

# **See Through Walls with Wi-Fi!**

Fadel Adib and Dina Katabi  
Massachusetts Institute of Technology  
{fadel,dk}@mit.edu

# 목차

1. INTRODUCTION
2. RELATED WORK
3. WI-VI OVERVIEW
4. ELIMINATING THE FLASH
5. IDENTIFYING AND TRACKING HUMANS
6. THROUGH-WALL GESTURE-BASED COMMUNICATION
7. IMPLEMENTATION AND EVALUATION

# 1. INTRODUCTION

논문 목표

Wi-fi 신호로 벽 뒤의 움직이는 물체 탐지

# 1. INTRODUCTION



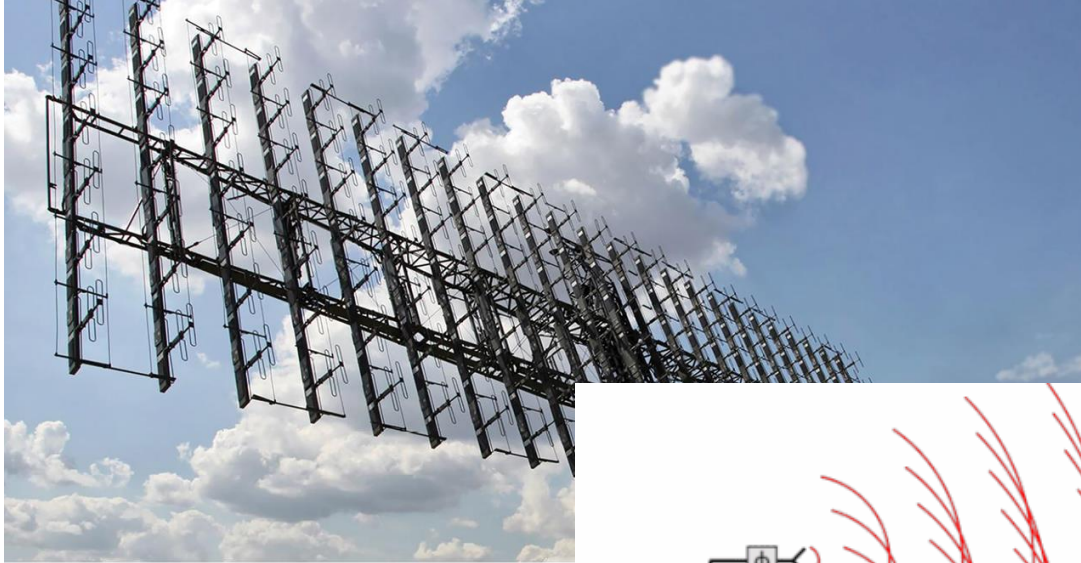
레이더 & 음파탐지 개념 사용.  
장애물 뒤의 물체를 탐지하기 위해서는  
플래시 효과(Flash Effect) 제거 필요

## Flash Effect란?

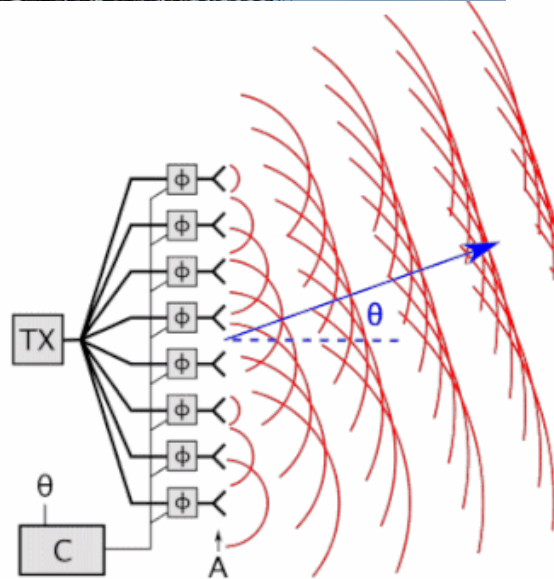
움직이는 물체의 반사 신호가 정적인 물체의 반사 신호보다 작기 때문에 발생

정적인 물체의 반사는 수신기의 ADC를 압도하여 움직이는 물체로부터의 반사 신호를 측정하기 어렵게 함.

# 1. INTRODUCTION



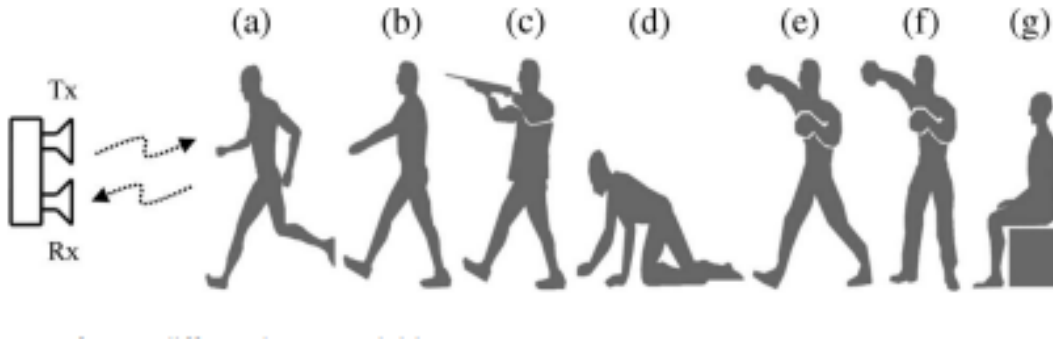
기존은 안테나 어레이(antenna array)를 사용하는 초광대역 시스템으로 플래시 효과를 해결



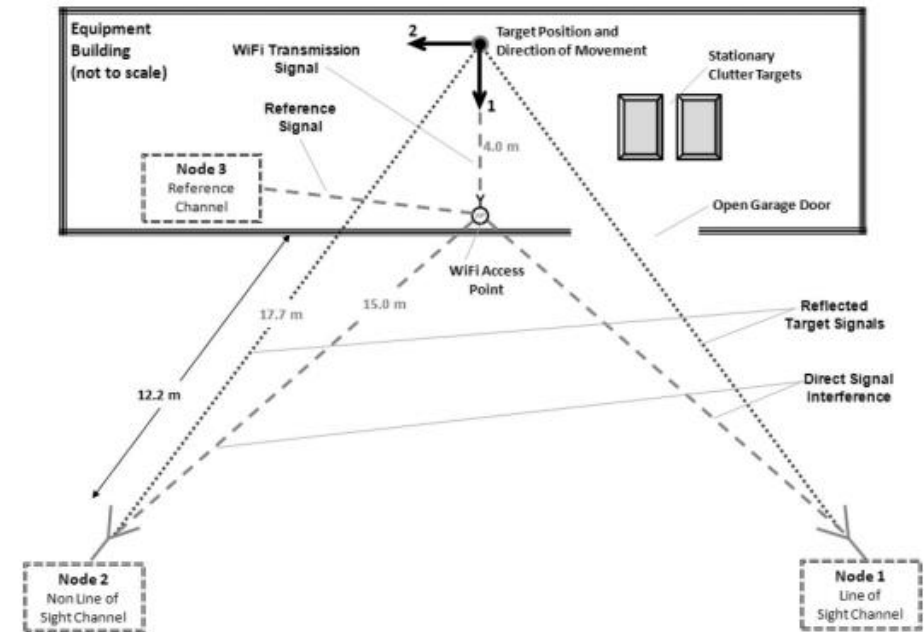
비용 절감을 위해 Wi-fi 신호를 사용한 WI-VI(Wi-fi vision) 기술을 제안

## 2. RELATED WORK

### 기존의 Wi-Fi 신호 사용 연구

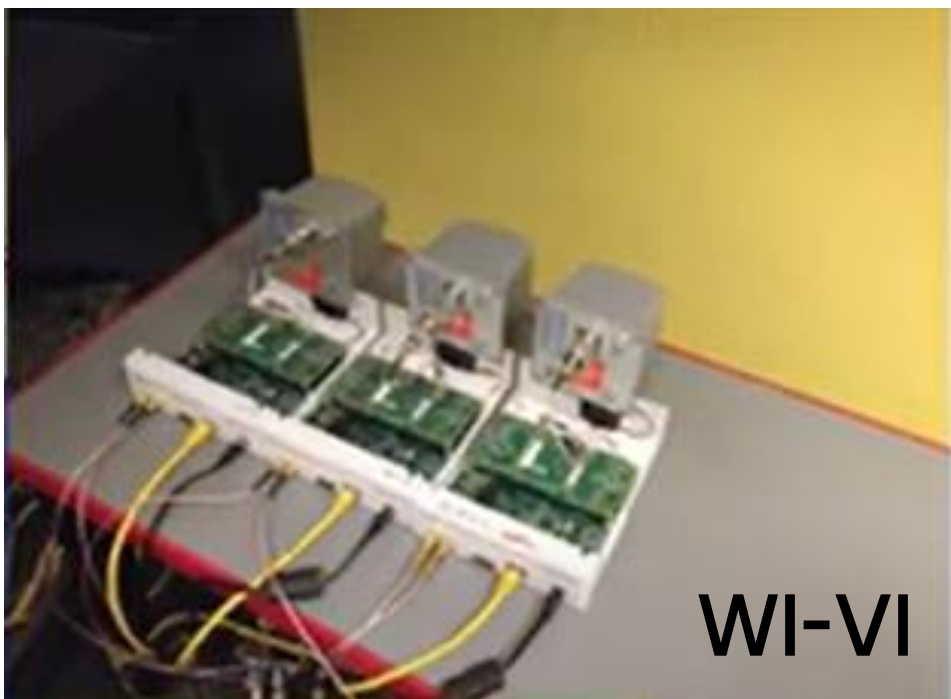


벽과 같은 장애물이 없는 환경에서  
물체의 움직임만을 탐지



방의 수신기와 방밖의 수신기의 연결 필요

# 3. Wi-Vi OVERVIEW



2.4GHz ISM대역에서 Wi-Fi 신호를 사용하는  
투시벽 장치

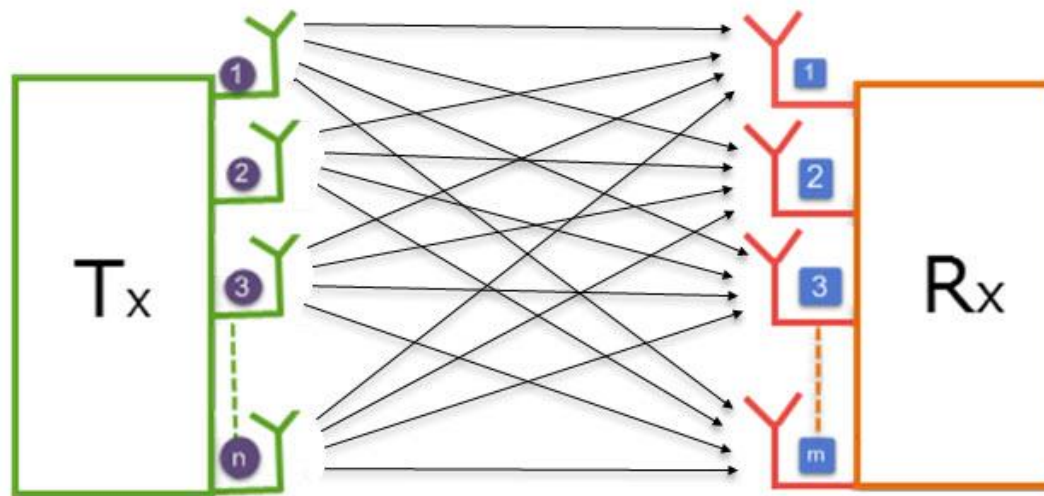
기존 방식	Wi-Vi
초광대역	20MHz 폭의 wi-fi 채널
안테나 어레이	3-안테나 MIMO



# 3. Wi-Vi OVERVIEW



MIMO (multiple input multiple out)



# 3. Wi-Vi OVERVIEW

기존의 안테나 어레이는 반사간의 나노 초단위의 지연을 분석해  
플래시효과를 제거

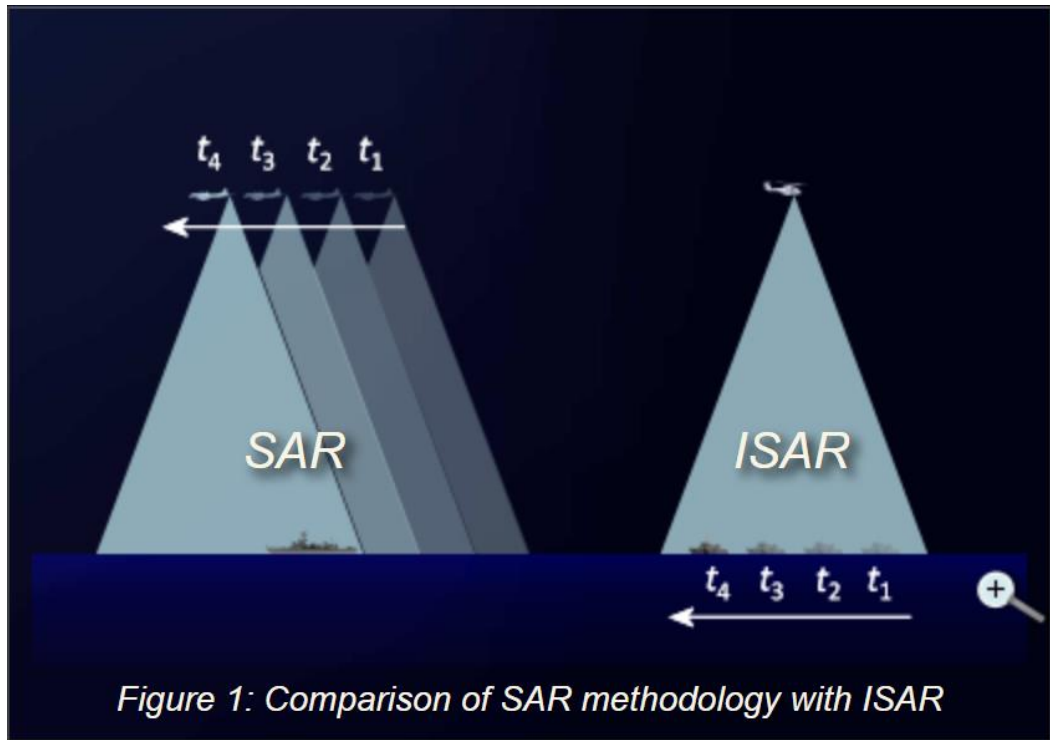


MIMO의 신호 Nulling  
= 원하지 않는 수신기에 대한 간섭 제거



정적물체(벽포함)의  
반사를 제거함.

# 3. Wi-Vi OVERVIEW



기존의 안테나 어레이는 공간적으로 원하는  
방사패턴 수집해 이동하는 물체의 방향을 탐지

Wi-Vi에서는 안테나 어레이의 모방을  
위해 ISAR(Inverse synthetic-  
aperture radar) 기술을 사용해 타겟의  
움직임을 포착함.

# Wi-Vi 구성요소

## 1. MIMO Nulling

정적인 물체에서 반사된 플래시 제거

## 2. ISAR

동적 물체를 안테나 어레이로 취급해 추적함.

# 4. ELIMINATING THE FLASH

무효화 절차

1. Initial Nulling
2. Power Boosting
3. Iterative Nulling

---

**Algorithm 1** Pseudocode for Wi-Vi's Nulling

---

**INITIAL NULLING:**

▷ Channel Estimation

Tx ant. 1 sends  $x$ ; Rx receives  $y$ ;  $\hat{h}_1 \leftarrow y/x$ Tx ant. 2 sends  $x$ ; Rx receives  $y$ ;  $\hat{h}_2 \leftarrow y/x$ ▷ Pre-coding:  $p \leftarrow -\hat{h}_1/\hat{h}_2$ **POWER BOOSTING:**

Tx antennas boost power

Tx ant. 1 transmits  $x$ , Tx ant. 2 transmits  $px$  concurrently**ITERATIVE NULLING:** $i \leftarrow 0$ **repeat**Rx receives  $y$ ;  $h_{res} \leftarrow y/x$ **if**  $i$  even **then** $\hat{h}_1 \leftarrow h_{res} + \hat{h}_1$ **else** $\hat{h}_2 \leftarrow \left(1 - \frac{h_{res}}{\hat{h}_1}\right) \hat{h}_2$  $p \leftarrow -\hat{h}_1/\hat{h}_2$ 

Tx antennas transmit concurrently

 $i \leftarrow i + 1$ **until** Converges

---

## - Initial Nulling

1. 첫 송신 안테나에서만 알려진 Preamble  $x$ 를 전송
2. 수신 안테나에서  $y = h_1x$  로 수신
3. 수신한 신호로  $\hat{h}_1$  을 추정하고 같은 방법으로  $\hat{h}_2$  추정함
4.  $p = -\hat{h}_1/\hat{h}_2$  를 도출한다.
5. 1번 안테나에서는  $x$ 를 2번 안테나에서는  $px$ 를 송신

$$h_{res} = h_1 + h_2 \left( -\overset{p}{\frac{\hat{h}_1}{\hat{h}_2}} \right) \approx 0$$

---

**Algorithm 1** Pseudocode for Wi-Vi's Nulling

---

**INITIAL NULLING:**

▷ Channel Estimation

Tx ant. 1 sends  $x$ ; Rx receives  $y$ ;  $\hat{h}_1 \leftarrow y/x$ Tx ant. 2 sends  $x$ ; Rx receives  $y$ ;  $\hat{h}_2 \leftarrow y/x$ ▷ Pre-coding:  $p \leftarrow -\hat{h}_1/\hat{h}_2$ **POWER BOOSTING:**

Tx antennas boost power

Tx ant. 1 transmits  $x$ , Tx ant. 2 transmits  $px$  concurrently**ITERATIVE NULLING:** $i \leftarrow 0$ **repeat**Rx receives  $y$ ;  $h_{res} \leftarrow y/x$ **if**  $i$  even **then** $\hat{h}_1 \leftarrow h_{res} + \hat{h}_1$ **else** $\hat{h}_2 \leftarrow \left(1 - \frac{h_{res}}{\hat{h}_1}\right) \hat{h}_2$  $p \leftarrow -\hat{h}_1/\hat{h}_2$ 

Tx antennas transmit concurrently

 $i \leftarrow i + 1$ **until** Converges

---

## - Power Boosting

벽 뒤 물체의 반사신호가 약해서 전송된 신호의 전력을 증폭시켜야 한다.

벽을 통과하는 전체 전력도 증가하고 벽뒤의 물체로 인한 신호의 SNR\* 이 향상된다.

채널이 널링되어서 전력이 증폭되어도 수신기의 ADC를 포화시키지 않는다.

\***SNR**(Signal-to-Noise Ratio):  
신호 대 잡음 비

---

**Algorithm 1** Pseudocode for Wi-Vi's Nulling

---

**INITIAL NULLING:**

▷ Channel Estimation

Tx ant. 1 sends  $x$ ; Rx receives  $y$ ;  $\hat{h}_1 \leftarrow y/x$ Tx ant. 2 sends  $x$ ; Rx receives  $y$ ;  $\hat{h}_2 \leftarrow y/x$ ▷ Pre-coding:  $p \leftarrow -\hat{h}_1/\hat{h}_2$ **POWER BOOSTING:**

Tx antennas boost power

Tx ant. 1 transmits  $x$ , Tx ant. 2 transmits  $px$  concurrently**ITERATIVE NULLING:** $i \leftarrow 0$ **repeat**Rx receives  $y$ ;  $h_{res} \leftarrow y/x$ **if**  $i$  even **then** $\hat{h}_1 \leftarrow h_{res} + \hat{h}_1$ **else** $\hat{h}_2 \leftarrow \left(1 - \frac{h_{res}}{\hat{h}_1}\right) \hat{h}_2$  $p \leftarrow -\hat{h}_1/\hat{h}_2$ 

Tx antennas transmit concurrently

 $i \leftarrow i + 1$ **until** Converges

---

## - Iterative Nulling

전송 전력을 강화하면 ADC 양자화 수준 아래에 있는 잔류 반사가 측정되어 이를 제거해야함.

채널 추정 오차가 채널 추정 자체보다 훨씬 작다는 원리로 Wi-Vi는 추정값을 미세조정한다.

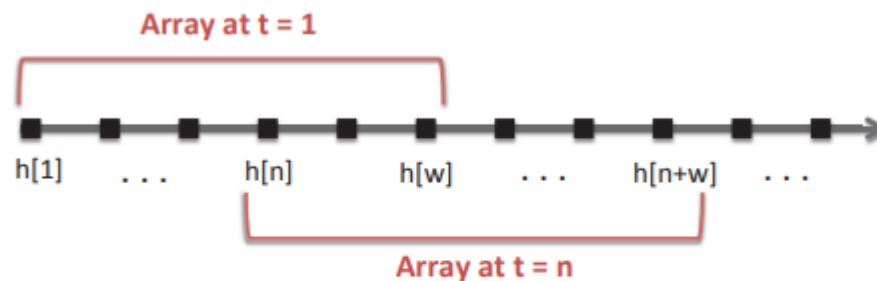


# 5. IDENTIFYING AND TRACKING HUMANS

정적인 물체의 영향을 제거했으므로 이제 움직이는 물체를 추적하는 데 집중 가능  
ISAR기술을 사용해 안테나 어레이를 모방해 움직이는 물체를 추적

# 5.1 Tracking a Single Human

- 채널 상호성으로 인해 Wi-Vi가 받는 연속 시간 샘플은 움직이는 대상의 연속적인 공간위치와 관련있다.
- 연이은 시간 샘플을 공간 샘플로 처리함으로써 Wi-Vi는 안테나 어레이를 흉내낸다.



채널의 시간 함수

$$h[n] = y[n]/x[n].$$

**Figure 2—Time samples as Antenna Arrays.** Wi-Vi groups time samples into overlapping windows of size  $w$ , then treats  $h[n] \dots h[n+w]$  as an antenna array. This allows it to track the a moving object with respect to the receiver.

한 간단한 수학적 채널 모델의 예는 다음과 같다.

$$y = hx + n$$

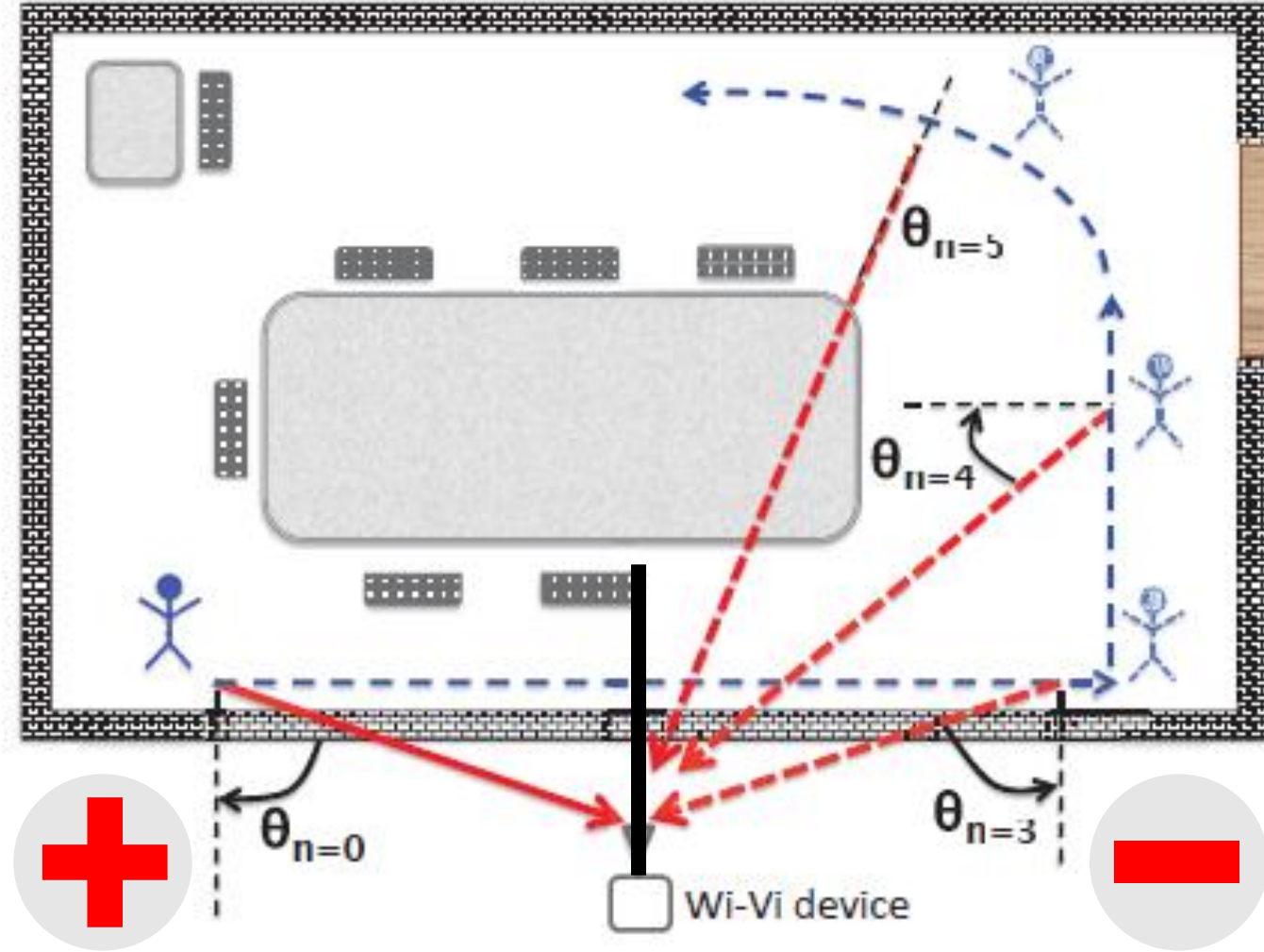
여기서  $x$ 는 송신 신호,  $h$ 는 채널,  $n$ 은 가산 잡음 그리고  $y$ 는 수신 신호이다.

## standard antenna array equations

$$A[\theta, n] = \sum_{i=1}^w h[n + i] e^{j \frac{2\pi}{\lambda} i \Delta \sin \theta},$$

시간  $n$ 에서 공간 방향  $\theta$ 신호를 측정하는 함수

임의의 시점  $n$ 에서  $A[\theta, n]$ 에서 가장 높은 값을 생성하는  $\theta$ 값은 물체가 이동하는 방향에 해당



(a) Experimental Setup

## standard antenna array equations

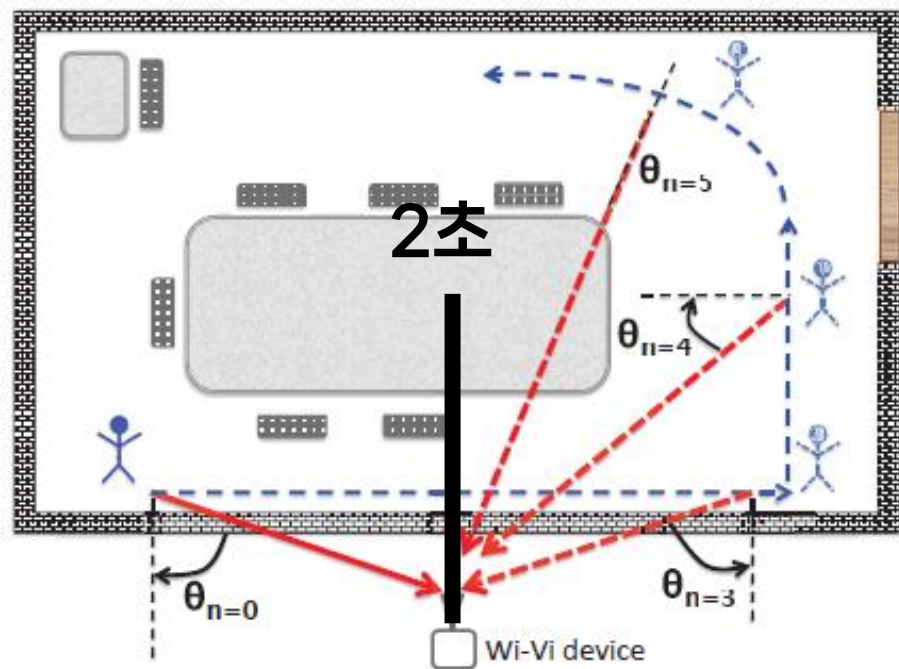
$$A[\theta, n] = \sum_{i=1}^w h[n+i] e^{j \frac{2\pi}{\lambda} i \Delta \sin \theta},$$

$\theta$  = 어레이의 연속된 안테나 사이의 공간적 간격,  $\lambda$  = 파장

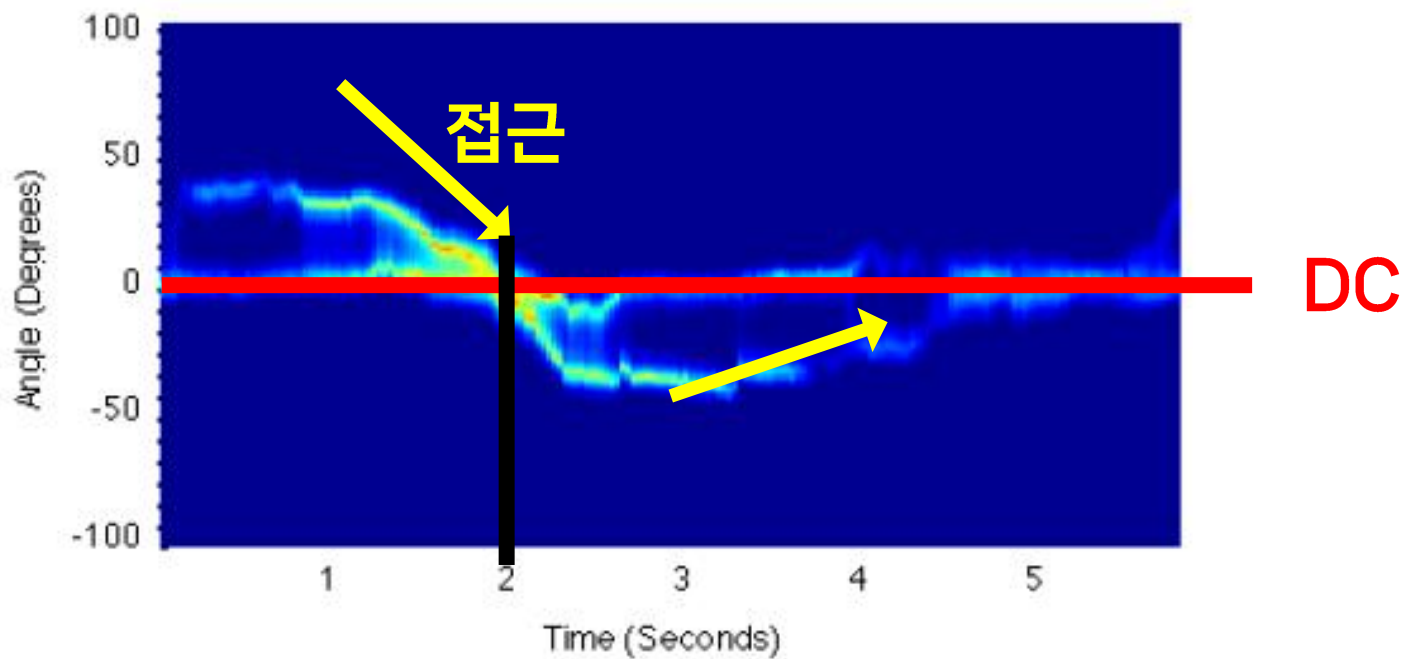
$$\Delta = vT$$

$T$ 는 Wi-Vi의 샘플링 주기이고  $v$ 는 모션의 속도

기본값은  $v = 1\text{m/s}$  [10]



(a) Experimental Setup



(b) Wi-Vi's output

# Tracking Multiple Humans

smoothed MUSIC\* 알고리즘

$$A'[\theta, n] = \frac{1}{\sum_{k=1}^K \left\| \sum_{i=1}^w e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} i \Delta \sin \theta} U_N[n](i, k) \right\|^2}.$$

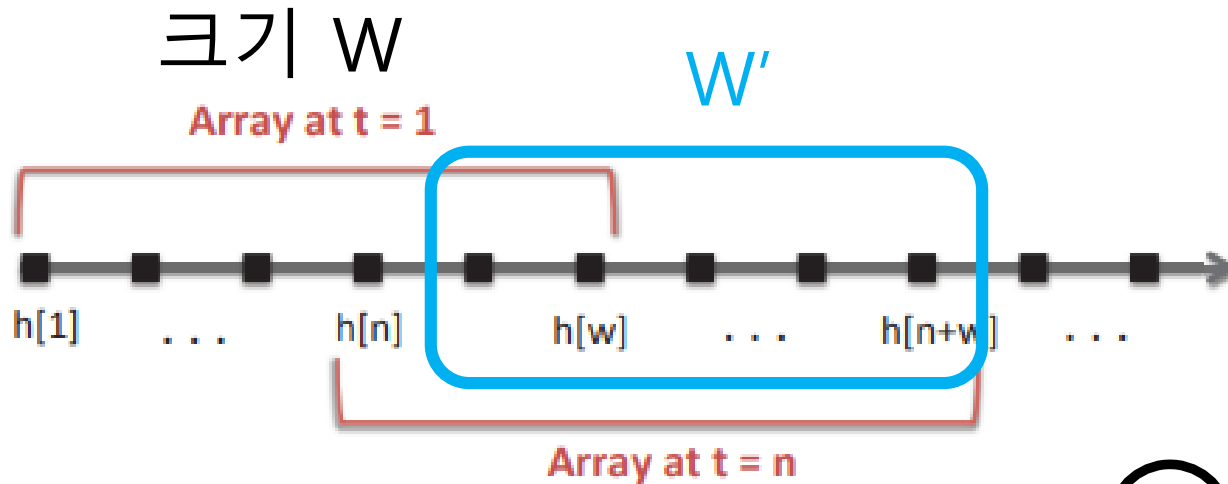
노이즈 고유벡터의 span

$$A[\theta, n] = \sum_{i=1}^w h[n+i] e^{j \frac{2\pi}{\lambda} i \Delta \sin \theta},$$

벡터의 norm(길이)

K = 노이즈 고유 벡터의 총 개수 => 사람 수

## 5.2 Tracking a multiple Human



①  $h = (h[n], \dots, h[n + w])$



$w' < w$  크기의 sub array로 분할



## 5.2 Tracking a multiple Human

- ② 분할된 sub array 각각을 크기  $w' \times w'$ 의 상관행렬  $R[n]$  계산

$$R[n] = E[\mathbf{h}\mathbf{h}^H],$$

$H =$  켈레 전치,  $\rightarrow \mathbf{h}^H =$  켈레 전치 행렬  
= 에르미트 행렬  
(Hermitian Matrix)

- ③ 서로 다른 상관행렬을 합산해 결합

전치행렬 = 행과 열을 교환해 얻는 행렬  
켈레 복소수 = 복소수의 부호 반대

## 5.2 Tracking a multiple Human

### ④ 결합한 상관행렬 $R'[n]$ 을 고유 분해

고유 분해 =  $p \times p$  정방행렬  $A$ 에 대해  $A\mathbf{v} = \lambda\mathbf{v}$   
를 만족하는 0이 아닌 열벡터  $\mathbf{v}$ 를 고유벡터, 상수  $\lambda$ 를 고유값이라 함.

### ⑤ 고유 분해로 나온 고유 벡터 행렬 $U[n]$ 를 신호공간 $U_s[n]$ 와, 노이즈공간 $U_n[n]$ 으로 나눔

DC 고유 벡터와 사람 수 당 고유 벡터 발견

## 5.2 Tracking a multiple Human

- ⑥ 모든 방향  $\theta$ 를 null 공간(노이즈공간)에 투영하고 역을 취함

# Tracking Multiple Humans

smoothed MUSIC\* 알고리즘

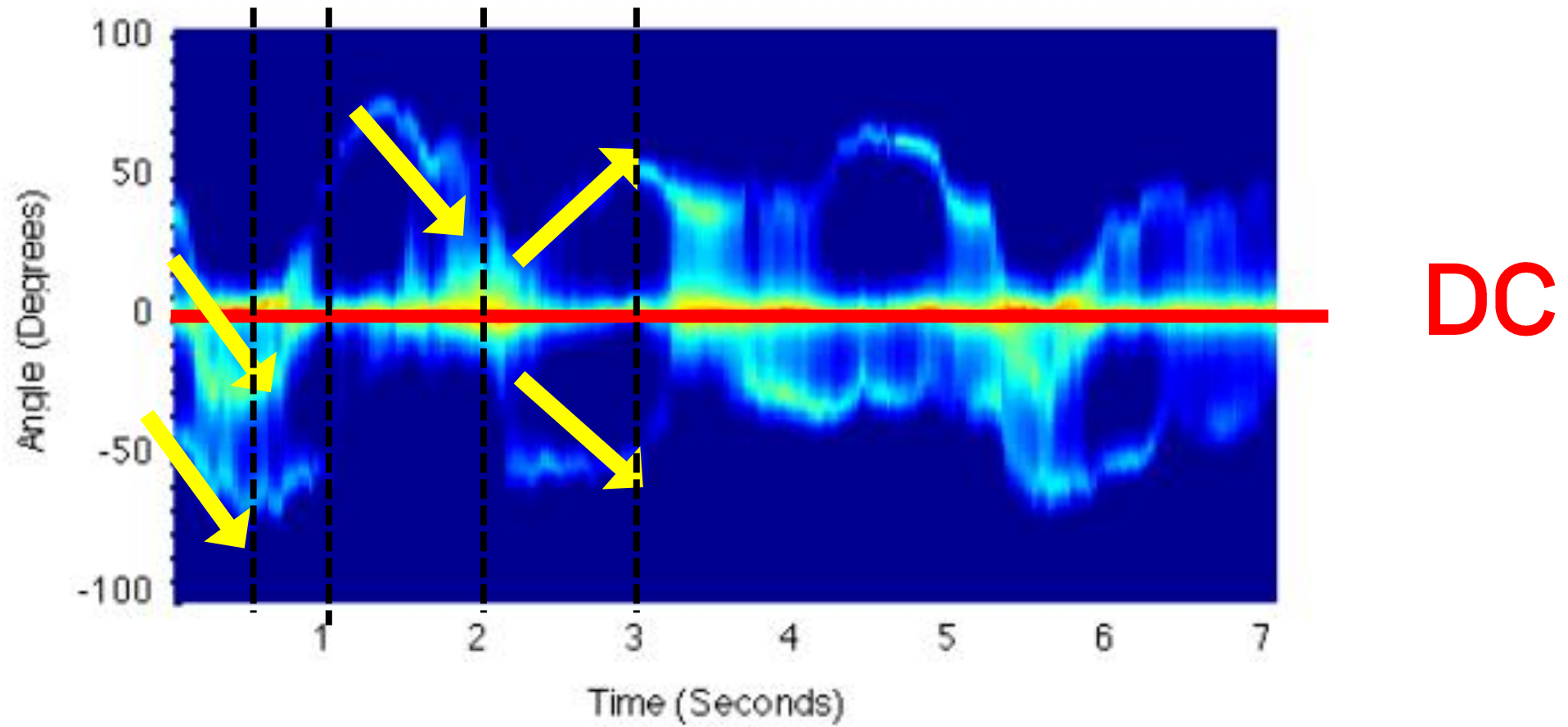
$$A'[\theta, n] = \frac{1}{\sum_{k=1}^K || \sum_{i=1}^w e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} i \Delta \sin \theta} U_N[n](i, k) ||^2}.$$

노이즈 고유벡터의 span

$$A[\theta, n] = \sum_{i=1}^w h[n+i] e^{j \frac{2\pi}{\lambda} i \Delta \sin \theta},$$

벡터의 norm(길이)

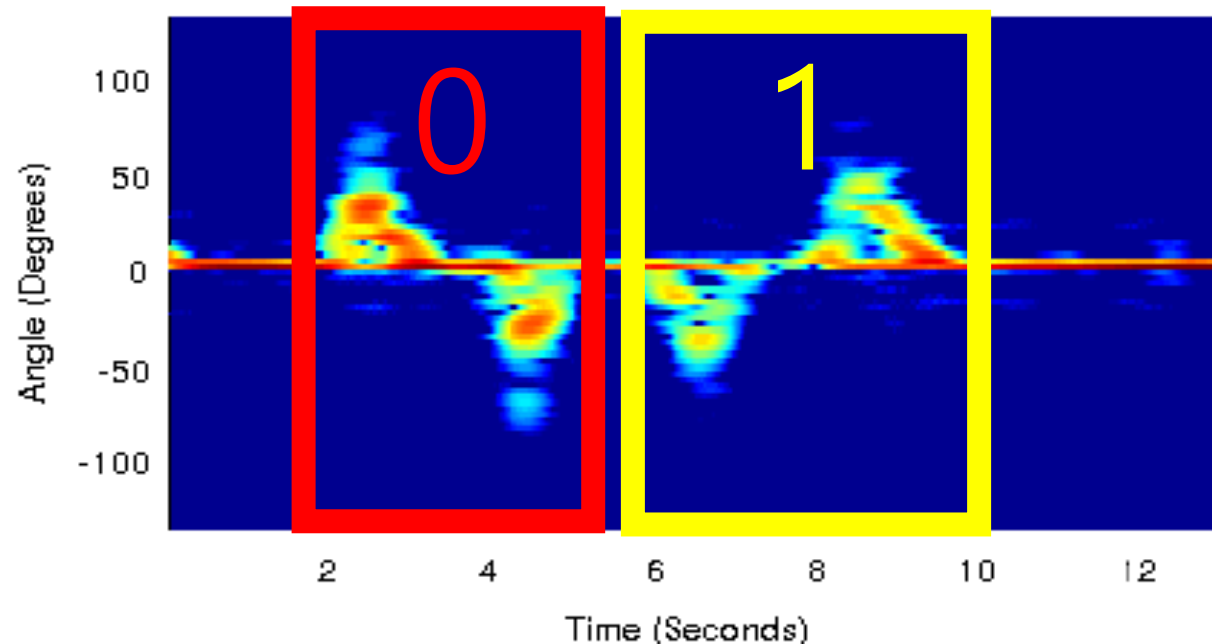
K = 노이즈 고유 벡터의 총 개수



**Figure 4—Wi-Vi tracks the motion of two humans.** The figure shows how the presence of two humans translates into two curved lines whose angles vary in time, and one straight line which corresponds to the DC.

## 6. THROUGH-WALL GESTURE-BASED COMMUNICATION:

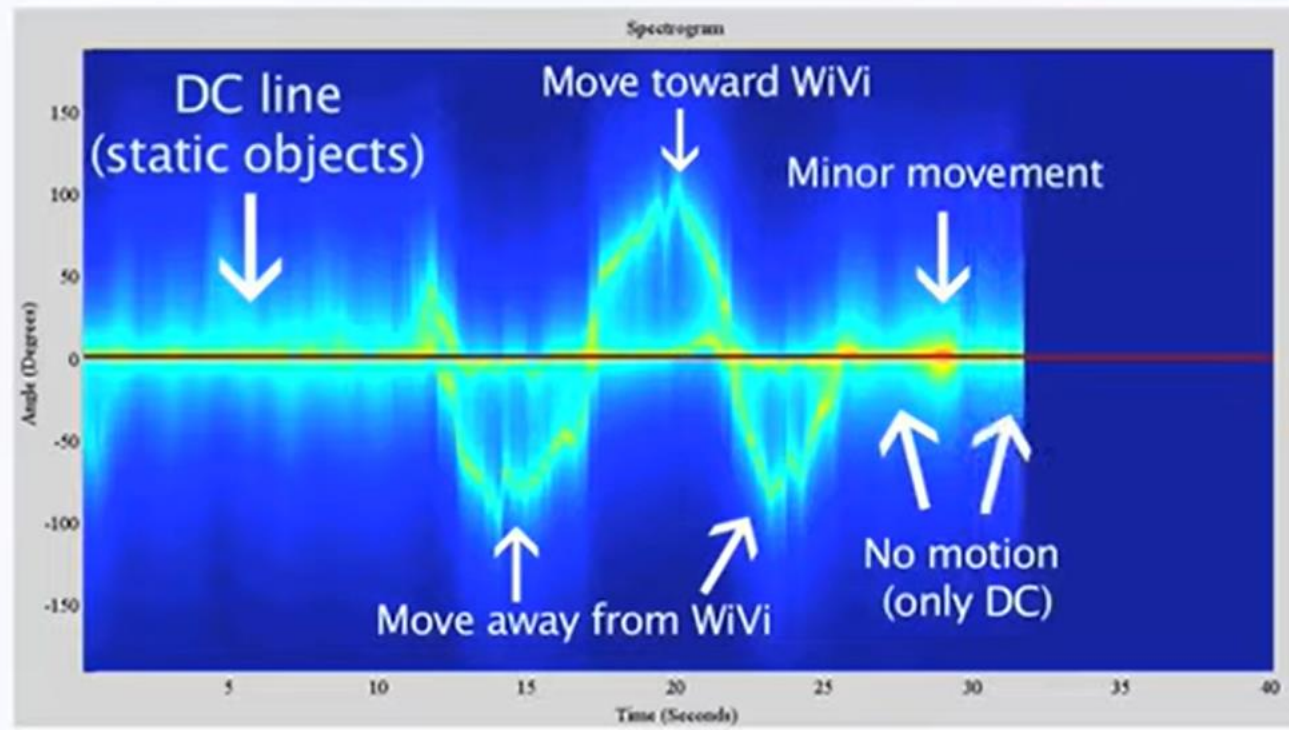
- Wi-Vi를 통해 움직이는 물체가 Wi-Vi로부터 가까워지고 있는지 멀어지고 있는지를 알 수 있는데, 그것을 이용해 간단한 제스처를 정의하여 메시지를 보내 통신할 수 있음.
  - 비트에 제스처를 매칭해서 확인할 수 있음
- 0비트는 하강 엣지(증가 후 감소), 1비트는 상승 엣지(감소 후 증가).



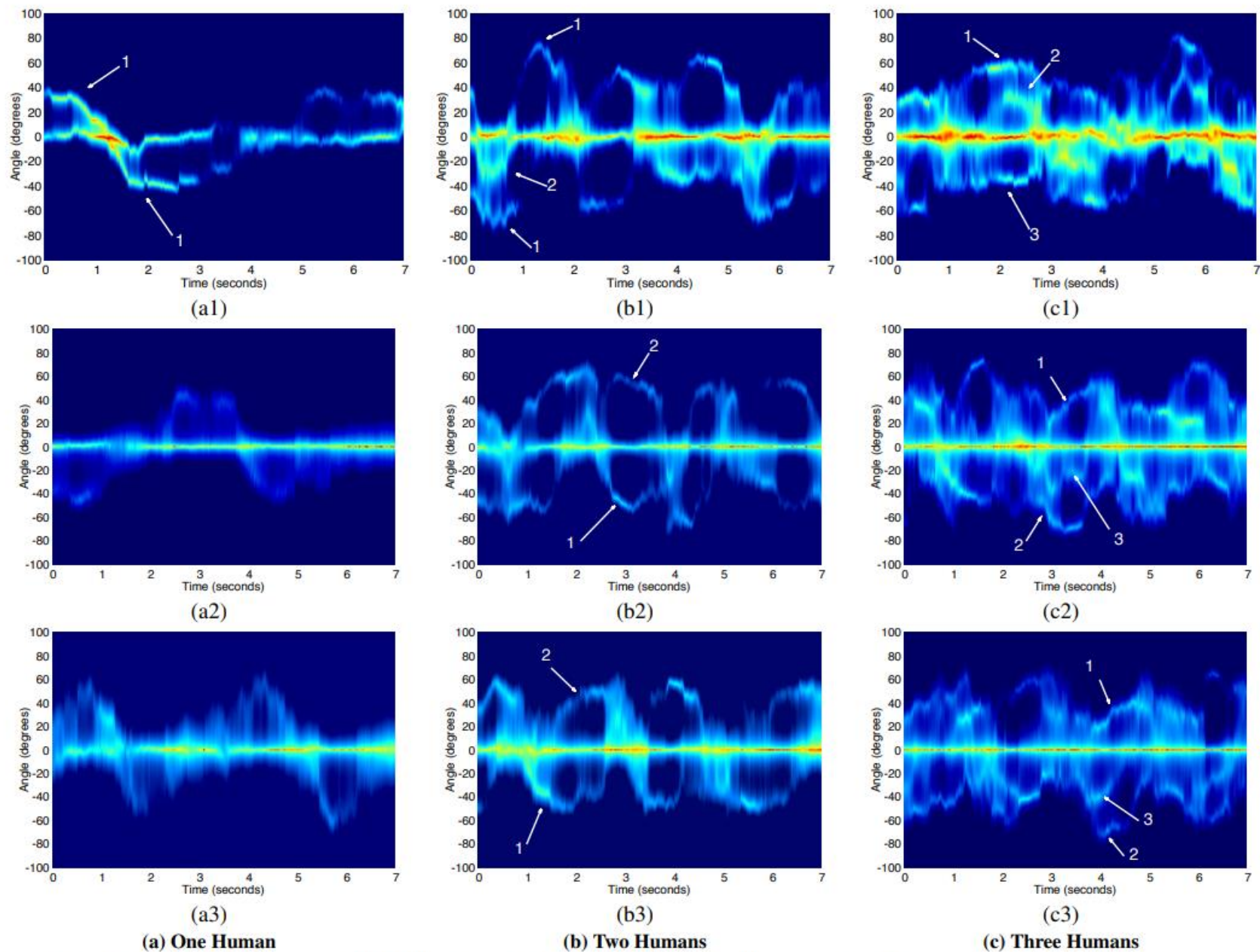
# 7. Implementation And Evaluation

- 실험 환경
- USRP N210 소프트웨어 라디오, LP0925 방향성 안테나사용  
MIMO 널링은 UHD 드라이버에 구현되어 실시간수행되며  
MATLAB으로 처리한다.
- MATLAB에는 SMOOTH MUSIC 알고리즘이 구현되어 있음.

## Wi-Vi: See through Walls with Wi-Fi signals







**Figure 8—Tracking human motion with Wi-Vi.** The figures show output traces with a different number of humans after processing with the smoothed MUSIC algorithm. They plot  $A'[\theta, n]$  where  $\theta$  is the angle in  $[-90, 90]$  is plotted on the y-axis and time is on the x-axis. (a) shows traces for one human; (b) for two humans; and (c) for three humans moving behind the wall of a closed room.

# 결론

Wi-Vi는 신호로 벽과 닫힌 공간내 동적물체를 감지하는 무선 기술임.  
게다가 군사용보다 훨씬 작은 장치로 수행해낼 수 있음.

# 최신 논문의 발전~ 연대기

RF-Capture: Capturing the Human Figure Through a Wall	Through wall Human pose estimation using radio signals	RF-Based 3D Skeletons	Through-Wall Human Mesh Recovery Using Radio Signals	Making the Invisible Visible: Action Recognition Through Walls and Occlusions
2015	2018	2018	2019	2019
Fadel Adib / wivi 논문 저자	Mingmin Zhao	Mingmin Zhao	Mingmin Zhao	Mingmin Zhao
code&data 보유	RF-Pose	RF-Pose3D	RF-Avatar	RF-Action
개인 heatmap으로 모션 구분, 사람 구분	skeleton machine running		modeling	motion learning skeleton!!
Too old!!!	2D	3D	3D	2D
RF-capture	레이블이 없는 데이터 cross-modal supervision 무선 센서에 웹카메라 부착해 무선 스트림과 시각 스트림을 동기화 바닐라 CNN 분류기로 사람구별	convolution neural network FMCW 라디오에서 캡처한 RF 신호 사용 1. CNN 활용 3D 골격 두개의 3D 컨볼루션 ⇒ 1개의 4D 컨볼루션 2. 사람의 구분을 위해 직접 학습하는 심층 신경망 RF신경망을 먼저 추상 도메인으로 변환 후 분리 3. 레이블이 지정된 예제를 위해 카메라로 2D 골격 수집, 키포인트 3D 맞춤	사람에게서 반사된 RF 신호를 기본 3D 바디에 사용에 연관성을 찾지 못함 ⇒ 기본 RF 반사 신호를 여러 스캔샷 → 다른 신체 부위의 정보 포함 → 판단 보류(선택적 초점이 가능한 multi-headed attention module) 모호함 해결을 위한 사람 움직임 사전 학습 (temporal adversarial training method)	multimodal 설계 기반. 스켈레톤을 중간 표현으로 RF, vision 데이터로 훈련 가능, 추가 감독 가능 스켈레톤에 신뢰도 점수 다중 제안 모듈로 여러사람이 다른 동작하는 것 인식  스켈레톤은 CNN 기반 접근 채택, 시공간 모듈과 동작 예측을 위한 다중 제안 모듈 도입 HCN 모델 확장

최근 논문에서 상용 Wi-Fi로  
신호를 분석 할 수 있다고 밝  
혀졌다.

# 향후 계획

라즈베리파이로 CSI(channel state information)  
를 측정하고 벽 뒤의 사람의 움직임을 측정할 것임