

IEEE 802.11 기반의 무선 백홀을 사용하는 Mobile WiMAX 펌토셀을 위한 프레임 동기화 기법

정회원 최지훈*, 종신회원 오혁준**, 정회원 윤재연***, 고현모***

Frame Synchronization for Mobile WiMAX Femtocells Using IEEE802.11 Based Wireless Backhaul

Jihoon Choi* *Regular Member*, Hyukjun Oh** *Lifelong Member*,
Jae Yeun Yun***, Hyunmo Ko*** *Regular Members*

요약

이동통신 시스템의 커버리지를 확장하고 네트워크 용량을 늘리기 위한 방법으로 사무실이나 가정에 펌토셀(femtocell)을 설치하는 방안이 널리 연구되어 왔다. 시분할 다중화 방식을 사용하는 M-WiMAX (Mobile WiMAX) 펌토셀의 경우 상향링크와 하향링크 신호간의 간섭을 피하기 위해 인접한 기지국과 프레임(frame) 동기를 일치시켜야 한다. 본 논문에서는 IEEE 802.11 기반의 무선 백홀(backhaul)을 사용하는 펌토셀의 프레임 동기화를 위해 IEEE 802.11의 비콘(beacon) 신호를 이용하여 이동통신망의 동기 정보를 펌토셀로 전달하는 방안을 제안한다. 또한 제안된 기법으로 동기 정보를 전달할 때 발생하는 시간 오차를 줄이기 위해 기존 IEEE 802.11 송신기의 충돌 회피 기법을 일부 수정하고 IEEE 802.11 수신기에 최소 자승(least squares) 오차 관점에서 설계된 시간 동기 추정 기법을 적용한다. 제안된 방식을 적용한 모의 실험을 통해 펌토셀의 프레임 동기화 성능을 평가하고, 펌토셀에서 복원된 시간 동기 정보가 M-WiMAX 표준에 정의된 규격을 만족함을 보인다.

Key Words : Femtocell, Mobile WiMAX, Frame Synchronization, Wireless Backhaul, IEEE 802.11

ABSTRACT

The use of femtocells in buildings and homes has been widely studied as a means to enlarge the cell coverage and increase the network capacity of mobile communication systems. Femtocells for Mobile WiMAX (M-WiMAX) using time division duplexing (TDD) requires frame synchronization with neighboring base stations to avoid interference between uplink and downlink signals. In this paper, we propose a new frame synchronization method for femtocell using IEEE 802.11 based wireless backhaul, which transfers the time information of mobile network to femtocells via the beacon signal provided by IEEE 802.11. Also, in order to reduce timing error of the proposed method, we modify the collision avoidance scheme in the transmitter of IEEE 802.11 and apply a timing estimation technique designed in the sense of least squares to the receiver of IEEE 802.11. Through computer simulations using the proposed scheme, we evaluate the performance of frame synchronization for femtocells and show that the recovered timing information satisfies the timing specification defined by M-WiMAX standard.

* 본 연구는 SK텔레콤 Network기술원의 "차세대 실내 초소형 기지국 요소 기술 연구" 과제와 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (No. 2009-0070069).

** 본 연구는 부분적으로 2009 광운대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행되었음.

* 한국항공대학교 항공전자및정보통신공학부(jihoon@kau.ac.kr), ** 광운대학교 전자통신공학과(hj_oh@kw.ac.kr)

*** SK텔레콤 Network기술원(jy_yun@sktelecom.com, hmko@sktelecom.com)

논문번호: KICS2009-11-564, 접수일자: 2009년 11월 6일, 최종논문접수일자: 2010년 7월 2일

I. 서 론

최근 이동통신망의 커버리지 확장과 서비스 품질 향상, 유무선 통신 서비스의 통합이라는 측면에서 소형 기지국 개념의 펠토셀 혹은 피코셀(picocell)이 많은 주목을 받고 있다. 소형 기지국은 크게 듀얼 모드(dual mode)단말을 사용하여 옥외에서는 이동통신망을 이용하여 통신하고 옥내에서는 무선랜과 근거리 이동통신망을 이용하여 통신을 제공하는 FMC(fixed mobile convergence) 방식과 옥외와 옥내에서 동일한 방식으로 이동통신 서비스를 제공하는 FMS(fixed mobile substitution) 방식으로 구분된다. 특히 FMS 방식의 경우 기존의 단말기를 교체하지 않고 서비스 품질을 개선할 수 있으므로 이동통신 사업자를 중심으로 사업화가 진행되고 있으며, 본 논문에서도 FMS 방식 중 가장 작은 용량을 갖는 펠토셀을 고려한다^{1,3)}.

중계기의 경우 매크로 기지국에서 수신한 신호를 그대로 전송하므로 기지국 커버리지는 확대되지만 용량은 증가하지 않는다. 반면에 펠토셀의 경우 기존 매크로 기지국과 유사하게 독립적인 주파수를 할당 받아서 동작하므로 펠토셀의 수에 비례해서 전체 이동통신 네트워크의 용량이 증가한다. 따라서 펠토셀의 경우 커버리지 확대와 동시에 무선 네트워크의 용량을 증가시킨다. 특히, 최근에 상용화되거나 표준화를 진행하고 있는 이동통신 시스템의 경우 사용하는 반송파 주파수가 높고 대역폭이 넓으므로 매크로 기지국의 커버리지가 기존 이동통신 시스템에 비해 좁다. 즉, 매크로 기지국만으로 망을 구축할 경우 필요한 기지국 수가 증가하여 망 구축 비용이 커진다. 또한, 이동통신 시스템의 진화에 따라 음성 통신에 비해 데이터 통신의 비율이 증가하고 있으므로 기존의 매크로 기지국만으로 다수의 사용자에게 고속의 데이터 통신 서비스를 제공하는 것이 힘들다. 이에 대한 대안으로 사람들이 무선 통신을 주로 이용하는 사무실이나 가정에 저가의 펠토셀을 설치하여 무선 통신 서비스를 제공하는 것이 유력한 대안으로 연구되고 있다. 일반적으로 펠토셀이라 함은 디지털 가입자 회선(digital subscriber line) 라우터나 케이블 모뎀 등과 유사한 크기로 매크로(macro) 기지국에 비해 매우 작은 초소형 기지국을 의미한다. 펠토셀은 이동통신 사업자에게 할당된 공인 주파수 대역 혹은 비공인 주파수 대역(ISM band 등)에서 동작할 수 있고, 출력 전압은 10~200mW, 통신 거리는 50~100m 정도를 커버하며,

10명 이내의 사용자가 동시 접속할 수 있다^{4,6)}.

이동통신망에서 기존의 매크로 기지국과 펠토셀을 동시에 운영하기 위해서는 펠토셀의 반송파 주파수와 신호 전송 시간이 매크로 기지국과 동기화되어야 한다. 특히 IEEE 802.16e 기반의 M-WiMAX와 같이 시분할 다중화 방식을 사용하는 경우 매크로 기지국과 펠토셀의 신호 전송 시간이 어긋나게 되면 매크로 기지국의 상향하향링크 신호와 펠토셀의 하향상향링크 신호간에 간섭이 발생하게 되므로 매크로 기지국과 펠토셀의 프레임 동기를 맞추는 것이 매우 중요하다⁷⁾. 기존 매크로 기지국의 경우 송수신 안테나가 실외에 설치되므로 인공위성으로부터 GPS(global positioning system) 정보를 수신하여 코어 네트워크(core network)와 매크로 기지국을 동기화시킨다. 하지만, 펠토셀의 경우 사무실, 학교, 아파트, 주택 등과 같이 일반적으로 GPS 신호를 수신하기 힘든 실내에 설치되므로 GPS 신호를 동기 획득에 사용할 수 없다. 또한, GPS 신호가 수신 가능한 경우라 하더라도 펠토셀에 GPS 신호 수신을 위한 별도의 장치를 부착하여야 하므로 가격이 비싸지는 단점이 있다. 펠토셀에서 GPS 신호를 수신할 수 없는 경우 매크로 기지국에서 송신한 파일럿(pilot) 신호를 이용해서 동기를 획득하는 방안이 제안되었다³⁾. 하지만, 이 방식은 펠토셀이 설치된 지역에서 매크로 기지국의 하향링크 파일럿 신호를 수신할 수 있는 경우에만 적용할 수 있는 단점이 있다. 펠토셀은 매크로 기지국 신호가 전달되지 않는 지역에 설치되어 무선 통신 서비스 영역을 넓히고 용량을 확대하는 것을 주 목적으로 한다. 그런데 펠토셀이 매크로 기지국의 커버리지 내에 설치되어야 한다면 펠토셀의 효율성이 현저히 줄어들게 된다. 펠토셀과 코어 네트워크가 초고속 인터넷 등을 이용해서 유선으로 연결된 경우에는 IEEE 1588 규격을 이용해서 펠토셀의 동기를 획득하는 방안이 연구되고 있다^{8,9)}. IEEE 1588을 이용하는 경우 코어 네트워크와 펠토셀이 IP(internet protocol) 망에 의해 유선으로 연결되고, 코어 네트워크에는 IEEE 1588 Master가 연결되며, 펠토셀에는 IEEE 1588 Slave가 연결된다. IEEE 1588 Master에서는 코어 네트워크의 동기 정보를 기록한 데이터 패킷(packet)을 IEEE 1588 Slave로 주기적으로 전달하고, Slave에서는 수신 패킷에 기록된 동기 정보와 전송 지연을 고려해서 시간 동기를 복원한다. 그런데, IEEE 1588은 코어 네트워크에서 펠토셀로 데이터를 전송하는 하향링크와 펠토셀에서 코어 네트워크로 데이터를 전송

하는 상향링크의 전송 지연이 동일한 경우에만 적용 가능하다. 즉, 일반적으로 널리 사용되는 디지털 가입자 회선망(DSL: digital subscriber line) 기반의 초고속 인터넷을 사용하는 경우 하향링크와 상향링크의 전송 지연에 상당한 차이가 나므로 IEEE 1588 규격을 적용하는 경우 심각한 동기 추정 오차가 발생하게 된다³⁾.

사무실 혹은 가정에서 펌토셀을 사용하기 위해서는 코어 네트워크와 펌토셀을 연결하는 망이 필요하다. 망 구축 비용을 줄이고 공사 범위를 줄이기 위한 유력한 방안으로 코어 네트워크와 펌토셀을 무선으로 연결하는 무선 백홀 구조를 고려한다. 특히 IEEE 802.11 기반의 무선랜의 경우 사무실이나 가정에서 널리 이용되고 있어서 가격이 저렴하고 최근 표준화가 진행되고 있는 IEEE 802.11n의 경우 MIMO (multi-input multi-output) 기술을 적용해서 200~300 Mbps에 이르는 높은 전송 속도를 제공하므로 M-WiMAX 펌토셀의 무선 백홀로 사용하기에 적합하다.

본 논문에서는 IEEE 802.11 기반의 무선랜을 백홀로 사용하는 M-WiMAX 펌토셀의 프레임 동기화를 위해 무선랜의 AP (access point)에서 주기적으로 전송하는 비콘 신호를 이용하는 방안을 제안한다. 코어 네트워크에서는 GPS를 이용하여 동기를 획득하고, 코어 네트워크에 연결된 무선랜 AP에서는 코어 네트워크에 동기화된 클락(clock)을 이용하여 주기적으로 비콘을 전송한다. M-WiMAX 펌토셀에 연결된 무선랜 AT (access terminal)에서는 수신한 비콘 신호를 이용하여 코어 네트워크의 동기 정보를 복원하고 이를 펌토셀에 제공하여 펌토셀이 코어 네트워크와 동기화되도록 한다. 그런데 무선랜 규격에서는 다수 단말간의 다중 접속시 패킷 충돌을 최소화하기 위해 랜덤 백오프(random backoff) 기법을 사용한다. 즉, 무선랜의 랜덤 백오프를 그대로 적용하면 AP에서 비콘 패킷을 생성한 후에 랜덤 백오프가 적용된 후 전송되므로, AP의 비콘에 기록된 패킷 송신 시간과 실제 비콘이 전송되는 시간에 차이가 생기게 된다. 본 논문에서는 이런 문제를 완화하기 위해 비콘에 기록된 송신 시간과 비콘의 실제 전송 시간의 차이를 최소화하는 새로운 백오프 기법을 제안한다. 또한, 무선랜 AT에서 비콘에 기록된 시간 정보에 포함된 지터(jitter)를 감안하여 최소 자승 오차 측면에서 최적의 방법으로 시간 정보를 추정한다. 제안된 백오프 기법과 시간 정보 추정 기법을 적용한 모의 실험을 수행하여 무선랜

AT에서 복원된 프레임 동기의 지터 특성을 평가하고, 복원된 프레임 동기가 M-WiMAX 규격에서 요구하는 프레임 동기 정확도 규격을 만족함을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서 무선랜을 백홀로 사용하는 M-WiMAX 펌토셀의 구조에 대해 설명하고, 3절에서 무선랜 비콘을 이용한 프레임 동기 획득 방안을 제안한다. 4절에서는 제안된 기법을 적용한 모의 실험을 수행하여 복원된 프레임 동기의 성능을 분석하고, 끝으로 5절에서 결론을 제시한다.

II. 무선랜 백홀을 사용하는 M-WiMAX 펌토셀

여러 개의 층으로 이루어진 사무실의 경우 건물 내부에 별도로 마련된 통신실에 접속제어국(ACR: access control router)을 설치하고, 옥외의 경우 매크로 기지국(RAS: radio access station)을 이용해서 커버리지를 확보하고 옥내의 경우 펌토셀을 이용해서 커버리지를 확보한다. 사무실에 펌토셀을 설치하는 경우 기존의 유선 인터넷망이 포화 상태이므로 접속제어국과 펌토셀을 연결하는 유선망을 추가로 설치하여야 한다. 펌토셀의 특성상 제한적인 커버리지를 가지므로 사무실에 펌토셀을 설치하는 경우 각 층별로 다수의 펌토셀을 설치하여야 하고, 이를 위해서는 각 층별로 유선망을 추가 설치해야 하므로 펌토셀의 설치 비용이 증가하는 문제점이 있다.

이런 유선 백홀의 단점을 극복하기 위해서 그림 1과 같이 IEEE 802.11 기반의 무선랜을 백홀로 사용하여 M-WiMAX 코어 네트워크를 연결하는 구조를 고려한다. 코어 네트워크와 건물의 통신실에 설치된 접속제어국은 유선으로 연결되고, 접속제어국에 연결된 무선랜 AP를 이용하여 데이터를 펌토셀로 전송한다. 무선랜 AP에서는 AP와 AT의 시간 동기화, 비콘 전송 주기, AP의 커버리지, 전송 규격, 주파수 대역, AP ID 정보 등을 무선랜 AT에 알려주기 위해 주기적으로 비콘 프레임을 전송한다. 무선랜을 백홀로 이용할 경우 무선랜 규격에서 기본으로 제공하는 비콘과 데이터가 다중화되어 전송된다. 또한 무선랜 규격에서는 1대의 AP와 다수의 AT가 시분할 다중화 방식으로 통신하고, AP 혹은 AT가 전송하는 데이터간에 충돌이 발생하는 확률을 낮추기 위해 랜덤 백오프 기법을 이용한다. 펌토셀에 연결된 무선랜 AT에서는 AP에서 전송된 데이터를 수신하여 비콘과 데이터로 분류하여 복호한다.

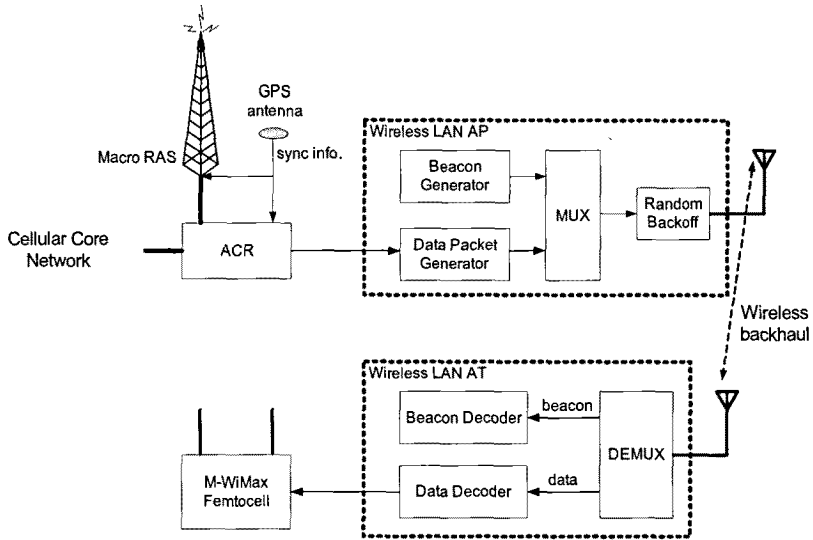


그림 1. 무선랜 백홀을 사용하는 M-WiMAX 펌토셀 구조
 Fig. 1. M-WiMAX femtocell using wireless backhaul

비콘 프레임이 복호되면 비콘에 포함된 필드 정보를 이용하여 AT의 동작 파라미터를 설정하고, 비콘에 포함된 전송시간 정보와 송신단에서의 신호처리 지연, 수신단에서의 신호처리 지연 등을 고려해서 AT의 시스템 시간을 AP와 근사적으로 동기화시킨다. 데이터가 수신되면 복호 후 펌토셀로 전달하고, 펌토셀의 하향링크를 통해 펌토셀 커버리지 내에 있는 단말로 전송된다. 상향링크의 경우에는 그림 1의 역과정을 통해 펌토셀 상향링크로 수신된 신호가 무선랜 AT로부터 무선랜 AP로 전달되고, AP에 연결된 ACR을 통해 코어 네트워크로 전달된다. 이 경우 AT에서는 비콘을 전송하지 않고 데이터만 전송한다.

무선랜 비콘에 포함된 timestamp 필드는 64 bits로 정의되고, 비콘의 송신 시간을 μs 단위로 나타낸다. 또한 비콘에 포함된 Beacon interval 필드는 16 bits로 구성되어 있고, 비콘 프레임이 송신되는 간격을 1,024 μs 단위로 정의한다. 본 논문에서는 무선랜을 이용하여 프레임 동기를 전달하는 것이 목적이므로 IEEE 802.11 표준에 정의된 동작 모드 중에

AP가 master로 AT가 slave로 정의되는 infrastructure network 모드만을 고려한다. 이 경우 AP에서 비콘을 전송하는 시점은 그림 2와 같이 주어진다. 무선 채널이 비어 있는 경우 비콘은 미리 정해진 주기에 따라 전송된다. 하지만 비콘을 전송하는 시점에 AP 혹은 AT에 의해 데이터가 전송중인 경우에는 해당 데이터의 전송이 완료된 후에 비콘이 전송된다. 이때 그 다음 비콘의 전송 시점은 이전 시점에서의 비콘 전송 지연을 고려하지 않고 미리 정해진 비콘 전송 주기에 의해 계산된다. 즉, n 번째 비콘의 전송 시간이 T_0 이고, 비콘의 전송 주기가 T_{interval} 이라고 하면, $(n+1)$ 번째 비콘은 $(T_0+T_{\text{interval}})$ 시점에 전송되어야 한다. 그런데 이 시점에 데이터가 전송되고 있어서 T_{delay} 만큼 전송 시간이 지연되었다면, $(n+1)$ 번째 비콘은 $(T_0+T_{\text{interval}}+T_{\text{delay}})$ 시점에 전송되고, $(n+2)$ 번째 비콘은 T_{delay} 와 상관없이 $(T_0+2T_{\text{interval}})$ 시점에 전송된다. 이와 같이 비콘이 전송되는 시점에 데이터가 전송중인 경우에는 비콘의 전송 시간에 편차가 발생할 수 있다.

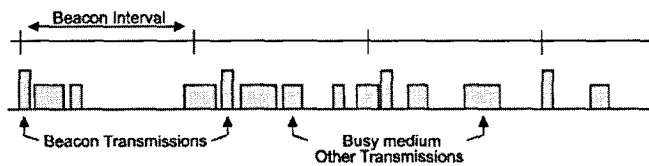


그림 2. 비콘과 데이터가 함께 전송되는 경우 비콘의 전송 시점
 Fig. 2. Transmit timing of beacons when beacon and data frames are simultaneously conveyed

III. 무선랜 비콘을 이용한 펌토셀 동기 획득

3.1 제안한 M-WiMAX 펌토셀 동기 획득 방안

본 절에서는 무선랜을 백홀로 사용하는 M-WiMAX 펌토셀에서 비콘 신호를 이용해서 펌토셀의 프레임 동기를 획득하는 방안을 제안한다. 제안된 기법을 적용한 무선랜 백홀의 구조는 그림 3으로 주어진다. 매크로 기지국에서는 실외에 설치된 안테나를 이용해서 GPS 신호를 수신하고, 이 신호를 접속제어국과 코어 네트워크가 공유하여 매크로 기지국과 코어 네트워크가 동기화되도록 한다. 또한, GPS 신호에 동기화해서 무선랜 AP 내부의 타이머를 구동한다. 이 타이머는 무선랜 AP에서 주기적으로 전송되는 비콘의 전송 시점을 알려주는 역할을 한다. 예를 들어 타이머의 클락 주기가 T_{clock} 이고 비콘의 전송 주기가 $T_{interval} = N \cdot T_{clock}$ 이라고 하면, 타이머를 (N-1)로 초기화하고 GPS에 동기화된 클락에 따라 타이머 값을 1씩 감소시켜서 타이머가 0이 되는 시점에 비콘을 전송하고, 다음 클락에 타이머를 다시 (N-1)로 초기화한다. 이런 방법으로 비콘의 전송 시간이 GPS 클락에 동기화되도록 할 수 있다.

무선랜을 백홀로 사용하는 경우 접속제어국에서 펌토셀로 전달되는 데이터와 비콘 프레임이 시간 다중화(multiplexing)되어 전송된다. 무선랜의 경우 AP와 다수의 AT가 동일한 주파수 자원을 시분할해서 사용하므로 AP 혹은 AT가 전송하는 데이터 프레임간에 충돌이 발생할 수 있다. IEEE 802.11 표

준에서는 AP 혹은 AT에서 전송되는 데이터 사이의 충돌 확률을 낮추기 위해 랜덤 백오프 방식을 사용한다. 무선랜을 M-WiMAX 펌토셀의 백홀로 사용할 때 랜덤 백오프 기법을 그대로 적용할 경우 비콘의 timestamp 필드에 기록된 전송 시간과 실제 비콘이 전송되는 시간의 차이가 커지는 문제점이 있다. 본 논문에서는 이런 문제점을 완화하기 위해 기존의 랜덤 백오프 방식 대신에 M-WiMAX 펌토셀용 무선 백홀 환경에 적합한 새로운 백오프 방식을 제안한다. 제안된 백오프 기법은 3.2절에서 자세히 설명한다.

송신단의 백오프 제어를 거쳐서 송신된 신호가 펌토셀에 부착된 무선랜 AT로 수신되면, AT에서는 수신된 프레임을 비콘과 데이터로 분류한다. 그리고 비콘 프레임의 수신 시간을 무선랜 AT의 local clock을 이용해서 측정한다. 수신단의 프레임 동기 추정기에서는 비콘의 timestamp 필드에 기록된 비콘 송신 시간과 AT에서 측정된 비콘 수신 시간을 이용하여 GPS에 연동된 코어 네트워크의 프레임 동기를 복원하고, 펌토셀로 프레임 동기 정보를 전달한다. 프레임 동기를 복원하는 과정은 3.3절에서 자세히 설명한다.

3.2 무선랜 송신기에서의 백오프 방안

IEEE 802.11에 정의된 랜덤 백오프 방법은 그림 4와 같이 표현된다. 무선랜의 AP 혹은 AT는 데이터를 전송하기 전에 무선 채널이 사용되고 있는지

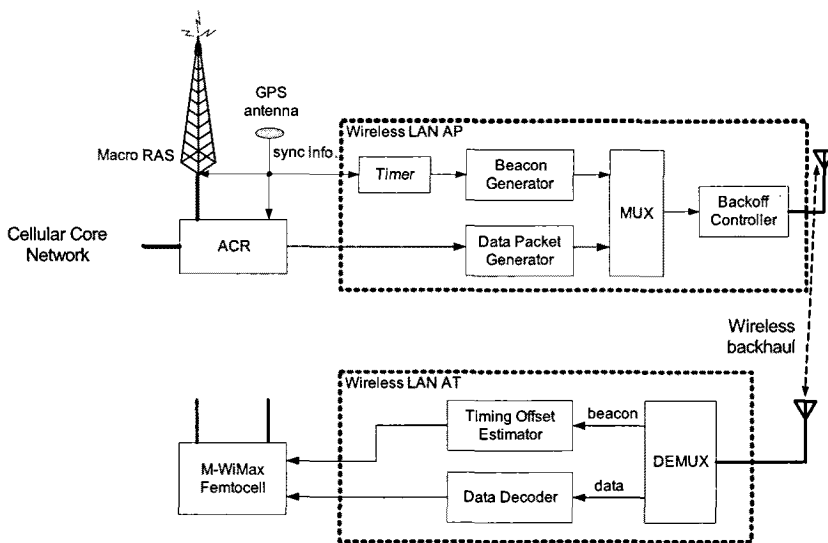


그림 3. 무선랜 백홀을 사용하는 M-WiMAX 펌토셀의 프레임 동기를 획득하기 위한 구조
Fig. 3. Frame synchronization of M-WiMAX femtocells using wireless backhaul

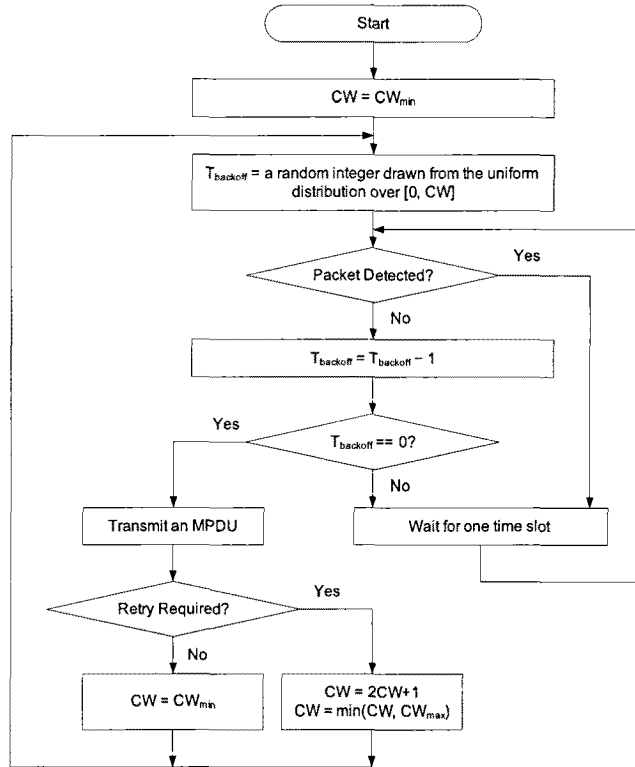


그림 4. IEEE 802.11에 정의된 랜덤 백오프 방식
Fig. 4. Random backoff defined by IEEE 802.11

여부를 감지하여 무선 채널이 사용되지 않는다고 판단되면 데이터를 전송한다. 그런데 두 대 이상의 무선 기기가 동시에 데이터를 전송하고자 하는 경우 무선 채널이 사용되지 않는 것을 감지한 직후에 데이터를 전송하면 다수의 무선 기기에서 동시에 데이터를 전송하게 되어 충돌이 발생하게 된다. 이런 문제점을 해결하기 위해 무선 채널이 사용되지 않은 상태를 확인한 후 백오프 시간만큼 기다린 후 데이터를 전송하도록 하고, 무선 기기간의 데이터 전송 시간을 차별화하기 위해 백오프 시간이 랜덤하게 정해지도록 하는 랜덤 백오프 기법을 사용한다. 구체적으로 살펴보면 그림 4에서와 같이 CW (contention window)는 시작시 CW_{min} 으로 초기화되고, 백오프 시간 $T_{backoff}$ 는 0~CW의 범위에서 선택된 임의의 정수값으로 정해진다. 매번 전송 시간 슬롯(time slot) 단위로 무선 채널이 사용되고 있는지 여부를 확인하여, 무선 채널이 사용되고 있는 경우에는 $T_{backoff}$ 값을 그대로 유지하고, 무선 채널이 사용되지 않는 경우에는 $T_{backoff}$ 값을 1씩 감소시킨다. 이런 과정을 통해 $T_{backoff}$ 값이 0이 되면 MPDU

(MAC protocol data unit)를 전송한다. MPDU가 정상적으로 전송되면 CW 값을 CW_{min} 으로 초기화하고, 전송 과정에서 충돌, 잡음 등의 이유로 MPDU를 정상적으로 수신하지 못해서 재전송이 발생하면 다음과 같이 CW 값을 증가시킨다.

$$CW = 2CW + 1 \quad (1)$$

$$CW = \min(CW, CW_{max}) \quad (2)$$

위의 식(2)는 CW가 최대값 CW_{max} 이하가 되도록 제한하는 역할을 한다. 위와 같은 랜덤 백오프 동작은 무선랜 AP에서 비콘 프레임을 전송할 때도 적용된다. 따라서 비콘을 전송하는 시점에 무선 채널이 비어 있는 경우에도 다음과 같은 전송 지연이 발생하게 된다.

$$T_{BO_delay} = T_{backoff} \times aSlotTime \quad (3)$$

이때 aSlotTime은 하나의 전송 슬롯이 차지하는

시간을 나타낸다. OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 방식으로 20MHz 대역을 사용하는 경우 $CW_{min}=15$, $aTimeSlot=9\mu s$ 로 정해지므로^[10], 식 (3)에 $CW=CW_{min}$ 인 경우에 T_{BO_delay} 값은 0~135 μs 사이의 값을 가지게 된다. 즉, 비콘의 timestamp 필드에 기록된 전송 시간과 실제 전송 시간 사이에 0~135 μs 의 오차가 생길 수 있다. 시분할 다중화 방식을 사용하는 M-WiMAX의 프레임 동기 오차가 있는 경우 상향링크와 하향링크의 신호간에 간섭이 발생할 수 있으므로, M-WiMAX 표준에서는 프레임 동기 오차가 핸드오버(handover)를 지원하는 경우 $\pm 2\mu s$, 핸드오버를 지원하지 않는 경우 $\pm 20\mu s$ 이내가 되도록 규정하고 있다. 따라서 기존의 무선랜에서 정의하고 있는 랜덤 백오프 기법을 사용해서 비콘을 전송하면 M-WiMAX의 프레임 동기 오차 규격을 만족하기 힘들다.

이 절에서는 이런 문제점을 완화하기 위해 무선 백홀로 사용되는 무선랜 시스템을 위한 새로운 백오프 기법을 제안한다. 사무실이나 가정에서 사용되는 무선랜 AP의 경우 동시에 다수의 AT가 접속할 수 있는 반면에 무선 백홀로 사용되는 무선랜 AP의 경우 접속제어국과 펌토셀의 연결 구조에 따라

동시에 접속하는 AT 수가 결정된다. 현재 상용화되어 사용되는 M-WiMAX의 하향링크 최대 용량, IEEE 802.11n의 최대 용량, 접속제어국과 펌토셀간의 통신을 위한 오버헤드(overhead) 등을 감안하면 무선랜 AP 당 최대 3대의 무선랜 AT(혹은 3대의 펌토셀)를 연결해서 무선 백홀을 구성할 수 있다. 즉, M-WiMAX 무선 백홀로 무선랜 AP를 사용하는 경우 동시에 접속하는 AT의 수가 매우 작으므로 이에 적합한 백오프 방식을 고려했다.

그림 5는 제안된 백오프 방법을 나타낸다. 동시에 접속 가능한 최대 AT의 수를 N_{AT} 라고 할 때, AP를 포함하여 동시에 접속 가능한 무선 기기의 수 N_{total} 은 다음과 같이 정의된다.

$$N_{total} = N_{AT} + 1 \quad (4)$$

이때 무선랜 AP를 포함한 N_{total} 개의 무선 기기에 0에서 $(N_{total}-1)$ 사이의 서로 다른 정수를 백오프 기준값(seed)으로 할당한다. 예를 들어 AP에 2대의 AT가 접속하는 경우 백오프 기준값은 다음과 같이 할당할 수 있다.

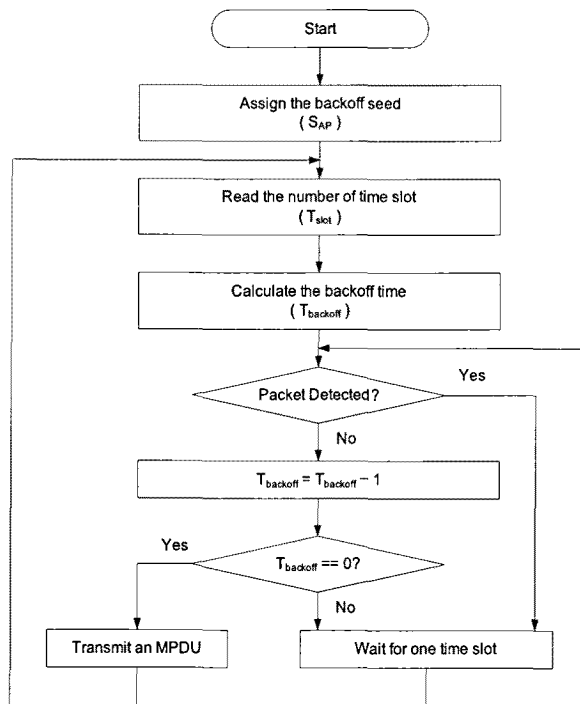


그림 5. 제안된 백오프 방법
Fig. 5. Proposed backoff method

$$S_{AP} = 0, S_{AT1} = 1, S_{AT2} = 1 \quad (5)$$

이때 S_{AP} , S_{AT1} , S_{AT2} 는 각각 AP, 첫번째 AT, 두번째 AT에 할당된 기준값을 나타낸다. 무선랜 AP에서는 GPS에 연동된 클락을 이용하여 전송 시간 슬롯 번호를 지정한다. 데이터를 전송하고자 하는 시점에서 시간 슬롯 번호를 T_{slot} 으로 정의하자. 이때 무선랜 AP에 대한 백오프 값은 다음과 같이 계산된다.

$$T_{backoff} = \left(\left\lfloor \frac{T_{slot}}{P} \right\rfloor + S_{AP} \right) \% N_{total} \quad (6)$$

이때 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 와 같거나 작은 최대 정수를 나타내고, $(x \% y)$ 는 정수 x 를 정수 y 로 나누었을 때의 나머지를 의미하며, P 는 스케줄링(scheduling) 우선 순위가 변경되는 주기를 나타낸다. 예를 들어 $N_{total}=3$ 이고, (5)와 같이 백오프 기준값을 할당하는 경우, 무선랜 AP에서 T_{slot} 에 따른 백오프 값은 다음과 같이 결정된다.

$$T_{backoff} = \begin{cases} 0, & \text{if } 3nP \leq T_{slot} \leq (3n+1)P-1 \\ 1, & \text{if } (3n+1)P \leq T_{slot} \leq (3n+2)P-1 \\ 2, & \text{if } (3n+2)P \leq T_{slot} \leq (3n+3)P-1 \end{cases} \quad (7)$$

이때 $n=0,1,2,\dots$ 으로 주어진다. 식(6)에 S_{AP} 대신에 S_{AT1} 과 S_{AT2} 를 대입하면 첫번째 AT와 두번째 AT의 백오프 값을 계산할 수 있다. 이때 동일한 T_{slot} 에서 AP와 첫번째 AT, 두번째 AT의 백오프 값은 0~2 사이의 서로 다른 정수값으로 할당되고, P 슬롯마다 백오프 값이 순환되면서 변경된다. 식(6)을 이용하여 AP의 백오프 값이 정해지면, 기존 IEEE

802.11에서와 유사하게 매 슬롯마다 무선 채널의 사용 유무를 감지하여 무선 채널이 사용되지 않으면 $T_{backoff}$ 값을 1씩 감소시킨다. 그리고 $T_{backoff}=0$ 이 되면 MPDU를 전송한다. 제안된 백오프 방식을 사용하면 무선 기기들이 전송하는 데이터간의 충돌을 막고, 각 무선 기기의 데이터 전송 우선 순위를 시간적으로 공평하게 할당하며, 백오프 동작에 의한 전송 지연을 줄일 수 있다. 제안된 백오프 방식을 적용하고 비콘을 전송하는 시점에 무선 채널이 비어 있다고 가정하면 백오프에 의한 전송 지연이 다음과 같이 주어진다.

$$T_{BO_delav} = k \times aSlotTime, k = 0,1,2 \quad (8)$$

기존 랜덤 백오프 방식을 사용할 경우 최대 전송 지연이 $135\mu s$ 인 반면에 제안된 백오프 방식을 사용하면 최대 전송 지연이 $18\mu s$ 로 줄어들음을 알 수 있다.

3.3 무선랜 수신기에서의 프레임 동기 추정

무선랜 AP에서 생성된 비콘이 무선랜 AT로 전달되는 과정은 그림 6과 같다. 비콘 전송 간격에 따라 주기적으로 생성된 비콘은 3.2절에서 설명한 백오프 절차를 통해 스케줄링 된 후 물리계층(physical layer)에서 변조 과정을 거쳐서 무선으로 송신된다. AT에서는 송신단의 역과정을 통해 비콘을 복조한 후 MAC(media access control) 계층으로 전달한다. 비콘이 무선랜 AP에서 AT로 전달되는 과정을 살펴보면 AP의 물리계층에서의 신호처리 지연 ($D_{PHY,AP}$), 송신 안테나에서 수신 안테나로 신호를 전파하는데 걸리는 시간 지연 (D_{air}), AT의 물리계층에서의 신호처리 지연 ($D_{PHY,AT}$) 등을 겪게 된다. $D_{PHY,AP}$ 와 $D_{PHY,AT}$ 는 무선랜 송수신기의 하드

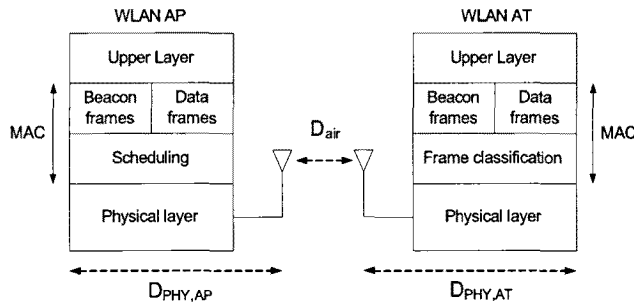


그림 6. 무선랜 백홀에서 비콘 프레임 전달 과정
Fig. 6. Transmission of beacon frames over wireless backhaul

웨어 구조에 의해 상수값으로 결정된다. 따라서 IEEE 802.11에서는 AP에서 비콘의 송신 시간을 timestamp 필드에 기록할 때 $D_{PHY,AP}$ 를 미리 보상하고, AT에서 비콘을 수신한 시간을 측정할 때 $D_{PHY,AT}$ 를 보상하도록 규정하고 있다. 또한, IEEE 802.11n을 고려할 때 최대 전송 거리가 70~100m 정도이므로 D_{air} 는 0.33 μs 이하가 된다. 핸드오버를 고려하는 경우 프레임 동기 오차 규격이 2 μs 이므로 D_{air} 에 의해 발생하는 동기 오차는 수용 가능한 수준이다.

IEEE 802.11 표준에서는 무선랜 AT가 비콘 신호를 수신하면, 무선랜 AT의 타이머 값을 수신한 비콘의 timestamp 필드에 기록된 무선랜 AP의 타이머 값으로 갱신해서 AT의 타이머를 동기화하도록 규정하고 있다. 이와 같이 하나의 비콘만을 이용해서 AT의 타이머를 갱신할 경우 3.2절에서 설명한 바와 같이 AP의 백오프 동작에 의해 비콘의 timestamp 필드에 기록된 전송 시간과 비콘의 실제 전송 시간 사이에 차이가 있는 경우 AT에서 복원한 타이머에 오차가 발생할 수 있다. 일반적인 무선랜 시스템의 경우 백오프 동작에 의해 AP와 AT의 타이머간에 오차가 발생해도 동작에 큰 문제가 없다. 하지만, 그림 3과 같이 무선랜을 M-WiMAX 펌토셀의 무선 백홀로 이용하는 경우 AP와 AT의 타이머 오차는 곧바로 펌토셀의 프레임 동기 오차가 되므로 AP와 AT의 타이머 오차를 줄이는 동기 추정 기법이 필요하다.

그림 7은 본 논문에서 제안한 프레임 동기 추정 기법을 나타낸다. 우선 비콘이 수신되면 비콘의 timestamp 필드를 이용하여 무선랜 AP의 타이머 값을 추출한다. n 번째 비콘의 timestamp 값을 $t(n)$ 이라고 하면, n 번째 비콘이 송신 안테나에서 실제 전송된 시간은 다음과 같이 표현된다.

$$s(n) = t(n) + v(n) \tag{9}$$

이때 $v(n)$ 은 송신단에서 백오프 지연을 나타낸다. 송수신 안테나간의 전송 시간과 무선랜 AT에서의 신호처리 지연을 고려하면, n 번째 비콘이 AT에 수신된 시간은 다음과 같이 주어진다.

$$u(n) = s(n) + D_{air} + D_{PHY,AT} = x(n) + w(n) \tag{10}$$

여기서 $x(n)$ 은 $t(n)$ 에서 AP에서의 백오프 지연의 평균값과 AT에서의 신호처리 지연을 보상한 값이고, $w(n)$ 은 $u(n)$ 에서 $x(n)$ 을 제외한 나머지 값을 나타내며, 각각 다음과 같이 정의된다.

$$x(n) = t(n) + D_{PHY,AT} + E[v(n)] \tag{11}$$

$$w(n) = v(n) - E[v(n)] + D_{air} \tag{12}$$

이때 $E[\cdot]$ 는 기대값을 의미한다. 식(10)은 AP의 타이머를 기준으로 AT에 비콘이 수신된 시간을 나타낸다. 실제 시스템에서 AT는 AP의 타이머를 알 수 없으므로 AT의 타이머를 이용하여 비콘의 수신 시간을 측정한다. AT의 타이머를 이용하여 측정된 비콘의 수신 시간을 $y(n)$ 이라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$y(n) = a \cdot u(n) + b \tag{13}$$

여기서 상수 a 는 AP 타이머의 주파수 대비 AT 타이머의 주파수 비를 나타내고, 상수 b 는 AP 타이머와 AT 타이머의 위상 오차를 나타낸다. 식(10)의 $u(n)$ 을 식(13)에 대입하면 다음과 같이 써진다.

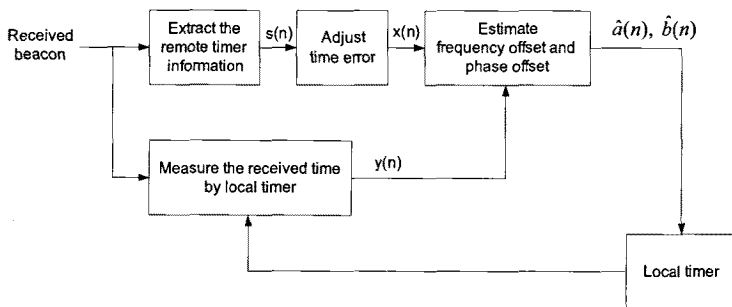


그림 7. 수신된 비콘을 이용한 프레임 동기 추정기 구조
Fig. 7. Estimation of frame time using received beacons

$$y(n) = a \cdot x(n) + b + a \cdot w(n) \quad (14)$$

식(14)에서 $x(n)$ 은 비콘에 기록된 timestamp 값 $t(n)$ 과 $D_{PHY,AT}$ 를 이용하여 계산할 수 있고, $y(n)$ 은 AT의 타이머를 이용하여 측정할 수 있다. 즉, $n=0,1, \dots, N-1$ 까지 총 N 개의 비콘을 수신했다면 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y = A \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} + aw \quad (15)$$

여기서 y, A, w 는 다음과 같이 정의된다.

$$y = \begin{bmatrix} y(0) \\ y(1) \\ \vdots \\ y(N-1) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} x(0) & 1 \\ x(1) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ x(N-1) & 1 \end{bmatrix}, w = \begin{bmatrix} w(0) \\ w(1) \\ \vdots \\ w(N-1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

식(15)에 최소 자승 기법을 적용하면 a 와 b 는 다음과 같이 추정된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T y \quad (17)$$

이때 X^T 는 X 의 전치행렬을 의미한다. 식(17)에서 추정된 상수 \hat{a}, \hat{b} 를 이용해서 계산된 비콘의 수신 시간과 이상적인 비콘 수신 시간의 차이는 다음과 같이 주어진다.

$$e = A \begin{bmatrix} \hat{a} \\ \hat{b} \end{bmatrix} - A \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} \quad (18)$$

식(18)에 식(17)을 대입하면 다음과 같이 정리된다.

$$e = A(A^T A)^{-1} A^T (aw) \quad (19)$$

식(12)에서 $D_{air} \approx 0$ 으로 근사화하고, $v(n)$ 을 분산 σ^2 인 백색 잡음(white noise)이라고 가정하면, 수신 시간 오차의 평균은 0이 되고, 분산은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \sigma_e^2 &= \frac{1}{N} E[tr(ee^T)] \\ &= \frac{a^2}{N} tr[A(A^T A)^{-1} A^T E[ww^T] A(A^T A)^{-1} A^T] \quad (20) \\ &= \frac{2a^2 \sigma^2}{N} \end{aligned}$$

식(20)은 비콘 하나만을 이용해서 AP의 타이머를 추정하는 기존의 방식과 그림 7로 주어지는 제안된 시간 동기 추정 방식을 비교할 경우 제안된 방식의 오차 분산이 $(2a^2/N)$ 만큼 작아짐을 의미한다. 일반적으로 AP의 타이머와 AT의 타이머의 주파수 오차는 수 ppm에서 수십 ppm 정도이므로 $a \approx 1$ 로 근사화하면 제안된 동기 추정 방식을 이용하여 오차 분산을 $2/N$ 만큼 줄일 수 있음을 알 수 있다.

식(17)로 주어지는 최소 자승 추정 기법은 최소 자승 오차 관점에서 최적이지만 비콘이 수신될 때마다 pseudo-inverse를 계산해야 하므로 연산 복잡도가 높은 것이 단점이다. 최소 자승 추정 기법의 복잡도를 줄이고 적응 신호 처리를 통해 AT의 타이머가 AP의 타이머 값으로 수렴하도록 하기 위해 RLS(recursive least squares) 알고리즘을 적용한다^[12]. 이때 n 번째 비콘을 수신했을 때 추정된 계수 $\hat{a}(n)$ 과 $\hat{b}(n)$ 은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} \hat{a}(n) \\ \hat{b}(n) \end{bmatrix} = \Phi^{-1}(n)z(n) \quad (21)$$

여기서 $\Phi(n)$ 과 $z(n)$ 은 다음과 같이 갱신된다.

$$\Phi(n) = \lambda \Phi(n-1) + \begin{bmatrix} x(n) \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(n) & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$z(n) = \lambda z(n-1) + \begin{bmatrix} x(n) \\ 1 \end{bmatrix} y(n) \quad (23)$$

$$\Phi(-1) = 0, z(-1) = 0 \quad (24)$$

이때 λ 는 forgetting factor로서 $0 < \lambda \leq 1$ 사이의 값을 갖는다.

최소 자승 추정 기법 혹은 RLS 알고리즘을 이용하여 상수 $a(n)$ 과 $b(n)$ 이 추정되면, 무선랜 AT의 타이머를 다음과 같이 보정한다.

$$t_{AT,comp}(n) = \frac{t_{AT}(n) - \hat{b}(n)}{\hat{a}(n)} \quad (25)$$

여기서 $t_{AT}(n)$ 과 $t_{AT,comp}(n)$ 은 보정전의 AT 타이머와 보정후의 AT 타이머를 각각 나타낸다. 식(25)에 의해 무선랜 AT의 타이머가 AP의 타이머와 동기화되고, 식(20)에서 보인 바와 같이 수신한 비콘

수가 증가함에 따라 AT 타이머의 지터가 줄어든다. 펌토셀은 AT 타이머를 클락으로 이용하므로 충분한 수의 비콘을 수신하여 AT 타이머의 지터를 줄이면, 코어 네트워크의 프레임 동기를 획득할 수 있다.

IV. 모의실험 결과

제안된 무선랜 AP에서의 백오프 기법과 무선랜 AT에서의 프레임 동기 추정 기법의 성능을 평가하기 위해 무선랜을 백홀로 사용하는 펌토셀 환경에서 모의 실험을 수행한다. 무선랜 AP에 2대의 AT가 동시에 접속한다고 가정하고 식(6)에서 P=8로 설정한다. IEEE 802.11의 OFDM 전송 규격을 고려하여 비콘 전송 주기 $T_{interval}=100ms$, aSlotTime=9 μs 로 가정한다. $N_{total}=3$ 이고 비콘의 백오프 지연은 식(8)에 의해 3가지 값으로 순환하면서 변경된다. 비콘에 대한 백오프 지연이 가장 심하게 발생하는 환경을 고려하기 위해 접속제어국에서 펌토셀로 전달되는 하향링크와 펌토셀에서 접속제어국으로 전달되는 상향링크 트래픽은 full buffer로 모델링하고, 데이터 프레임의 크기는 IEEE 802.16m evaluation methodology에 정의된 FTP(file transfer protocol) 트래픽 모델을 이용하여 랜덤하게 생성하였다¹³⁾. 또한, 비콘은 BPSK, 1/2 부호화율로 전송하고, 데이터는 16QAM, 1/2 부호화율로 전송한다고 가정하였다. 무선랜 AP의 타이머를 기준으로 AT 타이머의 주파수 오차는 100ppm으로 설정하였고, 무선랜 AT에서 처음 수신하는 비콘의 timestamp 값을 이용해서 AT의 타이머를 초기화하는 것으로 가정하였다. 제안된 RLS 알고리즘에서 $\lambda=0.999$ 로 설정하였다.

그림 8에서는 제안된 백오프 기법을 무선랜 AP에 적용하고, AT에서 하나의 비콘만을 이용해서 프레임 동기를 복원하는 기존 방식과 3.3절에서 제안한 프레임 동기화 기법을 사용하는 경우 성능을 비교한다. 식(8)에서 비콘의 백오프 지연의 평균값은 9 μs 이고, 백오프 지연에 의한 비콘 전송 시간의 지터는 $\pm 9 \mu s$ 가 된다. 기존 방식의 경우 수신된 비콘 하나만을 사용하므로 AT에서 복원된 타이머의 지터는 비콘 전송 시간의 지터에 의해 $\pm 9 \mu s$ 가 된다. 그림 8에서는 지터의 절대값을 고려하였으므로 9 μs 로 도시되었다. 식(21)의 RLS 알고리즘과 식(17)로 표현되는 최소 자승 오차 추정기를 사용하는 경우 AT 타이머의 시간 오차는 정규 분포로 근사화된다. 이때 AT 타이머의 지터를 99% 확률 범위에서 표현하기 위해 다음과 같이 표준편차의 2.5배로 정의하였다.

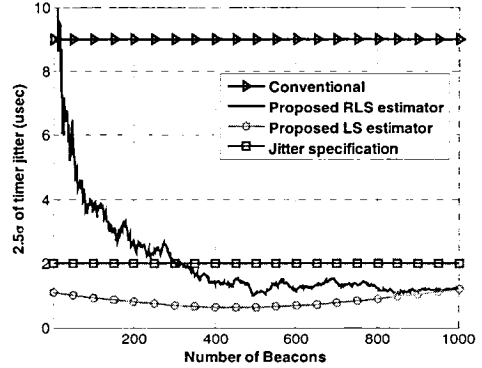


그림 8. 기존 방법과 제안된 동기 복원 기법의 지터 성능 비교

Fig. 8. Jitter performance comparison between the conventional method and the proposed timing recovery scheme

$$T_{jitter} = 2.5\sigma_e \quad (26)$$

이때 σ_e 는 식(20)에서 정의한 AT 타이머의 표준편차를 나타낸다. 즉, 그림 8에서 제안된 RLS 알고리즘과 최소 자승 오차 추정기의 지터는 표준편차에 식(26)을 적용하여 계산하였다. RLS 알고리즘을 사용하면 수신된 비콘의 수가 증가함에 따라 지터가 감소하고, 약 300개 이상의 비콘이 수신되면(=30초) M-WiMAX에서 핸드오버를 고려할 때의 지터 규격인 2 μs 이하가 됨을 알 수 있다. 또한, 약 600개 이상의 비콘이 수신되면(=60초) RLS 알고리즘이 정상상태(steady-state)로 수렴함을 확인할 수 있다. 최소 자승 오차 추정기의 경우 수신한 비콘을 모두 이용해서 시간 오차를 추정하므로 가장 우수한 지터 성능을 보인다. 기존 방법의 지터 대비 최소 자승 오차 추정기의 지터는 약 1/5로 줄어든다.

그림 9는 비콘의 전송 시간 지터가 변할 때 AT에서 복원된 타이머의 지터를 도시한다. 백오프 지연외에 구현 과정에서 추가적으로 발생할 수 있는 지터를 반영하기 위해 비콘의 송신 시간 오차를 정규 분포로 가정하였고, 수신단에서 시간 동기 오차 추정 방법에 따른 지터는 식(26)으로 계산하였다. 최소 자승 오차 추정기가 가장 우수한 성능을 보였고, RLS 알고리즘이 최소 자승 오차 추정기에 근접한 성능을 나타내었다. 전체적으로 제안된 방식을 사용할 경우 기존 방식을 사용하는 경우에 비해 AT 타이머의 지터가 현저히 감소하였다. M-WiMAX에서 핸드오버를 지원하는 경우 지터 규격이 $\pm 2 \mu s$ 이므로 RLS 알고리즘을 사용하는 경우 비콘의 송신

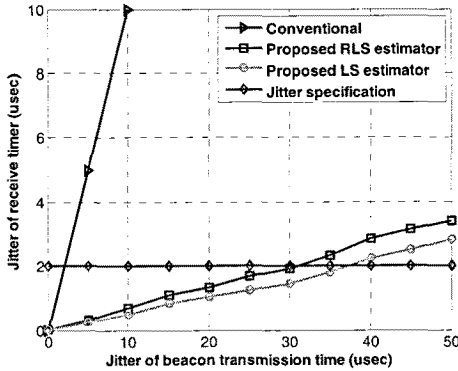


그림 9. 비콘 전송 시간 지터가 증가할 때 AT에서 복원된 타이머의 지터 변화
 Fig. 9. Change of the timer jitter recovered at AT when the jitter of beacon transmission time increases

시간 지터는 30 μ s 이하가 되어야 함을 알 수 있다.

V. 결 론

IEEE 802.11 기반의 무선랜을 백홀로 사용하는 M-WiMAX 펌토셀의 프레임 동기화를 위해 무선랜 비콘을 이용해서 코어 네트워크의 동기 정보를 펌토셀로 전달하는 기법을 제안하였다. 펌토셀에서 복원된 프레임 동기 지터를 줄이기 위해 무선랜 AP에서 비콘의 전송 시간 지터를 줄이는 백오프 방법을 제안하고, 무선랜 AT에서 최소 자승 오차 추정 기법을 적용하였다. 제안된 백오프 방식을 사용하면 IEEE 802.11 표준에 정의된 랜덤 백오프 방식과 동기 복원 방식을 사용할 때보다 복원된 타이머의 지터가 현저히 감소하고, M-WiMAX 표준에서 요구하는 프레임 오차 규격을 만족한다. 따라서 제안된 기법을 이용하면 펌토셀이 GPS 신호를 수신할 수 없는 환경에서 IEEE 1588이나 매크로 기지국의 파일럿 신호를 수신하기 위한 추가적인 장치 없이 프레임 동기를 획득할 수 있다.

제안된 동기 전달 방식은 본 논문에서 고려한 M-WiMAX 펌토셀 외에 IEEE 802.16m, CDMA 1xEV-DO 등 시간 동기를 필요로 하는 이동통신 시스템의 펌토셀에 무선 백홀을 사용하는 경우에도 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

[1] 류원, "Business strategies for FMC and

femtocell network," ETRI 광대역통합망연구단, 2008년 1월.

[2] "팜토셀(FMC) 포럼 창립 기념 워크샵 - Toward ubiquitous network with FMC & FMS," 팜토셀 (FMC) 포럼 창립준비위원회, 2008년 11월 28일.

[3] 이종식, "WiBro Femtocell 기술," KT 인프라 연구소, 2008년 10월.

[4] S.-P. Yeh, S. Talwar, S.-C. Lee, and H. Kim, "A perspective on network architecture, capacity, and coverage," *IEEE Commun. Magazine*, Oct., 2008.

[5] www.femtoforum.org

[6] 노미진, 김주성, "유무선 통합 시대의 펌토셀 동향 및 비즈니스 모델," ETRI 전자통신동향분석 제23권, 2008년 4월.

[7] IEEE Computer Society and IEEE Microwave Theory and Techniques Society, "Part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems - amendment 2," *IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor1-2005*, Feb., 2006.

[8] J. Eidson, "Measurement control and communication using IEEE 1588," London, UK, Springer, 2006.

[9] A. Vallat and D. Scheuwy, "Clock synchronization in telecommunications via PTP (IEEE 1588)," in *Proc. IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum*, May, 2007.

[10] IEEE Computer Society, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," *IEEE Std 802.11*, June, 2007.

[11] IEEE 802.11WG, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications - Amendment 5," *IEEE P802.11n/D11.0*, June, 2009.

[12] S. Haykin, *Adaptive filter theory*, Prentice-Hall, 1996, 3rd edition.

[13] 802.16m Evaluation Methodology Drafting Group, "Draft IEEE 802.16m evaluation methodology document," IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group, Apr., 2007.

최 지 훈 (Jihoon Choi)

정회원



1993년~1997년 KAIST 전기 및 전자공학과 학사
1997년~2003년 KAIST 전자전산학과 석사 및 박사
2003년~2004년 University of Texas, Austin 방문연구원
2004년~2008년 삼성전자 정보

통신총괄 책임연구원

2008년~현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신 공학부 조교수

<관심분야> 이동통신, 통신신호처리, 모뎀 설계

윤 재 연 (Jae Yeun Yun)

정회원



2000년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
2002년 2월 KAIST 전자전산학과 석사
2007년 2월 KAIST 전자전산학과 박사
2007년~2009년 SK텔레콤 Net-

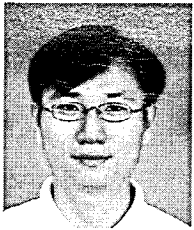
work기술원 Manager

2010년~현재 SK홀딩스 Technology Innovation Center Project Leader

<관심분야> 이동통신 네트워크, 통신시스템 설계, 기술기반 신성장사업 발굴

오 혁 준 (Hyukjun Oh)

중신회원



1989년~1999년 KAIST 전기및 전자공학과 학사 및 석사/박사
1999년~2000년 미국 Stanford 대학교 박사후 과정
2000년~2004년 미국 Qualcomm 사, 3GPP CSM/MSM 개발
2004년~현재 광운대학교 전자

통신공학과 부교수

<관심분야> 차세대 이동통신, 통신 모뎀 SoC 설계, 디지털신호처리, 레이더 신호처리

고 현 모 (Hyunmo Ko)

정회원



2005년 2월 연세대학교 기계전자공학부 학사
2010년 2월 연세대학교 전파통신공학과 석사
2005년~현재 SK텔레콤 Network 기술원 Manager

<관심분야> 이동통신, 펌토셀, Wi-Fi