

# MIMO OFDM 펄스 레이더-통신에서 부반송파 할당 방식에 따른 정보 전달률 및 파라미터 추정 성능 분석

이종혁\*, 서지호\*, 박재현°, 황성현\*\*, 변우진\*\*

## Analysis of Achievable Information Rate and Parameter Estimation Performances According to Subcarrier Allocation Methods in MIMO OFDM Pulse Radar-Communication

Jonghyeok Lee\*, Jiho Seo\*, Jaehyun Park°, Sunghyun Hwang\*\*, Woo-Jin Byun\*\*

### 요약

본 논문은 정보 전달과 목표물의 방위각 추정을 동시에 수행하는 Multiple Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MIMO OFDM) 펄스 레이더 통신 환경을 고려한다. MIMO 펄스 레이더에서는 방위각 추정 분해능을 높이기 위해서 가상배열 안테나 구축을 위해 각 안테나에서 송신되는 파형을 서로 직교하도록 설계한다. 즉, 각 안테나 별로 부반송파를 직교하도록 할당하여 파형을 전송할 수 있다. 반면, 통신을 위해서는 각 송신단과 수신단 사이의 채널 이득에 따라 부반송파를 할당할 수 있다. 본 논문에서는 통신과 레이더의 성능을 각 송신 안테나에 OFDM 부반송파를 할당하는 방법에 따른 정보 전송률과 방위각 추정 오차를 분석하였다. 또한, 이를 바탕으로 최적의 부반송파 할당 기법을 제안한다. 직교한 송신신호를 통해 가상 배열안테나를 구축하여 이를 바탕으로 Multiple Signal Classification (MUSIC) 알고리즘을 적용하여 방위각을 추정하며, 각 부반송파 별 통신 채널의 이득을 바탕으로 Achievable rate를 유도할 수 있다. 모의실험을 통해 제안한 OFDM 부반송파 할당 기법의 Achievable rate과 방위각 추정 Mean Square Error(MSE) 성능들을 검증하였다.

**Key Words** : OFDM MIMO Pulse Radar, Radar Communication (RadCom), Subcarrier Allocation

### ABSTRACT

In this paper, we consider Multiple Input Multiple Output Orthogonal Frequency Division Multiplexing (MIMO OFDM) pulse radar communication (RadCom) system in which the information transfer and the estimation of target azimuth angles are simultaneously performed. In the MIMO pulse radar, the waveforms transmitted from each antenna are designed to be orthogonal to each other in order to construct a virtual array antenna for high azimuth estimation resolution. That is, subcarriers may be orthogonally allocated to each antenna to transmit a waveform orthogonally. On the other hand, subcarriers can be adaptively allocated according to the channel gain between each transmitter and receiver for communication. In this paper, we analyze the performance of

※ 이 논문의 일부는 2019년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2018R1D1A1B07043786). 또한 일부는 한국전자통신연구원 연구운영지원사업의 일환으로 수행되었음. [19ZR1300, 자율주행 자동차를 위한 주야/전천후 비디오 SAR 기술 연구]

♦ First Author : Pukyong National University, Department of Electronics Engineering, 학생회원

° Corresponding Author : Pukyong National University, Department of Electronics Engineering, jaehyun@pknu.ac.kr, 정회원

\* Pukyong National University, Department of Electronics Engineering

\*\* Radio Resource Research Group, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

논문번호 : 201903-033-C-RN, Received March 27, 2019; Revised May 15, 2019; Accepted May 23, 2019

communication and radar (in terms of achievable rate and angle estimation error) in MIMO OFDM pulse RadCom and propose the subcarrier allocation methods. By constructing a virtual array antenna, Multiple Signal Classification (MUSIC) algorithm can be applied to estimate the azimuth angle, and the achievable rate can be derived based on the gain of the communication channel for each subcarrier. We also verify the achievable rate and the mean square error (MSE) of the proposed OFDM subcarrier allocation methods through the simulations.

## 1. 서 론

OFDM 통신 기법은 높은 정보 전송률과 낮은 구현 복잡도 등의 장점들로 인해 오늘날 대부분의 통신 시스템에 적용되어 왔다<sup>[1-3]</sup>. 최근 OFDM의 분해능 및 간단한 구현 방식의 장점들로 인해, 전방 목표물의 파라미터들(거리, 속도, 방위각 등)을 추정하는 레이더 시스템에도 적용되었다<sup>[4,5]</sup>. 동일한 OFDM 파형을 이용하기 때문에, OFDM 기반의 통신 및 레이더 시스템을 통합하는 연구도 최근에 활발히 진행되고 있다. 즉, 그림 1과 같이 OFDM 펄스 레이더는 OFDM signal을 사용하여 다수의 목표물의 거리, 속도 정보를 얻을 수 있는 레이더 시스템이며 동시에 OFDM signal에 Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)와 같은 phase code가 적용된 symbol을 실어 목표 수신기에게 정보를 전달하는 역할도 가능하다.

최근 자율 주행 자동차의 개발이 활발해짐에 따라 차량 간 통신과 차량용 레이더의 중요성이 대두되고 두 시스템 모두 유사한 대역의 RF신호를 활용함에 따라 이 두 기능을 결합한 Radar and Communication (RadCom) ([6-10] and references therein) 기술이 주목을 받고 있다. 자율 주행 차량들은 서로 간의 정보의 교환으로 도로의 상황을 분석하고 인접한 차량과의 거리와 상대 속도를 확인하여 안전성을 확보할 수 있다. 즉, 높은 정보 전송속도를 내는 동시에 정확한 파라미터 추정이 가능하기 때문에 RadCom의 대표적인 후보로써 OFDM 펄스 RadCom 기술이 주목받고 있다. 하지만 단일 안테나 기반의 OFDM 시스템은 정보 전송이나 파라미터 추정 관점에서 성능의 한계를 가지고 있다. 기존 대부분의 연구는 단일 안테나 기반

의 시스템에서 OFDM 통신과 레이더의 접목에 초점을 두고 성능 분석을 진행하였다.

본 논문에서는 다중안테나 기반의 정보 전송과 목표물의 파라미터를 동시에 추정하는 MIMO OFDM 펄스 RadCom을 고려하고 있다. 일반적으로 MIMO 펄스 레이더에서는 방위각 추정 분해능을 높이기 위해서 각 안테나에서 송신되는 파형을 서로 직교하도록 가상배열 안테나를 구축한다. 즉, MIMO OFDM 레이더 관점에서 각 안테나 별로 부반송파를 직교하도록 할당하여 파형을 전송할 수 있다. 반면, MIMO OFDM 통신 시스템에서는 전송 속도를 높이기 위해 다중안테나 기반 MIMO 기법을 적용할 수 있다. 하지만 가상배열 안테나를 형성하는 레이더 기능을 수행하기 위한 MIMO OFDM 레이더와의 결합에서는 기존의 MIMO OFDM 기술을 활용할 수 없다. 따라서 본 논문에서는 각 안테나별로 직교한 부반송파를 할당하여 전송하는 MIMO OFDM 통신환경을 가정한다. 이러한 시스템에서 통신 관점에서의 성능(말하자면, 정보 전송속도) 개선을 위해 각 송신단과 수신단 사이의 채널 이득에 따라 부반송파를 할당하는 기법을 제안한다. 하지만 이러한 부반송파 할당기법은 레이더 성능에도 영향을 미치기 때문에 본 논문에서는 이러한 부반송파 할당 방식에 따른 MIMO OFDM RadCom의 각각의 성능들을 분석하였다. 특히, MIMO OFDM RadCom에서 다중안테나 활용과 직접적으로 연관된 목표물 파라미터로써 방위각 정보를 추정하는 시스템을 고려하였으며, 방위각 추정 알고리즘은 MUSIC<sup>[11]</sup> 기반의 추정방식을 활용하였다.

이 논문의 2장에서는 본 논문에서 사용한 시스템 모델을 소개한다. 3장에서는 통신 측면에서의 성능인 정보 전송률과 레이더 측면에서의 성능인 파라미터 추정 성능에 대해 설명한다. 또한 MUSIC 기반 추정 알고리즘을 소개한다. 4장에서는 부반송파를 할당하는 방법들을 설명하고 5장에서는 시뮬레이션 결과들을 논의하며, 6장에서는 결론을 맺는다.

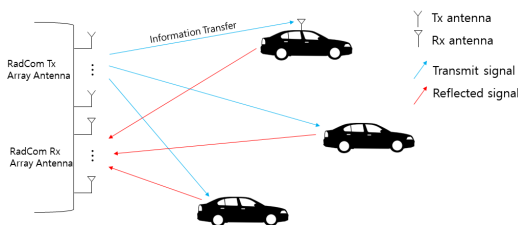


Fig. 1. RadCom system with multiple antennas

## II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템은 그림 1과 같이 다중 안테나 기반 OFDM 펄스 RadCom 송신기가 있으며, 전방에 이를 수신하여 정보를 전달받는 정보 수신기가 있다. 이 정보 수신기의 수신 안테나 개수는 1개로 가정하였다.<sup>1)</sup> 또한 OFDM 펄스 RadCom 송신기와 동일한 위치에 OFDM 펄스 레이더 수신기가 있어 전방의 여러 목표물에 부딪혀서 돌아온 OFDM 펄스를 수신하여 이를 바탕으로 전방 목표물의 방위각을 추정하는 시스템을 고려한다. 이때 OFDM 펄스 레이더 수신기는  $M_t$  개의 수신안테나를 가진다고 가정한다. 레이더 관점에서는 Collocated MIMO 안테나를 사용하였고 송신안테나와 수신안테나가 가상의 선형 배열안테나가 되도록 배치하였다. 즉 가상의 선형 배열안테나의 원소 수는  $M_t \times M_r$  개로써 구성할 수 있으며, 이를 위해서는 각 송신단의 안테나에서 전송되는 파형들이 서로 직교해야 하는 조건을 만족해야 한다. OFDM signal을 사용하는 시스템에서 직교한 송신 파형을 설계하기 위해 각 송신 안테나에 서로 다른 OFDM 부반송파를 할당할 수 있다. 즉, OFDM 펄스 RadCom 송신기의  $m_t$  번째 안테나에서 송신되는 송신 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_{m_t}(t) = \sum_{n=1}^N I_{m_t}[n] a_{m_t}[n] e^{j2\pi(f_c + (n-1)\Delta f)t}, m_t = 1, \dots, M_t \quad (1)$$

여기서 OFDM 심볼은 총  $N$ 개의 부반송파로 이루어져 있으며,  $a_{m_t}[n] \left( E[|a_{m_t}[n]|^2] = \frac{P_t}{N} \right)$ 는  $m_t$  번째 송신 안테나의  $n$  번째 부반송파를 통해 전달될 정보가 실린 Quadrature Amplitude Modulation (QAM) 심볼을 가리킨다.  $I_{m_t}[n]$ 는 Indicator 변수로써  $m_t$  번째 안테나가  $n$  번째 부반송파를 할당 받으면 1, 그렇지 않으면 0의 값을 가지는 변수이다.  $\Delta f$ 는 부반송파의 간격을 뜻한다.

OFDM 정보 수신기 주변의 Scatterer들의 영향으로 송신신호는 다중 경로를 거쳐 OFDM 정보 수신기로 수신된다. 이때 수신신호는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$r(t) = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m_t=1}^{M_t} h_{m_t}(l) s_{m_t}(t - \tau_{m_t,l}) + n(t) \quad (2)$$

여기서  $h_{m_t}(l)$  및  $\tau_{m_t,l}$ 는 각각  $m_t$  번째 송신 안테나에서 수신 안테나 사이의  $l$  번째 다중 경로의 채널 이득 및 시간 지연을 나타내며,  $n(t)$ 는 Additive White Gaussian Noise (AWGN)를 나타낸다. 그리고 RF단 이후의 ADC를 통해  $T_S$ 마다 샘플링한 후 CP 제거 및 FFT 프로세스를 거칠 경우, 각 부반송파 별로 Flat fading의 채널을 겪게 되므로  $n$  번째 부반송파에서의 수신된 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r[n] = \sum_{m_t=1}^{M_t} H_{m_t}[n] I_{m_t}[n] a_{m_t}[n] + n[n] \quad (3)$$

참고로  $H_{m_t} = [H_{m_t}[1], \dots, H_{m_t}[N]]$ 는  $m_t$  번째 송신 안테나에서 수신 안테나 사이의 각 부반송파에서의 주파수 도메인에서의 채널이득을 벡터로 나타낸 것이며, 이는 다중 경로  $h_{m_t}(t) = \sum_{l=0}^{L-1} h_{m_t}(l) \delta(t - \tau_{m_t,l})$ 을 이산 시간도메인에서 DFT를 통해 획득할 수 있다. 본 논문에서는 채널 정보  $H_{m_t}$ 를 송신단에서 완벽하고 알고 있는 perfect Channel State Information at the Transmitter (CSIT)를 가정하고 있다. 본 논문에서는  $E[n[n]^2] = 1, n = 1, \dots, N$ 로 가정한다.

OFDM 펄스 레이더 수신기에 수신 되는 신호의 경우 송신 신호가 목표물에 반사되어 돌아오기 까지 두 번의 경로 손실로 인한 감쇠를 겪는다. 따라서 Multi-path 성분 중 Line of sight(LOS)에 해당하는 신호 성분을 제외한 성분은 신호의 크기가 매우 작아 무시할 수 있다. 따라서 전방에  $K$ 개의 목표물에 반사되어  $m_r$  번째 수신안테나에 수신되는 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_{m_r}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{m_t=1}^{M_t} \gamma_k s_{m_t}(t - \tau_{m_r,m_t,k}) \quad (4)$$

여기서  $\gamma_k$ 는  $k$  번째 목표물의 반사이득계수이고  $\tau_{m_r,m_t,k}$ 는 신호가 송신안테나에서 목표물, 그리고 수신안테나까지 도달하는데 걸린 지연시간으로 송신안테나와 수신안테나를 간격  $d$ 를 가지는 가상의 선형 배열 안테나로 적절히 배치하여 파형을 송수신하는 형태로 변환할 수 있다. 이때  $\tau_{m_r,m_t,k}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

1) 참고로 본 논문에서는 RadCom관점에서의 부반송파 할당에 따른 성능을 분석하기 때문에 이러한 연구 결과는 일반적인 다중안테나로 쉽게 확장이 가능하다.

$$\tau_{m_n k} = \tau_{0k} + \frac{2}{c}(d(m-1)\sin\theta_k) \quad (5)$$

여기서  $m = M_t(m_r - 1) + m_t$ ,  $\tau_{0k} = \frac{2R_{0k}}{c}$  이고  $R_{0k}$  는 가상배열안테나의 기준 안테나 원소에서  $k$  번째 목표물까지 떨어진 거리를 나타낸다.  $\theta_k$  는  $k$  번째 목표물의 방위각 정보를 나타낸다. 이때 각 송신안테나에서 송신한 OFDM 파형은 서로 직교한 부반송파를 할당 받아 전송하였기 때문에, 수신 신호를  $T_s$  마다 샘플링한 뒤, Fast Fourier Transform (FFT)를 취하면  $m (= M_t(m_r - 1) + m_t)$  번째 가상안테나에서 수신되는 신호를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_m[\bar{n}_{m_t}] = \sum_{k=1}^K \gamma_k a_{m_t}[\bar{n}_{m_t}] e^{j2\pi \frac{R_{0k}}{\lambda}} e^{j\frac{4\pi}{\lambda} d(m-1)\sin\theta_k} + n[\bar{n}_{m_t}] \quad (6)$$

여기서  $\bar{n}_{m_t}$  는  $m_t$  번째 송신안테나가 할당받은 부반송파 인덱스를 나타내며 할당받은 부반송파의 개수를  $Card(\bar{n}_{m_t}) = \bar{N}_{m_t}$  이라 두자. 그러면 가상배열안테나 조건을 만족하기 위해 각각의 송신안테나는 직교하도록 부반송파를 할당받았기 때문에  $\sum_{m_t=1}^{M_t} \bar{N}_{m_t} = N$  을 만족한다.

### III. RadCom의 정보 전송기법 및 목표물 방위각 추정 기법

#### 3.1 정보 전송 기법 및 성능

RadCom에서 가상 배열 안테나 기반 레이더 기법을 적용하기 위해 각 송신안테나에서 서로 직교한 부반송파를 할당 받아야 한다. 따라서 정보 전송을 위해 각 안테나에 할당받은 부반송파에 QAM signaling 및 채널 코딩을 적용하여 정보를 송신할 수 있다. 이때 OFDM 정보 수신기로서 각 부반송파별 수신신호는 수식 (3)과 같이 주어지므로 Achievable rate는 다음과 같이 주어진다.

$$R(\text{bps}/\text{Hz}) = \sum_{n=1}^N \log_2 \left( 1 + \frac{P|H_{m_t}[n]|^2}{N} \right) \quad (7)$$

여기서  $\bar{m}_t$  는 송신 파형의  $n$  번째 부반송파에서 선택된 송신 안테나 인덱스를 나타낸다. 즉, 각 송신안테나와 정보 수신 안테나 사이의 채널 이득은 부반송

파 별로 달라지는데, 정보 전송 관점에서는 각 부반송파에서 이 채널 이득이 최대가 되는 안테나를 선택하여 전송하는 것이 유리하다. 자세한 부반송파 선택기법은 4절에서 논의한다.

#### 3.2 목표물 방위각 추정 기법 및 성능

RadCom의 수신기의 각 가상안테나 인덱스에서 수신되는 신호는 수식 (6)과 같이 주어지고, 이때 정보가 실린  $a_{m_t}[\bar{n}_{m_t}]$  는 RadCom 수신기에서 알 수 있기 때문에 다음과 같은 신호를 획득할 수 있다.

$$y_m[\bar{n}_{m_t}] = \frac{r_m[\bar{n}_{m_t}]}{a_{m_t}[\bar{n}_{m_t}]} = \sum_{k=1}^K \gamma_k e^{j2\pi \frac{R_{0k}}{\lambda}} e^{j\frac{4\pi}{\lambda} d(m-1)\sin\theta_k} + n'[\bar{n}_{m_t}] \quad (8)$$

즉 각 송신안테나에서 할당받은 부반송파의 개수에 비례하여 (8)과 같은 수신 신호 샘플을 획득할 수 있다. 따라서  $\bar{N} = \min_{m_t=1, \dots, M_t} \bar{N}_{m_t}$  로 둔다면 수식(8)을 다음과 같은 벡터 형태로 정렬할 수 있다.

$$\mathbf{y}[\bar{n}] = \sum_{k=1}^K \gamma_k \mathbf{a}(\theta_k) e^{j2\pi \frac{R_{0k}}{\lambda}} + \mathbf{n}'[\bar{n}], \bar{n} = 1, \dots, \bar{N} \quad (9)$$

여기서  $\mathbf{a}(\theta_k)$  는 배열응답벡터를 나타내며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{a}(\theta_k) = \left[ 1 \ e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} d \sin\theta_k} \dots e^{-j\frac{4\pi}{\lambda} (M-1) d \sin\theta_k} \right]^T \quad (10)$$

수식 (9)의 신호를 바탕으로 MUSIC을 적용하기 위해 다음과 같이 Sample Covariance matrix를 계산할 수 있다.

$$\mathbf{R}_{yy} = \frac{1}{N} \mathbf{y} \mathbf{y}^H = \begin{bmatrix} \sum_s & 0 \\ 0 & \sum_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{E}_s & \mathbf{E}_n \\ \mathbf{E}_s & \mathbf{E}_n \end{bmatrix}^H \quad (11)$$

$\mathbf{R}_{yy}$  는  $y$  의 Covariance matrix 이고  $\mathbf{E}_n$  은 noise subspace에 해당하는 Eigen vector이다. 이를 이용해 다음의 비용함수를 정의하자.

$$J(\theta) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (12)$$

$\mathbf{E}_n$  은 목표물에 해당하는  $\mathbf{a}(\theta_k)$  와 직교하기 때문에 추정하고자 하는 목표물의 방위각  $\hat{\theta}_k$  는  $J(\theta)$  의  $k$  개의 peak 지점에 해당하는 방위각이 된다. 이때 수식(9)는

Coherent 신호의 합으로 표현되기 때문에 이를 해결하기 위해 공간적 Smoothing을 함께 적용할 수 있다. 또한 방위각 추정 성능 기준으로 다음과 같은 평균제곱오차 MSE를 활용한다.

$$MSE = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K (\hat{\theta}_k - \theta_k)^2 \quad (13)$$

#### IV. 부반송파 할당 방법

RadCom에서 가상배열안테나 구조를 가져가기 위해서는 송신 안테나가 할당받는 채널(또는 부반송파)은 서로 직교하도록 설계되어야 한다. 따라서 정보 전송 관점에서는 수식 (7)의 전송률이 최대가 되도록 하기 위해  $n$ 번째 부반송파에서 선택된 송신 안테나 인덱스  $\bar{m}_i$ 를 다음과 같이 선택하여 부반송파를 할당한다.

$$\bar{m}_i = \arg_{m_i} \max |H_{m_i}[n]| \quad (14)$$

본 논문에서는 이러한 부반송파 할당 방식을 Rate-maximizing subcarrier allocation 방식으로 칭한다. 하지만 이 경우 각 안테나마다 할당 받은 부반송파의 개수가 불균일하여 수식 (9)의 가상 배열 안테나 기반 수신 신호 샘플 수가 적어진다. 즉 MUSIC 기반의 방위각 추정 성능 저하(즉, 방위각 MSE 증가)를 유발한다.

목표물 파라미터 추정 성능을 개선시키기 위해서는 각 송신 안테나 별로 균일한 개수의 부반송파를 할당하여 OFDM 파형을 전송하는 것이 유리하다. 즉  $N = \frac{N}{M_i}$ 을 정수라 가정하면,  $m_i$ 번째 안테나가 할당 받은 부반송파를 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$\bar{n}_{m_i} \in SC_{m_i} = \{m_i, m_i + M_i, \dots, m_i + M_i, \dots, N - M_i + m_i\} \quad (15)$$

이 경우 가상 배열 안테나 기반 수신 신호 샘플 수는  $\bar{N} = \min_{m_i=1, \dots, M_i} \bar{N}_{m_i} = N$ 로 최대가 된다. 이를 Regularly fixed subcarrier allocation 방식으로 칭한다.

하지만 Regularly fixed subcarrier allocation 방식의 경우 정보 전송률 최적화를 고려하고 있지 않기에, 정보 전송률은 Rate-maximizing subcarrier

allocation 방식에 비해서 적을 수 있다. 이를 극복하기 위해 본 논문에서는 정보 전송률과 목표물 추정 성능을 동시에 추구하는 부반송파 할당방식을 제안한다. 기본적인 접근 방식은 송신안테나마다 동일한 부반송파를 균일하게 할당한 뒤  $N \times \alpha\%$ 의 부반송파에 한해서 수식 (14)와 같이 채널이득이 최대가 되는 안테나로 선택하도록 변경한다. 이때 송신 안테나 인덱스를 변경할 부반송파는 송신안테나를 변경했을 때 전송률 개선이 가장 큰 순서 즉, 변경 시 채널이득의 차이가 가장 큰 것부터 순차적으로 변경한다. 이를 구체적으로 Algorithm 1에 정리하였다.

#### Algorithm 1. Adaptive subcarrier allocation method

```

1. Initialize the subcarrier indices for the  $m_i$ th antenna as (15).
2. Compute  $D[n] = \max_{i \neq j} |H_i[n]| - |H_j[n]|$  for  $n = 1, \dots, N$  and sort it as  $D[\bar{n}(n)]$  in descending order.2)
   For  $n = 1, \dots, \lceil N \times \alpha\% \rceil$ 
3. By letting  $\bar{m}_i = \arg_{m_i} \max |H_i[\bar{n}(n)]|$  for the subcarrier index  $\bar{n}(n)$ , if  $\bar{n}(n)$  is not included in  $SC_{m_i}$ , move it to  $SC_{m_i}$ .
end
    
```

참고로 Rate-maximizing subcarrier allocation 기법은  $\alpha = 100\%$ 을 가지는 알고리즘 1의 특수한 경우로 생각할 수 있으며, Regularly fixed subcarrier allocation 방식은  $\alpha = 0\%$ 을 가지는 알고리즘 1의 특수한 경우로 생각할 수 있다. 이때 여러 채널 환경에 따라 전송속도의 저하를 감수하고 추정 성능 개선을 증대시킬 수 있는 적절한  $\alpha$ 를 선택할 수 있다.

#### V. 모의실험 결과

본 절에서는 제안하는 부반송파 할당 방식의 성능을 검증하기 위해 Monte-Carlo 모의실험을 수행하였다. 본 논문의 모의실험에서는 2개의 Tx antenna와 6개의 Rx antenna를 사용하였다. Multi-path에 의한 frequency selective channel을 사용하였고 OFDM의 부반송파 개수( $N$ )는 512개를 가정하였다.  $f_c = 77 GHz$ 이고 대역폭은  $256 MHz$  그리고  $\Delta f = 500 kHz$ 로 두었다.

2) That is,  $\bar{n}(n)$  is the subcarrier index associated with the  $n$ th largest value among  $D[n]$ .

Fig 2와 3에서 4절에서 논의한 세 가지 방식의 부반송파 할당 방식에 따른 Achievable rate과 추정한 방위각 MSE curve를 비교하였다. 여기서 목표물의 개수는 2개이며, Multi-path의 개수는 6개가 있다고 가정하였다. 알고리즘 1에서  $\alpha = 20\%, 40\%$ 으로 설정하였다.

그림 2에서 확인할 수 있듯이 Rate-maximizing subcarrier allocation방식이 가장 높은 전송속도 (Achievable rate)를 보이는 것을 확인할 수 있다. 반면에, Regularly fixed subcarrier allocation방식은 가장 낮은 전송속도를 나타내고 있다. 또한 그림 3의 목표물 방위각 추정오차를 보면 Rate-maximizing subcarrier allocation방식이 가장 높은 MSE를 가지고, Regularly fixed subcarrier allocation방식이 가장 적은 MSE를 가지는 것을 확인할 수 있다. 그리고 Adaptive subcarrier allocation method의 성능 역시  $\alpha$ 에 따라 달라짐을 확인할 수 있는데,  $\alpha = 40\%$ 의 경우 전송속도는 Rate-maximizing subcarrier allocation방식과 비슷한 성능을 내는 반면, MSE는 더욱 개선된

것을 확인할 수 있다.  $\alpha = 20\%$ 의 경우에도 전송 속도는 Rate-maximizing subcarrier allocation방식에 비해 약간의 성능 저하가 발생하지만, MSE는 크게 개선된 것을 확인할 수 있다.

Fig 4와 5에서는 위의 모의실험 환경과 동일하게 두고 Multi-path의 개수만 2개로 줄였을 때의 성능을 비교하였다. 전반적인 경향성은 그림 2와 그림 3과 유사하게 나타났다. 하지만 다중경로의 감소로 인해 전체적인 수신 전력의 감쇠가 나타나 전송속도의 감소를 확인할 수 있으며, 부반송파 별 채널 변화가 적게 나타나기 때문에 각 안테나별로 할당받는 부반송파의 개수가 불균일할 가능성이 높다. 이에 따라 Rate-maximizing subcarrier allocation방식이 Regularly fixed subcarrier allocation방식에 비해 MSE의 성능저하가 상대적으로 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 하지만 본 논문에서 제안하는 Adaptive subcarrier allocation method방식을 통해  $\alpha$ 를 적절히 조절함으로써, 원하는 전송속도와 MSE성능 간의 균형을 맞출 수 있음을 확인할 수 있다.

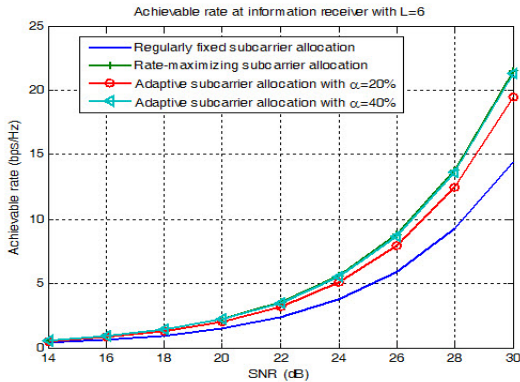


Fig. 2. Achievable rate at information receiver when L=6

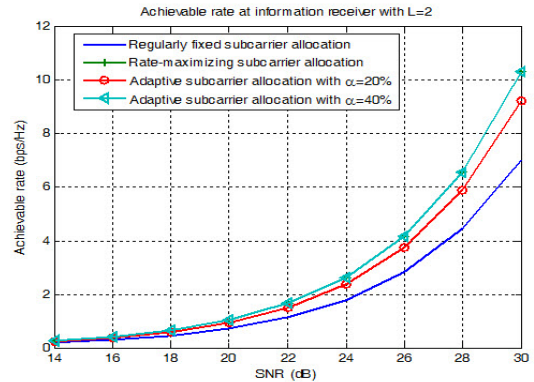


Fig. 4. Achievable rate at information receiver when L=2

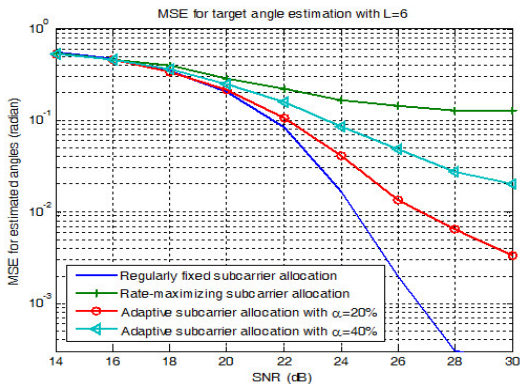


Fig. 3. MSE curve for target angle estimation when L=6

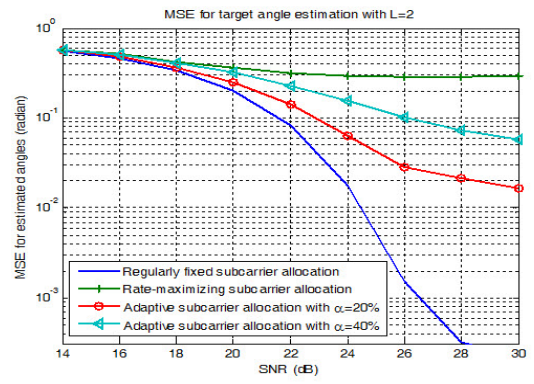


Fig. 5. Achievable rate at information receiver when L=2

## VI. 결 론

본 논문에서는 OFDM MIMO 펄스 RadCom을 활용하여 목표물 파라미터 추정과 동시에 원하는 정보 수신기에 정보를 전달하는 시스템을 연구하였다. 이 시스템에 사용될 직교 송신 파형을 만들기 위해 RadCom을 활용할 때 정보 전송 성능인 전송률과 목표물 추정 성능인 목표물 방위각 MSE를 각각 분석하였으며, 이를 바탕으로 OFDM 부반송파 할당 전략을 제안하였다. 즉, 정보 전달과 목표물 추정을 동시에 만족하는 시스템을 구성하기 위해 채널 환경에 따른 적응 부반송파 할당 방식을 제안하였다. 모의실험을 통해 각각의 OFDM 부반송파 할당 방식이 방위각 추정의 해상도 향상을 위한 Virtual array antenna 구현과 동시에 Multi-path channel에 따른 Achievable rate 향상에서도 중요한 역할을 할 수 있음을 확인하였다. 또한, 채널 상황에 따른 제안한 방식의 적응 비율을 적절히 조절함으로써 두 가지 성능을 동시에 최적화할 수 있음을 확인하였다.

## References

[1] Y. Wu and W. Y. Zou, "Orthogonal frequency division multiplexing : A multi-carrier modulation scheme," *IEEE Trans. Consumer Electron.*, vol. 41, no. 3, pp. 392-399, Aug. 1995.

[2] H. Bolcskei and A. J. Paulraj, "Space-frequency coded broadband OFDM system," *IEEE Wireless Commun. and Netw. Conf.*, vol. 1, no. L1.1, Sep. 2000.

[3] S. Lee, J. Park, J. Park, and K. Kang, "A study on the effect of spectrum sharing/overlapping in a heterogeneous OFDM system with nonlinear high power amplifiers," *J. KICS*, vol. 41, no. 12, pp. 1707-1714, Dec. 2016.

[4] Y. L. Sit, C. Sturm, J. Baier, and T. Zwick, "Direction of arrival estimation using the MUSIC algorithm for a MIMO OFDM radar," *IEEE Radar Conf.*, pp. 226-229, Jun. 2012.

[5] B. J. Donnet and L. D. Longstaff, "Combining MIMO radar with OFDM communications," *The 3rd Eur. Radar Conf.*, pp. 37-40, Sep. 2006.

[6] Y. L. Sit, C. Sturm, L. Reichardt, T. Zwick, and W. Wiesbeck, "The OFDM joint radar-communication system : An overview," *The Third Int. Conf. Advances in Satellite and Space Commun., SPACOMM 2011*, pp. 69-74, Apr. 2011.

[7] J. Moghaddasi and K. Wu, "Multifunctional transceiver for future radar sensing and radio communicating data-fusion platform," *IEEE Access 2016*, vol. 4, pp. 818-838, Feb. 2016.

[8] L. Reichardt, C. Sturm, F. Grunhaupt, and T. Zwick, "Demonstrating the use of the IEEE 802.11P car-to-car communication standard for automotive radar," *6th Eur. Conf. Ant. and Propag.*, pp. 1576-1580, Mar. 2012.

[9] 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.

[10] X. Tian, T. Zhang, Q. Zhang, and Z. Song, "High accuracy doppler processing with low complexity in OFDM-Based RadCom systems," in *IEEE Commun. Lett.*, vol. 21, no. 12, pp. 2618-2621, Dec. 2017.

[11] R. Joshi and A. Dhande, "Direction of arrival estimation using music algorithm," *Int. J. Res. in Eng. Technol.*, vol. 03, no. 03, Mar. 2014.

## 이 종 혁 (Jonghyeok Lee)



2018년 2월 : 부경대학교 전자공학과 학사  
 2018년 3월~현재 : 부경대학교 전자공학과 석사 과정  
 <관심분야> OFDM, 통신공학, 사물인터넷, MIMO radar

**서 지 호 (Jiho Seo)**



2014년 3월~현재 : 부경대학교  
전자공학과 학사과정  
<관심분야> 통신공학, 사물인  
터넷, automotive radar

**황 성 현 (Sunghyun Hwang)**



1996년 2월 : 성균관대학교 전  
자공학과 학사  
2001년 2월 : 성균관대학교 전  
기전자및컴퓨터공학부 박사  
2001년~2005년 : 삼성전자 SOC  
연구소 책임연구원  
2005년~현재 : 한국전자통신연  
구원, 책임연구원  
<관심분야> 통신 신호처리 기술, 레이더 신호처리  
기술, 주파수 공유 기술

**박 재 현 (Jaehyun Park)**



2003년 2월 : KAIST 전기 및  
전자 공학과 학사  
2010년 2월 : KAIST 전기 및  
전자 공학과 박사  
2010년~2013년 : 한국전자 통  
신 연구원, 선임연구원  
2013년~2014년 : Imperial

College London, Research Associate

2014년~현재 : 부경대학교 부교수

<관심분야> 다중안테나 기반 통신 신호처리, 동시  
전력 및 정보 전송 기술, 인지무선기술

**변 우 진 (Woo-Jin Byun)**



1992년 : 경북대학교 전자공학  
과(공학사)  
1995년 : KAIST 전자전산학과  
(공학석사)  
2000년 : KAIST 전기 및 전자  
공학과(공학박사)  
1999년~2004년 : 삼성전기(주) 책  
임연구원  
2015년~2016년 : Georgia Tech 방문연구원  
(ATHENA Group)  
2004년~현재 : ETRI 방송미디어연구소 전파자원연구  
그룹장  
관심분야: RF/밀리미터파/테라헤르츠 통신 및 전파  
센서 시스템/부품(칩, 모듈)/안테나 기술, 전자파  
이론 및 전자파 산란 수치해석