(12) 특허협력조약에 의하여 공개된 국제출원

(19) 세계지식재산권기구
국제사무국

(43) 국제공개일
2022 년 7 월 21 일 (21.07.2022)

WIPO | PCT

(10) 국제공개번호
WO 2022/154265 A1

(51) 국제특허분류:
H04B 7/06 (2006.01)

(21) 국제출원번호: PCT/KR2021/018528

(22) 국제출원일: 2021 년 12 월 8 일 (08.12.2021)

(25) 출원언어: 한국어

(26) 공개언어: 한국어

(30) 우선권정보:
10-2021-0005843 2021 년 1 월 15 일 (15.01.2021) KR

(71) 출원인: 한국과학기술원 **(KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY)** [KR/KR]; 34141 대전시 유성구 대학로 291, Daejeon (KR).

(72) 발명자: **박현철 (PARK, Hyuncheol)**; 34141 대전시 유성구 대학로 291, Daejeon (KR). **전성배 (JUN, Seongbae)**; 34141 대전시 유성구 대학로 291, Daejeon (KR). **권기림 (KWON, Girim)**; 34141 대전시 유성구 대학로 291, Daejeon (KR).

(74) 대리인: **양성보 (YANG, Sungbo)**; 06099 서울시 강남구 선릉로125길 14 삼성빌딩 2층 피앤티특허법률사무소, Seoul (KR).

(81) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 국내 권리의 보호를 위하여): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

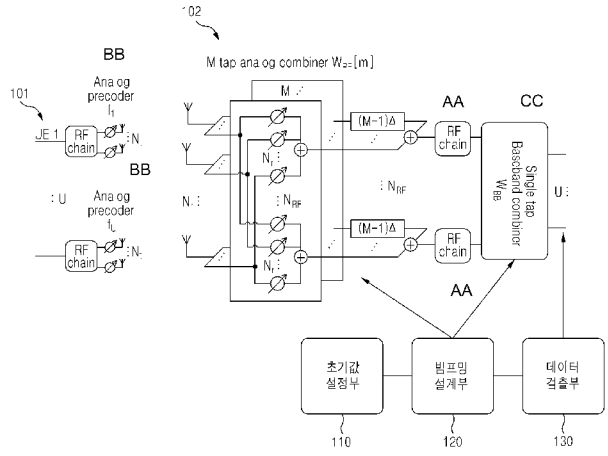
(84) 지정국 (별도의 표시가 없는 한, 가능한 모든 종류의 역내 권리의 보호를 위하여): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 유라시아 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 유럽 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

공개:
— 국제조사보고서와 함께 (조약 제21조(3))

WO 2022/154265 A1

(54) Title: SINGLE-CARRIER-BASED HYBRID BEAMFORMING METHOD AND DEVICE IN WIDEBAND SYSTEM

(54) 발명의 명칭: 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법 및 장치



102 ... M tap analog combiner
110 ... Initial value setting unit
120 ... eamforming design unit
130 ... Data detection unit
AA ... RF chain
BB ... Analog precoder
CC ... Single tap Baseband combiner

(57) Abstract: A single-carrier-based hybrid beamforming method and device in a wideband system are disclosed. A single-carrier-based hybrid beamforming method in a wideband system implemented by means of a computer device, according to one embodiment, comprises the steps of: detecting an output signal by using an analog beamforming unit comprising a plurality of taps; and detecting, with respect to the detected output signal, a final output signal by using a baseband digital beamforming unit.

(57) 요약서: 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법 및 장치가 제시된다. 일 실시예에 따른 컴퓨터 장치로 구현되는 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법은, 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출하는 단계; 및 검출된 상기 출력 신호를 기저 대역 디지털 빔포밍부를 이용하여 최종 출력 신호를 검출하는 단계를 포함하여 이루어질 수 있다.

명세서

발명의 명칭: 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법 및 장치

기술분야

[1] 아래의 실시예들은 빔포밍 기술에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법 및 장치에 관한 것이다.

[2] 이 발명은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구이다(No.2018-0-00809, 새로운 자원을 활용한 beyond 5G 이동통신 변혁기술 개발).

배경기술

[3] 빔포밍(Beamforming 또는 precoding) 기술은 다수의 안테나를 이용하여 전송 신호를 특정 방향으로 집중시키는 기술이다. 특히, beyond 5G 이동통신 시스템에서 고려하는 서브테라헤르츠(Sub-terahertz communication) 등의 초고주파 채널에서는 넓은 대역폭 확보가 용이하며, 매우 짧은 파장으로 인해 수백 수천 개의 안테나를 사용할 수 있으므로 좁은 빔 폭을 형성함으로써 높은 경로 감쇄를 극복할 수 있다.

[4] 다중 안테나를 사용하여 기존의 디지털 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 기술을 적용하기 위해서는 안테나 수만큼의 RF(Radio Frequency) chain이 필요하나 대량의 안테나를 사용하게 되면 하드웨어 복잡도와 전력소모가 대폭 증가하여 시스템 구현이 불가능해진다. 이를 해결하기 위해, 안테나에 비해 훨씬 적은 수의 RF chain을 사용하는 디지털-아날로그 하이브리드 빔포밍 구조가 사용되고 있다. 아날로그 빔포밍은 안테나 빔 형성 이득을 얻고, 기저 대역 디지털 빔포밍은 다중화 이득을 얻음으로써 디지털 빔포밍 성능에 근접한다. 여기서, 아날로그 빔포밍 블록은 회로복잡도를 낮추고자 신호의 위상만 제어할 수 있는 RF 위상 천이기로만 구성되어 있는 구조이다.

[5] 한편, 광대역 시스템은 주파수 선택적 채널에서 작동함에 따라 서로 다른 심볼 시간 신호 사이에 간섭인 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)이 시스템 전송률에 큰 영향을 미친다.

[6] 저전력 하드웨어 구조로 심볼 간 간섭(ISI)을 효과적으로 제어하는 기술인 직교 주파수 분할 다중방식(Orthogonal Frequency Division Modulation, OFDM) 기반 하이브리드 빔포밍 기술은 cyclic prefix 오버헤드를 수반하고, 전송률이 증가함에 따라 신호 검출에 필요한 연산 부담이 크다는 어려움이 있다. 대안으로, 단일 반송파 광대역 시스템은 cyclic prefix 오버헤드가 없고 OFDM과 비교하여 신호 검출 연산량을 더욱 줄일 수 있다는 장점이 있으나, 광대역 채널로 인해 발생하는 심볼 간 간섭(ISI)과 MIMO 시스템에서 발생하는 다중 안테나 간 간섭을 동시에 제어해야 한다.

[7] 다중 사용자 광대역 시스템은 심볼 간 간섭(ISI)과 사용자 간 간섭 완화가 시스템 전송률 향상에 큰 영향을 미치므로 간섭 제어를 위한 빔포밍 설계가 필요하다. 심볼 간 간섭(ISI)은 광대역 채널의 큰 시간 지연으로 인해 송신 신호가 여러 심볼 시간에 분산되어 수신하는 것이 원인으로, 심볼 간 간섭(ISI)을 해소하기 위해서는 여러 다른 심볼 시간에 수신한 신호를 모아서 합성해야 한다.

[8] 기존 기술에서 사용하는 디지털-아날로그 하이브리드 빔포밍 구조는 아날로그 빔포밍이 심볼 시간에 독립적으로 동작하기 때문에 복수 개의 심볼 시간 사이의 수신 신호를 다룰 수 없어 심볼 간 간섭(ISI) 제어에 한계가 있다. 이에 따라 단일 반송파 광대역 시스템에서 간섭을 제어하는 하이브리드 빔포밍 기술이 요구된다.

[9] (비특허문헌) S. Payami, M. Sellathurai, and K. Nikitopoulos, "Low-complexity hybrid beamforming for massive MIMO systems in frequency-selective channels," IEEE Access, vol. 7, pp. 36 195-36 206, Apr. 2019.

발명의 상세한 설명

기술적 과제

[10] 실시예들은 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법 및 장치에 관하여 기술하며, 보다 구체적으로 단일 반송파 기반의 하이브리드 빔포밍 구조를 사용하여 심볼 간 간섭(ISI) 등의 간섭을 제어할 수 있는 아날로그 멀티탭 하이브리드 빔포밍 기술을 제공한다.

[11] 실시예들은 아날로그 빔포밍 블록에서 시간 지연을 이용하여 수신 신호를 합성함으로써 심볼 간 간섭(ISI) 등 간섭을 상당 부분 제거하기 때문에 보다 간단한 기저 대역 빔포밍 연산으로 신호 검출이 가능한 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법 및 장치를 제공하는데 있다.

기술적 해결방법

[12] 일 실시예에 따른 컴퓨터 장치로 구현되는 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법은, 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출하는 단계; 및 검출된 상기 출력 신호를 기저 대역 디지털 빔포밍부를 이용하여 최종 출력 신호를 검출하는 단계를 포함하여 이루어질 수 있다.

[13] 상기 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출하는 단계는, 간섭을 제거하기 위해 상기 아날로그 빔포밍부에서 시간 지연을 이용하여 수신 신호를 합성할 수 있다.

[14] 상기 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출하는 단계는, 기지국에서 사용자로부터 수신한 신호에 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 컴바이너를 적용하여 출력 신호를 검출할 수 있다.

[15] 상기 아날로그 컴바이너는, 복수 개의 레이어(layer)의 위상 천이기 네트워크로 이루어져 있으며, 각각의 상기 레이어에 심볼 딜레이를 장착하여 다른 심볼

시간에 수신한 신호들을 모아서 합성함에 따라, 광대역 채널에서 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)을 제거할 수 있다.

[16] 상기 기저 대역 디지털 빔포밍부를 이용하여 최종 출력 신호를 검출하는 단계는, 기지국에서 검출된 상기 출력 신호에 단일 탭으로 이루어진 기저 대역 컴바이너를 적용하여 최종 출력 신호를 검출할 수 있다.

[17] 상향링크의 합계 전송률을 최대화하도록 복소 원 다양체에서 켤레 기울기 방법을 사용하여 최적화된 빔포밍을 설계하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[18] 상기 최적화된 빔포밍을 설계하는 단계는, 위상 천이기를 사용하는 상기 아날로그 빔포밍부가 갖는 제약 조건을 반영하여 최적의 빔포밍을 설계하기 위해, 상기 제약 조건을 복소 원 다양체로 정의하고, 상기 복소 원 다양체에서 정의되는 켤레 기울기를 구하여 최적 해로의 이동 방향을 찾아 단계적으로 최적화할 수 있다.

[19] 상기 최적화된 빔포밍을 설계하는 단계는, 상기 복소 원 다양체는 리만 기울기(Riemannian gradient)에서 정의되는 리만 다양체(Riemannian manifold)이고, 상향링크의 합계 전송률의 목적 함수의 켤레 기울기를 통해 line search 방법으로 최적화할 수 있다.

[20] 다른 실시예에 따른 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 장치는, 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출하는 제1 검출부; 및 검출된 상기 출력 신호를 기저 대역 디지털 빔포밍부를 이용하여 최종 출력 신호를 검출하는 제2 검출부를 포함하여 이루어질 수 있다.

[21] 상기 제1 검출부는, 간섭을 제거하기 위해 상기 아날로그 빔포밍부에서 시간 지연을 이용하여 수신 신호를 합성할 수 있다.

[22] 상기 제1 검출부는, 기지국에서 사용자로부터 수신한 신호에 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 컴바이너를 적용하여 출력 신호를 검출할 수 있다.

[23] 상기 아날로그 컴바이너는, 복수 개의 레이어(layer)의 위상 천이기 네트워크로 이루어져 있으며, 각각의 상기 레이어에 심볼 딜레이를 장착하여 다른 심볼 시간에 수신한 신호들을 모아서 합성함에 따라, 광대역 채널에서 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)을 제거할 수 있다.

[24] 상기 제2 검출부는, 기지국에서 검출된 상기 출력 신호에 단일 탭으로 이루어진 기저 대역 컴바이너를 적용하여 최종 출력 신호를 검출할 수 있다.

[25] 상향링크의 합계 전송률을 최대화하도록 복소 원 다양체에서 켤레 기울기 방법을 사용하여 최적화된 빔포밍을 설계하는 빔포밍 설계부를 더 포함할 수 있다.

[26] 상기 빔포밍 설계부는, 위상 천이기를 사용하는 상기 아날로그 빔포밍부가 갖는 제약 조건을 반영하여 최적의 빔포밍을 설계하기 위해, 상기 제약 조건을 복소 원 다양체로 정의하고, 상기 복소 원 다양체에서 정의되는 켤레 기울기를 구하여 최적 해로의 이동 방향을 찾아 단계적으로 최적화할 수 있다.

[27] 상기 복소 원 다양체는 리만 기울기(Riemannian gradient)에서 정의되는 리만

다양체(Riemannian manifold)이고, 상향링크의 합계 전송률의 목적 함수의 켤레 기울기를 통해 line search 방법으로 최적화할 수 있다.

[28] 상기 제1 검출부는 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 컴바이너로 구성되고, 상기 제2 검출부는 상기 아날로그 컴바이너와 결합되는 단일 탭으로 이루어진 기저 대역 컴바이너로 구성되어, 최종 출력 신호를 검출하는 데이터 검출부일 수 있다.

발명의 효과

[29] 실시예들에 따르면 단일 반송파 기반의 하이브리드 빔포밍 구조를 사용하여 심볼 간 간섭(ISI) 등의 간섭을 제어할 수 있는 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법 및 장치를 제공할 수 있다.

[30] 실시예들에 따르면 아날로그 빔포밍 블록에서 시간 지연을 이용하여 수신 신호를 합성함으로써 심볼 간 간섭(ISI) 등 간섭을 상당 부분 제거하기 때문에 보다 간단한 기저 대역 빔포밍 연산으로 신호 검출이 가능한 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법 및 장치를 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[31] 도 1은 일 실시예에 따른 광대역 다중 사용자 상향링크에서 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 시스템을 나타내는 도면이다.

[32] 도 2는 일 실시예에 따른 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법을 나타내는 흐름도이다.

[33] 도 3은 일 실시예에 따른 알고리즘의 초기 시작점을 설정하여 간섭을 제거하는 방법을 설명하기 위한 도면이다.

[34] 도 4는 일 실시예에 따른 GSO 초기화 효과를 나타내는 그래프이다.

[35] 도 5는 일 실시예에 따른 SC hybrid BF와 기존 기술과의 비교를 나타내는 그래프이다.

발명의 실시를 위한 최선의 형태

[36] 이하, 첨부된 도면을 참조하여 실시예들을 설명한다. 그러나, 기술되는 실시예들은 여러 가지 다른 형태로 변형될 수 있으며, 본 발명의 범위가 이하 설명되는 실시예들에 의하여 한정되는 것은 아니다. 또한, 여러 실시예들은 당해 기술분야에서 평균적인 지식을 가진 자에게 본 발명을 더욱 완전하게 설명하기 위해서 제공되는 것이다. 도면에서 요소들의 형상 및 크기 등은 보다 명확한 설명을 위해 과장될 수 있다.

[37]

[38] 아래의 실시예들은 단일 반송파 기반의 하이브리드 빔포밍 구조를 사용하여 심볼 간 간섭(ISI) 등의 간섭을 제어할 수 있는 아날로그 멀티탭 하이브리드 빔포밍 구조와 그 방법을 제안한다.

[39] 실시예들에 따른 단일 반송파 기반의 하이브리드 빔포밍 구조는 아날로그 빔포밍 블록에서 시간 지연을 이용해 수신 신호를 합성하여 심볼 간 간섭(ISI) 등

간섭을 상당 부분 제거하기 때문에, 보다 간단한 기저 대역 빔포밍 연산으로 신호 검출이 가능하다.

[40] 한편, 아날로그 빔포밍은 위상 천이기를 사용하기 때문에 위상만 제어할 수 있는 구조적 한계가 있으나, 여기에서는 이러한 제약 조건 하에서 전송률을 최대화하는 해를 찾는 방법을 제안한다.

[41]

[42] 먼저, 시스템 모델에 사용되는 수식을 정의한다.

[43] N_t는 사용자 안테나 수, 모든 사용자가 동일한 안테나 수 가정이다.

[44] N_r는 기지국 안테나 수이다.

[45] N_{RF}는 기지국 RF chain 수이다.

[46] U는 전체 사용자 수이다.

[47] N_s는 한 심볼 시간에 전송하는 data stream 수이다.

[48] P_t는 사용자의 송신 전력이다.

[49] $s_u[k]$는 u번째 사용자가 k번째 심볼 시간에 전송하려는 정보를 담은 신호이다.

[50] $x_u[k]$는 u번째 사용자의 안테나 어레이 이득을 얻은 송신 신호이다.

[51] $H_u[d]$는 시간 영역에서 샘플링 시간 T_s을 갖는 u번째 사용자와 기지국 간 상향링크 delay-d MIMO 클러스터 채널이다.

[52] r[k]는 기지국에서 k번째 심볼 시간에 받은 신호이다.

[53] z[k]는 가우시안 잡음 벡터이다.

[54] $h_{(eff,u)}[d]=H_u[d]f_u$는 u번째 사용자의 프리코딩을 포함하여 기지국의 수신 안테나까지의 유효 채널이다.

[55] $W_{RF}[m]\in C^{N_r\times N_{RF}}$는 기지국의 아날로그 컴바이너 행렬이다.

[56] $W_{BB}\in C^{N_{RF}\times U}$는 기지국의 기저 대역 컴바이너 행렬이다.

[57] $r_{RF}[k]$는 r[k]에 아날로그 컴바이너 $W_{RF}[m]$을 적용한 신호이다.

[58] y[k]는 아날로그 컴바이너와 이어서 기저 대역 컴바이너를 적용한 최종 출력 신호이다.

[59] $E[\cdot]$는 Expectation operator이다.

[60] I_k는 K x K Identity matrix이다.

[61] $[\cdot]^H$는 conjugate transpose이다.

[62] $[\cdot]^*$는 conjugate transpose이다.

[63] 도 1은 일 실시예에 따른 광대역 다중 사용자 상향링크에서 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 시스템을 나타내는 도면이다.

[64] 도 1을 참조하면, 광대역 다중 사용자 상향링크에서 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 시스템을 나타내며, 다중 탭 아날로그 빔포밍과 단일 탭 기저 대역 빔포밍을 구현할 수 있다.

[65] 예를 들어, U명의 상향링크 사용자(101)가 동시에 기지국(102)과 통신을 하며, 각 사용자(101)는 단일 RF chain과 N_t개 안테나가 장착되어 있다. 기지국(102)은 안테나 N_r개와 RF chain N_{RF}개를 사용한다. 각 사용자(101)는 단일 스트림을 전송하여, 한 심볼 시간에 동시 전송하는 상향링크 스트림은 총 N_s=U개가 된다.

[66] 기지국(102)의 신호처리부에서 아날로그 및 디지털 빔포밍을 설계하며, 이는 제안하는 알고리즘의 초기값 설정부, 빔포밍 설계부 및 데이터 검출부로 구성되어 있다. 다시 말하면, 일 실시예에 따른 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 장치는 초기값 설정부(110), 빔포밍 설계부(120) 및 데이터 검출부(130)를 포함하여 이루어질 수 있다. 이 때, 데이터 검출부(130)는 제1 검출부 및 제2 검출부를 포함할 수 있다.

[67] 여기서 빔(Beam)은 송수신단에서 안테나 배열에 곱하는 가중치 벡터에 따라 형성되는 안테나 패턴이고, Beam dictionary는 송수신단에서 방위각 상하각에 따라 구성할 수 있는 빔 패턴 후보 집합이다.

[68]

[69] 도 2는 일 실시예에 따른 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법을 나타내는 흐름도이다.

[70] 도 2를 참조하면, 일 실시예에 따른 컴퓨터 장치로 구현되는 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법은, 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출하는 단계(S120), 및 검출된 출력 신호를 기저 대역 디지털 빔포밍부를 이용하여 최종 출력 신호를 검출하는 단계(S130)를 포함하여 이루어질 수 있다.

[71] 실시예에 따라 출력 신호를 검출하기 이전에, 상향링크의 합계 전송률을 최대화하도록 복소 원 다양체에서 켤레 기울기 방법을 사용하여 최적화된 빔포밍을 설계하는 단계(S110)를 더 포함할 수 있다. 또한, 최적화된 빔포밍을 설계하기 위해 초기값을 설정할 수 있다.

[72] 일 실시예에 따른 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법은 도 1에서 설명한 일 실시예에 따른 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 장치를 예를 들어 보다 구체적으로 설명할 수 있다.

[73]

[74] 단계(S120)에서, 데이터 검출부(130)의 제1 검출부는 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출할 수 있다.

[75] 여기서 데이터 검출부(130)는 제1 검출부 및 제2 검출부를 포함할 수 있으며, 보다 구체적으로 제1 검출부는 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 컴바이너로 구성되고, 제2 검출부는 아날로그 컴바이너와 결합되는 단일 탭으로 이루어진 기저 대역 컴바이너로 구성되어 최종 출력 신호를 검출할 수 있다.

[76] 제1 검출부는 간섭을 제거하기 위해 아날로그 빔포밍부에서 시간 지연을 이용하여 수신 신호를 합성할 수 있다. 여기서 간섭은 심볼 간 간섭(ISI) 등일 수 있다.

[77] 제1 검출부는 기지국에서 사용자로부터 수신한 신호에 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 컴바이너를 적용하여 출력 신호를 검출할 수 있다. 여기서, 아날로그 컴바이너는 복수 개의 레이어(layer)의 위상 천이기 네트워크로 이루어져 있으며, 각각의 레이어에 심볼 딜레이를 장착하여 다른 심볼 시간에 수신한 신호들을 모아서 합성함에 따라 광대역 채널에서 심볼 간 간섭(ISI)을 제거할 수 있다.

[78] 단계(S130)에서, 데이터 검출부(130)의 제2 검출부는 검출된 출력 신호를 기저대역(baseband, BB) 디지털 빔포밍부를 이용하여 최종 출력 신호를 검출할 수 있다.

[79] 제2 검출부는 기지국에서 검출된 출력 신호에 단일 탭으로 이루어진 기저 대역 컴바이너를 적용하여 최종 출력 신호를 검출할 수 있다.

[80] 한편, 출력 신호를 검출하기 이전에 최적화된 빔포밍을 설계할 수 있다.

[81] 즉, 단계(S110)에서, 빔포밍 설계부(120)는 상향링크의 합계 전송률을 최대화하도록 복소 원 다양체에서 켤레 기울기 방법을 사용하여 최적화된 빔포밍을 설계할 수 있다. 이 때, 켤레 기울기 방법을 통해 최적 해를 구할 수 있으나, 켤레 기울기를 구하는 데 과도한 연산량을 필요로 하므로, 상향링크의 합계 전송률의 하한을 최대화하는 문제로 재구성하여 최적화된 빔포밍을 설계할 수 있다.

[82] 빔포밍 설계부(120)는 위상 천이기를 사용하는 아날로그 빔포밍부가 갖는 제약 조건을 반영하여 최적의 빔포밍을 설계하기 위해, 제약 조건을 복소 원 다양체로 정의하고, 복소 원 다양체에서 정의되는 켤레 기울기를 구하여 최적 해로의 이동 방향을 찾아 단계적으로 최적화할 수 있다. 여기서, 복소 원 다양체는 리만 기울기(Riemannian gradient)에서 정의되는 리만 다양체(Riemannian manifold)이고, 상향링크의 합계 전송률의 목적 함수의 켤레 기울기를 통해 line search 방법으로 최적화할 수 있다.

[83] 또한, 초기값 설정부(110)는 켤레 기울기 방법의 효과적인 초기값을 정하는 방법 (GSO 알고리즘)을 제공할 수 있다. GSO 기반 초기값 설정은 임의 선택 대비 반복 횟수를 줄이도록 하는 효과가 있다.

[84] 이와 같이 실시예들은 아날로그 빔포머 구조로 복수 개의 레이어의 위상 천이기 네트워크와, 각각의 레이어에 심볼 딜레이를 장착하여 여러 다른 심볼 시간에 수신한 신호를 모아서 합성할 수 있다.

[85] 실시예들은 위상 천이기를 사용한 아날로그 빔포밍이 갖는 제약 조건을 직접 반영하여 최적의 빔포밍을 설계하기 위해, 제약 조건에 따른 가능 해 집합 하에서 최적화를 수행할 수 있다. 이 제약 조건은 복소 원 다양체로 정의할 수 있으며, 복소 원 다양체에서 정의되는 켤레 기울기를 구하여 최적 해로의 이동 방향을 찾아 단계적으로 접근이 가능하다. 켤레 기울기를 이용한 단계적 최적화 과정에서 연산량을 줄이기 위한 목적 함수 재설정과 효과적인 초기값을 설정할 수 있다.

[86]

[87] 아래에서 일 실시예에 따른 광대역 다중 사용자 상향링크에서 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 시스템 모델에 대해 보다 상세히 설명한다.

[88] 송신 신호 모델

[89] u번째 사용자는 송신 아날로그 프리코딩 f_u을 통해 N_t 안테나 어레이 이득을 얻은 송신 신호 $x_u[k]$를 전송할 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[90] [수학식 1]

[91] $$x_u[k]=f_u s_u[k]$$

[92] 여기서, $s_u[k]$는 u번째 사용자가 k번째 심볼 시간에 전송하려는 정보를 담은 송신 전력 P_t의 신호이고, 이는 사용자 인덱스 및 시간에 독립적이다. 즉, $E[s_u[k_1]s_u^*[k_2]]=P_t\delta[k_2-k_1]$을 만족한다.

[93] 송신 아날로그 프리코딩 f_u은 위상 천이기를 통해 구현하기 때문에 f_u 행렬의 각 성분은 모두 같은 크기를 갖고, $|(f_u)_i|=1/\sqrt{(N_t)}$로 제한하면 송신 전력 정규화 $|f_u|=1$ 조건 역시 만족한다.

[94] 상향링크 다중 사용자 환경의 채널 모델

[95] $H_u[d]$는 시간 영역에서 샘플링 시간 T_s을 갖는 u번째 사용자와 기지국 간 상향링크 delay-dMIMO 클러스터 채널을 나타내며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

[96] [수학식 2]

[97] $$H_u[d]=\sqrt{\frac{N_{BS}N_{MS,u}}{N_{cl}N_{ray}}}\sum_{l=1}^{N_{cl}}\sum_{r=1}^{N_{ray}}\alpha_{lr,u}p_{RC}(dT_s-\tau_{lr,u})a_{BS}(\phi_{lr,u})a_{MS,u}^H(\theta_{lr,u})$$

[98] 여기서, N_{cl}는 u번째 사용자와 기지국 간 채널에 존재하는 클러스터(cluster) 수이고, N_{ray}는 u번째 사용자와 기지국 간 채널 클러스터에 존재하는 ray 수이며, $\alpha_{lr,u}$는 u번째 사용자와 기지국 간 경로 이득을 나타낸다. 또한, $p_{RC}(\cdot)$는 펄스 성형 함수(pulse-shaping function)이고, $\theta_{lr,u}$는 u번째 사용자에서 기지국으로 나가는 각 경로 성분의 azimuth angle이며, $\phi_{lr,u}$는 u번째 사용자에서 기지국으로 들어오는 각 경로 성분의 azimuth angle이고, $a_{TX}(\cdot)/a_{RX}(\cdot)$는 송신/수신 배열 안테나의 normalized array response vector로써 균일 선형 배열 안테나(Uniform Linear Array, ULA)를 고려한다.

[99] 수신 신호 모델

[100] 기지국에서 k번째 심볼 시간에 받은 신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

[101] [수학식 3]

[102] $$r[k]=\sum_{u=1}^{U}\sum_{d=0}^{D-1}H_u[d]f_u s_u[k-d]+z[k]$$

[103] 여기서, $z[k]\ N(0,N_0I)$는 가우시안 잡음 벡터이다.

[104] u번째 사용자의 프리코딩을 포함하여 기지국의 수신 안테나까지의 유효 채널을 $h_{eff,u}[d]=H_u[d]f_u$라 정의하면, r[k]는 다음과 같이 표현될 수 있다.

[105] [수학식 4]

[106] $$r[k]=\sum_{u=1}^{U}\sum_{d=0}^{D-1}h_{eff,u}[d]s_u[k-d]+z[k]=\sum_{d=0}^{D-1}H_{eff}[d]s[k-d]+z[k]$$

[107] 여기서, $H_{eff}[d]=[h_{eff,1}[d],\ldots,h_{eff,U}[d]],s[k]=[s_1[k],\ldots,s_U[k]]^T$이다.

[108] 일 실시예에 따르면 수신단에서 하이브리드 빔포밍을 적용할 수 있다.

[109] 보다 구체적으로, 기지국은 수신 신호에 M개 탭으로 이루어진 아날로그 컴바이너 $W_{RF}[m]\in C^{N_m N_{RF}}$와, 연달아서 단일 탭으로 된 기저 대역 컴바이너 $W_{BB}\in C^{N_{RF}\times U}$를 적용하여 신호를 검출할 수 있다.

[110] 아날로그 컴바이너는 M개 layer의 위상 천이기 네트워크로 이루어져 있고, 각각의 layer에는 심볼 딜레이가 장착되어 있기 때문에 여러 다른 심볼 시간에 수신한 신호를 모아서 합성할 수 있다.

[111] r[k]에 아날로그 컴바이너 $W_{RF}[m]$을 적용한 신호는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

[112] [수학식 5]

[113] $$r_{RF}[k]=\sum_{m=0}^{M-1}W_{RF}^{H}[m]r[k-m]$$

$$=\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{d=0}^{D-1}W_{RF}^{H}[m]H_{eff}[d]s[k-m-d]+\sum_{m=0}^{M-1}W_{RF}^{H}[m]z[k-m]$$

$$\triangleq\sum_{d_{RF}=m+d}\ \sum_{d_{RF}=0}^{D+M-2}\sum_{m=0}^{M-1}W_{RF}^{H}[m]H_{eff}[d_{RF}-m]\,s[k-d']+\sum_{m=0}^{M-1}W_{RF}^{H}[m]z[k-m]$$

$$=\sum_{RF=0}^{D+M-2}\bar{W}_{RF}^{H}\tilde{H}_{eff}[d']\,s[k-d_{RF}]+\bar{W}_{RF}^{H}\tilde{z}[k]$$

[114] 여기서, $$\bar{W}_{RF}^{H}=\begin{bmatrix}W_{RF}[0]\\ \vdots \\ W_{RF}[M-1]\end{bmatrix},\tilde{H}_{eff}[d_{RF}]=\begin{bmatrix}H_{eff}[d_{RF}]\\ \vdots \\ H_{eff}[d_{RF}-M+1]\end{bmatrix},\tilde{z}[k]=\begin{bmatrix}z[k]\\ \vdots \\ z[k-M+1]\end{bmatrix}$$

이다.

[115] k번째 심볼 시간에서의 수신 신호 $r_{RF}[k]$는 심볼 시간 k부터 k-(D+M-2)까지, 즉 최대 D+M-2 이전의 송신 신호에 영향을 받을 수 있다.

[116] 이는 D탭 채널과 M탭 아날로그 컴바이너로 인한 것으로, 특정 수신 신호가 영향을 받는 심볼 시간 범위를 $D_{RF}=D+M-1$라 정의할 수 있다.

[117] 아날로그 컴바이너 적용 이후, 단일 탭의 기저 대역 컴바이너를 적용하여 최종 출력 신호 y[k]를 얻고, 이를 바탕으로 송신 신호를 검출할 수 있다. 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[118] [수학식 6]

[119]

$$y[k] = W_{BB}^{H} r_{RF}[k] = W_{BB}^{H} \bar{W}_{RF}^{H} \sum_{m=0}^{D_{RF}-1} \tilde{H}_{eff}[d_{RF}] F_{RF} F_{BB} s[k - d_{RF}] + W_{BB}^{H} \bar{W}_{RF}^{H} \tilde{z}[k]$$

[120] 아래와 같이 신호대잡음및간섭비 및 상향링크의 합계 전송률을 계산할 수 있다.

[121] k번째 심볼 시간에서의 출력 신호 y[k]에는 D_{RF} 심볼 시간만큼의 송신 신호가 포함되어 있다. 이 중에서 가장 큰 에너지 비중을 차지하는 심볼 $s[k-d_{RF}^{*}]$을 아래와 같이 찾아 검출할 수 있다.

[122] [수학식 7]

[123]

$$d_{RF}^{*} = \underset{d_{RF}=0,\ldots,D_{RF}-1}{\operatorname{argmax}} \left\| \tilde{H}_{eff}[d_{RF}] \right\|_{F}^{2}$$

[124] 이 때, u번째 사용자의 송신 신호와 다중 안테나 간 간섭, 심볼 간 간섭(또는 심볼 시간 간 간섭)(ISI) 및 잡음 부분은 아래와 같이 정의될 수 있다.

[125] [수학식 8]

[126]

$$y[k] = w_{BB,u}^{H} \bar{W}_{RF}^{H} \sum_{d_{RF}=0}^{D_{RF}-1} \sum_{u=1}^{U} \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}]\, s[k - d_{RF}] + w_{BB}^{H} \bar{W}_{RF}^{H} \tilde{z}[k]$$

$$= \underbrace{w_{BB,u}^{H} \bar{W}_{RF}^{H} \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^{*}]\, s[k - d_{RF}^{*}]}_{\text{u번째 사용자의 송신 신호}} + \underbrace{w_{BB,u}^{H} \bar{W}_{RF}^{H} \sum_{u' \neq u} \tilde{h}_{eff,u'}[d_{RF}^{*}]\, s_{u'}[k - d_{RF}^{*}]}_{\text{다중 안테나 간 간섭}}$$

$$+ \underbrace{w_{BB,u}^{H} \bar{W}_{RF}^{H} \sum_{u'=1}^{U} \sum_{d_{RF} \neq d_{RF}^{*}}^{U} \tilde{h}_{eff,u'}[d_{RF}]\, s_{u'}[k - d_{RF}]}_{\text{심볼간 간섭 (ISI)}} + \underbrace{w_{BB,u}^{H} \bar{W}_{RF}^{H} \tilde{z}[k]}_{\text{잡음}}$$

[127] 여기서, $w_{BB,u}$, $\tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}]$은 각각 $W_{BB,u}$, $\tilde{H}_{eff,u}[d_{RF}]$에서 u번째 행 벡터들이다.

[128] u번째 사용자의 송신 신호에 대한 신호대잡음및간섭비(Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR)는 아래와 같고, 상향링크의 합계 전송률 R_u를 도출할 수 있다.

[129] [수학식 9]

[130]

$$SIN_u = \frac{\left|w_{BB,u}^H \bar{W}_{RF}^H \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^*]\right|^2}{\sum_{u \neq u} \left|w_{BB,u}^H \bar{W}_{RF}^H \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^*]\right|^2 + \sum_{u'=1}^{U} \sum_{d_{RF} \neq d_{RF}^*} \left|w_{BB,u}^H \bar{W}_{RF}^H \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}]\right|^2 + \frac{N_0}{P_t} \left\|w_{BB,u}^H \bar{W}_{RF}^H\right\|^2}$$

[131] $R_u = \log_2(1+SINR_u)$

[132]

[133] 아래에서는 하이브리드 빔포밍 설계의 문제 설정을 통해 보다 상세히 설명한다.

[134] 상향링크의 합계 전송률 최대화

[135] 상향링크의 합계 전송률을 최대화하는 하이브리드 빔포밍 설계 문제는 (P0)과 같다.

[136] [수학식 10]

[137]

$$(P0)\ \{W_{RF}^*, w_{BB,1}^*, \ldots, w_{BB,U}^*\} = \underset{\bar{W}_{RF}, w_{BB,1}, \ldots, w_{BB,U}}{\operatorname{argmax}} \sum_{U=1}^{U} R_u$$

$$\text{subject to} \left|[\bar{W}_{RF}]_{i,j}\right| = 1$$

[138] R_u는 $SINR_u$에 대해 증가 함수이기 때문에, (P0)의 최적 해는 각각의 $SINR_u$가 최댓값을 갖는 조건에서 얻어진다.

[139] Generalized eigenvalue problem을 이용하여 $SINR_u$을 최대화하는 $\overline{W}_{RF}$와 $w_{(BB,u)}$의 관계식을 구할 수 있다.

[140] [수학식 11]

[141]

$$SIN_u = \frac{\left|w_{BB,u}^H \bar{W}_{RF}^H \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^*]\right|^2}{\sum_{j\neq u}\left|w_{BB,u}^H \bar{W}_{RF}^H \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^*]\right|^2 + \sum_{u'=1}^{U}\sum_{d_{RF}\neq d_{RF}^*}\left|w_{BB,u}^H \bar{W}_{RF}^H \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}]\right|^2 + \frac{N_0}{P_t}\left\|w_{BB,u}^H \bar{W}_{RF}^H\right\|^2}$$

$$= \frac{w_{BB,u}^H\left(\bar{W}_{RF}^H \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^*]\right)\left(\bar{W}_{RF}^H \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^*]\right)^H w_{BB,u}}{w_{BB,u}^H \bar{W}_{RF}^H\left(\sum_{u'\neq u}\tilde{h}_{eff,u'}[d_{RF}^*]\tilde{h}_{eff,u'}[d_{RF}^*] + \sum_{u'=1}^{U}\sum_{d_{RF}\neq d_{RF}^*}\tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}]\tilde{h}_{eff,u}^H[d_{RF}] + \frac{N_0}{P_t} I_{MN_r}\right)\bar{W}_{RF}^H w_{BB,u}}$$

$$\Rightarrow w_{BB,u}^* = \left\{(\bar{W}_{RF}^*)^H\left(\sum_{u'\neq u}\tilde{h}_{eff,u'}[d_{RF}^*]\tilde{h}_{eff,u'}[d_{RF}^*] + \sum_{u'=1}^{U}\sum_{d_{RF}\neq d_{RF}^*}\tilde{h}_{eff,u'}[d_{RF}]\tilde{h}_{eff,u}^H[d_{RF}]\right.\right.$$

$$\left.\left. + \frac{N_0}{P_t} I_{MN_r}\right)\bar{W}_{RF}^*\right\}^{-1}(\bar{W}_{RF}^*)^H \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^*]$$

[142] $\overline{W}_{RF}^*$와 $w_{(BB,u)}^* u=1,\cdots,U$의 관계식을 (P0)에 대입하여 단일 변수 최적화 문제 (P1)을 얻는다.

[143] [수학식 12]

[144]

$$(P1)\ \{\bar{W}_{RF}^*\} = \underset{\bar{W}_{RF}^H}{\operatorname{argmax}} \sum_{U=1}^{U} \bar{R}_u$$

$$\text{subject to}\left|[\bar{W}_{RF}]_{i,j}\right| = 1$$

[145] 여기서, 상향링크의 결레 합계 전송률 $\overline{R}_u$는 합계 전송률 R_u에 $\overline{W}_{RF}^*$와 $w_{(BB,u)}^* u=1,\cdots,U$의 관계식을 대입한 것으로, 아래와 같이 나타낼 수 있다.

[146] [수학식 13]

[147] $$\overline{R}_u = \log_2(1 + \overline{SINR}_u)$$

[148] [수학식 14]

[149] $$\overline{SINR}_u = \tilde{h}^H_{eff,u}[d^*_{RF}]\,\overline{W}_{RF}\left\{\overline{W}^H_{RF}\left(\sum_{u'\neq u}\tilde{h}_{eff,u'}[d^*_{RF}]\tilde{h}^H_{eff,u'}[d^*_{RF}] + \sum_{u'=1}^{U}\sum_{d_{RF}\neq d^*_{RF}}\tilde{h}_{eff,u'}[d_{RF}]\tilde{h}^H_{eff,u}[d_{RF}] + \frac{N_0}{P_t}I_{MN_r}\right)\overline{W}_{RF}\right\}^{-1}\overline{W}^H_{RF}\,\tilde{h}_{eff,u}[d^*_{RF}]$$

[150] 상향링크의 합계 전송률의 하한을 최대화하는 문제

[151] (P1)은 켤레 기울기 방법을 통해 최적 해를 구할 수 있으나, 켤레 기울기를 구하는 데 과도한 연산량을 필요로 하다는 단점이 있다.

[152] 기하-조화 평균 부등식을 이용하여 (P1) 목적 함수 $\overline{R}_{HB}$의 하한 $\overline{R}_{HB,LB}$를 얻을 수 있다.

[153] [수학식 15]

[154] $$\overline{R}_{HB} = \sum_{u=1}^{U}\log_2(1+\overline{SINR}_2) = \log_2\left(\prod_{u=1}^{U}(1+\overline{SINR}_u)\right) \geq \log_2\left(\frac{1}{U}\sum_{u=1}^{U}\frac{1}{(1+\overline{SINR}_u)}\right)^{-U} \triangleq \overline{R}_{HB,LB}$$

[155] $\overline{R}_{HB,LB}$를 최대화하는 문제는 logarithm 함수 안에 항의 분모를 최소화하는 문제와 같다. 이를 (P2)라 하며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[156] [수학식 16]

[157] $$(P1)\ \{\overline{W}^*_{RF}\} = \underset{\overline{W}_{RF}}{\operatorname{argmax}}\sum_{u=1}^{U}\frac{1}{1+\overline{SINR}_u}$$
$$\text{subject to}\ \left|(W_{RF}[m])_{i,j}\right| = 1$$

[158]

[159] 아래에서는 복소 원 다양체에서 켤레 기울기 방법을 사용한 최적화를 설명한다.

[160] 아날로그 빔포밍이 갖는 제약 조건에 따른 가능 해 집합

[161] (P1) 및 (P2)의 제약 조건으로 인해 가능 해 집합은 MN_rN_{RF}개의 복소 원 S^1들의 곱으로 생각할 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[162] [수학식 17]

[163] $$S^1 \triangleq \{x\in C : |x| = 1\}$$

[164] 복소 원 S^1는 복소공간 C의 부분 다양체로 볼 수 있으므로 MN_rU개의 복소

원들의 곱은 $C^{MN_r \times N_{RF}}$의 부분 다양체에 해당한다. 이러한 다양체를 복소 원 다양체 라 하고 아래와 같이 정의할 수 있다.

[165] [수학식 18]

[166]
$$M \triangleq \{x \in C^{MN_r \times N_{RF}} : |[x]_{i,u}| = 1, i = 1, \dots, MN_r, u = 1, \dots, N_{RF}\}$$

[167] 복소 원 다양체에서 기울기를 이용한 최적화

[168] 복소 원 다양체 M은 Riemannian gradient가 정의되는 Riemannian manifold이고, 이를 통해 목적 함수가 증가 또는 감소하는 방향을 찾아 움직임으로 최적해를 구할 수 있다.

[169] 유클리드 공간에서의 유클리드 기울기를 구하는 과정을 통해, 복소 원 다양체에서 정의되는 리만 기울기 또한 구할 수 있다.

[170] 복소 변수를 가진 스칼라 함수 $f(\overline{W}_{RF})$의 유클리드 켤레 기울기는

$$\nabla f(\overline{W}_{RF}) = \frac{\partial f(\overline{W}_{RF})}{\partial W_{RF}^{*}}$$ 으로 정의된다.

[171] (P1), (P2)의 목적 함수를 각각 $f_1(\overline{W}_{RF}), f_2(\overline{W}_{RF})$라 하면, 각각의 유클리드 켤레 기울기 $\nabla f_1(\overline{W}_{RF}), \nabla f_2(\overline{W}_{RF})$는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

[172] [수학식 19]

[173]
$$\nabla f_1(\overline{W}_{RF}) = \sum_{u=1}^{U} \frac{1}{\ln 2} \frac{\{-A_{-u}\overline{W}_{RF}(\overline{W}_{RF}^{H} A_{-u}\overline{W}_{RF})^{-1}\overline{W}_{RF}^{H} + I_{MN_r}\}\tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^{*}]\tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^{*}]\overline{W}_{RF}^{H}(W_{RF}^{H} A_{-u} W_{RF})^{-1}}{1 + \tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^{*}]\overline{W}_{RF}^{H}(\overline{W}_{RF}^{H} A_{-u}\overline{W}_{RF})^{-1}\overline{W}_{RF}^{H}\tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^{*}]}$$

[174] [수학식 20]

[175]
$$\nabla f(\overline{W}_{RF}) = \left[\left(GG^{H}\overline{W}_{RF} + \frac{N_0}{P_t}\overline{W}_{RF}\right)\left(\overline{W}_{RF}^{H} GG^{H}\overline{W}_{RF} + \frac{N_0}{P_t}\overline{W}_{RF}^{H}\overline{W}_{RF}\right)^{-1}\overline{W}_{RF}^{H} - I_{MN_r}\right] \times GCC^{H}G^{H}\overline{W}_{RF}\left(\overline{W}_{RF}^{H} GG^{H}\overline{W}_{RF} + \frac{N_0}{P_t}\overline{W}_{RF}^{H}\overline{W}_{RF}\right)^{-1}$$

[176] 여기서,

[177]
$$A_{-u} = \sum_{u' \neq u}\tilde{h}_{eff,u'}[d_{RF}^{*}]\tilde{h}_{eff,u}[d_{RF}^{*}] + \sum_{u'=1}^{U}\sum_{d_{RF} \neq d_{RF}^{*}}\tilde{h}_{eff,u'}[d_{RF}]\tilde{h}_{eff,u}^{H}[d_{RF}] + \frac{N_0}{P_t} I_{MN_r}$$ 이다.

$$G = \left[\tilde{H}_{eff}[0] \cdots \tilde{H}_{eff}[d_{RF}^{*}] \cdots \tilde{H}_{eff}[D_{RF}]\right], \quad C = \left[0_{d_{RF}^{*}-1 \times U}^{H} \; I_U \; 0_{(D_{RF}-1-d_{RF}^{*}) \times U}^{H}\right]^{H}$$

[178] 복소 원 다양체 M에서 정의되는 리만 기울기는 유클리드 켤레 기울기를 탄젠트 공간에 투영하여 구할 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[179] [수학식 21]

[180]

$$\nabla f(\overline{W}_{RF}) = \mathrm{Proj}_{\overline{W}_{RF}} \nabla f(\overline{W}_{RF}) = \nabla f(\overline{W}_{RF}) - \Re\{\nabla f(\overline{W}_{RF}) \cdot \overline{W}_{RF}^{*}\} \cdot \overline{W}_{RF}$$

[181] 표 1은 일 실시예에 따른 리만 기울기를 이용한 켤레 기울기 방법 알고리즘을 나타낸다. 유도한 목적 함수의 켤레 기울기를 통해 line search 방법으로 최적화할 수 있다.

[182] [표 1]

[183]

Input: Obuective function $f(W_{RF})$, initial point $\overline{W}_{RF}^{(0)}$ M, k = 0

1: Repeat

2: Compute Riemannian gradient $G_k = \nabla_M f(\overline{W}_{RF}^{(k)})$

3: Calculate Polak-Ribiere parameter as ($\beta_0 = 0$)

$$\beta_k = \max\left(0, \frac{\mathrm{tr}\{G_k^H (G_k - \mathrm{Proj}_{\overline{W}_{RF}^{(k)}} G_{k-1})\}}{\left\| \mathrm{Proj}_{\overline{W}_{RF}^{(k)}} G_{k-1} \right\|_F^2}\right)$$

4: Determine conjugate direction $D_k = -G_k + \beta_k \mathrm{Proj}_{\overline{W}_{RF}^{(k)}} D_{k-1}$ to minimize (or $D_k = G_k + \beta_k \mathrm{Proj}_{\overline{W}_{RF}^{(k)}} D_{k-1}$ to maximize) the objective function

5: Choose Amijo backtracking line search step size α_k ($\alpha_0 = 0$)

Set eval = 1, $\gamma = 0.5$, c = 0.5

While eval

If $f(\exp(j\angle(\overline{W}_{RF}^{(k)} + \alpha_k D_k))) \le f(\overline{W}_{RF}^{(k)}) + \alpha_k \gamma^{tr}(G_k^H D_k)$

(or $f(\exp(j\angle(\overline{W}_{RF}^{(k)} + \alpha_k D_k))) \ge f(\overline{W}_{RF}^{(k)}) + \alpha\gamma^{tr}(G_k^H D_k)$ to maximize)

break

else

$\alpha_k = c\alpha_k$, eval = eval + 1

end

end

If eval == 2

$\alpha_{k+1} = \alpha_k$

else

$\alpha_{k+1} = 2\alpha_k$

end

6: Update the position as $\overline{W}_{RF}^{(k-1)} = \exp(j\angle(\overline{W}_{RF}^{(k)} + \alpha_k D_k))$

7: k ← k + 1

8: until a stopping criterion triggers

Output: $\overline{W}_{RF}^{+} = \overline{W}_{RF}^{(k)}$

[184]

[185] 표 2는 일 실시예에 따른 알고리즘의 초기 시작점을 설정하는 방법을

나타낸다(GSO 기반 초기화 설정).

[186] [표 2]

[187]

Input $\tilde{H}_{eff}[d_{RF}], d = 0,\ldots,D+M-2$

1: Find the $d_{RF}^{*} = \text{argmax}_{d_{RF}=0,\ldots,D+M-2} \|\tilde{H}_{eff}[d_{RF}]\|_F^2$

2: $\tilde{U}[d_{RF}] = \tilde{H}_{eff}[d_{RF}] = 0,\ldots, D+M-2$

For $d_{RF} = 0,\ldots, D+M-2$, $d_{RF} \neq d_{RF}^{*}$

For $p = 0,\ldots,d_{RF}-1, p \neq d_{RF}^{*}$

3: $\tilde{U}[d_{RF}] = \tilde{U}[d_{RF}] - \tilde{U}[p](\tilde{U}[p]U[p])^{-1}\tilde{U}^{H}[p]H_{eff}[d_{RF}]$

$= \tilde{U}[d_{RF}] - \tilde{U}[p]\tilde{z}[p]\tilde{U}^{H}[p]H_{eff}[d_{RF}].$

end

4: $\tilde{Z}[d_{RF}] = (\tilde{U}^{H}[d_{RF}]U[d_{RF}])^{-1}$

end

For $d_{RF} = 0,\ldots, D+M-2$, $d_{RF} \neq d_{RF}^{*}$

4: $\tilde{U}[d_{RF}^{*}] = \tilde{U}[d_{RF}^{*}] - \tilde{U}[d_{RF}^{*}](\tilde{U}^{H}[d_{RF}]\tilde{U}[d_{RF}])^{-1}\tilde{U}[d_{RF}]\tilde{H}_{eff}[d_{RF}^{*}]$

$= \tilde{U}[d_{RF}^{*}] - \tilde{U}[d_{RF}^{*}]\tilde{Z}[d_{RF}]\tilde{U}^{H}[d_{RF}]\tilde{H}_{eff}[d_{RF}^{*}].$

end

5: $\tilde{U}[d_{RF}^{*}] = [u_1,\ldots, u_U]$

For $u = 1,\ldots,U$

6: $v_u = u_u$

For $q = 1,\ldots, u-1$

7: $v_u = v_u - \frac{v_q^H u_u}{v_q^H v_q} v_q = v_u - \frac{v_q^H u_u}{z_q} v_q$

end

8: $z_u = v_u^H v_u$

end

9: $V = [v_1,\ldots, v_U]$

9: $\bar{W}_{RF} = \arg(V)$

10: $W_{BB} = \{\bar{W}_{RF}^H(\sum_{d'=0}^{D+M-2}\tilde{H}_{eff}[d']\tilde{H}_{eff}^H[d']\bar{W}_{RF} + \frac{N_0}{P_t}I_{N_{RF}}\}^{-1}\bar{W}_{RF}^H\tilde{H}_{eff}[d^{*}]$

Output $\bar{W}_{RF}, W_{3B}$

[188] 도 3은 일 실시예에 따른 알고리즘의 초기 시작점을 설정하여 간섭을 제거하는 방법을 설명하기 위한 도면이다. 도 3에서, M은 앞에서 설명한 복소 원 다양체를 나타낸다.

[189]

[190] 아래에서는 시뮬레이션 결과를 설명한다.

[191] 표 3은 일 실시예에 따른 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다.

[192] [표 3]

[193]

Number of clusters	N_{cl} = 5
Number of rays in each cluster	N_{ray} = 10
AoD/AoA angular spread	10°
Symbol interval	$T_s = 2 \times 10^{-9}$
Path delay	Unif[0,DT_s]
Channel coherence time	T_C= 0.5 ms
Bandwidth	B = 1 GHz

[194] $U=N_{RF}=8, N_t=4, N_r=64, M=4$이다.

[195] 도 4는 일 실시예에 따른 GSO 초기화 효과를 나타내는 그래프이다.

[196] 도 4를 참조하면, 일 실시예에 따른 GSO 기반 초기값 설정은 임의 선택 대비 10회 정도 반복 횟수를 줄이는 효과가 있음을 확인할 수 있다.

[197] 도 5는 일 실시예에 따른 SC hybrid BF와 기존 기술과의 비교를 나타내는 그래프이다.

[198] 도 5를 참조하면, 앞에서 설명한 본 발명의 기술은 SC hybrid BF로 표현되고, 이를 기존 기술(OFDM hybrid 등)과 비교한 결과를 나타낸다.

[199] 실시예들에 따른 합계 전송률 또는 에너지 효율 목표에 따라 반복(iteration) 수를 조절하여 사용할 수 있으며, 합계 전송률이 낮은 조건에서 OFDM 대비 높은 에너지 효율을 얻는 것을 확인할 수 있다. 실시예들에 따른 기술은 무선 센서 네트워크 및 IoT 소형 장비와 같이 높은 에너지 효율을 필요로 할 때 유리하다.

[200]

[201] 기존 기술에서는 단일 레이어 위상 천이기로 아날로그 빔포밍을 구성한다. 이는 심볼 간 간섭(ISI)을 고려하지 않은 구조로 심볼 간 간섭(ISI)이 발생하지 않는 협대역 채널 및 OFDM 시스템에 적합하나, 심볼 간 간섭(ISI)이 발생하는 광대역 채널에는 심볼 간 간섭(ISI)을 제어하지 못해 성능 개선에 한계가 있다. 실시예들은 복수 레이어의 위상 천이기와 심볼 딜레이를 사용하여 아날로그 빔포밍에서 서로 다른 심볼 시간 사이의 신호를 합성할 수 있다.

[202] 또한, 기존 기술은 협대역 채널 모델에서 복소 원 다양체에서 정의되는 리만 기울기를 사용하여 최적의 빔포밍을 설계하였다. 실시예들은 이를 심볼 간 간섭(ISI)과 서로 다른 안테나 간 간섭을 동시에 고려하는 단일 반송파 광대역 채널 모델에서 리만 기울기를 사용하는 최적화 기법을 적용하고, 연산량 감축을 위한 목적 함수 재설정과 초기값 설정 방법을 포함할 수 있다.

[203] 실시예들은 5G 및 beyond 5G 이동통신 시스템의 핵심 기술인 밀리미터파(30 GHz-300 GHz) 및 서브테라헤르츠(0.1 THz- 1THz) 빔포밍 시스템에 적용할 수 있다. 밀리미터파 및 서브테라헤르츠 통신 기술은 학계뿐만 아니라 산업계에서도 많은 관심을 받고 있다.

[204] 5G 이동통신 시스템의 핵심 기술인 광대역 밀리미터파 통신은 구현 단계에서

많은 어려움이 발견되어 있으며, 현재 산업계에서는 밀리미터파 빔포밍 기술의 상용화를 위해 상당한 양의 연구 투자를 하고 있다. 또한, 5G를 넘어 beyond 5G 시스템 개발을 목표로 더 많은 양의 주파수 대역을 확보할 수 있는 서브테라헤르츠 통신 기술도 많은 관심을 받고 있다. 따라서 미래 이동통신 시스템에서는 초고주파 채널의 이용은 필연적이며 이에 따라 광대역 빔포밍 기술에 대한 수요가 늘어날 것이다.

[205] 미래 이동통신 시스템에서는 초고주파 채널을 사용하여 커버리지가 작아지는 만큼 고밀집 소형셀 네트워크를 구성하여 저전력 고효율 다중 안테나 시스템에 대한 기술 수요가 늘어날 것이다.

[206] 이상과 같이, 실시예들에 따르면 다중 사용자 하향링크 시스템의 전송률을 최대화하는 OFDM 기반 최적 하이브리드 빔포밍 설계를 통해 기존 기술 대비 전송률을 대폭 증대시킬 수 있다.

[207]

[208] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 컨트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPA(field programmable array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 컨트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른 처리 구성(processing configuration)도 가능하다.

[209] 소프트웨어는 컴퓨터 프로그램(computer program), 코드(code), 명령(instruction), 또는 이들 중 하나 이상의 조합을 포함할 수 있으며, 원하는 대로 동작하도록 처리 장치를 구성하거나 독립적으로 또는 결합적으로(collectively) 처리 장치를 명령할 수 있다. 소프트웨어 및/또는 데이터는, 처리 장치에 의하여 해석되거나 처리 장치에 명령 또는 데이터를 제공하기 위하여, 어떤 유형의 기계, 구성요소(component), 물리적 장치, 가상 장치(virtual equipment), 컴퓨터 저장 매체 또는 장치에 구체화(embody)될 수 있다. 소프트웨어는 네트워크로 연결된 컴퓨터 시스템 상에 분산되어서, 분산된

방법으로 저장되거나 실행될 수도 있다. 소프트웨어 및 데이터는 하나 이상의 컴퓨터 판독 가능 기록 매체에 저장될 수 있다.

[210] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다.

[211] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.

[212] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

[213]

청구범위

[청구항 1] 컴퓨터 장치로 구현되는 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 방법에 있어서,
복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출하는 단계; 및
검출된 상기 출력 신호를 기저 대역 디지털 빔포밍부를 이용하여 최종 출력 신호를 검출하는 단계
를 포함하는, 하이브리드 빔포밍 방법.

[청구항 2] 제1항에 있어서,
상기 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출하는 단계는,
간섭을 제거하기 위해 상기 아날로그 빔포밍부에서 시간 지연을 이용하여 수신 신호를 합성하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 방법.

[청구항 3] 제1항에 있어서,
상기 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출하는 단계는,
기지국에서 사용자로부터 수신한 신호에 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 컴바이너를 적용하여 출력 신호를 검출하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 방법.

[청구항 4] 제3항에 있어서,
상기 아날로그 컴바이너는,
복수 개의 레이어(layer)의 위상 천이기 네트워크로 이루어져 있으며,
각각의 상기 레이어에 심볼 딜레이를 장착하여 다른 심볼 시간에 수신한 신호들을 모아서 합성함에 따라, 광대역 채널에서 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)을 제거하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 방법.

[청구항 5] 제1항에 있어서,
상기 기저 대역 디지털 빔포밍부를 이용하여 최종 출력 신호를 검출하는 단계는,
기지국에서 검출된 상기 출력 신호에 단일 탭으로 이루어진 기저 대역 컴바이너를 적용하여 최종 출력 신호를 검출하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 방법.

[청구항 6] 제1항에 있어서,
상향링크의 합계 전송률을 최대화하도록 복소 원 다양체에서 켤레 기울기 방법을 사용하여 최적화된 빔포밍을 설계하는 단계
를 더 포함하는, 하이브리드 빔포밍 방법.

[청구항 7] 제6항에 있어서,
상기 최적화된 빔포밍을 설계하는 단계는,

위상 천이기를 사용하는 상기 아날로그 빔포밍부가 갖는 제약 조건을 반영하여 최적의 빔포밍을 설계하기 위해, 상기 제약 조건을 복소 원 다양체로 정의하고, 상기 복소 원 다양체에서 정의되는 켤레 기울기를 구하여 최적 해로의 이동 방향을 찾아 단계적으로 최적화하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 방법.

[청구항 8] 제7항에 있어서,
상기 최적화된 빔포밍을 설계하는 단계는,
상기 복소 원 다양체는 리만 기울기(Riemannian gradient)에서 정의되는 리만 다양체(Riemannian manifold)이고, 상향링크의 합계 전송률의 목적 함수의 켤레 기울기를 통해 line search 방법으로 최적화하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 방법.

[청구항 9] 광대역 시스템의 단일 반송파 기반 하이브리드 빔포밍 장치에 있어서,
복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출하는 제1 검출부; 및
검출된 상기 출력 신호를 기저 대역 디지털 빔포밍부를 이용하여 최종 출력 신호를 검출하는 제2 검출부
를 포함하는, 하이브리드 빔포밍 장치.

[청구항 10] 제9항에 있어서,
상기 제1 검출부는,
간섭을 제거하기 위해 상기 아날로그 빔포밍부에서 시간 지연을 이용하여 수신 신호를 합성하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 장치.

[청구항 11] 제9항에 있어서,
상기 제1 검출부는,
기지국에서 사용자로부터 수신한 신호에 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 컴바이너를 적용하여 출력 신호를 검출하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 장치.

[청구항 12] 제11항에 있어서,
상기 아날로그 컴바이너는,
복수 개의 레이어(layer)의 위상 천이기 네트워크로 이루어져 있으며,
각각의 상기 레이어에 심볼 딜레이를 장착하여 다른 심볼 시간에 수신한 신호들을 모아서 합성함에 따라, 광대역 채널에서 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI)을 제거하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 장치.

[청구항 13] 제9항에 있어서,
상기 제2 검출부는,
기지국에서 검출된 상기 출력 신호에 단일 탭으로 이루어진 기저 대역 컴바이너를 적용하여 최종 출력 신호를 검출하는 것

을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 장치.

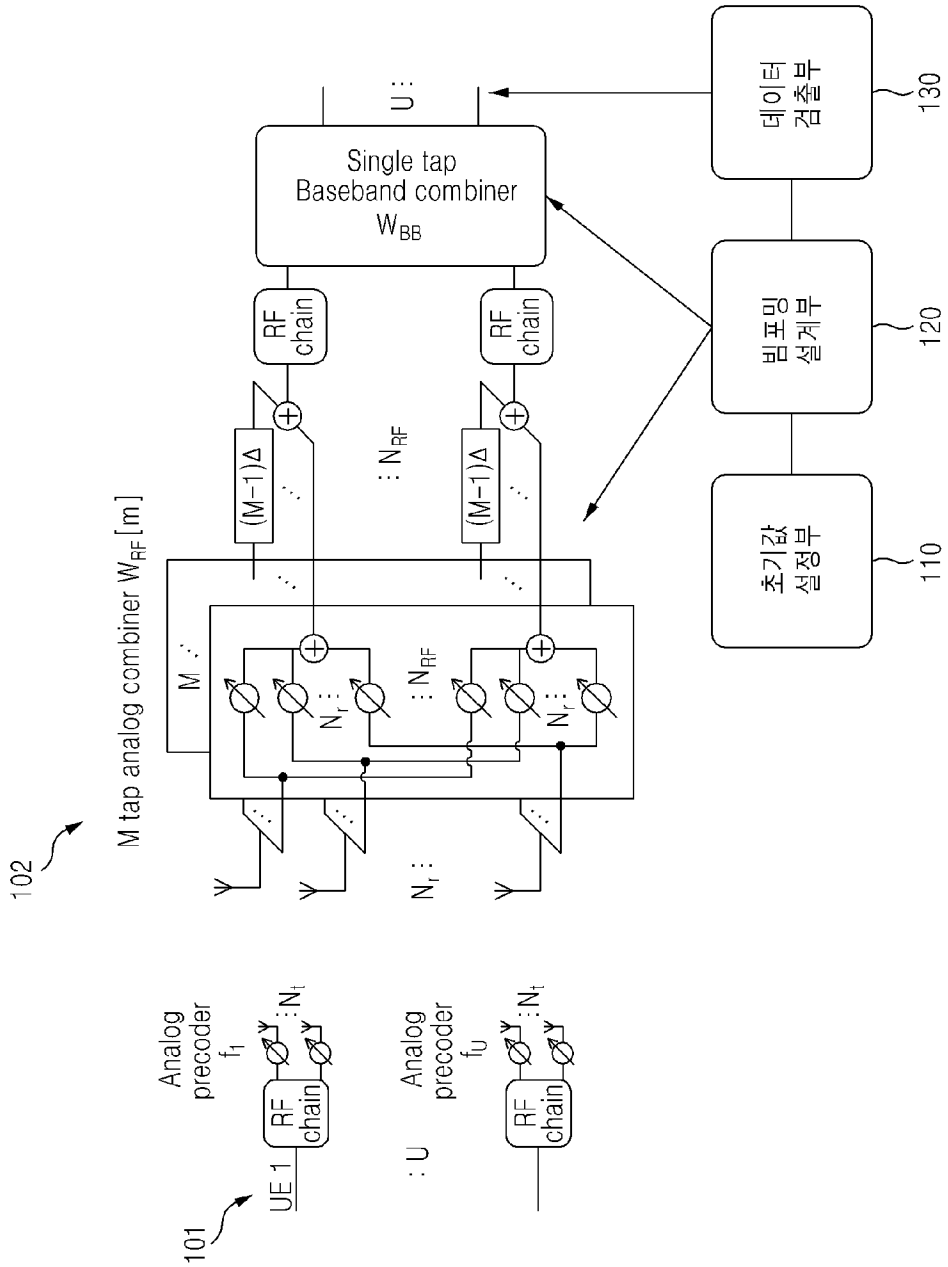
[청구항 14] 제9항에 있어서,
상향링크의 합계 전송률을 최대화하도록 복소 원 다양체에서 켤레 기울기 방법을 사용하여 최적화된 빔포밍을 설계하는 빔포밍 설계부를 더 포함하는, 하이브리드 빔포밍 장치.

[청구항 15] 제14항에 있어서,
상기 빔포밍 설계부는,
위상 천이기를 사용하는 상기 아날로그 빔포밍부가 갖는 제약 조건을 반영하여 최적의 빔포밍을 설계하기 위해, 상기 제약 조건을 복소 원 다양체로 정의하고, 상기 복소 원 다양체에서 정의되는 켤레 기울기를 구하여 최적 해로의 이동 방향을 찾아 단계적으로 최적화하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 장치.

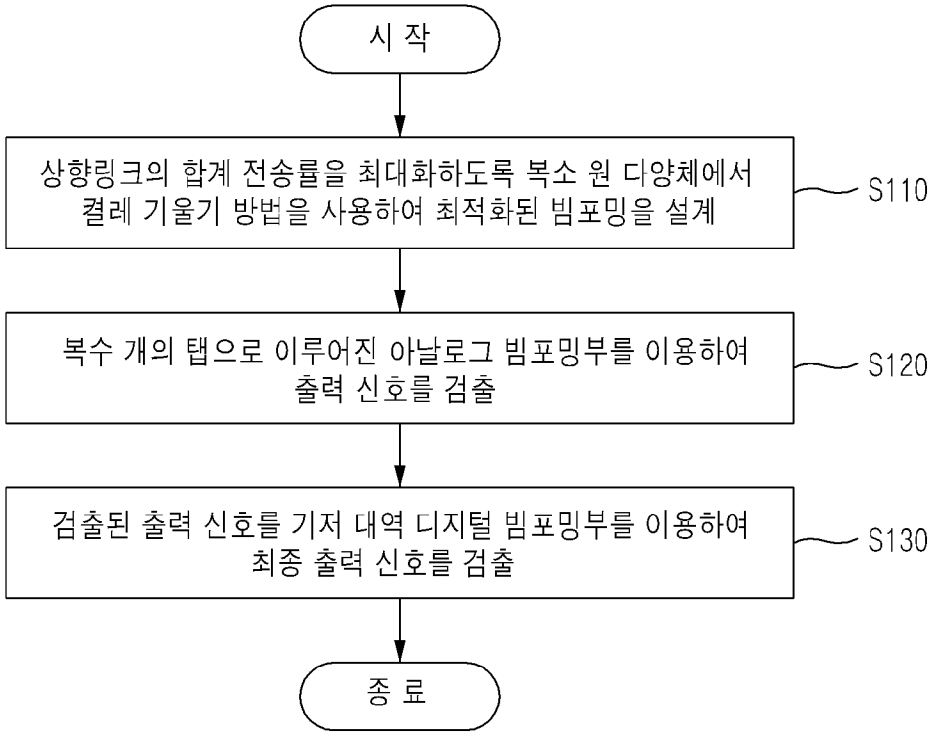
[청구항 16] 제15항에 있어서,
상기 복소 원 다양체는 리만 기울기(Riemannian gradient)에서 정의되는 리만 다양체(Riemannian manifold)이고, 상향링크의 합계 전송률의 목적 함수의 켤레 기울기를 통해 line search 방법으로 최적화하는 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 장치.

[청구항 17] 제9항에 있어서,
상기 제1 검출부는 복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 컴바이너로 구성되고, 상기 제2 검출부는 상기 아날로그 컴바이너와 결합되는 단일 탭으로 이루어진 기저 대역 컴바이너로 구성되어, 최종 출력 신호를 검출하는 데이터 검출부인 것
을 특징으로 하는, 하이브리드 빔포밍 장치.

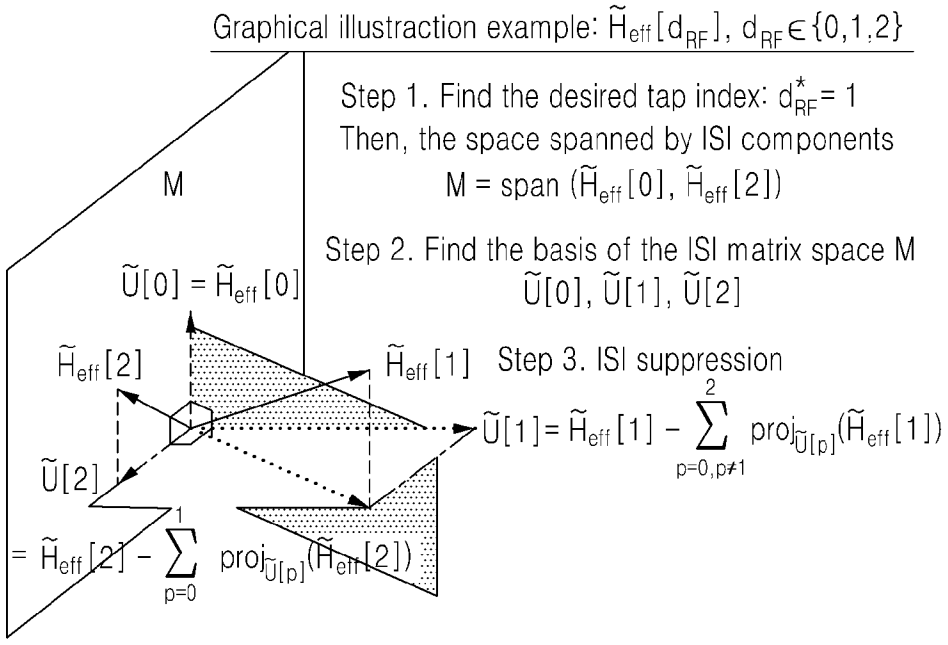
[도1]


데이터 검출부
130
빔포밍 설계부
120
초기값 설정부
110
Single tap Baseband combiner W_{BB}
U
RF chain
RF chain
N_{RF}
(M−1)Δ
(M−1)Δ
M tap analog combiner W_{RF}[m]
M
N_r
N_{RF}
N_r
N_r
102
Analog precoder f_1
N_t
RF chain
UE 1
101
U
Analog precoder f_U
N_t
RF chain

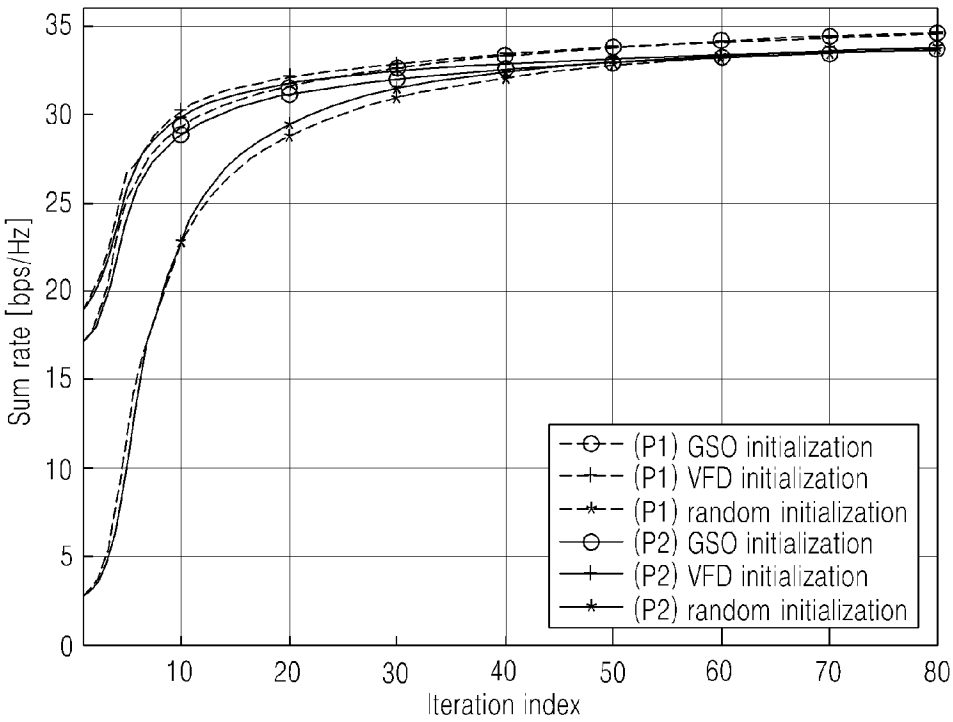
[도2]


시 작
상향링크의 합계 전송률을 최대화하도록 복소 원 다양체에서 켤레 기울기 방법을 사용하여 최적화된 빔포밍을 설계
S110
복수 개의 탭으로 이루어진 아날로그 빔포밍부를 이용하여 출력 신호를 검출
S120
검출된 출력 신호를 기저 대역 디지털 빔포밍부를 이용하여 최종 출력 신호를 검출
S130
종 료

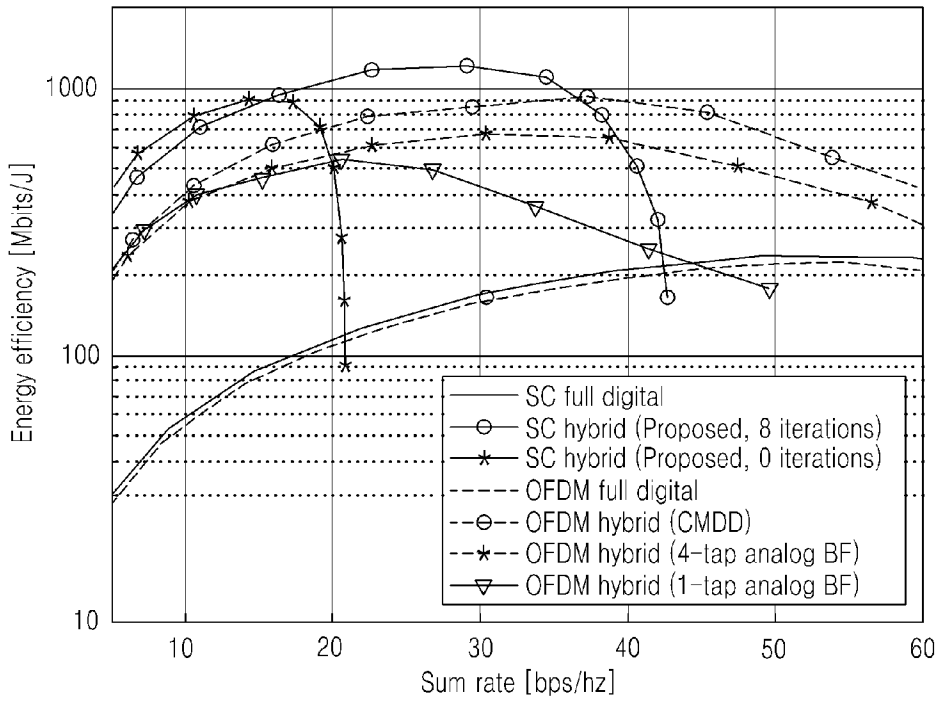
[도3]


Graphical illustraction example: $\tilde{H}_{eff}[d_{RF}]$, $d_{RF} \in \{0,1,2\}$
Step 1. Find the desired tap index: $d_{RF}^{\star} = 1$
Then, the space spanned by ISI components
$M = \text{span}(\tilde{H}_{eff}[0], \tilde{H}_{eff}[2])$
M
Step 2. Find the basis of the ISI matrix space M
$\tilde{U}[0], \tilde{U}[1], \tilde{U}[2]$
$\tilde{U}[0] = \tilde{H}_{eff}[0]$
$\tilde{H}_{eff}[2]$
$\tilde{H}_{eff}[1]$
Step 3. ISI suppression
$\tilde{U}[1] = \tilde{H}_{eff}[1] - \sum_{p=0,p\neq 1}^{2} \text{proj}_{\tilde{U}[p]}(\tilde{H}_{eff}[1])$
$\tilde{U}[2]$
$= \tilde{H}_{eff}[2] - \sum_{p=0}^{1} \text{proj}_{\tilde{U}[p]}(\tilde{H}_{eff}[2])$

[도4]


Sum rate [bps/Hz]
Iteration index
(P1) GSO initialization
(P1) VFD initialization
(P1) random initialization
(P2) GSO initialization
(P2) VFD initialization
(P2) random initialization

[도5]


Energy efficiency [Mbits/J]
Sum rate [bps/hz]
SC full digital
SC hybrid (Proposed, 8 iterations)
SC hybrid (Proposed, 0 iterations)
OFDM full digital
OFDM hybrid (CMDD)
OFDM hybrid (4-tap analog BF)
OFDM hybrid (1-tap analog BF)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/KR2021/018528

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H04B 7/06(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H04B 7/06(2006.01); H01Q 21/24(2006.01); H01Q 9/04(2006.01)

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Korean utility models and applications for utility models: IPC as above
Japanese utility models and applications for utility models: IPC as above

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

eKOMPASS (KIPO internal) & keywords: 안테나(antenna), 하이브리드(hybrid), 빔포밍(beamforming), 멀티 탭(multi tap), 간섭(interference)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	ALEXANDROPOULOS, George C. et al. Full Duplex Hybrid A/D Beamforming with Reduced Complexity Multi-Tap Analog Cancellation. 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). pp. 1-5, 26 May 2020. <DOI: 10.1109/SPAWC48557.2020.9154241>. See abstract, pages 1-3 and figure 1.	1-5,9-13,17
Y		6-8,14-16
Y	YUE, Xiu et al. Reconfigurable Intelligent Surfaces Aided mmWave NOMA: Joint Power Allocation, Phase Shifts, and Hybrid Beamforming Optimization. pp. 1-30, 18 October 2020. <https://arxiv.org/abs/2007.05873>. See pages 3-17.	6-8,14-16
A	ROBERTS, Ian P. et al. Equipping Millimeter-Wave Full-Duplex with Analog Self-Interference Cancellation. 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). pp. 1-6, 07 June 2020. <DOI: 10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145231>. See pages 1-6.	1-17

☑ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"D" document cited by the applicant in the international application
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
24 March 2022	**24 March 2022**

Name and mailing address of the ISA/KR	Authorized officer
Korean Intellectual Property Office **Government Complex-Daejeon Building 4, 189 Cheongsa-ro, Seo-gu, Daejeon 35208**	
Facsimile No. **+82-42-481-8578**	Telephone No.

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	TIAN, Lin et al. Hybrid Beamforming for Millimeter Wave Systems Using the MMSE Criterion. IEEE Transactions on Communications. Volume 67, Issue 5, pp. 1-15, 17 January 2019. <DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2893632>. See pages 1-15.	1-17
A	KR 10-2019-0089955 A (INTEL CORPORATION) 31 July 2019 (2019-07-31) See claims 1-4 and figure 2.	1-17

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/KR2021/018528

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
KR 10-2019-0089955 A	31 July 2019	CN 110447146 A	12 November 2019
		DE 112017006442 T5	19 September 2019
		EP 3560111 A2	30 October 2019
		JP 2020-507230 A	05 March 2020
		TW 201838352 A	16 October 2018
		US 2020-0091608 A1	19 March 2020
		WO 2018-119153 A2	28 June 2018
		WO 2018-119153 A3	14 March 2019

국 제 조 사 보 고 서

국제출원번호
PCT/KR2021/018528

A. 발명이 속하는 기술분류(국제특허분류(IPC))

H04B 7/06(2006.01)i

B. 조사된 분야

조사된 최소문헌(국제특허분류를 기재)

H04B 7/06(2006.01); H01Q 21/24(2006.01); H01Q 9/04(2006.01)

조사된 기술분야에 속하는 최소문헌 이외의 문헌

한국등록실용신안공보 및 한국공개실용신안공보: 조사된 최소문헌란에 기재된 IPC
일본등록실용신안공보 및 일본공개실용신안공보: 조사된 최소문헌란에 기재된 IPC

국제조사에 이용된 전산 데이터베이스(데이터베이스의 명칭 및 검색어(해당하는 경우))

eKOMPASS(특허청 내부 검색시스템) & 키워드: 안테나(antenna), 하이브리드(hybrid), 빔포밍(beamforming), 멀티 탭(multi tap), 간섭(interference)

C. 관련 문헌

카테고리*	인용문헌명 및 관련 구절(해당하는 경우)의 기재	관련 청구항
X	GEORGE C. ALEXANDROPOULOS 등. "Full Duplex Hybrid A/D Beamforming with Reduced Complexity Multi-Tap Analog Cancellation". 2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). 페이지 1-5. 2020.05.26 <DOI: 10.1109/SPAWC48557.2020.9154241> 요약, 페이지 1-3 및 도면 1	1-5,9-13,17
Y		6-8,14-16
Y	YUE XIU 등. "Reconfigurable Intelligent Surfaces Aided mmWave NOMA: Joint Power Allocation, Phase Shifts, and Hybrid Beamforming Optimization". 페이지 1-30. 2020.10.18 <https://arxiv.org/abs/2007.05873> 페이지 3-17	6-8,14-16
A	IAN P. ROBERTS 등. "Equipping Millimeter-Wave Full-Duplex with Analog Self-Interference Cancellation". 2020 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). 페이지 1-6. 2020.06.07 <DOI: 10.1109/ICCWorkshops49005.2020.9145231> 페이지 1-6	1-17

☑ 추가 문헌이 C(계속)에 기재되어 있습니다.

☑ 대응특허에 관한 별지를 참조하십시오.

* 인용된 문헌의 특별 카테고리:

"A" 특별히 관련이 없는 것으로 보이는 일반적인 기술수준을 정의한 문헌

"D" 본 국제출원에서 출원인이 인용한 문헌

"E" 국제출원일보다 빠른 출원일 또는 우선일을 가지나 국제출원일 이후에 공개된 선출원 또는 특허 문헌

"L" 우선권 주장에 의문을 제기하는 문헌 또는 다른 인용문헌의 공개일 또는 다른 특별한 이유(이유를 명시)를 밝히기 위하여 인용된 문헌

"O" 구두 개시, 사용, 전시 또는 기타 수단을 언급하고 있는 문헌

"P" 우선일 이후에 공개되었으나 국제출원일 이전에 공개된 문헌

"T" 국제출원일 또는 우선일 후에 공개된 문헌으로, 출원과 상충하지 않으며 발명의 기초가 되는 원리나 이론을 이해하기 위해 인용된 문헌

"X" 특별한 관련이 있는 문헌. 해당 문헌 하나만으로 청구된 발명의 신규성 또는 진보성이 없는 것으로 본다.

"Y" 특별한 관련이 있는 문헌. 해당 문헌이 하나 이상의 다른 문헌과 조합하는 경우로 그 조합이 당업자에게 자명한 경우 청구된 발명은 진보성이 없는 것으로 본다.

"&" 동일한 대응특허문헌에 속하는 문헌

국제조사의 실제 완료일	국제조사보고서 발송일
2022년03월24일(24.03.2022)	**2022년03월24일(24.03.2022)**

ISA/KR의 명칭 및 우편주소

대한민국 특허청
(35208) 대전광역시 서구 청사로 189, 4동 (둔산동, 정부대전청사)

팩스 번호 **+82-42-481-8578**

심사관

양정록

전화번호 **+82-42-481-5709**

국 제 조 사 보 고 서

국제출원번호
PCT/KR2021/018528

C. 관련 문헌

카테고리*	인용문헌명 및 관련 구절(해당하는 경우)의 기재	관련 청구항
A	TIAN LIN 등. "Hybrid Beamforming for Millimeter Wave Systems Using the MMSE Criterion". IEEE Transactions on Communications, Volume 67, Issue 5. 페이지 1-15. 2019.01.17 <DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2893632> 페이지 1-15	1-17
A	KR 10-2019-0089955 A (인텔 코포레이션) 2019.07.31 청구항 1-4 및 도면 2	1-17

국 제 조 사 보 고 서
대응특허에 관한 정보

국제출원번호
PCT/KR2021/018528

국제조사보고서에서 인용된 특허문헌	공개일	대응특허문헌	공개일
KR 10-2019-0089955 A	2019/07/31	CN 110447146 A	2019/11/12
		DE 112017006442 T5	2019/09/19
		EP 3560111 A2	2019/10/30
		JP 2020-507230 A	2020/03/05
		TW 201838352 A	2018/10/16
		US 2020-0091608 A1	2020/03/19
		WO 2018-119153 A2	2018/06/28
		WO 2018-119153 A3	2019/03/14