(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0015308
(43) 공개일자 2022년02월08일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04B 7/0413 (2017.01) *H04B 7/06* (2017.01)
H04L 25/02 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H04B 7/0413 (2013.01)
H04B 7/0663 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0040722
(22) 출원일자 2021년03월29일
심사청구일자 없음
(30) 우선권주장
1020200095409 2020년07월30일 대한민국(KR)

(71) 출원인
삼성전자주식회사
경기도 수원시 영통구 삼성로 129 (매탄동)
고려대학교 산학협력단
서울특별시 성북구 안암로 145, 고려대학교 (안암동5가)
(72) 발명자
이권종
경기도 수원시 영통구 삼성로 129
노광석
서울특별시 성북구 안암로 145
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
이건주, 김정훈

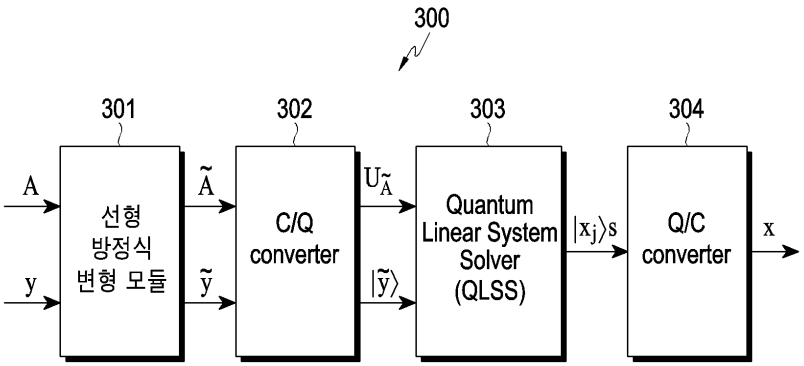
전체 청구항 수 : 총 32 항

(54) 발명의 명칭 **MIMO 시스템에서 양자 컴퓨팅을 이용한 신호 검출 방법 및 장치**

(57) 요 약

다중입력 다중출력을 지원하는 무선 통신 시스템에서의 신호 검출 방법에 있어서, 송신단과 수신단 사이의 MIMO 채널 행렬과 상기 수신단에 의해 수신된 수신벡터를 획득하는 과정과, 상기 송신단의 변조 방식을 확인하는 과정과, 상기 확인된 변조 방식에 따라 기설정된 방정식 변형 방식을 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터에 적용하는 과정과, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터에 대해 양자 계산을 수행하여 상기 송신단의 송신벡터를 검출하는 과정을 포함한다.

대 표 도 - 도3



(52) CPC특허분류
H04L 25/0242 (2013.01)
(72) 발명자
박정훈
서울특별시 성북구 안암로 145
허준
서울특별시 성북구 안암로 145

명 세 서

청구범위

청구항 1

다중입력 다중출력(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)을 지원하는 무선 통신 시스템에서의 신호 검출(detection) 방법에 있어서,

송신단과 수신단 사이의 MIMO 채널 행렬과 상기 수신단에 의해 수신된 수신벡터를 획득하는 과정;

상기 송신단의 변조 방식을 확인하는 과정;

상기 확인된 변조 방식에 따라 기설정된 방정식 변형 방식을 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터에 적용하는 과정;

상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터에 대해 양자 계산을 수행하여 상기 송신단의 송신벡터를 검출하는 과정을 포함하는 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 변형된 MIMO 채널 행렬은, 상기 MIMO 채널 행렬에 상기 MIMO 채널 행렬의 크기를 나타내는 값과 구하고자 하는 송신벡터 성분의 위치에 따라 정의되는 적어도 2개의 행들과 열들을 추가함으로써 생성되며,

상기 변형된 수신벡터는, 상기 수신벡터에 상기 수신벡터의 크기를 나타내는 값과 0을 포함하는 적어도 2개의 성분들을 추가함으로써 생성됨을 특징으로 하는 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 변조 방식은 BPSK(binary phase shift keying) 변조 방식, QPSK(quadrature phase shift keying) 변조 방식, MPSK(M-ary phase shift keying) 변조 방식, 또는 QAM(quadrature amplitude modulation) 변조 방식 중 어느 하나이고,

여기서, M은 2이상의 2의 거듭제곱임을 특징으로 하는 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 변조 방식이 BPSK 변조 방식인 경우, 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같음을 특징으로 하는 방법,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} & A & & & O & \\ & & & & & \\ 0 & & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & -N\,0 & \cdots & 0 \quad 0 \quad 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \\ N \\ 0 \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, N

은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O는 크기가 $N \times 2$인 영행렬을 나타내고, $\tilde{A}$에서 $-N$은 x_j에 대해 j번째 열에 위치함.

청구항 5

제3항에 있어서,

상기 변조 방식이 QPSK 변조 방식인 경우, 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신 벡터는 상기 송신벡터의 실수부 성분을 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 방법,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} A & O & O & O \\ O & \overline{A} & & \\ 0\cdots0 \;\; 0 \;\; 0\cdots0 & 0\cdots0 \;\; 0 \;\; 0\cdots0 & 1 & 0 \\ 0\cdots0 \;\; -N \; 0\cdots0 & 0\cdots0 \;\; -N \; 0\cdots0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \tilde{y} = \begin{pmatrix} y \\ \overline{y} \\ N \\ 0 \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $\overline{A}$는 A의 복소공액 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 상기 수신벡터를 나타내고, $\bar{y}$는 y의 복소공액 행렬을 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1, O_2는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, O_3는 크기가 $2N \times 2$인 영행렬을 나타내고, $\tilde{A}$에서 2개의 $-N$은 x_j에 대해 각각 j 및 $N + j$번째 열에 위치함.

청구항 6

제3항에 있어서,

상기 변조 방식이 QPSK 변조 방식인 경우, 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신 벡터는 상기 송신벡터의 허수부 성분을 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 방법,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} A & O & O & O \\ O & \overline{A} & & \\ 0\cdots0 \;\; 0 \;\; 0\cdots0 & 0\cdots0 \;\; 0 \;\; 0\cdots0 & 1 & 0 \\ 0\cdots0 \;\; -N \; 0\cdots0 & 0\cdots0 \;\; N \; 0\cdots0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \tilde{y} = \begin{pmatrix} y \\ \overline{y} \\ N \\ 0 \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $\overline{A}$는 A의 복소공액 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 상기 수신벡터를 나타내고, $\bar{y}$는 y의 복소공액 행렬을 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1, O_2 은 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, O_3는 크기가 $2N \times 2$인 영행렬을 나타내고, $\tilde{A}$에서 $-N$ 및 N은 x_j에 대해 각각 j 및 $N + j$번째 열에 위치함.

청구항 7

제3항에 있어서,

상기 변조 방식이 MPSK 변조 방식인 경우, 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 MIMO 채널 행렬

및 수신벡터는 하기의 수학식과 같음을 특징으로 하는 방법,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} I_N & & & & \\ \mathcal{O} & A & & & \\ & Y & A & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & Y & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Omega & & & & \\ & \Omega & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \Omega & \\ & & & & \Omega \end{pmatrix}, \quad \tilde{y} = \begin{pmatrix} J \\ y \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, $\mathcal{O}$는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, Y는 번째 열만 $-y$인 $N \times N$ 행렬을 나타내고, $\Omega = \mathrm{diag}(1, \ldots, 1, N^{-1}, 1, \ldots, 1)$는 번째 항이 N^{-1}인 $N \times N$ 대각 행렬을 나타내고, I_N은 크기가 $N \times N$인 항등 행렬이고, $J = (1 \quad \cdots \quad 1)^T$을 나타내고, $\tilde{A}$는 크기가 $MN \times MN$인 행렬을 나타내고, $\tilde{y}$는 길이가 MN인 열벡터를 나타냄.

청구항 8

제1항에 있어서, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터에 대해 양자 계산을 수행하는 과정은,

상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 양자화하는 과정;

상기 양자화된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터에 양자 알고리즘을 적용하는 과정; 및

상기 양자 알고리즘을 적용한 결과를 디지털화하여 상기 송신벡터를 검출하는 과정을 포함함을 특징으로 하는 방법.

청구항 9

제3항에 있어서, 상기 변조 방식이 QAM 변조 방식인 경우, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터에 대해 양자 계산을 수행하는 과정은,

상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터에 대해 양자 계산을 수행하여 상기 송신벡터와 관련된 사전 정보를 획득하는 과정; 및

상기 사전 정보를 기반으로 상기 송신 벡터를 검출하는 과정을 포함하되,

상기 사전 정보는 상기 송신벡터의 크기, 상기 송신벡터의 개별 성분의 크기, 및 상기 송신벡터의 상기 개별 성분의 위상 중 적어도 하나를 포함함을 특징으로 하는 방법.

청구항 10

제9항에 있어서, 상기 사전 정보에 포함된 상기 송신벡터의 크기를 구하기 위한 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같음을 특징으로 하는 방법,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 1 & O_1 \\ O_2 & A \end{pmatrix}, \quad \tilde{y} = \begin{pmatrix} N \\ y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1 은 크기가 $1 \times N$인 영행렬을 나타내고, O_2는 크기가 $N \times 1$인 영행렬을 나타냄.

청구항 11

제9항에 있어서, 상기 사전 정보에 포함된 상기 송신벡터의 상기 개별 성분의 크기를 구하기 위한 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터는 상기 송신벡터의 실수부 성분의 크기를 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 방법,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \cdots 0 & -N\,0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 & -N\,0 \cdots 0 \\ O_1 & & A & & O_2 \\ O_1 & & O_2 & & \overline{A} \end{pmatrix}, \tilde{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1 은 크기가 $N \times 1$인 영행렬을 나타내고, O_2는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 각각 A와 y의 복소공액 행렬을 나타내고, $\tilde{A}$에서 2개의 $-N$은 x_j에 대해 각각 i 및 $N + j$번째 열에 위치함.

청구항 12

제9항에 있어서, 상기 사전 정보에 포함된 상기 송신벡터의 상기 개별 성분의 크기를 구하기 위한 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터는 상기 송신벡터의 허수부 성분의 크기를 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 방법,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 2i & 0 \cdots 0 & -N\,0 \cdots 0 & 0 \cdots 0\,N\,0 \cdots 0 \\ O_1 & & A & O_2 \\ O_1 & & O_2 & \overline{A} \end{pmatrix}, \tilde{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1 은 크기가 $N \times 1$인 영행렬을 나타내고, O_2는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 각각 A와 y의 복소공액 행렬을 나타내고, $\tilde{A}$에서 $-N$ 및 N은 x_j에 대해 각각 i 및 $N + j$번째 열에 위치함.

청구항 13

제9항에 있어서, 상기 사전 정보에 포함된 상기 송신벡터의 상기 개별 성분의 위상을 구하기 위한 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터는 상기 송신벡터의 실수부 성분의 부호를 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 방법,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} N^{-1} & & \\ & I_{2N} & \\ & & A' \end{pmatrix}, \ \tilde{y} = \begin{pmatrix} 1 \\ \mathcal{O} \\ y' \end{pmatrix}$$

여기서 I_{2N}은 크기가 $2N \times 2N$인 항등행렬을 나타내고, $\mathcal{O}$는 크기가 $2N \times 1$인 영행렬을 나타내고, A' 및 y'는 각각

$$A' = \begin{pmatrix} 2|s_j| & 0 \cdots 0 \ -N \ 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 \ -N \ 0 \cdots 0 \\ \mathcal{O}_1 & A & \mathcal{O}_2 \\ \mathcal{O}_1 & \mathcal{O}_2 & \overline{A} \end{pmatrix}, \ y' = \begin{pmatrix} 1 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

을 나타내고, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \ \cdots \ y_N)^T$는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, $\mathcal{O}_1$은 크기가 $N \times 1$인 영행렬을 나타내고, $\mathcal{O}_2$는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 각각 A와 y의 복소공액 행렬을 나타내고, A'에서 두 개의 $-N$은 s_j에 대해 각각 i 및 $N+j$번째 열에 위치함.

청구항 14

제9항에 있어서, 상기 사전 정보에 포함된 상기 송신벡터의 상기 개별 성분의 위상을 구하기 위한 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터는 상기 송신벡터의 허수부 성분의 부호를 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 방법,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} N^{-1} & & \\ & I_{2N} & \\ & & A' \end{pmatrix}, \ \tilde{y} = \begin{pmatrix} 1 \\ \mathcal{O} \\ y' \end{pmatrix}$$

여기서 I_{2N}은 크기가 $2N \times 2N$인 항등행렬을 나타내고, $\mathcal{O}$는 크기가 $2N \times 1$인 영행렬을 나타내고, A' 및 y'는 각각

$$A' = \begin{pmatrix} 2i|t_j| & 0 \cdots 0 \ -N \ 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 \ N \ 0 \cdots 0 \\ \mathcal{O}_1 & A & \mathcal{O}_2 \\ \mathcal{O}_1 & \mathcal{O}_2 & \overline{A} \end{pmatrix}, \ y' = \begin{pmatrix} 1 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

을 나타내고, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \ \cdots \ y_N)^T$는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, $\mathcal{O}_1$은 크기가 $N \times 1$인 영행렬을 나타내고, $\mathcal{O}_2$는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 각각 A와 y의 복소공액 행렬을 나타내고, A'에서 $-N$과 N은 t_j에 대해 각각 i 및 $N+j$번째 열에 위치함.

청구항 15

제7항에 있어서, 상기 양자 알고리즘은 Harrow-Hassidim-Lloyd(HHL) 알고리즘을 포함함을 특징으로 하는 방법.

청구항 16

제1항에 있어서,

상기 수신단으로부터 상기 송신단의 변조 방식에 대한 정보를 수신하는 과정을 더 포함함을 특징으로 하는 방법.

청구항 17

다중입력 다중출력(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)을 지원하는 무선 통신 시스템에서 양자계산센터에 있어서,

송신단과 수신단 사이의 MIMO 채널 행렬과 상기 수신단에 의해 수신된 수신벡터를 획득하도록 구성된 네트워크 인터페이스부; 및

상기 송신단의 변조 방식을 확인하고, 상기 확인된 변조 방식에 따라 기설정된 방정식 변형 방식을 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터에 적용하고, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터에 대해 양자 계산을 수행하여 상기 송신단의 송신벡터를 검출하는 프로세서를 포함하는 양자계산센터.

청구항 18

제17항에 있어서,

상기 변형된 MIMO 채널 행렬은, 상기 MIMO 채널 행렬에 상기 MIMO 채널 행렬의 크기를 나타내는 값과 구하고자 하는 송신벡터 성분의 위치에 따라 정의되는 적어도 2개의 행들과 열들을 추가함으로써 생성되며,

상기 변형된 수신벡터는, 상기 수신벡터에 상기 수신벡터의 크기를 나타내는 값과 0을 포함하는 적어도 2개잇 성분들을 추가함으로써 생성됨을 특징으로 하는 양자계산센터.

청구항 19

제17항에 있어서,

상기 변조 방식은 BPSK(binary phase shift keying) 변조 방식, QPSK(quadrature phase shift keying) 변조 방식, MPSK(M-ary phase shift keying) 변조 방식, 또는 QAM(quadrature amplitude modulation) 변조 방식 중 어느 하나임을 특징으로 하는 양자계산센터.

청구항 20

제19항에 있어서,

상기 변조 방식이 BPSK 변조 방식인 경우, 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같음을 특징으로 하는 양자계산센터,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} & A & & O \\ & & & \\ 0 & \cdots & 0 & 0\ 1\ 0 \\ 0 & \cdots & 0\ -N\ 0 & \cdots\ 0\ 0\ 1 \end{pmatrix},\ \tilde{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \\ N \\ 0 \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, 0는 크기가 $N \times 2$인 영행렬을 나타내고, $\tilde{A}$에서 $-N$은 x_j에 대해 j번째 열에 위치함.

청구항 21

제19항에 있어서,

상기 변조 방식이 QPSK 변조 방식인 경우, 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신 벡터는 상기 송신벡터의 실수부 성분을 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 양자계산센터,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} A & & \overline{O} & & O \\ O & & \overline{A} & & \\ 0\cdots 0\ \ 0\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0\ \ 0 & 0\ 0\cdots 0 & 1\ 0 \\ 0\cdots 0\ -N\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0\ -N & 0\cdots 0 & 0\ 2 \end{pmatrix},\ \tilde{y} = \begin{pmatrix} y \\ \overline{y} \\ N \\ 0 \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $\overline{A}$는 A의 복소공액 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, $\overline{y}$는 y의 복소공액 행렬을 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1, O_2는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, O_3는 크기가 $2N \times 2$인 영행렬을 나타내고, $\tilde{A}$에서 2개의 $-N$은 x_j에 대해 각각 j 및 $N + j$번째 열에 위치함.

청구항 22

제19항에 있어서,

상기 변조 방식이 QPSK 변조 방식인 경우, 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신 벡터는 상기 송신벡터의 허수부 성분을 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 양자계산센터,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} A & & \overline{O} & & O \\ O & & \overline{A} & & \\ 0\cdots 0\ \ 0\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0\ \ 0 & 0\ 0\cdots 0 & 1\ 0 \\ 0\cdots 0\ -N\ 0\cdots 0 & 0\cdots 0\ \ N & 0\cdots 0 & 0\ 2 \end{pmatrix},\ \tilde{y} = \begin{pmatrix} y \\ \overline{y} \\ N \\ 0 \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $\overline{A}$는 A의 복소공액 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, $\overline{y}$는 y의 복소공액 행렬을 나타내고, N은 송신단

및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1, O_2 은 크기가 $N \times N$ 인 영행렬을 나타내고, O_3는 크기가 $2N \times 2$ 인 영행렬을 나타내고, $\tilde{A}$ 에서 $-N$ 및 N 은 x_j 에 대해 각각 j 및 $N+j$ 번째 열에 위치함.

청구항 23

제19항에 있어서,

상기 변조 방식이 MPSK 변조 방식인 경우, 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터는 하기의 수학식과 같음을 특징으로 하는 양자계산센터,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} I_N & & & & \\ O & A & & & \\ & Y & A & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & Y & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Omega & & & & \\ & \Omega & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \Omega & \\ & & & & \Omega \end{pmatrix}, \quad \tilde{y} = \begin{pmatrix} J \\ y \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, N 은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O는 크기가 $N \times N$ 인 영행렬을 나타내고, Y는 i번째 열만 $-y_i$ 인 $N \times N$ 행렬을 나타내고, $\Omega = \mathrm{diag}(1, \ldots, 1, N^{-1}, 1, \ldots, 1)$ 는 i번째 항이 N^{-1} 인 $N \times N$ 대각 행렬을 나타내고, I_N 은 크기가 $N \times N$ 인 항등 행렬이고, $J = (1 \quad \cdots \quad 1)^T$ 을 나타내고, $\tilde{A}$는 크기가 $MN \times MN$ 인 행렬을 나타내고, $\tilde{y}$ 는 길이가 MN 인 열벡터를 나타냄.

청구항 24

제17항에 있어서, 상기 프로세서는,

상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 양자화하고, 상기 양자화된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터에 양자 알고리즘을 적용하고, 상기 양자 알고리즘을 적용한 결과를 디지털화하여 상기 송신벡터를 검출하도록 구성됨을 특징으로 하는 양자계산센터.

청구항 25

제19항에 있어서, 상기 변조 방식이 QAM 변조 방식인 경우, 상기 프로세서는,

상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터에 대해 양자 계산을 수행하여 상기 송신벡터와 관련된 사전 정보를 획득하고, 상기 사전 정보를 기반으로 상기 송신 벡터를 검출하되,

상기 사전 정보는 상기 송신벡터의 크기, 상기 송신벡터의 개별 성분의 크기, 및 상기 송신벡터의 상기 개별 성분의 위상 중 적어도 하나를 포함함을 특징으로 하는 양자계산센터.

청구항 26

제25항에 있어서, 상기 사전 정보에 포함된 상기 송신벡터의 크기를 구하기 위한 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같음을 특징으로 하는 양자계

산센터,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 1 & O_1 \\ O_2 & A \end{pmatrix},\ \tilde{y} = \begin{pmatrix} N \\ y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1 은 크기가 $1 \times N$인 영행렬을 나타내고, O_2는 크기가 $N \times 1$인 영행렬을 나타냄.

청구항 27

제25항에 있어서, 상기 사전 정보에 포함된 상기 송신벡터의 상기 개별 성분의 크기를 구하기 위한 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터는 상기 송신벡터의 실수부 성분의 크기를 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 양자계산센터,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \cdots 0 & -N\, 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 & -N\, 0 \cdots 0 \\ O_1 & A & & O_2 & \\ O_1 & O_2 & & \overline{A} & \end{pmatrix},\ \tilde{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1 은 크기가 $N \times 1$인 영행렬을 나타내고, O_2는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 각각 A와 y의 복소공액 행렬을 나타내고, $\tilde{A}$에서 2개의 $-N$은 x_j에 대해 각각 j 및 $N + j$번째 열에 위치함.

청구항 28

제25항에 있어서, 상기 사전 정보에 포함된 상기 송신벡터의 상기 개별 성분의 크기를 구하기 위한 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터는 상기 송신벡터의 허수부 성분의 크기를 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 양자계산센터,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 2i & 0 \cdots 0 & -N\, 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0\, N\, 0 \cdots 0 \\ O_1 & A & & O_2 \\ O_1 & O_2 & & \overline{A} \end{pmatrix},\ \tilde{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

여기서, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1 은 크기가 $N \times 1$인 영행렬을 나타내고, O_2는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 각각 A와 y의 복소공액 행렬을 나타내고, $\tilde{A}$에서 $-N$ 및 N은

x_j에 대해 각각 i 및 $N+j$번째 열에 위치함.

청구항 29

제25항에 있어서, 상기 사전 정보에 포함된 상기 송신벡터의 상기 개별 성분의 위상을 구하기 위한 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터는 상기 송신벡터의 실수부 성분의 부호를 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 양자계산센터,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} N^{-1} & & \\ & I_{2N} & \\ & & A' \end{pmatrix}, \ \tilde{y} = \begin{pmatrix} 1 \\ \mathcal{O} \\ y' \end{pmatrix}$$

여기서 I_{2N}은 크기가 $2N \times 2N$인 항등행렬을 나타내고, $\mathcal{O}$는 크기가 $2N \times 1$인 영행렬을 나타내고, A' 및 y'는 각각

$$A' = \begin{pmatrix} 2|s_j| & 0 \cdots 0 \ -N \ 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 \ -N \ 0 \cdots 0 \\ \mathcal{O}_1 & A & \mathcal{O}_2 \\ \mathcal{O}_1 & \mathcal{O}_2 & \overline{A} \end{pmatrix}, \ y' = \begin{pmatrix} 1 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

을 나타내고, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \ \cdots \ y_N)^T$는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, $\mathcal{O}_1$은 크기가 $N \times 1$인 영행렬을 나타내고, $\mathcal{O}_2$는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 각각 A와 y의 복소공액 행렬을 나타내고, A'에서 두 개의 $-N$은 s_j에 대해 각각 i 및 $N+j$번째 열에 위치함.

청구항 30

제25항에 있어서, 상기 사전 정보에 포함된 상기 송신벡터의 상기 개별 성분의 위상을 구하기 위한 상기 기설정된 방정식 변형 방식을 이용하여 변형된 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터는 하기의 수학식과 같으며, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터는 상기 송신벡터의 허수부 성분의 부호를 구하는데 사용됨을 특징으로 하는 양자계산센터,

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} N^{-1} & & \\ & I_{2N} & \\ & & A' \end{pmatrix}, \ \tilde{y} = \begin{pmatrix} 1 \\ \mathcal{O} \\ y' \end{pmatrix}$$

여기서 I_{2N}은 크기가 $2N \times 2N$인 항등행렬을 나타내고, $\mathcal{O}$는 크기가 $2N \times 1$인 영행렬을 나타내고, A' 및 y'는 각각

$$A' = \begin{pmatrix} 2i|t_j| & 0 \cdots 0 \ -N \ 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 \ N \ 0 \cdots 0 \\ \mathcal{O}_1 & A & \mathcal{O}_2 \\ \mathcal{O}_1 & \mathcal{O}_2 & \overline{A} \end{pmatrix}, \ y' = \begin{pmatrix} 1 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

을 나타내고, A는 상기 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $y = (y_1 \ \cdots \ y_N)^T$는 상기 수신벡터를 나타내고, N은 송신

단 및 수신단의 안테나 개수를 나타내고, O_1은 크기가 $N \times 1$인 영행렬을 나타내고, O_2는 크기가 $N \times N$인 영행렬을 나타내고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 각각 A와 y의 복소공액 행렬을 나타내고, A'에서 $-N$과 N은 t_j에 대해 각각 i 및 $N+j$번째 열에 위치함.

청구항 31

제24항에 있어서, 상기 양자 알고리즘은 Harrow-Hassidim-Lloyd(HHL) 알고리즘을 포함함을 특징으로 하는 양자계산센터.

청구항 32

제17항에 있어서, 상기 프로세서는,

상기 수신단으로부터 상기 송신단의 변조 방식에 대한 정보를 수신하도록 상기 네트워크 인터페이스부를 제어함을 특징으로 하는 양자계산센터.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 개시는 다중입력 다중출력(Multiple-Input Multiple-Output, 이하 "MIMO"라 칭하기로 한다) 시스템에서 양자 컴퓨팅을 활용하여 신호를 검출(detection)하는 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 4G 통신 시스템 상용화 이후 증가 추세에 있는 무선 데이터 트래픽 수요를 충족시키기 위해, 개선된 5G 통신 시스템 또는 pre-5G 통신 시스템을 개발하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 이러한 이유로, 5G 통신 시스템 또는 pre-5G 통신 시스템은 4G 네트워크 이후 (Beyond 4G Network) 통신 시스템 또는 LTE 시스템 이후 (Post LTE) 시스템이라 불리어지고 있다.

[0004] 높은 데이터 전송률을 달성하기 위해, 5G 통신 시스템은 초고주파 (mmWave) 대역 (예를 들어, 60기가 헤르츠 (60GHz) 대역과 같은)에서의 구현이 고려되고 있다. 초고주파 대역에서 전파의 경로 손실 완화 및 전파의 전달 거리를 증가시키기 위해, 5G 통신 시스템에서는 빔포밍 (beamforming), 거대 배열 다중 입출력 (massive MIMO), 전차원 다중입출력 (full dimensional MIMO: FD-MIMO), 어레이 안테나 (array antenna), 아날로그 빔형성 (analog beam-forming), 및 대규모 안테나 (large scale antenna) 기술들이 논의되고 있다.

[0005] 또한 시스템의 네트워크 개선을 위해, 5G 통신 시스템에서는 진화된 소형 셀, 개선된 소형 셀 (advanced small cell), 클라우드 무선 액세스 네트워크 (cloud radio access network: cloud RAN), 초고밀도 네트워크 (ultra-dense network), 기기 간 통신 (device to device communication: D2D), 무선 백홀 (wireless backhaul), 이동 네트워크 (moving network), 협력 통신 (cooperative communication), CoMP (coordinated multi-points), 및 수신 간섭제거 (interference cancellation) 등의 기술 개발이 이루어지고 있다.

[0006] 이 밖에도, 5G 시스템에서는 진보된 코딩 변조 (advanced coding modulation: ACM) 방식인 FQAM (hybrid FSK and QAM modulation) 및 SWSC (sliding window superposition coding)과, 진보된 접속 기술인 FBMC (filter bank multi carrier), NOMA (non-orthogonal multiple access), 및 SCMA (sparse code multiple access) 등이 개발되고 있다.

[0007] 또한, 5G 통신 시스템 이후 앞으로 어떤 기술이 차세대 무선 통신을 이끌어 나갈지에 대한 논의가 이루어지고 있으며 이를 6세대 통신 (6^{th} generation: 6G)라 일컫는다. 6G 통신 시스템에서의 주요 서비스로 초실감 확장 현실(Truly Immersive XR), 고정밀 모바일 홀로그램(High-Fidelity Mobile Hologram), 디지털 복제(Digital

Replica) 등이 전망되며, 이를 위해 6G 통신 시스템의 후보 기술로 테라헤르츠(Terabyte Hz: THz) 주파수 대역 활용을 위한 기술, 고주파 대역 커버리지 개선을 위한 새로운 안테나 기술, 이중화(Duplex) 혁신 기술, 유연한 네트워크 구성, 위성 활용 등 네트워크 토폴로지(Topology) 혁신 기술, 주파수 활용 효율을 높이기 위한 주파수 공유 기술, AI 적용 통신 기술 등이 논의되고 있다. 6G 통신 시스템은 5G 통신 시스템보다 밀도가 높은 네트워크가 구축될 것으로 논의되고 있다.

[0008] 다중입력 다중출력(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) 기술은 복수개의 송수신 안테나에서 발생되는 순간적인 채널에 맞추어 공간적으로 정보를 다중화하여 전송하는 것이다. MIMO 전송은 한 개의 시간 및 주파수 자원에 복수의 데이터 스트림(datastream)을 공간적으로 다중화하여 보낼 수 있기 때문에 데이터 전송률을 기존의 non-MIMO 전송과 비교하여 몇 배 더 증가시킬 수 있다. 또한, 다중 안테나 기술을 이용하여 기지국 및 유저 장비에서 채널 페이딩이 억제됨으로써 채널 용량, 네트워크 커버리지 영역, 및 스펙트럼 이용이 크게 향상될 수 있다.

[0009] 도 1은 일반적인 MIMO 시스템에서 신호의 송수신 과정을 나타낸 블록도이다. 이 때, MIMO 시스템이란 MIMO 전송 기술을 지원하는 무선 통신 시스템을 의미한다.

[0010] 도 1을 참조하면, 일반적인 MIMO 시스템(100)은 송신단(101), MIMO 채널(102) 및 수신단(103)을 포함한다.

[0011] 계속해서 도 1을 참조하면, MIMO 시스템(100)의 송신단(101)에서 송신벡터를 보내면 MIMO 채널(102)을 통과하여 수신단(103)에서 수신벡터를 얻는다. 수신단(103)은 MIMO 채널(102)에 대해 주어진 MIMO 채널 행렬과 수신벡터로부터 MIMO 채널의 입력벡터, 즉 송신벡터를 검출한다.

[0012] 구체적으로, MIMO 시스템(100)에서 수신단(103)의 송신벡터를 검출하는 과정은 선형방정식 $Ax = y$의 해를 찾는 것이다. 즉, 수신단에서 송신벡터를 검출하기 위해서는 MIMO 채널 행렬, 수신벡터 및 송신벡터로 이루어진 선형 방정식을 풀어야 한다. 도 1의 시스템 모델에서, 행렬 A는 크기가 $N \times N$인 MIMO 채널 행렬로 나타내고, $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$는 길이 N의 열벡터로 구성되는 송신벡터를 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 길이 N의 열벡터로 구성되는 수신벡터를 나타낸다. 여기서, N은 송신단(101) 및 수신단(103)의 안테나 개수를 나타낸다.

[0013] MIMO 시스템에서 MIMO 채널의 입력벡터를 검출하기 위한 선형 방정식의 해를 구하기 위해 양자 컴퓨팅을 적용할 수 있다.

[0014] 양자 컴퓨팅은 양자 상태에 기반한 새로운 계산 방식으로 물리적으로 디지털 정보를 사용하는 기존 컴퓨터와 다른 특징을 가진다. 양자 알고리즘은 양자 컴퓨터에서 주어진 문제를 풀기 위한 구체적인 양자 회로 구성 방법을 말한다. 양자 컴퓨팅이 사용하는 양자 상태는 수학적으로 복소 공간에 있는 벡터로 정보의 중첩이 가능하여 기존 컴퓨팅 보다 더 빠른 계산이 가능하다. 예를 들어, 현재 상용으로 쓰이는 RSA (Rivest-Shamir-Adleman) 암호의 기반 문제인 소인수분해 문제를 기존 디지털 알고리즘 보다 지수적으로 빨리 해결한다.

[0015] 양자 컴퓨팅 방식에서 선형방정식을 푸는 다음과 같은 방식이 존재한다.

[0016] 양자 계산에서 선형방정식을 푸는 양자 알고리즘에는 Harrow-Hassidim-Lloyd 알고리즘(이하 “HHL 알고리즘”이라 칭하겠다)이 있다. 이 알고리즘은 양자 상태의 특징을 이용하여 기존에 알려진 디지털 알고리즘 보다 더 빠르게 문제를 해결한다. 특별히 주어진 선형 방정식의 행렬이 희소행렬에 가까운 경우, 대응하는 디지털 알고리즘 보다 지수적으로 더 빠르게 방정식을 푼다. 하지만 HHL 알고리즘이 푸는 방정식의 해는 디지털 값이 아닌 양자 상태로 존재하기 때문에 바로 어떤 상태인지 알 수 없고, 양자 측정이라는 과정을 거쳐야만 사용자가 사용하거나 다룰 수 있는 디지털 정보를 얻어낼 수 있다.

[0017] 양자 측정은 양자 컴퓨팅이 양자 상태를 사용하기 때문에 필요로 하는 정보를 보기 위해 양자 상태에서 디지털 정보를 추출하는 과정이다.

[0018] 양자 측정 과정에서 양자 역학이 가지는 특징 때문에 서로 수직이 아닌 양자 상태는 완벽히 구별할 수 없고 오류가 발생한다.

[0019] 따라서 선형방정식을 푸는 양자 알고리즘인 HHL 알고리즘의 빠른 성능에도 불구하고, 알고리즘 자체가 양자 상

태를 최종 상태로 출력하기 때문에 양자 측정 과정에서 어쩔 수 없이 생기는 오류가 있고 이를 제거하는 추출 기술이 필요하다.

[0020] 한편, HHL 알고리즘에 대해 오류 없이 디지털 정보를 추출하는 기존 방법으로 양자 진폭 측정(Quantum Amplitude Estimation)(이하 “QAE”이라 칭하기로 한다) 기법을 이용한 것이 있다.

[0021] QAE는 일반적으로 우리가 얻고자 하는 양자 상태의 확률 진폭 값(amplitude)의 크기를 알아내는 알고리즘이다.

[0022] 양자 상태는 두 가지 이상의 상태가 중첩되어 있는 것이 가능한데, 주어진 양자 상태를 양자 측정을 해서 특정 상태를 얻을 확률은 그것의 확률 진폭 값과 같다. 따라서 얻고자 하는 디지털 정보가 확률 진폭 값과 관련있는 것일 때, QAE를 적용하여 원하는 정보를 추출해 낼 수 있다.

[0023] QAE를 이용하여 HHL 알고리즘에 대해 오류 없이 디지털 정보를 추출하는 기존 방법은 먼저 HHL 알고리즘을 통해 얻은 방정식의 해를 구한다. 이 때, 구해진 해의 각 성분을 어떤 양자 상태의 확률 진폭과 관련된 값으로 보고, QAE 과정을 추가로 거쳐서 그 확률 진폭 값을 알아내어 해의 각 성분을 알아낸다.

[0024] 하지만 기존 방법은 방정식 해의 각 성분에서 크기(amplitude) 정보만 추출할 수 있고 위상(phase) 정보는 추출할 수 없다.

[0025] 이러한 이유로 QAE를 이용한 기존 기법은 MIMO 채널의 입력벡터를 구하기 위해 MIMO 시스템에 적용하는데 한계가 있다.

[0026] 또한, 기존 방법은 방정식 해의 각 성분을 추출하기 위해 QAE 알고리즘을 이용하는 추가 과정을 거치므로 전체 계산량을 증가시킨다.

[0027] 따라서, 계산량을 증가시키는 추가 과정을 거치지 않으면서, MIMO 시스템에 적용 가능하도록 방정식 해의 크기 정보와 위상 정보를 모두 추출할 수 있는 방법이 필요하다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0029] 따라서, 본 개시의 실시 예들은 종래 기술에서 적어도 상기 언급된 한계들 및 문제점들을 해결하고 적어도 하기에 기술된 장점들을 제공하도록 고안된다.

[0030] 본 개시의 실시 예에서는 MIMO 시스템에서 송신된 신호를 검출하는 단계에서 수행되는 선형방정식 풀이를 양자 알고리즘을 적용하여 해결하는 방법 및 장치를 제공한다.

[0031] 또한, 본 개시의 실시 예에서는 양자 알고리즘을 적용하여 선형방정식의 해를 찾을 때, 양자 상태로 존재하는 출력값을 디지털 정보로 오류 없이 추출하는 방법 및 장치를 제공한다.

[0032] 또한, 본 개시의 실시 예에서는 양자 알고리즘을 적용하여 찾은 선형방정식의 해에서 오류 없이 디지털 정보를 추출할 때, 추가로 수행해야 하는 과정 없이 추출하는 방법 및 장치를 제공한다.

[0033] 또한, 본 개시의 실시 예에서는 양자 알고리즘을 적용하여 찾은 선형방정식의 해에서 오류 없이 디지털 정보를 추출할 때, 기존 방법보다 적용 범위를 넓힌 방법 및 장치를 제공한다.

[0034] 또한, 본 개시의 실시 예에서는 양자 알고리즘을 적용하여 찾은 선형방정식의 해에서 오류 없이 디지털 정보를 추출할 때, 기존 방법보다 계산 복잡도를 떨어뜨리는 방법 및 장치를 제공한다.

과제의 해결 수단

[0036] 본 개시의 실시 예에 따른 다중입력 다중출력을 지원하는 무선 통신 시스템에서의 신호 검출 방법은, 송신단과 수신단 사이의 MIMO 채널 행렬과 상기 수신단에 의해 수신된 수신벡터를 획득하는 과정과, 상기 송신단의 변조 방식을 확인하는 과정과, 상기 확인된 변조 방식에 따라 기설정된 방정식 변형 방식을 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터에 적용하는 과정과, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터에 대해 양자 계산을 수행하여 상기 송신단의 송신벡터를 검출하는 과정을 포함한다.

[0037] 본 개시의 실시 예에 따른 다중입력 다중출력을 지원하는 무선 통신 시스템에서의 양자계산센터는, 송신단과 수신단 사이의 MIMO 채널 행렬과 상기 수신단에 의해 수신된 수신벡터를 획득하도록 구성된 네트워크 인터페이스부; 및 상기 송신단의 변조 방식을 확인하고, 상기 확인된 변조 방식에 따라 기설정된 방정식 변형 방식을 상기 MIMO 채널 행렬 및 상기 수신벡터에 적용하고, 상기 변형된 MIMO 채널 행렬 및 상기 변형된 수신벡터에 대해 양자 계산을 수행하여 상기 송신단의 송신벡터를 검출하는 프로세서부를 포함한다.

발명의 효과

[0039] 본 개시의 실시 예는 MIMO 시스템의 검출 단계에서 수행하는 연산을 양자계산센터를 이용하여 효율적으로 처리하도록 한다.

[0040] 본 개시의 실시 예는으로 MIMO 시스템에서 MIMO 채널의 입력벡터를 검출하기 위한 선형방정식의 변형을 통해 검출 단계의 복잡도를 감소시킬 수 있다.

[0041] 본 개시의 실시 예는 HHL 알고리즘에서 디지털 정보를 추출하는 과정의 복잡도를 감소시킬 수 있다.

[0042] 본 개시의 실시 예는 HHL 알고리즘이 가지는 기존 디지털 알고리즘에 대한 성능 우위를 그대로 유지하면서 MIMO 시스템의 검출 단계에 적용할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0044] 도 1은 일반적인 MIMO 시스템에서 신호의 송수신 과정을 나타내는 블록도이다.

도 2는 본 개시의 일 실시예에 따른 MIMO 시스템에서 신호의 송수신 과정을 나타내는 블록도이다.

도 3은 본 개시의 일 실시예에 따른 양자계산센터를 나타낸 블록도이다.

도 4는 본 개시의 실시 예에 따른, 송신단의 변조방식으로 BPSK 변조 방식이 사용된 경우 양자계산센터를 나타낸 블록도이다.

도 5는 본 개시의 실시 예에 따른, 송신단의 변조방식으로 QPSK 변조 방식이 사용된 경우 양자계산센터를 나타낸 블록도이다.

도 6은 본 개시의 일 실시예에 따른, 송신단의 변조방식으로 MPSK 변조 방식이 사용된 경우 양자계산센터를 나타낸 블록도이다.

도 7은 본 개시의 일 실시예에 따른, 송신단의 변조방식으로 QAM(quadrature amplitude modulation) 변조 방식이 사용된 경우 양자계산센터를 나타낸 블록도이다.

도 8은 본 개시의 일 실시예에 따른, 도 7의 norm extractor의 구성을 나타낸 블록도이다.

도 9는 본 개시의 일 실시예에 따른, 도 7의 aplitude extractor의 구성을 나타낸 블록도이다.

도 10은 본 개시의 일 실시예에 따른, 도 7의 phase extractor의 구성을 나타낸 블록도이다.

도 11은 본 개시의 실시 예에 따른, MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 이용하여 MIMO 채널의 입력인 송신벡터를 검출하는 절차를 나타낸 순서도이다.

도 12는 본 개시의 실시 예에 따른 MIMO 시스템에서 수신단이 단말인 경우 양자계산센터가 이용되는 과정을 나타낸 흐름도이다.

도 13은 본 발명의 실시 예에 따른 양자계산센터의 구성을 도시한 블록도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0045] 이하 본 개시의 바람직한 실시 예를 첨부된 도면의 참조와 함께 상세히 설명한다. 그리고, 본 개시를 설명함에 있어서, 관련된 공지기능 혹은 구성에 대한 구체적인 설명이 본 개시의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단된 경우 그 상세한 설명은 생략할 것이다. 그리고 후술되는 용어들은 본 개시에서의 기능을 고려하여 정의된 용어들로서 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 관례 등에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 그 정의는 본 명세서 전

반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.

[0046] 본 개시는 다양한 변경을 가할 수 있고 여러 가지 실시 예들을 가질 수 있는 바, 특정 실시 예들을 도면들에 예시하여 상세하게 설명한다. 그러나, 이는 본 개시를 특정한 실시 형태에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 개시의 사상 및 기술 범위에 포함되는 모든 변경, 균등물 내지 대체물을 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

[0047] 또한, 제1, 제2 등과 같이 서수를 포함하는 용어는 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 상기 구성요소들은 상기 용어들에 의해 한정되지는 않는다. 상기 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만 사용된다. 예를 들어, 본 개시의 권리 범위를 벗어나지 않으면서 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소도 제1 구성요소로 명명될 수 있다. 및/또는이라는 용어는 복수의 관련된 기재된 항목들의 조합 또는 복수의 관련된 기재된 항목들 중의 어느 항목을 포함한다.

[0048] 또한, 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시 예를 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 개시를 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 명세서상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0049] 일 실시 예에 따르면, 본 개시에 개시된 다양한 실시 예들에 따른 방법은 컴퓨터 프로그램 제품(computer program product)에 포함되어 제공될 수 있다. 컴퓨터 프로그램 제품은 상품으로서 판매자 및 구매자 간에 거래될 수 있다. 컴퓨터 프로그램 제품은 기기로 읽을 수 있는 저장 매체(예: CD-ROM, DVD-ROM)의 형태로 배포되거나, 또는 어플리케이션 스토어(예: 플레이 스토어TM)를 통해 또는 두 개의 유저 장치들(예: 스마트 폰들) 간에 직접, 온라인으로 배포(예: 다운로드 또는 업로드)될 수 있다. 온라인 배포의 경우에, 컴퓨터 프로그램 제품의 적어도 일부는 제조사의 서버, 어플리케이션 스토어의 서버, 또는 중계 서버의 메모리와 같은 기기로 읽을 수 있는 저장 매체에 적어도 일시 저장되거나, 임시적으로 생성될 수 있다.

[0050] 다양한 실시 예들에 따르면, 본 개시의 각각의 구성 요소(예: 블록 또는 프로그램)는 단수 또는 복수의 개체를 포함할 수 있다. 다양한 실시 예들에 따르면, 전술한 구성 요소들 중 하나 이상의 구성 요소들 또는 동작들이 생략되거나, 또는 하나 이상의 다른 구성 요소들 또는 동작들이 추가될 수 있다. 대체적으로 또는 추가적으로, 복수의 구성 요소들(예: 블록 또는 프로그램)은 하나의 구성 요소로 통합될 수 있다. 이런 경우, 통합된 구성 요소는 상기 복수의 구성 요소들 각각의 구성 요소의 하나 이상의 기능들을 상기 통합 이전에 상기 복수의 구성 요소들 중 해당 구성 요소에 의해 수행되는 것과 동일 또는 유사하게 수행할 수 있다. 다양한 실시 예들에 따르면, 모듈, 프로그램 또는 다른 구성 요소에 의해 수행되는 동작들은 순차적으로, 병렬적으로, 반복적으로, 또는 휴리스틱(heuristic)하게 실행되거나, 상기 동작들 중 하나 이상이 다른 순서로 실행되거나, 생략되거나, 또는 하나 이상의 다른 동작들이 추가될 수 있다.

[0051] 또한 본 개시에 따르면, 전자 장치는 단말과의 무선 통신을 위한 채널(channel)을 제공할 수 있다. 전자 장치는 기지국(base station), AN(access network), RAN(radio access network), eNB, eNodeB, 5G 노드(5G node), 송수신 포인트(TRP, transmission/reception point), 또는 5gNB(5th generation NodeB) 등을 의미할 수 있다. 편의상 전자 장치를 기지국(base station)으로 예시하여 이하 본 개시의 실시 예들을 설명하기로 한다. 단말은 기지국과 무선 채널을 통해 통신하는 유저 단말(user equipment: UE), 이동국(mobile station), 가입자국(subscriber station), 원격 단말(remote terminal), 무선 단말(wireless terminal), 또는 유저 장치(user device) 등을 의미할 수 있다.

[0052] 또한 본 개시에 따르면, MIMO 시스템은 예를 들어 3GPP(3rd Generation Partnership Project)에서 제안하는 롱-텀 에볼루션(long-term evolution: LTE, 이하 'LTE') 시스템, 롱-텀 에볼루션-어드밴스드(long-term evolution-advanced: LTE-A, 이하 'LTE-A') 시스템, LTE-A pro 시스템 또는 전술한 5G 시스템 등 다중 안테나 기술인 MIMO 전송 기술을 지원하는 다양한 무선 통신 시스템을 의미할 수 있다.

[0053] 또한, 본 개시에 따르면, 용어 '송신단' 및 '수신단'은 각각 단말 및 기지국에 대응되거나, 또는 각각 기지국 및 단말에 대응될 수 있으며, 이 때 단말과 기지국은 상술한 단말과 기지국에 대응된다.

[0054] 또한, 본 개시에서 별도로 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 개시가 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가지고 있다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥 상

가지는 의미와 일치하는 의미를 가지는 것으로 해석되어야 하며, 본 발명의 실시예에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0055] 본 개시의 실시예는 MIMO 시스템에서, MIMO 채널의 입력벡터를 추정하기 위한 선형 방정식의 해를 구하기 위해, MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 변형하고, 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 양자화한 후 양자 알고리즘을 적용하고, 그 결과를 디지털화(즉, 양자측정)하여 MIMO 채널의 입력벡터, 즉, 송신단의 송신벡터를 구하는 것을 포함한다.

[0056] 이 때, MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 변형은, 송신단에서 송신벡터 전송에 적용한 변조 방식에 따라 적용된다.

[0057] 또한, 변조 방식에 따라 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 변형 이전에 방정식의 해와 관련된 정보를 먼저 획득하고, 이러한 사전 정보에 따라 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 변형을 적용한다.

[0058] 이하에서는 상술한 기본 개념을 바탕으로 본 개시의 실시 예들을 상세히 설명한다.

[0059] 도 2는 본 개시의 일 실시예에 따른 MIMO 시스템(200)에서 신호의 송수신 과정을 나타내는 블록도이다.

[0060] 도 2를 참조하면, MIMO 시스템(200)은 송신단(201), MIMO 채널(202), 수신단(203) 및 양자계산센터(204)를 포함한다. 이 때, 양자계산센터(204)는 수신단(203)의 내부 또는 외부에 존재할 수 있으며, 내부에 존재하는 경우 수신단(203)에 포함된 기존 장치가 양자계산센터(204)의 역할을 대신할 수도 있다.

[0061] 계속해서 도 2를 참조하면, MIMO 시스템(200)의 송신단(201)에서 송신벡터를 보내면 송신벡터는 MIMO 채널(202)를 통과하여 수신단(203)에 도달하며, 수신단(203)은 수신신호로부터 수신벡터를 획득한다. 수신단(203)은 MIMO 채널(202)에 대해 주어진(혹은 추정된) MIMO 채널 행렬과 수신벡터를 양자계산센터(204)로 보낸다. 양자계산센터(204)는 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터로부터 MIMO채널(202)의 입력벡터, 즉, 송신단에 의해 송신된 송신벡터를 추정하고, 추정된 송신벡터를 수신단(203)으로 보낸다.

[0062] MIMO 시스템(200)에서 양자계산센터(204)에서 송신벡터를 추정하는 과정은 양자 알고리즘을 적용하여 선형방정식 $Ax = y$의 해를 찾는 것이다. 이 때, 행렬 A는 크기가 $N \times N$인 MIMO 채널(202)의 MIMO 채널 행렬을 나타내고, $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$는 길이 N의 열벡터로서 송신벡터를 나타내고, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 길이 N의 열벡터로서 수신벡터를 나타낸다. 여기서, N은 송신단(201) 및 수신단(203)의 안테나 개수를 나타낸다.

[0063] 한편, 본 개시의 실시 예에서 선형방정식의 행렬 A는 크기가 $N \times N$ 인 임의의 행렬로 가정한다.

[0064] 도 3은 본 개시의 일 실시예에 따른, 양자계산센터(300)를 나타낸 블록도이다.

[0065] 도 3을 참조하면, 양자계산센터(300)은 선형방정식 변형 모듈(301), 디지털-양자 변환기(classical-quantum converter)(302)(이하 “C/Q converter”이라 칭하기로 한다), 양자 선형 시스템 솔버(quantum linear system solver)(303)(이하 “QLSS”이라 칭하기로 한다) 및 양자-디지털 변환기(quantum-classical converter)(304)(이하 “Q/C converter”이라 칭하기로 한다)을 포함한다. 도 3에서는 QLSS(303) 및 Q/C converter(304)를 단수로 표현하였지만, QLSS(303) 및 Q/C converter(304)는 송신벡터의 전송에 적용된 변조방식에 따라 복수 개의 QLSS 및 복수 개의 Q/C converter가 존재할 수 있다. 이 때, 복수 개의 QLSS 와 복수 개의 Q/C converter는 병렬로 연결된다.

[0066] 계속해서 도 3을 참조하면, 선형방정식 변형 모듈(301)은 수신단으로부터 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 수신하고, 본 개시의 실시 예에 따른 방식으로 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 변형(modify)하고, 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 C/Q converter(302)로 전달한다. C/Q converter(302)는 디지털 상태의 정보(이하 “디지털 정보”라 칭함)인 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 양자 알고리즘을 적용하기 위한 양자 상태의 정보(이하 “양자 정보”로 칭함)로 변환(convert)한다. 그리고, C/Q converter(302)은 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 양자 정보를 QLSS(303)로 전달한다.

[0067] 한편, C/Q converter는 모든 양자 컴퓨팅 구동에서 반드시 거쳐야 하는 구성으로 구체적인 C/Q converter에 대한 설명은 본 개시의 내용을 벗어난 양자 컴퓨팅 구현 자체에 대한 내용이므로 자세한 설명은 생략하기로 한다.

[0068] MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 양자 정보를 수신한 QLSS(303)는 양자 알고리즘을 사용하여 송신 벡터의 양자 정보를 구한다. 이 때, QLSS(303)에 의해 사용되는 양자 알고리즘은 HHL 알고리즘을 포함할 수 있다. 그리고, QLSS(303)는 송신벡터의 양자 정보를 Q/C converter(304)로 전달한다.

[0069] 송신벡터의 양자 정보를 수신한 Q/C converter(304)는 양자 측정을 통해 송신벡터의 양자 정보에 대한 디지털 정보를 구한다. 디지털 정보는 송신벡터가 된다. 그리고, Q/C converter(304)는 MIMO 채널의 입력벡터인 송신벡터를 수신단으로 전달한다.

[0070] 다음은 도 4 내지 도 6을 통해 송신단의 변조 방식이 BPSK(binary phase shift keying) 변조 방식인 경우, QPSK(quadrature phase shift keying) 변조 방식인 경우, 및 MPSK(M-ary phase shift keying)(여기서, M은 2 이상인 2의 거듭제곱을 나타냄) 변조 방식인 경우 양자계산센터의 구체적인 구성에 대해 설명한다.

[0071] 도 4는 본 개시의 일 실시예에 따른, 송신단의 변조방식으로 BPSK 변조 방식이 사용된 경우 양자계산센터(400)를 나타낸 블록도이다. 즉, 도 4는 도 3에서 나타낸 각 구성 및/또는 구성들의 조합을 송신단의 송신벡터가 BPSK 신호인 경우를 구체적으로 나타낸 블록도이다.

[0072] 도 4을 참조하면, 양자계산센터(400)는 선형방정식 변형 모듈(401), C/Q converter(402), QLSS(403) 및 Q/C converter(404)를 포함한다. 이 때, 양자계산센터(400)의 선형방정식 변형 모듈(401), C/Q converter(402), QLSS(403) 및 Q/C converter(404) 각각은 도 3의 양자계산센터(300)의 선형방정식 변형 모듈(301), C/Q converter(302), QLSS(303) 및 Q/C converter(304) 각각에 대응되거나 또는 상응하는 역할을 수행할 수 있다.

[0073] 한편, 도 4에서 송신단의 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$ 는 BPSK 신호이므로, 각 항 x_j는 $x_j = \pm 1$ 을 만족하는 바이너리(binary) 값을 가진다. 따라서, 도 4의 양자계산센터(400)는 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$ 의 각 항 x_j에 대한 N개의 해를 구하기 위해 N개의 QLSS(403)와 N개의 Q/C converter(404)가 병렬로 구성된다.

[0074] 도 5는 본 개시의 일 실시예에 따른, 송신단의 변조방식으로 QPSK 변조 방식이 사용된 경우 양자계산센터(500)를 나타낸 블록도이다. 즉, 도 5는 도 3에서 나타낸 각 구성 및/또는 구성들의 조합을 송신단의 송신벡터가 QPSK 신호인 경우를 구체적으로 나타낸 블록도이다.

[0075] 도 5을 참조하면, 양자계산센터(500)은 선형방정식 변형 모듈(501), C/Q converter(502), QLSS(503) 및 Q/C converter(504)를 포함한다. 이 때, 양자계산센터(500)의 선형방정식 변형 모듈(501), C/Q converter(502), QLSS(503) 및 Q/C converter(504) 각각은 도 3의 양자계산센터(300)의 선형방정식 변형 모듈(301), C/Q converter(302), QLSS(303) 및 Q/C converter(304) 각각에 대응되거나 상응하는 역할을 수행할 수 있다.

[0076] 도 5에서 송신단의 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$ 는 QPSK 신호이므로, 각 항 x_j는 $x_j = 1 + i,\ 1 - i,\ -1 + i,\ -1 - i$ 의 값을 가질 수 있다. 따라서, 각 항 x_j는 $x_j = a_j + ib_j$ 로 나타낼 수 있다. 이 때, a_j 및 b_j 는 각각 $a_j = \pm 1,\ b_j = \pm 1$ 을 만족하는 바이너리(binary) 값을 가진다. 따라서, 도 5의 양자계산센터(500)는 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$ 의 각 항 x_j의 a_j 및 b_j에 대한 각각 N개의 해를 구하기 위해 a_j에 대한 N개의 QLSS (503)와 N개의 Q/C converter(504)가 병렬로 구성되고, b_j 에 대한 N개의 QLSS (503)와 N개의 Q/C converter(504)가 병렬로 구성되어 총 $2N$개의 QLSS (503)와 $2N$ 개의 Q/C converter(504)가 병렬로 구성된다.

[0077] 도 6은 본 개시의 일 실시예에 따른, 송신단의 변조방식으로 MPSK 변조 방식이 사용된 경우 양자계산센터를 나타낸 블록도이다. 즉, 도 6은 도 3에서 나타낸 각 구성 및/또는 구성들의 조합을 송신단의 송신벡터가 MPSK 신호인 경우를 구체적으로 나타낸 블록도이다.

[0078] 도 6을 참조하면, 양자계산센터(600)는 선형방정식 변형 모듈(601), C/Q converter(602), QLSS(603) 및 Q/C

converter(604)를 포함한다. 이 때, 양자계산센터(600)의 선형방정식 모듈(601), C/Q converter(602), QLSS(603) 및 Q/C converter(604) 각각은 도 3의 양자계산센터(300)의 선형방정식 변형 모듈(301), C/Q converter(302), QLSS(303) 및 Q/C converter(304) 각각에 대응되거나 또는 상응하는 역할을 수행할 수 있다.

[0079] 한편, 도 6에서 송신단의 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$는 MPSK 신호이므로, 각 항 x_j는 $\{0, 1, \ldots, M-1\}$에 속하는 k에 대해 $x_j = e^{i\left(\frac{2\pi}{M}k\right)}$을 만족하는 M진(M-ary) 값을 가진다. 따라서, 도 6의 양자계산센터(600)는 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$의 각 항 x_j에 대한 각각 N개의 해를 구하기 위해 N개의 QLSS(603)와 N개의 Q/C converter(604)가 병렬로 구성된다.

[0080] 도 7은 본 개시의 일 실시예에 따른, 송신단의 변조방식으로 QAM(quadrature amplitude modulation) 변조 방식이 사용된 경우 양자계산센터를 나타낸 블록도이다.

[0081] 도 7을 참조하면, 양자계산센터(700)는 해의 크기 추출기(이하 “norm extracter”이라 칭하기로 한다)(701), 해의 개별 진폭 추출기(이하 “amplitude extractor”이라 칭하기로 한다)(702), 및 해의 개별 위상 추출기(이하 “phase extractor”이라 칭하기로 한다)를 포함한다. 즉, 양자계산센터(700)는 송신벡터를 구하기 위한 사전 정보를 획득하는 norm extractor(701), 송신벡터의 개별 진폭을 구하기 위한 amplitude extractor(702), 및 송신벡터의 개별 위상을 구하기 위한 phase extractor(703)을 포함한다.

[0082] 계속해서 도 7을 참조하면, norm extractor(701)는 수신단으로부터 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 수신하고, 송신벡터를 구하기 위한 사전 정보인 해의 크기 값을 amplitude extractor(702)로 전달한다, Amplitude extractor(702)는 수신단으로부터 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 수신하고, norm extractor(701)으로부터 전달받은 해의 크기 값을 기반으로 획득한 해의 개별 진폭의 값을 phase extractor(703)로 전달한다. Phase extractor(703)는 수신단으로부터 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 수신하고, amplitude extractor(702)로부터 전달받은 해의 개별 진폭 값을 기반으로 해의 개별 위상 값을 획득함으로써 송신벡터의 값을 구한다. Phase extractor(703)는 획득한 MIMO 채널의 입력벡터인 송신벡터를 수신단으로 전달한다.

[0083] 도 8은 본 개시의 일 실시예에 따른, 도 7의 norm extractor의 구성을 나타낸 블록도이다.

[0084] 도 8을 참조하면, norm extractor(800)는 선형방정식 변형 모듈(801), C/Q converter(802), QLSS(803), 및 진폭 측정기(amplitude estimator)를 포함한다. 이 때, norm extractor(800)의 선형방정식 변형 모듈(801), C/Q converter(802) 및 QLSS(803) 각각은 도 3의 양자계산센터(300)의 선형방정식 변형 모듈(301), C/Q converter(302) 및 QLSS(303) 각각에 대응되거나 상응하는 역할을 수행할 수 있다.

[0085] 계속해서 도 8을 참조하면, 선형방정식 변형 모듈(801)은 수신단으로부터 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 수신하고, QAM 변조 방식에 대해 기설정된 방식으로 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 변형하고, 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 C/Q converter(802)로 전달한다. C/Q converter(802)는 선형방정식 변형 모듈(801)로부터 전달받은 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 양자 정보를 QLSS(803)으로 전달한다. QLSS(803)는 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 양자 정보를 기반으로 양자 알고리즘을 통해 송신벡터의 양자 정보를 획득한다. 이 때, QLSS(803)에 의해 사용되는 양자 알고리즘은 HHL 알고리즘을 포함할 수 있다. QLSS(803)는 송신벡터의 양자 정보를 진폭 측정기(804)로 전달한다. 송신벡터의 양자 정보를 전달받은 진폭 측정기(804)는 양자 알고리즘을 사용하여 송신벡터의 크기를 구한다. 이 때, 진폭 측정기(804)에 의해 사용되는 양자 알고리즘은 QAE 알고리즘을 포함할 수 있다. 그리고, 진폭 측정기(804)는 MIMO 채널의 입력벡터인 송신벡터의 크기를 후술하는 amplitude extractor로 전달한다.

[0086] 도 9는 본 개시의 일 실시예에 따른, 도 7의 aplitude extractor의 구성을 나타낸 블록도이다.

[0087] 도 9를 참조하면, amplitude extractor(900)는 선형방정식 변형 모듈(901), C/Q converter(902), QLSS(903), 및 진폭 측정기(904)를 포함한다. 이 때, amplitude extractor(900)의 선형방정식 변형 모듈(901), C/Q converter(902) 및 QLSS(903) 각각은 도 3의 양자계산센터(300)의 선형방정식 변형 모듈(301), C/Q converter(302) 및 QLSS(303) 각각에 대응되거나 상응하는 역할을 수행할 수 있다.

[0088] 계속해서 도 9를 참조하면, 선형방정식 변형 모듈(901)은 수신단으로부터 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 수신하고, QAM 변조방식에 대해 기설정된 방식으로 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 변형하고, 변형된 MIMO 채널 행렬

및 수신벡터를 C/Q converter(902)로 전달한다. C/Q converter(902)는 선형방정식 변형 모듈(901)로부터 전달받은 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 양자 정보를 QLSS(903)로 전달한다. QLSS(903)는 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 양자 정보를 기반으로 양자 알고리즘을 통해 송신벡터의 양자 정보를 획득한다. 이 때, QLSS(903)에 의해 사용되는 양자 알고리즘은 HHL 알고리즘을 포함할 수 있다. QLSS(903)는 송신벡터의 양자 정보를 진폭 측정기(904)로 전달한다. QLSS(903)으로부터 송신벡터의 양자 정보를 수신하고, 도 8의 norm extractor(800)로부터 송신벡터의 크기를 수신한 진폭 측정기(904)는 양자 알고리즘을 사용하여 송신벡터의 개별 진폭의 값을 구한다. 이 때, 진폭 측정기(904)에 의해 사용되는 양자 알고리즘은 QAE 알고리즘을 포함할 수 있다. 그리고, 진폭 측정기(904)는 MIMO 채널의 입력 벡터인 송신벡터의 개별 진폭의 값을 후술하는 phase extractor로 전달한다.

[0089] 한편, 도 9에서 송신단의 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$는 QAM 신호이므로, 각 항 x_j는 $x_j = s_j + i \cdot t_j$로 나타낼 수 있다. 이 때, s_j 및 t_j는 각각 $s_j,\ t_j = \cdots, -5,\ -3,\ -1, 1, 3, 5, \cdots$인 값을 가진다. 따라서, 도 9에서 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$의 각 항 x_j의 s_j 및 t_j에 대한 값 각각 N개의 값을 구하기 위해 $|s_j|$에 대한 N개의 QLSS(903)가 병렬로 구성되고, $|t_j|$에 대한 N개의 QLSS(903)가 병렬로 구성되어 총 $2N$개의 QLSS(903)가 병렬로 구성된다.

[0090] 도 10은 본 개시의 일 실시예에 따른, 도 7의 phase extractor의 구성을 나타낸 블록도이다.도 10을 참조하면, phase extractor(1000)는 선형방정식 변형 모듈(1001), C/Q converter(1002), QLSS(1003), 및 Q/C converter(1004)를 포함한다. 이 때, phase extractor(1000)의 선형방정식 변형 모듈(1001), C/Q converter(1002), QLSS(1003), 및 Q/C converter(1004) 각각은 도 3의 양자계산센터(300)의 선형방정식 변형 모듈(301), C/Q converter(302), QLSS(303), 및 Q/C converter(304) 각각에 대응되거나 상응하는 역할을 수행할 수 있다.

[0091] 계속해서 도 10을 참조하면, 선형방정식 변형 모듈(1001)은 수신단으로부터 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 수신하고, 도 9의 amplitude extractor(900)으로부터 송신벡터의 개별 진폭의 값을 수신한다. 선형방정식 변형 모듈(1001)은 QAM 변조방식에 대해 기설정된 방식으로 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 변형하고, 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 C/Q converter(1002)로 전달한다. C/Q converter(1002)는 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 양자 정보를 QLSS(1003)로 전달한다. QLSS(1003)는 변형된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터의 양자 정보를 기반으로 양자 알고리즘을 통해 송신벡터의 양자 정보를 획득한다. 이 때, QLSS(1003)에 의해 사용되는 양자 알고리즘은 HHL 알고리즘을 포함할 수 있다. QLSS(1003)는 송신벡터의 양자 정보를 Q/C converter(1004)로 전달한다. 송신벡터의 양자 정보를 수신한 Q/C converter는 양자 측정을 통해 송신벡터의 양자 정보에 대한 디지털 정보를 획득한다. 이 때, 디지털 정보는 송신벡터가 된다. 그리고, Q/C converter(1004)는 MIMO 채널의 입력 벡터인 송신벡터를 수신단으로 전달한다.

[0092] 한편, 도 10에서 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$의 각 항 x_j의 s_j 및 t_j의 값 각각 N개의 값을 구하기 위해 s_j에 대한 N개의 QLSS(1003)와 N개의 Q/C converter(1004)가 병렬로 구성되고, t_j에 대한 N개의 QLSS(1003)와 N개의 Q/C converter(1004)가 병렬로 구성된다.

[0093] 다음은 본 개시의 실시 예에 따른 MIMO 채널 행렬, 수신벡터 및 송신벡터와 관련된 선형 방정식의 해를 구하는 방법에 대해 설명한다.

[0094] 도 11은 본 개시의 실시 예에 따른, MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 이용하여 MIMO 채널의 입력인 송신벡터를 검출하는 절차를 나타낸 순서도이다.

[0095] 도 11을 참조하면, 1101단계에서 수신단으로부터 선형방정식 $Ax = y$에 대한 정보인 MIMO 채널 행렬 A와 수신벡터 y를 받는다. 이 때, MIMO 채널 행렬 A는 크기가 $N \times N$인 행렬이고, 수신벡터 y는 길이 N의 열벡

터로, $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 으로 나타내진다. 그리고, N 은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타낸다.

[0096] 1102단계에서 송신벡터 x 에 적용된 변조방식을 확인한다. 이 때, 송신벡터 x 의 변조방식은 송신단과 수신단이 사전에 공유하여 수신단이 양자계산센터에 알려줄 수 있다. 한편, 설명의 편의상 1101단계 이후 1102단계가 수행되도록 기술하였으나, 1102단계는 1101단계 이전에 또는 1101단계와 동시에 수행될 수 있다.

[0097] 1103단계에서 변조 방식에 따른 기설정된 방정식 변형 방식에 따라 A 를 $\tilde{A}$ 로, y 를 $\tilde{y}$ 로 변형(modify)한다. 변조 방식에 따른 기설정된 방정식 변형 방식의 구체적인 예시는 아래에서 설명한다.

[0098] 방정식 변형을 통해 변형된 $\tilde{A}$ 및 $\tilde{y}$ 는 디지털 정보이므로, 양자 알고리즘을 적용하기 위해, 1104단계에서 $\tilde{A}$ 및 $\tilde{y}$ 를 양자 정보로 변환한다. 즉, 디지털 정보인 $\tilde{A}$ 및 $\tilde{y}$ 는 각각 양자 정보인 $U_{\tilde{A}}$ 및 $|\tilde{y}\rangle$ 로 변환된다. 여기서, $U_{\tilde{A}}$ 는 $U_{\tilde{A}} = e^{2\pi i \tilde{A}}$ 로 정의되는 유니터리 연산자로서 양자 알고리즘에서 쓰이는 연산자이다. 또한, $|\ \rangle$ 는 크기가 1인 열벡터 즉, 양자 상태를 나타내는 양자 역학의 브라켓(braket) 표기법으로 후술하는 양자 상태를 나타낼 때는 일반적인 행렬 표기법 대신 브라켓 표기법을 사용한다.

[0099] 1105단계에서 $U_{\tilde{A}}$ 및 $|\tilde{y}\rangle$ 에 양자 알고리즘을 적용하여 선형방정식의 해를 구한다. 즉, $U_{\tilde{A}}$ 및 $|\tilde{y}\rangle$ 에 양자 알고리즘을 적용하여 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$ 의 각 항인 x_j 에 대한 정보를 담은 양자 정보 $|x_j\rangle$ 를 구한다. 여기서, 일 실시 예로 선형방정식의 해를 구하기 위해 HHL 알고리즘과 같은 양자 알고리즘이 사용될 수 있다.

[0100] 1106단계에서 양자 정보 $|x_j\rangle$ 를 변환하여 디지털 정보 x_j 를 구하고, 최종적으로 선형방정식의 해 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$ 를 알아낸다.

[0101] 1107단계에서 구한 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$ 를 수신단으로 전달한다.

[0102] 다음은 송신단의 변조 방식이 BPSK 변조 방식인 경우, QPSK 변조 방식인 경우, MPSK 변조 방식인 경우, 및 QAM 변조 방식인 경우 각각에 대해 기설정된 방정식 변형 및 선형방정식의 해를 구하는 방법에 대해 설명한다.

[0103] <BPSK 변조방식>

[0104] 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$ 에 적용된 변조방식이 BPSK 변조방식인 경우 MIMO 채널 행렬 A 및 수신벡터 $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 수학식 1과 같이 변형된다.

[0105] [수학식 1]

[0106]
$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} & A & & O & \\ & & & & \\ 0 & \cdots & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \\ N \\ 0 \end{pmatrix}$$

[0107] 수학식 1은 선형 방정식 $Ax = y$ 에 수학식 2와 같은 송신벡터 성분들을 새로 추가해서 만들어진 방정식이다. 이 때, $\tilde{A}$ 는 행렬 A 에 2개의 행과 열을 추가하여 확장한 형태이다. O 은 크기가 $N \times 2$ 인 영행렬을 나타낸

다. N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타낸다. 또한, $\tilde{A}$에서 $-N$은 x_j에 대해 $j\,(1 \le j \le N)$번째 열에 위치한다.

[0108] [수학식 2]

[0109] $$x_{N+1} = N,\ x_{N+2} = Nx_j$$

[0110] 여기서 x_{N+1}과 x_{N+2}은 송신 벡터에 대해 추가된 변수이다.

[0111] 수학식 1에서 추가된 마지막 두 행은 수학식 2에 따라 $x_{N+1} = N$, $-Nx_j + x_{N+2} = 0$ 를 만족하도록 구성된다.

[0112] 수학식 2는 양자 알고리즘을 이용하여 변형된 방정식을 풀었을 때, 양자 정보로 있는 방정식의 해가 x_j에 대한 정보를 별도로 가지게 해준다. 그래서 양자 측정 과정에서 x_j의 1비트 정보를 오류 없이 추출하게 만들어 준다. 이에 대해 하기에서 자세히 설명한다.

[0113] 수학식 1에 주어진 변형된 방정식에 대한 값 $\tilde{A}$와 $\tilde{y}$를 양자정보인 $U_{\tilde{A}}$와 $|\tilde{y}\rangle$로 변환한다.

[0114] 수학식 1과 수학식 2를 참조하면, 선형 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$의 해 $\tilde{x}$는 수학식 3과 같이 나타내진다.

[0115] [수학식 3]

[0116] $$\tilde{x} = (x_1 \quad \cdots \quad x_N\ x_{N+1}\ x_{N+2})^T = (x_1 \quad \cdots \quad x_N\ N\ Nx_j)^T$$

[0117] 한편, 양자 컴퓨팅의 특성 때문에 양자 정보는 크기가 1로 정규화된 벡터로 표현된다. 따라서 양자 알고리즘을 적용하여 얻는 방정식의 해 $|\tilde{x}\rangle$는 수학식 3에 있는 $\tilde{x}$가 정규화된 다음 수학식 4와 같은 벡터가 된다.

[0118] [수학식 4]

[0119] $$|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{1}{N+2N^2}}\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \\ N \\ Nx_j \end{pmatrix}$$

[0120] 여기서 $(x_1 \quad \cdots \quad x_N\ N\ Nx_j)^T$는 수학식 3에 나온 선형 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$의 해 $\tilde{x}$이고, $1/\sqrt{N+2N^2}$는 $\tilde{x}$를 정규화 인자이다.

[0121] 수학식 4에 있는 $|\tilde{x}\rangle$는 방정식을 추가하여 새로 생긴 해가 있는 부분인 $(0 \cdots 0\ N\ Nx_j)^T$와 원래 방정식의 해가 있는 부분인 $(x_1 \cdots x_N\ 0\ 0)^T$로 나누어 수학식 5와 같이 나타낼 수 있다.

[0122] [수학식 5]

[0123] $$|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{1}{N+2N^2}}\left[\begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ N \\ Nx_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_N \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}\right]$$

[0124] 여기서 $(0 \cdots 0\ N\ Nx_j)^T$ 와 $(x_1 \cdots x_N\ 0\ 0)^T$ 를 각각 정규화한 양자 정보로 표현하면, 수학식 5는 다음 수학식 6과 같이 나타내진다.

[0125] [수학식 6]

[0126] $$|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{2N}{1+2N}}|x_j\rangle + \sqrt{\frac{1}{1+2N}}|\phi\rangle$$

[0127] 여기서 $|x_j\rangle = \frac{1}{\sqrt{2N^2}}(0 \cdots 0\ N\ Nx_j)^T$ 이고, $|\phi\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}}(x_1 \cdots x_N\ 0\ 0)^T$ 이다. 그리고 $|x_j\rangle$와 $|\phi\rangle$는 수직이 된다.

[0128] 수학식 6에 있는 $|\tilde{x}\rangle$에서 $|x_j\rangle$는 x_j에 대한 비트 정보를 가지고 있는데, $|x_j\rangle$쪽의 진폭(amplitude)이 $\frac{2N}{1+2N}$ 이므로 양자 측정 과정을 거치면 N이 커짐에 따라 확률 100%에 근사하게 양자 정보 $|x_j\rangle$를 획득한다.

[0129] 양자 정보 $|x_j\rangle$에 대한 양자 측정을 수행하여 디지털 정보 x_j 를 추출한다. 이 때, $x_j = \pm 1$이므로, $|x_j\rangle$가 될 수 있는 양자 정보 $\frac{1}{\sqrt{2N^2}}(0 \cdots 0\ N\ N)^T$ 와 $\frac{1}{\sqrt{2N^2}}(0 \cdots 0\ N\ -N)^T$ 는 서로 수직인 상태이다. 양자 측정에서 서로 수직인 상태는 오류 없이 구별할 수 있으므로 $|x_j\rangle$를 측정하여 $x_j = +1$인지 $x_j = -1$ 인지가 오류 없이 구해진다.

[0130] <QPSK 변조방식>

[0131] 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$ 에 적용된 변조방식이 QPSK 변조방식인 경우 $x_j = a_j + ib_j$ ($1 \leq j \leq N$)로 나타내지므로, a_j 및 b_j 를 구하기 위해 각각 다른 방정식 변형이 적용된다.

[0132] 우선, a_j 를 구하기 위해 MIMO 채널 행렬 A 및 수신벡터 $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 수학식 7과 같이 변형된다.

[0133] [수학식 7]

[0134] $$\tilde{A} = \begin{pmatrix} A & & O_1 & & O_3 \\ & O_2 & & \overline{A} & \\ 0\cdots0\ \ 0\ \ 0\cdots0 & & 0\cdots0\ \ 0\ \ 0\cdots0 & & 1\ \ 0 \\ 0\cdots0\ -N\ 0\cdots0 & & 0\cdots0\ -N\ 0\cdots0 & & 0\ \ 2 \end{pmatrix},\ \tilde{y} = \begin{pmatrix} y \\ \overline{y} \\ N \\ 0 \end{pmatrix}$$

[0135] 여기서 $\tilde{A}$는 크기가 $(2N+2) \times (2N+2)$ 인 행렬이고, $\tilde{A}$에서 2개의 $-N$은 x_j에 대해 각각 j 및 $N+j$ 번째 열에 위치한다. 또한 O_1 , O_2 는 크기가 $N \times N$ 인 영행렬이고, O_3는 크기가 $2N \times 2$인 영행렬을 나타낸다. $\overline{A}$는 A의 복소공액 행렬을 나타내고, $\overline{y}$는 y의 복소공액 행렬을 나타낸다. 또한, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타낸다.

[0136] 수학식 7은 원래 선형 방정식 $Ax = y$에 수학식 8와 같은 송신벡터 성분을 새롭게 추가하여 만들어진 방정식

이다.

[0137] [수학식 8]

[0138] $$\overline{A}x' = \overline{y},\ x_{2N+1} = N,\ \ -Nx_j - Nx_{N+j} + 2x_{2N+2} = 0$$

[0139] 여기서 $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 각각 A와 y의 복소공액 행렬이고, $x' = (x_{N+1} \quad \cdots \quad x_{2N})^T$와 x_{2N+1}, x_{2N+2}는 송신 벡터에 대해 추가된 변수이고, $x_{N+j} = \overline{x_j}$이다. 또한, $\tilde{A}$에서 2개의 $-N$은 x_j에 대해 각각 및 $N+j$번째 열에 위치한다.

[0140] 수학식 8은 양자 알고리즘을 적용하여 변형된 방정식을 풀었을 때, 양자 정보로 있는 방정식의 해가 a_j에 대한 정보를 별도로 가지게 해준다. 그래서 양자 측정 과정에서 a_j의 1비트 정보를 오류 없이 추출하게 만들어 준다. 이에 대해 하기에서 자세히 설명한다.

[0141] 수학식 7과 수학식 8을 참조하면, 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$의 첫 N개 방정식에서 해 $x_1, \cdots, x_N$이 구해지고, 그 다음 N개 방정식에서 해 $\overline{x_1}, \cdots, \overline{x_N}$가 구해진다. 그리고 마지막 2개 방정식에서 $x_{2N+1} = N$, $x_{2N+2} = \frac{1}{2}(Nx_j + Nx_{N+j}) = \frac{1}{2}(Nx_j + N\overline{x_j}) = Na_j$이 구해진다. 정리하면 선형 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$의 해 $\tilde{x}$는 수학식 9과 같다.

[0142] [수학식 9]

[0143] $$\begin{aligned}\tilde{x} &= (x_1 \quad \cdots \quad x_N\ x_{N+1} \quad \cdots \quad x_{2N}\ x_{2N+1}\ x_{2N+2})^T \\ &= (x_1 \quad \cdots \quad x_N\ \overline{x_1} \quad \cdots \quad \overline{x_N}\ N\ Na_j)^T\end{aligned}$$

[0144] 한편, 양자 컴퓨팅의 특성 때문에 양자 정보는 크기가 1로 정규화된 벡터로 표현된다. 따라서 양자 알고리즘을 적용하여 얻는 방정식의 해 $|\tilde{x}\rangle$는 수학식 9에 있는 $\tilde{x}$가 정규화된 다음 수학식 10와 같은 벡터가 된다.

[0145] [수학식 10]

[0146] $$|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{1}{4N+2N^2}}(x_1 \quad \cdots \quad x_N\ \overline{x_1} \quad \cdots \quad \overline{x_N}\ N\ Na_j)^T$$

[0147] 수학식 10을 보면, 원래 방정식의 해가 있는 부분은 $(x_1 \quad \cdots \quad x_N\ 0 \quad \cdots \quad 0\ 0\ 0)^T$이고, 수학식 8의 방정식 $\overline{A}x' = \overline{y}$를 추가하여 새로 생긴 해가 있는 부분은 $(0 \quad \cdots \quad 0\ \overline{x_1} \quad \cdots \quad \overline{x_N}\ 0\ 0)^T$이다, 이것은 원래 방정식의 해인 x_j들의 켤레 복소수 값 $\overline{x_j}$들이다.

[0148] 여기에 수학식 8의 방정식 $x_{2N+1} = N,\ \ -Nx_j - Nx_{N+j} + 2x_{2N+2} = 0$을 추가하여 새로 생긴 해가 있는 부분은 $(0 \quad \cdots \quad 0\ 0 \quad \cdots \quad 0N\ Na_j)^T$으로 여기에 a_j에 대한 정보가 별도로 존재한다. $(0 \quad \cdots \quad 0\ 0 \quad \cdots \quad 0N\ Na_j)^T$과 나머지 부분을 나누어 보면 수학식 11과 같이 나타내진다.

[0149] [수학식 11]

$$|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{1}{4N+2N^2}}\Big[(0 \quad \cdots \quad 0\,0 \quad \cdots \quad 0N\; Na_j)^T$$

[0150] $$+ (x_1 \quad \cdots \quad x_N\; \overline{x_1} \quad \cdots \quad \overline{x_N}\; 0\; 0)^T\Big]$$

[0151] 여기서 $(0 \quad \cdots \quad 0\,0 \quad \cdots \quad 0N\; Na_j)^T$ 와 $(x_1 \quad \cdots \quad x_N\; \overline{x_1} \quad \cdots \quad \overline{x_N}\; 0\; 0)^T$ 를 각각 정규화한 양자 정보로 표현하면, 수학식 11은 다음 수학식 12와 같이 나타내진다.

[0152] [수학식 12]

[0153] $$|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{N}{2+N}}|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{N}{2+N}}\,|a_j\rangle + \sqrt{\frac{2}{2+N}}\,|\phi\rangle\,|a_j\rangle + \sqrt{\frac{2}{2+N}}\,|\phi\rangle$$

[0154] 여기에서 $|a_j\rangle = \sqrt{\frac{1}{2N^2}}(0 \quad \cdots \quad 0\,0 \quad \cdots \quad 0N\; Na_j)^T$ 이고,

$|\phi\rangle = \sqrt{\frac{1}{4N}}(x_1 \quad \cdots \quad x_N\; \overline{x_1} \quad \cdots \quad \overline{x_N}\; 0\; 0)^T$ 이다. 그리고 $|a_j\rangle$와 $|\phi\rangle$는 수직이 된다.

[0155] 수학식 12에 있는 $|\tilde{x}\rangle$에서 $|a_j\rangle$는 a_j에 대한 비트 정보를 가지고 있는데, $|a_j\rangle$ 쪽의 진폭(amplitude)이 $\frac{N}{2+N}$ 이므로 양자 측정 과정을 거치면 N이 커짐에 따라 확률 100%에 근사하게 양자 정보 $|a_j\rangle$를 획득한다.

[0156] 양자 정보 $|a_j\rangle$에 대한 양자 측정을 수행하여 디지털 정보 a_j를 추출한다. 이 때, $a_j = \pm 1$이므로, 가능한 양자 정보 $|a_j\rangle$는 서로 수직인 상태이다. 양자 측정에서 서로 수직인 상태는 오류 없이 구별할 수 있으므로 $|a_j\rangle$를 측정하여 a_j 값을 오류 없이 구할 수 있다.

[0157] 다음으로, b_j를 구하기 위해 MIMO 채널 행렬 A 및 수신벡터 $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$ 는 수학식 13과 같이 변형된다.

[0158] [수학식 13]

[0159] $$\tilde{A} = \begin{pmatrix} A & O_1 & O_3 \\ O_2 & \overline{A} & \\ 0\cdots 0 \;\; 0 \;\; 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \;\; 0 \;\; 0\cdots 0 & 1 \;\; 0 \\ 0\cdots 0 \;\; -N \;\; 0\cdots 0 & 0\cdots 0 \;\; N \;\; 0\cdots 0 & 0 \;\; 2i \end{pmatrix},\ \tilde{y} = \begin{pmatrix} y \\ \overline{y} \\ N \\ 0 \end{pmatrix}$$

[0160] 여기서 $\tilde{A}$는 크기가 $(2N+2)\times(2N+2)$인 행렬이고, $\tilde{A}$에서 $-N$ 및 N은 x_j에 대해 각각 j 및 $N+j$번째 열에 위치한다. $\overline{A}$는 A의 복소공액 행렬을 나타내고, $\overline{y}$는 y의 복소공액 행렬을 나타낸다. 또한, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타낸다. 또한 O_1, O_2는 크기가 $N\times N$인 영행렬이고, O_3는 크기가 $2N\times 2$인 영행렬을 나타낸다.

[0161] 수학식 13은 원래 선형 방정식 $Ax = y$ 에 수학식 14와 같은 송신벡터의 성분들을 새롭게 추가하여 만들어진 방정식이다.

[0162] [수학식 14]

[0163] $$\overline{A}x' = \overline{y},\ \ x_{2N+1} = N,\ \ -Nx_j + Nx_{N+j} + 2ix_{2N+2} = 0$$

[0164] 여기서 $\overline{A}$ 와 $\bar{y}$ 는 각각 A 와 y 의 복소공액 행렬이고, $x' = (x_{N+1} \ \ \cdots \ \ x_{2N})^T$ 와 x_{2N+1}, x_{2N+2}는 송신 벡터에 대해 추가된 변수이고, $x_{N+j} = \overline{x_j}$ 이다. 또한, $\tilde{A}$ 에서 $-N$ 및 N 은 x_j 에 대해 각각 j 및 $N + j$ 번째 열에 위치한다.

[0165] 수학식 14는 양자 알고리즘을 적용하여 변형된 방정식을 풀었을 때, 양자 정보로 있는 방정식의 해가 b_j 에 대한 정보를 별도로 가지게 해준다. 그래서 양자 측정 과정에서 b_j 의 1비트 정보를 오류 없이 추출하게 만들어 준다. 이에 대해 하기에서 자세히 설명한다.

[0166] 수학식 13에 주어진 변형된 방정식에 대한 값 $\tilde{A}$ 와 $\tilde{y}$ 를 양자정보인 $U_{\tilde{A}}$ 와 $|\tilde{y}\rangle$ 로 변환한다.

[0167] 수학식 13과 수학식 14을 참조하면, 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$ 의 첫 N 개 방정식에서 해 $x_1, \cdots, x_N$ 이 구해지고, 그 다음 N 개 방정식에서 해 $\overline{x_1}, \cdots, \overline{x_N}$ 가 구해진다. 그리고 마지막 2개 방정식에서 $x_{2N+1} = N$, $x_{2N+2} = \frac{1}{2}\left(Nx_j - Nx_{N+j}\right) = \frac{1}{2}\left(Nx_j - N\overline{x_j}\right) = Nb_j$ 이 구해진다. 정리하면 선형 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$ 의 해 $\tilde{x}$ 는 수학식 15과 같다.

[0168] [수학식 15]

[0169] $$\tilde{x} = (x_1 \ \ \cdots \ \ x_N\ x_{N+1} \ \ \cdots \ \ x_{2N}\ x_{2N+1}\ x_{2N+2})^T$$
$$= \left(x_1 \ \ \cdots \ \ x_N\ \overline{x_1} \ \ \cdots \ \ \overline{x_N}\ N\ Nb_j\right)^T$$

[0170] 한편, 양자 컴퓨팅의 특성 때문에 양자 정보는 크기가 1로 정규화된 벡터로 표현된다. 따라서 양자 알고리즘을 적용하여 얻는 방정식의 해 $|\tilde{x}\rangle$ 는 수학식 15에 있는 $\tilde{x}$ 가 정규화된 다음 수학식 16와 같은 벡터가 된다.

[0171] [수학식 16]

[0172] $$|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{1}{4N + 2N^2}}\left(x_1 \ \ \cdots \ \ x_N\ \overline{x_1} \ \ \cdots \ \ \overline{x_N}\ N\ Nb_j\right)^T$$

[0173] 수학식 16을 보면, 원래 방정식의 해가 있는 부분은 $(x_1 \ \ \cdots \ \ x_N\ 0 \ \ \cdots \ \ 0\ 0\ 0)^T$ 이고, 수학식 14의 방정식 $\overline{A}x' = \overline{y}$ 를 추가하여 새로 생긴 해가 있는 부분은 $(0 \ \ \cdots \ \ 0\ \overline{x_1} \ \ \cdots \ \ \overline{x_N}\ 0\ 0)^T$ 이다, 이것은 원래 방정식의 해인 x_j 들의 켤레 복소수 값 $\overline{x_j}$ 들이다.

[0174] 여기에 수학식 14의 방정식 $x_{2N+1} = N,\ \ -Nx_j + Nx_{N+j} + 2x_{2N+2} = 0$ 을 추가하여 새로 생긴 해가 있는 부분은 $\left(0 \ \ \cdots \ \ 0\ 0 \ \ \cdots \ \ 0N\ Nb_j\right)^T$ 으로 여기에 b_j 에 대한 정보가 별도로 존재한다.

$(0 \quad \dots \quad 0\,0 \quad \dots \quad 0N\,Nb_j)^T$ 과 나머지 부분을 나누어 보면 수학식 17이 된다.

[0175] [수학식 17]

$$|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{1}{4N+2N^2}}\left[(0 \quad \dots \quad 0\,0 \quad \dots \quad 0\,N\,Nb_j)^T + (x_1 \quad \dots \quad x_N\,\overline{x_1} \quad \dots \quad \overline{x_N}\,0\,0)^T\right]$$

[0176]

[0177] 여기서 $(0 \quad \dots \quad 0\,0 \quad \dots \quad 0N\,Nb_j)^T$ 와 $(x_1 \quad \dots \quad x_N\,\overline{x_1} \quad \dots \quad \overline{x_N}\,0\,0)^T$ 를 각각 정규화한 양자 정보로 표현하면, 수학식 17은 다음 수학식 18와 같이 나타내진다.

[0178] [수학식 18]

$$|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{N}{2+N}}|b_j\rangle + \sqrt{\frac{2}{2+N}}|\phi\rangle\,|\tilde{x}\rangle = \sqrt{\frac{N}{2+N}}|b_j\rangle + \sqrt{\frac{2}{2+N}}|\phi\rangle$$

[0179]

[0180] 여기에서 $|b_j\rangle = \sqrt{\frac{1}{2N^2}}(0 \quad \dots \quad 0\,0 \quad \dots \quad 0\,N\,Nb_j)^T$ 이고, $|\phi\rangle = \sqrt{\frac{1}{4N}}(x_1 \quad \dots \quad x_N\,\overline{x_1} \quad \dots \quad \overline{x_N}\,0\,0)^T$ 이다. 그리고 $|b_j\rangle$ 와 $|\phi\rangle$ 는 수직이 된다.

[0181] 수학식 18에 있는 $|\tilde{x}\rangle$ 에서 $|b_j\rangle$ 는 b_j 에 대한 비트 정보를 가지고 있는데, $|b_j\rangle$ 쪽의 진폭(amplitude)이 $\frac{N}{2+N}$ 이므로 양자 측정 과정을 거치면 N 이 커짐에 따라 확률 100%에 근사하게 양자 상태 $|b_j\rangle$ 를 획득한다.

[0182] 양자 정보 $|b_j\rangle$ 에 대한 양자 측정을 수행하여 디지털 정보 b_j 를 추출한다. 이 때, $b_j = \pm 1$ 이므로, 가능한 양자 정보 $|b_j\rangle$ 는 서로 수직인 상태이다. 양자 측정에서 서로 수직인 상태는 오류 없이 구별할 수 있으므로 $|b_j\rangle$ 를 측정하여 b_j 값을 오류 없이 구할 수 있다.

[0183] <MPSK 변조방식>

[0184] 송신벡터 $x = (x_1 \quad \dots \quad x_N)^T$ 에 적용된 변조방식이 MPSK 변조방식인 경우 MIMO 채널 행렬 A 및 수신벡터 $y = (y_1 \quad \dots \quad y_N)^T$ 는 수학식 19와 같이 변형된다.

[0185] [수학식 19]

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} I_N & & & \\ O & A & & \\ & Y & A & \\ & & \ddots & \ddots \\ & & & Y \quad A \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \Omega & & & \\ & \Omega & & \\ & & \ddots & \\ & & & \Omega \quad \Omega \end{pmatrix},\ \tilde{y} = \begin{pmatrix} J \\ y \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

[0186]

[0187] 여기서, O 는 크기가 $N \times N$ 인 영행렬이고, Y 는 x_j 에 대해 $j\,(1 \le j \le N)$ 번째 열만 $-y_j$ 인 $N \times N$ 행렬이다. 또한 $\Omega = \mathrm{diag}(1, \dots, 1, N^{-1}, 1, \dots, 1)$ 는 x_j 에 대해 j 번째 항이 N^{-1} 인 $N \times N$ 대각

행렬이고, $J = (1 \quad \cdots \quad 1)^T$ 이다. 또한, I_N 은 크기가 $N \times N$ 인 항등 행렬이다. 또한, N 은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타낸다.

[0188] 수학식 19에서 $\tilde{A}$ 는 $MN \times MN$ 행렬이고 $\tilde{y}$ 는 길이가 MN 인 열벡터로 선형 방정식 $Ax = y$ 을 변수가 MN 인 방정식으로 변형시킨 것이다.

[0189] 선형 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$ 의 해 $\tilde{x}$ 는 x_j 에 대해 수학식 20과 같다.

[0190] [수학식 20]

[0191] $$\tilde{x} = N(1 \; x_j \; x_j^2 \; \cdots \; x_j^M) \otimes u + r$$

[0192] 여기서 $u = (0 \cdots 0 \; 1 \; 0 \cdots 0)^T$ 는 x_j 에 대해 j 번째 항만 1인 열벡터이고, r 은 $\tilde{x}$ 에서 앞의 항 $N(1 \; x_j \; x_j^2 \; \cdots \; x_j^M) \otimes u$ 을 제외한 나머지 부분이다.

[0193] 한편, 양자 컴퓨팅의 특성 때문에 양자 정보는 크기가 1로 정규화된 벡터로 표현된다. 따라서 양자 알고리즘을 적용하여 얻는 방정식의 해 $|\tilde{x}\rangle$ 는 수학식 20에 있는 $\tilde{x}$ 가 정규화된 다음 수학식 21과 같은 벡터가 된다.

[0194] [수학식 21]

[0195] $$|\tilde{x}\rangle = \frac{N}{\sqrt{N^2 + (N-1)}}|x_j\rangle|j-1\rangle + \frac{\sqrt{(N-1)}}{\sqrt{N^2 + (N-1)}}|\phi\rangle$$

[0196] 여기서 $|x_j\rangle = \frac{1}{\sqrt{M}}(1 \; x_j \; x_j^2 \; \cdots \; x_j^M)$ 이고, $|j-1\rangle$ 는 수학식 20에서 u 의 양자 상태 표현이다. 또한 $|\phi\rangle$ 는 $|x_j\rangle|j-1\rangle$ 와 수직인 부분이다.

[0197] 수학식 21의 $|\tilde{x}\rangle$ 에서 $|x_j\rangle$ 는 x_j 에 대한 정보를 포함하는 부분이며, $|x_j\rangle$ 의 진폭이 $\frac{N^2}{N^2+(N-1)}$ 이므로 양자 측정 과정을 거치면 N 이 커짐에 따라 확률 100%에 근사하게 양자 상태 $|x_j\rangle$ 를 획득한다.

[0198] 양자 상태 $|x_j\rangle$ 는 수학식 22와 같이 나타내진다.

[0199] [수학식 22]

[0200] $$|x_j\rangle = \otimes_{t=0}^{m-1} \left|x_j^{(t)}\right\rangle = \left|x_j^{(m-1)}\right\rangle \otimes \left|x_j^{(m-2)}\right\rangle \otimes \cdots \otimes \left|x_j^{(0)}\right\rangle$$

[0201] 여기서, $m = \log_2 M$ 이고, $\left|x_j^{(t)}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ x_j^{2^t} \end{pmatrix}$ 이다.

[0202] 수학식 22의 양자 상태 $|x_j\rangle$ 는 m 개 시스템에 각 양자 상태 $\left|x_j^{(t)}\right\rangle$ 가 있는 것으로 볼 수 있다.

[0203] 수학식 22에서, 양자 상태 $|x_j\rangle$ 의 첫번째 시스템에 있는 양자 상태 $\left|x_j^{(m-1)}\right\rangle$ 부터 마지막 시스템에 있는 양

자 상태 $\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\x_j\end{pmatrix}$ 까지 차례대로 양자 측정 과정을 거쳐서 x_j에 대한 정보를 추출한다. 이에 대해 다음에서 구체적으로 설명한다.

[0204] $x_j = e^{i\left(\frac{2\pi}{M}k\right)}$ 이므로, 수학식 22의 양자 상태 $|x_j\rangle$에서 첫번째 시스템에 있는 양자 상태 $\left|x_j^{(m-1)}\right\rangle$는 수학식 23과 같이 나타내진다.

[0205] [수학식 23]

[0206] $$\left|x_j^{(m-1)}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\e^{i\left(\frac{2\pi}{M}k2^{m-1}\right)}\end{pmatrix}$$

[0207] k는 $\{0, 1, \ldots, M-1\}$에 속하는 수 이므로, k를 2진법으로 표현하면 수학식 24와 같이 나타내진다.

[0208] [수학식 24]

[0209] $$k = k_{m-1}k_{m-2}\cdots k_0\ (2)$$

[0210] 수학식 24를 참조하면, 수학식 23의 $\left|x_j^{(m-1)}\right\rangle$에서 $k2^{m-1}$는 수학식 25와 같이 나타내진다.

[0211] [수학식 25]

[0212] $$k2^{m-1} = k_0 0\cdots 0\ (2) = 2^{m-1}k_0$$

[0213] 수학식 25를 참조하면, 수학식 23의 $\left|x_j^{(m-1)}\right\rangle$는 수학식 26과 같이 나타내진다.

[0214] [수학식 26]

[0215] $$\left|x_j^{(m-1)}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\e^{i\left(\frac{2\pi}{M}2^{m-1}k_0\right)}\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\e^{i(\pi k_0)}\end{pmatrix}$$

[0216] k_0는 0 또는 1 이므로, 수학식 26에서 $\left|x_j^{(m-1)}\right\rangle$가 가질 수 있는 상태는 서로 수직관계를 만족한다. 양자 측정에서 서로 수직인 상태는 오류 없이 구별할 수 있으므로 $\left|x_j^{(m-1)}\right\rangle$를 측정하여 k_0의 값을 구할 수 있다.

[0217] 수학식 22의 양자 상태 $|x_j\rangle$에서 두번째 시스템에 있는 양자 상태 $\left|x_j^{(m-2)}\right\rangle$는 수학식 27과 같이 나타내진다.

[0218] [수학식 27]

[0219] $$\left|x_j^{(m-2)}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\e^{i\left(\frac{2\pi}{M}k2^{m-2}\right)}\end{pmatrix}$$

[0220] 수학식 24를 참조하면, 수학식 27의 $\left|x_j^{(m-2)}\right\rangle$에서 $k2^{m-2}$는 수학식 28과 같이 나타내진다.

[0221] [수학식 28]

[0222] $$k2^{m-2} = k_1 k_0 0 \cdots 0 \; o_{(2)} = 2^{m-1}k_1 + 2^{m-2}k_0$$

[0223] 수학식 28을 참조하면, 수학식 27의 $\left|x_j^{(m-2)}\right\rangle$는 수학식 29와 같이 나타내진다.

[0224] [수학식 29]

[0225] $$\left|x_j^{(m-2)}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\ e^{i\left(\frac{2\pi}{M}(2^{m-1}k_1+2^{m-2}k_0)\right)}\end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\ e^{i\left(\pi k_1+\frac{\pi}{2}k_0\right)}\end{pmatrix}$$

[0226] 앞 단계에서 k_0의 값을 구했고 k_1는 0 또는 1이므로 수학식 29에서 $\left|x_j^{(m-2)}\right\rangle$가 가질 수 있는 상태는 서로 수직관계를 만족한다. 양자 측정에서 서로 수직인 상태는 오류 없이 구별할 수 있으므로 $\left|x_j^{(m-2)}\right\rangle$를 측정하여 k_1의 값을 구한다.

[0227] 이러한 방식으로 수학식 22의 $|x_j\rangle$에서 마지막 시스템에 있는 양자 상태 $\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\ x_j\end{pmatrix}$까지 차례대로 양자 측정 과정을 거치면, k_0의 값부터 k_{m-1}의 값까지 구하여 k의 값을 알아낸다. $x_j = e^{i\left(\frac{2\pi}{M}k\right)}$이므로 x_j의 값을 오류 없이 추출한다.

[0228] 다음은 송신단의 변조 방식이 QAM 변조 방식인 경우, 도 7의 norm extractor(701), amplitude extractor(702), 및 phase extractor(703)에서 각각 기 설정된 방정식 변환 및 선형방정식의 해를 구하는 방법에 대해 설명한다.

[0229] <QAM 변조방식: norm extractor>

[0230] 송신 벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$의 크기를 구하기 위해 MIMO 채널 행렬 A 및 수신벡터 $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 수학식 30과 같이 변형된다.

[0231] [수학식 30]

[0232] $$\tilde{A} = \begin{pmatrix}1 & O_1\\ O_2 & A\end{pmatrix}, \; \tilde{y} = \begin{pmatrix}N\\ y_1\\ \vdots\\ y_N\end{pmatrix}$$

[0233] 여기서, $\tilde{A}$는 크기가 $(N+1)\times(N+1)$인 행렬이다. O_1은 크기가 $1\times N$인 영행렬이고, O_2는 크기가 $N\times 1$인 영행렬이다. 또한, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타낸다.

[0234] 선형 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$의 해 $\tilde{x}$는 수학식 31과 같다.

[0235] [수학식 31]

[0236] $$\tilde{x} = (N \quad x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$$

[0237] 한편, 양자 정보는 크기가 1로 정규화된 벡터로 표현되므로 양자 알고리즘(HHL)을 적용하여 얻는 방정식의 해 $|\tilde{x}\rangle$는 수학식 31에 있는 $\tilde{x}$가 정규화된 수학식 32과 같은 벡터가 된다.

[0238] [수학식 32]

[0239] $$|\tilde{x}\rangle = \frac{N}{\sqrt{\|x\|^2 + N^2}}|0\rangle + \frac{\|x\|}{\sqrt{\|x\|^2 + N^2}}|\phi\rangle$$

[0240] 여기서, $|\phi\rangle$는 $|0\rangle$과 수직인 양자 상태이다.

[0241] 수학식 32에 있는 양자 상태 $|0\rangle$의 확률 진폭 a는 수학식 33과 같이 정의된다.

[0242] [수학식 33]

[0243] $$a \equiv \frac{N^2}{\|x\|^2 + N^2}$$

[0244] 양자 알고리즘(예: QAE 알고리즘)을 적용하여 수학식 33의 값을 추출하면, 송신벡터의 크기 $\|x\|$을 얻는다.

[0245] <QAM 변조방식: amplitude extractor>

[0246] 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$의 각 항인 $x_j = s_j + i \cdot t_j$ $(1 \leq j \leq N)$에 대해 개별 진폭의 값인 $|s_j|$ 및 $|t_j|$을 구하기 위해 각각 다른 방정식 변형이 적용된다.

[0247] 먼저, $|s_j|$를 구하기 위해 MIMO 채널 행렬 A 및 수신벡터 $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 수학식 34과 같이 변형된다.

[0248] MIMO 채널 행렬 A 및 수신벡터 $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 수학식 34과 같이 변형된다.

[0249] [수학식 34]

[0250] $$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \cdots 0 & -N & 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 & -N & 0 \cdots 0 \\ O_1 & & A & & & O_2 & \\ O_1 & & O_2 & & & \overline{A} & \end{pmatrix}, \quad \tilde{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

[0251] 여기서, O_1은 크기가 $N \times 1$인 영행렬이고, O_2는 크기가 $N \times N$인 영행렬이다. 그리고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 A와 y의 복소공액 행렬이고, $\tilde{A}$에서 2개의 $-N$은 x_j에 대해 각각 j 및 $N + j$번째 열에 위치한다. 또한, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타낸다.

[0252] 선형 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$의 해 $\tilde{x}$는 수학식 35와 같다.

[0253] [수학식 35]

[0254] $$\tilde{x} = \begin{pmatrix} Ns_j & x^T & \overline{x}^T \end{pmatrix}^T$$

[0255] 여기서, $\overline{x}$는 x의 복소공액 행렬이다.

[0256] 한편, 양자 컴퓨팅의 특성 때문에 양자 정보는 크기가 1로 정규화된 벡터로 표현된다. 따라서 양자 알고리즘을 적용하여 얻는 방정식의 해 $|\tilde{x}\rangle$는 수학식 35에 있는 $\tilde{x}$가 정규화된 다음 수학식 36과 같은 벡터가 된다.

[0257] [수학식 36]

[0258] $$|\tilde{x}\rangle = \frac{Ns_j}{\sqrt{N^2|s_j|^2 + 2\|x\|^2}}|0\rangle + \frac{\sqrt{2}\|x\|}{\sqrt{N^2|s_j|^2 + 2\|x\|^2}}|\phi\rangle$$

[0259] 여기서, $|\phi\rangle$는 $|0\rangle$과 수직인 양자 상태이다.

[0260] 수학식 36에 있는 양자 상태 $|0\rangle$의 확률 진폭 a는 수학식 37과 같이 정의된다.

[0261] [수학식 37]

[0262] $$a \equiv \frac{N^2|s_j|^2}{N^2|s_j|^2 + 2\|x\|^2}$$

[0263] 양자 알고리즘(예: QAE 알고리즘)을 적용하여 수학식 37의 값을 추출하면, 도 7의 norm extractor(701)으로부터 받은 송신벡터의 크기 $\|x\|$을 이용하여 송신벡터의 개별 진폭의 값인 $|s_j|$를 얻는다.

[0264] 다음으로, $|t_j|$를 구하기 위해 MIMO 채널 행렬 행렬 A 및 수신벡터 $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 수학식 38과 같이 변형된다.

[0265] [수학식 38]

[0266] $$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 2i & 0\cdots0 & -N & 0\cdots0 & 0\cdots0 & N & 0\cdots0 \\ O_1 & & A & & O_2 & & \\ O_1 & & O_2 & & \overline{A} & & \end{pmatrix}, \tilde{y} = \begin{pmatrix} 0 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

[0267] 여기서, O_1은 크기가 $N \times 1$인 영행렬이고, O_2는 크기가 $N \times N$인 영행렬이다. 그리고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 A와 y의 복소공액 행렬이고, $\tilde{A}$에서 $-N$ 및 N은 x_j에 대해 각각 i 및 $N+j$번째 열에 위치한다. 또한, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타낸다.

[0268] 선형 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$의 해 $\tilde{x}$는 수학식 39와 같다.

[0269] [수학식 39]

[0270] $$\tilde{x} = \begin{pmatrix} Nt_j & x^T & \overline{x}^T \end{pmatrix}^T$$

[0271] 여기서, $\overline{x}$는 x의 복소공액 행렬이다.

[0272] 한편, 양자 컴퓨팅의 특성 때문에 양자 정보는 크기가 1로 정규화된 벡터로 표현된다. 따라서 양자 알고리즘을 적용하여 얻는 방정식의 해 $|\tilde{x}\rangle$는 수학식 39에 있는 $\tilde{x}$가 정규화된 다음 수학식 40과 같은 벡터가 된다.

[0273] [수학식 40]

[0274] $$|\tilde{x}\rangle = \frac{Nt_j}{\sqrt{N^2|t_j|^2 + 2\|x\|^2}}|0\rangle + \frac{\sqrt{2}\|x\|}{\sqrt{N^2|t_j|^2 + 2\|x\|^2}}|\phi\rangle$$

[0275] 여기서, $|\phi\rangle$는 $|0\rangle$과 수직인 양자 상태이다.

[0276] 수학식 40의 양자 상태 $|0\rangle$의 확률 진폭 a는 수학식 41과 같이 정의된다.

[0277] [수학식 41]

[0278] $$a \equiv \frac{N^2|t_j|^2}{N^2|t_j|^2 + 2\|x\|^2}$$

[0279] 양자 알고리즘(예: QAE 알고리즘)을 적용하여 수학식 41의 값을 추출하면, 도 7의 norm extractor(701)으로부터 받은 송신벡터의 크기 $\|x\|$를 이용하여 송신벡터의 개별 진폭의 값인 $|t_j|$를 얻는다.

[0280] <QAM 변조방식: phase extractor>

[0281] 송신벡터 $x = (x_1 \quad \cdots \quad x_N)^T$의 각 항인 $x_j = s_j + i \cdot t_j$ $(1 \leq j \leq N)$에 대해 개별 진폭의 값인 s_j 및 t_j를 구하기 위해 각각 다른 방정식 변형이 적용된다.

[0282] 먼저, s_j를 구하기 위해 MIMO 채널 행렬 A 및 수신벡터 $y = (y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 수학식 42과 같이 변형된다.

[0283] [수학식 42]

[0284] $$\tilde{A} = \begin{pmatrix} N^{-1} & & \\ & I_{2N} & \\ & & A' \end{pmatrix}, \quad \tilde{y} = \begin{pmatrix} 1 \\ \mathcal{O} \\ y' \end{pmatrix}$$

[0285] 여기서, I_{2N}는 크기가 $2N \times 2N$인 항등행렬이고, $\mathcal{O}$는 크기가 $2N \times 1$인 영행렬이다. 또한, A' 및 y'는 수학식 43과 같다. 또한, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타낸다.

[0286] [수학식 43]

[0287] $$A' = \begin{pmatrix} 2|s_j| & 0 \cdots 0 & -N\,0 \cdots 0 & 0 \cdots 0 & -N\,0 \cdots 0 \\ \mathcal{O}_1 & & A & & \mathcal{O}_2 \\ \mathcal{O}_1 & & \mathcal{O}_2 & & \overline{A} \end{pmatrix}, \quad y' = \begin{pmatrix} 1 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

[0288] 여기서, O_1은 크기가 $N \times 1$인 영행렬이고, O_2는 크기가 $N \times N$인 영행렬이다. 그리고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 A와

y의 복소공액 행렬이고, A'에서 두 개의 $-N$은 s_j에 대해 각각 j 및 $N+j$번째 열에 위치한다.

[0289] 선형 방정식 $\tilde{A}\tilde{x}=\tilde{y}$의 해 $\tilde{x}$는 수학식 44와 같다.

[0290] [수학식 44]

[0291]
$$\tilde{x}=\begin{pmatrix} N & O^T & N\dfrac{s_j}{|s_j|} & x^T & \overline{x}^T \end{pmatrix}^T$$

[0292] 여기서, $\overline{x}$는 x의 복소공액 행렬이다.

[0293] 한편, 양자 컴퓨팅의 특성 때문에 양자 정보는 크기가 1로 정규화된 벡터로 표현된다. 따라서 양자 알고리즘을 적용하여 얻는 방정식의 해 $|\tilde{x}\rangle$는 수학식 44에 있는 $\tilde{x}$가 정규화된 다음 수학식 45과 같은 벡터가 된다.

[0294] [수학식 45]

[0295]
$$|\tilde{x}\rangle=\frac{\sqrt{2}N}{\sqrt{2N^2+2\|x\|^2}}|s_j\rangle|0\rangle+\frac{\sqrt{2}\|x\|}{\sqrt{2N^2+2\|x\|^2}}|\phi\rangle$$

[0296] 여기서, $|s_j\rangle=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}1\\ s_j/|s_j|\end{pmatrix}$이고, $|\phi\rangle$는 $|s_j\rangle|0\rangle$과 수직인 부분이다.

[0297] 수학식 45의 $|\tilde{x}\rangle$에서 $|s_j\rangle$는 $s_j/|s_j|$에 대한 정보가 있는 부분이다. 그리고 $|s_j\rangle$ 쪽의 진폭은 $\frac{N^2}{N^2+\|x\|^2}$인데, $\|x\|^2$의 값은 N의 상수배 정도 이므로 양자 측정 과정을 거치면 N이 커짐에 따라 확률 100%에 근사하게 양자 상태 $|s_j\rangle$를 획득한다.

[0298] 그리고나서, 양자 상태 $|s_j\rangle$에서 $s_j/|s_j|$에 대한 정보를 획득한다. 이 때, $s_j/|s_j|$가 가질 수 있는 값은 ±1이므로 가능한 양자 상태 $|s_j\rangle$는 서로 수직이다. 양자 특정에서 서로 수직인 상태는 오류 없이 구별할 수 있으므로 $|s_j\rangle$를 측정하여 $s_j/|s_j|$의 값을 구한다.

[0299] 도 7의 amplitude extractor(702)로부터 받은 송신 벡터의 개별 진폭의 값인 $|s_j|$를 이용하여 s_j의 값을 구한다.

[0300] 다음으로, t_j를 구하기 위해 MIMO 채널 행렬 A 및 수신벡터 $y=(y_1 \quad \cdots \quad y_N)^T$는 수학식 46과 같이 변형된다.

[0301] [수학식 46]

[0302]
$$\tilde{A}=\begin{pmatrix} N^{-1} & & \\ & I_{2N} & \\ & & A' \end{pmatrix},\ \tilde{y}=\begin{pmatrix}1\\ O\\ y'\end{pmatrix}$$

[0303] 여기서 I_{2N}은 크기가 $2N \times 2N$인 항등행렬이고, $\mathcal{O}$는 크기가 $2N \times 1$인 영행렬이다. 또한, N은 송신단 및 수신단의 안테나 개수를 나타낸다. 그리고 A' 및 y'는 수학식 47과 같다.

[0304] [수학식 47]

[0305] $$A' = \begin{pmatrix} 2i|t_j| & 0 \cdots 0 & -N\, 0 \cdots 0 & 0 \cdots 0\, N\, 0 \cdots 0 \\ \mathcal{O}_1 & A & \mathcal{O}_2 & \\ \mathcal{O}_1 & \mathcal{O}_2 & \overline{A} & \end{pmatrix}, \quad y' = \begin{pmatrix} 1 \\ y \\ \overline{y} \end{pmatrix}$$

[0306] 여기서 $\mathcal{O}_1$은 크기가 $N \times 1$인 영행렬이고, $\mathcal{O}_2$는 크기가 $N \times N$인 영행렬이다. 그리고, $\overline{A}$와 $\overline{y}$는 A와 y의 복소공액 행렬이고, A'에서 $-N$과 N은 t_j에 대해 각각 | 및 $N+j$번째 열에 위치한다.

[0307] 선형 방정식 $\tilde{A}\tilde{x} = \tilde{y}$의 해 $\tilde{x}$는 수학식 48과 같다.

[0308] [수학식 48]

[0309] $$\tilde{x} = \left(N \quad \mathcal{O}^T \quad N\frac{t_j}{|t_j|} \quad x^T \quad \overline{x}^T \right)^T$$

[0310] 여기서, $\overline{x}$는 x의 복소공액 행렬이다.

[0311] 한편, 양자 컴퓨팅의 특성 때문에 양자 정보는 크기가 1로 정규화된 벡터로 표현된다. 따라서 양자 알고리즘을 적용하여 얻는 방정식의 해 $|\tilde{x}\rangle$는 수학식 48에 있는 $\tilde{x}$가 정규화된 다음 수학식 49와 같은 벡터가 된다.

[0312] [수학식 49]

[0313] $$|\tilde{x}\rangle = \frac{\sqrt{2}N}{\sqrt{2N^2 + 2\|x\|^2}}|t_j\rangle|0\rangle + \frac{\sqrt{2}\|x\|}{\sqrt{2N^2 + 2\|x\|^2}}|\phi\rangle$$

[0314] 여기서, $|t_j\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix} 1 \\ t_j/|t_j| \end{pmatrix}$이고, $|\phi\rangle$는 $|t_j\rangle|0\rangle$과 수직인 부분이다.

[0315] 수학식 49의 $|\tilde{x}\rangle$에서 $|t_j\rangle$는 $t_j/|t_j|$에 대한 정보가 있는 부분이다. 그리고 $|t_j\rangle$ 쪽의 진폭은 $\frac{N^2}{N^2+\|x\|^2}$인데, $\|x\|^2$의 값은 N의 상수배 정보 이므로 양자 측정 과정을 거치면 N이 커짐에 따라 확률 100%에 근사하게 양자 상태 $|t_j\rangle$를 얻는다.

[0316] 그리고나서, 양자 상태 $|t_j\rangle$에서 $t_j/|t_j|$에 대한 정보를 획득한다. 이 때, $t_j/|t_j|$가 가질 수 있는 값은 ± 1이므로 가능한 양자 상태 $|t_j\rangle$는 서로 수직이다. 양자 측정에서 서로 수직인 상태는 오류 없이 구별할 수 있으므로 $|t_j\rangle$를 측정하여 $t_j/|t_j|$의 값을 구한다.

[0317] 도 7의 amplitude extractor(702)로부터 받은 송신 벡터의 개별 진폭의 값인 $|t_j|$를 이용하여 t_j의 값을 구한다.

[0318] 도 12는 본 개시의 일 실시예에 따른 MIMO 시스템에서 수신단이 단말인 경우 양자계산센터가 이용되는 과정을 나타낸 흐름도이다.

[0319] 도 12를 참조하면, 1201단계에서 단말(1210)은 기지국(1220)의 양자계산센터 관리 장치로 양자계산센터의 사용을 요청하는 메시지를 전송한다. 1202단계에서 기지국(1220)의 양자계산센터 관리 장치는 소정의 조건에 따라 단말(1210)의 양자계산센터 사용을 승인하고, 단말(1210)로 양자계산센터 사용을 승인하는 메시지를 전송한다. 그리고, 1203단계에서 기지국(1220)의 양자계산센터 관리 장치는 양자계산센터(1230)에게 사용준비를 지시하는 메시지를 전송한다. 이 때, 사용준비를 지시하는 메시지에는 양자계산센터 사용을 요청한 단말(1210)에 대한 정보가 포함된다. 1204단계에서 양자계산센터의 사용을 승인받은 단말(1210)은 양자계산센터(1230)로 양자계산의 대상이 되는 MIMO 채널 행렬 A 및 수신벡터 y를 전송한다. 1205단계에서 양자계산센터(1230)은 본 개시의 실시 예에 따른 양자 계산을 수행하여 MIMO 채널 입력 벡터인 송신벡터 x를 구한다. 1206단계에서 양자계산센터(1230)는 송신벡터 x를 단말(1210)로 전달하고, 기지국(1220)의 양자계산센터 관리 장치로 양자 계산이 완료되었음을 알리는 메시지를 전송한다.

[0320] 한편, 양자계산센터에서 사용하는 MIMO 채널 행렬 A와 수신벡터 y는 양자계산센터로 계산을 요청하는 장치(단말 또는 기지국)가 양자계산센터로 전송하고, 양자계산센터에서 계산된 MIMO 채널 입력 벡터(또는 송신벡터) x는 양자계산센터에 계산을 요청했던 장치뿐만 아니라, 지정된 다른 장치로 전송할 수 있다. 이 때, 지정된 장치는 양자계산센터로 계산을 요청하는 장치가 지정할 수 있다.

[0321] 또한, 양자계산센터는 실용화를 고려하면, 여러 장치가 공유하여 사용할 수 있다. 따라서, 다수의 사용자가 사용할 수 있는 멀티플렉싱(multiplexing) 기술을 적용하여 TDM(Time Division Multiplexing), FDM(Frequency Disvision Multiplexing) 등을 적용할 수 있다. 따라서, 양자계산센터의 사용을 관리하는 장치자 등이 사용 자원인 시간, 주파수 등을 양자계산센터를 사용하는 장치와 양자계산센터에 송수신하여 A, x, y를 전송할 수 있다.

[0322] 도 13은 본 개시의 일 실시예에 따른 양자계산센터의 구성을 나타낸 블록도이다.

[0323] 도 13을 참조하면, 양자계산센터(1300)는 네트워크 인퍼페이스(1301) 및 프로세서(1302)를 포함한다.

[0324] 네트워크 인터페이스(1301)는 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터를 전달받고, 획득한 MIMO 채널의 입력 벡터(또는 송신벡터)를 수신단으로 전달한다.

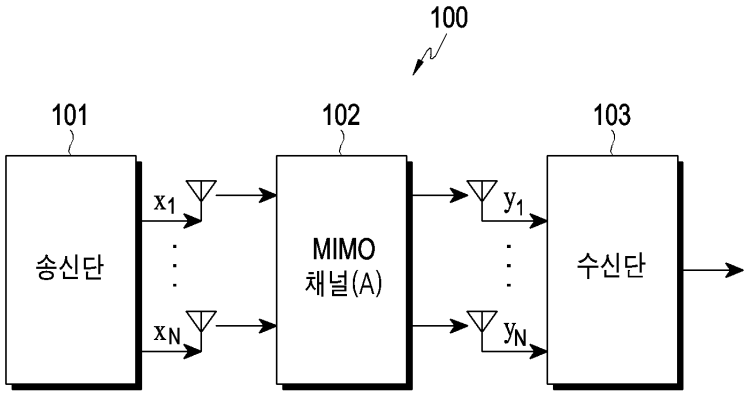
[0325] 프로세서(1302)는 도 3의 선형방정식 변형 모듈(301), C/Q converter(302), QLSS(303) 및 Q/C converter(304)의 역할을 수행하거나, 도 7의 norm extractor(701), amplitude extractor(702), 및 phase extractor(703)의 역할을 수행여 수신된 MIMO 채널 행렬 및 수신벡터에 양자 컴퓨팅을 수행하여 MIMO 채널의 입력벡터인 송신벡터를 획득하도록 한다.

[0326] 한편, 상기에서는 설명의 용이를 위해 MIMO 시스템을 예시하였다. 그러나, 본 개시는 이에 한정하지 않고 선형방정식을 사용하는 시스템에 대해 적용 가능한 것으로 이해하는 것이 타당하다.

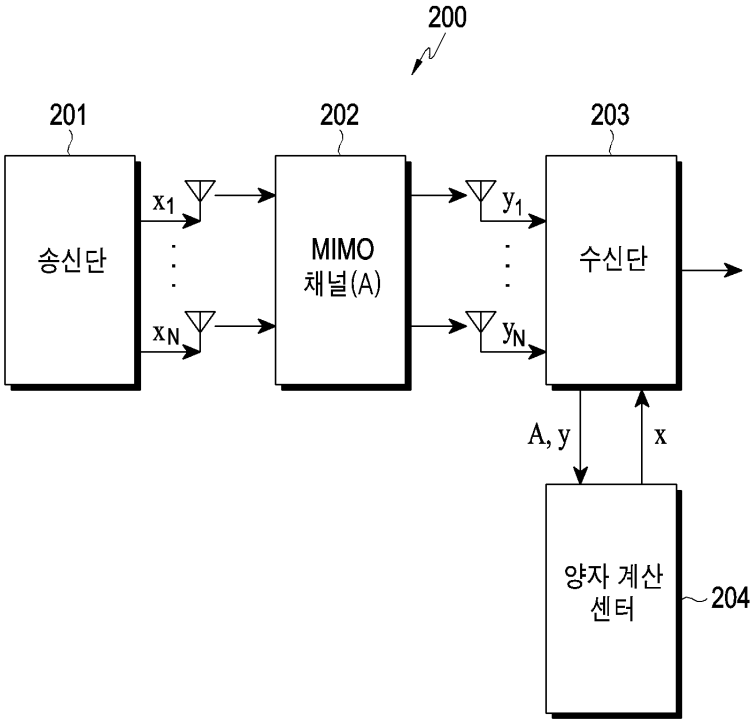
[0327] 또한, 본 개시의 상세한 설명에서는 구체적인 실시 예에 관해 설명하였으나, 본 개시의 범위에서 벗어나지 않는 한도 내에서 여러 가지 변형이 가능함은 물론이다. 그러므로 본 개시의 범위는 설명된 실시 예에 국한되어 정해져서는 안되며 후술하는 특허청구의 범위뿐만 아니라 이 특허청구의 범위와 균등한 것들에 의해 정해져야 한다.

도면

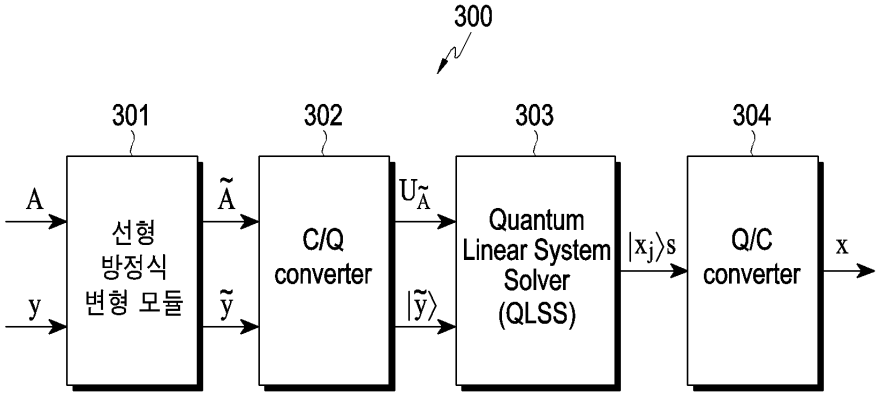
도면1


100
101
102
103
송신단
MIMO
채널(A)
수신단
x1
xN
y1
yN

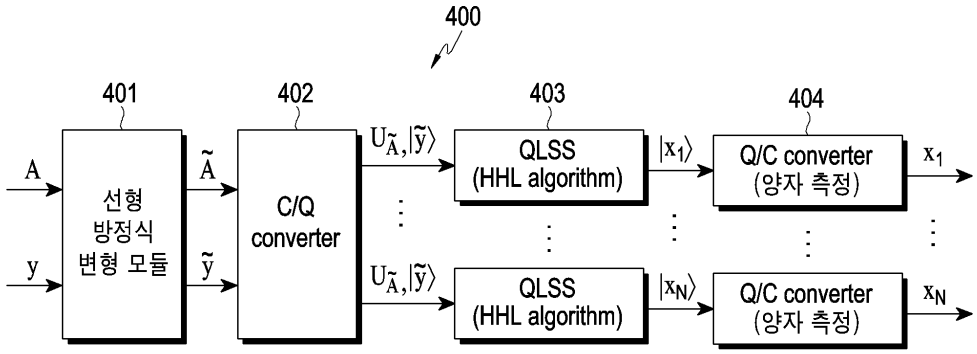
도면2


200
201
202
203
송신단
MIMO
채널(A)
수신단
x1
xN
y1
yN
A, y
x
양자 계산
센터
204

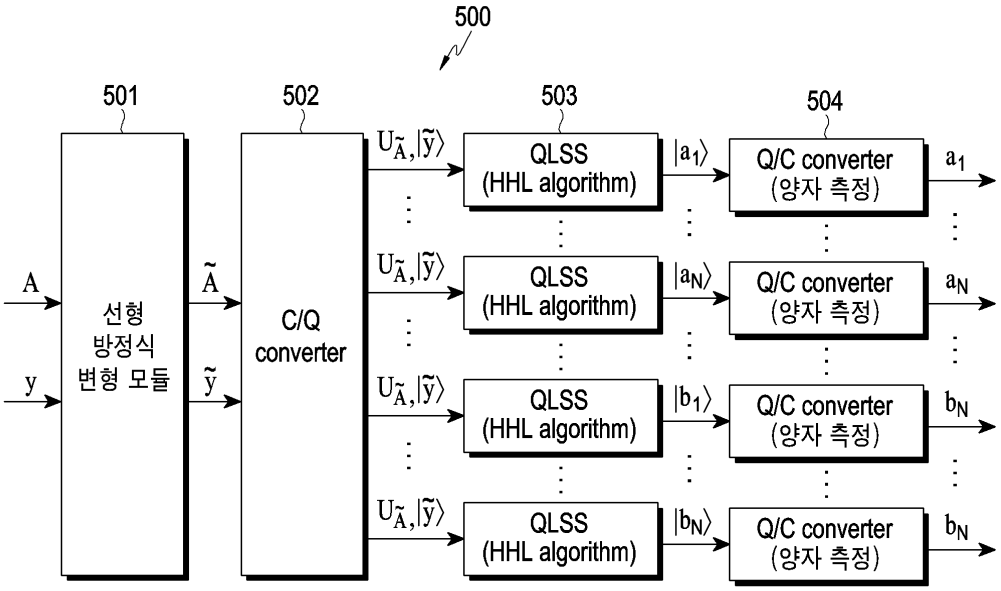
도면3


300
301
302
303
304
A
y
선형
방정식
변형 모듈
C/Q
converter
Quantum
Linear System
Solver
(QLSS)
Q/C
converter
x

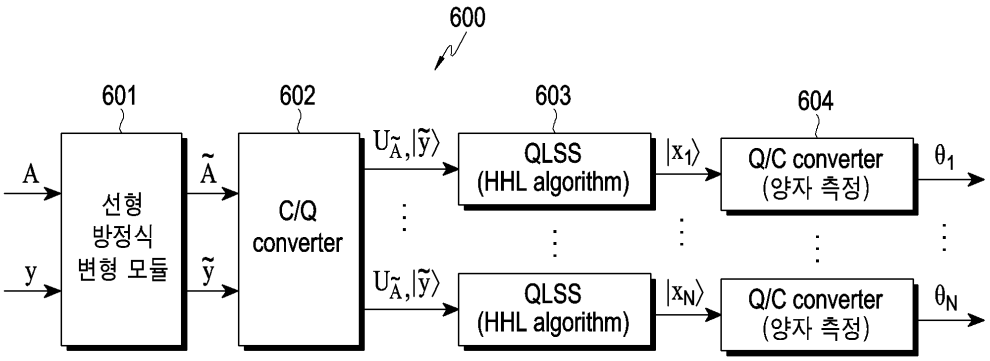
도면4


400
401
402
403
404
A
y
선형
방정식
변형 모듈
C/Q
converter
QLSS
(HHL algorithm)
QLSS
(HHL algorithm)
Q/C converter
(양자 측정)
Q/C converter
(양자 측정)

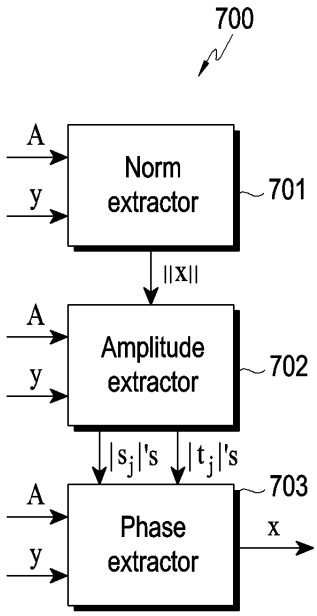
도면5


500
501
502
503
504
A
y
선형
방정식
변형 모듈
C/Q
converter
QLSS
(HHL algorithm)
Q/C converter
(양자 측정)

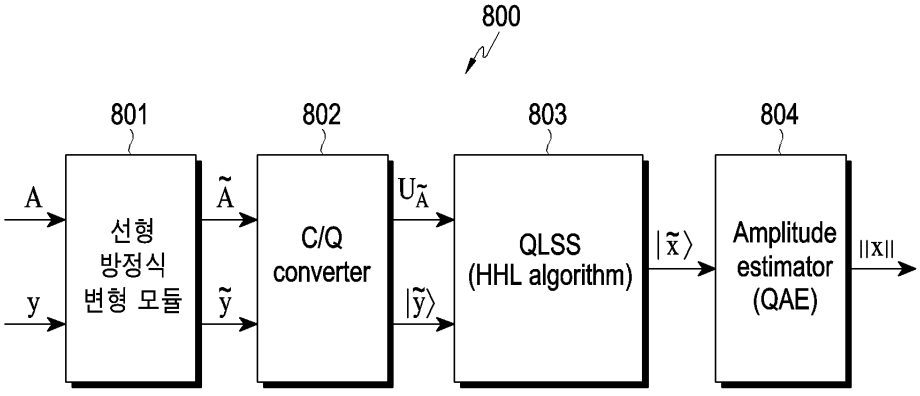
도면6


600
601
602
603
604
A
y
선형
방정식
변형 모듈
C/Q
converter
QLSS
(HHL algorithm)
Q/C converter
(양자 측정)

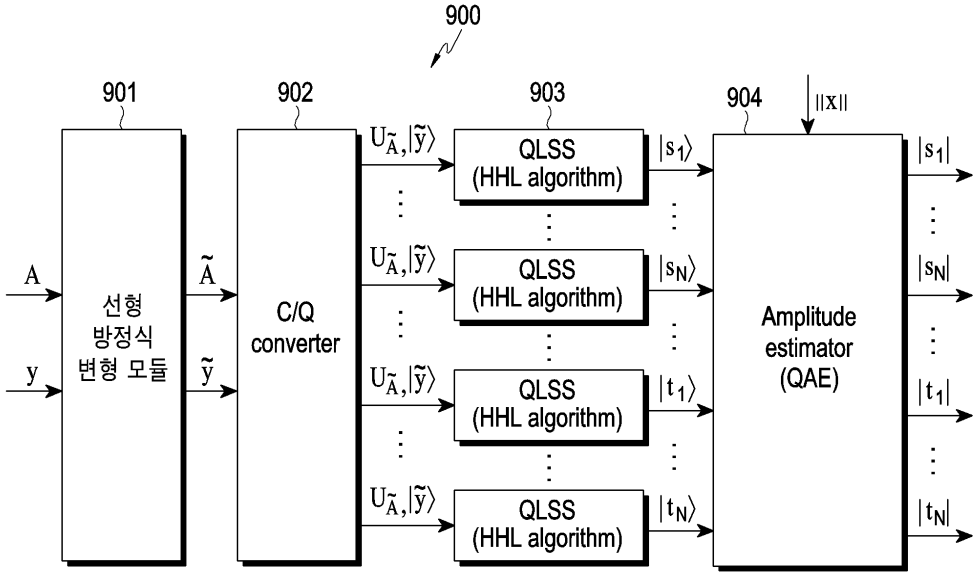
도면7


700
A
y
Norm extractor
701
||x||
A
y
Amplitude extractor
702
|s_j|'s
|t_j|'s
A
y
Phase extractor
703
x

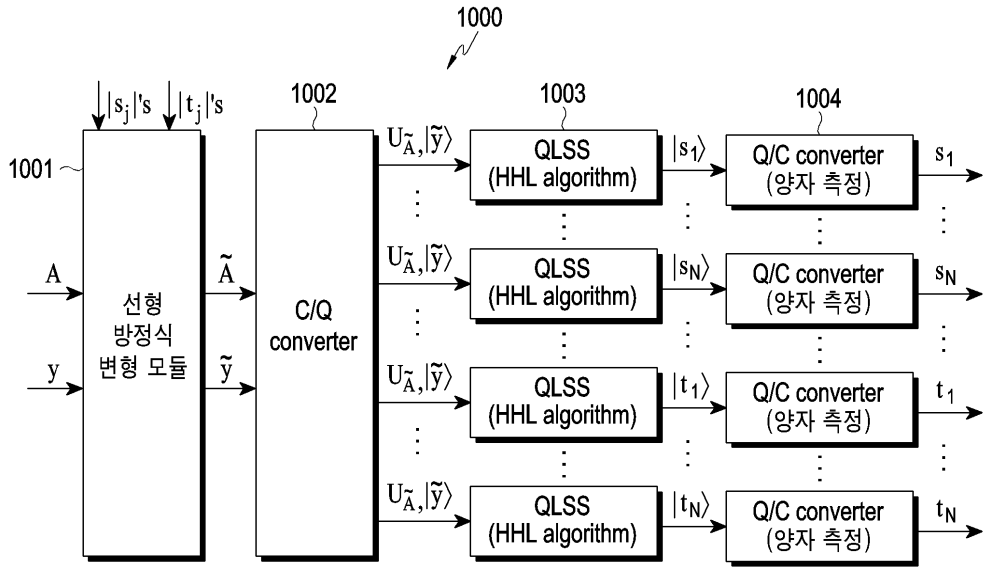
도면8


800
801
802
803
804
A
y
선형 방정식 변형 모듈
Ã
ỹ
C/Q converter
U_Ã
|ỹ⟩
QLSS (HHL algorithm)
|x̃⟩
Amplitude estimator (QAE)
||x||

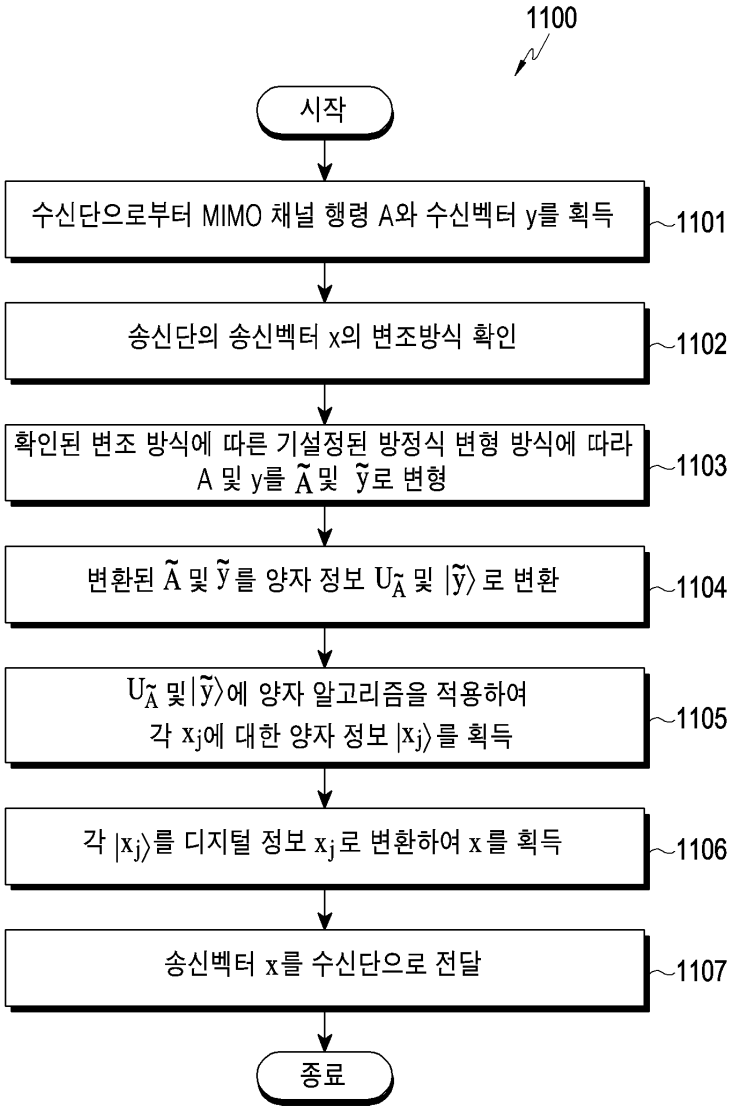
도면9


900
901
902
903
904
||x||
A
y
선형
방정식
변형 모듈
C/Q
converter
QLSS
(HHL algorithm)
Amplitude
estimator
(QAE)

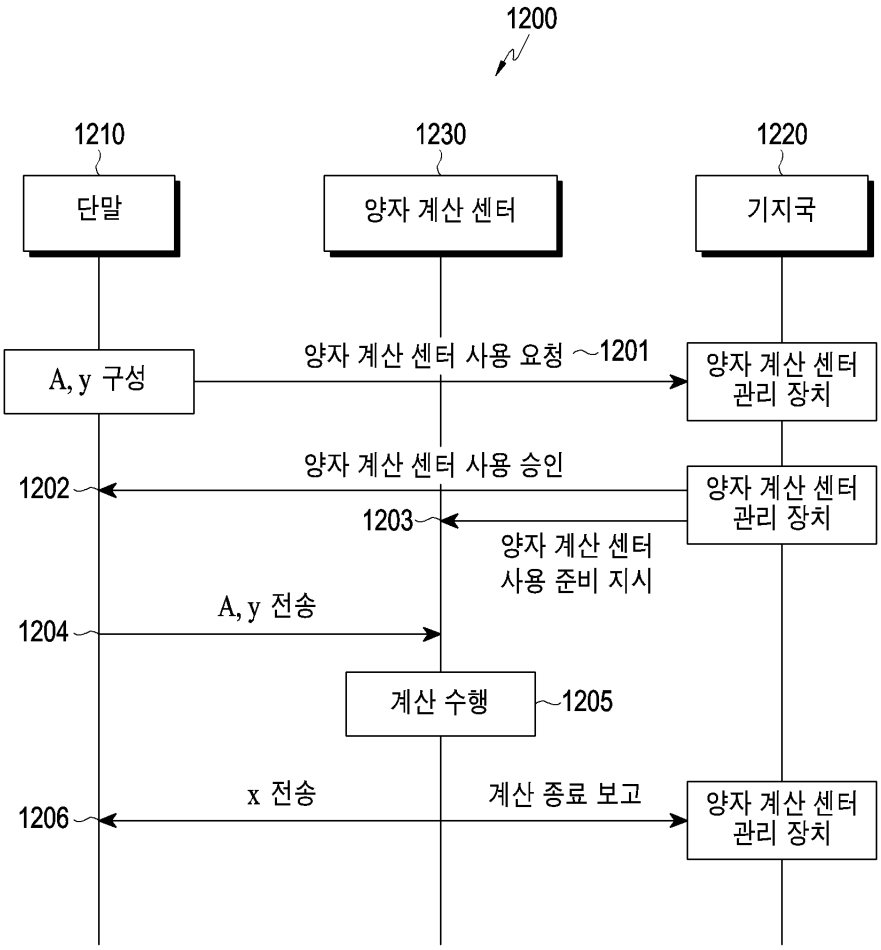
도면10


1000
1001
1002
1003
1004
A
y
선형
방정식
변형 모듈
C/Q
converter
QLSS
(HHL algorithm)
Q/C converter
(양자 측정)

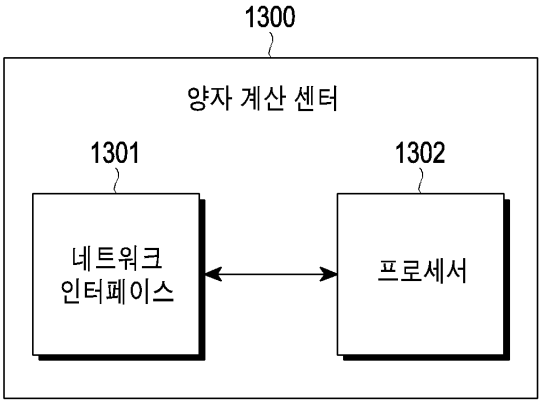
도면11


1100
시작
수신단으로부터 MIMO 채널 행렬 A와 수신벡터 y를 획득
1101
송신단의 송신벡터 x의 변조방식 확인
1102
확인된 변조 방식에 따른 기설정된 방정식 변형 방식에 따라 A 및 y를 $\tilde{A}$ 및 $\tilde{y}$로 변형
1103
변환된 $\tilde{A}$ 및 $\tilde{y}$를 양자 정보 $U_{\tilde{A}}$ 및 $|\tilde{y}\rangle$로 변환
1104
$U_{\tilde{A}}$ 및 $|\tilde{y}\rangle$에 양자 알고리즘을 적용하여 각 x_j에 대한 양자 정보 $|x_j\rangle$를 획득
1105
각 $|x_j\rangle$를 디지털 정보 x_j로 변환하여 x를 획득
1106
송신벡터 x를 수신단으로 전달
1107
종료

도면12


1200
1210
단말
1230
양자 계산 센터
1220
기지국
A, y 구성
양자 계산 센터 사용 요청
1201
양자 계산 센터
관리 장치
양자 계산 센터 사용 승인
1202
1203
양자 계산 센터
관리 장치
양자 계산 센터
사용 준비 지시
A, y 전송
1204
계산 수행
1205
x 전송
계산 종료 보고
1206
양자 계산 센터
관리 장치

도면13


1300
양자 계산 센터
1301
네트워크
인터페이스
1302
프로세서