

ESPRIT 알고리즘 기반 재구성 가능한 각도 추정기 설계에 관한 연구

A Study on Design and Implementation of Scalable Angle Estimator Based on ESPRIT Algorithm

이도현*, 김병현*, 정정화**, 이성진***, 민경육*★

Dohyun Lee*, Byunghyun Kim*, Jongwha Chong**, Sungjin Lee***, Kyeongyuk Min*★

Abstract

Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques (ESPRIT) is an algorithm that estimates the angle of a signal arriving at an array antenna using the shift invariance property of an array antenna. ESPRIT offers the good trade-off between performance and complexity. However, the ESPRIT algorithm still requires high-complexity operations such as covariance matrix and eigenvalue decomposition, so implementation with a hardware processor is essential to estimate the angle of arrival in real time. In addition, ESPRIT processors should have high performance. The performance is related to the number of antennas, and the number of antennas required for each application are different. Therefore, we proposed an ESPRIT processor that provides 2 to 8 variable antenna configurations to meet the performance and complexity requirements according to the applied field. The proposed ESPRIT processor was designed using the Verilog-HDL and implemented on a field programmable gate array (FPGA).

요약

본 논문에서는 ESPRIT(estimation of signal parameters via rotational invariance techniques)알고리즘 기반 재구성 가능한 각도 추정기를 제안 및 설계하였다. ESPRIT은 배열 안테나(uniform linear array)의 천이불변(shift invariance) 성질을 이용해 배열 안테나에 도래하는 신호의 도래각을 추정하는 알고리즘이다. 하지만 여전히 ESPRIT 알고리즘은 공분산 행렬, 고윳값 분해 등 높은 복잡도를 가지는 연산을 필요로 하므로 실시간 도래각 추정을 위해 하드웨어 프로세서로 구현이 필요하다. ESPRIT에서 성능은 안테나 개수와 관련이 있으며, 응용에 따라 요구되는 안테나 수는 상이할 수 있다. 이에 본 논문에서는 응용되는 분야에 따라 성능을 높이고 연산 복잡도 문제를 시킬 수 있도록 2 ~ 8개의 가변 안테나 개수를 지원하는 ESPRIT 프로세서를 제안하였다. 또한, 제안된 ESPRIT 프로세서는 MI-ESPRIT 구조를 기반으로 배열 안테나의 다중 불변성을 활용하여 성능을 향상시켰으며, 최소자승법 알고리즘을 간소화 시켜 복잡도를 감소시켰다.

Key words : Direction of Arrival Estimation, Eigen Value Decomposition, Uniform Linear Array, ESPRIT

* Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University

** Dept. of Computer Science, State University of New York Korea

** DaeBo Communication & Systems Co. Ltd.

★ Corresponding author

E-mail : kymin@hanyang.ac.kr, Tel : +82-2-2220-0350

※ Acknowledgment

This work was supported by IITP grant funded by the Korea government (MSIT) (2022-0-00521, Development of 5G-NR-V2X communication technology to support over Lv.4 autonomous driving service)

Manuscript received Dec.18, 2023; revised Dec. 21, 2023; accepted Dec. 29, 2023.

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.

I. 서론

배열 안테나 시스템(array antenna system)을 이용한 신호의 도래각 추정(DOA estimation)은 레이더(radar), 통신(communication) 등 다양한 분야에 활발히 사용되고 있다[1-4]. 현재 가장 많이 사용되는 도래각 추정 알고리즘은 부공간(subarray) 방법을 대표하는 MUSIC(multiple signal classification) [5]과 ESPRIT (estimation of signal parameters via rotational invariance techniques) [6] 알고리즘이다. MUSIC은 도래하는 신호의 조향 벡터가 잡음 부공간(noise subspace)에 직교한다는 사실을 이용해 공간각(spatial angle)에 대한 스펙트럼을 계산하고 첨두값(peak value)을 찾아 신호의 도래각을 구한다[7]. MUSIC은 모든 스펙트럼에 대한 광범위 한 탐색이 필요하기 때문에 연산 복잡도가 높은 단점이 있다[8]. 이에 반해 ESPRIT은 배열 안테나의 두 부어레이(subarray)가 천이불변(shift invariance)을 가지는 구조를 이용하여 도래각을 추정하는 방법이다 [9]. 스펙트럼 첨두값의 탐색 없이 도래각을 구할 수 있어 MUSIC 보다 복잡도 측면에서 이점이 있으며, 성능과 복잡도의 교환 관계(trade-off)를 잘 만족시킨다[10], [11]. 이러한 특성으로 인해, 도래각 추정을 위한 알고리즘으로 ESPRIT 알고리즘이 각광받고 있다[12]. 하지만, ESPRIT 알고리즘은 공분산 행렬(covariance matrix), 고유값 분해(eigenvalue decomposition) 등 복잡도가 높은 연산을 필요로 하므로 실시간으로 도래각을 추정하기 위해 하드웨어 프로세서로의 구현이 필수적이다. 다양한 분야에 사용되는 ESPRIT 프로세서는 실시간 처리뿐만 아니라 성능도 높아야 한다. ESPRIT에서 성능은 안테나 개수와 관계가 있으며, 응용되는 분야에 따라 요구되는 안테나 개수가 다르다[13], [14]. 정밀한 도래각 추정을 요구하는 분야의 경우 다수의 안테나를 구성해야 하며, 낮은 복잡도를 요구하는 분야의 경우 적은 수의 안테나를 구성해야 한다. 따라서 ESPRIT 프로세서는 다양한 분야에 사용될 수 있도록 안테나 개수 구성을 가변적으로 지원할 수 있어야 한다. 도래각 추정을 위한 기존 ESPRIT 알고리즘은 공분산 행렬 연산하고 신호 부공간과 잡음 부공간 분해를 위해 고유값 분해를 수행한 후, 부어레이의 단일 불변성을 이용해 도래각을 추정한다. 하지만 어레이가 다중 불변(multiple invariance)을 갖는 상황이 존재하며, 배열 불변성을 최대한 활용하기 위해 많은 연구들이 진행되었다[15], [16]. 그중 Xu는 단일 불변성을 사용하는 기존 ESPRIT 알고리즘의 계산 이

점을 유지한 채 다중 불변성을 최대한 활용하여 성능을 향상시키는 MI-ESPRIT을 제안하였다[17]. MI-ESPRIT은 부어레이 단위 연산이 가능하며, 이러한 특성을 활용하여 다양한 안테나 개수를 지원 가능하다. 따라서, 본 논문에서는 응용되는 분야에 따라 성능 및 복잡도의 요구 사항을 충족시킬 수 있도록 2~8개의 가변 안테나 개수를 지원하는 ESPRIT 프로세서를 제안 한다. 특히, 제안된 ESPRIT 프로세서는 MI-ESPRIT 구조에 기반하여 다중 불변성을 최대한 활용했기 때문에 기존 ESPRIT 프로세스에 비해 성능을 향상시켰다.

II. 데이터 모델

1. ULA 안테나 데이터 모델

ESPRIT 알고리즘은 중심 대칭 기반의 ULA(uniform linear array) 안테나로부터 데이터를 수신하여 도래각을 추정한다. 그림 2-1과 같이 ULA 안테나 M개에서 표적 k 개로부터 반사된 신호가 서로 다른 도래각 θ 로 입사될 경우 수신되는 신호를 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

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

여기에서 $X(t)$ 는 수신신호, A 는 신호의 방향을 나타내는 방향행렬, $S(t)$ 는 전송신호, $N(t)$ 는 잡음신호를 나타낸다.

III. 도래각 추정을 위한 ESPRIT 알고리즘

일정간격 떨어져 있는 안테나 배열을 정의하고, 이에 대한 고유치가 일정하다는 가정을 이용한 도래각 추정알고리즘이 ESPRIT알고리즘이다. 유사한 알고리즘중, MUSIC 알고리즘이 있으나, MUSIC알고리즘에 비하여 계산량이 적다는 장점이 있으나, 안테나의 배열이 ULA이어야 한다는 제한조건이 있다. ESPRIT 알고리즘은 안테나배열을 두 개의 Sub array로 나누어 수신신호를 계산하며, 두 개의 sub array의 수식을 정의하면 다음과 같다.

$$X_1(t) = A_1S(t) + N_1(t) \quad (2)$$

$$X_2(t) = A_2S(t) + N_2(t) \quad (3)$$

ULA이기 때문에 방향행렬은 A_1, A_2 로 정의 되며, 각각의 sub array는 $A_2 = A_1\phi$ 로 정의된다. ϕ 는 M개의 각각의 안테나 사이의 phase delay를 나타내는 diagonal

matrix이며, A_1, A_2 의 matrices 사이즈는 $(M-1) \times K$ 이다. 또한 $E_{S1} = A_1 F, E_{S2} = A_2 F$ 는 두 개의 sub-array의 signal subspace로 F 는 $K \times K$ matrices이며, E_{S1}, E_{S2} 는 $(M-1) \times K$ matrix 이다. 이를 통해 $E_{S2} = E_{S1} F^{-1} \Phi F = E_{S1} \Psi$ 가 구해지고, 따라서 수신신호의 DoA값은 Ψ 의 eigenvalue를 구하여 얻을 수 있다. 따라서 Ψ 의 least square method 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

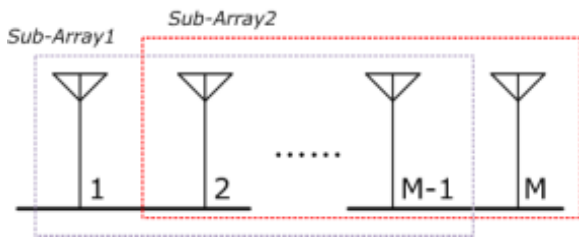


Fig. 1. Subarray structure of ESPRIT algorithm.
그림 1. ESPRIT 알고리즘의 서브어레이구조

$$\Psi = (E_{S1}^H E_{S2})^{-1} E_{S1}^H E_{S2} \quad (4)$$

Eigenvalue $z_k = e^{j \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta_k}$ 를 통해 DoA θ_k 는 다음과 같이 구해진다.

$$\theta_k = \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\pi d} \arg(z_k)\right) \quad (5)$$

따라서 DoA의 θ_k 를 구하여 측위를 수행할 수 있다.

IV. 제안된 ESPRIT 프로세서 하드웨어 구조

1. Covariance Matrix Module

Covariance Matrix Module의 세부 구조는 그림 2와 같이 RF(Register File), multiplexer, covariance calculator, controller로 구성된다. 안테나에서 입사한 표적 데이터는 register에 저장되며, multiplexer는 안테나 개수에 맞는 데이터를 정렬한다. 최종적으로 $M \times M$ 형태의 행렬을 생성하여 다음 모듈에 전달한다.

2. Eigen Decomposition Module

Eigen Decomposition Module의 세부 구조는 PE (Processing Element), RF, eigen value multiplexer, eigen vector multiplexer로 구성된다. covariance matrix 연산 후 전달 받은 $M \times M$ 행렬 데이터는 EDM 내부의 register에 저장되고 eigen value와 vector

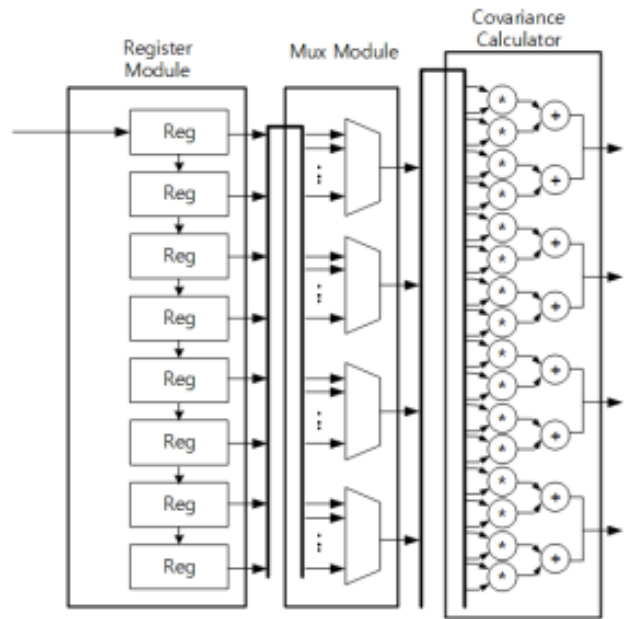


Fig. 2. Proposed Covariance Module.
그림 2. 제안하는 Covariance module.

multiplexer는 고유값 분해 연산에 필요한 데이터를 PE로 전송한다. PE는 전달 받은 데이터를 jacobi method 알고리즘을 적용하여 연산을 수행하여 동시에 고유값과 고유벡터를 계산하는 작업을 수행한다.

3. Least Square Module

Least Square Module의 세부 구조는 그림 2와 같이 RF, multiplexer, PSI calculator, LSM controller로 구성된다. 안테나 수에 해당하는 신호 subarray는 register에 저장되고, 저장된 신호는 PSI calculator로 전송하여 계산한다. PSI calculator는 한 개의 matrix multiplier와 complex adder로 구성되며, 안테나 수에 따른 사용이 가능하도록 설계하였다.

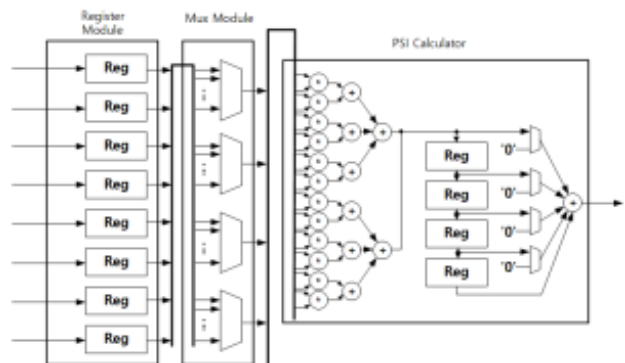


Fig. 3. Proposed Least Square Module.
그림 3. 제안하는 Least Square Module

4. Angle Estimation Module

Angle Estimation Module의 세부 구조는 그림 3과 같이 AEM controller로 구성된다. AEM controller는 CORDIC module을 제어할 수 있는 신호를 생성하여 CORDIC vector module과 CORDIC asin module을 제어한다. DOA추정이 마무리 되면 신호를 발생하여 동작이 끝남을 알려준다.



Fig. 4. Proposed Angle Estimation Module.
그림 4. 제안하는 Angle Estimation Module

V. 제안된 ESPRIT 프로세서의 FPGA 검증

제안하는 ESPRIT 하드웨어 구조는 KINTEX-7을 통해 검증하였다. System으로 구현하기 위한 Interface 방식을 PCIe로 정하여 Windows 콘솔 앱을 이용, PCI Express를 통해 DMA로 메모리에 Testvector 값을 입력 및 결과의 검증을 수행하였다. 이를 통하여 제안하는 ESPRIT의 검증시스템을 구현하기 위한 Power연결 및 검증용 Probe 등의 주변장치가 필요없으며, 이로 인한 검증에러의 방지를 최소화 할 수 있다. PCIe Interface를 위한 부가시스템의 구현의 난이도가 높으나 시스템 구현 후 검증 성공율이 높다는 장점이 있다.



Fig. 5. FPGA Evaluation Platform based on Kintex-7.
그림 5. Kintex-7 PCIe 기반 FPGA검증 platform

ESPRIT 알고리즘의 Compile 환경은 Vivado이며, ESPRIT의 동작검증은 Modelsim과 Vivado를 사용하였다.

Table 1. Usage of Resource.

표 1. 리소스 사용량

| Target FPGA Platform: Kintex-7 XC7K410T | | | |
|---|-------------|-----------|---------------|
| Resource | Utilization | Available | Utilization % |
| LUT | 66,597 | 441,803 | 13.8% |
| FF | 43,255 | 465,145 | 8.5% |

VI. 결론

본 연구에서는 ESPRIT(estimation of signal parameters via rotational invariance techniques) 알고리즘 기반 재구성 가능한 각도 추정기를 제안 및 설계하였다. ESPRIT은 배열 안테나(uniform linear array)의 천이불변(shift invariance) 성질을 이용해 배열 안테나에 도래하는 신호의 도래각을 추정하는 알고리즘이다. 하지만 여전히 ESPRIT 알고리즘은 공분산 행렬, 고윳값 분해 등 높은 복잡도를 가지는 연산을 필요로 하므로 실시간 도래각 추정을 위해 하드웨어 프로세서로 구현이 필요하다. ESPRIT에서 성능은 안테나 개수와 관련이 있으며, 응용에 따라 요구되는 안테나 수는 상이할 수 있다. 이에 본 논문에서는 응용되는 분야에 따라 성능을 높이고 연산 복잡도 문제를 시킬 수 있도록 2~8개의 가변 안테나 개수를 지원하는 ESPRIT 프로세서를 제안하였다. 또한, 제안된 ESPRIT 프로세서는 MI-ESPRIT 구조를 기반으로 배열 안테나의 다중 불변성을 활용하여 성능을 향상시켰으며, 최소자승법 알고리즘을 간소화 시켜 복잡도를 감소시켰다.

References

[1] M. Shahroz, F. Ahmad, M. S. Younis, N. Ahmad, Maged N. K. Boulos, R. Vinuesa, J. Qadir, "COVID-19 Digital Contact Tracing Applications and Techniques: A Review Post Initial Deployments," *arXiv e-prints*, 2021.
DOI: 10.1016/j.treng.2021.100072.2021.

[2] P. Kumar, L. Reddy, and S. Varma, "Distance measurement and error estimation scheme for RSSI based localization in Wireless Sensor Networks," *Wireless Communication and Sensor Networks (WCSN), 2009 Fifth IEEE Conference*, pp.1-4, 2009. DOI: 10.1109/WCSN.2009.5434802

[3] Jagoba Arias, Aitzol Zuloaga, JesusLazaro, Jon Andreu, Armando Astarloa, "Malguki: an RSSI based ad hoc location algorithm," *Microprocessors and Microsystems*, pp.403-409, 2004.

DOI: 10.1016/j.micpro.2004.03.001

[4] Santiago Ezpeleta, Jose M. Claver, Juan Jose Perez Solano, Jose V. Marti, "RF-Based Location Using Interpolation Functions to Reduce Fingerprint Mapping," *Sensors*, 2015, 15, 27322-27340;

DOI: 10.3390/s151027322

[5] Kim H., Seo Y., Kim J., Yeom C., Won Y., "Mechanism for Minimizing Positional Errors Using Bluetooth Packet Information," *Proceedings of the Korea Information Processing Society Conference*, vol.27, no.2, pp.769-772, 2020.

[6] Su, Z., Pahlavan, K., Agu, E., "Performance Evaluation of COVID-19 Proximity Detection Using Bluetooth LE Signal," *IEEE Access*, vol.9, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3064323

[7] Z. Yan, J. Yang, and E. M. Tapia, "Smartphone Bluetooth based social sensing," *Proceeding of UbiComp*, pp.95-98, 2013.

DOI: 10.1145/2494091.2494118

[8] Gary F. Hatke, Monica Montanari, Swaroop Appadwedula, Michael Wentz, John Meklenburg, Louise Ivers, Jennifer Watson, Paul Fiore, "Using Bluetooth Low Energy (BLE) signal strength estimation to facilitate contact tracing for COVID-19," *arXiv*, 2020. DOI: 10.48550/arXiv.2006.15711

[9] Lee H., Lee S., "Study on the Security Evaluations and Countermeasure of Exposure Notification Technology for Privacy-Preserving COVID-19 Contact Tracing," *Journal of The Korea Institute of Information Security & Cryptology*, vol.30, no.5, pp. 929-943, 2020.

DOI : 10.13089/JKIISC.2020.30.5.929

[10] "android-How to improve Bluetooth distance measuring using RSSI?," *Stack Overflow* <https://stackoverflow.com/questions/27939719/how-to-improve-bluetooth-distance-measuring-using-rssi>

[11] "Exposure Notification Bluetooth Specification, Google," v1.2, 2020.

<https://covid19.apple.com/contacttracing>

BIOGRAPHY

Dohyun Lee (Member)



He received the B.S. degree in computer engineering from Seokyeong University, Seoul, Korea, in 2020. He is currently pursuing the M.S. degree in software engineering with Hanyang University, Seoul, South Korea.

His research interests include artificial intelligence, machine learning, deep learning, computer vision, and bioinformatics.

Byunghyun Kim (Member)



He received the B.S. degree in computer engineering from Seokyeong University, Seoul, Korea, in 2020. He is currently pursuing the M.S. degree in software engineering with Hanyang University, Seoul, South Korea.

His research interests include artificial intelligence, machine learning, deep learning, computer vision, and natural language processing.

Jongwha Chong (Member)



He received his BS and MS degrees in electronics engineering from Hanyang University, Seoul, Rep. of Korea, in 1975 and 1979, respectively, and his PhD degree in electronics and communication engineering from Waseda University, Tokyo, Japan, in 1981.

Since 1981, he has been a professor of the Department of Electronics Engineering, Hanyang University, Seoul, Korea. His current research interests include SoC design methodology (including memory centric design and physical design automation of 3D ICs), indoor wireless communication SoC designs for ranging and location, video systems.

Sungjin Lee (Member)

He received the B.S degree in electrical engineering from Myongji University, Gyeonggi-do, Korea, in 1998. He is currently working at Daebo Communication & Systems Co., Ltd. His areas of interest include tolling and V2X communication technology.

Kyeongyuk Min (Member)

He received the B.S degree in physics from Korea University, Seoul, Korea in 1992. He received the M.S. and the Ph.D. degree in electronics engineering from Hanyang University, Seoul, Korea in 1996, and 2010 respectively.

He became a Member (M) of IEEE in 2002. His current research interests the digital Cinema, the implementation of FMCW radar, and the hardware design of real-time H.264 encoder/decoder and JPEG2000 encoder/decoder.