

경사 하강 기계학습 기법을 이용한 2D 실내 전파 방향 및 위치 측위 시스템

2D Indoor Direction and Location Finding System Based on Gradient Descent Machine Learning Algorithm

강혜원 · 문예림 · 박수민 · 김상길

Hyewon Kang · Yerim Mun · Soomin Park · Sangkil Kim

요 약

본 논문은 경사 하강 기계학습 알고리즘을 이용하여 실내에서 전파 도래 방향과 전파 발생 장치의 위치를 2차원 공간 상에서 탐지하는 안테나 시스템을 제안한다. 4개의 접힌 다이폴 안테나와 SP4T PIN 다이오드 스위치를 활용하여 안테나를 구성하였으며, SP4T 스위치는 아두이노 마이크로 컨트롤러의 디지털 출력핀 4개로 제어된다. 제안된 안테나는 USRP N200 SDR에 연결되어 LabView 플랫폼을 통해서 수신 무선 전력 신호의 크기를 측정하였으며, Matlab과 연동되어 경사 하강 기계학습 알고리즘에 따라서 2차원 실내 공간 안에서 전파의 입사 방향과 거리를 측정한다. 제안한 시스템의 정확도는 약 97 %로 측정되었다.

Abstract

In this paper, a 2D indoor direction and location finding system using a gradient descent machine learning algorithm is presented. The proposed antenna consists of four folded dipole antennas and an SP4T PIN diode switch. The SP4T switch was controlled by four digital output pins of the Arduino microcontroller. The antenna was connected to the USRP N200 SDR and controlled by the LabView platform. LabView transfers the magnitude of the received RF power to MATLAB to calculate the incident angle and distance of an electromagnetic wave source. The measured accuracy of the proposed 2D indoor direction and location finding system was approximately 97 %.

Key words: Direction Finding Antenna System, Folded Dipole Antenna Array, RF PIN Diode Switch, Machine Learning, Gradient Descent

I. 서 론

전파 입사 방향 탐지 및 전파원 위치 측위 기술을 군사 기술에 많이 사용되고 있으며, 근래에는 사물인터넷과 통신 기술에 응용되어 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 최근에는 휴대폰의 GPS와 무선통신 신호기 기술에도 적용

되어 MIMO(multiple-input multiple-output) 기반의 다중안테나 신호처리기술과 디지털 빔포밍을 응용하여 다양한 전파 방향 및 위치 측위 기술이 연구되고 있다^{[2],[3]}. 일반적으로 전파 방향 및 위치 측위를 하기 위해서 안테나를 회전시키거나 수신 신호의 위상 및 크기를 분석하는 등 다양한 방식이 개발되었다^{[4]~[6]}.

「본 연구는 2018학년도 부산대학교 교내학술연구비(신임교수연구정착금)에 의한 연구임.」

부산대학교 전자공학과 (Department of Electronics Engineering, Pusan National University)

· Manuscript received January 6, 2021 ; Revised January 22, 2021 ; Accepted February 10, 2021. (ID No. 20210106-002)

· Corresponding Author: Sangkil Kim (e-mail: ksangkil3@pusan.ac.kr)

실내 측위를 하기 위해 보고된 많은 기술들 중에서, 블루투스, WiFi, GPS 등의 무선 통신 시스템이 방출하는 전파의 RSSI를 이용한 삼각측위(triangulation)나 삼변측위(trilateration)가 많이 연구되었다^{[7],[8]}. 삼각측위나 삼변측위 알고리즘을 사용한다면, 위치 측위를 위해서 두 개 이상의 수신기를 지정하고 각각의 수신기에서 얻은 전파 정보를 삼각함수 기법을 활용하여 전파원의 위치를 추정하게 된다.

본 논문에서는 삼각측위법과 달리 하나의 수신기를 사용하여 전파원의 위치를 추정할 수 있는 시스템을 제안한다. 레이더와 같이 전파를 발신하여 돌아오는 전파를 분석하는 능동형 시스템이 아닌, 수동형 방향 및 위치 측위 방식을 제안하고 있다. 수동형 방향 및 위치 측위 시스템이기 때문에 낮은 전력을 소모하면서도 매우 적은 유지/보수비용으로 반영구적으로 사용이 가능하다. 전파의 입사각을 측정하기 위해서 회전하는 지향성 안테나 대신에, 순차적 스위칭 기법을 사용하여 기계적으로 회전하는 안테나 대신 전기적으로 제어가 가능한 평면형 안테나 시스템을 제안한다. 수동 시스템의 비교적 낮은 정확도를 개선하기 위해서 기계학습 기법을 도입하여 정확도를 획기적으로 높였다. 2D 전파 입사 방향 및 위치 측위 문제는 다중 선형 회귀 방식으로 접근할 수 있으며, 경사 하강(gradient descent) 알고리즘을 사용하여 실내 2D 방향 및 위치 측위 알고리즘을 설계하였다.

II. 2D 전파 방향 및 위치 측위 시스템 설계

2-1 제안하는 2D 전파 방향 및 위치 측위 시스템

본 논문에서 제안하는 2D 전파 방향 및 위치 측위 시스템의 블록도는 그림 1(a)에 나타나 있다. 평면형 지향성 폴디드 다이폴 안테나 4개를 그림 1(b)와 같이 서로 직교하게 배치하였으며, 각각의 안테나는 SP4T(single-pole 4-throw) PIN 다이오드 스위치에 의해서 제어된다. SP4T PIN 다이오드 스위치는 아두이노(Arduino) 마이크로컨트롤러 디지털 핀 4개에 의해서 제어되며, 순차적으로 Ant 1~Ant4가 한 번에 하나씩 USRP(universal software radio peripheral) N200 SDR(software defined radio)에 연결되어 전파를 수신하도록 하였다. SDR은 수신 전력의 크기를

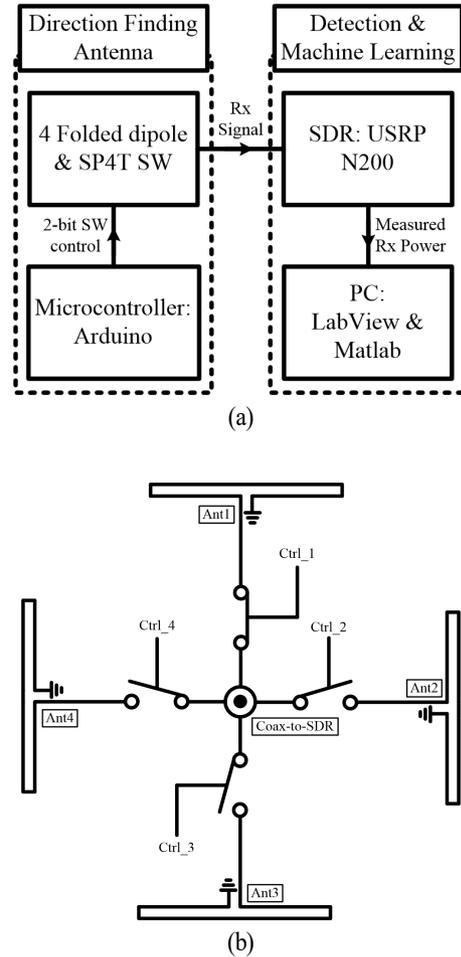
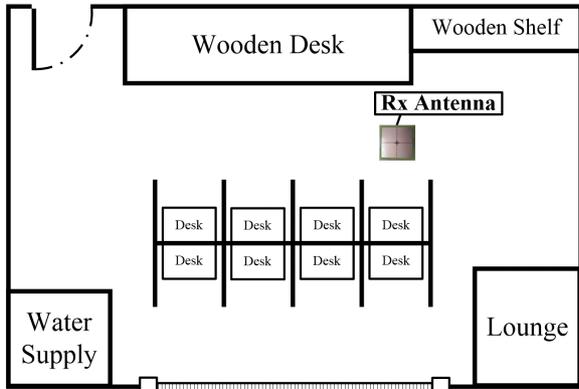


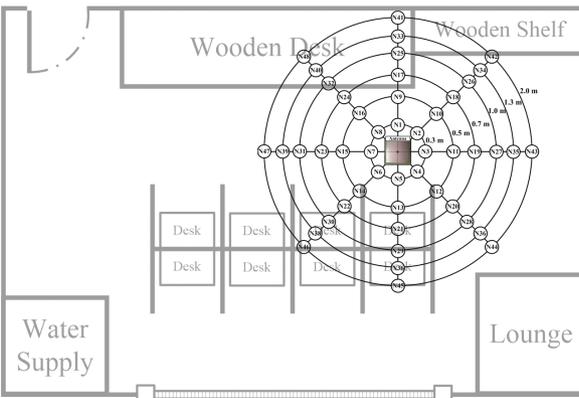
그림 1. (a) 제안하는 전파 방향 및 위치 탐지 안테나 시스템 및 (b) 안테나 구조도
 Fig. 1. (a) Proposed direction and location finding antenna system and (b) structure of the antenna.

PC로 전송하며, National Instrument사의 LabView 플랫폼을 활용하여 수신된 무선 전력 스펙트럼의 크기를 기록했다. LabView 플랫폼을 통해서 USRP N200을 제어했으며, 샘플링율은 1 MS/s 설정했다. 수신 신호는 LabView 플랫폼을 이용하여 실시간으로 고속푸리에변환(fast Fourier transform, FFT)되어 수신 신호의 스펙트럼을 주파수 영역에서 관측하였다. Ant1~Ant4에서 수신된 신호의 크기를 Mathworks사의 Matlab을 활용하여 1x4 배열에 저장하고, 이를 기계학습 알고리즘 구축을 위한 학습 자료로(learning dataset) 사용했다.

그림 2는 전파 방향 및 위치 측위를 위해 수집된 학습



(a)



(b)

그림 2. (a) 무선 데이터 수집 실내 환경 및 (b) 경사 하강 기계 학습 데이터 수집 지점

Fig. 2. (a) Indoor environment for wireless data collection and (b) data collection points for gradient descent algorithm learning.

자료를 극좌표 위에서 도식적으로 보여준다. 학습 데이터는 그림 2(a)와 같이 책상과 칸막이와 같은 장애물이 있는 철근 콘크리트 구조물의 실내 사무실 환경에서 측정하였으며, 그림 2(b)는 실측이 이루어진 지점을 도식적으로 나타내고 있다. 전파원(RF source)은 TI(Texas instruments)사의 CC2652를 사용하여 Zigbee 신호를 2.4 GHz에서 0 dBm의 RF 전력을 연속적으로 송출하도록 설정하였다. Zigbee 신호는 IEEE 802.15.4-2006 표준에 따라 생성되었고 Channel-11(2405 MHz)을 사용했다. 송출 Zigbee 신호는 OQPSK(offset quadrature phase shift keying) 변조를 사용하였으며, 데이터 전송속도는 250 kbps였다. 반경 2 m

의 원형 2D 공간에서 노드1(N1)부터 노드48(N48)까지 45° 간격으로 총 48개의 지점으로 나누었으며, 기계학습을 위해 수집된 학습 자료는 Matlab상에서 48×4 배열에 저장되었다. 저장된 학습 자료를 이용하여 경사 하강 기계학습 알고리즘을 활용하여 2D 공간상에서 임의의 지점에서 각각의 안테나에서 관측될 수신 신호 스펙트럼의 크기를 예측할 수 있는 알고리즘을 구축하였으며, 이를 바탕으로 한 번 학습된 공간에서는 실시간으로 전파 방향 및 거리를 측정할 수 있다.

2-2 안테나 설계

본 논문에서 제안하는 2D 전파 방향 및 위치 측위 시스템에 사용된 안테나 및 스위치의 자세한 구조는 그림 3에 나타나 있다. 비교적 높은 지향성과 입력 임피던스(Z_m)로 인해서 주변 환경에 둔감하면서도 평면형으로 구현이 용이한 접힌 다이폴 안테나를 FR4 PCB($\epsilon_r=4.4$, loss tangent=0.025)공정을 이용하여 설계하였다. 별도의 발룬(Balun)을 사용하지 않고, 안테나의 한쪽 끝은 접지(short-circuit)시키고 G_1 과 D_1 을 조절하여 원하는 주파수 대역인 2.4~2.5 GHz 대역에서 차동 모드로 동작할 수 있도록 설계하였다. 설계된 접힌 다이폴 안테나의 길이는 45 mm이며, SP4T PIN diode 스위치와 통합된 전체 안테나의 크기는 150×150 mm²이다. 자세한 안테나 설계 변수의 값은 표 1에 정리되어 있다. 제작된 접힌 다이폴 안테나의 반사 계수(S_{11})는 그림 4에서 보여주고 있다. 안테나의 반사 계수는 무반향실에서 측정되었다. 모의실험과 측정값이 잘 일치하며, 목표 주파수 대역인 2.4~2.5 GHz 대역에서 잘 동작하고 있음을 볼 수 있다.

그림 3(c)는 제안한 안테나의 중심 부위를 나타내고 있으며, 동축 SMA(surface mounting adapter)의 신호선(signal line)을 SP4T 스위치에 연결하기 위한 지름 1.0 mm (D_3) 구멍이 뚫려 있다. SP4T는 SPST(single-pole single-throw) PIN 다이오드 스위치 4개가 병렬로 연결되어 있는 형태이며, 4개의 바이어스 전압($V_1 \sim V_4$)에 의해서 제어된다. On-상태일 때 제안된 PIN 다이오드 스위치에 인가된 바이어스 전압은 1.0 V이며, Off-상태일 때는 바이어스 전압을 0 V로 설정하였다. RF 신호와 직류 신호를 분리하기

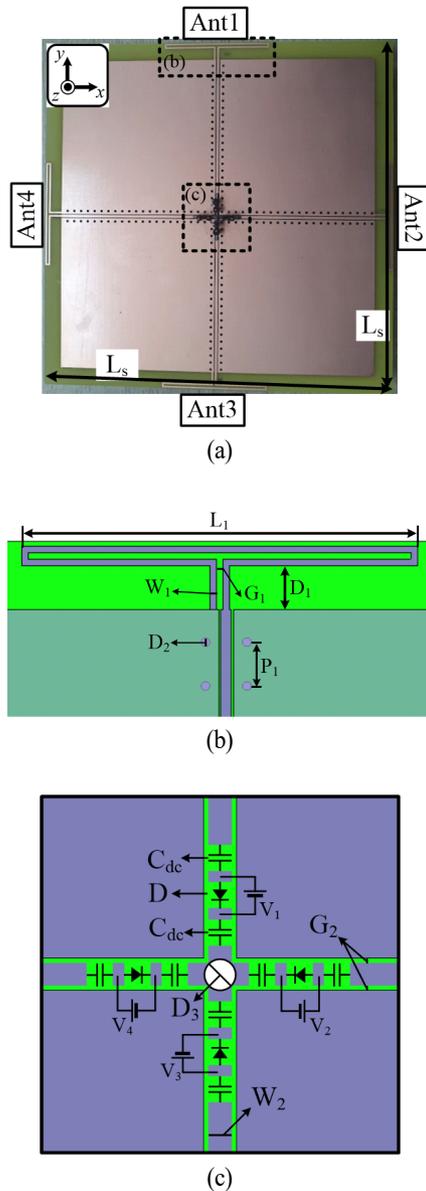


그림 3. (a) 제작된 방향 및 위치 측위 안테나, (b) 접힌 다이폴 안테나 및 (c) SP4T PIN 다이오드 스위치
 Fig. 3. (a) Fabricated direction and location finding antenna, (b) folded dipole antenna, and (c) SP4T PIN diode switch.

표 1. 안테나 설계 변수 (mm)
 Table 1. Antenna design parameters in mm.

L_s	150	L_1	45	W_1	0.75	W_2	1.2
G_1	0.75	G_2	0.25	D_1	5.0	D_2	1.0
D_3	1.0	P_1	5.0	D	BAR64-02V	C_{dc}	7.0pF

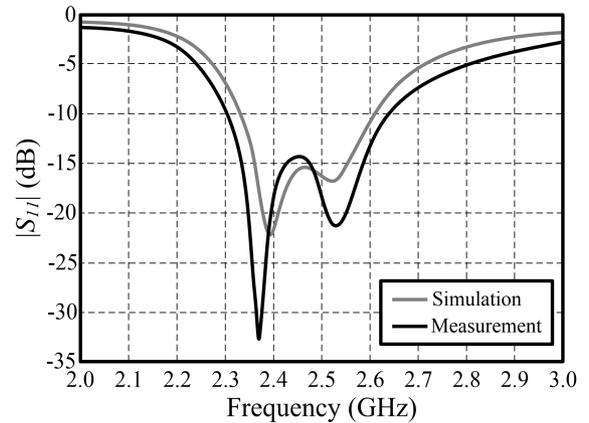


그림 4. 단일 접힌 다이폴 안테나의 $|S_{11}|$ 측정
 Fig. 4. Measured $|S_{11}|$ of a single folded dipole antenna.

위해서 C_{dc} 를 PIN 다이오드 양단에 배치하였다. 본 연구에서 사용한 PIN 다이오드는 Infineon사의 BAR64-02V를 사용하였다. PIN 다이오드의 On-/Off-상태일 때의 등가회로 모델은 그림 5에서 보여주고 있다. On-상태일 때는 다이오드 양단 전압차가 1.0V이며, 이때의 각 LC 소자의 값은 $L_p=0.6$ nH, $R_f=2.1$ Ω 이다. Off-상태일 때는 다이오드 양단 전압차가 0V이며, 이때의 각 RLC 소자의 값은 $R_f=3.014$ k Ω , $L_p=5.5$ nH, $C_r=148$ fF이다. On-상태일 때, 적정 전류인 10 mA가 PIN 다이오드에 흐르게 하기 위해서 100 Ω 의 저항을 연결하였다.

제안한 PIN 다이오드 스위치와 접힌 다이폴 안테나를 제작하여 반사 계수를 측정하였으며, 측정된 반사 계수는 그림 6에서 보여주고 있다. PIN diode 스위치를 켜고 꺼었을 때 약 12 dB의 반사계수 차이가 생기는 것을 볼 수 있었다. 안테나가 동작할 때, 안테나 이득 모의실험 패턴은 그림 7에 나타나 있다. 계산된 안테나 이득값은 4.8

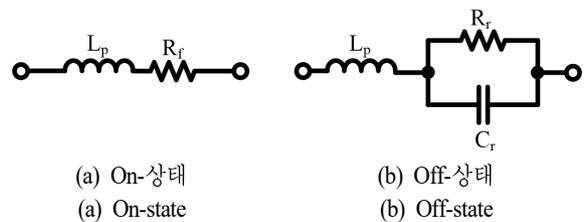


그림 5. PIN 다이오드 스위치 등가회로
 Fig. 5. Equivalent circuit of a PIN diode.

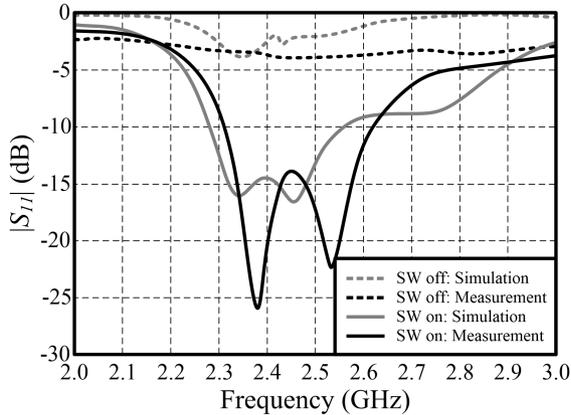


그림 6. 제안한 방향 및 위치 측위 안테나의 $|S_{11}|$ 측정: 안테나 & PIN 다이오드 스위치

Fig. 6. Measured $|S_{11}|$ of the proposed direction and location finding antenna: Antenna & PIN diode SW.

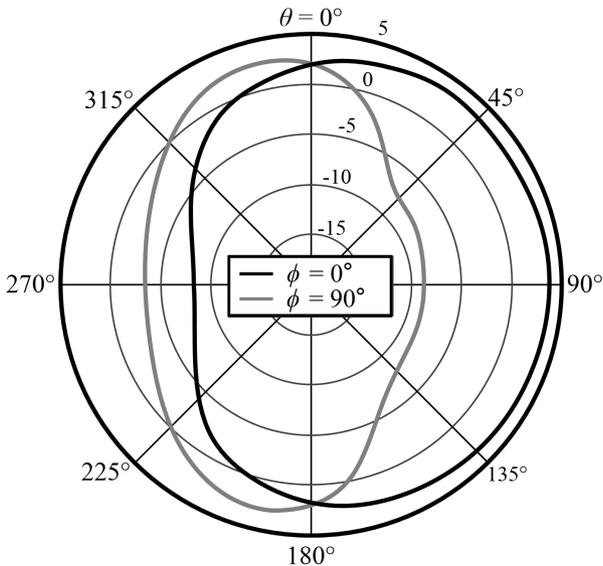


그림 7. 제안하는 방향 탐지 및 위치 측위 안테나 방사 패턴 모의실험

Fig. 7. Simulated radiation patterns of the proposed direction and location finding antenna.

dB이며, 지향성 방사 패턴을 가지는 것을 볼 수 있다.

제작된 안테나와 스위치 그리고 제어부를 연결하여 그림 8과 같이 2D 실내 방향 및 위치 측위 시스템을 구성하였다. 아두이노 디지털 핀은 SP4T 스위치가 On-상태일

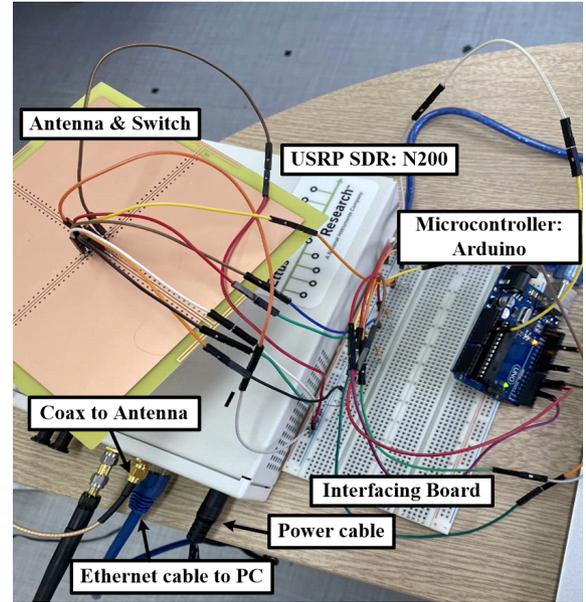


그림 8. 제안한 방향 및 위치 측위 안테나 시스템.

Fig. 8. Proposed direction and location finding antenna system.

때 5.0 V 출력 전압을 가지기 때문에, SP4T PIN 다이오드 스위치와 마이크로컨트롤러 사이에 저항기를 가진 인터페이스 보드(interfacing board)를 연결하여 PIN 다이오드에 흐르는 전류와 전압을 각각 10 mA와 1.0 V가 되도록 조절하였다.

2.3 경사 하강 기계학습 알고리즘

본 논문에서는 경사 하강 기계학습 알고리즘을 통해서 수집한 학습 자료를 이용하여 2D 전파 방향 및 위치 측위 시스템을 설계하였다. 전파 방향 및 위치 측위는 전파의 입사각(arrival angle), 수신 전력(Rx power), 수신 신호의 위상(phase) 등 다변수 함수의 최적화 문제로 생각할 수 있다. 다변수 함수의 최적화 문제의 경우 다중 선형 회귀(multiple linear regression) 방식을 사용하면 비교적 쉽게 원하는 최적의 값을 찾거나 예측할 수 있다.

본 연구에서는 다변수 함수에 대해서 임의의 가설함수를 $h_w(x)$ 로 정의하고, 경사 하강 알고리즘을 사용하여 수집된 학습 자료를 바탕으로 최적의 선형 회귀 모형(linear regression model)을 찾는다. n 개의 변수에 대한 가설함수

는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$h_W(x) = W_0 + W_1x_1 + W_2x_2 + \dots + W_nx_n \quad (1)$$

가설함수를 이용하여 예측한 식의 결과와 실제 데이터 (학습 자료)와의 차이를 비용 함수(cost function)를 정의 하여 정량화하였다. 비용 함수 $J(W_0, W_1, \dots, W_n)$ 는 평균 제곱근 오차(root mean square error)를 이용하여 식 (2)와 같이 정의하였다.

$$J(W_0, W_1, \dots, W_n) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (h_W(x^{(i)}) - y^{(i)})^2 \quad (2)$$

여기서 m 은 학습 자료의 개수이고, y 는 학습 자료 값이다. 비용 함수를 반복적으로 계산하여 최소값이 되도록 W_0, W_1, \dots, W_n 값을 찾아주었다. 비용 함수의 최소값을 찾기 위한 학습률(learning rate) α 를 가지는 경사 하강 알고리즘은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{cases} W_0 := W_0 - \alpha \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (h_W(x_0^{(i)}) - y^{(i)})x_0^{(i)} \\ W_1 := W_1 - \alpha \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (h_W(x_1^{(i)}) - y^{(i)})x_1^{(i)} \\ \vdots \\ W_n := W_n - \alpha \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (h_W(x_n^{(i)}) - y^{(i)})x_n^{(i)} \end{cases} \quad (3)$$

본 연구에서 제안하는 2D 전파 방향 및 위치 측위 시스템에서 입력 변수는 Ant1~Ant4에서 검출되는 수신된 스펙트럼의 크기($n=4$)가 되며 x_n 에 저장된다. 학습 자료는 48개의 지점에서 얻은 실측 자료($m=48$)가 되며, 정확한 거리와 각도는 y 에 저장된다. 본 연구에서는 학습률을 0.1로 설정하였다. 이때 사용한 Matlab 경사하강 기계학습 코드는 그림 9에 나타나 있다.

III. 측정 결과

본 연구에서 제안한 2D 실내 전파 방향 및 위치 측위 시스템을 이용하여 임의의 지점에 전파원을 놓고 방향과 위치를 측정하였다. 측정 결과는 그림 10에서 극좌표상에 나타내었다. 제안한 전파 방향 및 위치 측위 시스템을 측정 평면의 가운데 위치시키고, 총 11곳의 위치 (●)에서 CC2652RB를 이용하여 전파를 발생시켰다. 이때 방출된

```
//Multivariable cost function
function J = computeCostMulti(X, y, theta)
m = length(y);
J = 0;
prediction = X*theta;
J = (0.5*m)*(prediction-y).*(prediction-y);
end

//Multivariable gradient descent Matlab function
function [theta, J_his] = gradientDescentMulti(X, y, theta, alpha, num_iters)
m = length(y);
J_his = zeros(num_iters,1);
sumError = zeros(length(theta),1);
for iter = 1:num_iters
prediction = X*theta;
for i=1:length(theta)
sumError(i) = sum((prediction-y).*X(:,i));
end
theta = theta-(alpha/m)*sumError;
J_his = computeCostMulti(X,y,theta);
end
end
```

그림 9. 본 논문에서 사용한 경사하강 알고리즘 Matlab 함수
 Fig. 9. Used Matlab code of the gradient descent algorithm in this work.

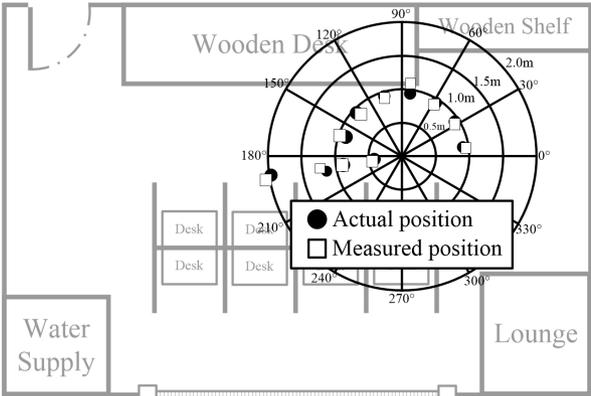


그림 10. 실내 환경에서 전파원의 실제 위치와 측정된 위치 비교
 Fig. 10. Comparison of actual and measured locations of an EM wave source in the indoor environment.

전파는 수평 선형 편파를 가졌으며, 송신 전력은 0 dBm 이었다. 제안한 수신 안테나는 SP4T 스위치를 통해서 1 초씩 SDR과 연결되었으며, 4개의 안테나 모두를 통해서 신호를 수신한 후에 4초에 한 번씩 전파원의 위치를 예측했다. 구축된 경사 하강 기계학습 알고리즘을 통해서 예측된 위치 (□)는 매우 높은 정확도로 실제 위치와 방향을 특정지을 수 있었다. 표 2에는 실제값과 예측값이 정

표 2. 실험 결과

Table 2. Experimental results.

Actual value		Measurement		Error	
Distance [m]	Angle [deg]	Distance [m]	Angle [deg]	Distance [m]	Angle [deg]
0.395	188.6	0.404	189.4	0.0107	0.86
0.925	6.1	0.93	5.3	0.0148	0.80
0.956	32.9	0.946	32.1	0.0166	0.16
0.934	57.9	0.924	57.7	0.0103	0.22
0.907	84.1	0.961	84.3	0.0541	0.34
0.935	110.1	0.922	110.4	0.0141	0.15
0.936	136.5	0.920	136.7	0.0162	0.00
0.909	162.9	0.960	162.9	0.0510	0.07
0.948	188.9	0.951	189.0	0.0032	0.83
1.185	189.7	1.269	189.8	0.0840	0.14
2.013	188.2	2.040	188.9	0.0383	0.77

리되어 있다. 실측된 오차 벡터의 크기는 최대 7.08 %, 최소 0.34 %로 측정되었고, 평균 2.85 %의 오차율을 가졌다.

IV. 결 론

본 논문에서는 경사 하강 기계학습 기법을 이용하여 2D 실내 전파 방향 및 위치 측위 시스템을 제안하였다. 제안한 시스템에 사용된 안테나는 4개의 접힌 다이폴 안테나를 사용하였고, SP4T PIN 다이오드 스위치를 이용하여 순차적으로 동작시켰다. SP4T 스위치는 아두이노 디지털 출력 2개를 이용하여 제어하였다. 설계된 안테나는 SDR USRP N200에 연결되어 LabView 플랫폼을 통해서 제어되었다. LabView를 통해 수집된 1×4 수신 전력이 기록된 배열은 Matlab으로 전달되어 구축된 경사 하강 기계학습 알고리즘에 기반하여 전파 도래 방향과 위치를 계산하였다. 제안한 시스템의 측정된 정확도는 약 97 %였다. 본 논문에서 제시한 위치측위 범위를 2차원에서 3차원으로 확장하기 위해서는 제안한 안테나의 위/아래에 패치 안테나와 같은 지향성 안테나를 추가로 설치하고, 6개의 입력 변수에 대한 경사하강 학습을 다시 거쳐야 한다. 본 논문에서 제안한 2D 실내 전파 방향 및 위치 측위 시스템은 군사 및 실내용 사물인터넷 분야에 널리 사용될

수 있으며, 범용성이 높아서 많은 응용 분야에 적용될 수 있을 것으로 예상된다.

References

- [1] B. J. Jang, "Direction finding technology: Tutorial, review, and research prospects," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 8, pp. 607-617, Aug. 2019.
- [2] X. Wang, Y. Xiong, and W. Huang, "An accurate direction finding scheme using virtual antenna array via smartphones," *Sensors*, vol. 16, no. 11, pp. 1-22, Oct. 2016.
- [3] W. Huang, Y. Xiong, X. Y. Li, H. Lin, X. Mao, and P. Yang, et al., "Swadloon: Direction finding and indoor localization using acoustic signal by shaking smartphones," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 14, no. 10, pp. 2145-2157, Oct. 2015.
- [4] S. Lee, H. Yoon, H. Choo, and B. J. Jang, "Implementation of real-time direction finding system using time-modulated array with two antenna elements and one USRP," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 4, pp. 347-350, Apr. 2017.
- [5] M. H. Chae, "Accuracy analysis of 2-D direction finding based on phase comparison," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 8, pp. 653-660, Aug. 2017.
- [6] J. Kim, H. Ryu, Y. J. Park, and B. Lee, "Design and fabrication of ultrawideband spinning direction finding antenna for airborne applications," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 4, pp. 320-323, Apr. 2018.
- [7] Y. S. Cho, S. Y. Cho, B. D. Kim, S. H. Lee, J. C. Kim, and W. S. Choi, "Technical trend of indoor/outdoor seamless positioning," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 22, no. 3, pp. 20-28, Jun. 2007.
- [8] B. Lee, S. Kim, "A study on self-localization of home

wellness robot using collaboration of trilateration and triangulation," *Journal of Institute of Korean Electrical*

and Electronics Engineers, vol. 18, no. 1, pp. 57-63, Mar. 2014.

강혜원 [부산대학교/학부생]

<https://orcid.org/0000-0002-6831-9451>



2021년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선통신시스템, 전파응용

박수민 [부산대학교/학부생]

<https://orcid.org/0000-0002-5855-4861>



2021년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선통신시스템, 전파응용

문예림 [부산대학교/학부생]

<https://orcid.org/0000-0002-4669-914X>



2021년 3월: 부산대학교 전자공학과 (공학사)
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선통신시스템, 전파응용

김상길 [부산대학교/조교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1720-2410>



2010년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
2011년 12월: 조지아공과대학 전자공학과 (공학석사)
2014년 12월: 조지아공과대학 전자공학과 (공학박사)
2015년 1월~2018년 2월: Qualcomm Inc.
2018년 3월~현재: 부산대학교 전자공학과 조교수
[주 관심분야] RF회로 및 시스템, 무선시스템, 전파응용