

WiBro 시스템에서의 셀 스캐닝 알고리즘

김경준, 황해광, 이두호, 김광순
연세대학교 전기전자공학부

{kimkj, hwang819, dhrhee, kskim }@dcl.yonsei.ac.kr,

Cell Scanning Algorithm for WiBro Systems

Kyung Jun Kim, Hae Gwang Hwang, Du ho Rhee, Kwang Soon Kim
Dept. of Electrical and Electronic Engineering
Yonsei University 134 Shinchonedong, Sudaemoon-gu Seoul, 120-749, Korea

요약

본 논문에서는 IEEE 802.16e OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access) 시스템을 기반으로 하는 WiBro (Wireless Broadband Internet) 시스템의 하향링크를 위한 셀 스캐닝 알고리즘에 대해 생각해 보았다. 기존의 셀 탐색 알고리즘에 대한 연구는 다른 세그먼트 (Segment) 번호를 사용하는 인접한 셀에 대한 연구가 주로 이루어졌다. 하지만 본 연구에서는 오류 발생 확률 (False Alarm Probability) 을 일정하게 유지 시키면서 같은 세그먼트 번호를 사용하는 멀리 떨어진 셀에서부터 날아오는 작은 전력의 프리앰블 (Preamble) 신호들도 스캐닝 할 수 있는 셀 스캐닝 알고리즘을 제안하고 그 성능을 모의실험을 통해서 확인해 보았다.

I. 서론

오늘날 OFDM 셀룰러 (Cellular) 시스템에서의 셀 탐색 (Cell Search) 알고리즘에 대한 연구가 이슈로 생각되어지고 다양하게 이루어지고 있다. 셀 탐색 알고리즘은 이동체 자신이 속해져 있는 셀과 인접해있는 셀에서부터 날아오는 프리앰블 신호를 잘 검출할 수 있는 알고리즘을 의미한다. 이와 같은 OFDM 셀룰러 시스템에서의 셀 탐색 알고리즘에 대한 연구는 새로운 프리앰블을 제안하고 그 프리앰블을 바탕으로 동기화 및 셀 탐색 알고리즘을 제안하는[1][2]와 W-CDMA 에서 사용하였던 계층적인 세 단계 셀 탐색 (Three-Step Cell Search) 알고리즘과 비슷한 OFCDM (Orthogonal Frequency and Code Division Multiplexing) 시스템에서의 알고리즘들[3][4]과 같이 많이 이루어져왔다. 이러한 셀 탐색 알고리즘에서 확장된 개념으로 셀 스캐닝 알고리즘이 있다. 셀 스캐닝 알고리즘은 이동체 자신이 속해져 있는 셀과 인접하고 있는 셀들에서 날아오는 프리앰블 신호뿐만 아니라 멀리 떨어져 있는 셀에서부터 날아오는 프리앰블 신호의 검출까지도 생각하는 알고리즘이다. 이러한 셀 스캐닝 알고리즘은 단순히 이동체가 수신 받고 있는 프리앰블 신호들 중에서 가장 큰 교차상관 값을 갖는 셀의 번호만 추정하면 되는 기존에 연구되었던 셀 탐색 알고리즘만으론 충분하지 않다. 따라서 여러 셀에서부터 날아오는 프리앰블 신호의 검출까지 할 수 있는 보다 더 강력한 셀 스캐닝 알고리즘 개발이 필요한 것이다. WiBro 시스템에서는 인덱스화된 프리앰블 부반송파 집합을 의미하는 세그먼트의 번호를 이용하여 셀에 따라서 정해진 각각의 세그먼트 번호를 사용하여 전송하게 되고 이 프리앰블을 통해서 셀 탐색이 이루어지게 된다. 서로 다른 세그먼트에 실려서 날아오는 신호들은 잘 검출해 낼 수 있지만 같은 세그먼트를 사용하는 신호들은 서로 간에 큰 간섭으로 작용하여 검출하기가 힘들게 된다. 또 거리가 먼 곳에서 날아오는 신호들도 경로 감쇄로 인하여 전력이 작아지게 되어 검출이 힘들어지게 된다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하고 여러 셀로부터

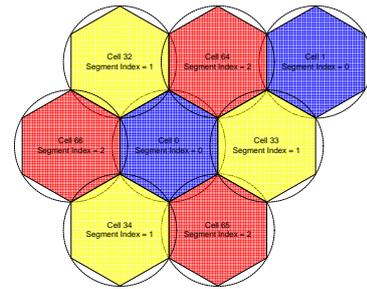


그림 1 시스템 모형

날아오는 신호들을 최대한 많이 검출할 수 있는 셀 스캐닝 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 같은 세그먼트 번호에 실려서 날아오는 작은 전력의 신호들을 효과적으로 찾을 수 있는 방법을 제시한다. 기존에 IEEE 802.16e OFDMA 시스템에서 수행되어졌던 셀 탐색 알고리즘 연구가 이동체가 위치하고 있는 기준 셀에서 날아오는 하나의 프리앰블 신호 검출만을 고려한 셀 탐색 알고리즘[5]이었다면 본 논문에서는 인접하지 않으면서 멀리 떨어져 있는 셀에서 날아오는 같은 세그먼트 번호를 사용하는 프리앰블 신호들 까지도 오류 발생 확률을 일정하게 유지시키면서 검출해 낼 수 있는 셀 스캐닝 알고리즘을 제안한다.

II. 시스템 모형

1. 시스템 모형

그림 1 과 같이 각각의 셀은 정해진 세그먼트 번호를 할당 받게 된다. 세그먼트 번호 s 와 셀 번호 i 와의 관계는 다음과 같다.[6]

$$s = \begin{cases} 0 & i \in I_0 \{0 \dots 31, 96, 99, 102, 105, 108, 111\} \\ 1 & i \in I_1 \{32 \dots 63, 97, 100, 103, 106, 109, 112\} \\ 2 & i \in I_2 \{64 \dots 95, 98, 101, 104, 107, 110, 113\} \end{cases} \quad (1)$$

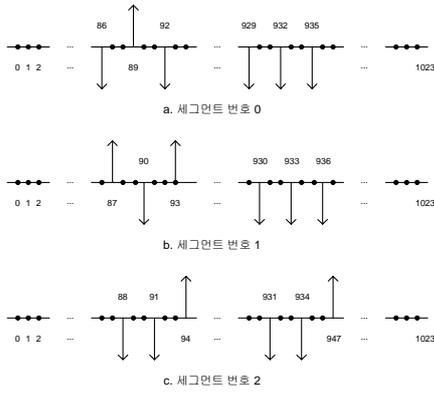


그림 2 주파수 영역에서 세그먼트 번호에 따른 프리앰블 부반송파의 배치 구조

기준 셀에 존재하는 이동체의 세그먼트 번호 s 의 k 번째 부반송파에서의 수신 신호 y_k^s 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_k^s = \sum_{i \in I_s} \sqrt{P_i} H_{i,k} c_{i,k} + N_k \quad (2)$$

P_i 는 i 번째 셀에서 날아오는 송신 프리앰블 신호의 전력이고 $c_{i,k}$ 는 송신 프리앰블 신호이며, N_k 는 잡음으로서 독립이며 평균이 0 이고 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 (Complex Gaussian) 랜덤 변수로 구성된다. I_s 는 s 번째 세그먼트에 속한 셀 번호들의 집합이며 $s \in \{0,1,2\}$ 이다. 채널 $H_{i,k}$ 는 셀 마다 독립적이며 모의실험 결과 분석시 편의를 위해서 OFDM 한 심벌이 통과하게 되는 페이딩 채널의 전력의 합은 1 이라고 가정하였다. 한 OFDM 심벌의 FFT 크기는 N 이며, 보호구간의 길이는 CP 라고 하였다.

2. 프리앰블

프리앰블은 그림 2 에서와 같이 세그먼트 번호에 따라서 서로 겹치지 않게 부반송파가 배치 되게 된다. 따라서 같은 세그먼트 번호를 쓰는 프리앰블끼리는 서로에게 간섭으로 작용하게 되어 검출이 어렵게 된다. 프리앰블 집합은 다음과 같이 정의된다.

$$P_s = s + 3 \cdot k \quad (3)$$

여기서 k 는 연속 인덱스 0~283 을 의미한다. 그림 2 에서와 같이 프리앰블 순열들 중에서 화살표 표시된 부반송파들만 전력이 증가된 형태로 특정한 의사잡음(PN) 부호를 갖는 BPSK 심벌로 변조되어 전송된다.

III. 동기화 기법 및 셀 스캐닝 알고리즘

1. 시간 동기 알고리즘

WiBro 시스템에서 시간 영역의 프리앰블은 주파수 축에서 3 개의 부반송파마다 하나씩 프리앰블 순열이 BPSK 심벌로 변조가 되기 때문에 유사하게 세 번 주기적으로 반복된다. 이러한 세 개의 유사한 서브 심벌이 나타난다는 특성을 이용하여 Schmidl[7] 알고리즘을 사용할 수 있다. 그러나 Schmidl 알고리즘의 특성상 보호구간에 대해서는 평평한 시간 metric 값이 형성되게 된다. 이러한 현상은 잡음으로 인하여 최댓값이 무작위로 바뀌게 되므로

정확한 시간 동기 추정이 어렵게 된다. 따라서 WiBro 시스템에서의 프리앰블이 실수 값만을 사용하기 때문에 중심을 기준으로 두 개의 서브 심벌은 켈레 복소수가 된다는 또 다른 특성을 이용하여 Park[8] 알고리즘을 사용해보자. 보다 더 정확한 시간 동기를 추정하게 된다. 그러나 매우 정확한 시간 동기를 추정할 수 있는 Park 알고리즘 역시 동기가 조금이라도 맞지 않으면 자기상관 값이 나타나지 않는다는 성질로 인하여 전 구간에 대해서 모두 계산을 해봐야 된다는 계산상 복잡도의 문제점이 있다. 이와 같이 Schmidl 과 Park 알고리즘이 가지고 있는 문제점을 해결하기 위해서 먼저 Schmidl 알고리즘을 통하여 특정 구간마다 샘플링을 하여 해당 샘플에 대한 시간 metric 을 계산하고 문턱 값을 설정하여 문턱 값 보다 높은 시간 metric 이 나온 샘플에 대해서는 그 샘플 주위에서 보다 정밀한 동기 추정 알고리즘인 Park 알고리즘을 적용하는 기법을 제안하였다. 이와 같은 기법을 통해서 계산상의 복잡도를 줄이면서도 정확한 시간 동기를 추정할 수 있게 된다.

2. 주파수 동기 알고리즘

시간 동기 알고리즘을 통하여 정확한 프레임 시작 위치를 추정하고 난 이후에 시간 영역에서 프리앰블의 보호구간을 이용한 자기상관을 통해 $-0.5 \sim 0.5$ 사이의 소수배 주파수 오차의 추정과 보상이 이루어지는 Van De Beek 알고리즘[9]을 사용한다.

3. 채널 보상 알고리즘 및 셀 탐색 알고리즘

시간 및 주파수 동기 추정 및 보상이 이루어진 후 FFT 결과를 통해 얻은 주파수 영역의 수신 신호를 바탕으로 셀 마다 각각 정해져 있는 모든 주파수 영역의 프리앰블 순열과의 교차상관을 통하여 셀 탐색이 이루어지게 된다. 초기 셀 탐색 시에는 채널추정이 이루어지지 않아 다중 경로 페이딩 환경에서는 채널로 인한 성능 열화가 생기게 된다. 따라서 인접한 부반송파가 겪게 되는 채널은 거의 변하지 않는다는 사실을 통하여 차동방법을 통해 채널로 인하여 생기는 성능 열화를 줄여줄 수 있다. 주파수 영역에서 셀 마다 특정한 정규화된 프리앰블 코드 d_k 의 차동벡터를 $P_{j,k} = d_{j,2k} d_{j,2k+1}^*$ 라고 정의하고 수신된 신호의 차동벡터를 $R_k = y_{2k}^s y_{2k+1}^{s*}$ 라 정의한다. 분석상의 편의를 위하여 분자, 분모에 $\frac{2}{K}$ 를 곱해주면 셀 탐색 metric 을 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기서 j 는 후보 프리앰블 번호, \hat{j} 는 셀 탐색 결과 추정된 프리앰블의 번호, K 는 순열의 총 길이가 된다.

$$\eta_j = \frac{\left| \frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} R_k P_{j,k} \right|^2}{\left(\frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} |R_k|^2 \right) \left(\frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} |P_{j,k}|^2 \right)} = \frac{\left| \frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} R_k P_{j,k} \right|^2}{\frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} |R_k|^2} \quad (4)$$

분모의 $\frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} |P_{j,k}|^2$ 항은 $|d_{j,k}|=1$ 이라 가정 하므로 1 이 된다. 추정된 셀 번호는 다음 식과 같이 수신된 신호의 차동벡터와 후보가 되는 프리앰블들의 차동벡터의 교차상관 값을 계산하고 각각 주파수 축에서의 전력을 합해 평균 취해주어 최댓값을 갖게 하는 후보 프리앰블의 번호가 될 것이다. 이렇게 상관 값을 전력의 합으로 평균 취해주는 것은 주파수 선택적 페이딩, 인접 셀과의 간섭

그리고 잡음에 대한 영향을 줄여주는 결과를 가져온다.

$$\hat{j} = \arg \max_j \{\eta_j\} \quad (5)$$

4. 오류 발생 확률을 유지시키는 문턱 값 설정

신호가 존재 하지 않을 때 신호가 발생 되었다고 할 확률을 오류 발생 확률이라고 정의한다. 이와 같은 오류 발생 확률을 일정하게 유지시키기 위해선 문턱 값 설정이 필요하다. 전송 신호가 존재하지 않으므로 주파수 영역에서의 수신 신호는 $y_k^s = N_k$ 라 표현 할 수 있고 수신된 신호의 차동벡터는 $R_k = y_{2k}^s y_{2k+1}^{s*} = N_{2k} N_{2k+1}^*$ 같이 표현할 수 있다. 분모의 $\frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} |R_k|^2$ 항은 큰 수의 법칙으로 인하여 $\frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} |R_k|^2 \simeq E(|R_k|^2) = \sigma^4$ 과 같이 상수로 근사화 될 수 있다. 따라서 셀 탐색 metric 는 다음과 같다.

$$\eta_j = \frac{\left| \frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} R_k P_{j,k} \right|^2}{\sigma^4} \quad (6)$$

분자의 항 $\left| \frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} R_k P_{j,k} \right|^2$ 을 랜덤변수 X 로 치환하면 X 는 랜덤변수들을 많이 더한 것의 제곱이므로 가우시안 랜덤변수의 제곱인 자유도가 2 인 중심 카이제곱 랜덤변수로 근사화 시킬 수 있다. 여기서 카이제곱 랜덤변수는 제곱이 되는 가우시안 랜덤변수의 특성을 따르게 되는데 $\frac{2}{K} \sum_{k=0}^{K/2-1} R_k P_{j,k}$ 의 평균과 분산은 각각 0, $\frac{1}{K} \sigma^4$ 이다. 신호가 존재하지 않을 때 셀 탐색 metric 이 특정 문턱 값보다 작거나 같아질 확률은 셀 탐색 metric 의 CDF 와 같아지며 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\Pr\left(\frac{X}{\sigma^4} \leq \gamma\right) = \Pr(X \leq \sigma^4 \gamma) = P_x(\sigma^4 \gamma) \quad (7)$$

여기서 랜덤변수 X 의 CDF 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_x(x) = 1 - \exp\left(-\frac{Kx}{2\sigma^4}\right), x \geq 0 \quad (8)$$

따라서 셀 탐색 metric 이 특정 문턱 값 보다 작거나 같아질 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_x(\sigma^4 \gamma) = 1 - \exp\left(-\frac{K\sigma^4 \gamma}{2\sigma^4}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{K\gamma}{2}\right) \quad (9)$$

단혀져있는 수식이므로 다음과 같이 문턱 값에 대한 식으로 쉽게 표현 할 수 있다.

$$\gamma = -\frac{2}{K} \ln\{1 - P_x(\sigma^4 \gamma)\} \quad (10)$$

이와 같이 원하는 오류 발생 확률에 따라서 문턱 값을 수식적으로 알아낼 수 있는 것이다. 이렇게 알아낸 수식적 분석을 모의실험을 통해서 그림 3 과 같이 비교 해보았더니 두 개의 그래프가 겹치게 나왔다.

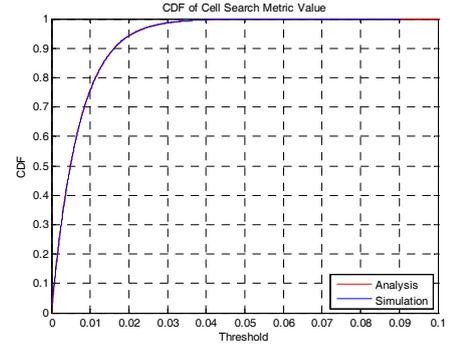


그림 3 신호가 존재하지 않을 때 문턱 값에 따른 셀 탐색 metric 값의 CDF 그래프 비교

5. 채널 추정 및 소거 알고리즘

셀 탐색 알고리즘을 통하여 셀 번호를 추정하고 이를 통하여 채널 추정 및 소거를 할 수 있다. 먼저 채널 추정 방법으로는 Modified LS (Least Square) 방법[10]을 사용하였다. 추정된 셀 번호를 이용하여 프리앰블 신호를 알 수 있고 이를 수신된 신호에 나누어 주어 추정된 프리앰블 신호가 통과한 채널과 간섭신호 그리고 잡음의 항으로 표현할 수 있다.

$$y_k^s / c_{j,k} = \sqrt{P_j} H_{j,k} c_{j,k} / c_{j,k} + \sum_{i \neq j} \sqrt{P_i} H_{i,k} c_{i,k} / c_{j,k} + N_k / c_{j,k} \quad (11)$$

$\sqrt{P_j} H_{j,k} + I_k + N_k$ 식을 Z_k 라 치환하고 추정된 프레임별 패턴에 맞게 부반송파에 배치하고 IFFT 를 해준다.

$$\mathbf{z} = [0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ 0 \ Z_0 \ 0 \ 0 \ Z_1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0 \ Z_{K-2} \ 0 \ 0 \ Z_{K-1} \ 0 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0 \ 0] \\ \mathbf{z} = \text{IFFT}(\mathbf{Z}) \quad (12)$$

$$\mathbf{z} = z(n), \quad 0 \leq n \leq N$$

다음과 같이 시간영역에서 샘플된 신호를 다음 조건에 맞게 다시 연산을 해준다.

$$q(n) = \begin{cases} z(n) & \text{if } |z(n)| > \text{Threshold and } n \leq CP \\ 0 & \text{o.w} \end{cases} \quad (13)$$

$$\mathbf{q} = q(n), \quad 0 \leq n \leq N$$

마지막으로 벡터 \mathbf{q} 를 FFT 취해 주파수 영역으로 바꿔주면 $\hat{\mathbf{H}} = \text{FFT}(\mathbf{q})$ 과 같이 추정된 채널 값을 얻을 수 있다.

추정된 채널과 추정된 프리앰블 신호를 통하여 다음과 같은 소거 알고리즘을 수행할 수 있다. 여기서 e 는 채널 추정 오차이다.

$$y_k^s - \sqrt{P_j} \hat{H}_{j,k} c_{j,k} \\ = \sqrt{P_j} H_{j,k} c_{j,k} - \sqrt{P_j} \hat{H}_{j,k} c_{j,k} + I_k + N_k \\ = \sqrt{P_j} e c_{j,k} + I_k + N_k \quad (14)$$

다음과 같은 소거를 통해서 다음 셀 탐색시 처음 추정된 셀의 프리앰블 신호에 대한 영향을 줄여줄 수 있다. 이러한 소거 알고리즘을 통해 얻은 소거된 신호를 셀 스캐닝 알고리즘에 적용하여 상대적으로 전력이 큰 프리앰블 신호에 가려져 있던 신호를 찾을 수 있게 되는 것이다. 이를 반복적으로 적용하면 같은 세그먼트를 사용하는 작은

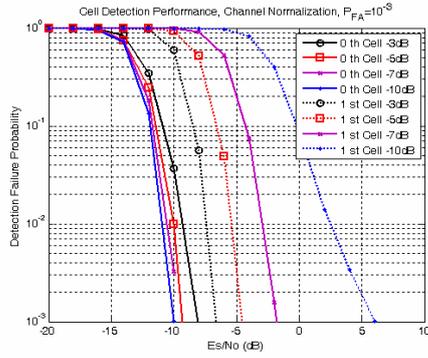


그림 4 셀 스캐닝 성능, $P_{FA}=10^{-3}$

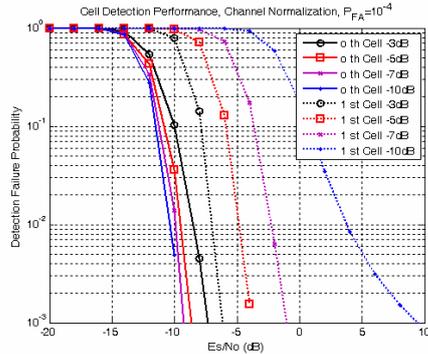


그림 5 셀 스캐닝 성능, $P_{FA}=10^{-4}$

전력의 프리앰블 신호들도 스캐닝 할 수 있는 것이다.

IV. 모의실험 결과 및 분석

1. 모의 실험 환경

모의실험 환경은 표 1 과 같다. 모의실험 결과 그래프에서 가로축 E_s/N_0 은 데이터 OFDM 심벌의 한 부반송파를 기준으로 하였다. 본 논문에서는 이동체가 위치하고 있는 기준 셀이 0 번일 때 같은 세그먼트를 사용하는 프리앰블에 대한 영향만을 보기 위해서 셀 0 번과 셀 1 번에서 전송되는 프리앰블 신호 두 개만이 존재하는 시스템을 고려하였다. 또 경로 감쇄 모델을 쓰지 않고 0 번 셀을 기준으로 두 셀의 송신 전력의 차는 -3, -5, -7, -10dB 과 같이 임의로 정해주었다.

2. 모의 실험 결과 및 분석

그림 4 는 오류 발생 확률이 10^{-3} 으로 일정하게 유지될 때 두 셀 간의 전력 차이에 따른 기준 셀 0 번과 간섭 셀 1 번의 검출 오류 확률에 대한 성능 그래프이다. 전체적으로 기준 셀 0 번의 경우 간섭 셀보다 전력이 크기 때문에 검출 성능이 더 좋고 비교적 낮은 SNR 값에서도 검출을 잘 해냄을 알 수 있다. 두 셀이 같은 세그먼트 번호를 사용하므로 서로에게 간섭으로 작용하게 되며 기준 셀의 경우 간섭 셀의 전력이 높을수록 성능이 나빠짐을 알 수 있다. 이는 전력 차이가 적을수록 더 큰 간섭으로 작용하기 때문이다. 반대로 간섭 셀의 경우는 전력 차이가 적게 날수록 성능이 좋게 나옴을 알 수 있다. 두 셀의 성능 차이는 목표 검출 오류 확률을 10^{-2} 라고 하였을 때 두 셀 간의 전력 차이만큼만 밀린 형태로 결과가 나타났다. 이는 제안하는 셀 스캐닝 알고리즘이 강력함을 알 수 있게 해준다. 하지만 두 셀 간의 전력 차이가 10dB 이상 날 경우는 간섭 셀의 전력이 너무 작게 되어 잡음의 크기가 줄어들어도

변수	값
채널 모형	ITU-R Vehicular A
이동체 속도	10km/h
FFT 크기 (N)	1024
보호구간 길이(CP)	128

표 1 모의실험 변수

더이상 성능 향상이 이루어지지 않고 기울기가 완만해지게 됨을 알 수 있었다. 그림 5 는 오류 발생 확률이 10^{-4} 으로 일정하게 유지 될 때 두 셀 간의 전력 차이에 따른 기준 셀 0 번과 간섭 셀 1 번의 검출 오류 확률에 대한 성능 그래프이다. 오류 발생 확률을 10^{-4} 으로 유지시키기 위해 문턱값이 커짐에 따라서 검출 성능의 열화가 있지만 전체적으로 오류 발생 확률이 10^{-3} 인 그림 4 와 비슷한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 WiBro 시스템의 하향링크를 위한 셀 스캐닝 알고리즘에 대해서 생각해 보았다. 제안한 셀 스캐닝 알고리즘 성능을 통해서 오류 발생 확률을 일정하게 유지시키면서도 좋은 셀 검출 성능을 나타냄을 보였다. 그러나 간섭 셀 1 번을 검출 시 높은 SNR 에서 채널 추정 오차로 인한 영향으로 기존에 적용했던 문턱 값으로는 오류 발생 확률이 일정하게 유지 되지 않는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 문제점은 다음 연구를 통해 개선해야 되는 부분으로 남겨 놓는다.

참고문헌

- [1] K.S. Kim, K.H. Chang, S.W. Kim, and Y.S. Cho, "A preamble-based cell searching technique for OFDM cellular systems," *Proc. IEEE Vehic. Techn. Confer. (VTC)*, pp. 2471-2475, Orlando, U.S.A., October 2003.
- [2] Jin-Woo Lee and Yong-Hwan Lee, "Rapid cell search in OFDM-based cellular systems," *Proc. IEEE Vehic. Techn. Confer. (VTC)'05*, pp.1273-1277, May 2005
- [3] M. Tanno, H. Atarashi, K. Higuchi, and M. Sawahashi, "Three-step cell search algorithm employing synchronization and common pilot channels for OFCDM broadband wireless access," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E86-B, pp. 325-334, January 2003.
- [4] M. Fujii, "Cell search scheme embedded with carrier frequency synchronization in broadband OFDM-CDM systems," *Proc. IEEE Global Telecommun. Confer. (Globecom)*, vol.1, pp. 17-21, Taipei, Taiwan, November 2001.
- [5] Cheng, Peng; Zhang, Zhaoyang; Zhou, Xiangwei; Li, Jing; Qiu, Peiliang, "A Study on Cell Search Algorithms for IEEE 802.16e OFDMA Systems, " *Proc. Wireless Commun. Netw. Confer. (WCNC)*, vol 1, pp.1848-1853 March 2007
- [6] IEEE 802.16e/D5-2004, *Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems – Amendment for Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands*, November, 2004
- [7] T.M. Schmidl and D.C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, pp. 1613-1621, December 1997
- [8] B. Park, H. Cheon, C. Kang, and D. Hong, "A novel timing estimation method for OFDM systems," *IEEE Commun. Letters*, vol. 7, pp. 239-241, May 2003.
- [9] J.-J. Van De Beek, M. Sandell, and P.O. Borjesson, "ML estimation of time and frequency offset in OFDM systems," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 45, pp. 1800-1805, July 1997.
- [10] J.-J. van de Beek, O. Edfors, M. Sandell, S. K. Wilson, and P. O. Börjesson, "On channel estimation in OFDM systems," in *Proc. IEEE Vehic. Techn. Confer. (VTC)*, vol. 2, pp. 815-819, July 1995.