

논문 2007-44TC-5-9

다중 안테나를 갖는 이동 릴레이의 셀 탐색과 입사각 추정방법

(Cell Searching and DoA Estimation Method for a Mobile Relay with Multiple Antennas)

고요한*, 강현진*, 조용수*

(Yo Han Ko, Hyun Jin Kang, and Yong Soo Cho)

요약

본 논문에서는 이동 차량에 다중 안테나를 설치하여 기존의 이동통신이나 방송시스템의 성능을 향상 시키는 이동 릴레이의 구조를 제안한다. 하드 핸드오버를 사용하는 시스템에서 다중 안테나를 갖는 이동 릴레이가 셀 경계에 있을 때 스마트 안테나 기법을 적용하기 위해서는 셀 탐색과 입사각을 추정해야 하므로 본 논문에서는 셀 탐색과 입사각을 동시에 추정하는 방법을 제안한다. 본 논문에서 제안한 셀 탐색과 입사각 동시 추정기법의 성능을 모의실험을 통해 검증한다.

Abstract

propose a mobile relay structure for vehicles with multiple antennas, which can increase performances of mobile communication systems and broadcasting systems significantly. Since cell searching and DoA estimation are required for the terminal in hard handover cellular system, joint techniques for cell searching and DoA estimation are proposed to apply beamforming technique for the mobile relay with multiple antennas located at the cell boundary. The proposed cell searching and DoA estimation techniques are evaluated by computer simulation under the environment similar to WiBro system.

Keywords : Mobile Relay, Multiple Antennas, Cell Searching, DoA Estimation

I. 서론

90년대부터 현재까지 셀룰러 시스템, PCS(Personal Communication Service), WiBro(Wireless Broadband Internet)등의 이동통신과 DMB(Digital Multimedia Broadcasting)와 같은 방송시스템 등 여러 기술들이 발전되어 보급되고 있다. 최근에는 이러한 이동통신 시스템의 성능을 더욱 향상시키기 위하여 다중 안테나 기술이 개발되고 있다. 다중 안테나 기술은 기존의 이동통신 시스템과 결합하여 주파수 효율을 크게 향상시킬 수

있으며, 무선링크 버짓(budget) 또는 채널 용량을 증가시킬 수 있다^[1]. 다중 안테나 기술은 안테나의 배치 간격과 사용 방법에 따라 스마트 안테나 기법과 MIMO(Multiple Input Multiple Output)기법으로 크게 나눌 수 있다. 이러한 다중 안테나 기술을 적용하기 위해서는 최소한 $\lambda/2$ 또는 그 이상의 안테나 간격을 필요로 하는데, 단말기의 경우 크기가 제한되어 있기 때문에 다중 안테나를 설치하는데 어려움이 따른다. 그러나 승용차나 버스와 같은 이동 차량의 경우에는 단말기에 비해 공간적 제약이 적기 때문에 다중 안테나 기술을 적용하기 쉽다. 따라서 기존의 이동통신 시스템에 대해 보다 향상된 서비스와 신뢰성 있는 정보를 제공하고자 하는 경우에 이동 차량에 다중 안테나를 설치하여 다중 안테나 기술을 적용할 수 있다.

본 논문에서 고려하는 이동 릴레이는 이동 차량에 다중 안테나를 설치하여 기지국으로부터 신뢰성 있는 정

* 정희원, 중앙대학교 전자전기공학부
(Chung-Ang University)

※ 본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업 유비쿼터스 컴퓨터및네트워크기술개발사업의 지원과 서울시 산학연 협력사업의 IP/SoC 설계기술혁신사업단의 지원으로 이루어졌습니다.

접수일자: 2007년5월1일, 수정완료일: 2007년5월14일

보를 수신하고, 수신된 정보를 신뢰성 있는 전송구간을 통해 다시 단말에게 전송하는 장치를 의미한다. 이러한 이동 릴레이에서 스마트 안테나 기법을 적용하고자 할 경우, 각 기지국에 대해 빔을 형성하기 위해서는 각 기지국의 입사각을 추정해야 한다. 또한 하드 핸드오버를 사용하는 시스템에서 인접 기지국의 신호는 간섭 신호로 작용하기 때문에 추정된 입사각이 어느 기지국에 해당하는 입사각인지를 알아야 한다. 이 경우 목표 기지국에 대해 빔을 형성하고 간섭 기지국에 대해서는 널빔(null-beam)을 형성할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 다중 안테나를 갖는 이동 릴레이에서 셀 탐색과 입사각 추정을 동시에 하는 방법을 제안하고, 모의실험을 통해 성능을 검증한다.

II. 본 론

1. 다중 안테나를 갖는 이동 릴레이 구조

본 논문에서 제안하는 이동 릴레이는 승용차나 버스와 같은 이동 차량에 다중 안테나를 설치하여 이동통신 시스템의 성능을 향상시키는 장치를 나타낸다. 이동 릴레이에 사용하는 안테나의 구조는 채널 환경, 이동 릴레이의 위치(셀 내, 셀 경계)에 따라 다르게 요구된다. 본 논문에서 제안하는 이동 릴레이의 안테나 구조는 빔형성 안테나와 다이버시티 안테나로 구성된다. 빔형성 안테나와 다이버시티 안테나는 각각 기지국과 릴레이 사이의 채널 환경에 따라 선택된다. 채널 환경은 기지국과 릴레이 사이에 LoS(Line-of-Sight)가 존재하고 반사체가 없는 스펙큘러 채널(Specular channel)과 기지국과 릴레이 사이에 반사체가 존재하는 스캐터링 채널(Scattering channel)로 구분할 수 있다. 스펙큘러 채널의 경우 안테나간 높은 상관관계로 인해 신호의 입사각도에 대한 공간 분할이 가능하고 빔형성 이득을 얻을 수 있는 스마트 안테나 기법이 적합하다^{[2][4][5][6]}. 반면에 스캐터링 채널의 경우 안테나간 상관관계가 적고 독립적인 페이딩을 겪게 되어, 페이딩을 효과적으로 극복하고 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 MIMO 기법이 적합하다^[1]. 따라서 본 논문에서 제안하는 다중 안테나를 갖는 이동 릴레이는 각 채널 환경에 따라 스마트 안테나 기법과 MIMO 기법을 적용하여 최적의 성능을 얻을 수 있다. 그림 1은 승용차에 다중 안테나를 적용한 이동 릴레이의 한 예를 나타낸다.

그림 1에서와 같이 본 논문에서 제안하는 이동 릴레이는 스마트 안테나 기법과 MIMO 기법을 모두 적용하

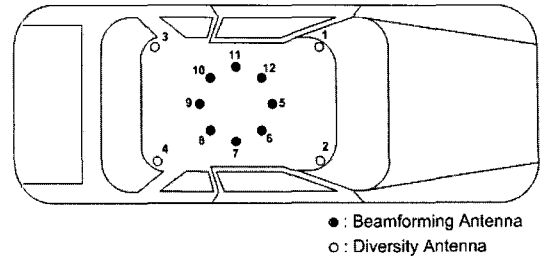


그림 1. 다중 안테나를 갖는 이동 릴레이의 안테나 구조

Fig. 1. Antenna configuration of mobile relay with multiple antennas.

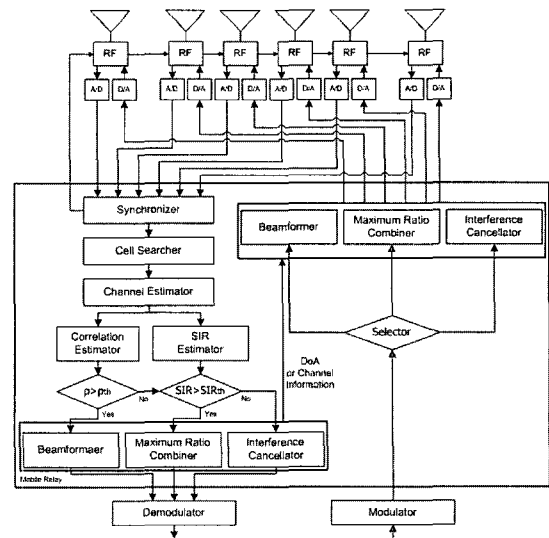


그림 2. TDD 시스템에서의 다중 안테나를 갖는 이동 릴레이의 구조

Fig. 2. Structure of mobile relay with multiple antennas in TDD systems.

기 위해 빔형성 안테나와 다이버시티 안테나의 결합으로 구성되어 있다. 그리고 차량의 천장에 안테나를 설치함으로써 단말에서의 다중 안테나 사용에 따른 공간적 제약을 극복할 수 있다.

그림 2는 본 논문에서 제안하는 TDD 시스템에서의 다중 안테나를 갖는 이동 릴레이의 구조를 나타낸다.

본 논문에서 제안하는 TDD 시스템에서의 이동 릴레이는 안테나를 통해 수신된 신호가 RF단을 통해 기지대역 신호로 변환된 후 동기부에서 신호의 동기를 맞추고, 셀 탐색기에서 릴레이가 위치하는 셀을 찾는다. 그 후, 채널 상관 측정기와 신호대 간섭비 측정기에 의해 측정된 결과값을 사용하여 스마트 안테나 기법과 MIMO 기법, 그리고 MIMO 기법 중 MRC(Maximum Ratio Combining) 기법과 간섭 제거 기법 하나를 택하여 사용한다. 한편 하드핸드오버를 하는 TDD 시스템에서는 릴레이가 셀 경계에 존재하는 경우 인접 기지국의

신호가 간섭 신호로 작용하여 성능 열화가 발생한다. 이 경우 빔형성 기법과 간섭제거 기법을 사용하여 간섭 신호를 제거하여 성능 열화를 감소시킨다. 그러나 릴레이가 셀 내에 존재하는 경우 인접 기지국의 신호가 간섭신호로 작용하지 않기 때문에 단일 송신 신호에 대해 최적의 성능을 내고 빔형성 기법과 간섭제거 기법에 비해 복잡도가 낮은 MRC 기법을 사용한다. 이때 빔형성 기법과 간섭제거 기법의 선택여부는 채널 환경에 따라 이루어진다. 이러한 세부 구분은 채널 상관 측정기와 신호대 간섭비 측정기에 의해서 결정된다.

하드 핸드오버를 사용하는 시스템에서 스마트 안테나 기법을 적용하기 위해서는 수신되는 신호의 입사각 정보를 알아야 한다. 또한 하드 핸드오버를 사용함에 따라 인접 기지국의 신호는 간섭으로 작용하므로 수신 신호에서 각 기지국의 신호를 구분해야 한다. 따라서 각 기지국의 Cell ID와 입사각 정보를 일치시켜 추정해야 목표 기지국으로 빔을 형성하고 간섭 기지국으로 널 빔을 형성할 수 있다.

2. 다중 안테나를 갖는 이동 릴레이의 셀 탐색과 입사각 추정방법

다중 안테나를 갖는 이동 릴레이에서 셀 탐색과 입사각 추정을 위해 일반적으로 적용할 수 있는 방법은 두 가지가 있다. 첫 번째는 입사각을 추정 후 추정된 입사각으로 빔을 형성하여 Cell ID를 찾는 방법이 있을 수 있다. 하지만 추정된 입사각이 여러 개 존재할 경우에 각 입사각에 대해 모두 빔을 형성하고 CINR을 측정하여 어느 기지국으로부터 신호를 수신할지 정해야 한다. 또 다른 방법으로는 Cell ID를 추정 후 입사각을 추정하는 방법이다. 이 방법 역시 추정된 입사각과 추정된 Cell ID를 일치시키기 위해 다수의 빔을 형성해야 한다.

하지만 본 논문에서 제안하는 다중 안테나를 갖는 이동 릴레이의 셀 탐색과 입사각 추정방법은 릴레이에서 초기 동기를 맞추고 기존의 셀 탐색과정에서 셀 탐색과 동시에 셀 탐색에서 사용하는 수신 신호와 프리엠블 신호의 상호상관 벡터를 이용하여 입사각을 추정한다. 따라서 셀 탐색과 입사각 추정을 개별적으로 실행하지 않아 목표 기지국으로 빔을 형성하기 위한 시간적 손실을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 이동 릴레이의 입사각 추정은 가능한 모든 방향으로 빔을 전자적으로 회전시켜 최대 출력을 찾는 기존의 입사각 추정방법을 기본으로 하여 셀 탐색과 입사각 추정의 개별적 실행여부와 혼합

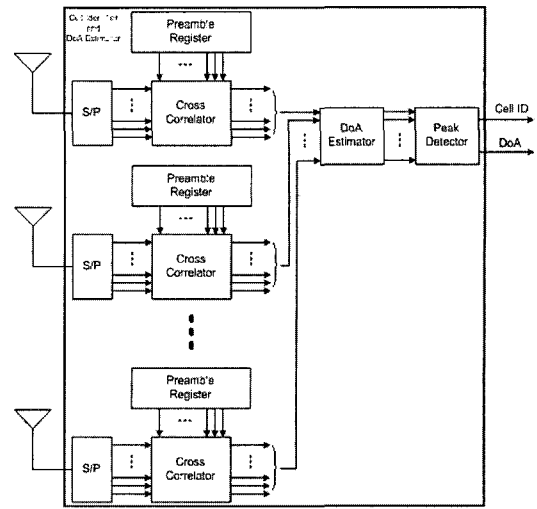


그림 3. 셀 탐색과 입사각 동시 추정방법 1의 블록도
Fig. 3. Block diagram of cell searching and DoA estimation method 1.

적 실행여부, 추정 순서에 따라 추정방법 1과 추정방법 2, 추정방법 3의 세 가지 방법을 제안한다.

추정방법 1은 먼저 빔형성 안테나를 통해 수신된 신호를 프리엠블 레지스터를 통해 가능한 프리엠블 신호와 함께 상호 상관기를 통해 상호상관 벡터를 구한다. 그리고 상호 상관기의 출력값을 이용하여 입사각 추정기와 최대값 검출기에서 Cell ID와 입사각을 추정한다. 그림 3은 셀 탐색과 입사각 동시 추정 방법 1의 블록도를 나타낸다.

식 (1)은 수신 신호와 프리엠블 신호의 상호상관 벡터를 나타낸다.

$$P^l = Y^l \cdot X^H = \sum_{n=0}^{N-1} y_n^l \cdot (x_n^c)^* \quad (1)$$

$$P_c = [P_c^0 \ P_c^1 \ \dots \ P_c^{L-1}]$$

여기서, y_n^l 은 l 번째 안테나로 들어온 수신신호 벡터의 n 번째 부반송파 신호를 나타내고, x_n^c 은 Cell ID c 를 갖는 n 번째 신호를 나타낸다. 그리고 N 은 전체 부반송파의 개수, L 은 수신 안테나의 개수, H 는 Hermitian 변환을 나타낸다. 위의 식 (1)의 상호상관 벡터를 이용하여 자기상관 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$R_c = P_c P_c^H = \begin{bmatrix} P_c^0 P_c^{0*} & P_c^0 P_c^{1*} & \dots \\ P_c^1 P_c^{0*} & P_c^1 P_c^{1*} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ & & & P_c^{L-1} P_c^{L-1*} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Cell ID와 입사각은 식 (2)의 자기상관 행렬을 이용

하여 각각 Delay and Sum과 MVDR, MUSIC, ESPRIT 등의 방법을 통해 추정한다. 이때, Cell ID C 와 입사각 θ 는 모든 가능한 Cell ID C 와 θ 에 대한 탐색 과정을 거쳐 추정된다. 식 (3)은 각 방식에 따른 추정 식을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 (C, \theta) &= \arg \max (\mathbf{a}(\theta)^H \mathbf{R}_c \mathbf{a}(\theta))_{\text{Delay and Sum}} \\
 (C, \theta) &= \arg \max \left(\frac{1}{\mathbf{a}(\theta)^H \mathbf{R}_c^{-1} \mathbf{a}(\theta)} \right)_{\text{MVDR}} \\
 (C, \theta) &= \arg \max \left(\frac{1}{\mathbf{a}(\theta)^H (\mathbf{V}_c)_n (\mathbf{V}_c)_n^H \mathbf{a}(\theta)} \right)_{\text{MUSIC}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

위의 식에서 $\mathbf{a}(\theta)$ 는 배열응답 벡터를 나타내고, $(\mathbf{V}_c)_n$ 는 \mathbf{R}_c 에 대한 잡음 부공간 벡터를 나타낸다.

그림 4는 셀 탐색과 입사각 동시 추정방법 2의 블록도를 나타낸다. 추정방법 2는 빔형성 안테나를 통해 수신된 신호에서 일차적으로 입사각을 추정한 후, 수신 신호와 프리엠블 신호의 상호상관을 이용하여 Cell ID와 입사각을 동시에 찾아내는 방법이다. 일차적으로 추정된 입사각은 최대값 검출기로 입력된다. 또한 수신된 신호는 프리엠블 레지스터를 통해 가능한 프리엠블 신호와 함께 상호 상관을 통해 상호상관을 구하는데 사용된다. 그리고 상호 상관기의 출력값을 이용하여 입사각 추정기와 최대값 검출기에서 Cell ID와 입사각을 추정한다. 이때 최대값 검출기에서 일차적으로 추정된 입사각에 대해서만 최대값 여부를 확인하게 된다. 따라서 추정방법 1에서 사용하는 모든 입사각에 대한 탐색

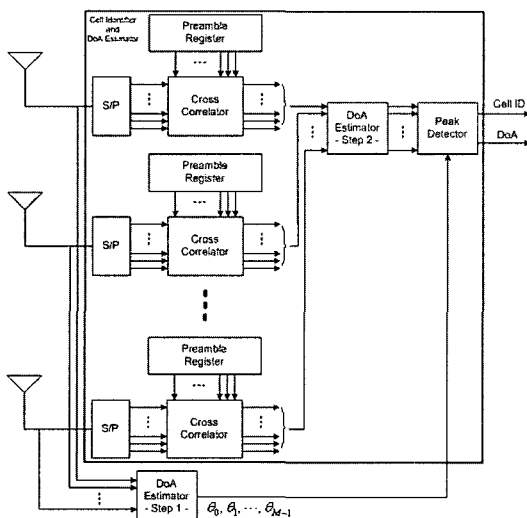


그림 4. 셀 탐색과 입사각 동시 추정방법 2의 블록도
Fig. 4. Block diagram of cell searching and DoA estimation method 2.

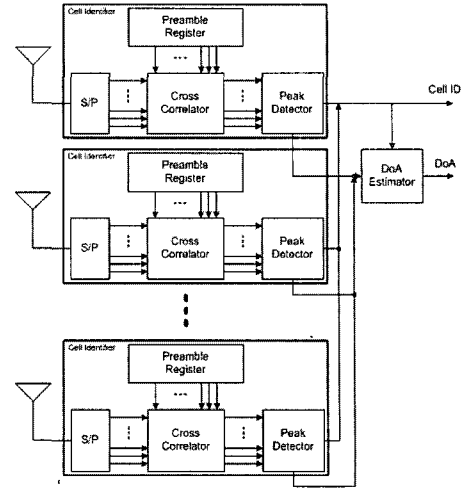


그림 5. 셀 탐색과 입사각 동시 추정방법 3의 블록도
Fig. 5. Block diagram of cell searching and DoA estimation method 3.

과정을 줄일 수 있다. 추정방법 2는 식 (1)의 상호상관 벡터와 배열응답 벡터와의 곱을 이용하여 Cell ID와 입사각을 추정한다. 식 (4)는 추정방법 2의 추정 식을 나타낸다.

$$(C, \theta) = \arg \max (\mathbf{a}(\theta_m)^H \mathbf{P}_c) \tag{4}$$

위의 식에서 θ_m 는 일차적으로 추정된 입사각을 나타내고, $\mathbf{a}(\theta)$ 는 배열응답 벡터를 나타낸다. 수신 신호를 이용한 일차적 입사각 추정은 기존의 Delay and Sum이나 MVDR, MUSIC, ESPRIT 등의 방법을 통해 이루어진다.

그림 5는 셀 탐색과 입사각 동시 추정방법 3의 블록도를 나타낸다. 추정방법 3은 수신 신호와 프리엠블 신호의 상호상관을 이용하여 Cell ID와 입사각을 동시에 찾아내는 방법이다. 그림 5에 나타난 바와 같이 빔형성 안테나를 통해 수신된 신호는 프리엠블 레지스터를 통해 가능한 프리엠블 신호와 함께 상호 상관을 통해 상호상관을 구하는데 사용된다. 그리고 최대값 검출기를 통해 최대값을 검출하는데, 이때 Cell ID가 추정된다. 검출된 최대값은 입사각 추정기에 입력되어 입사각을 추정한다. 추정방법 3은 식 (1)의 상호상관 벡터를 이용한다. 다음의 식 (5)는 상호상관을 이용한 Cell ID 탐색을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 C &= \arg \max |P_c^0| = \dots = \arg \max |P_c^1| \\
 &= \arg \max \left| \sum_{n=0}^{N-1} y_n^l \cdot (x_n^c)^* \right|
 \end{aligned} \tag{5}$$

여기서 C 는 추정된 Cell ID를 나타낸다.

그리고 식 (1)의 상호상관 벡터를 이용하여 각각 Direct Searching, Peak Searching, Joint Peak Searching을 통해 목표 기지국의 입사각을 추정한다.

Direct Searching은 식 (5)의 Cell ID C 에 해당하는 상호상관의 평균값에 대해 각 빔형성 안테나간의 위상차를 이용하여 입사각을 직접 추정하는 방법이다. 식 (6)은 선형 배열 안테나에서의 Direct Searching을 나타낸다.

$$\theta = \text{asin}\left(E\left[\frac{\ln(P_C^l/P_C^{l-1})}{-j2\pi d/\lambda}\right]\right) \quad (6)$$

여기서 \ln 은 자연로그(Natural logarithm)이고, P_C^l 은 l 번째 안테나에서 Cell ID C 에 해당하는 상호상관값이다. 그리고 d 는 선형 배열 안테나의 엘리먼트간 간격을 나타낸다.

Peak Searching은 식 (5)의 Cell ID C 에 해당하는 상호상관 벡터와 배열응답 벡터의 곱으로 표현되며, 탐색 가능한 모든 각도에 대해 최대값을 탐색함으로써 입사각을 추정한다. 식 (7)은 Peak Searching을 나타낸다.

$$\theta = \arg \max(a(\theta)^H P_C) \quad (7)$$

여기서 $a(\theta)$ 는 배열응답 벡터, P_C 는 Cell ID C 에 해당하는 상호상관 벡터를 나타낸다.

Joint Peak Searching은 최대값 검출기를 통과하지 않고, 식 (1)의 상호상관 벡터와 배열응답 벡터를 사용해서 탐색 가능한 모든 각도와 가능한 Cell ID에 대해 최대값을 탐색함으로써 Cell ID와 입사각을 동시에 추정하는 방법이다. 식 (8)은 Joint Peak Searching을 나타낸다.

$$(C, \theta) = \arg \max(a(\theta)^H P_C) \quad (8)$$

여기에서 $a(\theta)$ 는 배열응답 벡터, P_C 는 Cell ID c 에 해당하는 프리앰블 신호와 수신 신호의 상호상관 벡터를 나타낸다.

III. 실험

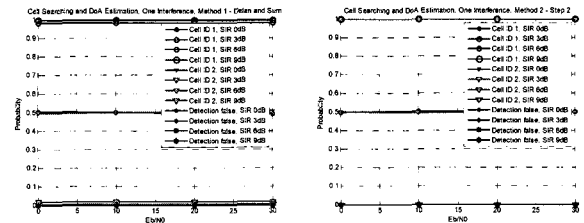
다중 안테나를 갖는 이동 릴레이에서의 셀 탐색과 입사각 추정을 위한 모의실험 환경은 표 1과 같다.

그림 6은 본 논문에서 제안된 방식을 사용하여 TDD 시스템에서 셀 탐색과 입사각을 추정할 때의 셀 탐색

표 1. 모의실험 환경

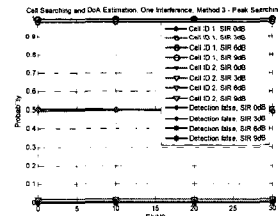
Table 1. Simulation parameters.

Carrier frequency	2GHz
Bandwidth	10MHz
Sampling frequency	10MHz
FFTsize	1024
CP size	128samples
No. of Base-station	2 (Cell ID of target BS=1, Cell ID of interference BS=2)
No. of Antenna	8(Beamforming Antenna)
Antenna structure	Uniform linear array (Target= -20° , Interference= 60°), Uniform circular array (Target= $[90^\circ, 200^\circ]$, Interference= $[90^\circ, 60^\circ]$)
Channel	Pedestrian A



(a) 추정방법 1

(b) 추정방법 2



(c) 추정방법 3

그림 6. 셀 탐색과 입사각 동시 추정방법의 셀 탐색 확률

Fig. 6. Cell searching probability of cell searching and DoA estimation method.

확률을 나타낸다. 그림 6(a)는 추정방법 1의 셀 탐색 확률이고, 그림 6(b)는 추정방법 2의 셀 탐색 확률, 그림 6(c)는 추정방법 3의 셀 탐색 확률을 나타낸다.

그림 6에서 신호대 간섭비가 0dB일 때 셀 탐색확률이 Cell ID 1과 Cell ID 2에 대해 약 50%의 확률을 갖지만, 신호대 간섭비가 증가할수록 Cell ID 1을 찾을 확률이 1에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 그리고 신호대 간섭비에 관계없이 셀 탐색에 실패하는 확률은 항상 0이 됨을 볼 수 있다. 따라서 제안된 방식에 의해 셀 탐색을 수행할 경우 항상 셀 탐색에 성공함을 알 수 있다.

그림 7은 본 논문에서 제안하는 이동 릴레이에서 셀

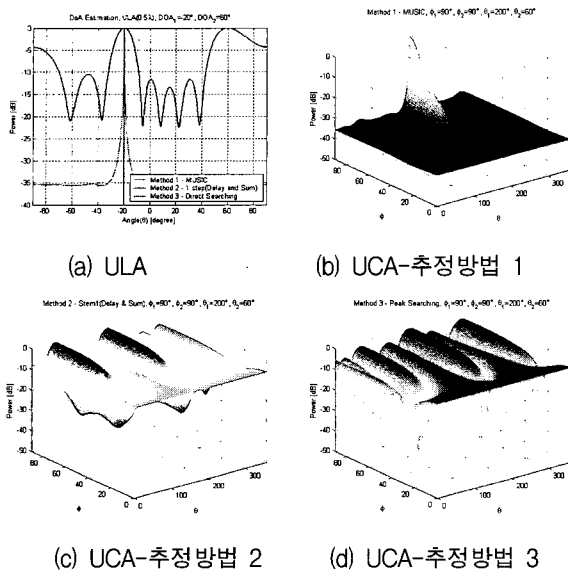


그림 7. 셀 탐색과 입사각 동시 추정방법의 입사각 추정 성능

Fig. 7. DoA estimation performance of cell searching and DoA estimation method

탐색을 통해 목표 기지국으로 Cell ID 1을 선택했을 때의 입사각 추정 성능을 나타낸다. 이때 E_b/N_0 는 30dB 이고, 빔형성 안테나는 선형 배열 안테나와 원형 배열 안테나를 사용하였다.

그림 7(a)는 빔형성 안테나로 선형 배열 안테나를 사용하였을 때의 입사각 추정 성능을 나타낸다. 그림 7(a)를 통해 목표 기지국의 Cell ID 1에 해당하는 입사각도인 -20° 를 정확히 추정함을 볼 수 있다. 그리고 추정방법 2의 경우 셀 탐색 과정에서 각각 -20° 와 60° 를 일차적으로 찾는 것을 확인 할 수 있다. 이때 일차적으로 추정된 입사각은 최대값 검출기의 입력값이 되어 Cell ID 1에 대한 -20° 를 최종적으로 추정한다.

그림 7(b), 7(c), 7(d)는 빔형성 안테나로 원형 배열 안테나를 사용하였을 때의 입사각 추정 성능을 나타낸다. 그림 7(b), 7(c), 7(d)를 통해 목표 기지국의 Cell ID 1에 해당하는 각도인 $[90^\circ, 200^\circ]$ 를 정확히 추정함을 알 수 있다. 선형 배열 안테나와 마찬가지로 추정방법 2의 경우 셀 탐색과 입사각 추정과정에서 각각 $[90^\circ, 60^\circ]$ 와 $[90^\circ, 200^\circ]$ 를 일차적으로 찾는 것을 확인 할 수 있다. 이때 일차적으로 추정된 입사각은 최대값 검출기의 입력값이 되어 Cell ID 1에 대한 입사각인 $[90^\circ, 200^\circ]$ 를 최종적으로 추정한다.

IV. 결론

본 논문에서는 이동 차량에 다중 안테나를 적용하여 기존의 이동통신 시스템이나 방송통신 시스템의 성능을 향상시키는 이동 릴레이의 구조에 대해 제안하였다. 그리고 하드 핸드오버를 사용하는 시스템에서 이동 릴레이에 스마트 안테나 기법이 적용될 때, 셀 탐색과 입사각 추정을 동시에 하는 기법을 제안하였다. 추정방법 1, 추정방법 2, 추정방법 3을 제안하였으며, 각 방식에 대해 모의실험을 통해 성능을 분석하였다. 모의실험 결과 셀 탐색과 입사각 동시 추정 방법에 대한 셀 탐색 확률이 목표 기지국의 신호대 간섭비가 증가함에 따라 목표 기지국을 선택하는 것을 확인하였다. 이때 입사각 추정치도 목표 기지국의 입사각으로 수렴함을 확인하였으며, 추정된 Cell ID와 입사각 또한 일치됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] G. Foschini and M. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Communications*, vol. 6, pp. 311-335, March 1998.
- [2] L. C. Godara, *Smart Antennas*, CRC Press, 2004.
- [3] Harry L. Van Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, Wiley-Interscience, 2002.
- [4] J. C. Liberti and T. S. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications: IS-95 and Third Generation CDMA Applications*, Prentice Hall PTR, 1999.
- [5] L. C. Godara, "Application of antenna array to mobile communications, part I: performance improvement, feasibility, and system consideration," in *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 1031-1060, Aug. 1997.
- [6] L. C. Godara, "Application of antenna array to mobile communications, part II: beam-forming and direction-of-arrival considerations," in *Proc. IEEE*, vol. 85, no. 1195-1245, Aug. 1997.
- [7] Ioannides. P and Balanis. C.A, "Uniform circular arrays for smart antennas," in *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 4, pp. 192-206, Aug. 2005.

저 자 소 개



고 요 한(정회원)
2005년 중앙대학교 전자전기
공학사 졸업.
2007년 중앙대학교 전자전기
공학 석사 졸업.
2007년 중앙대학교 전자전기
공학부 박사.

<주관심분야 : 통신, OFDM, MIMO, MMR>



강 현 진(정회원)
2005년 중앙대학교 전자전기
공학사 졸업.
2007년 중앙대학교 전자전기공학
석사.
<주관심분야 : 통신, OFDM,
MIMO, MMR>



조 용 수(정회원)
1984년 중앙대학교 전자전기
공학사 졸업.
1987년 연세대학교 전자전기공학
석사 졸업.
1991년 University of Texas
Austin 전기 및 컴퓨터
공학과 공학 박사 졸업.

1992년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수.

2001년 한국 전자통신연구원 이동통신단
초빙연구원.

2003년~현재 TTA 2.3GHz 휴대인터넷(WiBro),
무선접속실무반 의장.

<주관심분야 : 통신, OFDM, MIMO, MMR>