

Bluetooth 응용을 위한 MUSIC 알고리즘 기반 DoA 추정기의 설계

Design of MUSIC-based DoA Estimator for Bluetooth Applications

김종민*, 오동재*, 박상훈*, 이승혁*, 정윤호*

Jongmin Kim*, Dongjae Oh*, Sanghoon Park*, Seunghyeok Lee*, Yunho Jung*

Abstract

In this paper, we propose an angle estimator that is designed to be applied to Bluetooth low-power application technology based on multiple signal classification (MUSIC) algorithm, and present the result of implementation in FPGA. The MUSIC algorithm is designed for H/W high-speed design because it requires a lot of calculations due to high accuracy, and the snapshot variable is designed to cope with various resolution requirements of indoor systems. As a result of the implementation with Xilinx zynq-7000, it was confirmed that 9,081 LUTs were implemented, and it was designed to operate at the operating frequency of 100MHz.

요약

본 논문에서는 multiple signal classification(MUSIC) 알고리즘을 바탕으로 Bluetooth 저전력 응용 기술에 적용 가능하도록 설계한 각도 추정기를 제안하고, 이를 FPGA로 구현한 결과를 제시한다. MUSIC 알고리즘은 높은 정확도에 따른 많은 연산량이 요구되므로 이를 하드웨어 고속설계 하였고, 실내 시스템의 다양한 해상도의 요구에 대응하기 위해 snapshot 가변을 가능하게 설계하였다. Xilinx zynq-7000으로 구현한 결과 9,081개의 LUTs로 구현함을 확인하였고, 100MHz의 동작주파수로 동작이 가능하도록 설계하였다.

Key words : multiple signal classification, frequency modulated continuous wave radar, range resolution, angle resolution, computational complexity

1. 서론

최근 스마트 폰, 스마트 워치 등 이동통신기기에 있는 위치기반서비스(LBS : location based service)

를 통해 여행이나 목적지를 쉽게 찾을 수 있는 서비스가 상용화 되고 있다[1]. 특히, GPS(global positioning system) 기술은 GPS 위성에서 보내는 신호를 수신하여 사용자의 현재 위치를 계산하는

* School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University

★ Corresponding author

E-mail : yjung@kau.ac.kr, Tel : +82-2-300-0133

※ Acknowledgment

This work was supported by the Technology Innovation Program, 10080619, funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Korea) and CAD tools were supported by IDEC.

Manuscript received Mar. 14, 2020; revised Mar. 21, 2020; accepted Mar. 25, 2020.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

위성항법시스템으로, 항공기, 선박, 자동차 등에서 가장 많이 활용되고 있는 위치기반서비스이다. 하지만, 실내에서 GPS 신호는 신호의 회절, 흡수 및 감소와 같은 문제가 발생하기 때문에 정확한 위치를 찾는 데 한계를 갖고 있다. 이에, 실내 LBS를 제공할 수 있는 환경과 기술의 필요성이 대두되었고 최근 Bluetooth 5.1이 규격화되어 전송 가능한 데이터의 크기가 커짐에 따라 LBS를 제공할 수 있는 환경을 갖추게 되었다[2].

실내 LBS를 제공하는 BLE(blueooth low energy) 기술로는 대표적으로 ToA(time-of-arrival)와 DoA(direction-of-arrival)가 있다. ToA는 송신부에서 전송한 신호가 수신부에 도착한 시간을 이용하여 거리를 계산하는 기법으로, 정확한 측위를 위해서 송신노드와 수신노드 간 고도화 된 시간동기화가 요구된다. 하지만 신호의 대역폭과 수신부의 샘플링률에 영향을 받기 때문에 짧은 거리에서는 시간 동기화가 달성되기 어렵다는 단점이 있다. 반면, DoA 기술은 안테나 사이의 수신하는 신호의 위상 차이를 이용하여 송신된 신호의 방향을 계산하므로 ToA와 다르게 시간 동기화로부터 자유로울 뿐만 아니라, 수신부와 디바이스 간 거리가 짧을수록 정확한 측위가 가능하여 실시간 위치 서비스 솔루션에 활용 가능하다는 장점이 있다[3].

DoA 알고리즘 종류로는 신호의 위상 차이를 이용한 모노펄스, ESPRIT(estimation of signal parameters via rotation invariance techniques) 등이 있다. 모노펄스는 간단한 알고리즘이지만 잡음에 영향이 크기 때문에 성능이 낮으며[4], ESPRIT법은 스펙트럼에 대한 검색 없이 도래방향을 추정하는 장점을 가지고 있지만 고유값 분해 횟수가 많다는 단점을 가지고 있다[5]. 반면, MUSIC(multiple signal classification) 알고리즘은 다른 알고리즘에 비해 고해상도 및 높은 정확도로 DoA 추정이 가능하다[6]. 하지만, MUSIC 알고리즘은 공분산 행렬(covariance matrix), 고유값 분해(EVD : eignvalue decomposition), MUSIC 스펙트럼 및 첨두값 검출로 이루어지기 때문에 연산량이 많은 단점이 있어 소프트웨어로 시스템을 구축할 경우, 실내 측위 위치 서비스를 위한 BLE에 응용시 사용자에게 원하는 시간 내에 실시간으로 위치 정보를 제공하기 어려운 문제점이 있다. 이에 본 논문에서는 MUSIC 알고리즘의 고해상도로부터 DoA를 추정하면서도

LBS의 요구되는 조건에 맞춰 실시간으로 DoA를 추정할 수 있도록 MUSIC 알고리즘의 연산량이 높은 고유값 분해와 MUSIC 스펙트럼 및 첨두값 검출 연산을 병렬 연산처리 할 수 있는 하드웨어 가속기를 구현하였다. 더불어, 사용자의 위치 및 다양한 환경에 따라 요구되는 추정 성능과 출력 시간을 제공하기 위해, snapshot 개수를 가변 할 수 있도록 SoC (system on chip) 플랫폼을 이용해 소프트웨어와 하드웨어 분할 설계를 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 DoA 추정을 위한 MUSIC 알고리즘에 대해 설명하고, III장에서 제안하는 MUSIC 알고리즘 기반 DoA 추정기의 설계에 대해 설명한 뒤, IV장에서는 SoC 플랫폼을 이용한 구현결과를 설명하고 마지막으로, V장에서는 결론을 맺는다.

II. MUSIC 알고리즘 개요

1. DoA 추정을 위한 MUSIC 알고리즘

MUSIC은 신호의 조향벡터와 잡음 부공간의 직교성을 원리로 입사되는 신호의 방향인 DoA를 추정하는 기법이다. 안테나 개수 L 개를 가정하여, 그림 1과 같이 ULA(uniform linear array) 안테나 구조를 사용할 경우, 신호원 K 개로부터 수신되는 신호를 식 (1)과 같이 모델링 할 수 있다. $X(t)$ 는 L 개의 안테나로부터 수신되는 $L \times 1$ 의 신호 벡터이며, A 는 입사되는 K 개의 신호들에 의해 안테나마다 형성된 $L \times 1$ 의 조향벡터의 집합으로 이 조향벡터는 식 (2), (3)과 같다.

$$X(t) = AS(t) + N(t), \quad (1)$$

$$A = [\bar{a}(\theta_1), \bar{a}(\theta_2), \dots, \bar{a}(\theta_K)]^T, \quad (2)$$

$$\bar{a}(\theta_k) = [1, e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda} \sin(\theta_k)}, \dots, e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda} (L-1) \sin(\theta_k)}], \quad (3)$$

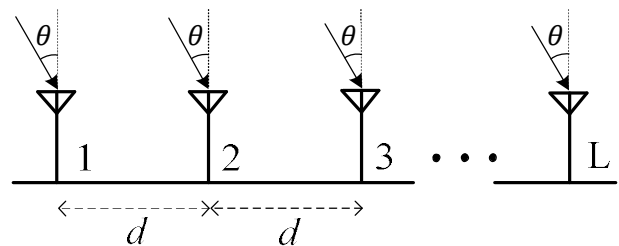


Fig. 1. Uniform linear array antenna.
그림 1. 등간격 선형 배열 안테나

식 (3)의 k 는 $K \times 1$ 벡터 중 k 번째 요소를 나타내고 λ 와 d 는 각각 신호의 파장과 안테나 간격을 의미한다. 식 (1)의 $S(t)$ 는 source 신호원으로 $K \times 1$ 벡터, $N(t)$ 는 AWGN (additive white gaussian noise) 으로 $L \times 1$ 벡터이다. MUSIC 알고리즘은 공분산 행렬, 고유값 분해, 그리고 스펙트럼 침투값 검출 연산으로 이루어진다. 우선, 각 안테나에 의해 수신된 신호벡터인 식 (1)로부터 식 (4)와 같이, 공분산 행렬 연산을 수행하게 되면, 잡음 성분과 신호 성분이 나뉘어 표현되는 우측 식으로 모델링 된다.

$$R_x = E[X(t)X^H(t)] = AE[S(t)S^H(t)]A^H + \sigma^2 I \quad (4)$$

E 는 기대치, H 는 Hermitian 연산을 나타내고 σ^2 은 잡음전력, I 는 단위행렬이다. 실제 기대치를 구할 수 없기 때문에, N 개의 데이터 샘플인 snapshot으로부터 식 (5)와 같이 평균값을 구하여 공분산 행렬 연산을 수행한다.

$$R_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} X[n]X^H[n] \quad (5)$$

공분산 행렬 연산 수행 뒤, 고유값 분해 연산을 수행하여 식 (6)과 같이 나타내면, 이 때 식 (7)에서 고유값의 크기 비교를 통해 식에서 크기가 작은 $L-K$ 개의 고유값에 해당하는 고유벡터 λ_i ($i = K+1, K+2, \dots, L$)를 선택하여 잡음 부공간 (E_N)을 형성한다.

$$R_{xx}e_i = e_i\lambda_i \quad (i = 1, 2, \dots, M) \quad (6)$$

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_L \quad (7)$$

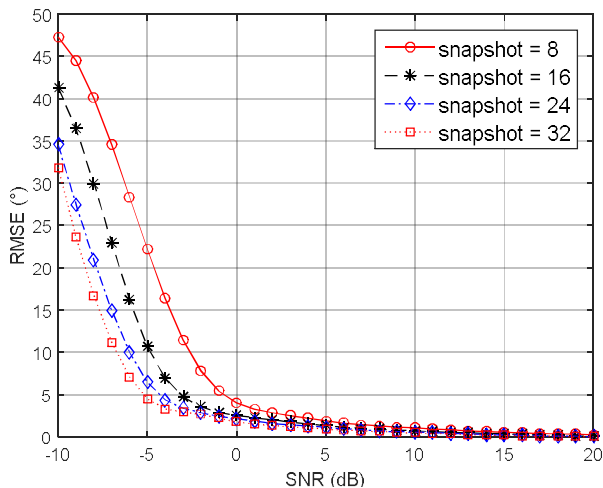


Fig. 2. comparison of RMSE results about snapshot number.
그림 2. snapshot 개수에 따른 SNR 대비 RMSE 값 비교

이 잡음 부공간과 신호의 입사 방향이 직교하는 특성을 이용하여 식 (8)의 MUSIC 스펙트럼을 형성한다. 잡음 부공간과 신호가 입사하는 방향으로 방향벡터가 직교하기 때문에 분모는 0이 되고, 식 (8)의 값은 침투값을 가지게 된다. 따라서, θ 값을 설정한 해상도 간격으로 대입하여 침투값으로부터 실제 신호의 입사방향을 찾을 수 있다.

$$P(\theta) = \frac{1}{\bar{a}(\theta)^H E_N E_N^H \bar{a}(\theta)} \quad (8)$$

2. snapshot 가변에 따른 RMSE 성능 비교

그림 2는 ULA 안테나 개수 4개를 사용하였을 때, snapshot 개수 가변에 따른 SNR(signal to noise ratio) 대비 RMSE(root mean square error) 성능 지표를 나타낸다. snapshot 개수가 적을수록 RMSE 값이 증가해 성능이 떨어지는 문제가 있지만, 식 (5)에서와 같이 연산복잡도가 감소하는 반면, snapshot 개수가 증가하면 연산복잡도가 증가하지만, RMSE 값이 감소해 성능이 증가한다. 이렇듯 snapshot 개수와 연산량의 trade-off 관계의 특성이 있기 때문에 요구되는 환경에 따라 MUSIC 알고리즘은 적합한 snapshot 개수와 연산 비용을 충족시킬 수 있는 시스템 구현이 필요하다. 이에, 본 논문에서는 MUSIC 알고리즘의 snapshot 개수가 가변되도록 효율적인 소프트웨어와 하드웨어 통합 설계를 제안하여 다양한 기기에 호환할 수 있도록 실시간으로 신호의 입사 방향을 추정하는 시스템을 구현하였다.

III. 제안된 MUSIC 기반 DoA 추정기 설계

그림 3은 Xilinx 사의 Zybo Zynq-7000 보드를 사용하여 제안하는 알고리즘의 설계 구조도를 나타낸다. SoC 플랫폼은 크게 마이크로프로세서인 ARM Cortex-A9 PS(processing system), AXI-BUS, 그리고 PL(programmable logic)로 구성되어 있다. 본 논문에서는 snapshot 가변 가능한 MUSIC 알고리즘 설계를 위해 PS 영역에서 전처리 연산 및 공분산 행렬을 소프트웨어 연산 처리하였으며, MUSIC 알고리즘의 고유값 분해와 MUSIC 스펙트럼 침투값 연산을 고속 연산을 위해 PL 영역에서 FPGA (field programmable gate array)를 이용해 하드웨어 병렬 연산을 수행하도록 하였다.

1. 소프트웨어 설계

MUSIC 알고리즘의 모든 연산은 복소수 기반으로 수행되기 때문에 연산 복잡도를 줄이기 위해 [7]에서 unitary matrix를 이용하여 공분산 행렬 연산 이후, 복소수 값을 실수값으로 전환하는 기법이 제안되었다. 하지만, unitary matrix를 사용할 경우, 공분산 행렬 연산 이후 얻어진 행렬에 곱셈 연산을 수행하기 때문에 큰 연산 부담이 있다. 이에 [8]에서 제안된 논문은 unitary matrix를 사용하지 않고 ULA 안테나의 중심 대칭 특징을 이용한 전처리 기법을 제안하여 MUSIC 알고리즘의 공분산 행렬 연산 이후에 대해 복소수 값을 실수값으로 전환하였다. 또한, [9]의 논문에서는 중심 대칭 안테나를 이용하여 [9]의 방법을 사용할 경우, MUSIC 알고리즘을 전체 실수화된 방식으로 사용할 수 있음을 보였다. ULA 안테나 4개를 가정하여 수신된 신호 식 (1)의 요소들을 식 (8)과 같이 표현할 때, 식 (9)와 같이 중심 대칭을 특징으로 전처리 과정을 수행하면 된다. 전처리 과정을 끝낸 신호 $Y(t)$ 와 조향벡터 식 (10)을 이용해 기존 MUSIC 알고리즘과 동일하게 연산을 수행하여 표적의 입사방향을 추정할 수 있다. 이에, PS 영역의 소프트웨어 부분은 수신된 신호들을 이용하여 전처리 과정을 거쳐 MUSIC 알고리즘을 실수값으로 전환한 후, snapshot 가변을 위해 공분산 행렬 연산을 수행하였다.

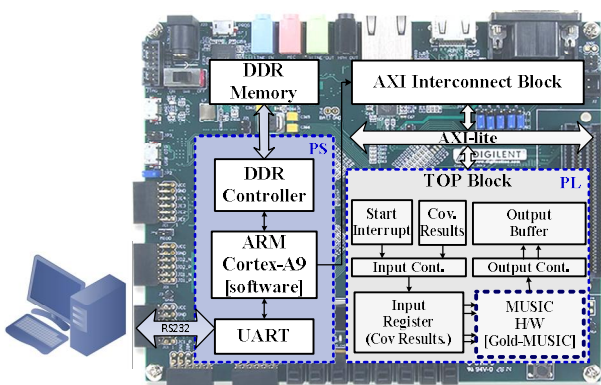


Fig. 3. proposed DoA estimator on SoC platform. 그림 3. 제안된 DoA 추정기의 SoC 플랫폼

$$X(t) = [x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t)]^T \tag{8}$$

$$Y(t) = \text{Real} \left[\begin{matrix} \frac{x_2(t) + x_3(t)}{2}, & \frac{x_1(t) + x_4(t)}{2}, \\ \frac{x_2(t) - x_3(t)}{-2j}, & \frac{x_1(t) - x_4(t)}{-2j} \end{matrix} \right]^T \tag{9}$$

$$\bar{a}(\theta_k) = \left[\cos\left(\frac{3\pi d \sin\theta}{\lambda}\right), \sin\left(\frac{3\pi d \sin\theta}{\lambda}\right), \cos\left(\frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}\right), \sin\left(\frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}\right) \right] \tag{10}$$

2. 제안하는 하드웨어 설계

MUSIC 알고리즘 기반의 제안된 DoA 추정 블록도는 그림 4와 같이 크게 EVD Unit과 MUSIC Spectrum Search Unit으로 구성된다. EVD Unit은 공분산행렬을 입력값으로 받고 고유벡터를 출력한다. MUSIC Spectrum Search Unit은 고유벡터에 대한 입력값을 통해 각도 값을 출력한다.

EVD Unit은 소프트웨어에서 처리된 공분산 행렬 연산으로 얻은 데이터 값으로부터 고유값, 고유벡터를 구하는 모듈이다. 고유값 분해 알고리즘은 Jacobi Method와 QR분해가 있으며, 그림 5와 같이 실제 값에 거의 일치한다. 이에 따라 DoA 추정에 대해 더욱 정확한 성능을 가지는 Jacobi method를 사용하여 EVD Unit을 구현하였다. 특히, 많은 연산량이 요구되는 Jacobi method를 수행하기 위해 고속 연산을 위한 systolic array를 구조를 사용하였다[10]. 4x4 고유값 분해 연산은 4x4 행렬에 대한 고유값 분해 연산이 필요하기 때문에 요구되는 연산량이 많다. 이에, Jacobi systolic array는 공분산행렬의 특성을 이용하여 4개의 2x2행렬을 바탕으로 4x4행렬의 고유값을 높은 수율로 얻을 수 있는 장점이 있다[11].

먼저, 4개의 2x2행렬인 processing element로 이루어진 공분산행렬에 대한 고유값과 고유벡터를 구하기 위해 공분산행렬에 회전행렬을 곱해주어 대각행렬로 만들어 주어야한다. 이후, 정확한 고유값과 고유벡터로 수렴시키기 위해 각 processing element에 해당하는 회전행렬을 곱한 후, processing element 간의 행렬 요소 위치를 조정해야한다. 우선, 회전행렬은 각도에 따른 $\cos\theta, \sin\theta$ 값이 필요하므로 CORDIC 모듈로부터 값을 구한다. 이후, NSD(Noise Subspace Decesion) unit에서 회전행렬과 2x2행렬로 나뉜 공분산행렬과의 곱셈 연산으로부터 고유값을 구한다. 그리고 Sweep Multiplier unit를 실행시켜 공분산행렬에 회전 행렬을 곱해서 고유벡터를 구하고 나면, Exchange unit에서 대각행렬로 만들기 위한 원소 간 위치 변환을 한다. 일련의 과정을 반복하면 정확한 고유값과 고유벡터를 구할 수 있는데 고유벡터는 고유값의 크기에 따라 신호부공간과 잡음

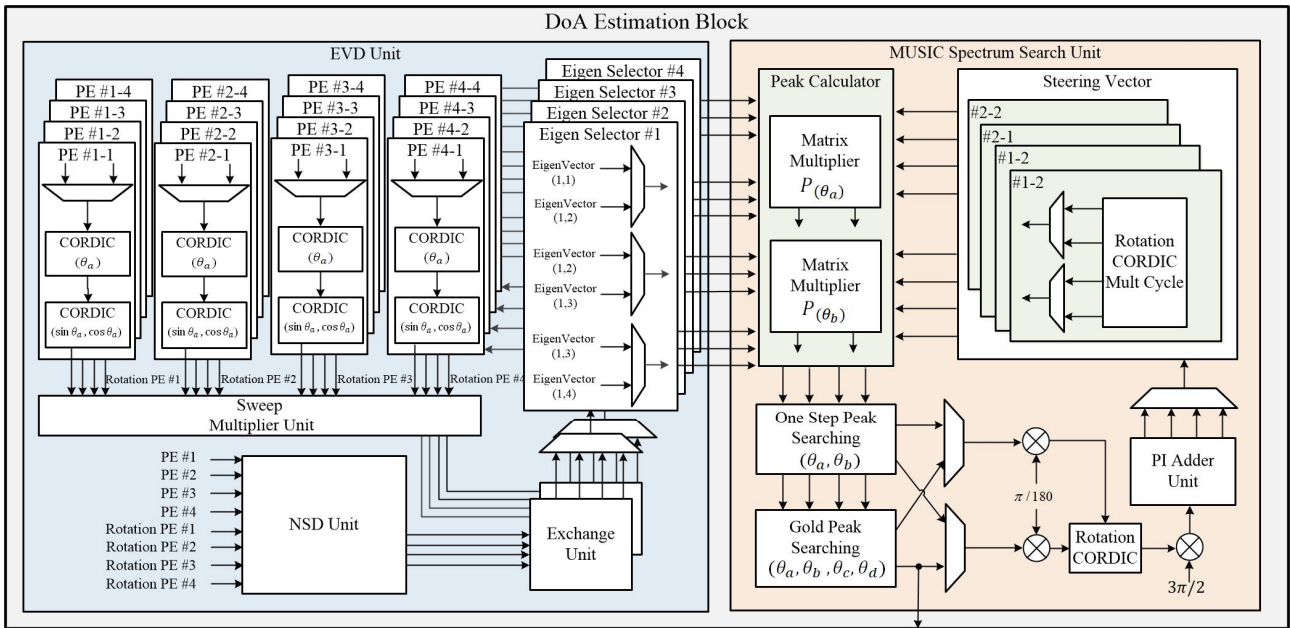


Fig. 4. Block diagram of the proposed DoA estimator.
 그림 4. 제안된 DoA 추정기의 하드웨어 블록도

부공간 벡터로 구별될 수 있다. 최종적으로 구한 고유벡터 중 잡음 부공간의 벡터만 최대값 검출 과정에서 필요하므로 Eigen Selector 모듈에서 고유값의 크기비교를 통해 잡음 부공간 벡터만 추출하여 MUSIC Spectrum Search Unit으로 데이터를 넘겨준다.

MUSIC Spectrum Search Unit은 식 (8)의 분모를 연산하여 최소값을 검출하는 모듈로, 식 (8)과 같이 MUSIC 스펙트럼을 구하기 위해 각도에 따라 방향벡터와 잡음 부공간 행렬의 곱셈연산을 수행해야 한다. 기본적인 MUSIC 스펙트럼 연산은 설정된 각도 해상도에 따라, -90도부터 90도까지의 모든 범위를 구해야하기 때문에 연산량이 많은 문제점이 있다. 이 문제에 대한 개선 방법으로 해상도에 의존하지 않는 GSU minimization 기법과 반복 연산을 통해 각도를 정확하게 추정할 수 있는 gold-MUSIC 알고리즘이 제안되었다[12].

gold-MUSIC은 크게 2 단계로 구성이 되어있다. 첫 번째로, 10도 간격으로 MUSIC 스펙트럼을 구해 주변 값과의 비교를 통해 대략적인 구간을 찾아낸다. 첫 번째 과정에서 -90도에서 90도 사이에서 10도 간격으로 최대값을 찾아 MUSIC 스펙트럼 중 최대값이 있는 $[\theta_a, \theta_b]$ 의 구간을 찾는다. 두 번째로는 GSU minimization 기법을 이용한다.

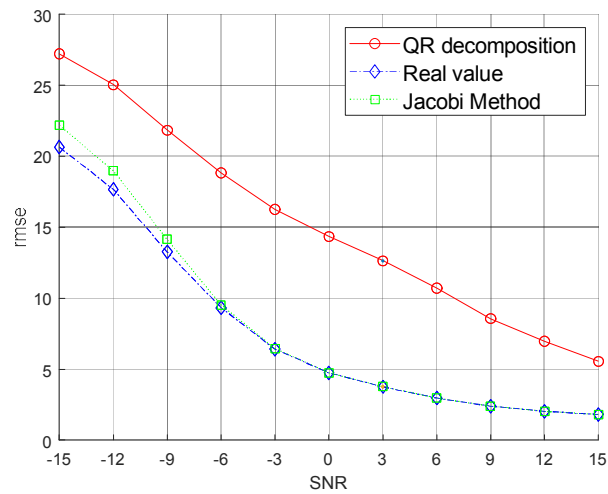


Fig. 5. comparison of RMSE results about QR decomposition and Jacobi method and real value.
 그림 5. QR 분해, Jacobi method, 참값에 대한 SNR 대비 RMSE 결과 비교

이는, 1단계에서 추정된 각도값을 기준으로 해상도 간격만큼 떨어진 θ_a, θ_b 를 구한 뒤, 식 (12), (13)과 같이 golden ratio인 $g=(2-\sqrt{5})/2$ 를 사용하여, θ_a 와 θ_b 의 범위 안에 위치한 θ_c 와 θ_d 를 얻는다.

$$\theta_c = \theta_a + g(\theta_b - \theta_a) \tag{12}$$

$$\theta_d = \theta_c + g(\theta_b - \theta_c) \tag{13}$$

만약 θ_c 에 대한 MUSIC 스펙트럼 $P(\theta_c)$ 값이 θ_d

에 대한 $P(\theta_d)$ 보다 크다면 θ_b 값은 θ_d 로, θ_d 는 θ_c 로 전환된다. 만약 조건이 위와 반대라면 θ_a 에 θ_c 를, θ_c 에 θ_d 값을 전환되며, 대략 8번의 반복을 통해 실제 값에 일치한 값을 추정할 수 있다[9].

침두값 검출은 각도에 따른 $P(\theta)$ 를 구하고 각각의 $P(\theta)$ 를 비교하여 침두값을 찾아야한다. $P(\theta)$ 를 구하기 위해서는 방향벡터와 고유벡터의 곱을 통해 구할 수 있다. 이 값을 이용하여 gold-MUSIC을 진행하게 되는데 첫 번째 과정은 One step peak searching 모듈에서 두 번째 과정은 gold peak searching 모듈에서 MUSIC 스펙트럼을 통해 각도를 구한다. 이에, EVD Unit에서 잡음 부공간 행렬을 받으면 추정 각도에 대한 방향벡터는 Steering Vector 모듈로부터 구하며, Peak Calculator 모듈을 통해 방향벡터와 잡음 부공간 행렬의 곱으로 MUSIC 스펙트럼 $P(\theta)$ 를 구한다. 이후, One Step Peak Searching 모듈을 통해 10도 단위로 얻은 MUSIC 스펙트럼 $P(\theta)$ 를 비교하여 신호의 각도정보를 저장한다. Gold Peak Searching 모듈은 저장된 신호의 각도로부터 $\theta_a, \theta_b, \theta_c, \theta_d$ 의 4개의 각도에 대한 $P(\theta)$ 의 크기를 비교한 뒤, 각도를 재정의 한다. 2번째 방식은 8번의 반복과정을 거쳐 진행하여 얻은 결과를 실제 신호의 DoA값으로 추정한다.

IV. SoC 플랫폼 기반 구현 결과

제안된 MUSIC 알고리즘 기반 DoA 추정기의 실시간 구현을 위해 그림 6과 같은 SoC 플랫폼 구축환경을 구성하였다. SoC 플랫폼은 Xilinx zynq-7000 디바이스 기반으로 검증 환경을 구축한 뒤, 구현 및 실시간 검증을 수행하였다. PS 영역에서 MUSIC 알고리즘의 실수화 연산을 위한 전처리 과정, snapshot 가변을 위한 공분산 행렬 연산을 수행 후 결과 값을 AXI-lite를 이용하여 해당 하드웨어 가속기 IP의 레지스터에 저장한다. 하드웨어 가속기는 PL영역에서 FPGA 기반 구현되었으며, verilog-HDL로 설계하였다. 이후, start 신호와 함께 하드웨어 가속기 동작 후, 실시간으로 출력되는 DoA 추정값을 UART 인터페이스로부터 확인하였다. 그림 7은 viavdo tool을 이용한 simulation 결과를 보여준다. snapshot 개수를 8, 16, 24, 32개일 때에 대한 각각의 출력 결과를 실시간으로 확인하였다. 하드웨어 가속기의 FPGA 기반 구현 결과는 표 1과 같다.

구현 결과, 총 9,081개의 LUTs, 10114개의 FF, 그리고 168개의 DSP로 구현 가능함을 확인하였고, 100MHz 동작으로 EVD Unit은 총 126 clock cycle, MUSIC Spectrum Search Unit은 총 1078 clock cycle이 소요됨을 확인하였다.

Table 1. Implementation results of the proposed DoA estimator based on FPGA.

표 1. 제안된 DoA 추정기의 FPGA 기반 구현 결과

Resource	Utilization	Available	Utilization (%)
LUT	9081	53200	17.07
FF	10114	106400	9.51
DSP	168	2200	76.36

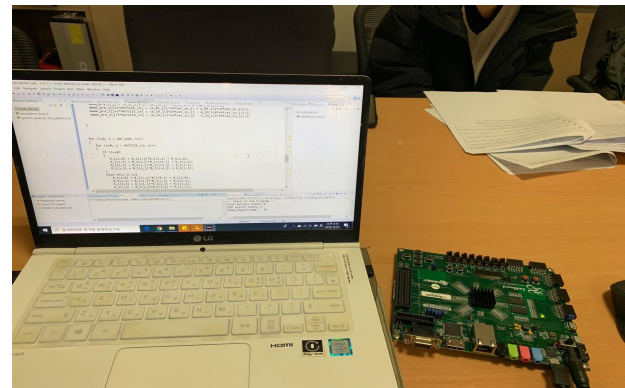


Fig. 6. Verification environment based on SoC platform.

그림 6. SoC 플랫폼 기반 검증 환경

V. 결론

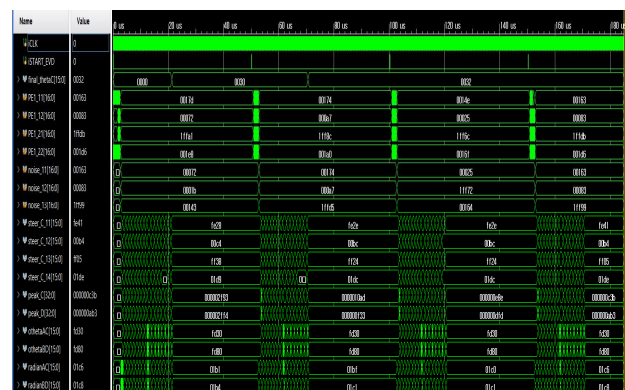


Fig. 7. Simulation result by number of snapshots.

그림 7. snapshot 개수에 따른 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 블루투스 응용을 위한 MUSIC 알고리즘 기반의 DoA 추정기의 설계를 제안하고, 이의 소프트웨어와 하드웨어 통합 설계 플랫폼 및 하

드웨어 설계 결과를 제시하였다. 시스템의 성능과 속도에 적합한 실시간 DoA 추정을 위해 snapshot을 가변시켜 사용자의 다양한 환경에 요구되는 값을 제공할 수 있도록 설계되었으며, 하드웨어의 FPGA 기반 구현 결과, 9,081개의 LUT, 168개의 DSP로 구현 가능함을 확인하였다.

References

- [1] Korea Communications Commission “LBS Industrial trend report,” *Korea Internet & Security Agency*, 2017.
- [2] Martin Woolley, “Bluetooth 5: Go Faster, Go Further [Internet],” Available : bluetooth.com/bluetooth-resources/bluetooth-5-go-faster-go-further/.
- [3] Y. Roh and D. kim, “Research Trends of Indoor Localization,” *The Korea Institute of Information and Communication Engineering*. Vol.23, No.2, pp.42-45. 2019.
- [4] H. Sim, S. Lee, and S. Kim, “Enhanced DOA Estimation Method Combining Monopulse Angle Estimation and BeamSpace MUSIC,” *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of communications and Information Sciences*, pp.538-539, 2017.
- [5] R.Roy and T.kailath, “ESPRIT-Estimation of signal parameters via rotational invariance technique,” in *Signal Processing Part2:Control Theory and Applications*, Berlin, Vienna, New York: Springer-Verlag, pp.369-411, 1990.
- [6] R. O. Schmidt, “Multiple emitter location and signal parameterestimation,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol.34, No.3, pp. 276-280, 1986. DOI: 10.1109/TAP.1986.1143830
- [7] M. Pesavento, A. B. Gershman and M. Haardt, “Unitary root-MUSIC with a real-valued eigendecomposition: a theoretical and experimental performance study,” in *IEEE Transactions on Signal Processing*, Vol.48, No.5, pp.1306-1314, 2000. DOI: 10.1109/ICASSP.2000.861179
- [8] R. B. Wu. “A Novel Universal Preprocessing Approach for High-resolution Direction-Of-Arrival Estimation,” *Journal of Electronics*, Vol.15, No.3, pp.305-309, 1993. DOI: 10.1007/BF02684554
- [9] Dechen Xu, Zhiwen Liu, Xiaodong Qi, Yougen Xu and Yifang Zeng, “A FPGA-based implementation of MUSIC for centrosymmetric circular array,” *2008 9th International Conference on Signal Processing*, Beijing, pp.490-493, 2008. DOI: 10.1109/ICOSP.2008.4697177
- [10] M. Kim, K. Ichige and H. Arai, “Design of Jacobi EVD processor based on CORDIC for DOA estimation with MUSIC algorithm,” *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PAVILHAO ATLANTICO, Lisboa, Portugal*, Vol.1, pp. 120-124, 2002. DOI: 10.1109/PIMRC.2002.1046673
- [11] I. Bravo, P. Jimenez, M. Mazo, J. L. Lazaro and A. Gardel, “Implementation in Fpgas of Jacobi Method to Solve the Eigenvalue and Eigenvector Problem,” *2006 International Conference on Field Programmable Logic and Applications*, pp.1-4, 2007. DOI: 10.1109/FPL.2006.311301
- [12] Kaluri V. Rangarao and Shridhar Venkatana rasimhan, “gold-MUSIC: A Variation on MUSIC to Accurately Determine Peaks of the Spectrum,” *IEEE TRANS.*, Vol.61, No.4, 2013. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232893

BIOGRAPHY

Jongmin Kim (Student Member)



2012~present: BS degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University.

Dongjae Oh (Student Member)



2013~present: BS degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University.

Sanghoon Park (Student Member)

2014~present: BS degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University.

Seunghyeok Lee (Student Member)

2018 : BS degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University.

2018~present : MS degree in School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University.

Yunho Jung (Member)

1998 : BS degree in Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2000 : MS degree in Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2005 : Ph.D degree in Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2005~2008 : Senior, Samsung Electronics

2008~present : Professor, School of Electronics and Information Engineering, Korea Aerospace University