

논문 2019-56-11-10

이진 분류기법을 이용한 24 GHz 실외용 도플러 레이더 모듈

(24 GHz Doppler Radar Module Using Simple Binary Classification Technique for Outdoor Applications)

정 응 기^{**,} 김 충 환^{*}, 백 동 현^{***}(Woong-Ki Jung, Chung-Hwan Kim, and Donghyun Baek[©])

요 약

본 논문에서는 저가형 24GHz 도플러 레이더 모듈을 제작하였으며 실외에서 절전용 움직임 감지센서로 사용가능하도록 고안된 알고리즘을 적용하였다. 제안된 24GHz 도플러 레이더에 사용된 바이너리 분류 기법을 사용하여 주 감지대상인 보행자, 자전거, 자동차 등은 원하는 신호로 감지하면서 그 외의 외부환경에 의한 감지는 무시함으로써 오감지율을 줄였다. 제안된 알고리즘은 부수적으로 SNR을 개선하는 효과가 있어 감지대상에 대한 감지거리를 늘림으로서 실외 절전용 움직임 센서분야에 적용 할 수 있도록 하였다. 외부환경에 의한 오감지율이 충분히 작음을 확인하기 위해, 바람에 의하여 흔들리는 나뭇잎과 가로 등 주변에서 날아다니는 곤충에 의한 오감지율을 실험하여 검증하였다. 보행자 감지거리 테스트 결과, 최소 30m 이상의 감지거리를 확인하였다.

Abstract

24GHz doppler radar module has been fabricated for low-cost and an algorithm which can be used for the energy saving of outdoor lamps has been proposed. The proposed algorithm can differentiate targets such as pedestrians, moving bicycles and vehicles from false alarms caused by environments. By increasing SNR, detection range for targets can be increased and applied to outdoor power-saving motion sensors. In order to verify that false alarm rate by the external environment is small enough, false alarm rate has been tested against swaying trees by wind and flying insects nearby the radar. The detection range for the pedestrian has been found to be more than 30m.

Keywords : Doppler radar, Movement detection, 24 GHz, Outdoor

I. 서 론

최근, 여러 국가에서 스마트시티를 활발하게 건설하고 있다. 우리나라에서는 세종과 부산을 시범적인 스마

* 정회원, 우리로(Wooriro Co.,Ltd)

** 정회원, 중앙대학교 전자전기공학부

(Electrical and Electronic Engineering, Chung-Ang University)

*** 정회원-교신저자, 중앙대학교 전자전기공학부

(Electrical and Electronic Engineering, Chung-Ang University)

© Corresponding Author(E-mail : dhbaek@cau.ac.kr)

※ 이 성과는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2017R1D1A1B03035656).

Received : August 9, 2019

Revised : September 3, 2019

Accepted : October 28, 2019

트 시티로 선정하여, 2020년 완공을 목표로 진행 중이다. 그러한 이유로 스마트 라이팅(smart lighting), 스마트 모빌리티(smart mobility), 스마트 빌딩(smart building) 등의 어플리케이션에 필요한 다양한 센서가 주목 받고 있다^[1]. 이 중, 스마트 라이팅에는 움직임 감지센서가 필수적이다. 교통량의 실시간 감지나 보행자의 통행량이 적은 도로의 LED 가로등의 디밍(밝기) 조절 등의 에너지 절약을 위한 실외 사용 목적의 움직임 감지 센서가 필요하다. 과거에는 움직임 감지 센서의 사용분야가 실내에 국한되었는데, 주로 건물 내부의 에너지 절전 또는 출입문 제어를 목적으로 PIR센서와 도플러 센서 등이 사용되었다^[2~3]. 그러나 실외용으로 현재 실내에 사용되고 있는 PIR 센서나 도플러 레이더를 그대로 적용하기에는 문제가 있다. PIR 센서는 Fresnel

렌즈와 Pyroelectric sensor를 통해 주변의 온도 변화를 전류로 환원하여 움직임 대상을 감지하게 되는 원리는 가지고 있으며, 도플러 레이더에 비해 느린 반응속도를 가지며, 감지거리가 최대 10m 이기 때문에 스마트 라이팅에는 부적합하다. 또한 PIR과 기존의 도플러 레이더는 외부 환경에 의한 오동작이 빈번하게 발생하는 단점이 있다. 이러한 오동작을 극복하기 위해서 도플러 레이더에서는 모션 분류 기법이 사용된다. 주로 사용되는 모션 분류 기법은 마이크로 도플러 분석을 이용한 모션 분류 방식이다^[4-7].

마이크로 도플러 분석 방식은 단시간 푸리에 변환(Short Time Fourier Transform, STFT)을 사용하여 만들어지는 스펙트로그램(Spectrogram)을 활용하여, 감지대상에 대한 움직임 패턴을 피쳐(feature)로 추출한 후, 모션 판단 알고리즘을 거쳐 모션을 구분함으로써 외부환경에 의한 오감지를 줄일 수 있다. 하지만 마이크로 도플러 움직임 분류 기법은 분류를 다양하게 할수록 계산이 복잡해지므로 이를 실시간으로 구현하기 위해서는 하드웨어 비용이 증가할 수밖에 없다. 본 논문에서는 실외 응용분야에 적용 가능한 저가형 솔루션을 목적으로 비교적 계산이 간단한 최소의 움직임 판단 알고리즘을 적용하여, 실시간 감지가 가능하면서도 오감지율이 낮고 동시에 감지거리를 증가시키는 장점을 가진 저가형 24GHz 도플러 레이더를 제안하고자 한다.

본 논문에 제안된 실외용 도플러 레이더에 사용되는 주파수 대역과 관련하여, 10GHz 대역에 움직임 감지 전용 주파수 대역이 있으나 국내와 일본에서는 실내에서만 사용 가능하므로 실외용으로는 부적합하다. 실외 고정용으로 사용가능한 주파수 대역은 60GHz 대역이며, 대역폭이 4GHz으로 넓은 것이 장점이지만 매우 높은 주파수이므로 하드웨어 제작 단가가 상대적으로 고가인 것이 단점이다. 이외에도 자동차 전용으로 사용되는 76~79GHz 대역이 있다. 이 주파수 대역은 자동차 전용이므로 실외 고정형으로 사용할 수 없다. 반면에 24GHz 협대역은 실내와 실외의 이동형 및 고정형으로 모두 사용할 수 있고 유사 대역인 60GHz 대역보다 주파수가 낮으므로 하드웨어 단가가 저렴하기 때문에 저가형 해법에 가장 적합하다.

본 논문의 구성으로는 2장에서 도플러 레이더의 원리와 적용된 알고리즘의 원리를 설명하였고, 제 3장은 제작된 레이더의 하드웨어 부분과 측정결과를 보여주며, 4장은 결론 부분으로 구성되었다.

II. 도플러 레이더 원리 및 구성

1. 도플러 레이더 원리

도플러 방식은 레이더 중 동작 원리가 가장 단순하므로 하드웨어 구조도 가장 간단하여 저가형 해법으로 적합하다. 도플러 효과는 정지된 물체에 대한 반사 신호의 위상이 일정하지만 움직이는 물체에 대해서는 변화하고 있다는 일반적인 물리적 현상이다. 도플러 레이더의 동작원리는 송신된 마이크로파 신호가 물체에 반사되어 돌아올 때, 도플러 효과에 의해 주파수편이가 일어나게 되고, 반사되어 수신한 신호를 바탕으로 반사체의 움직임 방향과 상대적인 속도를 알 수 있다. 이때, 위상 변화는 대상의 반경 속도에 비례하므로 수신된 도플러 주파수 f_d 는 아래 식 (1)과 같이 정의된다.

$$f_d = (2 \times f_c \times V_r) / C \quad (1)$$

여기서 f_d 는 도플러 신호의 주파수를 나타내며, V_r 는 반사체의 속도, C 는 빛의 속도, f_c 는 캐리어 주파수를 나타낸다. 또한 가까워짐 또는 멀어짐으로 구분되는 반사체의 움직임 방향(또는 속도의 부호)은 속도의 부호로 표현된다. 속도의 부호를 알기 위해서는 쿼드 복조(Quadrature Demodulation) 방식의 수신기가 필요하다. 그림 1에 보인 것처럼, 쿼드 복조 수신기가 적용된 도플러 레이더를 통해 수신되는 도플러 신호는 I신호(In-phase Signal)과 Q신호(Quadrature-phase Signal)를 포함하여, 이로부터 반사체의 움직임 방향을 알 수 있다.

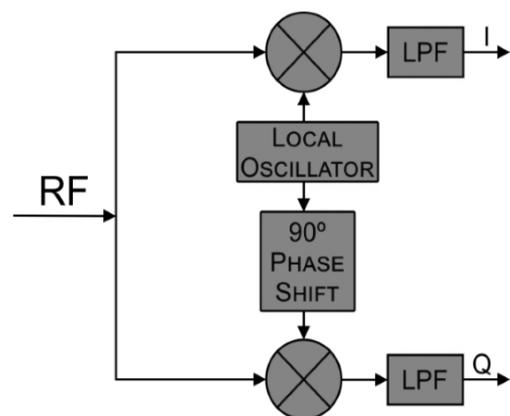


그림 1. 쿼드 복조 방식
Fig. 1. Quadrature Demodulation.

2. 도플러 레이더 적용 알고리즘

일반적으로 도플러 레이더를 이용하여 획득한 도플

러 신호로부터 물체의 움직임 종류를 구분하기 위한 분석방법으로 마이크로 도플러 분석 방식이 주로 사용된다. 마이크로 도플러 분석 방식은 시간에 따라 움직임 대상에 의해 발생하는 도플러 주파수의 시간적인 변화에 대한 분석을 통해 대상의 움직임을 판단하는 것을 말한다.

마이크로 도플러 방식은 짧은 시간의 윈도우를 설정하여, 윈도우 내의 수신된 아날로그 신호로부터 FFT(Fast Fourier Transform)^[8]를 수행하여 움직임에 대한 도플러 주파수를 산출한다. 이 과정에 의하여 추출된 신호를 패스트 타임(fast time) 신호라 한다. 이후 패스트 타임 신호를 시간에 따라 연속적이며 반복적으로 수행하는 경우 이를 슬로우 타임(slow time) 신호라 한다. 슬로우 타임 신호로부터 생성된 스펙트로그램(spectrogram)을 사용하여 움직임에 의한 마이크로 도플러 주파수가 변화하는 패턴을 추출할 수 있다. 하지만 마이크로 도플러 분석 방식은 앞에서 언급한 것과 같이 반사체의 움직임 종류를 판별하는데 있어 매우 효과적이지만 움직임의 패턴을 미세 분류하기 때문에 일반적으로 계산이 복잡하다는 문제가 있다. 또한 마이크로 도플러 분석 방법은 FFT를 한 번 수행하여 발생하는 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)의 개선 효과만 있으므로, 감지거리를 늘리기 위하여 SNR의 이득을 더 크게 해야 할 경우 더 이상의 방안이 없다. 일반적으로 감지거리를 늘릴 수 있는 방법 중 하나는 안테나의 이득을 늘리는 것이다. 그러나 이 방법은 안테나의 감지 각도가 줄어들므로 개선의 한계가 있다. 실외에 적용하기 위해서는 센서의 감지각도가 최소 좌우 60도, 상하 40도는 되어야 하므로 감지 각도를 이 정도로 유지한 상태에서 감지거리가 충분하지 않다면 안테나의 이득을 키워 감지거리를 늘리는 방식은 더 이상 유효하지 않다.

본 논문에 적용된 알고리즘은 센서의 움직임 감지 방식과 외부환경에 의한 오감지 문제를 단순화함으로써 간단한 알고리즘을 적용할 수 있도록 하였다. 즉 주 감지 대상인 보행자나 자전거, 자동차 등은 통상적으로 선형 운동을 하기 때문에 선형 운동과 비선형 운동을 구분할 수 있는 이진 분류 알고리즘을 사용하였다.

일반적으로 도플러 신호의 분석은 샘플링 시간마다 정해진 샘플링 개수까지 데이터를 측정 후, 그 데이터를 FFT하여 움직이는 물체의 속도를 감지하는 방식이다. 각 감지 과정은 FFT 변환을 통해 획득한 주파수 성분이 미리 설정된 기준치(Threshold)와 SNR의 마진

보다 크지를 판단하는 과정이다. 이때 사용되는 데이터를 FT-FFT(fast-time FFT) 데이터라 명한다. FT-FFT 과정을 연속으로 M번 반복하여, 얻은 데이터는 ST-FFT(slow-time FFT) 데이터라 한다.

그림 2는 일반적인 시간-도플러 그래프로 ST-FFT 과정을 통해 얻게 되는 감지 신호를 이용하여 생성한다. X축은 1에서 M번까지 수행한 ST-FFT 시간 인덱스이며, Y축은 각각의 FT-FFT 주 감지속도이다. 일반적으로 감지과정에서 사용되는 기준치는 일정 오경보율(Constant false alarm rate, CFAR)^[9] 방법 등에 의해 정해진다. 각 감지 과정에서 기준치 및 SNR 마진 보다 큰 주파수 성분을 가지는 도플러 신호가 감지되면, 대응되는 주파수 성분을 감지 신호로 출력한다. 그림 2의 움직임 a(Move a)는 직선운동을 하는 대상의 경우이며 움직임 b(Move b)는 주기적인 운동을 하는 대상에 의하여 생성된 시간-도플러 그래프 신호이다. 이를 통해 움직임의 종류를 판단하는 알고리즘을 사용하여, 움직임을 분류한다.

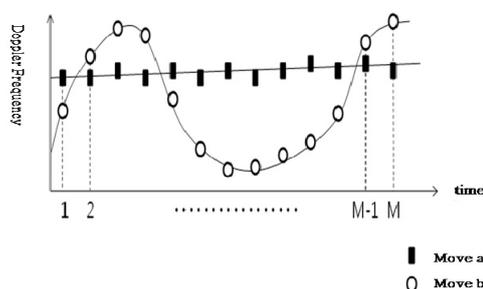


그림 2. 일반적인 시간-도플러 그래프
Fig. 2. Conventional Time-Doppler Graph.

그림 3은 본 논문에 제안된 방법을 사용하여 생성되는 시간-파워 그래프이며, 그림 3의 (a)는 직선 운동의 유무를 판정하기 위한 모델이며, (b)는 주기적인 운동의 유무를 판정하기 위한 모델이다. 그림 2와 마찬가지로 X축은 슬로우 타임이며, Y축의 데이터는 FT-FFT 데이터와 유사하게 보이지만 논문에 제안된 계산식을 통해 새롭게 생성되었다. 이 데이터에 대한 산출 과정은 다음과 같다.

움직임 방향 별로 두 개의 움직임 방향별 평균값을 산출하기 위해 아래 식 (2)와 (3)을 사용하여 j 번째 FT-FFT 측정 데이터에 대해 움직임 방향 별로 파워 평균값(P+(j), P-(j))을 산출 한다.

$$P_+(j) = \sum_{k=1:N/2-1} [20 \times \log_{10}(A_k)] \times 2 / (N-2) \quad (2)$$

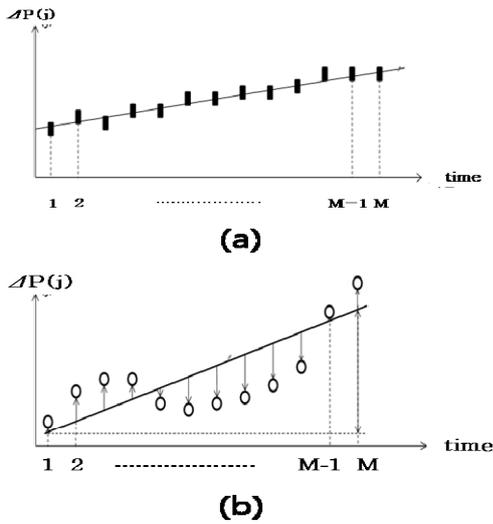


그림 3. 제안된 시간-파워 그래프
 (a) 직선 운동의 유무를 판정하기 위한 모델
 (b) 준주기적인 운동의 유무를 판정하기 위한 모델
 Fig. 3. Proposed Time-Power graph
 (a) Model for the determination of linear motion
 (b) Model for the determination of quasi-periodic motion

$$P_-(j) = \sum_{k=N/2+1:N-1} [20 \times \log_{10}(A_k)] \times 2 / (N-2) \quad (3)$$

여기서 N은 각 FFT 데이터의 샘플링 개수이며, Ak는 k번째 FFT신호의 진폭이며 k=1~N의 정수로서 패스트 타임(fast time) 인덱스이다. j=1~M의 범위를 가지며 FT-FFT의 연속적인 시간 인덱스이며, 슬로우 타임(Slow time)이다.

위 식 (2)는 레이더로부터 가까워지는 움직임 방향에 대한 파워의 로그 평균값을 나타내고, 식 (3)은 레이더로부터 멀어지는 움직임 방향의 파워의 로그 평균값을 나타낸다.

파워의 로그 평균값 (P+(j), P-(j))이 산출되면, 이를 통해 측정데이터의 최종 로그 파워 평균값(ΔP(j))의 차를 산출한다.

$$\Delta P(j) = P_+(j) - P_-(j) \quad (4)$$

위 식 (4)를 통해 슬로우 타임 시간마다 산출된 측정 데이터의 로그 파워 평균값을 이용하여, 움직임의 종류를 판정한다.

먼저 움직임 여부의 판정을 하기 위해, 연속적인 슬로우 타임 구간에 걸쳐 신호 처리된 측정 데이터의 로그 파워 차이 평균값(ΔP(j))을 계산한 뒤, 이를 시간 순서대로 배열하여 시간-파워 그래프를 생성한다. 그리고 시간-파워 그래프의 분석을 통해 반사체의 움직임 종류

를 판단할 수 있다. 그림 3(a)에서 보이는 것처럼 근사적인 직선 운동을 하는 반사체의 경우 대응하는 시간-파워 그래프가 근사적으로 직선에 가까운 형태를 보인다. 반면 근사적인 주기 운동을 하는 반사체의 경우, 그림 3(b)에서 보이는 것처럼 대응하는 시간-파워 그래프에서 주기성을 확인 할 수 있다. 직선 운동의 존재 유무를 판정하기 위해, 아래의 식 (5)을 이용하여 시간-파워 그래프를 통해 직선의 방정식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P(j) = a \times j + b, j = 1 \sim M \quad (5)$$

위 식 (5)에서, a는 직선식의 기울기이고, b는 직선식의 절편이며, j는 슬로우 타임 인덱스로 1에서 M까지의 정수로 나타낼 수 있다. 이후, 각 로그 파워 평균값(ΔP(j))의 차이 값에 대한 표준 편차 σy를 산출한다. 그리고 산출된 표준편차를 아래의 식 (6)에 대입하여 직선 운동의 존재 유무를 판정한다.

$$|a| / \sigma_y > TH \quad (6)$$

위 식 (6)에서 TH는 직선 운동의 존재 유무를 판정하기 위한 기준치로 실제 실험을 통하여 정해진다.

아래 그림 4는 제안된 알고리즘의 Block-diagram 이다.

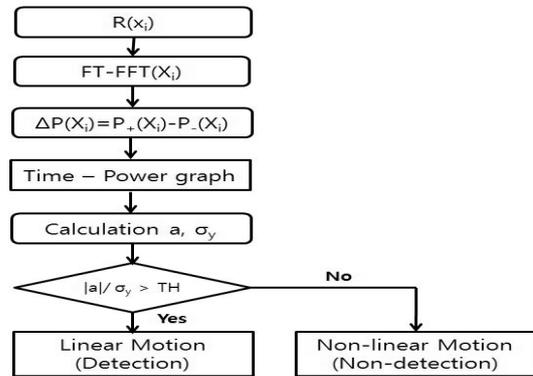


그림 4. 제안된 알고리즘의 Block-diagram
 Fig. 4. The block-diagram of the proposed algorithm.

본 논문에 제안된 알고리즘의 장점은 기존의 마이크로 도플러 분석 알고리즘에 비해 적은 연산으로 감지 대상의 선형 운동과 비선형 운동을 구분함으로써 오감지율을 개선하였고, 다수의 FFT 신호를 누적하여 계산함으로써 SNR을 높여, 센서의 감지거리 성능을 향상시키는 장점이 있다.

III. 하드웨어 구성과 실험결과

1. 도플러 레이더의 하드웨어 구성

본 논문에서 제안하는 도플러 레이더의 신호 발생 방식은 단일 톤 CW (Single-tone CW) 방식을 사용하며, 하드웨어 구성은 안테나부, RF부, 제어부로 구성되어 있다.

안테나부는 송수신부에는 동일한 성능의 1X3 패치 안테나를 사용하였다. 아래 그림 5는 수평 빔폭 측정 결과이며, 그림 6은 수직 빔폭 측정 결과이다. 측정결과를 참고 하였을 때, 안테나의 이득은 8dBi이며 -3dB 빔폭은 좌우 60도, 상하 40도이다.

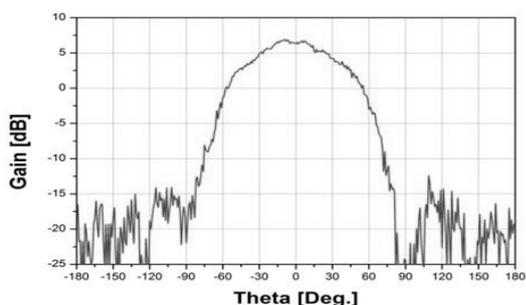


그림 5. 수평 빔폭 측정 결과
Fig. 5. The result of horizontal beamwidth measurement.

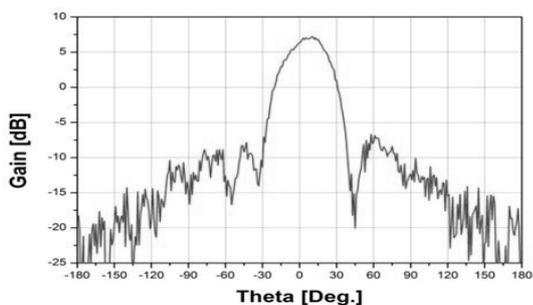


그림 6. 수직 빔폭 측정 결과
Fig. 6. The result of vertical beamwidth measurement.

RF 송신부는 신호 발생부(Signal generator)와 최종 증폭단인 전력증폭기(Power amplifier)로 구분된다. 저가액 솔루션을 위해 송신 주파수를 고정하기 위해 사용하는 PLL(Phase Locked Loop)은 사용하지 않았다. 신호발생부는 DSP(Digital Signal Process)에서 24GHz를 223 분주된 신호를 일정시간 동안 카운트하여 주파수를 계산하고 원하는 주파수와 차이만큼 12Bit DAC를 사용하여 주파수 제어 전압 신호를 생성하고 이를 RF 송신부의 VCO(Voltage Controlled Oscillator)의 주파수제

어 전압에 입력하여 원하는 송신 주파수를 생성하였다.

RF 수신부는 저잡음 증폭기(Low Noise Amplifier, LNA), 쿼드 복조기(Quadrature demodulator)와 IF증폭기로 이루어진다. 수신된 신호는 저잡음 증폭기에서 1차 증폭이 되고, 쿼드 복조기를 통해 I/Q 신호를 분리된다. 이후, 각각의 I/Q 신호는 IF증폭기를 통해 대역 통과필터로 원하는 신호대역을 제외한 나머지 주파수를 차단시키며, 신호의 크기를 40dB 증폭한다.

제어부는 신호와 데이터를 처리하는 부분으로 부동소수점 연산이 가능한 저가 DSP를 사용하였다. 적용된 DSP는 ST마이크로사의 STM32F303이다.

제어부는 크게 수신신호처리부와 데이터처리부로 나뉜다. 수신신호처리부(Signal Processing)는 RF부의 IF증폭기의 출력 신호를 받아 12bit ADC로 변환한 뒤 Windowing과 Zero-Padding을 거친다. 이후 FT-FFT를 수행하여 데이터를 주파수 영역으로 변환한다. 이로부터 움직임 신호를 감지한다. 데이터 처리부(Data processing)는 신호 처리된 데이터에 제안된 알고리즘을 적용하여 대상의 움직임을 판단한다. 이를 통해 감지대상과 오감지 대상을 분류하는 역할을 수행한다.

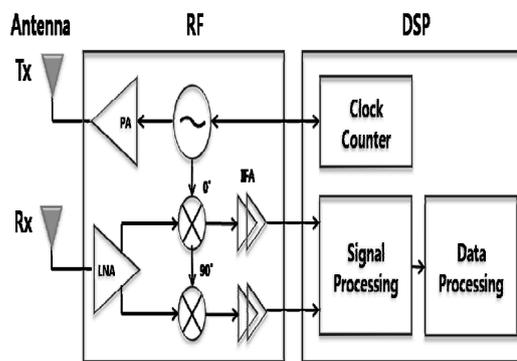


그림 7. 제작된 레이더의 블록도
Fig. 7. The block diagram of designed radar.

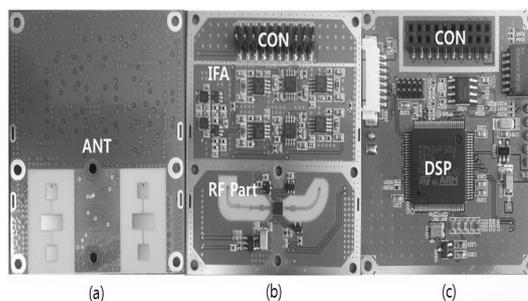


그림 8. 24GHz 도플러 레이더 (a) ANT 부, (b) RF 부, (c) 제어 부
Fig. 8. 24GHz Doppler Radar (a) ANT Part, (b) RF Part, (c) Control Part.

아래 그림 7은 제작된 24GHz 도플러 레이더의 블록도이며, 그림 8은 실제 모듈사진이다. 그림 8의 (a)는 ANT 부이며, (b)는 RF부, (c)는 제어부이다.

제작된 24GHz의 도플러 레이더의 제원은 아래 표 1과 같다.

표 1. 24GHz 도플러 레이더 제원
Table1. Specifications of 24GHz Doppler Radar.

Parameter	Specification
Operating Frequency	24.05~24.25GHz ISM
EIRP	15dBm max
Antenna FOV	60° x 40° Linear
Detection Velocity	0.2 m/s ~ 35 m/s
Data Update	0.5Hz / 10Hz
Size	50 x 45 x 10 mm ³
Supply voltage	+5 VDC
Power Consumption	1.0W

2. 실험 결과

본 논문에 제안된 알고리즘을 적용하여 제작된 24GHz 도플러 레이더를 사용하여, 바람에 의하여 흔들리는 나뭇잎과 주변에서 날아다니는 곤충에 의한 오감지율을 측정하였고 주 감지대상인 보행자를 대상으로 최초감지거리 측정 실험을 하였다. 이를 통해 제안된 알고리즘에 대한 성능을 확인하고자 한다. 위 3가지 실험에 사용된 TH는 모두 동일합니다.

가. 바람에 흔들리는 나뭇잎에 의한 오감지율 실험

본 논문에서는 바람에 의하여 흔들리는 나뭇잎에 의한 오감지율 실험을 통해 제안된 알고리즘의 효과를 확인하기 하였다. 본 실험은 그림 9에서 보이는 것처럼 가혹한 환경에서 실험하기 위하여, 레이더와 나뭇잎사이 거리를 1m 이내로 근접하여 설치하였다. 또한 바람의 속도를 측정하기 위해 비슷한 위치에 풍속계를 설치하여 바람의 속도를 측정하였다. 정확한 데이터를 측정하기 위해, 레이더 오감지 신호와 풍속계의 속도 데이터를 동기화하였다. 레이더가 흔들리는 나뭇잎을 감지하면 풍속계로부터 풍속 데이터를 동시에 기록하였다. 이를 통해 결과적으로 바람이 불 때의 오감지율을 통계적으로 처리했다.

그림 10은 측정결과 그래프이다. 총 측정 데이터 중 일부를 나타낸 것이며, 측정 결과 그래프의 가로축은 풍속(m/s)이고, 세로축은 오감지 대상의 신호 크기이다. 오감지 대상의 신호 크기는 바람에 의해 흔들리는 나뭇

잎이 오감지가 될 때마다 감지된 신호의 크기를 의미한다. 데이터가 풍속과 상관없이 비교적 골고루 퍼져있는 것을 볼 때, 오감지와 풍속의 크기는 연관성(Correlation)은 무시 할 만큼 작은 것을 알 수 있다.

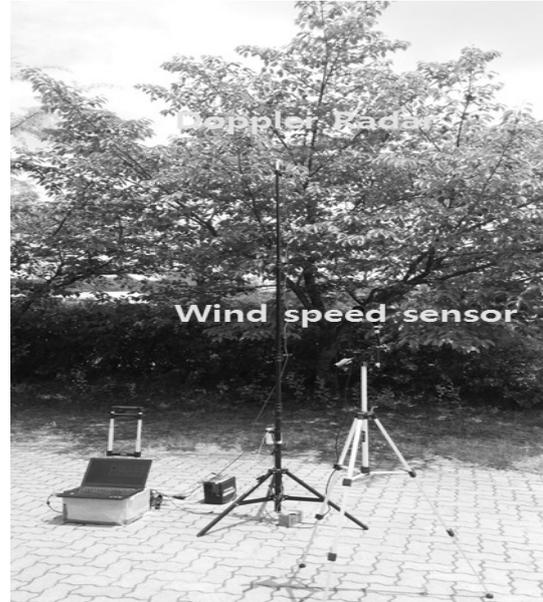


그림 9. 흔들리는 나뭇잎에 의한 오감지율 테스트 환경
Fig. 9. False alarm rate test environment of swayed leaves.

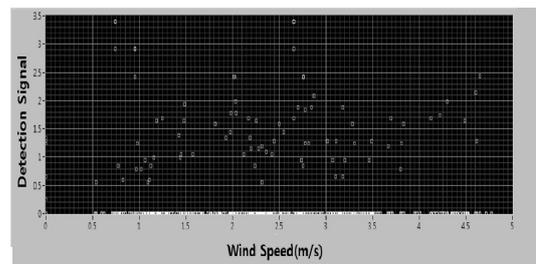


그림 10. 측정 결과 그래프
Fig. 10. Measurement Graph.

아래 표 2는 일주일동안 데이터를 수집하여, 통계처리한 결과이다. 이때 최소 풍속이 0.5m/s 이상일 때만 유효한 데이터로 판단하였다. 그리하여, 실제 측정 시간은 일주일이지만, 유효한 측정 시간은 451분이었다. 결과적으로 풍속이 3.5m/s 이하일 때, 오감지비율은 4.36% 이고, 풍속이 3.5m/s 이상인 경우에는 오감지비율이 0.04%로 측정되었다. 본 실험은 바람이 불지 않는 경우는 오감지율이 0%이기 때문에, 바람이 부는 경우만을 기준으로 통계 처리되었으며 레이더를 나무에 최대한 근접한 상태에서 측정하였으므로 본 레이더를 사

용하여 가로등 절전용 시스템을 구현하였을 경우 오감지율이 낮아 효율적으로 사용할 수 있음을 보인다.

표 2. 바람에 의하여 흔들리는 나뭇잎에 대한 오감지율
Table2. False Alarm Rate of swayed leaves by the wind.

Test Time[min]		451
Measure count [Number]	Low Speed	4,769
	High Speed	66,757
False alarm count [Number]	Low Speed	208
	High Speed	24
False alarm Rate [%]	Low Speed	4.36
	High Speed	0.04
Wind Speed [m/s]	Average	1.73
	Sigma	0.55

나. 곤충들에 의한 오감지율 실험

실외 절전용 가로등 분야에 적용되기 위해서는 가로등 주변에 모이는 곤충에 의한 오감지율 역시 매우 낮아야 한다. 실제 환경에서 실험을 하는 것은 안전 등의 이유로 어렵기 때문에, 간이 실험을 통해 확인하였다. 그림 11에서 보이는 바와 같이 실험대상은 배추흰나비이다. 배추흰나비를 선택한 이유는 다른 곤충에 비하여 단면적이 크고, 활동적이기 때문이다. 실험 환경은 하루 동안 모기장 안에 약 10마리의 나비를 넣고, 나비가 날아다닐 때 모기장에 근접하여 설치된 레이더로부터 오감지신호가 발생하는지를 확인하였다. 실험결과는 측정 시간 동안 오감지가 한 번도 일어나지 않았다. 그 이유를 분석한 결과로 나비의 RCS는 $10^{-4} \sim 10^{-5} m^2$ 로 사람(약 $1m^2$)에 비해 만배에서 10만배 작기 때문에 수신 신호의 크기가 설정된 기준치를 넘지 못하며, 곤충의 도플러 신호 중에서 직선 운동에 대한 성분이 레이더의



그림 11. 곤충들에 의한 오감지율 실험 화면
Fig. 11. False Alarm detection rate test Display of insects.

감지 기준치보다 항상 작았기 때문이다. 이를 통해 실외에서 사용 시 곤충에 의한 오감지 확률은 낮음을 알 수 있다.

다. 최초감지거리 실험

실외용 절전센서로 사용되기 위해서 주 감지대상 중 RCS(Radar Cross Section)가 자동차나 자전거에 비하여 작은 보행자를 대상으로 감지 대상이 레이더의 감지 영역 밖에서 다가오는 경우에 대해 최초감지거리 실험을 하였다. 레이더에서 멀어지는 보행자의 경우에는 최종 감지거리를 측정하는 것인데 판별하기가 어렵기 때문에 감지거리를 측정하기 더 쉬운 보행자가 다가오는 경우의 최초 감지 거리 실험을 수행하였다.

아래 그림 12는 최초 감지거리 실험에 대한 기본 구성도이다.

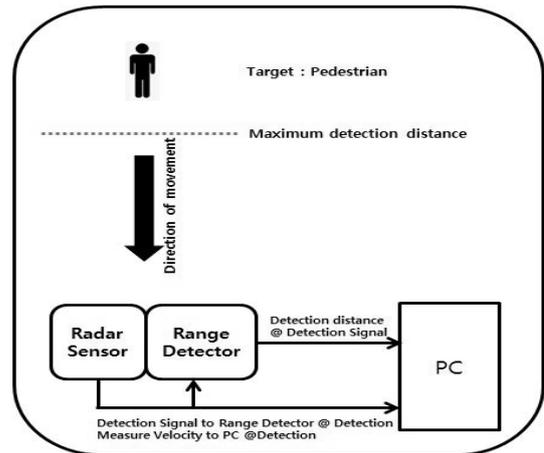


그림 12. 최초 감지거리 실험에 대한 구성도
Fig. 12. The concept of initial-detection-distance test.

본 실험에서 도플러 레이더로는 대상의 감지거리를 알 수 없기 때문에 레이더와 동기화 시킨 상용품인 거리 측정기를 이용하여 감지거리를 확인하였다. 실험방식은 보행자가 레이더로부터 감지되지 않는 거리 밖에서 레이더를 향해 걸어올 때, 레이더가 보행자를 감지하는 신호 및 속도와 거리계로부터의 측정 거리를 실시간 그래프에 기록하였다. 실험에 사용된 거리계는 ComLaser 사의 CSD-200H 제품을 사용하였다. CSD-200H의 감지거리는 0.3m~2000m이다. 정확도는 +/- 0.1m 이다.

그림 13은 최초 감지거리 실험의 한 회분 측정 결과이다. 측정 시간 동안 보행자의 감지속도는 5km/h로 측정되며, 최초감지는 약 50m로 확인되었다. 그리고 표 3

은 10회분 측정 결과 데이터이다. 각 측정마다 5번째 측정 결과 값까지 표시하였다. 이를 분석하면, 보행자에 의한 최초감지거리는 평균 49m 이며, 표준편차는 6m이다. 측정된 평균치에 가우시안 정규분포를 이용한 3-Sigma를 적용하였을 때 최소 30m 이상 감지 가능함을 알 수 있다. 이는 99.9%의 확률로 최소 30m 감지한다는 것을 의미하기 때문에 실외 절전용 가로등에 사용될 경우 30m 이상의 거리까지 감지가 가능함을 증명하였다.

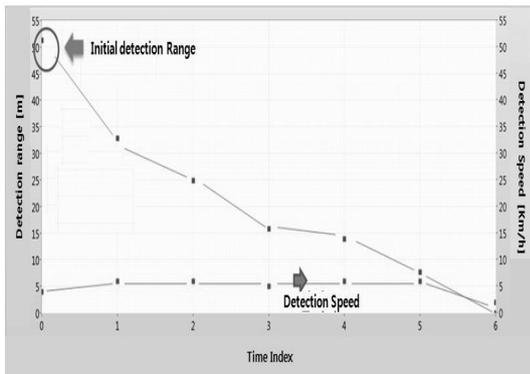


그림 13. 1회 측정분의 최초 감지거리 실험 결과
Fig. 13. Single test result of initial-detection-distance test.

표 3. 10회분의 최초감지거리 측정 결과
Table 3. 10 times test result of initial-detection-distance test.

Count	Number of measurement(Unit : m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	51.1	61.6	47.2	53.5	45.2	47.4	45.1	46.3	51.2	61.9
2	46.5	60.9	39.2	51.3	40.6	43.5	39.9	36.0	46.3	58.3
3	39.7	52.8	31.0	42.9	32.1	35.7	32.1	27.6	38.1	50.3
4	32.5	44.5	23.1	33.7	23.7	26.9	24.0	19.4	29.1	42.0
5	25.5	35.9	15.2	25.1	19.8	13.7	15.5	13.9	20.5	34.1

IV. 결 론

본 논문에서는 실외분야의 절전용 응용분야에 적용할 수 있는 저가형 24 GHz 도플러 레이더 구조와 도플러 레이더에서 움직임 분류 알고리즘으로 사용되는 마이크로도플러 분석 방법과는 피처가 다른 간략한 알고리즘을 제안하였다. 기존의 마이크로 도플러 분석 방법은 대상의 움직임을 미세분류하는 성능은 높으나 제안된 알고리즘은 가장 간단한 바이너리 분류를 선택하여 저가형 DSP에서 구현가능하고 외부환경에 의한 오감

지율은 매우 낮추고, SNR을 향상 시켜 감지거리를 40% 증가시켰기 때문에 실외 절전용 응용분야에 적합하다. 또한 실제 환경에서 알고리즘이 적용 가능한지를 확인하기 위해, 이와 관련된 세 가지 실험을 실시하였다. 첫째로, 바람에 의해 흔들리는 나뭇잎에 의한 오감지율을 실험하였다. 바람에 의한 오감지율은 저속감지 시 4.36%, 고속감지 시 0.04%로 측정되었다. 둘째로 곤충에 의한 오감지율 실험을 하였다. 해당 실험은 곤충에 의해 수신된 도플러 신호의 크기가 감지 기준치보다 작아 오감지가 발생하지 않았다. 마지막으로 보행자를 대상으로 최초감지거리를 측정된 결과 평균 49m이며, 3-Sigma를 적용하면, 최소 30m의 감지거리를 확인할 수 있었다.

결론적으로, 본 논문에 제안된 저가형 도플러 레이더 구조와 알고리즘을 적용하여, 실외 스마트 라이팅에 적용 가능함을 증명하였다. 이를 통해 현재 국가사업으로 진행 중인 스마트 시티의 스마트 가로등 및 차량이나 보행자의 이동이 적은 도심 및 농어촌의 가로등 절전 시스템에 제안된 알고리즘을 적용할 경우 많은 에너지 절약에 도움이 될 것으로 생각된다.

REFERENCES

- [1] Y. Mehmood, F. Ahmad, I. Yaqoob, A. Adnane, M. Imran and S.Guizani, "Internet-of-Things-Based Smart Cities: Recent Advances and Challenges," in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 9, pp. 16-24, 2017.
- [2] Dan Yang, Weihua Sheng, Ruili Zeng, "Indoor Human Localization Using PIR Sensors and Accessibility Map", The 5th Annual IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, pp. 577-581, Shenyang, China, June, 2015.
- [3] Q. Y. Lv et al., "High dynamic-range motion imaging based on linearized Doppler radar sensor," IEEE Trans. Microw. Theory Techn., vol. 62, no. 9, pp. 1837 - 1846, Sep. 2014.
- [4] Y. Kim, H. Ling, "Human activity classification based on micro-doppler signatures using a support vector machine," IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., vol.47, no.5, pp.1328-1337, May 2009.
- [5] Björklund, S., Johansson, T., Petersson, H. "Evaluation of a micro-Doppler classification method on mm-wave data", IEEE Radar Conf., pp 934-939, Atlanta, USA, May, 2012.

- [6] Li, J., Phung, S. L., Tivive, F. H. C., Bouzerdoun, A. "Automatic classification of human motions using Doppler radar", IEEE World Congr. Comp. Intel., pp , Brisbane, Australia, June, 2012.
- [7] Björklund S, Petersson H, Hendeby G., "Features for micro-Doppler based activity classification" IET Radar, Sonar & Navigation, pp.1181-1187, Sep 2015.
- [8] V. C. Chen, and H. Ling, "Joint time-frequency transform for radar imaging and signal analysis", in Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp 5166-5169, Barcelona, Spain, July, 2007.
- [9] Mark Richards, Fundamentals of Radar Signal Processing, McGraw Hill, pp 247-282, 2005.

저 자 소 개



정 응 기(정회원)
2012년 2월 한밭대학교
전파공학과 학사 졸업.
2017년 8월 중앙대학교
전자전기공학과 석사 수료.
2012년 1월~현재 우리로
선임연구원

<주관심분야: 레이더, 신호처리>



김 충 환(정회원)
1985년 2월 서울대학교
물리학과 학사 졸업.
1987년 2월 서울대학교
물리학과 석사 졸업.
1993년 2월 서울대학교
물리학과 박사 졸업.

1993년 3월~2010년 6월 한국전자연구원
선임연구원

2010년 6월~2011년 8월 (주)텔트론 이사

2011년 8월~현재 (주)우리로 상무이사

<주관심분야: RFIC, 레이더, 신호처리>



백 동 현(정회원) - 교신저자
1996년 2월 KAIST
전자전기공학부 학사 졸업.
1998년 2월 KAIST
전자전기공학과 석사 졸업.
2003년 2월 KAIST
전자공학과 박사 졸업.

2003년 3월~2007년 2월 삼성전자 시스템 LSI
책임연구원

2007년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수

<주관심분야: RFIC, PLL, 레이더, 밀리미터웨이브>