

OFDM 기반의 셀룰라 시스템을 위한 동기화 및 셀 탐색 기법

*김태곤, **김광순, **장경희, *김성웅⁰, *조용수

*중앙대학교, **한국전자통신연구원

A Synchronization & Cell Searching Technique for OFDM-based Cellular Systems

*Tae-Gon Kim, **Kwang-Soon Kim, **Kyung-Hi Chang, *Sung-Woong Kim⁰, and *Yong-Soo Cho

*Chung-Ang University, **Electronics and Telecommunication Research Institute

yscho@cau.ac.kr

요 약

본 논문에서는 OFDM 기반의 셀룰라 시스템의 하향링크를 위한 동기화 프리앰블 및 셀 탐색 프리앰블을 제안한 후, 제안된 프리앰블을 이용한 동기화 및 셀 탐색 기법을 설명하고 그 성능을 분석한다. 동기화는 연속적으로 전송되는 신호를 이용한 초기 심볼 타이밍 추정과 동기화 프리앰블을 이용한 프레임 검출, 동기화 프리앰블을 이용한 시간 및 주파수 동기의 수행 과정으로 이루어지며, 셀 탐색은 셀 탐색 프리앰블의 주파수영역에서의 고유한 패턴을 이용하여 이루어진다.

1. 서론

Beyond IMT-2000 시스템에서는 100Mbps 이상의 고속 데이터 전송이 요구된다. OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식은 주파수 효율이 높고, 주파수 선택적 페이딩 채널에 쉽게 대처할 수 있으며, 간단한 단일탭 등화기로 고속 전송시 급격히 증가하는 심볼간 간섭의 보상이 가능하다. 또한, FFT 를 사용하여 고속으로 구현할 수 있기 때문에 최근 고속 데이터 무선 통신을 위한 전송방식으로 무선 LAN, BWA, DAB, DVB, ADSL, VDSL 등에 채택되어 왔다. 특히, 이동통신시스템에서는 저/중/고속의 데이터율을 동일한 무선전송 platform 에서 지원하는 것이 바람직하기 때문에, 부반송파 수와 부채널의 변조방식을 채널 상황에 따라 조절함으로써 서비스의 종류를 쉽게 다양화 할 수 있는 OFDM 기반기술은 Mobile Access 전송방식 후보 중에 가장 가능성 있는 방식이 될 수 있다. 또한, OFDM 방식은 부채널의 특성을 쉽게 monitoring 할 수 있기 때문에 동적채널할당기법과 같은 효율적인 자원할당 기법과 결합하여 주파수 효율을 크게 향상시킬 수 있으며, OFDM 방식은 WP8F 보고서에서 IMT-2000 이후의 기술로 제안된 MIMO 와 스마트 안테나 기술과 결합하여 무선 link budget 또는 채널용량을 크게 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 4 세대 Macro/Micro Cell 이동통신시스템의 Requirement 를 만족하는 OFDM 기반의 셀룰라 시스템의 하향링크를 위한 동기화 및 셀 탐색 기법을 제안한다.

기존의 OFDM 기반의 시스템으로는 디지털 오디오 방송(DAB), 디지털 비디오 방송(DVB), IEEE 802.11a, Hiperlan/2 등이 있다[1]-[5]. 이 중 DAB 는 널 심볼과 위상기준심볼(Phase Reference Symbol)을 프레임 동기에 사용하고 DVB 는 파일럿을 프레임 동기에 사용한다. 또한, IEEE802.11a 나 Hiperlan/2 에서는 프리앰블을 이용하여 하

향링크 버스트(burst)의 동기를 잡는다[6]. 그러나, 기존의 OFDM 기반의 시스템들은 셀룰라 시스템이 아니기 때문에 OFDM 기반의 셀룰라 시스템에서 기존의 구조로 동기화 및 셀 탐색을 수행하기가 어렵다. 따라서 OFDM 기반의 셀룰라 시스템에서 동기화 및 셀 탐색을 수행하기 위해서는 기존의 OFDM 기반의 시스템과는 다른 프리앰블 설계가 필요하다. 본 논문에서는 OFDM 기반의 셀룰라 시스템의 하향링크 동기화를 수행하기 위한 동기화 프리앰블(synchronization preamble)과 셀 탐색을 수행하기 위한 셀 탐색 프리앰블(cell searching preamble)로 이루어진 새로운 프리앰블을 제안하고, 제안된 프리앰블을 이용한 동기화 및 셀 탐색 기법을 설명하고 그 성능을 분석한다.

2. 동기화 기법

그림 1 은 본 논문에서 제안할 프리앰블을 포함하는 고속 패킷 통신을 위한 OFDM 기반의 셀룰라 시스템의 개략적인 하향링크 프레임 구조를 보여준다. 그림 1 과 같이 한 프레임의 앞 부분에는 T_p 길이를 가지는 프리앰블이 있으며, 프리앰블은 T_{ps} 의 길이를 가지는 동기화 프리앰블과 $T_{pc} (=T_p - T_{ps})$ 의 길이를 가지는 셀 탐색 프리앰블로 이루어진다. 동기화 프리앰블은 시간 및 주파수 동기를 맞추기에 적합한 구조를 가지며, 셀 탐색 프리앰블은 셀 탐색에 적합한 구조를 가진다. 또한, 데이터가 전송되는 부분에는 시간축으로 N_f 개의 심볼 간격, 주파수축으로 N_f 개의 부반송파 간격으로 분산된 파일럿 심볼을 포함한다. 이러한 프레임 구조는 프리앰블을 이용하여 시간 및 주파수의 초기 동기를 맞추고 셀 탐색을 수행하기에 적합하며, 초기 동기를 이룬 이후에는 시간과 주파수를 추적(tracking)할 수 있도록 구성되어있다.

기존의 OFDM 기반의 무선 LAN 과 같은 버스트 모델의 경우에는 신호 검출을 포함한 모든 초기 동기화 과정

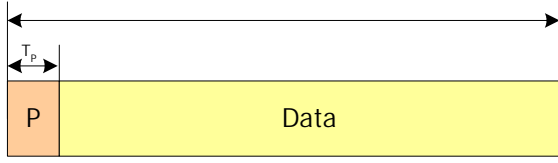


그림 1. 개략적인 프레임 구조

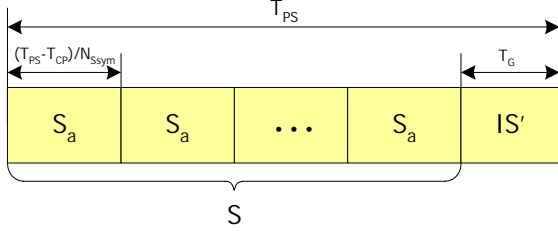


그림 2. 동기화 프리앰블 구조

이 프리앰블을 이용하여 수행된다. 하지만 OFDM 기반의 셀룰라 시스템에서는 파일럿 심볼과 다른 사용자에게 전송되는 데이터에 의해서 항상 연속적으로 신호가 전송된다. 따라서 이렇게 연속적으로 전송되는 신호를 이용하여 초기 심볼 동기를 잡은 후, 이를 이용한 간단한 연산을 통해서 프레임 동기를 수행할 수 있도록 S 심볼과 IS' 심볼로 구성된 새로운 동기화 프리앰블을 제안한다. 이 S 심볼은 프레임 동기화를 수행함과 동시에 대략적인 주파수 동기화와 심볼 동기화를 수행할 수 있도록 구성된다.

동기화 프리앰블은 T_{PS} 의 길이를 가지며 1개의 S 심볼과 1개의 IS' 심볼로 구성된다. 그림 2는 동기화 프리앰블의 구조를 보여준다. 여기서 T_{PS} 는 OFDM 심볼 1개의 길이이고 S 심볼은 OFDM 송신 신호의 보호구간의 길이를 제외한 길이인 유효 OFDM 심볼 길이이다. IS' 심볼은 OFDM 송신 신호의 보호구간과 같은 길이이며 S 심볼을 180° 위상회전 시킨 심볼에서 앞서서부터 보호구간의 길이만큼을 취해 사용하며, S 심볼은 N_{Sym} 개의 S_a 심볼로 구성된다. 이러한 동기화 프리앰블의 구조에 따라 S 심볼과 IS' 심볼의 자기상관의 실수부는 음의 부호를 가지는 반면 동일한 구조의 자기상관을 동기화 프리앰블을 제외한 연속적으로 전송되는 OFDM 심볼에 적용하였을 때, 자기상관의 실수부는 양의 부호를 가진다. 이러한 특성을 이용하여 연속적으로 전송되는 OFDM 심볼의 보호구간을 이용한 자기상관을 통해 초기 심볼 타이밍을 추정하고, 같은 구조를 가지는 자기상관의 위상을 검사하여 동기화 프리앰블의 수신여부를 판단하는 간단한 계산에 의해 프레임의 시작 위치를 추정할 수 있다. 식 (1)은 동기화 프리앰블을 이용한 프레임 검출 과정을 나타낸다. 이러한 프레임 검출 과정은 소수배 주파수 오프셋의 영향을 받으므로 초기 심볼 타이밍 추정과정에서 소수배 주파수 오프셋을 함께 추정하여 보상한다. 식 (1)에서 $y(n)$ 은 시간영역 수신신호를, N_{CP} 는 보호구간의 길이를, N_{FFT} 는 FFT 크기를, \hat{t}_F 는 프레임의 시작 위치를 나타낸다.

$$f_n = \sum_{l=0}^{N_{CP}-1} y^*(n+l)y(n+l+N_{FFT})$$

$$\Gamma_n = \text{sign}(\text{Re}\{f_n\}), \quad \text{sign}(p) = \begin{cases} 1 & \text{if } p \geq 0 \\ -1 & \text{if } p < 0 \end{cases}$$

$$\hat{t}_F = n \quad \text{if } \Gamma_n = -1 \quad (1)$$

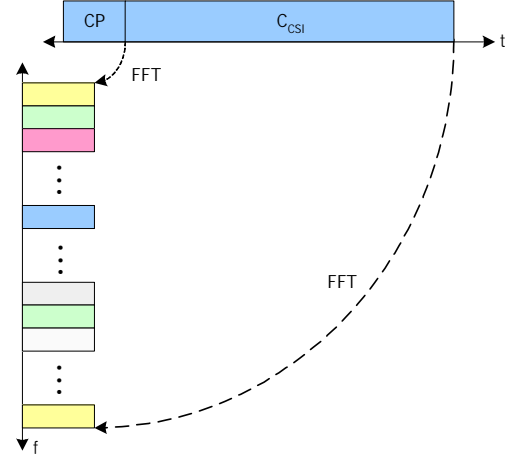


그림 3. 셀 탐색 프리앰블 구조

또한 S 심볼의 N_{Sym} 번 반복되는 구조를 통해 시간영역 자기상관의 위상값을 이용하여 $-N_{Sym}/2$ 에서 $N_{Sym}/2$ 범위의 부반송파 간격으로 정규화된 반송파 주파수 오프셋을 추정할 수 있으며, S 심볼과 IS' 심볼의 구조를 이용하여 교차상관이나 자기상관을 구하여 타이밍 동기를 추정할 수 있다. 초기 동기화 과정은 식 (1)과 같이 동기화 프리앰블을 이용하여 프레임의 시작 위치를 검출한 후, 동기화 프리앰블 S 심볼의 반복되는 구조를 이용하여 대략적인 반송파 주파수 오프셋을 추정하고, 동기화 프리앰블의 교차상관을 이용하여 정확한 타이밍 동기를 얻은 후, 셀 탐색 프리앰블의 보호구간을 이용한 자기상관을 통하여 -0.5 에서 0.5 범위의 미세 반송파 주파수 오프셋을 추정하는 과정으로 수행된다. 초기 동기화가 이루어진 이후에는 매 OFDM 심볼의 보호구간을 이용한 자기상관을 통하여 주파수 추적이 이루어지며 매 프레임마다 전송되는 동기화 프리앰블의 교차상관을 이용하여 시간 추적이 이루어진다.

3. 셀 탐색 기법

OFDM 기반의 시스템에서는 주파수영역에서 부반송파별로 신호를 할당할 수 있다. 이러한 OFDM 방식의 특징을 이용하여 셀에 따라 주파수 영역에서 고유한 패턴을 갖는 독특한 셀 탐색 프리앰블을 구성하여 효율적이고 강건한 셀 탐색을 수행할 수 있다. 그림 3은 셀 탐색 프리앰블의 구조를 나타낸다. 셀 탐색 프리앰블은 T_{PC} 의 길이를 가지며 셀마다 고유한 패턴을 갖는다. OFDM 기반의 셀룰라 시스템에서 8^L 개의 셀 종류가 있다고 할 때, T_{PC} 를 OFDM 심볼 L개의 길이로 하고, 셀 번호 $C = \sum_{k=1}^L 8^{L-k} c_k$ 에 따라 k번째 심볼에 주파수 축에서 8개의 다른 직교하는 패턴 중 $C_{c_k, m}$ 번째 부반송파에만 정해진 패턴을 송신할 수 있다. 또, 8^2 개의 셀 종류가 있다고 할 때, $L=1$ 로 하고, 셀 번호 $C = 8c_1 + c_2$ 에 따라, $\{C_{c_1, m}, m=0, \dots, M-1\}$ 의 부반송파에만 송신을 하고, 송신하는 부반송파에 길이가 M이고 교차상관 특성이 좋은 수열 중 c_2 번째 수열을 실어 이동국에서 셀을 탐색할 수 있도록 하는 셀 탐색 프리앰블을 구성할 수 있다.

셀 탐색 프리앰블을 이용한 셀 탐색은 수신된 셀 탐색 프리앰블을 이용하여 이루어진다. 셀 탐색 프리앰블에서 8개의 셀을 고려한다고 가정할 때, 각 셀은 셀 번호 C에

표 1. 모의실험을 위한 시스템 파라미터

반송파 주파수(f_c)	2 GHz
대역폭	20 MHz
FFT 크기(N_{FFT})	2048
데이터 구간(T_d)	102.4 us
보호구간(T_G)	25.6 us
심볼 구간(T_{sym})	128 us

표 2. 프레임 동기 성능

Channel / Velocity	SINR 0dB		SINR 5dB	
	FA	DF	FA	DF
AWGN (0km/h)	$<2.0*10^{-4}$	$<2.0*10^{-4}$	$<2.0*10^{-4}$	$<2.0*10^{-4}$
Pedestrian Ch B (3km/h)	$1.28*10^{-2}$	$<2.0*10^{-4}$	$2.0*10^{-4}$	$<2.0*10^{-4}$
Vehicular Ch A (100km/h)	$6.68*10^{-2}$	$4.0*10^{-4}$	$7.4*10^{-3}$	$<2.0*10^{-4}$

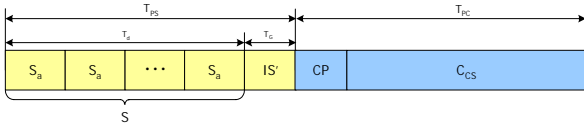


그림 4. 모의실험을 위한 프리앰블 구조

따라 C_{CS} 심볼의 C 에 해당하는 부반송파 집합 S_c 에만 신호를 송신한다. 셀 탐색은 수신된 주파수 영역의 셀 탐색 프리앰블을 이용하여 C_{CS} 심볼의 각 부반송파 집합에 대해 전력의 합을 최대로 하는 C 를 찾아서 셀 번호를 구할 수 있다. 이 경우 셀 탐색 과정은 식 (2)로 표현된다. 식 (2)에서 $Y_{CS}(k)$ 는 수신된 셀 탐색 프리앰블 심볼의 k 번째 부반송파에 해당하는 신호를 나타낸다. S_c 는 셀 번호가 c 일 때 셀 탐색 프리앰블 심볼의 부반송파 집합을 나타낸다. 수신된 셀 탐색 프리앰블에서 추정된 셀 번호, \hat{C} 는 셀 탐색 프리앰블 심볼의 부반송파 집합의 전력합이 최대인 셀 번호를 선택한다.

$$\hat{C} = \arg \max_c \sum_{k \in S_c} |Y_{CS}(k)|^2 \quad (2)$$

4. 모의실험

본 절에서는 본 논문에서 제안된 프리앰블을 이용한 프레임 동기 성능 및 셀 탐색 기법의 성능을 분석하였다. 표 1은 모의실험에 사용된 시스템 파라미터를 나타낸다. 모의실험에서는 다중경로 페이딩 채널 환경에서 동기화 및 셀 탐색 성능을 분석하기 위하여 ITU-R SISO Channel Model을 사용하였다.

그림 4는 모의 실험에 사용된 프리앰블의 구조를 보여준다. 동기화 프리앰블은 하나의 OFDM 심볼의 길이를 가지며 반복되는 S_a 심볼로 구성된 S 심볼과 S 심볼과 180° 의 위상차를 가지는 IS' 심볼로 이루어진다. 셀 탐색 프리앰블은 1개의 OFDM 심볼의 길이를 가지며 셀 번호에 따라 8개의 부반송파 집합 중 하나에만 신호를 전송한다.

표 2는 초기 심볼 타이밍 추정과 프레임 검출의 두 단계로 이루어지는 프레임 동기의 성능을 나타낸다. 표 2에서 인접셀간 간섭은 백색잡음으로 모형화되었으며, $<2.0*10^{-4}$ 는 $2.0*10^{-4}$ 미만의 확률을 나타낸다. 표 2에서 보는 바와 같이 프레임 동기 성능은 이동속도가 낮은 채널일수록 더 좋은 성능을 나타내며 가장 성능이 열악한 100km/h의 이동속도를 가지는 Vehicular Channel A의 경우 SINR 5dB에서 $7.4*10^{-3}$ 의 FA(false alarm)과 $2.0*10^{-4}$ 미

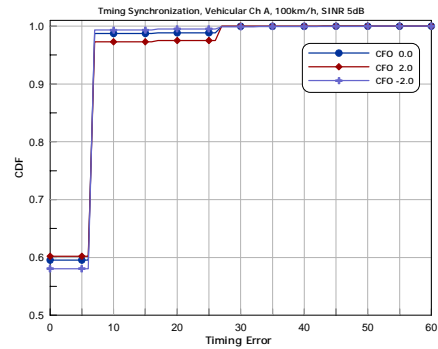
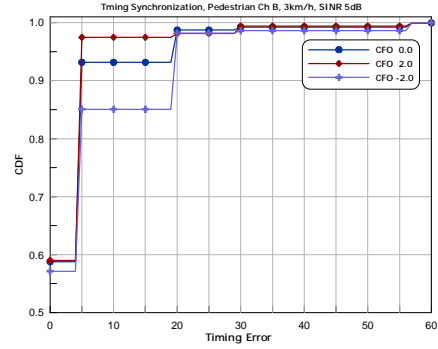


그림 5. 타이밍 동기 추정 성능

만의 DF(detection failure)을 보여준다.

그림 5는 타이밍 동기의 추정 성능을 타이밍 오차에 따른 CDF로 나타낸 것이다. 그림 5에서 인접셀간 간섭은 백색잡음으로 모형화되었으며, $-2.0 \sim 2.0$ 의 반송파 주파수 오프셋을 고려하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이 타이밍 동기의 추정 오차는 채널의 최대 시간 지연에 민감하며, SINR 5dB에서 3km/h의 이동속도를 가지는 Pedestrian Channel B의 경우 30 샘플이내의 오차가 발생할 확률이 0.98 이상이며 최대 57 샘플의 오차가 발생하고, 100km/h의 이동속도를 가지는 Vehicular Channel A의 경우 27 샘플이내의 오차가 발생할 확률이 0.99 이상이며 최대 50 샘플의 오차가 발생한다.

그림 6은 동기화 프리앰블을 이용한 대략적인 반송파 주파수 오프셋 추정과 셀 탐색 프리앰블의 보호구간을 이용한 미세 반송파 주파수 오프셋 추정을 포함한 반송파 주파수 오프셋 추정의 성능을 나타낸다. 그림 6에서 보는 바와 같이 이동국의 이동속도가 높을수록 반송파 주파수 오프셋의 추정 성능은 떨어지며, 3km/h의 이동속도를 가지는 Pedestrian Channel B의 경우 SINR 3dB 이상에서 MSE는 10^{-4} 이하가 되며, Vehicular Channel A에서는 100km/h의 이

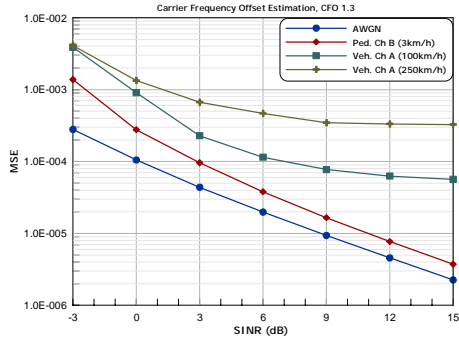


그림 6. 반송파 주파수 오프셋 추정 성능

동속도를 가지는 경우 SINR 8dB 이상에서 MSE 는 10^{-4} 이하가 되고 250km/h 의 이동속도를 가지는 경우 SINR 9dB 이상에서 MSE 는 $5 \cdot 10^{-4}$ 이하가 된다.

그림 7 은 셀 탐색 성능 분석을 위한 모의 실험 시나리오를 보여준다. 셀은 최대 8 개까지 고려하며 각 셀의 반경은 10km 이다. 이동국은 Cell 0 과 Cell 1 의 기지국 간을 잇는 직선 위에 있다고 가정하고 성능 분석을 수행한다. 이 때 기지국과 이동국 간의 거리로 인한 전파 지연은 $3.3\mu s/km$ 이며 셀 환경에서 기지국과 이동국 간의 거리로 인한 경로 손실은 COST-231 에서 제안된 Hata Model 을 사용하였다. 모의실험에서 SNR 은 5dB 로 고정되며 Cell 0 의 기지국과 이동국의 거리는 7km 에서 12km 까지 0.5km 간격으로 고려하여 거리에 따라 SINR 은 변하게 된다.

그림 8 은 각 채널 환경에 따른 셀 탐색 성능을 나타낸다. 그림 8 에서 거리는 Cell 0 의 기지국과 이동국의 거리를 나타내며, 2 개의 셀을 고려하여 1 개의 인접셀이 존재할 경우 7~12km 의 거리에 따라 SINR 은 2.89~5.96dB 가 되며 8 개의 셀을 고려할 경우 SINR 은 1.53~7.20dB 가 된다. 그림 8 에서 보는 바와 같이 7~9.5km 까지는 주어진 셀 번호를 0.999 이상의 확률로 찾아내며 셀 경계인 10km 에서는 0.5 이하의 확률을 가져서 Cell 0 가 아닌 인접 셀의 셀 번호를 찾을 확률이 존재한다. 셀 탐색을 수행할 경우 셀 경계에서는 인접 셀의 기지국과 이동국과의 거리가 같으므로 인접한 셀 중 어떠한 셀의 셀 번호를 찾더라도 무방하므로 셀 탐색 성능은 매우 강건한 특성을 지닐 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 OFDM 기반의 셀룰라 시스템을 위한 동기화 프리앰블 및 셀 탐색 프리앰블을 제안하고, 제안된 프리앰블을 이용한 동기화 및 셀 탐색 기법을 설명하였으며, 모의실험을 통하여 그 성능을 분석하였다. 본 논문에서 제안된 동기화 프리앰블은 반복되는 구조를 가지는 S 심볼, S 심볼과 180° 위상차이를 가지는 IS' 심볼로 구성되어 OFDM 기반의 셀룰라 시스템의 프레임 동기, 시간 및 주파수 초기 동기에 적합하며, 셀에 따라 주파수 영역에서 고유한 패턴을 갖는 셀 탐색 프리앰블은 효율적이며 강건한 셀 탐색을 가능하게 한다.

참고 문헌

[1] IEEE 802.11a, High Speed Physical Layer in the 5GHz Band, 1999.

Cell Scenario

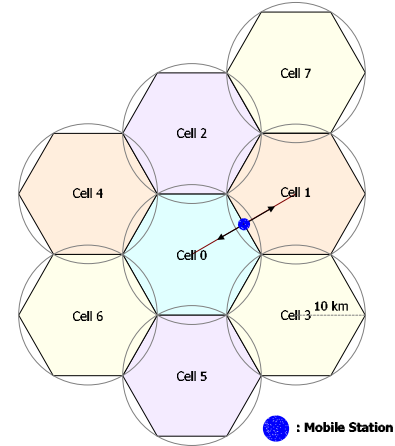
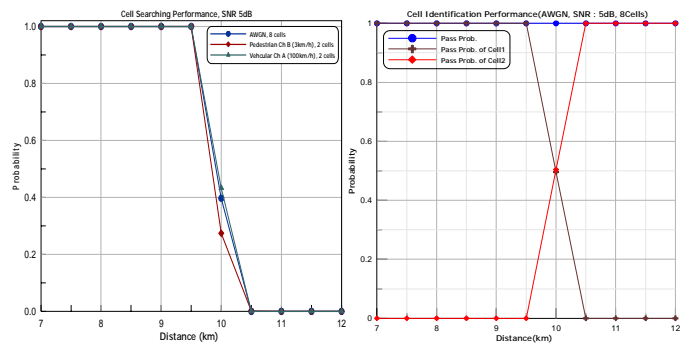
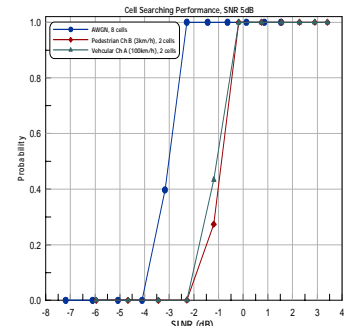


그림 7. 셀 탐색 성능분석을 위한 모의실험 시나리오



(a) 거리에 따른 셀 탐색 성능



(b) SINR 에 따른 셀 탐색 성능

그림 8. 셀 탐색 성능

- [2] ETSI BRAN, Broadband Radio Access Networks(BRAN) HIPERLAN Type 2; Physical (PHY) layer, TS 101 475 v1.1.1 Apr. 2000.
- [3] ETSI EN 300 401, "Radio broadcasting systems; digital audio broadcasting (DAB) to mobile, portable and fixed receivers," V1.3.2 (2000-09).
- [4] ETSI EN 300 799, Digital video broadcasting (DVB); framing, structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television, June 1999.
- [5] IEEE 802.16ab-01/01r1, "An Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems Part A: Systems between 2 and 11 GHz," July 2001
- [6] R.V. Nee, R. Prasad, "OFDM Wireless multimedia communications," Artech House, 2000.