

OFDM 기반의 SFN 환경에서의 멀티캐스트 커버리지 예측

준회원 정 경 구*, 종신회원 박 승 영**

Multicast Coverage Prediction in OFDM-Based SFN

Kyung-goo Jung* Associate Member, Seung Young Park** Lifelong Member

요 약

3GPP LTE (3rd Generation Project Partnership Long Term Evolution)에서는 SFN (Single Frequency Network) 환경에서 동일 데이터를 복수의 단말에 동시에 전송하는 무선 멀티캐스트 기술에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. 이러한 환경에서 효율적인 데이터 전송을 위해서는 멀티캐스트 커버리지 요구사항을 만족하는 최적의 전송 기법을 선택해야 하며 이를 위해 단말들의 수신 성능에 대한 정보가 반드시 필요하다. 하지만 실제 시스템에서 매 순간마다 모든 단말의 수신 성능을 피드백 받는 것은 상당한 역방향 링크의 채널자원을 필요로 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 단말의 수신 성능에 대한 예측을 바탕으로 멀티캐스트 커버리지를 예측하는 알고리즘을 제안하고 성능을 비교분석 하였다. 제안한 알고리즘은 각각의 단말이 자신의 수신 성공 여부 패턴에 따라 자신의 상태를 결정하고, 상태 천이 확률을 계산한다. 이를 일정한 주기 마다 기지국에 피드백하고, 기지국은 이러한 정보를 바탕으로 멀티캐스트 커버리지를 예측한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방법을 통한 커버리지 예측이 가능함을 확인하였다.

Key Words : multicast, single frequency network, SFN, OFDMA, coverage prediction

ABSTRACT

In 3rd generation project partnership long term evolution, wireless multicast techniques which send the same data to multiple users under single frequency networks have attracted much attention. In the multicast system, the transmission mode needs to be selected for efficient data transfer while satisfying the multicast coverage requirement. To achieve this, users' channel state information (CSI) should be available at the transmitter. However, it requires too much uplink feedback resource if all the users are allowed to transmit their CSI at all the time. To solve this problem, in this paper, the multicast coverage prediction is suggested. In the proposed algorithm, each user measures its transition probabilities between the success and the fail state of the decoding. Then, it periodically transmits its CSI to the basestation. Using these feedbacks, the basestation can predict the multicast coverage. From the simulation results, we demonstrate that the proposed scheme can predict the multicast system coverage.

※ 본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가위원회의 IT 산업원천기술개발사업의 일환으로 수행하였음. [2009-S-024-01, 와이브로 기반 모바일 멀티미디어 최적전송 시스템 개발]

* 강원대학교 전자통신공학과 (wjdrudm@kangwon.ac.kr, s.young.park@kangwon.ac.kr), (*: 교신저자)
논문번호: KICS2010-08-395, 접수일자: 2010년 8월 13일, 최종논문접수일자: 2011년 2월 8일

I. 서 론

최근 디지털 기술의 발달로 통신서비스와 방송기술을 융합한 이동통신망에서의 방송 서비스가 새로운 차세대 서비스로 관심을 받고 있다^[1]. 차세대 이동통신 시스템인 3GPP LTE (3rd Generation Project Partnership Long Term Evolution)에서는 사용자 별 QoS (Quality of Service)를 만족시키는 좀 더 효율적인 전송 기법을 개발하고 있다^[2].

3GPP에서는 다수의 사용자들에게 멀티캐스트 데이터를 제공하기 위해 각 셀 마다 동일한 공용 주파수 자원을 사용하여 동일한 데이터를 전송한다^[3]. 이러한 공용 주파수를 사용하여 멀티캐스트 서비스를 지원하게 되면, 셀 영역 안에 동일한 데이터를 수신하는 단말이 많을수록 주파수 효율성이 증가하게 된다. 그러나 셀 경계지역에 있는 단말들은 인접 셀의 간섭신호에 의해 성능 저하가 일어나게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 복수의 셀이 동일한 시간에 동일한 주파수 자원을 사용하여 동일한 신호를 전송하는 SFN (Single Frequency Network) 기술의 도입이 제안되었다^[4,5]. 특히 3GPP LTE에 적용되는 OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 시스템의 경우, 인접 기지국에서 전송되는 다중경로에 의해 지연되는 동일한 멀티캐스트 신호들이 OFDM symbol의 CP (Circular Prefix) 구간 내로 수신된다면, 각 멀티캐스트 단말들은 이 신호들을 결합하여 수신함으로써 macro diversity 이득을 얻을 수 있다^[4,6,7].

셀룰러 환경에서는 단말의 위치 또는 전파 환경에 따라 각 단말의 지원 가능한 전송률 즉, 지원 가능한 MCS (Modulation and Coding Scheme) level의 차이가 크다. 이 때문에 복수의 단말에 동시에 동일한 정보를 전송해야 하는 멀티캐스트 전송의 경우 가장 성능이 낮은 단말을 기준으로 전송해야 하므로 일반적으로 그 전송률은 매우 낮아지게 된다. 구체적으로 원활한 멀티캐스트 서비스 제공을 위해 멀티캐스트 controller는 멀티캐스트 커버리지 (즉, 전체 멀티캐스트 단말들 중 멀티캐스트 데이터를 성공적으로 수신 받는 단말의 비율) 요구사항을 만족하는 전송률을 결정해야 하며 이를 위해 모든 단말들의 멀티캐스트 수신 성능에 대한 정보가 필요하다. 하지만 실제 시스템에서 수신 성능에 대한 정보들을 해당 단말들이 매번 피드백 하는 것은 많은 (역방향 링크) 채널 낭비를 가져온다. 만약 멀티캐스트 controller에서 MCS level에 따른 멀티캐스트 커버리지를 예측 할 수 있다면 이를 통해 멀티캐스트 커버리지 요구사항을 만족하는 최적

의 MCS level을 결정할 수 있으므로 효율적 주파수 사용이 가능할 것이다^[8]. 본 논문에서는 시스템이 지원 가능한 모든 MCS level에 대하여 Markov chain 모델과 MTA (Markov Trace Analysis) 모델 기반의 멀티캐스트 커버리지 예측 기법을 소개한다.

일반적으로 무선 채널은 다중경로 페이딩, 섀도잉, 경로감쇄에 많은 영향을 받기 때문에 bursty한 error가 발생하기 쉽다. Markov chain 기반의 모델에 이러한 현상을 반영하기 위해서는 상당히 높은 order가 요구된다. 이를 보완하기 위해 단말의 상태를 Error 및 Error-Free 상태로 구분 지어 first order만으로 bursty한 채널 특성을 반영한 MTA 기법이 제안되었다. 이 모델에서는, 각 상태를 유지하는 시간을 지수 확률 분포로 모델링 하고, 측정을 통해 상태유지 시간에 대한 누적분포함수를 만들고 이와 가장 유사한 모양을 가지는 지수 확률 분포 파라미터를 결정하여 사용하였다^[9]. 이러한 방식은 시뮬레이션을 위한 채널 그 자체를 모델링하는데 적합할 수는 있지만 채널의 성능 예측에 적용하기에는 적합하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 실제 단말의 멀티캐스트 데이터 수신 성공 및 실패 패턴을 Error 및 Error-Free 상태로 분할하고, 이를 바탕으로 상태 전이 확률을 실시간으로 갱신하여 시스템의 멀티캐스트 커버리지를 예측하는데 적용해보았다. 이러한 멀티캐스트 커버리지를 예측이 가능하다면 그에 맞는 전송 기법을 선택하여 보다 효율적인 전송이 가능해질 것이다. 본 논문에서는 위의 예측 기법을 바탕으로 MCS level에 따른 커버리지 예측이 가능함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어있다. 2장에서는 본 논문의 시스템 모델에 대해 설명한다. 3장에서는 멀티캐스트 채널 성능 예측 기법에 대해 설명한다. 4장에서는 단말의 피드백 주기에 따른 예측 성능에 관해서, 5장에서는 시뮬레이션 환경에 대해서 설명하고, 6장에서는 시뮬레이션 결과를 정리하였다. 마지막으로 7장에서 결론을 논한다.

II. 시스템 모델

2.1 OFDMA 시스템에서의 자원 할당

멀티캐스트 데이터 stream은 다수의 사용자들에게 전송되는데 이때, 시스템의 커버리지 성능은 가장 채널이 나쁜 사용자에게 의해 결정이 된다. 위와 같은 시스템에서 단말의 deep fading을 피하기 위해 frequency diversity 기법을 사용하여 전송하는 것이 매우 유리하다. 구체적으로 OFDMA 기반의 SFN 시스템은 전체

시스템 전송대역을 균등하게 분할한 뒤, SFN을 구성하는 모든 셀에서 동일한 부 반송파를 pseudo-random 하게 선택하고 선택된 부 반송파를 이용하여 동일한 멀티캐스트 데이터를 전송한다. 또한 OFDMA 기반 SFN 환경에서는 CP 길이 내로 다수의 기지국으로부터 전송되는 신호는 결합하여 수신 할 수 있으므로 macro diversity 이득을 얻을 수 있다¹⁰⁾. OFDM 환경에서 하나의 전송 프레임은 10ms의 10개의 서브 프레임으로 나누어진다. 하나의 서브 프레임 이는 다시 2개의 타임 슬롯으로 나누어지며 하나의 타임 슬롯은 7개의 OFDM 심볼로 구성된다. 이를 그림 1에 자세히 나타내었다.

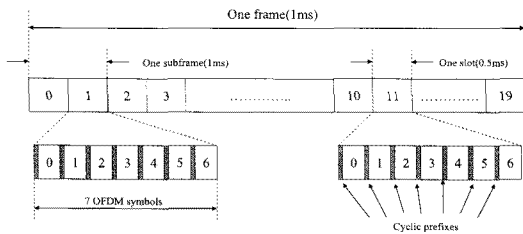


그림 1. OFDM 프레임 구조

2.2 시스템 커버리지

i 번째 단말이 n 번째 프레임에서 m 번째 MCS level로 전송된 데이터를 수신하는 상황을 고려하자. 이때 단말이 N_f 개의 프레임구간 동안($n - N_f + 1$ 번째 프레임부터 n 번째 프레임) 데이터 수신에 성공할 경우에 멀티캐스트 데이터가 성공적으로 수신 되었다고 가정한다. 즉, 전송 성공 여부를 식 (1)과 같이 정의한다.

$$s_i(m, n) = \begin{cases} 0, & \text{if } \sum_{j=n-N_f+1}^n q_i(m, j) = 0 \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $q_i(m, j)$ 는 i 번째 단말이 j 번째 프레임에서 m 번째 MCS level로 전송된 데이터를 성공적으로 수신 가능한 경우는 0, 그렇지 않은 경우는 1을 나타낸다. 식 (1)을 사용하여 n 번째 프레임에서 m 번째 MCS level을 이용해 전송할 경우의 멀티캐스트 커버리지는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$c(m, n) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (1 - s_i(m, n)) \quad (2)$$

여기서 K 는 시스템에 존재하는 멀티캐스트 서비스를 받는 단말의 수를 나타낸다.

III. 멀티캐스트 커버리지 성능 예측 기법

3.1 Markov Chain 모델

본 절에서는 MCS level의 시스템 커버리지를 예측하기 위한 Markov chain 모델 기반의 커버리지 예측 기법에 대해 설명한다. 구체적으로 각 단말의 n 번째 프레임에서의 수신에 대한 process를 random process라 가정하고 P^{th} order Markov chain 모델을 이용하여 각 단말 별 수신 성능을 예측하며 이러한 정보들을 전체 단말로부터 수집하여 시스템의 MCS level별 멀티캐스트 커버리지 성능을 예측한다. 최종적으로 이를 바탕으로 멀티캐스트 커버리지 성능 요구사항을 만족하는 최적의 MCS level을 결정한다.

P^{th} order Markov 모델에서 m 번째 MCS level을 사용하는 단말 i 에서의 상태전이 확률은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \Pr(q_i(m, n) = x_n \mid q_i(m, n-1) = x_{n-1}, \dots, q_i(m, 1) = x_1) \\ = \Pr(q_i(m, n) = x_n \mid q_i(m, n-1) = x_{n-1}, \dots, q_i(m, n-P) = x_{n-P}). \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $x_n \in \{0, 1\}$ 는 해당 프레임에서의 수신 성공 여부를 나타내며 0이면 성공, 1이면 실패이다. 또한, 이러한 random process가 stationary라 가정하면 다음이 성립한다.

$$\begin{aligned} \Pr(q_i(m, n) = x_{p+1} \mid q_i(m, n-1) = x_p, \dots, q_i(m, n-P) = x_1) \\ = \Pr(q_i(m, P+1) = x_{p+1} \mid q_i(m, P) = x_p, \dots, q_i(m, 1) = x_1) \\ \triangleq z_i(\mathbf{x}_{p-1}). \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, \mathbf{X}_{p+1} 는 $[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{p+1}]$ 인 vector를 나타낸다. 일반적으로 Markov chain 모델의 order인 P 값이 클수록 좀 더 정확한 단말 성능의 예측이 가능하나 P 가 증가할수록 계산해야 하는 상태 전이 확률의 개수가 2^P 로 증가하여 그 복잡도가 매우 크다. 따라서, 이러한 성능 예측 정확도와 복잡도 간의 tradeoff 관계를 고려하여 적절한 P 값을 적용해야 한다.

이러한 P^{th} order Markov 모델을 이용할 경우 단말 i 가 성공할 확률 $\Pr(s_i(m, n)=0)$ 은 N_f 개의 프레임 동안 연속적으로 수신에 성공할 확률이며

$$\begin{aligned}
 \Pr(s_i(m,n)=0) &= \Pr(q_i(m,n')=0, \text{ for } n'=n-N_j+1, \dots, n) \\
 &= \Pr(q_i(m,n)=0 | q_i(m,n-1)=0, \dots, q_i(m,n-N_j+1)=0) \\
 &\quad \Pr(q_i(m,n-1)=0 | q_i(m,n-2)=0, \dots, q_i(m,n-N_j+1)=0) \\
 &\quad \vdots \\
 &\quad \Pr(q_i(m,n-N_j+1)=0 | q_i(m,n-N_j+1)=0) \Pr(q_i(m,n-N_j+1)=0) \\
 &= \Pr(q_i(m,n)=0 | q_i(m,n-1)=0, \dots, q_i(m,n-P)=0) \\
 &\quad \Pr(q_i(m,n-1)=0 | q_i(m,n-2)=0, \dots, q_i(m,n-P-1)=0) \\
 &\quad \vdots \\
 &\quad \Pr(q_i(m,n-N_j+1)=0 | q_i(m,n-N_j+1)=0) \Pr(q_i(m,n-N_j+1)=0)
 \end{aligned} \tag{5}$$

으로 표현될 수 있다. 또한 (4)를 이용하면 (5)는

$$\begin{aligned}
 \Pr(s_i(m,n)=0) &= \Pr(q_i(m,n')=0, \text{ for } n'=n-N_j+1, \dots, n) \\
 &= (z_i(\mathbf{0}_{P-1}))^{N-P} \prod_{j=2}^P (z_i(\mathbf{0}_j)) \Pr(q_i(m,n-N_j+1)=0)
 \end{aligned} \tag{6}$$

로 표현되며, 여기서 $\mathbf{0}_j$ 는 j 개의 0으로 구성된 zero row vector이다. 모든 단말은 해당 상태 천이 확률을 멀티캐스트 controller에 보고하게 되면 이를 바탕으로 예측 커버리지 $\hat{c}(m,n)$ 는 다음과 같이 측정할 수 있다.

$$\hat{c}(m,n) = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \Pr(s_i(m,n)=0) \tag{7}$$

이러한 측정을 바탕으로 커버리지 요구사항을 만족할 수 있는 MCS level을 결정할 수 있다. 표1은 i 번째 단말이 m 번째 MCS level으로 전송되는 데이터에 대한 상태 천이 확률 $z_i(\mathbf{0}_j)$ 의 계산과정을 보여주는 의사 코드이다.

이와 같은 예측이 동작하기 위해서는 각 단말 별로 상태 천이 확률 $z_i(\mathbf{0}_j)$, $j=2, \dots, P+1$ 와 $\Pr(z_i(m,n-N_j+1)=0)$ 에 대한 측정이 필요하다. 그러나 매 프레임마다 해당 상태 천이 확률에 대한 값들을 controller에 보고한다면 상향 링크 자원을 극심하게 소모하게 될 것이다. 따라서 M 개의 프레임 구간마다 한번씩 보고한다고 가정한다.

3.2 MTA 모델

무선 채널은 짧은 시간에도 레일리 페이딩, 다중경로 페이딩, 섀도잉에 영향을 받기 때문에 bursty한 error가 발생하기 쉬우며 이러한 특성은 기존의 Markov 모델에 반영하기 위해서는 상당히 높은 order가 필요하다. 이를 보완하기 위해 단말의 상태를 Error

및 Error-Free 상태로 분할하고 각 상태 유지 시간을 지수 확률변수로 모델링 하여 낮은 복잡도로 bursty한 채널 특성을 고려한 MTA 기법이 제안되었다⁹⁾. 이때, 각 상태 유지 시간에 대한 지수 확률 변수의 매개변수 값은 실제 측정결과에 대한 누적 분포함수를 만들고 이와 가장 비슷한 모양을 갖는 값으로 결정하였다. 그러나 이러한 방식은 시뮬레이션을 위한 채널모델링에 적합할 수는 있지만 실시간으로 변화하는 채널의 성능변화를 예측하는 방식으로는 적합하지 않다. 따라서, 실제 단말의 멀티캐스트 데이터 수신 성공 및 실패 패턴을 Error 및 Error-Free 상태로 분할하고, 이를 바탕으로 상태 천이 확률을 실시간으로 갱신하여 시스템의 멀티캐스트 커버리지를 예측하는데 적용한다.

구체적으로 단말은 자신의 상태를 정의하기 위해 현재 MCS level로 전송된 전송 프레임에 대해 수신을 시작하고, 이에 대한 성공 혹은 실패 여부를 순차적으로 기록한다. 이때, 이러한 단말의 수신 여부가 시간 순으로 기록된 데이터 집합을 trace라 정의한다. 단말의 상태는 그림 2와 같이 Error-Free 상태와 Error 상태구간으로 정의 하게 되는데, Error 상태구간은 단말이 수신한 프레임이 계속 수신 불가로 나타난 구간 혹은 특정 프레임 구간 C 미만으로 수신 성공한 구간과 수신 실패한 구간이 뒤섞여 있는 구간이다. Error-Free 상태는 특정 프레임 구간 C 만큼 수신이 연속적으로 성공한 시점 이후부터 수신 error가 발생하는 시점 전까지로 유지된다. 그림 3은 그림 2에 의해 결정된 단말의 상태 천이 과정을 보여주는 그림이다. 이 그림에서 $p_i^{(00)}$, $p_i^{(01)}$, $p_i^{(10)}$, $p_i^{(11)}$ 는 각각 단말이 Error-free 상태에서 Error-free 상태로, Error-free 상태에서 Error 상태로, Error 상태에서 Error-free 상태로, Error 상태에서 Error 상태로

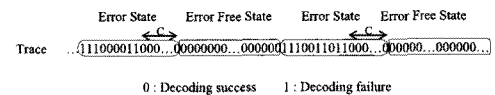


그림 2. 단말의 trace의 예.

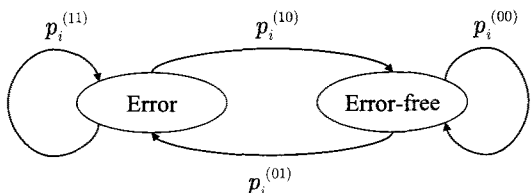


그림 3. 단말의 상태 diagram 예시.

서 Error 상태로 천이될 확률을 나타낸다. 즉, 매 프레임 마다 상태 변환을 바탕으로 상태 천이 확률이 갱신된다.

이렇듯 단말은 특정 프레임 구간마다 계산된 C 를 이용하여 자신의 상태를 Error-Free 상태로 정의하고 그렇지 않을 경우는 Error 상태라 정의한다. 이때, 단말은 이전 구간의 trace를 바탕으로 아래와 같이 C 를 계산한다^[9].

1. 정해진 임의의 프레임 구간 내에서 1개 이상의 error가 연속으로 발생하는 error-burst 들의 길이를 측정한다.
2. error-burst들의 길이의 평균을 구한다.
3. error-burst들의 길이의 분산을 구한다.
4. 2, 3 과정에서 구한 평균과 분산을 합한 값을 C 로 결정한다.

위와 같이 계산한 C 를 바탕으로 각 단말의 상태를 결정한 단말들은 자신의 현재 상태에 대한 정보를 시간 별로 저장하고 이를 이용하여 각 단말 별 상태 천이 확률을 표 1의 의사코드를 이용하여 갱신하고 이를 주기적으로 기지국에 피드백한다. 기지국은 이 정보를 이용하여 향후 각 단말의 상태에 대한 예측을 수행하여 전체적인 시스템의 커버리지를 예측한다.

표 1. 상태 천이 확률 갱신을 위한 의사코드

Transtion Probability Update Algoritm	
While(1)	
IF	$q_i(m, n - j^i) = 0$, for $j^i = 1, \dots, j - 1$
	$c = 1 + c\lambda^{n-b}$
IF	$q_i(m, n) = 0$
	$a = 1 + a\lambda^{n-b}$
Else	
	$a = a\lambda^{n-b}$
End	
	$b = n$
	$z_i(\mathbf{0}_j) = \frac{1}{b}$
End	
	$n = n + 1$
End	

IV. 단말의 피드백

기지국은 향후 시스템의 멀티캐스트 커버리지를 예

측하기 위해 단말로부터 단말의 멀티캐스트 데이터 수신에 대한 정보를 매 프레임마다 피드백 받아야 한다. 하지만 실질적인 시스템 환경 하에서는 상향링크 자원이 한정되어 있기 때문에 현실적으로 적합하지 않다. 그렇다고 채널 정보를 매우 긴 주기마다 피드백 한다면 시스템에서는 오래된 정보를 가지고 시스템의 멀티캐스트 커버리지를 예측하게 되어 그 정확성이 떨어지게 된다. 따라서 예측의 정확성이 보장되는 범위 안에서 단말의 피드백 주기를 조절하는 것이 필요하다. 그림 4는 단말 별 상태 천이 확률을 피드백하는 주기를 보여 준다.

기본적인 단말의 피드백 주기는 M 프레임이며 멀티캐스트 단말들은 M 프레임 구간 내에서 균등한 간격으로 자신의 피드백 시점을 정하고, 자신의 피드백 시점이 왔을 때, 기지국에게 자신의 상태 천이 확률과 자신의 현재 상태 정보(Error-Free, Error 상태)를 피드백한다. 그 후 기지국은 소속 단말에 대한 피드백 정보를 멀티캐스트 controller에게 전달하며 제어국은 SFN의 기지국으로부터 수집된 단말의 피드백 정보를 바탕으로 식 (7)의 과정을 통해 향후 서비스 커버리지에 대해 예측을 수행한다.

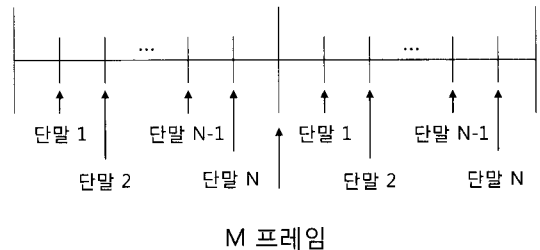


그림 4. 단말의 피드백 주기의 예.

V. 시뮬레이션 환경

4tier-Hexagonal 구조의 61개의 기지국들이 셀 간 최소 간격 1000m 로 분포하며 1000개의 단말들이 랜덤으로 분포하는 SFN 시스템을 가정한다. 반송 주파수 2.3GHz인 OFDMA 시스템을 고려한다. 모든 기지국들은 3섹터 구조의 셀 환경을 가정하였고 각 기지국의 송신 전력은 46dBm을 사용한다. noise figure는 6dB, noise density는 -174dBm/Hz 을 사용하였다.

$$L(d) [dB] = 128.1 + 37.6 \log_{10} d \quad (8)$$

여기서 d 는 기지국과 단말과의 거리(m)를 나타낸

다. Shadowing의 표준편차는 8dB, shadowing의 de-correlation distance는 50m이다. 각 단말은 61개의 기지국 중 경로감쇄가 가장 적은 기지국을 소속 기지국으로 결정한다고 가정한다. 이때 사용한 단말들의 채널 환경은 ITU (International Telecommunication Union)에 명시된 다중 경로 채널 모델을 사용하였으며, 이를 표 2에 정리하였다^{11,12)}. 여기서 각각의 단말은 표 2에 주어진 할당 확률에 따라 랜덤으로 하나의 채널 모델을 선택한다.

본 시뮬레이션에 사용된 OFDMA 시스템 파라미터를 표 3에 정의하였다. 전체 시스템의 대역폭은 10MHz이고 부 반송파의 간격은 15kHz이다. 즉, 하나의 OFDMA 심블당 600개의 부 반송파가 존재하며 1024 point의 FFT (Fast Fourier Transform)로 변조된다. 멀티캐스트 데이터는 MCS level중 하나를 선택하여 변조되고 OFDMA 시스템의 하나의 프레임 구간 동안 전송된다. 또한 모든 기지국이 동일한 정보를 전송하는 SFN 구조를 사용하는데 다음의 조건을 만족할 경우 간섭이 발생하지 않는다고 가정한다. OFDMA 시스템에선 각각의 부 채널들은 직교성을 지니고 있고 프레임의 앞부분 일정 구간은 CP로 할당되어 있다. 이러한 CP는 연속된 두 프레임간의 간섭에 대한 보호구간으로 작용한다. 또한, 서로 다른 기지국으로부터의 단말에 수신되는 신호의 전송 지연

시간차가 CP 구간에서 채널의 다중경로로 인한 최대 지연 시간을 뺀 시간 보다 작은 경우에 신호들을 결합 수신하는 것이 가능하므로 매크로 다이버시티 이득을 얻을 수 있다^{4,6)}. 구체적으로 그림 5처럼 A, B 기지국으로부터 전송된 동일한 신호가 CP 구간 내로 수신된다면 이 신호로부터 매크로 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 따라서, 단말이 매크로 다이버시티를 얻기 위한 두 기지국간의 최대 허용거리는 아래의 계산으로 표현될 수 있다. 예를 들어 다중 경로 채널에 의한 최대 딜레이는 3.7usec이고 CP의 길이는 12.8usec이라 가정하자. 그 시간의 차에 해당하는 시간 동안 전파는 2.7km의 거리를 이동할 수 있으므로 단말의 소속 기지국을 기준으로 2.7km 이내에 존재하는 기지국의 신호는 간섭이 발생하지 않는다고 볼 수 있다.

디코딩 과정은 EESM을 이용하여 시뮬레이션에 적용하였다¹¹⁾. 구체적으로, i 번째 기지국에 소속되어 있는 단위시간 TTI t 에서의 n 번째 단말의 SINR (signal-to-interference plus noise power ratio) 과 EESM (exponential effective SINR mapping)은 다음과 같다.

$$SINR_{n,i}(t) = \frac{(1-\phi) \sum_{k=0}^{K-1} \left| \sum_{l \in S} \sqrt{g_{ln}(t)} h_{ln}^k(t) \right|^2}{N_0/P + \phi \sum_{k=0}^{K-1} \left| \sum_{l \in S} \sqrt{g_{ln}(t)} h_{ln}^k(t) \right|^2 + \sum_{j \in S^c} g_{ln}(t) \rho_{ln}(t)} \quad (9)$$

표 2. 채널환경.

Channel model	Multipath model	No. of paths	Speed (km/h)	Fading	Assign. Prob.
Model 1	Flat fading	1	30	Jakes	0.1
Model 2	Flat fading	1	120	Jakes	0.1
Model 3	ITU vehicular A	6	30	Jakes	0.1
Model 4	ITU vehicular A	6	120	Jakes	0.1
Model 5	ITU pedestrian A	4	3	Jakes	0.3
Model 6	ITU pedestrian B	6	3	Jakes	0.3

표 3. 시스템 레벨 모의 실험 파라미터.

Carrier frequency	2.3GHz	Cell layout	Hexagonal grid, 3-sector sites
Bandwidth	8.75MHz	BS antenna pattern	70degree (-3dB), 20dB FBR, 15dB gain
Carrier spacing	9MHz	Site-to-site dist.	1000m
Sampling rate	10MHz	Path loss	$L = 128.1 + 37.6 \log_{10}(D)$
FFT size	1024	STD of shadowing	8dB
Frame length	5msec	Corr. dist. shadowing	50m
Symbol period	115.2usec	Correlation btw. sectors	1
No. of null subcarriers	184	Correlation btw. cells	0.5
No. of pilot subcarriers	120	Noise figure	6dB
No. of data subcarriers	720	Noise density	-174dBm/Hz
No. of subchannels	30	BS Tx. Power	46dBm
No. of BSs	61	No. of MSs	1000

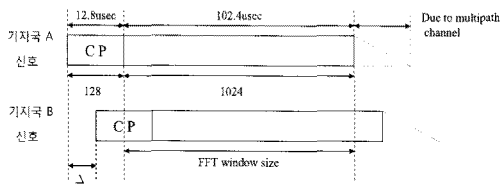


그림 5. SFN 기반 OFDM 구조에서 매크로 다이버시티를 위한 허용 경로차.

여기서 P 와 N_0 는 전송 신호의 전력과 잡음전력을 나타낸다. $h_{i,n}^k(t)$ 는 n 번째 기지국과 단말 i 사이의 k 번째에 다중 경로 페이딩의 값을 나타낸다. S_n 은 SFN에 속하는 기지국들 중 앞서 언급한 조건을 만족하여 유효신호를 전송하는 기지국 그룹을 나타낸다. K 는 다중경로 페이딩의 경로 수를 나타내며 ϕ 는 orthogonal factor를 나타낸다. 이때 orthogonal factor 값은 0.001로 정의하여 SINR 값은 30dB를 넘을 수 없다. $g_{i,n}(t)$ 는 단위시간 t 에서의 단말 i 와 기지국 n' 사이의 경로 감쇠를 포함한 경로 이득 값을 나타내며 $p_{i,n}(t)$ 는 fading process를 나타낸다. 이때, 단말의 실제 Effective SNR 값은 식 (10)에 의해 계산된다.

$$SINR_{i,n}^{eff}(t) = -\beta \log \left(\frac{1}{N_u} \sum_{l \in \mathcal{L}_k} e^{-\frac{\gamma_{i,n,l}(t)}{s}} \right) \quad (10)$$

여기서 β 는 MCS level 별 상수 값이고, N_u , A_n 은 부 반송파의 갯수와 desired signal set 수를 나타낸다. 여기서 $\gamma_{i,n,l}(t)$ 은 l 번째 부 반송파의 채널 이득을 나타낸다. 이렇게 계산된 값을 Effective SNR 값에 따른 PER(Packet Error Rate)에 Mapping 시켜 해당 값의 확률 값에 따라 전송 성공, 실패를 결정하였다.

VI. 시뮬레이션 결과

6.1 예측 기법의 order에 따른 성능예측 정확도

본 논문의 멀티캐스트 커버리지 예측 기법은 Markov Chain 모델을 기반으로 단말의 상태 전이 확률을 계산하고 이를 종합하여 향후 시스템의 멀티캐스트 커버리지를 계산하는 방식이다. 일반적으로 높은 order를 사용하여 상태전이 확률을 계산하고, 이를 바탕으로 시스템의 성능을 예측하는 것이 낮은 order를 사용하여 예측하는 것보다 예측 정확성이 높다. 하지만 높은 order를 사용할수록 복잡도는 2의 지수 승으로 증가하게 된다. 따라서 order에 따른 계산 복잡도와 성능 향상 정도를 비교 분석하기 위해 conditional

entropy를 고려한다. conditional entropy는 과거의 상태가 주어졌을 때 미래의 시점에서 발생할 상태의 randomness를 정도를 나타내며 이 값이 높다는 것은 예측의 정확도가 낮다는 것을 의미한다. 반대로 값이 낮을 때는 randomness가 낮다는 것을 의미하며 이는 예측의 정확도가 높음을 의미한다. 실질적인 수신 성공여부에 대한 데이터가 주어졌을 때 conditional entropy는 다음과 같이 계산한다^[11].

$$H(P) = -\sum_x \frac{\xi(x)}{T_{sample}} \sum_{y=0}^1 \frac{\xi(y,x)}{\xi(x)} \log_2 \frac{\xi(y,x)}{\xi(x)} \quad (11)$$

여기서, \mathbf{x} 는 $[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_p]$ 로 구성된 2^p 개의 서로 다른 데이터 패턴들 중 하나를 의미하며, T_{sample} 는 전체 데이터 사이즈, $\xi(x)$ 는 전체 데이터에서 데이터 패턴 x 의 개수, $\xi(y,x)$ 는 데이터 패턴 x 이후에 y 가 발생하는 패턴의 개수를 의미한다. 이러한 conditional entropy는 일반적으로 order P 값이 증가할수록 그 값은 낮아지며 (즉, randomness가 감소), 이는 예측 성능이 향상됨을 의미한다. 그림 6은 64QAM 3/4 전송 기법에서 식 (11)를 적용하였을 때, Markov 모델과 MTA 모델의 entropy에 대한 계산 결과를 비교한 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯 높은 order를 가지는 Markov 모델을 적용하는 것보다 MTA 모델 기반 예측 알고리즘을 적용하는 것이 복잡도를 낮출 뿐만 아니라 entropy 관점에서 더 이득이 있음을 보여준다. 그림 7, 8, 9는 1st, 2nd, MTA 기반 예측 알고리즘에 대한 전체 단말에 대한 entropy 누적 확률 분포 함수이다. 이러한 결과를 통해 높은 계산 복잡도를 가지는 Markov 모델 보다 MTA 모델을 사용하여 시스템의 성능을 예측하는 것이 계산 복잡도와 성능 면에서 보

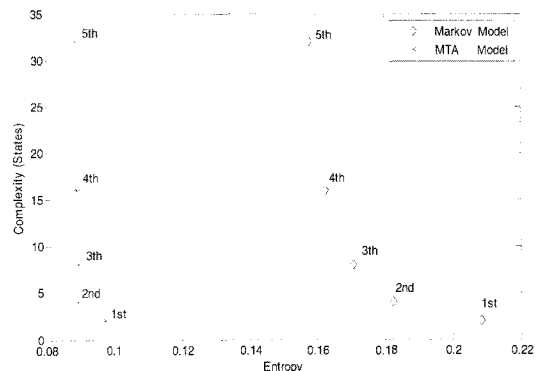


그림 6. 예측 기법의 order별 복잡도와 entropy 비교 (64QAM 3/4).

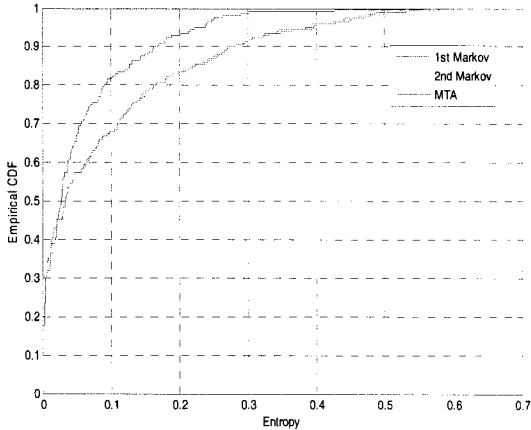


그림 7. 예측 모델 별 entropy의 누적 확률 분포 함수 (16QAM 1/2).

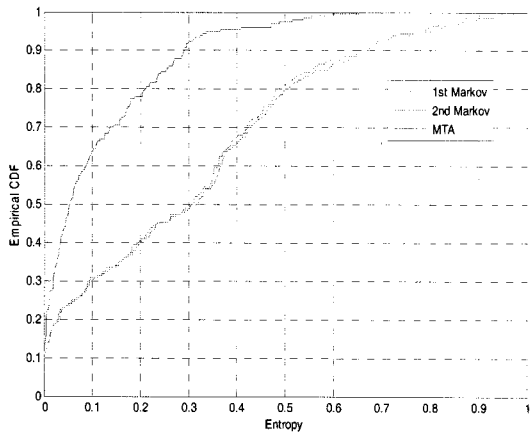


그림 8. 예측 모델 별 entropy의 누적 확률 분포 함수 (16QAM 3/4).

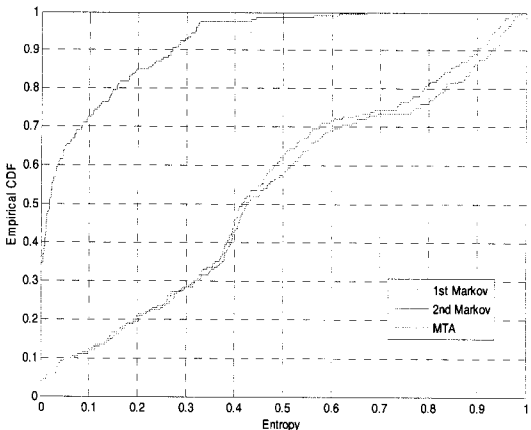


그림 9. 예측 모델 별 entropy의 누적 확률 분포 함수 (64QAM 3/4).

다 효율적임을 알 수 있다.

6.2 예측 기법 별 성능 비교

그림10, 11, 12은 각각 16QAM 1/2, 16QAM 3/4, 64QAM 3/4 전송에 대한 멀티캐스트 커버리지 예측 성능을 보인다. 여기서 1st 및 2nd order Markov 모델은 Error-free/Error 상태를 구분하는 MTA 기법과는 달리 각 프레임의 성공/실패만으로 상태를 구분하고 이를 이용하여 성능을 예측한다. 또한 각 기법에서 예측하는 커버리지 성능은 향후 100 프레임 구간 동안 에러가 발생하지 않는 단말의 비율로 정의하였다. 그림에서 알 수 있듯이 단말을 Error-Free/Error 상태로 구분하는 기법은 1st order로 구성된 단순한 모델임에도 불구하고 더 많은 계산 복잡도를 가진 2nd order Markov 모델에 비해 더 나은 예측 성능을 보인다. 또한 높은 주파수 효율을 가지는 전송 기법을 사용했을 때, 성능 예측의 정확도가 향상 됨을 알 수 있다. 반대로 낮은 주파수 효율을 가지는 전송기법을 사용했을 때는, 예측 기법 별 차이가 별로 나지 않았다. 그 이유는 주파수 효율이 낮은 전송 기법을 사용할 경우 매우 적은 수의 단말들만이 수신에러가 발생하므로 예측 기

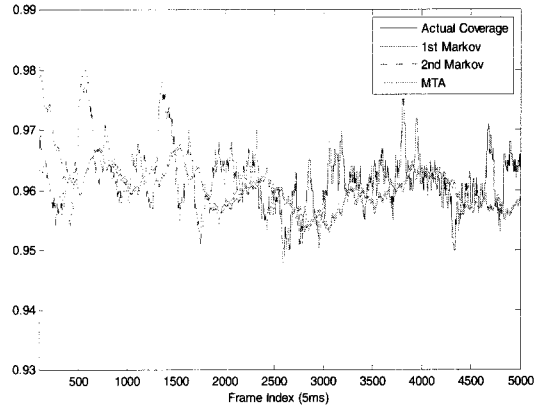


그림 10. 예측 기법 별 성능 (16QAM 1/2).

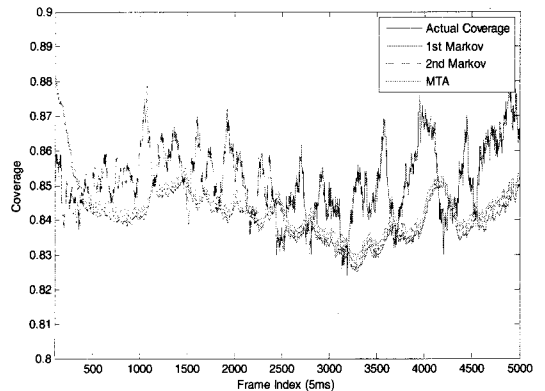


그림 11. 예측 기법 별 성능 (16QAM 3/4).

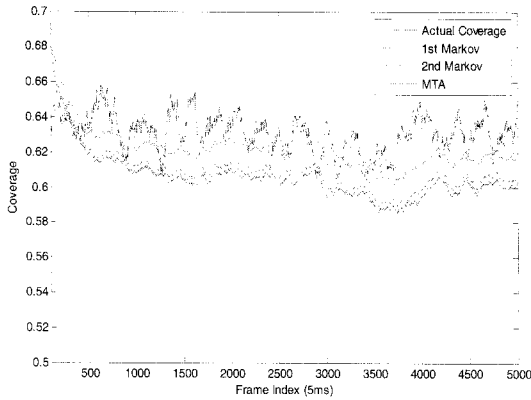


그림 12. 예측 기법 별 성능 (64QAM 3/4).

법 별 커버리지 차이가 거의 발생하지 않기 때문이다.

6.3 피드백 주기에 따른 성능

그림 13은 단말의 MTA 기법으로 피드백 주기에 따른 멀티캐스트 커버리지 예측 성능을 비교한 그래프이다. 단말이 자신의 상태 천이 확률과 자신의 상태를 각각 매 프레임, 50번째 프레임, 100번째 프레임 마다 기지국에 피드백하였을 경우의 커버리지 예측 성능을 비교 분석하였다. 그림에서 알 수 있듯이 매 프레임 마다 피드백을 하지 않고 주기적으로 피드백을 하더라도 멀티캐스트 커버리지 예측 성능을 어느 정도 유지할 수 있음을 알 수 있다.

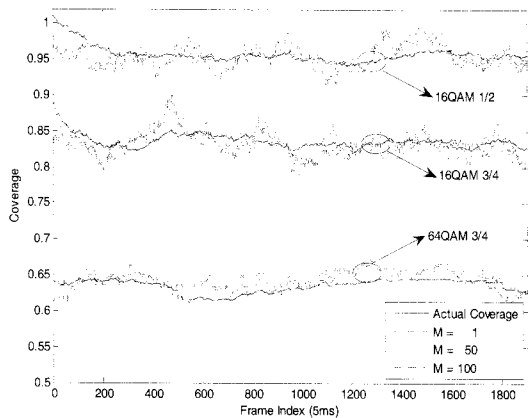


그림 13. 단말의 피드백 주기에 따른 예측 성능.

VII. 결 론

본 논문에서는 OFDM기반의 SFN 환경에서 단말의 상태를 바탕으로 상태 천이 확률을 이용하여 시스템의 멀티캐스트 커버리지 예측의 성능을 비교 분석

하였다. 순수 Markov 모델의 경우에는 무선 채널 특성에 의한 단말의 burst한 에러 특성 때문에 좀 더 정확한 예측을 위해서는 높은 order가 필요했다. 하지만 높은 order를 사용하였을 때 그에 필요한 계산량이 매우 높기 때문에 결과적으로 순수 Markov 모델만으로 시스템을 커버리지 성능을 예측하는 것은 다소 무리가 있었다. 따라서 이를 보완한 단말의 상태에 근거하여 상태 천이 확률을 계산하고 이를 바탕으로 시스템의 성능을 하는 MTA 기반 멀티캐스트 커버리지 예측 알고리즘이 좀 더 효율적임을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] U. Varshney, "Multicast over wireless networks," *Communications of the ACM*, Vol. 45, No.12, pp. 31137, Dec. 2002.
- [2] 3GPP TS 36.300 v8.7.0, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (EUTRAN); Overall Description; Stage 2," Jan 2009
- [3] 3GPP TS 22.146, "Multimedia broadcast / multicast service; stage 1 (Release 8)", v8.4.0, June 2008.
- [4] 3GPP TS 25.346, "Introduction of the multimedia broadcast multicast service (MBMS) in the radio access network (RAN); state 2 (Release 7)", v8.4.0, Dec. 2009
- [5] 이용수, 김영일, 김환우, "모바일 IPTV 서비스를 위한 Single Frequency Network에서의 효율적인 MBS Zone 구성", 한국통신학회 논문지, 제35권 제10호, 907~1026, 2010.10.
- [6] R. Rebhan and J. Zander, "On the outage probability in single frequency networks for digital broadcasting," *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol.39, No.4, pp.395-401, Dec. 1993.
- [7] 이대홍, 임세빈, 노희진, 최형진, "3GPP LTE 하향링크 OFDMA 시스템의 수신 성능 향상을 위한 주파수 동기 알고리즘", 한국통신학회 논문지, 제34권 제1호, pp.120-130, 2009.1.
- [8] 허주, 장경희, "OFDM/FDD 시스템에서 Target QoS 만족을 위한 다단계 적응전송 채널예측기법", 한국통신학회 논문지, 제31권, 8호, pp.

745~751, 2006.08.

- [9] Almudena Konrad, Ben Y. Zhao, Anthony D. Joseph, Reiner Ludwig, "A Markov-Based Channel Model Algorithm for Wireless Networks" Computer Science Division (EECS), Report No. UCB/CSD-01-1142 May 2001
- [10] R. Rebhan and J. Zander, "On the outage probability in single frequency networks for digital broadcasting," IEE Trans. Broadcasting, Vol.39, No.4, pp.395-401, Dec. 1993
- [11] 3GPP TR 25.892, "Feasibility study for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) for UTRAN enhancement," v6.0.0 June 2004.
- [12] ITU, "Guidelines for evaluation for radio transmission technologies for IMT-2000," Recommendation ITU-R M.1225, 1997.

박승영 (Seung Young Park)

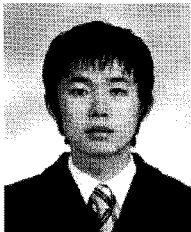
종신회원



1997년 2월 고려대학교 전파공학과 학사
 1999년 2월 고려대학교 통신시스템학과 석사
 2002년 8월 고려대학교 전파공학과 박사
 2002년 11월~2003년 3월 고려대학교 BK21 정보통신사업단 박사후연구원
 2003년 4월~2005년 12월 삼성전자중합기술원 책임연구원
 2006년 1월~2007년 2월 미국 퍼듀대학교 박사후연구원
 2007년 3월~현재 강원대학교 전자통신공학과 부교수 <관심분야> 이동통신, 다중안테나/다중사용자 통신, 무선자원관리

정경구 (Kyung-goo, Jung)

준회원



2009년 2월 강원대학교 전자통신공학과 학사
 2011년 2월 강원대학교 전자통신공학과 석사
 <관심분야> 차세대이동통신시스템, 무선자원관리 알고리즘 및 최적화