

통화 중 적응적 Power Save와 QoS 지원이 가능한 IEEE 802.11g VoWLAN 단말기 구현

정회원 권 성 수*, 이 중 철**

Realization of an IEEE 802.11g VoWLAN Terminal with Support of Adaptable Power Save and QoS During a Call

Sung-Su Kwoun*, Jong-Chul Lee** *Regular Members*

요 약

IEEE802.11g VoWLAN (Voice over Wireless LAN) 단말기는 802.11b 전용 단말기에 비해 통화시간이 30 % 이상 감소하는 문제점이 있어 통화시간이 문제로 대두되고 있다. 일반적으로, 802.11g에서는 멀티캐리어 방식인 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 변조방식을 사용하여 54 Mbps속도로 전송하기 때문에 기존의 802.11b MAC (Medium Access Control) 전송방식과 비교하여 통화시간을 만족시키는 것이 어렵다. 본 논문에서는 802.11g 규격을 적용한 단말기에서 통화중 Power Save 방법으로 Holdover Time을 처음으로 제안하므로 통화시간을 만족시킨다. 다만, 통화 단말기 수 증가에 따른 네트워크 혼잡으로 경합 창 (contention window)이 많이 발생하여, Back-off 수 증가로 인한 통화품질(QoS)의 문제가 발생하지만, QoS 해결 방안으로 다운 링크 시 802.11 G.711 Sequence Number를 단말기 MAC 단에서 분석하여 손실율에 따른 Holdover Time을 가변 하는 방법을 제안하므로 이 문제를 해결한다. 802.11b/g 소비전류 분석과 통화 단말기 증가에 따른 네트워크 혼잡에 의한 MAC 파라미터 성능을 분석하며, VQT장비와AiroPeek를 이용하여 실제적인 데이터를 분석한다.

Key Words : VoWLAN, IEEE802.11b/g, OFDM, QoS, back-off, Holdover time, MAC

ABSTRACT

There is a serious problem in an 802.11g VoWLAN (Voice over Wireless LAN) terminal that talk time is less than 30 % compared with an 802.11b terminal. It is almost impossible to achieve talk time level of the 802.11b MAC transmission method because IEEE 802.11g uses OFDM modulation, which is a kind of multi-carrier method and OFDM transmission speed is 54 Mbps faster than normal modulation. In this paper, a new concept of a Holdover time as a power saving method during a call with 802.11g terminal is suggested for the first time. Increase in the number of engaged terminals as a result of holdover time causes to QoS problem because of the increase in the number of back-off and then contention window. In this paper, to solve the QoS problem, a new approach is suggested such that when in down link, the sequence number of 802.11 G.711 is analyzed in the MAC of the terminal and then the Hold over time depending on loss rate is changed. Also, consumption of an electric current of 802.11b/g and MAC parameter's performance due to busy traffic caused by increase in the number of terminal are analyzed and then real data using VQT and Airopeek are analyzed.

※ 본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음(IITA-2006-(C1090-0603-0008))

* LG-NORTEL 연구소 BCS 개발실 (kwoun1@LG-NORTEL.com), ** 광운대학교 전파공학과 부교수 (jcleo@kw.ac.kr)

논문번호 : KICS2006-06-268, 접수일자 : 2006년 1월 8일, 최종논문접수일자 : 2006년 9월 25일

I. 서론

최근 초고속 정보통신 시스템에서 인터넷 망의 발달로 인터넷 전화 및 TV 방송 시청도 가능하게 되었다. 인터넷 망에서의 데이터 전송속도의 발전과, 기존 유선망에서의 유선 선로 설치비용, 운용 관리 비용 및 이동성 제한 등 여러 가지 문제점으로 인해 서비스사업자 및 사용자들이 상대적으로 불편함을 느끼게 되어 무선 인터넷 보급이 더욱 확대되어 가고 있다. 이러한 무선 랜 기술은 새로운 데이터 서비스와 이동성 보장으로 급속도로 발전하고 있다. IEEE 802.11 MAC 은 CSMA/CA(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) DCF(Distributed Coordination Function) 비동기식 경쟁 접속방법과 폴링을 통한 매체 접속방식으로 동기식 전송 방식인 PCF(Point Coordination Function)로 구현 되고 있다. PCF에서는 Point Coordination (PC) 기능을 하는 AP (access point) 를 포함하며 중앙 제어식 폴링 기능을 사용한다. AP는 각 스테이션에게 프레임을 보낼 수 있는 기회를 주기 위하여 주기적으로 결합된 스테이션들에게 폴링하게 된다. 폴링(polling)하기 위해 단말기는 항상 버퍼링을 하기 때문에 단말기에서 지원하는 메모리 사이즈로 인해 상용화되고 있는 모든 무선 랜 카드는 PCF를 지원 하지 않는다.

다음은 소비 전류에 관한 문제로, CDMA 단말기 처럼 개방루프 전력제어(Open loop Power Control)와 폐루프 전력 제어 (Close loop Power Control)의 제어기능이 없으므로, 통화 중 수신거리와 상관없이 균일한 전력을 소모하고 있다. 또한, 다음 Call 이 도착할 때까지 Deep Sleep 상태에 들어가는 CDMA 단말기와는 달리 VoWLAN에서는 비콘(Beacon) 주기마다 동작하므로 CDMA의 경우보다는 전력소모가 많아져 대기시간이 줄어들게 된다.

특히 IEEE 802.11g 규격은 송신 시 802.11b에 비해 큰 소비전력을 요구하고 있다. OFDM과 54 Mbps 전송속도의 구조적 특징 때문에 Data 전송 시 많은 전류를 소비하므로, 본 논문에서는 통화 중 전력 소모를 감소시키는 방법을 제안한다.

II. IEEE 802.11 MAC 동작

2.1 VoWLAN(Voice over Wireless LAN) 단말기 배경

VoWLAN 단말기 동작 수명은 정해진 배터리

용량과 동일하기 때문에, 통화시간 (Talk Time)과 대기시간 (Standby Time)을 더한 배터리 용량 (mAh)이다. 통화시간 및 대기시간은 배터리 양, 폴링 체계, 지연시간, Codec 선택과 전송 속도를 포함하는 여러 가지 파라미터에 따라 달라진다. 특히 대기모드에서 연장된 배터리수명은 Sleep과 Active모드 사이를 패킷 손실 없이 변환시키는 VoWLAN 단말기의 MAC 기술에 의존되는 것이다. IEEE802.11 a/g OFDM 기술이 상용화 되면서 54Mbps까지 전송속도 지원이 가능해 지고, 기존 IEEE 802.11b 전용 단말기보다 30 % 이상 통화 중 전력을 소모하기 때문에, 요즘은 대기시간 보다 통화 중 전력소모가 가장 큰 문제로 부각되고 있다. 802.11 MAC Layer에서는 Data를 Best-Effort 라는 방법으로 통신하는 메커니즘이 사용되고 있어 VOIP 와 같은 Real Time Data 서비스 시 QoS를 지원 하는데 무리가 따르고 있다.

2.2 IEEE 802.11 MAC 동작모드

실질적인 무선 채널로의 접속방법은 CSMA/CA+ACK(Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance plus Acknowledgement)방식 이다.

무선 채널 접근을 위하여 CSMA/CA+ACK을 사용하는데, 이는 데이터 전송 이전에 채널의 신호 레벨을 검사하여 신호 레벨이 일정 수준 이상으로 확인되는 경우는 전송을 보류하며, 채널이 사용되지 않을 때까지 대기한다. 대기후에 채널이 비워지면 단말은 일정시간의 back-off 후에 다시 채널 접근을 수행하여 채널 획득에 성공한 경우 데이터를 전송한다^[1]. 이후 비 신뢰적인 무선 채널의 신뢰성을 확보하기 위하여 전송된 데이터에 대한 응답을 기다린다. 이때 무선 랜 네트워크가 DCF (Distributed Coordination Function)에만 의존하는 경우는 각각의 단말이 동등한 자격을 갖고 전 채널에 걸쳐서 경쟁적인 채널 획득을 수행 한다. 하나의 PCF (Point Coordination Function)를 단말에서 지원하는 경우는 PCF에 의한 채널 관리가 이루어지므로 비 경쟁적인 방법을 통하여 충돌을 감소시킬 수 있다^[2]. 따라서 PCF기능을 이용하는 경우는 음성과 같은 시간에 민감한 트래픽의 차별적인 지원이 가능한 HCF (Hybrid Coordination Function) 802.11e를 지원한다. 802.11 RTS/CTS/DATA/ACK 기능들과 함께 순서를 이용하여 신뢰성 있는 데이터 전송을 지원한다^[3]. 즉, 데이터를 전송하고자 하는 노드는 RTS를 전송하므로 같은 채널을 공유하는 다른 노

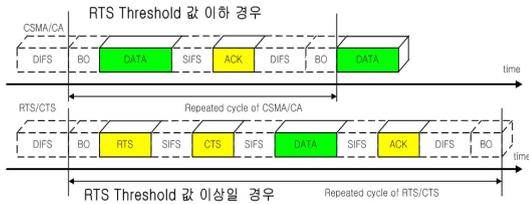


그림 1. RTS/CTS 동작 상태

드들에 'Duration ID'의 시간만큼 채널을 점유할 것을 알리며, 이에 수신 노드는 CTS로 응답한다. 이후 RTS/CTS의 점유된 시간만큼 데이터를 수신한 노드는 전송하므로 성공적인 수신을 알린다.

2.3 RTS Threshold 동작 모드

802.11은 큰 프레임 전송하는데 도움이 되는 RTS/CTS 클리어 과정을 포함하고 있다. RTS Threshold 보다 큰 프레임이 어떤 것이라도 RTS의 전송과 목적지로부터 CTS 수신을 통해서 안테나로부터의 출발을 위해 완료되어야 한다. RTS/CTS는 이른바 숨겨진 노드(Hidden nodes)라고 부르는 방해해 극복하기 위해서 존재한다.

RTS/CTS 교환은 직접적인 영역 내에 있는 모든 스테이션에게 프레임 교환이 곧 발생할 것이라는 것을 알려주어, 숨겨진 노드로부터의 간섭을 최소화한다. 그림 1은 RTS Threshold 설정 값에 따른 동작을 보여주고 있다.

표준(standard)은 RTS Threshold 값을 2,347 Byte로 설정하고 있다. 네트워크 전송량이 낮거나 혹은 프레임 재전송이 발생한다면, RTS Threshold 값을 감소시켜 RTS 클리어링을 동작시킨다^[4].

2.4 Power-Save 동작모드

다른 네트워크 인터페이스와 마찬가지로 트랜시버의 전원을 끄는 것은 무선 네트워크에 있어서 아주 많은 전력 절감의 효과가 있다. 트랜시버가 꺼져 있는 경우, Sleeping/Dozing, 또는 PS 또는 Power-Saving Mode에 있다고 불린다. 인프라스트럭처 네트워크에서의 전력관리 문제는 AP역할이 매우 중요하다. AP는 두 가지 전력관리 역할을 갖고 있다. 첫 번째로 AP는 결합하고 있는 모든 이동 스테이션의 전력 관리 상태를 알고 있으므로, 이동스테이션의 상태에 따라 프레임이 무선 네트워크에 전달되어야 할 지를 판단할 수 있다. 전력관리 중인 스테이션을 위한 프레임은 버퍼링 된다. 그러나, 이동스테이션은 이 버퍼링 된 프레임을 정해진 비콘 주

기에만 사용할 수 있다. 두 번째 역할은 주기적으로 어떤 스테이션의 프레임이 버퍼링 되어 있는지를 알려주는 것이다. 버퍼링 상태를 주기적으로 알리는 것은 인프라스트럭처 네트워크에서 전력 절감에 기여 한다. 버퍼 상태를 듣기 위하여 수신기를 켜는 것은 주기적으로 PS-Poll 프레임을 보내는 것보다 훨씬 적은 전력을 소모한다. 스테이션은 에너지를 소모 시켜야 할 이유가 있음을 통보 받은 후에, 송신기를 켜서 PS-Poll 프레임을 보내기만 하면 된다^[5].

III. 기존 VoWLAN 단말기의 전력 제어 구조

3.1 Beacon 간격에 의한 방법(AP에 의한 방법)

Sleep 모드와 Active모드 사이에 Power-Save는 802.11 Beacon 주기에 의해 Receiver 모드에 진입한 후 전력 소모가 크게 증가한다. Beacon Receiver모드에서 시간을 최소화하면서 전력소비를 최소화 하는 것이 바람직하다. Beacon에 의한 Wake-up의 변화는 대기모드에서는 VoWLAN 단말기 칩셋의 Traffic 상황을 인지하는 Beacon을 듣기 위한 Wake-up 상태 이어야 한다. Beacon 간격을 늘려서 대기모드를 길게 하여 VoWLAN 단말기 칩의 전력소비를 위해 Wake-up Time을 줄일 수 있다. 하지만, Beacon 간격을 늘림으로써 기본적으로 무선 링크 상태를 더 자주 알려주지는 못함으로 ARP와 같은 Broadcast Message는 놓칠 수 있다^[6].

3.2 DTIM 간격에 의한 방법(AP에 의한 방법)

VoWLAN 단말기의 대기 중 소모 전력을 줄이는 방법 중 한 가지는 DTIM Beacon을 위한 AP의 Interval Setting 이다^[7]. DTIM은 Multicast / Broadcast를 듣기 위한 클라이언트의 Countdown 정보이며, AP는 연결된 클라이언트의 Multicast / Broadcast Data가 버퍼링 되면 DTIM을 DTIM Interval 간격으로 전송 한다. AP에서 보내는 Beacon 정보를 듣고 Wake-up하여 Multicast / Broadcast를 듣게 된다. AP는 DTIM Interval을 3으로 설정하면, 매 세 번째 Beacon에 Multicast / Broadcast를 전송하게 되며 이런 방식으로 DTIM Interval이 1보다 크게 되면 전력 소모가 줄어든다^[6].

3.3 Listen Interval Value에 의한 방법(단말기에 의한 방법)

Power-Save 모드의 단말은 주기적으로 Doze 상태에서 Awake 상태로 깨어난다. VoWLAN 단말은

Listen Interval이라는 정수 값을 지정할 수 있다. 이 값은 단말이 다음 Beacon 신호를 듣기 위해 깨어나기 전까지 그냥 지나칠 수 있는 Beacon 간격의 수이다. 예를 들어 Listen Interval 값 1을 갖는 단말은 매 두 번째의 Beacon 신호마다 깨어나게 된다⁸⁾. DTIM 간격과의 혼동을 피하기 위해 Listen Interval 값에 1을 더한 값을 갖는 Wakeup-Interval이라는 새로운 값을 정의한다. 각 단말은 자신의 Listen Interval 값을 표준에서 분배 시스템을 서비스를 위해 정의한 Association 또는 Re-association 서비스 메시지를 통해 AP에게 알린다. 또한 각 단말은 자신의 각 프레임의 제어 필드 내에 있는 전력 관리 비트를 통해 전력 모드의 변화를 AP에게 알린다. 이를 통해 AP는 각 단말의 전력과 관련한 충분한 정보를 얻게 된다. Power-Save 모드에 있는 단말을 목적으로 하는 프레임이 AP에 도착하면 AP는 이를 임의로 전달하지 않고 대신 버퍼에 저장한다. 그리고 매 Beacon 신호마다 포함하는 TIM (Traffic Indication Map)이라는 필드를 통해 버퍼에 저장된 프레임들의 목적지 단말들의 리스트를 영역에 방송한다. Power-Save 모드에 있는 단말들은 주기적으로 깨어나서 Beacon 신호를 듣게 되므로 자신을 목적으로 하는 프레임이 버퍼에 있음을 TIM을 통해 알 수 있다. 따라서 그러한 단말들은 Power-Save 모드에서 Active Mode로 전력 모드를 바꾸어 버퍼에 있는 프레임을 수신할 수 있다.

IEEE802.11g VoWLAN 단말기는 대기 중 소모 전력은IEEE802.11b VoWLAN 단말기와 동일하며, Beacon 주기는 일반적으로 100 msec 로 설정한다. 대기시간을 줄이기 위해 Beacon 간격을 늘리는 방법은 가정용 인터넷 전용 무선 랜 카드에서만 사용할 수 있다. 예를 들어 사무실처럼 여러 명이 동시에 인터넷을 사용하는 환경에서는 현실적으로 이러한 방법을 적용할 수 없다. Beacon 간격을 늘리는 방법으로 Power-Save Mode를 늘려서 사용하는 방법은 대기 중 Real-Time이 보장되는 VOIP 통신에서는 QoS를 보장 못하며, 사무실처럼 여러 명이 사용하는 환경에서는 치명적인 통화 품질이 발생한다¹⁷⁾.

IV. IEEE802.11g VoWLAN 단말기 통화 중 Power Save 모드 구현 및 소모 전력 분석

기존에 제시되어왔던 방법은 대기 상태에서만 소모 전력이 절감되는 방식이었다⁸⁾. IEEE 802.11b VoWLAN 단말기는 최대 전송속도가 11 Mbps이

고, Contention Window 파라미터가 802.11g에 비해 긴 시간 동안 유지하는 규격을 갖고 있다⁷⁾. IEEE 802.11b G.711 Data 전송 Duration은 802.11g 규격에 비해 5배 이상 긴 데이터 전송 시간이 필요하게 되어, 통화 중 Holdover Time 설정 값 동안 몇 개의 프레임만 송수신하기 때문에 통화 품질이 매우 좋지 않게 된다. 또한, 통화 중 단말기 수가 증가 되면 치명적인 통화 품질(QoS)이 발생되기 때문에, 통화 중 Power-Save 방법은 적용하지 못하고 있다. 기존 802.11b 에서는 통화 중 전류가 280 mA 정도 소모되지만, 802.11g 에서는 358 mA 이상 소모되어 연속 통화시간 문제를 안고 있다. 통화 중 Power-Save 방법으로 본 논문에서는 표준화 되어 있지 않은 Holdover Time Duration을 구현 하였다. Holdover Time 설정 값에 따라 통화 중 소모 전류 감소와 그 설정 값 기간 동안만 송수신이 가능하도록 제한하였다. MAC 펌웨어에서 Holdover Time 기간 동안만 데이터가 송수신 할 수 있도록 MAC 펌웨어를 수정하였다. 만일 데이터가 없으면 MAC 펌웨어는 Beacon만 수신 한다. 만일 TIM에서 AP에 데이터가 없다고 판명되면, 바로 저 전력 모드로 변환한다. 송수신 Activity가 끝나고, 다음 송수신 이전의 Holdover Time 으로 들어간다. Holdover Time이 지나면 시스템은 저 전력 모드로 전환한다.

이러한 제안 방식을 검증하기 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다. Holdover Time이 적용되지 않은 VoWLAN 단말기의 전류를 먼저 측정하였다. 기존에 나와 있는IEEE 802.11 b/g 칩셋은 Hold off Duration Mode를 지원하고 있지 않다. Holdover Duration Mode는 IEEE 802.11 규격에서 내용이 언급되어 있지 않아 본 논문을 통해 구현하게 되었다. 다음 표 1은 VoWLAN 단말기 통화 중 Power save off 상태에서의 DC Current를 측정한 데이터이다. Holdover Duration Mode를 적용 하지 않은 송수신 전류를 측정 해 보면, 표 1 과 같은 전류 값을 얻을 수 있다. 이 데이터들은 본 논문에서 사용한 같은 칩 솔루션을 사용한 무선 랜 카드를 측정한 것이다. VoWLAN 단말기가 통화 중 일 때는 송수신 동작이 같이 일어나기 때문에 통화 중 전류 소모는 송수신 전류 평균값이 된다.

본 논문에서 사용한 무선 랜 칩셋은 MARVELL 사의 MRVL MAC / Baseband, MRVL 8010 RF Front-End 이다. 네트워크 분석 Tool은 Wild packets 사의 Airopack 프로그램을 사용하여 분석하였

표 1. holdover time을 적용하기 전의 VoWLAN 단말기의 측정 값

VoWLAN	54 Mbps 64QAM
TX 13.0 dBm 802.11.g	425 mA average
Rx	220 mA average
통화 중 일 때	360 mA average

다. Holdover Time Duration은 5 msec의 설정 값으로 고정하여 측정하였다. 실험 환경은 VoWLAN 단말기 한 대와 유선 VOIP폰 한 대를 시스템과 연동하여 내선 통화로 연결하였으며, 60초 간격으로 측정하여 분석하였다. VoWLAN 단말기 한 대만 사용한 이유는 Contention Window 때문에 Back off가 발생하여, 정확한 MAC 파라미터를 분석하기가 힘들고, 주변의무선 간섭을 피하기 위해 실드룸에서 측정하였다. VoWLAN 단말기로 연동시험을 하기 위하여 AP 한 대와 VoWLAN 단말기 두 대, VOIP Gateway 시스템 한 대, Hub등으로 시스템을 구성하였다.

CCATime(Clear_Channel_Assessment Time)은 각 슬롯에서 매체가 사용 중인지 비어있는지를 결정하는데 소요되는 최소시간을 의미한다. RxTx Turnaround Time은 물리계층에서 프레임의 수신한 후에 응답으로 다음 첫 번째 심벌을 송신할 때까지의 사용되는 최대시간을 의미한다. Air Propagation Time은 송신 터미널과 수신 터미널 사이에서 신호가 전송될 때 걸리는 전파지연 시간이다. 실내 전송거리가 100 m 이면 빛의 속도가 $3 \times 10^8 \text{m/s}$ 이므로 $0.33 \mu\text{sec}$ 이다 [3,4].

그림 2는 Airopeek으로 분석하여 기술한, CSMA/CA DCF 전송 상태를 나타낸 것이다. 여기서 Holdover Time을 적용 하지 않은 802.11b VoWLAN 단말기 두 대의 통화 상태를 20 msec 동안 Airopeek 와 RF 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하여 나타내고 있다. 그림2 에서 윗부분은 AP 송신이며, 아래 부분은 단말기의 송신 프레임을 보여주고 있다. ACK, CTS, RTS는 최고 우선순위가 높은 프레임이기 때문에 보내기 전에 가장 짧은 매체 접근 간격인 SIFS 기간만큼 간격을 두고 전송 한다. 802.11 G.711 Data 프레임 경쟁 우선순위를 공평하게 점유하기 위해 DIFS 프레임의 간격을 두고 매체 접근을 한다. 재전송이 두 번 발생 시 전송 Rate를 한 단계씩 낮추어 전송한다. 본 논문에서 사용하는 VoWLAN 단말기에서는 재전송 시, 한 단계씩 전송 Rate를 줄이는 어플리케이션 드라이브를 지원

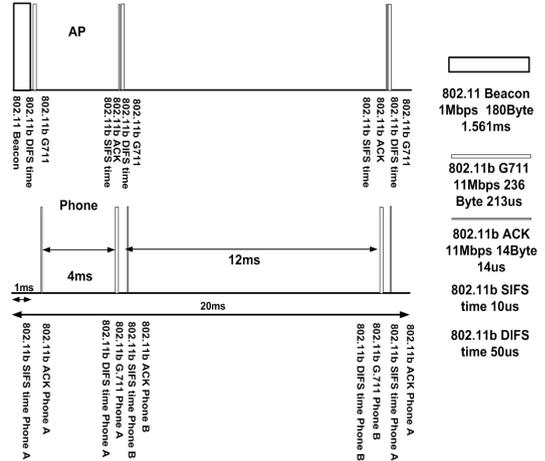


그림 2. 20 msec 동안 AP와 802.11b VoWLAN 단말기 두 대와의 송수신 작동 상태

하지 않으며, 전송 Rate를 줄이는 방법은 AP (시스템)에서만 지원한다. G.711 음성 코덱 data는 20 msec 동안 패킷을 모아서 20 msec 간격으로 보낸다. 수신 단은 이 데이터를 VOIP Gateway 나 VoWLAN 단말기 jitter buffer 단에서 정해진 시간 동안만 저장하고 삭제한다.

그림 2에서 맨 처음 동작은 802.11 Beacon 프레임이 180 Byte, 1Mbps 전송속도로 1.561 msec 전송 기간 동안 브로드 캐스팅 메시지를 보낸 후, DIFS 프레임 간격 후 AP는 단말기A에게 236 Byte 크기로 11Mbps 속도로 213 μsec 동안 UDP패킷 안에 RTP 데이터를 포함하여 보낸다. 단말기 A는 SIFS프레임 간격 후 14 Byte 크기로 11 Mbps 속도로 182 μsec 동안 ACK 프레임을 보내고, 4 msec 간격 후 단말기A는 DIFS 접속 매체 간격 후 G.711 데이터 프레임을 AP에게 보낸 후 AP는 단말기 A에게 ACK 프레임을 보내고, 단말기 B에게 G.711데이터 프레임을 보낸다. 단말기 B는 G.711 데이터 프레임을 받은 후 ACK 프레임을 AP에게 보낸다. 20 msec 동안 단말기A, B 는 한번씩 G.711 프레임을 전송하고, AP는 2번 전송한다. 만약 단말기 4대이면 AP는 8번 G.711 프레임을 전송한다. 각각의 단말기 한 대가 G.711 프레임을 보내는 시간은 $SIFS(10\mu\text{sec}) + ACK(14\mu\text{sec}) + DIFS(50\mu\text{sec}) + G.711(213\mu\text{sec})$ 로 전체 363 μsec 의 전송 시간이 필요하게 된다.

그림 3은 802.11b와 비교하기 위하여 각각의 데이터 프레임의 크기 및 전송시간을 비교하였다. 5 msec의 Holdover Duration time set 고정 값을 갖는

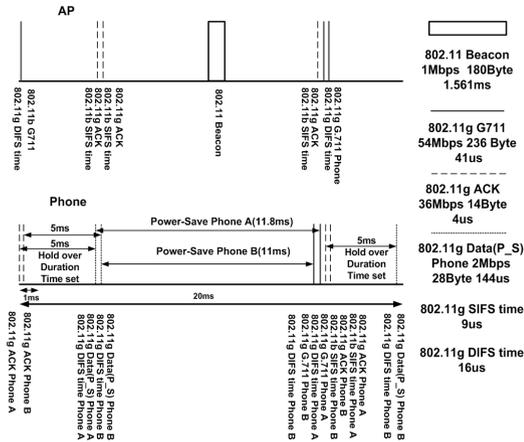


그림 3. 20 msec 동안 AP와 802.11gVoWLAN 단말기 두 대와의 송수신 작동 상태

802.11g VoWLAN 단말기 두 대의 통화상태를 그림 2와 같은 방법으로 20 msec 동안 측정 하였다.

단말기 A는 ACK 프레임을 12 Byte 크기로 36 Mbps 전송 속도로 4 usec 동안 보낸다. AP는 DIFS 매체 접속 구간 후 G.711 데이터 프레임을 236 Byte 크기로 54 Mbps 전송속도로 41μsec 동안 전송한다. 단말기 B는 SIFS기간 지난 후 ACK 프레임을 보낸다. 단말기A는 ACK 프레임을 보낸 후 5 msec Holdover Duration time set 설정 값에 따라 5 msec 후 IEEE 802.11 DATA (2Mbps-P_S Mode)를 보낸다. 그 Frame 안에는 Subtype 4 bit 다음에 오는 8 bit가 1000,0100으로 설정된 Frame Control Flags 가 포함되어있다. 그 내용을 분석하면 순서대로 '10' 두 bit는 AP에게 VoWLAN 단말기가 Power Management mode (000100 6 bit: 네 번째 bit 1은 Power-Save를 의미하는 bit)로 진입하는 메시지를 보낸다. AP는 SIFS동안 지난 후 802.11 ACK를 단말기A에게 전송하고 바로 단말기 A는 Power Save Mode (11.8 msec)로 진입한다. 11.8 msec 동안 단말기 A는 Rx off 상태로MAC의 모든 동작이 Power Save 모드로 들어간다. 단말기 B도 단말기 A와 같이 ACK 신호를 AP에게 보낸 후 5 msec Holdover Duration time set 설정 값에 따라 5 msec 후 IEEE 802.11 DATA (2Mbps-PS Mode)를 보낸다. AP 부터 ACK 프레임을 수신 후 단말기 B는 Power Save Mode(11msec)로 진입한다. 만약 Holdover Duration time set이 10 msec 이면, ACK 프레임을 보낸 후 10 msec 후 IEEE 802.11 DATA (2Mbps-PS Mode)를 보낸다.

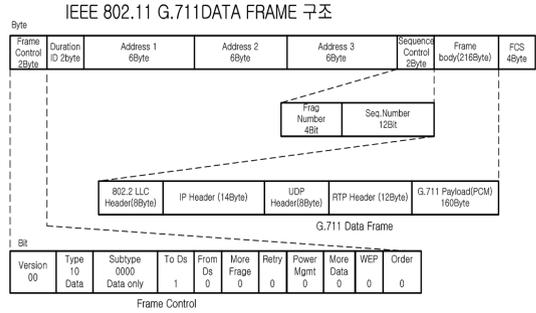


그림 4. Airopeak으로 분석한 IEEE802.11 G.711 Data Frame 구조

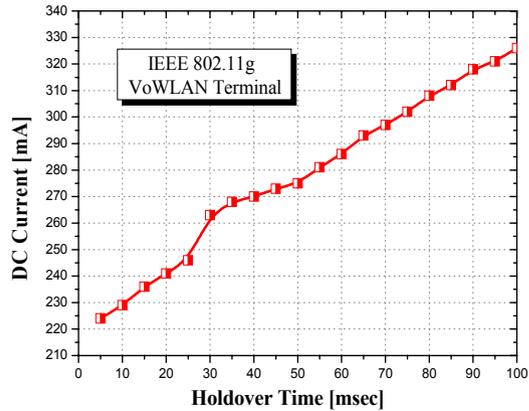


그림 5. VoWLAN 단말기의 Holdover time에 따른 전류 레벨

VOIP Gateway 시스템에서 20 msec 간격으로 RTP G.711 Data를 보내기 때문에, 단말기 B에 버퍼링되어 있던 G.711 Data (54 Mbps)가 전송 되면서, 단말기B는 Active모드로 Wake-up한다. 그림 2의 802.11b의 경우와 같이 20 msec 동안 단말기 A, B 는 한번씩 G.711 프레임을 전송하고, AP는 2 번 전송한다. 단말기 통화대수 만큼 20 msec 안에 G.711 데이터를 보낸다. 각각의 단말기가 한 대가 G.711 프레임을 보내는 시간은 SIFS(18 μsec) + ACK(4μsec) + DIFS(16μsec) +G.711(41μsec) 로 전체 79 μsec 의 시간이 필요하다.

이는 802.11b의 경우에서 363 μsec의 전송 시간이 필요했던 것과 비하여, 802.11g의 경우에는 그 1/4 인 79 μsec 시간 안에 전송하게 되며, 따라서 여러 명이 같은 장소에서 통화 할 경우 매체에 접속하고 종료하는 시간이 빠르기 때문에 802.11b 보다 Holdover Duration time set 구현이 용이하다.

그림 4는 IEEE 802.11 G.711 전송 프레임을 보여주고 있다. G.711 Codec을 사용하였으며, Coding

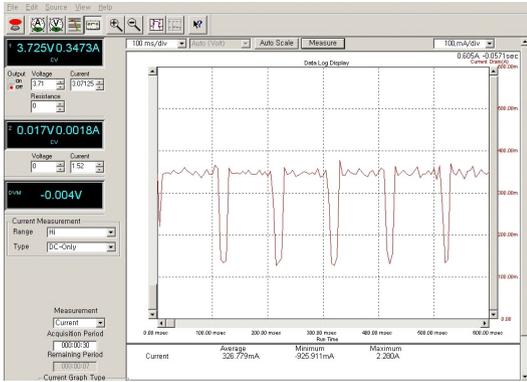


그림 6. 각 100 msec 의 Holdover Time에 따른 VoWLAN 단말기의 전류 측정

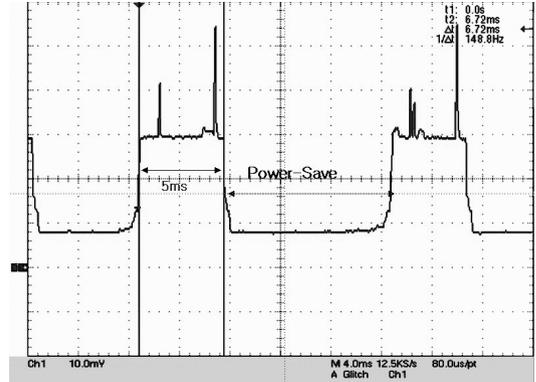


그림 7. Oscilloscope 측정 (Hold over Duration: 5 msec인 경우)

Algorithm은 PCM, Bandwidth은 64 kbps, Sample 은 0.125 msec이고, RTP VOIP 패킷에는 Vocoder Frame과 많은 Protocol Header가 포함된다.

헤더는 IPv4, RTP/UDP/IP로 설정되며, 일반적으로 270 bit (340 byte) Header를 16 bits header로 압축하여 사용하는 경우가 있지만, 본 논문에서는 Header를 압축하지 않고 사용한다. 본 논문에서는 Header 압축과 Voice Activity Detection (VAD)을 고려하지 않았으며, Voice Traffic은 (270 bits + 172 bits)을 20 msec 간격으로 전송한다.

802.11g MAC 펌웨어에서 WLHoldover Time Set 명령을 Consol로 이용하여 Holdover Time Duration 의 시간 값을 최소 5 msec 에서 최대 100 msec로 5 msec 씩 변경 값을 조정하여 측정하였다.

그림 5는 Holdover Time Set을 최소 5 msec 에서 최대 100 msec 까지 5 msec 간격으로 측정한 Data 이다. 측정결과 Holdover Time 간격에 따라 최대 30 % 이상 전류 값이 차이가 나는 것을 분석하였다. 최소 250 mA에서 최대 326 mA까지 통화 중 전류 소모를 보여주고 있다. 만약 1000 mA Li-Ion Battery를 사용, 통화시간을 측정하면, 3시간 에서 4시간까지 연속통화 시간을 연장할 수 있다.

그림 6은 무선 랜 전용 전류 측정 장비를 이용하여, 100 msec의 Holdover Time을 설정한 후 측정 한 전류 값이다. 일반적인 전류 측정 장비로는 순간적인 전류 평균값 측정이 불가능하다. 따라서 Agilent 사의 66319B 전류 측정 장비와 14565A S/W를 이용, 전류를 측정 하였다. Holdover Time 을 100 msec로 설정하여 326 mA 의 평균값을 얻었다.

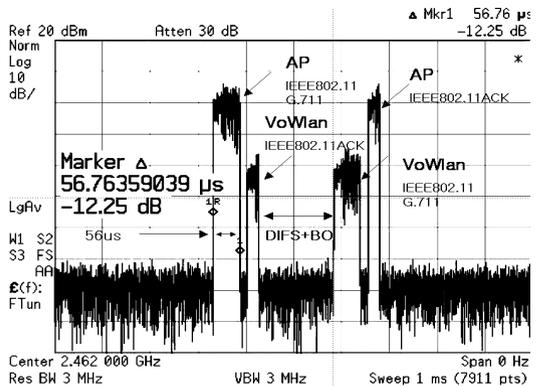


그림 8. PSA로 측정한 AP와 VoWLAN 단말기의 전송 간격 측정

그림 7은 Holdover Time을 5 msec로 설정한 후 Oscilloscope로 측정하였다. 여기서, 전압은 10 mV, 시간 간격은 4 msec로 설정하였다. 그림에서 중간에 길게 튀는 부분은 송신 Frame이 순간적으로 튀는 것을 나타낸다. AP로부터 802.11 ACK 메시지를 수신하기 위해 1.72 msec 만큼 Active Mode 가 연장 되었다.

그림 8은 Agilent 사 E4440 Performance Spectrum Analyzer를 이용하여 VoWLAN 단말기와 AP 간의 전송간격을 측정한 것을 나타낸 것이다.

중심 주파수는 2.462 GHz (11번 채널), Span은 0 Hz로 설정하고, 디바이더를 이용하여 AP와 VoWLAN 단말기를 연결하였다. 유선 VOIP 폰에서 AP를 통해 VoWLAN 단말기로 통화 연결한 후 테스트한 결과 값이다. AP는 VoWLAN 단말기에게 36 Mbps의 전송 속도로 56 μsec 동안 802.11 G.711 Data Frame을 보낸다. SIFS 기간이 지나고,

VoWLAN 단말기는 802.11 ACK (2 Mbps) Frame 을 26 μ sec 동안 AP에게 보낸다.

VoWLAN 단말기는 DIFS+Backoff 기간 동안 지나면 36 Mbps 전송 속도로 56 μ sec 동안 802.11 G.711 Data Frame을 AP에게 보낸 후 SIFS 기간이 지난 후, AP는 802.11 ACK (11 Mbps) Frame을 16 μ sec 동안 VoWLAN 단말기에게 보내는 그림이다.

V. 통화 품질(QoS)이 보장된 통화 중 Power Save 구현

본 논문에서는 사무실 환경이나 여러 사람이 사용하는 공공장소에서 여러 대의 단말기가 동시에 통화를 시도할 경우 통화품질(QoS)을 보장 할 수 있는지 분석하였다. Holdover Time은 5 msec 로 설정하였으며, 통화 중인 VoWLAN 단말기는 최대 8대까지 증가시키면서 AiroPeek 네트워크 분석 Tool을 이용하여 IEEE 802.11 MAC Parameter들을 분석하였다.

그림 9는 동시 통화 4대를 Airopeek으로 분석하여 프로토콜 진행을 화면 캡처한 그림이다. 통화 중인 한대 단말기의 MAC 주소를 AiroPeek tool을 이용해 필터링된 값으로 편집한 후, 필터링된 단말기와 양방향 통신을 하는 모든 단말기 및 AP의 프로토콜을 분석하여, 600 msec 간격으로 반복해서 RTS와 Data Retries를 분석하였다. AP로부터 단말기 G.711 데이터와 RTS 프레임 재전송 프로토콜 진행이 그림 9와 같이 분석 된다. 그림 9에서 보면 동일주소 상에서 G.711 데이터와 RTS 재전송이 자주 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 네트워크가 혼잡한 상태를 알 수 있다.

그림 10은 이러한 실험을 통해 통화 품질(QoS)이 가능한 지를 분석한 그래프이다. IEEE 802.11b

00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	11.0	20	1...	00.000316	01.616784	802.11 RTS
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	11.0	20	1...	00.000907	01.617593	802.11 RTS
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	11.0	236	1...	00.001717	01.618308	G.711
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	11.0	236	1...	00.006799	01.620079	G.711
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	11.0	236	1...	00.001456	01.622904	G.711
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	2.0	20	1...	00.000540	01.620504	802.11 RTS
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	1.0	20	1...	00.000888	01.620592	802.11 RTS
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	11.0	20	1...	00.001517	01.620448	802.11 RTS
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	11.0	14	1...	00.000211	01.620660	802.11 RTS
00:14:72:13:80:c0	00:14:72:13:80:c0	2.0	28	1...	00.004067	01.624727	802.11 Data
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	2.0	14	1...	00.000156	01.624883	802.11 ACK
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	1.0	20	1...	00.006012	01.640393	802.11 RTS
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	1.0	20	1...	00.002175	01.640370	802.11 RTS
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	11.0	236	1...	00.003012	01.640682	G.711
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	11.0	20	1...	00.004885	01.620467	802.11 RTS
00:14:72:13:80:c0	00:08:6c:53:89:c0	11.0	14	1...	00.000216	01.620683	802.11 RTS
00:14:72:13:80:c0	00:14:72:13:80:c0	2.0	28	1...	00.003304	01.625987	802.11 Data

그림 9. AiroPeek으로 측정된 4대의 VoWLAN 단말기 통화 중 프로토콜 분석

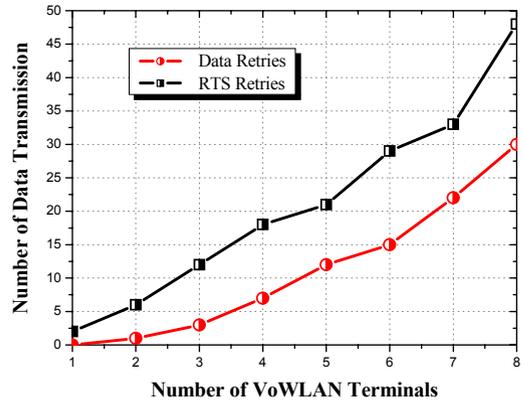


그림 10. 통화 중 VoWLAN 단말기 수에 따른 QoS 데이터

는 한 AP에서 동시 통화수가 최대 8대까지 가능하기 때문에 모든 실험 조건을 8대로 통일하였다. X축은 VoWLAN 단말기 통화 대수이며, Y축은 RTS 재전송 횟수를 나타낸다.

그림 10을 분석한 결과 통화 중 단말기 대수가 증가 할수록 802.11 Control 프레임에 RTS와 Data Retries 횟수가 증가하는 것을 알 수 있다. VoWLAN 단말기 수가 4대 이상 초과하게 되면, 그림 8처럼 네트워크 혼잡도가 급격히 증가하여 최소 통화품질을 지원하는 QoS는 DCF 경쟁 구조에서 Contention Window 파라미터 값이 크게 증가하여 Backoff 시간이 길어져 매체 접속이 어려워지는 결과가 나왔다.

지연이 30 msec 이상이 되면 jitter Buffer 단에서 단말기 마다 고정된 Buffer 사이즈만큼 저장되어 삭제된다. Buffer 사이즈는 200 msec 이며 10개 G.711 코덱 데이터를 저장할 수 있다. 10개 Slot 이상을 저장하면 DSP 단에 Echo Cancellation 기능이 저하되어 통화 음질이 떨어진다. 측정 결과를 통해 4대 이상 VoWLAN 단말기가 통화 중 일 때 음성품질이 떨어져 VQT의 Listening Quality Score 가 3.20 이라는 MOS 측정값이 나왔다.

그림 11은 Holdover time에 따른 VoIP 패킷 검사와 통화 음질을 Agilent VQT(Voice Quality Testing) 장비로 측정하여 비교하였다. PAMS (BT) (Perceptual Analysis Measure System)과 PSQM (ITU P. 861 Perceptual Speech Quality Measure) 측정 표준 방법 중 세계적으로 가장 많이 사용하는 BT(British Telecom) 권장 PAMS 규격을 사용하여 측정하였다. PAMS 측정 결과 레벨은 MOS(Mean Opinion Score) 1단계에서 5단계로 구분하여 결과를 보여준다. 1단계 Bad, 2단계 Poor, 3단계 Fair,

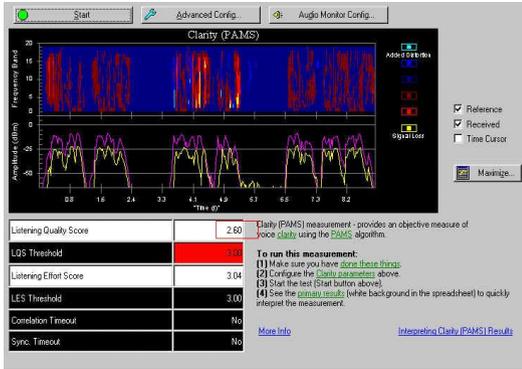


그림 11. 5 msec의 고정값 Holdover Time 시 8대 동시통화의 VQT 측정 데이터

4단계 Good, 5단계 Excellent로 단계 규격화 되어 표준에 적용되어 있다. 8대 동시 통화일 때는 네트워크 혼잡으로 음질 측정값인 Listening Quality Score가 2.60 MOS 값이 나왔다.

5msec의 Holdover Time 설정 값 동안 VoWLAN 단말기 2대가 통화 중 일 때에는 네트워크 상황이 혼잡하지 않아 Contention Window가 발생하지 않는다. 단말기 동시 통화 숫자가 증가함에 따라 네트워크 상태가 혼잡하게 되므로, 고정된 Holdover Time 값을 설정하는 대신, 네트워크 혼잡도 상태에 따라 Packet Loss를 분석하여 설정 값을 가변 하는 새로운 방법을 제안한다.

RTS와 G.711Re-Transmission 프레임 전송 시 Seq. Number를 함께 전송한다. 통화 음질에 밀접한 G.711 데이터는 UDP, RTP 두 개의 Seq. Number와 함께 전송한다. 수신 단에서는 G.711 Seq. Number를 RTP 어플리케이션 단과 jitter Buffer 단에서 확인할 수 있다.

RTP 어플리케이션 단에서 실시간으로 jitter Buffer 사이즈와 상관없이 Seq. number를 분석할 수 있기 때문에 본 논문에서는 RTP 어플리케이션 단에서 Seq. Number를 확인하기로 하였다. 802.11 G.711 Data를 AP가 RTP 패킷에 Decoding 하여 VoWLAN 단말기에게 전송하면, VoWLAN 단말기는 MAC Host 단에 있는 RTP Application Layer에서 Encoding 하여 G.711 Seq. Number를 확인 할 수 있다.

그림 12는 VoWLAN 단말기의 RTP application layer를 3초 동안 확인 한 후 G.711 Seq.Number의 손실율을 나타낸 그래프이다. VOIP Gateway 시스템에서 20 msec 간격으로 G.711 Data를 보내기 때

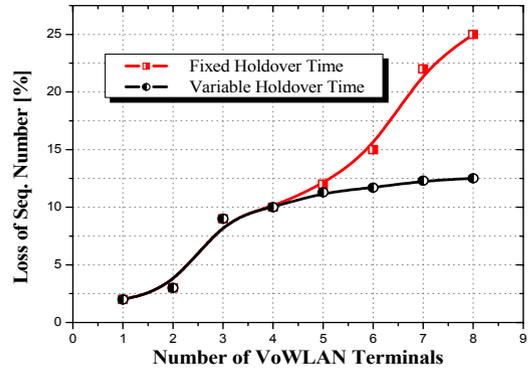


그림 12. 고정 및 가변 Holdover Time을 적용한 VoWLAN 단말기 수에 따른 Seq. Number 손실율

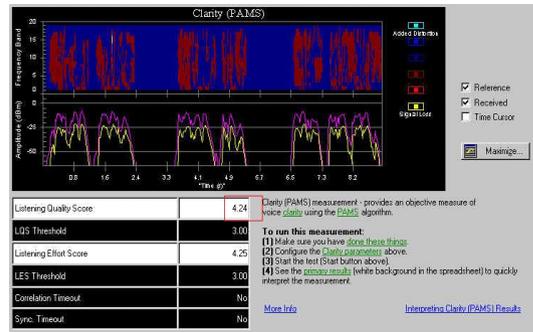


그림 13. 동시 통화 8대에가변 Hold over time을 구현한 VQT 측정값

문에 3초 안에 90개 Seq. Number를 확인할 수 있고, 확인된 RTP Data을 Jitter Buffer 단으로 넘겨 준다.

또한 Uplink Percent Packet Loss와 Downlink Percent Packet loss를 분석하였다. 외부 주파수 간섭과 여러 단말기 통화 네트워크가 혼잡하여 Contention Window 가 발생하기 때문에 AP에서 VoWLAN 단말기로 보내줄 Data에 손실이 많이 발생한다^[11]. AiroPeek 네트워크 분석Tool에 있는 Filter 값을 설정 할 때, 한 대의 AP와 8대의단말기 MAC Address 만 입력하여, AP에서 VoWLAN 단말기로 보내지는 802.11 G.711 Seq. Number를 분석한 결과, Downlink 시의 패킷 손실 데이터가 더 정확한 분석이 가능한 것으로 판단된다. AP는 통화중인 VoWLAN 단말기 대수 의 2 배 이상 프레임을 주고받기 때문에 AP로부터 받은 패킷 손실율을 분석하는 것이 더 정확하다. Seq. Number 손실이 10 %가 넘으면 VQT 장비의 MOS 값에 영향을 주어 음성 품질이 떨어지는 결과가 나왔다. AP에서 VoWLAN 단말기로

표 2. 4가지 경우에 대한 통화중 VoWLAN 단말기 수에 따른 측정 전류 값

	802.11b	802.11g Holdover time 비적용	802.11g Holdover time 5ms 고정	802.11g Holdover time 가변
Current	280mA	360mA	220mA	260mA

전달하는 802.11 G.711 Seq. Number 가 VoWLAN 단말기 MAC 단에서 손실되었는지를 3초동안 분석하여 손실율이 20 % 이상이면 Holdover Time 설정 값을 100 msec 로 하고, 10 % 이상이면 10 msec, 5 % 이상이면 5 msec로 설정하였다. 위 조건에 일치하도록 MAC 펌웨어 관리층에서 자동적으로 가변 하여 Holdover Time 설정 값이 정확하게 전송되도록 하였다. 아래 그림 12는 VoWLAN 단말기 8대를 네트워크 상태에 따라 Holdover Time 설정 값을 가변 하는 방법을 적용, 동시 통화 상태로 테스트하여, 고정값의 경우와 비교한 결과이다. 단말기 수가 4대 이상에서는 발생하는 Seq. Number 손실율이 12 % 정도로 고정 및 가변값의 경우가 모두 비슷하게 나타남을 관찰 할 수 있다. 단말기 대수가 증가함에 따라 고정값의 경우 손실율이 증가하지만, 가변값의 경우는 그 손실율 증가율이 거의 없음을 확인할 수 있다. 단말기 8 대가 동시통화 중일 때 소모 전류를 60 초 동안 측정 한 결과 260 mA를 얻었다. 이는 Holdover Time을 35 msec으로 고정하여 측정된 값에 해당된다.

그림 13은 동시 통화 8대의 경우, 가변 값의 Hold over time을 적용한 단말기에 대한 VQT 장비의 MOS 측정값이다. Listening Quality Score가 4.24 MOS 값이 나왔다.

표 2는 지금까지 측정한 Data를 정리한 표이다. 측정 결과치를 보면 기존 802.11g에 비해 100 mA 이상 전류값이 감소하였고, 802.11b 보다는 20 mA 가 감소하였다. 본 논문에서 제안한 방식을 적용한 결과, 전력 소모 절감 효과와 통화 품질(QoS)이 보장 된 통화 중 Power Save 구현이 가능해졌다.

VI. 결론

본 논문에서는 802.11g OFDM 방식에서 가장 취약한, Data Frame 전송 시 소비전력이 30 % 이상 증가하는 문제를 해결할 수 있는 방법 및 통화 품질(QoS)을 보장할 수 있는 새로운 방법을 제시하였

다. 통화 중 Power Save 모드를 사용하여 통화 중 MAC 파라미터와 전력 소모를 분석함으로써, 통화 중 Holdover Time 설정 값 변화에 따른 통화 품질을 분석하였다. Airopoek 네트워크 분석기를 통해 전송속도, 전송시간, Data 지연, 데이터 크기가 Holdover time에 따른 연관성을 확인할 수 있었고, 일반적으로 802.11g 에 비해 802.11b는 전송속도가 낮기 때문에, 전송시간이 길어진다. 이는 Holdover Time 설정 값 안에서 많은 프레임을 송수신 할 수 없어 패킷 손실이 발생하는 것을 확인하였다. 또한 Holdover Time 설정 값에 따른 무선링크에서 패킷 손실과 통화대수의 증가에 따른 통화상태를 분석하였다.

또한, 본 논문에서는 AP로부터 수신되는 G.711 RTP Seq Number를 확인하여, 3초 동안 MAC Host 단에 있는 RTP Application Layer에서 Seq. Number를 분석하여 Holdover Time 설정 값을 최소 5 msec 에서 최대 100 msec 까지 다양하게 조절할 수 있는 알고리즘을 제시하였으며, 이 알고리즘 표준에 따른 통화 중 Holdover Time으로 8대를 동시 통화하여 네트워크 포화상태에서도 통화품질이 향상되는 것을 네트워크 분석기 Airopoek을 통해서 검증하였다.

본 논문에서는 기존의 시물레이션에 의존한 전력 절감 방법 대신 Power Save를 실제적으로 구현할 수 있는 방법을 제시하고, VQT, Oscilloscope, Vector Signal Analyzer, 무선 랜 전용 전류 측정 장비를 사용하여, 실제 환경에서 단말기 통화 대수를 증가시키면서 네트워크 분석 Tool을 이용하여 성능이 향상됨을 검증하였다.

본 논문에서 제시한 방법은 실제 무선 랜 시스템에 다양하게 적용 가능하리라 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE Std. 802-11-1999, Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, IEEE 802.11 Std, 1999.
- [2] X. P. Costa, D. C. Mur, and T. Sashihara, "Analysis of the integration of IEEE 802.11e capabilities in battery limited mobile devices," IEEE Wireless Communications, vol. 12, no. 6, pp. 26-32, Dec. 2005.
- [3] IEEE Std. 802-11e-Supplement to Part 11:

Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications; Medium Access Control (MAC) Enhancement for Quality of Service (QoS), IEEE 802.11e/D8.0, February 2004.

[4] T. Mo and C. W. Bostian, "A throughput optimization and transmitter power saving algorithm for IEEE 802.11b links," Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf., vol. 1, pp. 57-62, March 2005.

[5] IEEE Std 802.11b-Supplement to Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications; High-speed Physical Layer Extension in the Sept. 1999, 2.4 GHz Band, IEEE 802.11b Std, 1999.

[6] F. Anjum, M. Elaoud, D. Famolari, A. Ghosh, R. Vaidyanathan, A. Dutta, P. Agrawal, T. Kodama, and Y. Katsube, "Voice Performance in WLAN Networks-An Experimental Study," Proc. IEEE Global Telecomm.Conf., pp. 3504-3508, Dec. 2003.

[7] G. H. Hwang and D. H. Cho, "Voice capacity in IEEE 802.11 wireless LANs," Electron. Lett., vol. 40, no. 18, pp. 1137-1138, Sept. 2004.

[8] X. Wang, T. D. Todd, D. Zhao, and V. Kezys, "Power saving gateways for real-time voice handset support in IEEE 802.11 wireless LANs," Proc. IEEE Int. Conf. Communications, vol. 1, pp. 164-169, June 2004.

[9] P. Wang, H. Jiang, and W. Zhuang, "IEEE 802.11e enhancement for voice service," IEEE Wireless Communications, vol. 13, no. 1, pp. 30-35, Feb. 2006.

[10] M. Narbutt and M. Davis, "An assessment of the audio codec performance in voice over WLAN (VoWLAN) systems," Proc. 2nd Int. Conf. Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services, pp. 461-467, July 2005.

[11] Y. Chen, N. Snavatkul, and S. Emeott, "Power management for VoIP over IEEE 802.11 WLAN," Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conf., vol. 3, pp. 1648-1653, March 2004.

권 성 수 (Sung-Su Kwoun)

정회원



1999년 2월 광운대학교 전파공학과(공학사)
 2001년 2월 광운대학교 전자공학과(공학석사)
 2002년 3월~현재 광운대학교 전파공학과 박사과정
 2004년 3월 박사과정 수료
 2000년 12월~2005년 11월 LG

전자 정보통신 사업본부

2005년 11월~현재 LG-NORTEL 연구소

<관심분야> OFDM, MIMO, MESH

이 종 철 (Jong-Chul Lee)

정회원



1983년 2월 한양대학교 전자공학과(공학사)
 1985년 2월 한양대학교 전자공학과(공학석사)
 1989년 12월 Arizona State Univ. EE Dept. (공학석사)
 1994년 5월 Texas A&M Univ. EE Dept. (공학박사)

EE Dept. (공학박사)

1994년 6월~1996년 2월 현대전자 광소자 개발실 (선임연구원)

1996년 3월~현재 광운대학교 전파공학과 전임강사/조교수/부교수

<관심분야> 초고주파 및 광전자 공학, RF MEMS, 밀리미터파 능동 및 수동 소자