

원형 등간격 어레이를 갖는 이동 릴레이의 셀 탐색과 입사각 추정기법

정회원 고요한*, 김영준*, 유현일*, 종신회원 조용수*

Cell Searching and DoA Estimation Methods for a Mobile Relay Station with a Uniform Circular Array

Yo Han Ko*, Yeong Jun Kim*, Hyun Il Yoo* *Regular Members,*
Yong Soo Cho*^o *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 원형 등간격 어레이를 갖는 이동 릴레이를 위한 셀 탐색과 입사각 동시 추정기법을 제안한다. 제안된 셀 탐색과 입사각의 동시 추정기법은 인접 기지국에서 이동 릴레이로 수신되는 신호 간에 심볼 타이밍 오프셋이 존재하는 경우에도 강건한 특성을 갖고, 셀 탐색과 입사각을 각각 독립적으로 추정하는 경우에 비하여 계산량과 수행시간을 감소시킬 수 있다. 제안된 동시 추정기법의 성능을 Mobile WiMAX 환경 하에서 모의실험을 통하여 검증한다.

Key Words : Mobile Relay Station, Beamforming, Uniform Circular Array, Cell Searching, DoA Estimation

ABSTRACT

In this paper, joint methods of cell searching and Direction-of-Arrival (DoA) estimation for a mobile relay station with a uniform circular array are proposed. The proposed joint estimation method for the mobile relay station is robust even when there exist symbol timing offsets between the signals received from adjacent base stations. Also, the proposed joint estimation method can reduce computational complexity and processing time, compared with the case where cell searching and DoA estimation are performed separately. Performances of the proposed method are evaluated by computer simulation under Mobile WiMAX environment.

1. 서론

최근 이동통신시스템에서 기지국과 단말기 사이에 릴레이 스테이션을 설치하여 셀 커버리지를 확대하거나, 수율(throughput)을 증대시킬 수 있는 다중 홉 릴레이(multi-hop relay)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁾. 이에 관련된 표준화 활동으로서 Mobile WiMAX 시스템의 다중 홉 릴레이 도입을 위한 IEEE802.16j 규격이 완료단계에 있으며, IMT-Advanced

후보 기술로 유력시 되는 IEEE 802.16m과 3GPP LTE-Advanced에서 다중 홉 릴레이 도입을 위한 연구가 진행 중이다. 또한 차량의 탑승자에게 효율적인 정보 전달을 위하여 이동 릴레이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

차세대 차량은 단순 운송 수단에서 벗어나 인터넷 서비스 등이 가능한 인포테인먼트 공간으로 발전하여 이동 오피스화 될 것으로 예상된다. 이를 위해서 승용차, 버스, 기차 등의 차세대 차량에서는 외부 세계와

* 이 논문은 2007년도 중앙대학교 학술연구비(일반연구비) 지원에 의한 것임.

* School of Electrical & Electronic Engineering, Chung-Ang University, KOREA (yscho@cau.ac.kr) (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2009-03-083, 접수일자 : 2009년 03월 02일, 최종논문접수일자 : 2009년 08월 26일

고속, 고신뢰도의 접속(connectivity)이 필수적으로 요구된다. 일반 소형 단말기의 경우에는 단말의 크기 제약으로 인해 안테나 어레이의 탑재가 어려우나, 차량에서는 단말기에 비해 크기의 제약이 적어 안테나 어레이의 탑재가 용이하고 전력 소모에 대한 제약이 적다는 장점이 있다. 또한 최근에는 메타물질 등의 기술을 이용하여 외부로 돌출되지 않는 내장형 안테나 어레이 기술이 개발 중에 있다. 이러한 안테나 어레이를 갖는 차량에서는 빔형성 기법을 사용하여 기지국과 고속, 고신뢰도의 접속이 가능하게 된다.

안테나 어레이를 갖는 이동 릴레이에서 각 기지국으로 빔을 형성하기 위하여 각 기지국의 입사각(DoA: Degree of Arrival)을 추정해야 한다. 기존의 스마트 안테나를 갖는 기지국에서는 기지국에서 그 셀 내의 단말기의 입사각만 추정하여 빔형성을 이루면 되는 것에 비하여, 안테나 어레이를 갖는 이동 릴레이에서는 주위의 기지국에서 수신되는 신호로부터 입사각과 셀 탐색을 함께 추정해야 한다. 셀 탐색은 프리앰블 등을 사용하여 단말 혹은 이동 릴레이가 속한 셀을 검출하기 위해 수행하며, 핸드오버 지역에 속한 경우에는 인접한 셀의 검출까지 수행한다. 즉, 셀 경계에 있는 이동 릴레이가 하드 핸드오버를 사용하고 주파수 재사용 계수가 1인 경우에는 인접 기지국의 신호가 간섭으로 작용하기 때문에 간섭 기지국에 대해 널(null) 빔을 형성하여 간섭을 제거해야 하며, 소프트 핸드오버를 사용하는 경우에는 목표 기지국과 서빙 기지국의 신호를 결합(combining) 하여야 한다. 따라서 이동 릴레이에서는 수신되는 신호의 입사각이 각각 어느 기지국에 해당하는지를 알아야한다²⁾.

본 논문에서는 원형 등간격 어레이(UCA: Uniform Circular Array)를 갖는 이동 릴레이에서 셀 탐색과 입사각의 동시 추정(joint estimation) 기법을 제안한다. 기존에 UCA를 갖는 기지국에서 적합한 입사각 추정기법에 대한 연구가 이루어졌으나^{3)~5)}, 본 논문에서는 이동 릴레이에 적합한 셀 탐색과 입사각 동시 추정기법을 제안한다. 또한 인접 기지국에서 이동 릴레이로 수신되는 신호들은 도착 시간이 다르기 때문에 수신 신호 간에 심볼 타이밍 오프셋이 존재하게 된다. 제안된 셀 탐색과 입사각의 동시 추정기법은 심볼 타이밍 오프셋이 존재하는 경우에도 강건한 특성을 갖는다. 또한 제안된 동시 추정기법은 셀 탐색과 입사각을 각각 독립적으로 추정하는 경우에 비하여 계산량과 수행시간을 크게 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 제안된 동시 추정기법의 성능은 Mobile WiMAX 환경 하에서 모의실험을 통하여 검증한다.

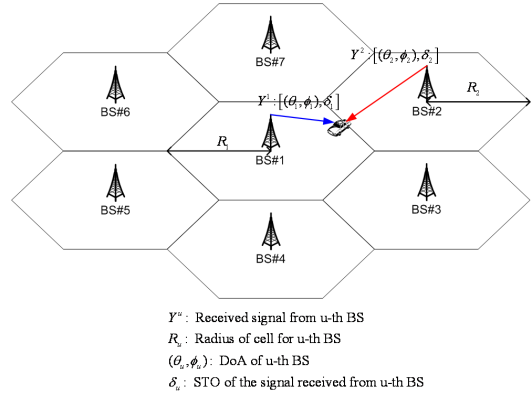


그림 1. 이동 릴레이가 셀 경계에 위치하는 경우의 셀 환경

II. 원형 등간격 어레이를 갖는 이동 릴레이의 셀 탐색과 입사각 동시 추정기법

그림 1은 셀룰러 환경에서 UCA를 갖는 이동 릴레이의 예를 보여준다. 여기서 Y^u 는 이동 릴레이에 수신되는 u 번째 기지국 신호를 나타내고, R_u 는 u 번째 기지국의 셀 반경을 나타낸다. 그리고 (θ_u, ϕ_u) 는 u 번째 기지국에서 이동 릴레이로 수신되는 입사각으로 고도각(elevation angle)과 방위각(azimuth angle)을 각각 나타낸다. δ_u 는 u 번째 기지국 신호의 심볼 타이밍 오프셋을 나타낸다.

이동 릴레이에서 빔형성을 위하여 ULA(Uniform Linear Array)를 사용할 경우에는 전 방향에 대한 입사각 추정이나 빔 형성이 어려운 단점이 있다. 반면에 UCA를 사용할 경우에는 전 방향에 대한 입사각 추정과 빔 형성을 수행할 수 있고, 전 방향에 대해 빔폭 변화와 인접로브(side lobe)의 크기 변화가 크지 않은 특성을 갖는다^{3)~5)}. 이와 같은 장점으로 본 논문에서는 UCA를 갖는 이동 릴레이에 대하여 기술한다. 그림 2는 UCA 안테나 구조를 보여준다.

그림 2에 나타난 바와 같이 UCA는 등간격으로 배

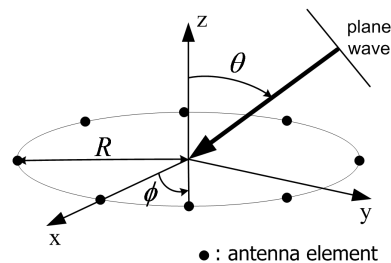


그림 2. UCA 안테나 구조

치된 원형 어레이로써 각 안테나에 수신되는 신호는 비선형적인 위상지연을 갖고 수신된다. UCA에 대한 어레이 매니폴드 벡터(array manifold vector)는 다음과 같이 주어진다^{[3],[5]}.

$$\mathbf{a}_\kappa = [e^{-j\kappa^T \mathbf{p}_0}, e^{-j\kappa^T \mathbf{p}_1}, \dots, e^{-j\kappa^T \mathbf{p}_{L-1}}]^T \quad (1)$$

여기서 $(\cdot)^T$ 는 행렬 전치(transposition)를 나타내고, L 은 안테나 수를 나타낸다. 어레이 매니폴드 벡터는 어레이의 구조에 따른 공간 특성을 나타내며, 조향 벡터(steering vector)라고 불리기도 한다. 조향 벡터를 구하기 위해서 입사각 $[\theta, \phi]$ 로부터 수신되는 평면파에 대한 파수(wavenumber)를 나타내면 다음과 같다.

$$\kappa = -\frac{2\pi}{\lambda} [\sin\theta \cos\phi, \sin\theta \sin\phi, \cos\theta]^T \quad (2)$$

여기서 $\lambda (= c/f)$ 는 파장(wavelength)을 나타낸다. 또한 $[R, \phi_l]$ 에 위치하는 l 번째 안테나의 위치 벡터(position vector)는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{p}_l = R[\cos\phi_l, \sin\phi_l, 0]^T \quad (3)$$

여기서 R 은 UCA의 반지름을 나타낸다. 식 (2)와 식 (3)을 이용하여 UCA의 조향 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다^{[3],[5]}.

$$\mathbf{a}(\theta, \phi) = [a_0(\theta, \phi), a_1(\theta, \phi), \dots, a_{L-1}(\theta, \phi)]^T \quad (4)$$

where $a_l(\theta, \phi) = e^{-j\gamma R \sin(\theta) \cos(\phi - 2\pi l/L)}$

$$l = 0, 1, \dots, L-1, R = Ld/2\pi, \gamma = 2\pi/\lambda$$

$$\theta \in [0, \pi/2], \phi \in [0, 2\pi]$$

여기서 d 는 안테나 사이의 간격을 나타낸다. 본 논문에서는 안테나 사이의 간격 d 를 0.5λ 로 가정한다. 기존에 UCA에서 입사각 추정을 위해 UCA-MUSIC, UCA-RB-MUSIC, UCA-ESPRIT 등의 연구가 이루어졌다^[4]. 하지만 이와 같은 기술들은 기지국에서 단말기로 부터의 수신신호 입사각만을 추정할 수 있으며, 이동 릴레이에서 필요로 하는 셀 탐색을 수행할 수 없다. 셀 탐색과 입사각 추정을 독립적으로 수행한 후 각 입사각에 해당하는 기지국을 찾는 방법을 사용하는 경우에는 복잡도가 증가하고 수행시간이 길어지는 단점이 있다. 특히 차량은 빠른 속도로 이동하고

회전이 자주 이루어지기 때문에 수행시간과 복잡도를 최소화할 수 있는 동시 추정기법이 반드시 필요하다. 최근에 수행시간과 복잡도를 최소화할 수 있는 동시 추정기법이 연구되었으나^[7], 이는 ULA 구조를 갖는 안테나를 기반으로 전개되었기 때문에 UCA 구조에 적합하지 않아 UCA 안테나에 적합한 동시 추정기법이 필요하다.

UCA의 l 번째 안테나에 수신되는 주파수 영역 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 신호는 다음과 같이 주어진다^{[6],[7]}.

$$Y_l(k) = \sum_{u=0}^{U-1} Y_l^u(k) \quad (5)$$

$$= \sum_{u=0}^{U-1} H_l^u(k) \beta^u(k) X^{c(u)}(k) a_l^u(\theta_u, \phi_u) + W_l(k)$$

where $c(u) \in \mathbf{C}, \mathbf{C} = \{1, 2, \dots, N_c\}$

$$k = 0, 1, \dots, N-1, \beta^u(k) = e^{-j2\pi \delta_u k/N}$$

여기서 U 와 N_c 는 각각 기지국 수와 프리앰블 수를 나타내고, N 은 프리앰블의 부반송파 수를 나타낸다. $H_l^u(k)$ 는 k 번째 부반송파에서 u 번째 기지국과 이동 릴레이의 l 번째 안테나 사이의 채널 주파수 응답을 나타내고, $W_l(k)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 백색 가산 가우시안 잡음(AWGN)을 나타낸다. 또한 $X^{c(u)}(k)$ 는 Cell ID $c(u)$ 를 갖는 프리앰블 신호의 k 번째 부반송파 심볼을 나타내고, $a_l^u(\theta_u, \phi_u)$ 는 조향 값으로 이동 릴레이의 l 번째 안테나에 수신된 u 번째 기지국 신호의 입사각을 포함한다. 그리고 δ_u 는 u 번째 기지국 신호의 심볼 타이밍 오프셋을 나타내며, $\beta(k)$ 는 심볼 타이밍 오프셋으로 인한 위상 회전을 나타낸다.

본 논문에서 제안하는 동시 추정기법을 위해 $P_{l,l-1}^c$ 값을 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{P}^c = [P_{1,0}^c, P_{2,1}^c, \dots, P_{L-1,L-2}^c]^T \quad (6)$$

$$\begin{aligned} P_{l,l-1}^c &= \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-2} \left\{ Y_l(k) (Y_{l-1}(k+1))^* \right\} \\ &\quad \times (X^c(k))^* X^c(k+1) \\ &= \frac{1}{N-1} \sum_{k=0}^{N-2} \left\{ \sum_{u=0}^{U-1} \left\{ H_l^u(k) \beta^u(k) X^{c(u)}(k) \right\} \right. \\ &\quad \times \left. \left\{ \sum_{u=0}^{U-1} \left\{ H_{l-1}^u(k+1) \beta^u(k+1) X^{c(u)}(k+1) \right\} \right\}^* \right. \\ &\quad \times \left. \left. \left\{ \sum_{u=0}^{U-1} \left\{ a_{l-1}^u(\theta_u, \phi_u) + W_{l-1}(k+1) \right\} \right\} \right\}^* \right\} \\ &\quad \times (X^c(k))^* X^c(k+1) \end{aligned}$$

$$P_{l,l-1}^c \approx \begin{cases} E\{|H_l(k)|^2\} & \text{if } c(u) = c \\ \times \exp \left\{ \begin{array}{l} -jLs \sin(\theta_u) \\ \times \sin(\phi_u - 2\pi l/L + \pi/L) \\ \times \sin(\pi/L) \end{array} \right\} & \\ 0 & \text{if } c(u) \neq c \end{cases}$$

여기서 $P_{l,l-1}^c$ 는 l 번째 안테나에 수신된 k 번째 부반송파 신호와 $l-1$ 번째 안테나에 수신된 $k+1$ 번째 부반송파 신호, 두 부반송파 위치에 해당하는 프리엠프랩 심볼을 서로 곱한 값들의 평균이다. $(\cdot)^*$ 는 conjugation을 나타내고, $E\{\cdot\}$ 는 평균값을 나타낸다. 식 (6)으로부터 $c(u) = c$ 일 때, 심볼 타이밍 오프셋에 의한 위상 회전은 제거되고, 채널의 평균 전력과 조향 값만 남게 됨을 알 수 있다. 또한 이 조향 값은 UCA의 본래 조향 값과 서로 다른 값을 갖게 됨을 알 수 있다. 즉, 심볼 타이밍 오프셋에 의한 위상 회전이 제거되기 때문에 셀 탐색 성능 열화가 발생하지 않으며, 변화된 조향 값은 이후에 설명할 제약조건(식 (8))을 만족하기 때문에 변화된 조향 값의 특성을 이용하여 입사각을 추정할 수 있다. UCA의 본래 조향 값은 안테나 수에 따라 제약조건을 만족하지 않는 경우가 발생한다. 기존의 UCA에서 입사각 추정은 수신 신호의 자기상관 행렬과 전 입사각에 대한 조향 값을 이용하여 수행하거나, 수신 신호의 자기상관 행렬의 고유 분해를 이용하여 수행하였으나 이 경우에는 입사각에 해당하는 Cell ID를 구할 수 없다⁷⁾. 또한 식 (6)을 정의할 때 심볼 타이밍 오프셋의 영향을 제거하기 위하여 l 번째 안테나에서 인접한 두 반송파에 수신된 신호의 차등 값을 사용하게 되면 입사각의 정보도 사라지게 되어 입사각과 Cell ID를 함께 구할 수 없다.

제안된 동시 추정기법의 셀 탐색과 입사각 추정은 \mathbf{P}^c 를 이용하여 수행된다. UCA의 입사각은 3차원으로 표현되기 때문에 방위각 추정과 고도각 추정이 필요하다. 방위각 추정은 식 (6)의 \mathbf{P}^c 의 각 요소 $P_{l,l-1}^c$ 값들의 위상 차이와 각 안테나의 고도각이 동일한 성질을 이용하여 추정한다. 방위각 추정을 위한 비용함수를 나타내면 다음과 같다.

$$\zeta = \min_{\phi} \left| Z_l - \frac{\sin(\hat{\phi} - 2\pi l/L + \pi/L)}{\sin(\hat{\phi} - 2\pi(l-1)/L + \pi/L)} \right|^2 \quad (7)$$

$$\text{where } Z_l = \frac{\ln(\hat{P}_{l,l-1}^c)}{\ln(\hat{P}_{l-1,l-2}^c)}$$

$$\hat{c} = \arg \max_c \left| \sum_{l=1}^{L-1} |P_{l,l-1}^c| \right|$$

여기서 \hat{c} 은 추정된 Cell ID를 나타내고, \bar{P} 는 P 의 정규화(normalization) 값을 나타내며, \ln 은 자연로그 함수(natural logarithm function)를 나타낸다. 자연로그 함수를 이용할 때, 지수(exponential) 함수가 제약조건을 만족하는가를 검토해야한다. 자연로그함수의 제약 조건은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \ln A = jx & \text{if } -\pi \leq x < \pi \\ \ln A = j(x + 2n\pi) & \text{if } x \geq \pi \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{where } A = e^{jx}, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

식 (8)를 통해 지수함수 A 에 대한 자연로그함수가 지수함수의 지수 값 jx 와 동일한 값을 갖기 위해서는 지수의 크기 값이 $[-\pi, \pi]$ 범위 안에 있어야함을 알 수 있다. 식 (6)의 조향 값이 제한조건을 만족하는지 확인하기 위해 조향 값을 정리하면 다음과 같다.

$$\mu = e^{-jLs \sin(\theta_u) (\sin(\phi_u - 2\pi l/L + \pi/L) \sin(\pi/L))} = e^{jLs_1 s_2} \quad (9)$$

$$\text{where } s_1 = -\sin(\theta_u)$$

$$s_2 = \sin(\phi_u - 2\pi l/L + \pi/L) \sin(\pi/L)$$

여기서 s_1 과 $\sin(\phi_u - 2\pi l/L + \pi/L)$ 은 -1 과 $+1$ 사이의 값을 갖기 때문에 이 두 값을 -1 또는 $+1$ 로 가정하면, 조향 값은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$\mu' = e^{\pm jLs \sin(\pi/L)} \quad (10)$$

식 (10)의 지수의 크기 값은 극한 정리에 의해서 $L \rightarrow \infty$ 일 때, $+\pi$ 또는 $-\pi$ 로 수렴한다. 따라서 식 (6)의 조향 값은 다음을 만족한다.

$$-\pi \leq Ls_1 s_2 \leq \pi \quad (11)$$

$$\Rightarrow |Ls \sin(\theta_u) (\sin(\phi_u - 2\pi l/L + \pi/L) \sin(\pi/L))| \leq \pi$$

식 (11)을 통해 식 (9)의 조향 값은 제약조건을 만족함을 알 수 있다.

방위각 추정을 위한 비용함수인 식 (7)을 만족하는 방위각은 다음과 같다.

$$\hat{\phi} = \arg \min_{\phi} \left| Z_l - \frac{\sin(\tilde{\phi} - 2\pi l/L + \pi/L)}{\sin(\tilde{\phi} - 2\pi(l-1)/L + \pi/L)} \right|^2 \quad (12)$$

$$= \arg \min_{\phi} \left| Z_l - \frac{\sin(\tilde{\phi}) \cos(2\pi l/L - \pi/L) - \cos(\tilde{\phi}) \sin(2\pi l/L - \pi/L)}{\sin(\tilde{\phi}) \cos(2\pi(l-1)/L - \pi/L) - \cos(\tilde{\phi}) \sin(2\pi(l-1)/L - \pi/L)} \right|^2$$

$$= \arctan(\mathbf{Z}_D \mathbf{Z}_N)$$

where $\mathbf{Z}_N = [Z_2 C_2 - D_2, \dots, Z_{L-1} C_{L-1} - D_{L-1}]^T \in C^{(L-2) \times 1}$

$$\mathbf{Z}_D = [Z_2 A_2 - B_2, \dots, Z_{L-1} A_{L-1} - B_{L-1}]^T \in C^{(L-2) \times 1}$$

$$A_l = \cos(2\pi(l-1)/L - \pi/L), B_l = \cos(2\pi l/L - \pi/L)$$

$$C_l = \sin(2\pi(l-1)/L - \pi/L), D_l = \sin(2\pi l/L - \pi/L)$$

$$\mathbf{Q}^\dagger = (\mathbf{Q}^H \mathbf{Q})^{-1} \mathbf{Q}^H \text{ if } \mathbf{Q}_{low} > \mathbf{Q}_{column}$$

여기서 $(\cdot)^\dagger$ 는 의사역행렬(pseudoinverse)을 나타내며, \mathbf{Q}_{low} 와 \mathbf{Q}_{column} 은 각각 행렬 \mathbf{Q} 의 행과 열의 크기와 같다.

식 (12)에 나타난 바와 같이 방위각 추정과정에서 arctan를 이용하는데, tan는 매 π 마다 반복되는 특성을 갖기 때문에 전 방위각($[0, 2\pi]$)에 대해 모호성(ambiguity)이 발생한다. 따라서 추정된 방위각은 두 개($\hat{\phi}_0, \hat{\phi}_1$)가 존재하고, 두 방위각은 π 만큼 차이가 발생한다.

고도각 추정은 추정된 두 개의 방위각을 이용하여 수행되며, 추정방법에 따라 고도각 추정방법 1 (EAE 1)과 고도각 추정방법 2 (EAE 2)로 구분할 수 있다.

고도각 추정방법 1은 $[0, \pi/2]$ 의 고도각에 대한 탐색 과정을 수행한다. 다음은 고도각 추정방법 1의 비용함수를 나타낸다.

$$\eta = \min \|\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}_n\|^2 \tag{13}$$

where $\mathbf{v} = [\nu_1, \nu_2, \dots, \nu_{L-1}]^T \in C^{(L-1) \times 1}$

$$\hat{\mathbf{v}}_n = [\hat{\nu}_{n,1}, \hat{\nu}_{n,2}, \dots, \hat{\nu}_{n,L-1}]^T \in C^{(L-1) \times 1}$$

$$\nu_l = \frac{\hat{P}_{l,l-1}^c}{e^{-jL \sin(\theta) (\sin(\phi - 2\pi l/L + \pi/L) \sin(\pi/L))}}$$

$$\hat{\nu}_{n,l} = e^{-jL \sin(\hat{\theta}) \sin(\hat{\phi}_n - 2\pi l/L + \pi/L) \sin(\pi/L)}$$

$$n = [0, 1], \theta \in [0, \pi/2]$$

여기서 $\|\cdot\|$ 는 벡터 놈(vector norm)을 나타낸다. 식 (13)의 비용함수를 만족하는 고도각과 방위각은 다음과 같다.

$$\{\hat{\theta}, \hat{\phi}\} = \arg \min_{\tilde{\theta}, \tilde{\phi}_n} \|\mathbf{v} - \hat{\mathbf{v}}_n\|^2 \tag{14}$$

$$\text{where } n = [0, 1], \tilde{\theta} \in [0, \pi/2]$$

즉, 제안된 동시추정 기법을 적용하면 UCA의 전 입사각에 대한 탐색이 필요하지 않으며, 두 개의 방위각($\hat{\phi}_n$)에 대해 각각 $[0, \pi/2]$ 의 고도각만 탐색하면 된다.

고도각 추정방법 2는 $[0, \pi/2]$ 의 고도각을 모두 탐색하지 않고 추정된 방위각을 이용하여 고도각을 바로

표 1. 모의실험 환경

Items	Values
Carrier Frequency	2.3GHz
Bandwidth	10MHz
FFT Size	1024
Cyclic Prefix(us/sample)	12.8us/128samples
Number of BSs	2
Number of Antennas	8
Antenna Spacing	0.5λ
Channel Model	ITU-Pedestrian A
Target BS	Cell ID=1 (θ_1, ϕ_1) = (80°, 200°), $\delta_1 = 2$
Interfering BS	Cell ID=4 (θ_2, ϕ_2) = (80°, 45°), $\delta_2 = 5$

추정한다. 다음은 고도각 추정방법 2를 나타낸다.

$$\{\hat{\theta}, \hat{\phi}\} = \begin{cases} [\hat{\theta}_0, \hat{\phi}_0] & \text{if } \hat{\theta}_0 \geq 0 \\ [\hat{\theta}_1, \hat{\phi}_1] & \text{if } \hat{\theta}_1 > 0 \end{cases} \tag{15}$$

$$\text{where } \hat{\theta}_n = \arcsin((\mathbf{E}_D^n)^\dagger \mathbf{E}_N)$$

$$\mathbf{E}_N = [E_{N,1}, E_{N,2}, \dots, E_{N,L-1}]^T \in C^{(L-1) \times 1}$$

$$\mathbf{E}_D^n = [E_{D,1}^n, E_{D,2}^n, \dots, E_{D,L-1}^n]^T \in C^{(L-1) \times 1}$$

$$E_{N,l} = \ln(\overline{P}_{l,l-1}^c)$$

$$E_{D,l}^n = -jL \sin(\hat{\phi}_n - 2\pi l/L + \pi/L) \sin(\pi/L)$$

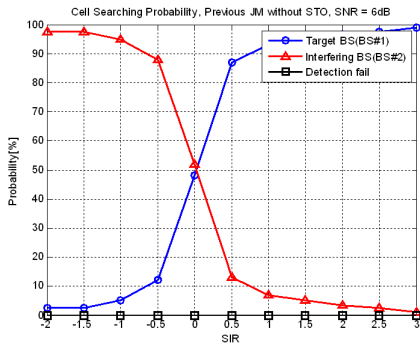
$$n = [0, 1]$$

식 (15)에 나타난 바와 같이 고도각 추정방법 2는 고도각 추정방법 1과 달리 두 번의 탐색과정만 필요하다. 따라서 고도각 추정방법 2가 고도각 추정방법 1에 비해 복잡도가 낮다.

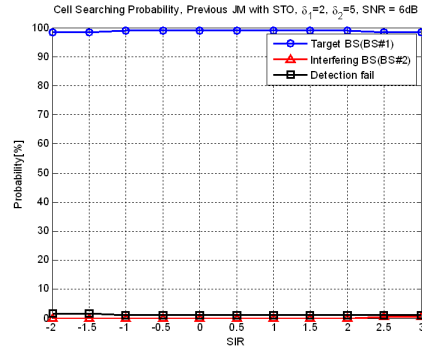
III. 모의실험

본 장에서는 UCA를 갖는 이동 릴레이에서의 셀 탐색과 입사각 동시 추정기법의 성능을 모의실험을 통하여 분석한다. 표 1은 모의실험에 사용된 파라미터를 보여준다. 기본적인 모의실험 파라미터는 IEEE 802.16e 표준(mobile WiMAX: WiBro)을 따랐고, 이동 릴레이에서는 두 기지국(Cell ID = 1, 4)으로부터 다른 입사각으로 수신된다고 가정하였다.

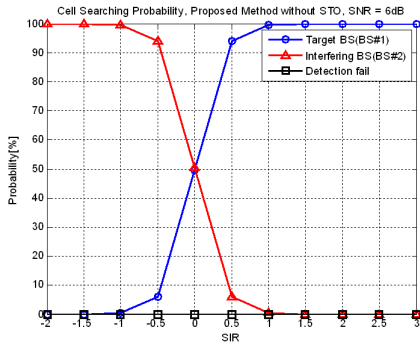
그림 3은 심볼 타이밍 옵셋이 없고 신호대 잡음비(SNR: Signal-to-Noise Ratio)가 6dB일 때, UCA를



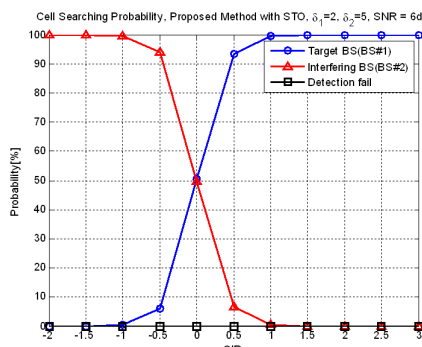
(a) Previous Joint Method



(a) Previous Joint Method



(b) Proposed Joint Method



(b) Proposed Joint Method

그림 3. 심볼 타이밍 옵셋이 없는 경우 UCA를 갖는 이동 릴레이에서의 셀 탐색 확률

그림 4. 심볼 타이밍 옵셋 존재시 UCA를 갖는 이동 릴레이에서의 셀 탐색 확률

갖는 이동 릴레이에서 기존의 동시 추정기법^[2]과 제안된 동시 추정기법의 셀 탐색 확률을 나타낸다.

그림 3(a)와 (b)는 각각 기존의 동시 추정기법과 제안된 동시 추정기법의 셀 탐색 확률을 보여준다. 그림 3에 나타난 바와 같이 심볼 타이밍 옵셋이 없는 경우에 두 동시 추정기법 모두 신호대 간섭비(SIR: Signal-to-Interference Ratio)가 증가할수록 목표 기지국(BS#1)의 셀 탐색확률이 점차 증가하고, 셀 경계에 위치했을 때(SIR=0dB) 각 기지국을 선택하는 확률이 약 50%가 됨을 알 수 있다. 또한 목표 기지국이나 인접 기지국(BS#2)의 Cell ID가 아닌 다른 기지국의 Cell ID를 선택하는 검출 실패(detection fail) 확률은 항상 0%임을 알 수 있다.

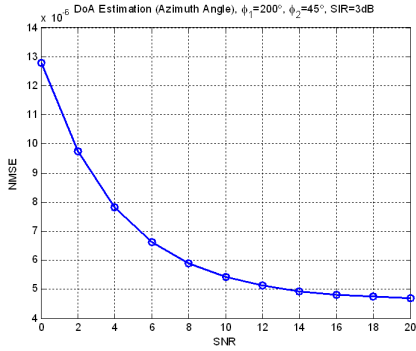
그림 4는 심볼 타이밍 옵셋이 존재하고 신호대 잡음비가 6dB일 때, UCA를 갖는 이동릴레이에서 기존의 동시 추정기법^[2]과 제안된 동시 추정기법의 셀 탐색 확률을 나타낸다.

그림 4(a)와 (b)는 각각 기존의 동시 추정기법과 제안된 동시 추정기법의 셀 탐색 확률을 보여준다. 그림 4에 나타난 바와 같이 심볼 타이밍 옵셋이 존재하는

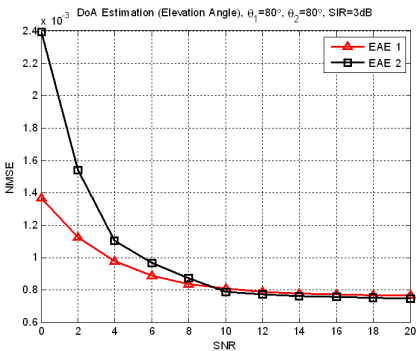
경우에 기존의 동시 추정기법은 신호대 간섭비의 변화에 상관없이 항상 목표 기지국을 선택하는 확률이 높음을 알 수 있다. 즉, 목표 기지국으로 핸드오버 전인 경우(SIR<0dB)에도 목표 기지국을 선택하여, 잘못된 기지국을 선택하게 됨을 알 수 있다. 하지만 제안된 동시 추정기법은 심볼 타이밍 옵셋의 영향이 제거되기 때문에 심볼 타이밍 옵셋이 없는 경우와 마찬가지로 신호대 간섭비가 증가할수록 목표 기지국의 셀 탐색확률이 점차 증가하는 것을 알 수 있고, 셀 경계에 위치했을 때 각 기지국을 선택하는 확률이 약 50%가 됨을 볼 수 있다. 또한 신호대 간섭비에 상관없이 검출 실패 확률은 항상 0%가 됨을 알 수 있다.

그림 5는 심볼 타이밍 옵셋이 존재하고 신호대 간섭비가 3dB일 때, UCA를 갖는 이동릴레이의 동시 추정기법의 입사각 추정 성능을 나타낸다. 이때 성능 분석의 지표는 NMSE(Normalized Mean Square Error)를 사용하였다.

그림 5(a)와 (b)는 제안된 추정기법의 방위각 추정 성능과 고도각 추정성능을 각각 나타낸다. 전체적으로 신호대 잡음비가 증가함에 따라 추정성능이 향상되는



(a) 방위각 추정성능

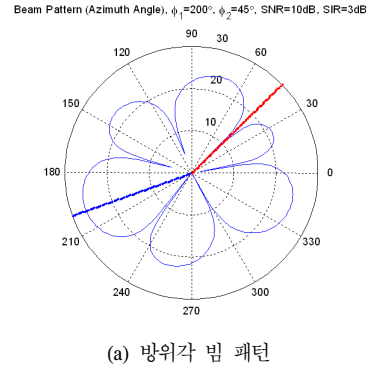


(b) 고도각 추정성능

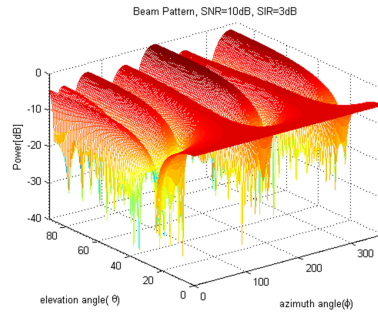
그림 5. 심볼 타이밍 옵셋 존재시 UCA를 갖는 이동 릴레이의 입사각 추정성능

것을 이 그림을 통하여 알 수 있다. 또한 그림 5(b)로부터 낮은 신호대 잡음비(SNR<5dB) 상황에서 고도각 추정방법 1의 성능이 고도각 추정방법 2의 성능보다 우수하지만, 높은 신호대 잡음비(SNR≥5dB) 상황에서는 두 성능이 유사함을 알 수 있다. 기존의 동시 추정기법의 입사각 추정성능은 셀 탐색이 제대로 수행되지 않아 입사각을 추정하여도 잘못된 기지국을 선택하기 때문에 입사각 추정성능을 도사하지 않았다.

그림 6은 신호대 잡음비가 10dB이고 신호대 간섭



(a) 방위각 빔 패턴



(b) 3D 빔 패턴

그림 6. UCA를 갖는 이동릴레이에서 제안된 동시 추정기법에 의한 빔 패턴

비가 6dB일 때, 제안된 동시 추정기법에 의한 빔 패턴을 나타낸다. 이때 빔 형성은 널 조정(Null Steering) 빔 형성 기법을 사용하였고^{[3],[7]}, 제안된 동시 추정기법(고도각 추정방법 1)에 의해 추정된 입사각을 사용하였다.

그림 6(a)는 2차 평면에서 방위각의 빔 패턴을 나타내고, 그림 6(b)는 3차원 공간에서의 빔 패턴을 나타낸다. 그림 6을 통해 제안된 동시 추정기법에 의해 추정된 목표 기지국의 입사각으로 주(main) 빔이 형성되고, 간섭 기지국의 입사각으로 널 빔이 형성됨을

표 2. 각 기법의 복잡도 비교

Method		Complexity
Conventional Method		$L^3 + (0.5N + 129600)L^2 + (2.5N + 129600)L + 2U\{2L^2 + (2N + D + 5)L + (2N + 1)N_c\}$
Previous Joint Method	JM1	$N_c\{(129600.5)L^2 + (4N + 129602.5)L + 64800\}$
	JM2	$(0.5N + 129600)L^2 + \{2.5N + 4N_c(N + U) + 129600\}L + 64800$
	JM3	$2N_c(2NL + 1) + 129600LU$
Proposed Joint Method	EAE1	$2N_c\{6(N-1)(L-1) + 1\} + 4U\{(D+96)L - 2(D+50)\}$
	EAE2	$2N_c\{6(N-1)(L-1) + 1\} + 2U\{(3D+11)L - (5D+19)\}$

알 수 있다.

표 2는 셀 탐색과 입사각 추정을 순차적으로 수행하는 기존 기법(conventional), 기존의 동시 추정기법, 제안된 동시 추정기법의 복잡도를 곱셈기 수(number of multiplications)와 나눗셈기 수(number of dividers)로 비교하여 보여준다. 여기서 N_c 는 기지국으로부터 수신한 Cell ID 후보 수를 나타내고, D 는 나눗셈기 수를 나타낸다.

표 3은 전형적인 예를 사용한 경우에 표 2의 결과를 비교하여 보여준다. 여기서 핸드오버를 위한 인접 기지국의 정보는 목표 기지국으로부터 수신하였음을 가정하였고, 셀 모양을 그림 1과 같은 정육면체로 가정하여 인접 기지국의 후보 수는 6개로 가정하였다. 그리고 프레임 길이는 5ms를 가정하였고, 나눗셈기의 계산량은 곱셈기의 4배를 가정하였다. 셀 탐색과 입사각 추정을 순차적으로 수행하는 기존(conventional) 기법에서 입사각 추정을 위해 Delay and Sum 기법^[7]을 사용하였고, 셀 탐색을 위해서는 수신신호와 프리앰블 신호의 상호상관 값의 최대 값을 선택하는 기법을 사용하였다. 기존의 동시 추정기법에서는 각각 JM 1과 JM 2, JM 3(peak searching algorithm)을 사용하였다^[2]. 표 3으로부터 제안된 동시 추정기법은 UCA를 갖는 이동 릴레이에서 입사각 추정시 전 입사각에 대한 탐색이 필요하지 않아 복잡도가 매우 낮음을 알 수 있고, 고도각 추정방법 2의 복잡도가 고도각 추정방법 1의 복잡도보다 낮음을 알 수 있다. 또한 수행 시간은 셀 탐색과 입사각 추정이 동시에 수행되기 때문에 기존의 동시 추정기법과 동일한 5ms임을 알 수 있다.

표 3. 각 기법의 복잡도 비교

Method		Number of Multiplications	Processing Time
Conventional Method		9,381,388	10ms (2 frames)
Previous Joint Method	JM1	65,835,980	5ms (1 frame)
	JM2	9,474,832	5ms (1 frame)
	JM3	2,137,230	5ms (1 frame)
Proposed Joint Method	EAE1	171,954	5ms (1 frame)
	EAE2	166,988	5ms (1 frame)

IV. 결 론

본 논문에서는 UCA를 갖는 이동 릴레이에서 셀 탐색과 입사각 동시 추정기법을 제안하였다. 모의실험 결과 제안된 동시 추정기법이 심볼 타이밍 옵셋이 존재하는 경우에 기존의 추정기법에 비해 향상된 셀 탐색 성능을 가짐을 확인하였다. 또한 신호대 간섭비가 증가함에 따라 목표 기지국을 선택하는 확률이 점차 증가하고, 잘못된 기지국을 선택하는 검출 실패의 확률은 신호대 간섭비와 상관없이 매우 적으며, 추정된 입사각이 목표 기지국과 일치됨을 확인하였다. 제안된 동시 추정기법은 셀 탐색과 입사각을 독립적으로 수행하는 방법, 기존의 동시 추정기법과 비교하여 전 입사각에 대한 탐색이 필요하지 않기 때문에 복잡도가 크게 감소하고, 처리 시간은 기존의 동시 추정기법과 동일하다.

참 고 문 헌

- [1] S. W. Peter and R. W. Heath Jr, "The Future of WiMAX: Multihop Relaying with IEEE 802.16j," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 104-111, Jan. 2009.
- [2] Y. H. Ko and Y. S. Cho, "Joint Methods of Cell Searching and DoA Estimation for a Mobile Relay Station with Multiple Antennas," *GLOBECOM'08*, Dec. 2008.
- [3] Harry L. Van Trees, *Optimum Array Processing: Part IV of Detection, Estimation, and Modulation Theory*, Wiley-Interscience, 2002.
- [4] P. Ioannides and C.A. Balanis, "Uniform circular arrays for smart antennas," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 47, no. 4, pp. 192-206, Aug. 2005.
- [5] P. Ioannides and C.A. Balanis, "Uniform circular and rectangular arrays for adaptive beamforming applications," *IEEE Antennas and Wireless Propag. Letter*, vol. 4, pp. 351-354, 2005.
- [6] 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, Mar. 1998.
- [7] L. C. Godara, *Smart Antennas*, CRC Press, 2004.

고요한 (Yo Han Ko)

정회원



2005년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학사)
2007년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학석사)
2007년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정
<관심분야> 디지털통신, OFDM, MIMO, MMR 시스템

유현일 (Hyun Il Yoo)

정회원



2005년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학사)
2007년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학석사)
2007년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정
<관심분야> 디지털 신호처리, 무선모뎀, OFDM 모뎀, MMR 시스템

김영준 (Yeung Jun Kim)

정회원



2005년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학사)
2007년 2월 중앙대학교 전자전기공학부 졸업(공학석사)
2007년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 박사과정
<관심분야> 디지털통신, 무선모뎀, OFDM 모뎀, MMR 시스템

조용수 (Young Soo Cho)

종신회원



1984년 2월 중앙대학교 전자공학과 졸업(학사)
1987년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업(석사)
1991년 2월 The University of Texas at Austin 졸업(공학박사)
1992년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수
2003년 8월~2007년 12월 TTA 휴대인터넷(와이브로) 프로젝트 그룹 무선접속 실무반 의장
<관심분야> 디지털통신, OFDM 모뎀 설계, MIMO-OFDM 모뎀, MMR 시스템