



(12) **BẢN MÔ TẢ GIẢI PHÁP HỮU ÍCH THUỘC BẰNG ĐỘC QUYỀN
GIẢI PHÁP HỮU ÍCH**

(19) Cộng hòa xã hội chủ nghĩa Việt Nam (VN)
CỤC SỞ HỮU TRÍ TUỆ

(11) 
2-0002221

(51)⁷ H04L 1/00, H04B 7/0452, 7/08

(13) Y

(21) 2-2019-00294

(22) 13.04.2017

(67) 1-2017-01366

(45) 27.01.2020 382

(43) 26.06.2017 351

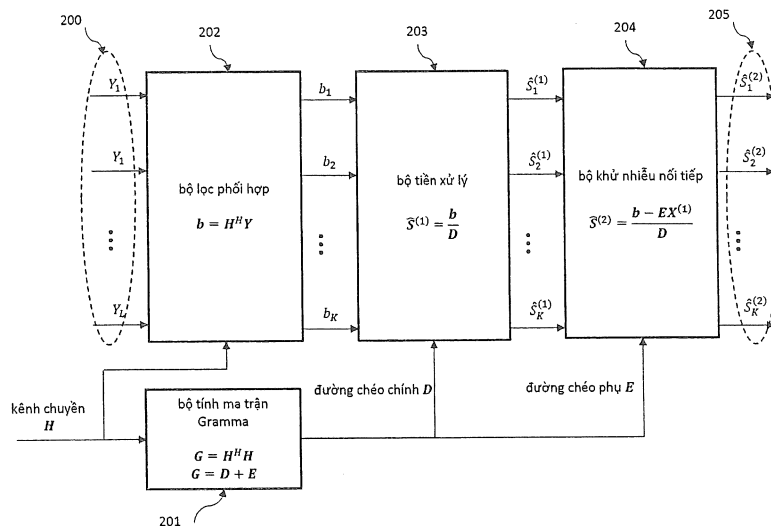
(73) TẬP ĐOÀN CÔNG NGHIỆP - VIỄN THÔNG QUÂN ĐỘI (VIETTEL) (VN)
Số 1 Trần Hữu Dực, phường Mỹ Đình 2, quận Nam Từ Liêm, thành phố Hà Nội

(72) Ngô Hoàng Anh (VN), Trần Minh Hải (VN)

(74) Công ty Luật TNHH quốc tế BMVN (BMVN INTERNATIONAL LLC)

(54) **PHƯƠNG PHÁP GIẢI MÃ TÍN HIỆU ĐA NGƯỜI DÙNG TRONG HỆ THỐNG
MASSIVE MIMO**

(57) Giải pháp hữu ích đề cập đến phương pháp giải mã tín hiệu đa người dùng trong hệ thống Massive MIMO mà không cần sử dụng ma trận nghịch đảo bao gồm i) sử dụng nguyên lý của bộ lọc phối hợp để tăng tỷ số tín hiệu trên tạp âm; ii) khởi tạo giá trị ước lượng cho mỗi người dùng; và iii) tạo kiến trúc nối tiếp để khử nhiễu và cải thiện tín hiệu của mỗi người dùng.



Lĩnh vực kỹ thuật được đề cập

Giải pháp hữu ích liên quan đến việc thiết kế trạm gốc (Base Station) của hệ thống liên lạc không dây 5G sử dụng nhiều ăng-ten hay còn gọi là kỹ thuật MIMO tập hợp lớn - Massive MIMO (multiple input, multiple output). Cụ thể, giải pháp hữu ích đề cập đến phương pháp giải mã tín hiệu đa người dùng trong hệ thống Massive MIMO mà không cần sử dụng ma trận nghịch đảo.

Tình trạng kỹ thuật của giải pháp hữu ích

Để tăng tốc độ chuyển tải dữ liệu giữa người dùng và trạm gốc trong hệ thống liên lạc không dây 5G, nhiều ăng-ten có thể được tích hợp ở trạm gốc và sử dụng kỹ thuật Massive MIMO. Ví dụ, bằng cách sử dụng kỹ thuật Massive MIMO với 64, 128, hoặc 256 ăng-ten, trạm gốc có thể cung cấp tốc độ dữ liệu cao gấp 10 lần tốc độ dữ liệu cung cấp bởi 4G-LTE.

Một trong những thách thức trong việc sử dụng kỹ thuật Massive MIMO là tính toán rất nhiều ma trận nghịch đảo để tách và khôi phục tín hiệu của người dùng. Ví dụ, trong một hệ thống 16 người dùng, có 128 ăng-ten ở trạm gốc, sử dụng điều chế OFDM (Orthogonal Frequency Division Modulation) với 1200 sóng mang cho dữ liệu, yêu cầu xử lý khoảng 2,4 triệu ma trận nghịch đảo/giây. Thiết kế mạch tích hợp IC (Integrated Circuit), hoặc thiết kế FPGA (Field Programmable Gate Array) để tính trực tiếp ma trận nghịch đảo phức tạp, tốn nhiều tài nguyên phần cứng, và trễ xử lý lớn.

Các phương pháp hiện nay để tách và khôi phục tín hiệu của mỗi người dùng được chia làm 3 nhóm:

- Tính trực tiếp ma trận nghịch đảo bằng cách sử dụng thuật toán phân tích QR [1, 2] (QR decomposition), hoặc phân tích Cholesky [3] (Cholesky decomposition)
- Tính xấp xỉ ma trận nghịch đảo: chuỗi đa thức (polynomial expansion), chuỗi Neumann (Neumann series) [4]

- Giải hệ thống phương trình tuyến tính bằng phương pháp lặp: Gradient liên hợp CG (Conjugate Gradient) [5] hoặc CD (Coordinate Descent) [6]

Những phương pháp này có các nhược điểm như sau:

- Phương pháp tính trực tiếp ma trận nghịch đảo bằng cách sử dụng thuật toán phân tích QR [1, 2], hoặc phân tích Cholesky [3] phức tạp và trễ xử lý cao.
- Phương pháp chuỗi đa thức, chuỗi Neuman bậc 1 hoặc 2 đơn giản nhưng độ chính xác không cao. Chuỗi Neuman [4] với bậc 3 có độ chính xác cao, nhưng tính toán phức tạp gần bằng tính trực tiếp ma trận nghịch đảo.
- Phương pháp lặp CG [5] và CD [6] yêu cầu rất nhiều phép toán nhân ở mỗi vòng lặp, số phép nhân tỷ lệ với số ăng-ten ở trạm gốc (64, 128). Phép toán nhân yêu cầu nhiều tài nguyên khi triển khai trên FPGA.

Do đó, cần có một phương pháp giải mã tín hiệu của người dùng một cách đơn giản, tính toán tốc độ cao, không cần sử dụng ma trận nghịch đảo.

Bản chất kỹ thuật của giải pháp hữu ích

Mục đích của giải pháp hữu ích này là tách và khôi phục dữ liệu của các người dùng trong hệ thống Massive MIMO một cách đơn giản, trễ xử lý thấp, không sử dụng ma trận nghịch đảo, dễ dàng thiết kế trên FPGA. Để đạt được mục đích này, giải pháp hữu ích đề xuất phương pháp giải mã tín hiệu đa người dùng trong hệ thống Massive MIMO mà không cần sử dụng ma trận nghịch đảo, phương pháp này bao gồm các bước sau:

- i) sử dụng nguyên lý của bộ lọc phối hợp để tăng tỷ số tín hiệu trên tạp âm;
- ii) khởi tạo giá trị ước lượng cho mỗi người dùng;
- iii) khử nhiễu và cải thiện tín hiệu của mỗi người dùng;

khác biệt ở chỗ trong bước iii), một cấu trúc xử lý nối tiếp bao gồm K khối xử lý nối tiếp giống nhau được tạo ra nhằm khử nhiễu một cách hiệu quả, tín hiệu người dùng k sau khi được cải thiện sẽ được sử dụng ngay để khử nhiễu và cải thiện tín hiệu của người dùng $k + 1$.

Mô tả tóm tắt các hình vẽ

Hình 1 là hình vẽ dạng sơ đồ mô tả phương pháp xử lý tín hiệu của trạm gốc.

Hình 2 là sơ đồ mô tả phương pháp giải mã đa người dùng trong hệ thống Massive MIMO không dùng ma trận nghịch đảo.

Hình 3 là sơ đồ mô tả cấu trúc khử nhiễu nối tiếp.

Mô tả chi tiết giải pháp hữu ích

Tại trạm gốc bao gồm nhiều ăng-ten, tín hiệu đầu vào của mỗi ăng-ten là tổng hợp của nhiều người dùng qua ảnh hưởng của kênh truyền dẫn. Nguyên lý để tách và khôi phục tín hiệu của mỗi người dùng như sau:

- Kết hợp tín hiệu từ các ăng-ten để tăng công suất tín hiệu của người dùng muốn tách. Bước này được thực hiện bằng cách sử dụng một bộ lọc phối hợp. Trạm gốc sử dụng L ăng-ten để thu nhận tín hiệu của người dùng thứ k . Nếu hàm truyền từ người dùng này tới mỗi ăng-ten của trạm gốc được ước lượng, bằng cách nhân tín hiệu ở mỗi ăng-ten với liên hợp phức của hàm truyền rồi cộng tổng tín hiệu tại các nhánh ăng-ten, tỉ số tín hiệu trên tạp âm của người dùng k được tăng lên. Nguyên lý này sẽ được giải thích chi tiết hơn dưới đây.
- Lọc bỏ nhiễu gây ra bởi các người dùng trên tín hiệu mong muốn thông qua các vòng lặp. Bằng cách sử dụng một cấu trúc nối tiếp, tín hiệu của từng người dùng được cải thiện nối tiếp nhau qua các vòng lặp.
- Cấu trúc nối tiếp gồm K bộ tính toán có cấu trúc giống nhau, đơn giản, dễ thực hiện trên phần cứng.
- Thông qua tính toán ma trận Gramma (Gramma matrix), số lượng phép nhân tại mỗi vòng lặp chỉ là 1, nhỏ hơn rất nhiều so với phương pháp CG [5] hay CD [6].

Hình 1 là hình vẽ dạng sơ đồ mô tả kiến trúc xử lý tín hiệu của trạm gốc sử dụng hệ thống OFDM Massive MIMO với K người dùng. Dữ liệu bit của mỗi người dùng được đưa qua bộ mã hóa, ví dụ mã Turbo, sau đó điều chế QAM (quadrature amplitude modulation) như khối 100-1, 100-2,..., 100- K . Đầu ra của bộ điều chế QAM là các mẫu IQ được ký hiệu là $S_1, S_2, \dots, S_K$. Sau khi điều chế OFDM khối 101-1, 101-2,..., 101- K , tín hiệu của mỗi người dùng được phát đi sử

dùng một ăng-ten như ở khối 102. Tín hiệu trên miền thời gian tại các ăng-ten của các người dùng được ký hiệu là $s_1, s_2, \dots, s_K$ như ở khối 101. Tín hiệu OFDM của mỗi người dùng truyền qua kênh truyền vô tuyến và được thu tại L ăng-ten của trạm gốc.

Ở đường lên trạm gốc sử dụng L ăng-ten để thu và tách tín hiệu của K người dùng, ở đường xuống trạm gốc sử dụng L ăng-ten để đồng thời phát tín hiệu cho K người dùng. Ở trạm gốc, tại khối 104, tín hiệu thu trên miền thời gian là $y_1, y_2, \dots, y_L$. Sau khi giải điều chế OFDM, tín hiệu tại các vị trí hoa tiêu (pilot) được đưa vào bộ ước lượng kênh (Channel Estimator) 107-1, 107-2, ..., 107- L . Đầu ra của bộ ước lượng kênh là các vec tơ kênh truyền $H_1, H_2, \dots, H_L$ cùng với tín hiệu giải điều chế OFDM tại vị trí các sóng mang mang dữ liệu là vec tơ Y được đưa vào bộ giải mã đa người dùng Massive-MIMO 107. Bộ giải mã đa người dùng Massive MIMO sẽ tách và khôi phục lại tín hiệu của mỗi người dùng. Đầu ra của bộ giải mã đa người dùng Massive MIMO là các ký hiệu phức $X_1, X_2, \dots, X_K$ được đưa vào bộ giải điều chế QAM và giải mã để khôi phục lại dữ liệu bit ban đầu cho từng người dùng.

Thách thức của hệ thống Massive MIMO đường lên là khối bộ giải mã đa người dùng Massive MIMO sẽ phải tính toán rất nhiều ma trận nghịch đảo trong thời gian ngắn. Ví dụ, một hệ thống OFDM Massive MIMO với 8 người dùng, trạm gốc sử dụng 128 ăng-ten, hệ thống OFDM sử dụng 1200 sóng mang để mang dữ liệu, với kích thước FFT/IFFT là 2048 và tốc độ lấy mẫu 30,72 Mega-mẫu/giây (Mpsps-Mega sample per second), số lượng ma trận nghịch đảo cần phải tính là 2,4 triệu ma trận/giây (Mmps-Milion matrices per second). Thiết kế FPGA để tính trực tiếp 2,4 Mmps là rất phức tạp, và yêu cầu nhiều tài nguyên phần cứng.

Phương pháp giải mã đa người dùng trong hệ thống Massive MIMO sử dụng ma trận nghịch đảo được thực hiện như sau:

Tín hiệu thu ở trạm gốc sau giải điều chế OFDM được biểu diễn bởi phương trình sau:

$$Y = H.S + N \quad (1)$$

$$Y \in \mathbb{C}^{L \times 1}, H \in \mathbb{C}^{L \times K}, S \in \mathbb{C}^{K \times 1}, N \in \mathbb{C}^{L \times 1} \quad (2)$$

$\mathbf{H}$ là ma trận kênh truyền giữa K người dùng và L ăng-ten của trạm gốc, $\mathbf{N}$ ký hiệu nhiễu trắng tại các ăng-ten của trạm gốc. Tín hiệu của K người dùng có thể được khôi phục theo phương pháp ZF (Zero-Forcing) hoặc MMSE (Minimum Mean Square Error) như sau:

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{ZF}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{Y} \quad (3)$$

$$\hat{\mathbf{S}}_{\text{MMSE}} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H} + \sigma^2 \mathbf{I})^{-1} \mathbf{H}^H \mathbf{Y} \quad (4)$$

ký hiệu σ là giá trị phương sai nhiễu (noise variance) của nhiễu tại các ăng-ten thu, $\sigma^2 = E[\mathbf{N}^H \mathbf{N}]$. Phương trình (2) và (3) yêu cầu tính ma trận nghịch đảo $(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$. Mỗi sóng mang đều yêu cầu tính một ma trận nghịch đảo, do đó với hệ thống OFDM 1200 sóng mang, số lượng ma trận nghịch đảo là rất lớn. Phương pháp tính trực tiếp ma trận nghịch đảo là không phù hợp cho triển khai trên phần cứng.

Hình 2 là sơ đồ mô tả phương pháp giải mã đa người dùng trong hệ thống Massive MIMO không dùng ma trận nghịch đảo và được thực hiện như sau:

Tín hiệu thu tại mỗi ăng-ten là tổng hợp tín hiệu của K người dùng, và phương trình 1 có thể được viết lại như sau:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{S}_1 \mathbf{H}_1 + \mathbf{S}_2 \mathbf{H}_2 + \dots + \mathbf{S}_K \mathbf{H}_K + \mathbf{N} \quad (5)$$

$$\mathbf{H}_k = [H_{1k}, H_{2k}, \dots, H_{Lk}]^T \quad (6)$$

ký hiệu $\mathbf{H}_k$ là vec tơ hàm truyền giữa người dùng k và L ăng-ten của trạm thu gốc, H_{lk} là hàm truyền giữa người dùng k và ăng-ten thứ l của trạm thu gốc.

- **Bước 1: Bộ lọc phối hợp (Matched Filter) là khối 202.**

Đầu vào của khối 202 là tín hiệu giải điều chế OFDM tại L nhánh của trạm gốc $Y_1, Y_2, \dots, Y_L$, và hàm truyền ước lượng $\mathbf{H}$, đầu ra là tín hiệu $b_1, b_2, \dots, b_K$. Bộ lọc phối hợp được sử dụng để tăng tỷ số tín hiệu trên tạp âm cho mỗi người dùng. Sử dụng nguyên lý của bộ lọc phối hợp, tỷ số tín hiệu trên tạp âm của người mỗi người dùng được tối ưu như sau.

$$\mathbf{b} = \mathbf{H}^H \mathbf{Y} \quad (7)$$

Ví dụ, cho người dùng thứ k

$$Y_k = ||\mathbf{H}_k||_2^2 S_k + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^K \mathbf{H}_k^* \mathbf{H}_i S_i + \mathbf{H}_k^* \mathbf{N} \quad (8)$$

Khi số lượng ăng-ten ở trạm gốc lớn, và vec tơ kênh truyền của 2 người dùng $\mathbf{H}_u$ và $\mathbf{H}_v$ là không tương quan thì thành phần tạp âm $\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{H}_k^* \mathbf{H}_i S_i$ sẽ tiến tới 0. Do đó phương trình (7) có thể được sử dụng để nâng cao tỷ số tín hiệu trên tạp âm tại phía thu.

• **Bước 2. Khối tiền xử lý (Pre-processor) là khối 203.**

Khối 203 khởi tạo giá trị ước lượng cho tín hiệu của mỗi người dùng như sau

$$\hat{\mathbf{S}}^{(1)} = \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{D}} \quad (9)$$

$$D_k = ||\mathbf{H}_k||_2^2 \quad (10)$$

$\mathbf{D}$ và $\mathbf{E}$ là được tính từ ma trận Gramm như sau

$$\mathbf{G} = \mathbf{H}^H \mathbf{H} \quad (11)$$

$$\mathbf{G} = \mathbf{D} + \mathbf{E} \quad (12)$$

$\mathbf{D}$ là đường chéo chính của ma trận $\mathbf{G}$.

• **Bước 3: Khối khử nhiễu (Interference Canceller) là khối 204.**

Sau khi tín hiệu của mỗi người dùng được ước lượng thô bởi khối tiền xử lý 203, khối 204 thực hiện khử nhiễu như sau

$$\hat{\mathbf{S}}^{(2)} = \frac{\mathbf{b} - \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{S}}^{(1)}}{\mathbf{D}} \quad (13)$$

Để giảm độ phức tạp của khối khử nhiễu 204 và tăng hiệu quả của quá trình khử nhiễu, một cấu trúc tính toán nối tiếp được thiết kế như trên Hình 3. Khối khử nhiễu được thực hiện bởi K bộ xử lý nối tiếp nhau. Sau khi tín hiệu của người dùng 1 được cải thiện, tín hiệu này được đưa vào bộ thứ 2 để cải thiện tín hiệu của người dùng 2,

tương tự cho tới người dùng K . Đầu vào của mỗi bộ xử lý là vec tơ $\mathbf{t}_{K \times 1}$ (với giá trị ban đầu $\mathbf{t} = \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{S}}^{(1)}$) và hệ số b_k , mỗi bộ xử lý sẽ cập nhật tín hiệu cho người dùng và cập nhật vec tơ $\mathbf{t}$ như sau:

$$\hat{\mathbf{S}}_k^{(2)} = \frac{b_k - \mathbf{t}_k}{D_k} \quad (14)$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{t} + (\hat{\mathbf{S}}_k^{(2)} - \hat{\mathbf{S}}_k^{(1)}) \mathbf{E}_k \quad (15)$$

$\mathbf{E}_k$ là cột thứ k của ma trận $\mathbf{E}$. Mỗi bộ xử lý có cấu trúc giống nhau nên dễ dàng cho thiết kế. Kỹ thuật ống dẫn (pipeline) có thể được áp dụng để làm tăng lưu lượng (throughput) của bộ xử lý nối tiếp.

Số lượng phép toán cần thực hiện trong phương pháp giải mã đa người dùng Massive MIMO sử dụng ma trận nghịch đảo được trình bày trong bảng sau:

Bảng 1. Số lượng phép toán khi tính toán trực tiếp ma trận nghịch đảo

	Phương trình	Số phép chia	Số phép nhân	Số phép cộng
Ma trận Gramma	$\mathbf{G} = \mathbf{H}^H \mathbf{H}$	0	$\frac{K^2 L}{2}$	$\frac{K^2 L}{2}$
Bộ lọc phối hợp	$\mathbf{b} = \mathbf{H}^H \mathbf{Y}$	0	KL	KL
Bộ nghịch đảo ma trận	$(\mathbf{G})^{-1}$	0	K^3	K^3
Bộ cân bằng kênh	$\hat{\mathbf{S}} = \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{G}}$	K	0	K
Tổng		K	$K^3 + \frac{K^2 L}{2} + KL$	$K^3 + \frac{K^2 L}{2} + KL + K$

Số lượng phép toán cần để thực hiện trong phương pháp giải mã đa người dùng trong hệ thống Massive MIMO không sử dụng ma trận nghịch đảo theo giải pháp hữu ích được trình bày trong bảng sau:

Bảng 2. Số lượng phép toán khi sử dụng phương pháp đề xuất

	Phương trình	Số phép chia	Số phép nhân	Số phép cộng
Ma trận Gramma	$\mathbf{G} = \mathbf{H}^H \mathbf{H}$	0	$\frac{K^2 L}{2}$	$\frac{K^2 L}{2}$
Bộ tách ma trận	$\mathbf{G} = \mathbf{D} + \mathbf{E}$	0	0	0
Bộ lọc phối hợp	$\mathbf{b} = \mathbf{H}^H \mathbf{Y}$	0	KL	KL
Bộ tiền xử lý	$\hat{\mathbf{S}}^{(1)} = \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{D}}$	K	0	0
Bộ khử nhiễu	$\hat{\mathbf{S}}_k^{(2)} = \frac{b_k - t_k}{D_k}$ $\mathbf{t} = \mathbf{t} + (\hat{\mathbf{S}}_k^{(2)} - \hat{\mathbf{S}}_k^{(1)}) \mathbf{E}_k$	K	K^2	3K
Tổng		2K	$\frac{K^2 L}{2} + K^2 + KL$	$\frac{K^2 L}{2} + KL + 3K$

Như vậy, số lượng phép toán cần để thực hiện trong phương pháp giải mã đa người dùng Massive MIMO không sử dụng ma trận nghịch đảo chỉ là $\left(\frac{K^2 L}{2} + K^2 + KL\right)$ phép nhân thì số lượng phép toán cần thực hiện trong phương pháp giải mã đa người dùng Massive MIMO sử dụng ma trận nghịch đảo là $\left(K^3 + \frac{K^2 L}{2} + KL\right)$ phép nhân.

Ví dụ thực hiện giải pháp hữu ích

Để kiểm tra hiệu quả của phương pháp giải mã trên thực tế, một thiết kế FPGA được thực hiện trên Xilinx System Generator với tham số hệ thống, và kết quả đạt được ở Bảng 3.

Bảng 3. Tham số hệ thống thử nghiệm và kết quả

Tham số hệ thống	
Số lượng ăng-ten ở trạm gốc	64
Số lượng người dùng	4
Kích thước FFT/IFFT của OFDM	2048
Kích thước sóng mang con	15KHz
Số lượng sóng mang con mang dữ liệu	1200
Điều chế	64QAM

Kết quả thiết kế FPGA (Ultrascale FPGA) với clock 100MHz	
Tốc độ xử lý của bộ giải mã Massive-MIMO	25Msps/người dùng
Số lượng ma trận nghịch đảo	3,125 triệu ma trận/giây
Số DSP48 sử dụng	2368
Chú ý: nếu sử dụng phương pháp tính trực tiếp ma trận nghịch đảo thì số DSP48 cần sử dụng là 4352.	

Lợi ích có thể đạt được của giải pháp hữu ích

Phương pháp giải mã tín hiệu đa người dùng trong hệ thống Massive MIMO mà không cần sử dụng ma trận nghịch đảo có độ phức tạp thấp, số lượng phép nhân ít hơn 1 bậc so với tính trực tiếp ma trận nghịch đảo. Phương pháp theo giải pháp hữu ích này đạt được độ chính xác cao hơn các phương pháp chuỗi đa thức, chuỗi Neuman, CG, CD nhờ cấu trúc khử nhiễu nối tiếp. Phương pháp này cũng có thể được thực hiện bằng cấu trúc xử lý song song (pipeline) để hỗ trợ tính toán tốc độ cao (high-throughput). Cấu trúc xử lý nối tiếp gồm K khối giống nhau cho hiệu quả cao, dễ dàng cho thiết kế phần cứng.

YÊU CẦU BẢO HỘ

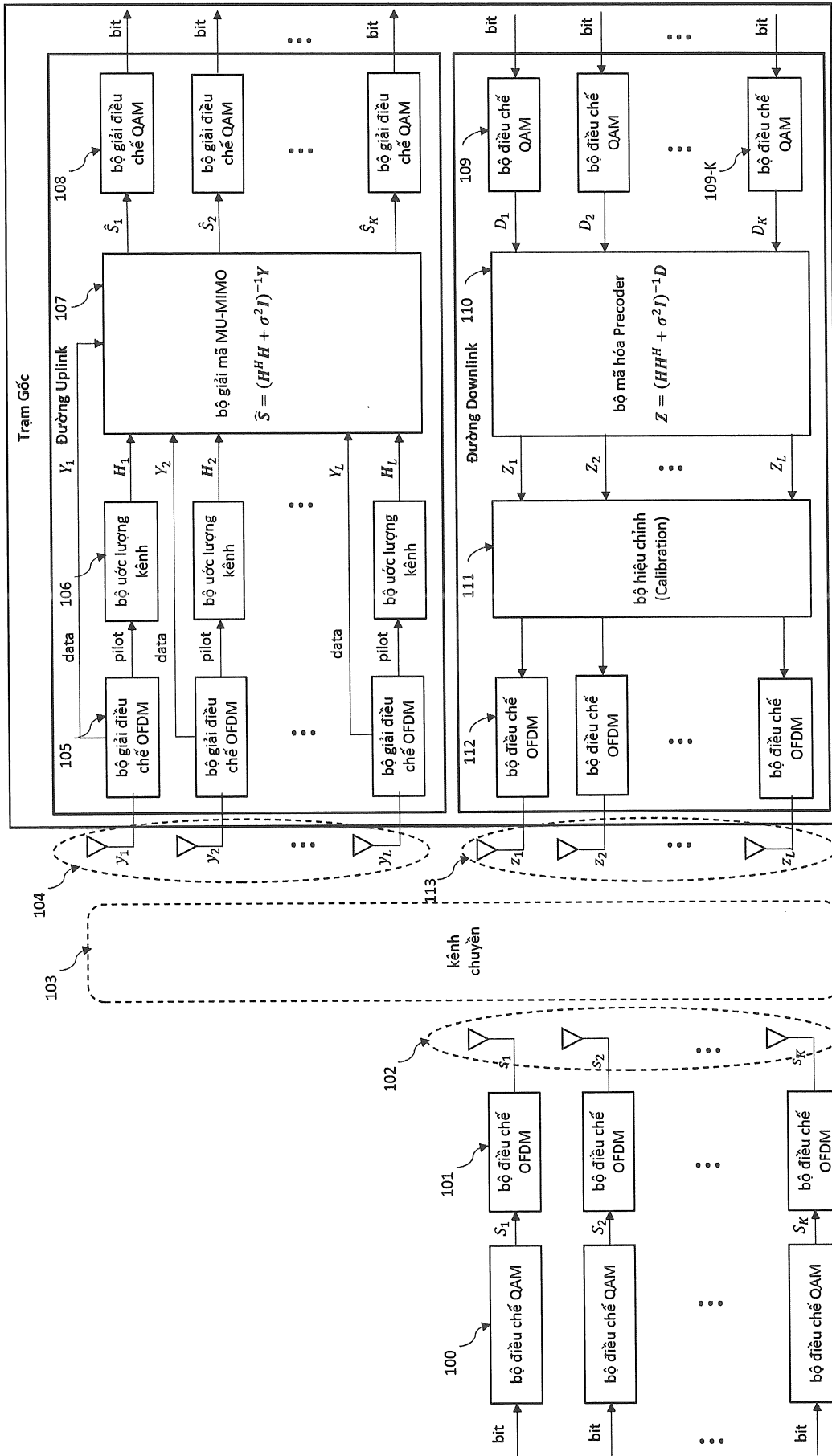
1. Phương pháp giải mã tín hiệu đa người dùng trong hệ thống Massive MIMO mà không cần sử dụng ma trận nghịch đảo, phương pháp này bao gồm các bước sau:

i) sử dụng nguyên lý của bộ lọc phối hợp để tăng tỷ số tín hiệu trên tạp âm;

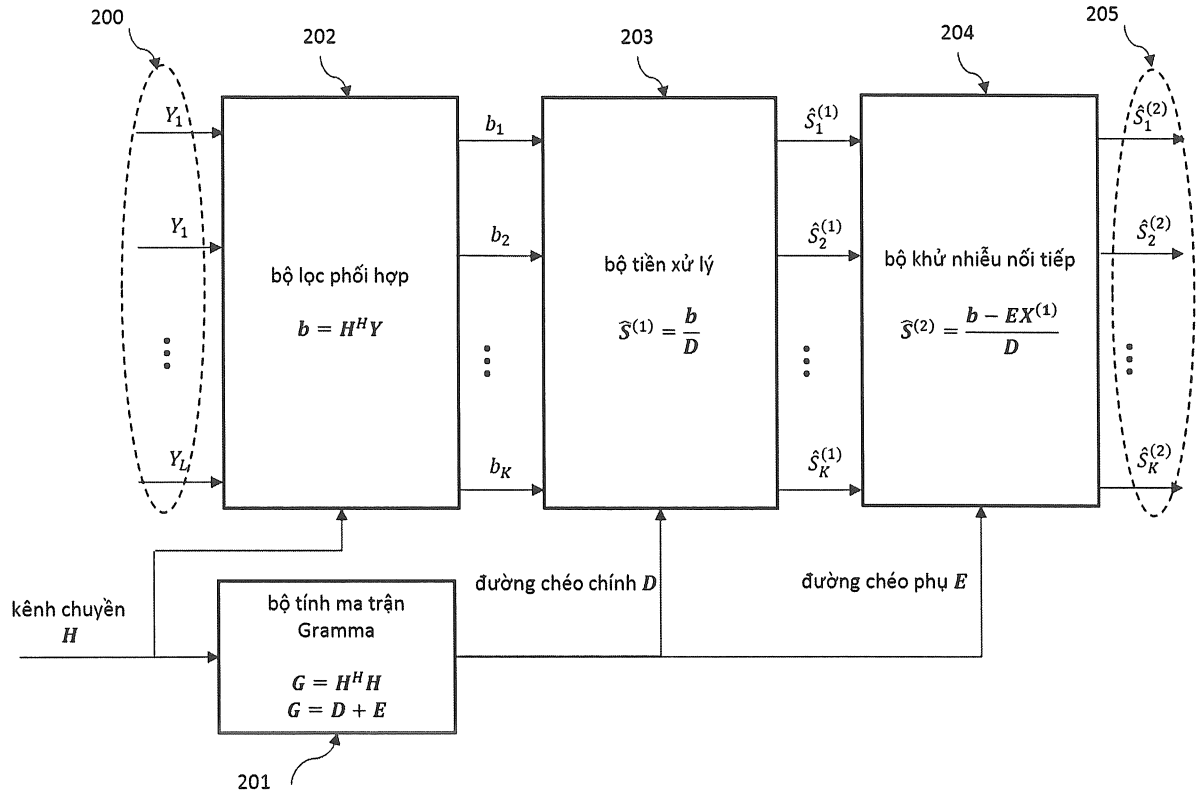
ii) khởi tạo giá trị ước lượng cho mỗi người dùng; và

iii) khử nhiễu và cải thiện tín hiệu của mỗi người dùng;

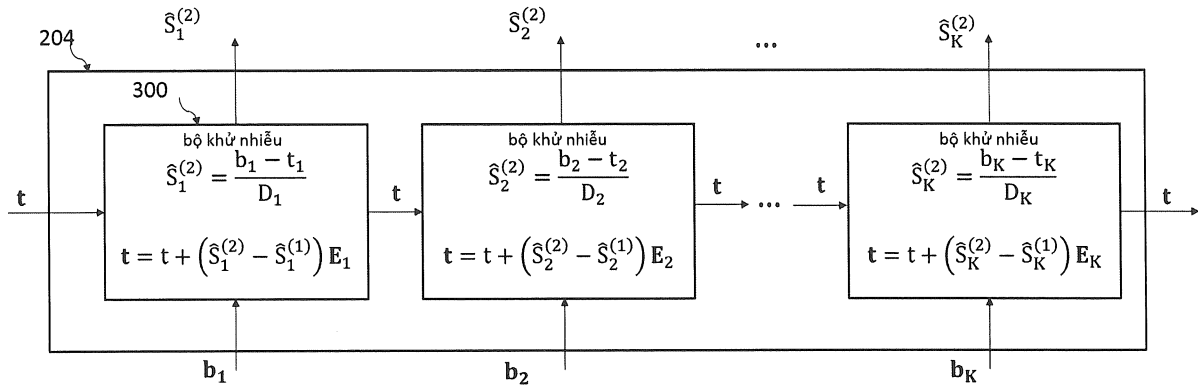
khác biệt ở chỗ, trong bước iii), một cấu trúc xử lý nối tiếp bao gồm K khối xử lý nối tiếp giống nhau được tạo ra nhằm khử nhiễu một cách hiệu quả, tín hiệu người dùng k sau khi được cải thiện sẽ được sử dụng ngay để khử nhiễu và cải thiện tín hiệu của người dùng $k + 1$.



Hình 1



Hình 2



Hình 3