de canal e estimativas de fase para obter símbolos de dados recuperados.

As SNRs alcançadas para o modo direcionado de multi-usuário são uma função da autocovariância da matriz resposta de canal  $\underline{H}_{mu-s}(k)$ . SNRs mais altas podem ser alcançadas, selecionando-se terminais de usuário "compatíveis". Diferentes conjuntos e/ou combinações de terminais de usuário podem ser avaliados e o conjunto/combinção das SNRs mais altas pode ser selecionado para transmissão de dados.

Enquanto o esquema de inversão de canal é interessante em sua simplicidade, em geral, proverá um desempenho deficiente porque o pré-condicionamento dos fluxos de símbolos de dados com a matriz resposta de canal inversa na equação 29 força o transmissor a aplicar a maior parte da sua potência nos piores autômodos do canal MIMO. Também em alguns canais, particularmente aqueles com grandes correlações entre os elementos de  $\underline{H}_{mu-s}(k)$ , a matriz resposta de canal é inferior a uma categoria plena, e não será possível calcular um inverso.

No esquema de pré-codificação, o transmissor pré-codifica  $N_T$  fluxos de símbolos de dados para serem enviados para  $N_T$  receptores selecionados, de maneira que estes fluxos de símbolos de dados experimentam pouca diafonia nos receptores. O receptor poderá formar uma matriz resposta de canal  $\underline{H}_{mu}(k)$  para os  $N_T$  receptores selecionados. O



transmissor realiza, então, a fatoração QR em  $\underline{H}_{mu}(k)$  de tal maneira que  $\underline{H}_{mu}(k) = \underline{F}_{tri}(k) \underline{Q}_{mu}(k)$ , onde  $\underline{F}_{tri}(k)$  é uma matriz triangular esquerda inferior e  $\underline{Q}_{mu}(k)$  é uma matriz unitária.

5 O transmissor realiza uma operação de pré-codificação no vetor de símbolos de dados para ser transmitida,  $\underline{s}(k) = [s_1(k) s_2(k) \dots s_{N_T}(k)]^T$ , para obter um vetor de símbolos pré-codificado  $\underline{a}(k) = [a_1(k) a_2(k) \dots a_{N_T}(k)]^T$ , como segue:

$$a_\ell(k) = \frac{1}{f_{\ell\ell}(k)} \left( s_\ell(k) - \sum_{i=1}^{\ell-1} f_{\ell i}(k) a_i(k) \right) \bmod (M/2), \text{ para } \ell = 1 \dots N_T \quad \text{Eq (31)}$$

10 onde  $M$  é o número de níveis espaçados em intervalos de unidade, na fase ou dimensão de quadratura de uma constelação de sinal QAM quadrada; e

$f_{\ell i}(k)$  é o elemento de  $\underline{F}_{tri}(k)$  na linha  $i$  e coluna  $j$ . A operação de módulo (mod) adiciona um número  
15 suficiente de múltiplos números inteiros de  $M$  ao argumento, de maneira que o resultado satisfaz  $a_\ell(k) \in [-M/2, M/2]$ . Após esta operação de pré-codificação, os símbolos de transmissão são computados por processamento do vetor de símbolos pré-codificado  $\underline{a}(k)$  com a matriz de direcionamento  
20 unitária  $\underline{Q}_{mu}(k)$  para gerar o vetor de símbolos de transmissão  $\underline{x}_{mu-pc}(k) = \underline{Q}_{mu}^H(k) \underline{a}(k)$ .

Um vetor de símbolos de recepção para o esquema de pré-codificação pode ser expresso como:

$$\underline{r}_{mu-pc}(k) = \underline{H}_{mu}(k) \underline{Q}_{mu}^H(k) \underline{a}(k) + \underline{n}(k) = \underline{F}_{tri}(k) \underline{a}(k) + \underline{n}(k). \quad \text{Eq (32)}$$

25 Pode ser mostrado que  $\underline{F}_{tri}(k) \underline{a}(k) \bmod (M/2) = \underline{s}(k)$ . Assim sendo, o vetor de símbolos de dados pode ser estimado como sendo  $\hat{\underline{s}}_{mu-pc}(k) = \underline{r}_{mu-pc}(k) \bmod (M/2)$ . Cada um dos  $N_T$  receptores selecionados apenas obtém um dos  $N_T$  elementos de  $\underline{r}_{mu-pc}(k)$  e

pode estimar os símbolos de dados a ele enviados por realizar  $\text{mod}(M/2)$  nos seus símbolos recebidos.

O transmissor pode, também, transmitir múltiplos fluxos de símbolos de dados para um receptor de multi-  
 5 antena no modo direcionado de multi-usuário. A matriz resposta de canal  $\underline{H}_{mu}(k)$  incluiria, então, um vetor de uma linha para cada antena receptora no receptor de multi-antena.

O modo direcionado de multi-usuário também  
 10 suporta a transmissão de dados de múltiplos transmissores de multi-antena para um único receptor. Cada transmissor de multi-antena realiza o processamento espacial no seu fluxo de símbolos de dados para direcionar o fluxo em direção ao receptor. Cada transmissor também transmite um piloto  
 15 direcionado para o receptor. Para o receptor, cada transmissor aparece como única transmissão. O receptor realiza o processamento espacial (por exemplo, CCMI, MMSE e assim por diante) para recuperar fluxos de símbolos de dados direcionados a partir de todos os transmissores.

#### 20 4. MODO DE MULTIPLEXAÇÃO ESPACIAL NÃO DIRECIONADO DE MULTI-USUÁRIO

O modo de multiplexação espacial não direcionado de multi-usuário (ou simplesmente o "modo não direcionado de multi-usuário") suporta a transmissão de dados  
 25 simultânea por (1) um único transmissor para múltiplos receptores (por exemplo, para downlink e (2) múltiplos transmissores para um único receptor (por exemplo, para uplink).

Para transmissão não direcionada de um único  
 30 transmissor para múltiplos receptores, o transmissor transmite um fluxo de símbolos de dados de cada antena transmissora para um receptor que está recebendo. Um ou múltiplos fluxos de símbolos de dados podem ser

transmitidos para cada receptor recipiente. Cada receptor recipiente inclui pelo menos  $N_T$  antenas receptoras que podem realizar processamento espacial para isolar e recuperar seus fluxos (s) de símbolos de dados. Cada

5 receptor que deseja transmissões de dados estima a SNR para cada uma das  $N_T$  antenas transmissoras e envia as  $N_T$  estimativas de SNR para o transmissor. O transmissor seleciona um conjunto de receptores para transmissão de dados, com base nas estimativas de SNR de todos os

10 receptores que desejam a transmissão de dados (por exemplo, para maximizar a capacidade de transmissão total.

Para transmissão não direcionada de múltiplos transmissores para um único receptor, os transmissores transmitem fluxos de símbolos de dados a partir de suas

15 antenas (isto é, sem processamento espacial), de maneira que estes fluxos chegam aproximadamente com alinhamento temporal no receptor. O receptor pode estimar a matriz resposta de canal para todos os transmissores como se eles fossem um transmissor. O receptor pode recuperar múltiplos

20 fluxos de símbolos de dados transmitidos por esses múltiplos transmissores, utilizando qualquer uma das técnicas acima descritas para o modo não direcionado de único usuário (por exemplo, técnicas CCMI, MMSE e SIC).

#### 5.PROCESSAMENTO ESPACIAL

25 A tabela 2 resume o processamento espacial no transmissor e no receptor para os quatro modos de multiplexação espacial acima descritos. Para os modos não direcionados, as técnicas de processamento de receptor diferentes de CCMI e MMSE também podem ser utilizadas. A

30 última coluna na tabela 2 indica se a técnica SIC pode ou não ser utilizada no receptor.

Tabela 2

MODO DE MULTIPLE- XAÇÃO ESPACIAL	TRANSMISSÃO $\underline{F}(k)$	RECEPÇÃO $\underline{M}(k)$	ESCALONA- MENTO	SIC
Direcionado de único usuário	$\underline{V}(k)$	$\underline{U}^H(k)$	$\underline{\Sigma}^{-1}(k)$	Não
Não direcionado de único usuário	$\underline{I}$	$\underline{M}_{ccmi}(k)$ $\underline{M}_{mmse}(k)$	– $\underline{D}_{mmse}^{-1}(k)$	Sim
Direcionado de multi- usuário (único transmissor para múltiplos receptores)	$\underline{H}_{mu-s}^{-1}(k)$	–	–	Não
Multi-usuário não direcionado (múltiplos transmissores para único receptor)	$\underline{I}$	$\underline{M}_{ccmi}(k)$ $\underline{M}_{mmse}(k)$	– $\underline{D}_{mmse}^{-1}(k)$	Sim

Para maior simplicidade, o processamento espacial para o modo direcionado de multi-usuário a partir de múltiplos transmissores para único receptor, e o modo não direcionado de multi-usuário a partir de um único transmissor para múltiplos receptores, não são mostrados na tabela 2.

Na seguinte descrição, um canal espacial de banda larga pode corresponder a (1) um automodo de banda larga para um modo de multiplexação espacial direcionado, (2) uma antena transmissora para um modo de multiplexação espacial não direcionado, ou (3) uma combinação de um ou mais canais espaciais para uma ou mais sub-bandas. Um canal espacial de banda larga pode ser utilizado para transmitir um fluxo de dados independente.

## 6. SISTEMA MIMO

A figura 1 mostra um sistema MIMO 100 de múltiplo acesso com vários pontos de acesso (APs) 110, provendo comunicação para um número de terminais de usuário (UTs) 5 120. Por razões de simplicidade, apenas dois pontos de acesso 110a e 110b são mostrados na figura 1. Um ponto de acesso é geralmente uma estação fixa que se comunica com os terminais de usuário, e pode também ser referida como uma estação base ou outra terminologia. Um terminal de usuário 10 pode ser fixo ou móvel e pode ser referido como estação móvel, dispositivo sem fio ou qualquer outra terminologia. Um controlador de sistema 130 se acopla a, e provê coordenação e controle para pontos de acesso 110.

O sistema MIMO 100 pode ser um sistema duplex por 15 divisão de tempo (TDD) ou um sistema duplex por divisão de frequência (FDD). O downlink e o uplink (1) compartilham a mesma banda de frequência para um sistema TDD e (2) utilizam diferentes bandas de frequência para o sistema FDD. A seguinte descrição pressupõe que o sistema MIMO 100 20 seja um sistema TDD.

O sistema MIMO 100 utiliza um conjunto de canais de transporte para transmitir diferentes tipos de dados. Os canais de transporte podem ser implementados de várias maneiras.

25 A figura 2 mostra um quadro exemplar e uma estrutura de canal 200 que podem ser utilizados para um sistema MIMO 100. A transmissão de dados ocorre em quadros TDD. Cada quadro TDD estende uma duração de tempo predeterminada (por exemplo, 2 ms) sendo dividido em uma 30 fase de downlink e uma fase de uplink. Cada fase é adicionalmente dividida em múltiplos segmentos 210, 220, 230, 240 e 250 para múltiplos canais de transporte.

Na fase de downlink, um canal de broadcast (BCH) porta um piloto de orientação 214, um piloto MIMO 216, e uma mensagem BCH 218. O piloto de orientação é utilizado para aquisição de temporização e frequência. O piloto MIMO  
 5 é utilizado para estimação de canal. A mensagem BCH porta parâmetros de sistema para os terminais de usuário. Um canal de controle direto (FCCH) porta informação de programação para atribuições de recursos de downlink e uplink e outras sinalizações para os terminais de usuários.

10 Um canal direto (FCH) porta unidades de dados de protocolo FCH (PDUs) no downlink. Uma PDU FCH 232a inclui um piloto 234a e um pacote de dados 236a, e uma PDU FCH 232b inclui apenas um pacote de dados 236b. Na fase de uplink, um canal reverso (RCH) porta PDUs de RCH no uplink. Uma PDU RCH 242a  
 15 inclui apenas um pacote de dados 246a, e uma PDU RCH 242b inclui um piloto 244b e um pacote de dados 246b. Um canal de acesso aleatório (RACH) é utilizado pelos terminais de usuário para ganhar acesso ao sistema e para enviar mensagens curtas no uplink. Uma PDU RACH 252 enviada no  
 20 RACH inclui um piloto 254 e uma mensagem 256.

A figura 3 mostra um diagrama de bloco do ponto de acesso 110x e dois terminais de usuário 120x e 120y no sistema MIMO 100. O ponto de acesso 110x é um dos pontos de acesso da figura 1, e é equipado com múltiplas ( $N_{ap}$ ) antenas  
 25 324a até 324ap. O terminal de usuário 120x é equipado com uma única antena 352x e o terminal de usuário 120y é equipado com múltiplas ( $N_{ut}$ ) antenas 352a até 352ut.

No downlink, no ponto de aceso 110x, um processador de dados TX 310 recebe dados de tráfego para um  
 30 ou mais terminais de usuário a partir de uma fonte de dados 308, dados de controle a partir de um controlador 330, e possivelmente outros dados de um programador 334. Os vários tipos de dados podem ser enviados em diferentes canais de transporte. O processador de dados TX 310 processa (por  
 35 exemplo, encodifica, intercala e mapea por símbolos) nos

diferentes tipos de dados, com base em um ou mais esquemas de codificação e modulação para obter  $N_s$  fluxos de símbolos de dados. Conforme aqui utilizado, um "símbolo de dados" refere-se a um símbolo de modulação para dados, e um

5 "símbolo piloto" refere-se a um símbolo de modulação para piloto. Um processador espacial TX 320 recebe os  $N_s$  fluxos de símbolos de dados do processador de dados TX 310, realiza processamento espacial nos símbolos de dados com as matrizes  $\underline{F}_{ap}(k)$ , para  $k = 1 \dots N_F$ , multiplexa em símbolos

10 piloto, e provê  $N_{ap}$  fluxos de símbolos de transmissão para as  $N_{ap}$  antenas. As matrizes  $\underline{F}_{ap}(k)$  são derivadas de acordo com o modo de multiplexação espacial selecionado para ser utilizado. O processamento através do processador de dados TX 310 e processador espacial TX 320 é descrito abaixo.

15 Cada modulador (MOD) 322 recebe e processa um respectivo fluxo de símbolos de transmissão para obter um fluxo de símbolos OFDM, e adicionalmente condiciona (por exemplo, amplifica, filtra e converte ascendente em frequência) o fluxo de símbolos OFDM para gerar um sinal de

20 downlink.  $N_{ap}$  moduladores 322a até 322ap provêm  $N_{ap}$  sinais de downlink para transmissão a partir de  $N_{ap}$  antenas 324a até 324ap, respectivamente, para os terminais de usuário.

Em cada terminal de usuário 120, uma ou múltiplas antenas 352 recebem os  $N_{ap}$  sinais de downlink e cada antena

25 provê um sinal recebido para um demodulador respectivo (DEMOD) 354. Cada demodulador 354 realiza processamento complementar ao realizado pelo modulador 322 e provê um fluxo de símbolos recebido. Para o terminal de usuário de única antena 120x, um processador espacial RX 360x realiza

30 a demodulação coerente do fluxo de símbolos recebido de um único demodulador 354x e provê um fluxo de símbolos de dados recuperado. Para o terminal de usuário de multi-antena 120y, o processador espacial RX 360y realiza processamento espacial em  $N_{ut}$  fluxos de símbolos recebidos a

35 partir de  $N_{ut}$  demoduladores 354 com matrizes de filtros espaciais  $\underline{M}_{ut}(k)$ , para  $k = 1 \dots N_F$ , e provê  $N_{ut}$  fluxos de

símbolos de dados recuperados. De qualquer maneira, cada fluxo de símbolos de dados recuperado  $\{\hat{s}_m\}$  é uma estimativa de um fluxo de símbolos de dados  $\{s_m\}$  transmitido pelo ponto de acesso 110x para aquele terminal de usuário 120.

5 Um processador de dados RX 370 recebe e demultiplexa os símbolos de dados recuperados para os canais de transporte adequados. Os símbolos de dados recuperados para cada canal de transporte são depois processados (por exemplo, demapeados, deintercalados e decodificados) para obter  
10 dados decodificados para aquele canal de transporte. Os dados decodificados para cada canal de transporte podem incluir dados de tráfegos recuperados, dados de controle, e assim por diante, os quais podem ser providos para um depósito de dados 372 para armazenamento e/ou para um  
15 controlador 380 para processamento adicional.

Em cada terminal de usuário 120, um estimador de canal 378 estima a resposta de canal de downlink e provê estimativas de canal que podem incluir estimativas de ganho de canal, estimativas de SNR e assim por diante. O  
20 controlador 380 recebe as estimativas de canal, deriva os vetores e/ou coeficientes utilizados para processamento espacial nos percursos de transmissão e de recepção, e determina uma taxa adequada para cada fluxo de símbolos de dados no downlink. Por exemplo, o controlador 380y para um  
25 terminal de usuário de multi-antena 120y pode derivar as matrizes de filtro espacial  $\underline{M}_{ut}(k)$  para o downlink e as matrizes  $\underline{F}_{ut}(k)$  dos vetores de direcionamento para uplink, com base nas matrizes resposta de canal de downlink  $\underline{H}_{dn}(k)$ , para  $k = 1 \dots N_F$ . O controlador 380 pode também receber o  
30 status de cada pacote/quadro recebido no downlink e reunir informações de realimentação para o ponto de acesso 110x. A informação de realimentação e dados de uplink são



processados por um processador de dados TX 390, espacialmente processados por um processador espacial TX 392 (se estiver presente no terminal de usuário 120), multiplexado com símbolos piloto, condicionados por um ou  
5 mais moduladores 354, e transmitidos via uma ou mais antenas 352 até o ponto de acesso 110x.

No ponto de acesso 110x, os sinais de uplink transmitidos são recebidos por antenas 324, demodulados por demoduladores 322 e processados por um processador espacial  
10 RX 340 e um processador de dados RX 342 de uma maneira complementar a que foi realizada nos terminais de usuário 120. A informação de realimentação recuperada é provida para o controlador 330 e o programador 334. O programador 334 poderá utilizar a informação de realimentação para  
15 realizar várias funções, tais como (1) programar um conjunto de terminais de usuário para transmissão de dados no downlink e uplink, e (2) atribuir os recursos disponíveis de downlink e de uplink aos terminais programados.

20 Os controladores 330 e 380 controlam a operação das várias unidades de processamento no ponto de acesso 110x e no terminal de usuário 120, respectivamente. Por exemplo, o controlador 380 poderá determinar as mais altas taxas suportadas pelos canais espaciais no downlink para o  
25 terminal de usuário 120. O controlador 330 poderá selecionar taxas, tamanho da carga útil, e tamanho do símbolo OFDM para cada canal espacial de cada terminal de usuário programado.

O processamento no ponto de acesso 110x e  
30 terminais de usuário 120x e 120y para o uplink poderão ser os mesmos ou diferentes a partir do processamento para downlink. Para maior clareza, o processamento para downlink está descrito detalhadamente abaixo.

A figura 4 mostra um diagrama de bloco de uma modalidade de um processador de dados TX 310 no ponto de acesso 110x. Para esta modalidade, o processador de dados TX 310 inclui um conjunto de encodificador 412, intercalador de canal 414 uma unidade de mapeamento por símbolos 416 para cada um dos  $N_s$  fluxos de dados. Para cada fluxo de dados  $\{d_m\}$ , onde  $m = 1 \dots N_s$ , um encodificador 412 recebe e codifica o fluxo de dados, com base em um esquema de codificação selecionado para aquele fluxo e provê bits de código. O esquema de codificação poderá incluir CRC, convolucional, turbo, verificação de paridade de baixa densidade (LDPC), bloco e outro tipo de codificação ou uma combinação dos mesmos. Um intercalador de canal 414 intercala (isto é, reordena), os bits de código, com base em um esquema de intercalação. Uma unidade de mapeamento de símbolo 416 mapeia os bits intercalados, com base em um esquema de modulação selecionado para aquele fluxo, e provê um fluxo de símbolos de dados  $\{s_m\}$ . A unidade 416 agrupa cada conjunto de bits intercalados B para formar um valor binário B-bit, onde  $B \geq 1$ , e adicionalmente mapeia cada valor binário B-bit para um símbolo de dados específico, com base no esquema de modulação selecionado (por exemplo, QPSK, M-PSK, ou M-QAM, onde  $M = 2^B$ ). A codificação e modulação para cada fluxo de dados são realizados de acordo com controles de codificação e modulação fornecidos pelo controlador 330.

A figura 5 mostra um diagrama de bloco de uma modalidade de um processador espacial TX 320 e moduladores 322a até 322ap no ponto de acesso 110x. Para esta modalidade, o processador espacial TX 320 inclui  $N_s$  demultiplexadores (Demux) 510a até 510s,  $N_F$  processadores espaciais de sub-banda TX 520a até 520f e  $N_{ap}$

multiplexadores (Mux) 530a até 530ap. Cada demultiplexador  
 510 recebe um respectivo fluxo de símbolos de dados  $\{s_m\}$  do  
 processador espacial TX 320, demultiplexa o fluxo em um  $N_F$   
 sub-fluxo de símbolos de dados para as  $N_F$  sub-bandas, e  
 5 provê os  $N_F$  sub-fluxos aos  $N_F$  processadores espaciais 520a  
 até 520f. Cada processador espacial 520 recebe  $N_S$  sub-  
 fluxos de símbolos de dados para a sua sub-banda de  $N_S$   
 demultiplexadores 510a até 510s, realiza o processamento  
 espacial de transmissor nesses sub-fluxos, e provê  $N_{ap}$  sub-  
 10 fluxos de símbolos de transmissão para  $N_{ap}$  antenas de ponto  
 de acesso. Cada processador espacial 520 multiplica um  
 vetor de dados  $\underline{s}_{dn}(k)$  com uma matriz  $\underline{F}_{ap}(k)$  para obter um  
 vetor de transmissão  $\underline{x}_{dn}(k)$ . A matriz  $\underline{F}_{ap}(k)$  é igual (1) uma  
 matriz  $\underline{V}_{dn}(k)$  ou autovetores direitos de  $\underline{H}_{dn}(k)$  para o modo  
 15 direcionado de único usuário, (2) a matriz  $\underline{F}_{mu}(k)$  para o  
 modo direcionado de multi-usuário ou (3) a matriz  
 identidade  $\underline{I}$  para o modo não direcionado de único usuário.

Cada multiplexador 530 recebe  $N_F$  sub-fluxos de  
 símbolos de transmissão para sua antena transmissora a  
 20 partir de  $N_F$  processadores espaciais 520a até 520f,  
 multiplexa estes sub-fluxos e símbolos piloto e provê um  
 fluxo de símbolos de transmissão  $\{x_j\}$  até a sua antena  
 transmissora. Os símbolos piloto podem ser multiplexados em  
 frequência (isto é, em algumas sub-bandas) no tempo (isto  
 25 é, em alguns períodos de símbolos) e/ou em espaço de código  
 (isto é, com um código ortogonal).  $N_{ap}$  multiplexadores 530a  
 até 530ap provêm  $N_{ap}$  fluxos de símbolos de transmissão  $\{x_j\}$   
 para  $j=1 \dots N_{ap}$ , para  $N_{ap}$  antenas 324a até 324ap.

Para a modalidade mostrada na figura 5, cada  
 30 modulador 322 inclui uma unidade de transformada rápida  
 inversa de Fourier 542, um gerador de prefixo cíclico 544 e

uma unidade de RF TX 546. A unidade IFFT 542 e o gerador de prefixo cíclico 544 compõe um modulador OFDM. Cada modulador 322 recebe um fluxo de símbolos de transmissão respectivo  $\{x_j\}$  do processador espacial TX 320 e agrupa

5 cada conjunto de  $N_F$  símbolos de transmissão para as  $N_F$  sub-bandas. Unidades IFFT 542 transformam cada conjunto de  $N_F$  símbolos de transmissão para o domínio do tempo utilizando uma  $N_F$  transformada rápida inversa de Fourier de ponto, e provê um correspondente símbolo transformado que contém  $N_F$

10 chips. O gerador de prefixo cíclico 544 repete uma parte de cada símbolo transformado para obter um símbolo OFDM correspondente que contém  $N_F + N_{cp}$  chips. A parte repetida (isto é, o prefixo cíclico) assegura que o símbolo OFDM retenha as suas propriedades ortogonais na presença de um

15 espalhamento de retardo de multi-percurso causado por desvanecimento seletivo em frequência. A unidade de RF TX 546 recebe e condiciona o fluxo de símbolos OFDM do gerador 544 para gerar um sinal modulado de downlink.  $N_{ap}$  sinais modulados de downlink são transmitidos de  $N_{ap}$  antenas 324a

20 até 324ap, respectivamente.

A figura 6 mostra um diagrama de bloco de uma modalidade de demoduladores 354a até 354ut e um processador espacial RX 360y para terminal de usuário de multi-antena 120y. No terminal de usuário 120y,  $N_{ut}$  antenas 352a até

25 352ut recebem os  $N_{ap}$  sinais modulados transmitidos pelo ponto de acesso 110x e provêem  $N_{ut}$  sinais recebidos para  $N_{ut}$  demoduladores 354a para 354ut respectivamente. Cada demodulador 354 inclui uma unidade de RF RX 612, uma unidade de remoção de prefixo cíclico 614 e uma unidade de transformada rápida de Fourier (FFT) 616. As unidades 614 e

30 616 formam um demodulador OFDM. Dentro de cada demodulador 354, a unidade de RF RX 612 recebe, condiciona e digitaliza um respectivo sinal recebido e provê um fluxo de chips. A

unidade de remoção de prefixo cíclico 614 remove o prefixo cíclico em cada símbolo OFDM recebido para obter um símbolo transformado recebido. A unidade FFT 616 depois transforma cada símbolo transformado recebido para o domínio de  
 5 frequência com uma  $N_F$  transformada rápida de Fourier de ponto para obter  $N_F$  símbolos recebidos para as  $N_F$  sub-bandas. A unidade FFT 616 provê um fluxo de símbolos recebido até o processador espacial RX 360y e símbolos piloto recebidos para o estimador de canal 378y.

10 Para a modalidade mostrada na figura 6, o processador espacial RX 360y inclui  $N_{ut}$  demultiplexadores 630a até 630ut para as  $N_{ut}$  antenas no terminal de usuário 120y,  $N_F$  processadores espaciais de sub-banda RX 640a até 640f e unidades de escalonamento 642a até 642f para as  $N_F$   
 15 sub-bandas, e  $N_s$  multiplexadores 650a até 650s para os  $N_s$  fluxos de dados. O processador espacial RX 360y obtém  $N_{ut}$  fluxos de símbolos recebidos  $\{r_i\}$ , para  $i = 1 \dots N_{ut}$ , dos demoduladores 354a até 354ut. Cada demultiplexador 630 recebe um respectivo fluxo de símbolos recebido  $\{r_i\}$ ,  
 20 demultiplexa o fluxo em  $N_F$  sub-fluxos de símbolos recebidos para  $N_F$  sub-banda, e provê os  $N_F$  sub-fluxos para os  $N_F$  processadores espaciais 640a até 640f. Cada processador espacial 640 obtém  $N_{ut}$  sub-fluxos de símbolos recebidos para sua sub-banda a partir de  $N_{ut}$  demultiplexadores 630a  
 25 para 630ut, realiza o processamento espacial de receptor nesses sub-fluxos, e provê  $N_s$  sub-fluxos de símbolos detectados para a sua sub-banda. Cada processador espacial 640 multiplica um vetor recebido  $\underline{r}_{dn}(k)$  com uma matriz  $\underline{M}_{ut}(k)$  para obter um vetor de símbolos detectado  $\underline{\tilde{s}}_{dn}(k)$ . A matriz  
 30  $\underline{M}_{ut}(k)$  é igual a (1) uma matriz  $\underline{U}_{dn}^H(k)$  de autovetores esquerdos de  $\underline{H}_{dn}(k)$  para um modo direcionado de único

usuário ou (2) a matriz  $\underline{M}_{ccmi}(k)$ ,  $\underline{M}_{mmse}(k)$ , ou alguma outra matriz para o modo não direcionado de único usuário.

Cada unidade de escalonamento 642 recebe  $N_s$  sub-fluxos de símbolos detectados para sua sub-banda, e  
 5 escalona estes sub-fluxos, e provê  $N_s$  sub-fluxos de símbolos de dados recuperados para sua sub-banda. Cada unidade de escalonamento 642 realiza o escalonamento de sinal de vetor de símbolos detectado  $\tilde{\underline{s}}_{dn}(k)$  com uma matriz diagonal  $\underline{D}_{ut}^{-1}(k)$  e encaminha o vetor de símbolos de dados  
 10 recuperado  $\hat{\underline{s}}_{dn}(k)$ . Cada multiplexador 650 recebe e multiplexa  $N_F$  sub-fluxos de símbolos de dados recuperados para o seu fluxo de dados a partir de  $N_F$  unidades de escalonamento 642a até 642f e provê um fluxo de símbolos de dados recuperado. Os  $N_s$  multiplexadores 650a até 650s  
 15 provêm  $N_s$  fluxos de símbolos de dados recuperados  $\{\hat{s}_m\}$ , para  $m = 1 \dots N_s$ .

A figura 7 mostra um diagrama de bloco de uma modalidade de um processador de dados RX 370y no terminal de usuário 120y. O processador de dados 370y inclui um  
 20 conjunto de unidade de demapeamento por símbolos 712, dispositivo de deintercalação de canal 714, e decodificador 716 para cada um dos  $N_s$  fluxos de dados. Para cada fluxo, de símbolos de dados recuperados  $\{\hat{s}_m\}$  onde  $m = 1 \dots N_s$ , uma unidade de demapeamento por símbolos 712 demodula os  
 25 símbolos de dados recuperados de acordo com o esquema de modulação utilizado para aquele fluxo e provê dados demodulados. Um deintercalador de canal 714 deintercala os dados demodulados de uma maneira complementar à intercalação realizada naquele fluxo pelo ponto de acesso  
 30 110x. Um decodificador 716 então, decodifica os dados deintercalados de uma maneira complementar a encodificação

realizada pelo ponto de acesso 110x naquele fluxo. Por exemplo, um decodificador Turbo ou um decodificador Viterbi podem ser utilizados para o decodificador 716, se for realizada codificação Turbo ou convolucional  
 5 respectivamente, no ponto de acesso 110x. O decodificador 716 provê um pacote decodificado para cada pacote de dados recebidos. O decodificador 716 também verifica cada pacote decodificado para determinar se o pacote está codificado, corretamente, ou de forma errada, e provê o status do  
 10 pacote decodificado. A demodulação e decodificação para cada fluxo de símbolos de dados recuperado é realizada de acordo com controles de demodulação e decodificação fornecidos pelo controlador 380y.

A figura 8 mostra um diagrama de bloco de um  
 15 processador espacial RX 360z e um processador de dados RX 370z que implementam a técnica SIC. O processador espacial RX 360z e o processador de dados RX 370z implementam  $N_s$  estágios de processamento de receptor sucessivo (isto é, em cascata) para  $N_s$  fluxos de símbolos de dados. Cada um dos  
 20 estágios de 1 a  $N_s-1$  inclui um processador espacial 810, uma unidade de cancelador de interferência 820, um processador de fluxo de dados RX 830, e um processador de fluxo de dados TX 840. O último estágio inclui apenas um processador espacial 810s e um processador de fluxo de  
 25 dados RX 830s. Cada processador de fluxo de dados RX 830 inclui uma unidade de demapeamento por símbolos 712, um deintercalador de canal 714, e um decodificador 716, conforme mostrado na figura 7. Cada processador de fluxo de dados TX 840 inclui um encodificador 412, um intercalador de canal 414, e uma unidade de mapeamento de símbolo 416,  
 30 conforme mostrado na figura 4.

Para o estágio 1, o processador espacial 810a realiza o processamento espacial de recepção nos  $N_{ut}$  fluxos

de símbolos recebidos e provê um fluxo de símbolos de dados recuperado  $\{\hat{s}_{j_1}\}$ , onde o subscrito  $j_1$  indica a antena de ponto de acesso utilizada para transmitir o fluxo de símbolos de dados  $\{s_{j_1}\}$ . O processador de fluxo de dados RX 830a demodula, deintercala e decodifica o fluxo de símbolos de dados recuperado  $\{\hat{s}_{j_1}\}$  e provê um fluxo de dados decodificados correspondentes  $\{\hat{d}_{j_1}\}$ . O processador de fluxo de dados TX 840a encodifica, intercala e modula o fluxo de dados decodificados  $\{\hat{d}_{j_1}\}$  da mesma maneira realizada pelo ponto de acesso 110x para aquele fluxo e provê um fluxo de símbolos remodulado  $\{\tilde{s}_{j_1}\}$ . O cancelador de interferência 820a realiza o processamento espacial no fluxo de símbolos remodulado  $\{\tilde{s}_{j_1}\}$  da mesma maneira (se existir) realizada pelo ponto de acesso 110x e também processa o resultado com a matriz resposta de canal  $\underline{H}_{dn}(k)$  para obter  $N_{ut}$  componentes de interferência devido ao fluxo de símbolos de dados  $\{s_{j_1}\}$ . Os  $N_{ut}$  componentes de interferência são subtraídos dos  $N_{ut}$  fluxos de símbolos recebidos para obter  $N_{ut}$  fluxo de símbolos modificados, que são fornecidos para o estágio 2.

Cada um dos estágios 2 até  $N_s-1$  realiza o mesmo processamento como o estágio 1, embora nos  $N_{ut}$  fluxos de símbolos modificados do estágio precedente, ao invés dos  $N_{ut}$  fluxos de símbolos recebidos. O último estágio realiza processamento espacial e a decodificação nos  $N_{ut}$  fluxos de símbolos modificados do  $N_s-1$  estágio e não realiza estimação de interferência e cancelamento.

Os processadores espaciais 810a até 810s podem, cada qual, implementar a CCMI, MMSE ou alguma outra técnica de processamento de receptor. Cada processador espacial 810 multiplica um vetor de símbolos de entrada (recebido ou



modificado)  $\underline{r}_{dn}^{\ell}(k)$  com uma matriz  $\underline{M}_{ut}^{\ell}(k)$  para obter um vetor de símbolo detectado  $\tilde{\underline{s}}_{dn}^{\ell}(k)$ , seleciona e escalona um dos fluxos de símbolos detectados e provê o fluxo de símbolos escalonado como fluxo de símbolos de dados recuperado para  
 5 aquele estágio. A matriz  $\underline{M}_{ut}^{\ell}(k)$  é derivada, com base em uma matriz resposta de canal reduzida  $\underline{H}_{dn}^{\ell}(k)$  para o estágio.

As unidades de processamento no ponto de acesso 110x de um terminal de usuário 120y para o uplink podem ser implementadas conforme acima descrito para o downlink. O  
 10 processador de dados TX 390y e o processador espacial TX 392y podem ser implementados com o processador de dados TX 310 na figura 4 e com o processador espacial TX 320 na figura 5, respectivamente. O processador espacial RX 340 pode ser implementado com o processador espacial RX 360y ou  
 15 360z, e o processador de dados RX 342 pode ser implementado com o processador de dados 370y ou 370z.

Para o terminal de usuário de única antena 120x, o processador espacial RX 360x realiza a demodulação coerente de um fluxo de símbolos recebido com estimativas  
 20 de canal para obter um fluxo de símbolos de dados recuperado.

#### A. ESTIMAÇÃO DE CANAL

A resposta de canal do downlink e do uplink pode ser estimada de várias maneiras, tais como com um piloto  
 25 MIMO ou piloto direcionado. Para o sistema MIMO TDD, determinadas técnicas podem ser utilizadas para simplificar a estimação de canal.

Para o downlink, o ponto de acesso 110x pode transmitir um piloto MIMO para os terminais de usuário 120.  
 30 O piloto MIMO compreende  $N_{ap}$  transmissões piloto a partir de  $N_{ap}$  antenas de ponto de acesso, com a transmissão de piloto de cada antena sendo "coberta" com uma sequência

ortogonal diferente (por exemplo, uma seqüência Walsh). Cobertura é um processo, de acordo com o qual um dado símbolo de modulação (ou um conjunto de símbolos de modulação  $L$  com o mesmo valor) a ser transmitido é

5 multiplicado por todos os tipos de chips de uma seqüência ortogonal de chip  $L$  para obter símbolos cobertos  $L$  que depois são transmitidos. A cobertura alcança a ortogonalidade entre as  $N_{ap}$  transmissões piloto enviadas a partir de  $N_{ap}$  antenas de ponto de acesso e permite que os

10 terminais de usuário possam distinguir a transmissão de piloto de cada antena.

Em cada terminal de usuário 120, o estimador de canal 378 "realiza descobertura" dos símbolos piloto recebidos para cada antena terminal de usuário  $i$  com as

15 mesmas  $N_{ap}$  seqüências ortogonais utilizadas pelo ponto de acesso 110x para as  $N_{ap}$  antenas para obter estimativas de ganho de canal complexo entre a antena de terminal de usuário  $i$  e cada uma dentre as  $N_{ap}$  antenas de ponto de acesso. A descobertura é complementar a cobertura, e é um

20 processo onde símbolos (piloto) recebidos são multiplicados pelos chips  $L$  da seqüência ortogonal de chip  $L$  para obter símbolos descobertos  $L$ , que são depois acumulados para obter uma estimativa do símbolo (piloto) transmitido. O estimador de canal 378 realiza o mesmo processamento de

25 piloto para cada sub-banda utilizada para transmissão de piloto. Se símbolos piloto são transmitidos em apenas um sub-conjunto das  $N_F$  sub-bandas, então o estimador de canal 378 pode realizar a interpolação nas estimativas de resposta de canal para sub-bandas com transmissão de piloto

30 para obter estimativas de resposta de canal para sub-bandas sem transmissão de piloto. Para o terminal de usuário de única antena 120x, o estimador de canal 378x provê vetores

resposta de canal de downlink estimado  $\hat{h}_{dn}(k)$  para  $k = 1 \dots N_F$ , para a única antena 352. Para o terminal de usuário de multi-antena 120y, o estimador de canal 378y realiza o mesmo processamento de piloto para todas as  $N_{ut}$  antenas 352a até 352ut, e provê matrizes resposta de canal de downlink estimadas  $\hat{H}_{dn}(k)$  para  $k = 1 \dots N_F$ . Cada terminal de usuário 120 pode também estimar a variância de ruído para o downlink com base nos símbolos piloto recebidos e provê a estimativa de ruído de downlink,  $\hat{\sigma}_{dn}^2$ .

10 Para o uplink, o terminal de usuário de multi-antena 120y pode transmitir um piloto MIMO que pode ser utilizado pelo ponto de acesso 110x para estimar a resposta de canal de uplink  $\hat{H}_{up}(k)$  para o terminal de usuário 120y. O terminal de usuário de única antena 120x pode transmitir um piloto a partir de sua única antena. Terminais de usuário de única antena 120 podem transmitir pilotos ortogonais simultaneamente no uplink onde a ortogonalidade pode ser alcançada no tempo e/ou frequência. A ortogonalidade do tempo pode ser obtida fazendo com que cada terminal de usuário cubra o seu piloto de uplink com uma sequência ortogonal diferente atribuída ao terminal de usuário. A ortogonalidade de frequência pode ser obtida fazendo com que cada terminal de usuário transmita o seu piloto de uplink em um conjunto de sub-bandas diferente. As transmissões de piloto de uplink simultâneas a partir de múltiplos terminais de usuário deveriam ser aproximadamente alinhadas em tempo no ponto de acesso 120x (por exemplo, alinhadas em tempo dentro do prefixo cíclico).

Para um sistema MIMO TDD, existe normalmente, um alto grau de correlação entre a resposta de canal para o downlink e o uplink, visto que estes links compartilham a

mesma banda de frequência. Contudo, as respostas das cadeias de transmissão/recepção do ponto de acesso tipicamente não são as mesmas como as respostas das cadeias de transmissão/recepção no terminal de usuário. Se as  
 5 diferenças forem determinadas e verificadas via calibragem, então as respostas de canal de downlink e uplink total podem, supostamente, ser recíprocas (isto é, transpostas) umas com as outras.

A figura 9 mostra as cadeias de  
 10 transmissão/recepção no ponto de acesso 110x e o terminal de usuário 120y. No ponto de acesso 110x, o percurso de transmissão é modelado por uma matriz  $N_{ap} \times N_{ap}$ ,  $\underline{T}_{ap}(k)$ , e o percurso de recepção é modulado por uma matriz  $N_{ap} \times N_{ap}$ ,  $\underline{R}_{ap}(k)$ . No terminal de usuário 120y o percurso de recepção é  
 15 modelado por uma matriz  $N_{ut} \times N_{ut}$ ,  $\underline{R}_{ut}(k)$ , e o percurso de transmissão é modulado por uma matriz  $N_{ut} \times N_{ut}$ ,  $\underline{T}_{ut}(k)$ . Os vetores de símbolos recebidos para o downlink e uplink para cada sub-banda podem ser expressos como:

$$\underline{r}_{dn}(k) = \underline{R}_{ut}(k) \underline{H}(k) \underline{T}_{ap}(k) \underline{x}_{dn}(k) \quad , \quad e \quad \text{Eq (33)}$$

$$20 \quad \underline{r}_{up}(k) = \underline{R}_{ap}(k) \underline{H}^T(k) \underline{T}_{ut}(k) \underline{x}_{up}(k) ,$$

onde " $T$ " indica uma transposta. A equação (34) pressupõe que os downlink e uplink são uma transposta de um para o outro. As respostas "efetivas" de canal de downlink e uplink  $\underline{H}_{edn}(k)$  e  $\underline{H}_{eup}(k)$ , para cada sub-banda, incluem as  
 25 respostas das cadeias de transmissão de recepção, podendo ser expressas como:

$$\underline{H}_{edn}(k) = \underline{R}_{ut}(k) \underline{H}(k) \underline{T}_{ap}(k) \quad e \quad \underline{H}_{eup}(k) = \underline{R}_{ap}(k) \underline{H}^T(k) \underline{T}_{ut}(k) \quad \text{Eq (34)}$$

As respostas efetivas de canal de downlink e uplink não são recíprocas (isto é,  $\underline{H}_{edn}(k) \neq \underline{H}_{eup}^T(k)$ ) se as respostas das

cadeias de transmissão/recepção de downlink e uplink não forem iguais umas com as outras.

O ponto de acesso 110x e o terminal de usuário 120y podem realizar a calibragem para obter matrizes de correção  $\underline{K}_{ap}(k)$  e  $\underline{K}_{ut}(k)$  para cada sub-banda, que podem ser expressas como:

$$\underline{K}_{ap}(k) = \underline{T}_{ap}^{-1}(k) \underline{R}_{ap}(k) \quad \text{e} \quad \underline{K}_{ut}(k) = \underline{T}_{ut}^{-1}(k) \underline{R}_{ut}(k) . \quad \text{Eq (35)}$$

As matrizes de correção podem ser obtidas por uma transmissão de piloto MIMO tanto no downlink como no uplink e derivando as matrizes de correção, utilizando critério MMSE ou algumas outras técnicas. As matrizes de correção  $\underline{K}_{ap}(k)$  e  $\underline{K}_{ut}(k)$  são aplicadas no ponto de acesso 110x e no terminal de usuário 120y, respectivamente, conforme mostrado na figura 9. As respostas de canal de downlink e uplink "calibradas"  $\underline{H}_{cdn}(k)$  e  $\underline{H}_{cup}(k)$  são, então, recíprocas e podem ser expressas como:

$$\underline{H}_{cup}(k) = \underline{H}_{up}(k) \underline{K}_{ut}(k) = (\underline{H}_{dn}(k) \underline{K}_{ap}(k))^T = \underline{H}_{cdn}^T(k) . \quad \text{Eq (36)}$$

A decomposição em valores singulares das matrizes resposta de canal de downlink e uplink calibradas  $\underline{H}_{cup}(k)$  e  $\underline{H}_{cdn}(k)$ , para cada sub-banda, podem ser expressas como:

$$\begin{aligned} \underline{H}_{cup}(k) &= \underline{U}_{ap}(k) \underline{\Sigma}(k) \underline{V}_{ut}^H(k) , \quad \text{e} \\ \underline{H}_{cdn}(k) &= \underline{V}_{ut}^*(k) \underline{\Sigma}(k) \underline{U}_{ap}^H(k) \end{aligned} \quad \text{Eq (37)}$$

Conforme mostrado no conjunto de equações (38), as matrizes  $\underline{V}_{ut}^*(k)$  e  $\underline{U}_{ap}^*(k)$  dos autovetores esquerdo e direito de  $\underline{H}_{cdn}(k)$  são o conjugado complexo das matrizes  $\underline{V}_{ut}(k)$  e  $\underline{U}_{ap}(k)$  dos autovetores direito e esquerdo de  $\underline{H}_{cup}(k)$ . A matriz  $\underline{U}_{ap}(k)$  pode ser utilizada pelo ponto de acesso 110x para ambos os processamentos espaciais de transmissão e de recepção. A

matriz  $\underline{V}_{ut}(k)$  pode ser utilizada pelo terminal de usuário 120y para ambos os processamentos espacial de transmissão e de recepção.

Em virtude da natureza recíproca do canal MIMO para o sistema MIMO TDD, e depois de ter sido realizada a calibragem para levar em conta as diferenças nas cadeias de transmissão/recepção, a decomposição de valor singular apenas precisa ser realizada tanto pelo terminal de usuário 120y quanto pelo ponto de acesso 110x. Se for realizada pelo terminal de usuário 120y, então as matrizes  $\underline{V}_{ut}(k)$ , para  $k = 1 \dots N_F$ , são utilizadas para o processamento espacial no terminal de usuário e a matriz  $\underline{U}_{ap}(k)$  para  $k = 1 \dots N_F$ , pode ser provida para o ponto de acesso em forma direta (por exemplo, enviando inserções das matrizes  $\underline{U}_{ap}(k)$ ) ou em uma forma indireta (através de um piloto direcionado). Efetivamente, o terminal de usuário 120y somente pode obter  $\hat{H}_{cdn}(k)$ , que é uma estimativa de  $\underline{H}_{cdn}(k)$ , e somente pode derivar  $\hat{\underline{V}}_{ut}(k)$ ,  $\hat{\underline{\Sigma}}(k)$  e  $\hat{\underline{U}}_{ap}(k)$ , que são estimativas de  $\underline{V}_{ut}(k)$ ,  $\underline{\Sigma}(k)$  e  $\underline{U}_{ap}(k)$ , respectivamente. Para maior simplicidade, a descrição presente presume estimativas de canal sem erros.

Um piloto direcionado de uplink, enviado pelo terminal de usuário 120y, pode ser expresso como:

$$\underline{x}_{up,m}(k) = \underline{K}_{ut}(k) \underline{v}_{ut,m}(k) p(k), \quad \text{Eq(38)}$$

onde  $\underline{v}_{up,m}(k)$  é a  $m$ -ésima coluna de  $\underline{V}_{ut,m}(k)$  e  $p(k)$  é o símbolo piloto. O piloto direcionado de uplink, recebido no ponto de acesso 110x, pode ser expresso como:

$$\underline{r}_{up,m}(k) = \underline{u}_{ap,m}(k) \underline{\sigma}_m(k) + \underline{n}_{up}(k). \quad \text{Eq(39)}$$

A equação (40) indica que o ponto de acesso 110x pode obter a matriz  $\underline{U}_{ap}(k)$ , um vetor de cada vez, com base no piloto direcionado de uplink a partir do terminal de usuário 120y.

Um processo complementar pode também ser realizado, onde o terminal de usuário 120y transmite um piloto MIMO no uplink, e o ponto de acesso 110x realiza uma decomposição de valor singular e transmite um piloto direcionado no downlink. A estimativa de canal para o downlink e o uplink pode também ser realizada de outras maneiras.

Em cada terminal de usuário 120, o estimador de canal 378 pode estimar a resposta do canal de downlink (por exemplo, com base em um piloto MIMO ou em um piloto direcionado enviado pelo ponto de acesso 110x) e provê estimativas de canal de downlink para o controlador 380. Para o terminal de usuário de única antena 120x, o controlador 380x pode derivar os ganhos complexos de canal utilizados para demodulação coerente. Para o terminal de usuário de multi-antena 120y, o controlador 380y pode derivar a matriz  $\underline{M}_{ut}(k)$ , utilizada para receber processamento espacial e a matriz  $\underline{F}_{ut}(k)$  utilizada para transmissão de processamento espacial, com base nas estimativas de canal de downlink. No ponto de acesso 110x, o estimador de canal 328 pode estimar a resposta de canal de uplink (por exemplo, com base em um piloto direcionado ou em um piloto MIMO enviado pelo terminal de usuário 120) e prover estimativas de canal de uplink para o controlador 380. O controlador 380 pode derivar a matriz  $\underline{F}_{ap}(k)$ , utilizada para transmitir o processamento espacial e a matriz  $\underline{M}_{ap}(k)$  utilizada para receber processamento espacial, com base nas estimativas de canal de uplink.

A figura 9 mostra o processamento espacial no ponto de acesso 110x e no terminal de usuário 120y para o downlink e uplink para uma sub-banda  $k$ . Para o downlink, dentro do processador espacial TX 320 no ponto de acesso 110x, o vetor de dados  $\underline{s}_{dn}(k)$  é primeiramente multiplicado pela matriz  $\underline{F}_{ap}(k)$  por uma unidade 910, sendo adicionalmente multiplicado pela matriz de correção  $\underline{K}_{ap}(k)$  por uma unidade 912, para obter o vetor de transmissão  $\underline{x}_{dn}(k)$ . O vetor  $\underline{x}_{dn}(k)$  é processado por uma cadeia de transmissão 914 dentro de moduladores 322, sendo transmitido através do canal MIMO para o terminal de usuário 120y. As unidades 910 e 912 realizam o processamento espacial de transmissão para o downlink e podem ser implementadas no processador espacial de sub-banda TX 520 na figura 5.

No terminal de usuário 120y, os sinais de downlink são processados por uma cadeia de recepção 954 dentro de demoduladores 354 para obter o vetor de recepção  $\underline{r}_{dn}(k)$ . Dentro do processador espacial Rx 360y, o vetor de recepção  $\underline{r}_{dn}(k)$  é primeiramente multiplicado pela matriz  $\underline{M}_{ut}(k)$  por uma unidade 956, sendo adicionalmente escalonado com a matriz diagonal inversa  $\underline{D}_{ut}^{-1}(k)$  por uma unidade 958 para obter um vetor  $\hat{\underline{s}}_{dn}(k)$ , que é uma estimativa do vetor de dados  $\underline{s}_{dn}(k)$ . As unidades 956 e 958 realizam o processamento espacial para o downlink e podem ser implementadas dentro do processador espacial de sub-banda RX 640 na figura 6.

Para o uplink, dentro do processador espacial TX 392y no terminal de usuário 120y, o vetor de dados  $\underline{s}_{up}(k)$  é primeiramente multiplicado pela matriz  $\underline{F}_{ut}(k)$  por uma unidade 960 e multiplicado adicionalmente pela matriz de correção  $\underline{K}_{ut}(k)$  por uma unidade 962, para obter o vetor de



transmissão  $\underline{x}_{up}(k)$ . O vetor  $\underline{x}_{up}(k)$  é processado por uma cadeia de transmissão 964 dentro dos moduladores 354, e transmitido através do canal MIMO para o ponto de acesso 110x. As unidades 960 e 962 realizam o processamento  
5 espacial de transmissão para o uplink.

No ponto de acesso 110x, os sinais de uplink são processados por uma cadeia de recepção 924 dentro de demoduladores 322 para obter o vetor de recepção  $\underline{r}_{up}(k)$ . Dentro do processador espacial RX 340, o vetor de recepção  
10  $\underline{r}_{up}(k)$  é primeiramente multiplicado pela matriz  $\underline{M}_{ap}(k)$  por uma unidade 926, sendo adicionalmente escalonado com a matriz diagonal inversa  $\underline{D}_{ap}^{-1}(k)$  por uma unidade 928 para obter o vetor  $\hat{\underline{s}}_{up}(k)$ , que é uma estimativa do vetor de dados  $\underline{s}_{up}(k)$ . As unidades 926 e 928 realizam o processamento  
15 espacial de recepção para o uplink.

#### B. PROCESSAMENTO ESPACIAL PARA SISTEMA MIMO TDD

A tabela 3 resume o processamento de transmissão de piloto e espacial exemplar, realizado pelo ponto de acesso e os terminais de usuário para transmissão de dados  
20 no downlink e uplink para vários modos de multiplexação espacial no sistema MIMO TDD. Para o modo direcionado de único usuário, o ponto de acesso transmite um piloto MIMO para permitir que o terminal de usuário possa estimar a resposta de canal de downlink. O terminal de usuário  
25 transmite um piloto direcionado para permitir que o ponto de acesso estime a resposta de canal de uplink. O ponto de acesso realiza o processamento espacial de transmissão e recepção com  $\underline{U}_{ap}(k)$ . O terminal de usuário realiza o processamento espacial de transmissão de recepção com  
30  $\underline{V}_{ut}(k)$ .

Para o modo não direcionado de único usuário, para transmissão de dados de downlink, o ponto de acesso transmite um piloto MIMO a partir de todas as antenas e um fluxo de símbolos de dados a partir de cada antena. O terminal de usuário estima a resposta de canal de downlink com o piloto MIMO e realiza o processamento espacial de recepção utilizando as estimativas de canal de downlink. O processamento complementar ocorre para transmissão de dados de uplink.

Tabela 3

MODO DE MULTIPLEXAÇÃO ESPACIAL	TRANSMISSÃO DE DADOS DE DOWNLINK	TRANSMISSÃO DE DADOS DE UPLINK
Único usuário direcionado	AP transmite piloto MIMO UT Transmite piloto direcionado AP transmite dados com $\underline{U}_{ap}(k)$  UT recebe dados com $\underline{V}_{ut}(k)$	AP transmite piloto MIMO UT Transmite piloto direcionado UT transmite dados com $\underline{V}_{ut}(k)$  AP recebe dados com $\underline{U}_{ap}(k)$
Único usuário não direcionado	AP transmite piloto MIMO AP transmite dados a partir de cada antena UT utiliza CCMI, MMSE, etc.	UT transmite piloto MIMO UT transmite dados a partir de cada antena AP utiliza CCMI, MMSE, etc.
Multi-usuário direcionado	UTs transmitem piloto ortogonal AP transmite dados direcionados  AP transmite piloto direcionado  UTs recebem com piloto direcionado	AP transmite piloto MIMO UTs transmitem piloto direcionado UTs transmitem dados direcionados AP utiliza CCMI, MMSE, etc.
Multi-usuário não direcionado	AP transmite piloto MIMO UTs enviam taxa para cada antena AP AP transmite dados a partir de cada antena UTs utilizam CCMI, MMSE, etc.	UTs transmitem piloto ortogonal AP seleciona UTs compatível  UTs transmitem dados a partir de cada antena AP utiliza CCMI, MMSE, etc.

Para o modo direcionado de multi-usuário, para transmissão de dados de downlink para terminais de usuário de única antena e/ou de multi-antena, os terminais de usuário transmitem pilotos ortogonais no uplink para  
5 permitir que o ponto de acesso estime a resposta de canal de downlink. Um terminal de usuário de única antena transmite um piloto não direcionado, e um terminal de usuário de multi-antena transmite um piloto direcionado. O ponto de acesso deriva vetores de direcionamento de  
10 downlink, com base nos pilotos de uplink ortogonais, e utiliza os vetores de direcionamento para transmitir pilotos direcionados e fluxos de símbolos de dados direcionados para os terminais de usuário selecionados. Cada terminal de usuário utiliza o piloto direcionado para  
15 receber o fluxo de símbolos de dados direcionado enviado para o terminal de usuário. Para a transmissão de dados de uplink a partir de terminais de usuário de multi-antenas, o ponto de acesso transmite um piloto MIMO. Cada terminal de usuário de multi-antena transmite um piloto direcionado e  
20 um fluxo de símbolos de dados direcionado no uplink. O ponto de acesso realiza processamento espacial de recepção (por exemplo, CCMI, MMSE, e assim por diante) para recuperar os fluxos de símbolos de dados.

Para o modo não direcionado de multi-usuário,  
25 para transmissão de dados de downlink para terminais de usuário de multi-antena, o ponto de acesso transmite um piloto MIMO no downlink. Cada terminal de usuário determina e retorna a taxa que pode receber a partir de cada antena de ponto de acesso. O ponto de acesso seleciona um conjunto  
30 de terminais de usuário e transmite os fluxos de símbolos de dados para os terminais de usuário selecionados a partir das antenas de ponto de acesso. Cada terminal de usuário de multi-antena realiza o processamento espacial de recepção

(por exemplo, CCMI, MMSE, e assim por diante) para recuperar o seu fluxo de símbolos de dados. Para transmissão de dados de uplink a partir de terminais de usuários de única antena e/ou multi-antena, os terminais de usuário transmitem pilotos ortogonais (não direcionados) no uplink. O ponto de acesso estima a resposta de canal de uplink com base nos pilotos de uplink e seleciona um conjunto de terminais de usuário compatível. Cada terminal de usuário selecionado transmite um fluxo de símbolos de dados a partir da antena de terminal de usuário. O ponto de acesso realiza o processamento espacial de receptor (por exemplo, CCMI, MMSE e assim por diante) para recuperar os fluxos de símbolos de dados.

#### C. SELEÇÃO DE TAXA

Cada fluxo de dados para os downlink e uplink é transmitido em um canal espacial  $m$  de banda larga, utilizando um dos modos de multiplexação espacial. Cada fluxo de dados também é transmitido a uma taxa que é selecionada de tal maneira que o nível alvo de desempenho (por exemplo, 1 por cento de taxa de erro de pacote (PER)) possa ser alcançado para aquele fluxo. A taxa para cada fluxo de dados pode ser determinada, com base na SNR alcançada no receptor para aquele fluxo (isto é, a SNR recebida), onde a SNR depende do processamento espacial realizado no transmissor e receptor, conforme acima descrito.

Em um esquema de seleção de taxa exemplar, a determinação da taxa para canal espacial  $m$  de banda larga, uma estimativa de SNR,  $\gamma_m(k)$ , (por exemplo, em unidades de dB) para cada sub-banda  $k$  do canal espacial de banda larga é primeiramente obtida conforme acima descrito. Uma SNR média  $\gamma_{\text{média}}$ , é então computada para o canal espacial  $m$  de banda larga como segue:

$$\gamma_{\text{média},m} = \frac{1}{N_F} \sum_{k=1}^{N_F} \gamma_m(k), \quad \text{Eq (40)}$$

A variância da estimativa de SNR  $\sigma_{\gamma_m}^2$  é também computada como segue:

$$\sigma_{\gamma_m}^2 = \frac{1}{N_F - 1} \sum_{k=1}^{N_F} (\gamma_m(k) - \gamma_{\text{média},m})^2. \quad \text{Eq (41)}$$

5 Um fator de recuo  $\gamma_{bo,m}$ , é determinado, com base em uma função  $F(\gamma_{\text{média},m}, \sigma_{\gamma_m}^2)$  da média de SNR e da variância de SNR. Por exemplo, a função  $F(\gamma_{\text{média},m}, \sigma_{\gamma_m}^2) = K_b \cdot \sigma_{\gamma_m}^2$  pode ser utilizada, onde  $K_b$  é um fator de escalonamento e pode ser selecionado, com base em uma ou mais características do sistema MIMO, como a intercalação, tamanho do pacote e/ou  
10 esquema de codificação utilizada para o fluxo de dados. O fator de recuo de SNR é responsável pela variância na SNRs pelo canal espacial de banda larga. Uma SNR operativa  $\gamma_{op,m}$ , para o canal espacial  $m$  de banda larga será computada em  
15 seguida como segue.

$$\gamma_{op,m} = \gamma_{\text{média},m} - \gamma_{bo,m} \quad \text{Eq (42)}$$

A taxa para o fluxo de dados é então determinada, com base na SNR operativa. Por exemplo, a tabela de consulta (LUT) pode armazenar um conjunto de taxas suportadas pelo sistema  
20 MIMO e suas SNRs necessárias. A SNR necessária para cada taxa pode ser determinada por simulação computadorizada, mediação empírica e assim por diante, com base em uma pré-suposição de um canal AWGN. A taxa mais alta na tabela de consulta com uma SNR exigida que é igual ou inferior à SNR  
25 operativa, é selecionada como a taxa para o fluxo de dados enviado no canal espacial  $m$  de banda larga.

Vários outros esquemas de seleção de taxa também podem ser utilizados.

#### D. CONTROLE DE TAXA DE MALHA FECHADA

O controle da taxa da malha fechada pode ser utilizado para cada um dos fluxos de dados transmitidos em múltiplos canais espaciais de banda larga. O controle de taxa de malha fechada pode ser alcançado com uma ou múltiplas malhas.

A figura 10 mostra um diagrama de bloco de uma modalidade de um mecanismo de controle de taxa de malha fechada 1000, que compreende uma malha interna 1010 que opera juntamente com uma malha externa 1020. A malha interna 1010 estima as condições de canal e determina a taxa suportada por cada canal espacial de banda larga. A malha externa 1020 estima a qualidade da transmissão de dados recebida em canal espacial de banda larga e ajusta a operação da malha interna correspondentemente. Para fins de simplicidade, a operação das malhas 1010 e 1020 para um canal espacial  $m$  de banda larga de downlink, é mostrada na figura 10, sendo a seguir descrita.

Para a malha interna 1010, o estimador de canal 378 no terminal de usuário 120 estima o canal espacial  $m$  de banda larga e provê estimativas de canal (por exemplo, estimativas de ganho de canal e estimativas de variância de ruído). Um seletor de taxa 1030 dentro do controlador 380 determina a taxa suportada por um canal espacial  $m$  de banda larga, com base (1) nas estimativas de canal a partir do estimador de canal 378, (2) em um fator de recuo de SNR e/ou um ajuste de taxa para o canal espacial  $m$  de banda larga a partir de um estimador de qualidade 1032, e (3) em uma tabela de consulta (LUT) 1036 de taxas suportadas pelos sistemas MIMO e as suas SNRs necessárias. A taxa suportada para o canal espacial  $m$  de banda larga é enviada pelo controlador 380 até o ponto de acesso 110. No ponto de acesso 110, o controlador 330 recebe a taxa suportada para

o canal espacial  $m$  de banda larga e determina a taxa de dados, codificação e controles de modulação para o fluxo de dados a serem enviados para este canal espacial. O fluxo de dados é então processado de acordo com esses controles pelo  
5 processador de dados TX 310, sendo espacialmente processado e multiplexado com símbolos piloto pelo processador espacial TX 320, condicionado por moduladores 322, e transmitido para o terminal de usuário 120.

A malha externa 1020 estima a qualidade do fluxo  
10 de dados decodificados recebido no canal espacial  $m$  de banda larga e ajusta a operação de malha interna 1010. Os símbolos recebidos para o canal espacial  $m$  de banda larga são espacialmente processados pelo processador espacial RX 360 e também processados pelo processador de dados RX 370.  
15 O processador de dados RX 370 provê o status de cada pacote recebido no canal espacial  $m$  de banda larga e/ou métricas de decodificador para o estimador de qualidade 1032. A malha externa 1020 pode prover diferentes tipos de informação (por exemplo, fator de recuo de SNR, ajuste de  
20 taxa e assim por diante), utilizados para controlar a operação da malha interna 1010.

O controle da malha fechada acima descrito pode, assim, ser realizado independentemente para cada canal espacial de banda larga de downlink e de uplink, e que pode  
25 corresponder a (1) um automodo de banda larga para o modo controlado de único usuário, ou (2) uma antena transmissora para os modos não direcionados de único usuário e multi-usuário.

#### E. PROGRAMAÇÃO DE TERMINAIS DE USUÁRIO

30 A figura 11 mostra um diagrama de bloco de uma modalidade de controlador 330 e programador 334 para a programação de terminais de usuário para transmissão de dados no downlink e no uplink. Dentro do controlador 330,

um processador de solicitação 1110 recebe solicitações de acesso que são transmitidas por terminal de usuário 120 no RACH e possivelmente solicitações de acesso de outras fontes. Estas solicitações de acesso são para transmissão  
5 de dados no downlink e/ou no uplink. O processador de solicitação 1110 processa as solicitações de acesso recebidas e provê as identidades (IDs) e o status de todos terminais de usuário de solicitação. O status para um terminal de usuário pode indicar o número de antenas  
10 disponíveis no terminal, se o terminal está calibrado, e assim por diante.

Um seletor de taxa 1120 recebe estimativas de canal do estimador de canal 328, e determina as taxas suportadas pelos canais espaciais de banda larga de  
15 downlink e/ou uplink para os terminais de usuário de solicitação, conforme acima descrito. Para o downlink, cada terminal de usuário 120 pode determinar a taxa suportada por cada um de seus canais espaciais de banda larga conforme acima descrito. A taxa suportada é a taxa máxima  
20 que pode ser utilizada para transmissão de dados sem um canal espacial de banda larga para alcançar o nível alvo de desempenho. Cada terminal de usuário 120 pode enviar as taxas suportadas para todos seus canais espaciais de banda larga de downlink para o ponto de acesso 110, por exemplo,  
25 via o RACH. Alternativamente, o ponto de acesso 110 pode determinar as taxas suportadas para os canais espaciais de banda larga de downlink, caso (1) os downlink e uplink sejam recíprocos e (2) o ponto de acesso 110 seja provido com a variância de ruído, ou ruído de fundo (noise floor),  
30 no terminal de usuário 120. Para o uplink, o ponto de acesso 110 pode determinar a taxa suportada para cada canal espacial de banda larga para cada terminal de usuário de solicitação 120.



Um seletor de usuário 1140 seleciona diferentes conjuntos de um ou mais terminais de usuário, dentre todos os terminais de usuário de solicitação, para possível transmissão de dados no downlink e/ou no uplink. Os terminais de usuário podem ser selecionados, com base em 5 vários critérios, como exigências de sistema, capacidades de terminal de usuário e taxas suportadas, prioridade de usuário, quantidade de dados enviados, e assim por diante. Para os modos de multiplexação espacial de multi-usuário, os terminais de usuário para cada conjunto podem também ser 10 selecionados, com base em seus vetores resposta de canal.

Um seletor de modo 1130 seleciona o modo de multiplexação espacial particular para ser utilizado para cada conjunto de terminais de usuário, com base no estado 15 operacional e nas capacidades dos terminais de usuário no conjunto e possivelmente outros fatores. Por exemplo, o modo direcionado de único usuário pode ser utilizado para um terminal de usuário de multi-antena "calibrada" que realizou a calibragem, de maneira que a resposta de canal para um link (por exemplo, downlink) possa ser estimada com 20 base em um piloto (por exemplo, direcionado) recebido via o outro link (por exemplo, uplink). O modo não direcionado de único usuário pode ser utilizado para um terminal de usuário de multi-antena (descalibrado) que não realizou a calibragem ou não pode suportar o modo direcionado de único 25 usuário, devido a uma razão qualquer. O modo direcionado de usuário múltiplo pode ser utilizado para transmissão de downlink para múltiplos terminais de usuário, cada qual equipado com uma ou mais antenas. O modo não direcionado de multi-usuário pode ser utilizado para transmissão de uplink 30 por múltiplos terminais de usuário.

O programador 334 recebe os conjuntos de terminais de usuário a partir do seletor de usuário 1140, o

modo de multiplexação espacial selecionado para cada conjunto de terminal de usuário a partir do seletor de modo 1130, e as taxas selecionadas para cada conjunto de terminal de usuário a partir do seletor de taxa 1120. O

5 Programador 334 programa os terminais de usuário para transmissão de dados no downlink e/ou no uplink. O programador 334 seleciona um ou mais conjuntos de terminais de usuário para transmissão de dados no downlink e um ou mais conjuntos de terminais de usuário para transmissão de

10 dados no uplink para cada quadro TDD. Cada conjunto inclui um ou mais terminais de usuário, e é programado para transmissão de dados de modo correspondente em um intervalo de transmissão designado dentro do quadro TDD.

O programador 334 forma um elemento de informação

15 (IE) para cada terminal de usuário programado para transmissão de dados no downlink e/ou no uplink. Cada elemento de informação inclui (1) o modo de multiplexação espacial a ser utilizado pela transmissão de dados, (2) a taxa a ser utilizada para o fluxo de dados enviado em cada

20 canal espacial de banda larga, (3) o início e a duração da transmissão de dados e (4) possivelmente outras informações (por exemplo, o tipo de piloto sendo transmitido juntamente com a transmissão de dados). O programador 334 envia os elementos de informação para todos os terminais de usuário

25 programados via o FCCH. Cada terminal de usuário processa o FCCH para recuperar o seu elemento de informação, e depois recebe uma transmissão de downlink e/ou envia uma transmissão de uplink de acordo com a informação de programação recebida.

30 A figura 11 mostra uma modalidade da programação dos terminais de usuário para transmissão de dados, quando múltiplos modos de multiplexação espacial são suportados. A

programação pode ser realizada de outras maneiras, o que está dentro do escopo da invenção.

A figura 12 mostra um diagrama de fluxo de um processo 1200 para programação de terminais de usuário para transmissão de dados no sistema MIMO 100. Um conjunto de pelo menos um terminal de usuário é selecionado para transmissão de dados no downlink e/ou no uplink (bloco 1212). Um modo de multiplexação espacial é selecionado para o conjunto de terminal de usuário entre múltiplos modos de multiplexação espacial suportados pelo sistema (bloco 1214). Múltiplas taxas são também selecionadas para múltiplos fluxos de dados a serem transmitidos via múltiplos canais espaciais para o conjunto de terminal de usuário (bloco 1216). O conjunto de terminal de usuário é programado para transmissão de dados no downlink e/ou no uplink com as taxas selecionadas e o modo de multiplexação espacial selecionado (bloco 1218).

A figura 13 mostra um diagrama de fluxo de um processo 1300 para transmissão de dados no downlink no sistema MIMO 100. O processo 1300 pode ser realizado pelo ponto de acesso 110x. Uma primeira pluralidade de fluxos de dados é codificada e modulada de acordo com uma primeira pluralidade de taxas para obter uma primeira pluralidade de fluxos de símbolos de dados (bloco 1312). Para o modo direcionado de único usuário, a primeira pluralidade de fluxos de símbolos de dados é espacialmente processada com uma primeira pluralidade de vetores de direcionamento para obter uma primeira pluralidade de fluxos de símbolos de transmissão para transmissão a partir de múltiplas antenas para um primeiro terminal de usuário em um primeiro intervalo de transmissão (bloco 1314). A primeira pluralidade de vetores de direcionamento é derivada de tal maneira que a primeira pluralidade de fluxos de dados é

transmitida em canais espaciais ortogonais para o primeiro terminal de usuário. Uma segunda pluralidade de fluxos de dados é codificada e modulada de acordo com uma segunda pluralidade de taxas para obter uma segunda pluralidade de fluxos de símbolos de dados (bloco 1316). Para o modo não direcionado de único usuário, a segunda pluralidade de fluxos de símbolos de dados é fornecida como uma segunda pluralidade de fluxos de símbolos de transmissão para transmissão a partir de múltiplas antenas para um segundo terminal de usuário em um segundo intervalo de transmissão (bloco 1318). Uma terceira pluralidade de fluxos de dados é codificada e modulada para obter uma terceira pluralidade de fluxos de símbolos de dados (bloco 1320). Para o modo direcionado de multi-usuário, a terceira pluralidade de fluxos de símbolos de dados é espacialmente processada com uma segunda pluralidade de vetores de direcionamento para obter uma terceira pluralidade de fluxos de símbolos de transmissão para transmissão a partir de múltiplas antenas para múltiplos terminais de usuário em um terceiro intervalo de transmissão (bloco 1322). A segunda pluralidade de vetores de direcionamento é derivada de tal maneira que a terceira pluralidade de fluxos de símbolos de dados é recebida com diafonia suprimida nos múltiplos terminais de usuário.

A figura 14 mostra um diagrama de fluxo de um processo 1400 para receber dados no uplink em sistema MIMO 100. O processo 1400 pode também ser realizado pelo ponto de acesso 110x. O processamento espacial de recepção é realizado em uma primeira pluralidade de fluxos de símbolos recebidos, de acordo com um primeiro modo de multiplexação espacial (por exemplo, o modo direcionado de único usuário) para obter uma primeira pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados (bloco 1412). A primeira pluralidade

de fluxos de símbolos de dados recuperados é demodulada e decodificada de acordo com uma primeira pluralidade de taxas, para obter uma primeira pluralidade de fluxos de dados decodificados (bloco 1414). O processamento espacial  
5 de recepção é realizado em uma segunda pluralidade de fluxos de símbolos recebidos de acordo com um segundo modo de multiplexação espacial (por exemplo, um modo não direcionado) para obter uma segunda pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados (bloco 1416). A segunda  
10 pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados é demodulada e decodificada de acordo com a segunda pluralidade de taxas para obter uma segunda pluralidade de fluxos de dados decodificados que são estimativas de fluxos de dados transmitidos por um ou múltiplos terminais de  
15 usuário (1418).

Cada terminal de usuário realiza processos correspondentes para transmitir dados em um ou múltiplos canais espaciais de banda larga de uplink e para receber dados em um ou múltiplos canais espaciais de banda larga de  
20 downlink.

A transmissão de dados com múltiplos modos de multiplexação espacial conforme aqui descrita, pode ser implementada por vários meios. Por exemplo, o processamento pode ser implementado em hardware, software ou em uma  
25 combinação dos mesmos. Para uma implementação em hardware, as unidades de processamentos utilizadas para realizar o processamento de dados, o processamento espacial e a programação no ponto de acesso podem ser implementadas dentro de um ou mais circuitos integrados de aplicação  
30 específica (ASICs), processadores de sinal digital (DSPs), dispositivos de processamento de sinal digital (DSPDs), dispositivos lógicos programáveis (PLDs), arranjos de porta programáveis em campo (FPGAs), processadores, controladores,

microcontroladores, microprocessadores, outras unidades eletrônicas projetadas para realizar as funções aqui descritas, ou uma combinação destas. As unidades de processamento em um terminal de usuário podem também ser  
5 implementadas em um ou mais ASICs, DSPs e assim por diante.

Para uma implementação em software, o processamento no ponto de acesso e no terminal de usuário para a transmissão de dados com múltiplos modos de multiplexação espacial, pode ser implementado com módulos  
10 (por exemplo, procedimentos, funções e assim por diante) que realizam as funções aqui descritas. Os códigos de software podem ser armazenados em uma unidade da memória (por exemplo, unidade de memória 332 ou 382 na figura 3), sendo executados por um processador (por exemplo,  
15 controlador 330 ou 380). A unidade de memória pode ser implementada dentro do processador ou fora do processador.

Cabeçalhos são aqui incluídos para referência e para auxiliarem na localização de determinadas seções. Estes cabeçalhos não pretendem limitar o escopo dos  
20 conceitos aqui descritos e estes conceitos podem ser aplicados em outras seções, em toda a especificação.

A descrição anterior das modalidades descritas é fornecida para possibilitar a qualquer pessoa versada na técnica para fazer ou utilizar a presente invenção. Várias  
25 modificações nestas modalidades tornar-se-ão prontamente aparentes aos versados na técnica e os princípios gerais aqui definidos podem ser aplicados a outras modalidades, sem se afastar do espírito ou escopo da invenção. Assim sendo, a presente invenção não pretende estar limitada às  
30 modalidades aqui mostradas, mas deve ser acordado o mais amplo escopo consistente com os princípios e novas características aqui descritos.

## REIVINDICAÇÕES

1. Método para transmitir dados em um sistema de comunicação sem fio de acesso múltiplo por múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO), **caracterizado** pelo fato  
5 de que compreende as etapas de:

selecionar (1212) pelo menos dois terminais de usuário para transmissão de dados;

selecionar (1214) um modo de multiplexação espacial direcionado dentre uma pluralidade de modos de  
10 multiplexação espacial, um dentre os quais é o modo de multiplexação espacial direcionado, suportados pelo sistema, para uso para os pelo menos dois terminais de usuário;

selecionar (1216) taxas para uma pluralidade de  
15 fluxos de dados a serem transmitidos via uma pluralidade de canais espaciais para os pelo menos dois terminais de usuário; e

programar (1218) os pelo menos dois terminais de usuário para transmissão de dados com as taxas selecionadas  
20 e o modo de multiplexação espacial selecionado.

2. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que um terminal de usuário é selecionado para transmissão de dados e o modo de multiplexação espacial selecionado é um modo de  
25 multiplexação espacial direcionado.

3. Método, de acordo com a reivindicação 2, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente:

processar espacialmente a pluralidade de fluxos de dados com uma pluralidade de vetores de direcionamento  
30 para transmitir a pluralidade de fluxos de dados em canais espaciais ortogonais até um terminal de usuário.

4. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que um terminal de usuário é

selecionado para transmissão de dados e o modo de multiplexação espacial selecionado é um modo de multiplexação espacial não-direcionado.

5        5. Método, de acordo com a reivindicação 4, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente:  
prover a pluralidade de fluxos de dados para transmissão a partir de uma pluralidade de antenas até um terminal de usuário.

10       6. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente:  
processar espacialmente a pluralidade de fluxos de dados com uma pluralidade de vetores de direcionamento para direcionar a pluralidade de fluxos de dados para os pelo menos dois terminais de usuário.

15       7. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente:  
executar processamento espacial de receptor em uma pluralidade de fluxos de símbolos recebidos para obter estimativas da pluralidade de fluxos de dados transmitidos  
20       por uma pluralidade de terminais de usuário, em que cada fluxo de dados é processado com um respectivo vetor de direcionamento para direcionar o fluxo de dados.

25       8. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que uma pluralidade de terminais de usuário é selecionada para transmissão de dados e o modo de multiplexação espacial selecionado é um modo de multiplexação espacial não-direcionado.

30       9. Método, de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente:  
executar um processamento espacial de receptor em uma pluralidade de fluxos de símbolos recebidos, para obter estimativas da pluralidade de fluxos de dados transmitidos pela pluralidade de terminais de usuário.



10. Método, de acordo com a reivindicação 8, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente:

prover a pluralidade de fluxos de dados para transmissão a partir de uma pluralidade de antenas para a pluralidade de terminais de usuário, cada qual possuindo múltiplas antenas.

11. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que o sistema MIMO é um sistema duplex por divisão de tempo (TDD).

12. Método, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado** pelo fato de que o modo de multiplexação espacial selecionado é um modo de multiplexação espacial direcionado, caso pelo menos um terminal de usuário seja calibrado e uma resposta de canal de *downlink* seja recíproca de uma resposta de canal de *uplink*.

13. Método, de acordo com a reivindicação 11, **caracterizado** pelo fato de que o modo de multiplexação espacial selecionado é um modo de multiplexação espacial não-direcionado, caso o pelo menos um terminal de usuário esteja descalibrado e uma resposta de canal de *downlink* não seja recíproca a uma resposta de canal de *uplink*.

14. Método, de acordo com a reivindicação 1, **caracterizado** pelo fato de que a seleção de uma pluralidade de taxas compreende:

estimar relações sinal/ruído-e-interferência (SNRs) da pluralidade de canais espaciais; e  
selecionar as taxas com base nas SNRs estimadas da pluralidade de canais espaciais.

15. Equipamento em um sistema de comunicação sem fio de acesso múltiplo por múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO), caracterizado pelo fato de que compreende:

meios (330) para selecionar pelo menos dois terminais de usuário para transmissão de dados;

meios (330) para selecionar um modo de multiplexação espacial direcionado dentre uma pluralidade de modos de multiplexação espacial, um dentre os quais é o modo de multiplexação espacial direcionado, suportados pelo sistema, para uso para os pelo menos dois terminais de usuário;

meios (330) para selecionar taxas para uma pluralidade de fluxos de dados a serem transmitidos via uma pluralidade de canais espaciais de um canal MIMO para os pelo menos dois terminais de usuário; e

meios (334) para programar os pelo menos dois terminais de usuário para transmissão de dados com a pluralidade de taxas selecionadas e o modo de multiplexação espacial selecionado.

16. Equipamento, de acordo com a reivindicação 15, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente:

meios (320) para processar espacialmente a pluralidade de fluxos de dados, de acordo com o modo de multiplexação espacial selecionado, para obter uma pluralidade de fluxos de símbolos de transmissão para transmissão a partir de uma pluralidade de antenas para pelo menos um terminal de usuário.

17. Equipamento, de acordo com a reivindicação 15, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente:

meios (340) para processar espacialmente uma pluralidade de fluxos de símbolos recebidos de acordo com o modo de multiplexação espacial selecionado, para obter estimativas da pluralidade de fluxos de dados transmitidos para o pelo menos um terminal de usuário.

18. Método para receber dados em um sistema de comunicação sem fio por múltiplas-entradas e múltiplas-

saídas (MIMO), **caracterizado** pelo fato de que compreende as etapas de:

5           executar processamento espacial de receptor (1412) em uma primeira pluralidade de fluxos de símbolos recebidos de acordo com um primeiro modo de multiplexação espacial, para obter uma primeira pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados, o primeiro modo de multiplexação espacial compreendendo um modo de multiplexação espacial direcionado selecionado dentre uma  
10 pluralidade de modos de multiplexação espacial;

          demodular e decodificar (1412) a primeira pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados de acordo com uma primeira pluralidade de taxas para obter uma primeira pluralidade de fluxos de dados decodificados;

15           executar processamento espacial de receptor (1416) em uma segunda pluralidade de fluxos de símbolos recebidos de acordo com um segundo modo de multiplexação espacial para obter uma segunda pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados; e

20           demodular e decodificar (1418) a segunda pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados de acordo com uma segunda pluralidade de taxas para obter uma segunda pluralidade de fluxos de dados decodificados.

          19. Método, de acordo com a reivindicação 18,  
25 **caracterizado** pelo fato de que a primeira pluralidade de fluxos de símbolos recebidos é processada espacialmente com uma pluralidade de autovetores para uma pluralidade de canais espaciais de um canal MIMO para um terminal de usuário.

30           20. Método, de acordo com a reivindicação 18, **caracterizado** pelo fato de que o segundo modo de multiplexação espacial é um modo de multiplexação espacial não-direcionado.

21. Método, de acordo com a reivindicação 20, **caracterizado** pelo fato de que a segunda pluralidade de fluxos de dados decodificados são estimativas de uma pluralidade de fluxos de dados transmitidos por um único terminal de usuário.

22. Método, de acordo com a reivindicação 20, **caracterizado** pelo fato de que a segunda pluralidade de fluxos de dados decodificados são estimativas de uma pluralidade de fluxos de dados transmitidos simultaneamente por uma pluralidade de terminais de usuário.

23. Método, de acordo com a reivindicação 20, **caracterizado** pelo fato de que a segunda pluralidade de fluxos de símbolos recebidos é processada espacialmente com base em uma técnica de inversão de matriz de correlação de canal (CCMI).

24. Método, de acordo com a reivindicação 20, **caracterizado** pelo fato de que a segunda pluralidade de fluxos de símbolos recebidos é processada espacialmente com base em uma técnica de mínimo erro quadrático médio (MMSE).

25. Método, de acordo com a reivindicação 20, **caracterizado** pelo fato de que a segunda pluralidade de fluxos de símbolos recebidos é processada espacialmente com base em uma técnica de cancelamento sucessivo de interferência (SIC).

26. Equipamento em um sistema de comunicação sem fio por múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO), **caracterizado** pelo fato de que compreende:

um processador espacial de receptor operativo para:

executar processamento espacial de receptor (1412) em uma primeira pluralidade de fluxos de símbolos recebidos de acordo com um primeiro modo de multiplexação espacial para obter uma primeira pluralidade de fluxos de

símbolos de dados recuperados, o primeiro modo de multiplexação espacial compreendendo um modo de multiplexação espacial direcionado selecionado dentre uma pluralidade de modos de multiplexação espacial; e

5                   executar um processamento espacial de receptor (1416) em uma segunda pluralidade de fluxos de símbolos recebidos de acordo com um segundo modo de multiplexação espacial para obter uma segunda pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados; e

10                  um processador de dados de recepção operativo para:

                  demodular e decodificar (1414) a primeira pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados de acordo com uma primeira pluralidade de taxas para obter uma  
15 primeira pluralidade de fluxos de dados decodificados; e

                  demodular e decodificar (1418) a segunda pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados de acordo com uma segunda pluralidade de taxas para obter uma segunda pluralidade de fluxos de dados decodificados.

20                  27. Equipamento, de acordo com a reivindicação 26, **caracterizado** pelo fato de que o segundo modo de multiplexação espacial é um modo de multiplexação espacial não direcionado.

                  28. Método para transmitir dados em um sistema de  
25 comunicação sem fio por múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO), **caracterizado** pelo fato de que compreende as etapas de:

                  receber informações (330, 380x, 380y) indicando um modo de multiplexação espacial e uma pluralidade de  
30 taxas para uso para transmissão de dados, em que o modo de multiplexação espacial é selecionado dentre uma pluralidade de modos de multiplexação espacial, suportados pelo sistema, e em que cada uma dentre a pluralidade de taxas é

selecionada dentre um conjunto de taxas suportadas pelo sistema, o modo de multiplexação espacial compreendendo um modo de multiplexação espacial direcionado;

codificar e modular uma pluralidade de fluxos de dados (310, 390x, 390y) de acordo com a pluralidade de taxas para obter uma pluralidade de fluxos de símbolos de dados; e

processar espacialmente a pluralidade de fluxos de símbolos de dados (320, 392y) de acordo com o modo de multiplexação espacial para obter uma pluralidade de fluxos de símbolos de transmissão para transmissão a partir de uma pluralidade de antenas.

29. Método, de acordo com a reivindicação 28, **caracterizado** pelo fato de que o modo de multiplexação espacial é um modo de multiplexação espacial direcionado e em que a pluralidade de fluxos de símbolos de dados é processada espacialmente com uma pluralidade de vetores de direcionamento, para transmitir a pluralidade de fluxos de símbolos de dados em uma pluralidade de canais espaciais ortogonais de um canal MIMO.

30. Método, de acordo com a reivindicação 29, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente:

transmitir um piloto direcionado em cada um dentre a pluralidade de canais espaciais ortogonais.

31. Método, de acordo com a reivindicação 28, **caracterizado** pelo fato de que o modo de multiplexação espacial é um modo de multiplexação espacial não-direcionado e em que a pluralidade de fluxos de símbolos de dados é provida como a pluralidade de fluxos de símbolos de transmissão.

32. Método, de acordo com a reivindicação 28, **caracterizado** pelo fato de que compreende adicionalmente:

executar calibragem de forma que uma resposta de canal de uplink seja recíproca a uma resposta de canal de downlink.

33. Equipamento em um sistema de comunicação sem fio por múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO), **caracterizado** pelo fato de que compreende:

um controlador (330, 380x, 380y) operativo para receber informações indicando um modo de multiplexação espacial e uma pluralidade de taxas a serem usadas para transmissão de dados, em que o modo de multiplexação espacial é selecionado dentre uma pluralidade de modos de multiplexação espacial, suportados pelo sistema, e em que cada uma dentre a pluralidade de taxas é selecionada dentre um conjunto de taxas suportadas pelo sistema, o modo de multiplexação espacial compreendendo um modo de multiplexação espacial direcionado;

um processador de dados de transmissão (310, 390x, 390y) operativo para codificar e modular uma pluralidade de fluxos de dados, de acordo com a pluralidade de taxas para obter a pluralidade de fluxos de símbolos de dados; e

um processador espacial de transmissão (320, 392y) operativo para processar espacialmente a pluralidade de fluxos de símbolos de dados de acordo com o modo de multiplexação espacial para obter uma pluralidade de fluxos de símbolos de transmissão para transmissão a partir de uma pluralidade de antenas.

34. Método para receber dados em um sistema de comunicação sem fio por múltiplas-entradas e múltiplas-saídas (MIMO), **caracterizado** pelo fato de que compreende as etapas de:

receber informações (360x, 360y) indicando um modo de multiplexação espacial direcionado e pelo menos uma

taxa para uso para transmissão de dados, em que o modo de multiplexação espacial direcionado é selecionado dentre uma pluralidade de modos de multiplexação espacial, um dentre os quais é o modo de multiplexação espacial direcionado para pelo menos dois terminais, suportados pelo sistema, e em que cada uma dentre as pelo menos uma taxa é selecionada dentre um conjunto de taxas suportadas pelo sistema;

processar espacialmente (360x, 360y) pelo menos um fluxo de símbolos recebido de acordo com o modo de multiplexação espacial direcionado para obter pelo menos um fluxo de símbolos de dados recuperado; e

demodular e decodificar (360x, 360y) o pelo menos um fluxo de símbolos de dados recuperado de acordo com a pelo menos uma taxa para obter o pelo menos um fluxo de dados decodificado.

35. Método, de acordo com a reivindicação 34, **caracterizado** pelo fato de que um dentre a pluralidade de modos de multiplexação espacial é um modo de multiplexação espacial não-direcionado.

36. Método, de acordo com a reivindicação 35, **caracterizado** pelo fato de que uma pluralidade de fluxos de símbolos recebidos é processada espacialmente com base em uma técnica de inversão de matriz de correlação de canal (CCMI), uma técnica de mínimo erro quadrático médio (MMSE) ou uma técnica de cancelamento sucessivo de interferência (SIC), para obter uma pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados.

37. Método, de acordo com a reivindicação 35, **caracterizado** pelo fato de que um fluxo de símbolos recebido é processado com estimativas de ganho de canal para obter um fluxo de símbolos de dados recuperado.

38. Equipamento para receber dados em um sistema de comunicação sem fio por múltiplas-entradas e múltiplas-



saídas (MIMO), **caracterizado** pelo fato de que compreende:

meios (330, 380x, 380y) para receber informações indicando um modo de multiplexação espacial direcionado e pelo menos uma taxa para uso para transmissão de dados, em  
5 que o modo de multiplexação espacial direcionado é selecionado dentre uma pluralidade de modos de multiplexação espacial, um dentre os quais é o modo de multiplexação espacial direcionado para pelo menos dois terminais, suportados pelo sistema, e em que cada uma  
10 dentre a pelo menos uma taxa é selecionada dentre um conjunto de taxas suportadas pelo sistema;

meios (340, 360x, 360y) para processar espacialmente pelo menos um fluxo de símbolos recebido de acordo com o modo de multiplexação espacial direcionado  
15 para obter pelo menos um fluxo de símbolos de dados recuperado; e

meios para demodular (342, 370x, 370y) e decodificar o pelo menos um fluxo de símbolos de dados recuperado de acordo com a pelo menos uma taxa para obter  
20 pelo menos um fluxo de dados decodificado.

39. Equipamento, de acordo com a reivindicação 38, **caracterizado** pelo fato de que um dentre a pluralidade de modos de multiplexação espacial é um modo de multiplexação espacial não-direcionado.

25 40. Equipamento, de acordo com a reivindicação 38, **caracterizado** pelo fato de que os meios para processar espacialmente compreendem meios para processar espacialmente com base em uma técnica de inversão de matriz de correlação de canal (CCMI), uma técnica de mínimo erro  
30 médio quadrático (MMSE), ou uma técnica de cancelamento sucessivo de interferência (SIC) para obter uma pluralidade de fluxos de símbolos de dados recuperados.

41. Equipamento, de acordo com a reivindicação 38, **caracterizado** pelo fato de que os meios para demodular e decodificar compreendem meios para processar pelo menos um fluxo de símbolos recebido com estimativas de ganho de canal para obter um fluxo de símbolos de dados recuperado.

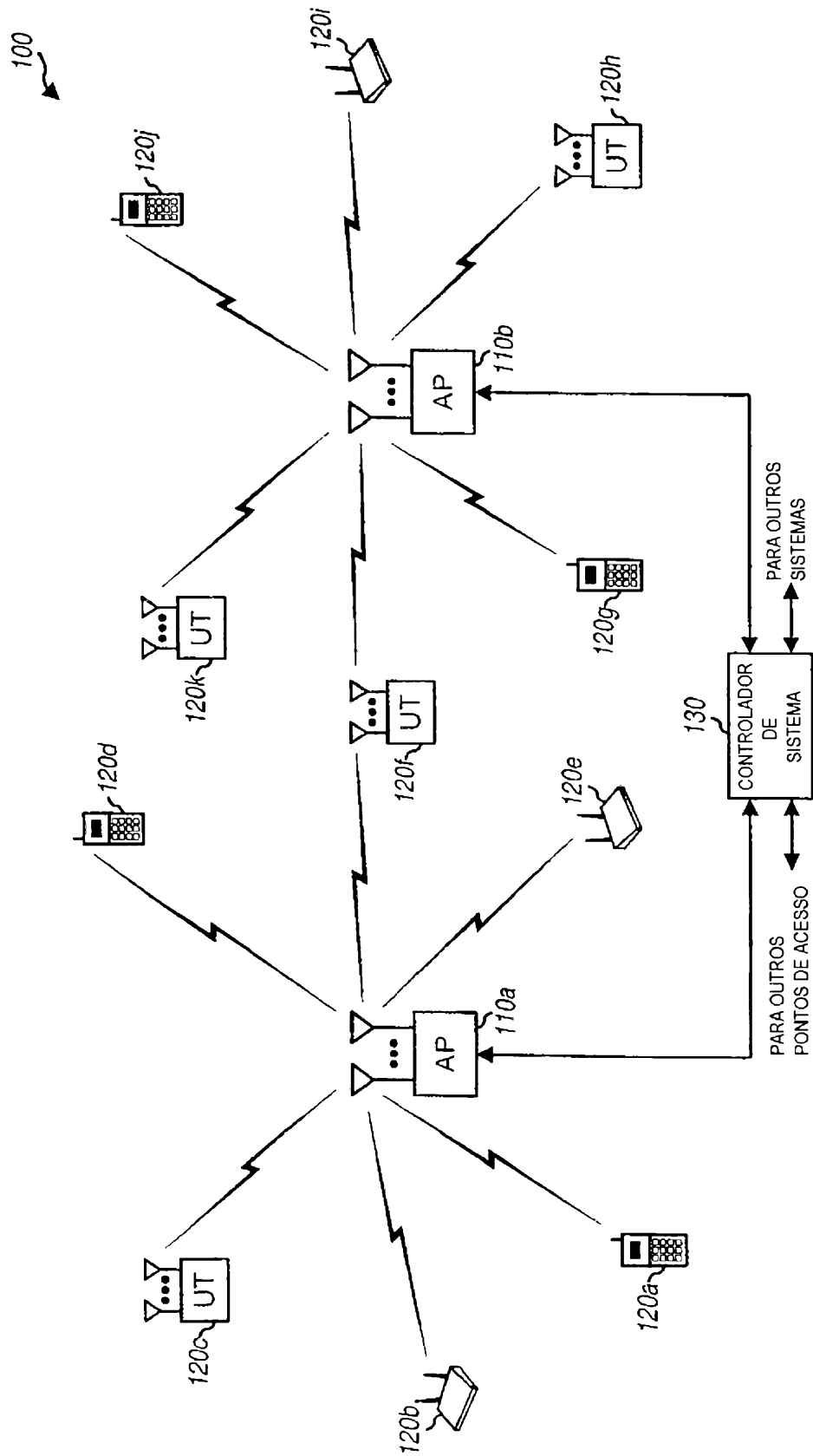


FIG. 1

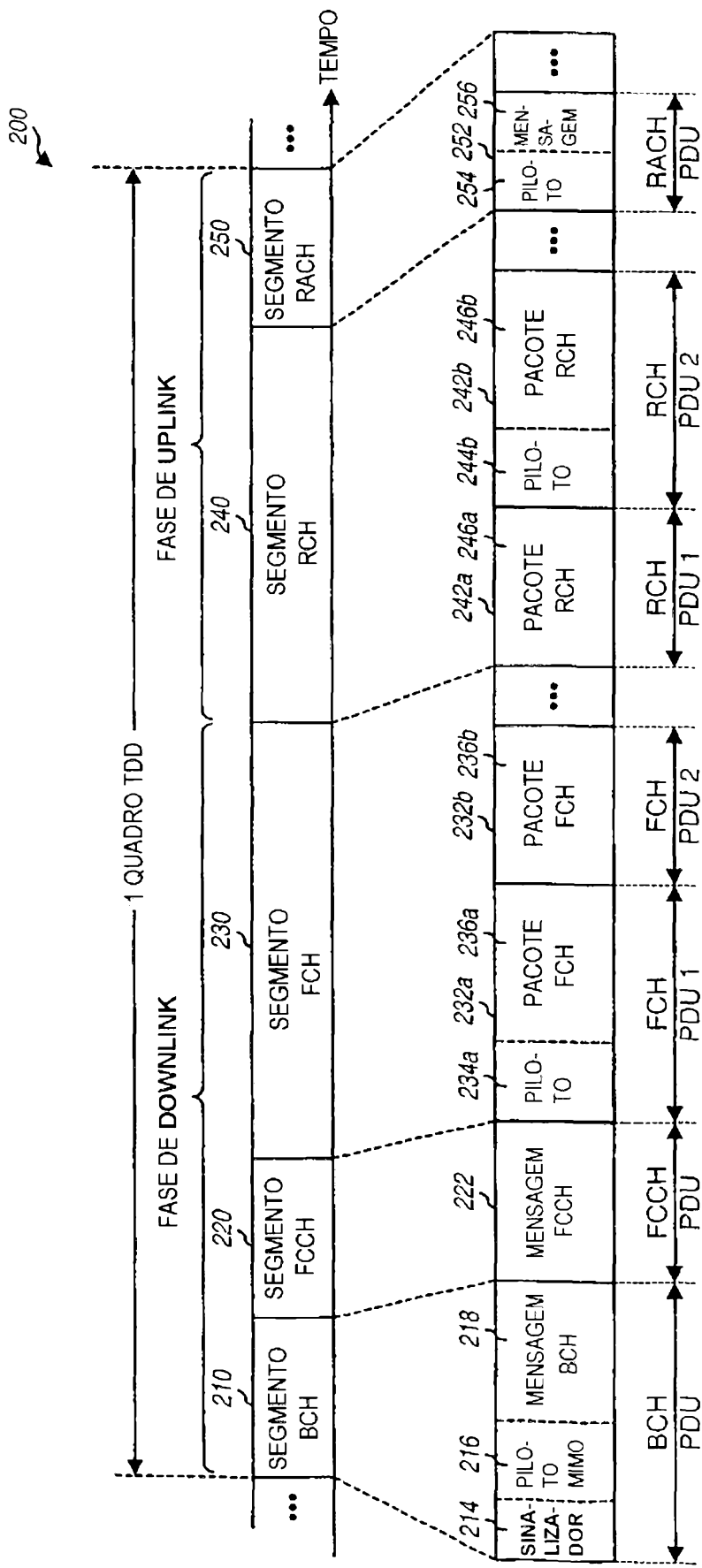


FIG. 2

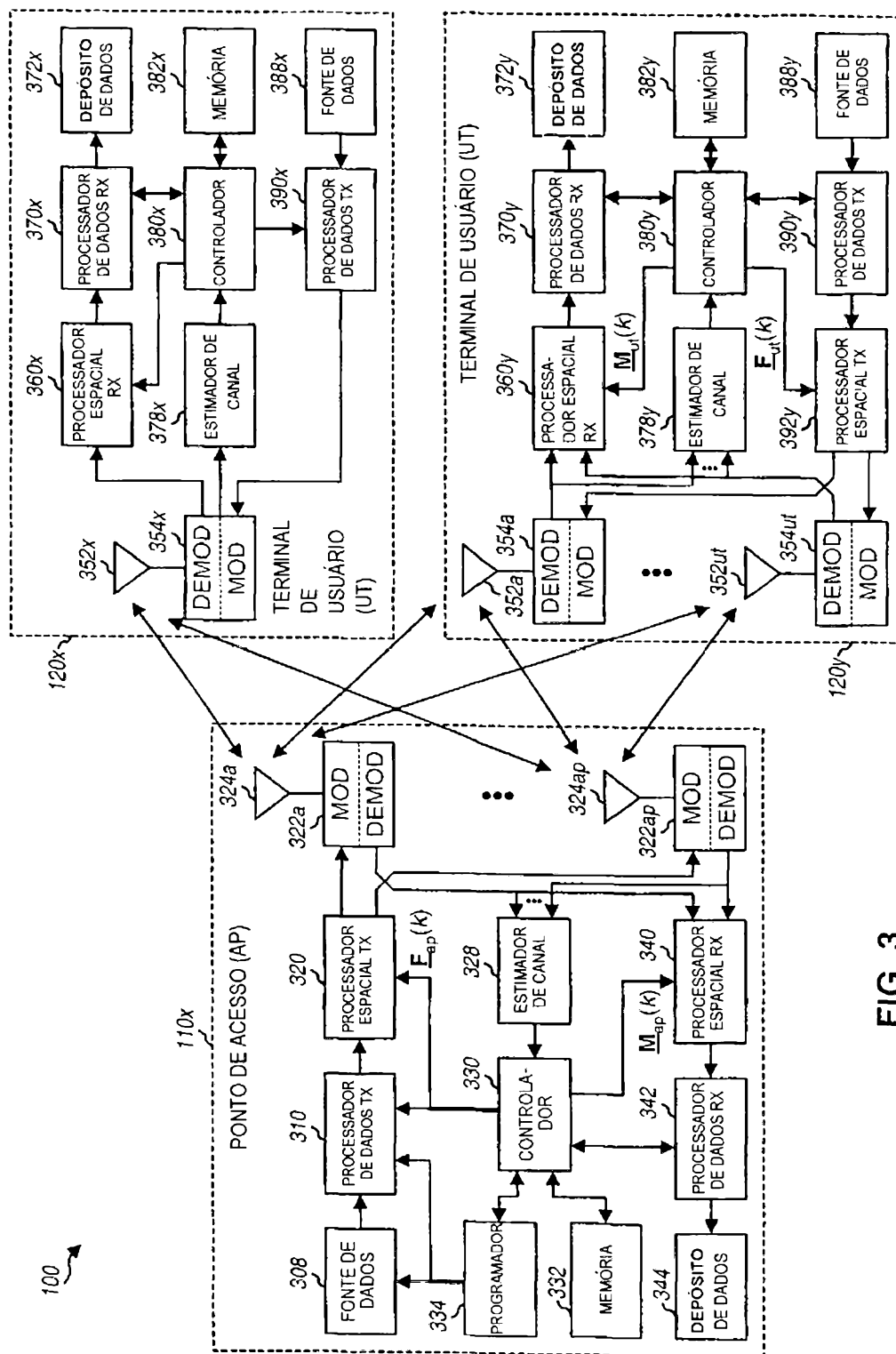


FIG. 3

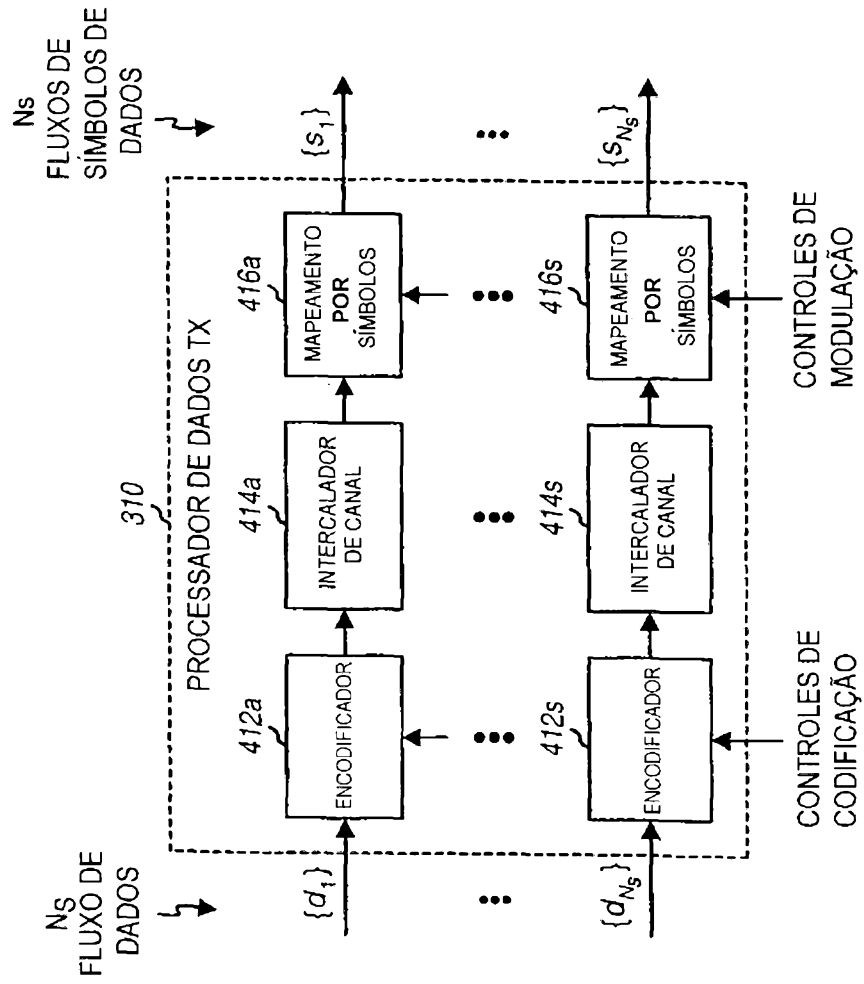


FIG. 4

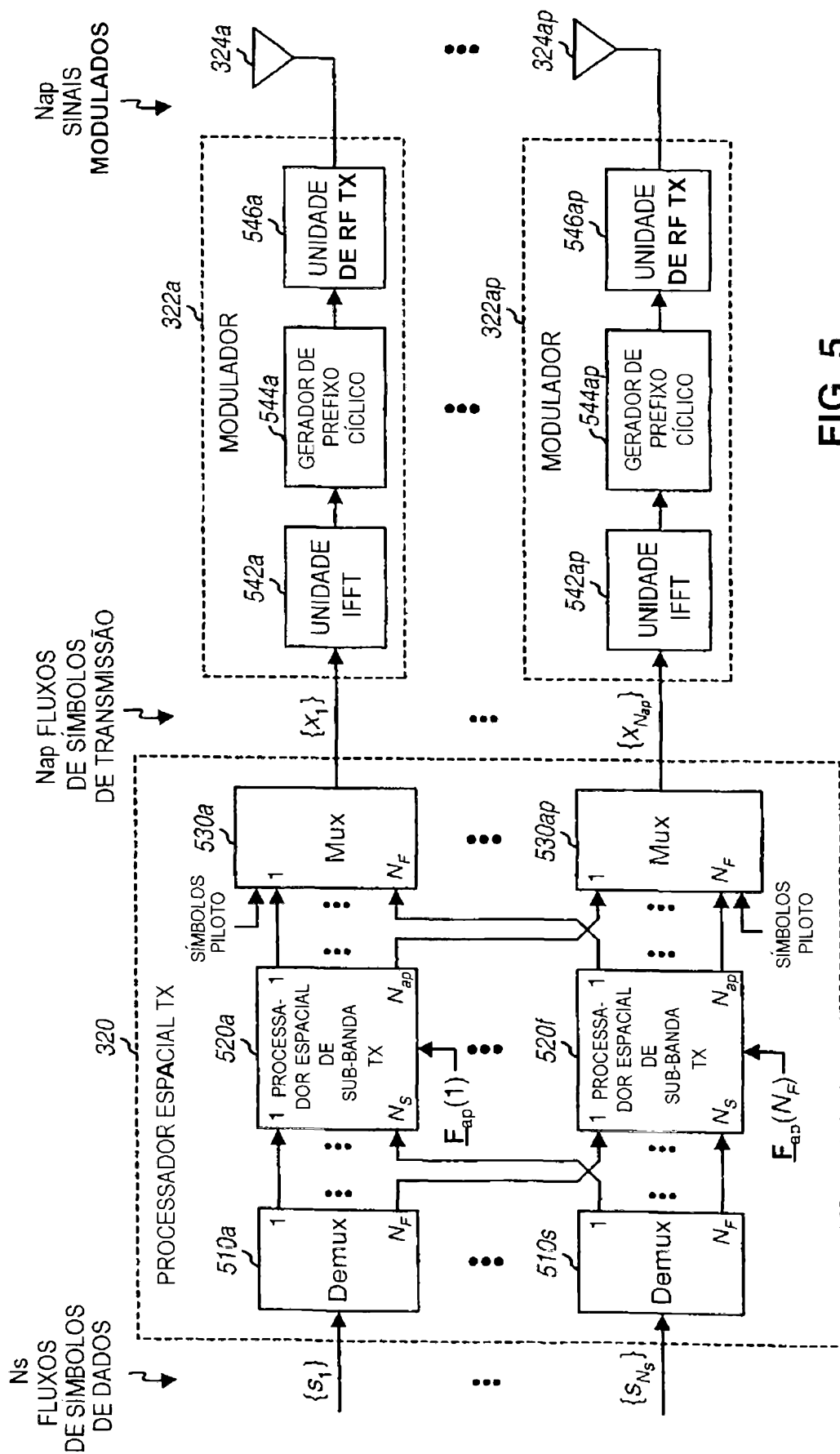


FIG. 5

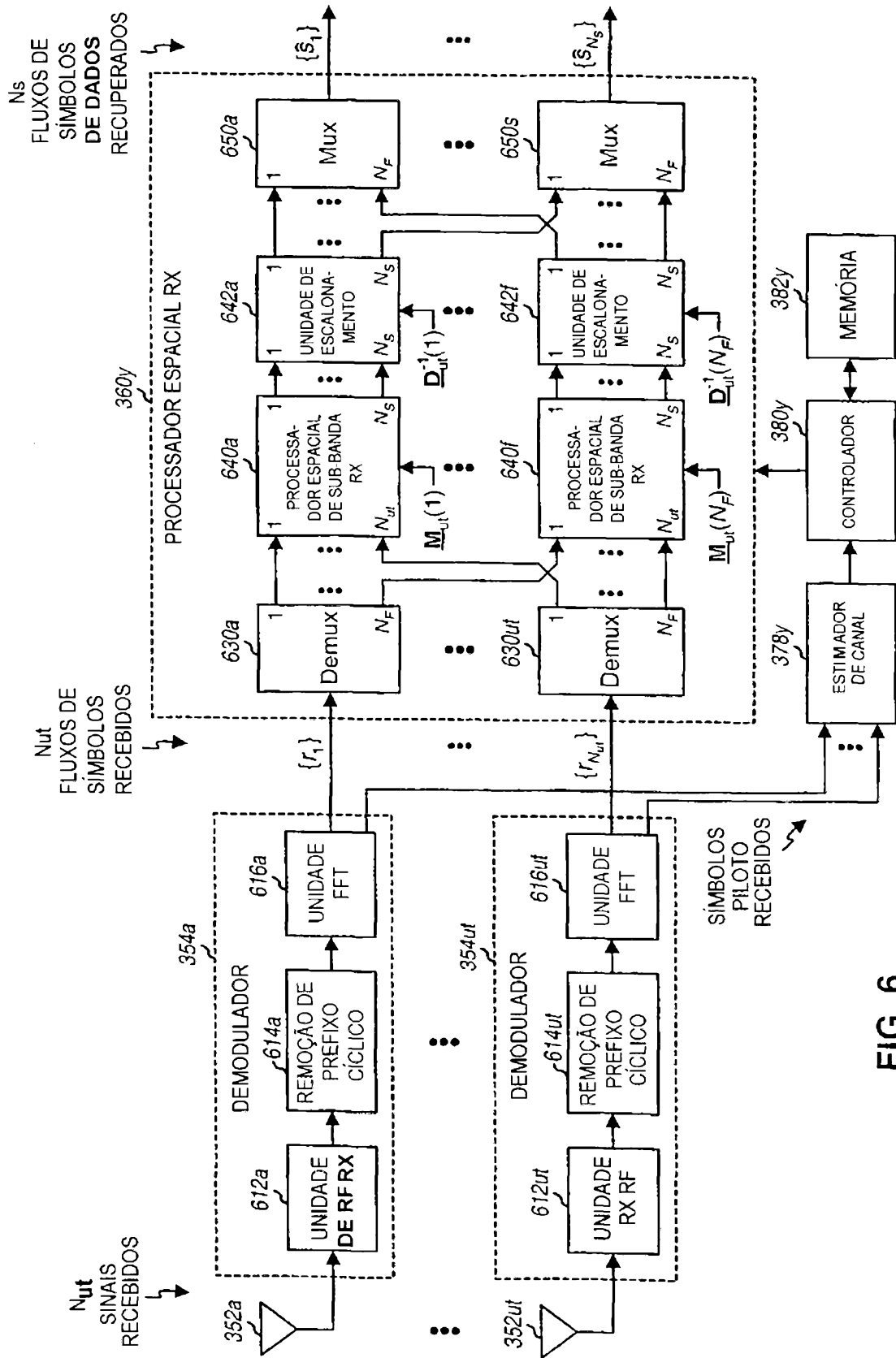


FIG. 6



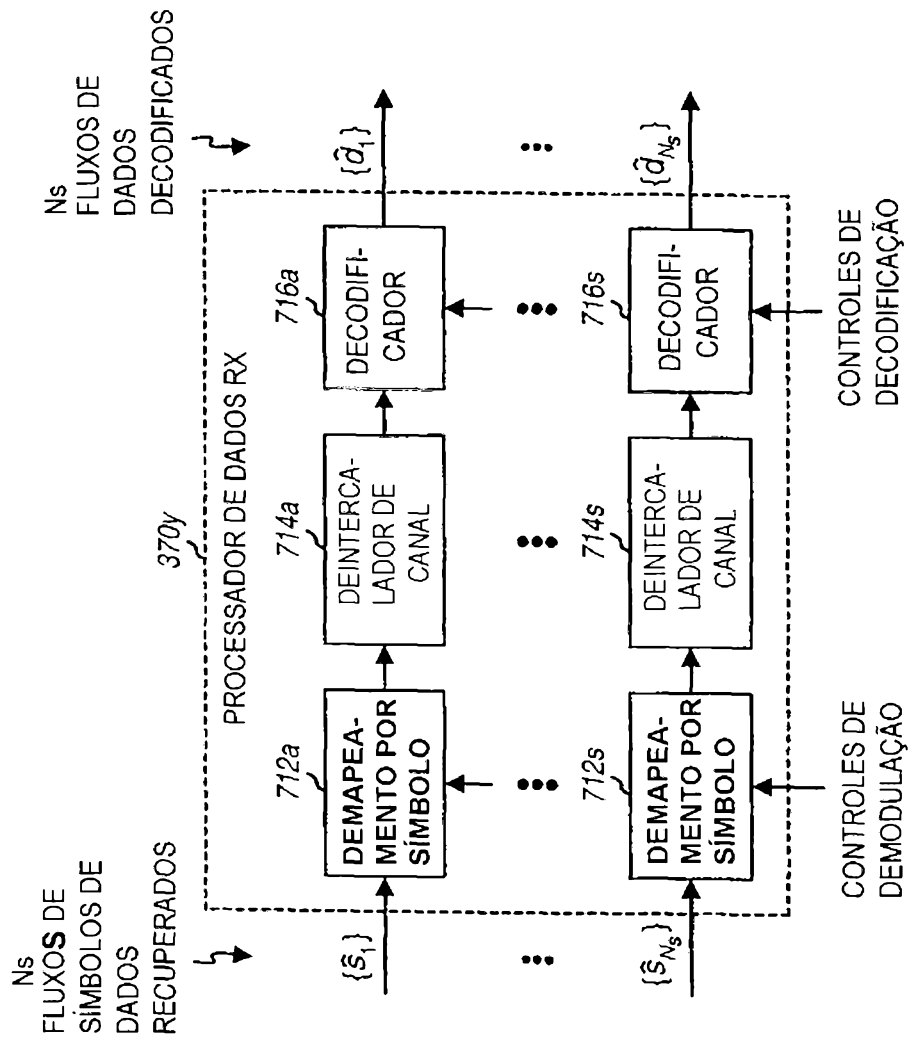


FIG. 7

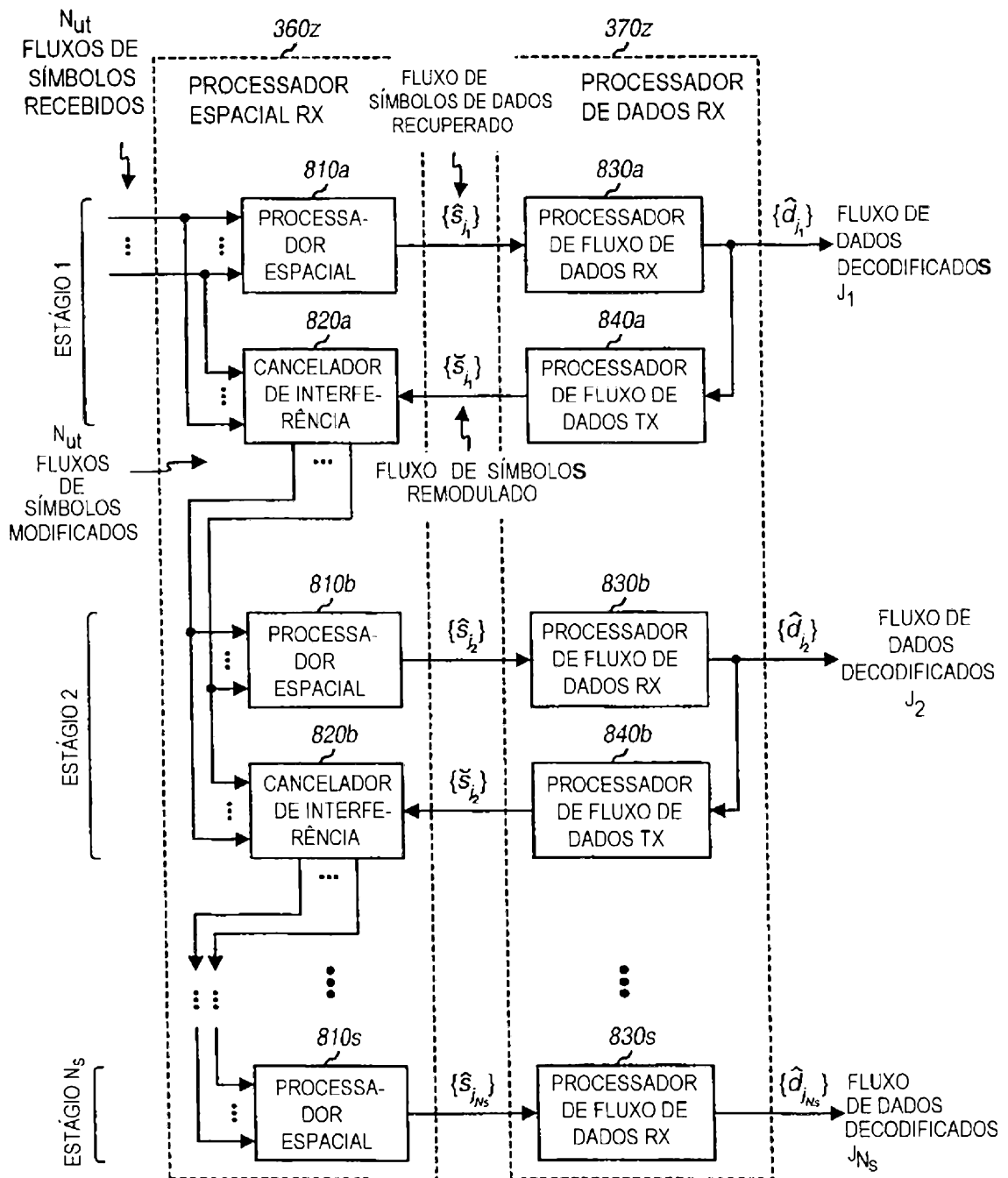


FIG. 8

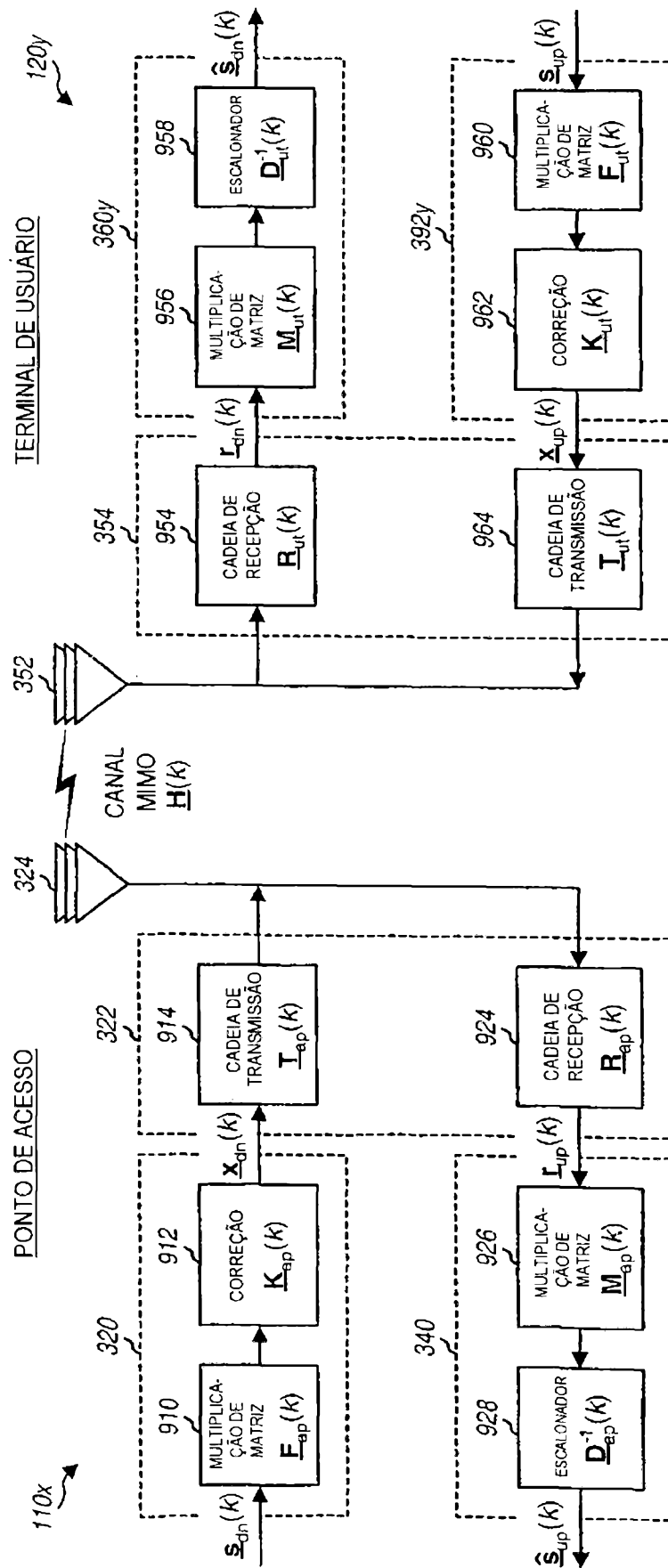
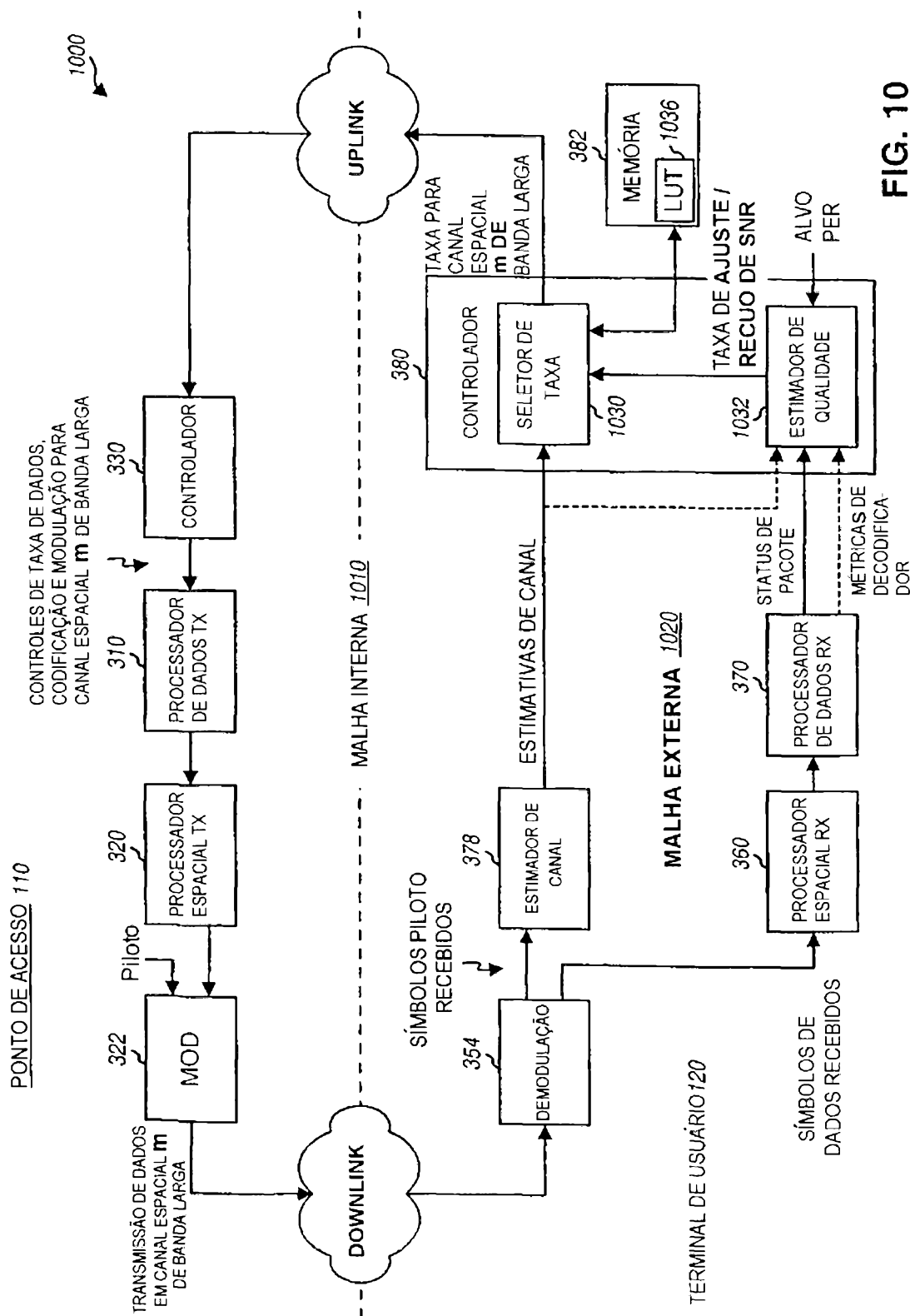


FIG. 9



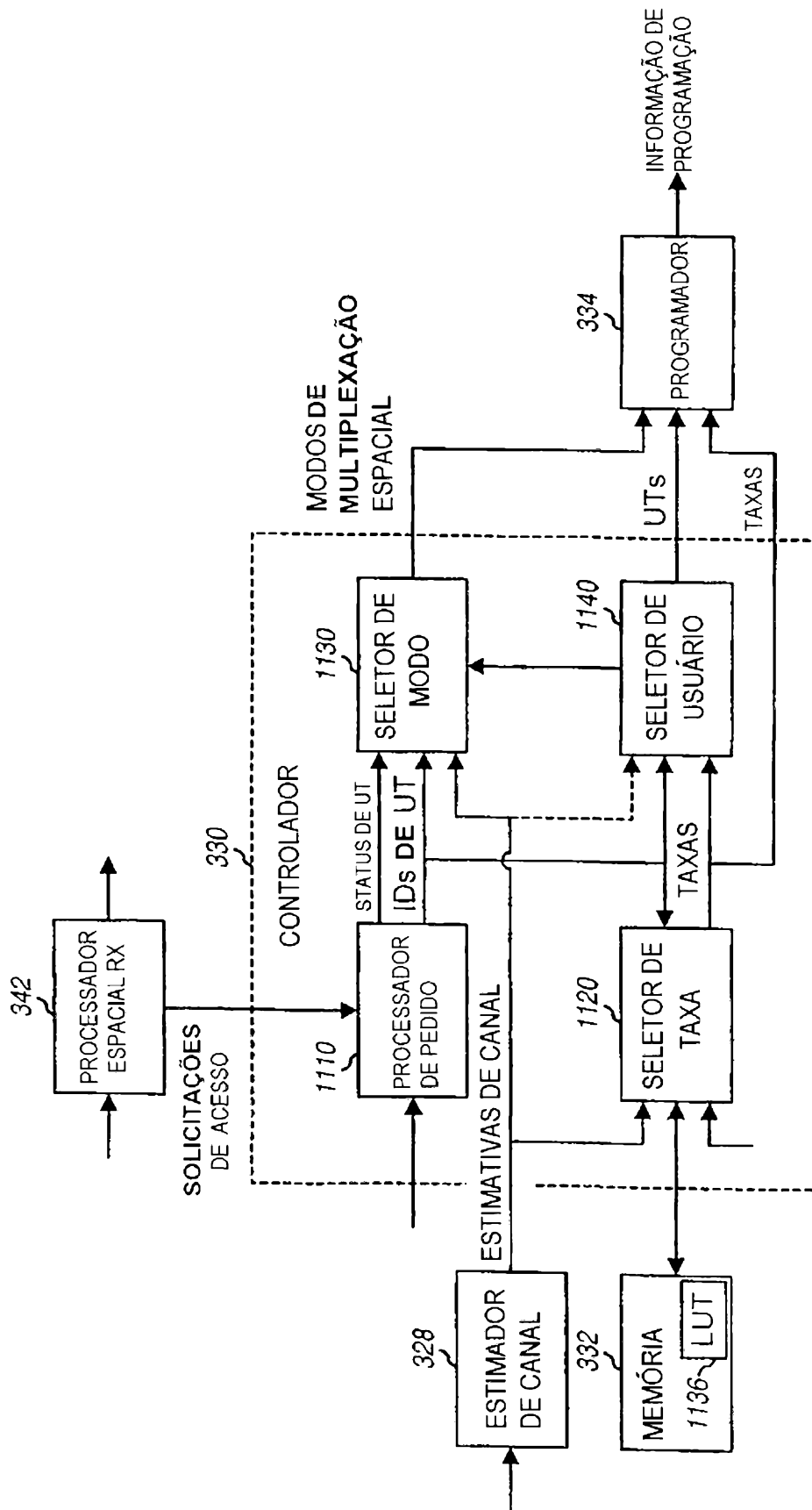


FIG. 11

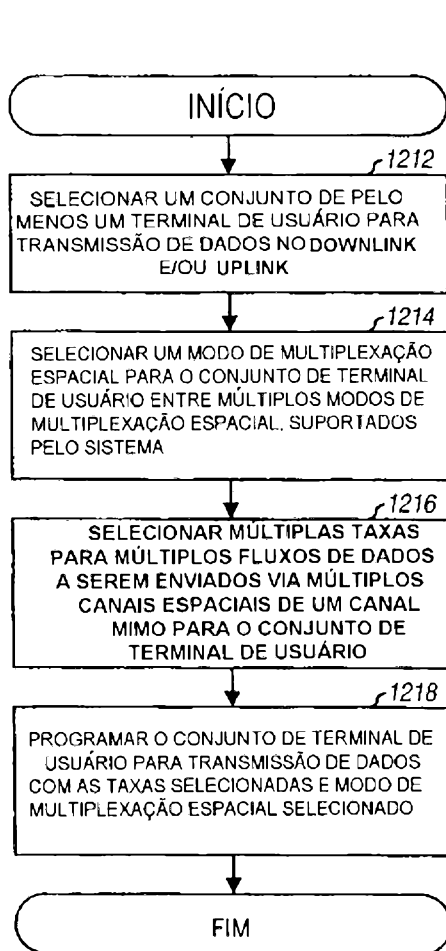


FIG. 12

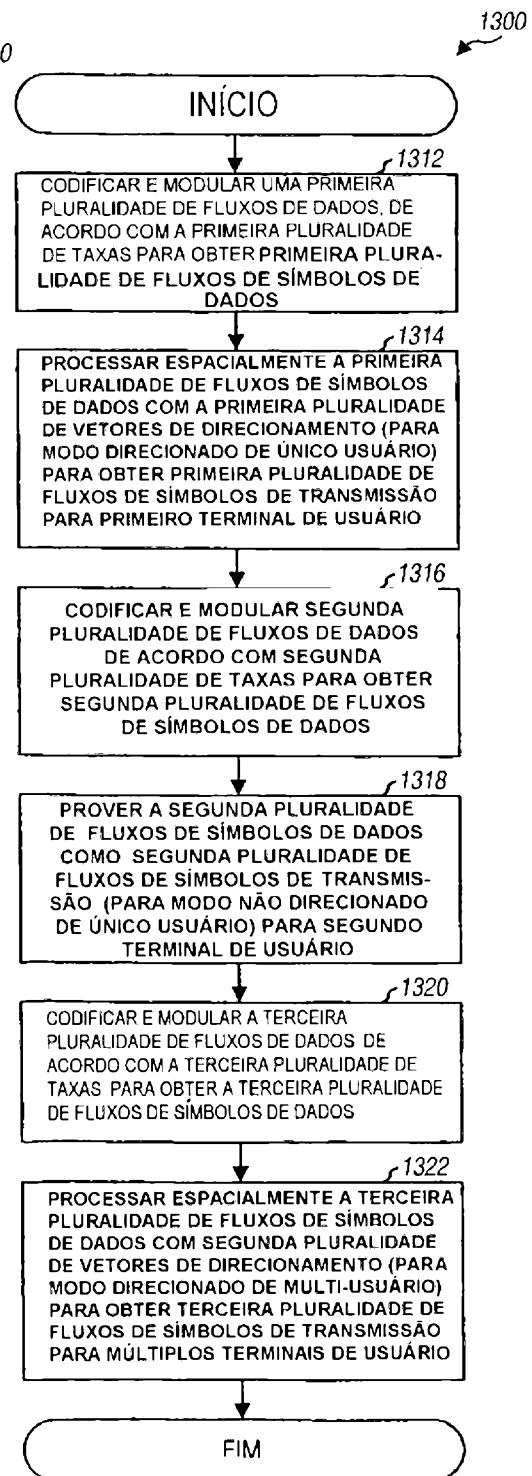


FIG. 13

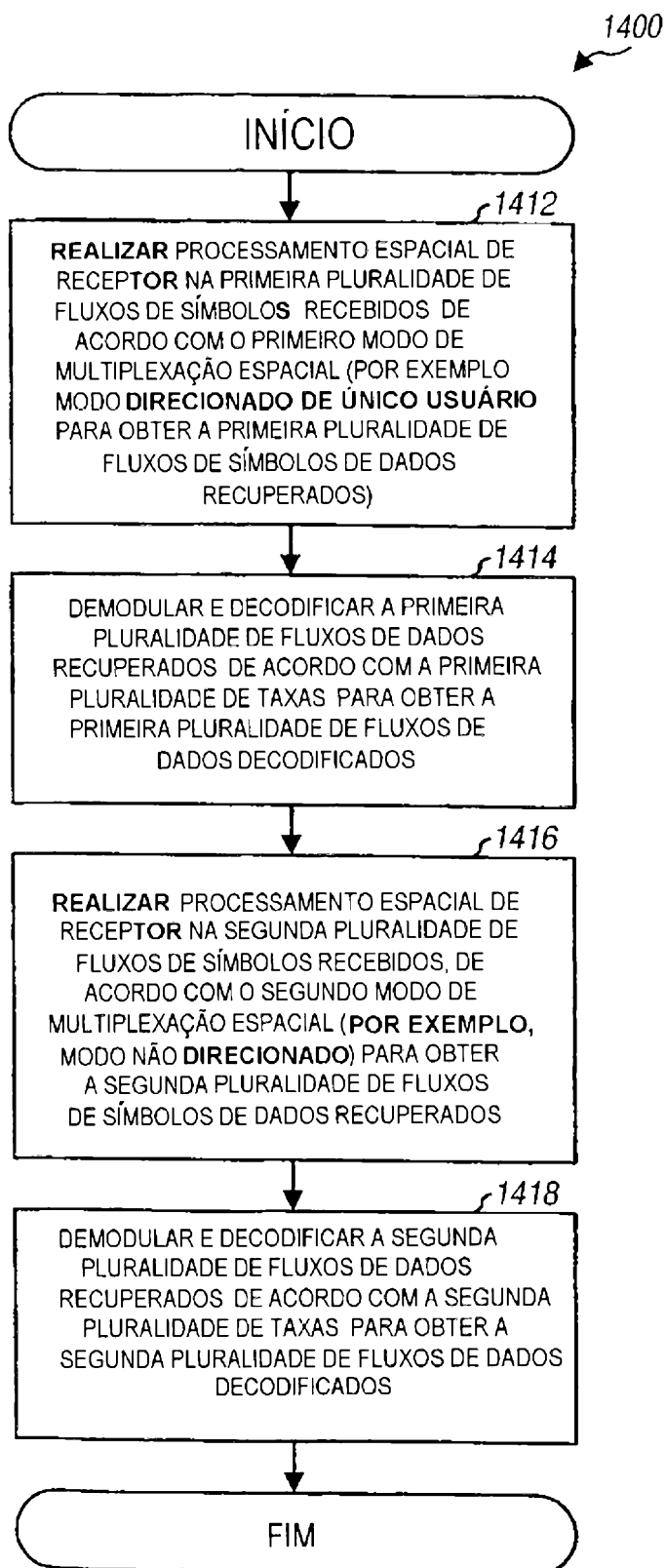


FIG. 14

**RESUMO****"SISTEMA MIMO COM MÚLTIPLOS MODOS DE MULTIPLEXAÇÃO  
ESPACIAL"**

Um sistema MIMO suporta múltiplos modos de  
5 multiplexação espacial para desempenho aperfeiçoado e maior  
flexibilidade. Estes modos podem incluir (1) um modo  
direcionado de único usuário que transmite múltiplos fluxos  
de dados em canais espaciais ortogonais para um único  
receptor, (2) um modo não direcionado de único usuário que  
10 transmite múltiplos fluxos de dados a partir de múltiplas  
antenas para um único receptor sem processamento espacial  
no transmissor, (3) um modo direcionado de multi-usuário  
que transmite múltiplos fluxos de dados simultaneamente  
para múltiplos receptores com processamento espacial em um  
15 transmissor, e (4) um modo não direcionado de multi-usuário  
que transmite múltiplos fluxos de dados a partir de  
múltiplas antenas (co-localizadas ou não co-localizadas),  
sem processamento espacial no(s) transmissor(es) para  
receptor(es), tendo múltiplas antenas. Para cada conjunto  
20 de terminal(is) de usuário selecionado para transmissão de  
dados no downlink e/ou no uplink, um modo de multiplexação  
espacial é selecionado para o conjunto de terminal de  
usuário dentre os modos de multiplexação espacial  
suportados pelo sistema.