



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2008년03월07일
(11) 등록번호 10-0809896
(24) 등록일자 2008년02월27일

(51) Int. Cl.

H04B 7/04 (2006.01) *H04B 7/06* (2006.01)*H04B 17/00* (2006.01)

(21) 출원번호 10-2006-7019327

(22) 출원일자 2006년09월19일

심사청구일자 2006년09월19일

번역문제출일자 2006년09월19일

(65) 공개번호 10-2006-0125908

(43) 공개일자 2006년12월06일

(86) 국제출원번호 PCT/US2005/005262

국제출원일자 2005년02월18일

(87) 국제공개번호 WO 2005/081483

국제공개일자 2005년09월01일

(30) 우선권주장

10/783,175 2004년02월19일 미국(US)

(56) 선행기술조사문헌

US 2004/087324 A1

US 2004/085939 A1

US 2004/082356 A1

전체 청구항 수 : 총 43 항

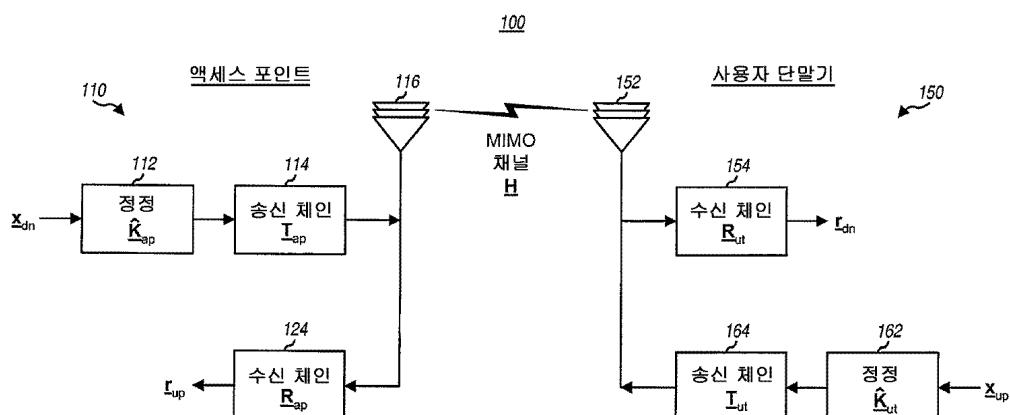
심사관 : 정구웅

(54) 무선 MIMO 통신 시스템에서 다운링크 및 업링크 채널응답의 캘리브레이션

(57) 요약

다운링크 및 업링크는 액세스 포인트 및 사용자 단말기에서 송신 및 수신 채인의 응답에서의 차를 설명하기 위하여 캘리브레이션된다. 개시 캘리브레이션에 대하여, 액세스 포인트 및 사용자 단말기는 다운링크 및 업링크 상에 응용할 수 있는, 송신/수신 채인의 응답을 포함하여 채널 추정치를 유도하기 위하여 이용되는, MIMO 파일럿을 송신한다. 정정 매트릭스 (a) 및 (b)는 이들 채널 추정치에 기초하여 유도되고 액세스 포인트 및 사용자 단말기에 의해 이용된다. 후속 캘리브레이션에 대하여, 하나의 엔터티는 MIMO 파일럿 및 스티어링 레퍼런스를 송신한다. 다른 엔터티는 스티어링 레퍼런스에 기초하여 제 1 송신 매트릭스를 유도하고 MIMO 파일럿 및 (a) 및 (b) 각각에서의 에러의 추정치를 포함하고 있는, 캘리브레이션 에러 매트릭스 (c) 및 (d)에 기초하여 제 2 송신 매트릭스를 유도한다. (c) 및 (d)는 2개의 송신 매트릭스간의 에러를 최소화하기 위해 적응적인 절차에 기초하여 반복적으로 조정될 수도 있다.

대표도



(72) 발명자
 월턴 제이 로드니
 미국 01741 매사추세츠주 칼리슬 하이우즈 레인 85

하워드 스티븐 제이
미국 01721 매사추세츠주 애쉬랜드 헤리티지 애비
뉴 75

특허청구의 범위

청구항 1

무선 다중-입력 다중-출력 통신 시스템에서 업링크 및 다운링크 채널을 캘리브레이션하는 방법으로서,

송신 엔터티와 수신 엔터티간에 MIMO 채널을 통하여 수신된 제 1 파일럿에 기초하여 제 1 송신 매트릭스를 유도하는 단계;

MIMO 채널의 응답의 추정치이고 MIMO 채널을 통하여 수신된 제 2 파일럿에 기초하여 유도된 MIMO 채널 응답 추정치와, 송신 엔터티에서 송신 및 수신 채인의 응답을 설명하기 위해 이용된 제 1 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 1 캘리브레이션 에러 매트릭스와, 수신 엔터티에서 송신 및 수신 채인의 응답을 설명하기 위해 이용된 제 2 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스에 기초하여 제 2 송신 매트릭스를 유도하는 단계; 및

상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스에 기초하여 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 수정하는 단계를 포함하는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 파일럿은 상기 MIMO 채널의 복수의 고유모드를 통하여 수신된 스티어링 파일럿인, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 제 2 파일럿은 송신 엔터티에서 복수의 송신 안테나로부터 전송된 복수의 파일럿 송신으로 구성된 MIMO 파일럿이고, 각각의 송신 안테나로부터의 상기 파일럿 송신은 수신 엔터티에서 식별 가능한, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 제 2 송신 매트릭스를 유도하는 단계는,

상기 MIMO 채널에 대한 고유벡터의 제 1 매트릭스를 획득하기 위하여 상기 MIMO 채널 응답 추정치를 분해하는 단계,

상기 MIMO 채널 응답 추정치와 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스에 기초하여 상기 MIMO 채널에 대한 고유벡터의 제 2 매트릭스를 계산하는 단계, 및

상기 고유벡터의 제 2 매트릭스 및 상기 MIMO 채널 응답 추정치에 기초하여 상기 제 2 송신 매트릭스를 계산하는 단계를 포함하는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 제 2 송신 매트릭스를 유도하는 단계는,

고유벡터의 제 3 매트릭스를 획득하기 위하여 고유벡터의 상기 제 2 매트릭스를 프로세싱하는 단계를 더 포함하고,

상기 제 2 매트릭스에 대한 프로세싱은, 상기 수신 엔터티로부터 상기 송신 엔터티에 의해 수신된 스티어링 파일럿에 기초하여 송신 매트릭스를 생성시키기 위해 상기 송신 엔터티에 의해 수행되는 프로세싱에 정합되고,

상기 제 2 송신 매트릭스는 고유벡터의 상기 제 3 매트릭스 및 상기 MIMO 채널 응답 추정치에 기초하여 계산되

는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

고유벡터의 상기 제 2 매트릭스를 프로세싱하는 단계는,

상기 제 2 매트릭스의 상기 고유벡터에 직교화를 수행하여 상기 제 3 매트릭스에 대하여 직교 고유벡터를 유도하는 단계를 포함하는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 7

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스는 최소 평균 제곱 에러 (MMSE) 적응적인 절차에 기초하여 수정되는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 8

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 수정하는 단계는,

상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스간의 차로서 에러 매트릭스를 계산하는 단계,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스내의 엘리먼트중 선택된 엘리먼트에 대하여 에러 매트릭스내의 엘리먼트에 대한 편미분을 유도하는 단계,

상기 편미분 및 상기 에러 매트릭스에 기초하여 업데이트 벡터를 계산하는 단계, 및

상기 업데이트 벡터로 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 업데이트하는 단계를 포함하는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 편미분을 유도하는 단계는,

상기 MIMO 채널 응답 추정치, 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스, 및 에러 벡터에 기초하여, 수정된 제 2 송신 매트릭스를 유도하는 단계,

상기 제 1 송신 매트릭스와 상기 수정된 제 2 송신 매트릭스간의 차로서 수정된 에러 매트릭스를 계산하는 단계, 및

상기 에러 매트릭스 및 상기 수정된 에러 매트릭스에 기초하여 상기 편미분을 계산하는 단계를 포함하는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 10

제 8 항에 있어서,

상기 에러 매트릭스와 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스는, 각각 실수 성분 및 허수 성분을 갖는 복소-값 엘리먼트들을 포함하고,

상기 편미분은 상기 실수 및 허수 성분에 대하여 개별적으로 유도되는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 11

제 8 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 수정하는 단계는,

상기 편미분으로 매트릭스를 형성하는 단계를 더 포함하고,

상기 업데이트 벡터는 상기 여러 매트릭스 및 상기 편미분의 매트릭스의 인버스에 기초하여 계산되는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 12

제 8 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 여러 매트릭스내의 엘리먼트중 선택된 엘리먼트는, 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 여러 매트릭스에서, 상부 최좌측 엘리먼트를 제외하고, 모든 대각선 엘리먼트를 포함하는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 13

제 8 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 여러 매트릭스를 수정하는 단계는

상기 업데이트 벡터가 종료 조건을 만족할 때까지 복수의 시간에 대하여 여러 매트릭스를 계산하고, 편미분을 유도하고, 업데이트 벡터를 계산하고, 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 여러 매트릭스를 업데이트하는 것을 반복하는 단계를 더 포함하는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 14

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 여러 매트릭스는 최급강하 (steepest descent) 적응적인 절차에 기초하여 수정되는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 15

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 여러 매트릭스를 수정하는 단계는,

상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스 간의 차로서 여러 매트릭스를 계산하는 단계,

상기 여러 매트릭스에 기초하여 전체 여러를 계산하는 단계,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 여러 매트릭스내의 엘리먼트중 선택된 엘리먼트에 대하여 상기 전체 여러에 대한 편미분을 유도하는 단계, 및

상기 편미분으로 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 여러 매트릭스를 업데이트하는 단계를 포함하는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 16

제 15 항에 있어서,

상기 전체 여러는 상기 여러 매트릭스내의 엘리먼트의 크기의 제곱의 합으로서 계산되는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 17

제 15 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 여러 매트릭스를 수정하는 단계는,

상기 전체 여러가 종료 조건을 만족할 때까지 복수의 시간에 대하여 여러 매트릭스를 계산하고, 전체 여러를 계산하고, 편미분을 유도하고, 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 여러 매트릭스를 업데이트하는 것을 반복하는 단계를 더 포함하는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 18

제 1 항에 있어서,

상기 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스로 상기 제 2 정정 매트릭스를 업데이트하는 단계를 더 포함하는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 19

제 1 항에 있어서,

상기 제 1 정정 매트릭스는 상기 제 1 캘리브레이션 에러 매트릭스로 업데이트되는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 20

제 1 항에 있어서,

상기 수신 엔터티는 시분할 듀플렉스 (TDD) MIMO 시스템에서의 사용자 단말기이고 상기 송신 엔터티는 시분할 듀플렉스 (TDD) MIMO 시스템에서의 액세스 포인트인, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 21

제 1 항에 있어서,

상기 시스템은 직교 주파수 분할 멀티플렉싱 (OFDM) 을 이용하고,

제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스의 세트는 서브밴드에서 수신된 상기 제 1 및 제 2 파일럿에 기초하여 복수의 서브밴드 각각에 대하여 유도되는, 업링크 및 다운링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 22

송신 엔터티와 수신 엔터티간에 MIMO 채널을 통하여 수신된 제 1 파일럿에 기초하여 제 1 송신 매트릭스를 유도하고,

MIMO 채널의 응답의 추정치이고 MIMO 채널을 통하여 수신된 제 2 파일럿에 기초하여 유도된 MIMO 채널 응답 추정치와, 송신 엔터티에서 송신 및 수신 체인의 응답을 설명하기 위해 이용된 제 1 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 1 캘리브레이션 에러 매트릭스와, 수신 엔터티에서 송신 및 수신 체인의 응답을 설명하기 위해 이용된 제 2 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스에 기초하여 제 2 송신 매트릭스를 유도하며, 및

상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스에 기초하여 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 수정하도록 동작하는 제어기; 및

상기 MIMO 채널을 통하여 송신 전에 상기 제 2 정정 매트릭스로 데이터 심볼을 곱하도록 동작하는 공간 프로세서를 포함하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 23

제 22 항에 있어서,

상기 제 1 파일럿은 상기 MIMO 채널의 복수의 고유모드를 통하여 수신된 스티어링 파일럿이고,

상기 제 2 파일럿은 송신 엔터티에서 복수의 송신 안테나로부터 전송된 복수의 파일럿 송신으로 구성된 MIMO 파일럿이고, 각각의 송신 안테나로부터의 상기 파일럿 송신은 상기 수신 엔터티에서 식별이 가능한, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 24

제 22 항에 있어서,

상기 제어기는 상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스간의 에러를 감소시키기 위하여 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 반복적으로 조정하는 적응적인 절차에 기초하여 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트

릭스를 수정하도록 동작하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 25

제 22 항에 있어서,

상기 제어기는 또한,

상기 MIMO 채널에 대한 고유벡터의 제 1 매트릭스를 획득하기 위하여 상기 MIMO 채널 응답 추정치를 분해하고,

상기 MIMO 채널 응답 추정치와 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스에 기초하여 상기 MIMO 채널에 대한 고유벡터의 제 2 매트릭스를 계산하고, 및

상기 고유벡터의 제 2 매트릭스 및 상기 MIMO 채널 응답 추정치에 기초하여 상기 제 2 송신 매트릭스를 계산하도록 동작하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 26

제 22 항에 있어서,

상기 제어기는 또한,

상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스 간의 차로서 에러 매트릭스를 계산하고,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스내의 엘리먼트 중 선택된 엘리먼트에 대하여 에러 매트릭스내의 엘리먼트에 대한 편미분을 유도하고,

상기 편미분 및 상기 에러 매트릭스에 기초하여 업데이트 벡터를 계산하고,

상기 업데이트 벡터로 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 업데이트하며, 및

상기 업데이트 벡터가 종료 조건을 만족할 때까지 복수의 시간에 대하여 에러 매트릭스를 계산하고, 편미분을 유도하고, 업데이트 벡터를 계산하고, 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 업데이트를 반복하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 27

제 22 항에 있어서,

상기 제어기는 또한,

상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스 간의 차로서 에러 매트릭스를 계산하고,

상기 에러 매트릭스에 기초하여 전체 에러를 계산하고,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스내의 엘리먼트 중 선택된 엘리먼트에 대하여 상기 전체 에러에 대한 편미분을 유도하고,

상기 편미분으로 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 업데이트하고, 및

상기 전체 에러가 종료 조건을 만족할 때까지 복수의 시간에 대하여 에러 매트릭스의 계산, 전체 에러의 계산, 편미분의 유도, 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스의 업데이트를 반복하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 28

송신 엔터티와 수신 엔터티간에 MIMO 채널을 통하여 수신된 제 1 파일럿에 기초하여 제 1 송신 매트릭스를 유도하는 수단,

MIMO 채널의 응답의 추정치이고 MIMO 채널을 통하여 수신된 제 2 파일럿에 기초하여 유도된 MIMO 채널 응답 추정치와, 송신 엔터티에서 송신 및 수신 체인의 응답을 설명하기 위해 이용된 제 1 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 1 캘리브레이션 에러 매트릭스와, 수신 엔터티에서 송신 및 수신 체인의 응답을 설명하기 위해 이용된 제 2 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스에 기초하여 제 2 송신 매트릭스를 유도하는 수단, 및

상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스에 기초하여 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 수정하는 수단을 포함하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 29

제 28 항에 있어서,

상기 제 1 파일럿은 상기 MIMO 채널의 복수의 고유모드를 통하여 수신된 스티어링 파일럿이고,

상기 제 2 파일럿은 송신 엔터티에서 복수의 송신 안테나로부터 전송된 복수의 파일럿 송신으로 구성된 MIMO 파일럿이고, 각각의 송신 안테나로부터의 상기 파일럿 송신은 상기 수신 엔터티에서 식별이 가능한, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 30

제 28 항에 있어서,

상기 MIMO 채널에 대한 고유벡터의 제 1 매트릭스를 획득하기 위하여 상기 MIMO 채널 응답 추정치를 분해하는 수단,

상기 MIMO 채널 응답 추정치와 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스에 기초하여 상기 MIMO 채널에 대한 고유벡터의 제 2 매트릭스를 계산하는 수단, 및

상기 고유벡터의 제 2 매트릭스 및 상기 MIMO 채널 응답 추정치에 기초하여 상기 제 2 송신 매트릭스를 계산하는 수단을 더 포함하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 31

제 28 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스간의 차로서 에러 매트릭스를 계산하는 수단,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스내의 엘리먼트중 선택된 엘리먼트에 대하여 에러 매트릭스 내의 엘리먼트에 대한 편미분을 유도하는 수단,

상기 편미분 및 상기 에러 매트릭스에 기초하여 업데이트 벡터를 계산하는 수단,

상기 업데이트 벡터로 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 업데이트하는 수단, 및

상기 업데이트 벡터가 종료 조건을 만족할 때까지 복수의 시간에 대하여 에러 매트릭스의 계산, 편미분의 유도, 업데이트 벡터의 계산, 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스의 업데이트를 반복하는 수단을 더 포함하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 32

제 28 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스 간의 차로서 에러 매트릭스를 계산하는 수단,

상기 에러 매트릭스에 기초하여 전체 에러를 계산하는 수단,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스내의 엘리먼트중 선택된 엘리먼트에 대하여 상기 전체 에러에 대한 편미분을 유도하는 수단,

상기 편미분으로 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 업데이트하는 수단, 및

상기 전체 에러가 종료 조건을 만족할 때까지 복수의 시간에 대하여 에러 매트릭스의 계산, 전체 에러의 계산, 편미분의 유도, 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스의 업데이트를 반복하는 수단을 더 포함하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 33

무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템에서 다운링크 및 업링크 채널을 캘리브레이션하는 방법으로서,

송신 엔터티에서 송신 및 수신 체인의 응답을 설명하기 위하여 이용된 제 1 정정 매트릭스와, 수신 엔터티에서 송신 및 수신 체인의 응답을 설명하기 위하여 이용된 제 2 정정 매트릭스를 획득하기 위하여, 송신 엔터티와 수신 엔터티간에 MIMO 채널에 대한 다운링크 및 업링크 채널 응답 추정치에 기초하여 제 1 캘리브레이션을 수행하는 단계; 및

상기 제 1 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 1 캘리브레이션 에러 매트릭스와, 제 2 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 획득하기 위하여, MIMO 채널을 통하여 수신된 제 1 및 제 2 파일럿에 기초하여 제 2 캘리브레이션을 수행하는 단계를 포함하는, 다운링크 및 업링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 34

제 33 항에 있어서,

상기 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스로 상기 제 2 정정 매트릭스를 업데이트하는 단계를 더 포함하는, 다운링크 및 업링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 35

제 33 항에 있어서,

상기 제 1 파일럿은 상기 MIMO 채널의 복수의 고유모드를 통하여 수신된 스티어링 파일럿이고,

상기 제 2 파일럿은 송신 엔터티에서 복수의 송신 안테나로부터 전송된 복수의 파일럿 송신으로 구성된 MIMO 파일럿이고, 각각의 송신 안테나로부터의 상기 파일럿 송신은 상기 수신 엔터티에서 식별이 가능한, 다운링크 및 업링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 36

제 33 항에 있어서,

상기 제 2 캘리브레이션을 수행하는 단계는,

상기 제 1 파일럿에 기초하여 제 1 송신 매트릭스를 유도하는 단계,

상기 제 2 파일럿으로부터 획득된 MIMO 채널 응답 추정치에 기초하여 제 2 송신 매트릭스를 유도하는 단계, 및 상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스에 기초하여 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 수정하는 단계를 포함하는, 다운링크 및 업링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 37

제 36 항에 있어서,

상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스는 상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스 간의 에러를 감소시키기 위하여 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 반복적으로 조정하는 적응적인 절차를 이용하여 수정되는, 다운링크 및 업링크 채널 캘리브레이션 방법.

청구항 38

송신 엔터티에서 송신 및 수신 체인의 응답을 설명하기 위하여 이용된 제 1 정정 매트릭스와, 수신 엔터티에서 송신 및 수신 체인의 응답을 설명하기 위하여 이용된 제 2 정정 매트릭스를 획득하기 위하여, 송신 엔터티와 수신 엔터티간의 MIMO 채널에 대한 다운링크 및 업링크 채널 응답 추정치에 기초하여 제 1 캘리브레이션을 수행하고, 및

상기 제 1 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 1 캘리브레이션 에러 매트릭스와, 상기 제 2 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 획득하기 위하여, MIMO 채널을 통하여 수신된 제 1 및 제 2 파일럿에 기초하여 제 2 캘리브레이션을 수행하도록 동작하는 제어기; 및

MIMO 채널을 통하여 송신 전에 상기 제 2 정정 매트릭스로 데이터 심볼을 곱하도록 동작하는 공간 프로세서를 포함하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 39

제 38 항에 있어서,
 상기 제어기는,
 상기 제 1 파일럿에 기초하여 제 1 송신 매트릭스를 유도하고,
 상기 제 2 파일럿으로부터 획득된 MIMO 채널 응답 추정치에 기초하여 제 2 송신 매트릭스를 유도하고, 및
 상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스에 기초하여 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 수정하도록 동작하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 40

제 39 항에 있어서,
 상기 제어기는,
 상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스 간의 에러를 감소시키기 위하여 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 반복적으로 조정하는 적응적인 절차를 이용하여 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 수정하도록 동작하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 41

송신 엔터티에서 송신 및 수신 체인의 응답을 설명하기 위하여 이용된 제 1 정정 매트릭스와, 수신 엔터티에서 송신 및 수신 체인의 응답을 설명하기 위하여 이용된 제 2 정정 매트릭스를 획득하기 위하여, 송신 엔터티와 수신 엔터티간의 MIMO 채널에 대한 다운링크 및 업링크 채널 응답 추정치에 기초하여 제 1 캘리브레이션을 수행하는 수단; 및

제 1 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 1 캘리브레이션 에러 매트릭스와, 제 2 정정 매트릭스에서 에러의 추정치를 포함하는 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 획득하기 위하여, MIMO 채널을 통하여 수신된 제 1 및 제 2 파일럿에 기초하여 제 2 캘리브레이션을 수행하는 수단을 포함하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 42

제 41 항에 있어서,
 상기 제 2 캘리브레이션을 수행하는 수단은,
 상기 제 1 파일럿에 기초하여 제 1 송신 매트릭스를 유도하는 수단,
 상기 제 2 파일럿으로부터 획득된 MIMO 채널 응답 추정치에 기초하여 제 2 송신 매트릭스를 유도하는 수단, 및
 상기 제 1 및 제 2 송신 매트릭스에 기초하여 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 수정하는 수단을 포함하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

청구항 43

제 42 항에 있어서,
 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스는 제 1 및 제 2 송신 매트릭스 간의 에러를 감소시키기 위하여
 상기 제 1 및 제 2 캘리브레이션 에러 매트릭스를 반복적으로 조정하는 적응적인 절차를 이용하여 수정하는, 무선 다중-입력 다중-출력 (MIMO) 통신시스템 장치.

명세서

<1>

배경

<2>

기술분야

<3>

본 발명은 일반적으로 통신에 관한 것으로서, 좀 더 상세하게는, 무선 다중-입력 다중-출력 통신 시스템 (MIMO)

의 다운링크 및 업링크 채널 응답을 캘리브레이션하는 기술에 관한 것이다.

<4>

배경

<5>

MIMO 시스템은 데이터 통신시 복수 (N_T) 송신 안테나 및 복수 (N_R) 수신 안테나를 사용한다. N_T 개의 송신 안테나 및 N_R 개의 수신 안테나로 형성된 MIMO 채널은 $N_s \leq \min\{N_T, N_R\}$ 인 N_s 개의 공간 채널로 분해될 수 있다. N_s 개의 공간 채널은 전체적으로 좀 더 높은 스루풋 (throughput) 을 달성하거나 가외로 좀 더 높은 신뢰도를 달성하기 위하여 데이터를 병렬로 송신하기 위해 이용될 수도 있다.

<6>

고성능을 달성하기 위하여, 종종, MIMO 채널의 응답을 알 필요가 있다. 예를 들어, 액세스 포인트는 사용자 단말기로의 다운링크 송신에 대한 공간 프로세싱을 수행하기 위하여 다운링크 채널의 응답을 아는 것이 필요할 수도 있다. 하나의 종래 채널 추정 기술에서, 액세스 포인트는 다운링크상에 파일럿을 송신하고, 사용자 단말기는 파일럿에 기초하여 다운링크 채널 응답을 추정하고 액세스 포인트로 다운링크 채널 응답 추정치를 재전송한다. 이 채널 추정 기술은, 바람직하지 않게, 업링크 자원을 이용하고 또한 채널 추정 응답 추정치를 재전송시 지연을 야기한다.

<7>

TDD 시스템은 다운링크가 시간의 일부에 할당되고 업링크가 그 시간의 나머지 부분에 할당되게 하여, 다운링크 및 업링크 모두에 대하여 하나의 주파수 대역을 이용한다. TDD 시스템에 대하여, 다운링크 및 업링크 채널 응답은 서로 상반된다고 가정될 수도 있다. 즉, \underline{H} 이 안테나 어레이 (array) A로부터 안테나 어레이 B까지의 채널 응답 매트릭스를 나타내면, 상반 채널은 어레이 B로부터 어레이 A까지 연결은 \underline{H} 의 전치행렬 (transpose) 인 \underline{H}^T 에 의해 주어진다. 상반 채널에서, 하나의 링크에 대한 채널 응답 (예를 들어, 다운링크) 은 다른 링크 (예를 들어, 업링크) 를 통하여 수신된 파일럿에 기초하여 추정될 수도 있다.

<8>

액세스 포인트 및 사용자 단말기는 모두 송신 및 수신을 위해 각각 송신 및 수신 체인을 이용한다. 그 후, 다운링크 송신은 액세스 포인트의 송신 체인 및 사용자 단말기의 수신 체인의 응답을 포함하는 "효과적인" 다운링크 채널 응답을 관측한다. 대응적으로, 업링크 송신은 사용자 단말기에서의 송신 체인 및 액세스 포인트에서의 수신 체인의 응답을 포함하는 효과적인 업링크 채널 응답을 관측한다. 통상, 액세스 포인트에서 송신 및 수신 체인의 응답은 사용자 단말기에서의 송신 및 수신 체인의 응답과는 다르다. 그 결과, 통상, 효과적인 업링크 및 다운링크 채널 응답은 서로간에 상반적이지 않다. 하나의 링크에 대해 획득된 채널 응답 추정치가 다른 링크에 대한 공간 프로세싱을 위해 이용된다면, 액세스 포인트 및 사용자 단말기에서의 송신/수신 체인의 응답에서의 임의의 차는, 판정되지 않고 설명되지 않으면, 성능을 저하시킬 수도 있는 에러를 나타낸다.

<9>

따라서, TDD MIMO 시스템에서 다운링크 및 업링크 채널 응답을 캘리브레이션하기 위한 기술에 대한 당업계의 요구가 있다.

<10>

개요

<11>

액세스 포인트 및 사용자 단말기에서 송신 및 수신 체인의 응답의 차를 설명하기 위해 다운링크 및 업링크 채널 응답을 캘리브레이션하는 기술이 여기서 설명된다. 캘리브레이션 후, 하나의 링크에 대해 획득된 채널 응답 추정치는 다른 링크에 대한 채널 응답 추정치로서 이용될 수도 있다. 이는 채널 추정치 및 공간 프로세싱을 단순화할 수 있다.

<12>

캘리브레이션은 개시 캘리브레이션 및 후속 캘리브레이션의 2개의 부분으로 분리되어질 수도 있다. 개시 캘리브레이션에 대하여, 액세스 포인트 및 사용자 단말기는 다운링크 및 업링크상에 각각에 MIMO 파일럿 (이하 설명됨) 을 송신한다. MIMO 파일럿은 해당되는 송신/수신 체인의 응답을 포함하는 "효과적인" 다운링크 및 업링크 채널 응답 추정치, $\hat{\underline{H}}_{dn}$ 및 $\hat{\underline{H}}_{up}$ 를 유도하기 위해 이용된다. 이하에서 설명되는 바와 같이, 그 후, 채널 추정치 $\hat{\underline{H}}_{dn}$ 및 $\hat{\underline{H}}_{up}$ 는 송신/수신 체인의 응답을 설명하기 위해 액세스 포인트 및 사용자 단말기 각각에 의해 이용된 정정 매트릭스 $\hat{\underline{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\underline{K}}_{ut}$ 를 유도하기 위해 이용된다.

<13>

후속 캘리브레이션에 대하여, 하나의 엔터티 (예를 들어, 액세스 포인트) 는 MIMO 파일럿 및 스티어링 레퍼런스

(이하에서 후술됨) 를 송신한다. 다른 엔터티 (예를 들어, 사용자 단말기) 는 (1)스티어링 레퍼런스에 기초하여 "실제 수신된" 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_a$ 및 (2) MIMO 파일럿 및 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 에 기초하여 "가정된" 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_{hyp}$ 를 유도한다. 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 는 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 각각에서 에러의 추측 또는 추정치를 포함한다. 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_a$ 와 $\tilde{\mathbf{V}}_{hyp}$ 사이의 차는 정정 매트릭스에서 에러의 추정치의 정확도를 나타낸다. 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 는 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_a$ 와 $\tilde{\mathbf{V}}_{hyp}$ 간의 에러를 최소화하기 위해 적응적인 절차에 기초하여 조정될 수도 있다. 반복적으로 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 를 조정하기 위한 몇몇 적응적인 절차는 이하에서 설명된다. 그 후, 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 는 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 각각에 의해 업데이트 될 수도 있다.

<14> 본 발명의 다양한 양태 및 실시 예가 이하에서 좀 더 자세히 설명된다.

도면의 간단한 설명

<16> 도 1은 TDD MIMO 시스템에서 액세스 포인트 및 사용자 단말기에서의 송신부 및 수신부를 도시한다.

<17> 도 2는 송신/수신 체인을 설명하기 위한 액세스 포인트 및 사용자 단말기에서의 정정 매트릭스의 이용을 도시한다.

<18> 도 3은 개시 캘리브레이션, 정상 동작, 및 후속 캘리브레이션에 대하여 액세스 포인트 및 사용자 단말기에 의해 수행된 프로세스를 도시한다.

도 4는 최소 평균 제곱 에러 (MMSE) 적응적인 절차를 도시한다.

<20> 도 5는 최급강하 (steepest descent) 적응적인 절차를 도시한다; 및

<21> 도 6은 액세스 포인트 및 사용자 단말기의 블록도를 도시한다.

상세한 설명

<23> 여기서 이용된 "예시적인"은 "예, 예증, 또는 예시로서만 제공되는 것을 의미한다. "예시적인"으로 여기서 설명된 임의의 실시 예는 다른 실시예에 대해 반드시 바람직하거나 유리한 것으로써 해석되지는 않아야한다.

<24> 여기서 설명된 캘리브레이션 기술은 다중-캐리어 TDD MIMO 시스템뿐만 아니라 싱글-캐리어를 위해 이용될 수도 있다. 명료화를 위해, 이 기술은 싱글-캐리어 TDD MIMO 시스템에 대하여 설명된다.

<25> 도 1은 TDD MIMO 시스템 (100)에서 액세스 포인트 (110) 및 사용자 단말기 (150)에서 송신부 및 수신부의 블록도를 도시한다. 다운링크에 대하여, 액세스 포인트 (110)에서, 송신 심볼 (벡터 \mathbf{X}_{dn} 로 표시됨)은 송신 체인 (114)에 의해 프로세싱되며 N_{ap} 개의 안테나 (116)로 부터 송신되며 \mathbf{H} 의 응답을 갖는 무선 MIMO 채널을 통하여 송신된다. 사용자 단말기 (150)에서, N_{ap} 개의 다운링크 신호는 N_{ut} 개의 안테나 (152)에 의해 수신되며 수신 체인 (154)에 의해 프로세싱되어 수신 심볼 (벡터 \mathbf{L}_{dn} 으로 표시됨)을 획득한다. 통상, 송신 체인 (114)에 의한 프로세싱은 디지털-아날로그 변환, 증폭, 필터링, 주파수 상향변환 (upconversion) 등을 포함한다. 통상, 수신 체인 (154)에 의한 프로세싱은 주파수 하향변환 (downconversion), 증폭, 필터링, 아날로그-디지털 변환 등을 포함한다.

<26> 업링크에 대하여, 사용자 단말기 (150)에서, 송신 심볼 (\mathbf{X}_{up} 로 표시됨)은 송신 체인 (164)에 의해 프로세싱되어 N_{ut} 개의 안테나 (152)로 부터 송신되며 MIMO 채널을 통하여 송신된다. 액세스 포인트 (110)에서, N_{ut} 개의 업링크 신호는 N_{ap} 개의 안테나 (116)에 의해 수신되고 수신 체인 (124)에 의해 프로세싱되어 수신 심볼 (벡터 \mathbf{L}_{up} 로 표시됨)을 획득한다.

<27> 다운링크에 대하여, 사용자 단말기에서의 수신 벡터는 하기와 같이 표시될 수도 있으며:

수학식 1

$$\underline{\mathbf{r}}_{\text{dn}} = \underline{\mathbf{R}}_{\text{ut}} \underline{\mathbf{H}} \underline{\mathbf{T}}_{\text{ap}} \underline{\mathbf{x}}_{\text{dn}}$$

<28> 여기서, $\underline{\mathbf{x}}_{\text{dn}}$ 는 N_{ap} 개의 액세스 포인트 안테나로부터 전송된 N_{ap} 개의 송신 심볼을 갖는 벡터이다;

<29> $\underline{\mathbf{r}}_{\text{dn}}$ 는 N_{ut} 개의 사용자 단말기 안테나를 통해 획득된 N_{ut} 개의 수신 심볼을 갖는 벡터이다;

<30> $\underline{\mathbf{T}}_{\text{ap}}$ 는 각각의 액세스 포인트 안테나마다 하나의 복소 이득인 액세스 포인트 송신 체인에 대한 N_{ap} 의 복소 이득을 갖는 $N_{\text{ap}} \times N_{\text{ap}}$ 의 대각선 (diagonal) 매트릭스이다;

<31> $\underline{\mathbf{R}}_{\text{ut}}$ 는 각각의 사용자 단말기 안테나에 대한 하나의 복소 이득인 사용자 단말기 수신 체인에 대한 N_{ut} 의 복소 이득을 갖는 $N_{\text{ut}} \times N_{\text{ut}}$ 의 대각선 (diagonal) 매트릭스이다; 및

<32> $\underline{\mathbf{H}}$ 는 다운링크에 대한 $N_{\text{ut}} \times N_{\text{ap}}$ 개의 채널 응답 매트릭스이다.

<33> 통상, 송신/수신 체인 및 MIMO 채널의 응답은 주파수 함수이다. 간단화를 위해, 플랫 주파수 응답을 갖는 플랫-페이딩 채널을 가정한다.

<34> 업링크에 대해, 액세스 포인트에서 수신 벡터는 하기와 같이 표시될 수도 있으며:

수학식 2

$$\underline{\mathbf{r}}_{\text{up}} = \underline{\mathbf{R}}_{\text{ap}} \underline{\mathbf{H}}^T \underline{\mathbf{T}}_{\text{ut}} \underline{\mathbf{x}}_{\text{up}}$$

<35> 여기서, $\underline{\mathbf{x}}_{\text{up}}$ 는 N_{ut} 사용자 단말기 안테나로 부터 전송된 N_{ut} 송신 심볼을 갖는 벡터이다;

<36> $\underline{\mathbf{r}}_{\text{up}}$ 는 N_{ap} 액세스 포인트 안테나를 통하여 획득된 N_{ap} 수신 심볼을 갖는 벡터이다;

<37> $\underline{\mathbf{T}}_{\text{ut}}$ 는 각각의 사용자 단말기 안테나에 대해 하나의 복소 이득인 사용자 단말기 송신 체인에 대한 N_{ut} 의 복수 이득을 갖는 $N_{\text{ut}} \times N_{\text{ut}}$ 의 대각선 (diagonal) 매트릭스이다;

<38> $\underline{\mathbf{R}}_{\text{ap}}$ 는 각각의 액세스 포인트 안테나에 대한 하나의 복소 이득인 액세스 포인트 수신 체인에 대한 N_{ap} 의 복수 이득을 갖는 $N_{\text{ap}} \times N_{\text{ap}}$ 의 대각선 (diagonal) 매트릭스이다; 및

<39> $\underline{\mathbf{H}}^T$ 는 업링크에 대한 $N_{\text{ap}} \times N_{\text{ut}}$ 채널 응답이다.

<40> 수학식 1 및 2로부터, 해당되는 송신 및 수신 체인의 응답을 포함하는 "효과적인" 다운링크 및 업링크 채널 응답, $\underline{\mathbf{H}}_{\text{dn}}$ 및 $\underline{\mathbf{H}}_{\text{up}}$ 는 하기와 같이 표시될 수도 있다:

수학식 3

$$\underline{\mathbf{H}}_{\text{dn}} = \underline{\mathbf{R}}_{\text{ut}} \underline{\mathbf{H}} \underline{\mathbf{T}}_{\text{ap}} \quad \text{및} \quad \underline{\mathbf{H}}_{\text{up}} = \underline{\mathbf{R}}_{\text{ap}} \underline{\mathbf{H}}^T \underline{\mathbf{T}}_{\text{ut}}$$

<41> 수학식 세트 3에 있는 2개의 수학식을 결합하여, 하기와 같이 획득될 수도 있으며:

수학식 4

$$\underline{\mathbf{H}}_{\text{up}}^T = \underline{\mathbf{T}}_{\text{ut}} \underline{\mathbf{R}}_{\text{ut}}^{-1} \underline{\mathbf{H}}_{\text{dn}} \underline{\mathbf{T}}_{\text{ap}}^{-1} \underline{\mathbf{R}}_{\text{ap}} = \underline{\mathbf{K}}_{\text{ut}}^{-1} \underline{\mathbf{H}}_{\text{dn}} \underline{\mathbf{K}}_{\text{ap}} \quad \text{또는} \quad \underline{\mathbf{H}}_{\text{up}} = \underline{\mathbf{R}}_{\text{ap}} \underline{\mathbf{H}}^T \underline{\mathbf{T}}_{\text{ut}}$$

<46> 여기서, $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ap}} = \underline{\mathbf{T}}_{\text{ap}}^{-1} \underline{\mathbf{R}}_{\text{ap}}$ 및 $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ut}} = \underline{\mathbf{T}}_{\text{ut}}^{-1} \underline{\mathbf{R}}_{\text{ut}}$ 는 액세스 포인트에 대한 $\mathbf{N}_{\text{ap}} \times \mathbf{N}_{\text{ap}}$ 대각선 매트릭스이고 송신 체인 응답 $\underline{\mathbf{T}}_{\text{ap}}$ 에 대한 수신 체인 응답 $\underline{\mathbf{R}}_{\text{ap}}$ 의 비로 획득되며, 여기서 비는 엘리먼트-대-엘리먼트로 취해진다. 유사하게, $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 는 사용자 단말기에 대한 $\mathbf{N}_{\text{ut}} \times \mathbf{N}_{\text{ut}}$ 의 대각선 매트릭스이고 송신 체인 응답 $\underline{\mathbf{T}}_{\text{ut}}$ 에 대한 수신 체인 응답 $\underline{\mathbf{R}}_{\text{ut}}$ 의 비로 획득된다.

<47> 수학식 4는 하기와 같이 표시될 수도 있으며:

수학식 5

$$\underline{\mathbf{H}}_{\text{cup}} = \underline{\mathbf{H}}_{\text{up}} \underline{\mathbf{K}}_{\text{ut}} = (\underline{\mathbf{H}}_{\text{dn}} \underline{\mathbf{K}}_{\text{ap}})^T = \underline{\mathbf{H}}_{\text{cdn}}$$

<49> 여기서, $\underline{\mathbf{H}}_{\text{cup}}$ 는 업링크에 대한 캘리브레이션 채널 응답을 나타내며; 및

<50> $\underline{\mathbf{H}}_{\text{cdn}}$ 는 다운링크에 대한 캘리브레이션 채널 응답을 나타낸다.

<51> 매트릭스 $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 및 $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 는 액세스 포인트 및 사용자 단말기에서 송신/수신 체인의 차를 설명하기 위한 값을 포함한다. 수학식 5에 나타낸 바와 같이, 효과적인 다운링크 및 업링크 채널 응답에 대각선 매트릭스, $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 및 $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 의 적용은 하나의 링크에 대한 캘리브레이션 채널 응답이 다른 링크에 대한 캘리브레이션 채널 응답에 의해 표시되도록 한다.

<52> 개시 캘리브레이션은 매트릭스 $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 및 $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 을 결정하도록 수행될 수도 있다. 통상, 실제 채널 응답 $\underline{\mathbf{H}}$ 및 송신/수신 체인 응답은 알려지지 않거나 정확히 또는 쉽게 알아낼 수 없다. 대신, 효과적인 다운링크 및 업링크 채널 응답, $\underline{\mathbf{H}}_{\text{dn}}$ 및 $\underline{\mathbf{H}}_{\text{up}}$, 는 다운링크 및 업링크 각각에 전송된 MIMO 파일럿에 기초하여 추정될 수도 있다. MIMO 파일럿은 \mathbf{N}_{T} 개의 송신 안테나로 부터 전송된 \mathbf{N}_{T} 개의 파일럿 송신으로 구성된 파일럿이며, 여기서 각각의 송신 안테나로부터의 파일럿 송신은 수신 엔터티에 의해 확인할 수 있다. 예를 들면, 이는 각각의 송신 안테나로부터의 파일럿 송신에 대하여 상이한 직교 시퀀스를 이용함으로써 달성될 수 있다. 그

후, 이하에서 설명되는 바와 같이, 매트릭스 $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 및 $\underline{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 의 추정치 (상관 매트릭스 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{\text{ap}}$ 및 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{\text{ut}}$ 로 칭함)는 효과적인 다운링크 및 업링크 채널 응답에 기초하여 유도될 수도 있다. 매트릭스 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{\text{ap}}$ 및 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{\text{ut}}$ 는 액세스 포인트 및 사용자 단말기에서 송신/수신 체인의 차를 설명할 수 있는 정정 인수를 포함한다.

<53> 도 2는 액세스 포인트 (110) 및 사용자 단말기 (150)에서 정정 매트릭스 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{\text{ap}}$ 및 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{\text{ut}}$ 의 이용을 도시한다.

다운링크에서, 먼저, 송신 벡터 $\underline{\mathbf{x}}_{\text{dn}}$ 는 유닛 (112)에 의해 정정 매트릭스 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{\text{ap}}$ 로 곱해진다. 다운링크에 대한 송신 체인 (114) 및 수신 체인 (154)에 의한 후속 프로세싱은 도 1에서 설명된 바와 같다. 유사하게, 업링크에서, 먼저 송신 벡터 $\underline{\mathbf{x}}_{\text{up}}$ 는 유닛 (162)에 의해 정정 매트릭스 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{\text{ut}}$ 로 곱해진다. 또한, 업링크에 대한 송신 체인 (164) 및 수신 체인 (124)에 의한 후속 프로세싱은 도 1에서 설명된다.

<54> MIMO 시스템에서, 데이터는 MIMO 채널의 \mathbf{N}_{S} 고유모드 (eigenmode)를 통하여 송신될 수도 있다. 이를 고유모드는 MIMO 채널의 직교 공간 채널로서 간주될 수도 있다. 채널 응답 매트릭스 $\underline{\mathbf{H}}$ 는 MIMO 채널의 \mathbf{N}_{S} 고유모드를 획득하기 위해 "대각선 매트릭스로" 될 수도 있다. 이 대각선화는 $\underline{\mathbf{H}}$ 의 특이 값 분해 또는 $\underline{\mathbf{H}}$

의 $\underline{\mathbf{R}} = \underline{\mathbf{H}}^H \underline{\mathbf{H}}$ 인 상관 매트릭스의 고유값 분해를 수행함으로써 달성될 수도 있으며, 여기서 $\underline{\mathbf{H}}^H$ 는 $\underline{\mathbf{H}}$ 의 결례 전치행렬을 나타낸다.

<55> 표 1은 캘리브레이션 다운링크 및 업링크 채널 응답 매트릭스의 특이 값 분해뿐만 아니라 다운링크 및 업링크에 대한 효과적인 캘리브레이션 채널 응답을 도시한다.

<56>

표 1 - 특이 값 분해

<57>

	다운 링크	업 링크
효과적인 채널 응답	$\underline{\mathbf{H}}_{dn} = \underline{\mathbf{R}}_{ut} \underline{\mathbf{H}}^H \underline{\mathbf{T}}_{ap}$	$\underline{\mathbf{H}}_{up} = \underline{\mathbf{R}}_{ap} \underline{\mathbf{H}}^T \underline{\mathbf{T}}_{ut}$
캘리브레이션 채널 응답	$\underline{\mathbf{H}}_{cdn} = \underline{\mathbf{H}}_{dn} \underline{\mathbf{K}}_{ap}$	$\underline{\mathbf{H}}_{cup} = \underline{\mathbf{H}}_{up} \underline{\mathbf{K}}_{ut}$
정확한 채널 응답의 특이 값 분해	$\underline{\mathbf{H}}_{cdn} = \underline{\mathbf{V}}_{ut}^* \underline{\Sigma}^T \underline{\mathbf{U}}_{ap}^T$	$\underline{\mathbf{H}}_{cup} = \underline{\mathbf{U}}_{ap} \underline{\Sigma} \underline{\mathbf{V}}_{ut}^H$
추정 채널 응답의 특이 값 분해	$\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cdn} = \hat{\underline{\mathbf{V}}}_{ut}^* \hat{\underline{\Sigma}}^T \hat{\underline{\mathbf{U}}}_{ap}^T$	$\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cup} = \hat{\underline{\mathbf{U}}}_{ap} \hat{\underline{\Sigma}} \hat{\underline{\mathbf{V}}}_{ut}^H$
비정규화 송신 매트릭스	$\underline{\mathbf{V}}_{ut}^* \underline{\Sigma}^T = \hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cdn} \underline{\mathbf{U}}_{ap}$	$\underline{\mathbf{U}}_{ap} \underline{\Sigma} = \hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cup} \underline{\mathbf{V}}_{ut}$

<58> 표 1에서, $\underline{\mathbf{U}}_{ap}$ 는 $\underline{\mathbf{H}}_{cup}$ 의 좌측 고유벡터의 $N_{ap} \times N_{ap}$ 유니터리 (unitary) 매트릭스이고, $\underline{\Sigma}$ 는 $\underline{\mathbf{H}}_{cup}$ 의 특이 값의 $N_{ap} \times N_{ut}$ 대각선 매트릭스이고, $\underline{\mathbf{V}}_{ut}$ 는 $\underline{\mathbf{H}}_{cup}$ 의 우측 고유벡터의 $N_{ut} \times N_{ut}$ 유니터리 매트릭스이고, $**$ 는 복소 결례를 표시한다. 유니터리 매트릭스 $\underline{\mathbf{M}}$ 는 \mathbf{I} 가 단위매트릭스인 특성 $\underline{\mathbf{M}}^H \underline{\mathbf{M}} = \mathbf{I}$ 로 특징지워진다. 또한, 매트릭스 $\underline{\mathbf{V}}_{ut}^*$ 및 $\underline{\mathbf{U}}_{ap}^*$ 는 $\underline{\mathbf{H}}_{cdn}$ 의 각각 좌측 및 우측 고유벡터의 매트릭스이다. 매트릭스 $\underline{\mathbf{V}}$, $\underline{\mathbf{V}}^*$, $\underline{\mathbf{V}}^T$ 및 $\underline{\mathbf{V}}^H$ 는 매트릭스 $\underline{\mathbf{V}}$ 의 상이한 형태이다. 단순화를 위해, 하기의 설명에서 매트릭스 $\underline{\mathbf{U}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{V}}_{ut}$ 에 관한 레퍼런스는 다른 형태를 지칭할 수도 있다. 매트릭스 $\underline{\mathbf{U}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{V}}_{ut}$ (또한, 송신 매트릭스로 칭함)는 공간 프로세싱을 위해 액세스 포인트 및 사용자 단말기 각각에 의해 이용될 수도 있고, 이들의 첨자로서 표시된다.

<59> 특이 값 분해는, 여기서 참조로서 포함되고 1980, Academic Press, 제 2 판인 제목 "Linear Algebra and Its Applications" 이고, Gilbert Strang저에 좀 더 상세히 설명되어 있다.

<60>

실제 시스템에서, 매트릭스 $\underline{\mathbf{H}}_{cdn}$ 및 $\underline{\mathbf{H}}_{cup}$ 는 이용되지 않는다. 대신, 사용자 단말기는 액세스 포인트로 송신된 MIMO 파일럿에 기초하여 캘리브레이션 다운링크 채널 응답을 추정할 수 있다. 그 후, 사용자 단말기는 캘리브레이션 다운링크 채널 응답 추정치인 $\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cdn}$ 의 특이값 분해를 수행하여 대각선 매트릭스 $\hat{\underline{\Sigma}}$ 및 $\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cdn}$ 좌측 고유벡터의 매트릭스 $\underline{\mathbf{V}}_{ut}^*$ 를 획득하며, 여기서 각각의 매트릭스 위의 햇 (hat: $^{\wedge}$)은 실제 매트릭스의 추정치를 나타낸다. 유사하게, 액세스 포인트는 사용자 단말기로 송신된 MIMO 파일럿에 기초하여 캘리브레이션 업링크 채널 응답을 추정할 수 있다. 그 후, 액세스 포인트는 캘리브레이션 업링크 채널 응답 추정치 $\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cup}$ 의 특이 값 분해를 수행하여 대각선 매트릭스 $\hat{\underline{\Sigma}}$ 및 $\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cup}$ 의 좌측 고유벡터의 매트릭스 $\underline{\mathbf{U}}_{ap}$ 를 획득한다.

<61>

상반채널 및 캘리브레이션으로 인해, 특이값 분해는 매트릭스 $\underline{\mathbf{V}}_{ut}$ 및 $\underline{\mathbf{U}}_{ap}$ 을 획득하기 위하여 사용자 단말기 또는 액세스 포인트로 수행될 필요가 있다. 명료화를 위해, 이하에서 설명되는 바와 같이, 하기의 설명은, 사용자 단말기가 캘리브레이션 다운링크 채널 응답 추정치 $\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cdn}$ 을 획득하고, $\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cdn}$ 의 분해를 수행하고, 공간

프로세싱에 대하여 매트릭스 $\hat{\mathbf{V}}_{\text{ut}}$ 을 이용하고, 스티어링 레퍼런스를 이용하여 액세스 포인트로 매트릭스 $\hat{\mathbf{U}}_{\text{ap}}$ 를 재전송하는 것에 대한 구체화이다. 스티어링 레퍼런스 (또는 스티어링 파일럿)는 모든 안테나로부터 그리고 MIMO 채널의 고유모드 (eigenmode)를 통하여 송신된 파일럿이다.

<62> 사용자 단말기는 하기와 같이 업링크 스티어링 레퍼런스를 송신할 수도 있으며:

수학식 6

$$<63> \underline{\mathbf{x}}_{\text{up},m} = \hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}} \hat{\mathbf{V}}_{\text{ut},m} \mathbf{p}_m$$

<64> 여기서 \mathbf{p}_m 는 스티어링 레퍼런스에 대한 고유모드 m 을 통하여 송신된 파일럿 심볼이고;

<65> $\underline{\mathbf{x}}_{\text{up},m}$ 는 고유모드 m 에 대하여 업링크 스티어링 레퍼런스에 대한 송신 벡터이며; 및

<66> $\hat{\mathbf{V}}_{\text{ut},m}$ 는 $\hat{\mathbf{V}}_{\text{ut}} = [\hat{\mathbf{v}}_{\text{ut},1} \ \hat{\mathbf{v}}_{\text{ut},2} \ \dots \ \hat{\mathbf{v}}_{\text{ut},N_{\text{ut}}}]$ 인 $\hat{\mathbf{V}}_{\text{ut}}$ 의 m 번째 고유벡터 또는 열이다.

<67> 액세스 포인트에서 수신된 업링크 스티어링 레퍼런스는 하기와 같이 나타낼 수도 있으며:

수학식 7

$$\begin{aligned} <68> \underline{\mathbf{r}}_{\text{up},m} &= \underline{\mathbf{H}}_{\text{up}} \underline{\mathbf{x}}_{\text{up},m} + \underline{\mathbf{n}}_{\text{up}} = \underline{\mathbf{H}}_{\text{up}} \hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}} \hat{\mathbf{V}}_{\text{ut},m} \mathbf{p}_m + \underline{\mathbf{n}}_{\text{up}} \\ &\approx \hat{\mathbf{H}}_{\text{cup}} \hat{\mathbf{v}}_{\text{ut},m} \mathbf{p}_m + \underline{\mathbf{n}}_{\text{up}} = \hat{\mathbf{U}}_{\text{ap}} \hat{\Sigma} \hat{\mathbf{V}}_{\text{ut}}^H \hat{\mathbf{v}}_{\text{ut},m} \mathbf{p}_m + \underline{\mathbf{n}}_{\text{up}}, \\ &= \hat{\mathbf{u}}_{\text{ap},m} \hat{\sigma}_m \mathbf{p}_m + \underline{\mathbf{n}}_{\text{up}} \end{aligned}$$

<69> 여기서, $\underline{\mathbf{r}}_{\text{up},m}$ 는 고유모드 m 에 대한 업링크 스티어링 레퍼런스에 대한 수신 벡터이고;

<70> $\hat{\sigma}_m$ 는 $\hat{\Sigma}$ 의 m 번째 대각선 엘리먼트이며; 및

<71> $\hat{\mathbf{u}}_{\text{ap},m}$ 는 $\hat{\mathbf{U}}_{\text{ap}} = [\hat{\mathbf{u}}_{\text{ap},1} \ \hat{\mathbf{u}}_{\text{ap},2} \ \dots \ \hat{\mathbf{u}}_{\text{ap},N_{\text{ap}}}]$ 인 $\hat{\mathbf{U}}_{\text{ap}}$ 의 m 번째 고유벡터 또는 열이다. 수학식 7은, 잡음이 없을 때 액세스 포인트에서 수신된 업링크 스티어링 레퍼런스는 대략 $\hat{\mathbf{u}}_{\text{ap},m} \hat{\sigma}_m \mathbf{p}_m$ 과 같다는 것을 나타낸다.

액세스 포인트는 다양한 추정치 기술을 이용하여 사용자 단말기에 의해 전송된 스티어링 레퍼런스에 기초하여 업링크 채널 응답의 추정치를 획득할 수 있다.

<72> 일 실시 예로서, $\hat{\mathbf{u}}_{\text{ap},m}$ 의 추정치를 획득하기 위하여, 수신 벡터 $\underline{\mathbf{r}}_{\text{up},m}$ 은 먼저 파일럿 심볼, 복소 결례 또는 \mathbf{p}_m^* 로 곱해지고, 그 후, 각각의 고유모드에 대한 복수 수신된 스트어링 레퍼런스 심볼에 관하여 적분되어 고유모드 m 에 대한 $\hat{\mathbf{u}}_{\text{ap},m} \hat{\sigma}_m$ 의 추정치인 벡터 $\bar{\mathbf{r}}_{\text{up},m}$ 을 획득한다. 고유벡터가 단위 (unit) 전력을 가지므로, 각각의 고유모드에 대한 특이 값 $\hat{\sigma}_m$ 은 각각의 고유모드에 대한 업링크 스티어링 레퍼런스의 수신 전력에 기초하여 추정될 수도 있고, 즉 $\hat{\sigma}_m = \|\bar{\mathbf{r}}_{\text{up},m}\|^2$ 이다. $\hat{\mathbf{u}}_{\text{ap},m}$ 의 추정치의 각각의 N_{ap} 엘리먼트는 $\bar{\mathbf{r}}_{\text{up},m}$ 의 N_{ap} 엘리먼트의 대응되는 하나를 $\hat{\sigma}_m$ 로 나눔으로서 획득된다.

<73> 다른 실시 예로서, $\hat{\mathbf{u}}_{\text{ap},m}$ 의 추정치는 수신 벡터 $\underline{\mathbf{r}}_{\text{up},m}$ 에 기초하여 그리고 MMSE 기술을 이용하여 획득된다. 파일럿 심볼 \mathbf{p}_m 을 알고 있으므로, 액세스 포인트는 수신 파일럿 심볼 $\hat{\mathbf{p}}_m$ ($\hat{\mathbf{V}}_{\text{ut},m}$ 으로 수신 벡터 $\underline{\mathbf{r}}_{\text{up},m}$ 에

정합 필터링을 수행함으로써 획득됨) 과 송신된 파일럿 심볼 \mathbf{p}_m 간의 평균 제곱 에러가 최소화되는 $\hat{\mathbf{u}}_{ap,m}$ 의 추정치를 유도할 수 있다.

<74> 액세스 포인트는 $m = 1 \dots N_s$ 인 $\hat{\mathbf{u}}_{ap,m}$ 의 추정치에 추가적인 프로세싱을 수행할 수도 있다. 예를 들어, 이를 추정치는 한번에 하나의 고유벡터에 대하여 획득되므로, N_s 고유벡터 추정치는 MIMO 채널 응답 등에서의 변화, 예를 들어, 수신된 스티어링 레퍼런스에서의 잡음,으로 인하여 서로 직교하지 않을 수도 있다. 그 후, 액세스 포인트는 직교 송신 벡터를 획득하기 위하여 N_s 고유벡터 추정치에 Gram-Schmidt 직교화를 수행할 수도 있다. 임의의 경우에 있어서, 액세스 포인트는 $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ 의 추정치이고 차례로 $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ 에 기초하여 사용자 단말기에 의해 유도된 송신 매트릭스 $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ 을 획득한다. 액세스 포인트는 송신 매트릭스 $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ 을 이용하여 다운링크 송신에 대하여 공간 프로세싱을 수행한다.

1. 후속 캘리브레이션

<76> 개시 캘리브레이션으로부터 획득된 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 는 (1)개시 캘리브레이션을 위해 이용된 불완전한 채널 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$ 및 $\hat{\mathbf{H}}_{up}$, (2)액세스 포인트 및 사용자 단말기의 송신/수신 체인에서의 변화 등과 같은 다양한 소스로 인한 에러를 포함할 수도 있다. 정정 매트릭스에서의 에러는 (1) 공간 프로세싱을 위해 사용자 단말기에 의해 이용되고 $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ 으로부터 유도된 송신 매트릭스 $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$ 및 (2) 공간 프로세싱을 위해 액세스 포인트에 의해 이용되고 $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$ 을 이용하여 전송된 업링크 스티어링 레퍼런스로부터 유도된 송신 매트릭스 $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$, 양쪽에서의 에러를 유발할 수도 있다. 정정 매트릭스에서 에러가 추정되고 제거될 수 있는 경우에 향상된 성능을 획득할 수도 있다.

<77> 액세스 포인트 및/또는 사용자 단말기는 후속 캘리브레이션을 수행하여 정정매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 에서 에러를 추정할 수 있다. 명료화를 위해, 하기의 설명은 사용자 단말기에 의한 후속 캘리브레이션에 대한 것이다. 사용자 단말기에 의한 후속 캘리브레이션에 대하여, 액세스 포인트는 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 를 이용하여 다운링크상에 MIMO 파일럿을 송신하고 또한 송신 매트릭스 $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ 및 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 를 이용하여 다운링크상에 스티어링 레퍼런스를 송신한다. 다운링크 스티어링 레퍼런스는 $\hat{\mathbf{U}}_{ap} = [\hat{\mathbf{u}}_{ap,1} \ \hat{\mathbf{u}}_{ap,2} \ \dots \ \hat{\mathbf{u}}_{ap,N_{ap}}]$ 인 $\mathbf{x}_{dn,m} = \hat{\mathbf{K}}_{ap} \hat{\mathbf{u}}_{ap,m} \mathbf{p}_m$ 로서 표현될 수도 있다. 업링크 스티어링 레퍼런스에 대하여 전술한 바와 유사하게, 사용자 단말기는 수신된 다운링크 스티어링 레퍼런스에 기초하여 $\mathbf{V}_{ut} \Sigma^T$ 의 추정치를 획득할 수 있다. 간단화를 위해, 다운링크 스티어링 레퍼런스로부터 유도된 $\mathbf{V}_{ut} \Sigma^T$ 의 추정치는 "실제 수신된" 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_a$ 로 칭해지며, $\tilde{\mathbf{V}}_a$ 는 Σ 의 추정치뿐만 아니라 \mathbf{V}_{ut} 의 추정치를 포함하는 비정규화 매트릭스이다. (명료화를 위해, 매트릭스 상부의 " \sim "는 비정규화 매트릭스임을 나타낸다.) 또한, 사용자 단말기는 액세스 포인트에 의해 전송된 MIMO 파일럿로부터 $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ 의 다른 버전 (version) 을 획득한다.

<78> 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 에서 에러는 대각선 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}'_{ap} 및 \mathbf{Q}'_{ut} 각각에 의해 나타내질 수도 있다. 그 후, 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 는 하기와 같이 나타내 질수도 있으며:

수학식 8

$$<79> \quad \hat{\mathbf{K}}_{ap} = \underline{\mathbf{K}}_{ap} \underline{\mathbf{Q}}'_{ap} \quad \text{및} \quad \hat{\mathbf{K}}_{ut} = \underline{\mathbf{K}}_{ut} \underline{\mathbf{Q}}'_{ut}$$

<80> 정정 매트릭스에서 에러가 적은 경우, $\underline{\mathbf{Q}}'_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ut}$ 의 대각선 엘리먼트는 $1+j0$ 에 근접한 복소 값이다. 캘리브레이션 다운링크 채널 응답 추정치, $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$, 는 하기와 같이 표현될 수도 있으며:

수학식 9

$$<81> \quad \hat{\mathbf{H}}_{cdn} = \hat{\mathbf{H}}_{dn} \hat{\mathbf{K}}_{ap} = \hat{\mathbf{H}}_{dn} \underline{\mathbf{K}}_{ap} \underline{\mathbf{Q}}'_{ap}$$

$$<82> \quad \text{또는} \quad \hat{\mathbf{H}}_{cdn} \underline{\mathbf{Q}}'^{-1}_{ap} = \hat{\mathbf{H}}_{dn} \hat{\mathbf{K}}_{ap}$$

<83> 매트릭스 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ut}$ 는 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 의 각각에서의 "실제" 에러를 포함한다. $\underline{\mathbf{Q}}'_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ut}$ 의 가정치 또는 추정치는 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 로서 각각 표시될 수도 있다. "가정된" 다운링크 채널은 하기와 같이 정의될 수도 있다:

수학식 10

$$<84> \quad \underline{\mathbf{H}}_{hyp} = \hat{\mathbf{H}}_{cdn} \underline{\mathbf{Q}}_{ap}^{-1}$$

<85> 가정된 다운링크 채널은 $\hat{\mathbf{H}}_{dn} \hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 의 가정치이고 적용된 정확한 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 에서의 에러는 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 인 가정 하에 유도된다. $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 가 수학식 10에서 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ap}$ 의 완벽한 가정치이고 $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$ 수학식 9에서 $\underline{\mathbf{H}}_{dn}$ 의 완벽한 추정치인 경우, $\underline{\mathbf{H}}_{hyp} = \underline{\mathbf{H}}_{cdn}$ 및 $\underline{\mathbf{H}}_{hyp}^T = \underline{\mathbf{H}}_{cup}$ 이다.

<86> 액세스 포인트에서 공간 프로세싱은 하기와 같이 나타내질 수도 있으며:

수학식 11

$$<87> \quad \hat{\mathbf{U}}_{ap} \hat{\Sigma} = \hat{\mathbf{H}}_{cup} \hat{\mathbf{V}}_{ut} = \hat{\mathbf{H}}_{up} \hat{\mathbf{K}}_{ut} \hat{\mathbf{V}}_{ut} = \hat{\mathbf{H}}_{up} \hat{\mathbf{K}}_{ut} \underline{\mathbf{Q}}'_{ut} \hat{\mathbf{V}}_{ut}$$

<88> 여기서, $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$ 는 다운링크 MIMO 파일럿으로부터 획득된 $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ 의 특이 값 분해로부터 획득된다. 사용자 단말기는 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ap}$ 에 대한 값을 갖지 않고, 오직 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ap}$ 의 가정치 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 을 갖는다. 따라서, 사용자 단말기는 캘리브레이션 에러 매트릭스가 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 인 경우 가정적으로 액세스 포인트에 의해 획득될 비정규화 매트릭스 $\tilde{\mathbf{U}}_{rx}$ 를 하기와 같이 계산한다:

수학식 12

$$<89> \quad \tilde{\mathbf{U}}_{rx} = \underline{\mathbf{H}}_{hyp}^T \underline{\mathbf{Q}}_{ut} \hat{\mathbf{V}}_{ut} = (\hat{\mathbf{H}}_{cdn} \underline{\mathbf{Q}}_{ap}^{-1})^T \underline{\mathbf{Q}}_{ut} \hat{\mathbf{V}}_{ut}$$

<90> 수학식 12는 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 가 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ap}$ 의 완벽한 가정치이고 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 가 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ut}$ 의 완벽한 가정치인 경우 수학식 11과 같다.

위와 같은 경우, $\underline{\mathbf{H}}_{hyp} = \hat{\underline{\mathbf{H}}}_{dn} \underline{\mathbf{K}}_{ap}$ 이다.

<91> 그 후, 사용자 단말기는 액세스 포인트가 수신된 업링크 스티어링 레퍼런스에서 수행했던 것과 동일한 방식으로 $\tilde{\underline{\mathbf{U}}}_{rx}$ 에 프로세싱을 수행하고 $\hat{\underline{\mathbf{U}}}_{ap}$ 과 유사한 정규 송신 매트릭스인 "생성된" 송신 매트릭스 $\underline{\mathbf{U}}_g$ 을 획득한다.

예를 들어, 액세스 포인트는 송신 스티어링 벡터의 성능을 향상시키기 위해 수신 고유벡터 $\hat{\underline{\mathbf{u}}}_{ap,m}$ 의 Gram-Schmidt 직교화를 수행할 수도 있다. 이 경우에 있어서, 사용자 단말기는 $\tilde{\underline{\mathbf{U}}}_{rx}$ 에서 고유벡터에 동일한 직교화를 수행할 수도 있다. $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 에 의해 나타내진 캘리브레이션 에러의 가정이기는 하지만, 사용자 단말기는 액세스 포인트 및 사용자 단말기 양쪽에 의해 정규적으로 수행된 프로세싱을 간단히 에뮬레이션한다.

매트릭스 $\underline{\mathbf{U}}_g$ 는 다운링크 스티어링 레퍼런스를 송신하기 위해 그리고 다운링크 송신의 공간 프로세싱을 위해 액세스 포인트에 의해 이용된다.

<92> 사용자 단말기에서 공간 프로세싱은 하기와 같이 나타내 질 수도 있다:

수학식 13

$$\underline{\mathbf{V}}_g \underline{\Sigma}_g^T = \hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cdn} \underline{\mathbf{U}}_g = \hat{\underline{\mathbf{H}}}_{dn} \hat{\underline{\mathbf{K}}}_{ap} \underline{\mathbf{U}}_g = \hat{\underline{\mathbf{H}}}_{dn} \underline{\mathbf{K}}_{ap} \underline{\mathbf{Q}}'_{ap} \underline{\mathbf{U}}_g$$

<93> 다시, 사용자 단말기는 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ap}$ 을 가지지 않고 가정치 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 만을 가진다. 따라서, 사용자 단말기는 하기와 같이 그 자체에 대한 가정된 송신 매트릭스 $\tilde{\underline{\mathbf{V}}}_{hyp}$ 을 계산한다:

수학식 14

$$\tilde{\underline{\mathbf{V}}}_{hyp} = \underline{\mathbf{H}}_{hyp} \underline{\mathbf{Q}}_{ap} \underline{\mathbf{U}}_g$$

<96> 수학식 14는 $\underline{\mathbf{H}}_{hyp}$ 이 $\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{dn} \underline{\mathbf{K}}_{ap}$ 의 완벽한 가정치이고 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 이 $\underline{\mathbf{Q}}'_{ap}$ 의 완벽한 가정치인 경우 수학식 13과 동일하다. 매트릭스 $\tilde{\underline{\mathbf{V}}}_{hyp}$ 는 대각선 매트릭스 $\underline{\Sigma}_g$ ($\underline{\Sigma}$ 과 유사함) 뿐만 아니라 사용자 단말기 송신 매트릭스 $\underline{\mathbf{V}}_g$ ($\underline{\mathbf{V}}_g$ 는 액세스 포인트 송신 매트릭스 $\underline{\mathbf{U}}_g$ 에 대응됨)을 포함하는 비정규화 매트릭스이다. 매트릭스 $\tilde{\underline{\mathbf{V}}}_{hyp}$ 는, (1) 사용자 단말기가 $\hat{\underline{\mathbf{V}}}_{ut}$ 을 이용하여 업링크 스티어링 레퍼런스를 송신하고, (2) 액세스 포인트가 수신된 업링크 스티어링 레퍼런스에 대해 정규 프로세싱을 수행하여 송신 매트릭스 $\underline{\mathbf{U}}_g$ 을 유도하며, (3) 액세스 포인트가 $\underline{\mathbf{U}}_g$ 을 이용하여 다운링크 스티어링 레퍼런스를 송신하고, (4) 정정 매트릭스 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{ap}$ 및 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{ut}$ 가 매트릭스 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 각각에 의해 나타낸 에러를 가지고, (5) $\hat{\underline{\mathbf{H}}}_{cdn}$ 에서 다운링크 MIMO 파일럿으로부터 어떤 채널 추정치 에러도 없다고 가정하고서 사용자 단말기에 의해 수신되어진다고 가정된다.

<97> 수학식 12 및 14는 캘리브레이션 에러 매트릭스 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 가 정정 매트릭스 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{ap}$ 및 $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{ut}$ 의 각각에서 실제 에러를 정확하게 나타내는 경우 정확하다. 다운링크 스티어링 레퍼런스로부터 획득된 실제 수신 송신 매트릭스 $\tilde{\underline{\mathbf{V}}}_a$ 와 다운링크 MIMO 파일럿으로부터 획득된 가정된 송신 매트릭스 $\tilde{\underline{\mathbf{V}}}_{hyp}$ 간의 차는 하기와 같이 계산될 수도 있으며:

수학식 15

$$\underline{\mathbf{E}} = \tilde{\underline{\mathbf{V}}}_a - \tilde{\underline{\mathbf{V}}}_{hyp}$$

<98> 여기서, $\underline{\mathbf{E}}$ 는 $\tilde{\underline{\mathbf{V}}}_a$ 와 $\tilde{\underline{\mathbf{V}}}_{hyp}$ 간의 에러의 $N_{ut} \times N_{ap}$ 매트릭스이다. 에러 매트릭스 $\underline{\mathbf{E}}$ 는 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 에 대한 가정치의 정확도의 표시이다. 다양한 적응적인 절차는 에러 매트릭스 $\underline{\mathbf{E}}$ 를 0으로 유도하기 위해 매트릭스 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 을 조정하기 위해 이용될 수도 있다. 이 적응적인 절차는 MMSE 적응적인 절차 및 최급강하 (steepest descent) 적응적인 절차를 포함한다. $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 의 대각선 엘리먼트는 적응적인 절차에 대하여 $1+j0$ 으로 초기화될 수도 있다.

<100> MMSE 적응적인 절차에 대하여, $\underline{\mathbf{E}}$ 의 엘리먼트의 근사 편미분은 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 의 엘리먼트에 관하여 계산된다. $\hat{\underline{\mathbf{K}}}_{ap}$ 의 "리드(lead)" 엘리먼트 (상부 최좌측 엘리먼트) 가 개시 캘리브레이션에 의해 $1+j0$ 으로 설정되는 경우, 이 엘리먼트는 조정될 필요가 없다. 또한, $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 에서 엘리먼트의 크기는 에러 매트릭스 $\underline{\mathbf{E}}$ 에 영향을 미치지 않는다. 따라서, 예를 들어, $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 는 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 의 리드 엘리먼트의 실수 성분을 1.0으로 정의함으로써 정규화될 수도 있다. 또한, 고유벡터는 성능에 영향을 미치지 않고서 임의의 단위-크기 복소수에 의해 스케일링될 (또는 임의의 위상에 의해 회전됨) 수도 있다. 따라서, 일반적으로, 위상의 세트는 임의의 손실없이 $\tilde{\underline{\mathbf{V}}}_{hyp}$ 를 $\tilde{\underline{\mathbf{V}}}_a$ 에 근접하게 하도록 선택될 수도 있다. 이 특성은 임의의 단위-크기 인자에 의한 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 의 스케일링을 고려하고, 따라서, $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 의 리드 엘리먼트의 허수성분은 0.0으로 정의될 수도 있다.

<101> MMSE 적응적인 절차는 하기와 같이 수행될 수도 있다. 1.0으로 설정되는 리드 엘리먼트를 제외하고, $\underline{\mathbf{q}}$ 은 $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$ 의 실수 벡터이고 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 의 대각선 엘리먼트의 실수 및 허수성분으로 구성되도록 놓는다. 벡터는 하기와 같이 정의될 수도 있고:

$$<102> q_{2(i-2)+1} = \operatorname{Re}\{\underline{\mathbf{Q}}_{ap}(i,i)\}, \quad \text{for } i = 2 \dots N_{ap},$$

$$<103> q_{2(i-1)} = \operatorname{Im}\{\underline{\mathbf{Q}}_{ap}(i,i)\}, \quad \text{for } i = 2 \dots N_{ap},$$

$$<104> q_{2(i+N_{ap}-2)-1} = \operatorname{Re}\{\underline{\mathbf{Q}}_{ut}(i,i)\}, \quad \text{for } i = 2 \dots N_{ut}, \text{ 및}$$

$$<105> q_{2(i+N_{ap}-2)} = \operatorname{Im}\{\underline{\mathbf{Q}}_{ut}(i,i)\}, \quad \text{for } i = 2 \dots N_{ut},$$

<106> 여기서, q_i 는 $\underline{\mathbf{q}}$ 의 i 번째 대각선 엘리먼트이고;

<107> $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}(i,i)$ 는 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 의 i 번째 대각선 엘리먼트이고; 및

<108> $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}(i,i)$ 는 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 의 i 번째 대각선 엘리먼트이다.

<109> $\underline{\mathbf{q}}$ 의 홀수-색인 엘리먼트는 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 의 대각선 엘리먼트의 실수 성분에 대한 것이고, $\underline{\mathbf{q}}$ 의 짝수-색인 엘리먼트는 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{ut}$ 의 대각선 엘리먼트의 허수 성분에 대한 것이다. $\underline{\mathbf{q}}$ 의 첫번째 $2N_{ap} - 2$ 엘리먼트는 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap}$ 의 리드 엘리먼트와는 다른 $N_{ap} - 1$ 대각선 행렬에 대한 것이고, $\underline{\mathbf{q}}$ 의 마지막 $2N_{ut} - 2$ 엘리먼트는

$\underline{\mathbf{Q}}_{\text{ut}}$ 의 리드 엘리먼트와는 다른 $\mathbf{N}_{\text{ut}} - 1$ 대각선 행렬에 대한 것이다.

<110> $\underline{\mathbf{e}}$ 는 길이 $2\mathbf{N}_{\text{ap}}\mathbf{N}_{\text{ut}}$ 의 실수 벡터이고 $\underline{\mathbf{E}}$ 의 엘리먼트의 실수 및 허수성분으로 구성된다. 벡터 $\underline{\mathbf{e}}$ 는 하기와 같이 정의되며:

$$e_{2(i+(j-1)\mathbf{N}_{\text{ut}})-1} = \text{Re}\{E(i, j)\}, \quad \text{for } i=1 \dots \mathbf{N}_{\text{ut}} \text{ and } j=1 \dots \mathbf{N}_{\text{ap}}, \text{ and}$$

$$e_{2(i+(j-1)\mathbf{N}_{\text{ut}})} = \text{Im}\{E(i, j)\}, \quad \text{for } i=1 \dots \mathbf{N}_{\text{ut}} \text{ and } j=1 \dots \mathbf{N}_{\text{ap}},$$

<112> 여기서, e_i 는 $\underline{\mathbf{e}}$ 의 i번째 엘리먼트이고; 및

<113> $E(i, j)$ 는 $\underline{\mathbf{E}}$ 의 i번째 및 j번째 열의 엘리먼트이다.

<114> $\underline{\mathbf{e}}$ 의 홀수-색인 엘리먼트는 $\underline{\mathbf{E}}$ 의 엘리먼트의 실수 성분에 대한 것이고, $\underline{\mathbf{e}}$ 의 짝수-색인 엘리먼트는 $\underline{\mathbf{E}}$ 의 엘리먼트의 허수 성분에 대한 것이다. 여러벡터 $\underline{\mathbf{e}}$ 는 벡터 $\underline{\mathbf{q}}$ 를 갖는 수학식 10, 12, 14, 및 15의 수치 값을 구함으로써 획득될 수 있다.

<115> MMSE 적응적인 절차에 대하여, $\underline{\mathbf{Q}}_{\text{ap}}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{\text{ut}}$ 의 엘리먼트의 실수 또는 허수 성분에 대한 $\underline{\mathbf{E}}$ 의 엘리먼트의 실수 또는 허수 성분의 편미분은 $\underline{\mathbf{Q}}_{\text{ap}}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{\text{ut}}$ 의 엘리먼트의 성분을 인자변환하고 (perturb) 수학식 10, 12, 14, 15에 의해 정의된 함수를 계산함으로써 생성될 수도 있다. $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp}}$ 에 대한 계산의 일부로서, 하나의 e^{jx} 항은 $|\tilde{\mathbf{V}}_{\text{a}} - e^{jx} \cdot \tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp}}|^2$ 이 최소화되도록 선택될 수도 있다. 이는 $\underline{\mathbf{Q}}_{\text{ut}}$ 의 리드 엘리먼트의 위상을 정규화하기 위해 수행된다.

<116> $\underline{\mathbf{q}}$ 의 엘리먼트에 대한 $\underline{\mathbf{e}}$ 의 엘리먼트의 근사 편미분은 하기와 같이 표시될 수도 있으며:

수학식 16

$$A_{j,i} = \frac{\partial e_j}{\partial q_i} \cong \frac{e_j(\underline{\mathbf{q}} + \underline{\Delta}_i) - e_j(\underline{\mathbf{q}})}{\delta}, \quad \text{for } i=1 \dots 2(\mathbf{N}_{\text{ap}} + \mathbf{N}_{\text{ut}} - 2) \text{ and } j=1 \dots 2\mathbf{N}_{\text{ap}}\mathbf{N}_{\text{ut}}$$

<118> 여기서, $\underline{\Delta}_j$ 는 길이 $2(\mathbf{N}_{\text{ap}} + \mathbf{N}_{\text{ut}} - 2)$ 이고 j번째 엘리먼트에 대한 δ 의 작은 실수 값과 그 외에는 영을 포함하는 벡터이고; 및

<119> $A_{j,i}$ 는 $\underline{\mathbf{q}}$ 의 i번째 엘리먼트에 대한 $\underline{\mathbf{e}}$ 의 j번째 엘리먼트의 근사 편미분이다.

<120> 근사 편미분 $A_{j,i}$ 는 하기와 같이 획득될 수도 있다. 벡터 $\underline{\mathbf{q}}_i$ 는 먼저 $\underline{\mathbf{q}}_i = \underline{\mathbf{q}} + \underline{\Delta}_i$ 와 같이 계산된다. 수학식 10, 12, 및 14에 의해 정의된 함수는 $\underline{\mathbf{q}}_i$ ($\underline{\mathbf{Q}}_{\text{ap},i}$ 및 $\underline{\mathbf{Q}}_{\text{ut},i}$ 를 포함함)에 대한 수치값을 구하여 신규 ("수정된") 가정 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp},i}$ 를 획득한다.

그 후, 신규 여러 벡터 $\underline{\mathbf{e}}_i$ 를 형성하기 위해 이용된 신규 여러 매트릭스 $\underline{\mathbf{E}}_i = \tilde{\mathbf{V}}_{\text{a}} - \tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp},i}$ 을 획득하기 위하여 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{a}}$ 로부터 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp},i}$ 를 뺀다. 그 후, 수학식 16에서 $e_j(\underline{\mathbf{q}} + \underline{\Delta}_i)$ 로서 표시된 $\underline{\mathbf{e}}_i$ 의 j번째 엘리먼트로부터 수학식 16에서 $e_j(\underline{\mathbf{q}})$ 로서 표시된 $\underline{\mathbf{e}}$ 의 j번째 엘리먼트

트를 뺀다. 빼기의 결과를 δ 로 나누어서 $A_{j,i}$ 을 획득한다.

<121> 수학식 10, 12, 14, 및 15에 대한 계산은 \mathbf{q} 의 $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$ 엘리먼트의 각각에 대하여 수행되어 대응하는 신규 에러 벡터 \mathbf{e}_i 를 획득한다. 각각의 신규 에러 벡터 \mathbf{e}_i 에 대하여, 엘리먼트대 엘리먼트에 기초하여 \mathbf{e}_i 의 $2N_{ap}N_{ut}$ 엘리먼트로부터 \mathbf{e} 의 $2N_{ap}N_{ut}$ 엘리먼트를 빼서 \mathbf{q} 의 i 번째 엘리먼트에 대한 \mathbf{e} 의 $2N_{ap}N_{ut}$ 엘리먼트의 $2N_{ap}N_{ut}$ 근사 편미분을 획득한다. $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$ 에 의한 차수 $2N_{ap}N_{ut}$ 의 매트릭스 \mathbf{A} 는 \mathbf{e} 및 \mathbf{q} 의 모든 엘리먼트의 모든 편미분으로 형성될 수도 있다. \mathbf{A} 의 열 각각은 \mathbf{q} 의 일 엘리먼트에 대하여 \mathbf{e} 의 $2N_{ap}N_{ut}$ 엘리먼트에 대한 $2N_{ap}N_{ut}$ 근사 편미분을 포함한다. \mathbf{A} 의 $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$ 열은 $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$ 엘리먼트 \mathbf{q} 에 대한 것이다.

<122> 수학식 10, 12, 14, 및 15에서 관계식이 근사하게 선형인 경우, \mathbf{q} 에서의 캘리브레이션 에러의 가정치와 실제 캘리브레이션 에러간의 차에 대한 추정치는 하기와 같이 표현될 수도 있으며:

수학식 17

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{e}$$

<124> 여기서, \mathbf{y} 는 \mathbf{q} 와 실제 캘리브레이션 에러간의 추정된 차에 대한 업데이트 벡터이다. 업데이트 벡터 \mathbf{y} 는 벡터 \mathbf{q} 와 동일한 포맷 및 차수를 갖으며, \mathbf{y} 는 리드 엘리먼트와는 다른 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 의 대각선 엘리먼트의 실수 및 허수 성분으로 구성된 실수 벡터이다.

<125> 통상의 경우처럼, \mathbf{A} 가 제곱 (square) 벡터가 아닌 경우, 간단한 매트릭스 인버스는 존재하지 않는다. 그 후, \mathbf{A} 의 무어펜로즈 유사-역원 (Moore-Penrose pseudo-inverse)은 수학식 17을 위해 이용될 수도 있다. 이 유사-역원은 등식 $\mathbf{A}\mathbf{A}^{-1}\mathbf{A} = \mathbf{A}$ 및 $\mathbf{A}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{A}^{-1}$ 을 만족시키는 간단한 매트릭스이다. 유사-역은 $\mathbf{A} = \mathbf{U}_a \mathbf{D} \mathbf{V}_a^H$ 인 \mathbf{A} 의 특이 값 분해를 수행하고, $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{U}_a^H \mathbf{D}^{-1} \mathbf{V}_a$ 처럼 유사-역을 계산함으로써 생성될 수도 있으며, 여기서 \mathbf{D}^{-1} 는 \mathbf{D} 의 대응하는 논-제로 (non-zero) 대각선 엘리먼트의 인버스로 구성되는 대각선 매트릭스이다.

<126> 편미분의 매트릭스 \mathbf{A} 는 수학식 10 내지 13에 의해 정의된 함수가 수치가 구해진 사이즈의 캘리브레이션 에러에 대하여 근사하게 선형이라는 가정하에서 계산된다. 선형성 가정이 완벽히 정확하지는 않으므로, 절차는 정확한 캘리브레이션 에러를 결정하기 위하여 수회 반복될 수도 있다. 몇몇 경우에 대하여, 그 절차는 수렴되지 않는다. 그러나, 통상, 수렴 (convergence)은 캘리브레이션 에러에 대한 상이한 개시 가정치를 간단하게 선택함으로써 달성될 수 있다. 그러나, 수렴이 획득되지 않은 경우, 사용자 단말기는 다운링크 스티어링 레퍼런스 및 다운링크 MIMO 파일럿의 다른 추정치에 기초한 $\tilde{\mathbf{V}}_a$ 및 $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ 의 다른 버전을 획득할 수도 있고 이를 신규 매트릭스를 이용하여 MMSE 적응적인 절차를 수행할 수도 있다.

<127> 수학식 10, 12, 14, 및 15가 선형인 경우, $\mathbf{y} + \mathbf{q}$ 는 \mathbf{e} 의 엘리먼트의 평균 제곱을 최소화한다. 그러나, 이를 수학식이 선형이 아니므로, \mathbf{q} 는 $\mathbf{y} + \mathbf{q}$ 으로 대체되고 절차는 반복된다. 그 후, 캘리브레이션 에러 벡터는 하기와 같이 업데이트될 수도 있으며:

수학식 18

$$<128> \underline{\mathbf{q}}_{mmse}(n+1) = \underline{\mathbf{y}}(n) + \underline{\mathbf{q}}_{mmse}(n)$$

<129> 여기서, n 는 반복횟수에 대한 인덱스이고;

<130> $\underline{\mathbf{q}}_{mmse}(n)$ 는 n번째 반복에 대한 캘리브레이션 에러 벡터이고;

<131> $\underline{\mathbf{y}}(n)$ 는 n번째 반복에 대한 업데이트 벡터이며; 및

<132> $\underline{\mathbf{q}}_{mmse}(n+1)$ 는 (n+1)번째 반복에 대하여 획득된 캘리브레이션 에러 벡터이다.

<133> 전술한 계산은 임의의 반복횟수에 대하여 반복될 수도 있다. 각각의 반복은 이전 반복에서 획득된 업데이트 캘리브레이션 에러 벡터 $\underline{\mathbf{q}}_{mmse}(n+1)$ 을 이용한다. 절차는 업데이트 벡터 $\underline{\mathbf{y}}(n)$ 가 충분히 작을 경우

종료될 수 있다. 예를 들어, 종료 조건은 $\|\underline{\mathbf{y}}(n)\|^2 = y < y_{th1}$ 일 수도 있으며, 여기서 y 는 $\underline{\mathbf{y}}(n)$ 의 엘리먼트 크기의 제곱의 합이고 y_{th1} 는 문턱값이다. 다른 예로서, 종료 조건은 모든 i 에 대하여 $y_i < y_{th2}$ 일 수도 있고, 여기서, y_i 는 $\underline{\mathbf{y}}(n)$ 의 i 번째 엘리먼트이고 y_{th2} 는 다른 문턱값이다. 모든 반복이 종료된 후, 캘리브레이션 에러의 마지막 추정치에 대한 매트릭스는 $\mathbf{Q}_{ap,final}$ 및 $\mathbf{Q}_{ut,final}$ 로서 표시된다.

<134> 최급강하 (steepest descent) 적응적인 절차에 대하여, 전체에러는 하기와 같이 정의될 수도 있다:

수학식 19

$$<135> z = \|\underline{\mathbf{E}}\|^2 = \|\widetilde{\underline{\mathbf{V}}}_a - \widetilde{\underline{\mathbf{V}}}_{hyp}\|^2$$

<136> 총에러 z 는 $\underline{\mathbf{E}}$ 의 엘리먼트 크기의 제곱을 합산함으로써 획득된다. $\underline{\mathbf{q}}$ 의 엘리먼트에 대한 z 의 편미분은 하기와 같이 계산될 수도 있으며:

수학식 20

$$<137> g_i = \frac{\partial z}{\partial q_i} \cong \frac{z(\underline{\mathbf{q}} + \Delta_i) - z(\underline{\mathbf{q}})}{\delta}, \quad \text{for } i = 1 \dots 2(N_{ap} + N_{ut} - 2),$$

<138> 여기서, g_i 는 $\underline{\mathbf{q}}$ 의 i 번째 엘리먼트에 대한 z 의 근사 편미분이고 Δ_i 는 길이 $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$ 이고 i 번째 엘리먼트에 대하여 δ 의 적은 실수 값 및 그 외에는 제로를 포함하는 벡터이다. 근사 편미분 g_i 는 하기와

같이 획득될 수도 있다. 벡터 $\underline{\mathbf{q}}_i$ 는 먼저 $\underline{\mathbf{q}}_i = \underline{\mathbf{q}} + \Delta_i$ 로서 계산된다. 수학식 10, 12, 14, 및 15에

의해 정의된 함수는 $\underline{\mathbf{q}}_i$ 에 대하여 계산되어 신규 에러 벡터 $\underline{\mathbf{e}}_i$ 을 획득한다. 그 후, 수학식 19에 나타난 바

와 같이 전체 에러 $\underline{\mathbf{z}}_i$ 는 신규 에러 벡터 $\underline{\mathbf{e}}_i$ 에 대하여 계산된다. 그 후, 수학식 20에서 $z(\underline{\mathbf{q}} + \Delta_i)$ 로서

표시되며 $\underline{\mathbf{q}}_i$ 를 가지고 획득된 전체 에러 $\underline{\mathbf{z}}_i$ 로부터 수학식 20에서 $z(\underline{\mathbf{q}})$ 로서 표시되며 $\underline{\mathbf{q}}$ 를 가지고 획득된 전체 에러 z 를 뺀다. 빼기의 결과를 δ 로 나눈 후에 g_i 를 획득한다. 계산은 $\underline{\mathbf{q}}$ 의

$2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$ 엘리먼트의 각각에 대하여 반복된다. 차수 $2(N_{ap} + N_{ut} - 2)$ 의 벡터 $\underline{\mathbf{g}}$ 는 $\underline{\mathbf{q}}$ 의 $\underline{\mathbf{q}}$ 의 대응하는 엘리먼트에서 수치값을 구한 전체에러의 기울기이다.

<139> 그 후, 캘리브레이션 에러 벡터는 하기와 같이 업데이트 될 수도 있으며:

수학식 21

$$\underline{\mathbf{q}}_{sd}(n+1) = \underline{\mathbf{q}}_{sd}(n) - \delta \underline{\mathbf{g}}(n),$$

<140> 여기서, $\underline{\mathbf{g}}(n)$ 은 n번째 반복에 대하여 획득된 기울기 벡터이고, $\underline{\mathbf{q}}_{sd}(n)$ 및 $\underline{\mathbf{q}}_{sd}(n+1)$ 은 가장 급속한 하강 절차에 대한 n번째 및 (n+1)번째 반복 각각에 대한 캘리브레이션 에러 벡터이다. 전술한 계산은 임의의 획 수의 반복을 위해 반복된다. 각각의 반복은 이전의 반복으로부터 획득된 업데이트 캘리브레이션 에러 벡터 $\underline{\mathbf{q}}_{sd}(n+1)$ 를 이용한다. 절차는 전체에러 z가 충분히 적을 경우, 예를 들어, Z_{th} 문턱값보다 적을 경우, 에 종료될 수 있다.

<141> 2개의 적응적인 절차는 실제 캘리브레이션 에러의 추정치를 유도하기 위해 전술되었다. 또한, 본 발명의 범위 내에 있는 다른 적응 및 비-적응적인 절차가 이용될 수도 있다.

<142> 사용자 단말기는 정정 매트릭스를 업데이트하여 하기와 같이 캘리브레이션 에러를 설명할 수 있다:

수학식 22

$$\hat{\mathbf{K}}_{ut,new} = \hat{\mathbf{K}}_{ut} \underline{\mathbf{Q}}_{ut,final}^{-1}.$$

<143> 도 2에 도시된 바와 같이, 업링크 송신에 대한 공간 프로세싱을 위해 사용자 단말기는 이전 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 대신에 신규 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ut,new}$ 을 이용한다. 사용자 단말기는 액세스 포인트에 캘리브레이션 에러 매트릭스 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap,final}$ 을 전송할 수도 있고, 그 후 $\hat{\mathbf{K}}_{ut,new} = \hat{\mathbf{K}}_{ut} \underline{\mathbf{Q}}_{ut,final}^{-1}$ 로 정정 매트릭스를 업데이트할 수도 있다. 시그널링의 양을 줄이기 위해서, 사용자 단말기는 매트릭스가 몇몇의 소정의 문턱값을 만족시키는 경우 캘리브레이션 에러 매트릭스 $\underline{\mathbf{Q}}_{ap,final}$ 을 재전송만 할 수도 있다.

<144> 도 3은 개시 캘리브레이션, 정규 동작, 및 후속 캘리브레이션에 대하여 액세스 포인트 및 사용자 단말기에 의해 수행된 프로세스 300를 도시한다. 액세스 포인트 및 사용자 단말기는 개시 캘리브레이션을 수행하여 송신 및 수신 체인을 캘리브레이션하여 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 를 유도한다 (블록 310). 개시 캘리브레이션을 이하에서 설명한다.

<145> 따라서, 정규 동작에 대하여, 액세스 포인트는 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 을 이용하여 다운링크 MIMO 파일럿을 송신한다 (블록 322). 사용자 단말기는 다운링크 MIMO 파일럿에 기초하여 캘리브레이션 다운링크 채널 응답 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ 을 획득하고 (블록 324) $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ 의 특이 값 분해를 수행하여 송신 매트릭스 $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$ 을 획득한다 (블록 326). 그 후, 수학식 6에서 나타낸 바와 같이, 사용자 단말기는 $\hat{\mathbf{V}}_{ut}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 를 이용하여 업링크 스티어링 레퍼런스를 송신한다 (블록 328). 전술한 바와 같이, 액세스 포인트는 업링크 스티어링 레퍼런스를 수신하고 송신 매트릭스 $\hat{\mathbf{U}}_{ap}$ 을 유도한다 (블록 330). 액세스 포인트 및 사용자 단말기는 공간 프로세싱을

위해 송신 매트릭스 $\hat{\mathbf{U}}_{\text{ap}}$ 및 $\hat{\mathbf{V}}_{\text{ut}}$ 각각을 이용한다.

<148> 후속 캘리브레이션에 대하여, 액세스 포인트는 $\hat{\mathbf{U}}_{\text{ap}}$ 및 $\hat{\mathbf{V}}_{\text{ut}}$ 을 이용하여 다운링크 스티어링 레퍼런스를 송신하고, 또한, $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 을 이용하여 다운링크 MIMO 파일럿을 송신한다 (블록 342). 전술한 바와 같이, 사용자 단말기는 다운링크 스티어링 레퍼런스에 기초하여 실제 비정규화 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{a}}$ 을 유도한다 (블록 344).

또한, 수학식 10 및 12, 또는 $\tilde{\mathbf{U}}_{\text{rx}} = (\hat{\mathbf{H}}_{\text{cdn}} \mathbf{Q}_{\text{ap}}^{-1})^T \mathbf{Q}_{\text{ut}} \hat{\mathbf{V}}_{\text{ut}}$ 에서 나타난 바와 같이, 사용자 단말기는 송신 매트릭스 $\hat{\mathbf{V}}_{\text{ut}}$, 캘리브레이션 다운링크 채널 응답 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{cdn}}$, 및 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 에 기초하여 비정규화 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{U}}_{\text{rx}}$ 를 계산한다 (블록 346). 사용자 단말기는, 또한, 액세스 포인트에서 수행되어지는 것 (직교화를 수행함) 과 동일한 방식으로 $\tilde{\mathbf{U}}_{\text{rx}}$ 을 프로세스하여 정규화 송신 매트릭스 \mathbf{U}_{g} 를 획득한다 (블록 348). 그 후, 사용자 단말기는, 수학식 10 및 14에 나타난 바와 같이, 송신 매트릭스 \mathbf{U}_{g} 및 캘리브레이션 다운링크 채널 응답 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{cdn}}$ 에 기초하여 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp}} = \hat{\mathbf{H}}_{\text{cdn}} \mathbf{U}_{\text{g}}$ 인 가정된 비정규화 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp}}$ 을 계산한다 (블록 350). 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp}}$ 는, 액세스 포인트가 \mathbf{U}_{g} 을 이용하여 다운링크 스티어링 레퍼런스를 송신하는 경우 사용자 단말기가 수신할 비정규화 송신 매트릭스이다. 그 후, 사용자 단말기는 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{a}}$ 및 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp}}$ 에 기초하여 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 을 수정한다 (블록 352). 블록 346 내지 352는 적응적인 절차를 이용하여 수행될 수도 있다. 그 후, 사용자 단말기는 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ut} 을 가지고 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 을 업데이트할 수도 있고 (블록 354), 액세스 포인트는 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 로서 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 을 업데이트할 수도 있다 (블록 356).

<149> 도 4는 도 3에서 블록 346 내지 352에서 이용될 수도 있는 MMSE 적응적인 절차 400을 도시한다. 먼저, 가정 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp}}$ 는 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{cdn}}$ 및 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 에 기초하여 계산된다 (블록 410). 블록 (410)은 도 3에서 블록 (346) 내지 (350)에 대응된다. 다음에, 수학식 15에서 나타난 바와 같이, 에러 매트릭스 \mathbf{E} 는 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{a}}$ 및 $\tilde{\mathbf{V}}_{\text{hyp}}$ 간의 차로서 계산된다 (블록 412). 수학식 16에서 나타난 바와 같이, 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 의 엘리먼트들중 선택된 엘리먼트의 각각 (예를 들면, 리드 엘리먼트를 제외한 모든 대각선 엘리먼트)에 대하여 에러 매트릭스 \mathbf{E} 의 엘리먼트 각각에 대한 편미분이 유도된다 (블록 414). 전술한 바와 같이, 매트릭스 \mathbf{E} 와 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 는 계산의 편의를 편의를 위해 벡터 형태로 놓여질 수도 있다. 또한 전술한 바와 같이, 편미분은 매트릭스에서 엘리먼트의 실수 및 허수 성분에 대하여 분리해서 유도될 수도 있다. 그 후, 수학식 17에서 나타낸 바와 같이, 업데이트 벡터 \mathbf{y} 는 편미분의 매트릭스 \mathbf{A} 및 에러 매트릭스 \mathbf{E} 에 기초하여 계산된다 (블록 416). 그 후, 수학식 18에서 나타낸 바와 같이, 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 는 업데이트 벡터 \mathbf{y} 로 업데이트된다 (블록 418). 다음에, 업데이트 벡터 \mathbf{y} 가 종료 조건을 만족하는지가 결정된다 (블록 420). 그 답이 "예"이면, 프로세스 (400)는 종료된다. 그렇지 않다면, 프로세스는 블록 (410)으로 돌아가서 다른 반복을 수행한다.

<150> 도 5는, 또한, 도 3에서 블록 346 내지 352에 대하여 이용될 수도 있는 최급강하 적응적인 절차 500을 도시한다. 먼저, 가정 송신 매트릭스 $\tilde{\mathbf{V}}_{hyp}$ 는 $\hat{\mathbf{H}}_{cdn}$ 와 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 에 기초하여 계산된다 (블록 510). 다음에, 수학식 19에 나타난 바와 같이, 전체 에러 z 는 $z = \|\tilde{\mathbf{V}}_a - \tilde{\mathbf{V}}_{hyp}\|^2$ 로서 계산된다 (블록 512). 그 후, 수학식 20에 나타난 바와 같이, 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 에서의 엘리먼트중 선택된 각각의 엘리먼트에 대한 전체 에러의 편미분이 유도된다 (블록 514). 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 는 벡터의 형태로 있을 수도 있고, 편미분은 매트릭스에서 엘리먼트의 실수 및 허수 성분에 대하여 개별적으로 유도될 수도 있다. 그 후, 수학식 21에 나타난 바와 같이, 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 는 편미분으로 업데이트된다 (블록 516). 다음에 전체 에러 z 가 종료 조건을 만족하는지에 관하여 결정을 한다 (블록 518). 그 답이 "예"이면 프로세스 (500)는 종료된다. 그렇지 않으면, 프로세스는 블록 (510)으로 돌아가서 다른 반복을 수행한다.

<151> 전술한 바와 같이, 사용자 단말기는 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 양쪽에서 캘리브레이션 에러를 측정한다. 후속 캘리브레이션을 간단히 하기 위해, 사용자 단말기는, 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 는 어떤 에러도 포함하지 않고 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 에서 에러만을 추정한다고 가정할 수 있다. 이는 캘리브레이션 에러 매트릭스 \mathbf{Q}_{ap} 를 단위 매트릭스로 설정하는 것에 해당된다. \mathbf{Q}_{ap} 를 생략함으로써, 벡터 \mathbf{q} , \mathbf{y} , 및 \mathbf{g} 와 매트릭스 \mathbf{A} 의 차수 (dimension)는 감소되고, 그 후, 계산이 많이 줄어들 수도 있다.

<152> 명료화를 위해, 전술은 사용자 단말기가 후속 캘리브레이션을 수행하는 경우에 대한 것이다. 또한, 액세스 포인트는 후속 캘리브레이션을 수행할 수도 있다. 이 경우에 있어서, 액세스 포인트 및 사용자 단말기는 도 3에서 역할을 스위치한다. 그 후, 사용자 단말기는 업링크 스티어링 레퍼런스 및 업링크 MIMO 파일럿을 송신하고, 액세스 포인트는 계산을 수행하여 \mathbf{Q}_{ap} 및 \mathbf{Q}_{ut} 을 유도한다.

<153> 또한 명료화를 위해서, 후속 캘리브레이션은 싱글-캐리어 MIMO 시스템에 대하여 설명된다. 또한, 후속 캘리브레이션은 직교 주파수 분할 멀티플렉싱 (OFDM) 또는 몇몇 다른 멀티-캐리어 변조 기술을 이용할 수도 있는 멀티-캐리어 MIMO 시스템에 대하여 수행될 수도 있다. OFDM은 전체적인 시스템 대역폭을 톤, 서브캐리어, 빈 (bin), 및 주파수 채널로 칭하는 복수 (N_F) 직교 서브밴드로 효과적으로 분할한다. OFDM와 함께, 각각의 서브밴드는 데이터로 변조될 수도 있는 각각의 서브캐리어와 접속된다. OFDM을 이용하는 MIMO 시스템 (MIMO-OFDM 시스템)에 대하여, 전술한 계산은 복수 서브밴드의 각각에 대하여 수행될 수도 있다. 고도의 상관이 인접 서브밴드간에 존재할 수도 있기 때문에, 캘리브레이션은, 예를 들어, 서브밴드의 수를 줄여서 후속 캘리브레이션을 수행하고, 수렴을 가속화 시킴 등을 하여 이 상관을 이용하는 방식으로 수행될 수도 있다.

2. 개시 캘리브레이션

<155> 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 을 유도하기 위한 개시 캘리브레이션에 대하여, 하나의 엔터티 (사용자 단말기 또는 액세스 포인트)는 효과적인 다운링크 채널 응답 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$ 및 효과적인 업링크 채널 응답 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_{up}$ 양쪽을 획득한다. 채널 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$ 및 $\hat{\mathbf{H}}_{up}$ 은 다운링크 및 업링크 MIMO 파일럿 각각에 기초하여 획득될 수도 있다. 정정 매트릭스는 $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$ 및 $\hat{\mathbf{H}}_{up}$ 로 부터 계산될 수도 있고 매트릭스-비 계산 또는 MMSE 계산을 이용하여 계산될 수도 있다.

<156> 매트릭스-비 계산에 대하여, 먼저, $N_{ut} \times N_{ap}$ 매트릭스 \mathbf{C} 는 하기와 같이 계산 되며:

수학식 23

$$\underline{\mathbf{C}} = \frac{\hat{\mathbf{H}}_{\text{up}}^T}{\hat{\mathbf{H}}_{\text{dn}}}$$

<157> 여기서, $\underline{\mathbf{C}}$ 는 엘리먼트-대-엘리먼트로 취해진다.

<159> 액세스 포인트에 대하여 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 에서의 대각선 엘리먼트는 $\underline{\mathbf{C}}$ 의 정규화된 행의 평균과 동일한 세트이다. 먼저, $\underline{\mathbf{C}}$ 의 각각의 행을 행내의 제 1 엘리먼트로 행내의 \mathbf{N}_{ap} 엘리먼트 각각을 스케일링함으로써 정규화된다. 그 후, 정규화 행의 평균 (벡터 $\bar{\mathbf{c}}_{\text{row}}$ 로 표시됨) 은 \mathbf{N}_{ut} 로 나누어진 \mathbf{N}_{ut} 정규화 행의 합으로서 계산된다. $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 의 \mathbf{N}_{ap} 대각선 엘리먼트는 $\bar{\mathbf{c}}_{\text{row}}$ 의 \mathbf{N}_{ap} 엘리먼트와 동일한 세트이다. 정규화로 인해, $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 의 리드 엘리먼트는 1 (unity) 과 같다.

<160> 사용자 단말기에 대한 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 에서의 대각선 엘리먼트는 $\underline{\mathbf{C}}$ 의 정규화 열의 인버스의 평균과 동일한 세트이다. 먼저, $\mathbf{j} = 1, \dots, \mathbf{N}_{\text{ap}}$ 인 $\underline{\mathbf{C}}$ 의 j 번째 열은 그 열에의 각각의 엘리먼트를 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 의 j 번째 대각선 엘리먼트로 스케일링함으로써 정규화된다. 그 후, 정규화 열의 인버스의 평균 (벡터 $\bar{\mathbf{c}}_{\text{col}}$ 로 표시됨) 은 (1) 인버전 (inversion) 은 엘리먼트 별로 수행되는 각각의 정규화 열의 인버스를 취함으로써, (2) \mathbf{N}_{ap} 인버스 정규화 열을 합산함으로써, (3) $\bar{\mathbf{c}}_{\text{col}}$ 을 획득하기 위하여 결과로서 생기는 열의 각각의 엘리먼트를 \mathbf{N}_{ap} 로 나눔으로서 계산된다. $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 의 \mathbf{N}_{ut} 대각선 엘리먼트는 $\bar{\mathbf{c}}_{\text{col}}$ 의 \mathbf{N}_{ut} 엘리먼트와 동일한 세트이다.

<161> MMSE 계산에 대하여, 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 는 효과적인 다운링크 및 업링크 채널 응답 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{dn}}$ 및 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{up}}$ 로 부터 유도되어 캘리브레이션 다운링크 및 업링크 채널 응답간의 평균 제곱 에러 (MSE) 가 최소가 된다. 이 조건은 하기와 같이 표현될 수도 있으며:

수학식 24

$$\min \left| (\hat{\mathbf{H}}_{\text{dn}} \hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}})^T - \hat{\mathbf{H}}_{\text{up}} \hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}} \right|^2,$$

<163> 또한, 하기와 같이 표현될 수도 있으며

$$\min \left| \hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}} \hat{\mathbf{H}}_{\text{dn}}^T - \hat{\mathbf{H}}_{\text{up}} \hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}} \right|^2$$

<165> 여기서, $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 는 대각선 매트릭스이므로 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}^T = \hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 이다.

<166> 수학식 24는 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 의 리드 엘리먼트가 1과 동일한 세트인 제약에 종속된다. 이 제약이 없는 경우, 0과 동일한 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 세트의 모든 엘리먼트로 명백한 해를 획득할 수 있다. 먼저, 수학식 24에서, 매트릭스 \mathbf{Y} 는 $\mathbf{Y} = \hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}} \hat{\mathbf{H}}_{\text{dn}}^T - \hat{\mathbf{H}}_{\text{up}} \hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 로 획득된다. 다음에, 절대값의 제곱은 \mathbf{Y} 의 $\mathbf{N}_{\text{ap}} \mathbf{N}_{\text{ut}}$ 엘리먼트의 각각에 대하여 획득된다. 그 후, 평균 제곱 에러 (또는, $\mathbf{N}_{\text{ap}} \mathbf{N}_{\text{ut}}$ 에 의한 제산이 생략되어 제곱 에러) 는

모든 제곱 값의 합산과 동일하다.

<167> MMSE 계산은 하기와 같이 수행된다. 간단화를 위해, $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$ 의 엘리먼트는 $\{a_{ij}\}$ 로서 표시되고, $\hat{\mathbf{H}}_{ap}$ 의 엘리먼트는 $\{b_{ij}\}$ 로 표시되고, $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 의 대각선 엘리먼트는 $\{u_i\}$ 로서 표시되며, $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 의 대각선 엘리먼트는 $\{v_j\}$ 로서 표시되고, 여기서 $i=1 \dots N_{ap}$ 및 $j=1 \dots N_{ut}$ 이다. 제곱 평균 에러는 수학식 24로부터 하기와 같이 재작성될 수도 있으며:

수학식 26

$$MSE = \sum_{j=1}^{N_{ut}} \sum_{i=1}^{N_{ap}} |a_{ij}u_i - b_{ij}v_j|^2$$

<168> 다시 제약 $u_1 = 1$ 에 종속된다. 최소 평균 제곱 에러는 u 및 v 에 대하여 수학식 25의 편미분을 취하고 편미분을 0으로 설정함으로써 획득될 수도 있다. 이들 동작의 결과는 하기의 수학식이다:

수학식 26a

$$\sum_{j=1}^{N_{ut}} (a_{ij}u_i - b_{ij}v_j) \cdot a_{ij}^* = 0, \quad \text{for } i = 2 \dots N_{ap}$$

, 및

수학식 26b

$$\sum_{i=1}^{N_{ap}} (a_{ij}u_i - b_{ij}v_j) \cdot b_{ij}^* = 0, \quad \text{for } j = 1 \dots N_{ut}$$

<172> 수학식 26에서, $u_1 = 1$, 따라서 이 경우에 대한 어떠한 편미분도 없고, 색인 i 는 2부터 N_{ap} 까지 실행된다.

<173> 수학식 26a 및 수학식 26b에서 $N_{ap} + N_{ut} - 1$ 등식의 세트는 하기와 같이 매트릭스 형태로 좀 더 편리하게 표현될 수도 있다:

수학식 27

$$\mathbf{Bk} = \mathbf{z},$$

<175>

여기서

$$\underline{\mathbf{B}} = \begin{bmatrix} \sum_{j=1}^{N_{ut}} |a_{2j}|^2 & 0 & \dots & 0 & -b_{21}a_{21}^* & \dots & -b_{2N_{ap}}a_{2N_{ut}}^* \\ 0 & \sum_{j=1}^{N_{ut}} |a_{3j}|^2 & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & 0 & \dots & 0 & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & \sum_{j=1}^{N_{ut}} |a_{N_{ap}j}|^2 & -b_{N_{ap}1}a_{N_{ap}1}^* & \dots & -b_{N_{ap}N_{ut}}a_{N_{ap}N_{ut}}^* \\ -a_{21}b_{21}^* & \dots & -a_{N_{ap}1}b_{N_{ap}1}^* & \sum_{i=1}^{N_{ap}} |b_{i1}|^2 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 & \sum_{i=1}^{N_{ap}} |b_{i2}|^2 & 0 & \dots \\ -a_{2N_{ut}}b_{2N_{ut}}^* & \dots & -a_{N_{ap}N_{ut}}b_{N_{ap}N_{ut}}^* & 0 & \dots & 0 & \sum_{i=1}^{N_{ap}} |b_{iN_{ut}}|^2 \end{bmatrix}$$

<176>

$$\underline{\mathbf{k}} = \begin{bmatrix} u_2 \\ u_3 \\ \dots \\ u_{N_{ap}} \\ v_1 \\ v_2 \\ \dots \\ v_{N_{ut}} \end{bmatrix} \text{ and } \underline{\mathbf{z}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ a_{11}b_{11}^* \\ a_{12}b_{12}^* \\ \dots \\ a_{1N_{ut}}b_{1N_{ut}}^* \end{bmatrix}$$

<177>

<178> 매트릭스 $\underline{\mathbf{B}}$ 는, 수학식 세트 26a로 부터 $N_{ap}-1$ 수학식에 대응하는 제 1의 $N_{ap}-1$ 행과 수학식 세트 26b로 부터 N_{ut} 수학식에 대응하는 마지막 N_{ut} 행을 갖는, $N_{ap}+N_{ut}-1$ 행을 포함한다. 매트릭스 $\underline{\mathbf{B}}$ 및 벡터 $\underline{\mathbf{z}}$ 의 엘리먼트는 $\hat{\mathbf{H}}_{dn}$ 및 $\hat{\mathbf{H}}_{up}$ 의 엘리먼트에 기초하여 획득될 수도 있다. $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 의 대각선 매트릭스는 하기와 같이 획득될 수도 있는 벡터 $\underline{\mathbf{k}}$ 내에 포함된다:

수학식 28

$$\underline{\mathbf{k}} = \underline{\mathbf{B}}^{-1} \underline{\mathbf{z}}$$

<179>

<180> MMSE 계산의 결과는, 수학식 24에서 나타난 바와 같이 캘리브레이션 다운링크 및 업링크 채널 응답에서 평균 제곱 에러를 최소화하는, 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 이다.

<181>

3. 공간 프로세싱

<182> 표 2는 데이터 송신을 위한 사용자 단말기와 액세스 포인트에 의해 수행된 공간 프로세싱 및 MIMO 채널의 고유 모드에서의 수신을 요약한다.

<183>

표 2

<184>

	업링크	다운링크
사용자 단말기	송신: $\underline{\mathbf{x}}_{\text{up}} = \hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}} \hat{\mathbf{V}}_{\text{ut}} \underline{\mathbf{s}}_{\text{up}}$	수신: $\hat{\underline{\mathbf{s}}}_{\text{dn}} = \hat{\underline{\mathbf{V}}}^{-1}_{\text{ut}} \hat{\mathbf{r}}_{\text{dn}}$
액세스 포인트	수신: $\hat{\underline{\mathbf{s}}}_{\text{up}} = \hat{\underline{\mathbf{U}}}^{-1}_{\text{ap}} \hat{\mathbf{r}}_{\text{up}}$	송신: $\underline{\mathbf{x}}_{\text{dn}} = \hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}} \hat{\mathbf{U}}_{\text{ap}}^* \underline{\mathbf{s}}_{\text{dn}}$

<185>

도 2 및 표 2에서 도시된 실시 예에 대하여, 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ap}}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{\text{ut}}$ 는 액세스 포인트 및 사용자 단말기 각각에서 송신측에 적용된다.

<186>

4. 시스템

<187>

도 6은 TDD MIMO 시스템 (100)에서 액세스 포인트 (110) 및 사용자 단말기 (150)의 실시 예의 블록도를 도시 한다. 다운링크상에서, 액세스 포인트 (110), 송신 (TX) 데이터 프로세서 (610)는 데이터 소스 (608)로부터 트래픽 데이터 (즉, 정보 비트)를 수신하고 제어기 (630)로 부터 시그널링 및 다른 데이터를 수신한다. TX 데이터 프로세서 (610)는 데이터의 상이한 타입의 데이터를 포맷, 코딩, 인터리빙, 및 변조 (또는 심볼 맵핑)하고 데이터 심볼을 제공한다. 여기서 이용된 바와 같이, "데이터 심볼"은 데이터에 대한 변조 심볼이고 "파일럿 심볼"은 파일럿에 대한 변조 심볼이다. 액세스 포인트 및 사용자 단말기 모두는 선형적으로 파일럿 심볼을 알고 있다. TX 공간 프로세서 (620)는 TX 데이터 프로세서 (610)로 부터 데이터 심볼을 수신하고, 데이터 심볼에 공간 프로세싱을 수행하고, 적합하게 파일럿 심볼에 멀티플렉싱 (예를 들면, 채널 추정, 캘리브레이션 등을 위해)하고, N_{ap} 변조기 (MOD; 622a) 내지 (622ap)에 대하여 송신 심볼의 N_{ap} 스트림을 제공한다. 각각의 변조기 (622)는 각각의 송신 심볼 스트림을 수신 및 프로세싱하여 OFDM 심볼의 대응하는 스트림을 획득하며, 또한, OFDM 심볼의 대응하는 스트림은 변조기 내의 송신 체인으로 프로세싱되어 대응하는 다운링크 변조 심볼을 획득한다. 그 후, 변조기 (622a)부터 (622ap) 까지의 N_{ap} 다운링크 변조 심볼은 N_{ap} 안테나 (624a)부터 (624ap) 까지 각각 송신된다.

<188>

사용자 단말기 (150)에서, N_{ut} 안테나 (652a)에서 (652ut)는 송신 다운링크 변조 신호를 수신하고, 각각의 안테나는 각각의 복조기 (DEMOD; 654)에 수신 신호를 제공한다. 각각의 복조기 (654) (수신체인을 포함함)는 변조기 (622)에서 수행되는 것과 상보적인 프로세싱을 수행하고 수신 심볼을 제공한다. 그 후, 수신 (RX) 공간 프로세서 (660)는 모든 N_{ut} 복조기 (654)로부터 수신 심볼에 수신기 공간 프로세싱을 수행하여 액세스 포인트에 의해 전송된 데이터 심볼의 추정치인 검파 심볼을 획득한다. 후속 캘리브레이션에 대하여, RX 공간 프로세싱 (660)은 (1)액세스 포인트에 의해 송신된 다운링크 MIMO 파일럿으로부터 획득된 캘리브레이션 다운링크 채널 응답 추정치 $\hat{\mathbf{H}}_{\text{cdn}}$ 을 제공하고 (2)액세스 포인트에 의해 송신된 다운링크 스티어링 레퍼런스에 대한 수신 심볼을 제공한다. RX 데이터 프로세서 (670)는 검파 심볼을 프로세싱하고 (예를 들면, 심볼 디맵핑, 디인터리빙, 및 디코딩) 디코딩 데이터를 제공한다. 디코딩 데이터는 복구된 트래픽 데이터, 시스템 신호 등을 포함하며, 디코딩 데이터는 저장을 위해 데이터 싱크 (672)에 제공되고 그리고/또는 추가 프로세싱을 위해 제어기 (680)에 제공된다.

<189>

업링크에 대한 프로세싱은 다운링크에 대한 프로세싱과 동일하거나 상이할 수도 있다. 데이터 및 시그널링은 TX 데이터 프로세서 (690)에 의해 프로세싱 (예를 들면, 코딩, 인터리빙, 및 변조) 되고, 또한, TX 공간 프로세서 (692)에 의해 파일럿 심볼로 공간 프로세싱 및 멀티플렉싱되어 송신 심볼을 획득한다. 또한, 송신 심볼은 변조기 (654a) 내지 (654ut)에 의해 프로세싱되어 N_{ut} 안테나 (652a) 내지 (652b)를 통해 액세스 포인트로 송신되는 N_{ut} 업링크 변조 심볼을 획득한다. 전술한 구현을 위해, 사용자 단말기 (150)은 개시 캐

리브레이션을 위해 정정 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 을 재전송하고 후속 캘리브레이션을 위해 캘리브레이션 에러 매트릭스 $\mathbf{Q}_{ap,final}$ 을 재전송할 수도 있다. 액세스 포인트 (110)에서, 업링크 변조 신호는, 사용자 단말기에서 수행되는 것과 상보적으로 안테나에 의해 수신되고, 복조기 (622)에 의해 복조되며, RX 공간 프로세서 (640) 및 RX 데이터 프로세서 (642)에 의해 프로세싱된다. RX 데이터 프로세서 (642)는 제어기 (630)에 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\mathbf{Q}_{ap,final}$ 을 제공한다.

<190> 개시 캘리브레이션에 대하여, 액세스 포인트 및 사용자 단말기는 다운링크 및 업링크 각각에 대하여 MIMO 파일럿을 송신한다. 각각의 엔터티는 링크에 대하여 효과적인 채널 응답 추정치를 유도한다. 하나의 엔터티 (예를 들면, 액세스 포인트)는 양쪽 엔터티에 대한 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 의 계산을 위해 채널 추정치를 다른 엔터티 (예를 들면, 사용자 단말기)에 전송한다. 정정 매트릭스를 유도하는 엔터티는 정정 매트릭스를 이용하여 다른 엔터티에 다른 정정 매트릭스를 전송한다. 후속 캘리브레이션에 대하여, 하나의 엔터티 (예를 들면, 액세스 포인트)는 스티어링 레퍼런스 및 MIMO 파일럿 양쪽에게 송신한다. 전술한 바와 같이, 다른 엔터티는 수신 파일럿에 기초하여 양쪽의 엔터티에 대하여 캘리브레이션 에러 매트릭스 $\mathbf{Q}_{ap,final}$ 및 $\mathbf{Q}_{ut,final}$ 을 유도한다. (예를 들면, 에러가 충분히 큰 경우) 캘리브레이션 에러 매트릭스를 유도하는 엔터티는 캘리브레이션 에러 매트릭스를 이용하여 다른 엔터티에 다른 캘리브레이션 에러 매트릭스를 재전송할 수도 있다.

<191> 제어기 (630 및 680)는 액세스 포인트 및 사용자 단말기 각각에서 다양한 프로세싱 유닛의 동작을 제어한다. 또한, 제어기 (630 및/또는 680)는 개시 및 후속 캘리브레이션에 대하여 프로세싱을 수행할 수도 있다 (예를 들면, 정정 매트릭스 $\hat{\mathbf{K}}_{ap}$ 및 $\hat{\mathbf{K}}_{ut}$ 그리고 캘리브레이션 에러 매트릭스 $\mathbf{Q}_{ap,final}$ 및 $\mathbf{Q}_{ut,final}$ 에 대한 계산). 메모리 유닛 (632 및 682)는 제어기 (630 및 680) 각각에 의해 이용된 데이터 및 프로그램 코드를 저장한다.

<192> 여기서 설명된 캘리브레이션 기술은 다양한 수단에 의해 구현될 수도 있다. 예를 들면, 이들 기술은 하드웨어, 소프트웨어, 또는 이들의 조합으로 구현될 수도 있다. 하드웨어 구현시, 개시 및/또는 후속 캘리브레이션을 수행하기 위해 이용된 프로세싱 유닛은 하나 이상의 주문형 집적회로 (ASIC), 디지털 신호 프로세서 (DSP), 디지털 신호 프로세서 장치 (DSPD), 프로그래머블 로직 디바이스 (PLD), 필드 프로그래머블 게이트 어레이 신호 (FPGA), 프로세서, 제어기, 마이크로-제어기, 마이크로프로세서, 여기서 설명된 기능을 수행하도록 설계되는 다른 전자 유닛, 또는 이들의 조합으로 구현될 수도 있다.

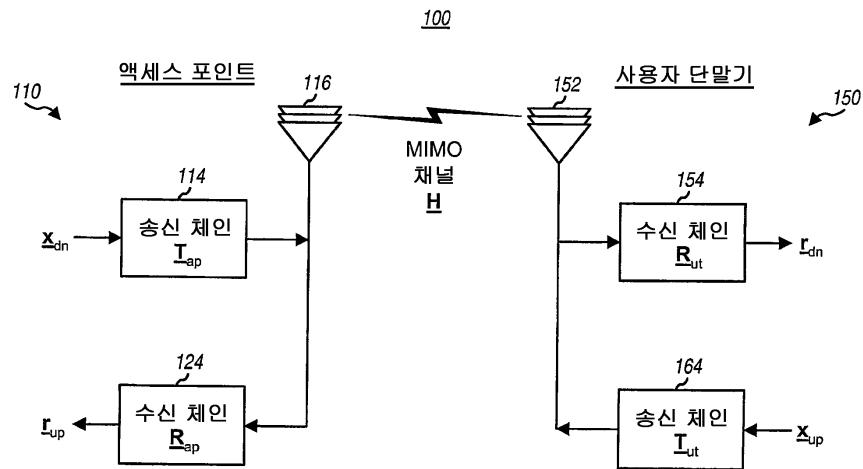
<193> 소프트웨어 구현시, 캘리브레이션 기술은 여기서 설명된 기능을 수행하는 모듈 (예를 들면, 절차, 기능등)로서 구현될 수도 있다. 소프트웨어 코드는 메모리 유닛 (예를 들면, 도 6에서 메모리 유닛 (632 또는 682))에 저장될 수도 있고 프로세서 (예를 들면, 제어기 (630 또는 680))에 의해 실행될 수도 있다. 메모리 유닛은 프로세서 내부에 또는 프로세서 외부에 구현될 수도 있으며, 각 경우에 있어서 메모리 유닛은 당업계에서 공지된 다양한 수단을 통하여 프로세서에 통신으로 연결될 수 있다.

<194> 표제는 여기서 참조를 위해 그리고 어떤 섹션에 위치하는지를 돋기 위해 포함되었다. 이들 표제는 여기서 기술된 개념의 영역을 제한하려는 의도는 아니며, 이들 개념은 전체 상세한 설명을 통하여 다른 섹션에서 응용을 가질수도 있다.

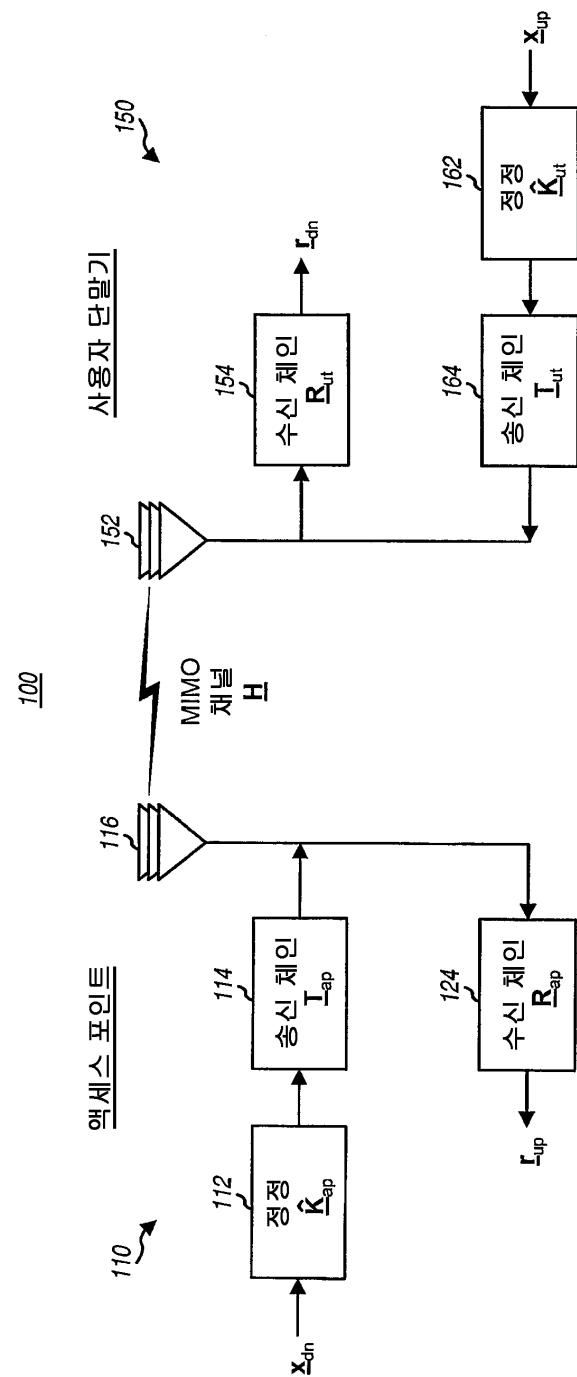
<195> 개시되어 있는 실시형태들에 대한 설명은 당업자로 하여금 본 발명을 제조 또는 이용할 수 있도록 제공된다. 당업자는 이들 실시형태에 대한 다양한 변형들을 명백히 알 수 있으며, 여기에서 정의된 일반적인 원리들은 본 발명의 사상 또는 범위를 벗어나지 않고도 다른 실시형태들에 적용될 수도 있다. 따라서, 이런 응용의 영역은 여기에서 설명된 실시형태들에 제한되는 것이 아니라, 여기에서 개시된 원리 및 신규한 특징들과 부합하는 최광의 범위를 부여하려는 수도 있다.

도면

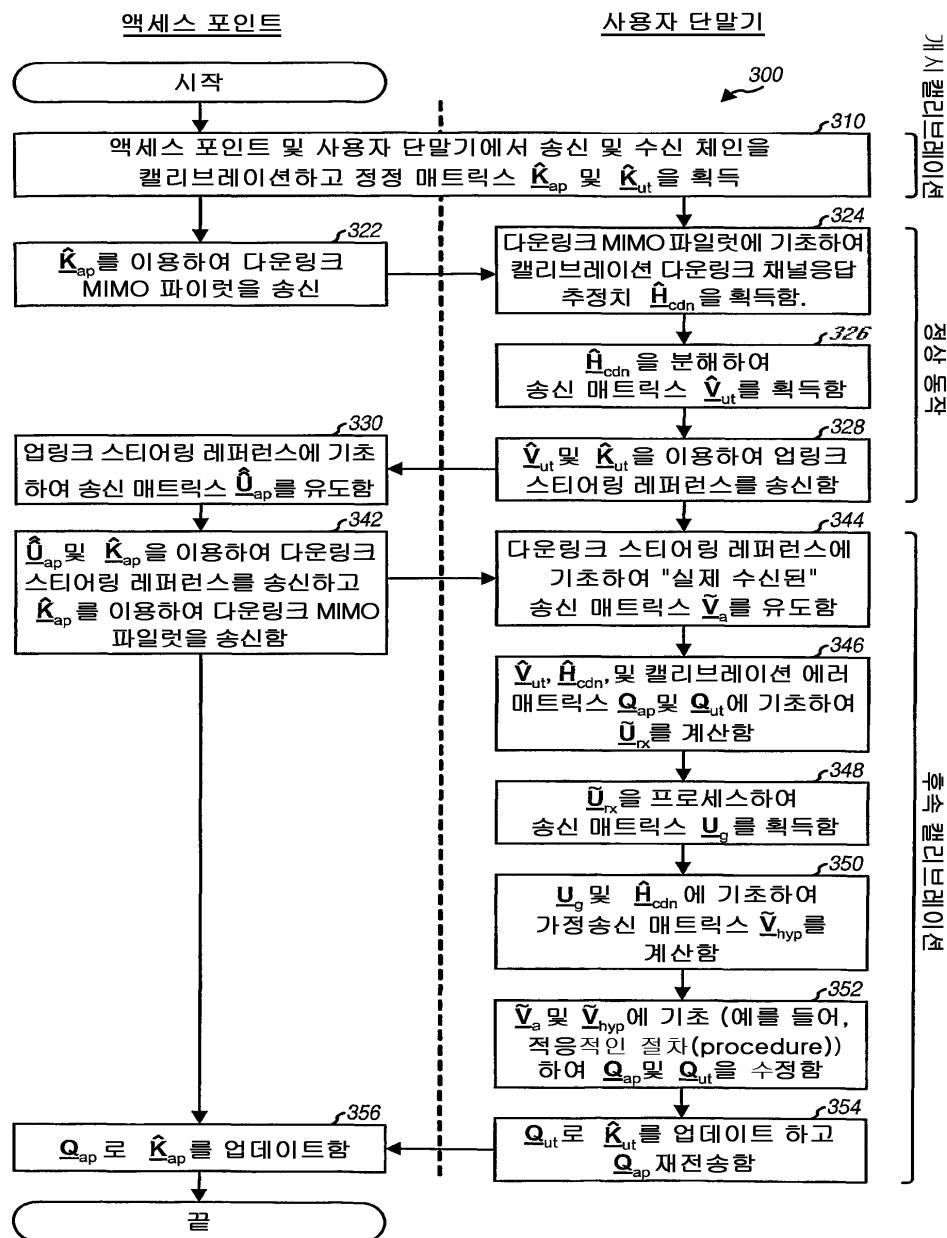
도면1



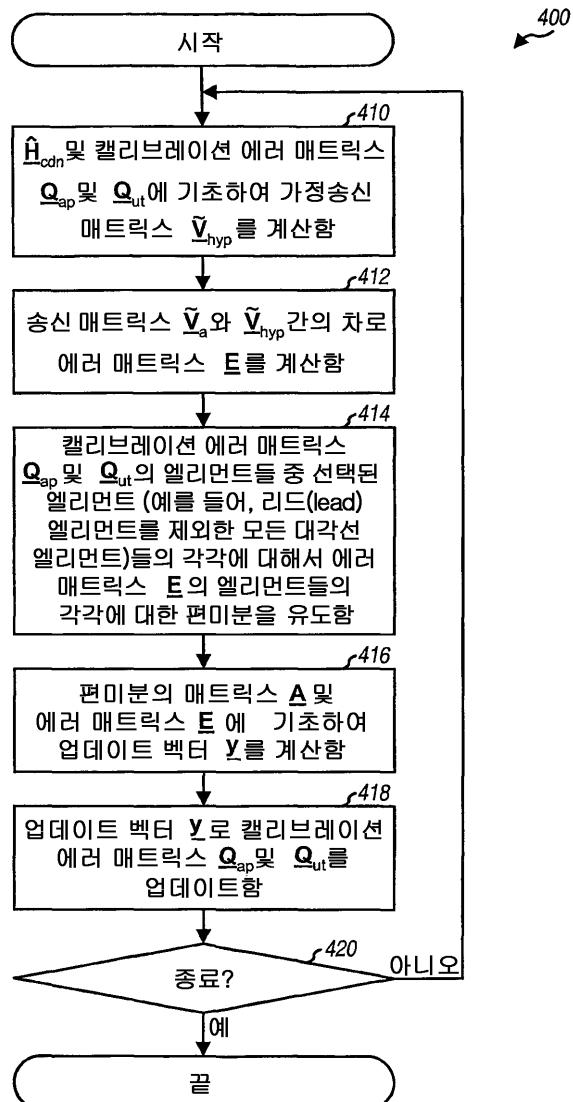
도면2



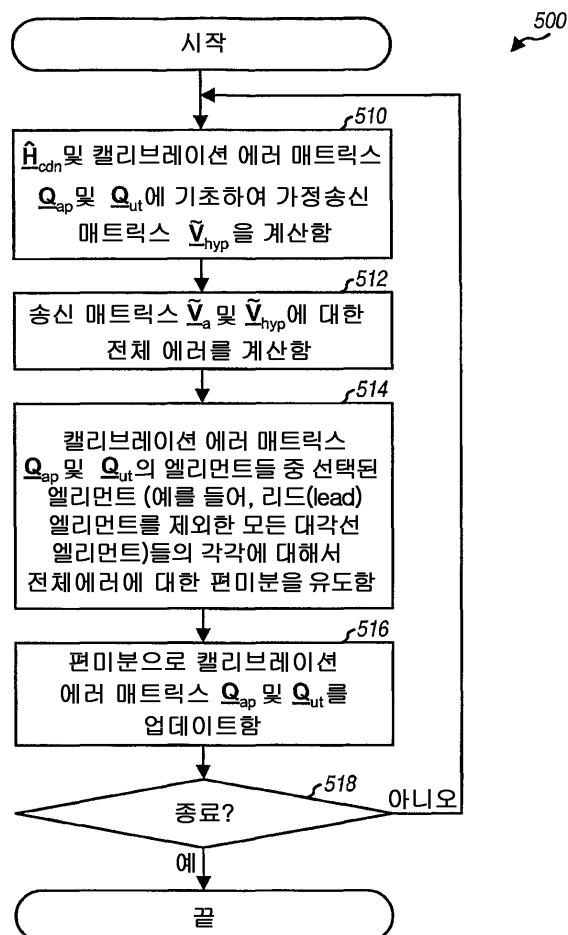
도면3



도면4



도면5



도면6

