

다중송수신 안테나 기반 이동통신 시스템 하의 동기 이슈

I. 서론

통신시스템의 안정적인 동작과 성능측면에서 동기는 매우 중요한 이슈이나 상대적으로 많이 다루어지지 않은 이유로는 구현의 측면이나 해석의 측면에서 완벽하다는 전제를 통하여 우회하여 다루지 않았다고 할 수 있다. 동기가 시스템의 품질과 성능에 미치는 영향이 매우 크다는 점을 고려할 때 심층적으로 다루어 볼 필요가 있는 주제라 판단된다. 이에 따라 본 고에서는 다중 송수신 안테나 기반 이동통신 시스템의 co-located 와 cooperative 다중 송수신 안테나 환경 하에서의 초기 동기 절차 및 관련 특성을 논의하고자 한다. 첫 번째로 co-located non-coherent 다중송수신 환경 하에서의 초기 동기 절차에 대해 설명하고, 연관된 정보이론적 특징을 살펴보고자 한다. 그리고 이를 기반으로 한 초기 동기 시스템의 디자인 방안에 대해서 소개한다. 두 번째로 릴레이를 이용하는 협력 다중 송수신 환경 하에서의 초기 동기 시스템의 절차 및 문제점을 소개하고, 이를 극복하기 위한 디자인 방안에 대해서 살펴 보고자 한다. 현재 표준화 활동을 통해 기 구현된 시스템 및 2020년 상용화가 목표인 5G 시스템 동기 모듈 디자인을 위한 다양한 동기 방식 연구를 위해 본 고에 소개된 중요한 디자인 지침들이 활용 될 수 있을 것으로 기대한다.

다중 송수신 안테나 기반 이동통신 시스템의 가능성이 부각된 이후로, 다양한 기법의 다중송수신 방법이 고안되어 왔고, 이 기법들은 다양한 표준에 적용되어 왔다. 하지만 co-located 다중송수신 방식의 고려 시, 동기 획득 방식에 대한 내용을 보여주는 연구결과를 찾아보기 어려웠고, 특정 기법에 대한 내용들이 발표되어 왔다. 본론에서는 co-located 다중송수신 시스템 하의 전반적인 동기 획득에



원 승 환
University of
Southampton Malaysia
Campus

대한 고찰을 위하여, 4가지 대표적인 통신 시스템들의 초기 동기 타이밍 획득 방식에 대해 소개 후, 정보이론 관점 하의 co-located non-coherent (NC) 다중송수신 환경의 특징을 살펴보고, 이에 적합한 디자인 방안 에 대해 논하고자 한다^[1]. 이와 더불어 여기서 고려된 릴레이 기반 협력 통신 환경의 소개 후, 이에 상응하는 동기기법에 대한 내용을 살펴보고, 여기에 필요로 한 핵심 특징 및 적합한 디자인 방안 에 대해 논의하고자 한다^[2].

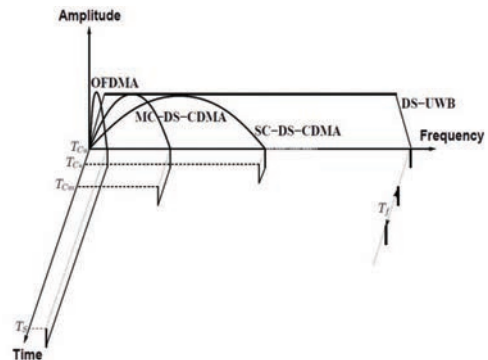
II. 본론

1. Co-located 다중 송수신 안테나 환경

1.1. NC 다중 송수신 안테나 시나리오를 위한 시스템 소개

본 고에서는 세 가지 종류의 직접확산 부호분할 시스템의 칩 타이밍 동기 획득 이슈, 즉, Single-Carrier (SC) Direct Sequence (DS) Code Division Multiple Access (CDMA), Multi-Carrier (MC) DS-CDMA, 그리고 DS-Ultra WideBand (DS-UWB)를 살펴 보고자 한다. 이와 더불어 NC 다중 송수신 환경 하의 시분할 Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA)의 프레임 타이밍 획득에 대해서도 논의 하고자 한다.

<그림 1>에서는 OFDMA, MC-DS-CDMA, SC-DS-CDMA 그리고 DS-UWB에 대한 특징을 시간 및 주파수 영역 신호파형의 power spectra를 가지고 설명하고 있다. 여기서 T_s 는 OFDMA의 OFDM 심볼 구간을 나타내고, T_{cm} , T_{cs} 그리고 T_{cu} 는 각각 MC-DS-CDMA, SC-DS-CDMA 그리고 DS-UWB의 칩 구간을 나타낸다. 또한, T_f 는 임펄스 반복 구간을 나타내며, 이는 DS-UWB 시스템의 연속되는 두 임펄스가 존재하는 간격이다. 또한 <그림 1>에서와 같이 심볼 또는 칩 간격은 할당된 주파수 대역에 반비례한다. 고려되는 4가지 중, MC-DS-CDMA는 각 반송파가 중첩되지 않은 3개의 1.25MHz 주파수 대역을 사용하는



<그림 1> 네 가지 대표적인 시스템 하에서의 주파수 및 시간 영역 신호의 전력 스펙트럼^[1]

CDMA-2000 3x와 같은 구조를 고려하였고, 각 부반송파는 충분히 넓은 주파수 대역의 할당으로 인해, 독립적인 채널 페이딩을 가정하였다. SC-DS-CDMA와 MC-DS-CDMA는 동일한 총 주파수 대역을 가지게 되고 DS-UWB에서는 아주 짧은 임펄스 구간을 가진 신호가 주기적으로 반복됨을 알 수 있다.

마지막으로, 각 시스템에 할당된 송신 전력은 OFDMA, SC-DS-CDMA 그리고 DS-UWB의 경우, M개의 송신 안테나에 균등하게 할당되고, 시간 영역에서 직접확산 된 MC-DS-CDMA의 경우는 M개의 송신 안테나와 U_m 개의 부 반송파에 균등하게 할당된다^[1,3].

1.2. NC 다중송수신 시스템 분석을 위한 직접확산 부호분할 및 시분할 OFDMA 시스템 시나리오

동기식 SC와 MC-DS-CDMA 시스템에서는 특정 셀에서 송신되는 PN 시퀀스의 타이밍 및 셀 ID의 획득을 위하여, 단말기에서 생성된 PN 시퀀스들과 수신된 시퀀스를 곱한 후, 일치 정도를 비교 함으로써, 수신 신호의 타이밍 오프셋 및 셀 ID를 동시에 획득하게 된다. 또한 DS-UWB의 경우도 동일한 방식의 사용이 가능하나, 앞의 두 시스템에 대비 극단적으로 넓은 반송 주파수 대역으로 인한 많은 수의 유효 다중경로들이 존재하고, 검색 영역이 전체 코드 시퀀스 위상 개수와 두 개의 연속 임펄스 반복 구간 내에 존재 할 수 있는 가능한 임펄스 위치 개수의 곱으로 증가하게 되어 좀 더 복잡한 방식이 필요로 하게 된다^[3].

반면에, 시분할 OFDMA 기반 IEEE 802.16e의 경우, 셀의 구분을 위하여 셀 구분용 동기 프리앰블을 사용하며 주파수와 시간 영역간의 상관관계를 활용하여 다양한 동기획득 방식의 구현이 가능하다. 일례로써, IEEE 802.16e의 동기획득은 다음의 순서로 구성될 수 있다. 즉, 1) 시간 축 상에서의 프레임동기 획득, 2) 시간 축 상에서의 반송파 주파수 오프셋 추정, 3) 주파수 축 상에서의 셀 ID 획득, 그리고 4) 주파수 축 상에서의 미세 반송파 주파수 오프셋 추정으로 구성할 수 있다. 특히, 하향링크 프레임 타이밍 획득을 위해서는 이 목적에 최적화 된 프리앰블을 사용하여 획득 가능하고, 단말기가 연결될 셀에 대한 정보는 요구되지 않는다. 주로 이 단계에서는 시간 축 상에서 프리앰블의 상관관계를 이용한 검출 방식이 가능하다. 또한 송수신기에 위치하는 크리스탈 발진기 간에 존재하는 반송 주파수 오프셋의 추정의 경우는 주파수 축이나 시간 축 상에서의 추정이 다 가능하며, 역시 상관관계 활용법이 가능하다. 셀 검색 혹은 셀 ID 획득 단계에서는 단말기의 최적 셀 커버리지를 획득하기 위하여 특정 셀 그룹 내의 각 셀의 ID 획득을 위하여 특별한 주파수축상의 프리앰블 시퀀스를 적용 할 수 있다^[1].

1.3. NC 다중송수신 시스템을 위한 정보이론적 분석

채널에 대한 정보가 수신기에 알려지면, 다중 송수신 시스템은 높은 채널용량을 획득할 수 있게 되는데 이를 COH MIMO로 표기하고자 한다. 반면에 수신기에서 알지 못하는 경우에 있어서는, NC MIMO로 표기하여 <표 1>에서 정리되어 있는 바와 같이 특징들을 설명하고자 한다, 여기서 M은 송신 안테나의 개수, N은 수신 안테나의 개수 그리고 T_{sym} 은 수신된 심볼의 개수로써, 이 구간 동안 시간 축 상에서의 수신신호 크기와 위상이 유지된다. 또한 c는 채널용량 이득을 d는 획득 가능한 다이버시티 이득, L은 유효 다중경로의 개수를 말한다. 마지막으로 K와 BW는 각각 $\min(M,N)$ 과 주파수 대역을 의미한다.

높은 Signal-to-Interference plus Noise Ratio (SINR)을 가지는 COH MIMO의 경우 (<표 1> 내의

(1)과 (2)의 경우), 채널의 용량은 안테나 간의 채널을 Independent Identically Distributed (i.i.d.) 레일리 페이딩으로 가정 시, $\min(M,N)$ 의 조건을 가지고 선형적으로 증가하게 된다. 하지만 주파수 선택적 페이딩 채널의 경우 채널 추정에 보다 많은 자원이 할당되어야 하므로 확보 가능한 채널용량과 채널 추정을 위한 시간/주파수 영역 자원간에 최적 포인트를 찾는 작업이 필요 하다. 따라서 최소한의 파워와 복잡도를 요구하는 무선센서용 기기의 경우는 NC MIMO 환경의 적극적인 활용이 더 유용할 수 있다.

이번에는 NC MIMO의 정보이론적 관점 하에서의 특징을 알아보하고자 한다. NC MIMO의 경우, 채널 정보의 활용이 배제되기 때문에, COH MIMO에 비해 항상 낮은 채널 용량을 가질 수 밖에 없다. [1]에 따르면 표 1의 (3)과 (4)의 경우, 높은 SINR을 가지는 경우에 조차, 송신 안테나의 개수가 $T_{sym}/2$ 보다 많으면 아무 효과가 없음이 소개되어 있다. 즉, NC MIMO 채널 용량은 M이 $T_{sym}/2$ 까지만 유효함을 알 수 있다. 따라서, 가장 효과적인 방식은 동기 획득 과정 동안에는 이용가능한 물리적 송신 안테나 중, 단지 M^* 개의 안테나만 활용해야 한다 ($M^* = \min(M,N, \lceil T_{sym}/2 \rceil$). 그리고 여러 송신안테나의 사용은 오직 높은 SINR 영역에서만 유효하다. 또한 총 할당 전력이 총 송신안테나 개수에 균등하게 할당되므로 낮은 SINR 영역에서는 잡음에 인한 심각한 신호 손상이 발생한다. 특히, T_{sym} 이 상대적으로 짧은 경우에는 적용되어야 할 송신 안테나 개수 M^* 는 수신안테나 개수 보다는 T_{sym} 에 좌우된다. 이에 대해 자세히 살펴보자.

낮은 SINR의 영역에서는 할당 주파수 대역이 무한대로 가정될 때 (<표 1>의 (5)), NC와 COH MIMO의 채널 용량이 거의 동일하게 수렴된다. 상호정보 이론 관점에서 보더라도, M개의 송신안테나에 총 할당 파워가 균등하게 할당되면, 이는 잡음에 의해 손상된 신호를 초래하여 M에 따라 채널 용량이 감소하는 함수를 보여 주게 된다. 따라서 낮은 SINR 영역에서는 최대 NC MIMO 채널 용량은 단일 송신안테나 채널용량과 동일하게 된다. 마지막으로 광대역 NC MIMO 상황에서는

〈표 1〉 M, N, T_{sym} 관점 하의 COH 및 NH-MIMO 채널용량 결정을 위한 핵심 파라미터 간의 상관 관계 및 특징^[1]

다중송수신 환경	핵심 파라미터간 관계	특징
(1) COH-MIMO (높은 SINR)	$M \geq N$	$c: \min(M, N)$ $d = M - N$
(2) COH-MIMO (높은 SINR)	$M < N$	$c: \min(M, N)$ $d = M - N$
(3) NC-MIMO (높은 SINR)	$T_{sym} \geq K + N$	$c: K(1 - K/T_{sym})$
(4) NC-MIMO (높은 SINR)	$T_{sym} < K + N$	$c: M*(1 - M*/T_{sym})$
(5) NC-MIMO (낮은 SINR)	T_{sym}, M, N	$c: N, T_{sym}=1$ $M=1$
(6) 광대역 NC-MIMO	T_{sym}, M, N, BW, L	$c: N \text{ and } M,$ $T_{sym} \gg 1 \text{ } BW \propto L$

(〈표 1〉의 (6)), 직접확산 부호분할 다중접속시스템에서는 할당된 송신 전력이 많은 칩들에 균등하게 할당되어 낮은 칩 SINR에서 동작하게 된다. 따라서, 이 경우, 광대역과 낮은 SINR은 치환되어 사용이 가능하다. 또한 백색잡음과 같은 신호를 사용 할 경우, 상호정보는 총 주파수 대역과 유효한 다중경로 개수에 반비례하게 되는데 이는 총 할당 전력이 넓은 주파수 대역과 많은 수의 다중경로로 흩어지게 되기 때문이다. 다중 송수신 안테나의 사용은 채널 용량을 증가하는 특징 한계까지만 증가하게 되고, NC MIMO의 채널용량은 T_{sym} 이 M보다 충분히 큰 경우에, COH MIMO의 용량으로 근접할 수 있다. 좀 더 자세히 말하자면, 입력 신호가 가우시언 분포를 가지는 경우, T_{sym} 은 $(M^2/(N+M)^2)$ ($1/SINR^2$) 보다 더 길어야 한다. 또한 할당된 총 송신 전력은 전체 주파수 대역과 유효한 다중경로 개수에 비례하여 결정되어야 한다^[1].

1.4. 다양한 NC 다중송수신 시스템 하 동기모듈에 필요로 한 핵심요소들의 상관 관계 및 디자인 지침

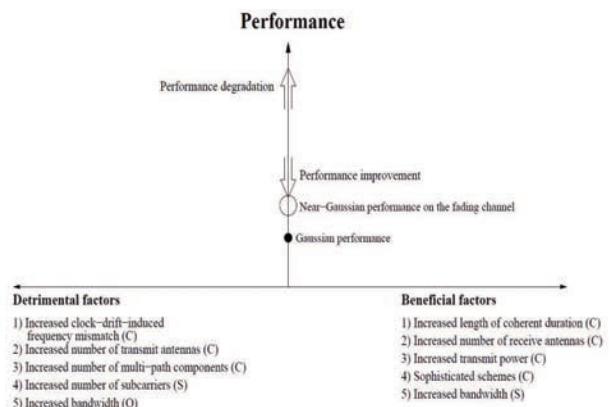
NC MIMO 환경하의 정보이론 관점들과 초기 동기 모듈 정을 고려 시에, NC MIMO 환경 하의 초기 동기 모듈 디자인에 대한 핵심 사항은 〈그림 2〉의 상관관계를 가

지고 설명이 가능하다. 여기서 ‘S’는 직접확산 부호분할 시스템 계열에만 적용되는 경우, ‘O’는 OFDMA에만 그리고 ‘C’는 양 시스템 모두에 적용되는 경우를 나타낸다. 〈그림 2〉의 성능 저하를 일으키는 5가지 요소들을 살펴보면 다음과 같다.

- 1) 초기 주파수 오프셋의 증가는 빠른 클럭 타이밍의 이동을 야기하고 이는 시간 축 상의 코히어런트 누적구간 감소로 이어진다. 따라서, 수신 신호의 코히어런트 구간에 누적할 수 있는 에너지의 양이 줄어들게 되어 궁극적으로 검출 확률을 감소시킨다 (C).
- 2) 송신 안테나의 개수 증가는 안테나 당 할당된 송신 전력을 감소시키므로 증가된 송신 다이버시티는 성능 향상을 이끌지 못한다 (C).
- 3) 유효 다중 경로의 증가는 경로 당 할당된 송신 전력의 감소를 이끌며, 이는 성능열화로 이어진다 (C).
- 4) 부 반송파의 증가 역시 반송파 당 할당된 송신 전력의 감소로 인한 성능열화를 일으킨다 (S).
- 5) 과도한 주파수 대역의 사용은 총 할당 전력의 과도한 확산을 야기하여 성능열화를 일으킨다 (O).

반면에 성능향상을 위한 5가지 요소들을 보면 다음과 같다.

- 1) 증가된 코히어런트 구간 동안 신호의 에너지를 누



〈그림 2〉 Co-located NC MIMO 환경 하에서 최적의 성능을 이끌어 내기 위한 요소들의 상관 관계^[1]

적할 수 있으면, 보다 나은 검출 확률의 확보가 가능하다 (C).

- 2) 수신 안테나 개수 증가 역시, 향상된 검출 확률을 이끌어 낸다 (C).
- 3) 송신 신호 전력의 증가 역시 검출확률을 증가시키는 데, 보다 짧은 시간 구간에 최대한 많은 전력을 할당하는 것이 보다 나은 성능을 이끌 수 있다 (C).
- 4) 보다 나은 기법들의 사용으로 성능향상이 가능하며, 일례로써, 차등검파 방식의 적용을 생각해 볼 수 있다 (C).
- 5) 사용 주파수 대역폭의 증가 시, 이는 채널의 코히어런트 구간을 증가 시킬 수 있다. 이 경우, 늘어난 만큼 더 신호의 코히어런트 누적이 가능하다 (S).

따라서, 위에서 소개된 요소들의 적절한 조합을 통하여 최대한 검출성능을 향상시켜야 하고, [1]과 위에서 논의된 내용을 기반으로 하여 다음과 같이 NC MIMO 환경 하의 디자인 지침이 정리 될 수 있다.

2. 다중 송수신 릴레이 기반 협력통신 환경

릴레이 기반 협력 통신 이전의 환경에서는 기지국에 의해 전송되는 송신 전력의 제약으로 셀 경계에 위치한 단말기의 경우, 충분한 수신 전력을 확보하기가 힘들었다. 하지만 릴레이의 도움으로 셀 경계에서의 수신 성능이 명확하게 향상이 될 수 있고 또한 셀 영역 확장도 이끌어 낼 수 있다. 따라서 여기서는 첫째, 릴레이 기반 협력통신 환경 소개 및, 둘째, 이러한 환경 하의 가능한 초기 동기 시나리오, 그리고 마지막으로 협력 통신 시스템 동기모듈을 위한 핵심 요소들 간의 상관 관계 및 디자인 지침을 논의할 것이다.

2.1. 릴레이 기반 협력통신

낮은 복잡도의 릴레이 기반 협력 통신 시스템에서 단말기는 신호를 직접 수신하거나 릴레이를 거쳐서 신호를 수신할 수 있다. 이 두 하향링크 신호는 서로 완전히 다른 경로를 거쳐서 수신되기 때문에 협력 통신 전송기법은 음영 페이딩으로 인한 성능저하 효과를 줄이

는데 도움을 준다. 더욱이 릴레이를 사용함으로써, 협력통신은 셀 영역을 확장시킬 수 있으므로, 필요로 한 기지국의 수를 줄일 수 있다. 본 고에서는 신뢰성으로 인한 문제를 피하기 위하여 고정 릴레이의 경우만을 고려하고 주 기지국과 릴레이들 간에 Line-Of-Sight (LOS)를 가정한다.

초기 동기 문제를 논하기 전에 여기서 고려하고자 하는 두 가지 방식의 릴레이 기반 협력통신 방식에 대해서 소개하고자 한다. 이 두 가지는 A) Amplify-and-Forward (AF) 와 B) Decode-and-Forward (DF)고 <그림 3>에서 자세한 구성을 보여주고 있다. AF 기반 릴레이 방식에서 존재 가능한 가장 간단한 방식은 <그림 3A>의 (1)로 표시된 방식으로 릴레이가 단순히 수신 신호를 증폭시켜서 재전송하는 방식이다. 이 경우 잡음 성분도 같이 증폭되어 전송되게 된다 (AF 기반 릴레이 형식1으로 표기된다.). 또한 <그림 3A>의 (2)가 추가되면, 간단한 복조기능이 추가되는 것으로써, 복조 및 변조기능 블록이 추가되게 된다. 이 경우, 복조 블록 내에 타이밍 및 주파수 오프셋 추정 기능도 포함될 수 있다. 더욱이, (3)의 기능이 추가되면, 협력통신 기반 시공간 코딩 기법이 주 기지국과 릴레이들에 적용된다. 따라서 이 방식을 AF 기반 릴레이 형식2로 표기하고자 한다.

반면에 DF 기반 릴레이 방식에서는 릴레이가 수신된 신호를 복호화하여 처리하고, 다시 부호화하여 목적 노드까지 전송하므로, AF 기반 방식에서 발생하는 잡음 증폭 현상을 방지할 수 있다. DF 기반 릴레이 방식도 크게 두 가지 형식으로 구분 가능하며, DF 기반 릴레이 형식1은 <그림 3B>의 (1)로 표기되며, AF 기반 대비 복잡도가 증가하게 된다. 또한 DF 기반 릴레이 형식2의 경우 릴레이의 기능을 더욱 증가시키기 위하여, (2)로 표시된 보다 복잡한 사용자 데이터 처리 기능이 추가 될 수 있다. 따라서 지금까지 소개된 4가지 방식과 더불어 AF 및 DF 기반 릴레이 방식이 함께 적용되는 하이브리드 방식도 고려가능 하다^[2,4].

더욱이 AF 기반 다중송수신 전송 방식이 고려되면, AF 기반 릴레이 형식 1은 처리 지연이 크지 않기 때문

에, 기존의 순환전치(Cyclic Prefix: CP)보다 긴 CP를 사용하면 시간 축상 심볼간의 간섭이 발행하지 않는다. 반면에 AF 기반 릴레이 형식 2 또는 DF 기반 릴레이를 고려한다면, 브로드캐스트 단계와 협력전송 단계를 적용해야 한다. 좀 더 자세히 말하면, 브로드캐스트 단계에서는 릴레이와 단말기 모두 주 기지국으로부터의 하향링크 신호를 수신하여 복조 및 복호화를 수행한다. 그 후, 협력 전송 단계에서는 릴레이는 목적하는 단말기에 재생된 신호를 전송 할 수 있다. 동시에 해당 단말기와의 동기를 유지하기 위하여 기지국은 여전히 해당 단말기에 하향링크 신호를 전송할 수도 있다. 하지만 이 두 단계 전송방식은 전송구간이 절반으로 줄게 되는 단점이 존재하게 된다.

〈그림 4〉는 세 가지 릴레이 기반 협력통신 시나리오를 설명하고 있다. 여기서 릴레이는 고정되어 있으며, 〈그림 4(A)〉는 두 개의 독립적인 릴레이를 통한 2홉(hop) 하향링크 신호와 주 기지국으로부터 직접 송신되는 신호를 보여주고 있다. 반면에 〈그림 4(B)〉는 단지 여러 개의 독립적인 릴레이를 통한 2홉 하향링크 신호 송신을 보여주고 있다. 이 경우, 기지국으로부터 직접 송신되는 신호는 신호세기가 너무 작아서 단말기에서 적절하게 수신할 수 없는 경우이다. 더욱이 〈그림 4(C)〉의 경우는 3홉 시나리오를 보여주고 있으며, 이는 N홉 구성으로 바로 확장가능 하다. 한 셀 내에 여러 릴레이가 설치되는 경우, 〈그림 4〉 내의 [1]부터 [6]은 위에서 고려되는 시나리오에서 적용되는 모든 구성요소들을 지시하고 있다. 좀 더 자세히 살펴보면, [1]은 셀 내 여러 릴레이들과 연관된 주 기지국을 나타내고, [2]는 고정 릴레이들을 의미한다. 또한 [3]은 세 가지 시나리오들 중 하나와 연관된 단말기를 의미하고, [4]는 주 기지국으로부터 단말기까지 직접 송신되는 신호를 의미한다. [5]는 릴레이들로부터 주 기지국 또는 연관된 릴레이들로 송신되는 신호를 의미하고 마지막으로 [6]은 릴레이들로부터 해당 단말기로 직접 송신되는 신호를 설명하고 있다. 여기서 주 기지국과 릴레이들은 단 하나만의 송신 안테나를 가지고 있고, 주 기지국은 요구되는 모든 기능을 지원할 수 있다고 가정하였다.

릴레이의 경우에도 직접확산 부호분할 시스템과 OFDMA에 따라 이에 합당한 AF 기반, DF 기반 또는 파일럿 (혹은 프리앰블) 전송을 가정하였다. 더욱이 설치된 릴레이들은 주 기지국과 동일한 반송 주파수를 사용하는 경우로 한정하였고 (in-band 릴레이), 〈그림 4〉는 이런 조건 하에서 셀 영역 확장이 고정 릴레이들에 의해 가능함을 보여주고 있다^[2,5].

2.2. 릴레이 기반 협력통신 환경 하의 직접확산 부호분할 및 시분할 OFDMA 시스템의 초기 동기 시나리오

여기서는 협력 통신 환경 하의 다중송수신 조건을 고려한 초기동기 시나리오를 설명하고자 한다. Co-located 다중송수신 환경 하에서, 반송 주파수 오프셋(Carrier Frequency Offset: CFO)은 송신기와 수신기 사이의 잔류 주파수 오프셋 차로써 정의된다. 이 CFO는 수신된 신호 전력량을 감소시키는 효과가 있다. 그러므로 CFO로 인한 성능저하는 감소된 SINR로 분석이 가능하다. 직접확산 부호분할 시스템에서 파일럿 채널을 사용하는 경우에 CFO는 이 파일럿 신호의 도움으로 쉽게 극복이 가능하다. 하지만 co-located 다중송수신 안테나 OFDMA기반 전송의 경우, CFO에 기인한 심한 성능저하를 경험할 수 있다. 이는 부 반송파의 직교성이 깨져서 반송파간 간섭과 다중 사용자 간섭이 초래된다. 이에 더하여, 협력통신 환경 하에서는 공간적으로 떨어져 있는 송신기로부터 송신된 신호에 발생하는 클럭 변화, 크리스털 발진기의 부정확성, 그리고 도플러 위상변화를 경험하게 된다. 또한, 협력통신 기반 비동기식 송신기들의 신호는 각각이 서로 다른 전송 지연과 CFO를 가지고 수신기에 도착하게 된다. 따라서 이러한 다중 CFO 상쇄 문제는 추가적인 다중 송신기간의 간섭 (co-located 환경에서는 다중 사용자 간섭으로도 불리운다.) 과 연관된다. 또한 도플러 위상변화도 다중 CFO로 인한 성능저하를 더 악화시키며, 궁극적으로 수신된 SINR의 값을 더욱 저하시킨다.

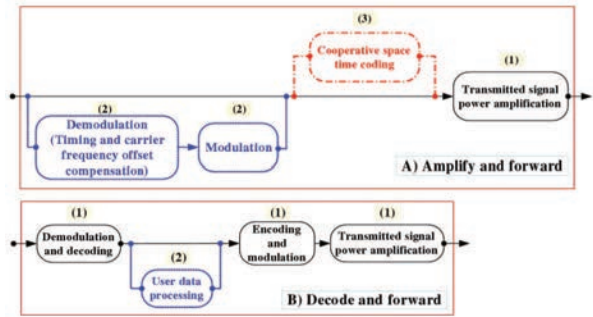
더욱이 릴레이를 사용하는 시분할OFDMA 시스템의 경우, 단말기는 여러 릴레이들이 서로 다른 CFO를 가

〈표 2〉 Co-located NC MIMO 환경 하의 동기 모듈 디자인 지침^[1]

(1) 다중 송신 안테나에 할당된 송신 전력을 균등하게 할당하는 것은 항상 부정적인 효과를 이끈다. 특히, 다중경로 환경 하에서 감소된 안테나 및 경로 당 할당 전력 때문에 송신 다이버시티 이득 획득에 일반적으로 실패한다. 따라서 초기 동기 성능 최적화를 위하여 단지 하나의 송신 안테나만이 사용되는 것이 권고된다. 또한 시간/주파수 스위치 전송 다이버시티를 적용한 초기동기용 프리앰블이 보다 나은 성능을 이룰 수 있다.
(2) 추가 송신 전력이 할당된 파일럿 또는 프리앰블의 사용은 성능향상을 이끈다. 따라서 데이터 신호 대비 최소 몇 dB이상 크게 할당하여야 한다. 특히, 시간 분할 방식의 시스템의 경우, 초기 동기용 파일럿 또는 프리앰블이 각 프레임에 하나씩 존재하므로 송신 구간 동안에는 최대 허용 가능한 송신전력의 할당이 필요로 하다.
(3) 초기 동기과정 동안, 존재하는 초기 주파수 오프셋이 큰 경우, 상대적으로 짧은 구간 동안의 신호누적만이 가능하여 성능에 제약이 오게 된다. 따라서, 이 경우 보다 좋은 성능의 수정 발진기를 사용하면 이를 완화시킬 수 있다.
(4) 복수 개의 수신 안테나를 사용하게 되면, 수신 다이버시티 이득을 증가시킬 수 있고, 다중 송신 안테나로 인한, 낮은 경로당 전력 할당에 의한 성능 저하를 어느 정도 극복 가능하다.
(5) SC-DS-CDMA와 같은 시스템의 경우, 주파수 대역의 증가는 시간(경로) 다이버시티 이득 향상을 일으키는 독립적인 페이딩을 겪는 다중경로 요소들의 개수를 증가시킨다. 따라서 누적되는 칩의 개수를 증가시켜서 혜택을 얻을 수 있다. 하지만 증가되는 주파수 대역과 동시에 증가하는 유효 다중경로 개수간의 균형이 필요로 하다.

지고 신호전송 하는 것을 경험하게 되며, 단말기는 여러 개의 CFO추측기 또는 협력통신에 최적화 된 CFO추측기를 사용할 수 있다. 이러한 다중 CFO의 상쇄는 획득된 동기 정보의 안정적인 유지를 위해서 필요로 하다. 동시에 서로 다른 타이밍 오프셋을 가지는 신호들은 서로 다른 전송경로 지연과 부정확한 전송 타이밍으로 인해 발생하는데 이러한 다중 타이밍 오프셋의 존재는 심볼간 간섭 및 더욱 열화된 SINR 손실을 일으킨다. 따라서 시간 및 주파수 영역에서 야기되는 오프셋으로 인한 성능손실은 협력통신 하의 전송에서 획득할 수 있는 다이버시티 이득을 상당히 감소시킨다.

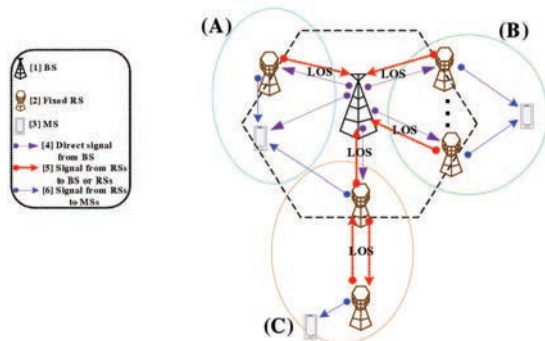
이번에는 초기 동기획득을 위한 두 시스템의 환경을 살펴보자. 동기식 직접확산 부호분할 시스템에서 한 셀 내의 주 기지국과 릴레이들은 동일한 코드위상 오프셋을 가지는 PN 시퀀스를 사용한다. 하지만 다른 월시(Walsh) 코드가 각각에 할당되어서, 두개의 XOR 연산 결과가 사용되게 된다. 그러므로 타이밍 동기는 시간 영역에서 일반적인 상관관계 분석 기법을 사용하여 획득



〈그림 3〉 릴레이 기반의 대표적인 협력 송신 방식:
A) amplify-and-forward; B) decode-and-forward^[2,4]

득할 수 있다^[2]. 반면에 시분할 OFDMA 시스템에서는 서로 다른 동기 프리앰블이 각 셀 내의 주 기지국과 릴레이들에 할당 될 수 있고 이는 릴레이들이 독립적인 셀이나 섹터로 고려될 수 있음을 나타낸다^[2]. 이 조건 하에서 단말기는 수신 프리앰블들의 상관관계를 분석하여 기지국과 릴레이들에서 온 신호의 프레임 타이밍을 획득 할 수 있다. 이 단계에서는 단지 유효한 수신신호들의 타이밍만 검출된 것이며, 최종적인 셀 ID는 획득하지 못한 상태이다. 따라서 이 경우는 뒤따르는 주파수 영역의 각 셀을 위한 프리앰블 자원을 활용하여 결정할 수 있다. 지금까지 언급된 두 시스템을 사용하여 〈그림 4〉에서 소개된 세 가지 초기동기 획득 시나리오에 대해서 〈표 3〉과 같이 정리할 수 있다.

위에서 언급된 협력 통신 시스템의 성능분석, 중요 요소들의 상관 관계 및 디자인 지침을 소개하기 전에, 초기 동기과정 이후의 절차에 대해서 소개하고자 한다. 직접확산 부호분할 시스템에서 수신신호의 타이밍이 획득되면, 초기 동기 시기에 존재하는 넓은 타이밍 검색 영역이 획득된 타이밍 시점 기준으로부터 근방의 영역으로 줄어들게 된다 (검색영역 감소). 따라서 줄어든 검색영역 내의 유효한 다중경로들의 타이밍이 추가적인 검색과정을 거쳐서 획득될 수 있고, 이 다중경로 정보를 다양하게 활용할 수 있다. 일례로써, 수신 신호크기를 증대시키기 위한 다중경로 신호 누적 활용이 가능하다. 시분할 OFDMA의 경우, 초기 검색된 경로의 타이밍을 기반으로 다중경로 타이밍 정보를 획득하여, 이 다중경로 중 첫 번째 도착한 경로의 타이밍을 최종적으



〈그림 4〉 세 가지 방식의 릴레이 기반 NC MIMO 송신 환경, (A) 직접 및 two-hop 송신 방식, (B) two-hop 기반 병렬송신 방식, 그리고 (C) 다중 hop 송신 방식, 여기서 LOS는 릴레이들과 주 기지국 간의 LOS를 의미한다^[2]

로 추출할 수 있고, 이를 기반으로 최적의 이산 푸리에 변환 윈도우 시작점을 찾는 데 활용할 수 있다. 이는 다중 타이밍 오프셋이 발생하는 협력신호 환경에서 해당 윈도우를 위치할 최적의 위치를 찾는 것이다. 이와 같은 검색과정은 주기적으로 운용되어야 하고, 채널의 변화를 추적하는데 문제가 없어야 한다.

〈표 3〉 그림 4의 A, B, C 시나리오 하의 세 가지 동기화 획득 시나리오^[2,5]

(1) 직접 통신 및 다중 홉 릴레이 기반 통신환경 (〈그림 4(A)〉의 일반화된 경우)

주 기지국과 릴레이들 사이에는 LOS 경로로 가정하고, 따라서 기지국과 릴레이들은 서로간의 타이밍 정보를 손쉽게 획득할 수 있다. 또한 릴레이는 주 기지국 또는 다른 릴레이들과 타이밍을 맞추어 자체 파일럿 (또는 프리앰블)을 송신한다. 시분할 OFDMA 시스템에서 DF 기반 릴레이 전송 경우, IEEE 802.16j 규격을 따를 수 있다. 이 규격 하에서, 프레임은 하향 및 상향링크 쌍으로 구성되어 있고, 특히 하향링크는 액세스 영역과 여러 릴레이 영역으로 구성된다. 이와 같은 구성에서 단말기는 기지국으로부터 낮은 신호크기의 하향링크 프리앰블을 수신할 수도 있으나, 릴레이로부터 송신된 프리앰블이 더욱 큰 신뢰성을 보여준다. 따라서 이 신호를 가지고 동기화가 이루어 질 수 있다. 기지국과 릴레이의 프레임은 동기 전용 프리앰블이 처음에 위치하고 이 후에 제어정보들이 위치하게 된다. 기지국과 모든 릴레이들은 동시에 자신들의 프리앰블을 송신한다. 그 후, 단말기는 기지국과 타이밍 동기가 맞은 릴레이들과 동기화를 수행하게 된다.

(2) 2홉 다중릴레이 환경 (〈그림 4(B)〉의 경우)

주 기지국으로부터 직접 수신하는 링크가 없는 경우로써, 단지 2홉 기반 시공간 협력 전송을 가정한다. 나머지 요소들은 (1)의 시나리오와 동일하다.

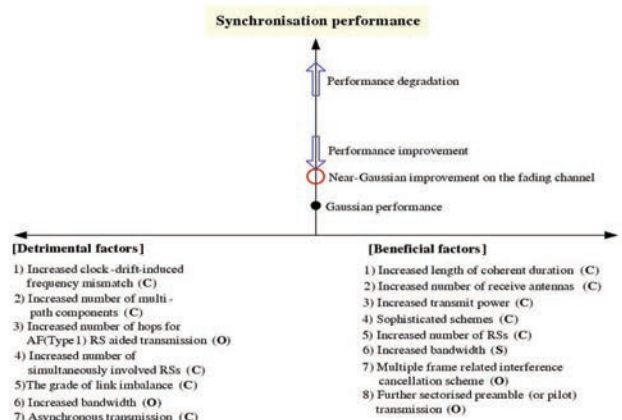
(3) 다중 홉 릴레이 환경 (〈그림 4(C)〉의 경우)

직접확산 부호분할 시스템에서는 이는 단지 〈그림 4(B)〉의 확장형이다. 하지만 시분할 OFDMA 시스템에서는 〈그림 4(A)〉에서 직접통신을 제외한 것과 유사하게 설명할 수 있다.

2.3. 다양한 NC 다중 송수신 협력 통신 시스템 동기 모듈에 필요로 한 핵심요소들의 상관 관계 및 디자인 지침

NC MIMO 환경하의 정보이론 관점들과 협력통신 초기 동기과정을 고려 시에, 초기 동기 모듈 디자인에 대한 핵심 사항은 〈그림 5〉의 상관관계를 가지고 설명이 가능하다. 여기서 ‘S’는 직접확산 부호분할 시스템 계열에만 적용되는 경우, ‘O’는 OFDMA에만 그리고 ‘C’는 양 시스템 모두에 적용되는 경우를 나타낸다. 〈그림 5〉에서 설명된 바와 같이 협력통신 하의 동기 성능을 저하시키는 7가지 요소들을 다음과 같다.

- 1) 초기 주파수 오프셋의 증가는 빠른 클럭 타이밍의 이동을 야기하고 이는 시간 축 상의 코히어런트 구간 감소로 이어진다. 따라서, 수신 신호의 코히어런트 구간에 누적할 수 있는 에너지의 양이 줄어들게 되어 궁극적으로 검출 확률을 감소시킨다 (C).
- 2) 유효 다중 경로의 증가는 경로 당 할당 송신 전력의 감소를 이끌며, 이는 성능열화로 이어진다 (C).
- 3) AF 릴레이 형식1 하의 홉 개수를 증가시키면 이에 상응하여 CP의 길이가 길어져야 한다. 이는 데이터 송신을 위한 자원을 감소시킨다 (O).
- 4) 동시 전송에 연관된 릴레이 개수의 증가는 다중 릴레이로 인한 간섭을 증가시킨다 (C).
- 5) 다중 링크간 신호 전력의 차이는 보다 긴 지연을 이끈다 (C).



〈그림 5〉 릴레이 기반 협력 다중 송수신 환경 하에서 최적의 성능을 이끌어 내기 위한 요소들의 상관 관계^[2]

- 6) 과도한 주파수 대역의 사용은 총 할당 전력의 과도한 확산을 야기하여 성능열화를 일으킨다 (O).
- 7) 기지국과 연관된 릴레이들의 비동기 전송은 단말기에서 다중 타이밍 및 주파수 오프셋으로 인한 간섭을 일으킨다 (C).

반면에 성능향상을 위한 8가지 요소들이 다음과 같이 소개된다.

- 1) 증가된 코히어런트 구간 동안 신호의 에너지를 누적할 수 있으면, 보다 나은 검출 확률의 확보가 가능하다 (C).
- 2) 수신 안테나 개수 증가 역시, 향상된 검출 확률을 이끌어 낸다 (C).
- 3) 송신 신호 전력의 증가 역시 검출확률을 증가시키는 데, 보다 짧은 시간 구간에 최대한 많은 전력을 할당하는 것이 보다 나은 성능을 이끌 수 있다 (C).
- 4) 보다 나은 기법들의 사용으로 성능향상이 가능하며, 일례로써, 차등검파 방식의 적용을 생각해 볼 수 있다 (C).
- 5) 증가된 릴레이의 사용은 셀 경계에 위치한 단말기의 지연을 줄일 수 있다 (C).
- 6) 사용 주파수 대역폭의 증가 시, 이는 채널의 코히어런트 구간을 증가 시킬 수 있다. 이 경우, 늘어남만큼 더 신호의 코히어런트 누적이 가능하다 (S).
- 7) OFDMA 시스템에서 간섭감소를 위하여 다중 프레임 간섭제거 기법을 적용하여 신뢰성 있는 프레임 타이밍 동기를 획득 할 수 있다 (O).
- 8) 셀 세분화 및 특정 셀 전용 프리앰블 (또는 파일럿)의 사용이 다중 릴레이로 인한 간섭 감소에 도움을 준다 (O).

따라서, 위에서 소개된 요소들의 적절한 조합을 통하여 최대한 검출성능을 향상시켜야 하고, [2]와 위에서 논의된 내용을 기반으로 하여 다음과 같이 NC 다중 송수신 기반 협력 통신 시스템 동기 모듈 디자인 지침이 정리 될 수 있다.

<표 4> NC 다중 송수신 환경 하의 협력 통신 시스템 동기 모듈 디자인 지침^[2]

(1) 다중 송신안테나에 송신 전력을 균등하게 할당하는 것은 보다 긴 지연을 이끌게 된다. Co-located 경우와 같이 감소 된 안테나 및 경로 당 전력은 송신 다이버시티 이득의 획득을 일반적으로 실패하게 한다. 따라서 초기 동기구간에는 동기획득 시간지연을 피하기 위하여 한 개의 송신 안테나를 사용하는 것이 유리하다.
(2) 할당 전력을 증가시킨 동기 프리앰블이나 파일럿의 사용은 지연을 줄일 수 있다. 예로써, IEEE 802.16j의 경우 데이터 심볼 대비 9 dB 높은 동기 프리앰블을 사용한다. 직접확산 부호분할 시스템의 경우도 데이터 채널 대비 몇 dB 높게 파일럿 채널의 전력을 할당한다.
(3) 상대적으로 짧은 신호누적 구간은 협력통신 기반의 NC 다중 송수신 환경에서 획득 가능한 성능을 제약한다.
(4) 다중 수신 안테나의 사용은 수신 다이버시티 이득을 증가시키므로 다중 송신기로부터 수신된 낮은 전력으로 인한 지연을 어느 정도 상쇄시킬 수 있다.
(5) 다중 릴레이의 사용은 송신 다이버시티의 이득을 늘릴 수 있으며, 특히 핸드오버 상황에서 유용할 수 있다. 하지만 동시에 다중 릴레이로 인한 간섭이 발생하므로 최적화된 사용이 필요로 하다. 또한 OFDMA 시스템에서 간섭감소를 위하여 다중 프레임 간섭제거 기법을 적용하여 직접통신을 위한 신뢰성 있는 프레임 타이밍 동기를 획득 할 수도 있다.
(6) 사용 가능한 주파수 대역을 증가시키는 것은 직접확산 부호분할 시스템에서 누적되는 칩의 개수를 증가시켜, 궁극적으로 누적되는 신호 에너지를 증가시키므로 혜택을 얻을 수 있으나 동시에 증가되는 유효 다중경로의 개수로 인한 성능저하와 같이 고려되어야 한다. OFDMA의 경우는 증가하는 부 반송파의 개수가 각 부 반송파 당 할당되는 송신 전력량을 감소시키므로 성능저하를 야기한다.
(7) 최대 3 홉의 사용과 고정 릴레이가 초기동기에 발생 가능한 지연을 줄이기 위하여 고려될 수 있다. 보다 증가된 홉의 개수는 동기성능 열화를 이끌 수 있기 때문이다. 예를 들면, AF 기반 릴레이 형식 1의 경우, 누적 에러와 보다 긴 CP를 발생시키므로, 무작정 홉의 개수를 늘릴 수 없다. 따라서, 하이브리드 형식의 경우, AF 기반 릴레이 형식 1과 DF 기반 릴레이의 장점을 활용 할 수 있다. 추가적으로, 이동형 릴레이를 고려 시, 신뢰성 있는 셀 검색이 보장되지 않을 수 있으며, 주 기지국과 이동형 릴레이 간 불안정한 연결로 인해 보다 긴 셀 검색 시간이 소요된다.
(8) 간섭으로 인해 단말기에서 경험하는 다중 타이밍 오프셋과 다중 주파수 오프셋을 피하는 방법으로 동기식 전송방식을 기지국과 연관된 릴레이들에서 사용 할 수 있다. 이 경우에 GPS 타이밍 기준과 어긋난 클럭 타이밍 감소기법의 사용이 필요로 하다.
(9) 셀 세분화 및 특정 셀 전용 프리앰블 (또는 파일럿)의 사용이 다중 릴레이로 인한 간섭 감소에 도움을 준다.
(10) 초기 동기 단계에서는 해당 반송파 주파수 대역에 대한 정보 외에는 알 수 있는 것이 없으므로, 복잡도에 문제가 없으면, 최대 우도 검파방식의 적용이 고려될 수 있다.
(11) 핸드오버를 위한 타겟 셀 검색의 경우, 단말기는 인근 셀에 대한 정보 획득이 가능하므로, 보다 용이한 셀 검색이 가능하고, 검색할 대상이 명확하고, 시간 및 주파수 축 상의 에러의 크기가 특정 범위 내에 있으므로 다양한 기법의 적용이 용이하다. 또한 최대 우도 검파방식 적용 시, 필요로 한 저장영역의 크기가 초기 셀 검색에 비해, 상당히 줄어들므로 적용이 쉬워진다.
(12) Long Term Evolution-Advanced와 같이 반송 주파수 집성이 적용된 경우, 인접 주파수 대역을 위한 동기 획득이 생략 가능할 수 있다. 하지만 주파수 집성 후, 대역이 상당히 넓은 경우, 동기 획득이 여러 번 이루어 질 수도 있다.



III. 결론

본 고에서는 Co-located 다중 송수신 안테나 시스템 환경 하에서 NC MIMO를 고려했을 때의 정보이론적 특징을 살펴보고, 직접확산 부호분할 시스템과 OFDMA 시스템 하의 초기 동기과정 디자인을 위한 중요 요인들을 살펴보았다. 또한 이를 바탕으로 동기모듈 디자인에 필요로 한 핵심 요소들간의 상관 관계 및 지침을 설명하였다. 그리고 다중 송수신 협력 통신 시스템 환경에서도 초기 동기과정 디자인을 위한 중요 요인들과 이에 상응하는 디자인 지침을 살펴보았다. 따라서 현재 표준화 활동을 통해 구현된 시스템 및 2020년 상용화가 목표인 5G 시스템 동기 모듈 디자인을 위한 다양한 동기 방식 연구를 위해 여기서 소개된 중요한 디자인 지침들이 활용 될 수 있을 것으로 기대한다.

IV. 감사의 글

I would like to show my special thanks to Professor Lajos Hanzo for his contribution on our research.

참고 문헌

[1] S.H. Won and L. Hanzo, "Synchronization of Noncoherent MIMO Systems: Synchronization Issues," IEEE Vehic. Tech. Mag., vol. 7, issue 4, 2012, pp. 95-103.

[2] S.H. Won and L. Hanzo, "Synchronization Issues in Relay-Aided Cooperative MIMO Networks," IEEE Wireless Comm. Mag., vol. 21, issue 5, 2014, pp. 41-51.

[3] S.H. Won and L. Hanzo, "Initial Synchronisation of Wideband and UWB Direct Sequence Systems: Single- and Multiple-Antenna Aided Solutions," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, issue 1, 2012, pp. 87-108.

[4] M. Iwamura, H. Takahashi, and S. Nagata, "Relay

Technology in LTE-Advanced," NTT DOCOMO Tech. J., vol. 12, no. 2, 2012, pp. 29-36.

[5] IEEE Std 802.16j-2009, "Standard for Local and Metropolitan Area Networks, Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems, Amendment 1: Multihop Relay Specification," 2009.



원승환

- 1999년 2월 고려대학교 전파공학과 학사
- 2001년 2월 고려대학교 전파공학과 석사
- 2001년 1월~2004년 9월 LG전자 주임연구원
- 2008년 9월 University of Southampton, UK 박사
- 2008년 11월~2013년 3월 삼성전자 책임연구원
- 2013년 4월~현재 University of Southampton Malaysia Campus 부교수

〈관심분야〉

Synchronization and estimation schemes in diverse MIMO-aided multicarrier and (or) millimeter-wave mobile broadband system