

대기중 사운드 통신 기술 및 응용

가순원, 김태현*, 이혜원**, 최성현
서울대학교, *사운들리, **삼성전자

요약

대기중 사운드 통신(Aerial acoustic communication)은 공기를 매질로 삼아서 전파되는 소리에 정보를 실는 통신 기술로 스피커와 마이크 등의 오디오 인터페이스로 신호를 송수신하는 방식을 의미한다. 오늘날 많은 사람들이 사용하는 스마트 기기의 내장 마이크를 수신 인터페이스로 활용할 수 있다는 장점 때문에 대기중 사운드 통신을 기반으로 한 다양한 기술 및 어플리케이션 개발이 이루어지고 있다. 본 고에서는 최근 대기중 사운드 통신 기술 동향을 살펴보고 대기중 사운드 통신의 특성으로부터 기인하는 기술적인 어려움을 짚어본다. 또한, 대기중 사운드 통신 기술 기반의 응용 서비스를 알아본다.

I. 서론

사운드 통신(Acoustic communication)은 음파를 매질로 하여 정보를 전달하는 통신 기술로 소리가 전파되는 매질의 종류에 따라 수중 사운드 통신(Underwater acoustic communication)과 대기중 사운드 통신(Aerial acoustic communication)으로 나뉜다. 음파는 밀도가 큰 매질에서 전파 속도가 더 빠르고 송신 범위가 커지는 특성을 가지고 있다. 때문에, 과거에는 수중 음파 탐지 기술(Sound navigation and ranging, SONAR)이나 해양 생태계 모니터링 센서 네트워크 등 수중 사운드 통신을 중심으로 연구가 이루어졌다. 그러나 최근 스마트 기기에 내장된 오디오 인터페이스를 활용하는 대기중 사운드 통신에 대한 관심이 높아지면서 관련 연구도 활발히 진행되고 있다.

대기중 사운드 통신은 공기 중 음파에 정보를 실어 통신하는 기술이다. 물을 이용한 수중 사운드 통신에 비해 공기 중 음파 전달 손실이 커서 전송 거리가 십 수 미터로 훨씬 짧다. 통신 동작 주파수에 따라서 다른 송신기가 쓰일 수 있는데, 22 kHz 이상인 경우에는 초음파 송수신기(Ultrasound transceiver)를 사

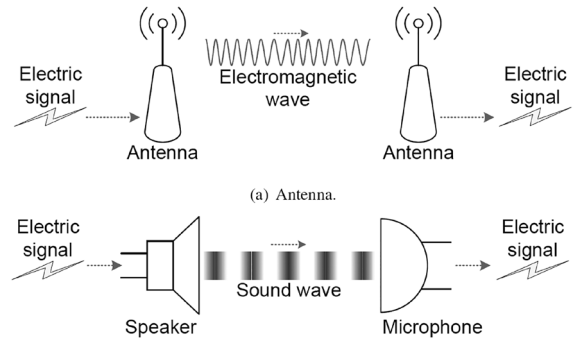


그림 1. 전자기파와 음파의 무선 통신 모델

용하고 22 kHz보다 작은 경우에는 오디오를 재생 및 녹음할 수 있는 일반 오디오 인터페이스를 사용한다.

최근 스마트폰, 태블릿 등의 스마트 기기들이 광범위하게 사용되면서 대기중 사운드 통신의 운영체제(Operating system, OS) 및 장치 독립적인 특성을 기반으로 한 연구들이 이루어지고 있다. 전세계적으로 2013년 한 해 동안 약 11억대의 스마트폰이 출하되었다[1]. 대기중 사운드 통신의 가장 큰 장점은 이러한 스마트 기기들에 이미 내장되어 있는 마이크와 일반 스피커를 이용하여 통신을 하므로 별도의 장치가 필요 없다는 것이다. 스마트 기기의 음성 사용자 인터페이스(User interface, UI), 즉, 마이크가 신호를 녹음 및 재생을 하면 스마트 기기의 어플리케이션 프로세서(Application processor, AP)가 해당 신호를 처리한다. 따라서, 스마트 기기가 일종의 software-defined radio (SDR) 플랫폼의 역할을 하며 이는 스마트 기기의 종류나 운영 체제에 상관 없이 가능하다. 이러한 장점을 기반으로 낮은 전파 속도가 오히려 더 유리한 거리 측정이나 ID 정보를 주고받는 간단한 데이터 통신 등 일부 어플리케이션을 중심으로 연구가 진행되고 있다.

본 고의 내용 구성은 다음과 같다. II 절에서는 대기중 사운드 통신 기술의 구체적인 내용을 살펴보고, III 절에서는 대기중 사운드 통신 기술이 극복해야 할 기술적인 문제들에 대해 알아본다. IV 절에서는 대기중 사운드 통신 기술의 응용 분야를 소개하고, V 절에서 결론을 맺는다.

II. 대기중 사운드 통신 기술

본 절에서는 대기중 사운드 통신에 어떠한 기술들이 있는 지 알아본다. 대기중 사운드 통신 기술에는 크게 거리 측정, 실내 위치 확인, 데이터 통신이 있다.

1. 거리 측정(Ranging)

음파 신호는 전자기파보다 전파 속도가 느리기 때문에 더 정확한 거리 측정 결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 거리 측정은 두 기기간에 주고받는 신호의 송수신 시간차와 신호의 전파 속도를 곱하여 거리를 계산한다. 전자기파와 같이 전파 속도가 매우 빠른 신호를 사용하면 시간 측정상의 작은 오차도 거리 계산에 큰 영향을 준다.

BeepBeep은 양방향 신호 측정과 자가 녹음 방식을 사용하여 거리를 측정하는 기기간(Device-to-device, D2D) 커뮤니케이션 기술이다[2]. 두 기기간의 거리를 측정하기 위해 각 기기는 “Beep” 음파 신호를 발생시키고 동시에 마이크로 녹음을 진행한다. <그림 2>와 같이 각 기기는 자신이 발생한 신호와 상대 기기에서 온 신호를 모두 녹음하게 된다. 두 기기는 두 신호 사이의 시간차의 샘플 수를 센 후 서로 교환하여 신호의 양방향 이동 시간을 구할 수 있게 되고 이를 통해서 거리를 알 수 있다. 실험적으로 기기간 거리가 10 m 이상일 때 약 2 cm 이하의 오차를 보인다.

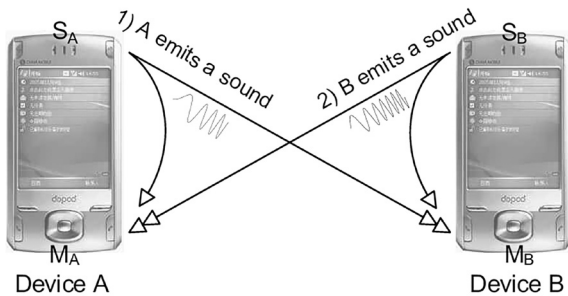


그림 2. 기기간 양방향 측정과 자가 측정 [2]

Beep은 스마트 기기가 쓰는 음파 비콘 신호를 실내 벽에 부착된 마이크들이 녹음하고 이 신호를 Wi-Fi를 통하여 중앙 서버에서 수집하고 계산하여 거리를 측정하는 기술이다 [3]. 이 때, 중앙 서버는 마이크들의 상대적 위치 정보를 가지고 있으며 녹음 시점은 동기화되어 있다. 20 m×9 m 크기의 방에서 측정 실험을 한 결과 40 cm의 오차 범위를 보였다.

음파 처프(Chirp) 신호를 이용한 거리 측정 기술은 10 cm 이내의 오차로 더 향상된 성능을 보인다[4]. 처프 신호는 시간

에 따라 신호의 주파수가 변화하는 신호로 auto correlation의 peak가 높고 좁은 특성 때문에 무선탐지와 거리측정(Radio detecting and ranging, RADAR) 기술에서 활용되어 왔다. [4]는 이러한 처프 신호를 대기중 음파 통신에서 활용하여 실내 환경에서 혼한 도플러 효과(Doppler shift)와 다중경로 전파 손실에 큰 영향을 받지 않는 기술을 제시한다. 또한, 처프의 선형 주파수 의 기울기에 변화를 주고 한 펄스에 두 개 이상의 비트 정보를 삽입할 수 있게 함으로써 서로 다른 단말기가 각자의 ID 정보를 이용하여 위치 확인을 하는 다중 접속 모델을 제안한다.

2. 실내 위치 확인(Indoor Positioning)

대기중 사운드 통신의 또 다른 주요 응용 분야 중 하나가 실내 위치 확인(Indoor positioning)이다. 위성항법장치(Global positioning system, GPS)와 WiFi 위치 확인 시스템(WiFi positioning system, WPS)이 위치 확인 목적으로 널리 사용되나, 두 기술 모두 한계점을 가진다. GPS가 사용하는 위성 신호는 건물의 벽과 천장을 통과하면서 전파 손실이 심하여 실내 위치를 파악하기 힘들다. 한편, WPS는 WiFi Access Point (AP)에서 받는 신호의 세기를 기준으로 위치를 파악하는 실내 위치 확인 기술이나 오차 범위가 10m에 달하여 좋은 성능을 보이지 못한다.

또한 벽을 통과할 수 있는 전자기파와는 달리 음파는 벽을 통과하여 전파될 수 없기 때문에 사람이 인지하는 공간의 단위로 위치 확인이 가능하다. ShopKick은 음파의 이러한 특성을 이용하여 매장에 입점한 고객들에게 특가 판매 서비스를 제공하는 기술이다 [5]. ShopKick이 제공하는 어플리케이션을 스마트 기기에 다운로드 받은 고객이 ShopKick 서비스를 제공하는 매장에 입점하면 스마트 기기가 입구에 부착된 초음파 송신기에서 반복적으로 broadcast되는 매장 ID를 수신하게 된다. 고객은 어플리케이션을 통해서 해당 매장에서 제공하는 프로모션 정보와 다른 매장 정보를 받을 수 있다.

3. 데이터 통신

기존의 전자기파 데이터 통신에서 사용되는 변복조 방식에는 신호의 주파수에 신는 Frequency Shifting Key (FSK)와 신호의 위상에 정보를 신는 Phase Shifting Key (PSK)가 있다. 이러한 변복조 방식은 사운드 통신에서도 사용 가능하며 여러 대기중 사운드 통신 기술에서 사용되어 왔다.

대기중 사운드 통신은 시중 마이크의 비가청 대역의 불균형한 주파수 응답 때문에 가청 대역에서 활발히 연구되어 왔다. Digital Voice는 Multi FSK (MFSK) 기반으로 주변 음향 환경

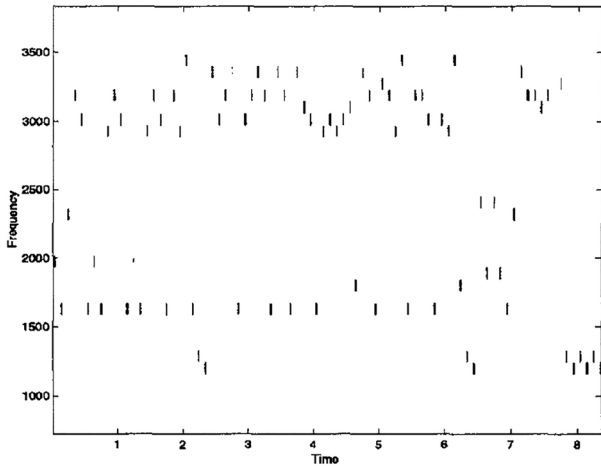


그림 3. 8-FSK신호의 Spectrogram, $\Delta f=20$ Hz, $T = 100$ ms [6]

과 시스템 목표 성능에 따라서 적응적으로 음파 톤의 개수와 심볼 길이를 정하는 가청대역 통신 기술이다[6]. 따라서 환경에 따라 데이터 전송률이 수 십에서 수 천 bit per second (bps)까지 가능하다. 12 kHz이하의 가청 대역 주파수를 사용하며 tone spacing을 적절히 조절하여 신호의 소리가 클라리넷이나 크리켓, 새 등의 소리와 유사하게 나도록 한다. <그림 3>은 8-FSK 신호를 사용하였을 때의 spectrogram을 나타낸 것이다. NTT DoCoMo는 사람의 청각 시스템이 소리의 크기 변화에는 민감하나 위상 변화에는 덜 민감한 점에서 착안하여 Acoustic OFDM 변복조 방식을 제안하였다[7]. 즉, 주파수 영역에서 같은 크기와 서로 다른 위상을 가진 두 소리는 사람에게 같게 들리므로, 기존에 존재하는 오디오 소스의 주파수 영역에서 OFDM으로 변조된 데이터를 subcarrier의 위상에 삽입한다. 이 때 6.4~8 kHz 대역에서 약 240 bps의 전송률을 보인다.

한편, 비가청 대역 신호를 사용한 사운드 통신에 관한 연구도 일부 진행되어 왔다. 18 kHz 이상의 주파수 대역 신호를 초음파 송신기(ultrasound transducer) 장비로 송신한 실험에서 10 m 거리에서 최대 100 bps 전송률까지 얻어낼 수 있었다[8]. 위 실험은 한 국립 병원에서 이뤄졌으며 200 개의 초음파 태그(송신기)와 31개의 수신기가 사용되었다. 나아가서 주파수 응답이 21 kHz까지 상대적으로 일정한 노트북의 마이크를 이용한 Mesh 네트워크(Mesh network) 실험에서는 최대 20 m 거리에서 20 bps의 전송률을 얻어냈다[9]. 이 두 실험의 경우 비가청대역 신호를 사용한 대기중 사운드 통신 기술이나, 특정 수신기나 노트북을 사용해야 한다는 제한이 있다. 일반 스피커와 모바일 스마트 기기는 지중마다 주파수 응답 특성이 상이하기 때문에 같은 기술로 성능을 내기 어렵다.

이러한 frequency selectivity를 극복하기 위한 기술로 처프 신호를 이용한 대기중 사운드 음파 통신이 있다[10]. 처프 신호

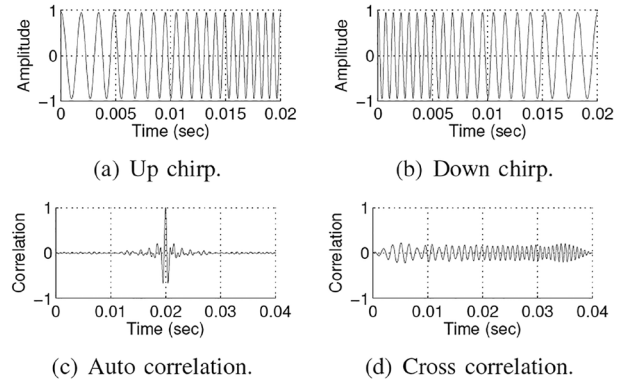


그림 4. 처프(Chirp) 신호와 correlation

는 mulpi-path propagation에 의한 여러 수신 성분들을 분리해낼 수 있는 능력 때문에 RADAR 통신에서 광범위하게 사용된다. 또한, 처프 신호는 한 주파수 성분이 아니라 특정 주파수 대역을 모두 ‘스위핑(sweeping)’하기 때문에 제각기 최대 주파수 대역 범위가 다른 스마트 기기들에서 고른 수신 성능을 보여주는 장점이 있다. [10]는 처프 신호를 비가청 대역에 실어 통신을 하는 기술을 제안하였으며 실험적으로 최대 25m까지 16 bps의 전송률로 전송 가능함을 확인하였다. 이는 신호의 auto correlation peak의 폭이 좁고 up chirp과 down chirp간의 cross correlation이 작아서 복조가 용이한 chirp의 특징 때문이다. <그림 4> 이 때 16 bps로 높지 않은 전송률을 보완하기 위해 백엔드 서버(backend server)를 두고, 처프 대기중 사운드 통신을 통해서 스마트 기기가 ID를 전송 받으면 해당 ID를 백엔드 서버에 보내서 관련 내용을 인터넷으로 받아오는 방식을 취한다.

Ⅲ. 사운드 통신의 기술적 허들

대기중 사운드 통신은 기존의 오디오 인터페이스를 활용할 수 있는 장점이 있는 반면, 기존의 전자기파 통신과 달리 음파를 사용하면서 가지는 기술적인 어려움이 존재한다. 본 절에서는 사운드 통신의 기술적 어려움에 대해 알아본다.

1. Frequency Selectivity

스마트 기기의 오디오 인터페이스는 불균형한 주파수 응답 특성을 갖기 때문에 하나의 통일된 변복조 방식으로 서로 다른 기기들에서 고른 성능을 얻는 기술을 고안하기가 쉽지 않다. 시중의 스피커 및 마이크는 모델에 따라 서로 다른 주파수 응답 특성을 가진다. 특히 22 kHz 대역까지 고른 주파수 응답을 갖는

오디오 인터페이스는 흔치 않으며 가격이 매우 비싸기 때문에 일반 스마트 기기에서는 사용되지 않는다. 실험적으로 여러 종류의 스마트 기기들의 마이크 주파수 응답 특성을 측정해본 결과, 20 kHz 대역까지는 상대적으로 고른 주파수 응답을 보이거나 20~22 kHz 대역에서는 제각기 다른 주파수 응답을 보인다 [10]. <그림 5>를 보면 일부 스마트 기기의 경우 20 kHz 이상 주파수 대역에서 frequency gain이 0에 가까움을 볼 수 있다. 따라서 스마트 기기에 따라 녹음에 사용할 수 있는 최대 주파수가 달라지고, 비가청 대역 신호를 사용하는 기술의 경우 이러한 점이 고려되어야 한다.

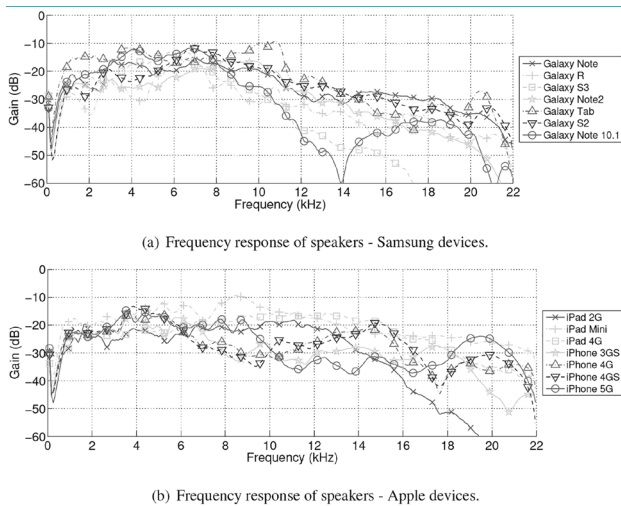


그림 5. 스마트 기기별 마이크 주파수 응답 특성

2. Inter Symbol Interference (ISI)

사운드 통신이 일반적으로 사용되는 실내 환경에서는 multi-path propagation으로 인한 inter-symbol interference (ISI)가 발생하여 거리 측정 및 데이터 전송 성능의 저하를 일으킨다. 실내 Non-line-of-sight (NLOS) 환경에서 delay spread를 측정된 결과 약 40 msec 정도로 기존의 전자기파 통신이 수 μsec delay spread를 가짐을 고려할 때 상당히 큰 값을 가진다. 따라서 심볼 사이에 delay spread 이상의 guard interval을 삽입하거나 채널 이퀄라이저(channel equalizer)를 통하여 ISI 영향을 줄이는 것이 필요하다.

3. 낮은 데이터 전송률

사운드 통신은 최대 수 십 kHz의 제한된 주파수 대역폭을 사용하기 때문에 기존의 전자기파 통신에 비해 데이터 전송률이 훨씬 낮다. 따라서 데이터 전송이 주 목적인 어플리케이션의 경우 기술적으로 전송률을 더 높이거나 백엔드 서버를 두는 등의

대안이 필요하다.

4. 인체 무해성

일부 대기중 사운드 통신 기술에서 사용되는 비가청 대역의 신호가 사람 및 동물에게 얼마나 영향을 끼치는 가는 기술의 산업화에 있어 중요한 부분이다. 사람의 가청대역은 일반적으로 2~20 kHz 대역으로 알려져 있으며, 동물의 경우에는 종에 따라 다르나 일반적으로 22 kHz 대역 이상까지도 들을 수 있다 <그림 6> [11]. 실험적으로 65 dB SPL 이하의 비 가청 음파에 16 시간 이하로 노출되는 경우에는 사람 및 동물에게 스트레스를 주지 않는다[12].

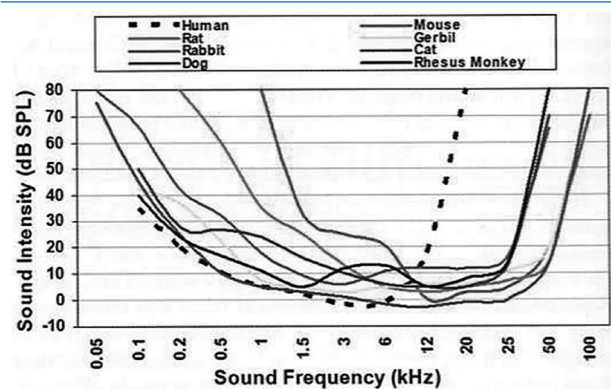


그림 6. 사람과 동물의 가청 주파수 대역 [12]

세계보건기구(WHO)에서 조사한 결과에 의하면 국가에 따라 16 kHz 대역의 초음파는 약 85~90 dB SPL 음압 크기까지 안전하다고 밝혔고 20 kHz 대역의 초음파는 80~110 dB SPL 크기까지 안전하다고 밝혔다[13]. 미국 공군과 캐나다도 20 kHz 대역의 초음파에 대해 각각 85 dB과 80 dB 이하가 안전하다고 판단했다. 반면, 일본과 소비에트 연방(현 러시아 및 동유럽 국가들), 스웨덴 등은 16 kHz 이하 대역에서는 90 dB 이하를 기준으로 삼고 20 kHz 이상 대역에서는 110 dB 이하의 소리가 안전하다고 밝혔다(스웨덴의 경우 20 kHz에서 105 dB SPL을 기준으로 삼았다). 모든 국가에서 가청 대역 소리의 최대 허용 음압보다 비가청 대역의 소리에 대해 더 크거나 같은 음압 수치를 허용하는 것으로 볼 때 비가청 대역 소리가 가청 대역 소리에 비해 덜 영향을 준다는 것을 알 수 있다.

IV. 대기 사운드 통신 기술의 응용

지금까지 대기중 사운드 통신 기술에 대하여 살펴보았다. IV

절에서는 이러한 대기중 사운드 통신 기술들이 실제로 응용되는 예를 살펴본다.

1. 매장 위치 기반 서비스

2014년 7월부터 편의점 'CU'를 중심으로 소비자의 위치를 기반으로 멤버십, 쿠폰, 결제 수단 등을 제공하는 모바일 어플리케이션 서비스가 시행되고 있다. IT 기업 아이팝콘이 개발한 이 어플리케이션은 18 kHz 이상의 음파로 데이터를 수신하고 블루투스 모듈로 최대 50 m의 전송 거리를 확보하여 손님이 매장에 입점했을 때 매장 입점을 확인하고 해당 매장의 서비스를 받을 수 있도록 한다. 글로벌 프랜차이즈인 스타벅스커피 코리아 역시 2014년부터 비가청대역의 음파 신호를 사용하여 고객의 입점을 확인하고 온라인 주문 및 결제 수단을 제공하는 원격 주문 서비스 '사이렌 오더(Siren Order)'를 한국에서 제공한다 [14]. 모바일 어플리케이션을 통해서 매장 입점 전에 미리 제품을 선택한 후 매장에서 입점이 확인되면 자동으로 결제 후 주문이 들어가게 된다. 매장에 따라서 서로 다른 코드가 음파에 삽입되어 송신되면 스마트 기기가 수신하여 현재 어느 매장에 있는지 확인하게 된다.

한편, 해외 스타트업 회사인 Signal360(구 SonicNotify)은 비가청 대역의 비콘 신호를 이용하여 매장 내 맞춤 고객 서비스를 수행할 수 있는 SDK를 개발했다[15]. 예를 들어 어떤 마트에서 Signal360에서 제공하는 비콘 송신기를 제품 코너 곳곳에 설치했다고 하자. 설치된 비콘 송신기들은 근처에 있는 Signal360 어플리케이션 이용자에게 해당 제품의 할인 이벤트나 제품 정보를 푸시 알림으로 보낼 수 있다.

2. T커머스

T커머스는 디지털 TV를 기반으로 리모컨 등을 활용하여 상품 정보 검색·구매·결제 등의 상거래를 할 수 있는 서비스이다. 시청자가 TV를 통해 드라마·예능 프로그램 등을 시청하다가 특정 노출 상품에 관심을 가지는 경우, 기존에는 직접 인터넷으로 검색을 하는 등 추후에 찾아보아야 하는 번거로움이 있다. 연동형 T커머스는 기존 방송 채널을 시청하다 관심 있는 제품이 나오면, TV에 나오는 관련 제품의 정보를 제공 받아 구매를 진행할 수 있는 서비스이다. 이 때, 제품의 정보를 TV에서 받는 경우 기존에 보던 콘텐츠를 중단해야 하는 단점이 있어서 실제 시장에서 큰 호응을 얻지 못하고 기존의 홈쇼핑과 유사한 서비스 정도만 시행하고 있다[16].

비가청 음파를 사용하는 대기중 사운드 통신 기술을 통해 TV에서 제품 정보를 시청자의 스마트 기기에 전송하면 이러한 물

입 방해 없이 받을 수 있다. 사운드리는 TV방송 음파의 비가청 대역에 제품 정보를 제공 할 ID를 삽입하는 기술을 개발하였다 [10]. 시청자의 스마트 기기가 마이크를 통해 ID를 수신하면 해당 ID를 백엔드 서버에 보내서 제품 정보 및 결제 수단을 제공한다 (그림 7).

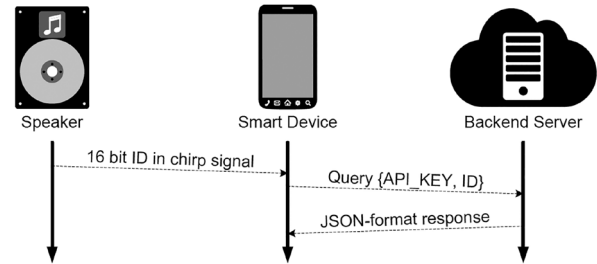


그림 7. 백엔드 서버를 활용한 메시지 흐름도

3. 청각 장애인 안내 방송

실내 위치 확인 기술의 일환으로 지하철 및 버스 내의 안내 방송에 정보를 실어서 청각 장애인에게 다음 역을 알려주는 역 정보 제공 서비스가 있다. 벤처 기업 사운드리는 서울 지하철 열차 내에 재생되는 안내 방송 음파의 비가청 대역에 다음 역의 ID 정보를 실어서 송신하는 기술을 개발하고, 해당 신호를 승객의 스마트 기기가 녹음을 통해 수신하고 다음 역 정보를 알려주거나 원하는 목적지에서 알람을 주는 서비스를 제공하는 어플리케이션을 제작하였다. 해당 서비스는 청각 장애인에게 큰 편이를 제공할 수 있을 뿐만 아니라, 열차 내에 음악이나 영화 감상을 하여 미처 방송을 듣지 못하는 일반 승객들에게도 유용할 것이라 예상된다.

4. NFC 대체 기술

대기중 사운드 통신의 또 다른 응용 사례로 모바일 택시 결제 서비스가 있다. Zoosh는 Naratte사가 개발한 비가청 대역 음파 신호 기반의 기술로 현재 Verifone 통신사의 모바일 택시 결제 서비스 Way2Ride로 사용되고 있다[17]. Verifone사는 택시의 뒷좌석에 작은 태블릿을 설치하고 태블릿 화면에는 서비스 사용 방법과 함께 스피커에서 비가청 음파가 재생된다. 승객은 태블릿에 Zoosh 어플리케이션이 깔린 스마트 기기를 대는 것으로 택시 요금을 지불할 수 있다.

V. 결론

본 고에서 대기중 사운드 통신의 종류별 기술과 응용에 대해서 살펴보았다. 대기중 사운드 통신은 스마트 기기를 활용한 실내 환경 편리 서비스 개발의 원천 기술로 유용하게 활용될 수 있다. 이것은 기존의 오디오 인터페이스를 재사용할 수 있다는 점과 실내 환경에서 GPS나 Wi-Fi 등 기존의 위치 확인 기술에 비해 유리하다는 점 때문이다. 앞으로 지속적인 기술개발과 더불어 다양한 산업 어플리케이션에 적용되면서 차세대 실내 환경 통신 기술의 한 축을 담당하게 될 것이다.

참고 문헌

- [1] M. Meeker, Internet Trends 2014, Code Conference, KPCB, 2014.
- [2] C. Peng, G. Shen, Y. Zhang, Y. Li, and K. Tan, "BeepBeep: A high accuracy acoustic ranging system using cots mobile devices," in Proc. ACM SenSys, 2007, pp. 1-14.
- [3] A. Mandal, C. V. Lopes, T. Givargis, A. Haghghat, R. Jurdak, and P. Baldi, "Beep: 3D indoor positioning using audible sound," in Proc. IEEE CCNC, 2005, pp. 348-353.
- [4] P. Lazik, and A. Rowe, "Indoor pseudo-ranging of mobile devices using ultrasonic chirps," in Proc. ACM SenSys, 2012.
- [5] ShopKick. [Online]. Available: <https://www.shopkick.com>
- [6] C. V. Lopes and P. M. Aguiar, "Aerial acoustic communications," in Proc. IEEE WASPAA, 2001, pp. 219-222.
- [7] H. Matsuoka, Y. Nakashima, and T. Yoshimura, "Acoustic communication system using mobile terminal microphones," NTT DoCoMo Tech. J, vol. 8, no. 2, pp. 2-12, 2006.
- [8] S. Holm, O. B. Hovind, and S. Rostad, "Indoors data communications using airborne ultrasound," in Proc. IEEE ICASSP, vol. 3, 2005, pp. iii-957.
- [9] M. Hanspach and M. Goetz, "On covert acoustical mesh networks in air," J. Commun., vol. 8, no. 11, 2013.
- [10] H. Lee, "Aerial acoustic communication using chirp signal," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Comput. Eng., Seoul Nat. Univ., Seoul, 2014.
- [11] OSHA Technical Manual Section III: Chapter 5. Noise, Occupational Safety & Health Administration (OSHA), USA, https://www.osha.gov/dts/osta/otm/new_noise/
- [12] Turner, Jeremy G. et al., "Hearing in laboratory animals: strain differences and nonauditory effects of noise," Comparative medicine 55.1 (2005): 12.
- [13] B.W. Lawton, Damage to human hearing by airborne sound of very high frequency or ultrasonic frequency, London, Health & Safety Executive, 2001.
- [14] Starbucks Coffee Korea. [Online]. Available: http://www.istarbucks.co.kr/Coffeehouse/starbucks_application.asp
- [15] Signal360. [Online]. Available: <http://signal360.com/>
- [16] '홈쇼핑 따라하기' T커머스 규제논란, 한국경제, 2014년 7월 15일
- [17] Zoosh. [Online]. Available: <http://www.verifone.com/industries/taxi/way2ride/>

약 력



가 순 원

2014년 서울대학교 전기·정보공학부 공학사
 2014년~현재 서울대학교 전기·정보공학부
 석사과정
 관심분야: 사운드 통신, WLAN



김 태 현

2004년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 공학사
 2006년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 석사
 2012년 일리노이대학교 대학원 전기전자공학
 박사수로
 2012년~현재 사운드리 CEO
 관심분야: 사운드 통신



이 혜 원

2005년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 공학사
 2014년 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 박사
 2014년~현재 삼성전자 연구원
 관심분야: 사운드 통신, WLAN



최 성 현

1992년 KAIST 전기전자공학과 공학사
 1994년 KAIST 전기전자공학과 공학석사
 1999년 미시간대학교 대학원 전기컴퓨터공학 박사
 1999년~2002년 미국필립스 연구소 연구원
 2002년~현재 서울대학교 전기·정보공학부 교수
 2007년 제2회 미국전기전자학회, 대한전자공학회
 IT젊은공학자상
 2008년 제11회 젊은 과학자상.
 관심분야: 사운드 통신, 4G/5G Wireless, WLAN