

이중 기능 레이다-통신 최신 기술 연구 동향

김 동 환*, 정 방 철^o

Research Trends of Emerging Technology for Dual-Function Radar-Communications

Dong-Hwan Kim*, Bang Chul Jung^o

요 약

본 논문에서는 레이다와 통신시스템의 주파수 공유를 위한 주된 연구 방향 중에서 각각의 시스템에서 수행하던 본연의 정보의 전달 기능과 주변 환경에 대한 센싱 기능을 하나의 시스템에서 수행하는 이른바 이중 기능 레이다-통신시스템(Dual-Function Radar-Communications; DFRC)에 관한 기술과 연구 동향을 조사하였다. 특히, 서론에서는 주파수 공유의 필요성과 주파수 공유를 위한 주된 연구 방향에 대하여 기술하고, 시스템 개요에서 DFRC 시스템의 개념과 원리 및 특징에 대하여 설명한다. 또한, DFRC 시스템 설계의 핵심 기술이자 주된 도전 과제인 공통의 파형 설계 기술에 대한 다양한 접근 방식과 각 방식의 장단점에 대해 논의한다. DFRC 시스템의 많은 장점들로 인해 최근 많은 분야에서 무선 통신 기능과 레이다의 센싱 기능을 통합하려는 요구가 대두되었고, 관련 응용 분야가 출현하였다. 이러한 응용 분야에 대해 크게 민수분야와 군수분야로 나누어 소개한다. 마지막으로, 결론 및 향후 발전 방향을 통해 가까운 미래에 DFRC 시스템에 적용 가능한 유망한 기술을 제시한다.

Key Words : Spectrum Sharing, Radar-Communication Coexistence, Dual-Function Radar-Communication, MIMO-OFDM, RadCom

ABSTRACT

In this paper, we investigate the technologies and recent research trends on so-called “Dual-Function Radar-Communications(DFRC)” that performed simultaneously the original information transmission function and sensing function for the surrounding environment in one system among the main research directions for spectrum sharing between radar and communication systems. In particular, we describe the need and main research direction for spectrum sharing in the introduction, and explain the concept, principles and features of the DFRC system in the system overview. It also discusses the various approaches and the pros and cons of each approach to joint waveform design technologies, which are key technologies and main challenges in the design of DFRC system. Many of the advantages of DFRC system have led to a number of recent demands for integrating wireless communication functions with radar sensing in many areas, and related applications have emerged. These applications were introduced largely divided into commercial and military sectors. Finally, it presents promising technologies that can be applied to DFRC system in the near future in the conclusions and future trends.

* 본 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019-0-00964-002, 스펙트럼 쉐어링을 통한 기존 무선국 보호 및 주파수 공유기술 개발)

• First Author : Department of Electronics Engineering, Chungnam National University; Aircraft Radar System PMO, Agency for Defense Development, dhkim0812@gmail.com, 정희원

^o Corresponding Author : Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr, 종신회원
논문번호 : 202008-198-D-RU, Received August 18, 2020; Revised August 27, 2020; Accepted August 28, 2020

1. 서 론

레이더와 무선 통신시스템과 같이 무선 주파수(Radio Frequency, 이하 RF)를 사용하는 시스템들은 일반적으로 서로에게 미치는 해로운 간섭을 배제하기 위해 서로 독립적으로 할당된 주파수 대역에서 설계되고 개발되었다. 그러나, 최근 스마트폰 및 태블릿 PC 등으로 대표되는 이동 가능한 무선 단말기들의 기하급수적인 증가와 이로 인한 데이터 트래픽의 급증으로 최소 자원인 주파수 스펙트럼의 과밀화 현상이 심화되고 있다^[1]. 또한, 현재 사용 중인 주파수 스펙트럼의 사용 실태를 보면 독점적으로 넓은 대역의 주파수를 할당받아 사용 중인 레이더 시스템의 경우 활용도 측면에서 충분히 이용되지 못하고 있음을 보인다^{[2][3]}. 이에 대한 해결책으로 레이더와 통신시스템의 공존을 위한 주파수 공유기술이 최근 많은 관심과 주목을 받고 있으며, 이의 일환으로 미국 방위고등연구계획국(Defense Advanced Research Projects Agency, 이하 DARPA)과 같은 정부 기관에서도 주파수 공유를 통한 레이더와 통신시스템의 성능 향상 및 주파수 스펙트럼의 과밀화를 해결하기 위해 “Shared Spectrum Access for Radar and Communications(SSPARC)”와 같은 프로그램을 통해 연구지원과 관련 조사를 활발히 진행하고 있다^[4]. 특히, 10 GHz 이하에서 대부분의 주파수 스펙트럼이 이미 주로 레이더에 할당되어 있어 이러한 대역에서는 기존에 존재하는 다양한 통신시스템과의 주파수 공유가 가능할 것으로 여겨지고 있으며^[5], 밀리미터와 대역과 같은 더 높은 주파수에서는 5세대 및 차세대 무선 통신시스템과의 주파수 공유가 역시 기대되고 있다.

일반적으로, 통신시스템과 레이더의 주파수 공유(Communication and Radar Spectrum Sharing, 이하 CRSS)에는 두 가지 주된 연구 방향이 있다^{[6][7]}. 첫 번째는 레이더와 통신시스템이 서로 다른 플랫폼에서 각각 본연의 임무를 수행하면서 지리적으로 비슷한 영역에서 동일한 주파수 대역을 공유하는 이른바 레이더와 통신시스템의 공존(Radar-Communication Coexistence, 이하 RCC)이라 불리는 연구방향이다. 그림 1은 RCC에 대한 개념도이다. RCC에서는 주로 두 시스템 사이에서 발생하는 서로에게 미치는 해로운 간섭(Inter-System Interference, 이하 ISI)을 효과적으로 관리하여 두 시스템이 각각 큰 성능 저하 없이 공존하는 것을 목표로 한다. 이러한 ISI를 억제하거나 경감시켜야 하는 책임이 레이더와 통신시스템 중에 어느 한쪽에 있거나 혹은 서로 협력하느냐에 따라 크게 3가지 범

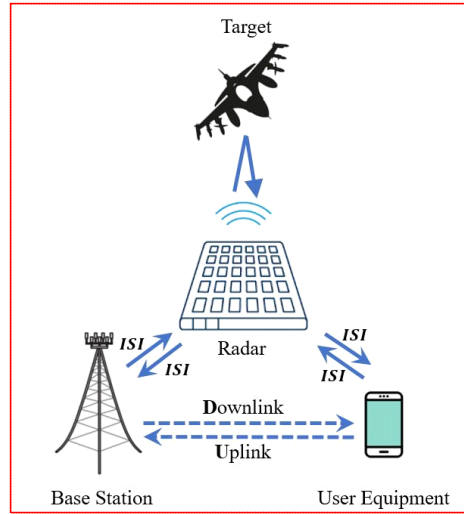


그림 1. 레이더와 통신시스템의 공존 개념도
Fig. 1. A conceptual diagram of a RCC

주로 분류할 수 있다^[8]. 즉, 인지 통신(Cognitive communication) 기술, 인지 레이더(Cognitive radar) 기술, 그리고 합동 인지(Joint cognitive) 기술로 분류한다. 두 번째는 레이더와 통신시스템 각각의 기능을 하나의 시스템에서 수행하는 이른바 이중기능 레이더-통신시스템(Dual-Function Radar-Communications, 이하 DFRC)이라 불리는 연구방향으로 같은 하드웨어와 플랫폼을 사용하면서 동일한 주파수 대역을 사용한다. 주파수 스펙트럼을 공유하는 방식에 있어서 서로 독립된 시스템에서 서로에게 미치는 간섭을 경감하거나 제거하는 RCC 방식에서 하나의 플랫폼에서 레이더의 표적 센싱 기능과 통신시스템의 통신 기능을 동시에 수행하는 DFRC 방식으로의 진화는 상당히 자연스러운 현상이다. DFRC 방식으로 레이더와 통신시스템을 하나의 시스템으로 통합하게 되면 플랫폼과 시스템을 구성하는 하드웨어를 함께 사용하기 때문에 무게 저감뿐만 아니라 비용 측면에서도 상당한 절감 효과를 가질 수 있다. 또한, 동일한 주파수 대역을 사용하기 때문에 부족한 주파수 스펙트럼을 효율적으로 사용할 수 있고, 매년 주파수 경매에 쓰이는 비용을 고려할 때 경제/사회적인 측면에서도 많은 장점을 갖는다. 이러한 CRSS에 보다 유리한 접근 방식으로 레이더와 통신시스템의 기능을 모두 지원하는 새로운 DFRC 시스템에 관한 많은 연구들이 수행되고 있다^[9-15].

본 논문에서는 DFRC 시스템의 개요에서 원리와 특징에 대해 설명하고, DFRC 시스템 파형 설계를 위

한 다양한 접근 방식과 각 방식의 장점과 한계에 대해 논의하고, 지금까지 이루어진 진척상황을 기술한다. 또한, DFRC 시스템의 구체적인 응용 분야와 직면한 도전에 대해 알아보고, 앞으로 어떠한 연구들이 진행될지 관련 연구 동향에 대해 살펴보고자 한다.

II. DFRC 시스템 개요

하드웨어 플랫폼과 주파수 자원을 공유하면서 레이더와 통신시스템의 기능을 동시에 수행할 수 있는 하나의 시스템을 설계하는 개념은 오래전에 소개되었다¹⁶⁾. 그러나, 통신시스템과 레이더 시스템은 운용 개념과 원리가 상당히 달라 서로 다른 방식으로 설계되고 개발되어 왔다. 즉, 각 시스템을 설계하는데 고려되어야 할 요소들, 운용 모드나 변조 기법 그리고 신호처리 알고리즘 등이 서로 달라 여러 부분에서 두 시스템을 하나의 아키텍처로 개발하는 것은 커다란 도전이었다. 최근에 와서야 파형 설계의 유연성과 다양성의 진보, 소프트웨어 기반의 무선 하드웨어 기술의 성숙, 디지털 빔형성 기술의 구현과 레이더 및 통신의 디지털 신호처리 기술의 급속한 발전으로 두 시스템을 하나의 플랫폼에서 동시에 운용하는 것이 현실화 되고 있다¹⁷⁻²¹⁾. 그림 2는 DFRC의 개념도이다. 개념도에서 보는 바와 같이 DFRC는 두 개의 시스템인 레이더와 통신시스템이 서로에게 해로운 영향을 미치지 않고 동시에 서로 다른 기능인 표적의 센싱 기능과 통신 기능을 하나의 하드웨어 플랫폼에서 수행하는 시스템을 의미한다. 그래서 이와 같은 시스템을 레이더와 통신

시스템의 영문을 줄여서 “RadCom”으로 칭하기도 한다. 이러한 RadCom 시스템을 설계함에 있어 정보의 전달과 센싱 기능을 동시에 수행할 수 있는 최적의 파형을 설계하는 것이 핵심 기술이자 주된 도전이다. RadCom 시스템의 파형 설계를 위한 접근 방식은 레이다가 사용하는 파형에 통신에 필요한 정보를 끼워 넣은 방식(Embedding information into radar waveforms)과 통신시스템에 적용된 파형을 이용하여 레이다의 센싱 기능을 함께 수행하도록 하는 방식(Radar employing communication waveforms)으로 크게 나눌 수 있다. 일반적으로, 전자를 레이더 중심 파형 설계(Radar-centric waveform design) 방식으로 칭하고, 후자는 통신 중심 파형 설계(Communication-centric waveform design) 방식으로 일컫는다.

III. DFRC 시스템 파형 설계

3.1 LFM 및 SS 파형

전통적으로 레이더 시스템에서는 수신단에서 최적의 상관(Correlation) 특성을 갖으면서 송신 펄스의 대역폭 확장을 통한 레이더 표적의 높은 거리 분해능을 확보할 수 있는 일명 “Chirp” 신호로 불리는 선형 주파수 변조(Linear Frequency Modulation, 이하 LFM) 파형이 가장 많이 사용되고 있다²²⁾. 그래서 이러한 레이더 시스템에서 주로 사용하는 LFM 파형에 통신시스템의 정보를 담고 있는 데이터를 결합하려는 시도가 공통의 파형 설계 연구 초기에 많이 이루어졌다^{23,24)}. 그러나, 이러한 단순한 접근 방식은 통신시스템의 변조 속도(Symbol rate)가 LFM 파형의 칩율(Chirp rate)에 종속되기 때문에 동일한 대역폭을 사용하는 전용 통신시스템에 의해 달성할 수 있는 변조 속도에 한참 못 미치는 결과를 보였다. 그래서 통신시스템의 관점에서 전송률을 향상시키기 위한 연구들이 진행되었다. 특히, 자기상관(Autocorrelation) 특성이 우수하고, 비화특성과 재밍 및 페이딩에 강인한 전형적인 통신시스템 파형인 확산 스펙트럼(Spread Spectrum, 이하 SS) 신호가 LFM 파형과 더불어 RadCom 시스템의 공통 파형 설계에 많이 이용되었다²⁵⁻²⁹⁾. 그러나 SS 파형도 LFM 파형과 마찬가지로 여전히 전송률이 높지 않으며, 변수 조정이 유연하지 않고, 공통 파형의 직교성을 유지하기 어려운 문제가 있다. 또한, SS 파형을 사용할 경우 시스템 구현 관점에서도 높은 복잡도와 비용, 낮은 효율성의 우려가 있으며, 특히, 레이더 시스템에서 표적의 속도를 측정하기 위한 도플러 처리 관점에서 보면 SS 파형은 상당히 많은 연산량을

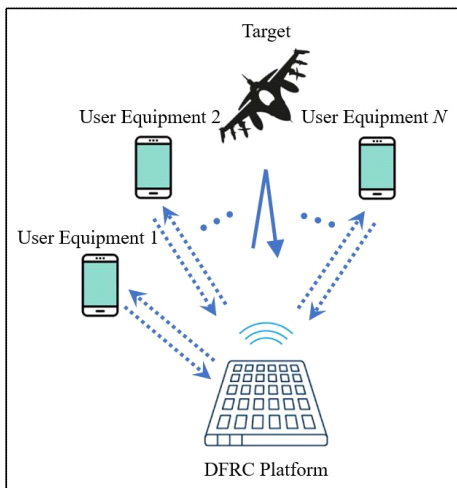


그림 2. 이중 기능 레이더-통신시스템의 개념도
Fig. 2. A conceptual diagram of a DFRC

표 1. 파형 설계 기법에 따른 특징 비교^[50]
 Table 1. Comparison according to the techniques of waveform design

Techniques	Characteristics	
	Pros	Cons
LFM	<ul style="list-style-type: none"> Easily implementation 	<ul style="list-style-type: none"> Need accurate signal separation Low data load High cost and complexity
SS	<ul style="list-style-type: none"> High security and robustness Higher anti-jamming capability 	<ul style="list-style-type: none"> Low transmission rate Low flexible of parameter adjustment
OFDM	<ul style="list-style-type: none"> Low sidelobe Higher Doppler tolerance and information transmission capacity 	<ul style="list-style-type: none"> Unavoidable waveform distortion due to high PAPR
MIMO-OFDM	<ul style="list-style-type: none"> Good spatial and waveform diversity Large time-bandwidth product Low cross-correlation sidelobe and low PAPR 	-

요구한다. LFM 파형이나 SS 파형과 같은 파형 설계 방식은 한쪽 시스템 관점에서는 최적이지만 다른 시스템의 관점에서는 더 이상 최적이지 아니므로 레이더의 성능을 유지하면서 통신시스템의 전송률을 개선할 수 있는 좀 더 새롭고 진보된 공통 파형 설계 방식이 필요하게 되었다.

3.2 OFDM 및 MIMO-OFDM 파형

무선 통신시스템에서 널리 사용되고 있는 다중 반송파(Multi-carrier)를 이용한 파형 설계 개념을 RadCom 시스템의 공통 파형 설계에 도입하는 연구가 진행되었다^[30-40]. 대표적인 다중 반송파 파형인 직교주파수분할다중(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 이하 OFDM) 파형을 공통 파형으로 사용할 경우 낮은 부엽(Sidelobes) 특성과 높은 도플러 내성, 그리고 정보 전송 용량 측면에서 우수한 특성을 갖는다. 특히, 레이더 시스템에서 움직이는 물체를 탐지하는 원리인 도플러 이동은 통신시스템에서는 정보 전송의 질을 악화시키는 요소이다. OFDM 파형을 레이더 신호로 사용할 경우 매력적인 특성 중의 하나가

이 파형은 거리-도플러 디커플링을 통해 거리 도메인 신호처리와 도플러 도메인 신호처리를 각각 독립적으로 수행 가능하게 한다^[41,42]. 그러나, 이러한 OFDM 파형의 장점에도 불구하고, OFDM 신호가 갖고 있는 가장 주된 문제점 중의 하나가 피크 전력 대비 평균 전력의 비율(Peak to Average Power Ratio, 이하 PAPR)이 매우 커서 송신 파형의 왜곡이 불가피하고, 이는 레이더의 탐지 거리를 심각하게 감소시키는 결과를 초래한다^[43]. 또한, 통신시스템에서 OFDM 파형은 데이터를 연속적으로 송수신하지만, 현존하는 대부분의 레이더는 소형 경량화 되는 레이더의 발전 추세에 맞추어 소형 안테나를 갖는 펄스 모드로 동작한다. 그렇기 때문에 RadCom 시스템에서 OFDM 파형을 펄스 모드로 동작시키게 될 경우 통신에서의 전송률이 심각하게 줄어들게 된다. 위와 같이 OFDM 파형의 높은 PAPR에 의한 문제점을 피하고, 통신에서의 전송률 요구조건과 레이더에서의 탐지 성능 및 분해능 요구조건을 만족하기 위해서 다중입출력(Multiple Input Multiple Output, 이하 MIMO) 기술을 이용한 RadCom 시스템 파형 설계가 제안되었다. 특히, MIMO 기술과 OFDM 파형을 결합한 새로운 기법이 많은 관심과 주목을 받았다^[44-49]. MIMO 기술은 통신 시스템 관점에서 송수신 안테나의 공간 자유도의 확장으로 전송률과 SINR을 개선하는 효과가 탁월하며, 레이더 관점에서도 가상 배열의 확장과 다중 빔의 운용을 통해 분해능을 개선하는 공간 다양성(Spatial diversity)과 다중 표적을 동시에 식별하고, 탐색 및 추적할 수 있는 파형 다양성(Waveform diversity)의 탁월한 장점을 갖는다. 또한, 적응 배열 기법(Adaptive array techniques)을 바로 적용할 수 있어 간섭 및 재밍 억제에 효과적이다. 간섭을 억제할 수 있는 능력이 레이더의 표적 탐지 성능(Probability of detection)과 통신시스템의 총합 전송률(Sum-rates) 성능을 결정한다고 해도 과언이 아니다. 이렇게 MIMO 기술의 장점과 OFDM 파형의 장점을 결합한 MIMO-OFDM 기법은 다중 경로에 의한 페이딩에 강인하고, 높은 스펙트럼 이용률을 보인다. 또한, MIMO-OFDM 파형을 최적화함으로써 높은 시간-대역폭 곱(Time-Bandwidth product)의 신호처리 이득과 낮은 교차상관(Cross-correlation) 부엽레벨 특성 그리고 낮은 PAPR 특성을 구현할 수 있다. 특히, MIMO-OFDM 기술을 적용한 RadCom 시스템은 레이더의 각도 해상도와 통신시스템의 데이터 전송률을 동시에 개선할 수 있는 장점을 갖는다.

IV. DFRC 시스템 응용 분야

앞서 설명한 것처럼 DFRC 기술이 주는 많은 장점들로 인해 최근 많은 분야에서 무선 통신 기능과 레이더 센싱 기능을 통합하려는 수많은 새로운 요구가 대두되고 있다. 일반적으로 이러한 응용 분야는 크게 민수분야와 군수분야로 나눌 수 있다.

4.1 민수분야 응용(Commercial Applications)

첫째로, 가장 대표적이고 관련 연구가 가장 활발하게 진행되고 있는 분야는 지능형 교통 시스템(Intelligent Transport System, 이하 ITS)과 차세대 자율 주행 자동차(Autonomous Vehicle, 이하 AV)를 위한 네트워크이다. ITS에서는 복잡한 교통 환경하에서 운전자와 보행자의 안전을 보장하기 위해서 교통 상황에 대한 정보가 빠르고 정확하게 즉각적으로 교환될 수 있어야 한다. 또한, 통신의 신뢰성이 보장되어야 하고, 주변의 움직임은 물체에 대한 정확한 센싱이 수반되어야 한다. 이 분야에 RadCom 시스템을 적용하면 높은 안테나 이득과 팬벨 빔과 같은 지향성이 좋은 레이더 신호를 이용하여 통신의 신뢰성을 강화할 수 있고, 교통 상황과 주변 움직이는 물체에 대한 차량 간 정보 교환을 통해 레이더의 즉각적인 물체 탐지 및 탐지 거리의 확장, 정확한 위치 인식이 가능하여 교통안전을 한층 강화할 수 있다. 이러한 응용을 위하여 개념 연구에서부터 시스템 및 공통 플랫폼 설계, 다기능 하드웨어 플랫폼 관련 연구까지 다양한 연구가 진행되었다⁵¹⁻⁵⁵. 미래의 AV를 위한 네트워크에서는 차세대 5G 기술을 이용한 밀리미터파 대역의 RadCom 연구가 활발히 진행되고 있다⁵⁶. 광대역의 밀리미터파 대역을 이용할 수 있어 통신에서 높은 전송률을 달성할 수 있을 뿐만 아니라 레이더에서 상당히 높은 거리 분해능을 얻을 수 있다. 또한, 동일한 안테나 개구면을 이용하더라도 파장이 매우 짧기 때문에 안테나의 빔폭을 굉장히 좁게 만들 수 있고, 이에 따라 관심 방향을 정확하게 지향할 수 있기 때문에 도래각(Angle of arrival, 이하 AOA) 추정 정확도를 향상시킬 수 있다.

둘째로, 응용 가능한 곳은 와이-파이 통신망을 이용한 실내에서의 위치 추정 분야이다⁵⁷. GPS와 같은 위성측위시스템(Global Navigation Satellite System, 이하 GNSS)을 이용한 위치 추정은 실외에서는 탁월하게 동작하지만, 실내에서는 급격하게 성능이 저하된다. 와이-파이 통신망은 낮은 비용과 어디에나 존재하기 때문에 이것을 이용한 위치 추정 시스템은 실내에

서의 위치와 움직임을 탐지하는데 매우 유용하게 응용될 수 있다. 와이-파이 통신시스템을 이용하여 통신 기능과 동시에 사람이나 물체의 위치나 움직임과 같은 매우 정교한 정보를 얻기 위해서는 신체에서 반사되거나 산란되는 신호를 처리할 수 있는 정교한 신호 처리 기술이 필요하다.

다음으로 응용 가능한 분야는 드론과 같은 소형 무인 항공기(Unmanned Aerial Vehicle, 이하 UAV)를 활용한 통신과 센싱 시스템이다. 최근에 재난 구호나 긴급 이동 통신 기지국 개설, 자연 탐사 및 물품 수송 등과 같은 많은 분야에 드론이 폭넓게 사용되고 있다⁵⁸. 특히, 드론이 군집으로 움직일 경우에는 서로의 충돌을 방지하기 위하여 무선 제어 및 센싱과 더불어 드론 간 통신을 통한 정보 교환을 할 경우 매우 효율적이고 안정적인 운용이 가능하다⁵⁹. 이러한 센싱과 통신을 하나의 하드웨어 플랫폼에서 공유한다면 드론과 같은 소형 UAV를 더 작게 만들 수 있어 기동성과 유연성을 확보할 수 있으면서 동시에 전력 소모 또한 줄일 수 있다⁶⁰. 그러나, 이렇게 많은 분야에서 드론과 같은 소형 UAV가 출현함으로써 공공의 안전과 보안이 위협받을 수 있다. 그래서 공중의 드론을 탐지하고 추적하는 레이더에 관한 연구도 관심을 받고 있다. 이러한 레이더를 RadCom 시스템으로 개발한다면 정보 교환과 함께 소형화가 가능하며, 기동성을 확보할 수 있으므로 언제 어디에서나 전개가 가능하여 매우 효과적인 탐지/추적이 가능하게 될 것이다.

앞서 언급한 응용 분야 이외에도 가능한 분야로 현재는 공항의 통제 센터에서 하늘에 떠 있는 항공기의 교통/관제를 위하여 레이더와 통신을 별개의 시스템으로 운용하고 있지만, 앞으로 항공 교통 관제(Air Traffic Control, 이하 ATC) 레이더 시스템을 RadCom 시스템으로 구성하게 될 경우에는 항공기를 탐지/추적하면서 동시에 정보 교환이 가능하여 더욱 효과적이고 효율적인 공항 운영이 가능할 것이다. 마지막으로 레이더 시스템의 높은 전력과 강한 방향성 특성을 이용한다면 먼 거리에 있는 사용자에게 정보를 전달하고자 할 때 세기가 약한 통신 신호를 증폭하여 전달할 수 있는 중계기(Communication Relay)로써 역할을 RadCom 시스템으로 할 수 있을 것이다⁶¹.

4.2 군수분야 응용(Military Applications)

군수 분야에서는 전장 환경이 복잡 다양해지면서 군용 플랫폼인 전투 함정이나 전투기를 포함한 항공기들이 생존성을 극대화하기 위해서 다양한 전자 장비들과 전투 시스템을 탑재하게 되었다. 이로 인해 전

자 장비들 사이에 상호 운용성이 중요한 화두로 떠오르게 되었다. 통상적으로 지금까지는 함정이나 항공기에 탑재되는 레이더를 비롯한 통신시스템, 전자전 장비(Electronic Warfare) 등의 RF 시스템들은 각각 독립적으로 분리되어 개발되었다. 하지만, 이렇게 군용 플랫폼에 탑재되는 RF 시스템들이 각각 분리되어 탑재되다 보니 부피나 무게가 증가하게 되었고, 각각의 시스템들이 송수신을 위한 각자의 안테나를 장착하고 있어 갑판 등이 복잡 과밀화되었고, 전자 장비들 간에 전자기 간섭이나 상호 운용성의 문제를 피할 수 없게 되었다. 더욱이 전투 플랫폼의 생존성에 직결되는 레이더의 반사 단면적(Radar Cross Section, 이하 RCS)을 키우게 되어 결과적으로 적에게 노출될 확률이 커지는 결과를 초래하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 탑재되는 전자 장비들의 통합이 절실히 필요하게 되었다. 이의 일환으로 미 해군연구소에서는 전투 함정에 적용하고자 새로운 다기능 RF 시스템(Advanced Multifunction RF System, 이하 AMRFS)이라는 프로젝트를 수행하였다⁶²⁾⁶³⁾. 이 프로젝트의 목적은 RF 시스템을 통합하고, 안테나 개구면을 공통으로 사용하여 전자 장비들의 부피와 크기를 줄이고, RCS를 최소화하여 전투 능력과 생존성을 극대화하는데 있다. 이후로도 AMRFS의 업그레이드된 버전의 프로젝트가 수행되었고, 최근에는 서론에서 언급한 SSPARC 프로그램이 진행되었다. 또한, 전투기와 같은 항공기에 DFRC 개념을 적용하기 위한 연구도 진행되었다. 항공기에 탑재되는 항공 전자 시스템도 기능을 통합하고, 장비의 수를 줄임으로써 항공기의 RCS를 감소시키고, 항공기 조종사의 부하를 줄여서 생존성을 극대화 하려는 노력들이 진행되었다. 대표적인 프로그램이 F-35 전투기에 적용된 미 공군의 “PAVE PACE” 이다⁶⁴⁾. 이 프로젝트를 통해 전투기에 탑재되는 RF 시스템의 기능을 통합하고자 하였다. 이와 같이 군수 분야에서는 통신시스템이나 레이더와 같은 RF 시스템을 기능적으로 통합하려는 연구와 노력들이 오래전부터 진행되어 왔다. 최근에 들어서는 감시/정찰 및 무인 공격 분야에서 군용 UAV의 활약이 두드러지고 있다. UAV는 지상 통제 센터에서 무선 통신을 통해 UAV의 비행을 제어하고, 레이더 영상을 통해 감시/정찰을 수행하기 때문에 레이더의 센싱 기능과 통신시스템의 통신 기능이 모두 필요한 시스템으로 RadCom 시스템으로 통합하게 되면 UAV 플랫폼에 탑재되는 전자 장비의 수를 줄여 무게를 절감할 수 있을 뿐만 아니라 RCS를 감소시켜 UAV의 생존성을 향상시킬 수 있다. 반면에, 방어하는 입장에

서는 민수분야에서와 마찬가지로 UAV는 안전과 보안에 위협이 될 수 있다⁶⁵⁾. 이러한 허가되지 않은 UAV를 감시하기 위하여 전용의 감시 센서를 사용하지 않고, 이동 통신 기지국과 같은 기존의 통신시스템을 이용하려는 응용 분야도 있다⁶⁶⁾.

V. 결론 및 향후 발전방향

무선 주파수를 사용하는 레이더와 무선 통신시스템 사이에 주파수를 공유하려는 움직임은 현재 과밀화되고, 부족한 스펙트럼 문제를 해결할 수 있는 주된 해결책 중 하나로서 레이더 관련 분야뿐만 아니라 통신시스템 관련 분야에서도 동시에 많은 관심을 받고 있는 연구 주제이다. 특히, 정보의 전달이라는 통신 본연의 기능과 주변 환경을 센싱하는 레이더의 기능을 하나의 플랫폼에 통합하여 주파수 스펙트럼의 공유뿐만 아니라 하드웨어까지 공유하려는 DFRC 기술은 두 시스템을 하나의 시스템으로 통합함으로써 얻을 수 있는 많은 이점으로 현재 활발한 연구가 진행되고 있다. 또한, DFRC 시스템은 관련 응용 분야에서 보듯이 많은 장점이 있고, 민수 뿐만 아니라 군수 분야에서도 적용 가능한 분야가 많아 군 연구소에서도 활발한 연구가 진행되고 있다.

본 논문에서는 특히, RadCom 시스템을 설계함에 있어 정보의 전달이라는 통신의 기능과 표적의 탐지라는 레이더의 기능을 동시에 수행할 수 있는 최적화된 파형 설계 기법과 각 파형의 장단점에 대하여 살펴 보았다. 연구 초기에는 통신시스템과 레이더는 운용 개념과 원리가 다르고, 각 시스템을 설계하는데 고려되어야 할 요소들이 서로 달라 여러 부분에서 두 시스템을 하나의 아키텍처로 개발하는 것이 커다란 도전이었지만, 최근의 소프트웨어 기반의 무선 하드웨어 기술의 성숙, 디지털 빔형성 기술의 구현과 레이더 및 통신시스템 분야의 인지 무선(Cognitive radio) 기술과 인지 레이더(Cognitive radar) 기술의 급속한 발전으로 적응형 빔형성(Adaptive beamforming) 및 적응형 변조 파형(Adaptive modulation waveform)의 생성 등이 가능하게 되어 두 시스템을 하나의 플랫폼에서 동시에 운용하는 것이 점점 현실화되고 있다. 하지만, 두 기능을 하나의 시스템으로 통합하다 보니 한쪽의 성능이 개선되면, 다른 한쪽의 성능이 열화되는 특성이 있어 두 기능을 동시에 최적화하는 기술 및 비용 대비 효과가 높은(Cost-effective) 시스템 구현기술의 개발 등 많은 연구와 노력들이 아직 필요하다.

마지막으로, 이 분야의 발전 방향으로 DFRC 시스

탐을 통해 주파수 뿐만 아니라 하드웨어를 공유함에 있어 잡음과 많은 간섭 신호가 존재하는 실제 환경에서 레이더 표적의 미약한 반사 신호와 통신시스템의 사용자 단말기 신호 사이에서 표적의 유무를 판별하고, 유의미한 정보를 구별해내는 것은 핵심 기술이자 커다란 도전일 것이다. 이 분야에 레이더 신호와 통신 신호의 독립적인 통계학적 특성을 이용하여 신호를 분류(Signal classification)하는데 기계 학습(Machine learning) 기반의 최신 기술을 적용하는 것은 적합할 뿐만 아니라 유망한 방법으로 생각된다.

References

- [1] W. Lehr, *Toward more efficient spectrum management*(2014), MIT Communications Future Programs, <http://cfp.mit.edu/publication/s/index.shtml>.
- [2] Federal Communications Commission (FCC), *Connecting America: The national broadband plan*(2010), <https://www.fcc.gov/general/national-broadband-plan>.
- [3] The Presidents Council of Advisors on Science and Technology (PCAST), *Realizing the full potential of government-held spectrum to spur economic growth*(2012), <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a565091.pdf>.
- [4] Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), *Shared Spectrum Access for Radar and Communications (SSPARC)* (2016), <https://www.darpa.mil/program/shared-spectrum-access-for-radar-and-communications>.
- [5] H. Griffiths, L. Cohen, S. Watts, E. Mokole, C. Baker, M. Wicks, and S. Blunt, "Radar spectrum engineering and management: Technical and Regulatory Issues," in *Proc. IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 85-102, Jan. 2015.
- [6] B. Paul, A. R. Chiriyath, and D. W. Bliss, "Survey of RF communications and sensing convergence research," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 252-270, Feb. 2017.
- [7] F. Liu, C. Masouros, A. Li, H. Sun, and L. Hanzo, "MU-MIMO communications with MIMO radar: From co-existence to joint transmission," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2755-2770, Apr. 2018.
- [8] D.-H. Kim and B. C. Jung, "Research trends and spectrum sharing techniques between radar and communication systems," *J. KIEES*, vol. 30, no. 6, pp. 54-65, Nov. 2019.
- [9] J. R. Guerci, R. M. Guerci, A. Lackpour, and D. Moskowitz, "Joint design and operation of shared spectrum access for radar and communications," in *Proc. IEEE RadarCon*, pp. 761-766, Arlington, Virginia, USA, May 2015.
- [10] A. Hassanien, M. G. Amin, Y. D. Zhang, F. Ahmad, and B. Himed, "Non-coherent PSK-based dual-function radar-communication systems," in *Proc. IEEE RadarConf*, pp. 1-6, Philadelphia, PA, USA, May 2016.
- [11] E. Boudaher, A. Hassanien, E. Aboutanois, and M. G. Amin, "Towards a dual-function MIMO radar-communication system," *Proc. IEEE Radar Conf. (RadarConf)*, pp. 1-6, Philadelphia, PA, USA, May 2016.
- [12] A. R. Chiriyath, B. Paul, and D. W. Bliss, "Radar-communications convergence: Coexistence, cooperation, and co-design," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 3, no 1, pp. 1-12, Mar. 2017.
- [13] F. Liu, C. Masouros, A. Li, H. Sun, and L. Hanzo, "MU-MIMO communications with MIMO radar: From co-existence to joint transmission," *IEEE Trans. Wireless commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2755-2770, Apr. 2018.
- [14] F. Liu, L. Zhou, C. Masouros, A. Li, W. Luo, and A. Petropulu, "Toward dual-functional radar-communication systems: Optimal waveform design," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 16, pp. 4264-4279, Aug. 2018.
- [15] F. Liu, C. Masouros, and H. Griffiths, "Dual-functional radar-communication waveform design under constant-modulus and orthogonality constraints," in *Proc. SSPD*, pp. 1-5, May 2019.
- [16] R. M. Mealey, "A method for calculating error probabilities in a radar communication system," *IEEE Trans. Space Electron. Telemetry*, vol. 9, pp. 37-42, Jun. 1963.
- [17] S. D. Blunt, M. R. Cook, and J. Stiles,

- “Embedding information into radar emissions via waveform implementation,” in *Proc. Int. Waveform Diversity and Design Conf.*, pp. 195-199, Niagara Falls, ON, Canada, Aug. 2010.
- [18] A. Hassaniien, M. G. Amin, Y. D. Zhang, and F. Ahmad, “Dual-function radar-communications: Information embedding using sidelobe control and waveform diversity,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 64, no. 8, pp. 2168-2181, Apr. 2016.
- [19] D. Gaglione, C. Clemente, C. V. Ilioudis, A. R. Persico, I. K. Proudler, and J. J. Soraghan, “Fractional Fourier based waveform for a joint radar-communication system,” in *Proc. IEEE RadarConf*, pp. 1-6, Philadelphia, PA, USA, May 2016.
- [20] A. Hassaniien, M. G. Amin, Y. D. Zhang, and F. Ahmad, “Signaling strategies for dual-function radar communications: An overview,” *IEEE Aerospace and Electron. Syst. Mag.*, vol. 31, pp. 36-45, Oct. 2016.
- [21] A. Hassaniien, M. G. Amin, Y. D. Zhang, and F. Ahmad, “Phase-modulation based dual-function radar-communications,” *IET Radar, Sonar Navig.*, vol. 10, pp.1411-1421, Oct. 2016.
- [22] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd Ed., McGraw-Hill, 2001.
- [23] G. N. Saddik, R. S. Singh, and E. R. Brown, “Ultra-wideband multifunctional communications/radar system,” *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 55, no. 7, pp. 1431-1437, Jul. 2007.
- [24] S. D. Blunt, P. Yatham, and J. Stiles, “Intrapulse radar-embedded communications,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 46, no. 3, pp. 1185-1200, Jul. 2010.
- [25] S. Yamasaki and K. Mizui, “A study on improvement of vehicle to vehicle communication and location system using spread spectrum technique,” *IEEE 9th ICACT*, pp. 2039-2044, Okamoto, Kobe, Japan, Feb. 2007.
- [26] M. Robertson and E. Brown, “Integrated radar and communications based on chirped spread-spectrum techniques,” *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Digest*, pp. 611-614, Philadelphia, PA, USA, Jun. 2003.
- [27] S. J. Xu, B. Chen, and P. Zhang, “Radar-communication integration based on DSSS techniques,” *IEEE 8th Int. Conf. Signal Proc.*, pp. 1-4, Beijing, China, Nov. 2006.
- [28] S. J. Xu, Y. Chen, and P. Zhang, “Integrated radar and communication based on DS-UWB,” *Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals*, pp. 142-144, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2006.
- [29] Y. Xie, R. Tao, and T. Wang, “Method of waveform design for radar and communication integrated system based on CSS,” *2011 Int. Conf. Instru., Meas., Computer, Commun. and Control*, pp. 737-739, Beijing, China, Oct. 2011.
- [30] B. J. Donnet and I. D. Longstaff, “Combining MIMO radar with OFDM communications,” *3rd Eur. Radar Conf.*, pp. 37-40, Manchester, UK, Sep. 2006.
- [31] C. Sturm, T. Zwick, and W. Wiesbeck, “Performance verification of symbol-based OFDM radar processing,” *IEEE RadarConf*, pp. 60-63, Washington DC, USA, May 2010.
- [32] C. Sturm and T. Zwick, “Joint radar sensing and communications based on OFDM signals for intelligent networks,” *LS Telecom Summit*, pp. 1-4, Lichtenau, Germany, Jun. 2010.
- [33] C. Sturm and W. Wiesbeck, “Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing,” in *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 7, pp. 1236-1259, Jul. 2011.
- [34] Y. L. Sit, C. Sturm, L. Reichardt, T. Zwick, and W. Wiesbeck, “The OFDM joint radar-communication system: an overview,” *3rd Int. Conf. Advances in Satellite and Space Commun.*, pp. 69-74, Budapest, Hungary, Apr. 2011.
- [35] Y. L. Sit, L. Reichardt, C. Sturm, and T. Zwick, “Extension of the OFDM joint radar-communication system for a multipath,

- multiuser scenario,” *IEEE RadarConf*, pp. 718-723, Kansas City, MO, USA, May 2011.
- [36] Y. L. Sit, C. Sturm, and T. Zwick, “Interference cancellation for dynamic range improvement in an OFDM joint radar and communication system,” *8th European Radar Conf.*, pp. 333-336, Manchester, UK, Oct. 2011.
- [37] Y. L. Sit, C. Sturm, and T. Zwick, “One-stage selective interference cancellation for the OFDM joint radar-communication system,” *7th German Microwave Conf., Ilmenau*, pp. 1-4, Ilmenau, Germany, Mar. 2012.
- [38] M. Bica, K. W. Huang, V. Koivunen, and U. Mitra, “Mutual information based radar waveform design for joint radar and communication systems,” *IEEE ICASSP*, pp. 3671-3675, Shanghai, China, Mar. 2016.
- [39] Y. J. Liu, G. S. Liao, J. W. Xu, Z. Yang, and Y. Zhang, “Adaptive OFDM integrated radar and communications waveform design based on information theory,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 10, pp. 2174-2177, Jul. 2017.
- [40] J. Ellinger, Z. P. Zhang, Z. Q. Wu, and M. C. Wicks, “Dual-use multicarrier waveform for radar detection and communication,” *IEEE Trans. Aero. and Electron. Systems*, vol. 54, no. 3, pp. 1265-1278, Jun. 2018.
- [41] G. E. A. Franken, H. Nilookar, and P. V. Genderen, “Doppler tolerance of OFDM-coded radar signal,” *3rd Eur. Radar Conf.*, pp. 108-111, Manchester, UK, Sep. 2006.
- [42] C. Sturm, T. Zwick, and W. Wiesbeck, “An OFDM system concept for joint radar and communications operations,” *IEEE 69th Veh. Technol. Conf.*, pp. 1-5, Barcelona, Spain, Apr. 2009.
- [43] Y. Zhang, Q. Y. Li, L. Huang, and J. Song, “Waveform design for joint radar-communication system with multi-user based on MIMO radar,” *IEEE RadarConf*, pp. 415-418, Seattle, WA, USA, May 2017.
- [44] Y. L. Sit and T. Zwick, “MIMO OFDM radar with communication and interference cancellation features,” *IEEE RadarConf*, pp. 265-268, Cincinnati, OH, USA, May 2014.
- [45] Y. J. Liu, G. S. Liao, and Z. W. Yang, “Range and angle estimation for MIMO-OFDM integrated radar and communication systems,” *CIE Int. Conf. Radar(RADAR)*, pp. 1-4, Guangzhou, China, Oct. 2016.
- [46] Y. L. Sit, B. Nuss, S. Basak, M. Orzol, and T. Zwick, “Demonstration of interference cancellation in a multiple-user access OFDM MIMO radar-communication network using USRPs,” *IEEE MTT-S Int. Conf. Microw. for Intell. Mobility*, pp. 1-4, San Diego, CA, USA, May 2016.
- [47] T. Bai, H. Y. Hu, and X. Y. Song, “OFDM MIMO radar waveform design with high range resolution and low sidelobe level,” *IEEE 17th ICCT*, pp. 1065-1069, Chengdu, China, Oct. 2017.
- [48] Y. J. Liu, G. S. Liao, Z. W. Yang, and J. W. Xu, “Design of integrated radar and communication system based on MIMO-OFDM waveform,” *J. Syst. Eng. and Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 265-268, Sep. 2017.
- [49] Y. L. Sit, B. Nuss, and T. Zwick, “On mutual interference cancellation in a MIMO OFDM multi-user radar-communication network,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 4, pp. 3339-3348, Apr. 2018.
- [50] Z. Feng, X. Fang, Z. Wei, X. Chen, Z. Quan, and D. Ji, “Joint radar and communication: A survey,” *China Commun.*, vol. 17, no. 1, pp. 1-27, Jan. 2020.
- [51] Y. Han, E. Ekici, H. Kremono, and O. Altintas, “Optimal spectrum utilization in joint automotive radar and communication networks,” *14th Int. Symp. Modeling and Optim. in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Netw.(WiOpt)*, pp. 1-8, Tempe, AZ, USA, May 2016.
- [52] R. C. Daniels, E. R. Yeh, and R. W. Heath, “Forward collision vehicular radar with IEEE 802.11: Feasibility demonstration through measurements,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 2, pp. 1404-1406, Feb. 2018.
- [53] P. Kumari, J. Choi, N. G. Prelcic, and R. W.

- Heath, "IEEE 802.11ad-based radar: An approach to joint vehicular communication-radar system," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 4, pp. 3012-3027, Apr. 2018.
- [54] L. Han and K. Wu, "Multifunctional transceiver for future intelligent transportation systems," *IEEE Trans. Microw. Theory and Techniques*, vol. 59, no. 7, pp. 1879-1892, May 2011.
- [55] J. Moghaddasi and K. Wu, "Multifunctional transceiver for future radar sensing and radio communicating data-fusion platform," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 818-828, Feb. 2016.
- [56] H. Wymeersch, G. Seco-Granados, G. Destino, D. Dardari, and F. Tufvesson, "5G mmWave positioning for vehicular networks," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 6, pp. 80-86, Dec. 2017.
- [57] C. Yang and H. R. Shao, "WiFi-based indoor positioning," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, no. 3, pp. 150-157, Mar. 2015.
- [58] X. F. Shi, C. Q. Yang, W. G. Xie, C. Liang, Z. G. Shi, and J. M. Chen, "Anti-Drone system with multiple surveillance technologies: Architecture, implementation, and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 4, pp. 68-74, Apr. 2018.
- [59] A. Ryan, M. Zennaro, A. Howell, R. Sengupta, and J. K. Hedrick, "An overview of emerging results in cooperative UAV control," *43rd IEEE CDC*, vol. 1, pp. 602-607, Dec. 2004.
- [60] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communication with unmanned aerial vehicle: Opportunities and challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, May 2016.
- [61] D. W. Bliss, "Cooperative radar and communications signaling: The estimation and information theory odd couple," *IEEE Radar Conf.*, pp. 50-55, Cincinnati, OH, USA, May 2014.
- [62] P. K. Hughes and J. Y. Choe, "Overview of advanced multifunction RF system (AMRFS)," *IEEE Int. Conf. Phased Array Syst. and Technol.*, pp. 21-24, Dana Point, CA, USA, May 2000.
- [63] G. C. Tavik, et al., "The advanced multifunction RF concept," *IEEE Trans. Microw. Theory Technol.*, vol. 53, no. 3, pp. 1009-1020, Mar. 2005.
- [64] R. B. Marcum, R. V. Kurtz, T. G. Little, and A. E. Pettai, "The PAVE PACE integrated RF architecture for next generation avionics," *IEEE National Aeros. and Electronics Conf.*, pp. 226-232, Dayton, OH, USA, May 1992.
- [65] S. Winkler, S. Zeadally, and K. Evans, "Privacy and civilian drone use: The need for further regulation," *IEEE Secur. Privacy*, vol. 16, no. 5, pp. 72-80, Sep. 2018.
- [66] S. Zhang, H. Zhang, B. Di, and L. Song, "Cellular UAV-to-X communications: Design and optimization for multi-UAV networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 18, no. 2, pp. 1346-1359, Feb. 2019.

김 동 환 (Dong-Hwan Kim)



2005년 2월 : 아주대학교 전자공학부 (공학사)
 2007년 2월 : 서울대학교 전기 및 컴퓨터공학부 (공학석사)
 2007년 2월~현재 : 국방과학연구소 선임연구원
 2016년 3월~현재 : 충남대학교 전자전파정보통신공학과 박사과정

<관심분야> AESA Radar System Design, Radar Signal Processing, Array Processing Algorithm, Spectrum Sharing between Radar and Wireless Communications

[ORCID:0000-0002-2089-4318]

정 방 철 (Bang Chul Jung)



12002년 2월 : 아주대학교 전자
공학부 (공학사)

2004년 8월 : 한국과학기술원 전
자전산학과 (공학석사)

2008년 2월 : 한국과학기술원 전
자전산학과 (공학박사)

2008년 3월~2009년 8월 : 한국
과학기술원 IT 융합연구소 팀장

2009년 9월~2010년 2월 : 한국과학기술원 IT 융합연구
소 연구교수

2010년 3월~2014년 2월 : 경상대학교 정보통신공학과
조교수

2014년 3월~2015년 8월 : 경상대학교 정보통신공학과
부교수

2015년 9월~현재 : 충남대학교 전자공학과 정교수

<관심분야> Wireless Communication, Stochastic
Signal Processing, Information Theory,
Compressed Sensing, Mobile Communication,
Spectrum Sharing

[ORCID:0000-0002-4485-9592]