

## 향상된 신호 추정을 위한 안테나 오차 보정 과 수정된 최적 가중치를 이용한 디지털 빔 형성 성능 분석에 관한 연구

조 성 국\* · 이 준 동\*\* · 양 길 모\*\*\*

### *A Study on the Performance Digital Beamforming using Antenna Error Correction and Modified Optimum Weight for Improved Signal Estimation*

Cho, Sung Kuk · Lee, Jun Dong · Yang, Gill Mo

#### 〈Abstract〉

Method a target estimation in spatial are mobile wireless communication using network cell and GPS. It have much error that mobile wireless communication depend on cell size. GPS method can't find a target in shadow and inner area. In this paper, we estimate a target as direction of arrival method using adaptive array antenna system. Adaptive array antenna system can obtain desired signal to remove other signal This paper studied digital beamforming method in order to estimation a target. Proposed method is modified optimum weight and antenna error correction to estimation an optimal receive signal. Digital beamforming method decided a signal phase and amplitude from received signal on array antenna element. But if it is not to do error correction of received signal, system performance have decreased. Firstly, we proposed modified optimum weight in order to finding desired target. Secondly, we are error correction of antenna incident signals by optimal weight before digital beamforming method. Thirdly, throughly simulation, we showed that system performance of proposed method compare proposal method with general method. It have improved resolution of estimation target to good performance more proposed method than general method.

Key Words : Adaptive Array Aantenna, Weight, MUSIC, Digital Beamforming

## I. 서론

레이더란 안테나를 이용하여 신호를 송신하고 물체로 부터 반사된 신호를 수신하여 정보를 추측하는 시스템이다. 레이더는 RAdio Detection And Ranging의 약자이다[1-2]. 초기에 연구된 레이더는 군사용으로 이동 물체의 정보를 탐지하고 대공무기를 통제하

\* 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 교수

\*\* 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 교수

\*\*\* 강릉원주대학교 멀티미디어공학과 교수(교신저자)

기 위한 시스템으로 개발되었다. 레이더의 기본구성은 신호를 송신하는 송신 안테나, 물체로부터 정보를 수신하는 수신안테나 및 송수신기로 구성되어 있다. 레이더는 목표물의 위치를 탐지하고 추적하는데 목표가 있으며, 수신안테나는 반사 에너지를 모아 수신기로 보내고 신호를 처리한다[3]. 레이더를 이용한 목표물 거리 추정은 송신 신호가 목표물에 반사되어 오는 시간으로 결정되고, 목표물의 방향 및 고도는 수신기에 입사되는 반사파 신호 방향으로 결정한다. 본 논문에서는 이동 물체 추정시 정확도를 향상시키기 위해서 적응배열 안테나를 사용한다. 레이더에서 안테나는 고 지향성과 저 부엽레벨, 신속한 빔 주사, 저 전력 특성을 갖는 안테나가 적합하다. 적응배열안테나는 여러 개의 안테나 소자를 일정하게 위치시켜 각 안테나 소자에서 방사되는 전력이 특정한 방향으로 보강간섭을 생성하고, 다른 방향으로서는 상쇄간섭이 생성하여 원하는 방향의 지향성을 향상시킨다. 적응배열 안테나는 배열 안테나 소자들의 수신 신호를 공간적인 필터링을 통하여 재밍, 클러터, 간섭, 잡음 등의 원하지 않는 신호 제거하고 원하는 신호만을 얻을 수 있다[4]. 본 논문에서는 수신신호에 가중치를 이용하여 빔을 형성하는 디지털 빔 형성 방법에 대해서 연구하였다. 디지털 빔 형성 방법은 적응배열 안테나의 한 부분으로 디지털 빔 형성의 성능은 안테나 소자에 수신되는 많은 위상과 크기로 결정되지만 빔 지향의 오차가 보정되지 않으면 원하는 신호를 추정할 때 목표물의 신호 정보에 많은 오차가 발생하기 때문에 시스템의 성능이 저하된다[5-6].

본문에서는 원하는 정보를 정확히 추정하기 위해서 적응배열 안테나 시스템을 적용하고, 적응배열 알고리즘을 적용하기 전에 수정 가중치를 계산하여 오차를 보정하여 신호 대 잡음비를 향상시키고, 간섭, 잡음, 클러터, 재밍 신호를 제거하여 원하는 방향으로 빔을 지향하는 시스템에 대해서 연구하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 적응 배열 시스템에서 수정된 최적 가중치를 구하는 방법에 대해서 제안하였고, III장에서는 디지털 빔 형성을 위한 수신신호 안테나 보정방법에 대해서 제안하였다. IV장에서는 제안된 방법을 모의실험으로 통하여 분석하였고, 마지막으로 V장에서는 결론을 맺었다.

## II. 관련연구

### 2.1 수정된 최적 가중치

적응배열 배열 안테나 시스템은 빔 형성기, 배열안테나, 적응신호처리기, 가중치 등으로 구성된다[7, 8]. 빔 형성기는 그림1에서 점선으로 나타난 부분이고 적응신호처리기는 일반적으로 가중치를 구하기 위한 알고리즘이 사용된다. 그림1은 배열안테나에 입사되는 신호에 적응신호처리기의 가중치를 곱하여 출력 신호를 나타낸다. 그림 1에서 적응배열 안테나 시스템에서 배열 안테나 소자는  $M$ 개, 배열 안테나에 수신 신호는  $P$ 개다. 배열안테나의 수신신호는 다음과 같이 나타 낼 수 있다[9].

$$X(t) = Ax(t) + n(t) \quad (1)$$

여기서  $x(t)$ 는 배열 안테나에 입사하는 신호,  $A(\theta)$ 는 지향 벡터,  $n(t)$ 는 잡음이다.

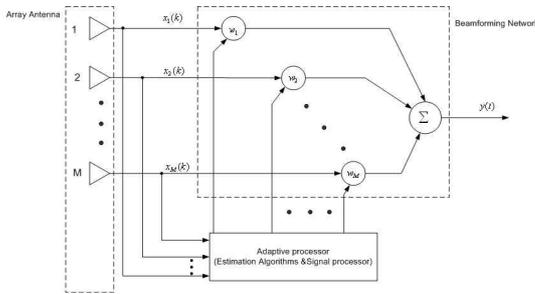
$$A = [a(\theta_1), a(\theta_2), \dots, a(\theta_p)]^T \quad (2)$$

$$a(\theta) = \exp(-j2\pi\beta d \cos\theta) \quad (3)$$

$\beta$ 는  $2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$ 는 파장,  $d$ 는 배열 안테나 소자간의 간격이다. 일반적으로 그레이팅 로브를 피하기 위해서

소자간의간격은 반파장 으로 배열한다. 이때, 적응배열 안테나 시스템의 출력 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = WX(t) \quad (4)$$



<그림 1> 적응배열 안테나 시스템

여기서,  $W$ 는 복소 공액 가중벡터(Complex conjugate weight vector)이며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_M] \quad (5)$$

수신신호의 정보를 추정하기 위해서는 신호의 공분산 행렬을 계산하여야한다. 공분산 행렬  $R$  은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = E[X(t)X^H(t)] = ASA^H + \sigma^2 I \quad (6)$$

여기서  $(\cdot)^H$ 는 허미트(hermit matrix)행렬,  $\sigma$ 는 분산,  $I$ 는 단위행렬을 나타낸다. 배열 수신 신호 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \begin{bmatrix} s_{00} & s_{01} & \dots & s_{0L} \\ s_{01} & s_{11} & \dots & s_{1L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{0L} & s_{1L} & \dots & s_{LL} \end{bmatrix} \quad (7)$$

원하는 신호와 간섭신호 간의 상관도를 제거한 공분산 행렬( $R_t$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = \frac{1}{2}(R + R_c) \quad (8)$$

여기서  $R_c$ 는  $z(t)$ 의 공분산 행렬로서  $z(t)$ 는 SPT(spilt polarity transformation)행렬로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z(t) = T(\theta_0)X(t) \quad (9)$$

여기서  $T(\theta_0)$ 는 SPT행렬이다. 식(9)를 만족하는 SPT행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T(\theta_0) = \hat{A} J \hat{A}^+ \quad (10)$$

여기서  $\hat{A}^+$ 는  $\hat{A}$ 의 의사역행렬(pseudo inverse matrix)이다. 제한행렬  $\hat{A}$ 는 원하는 신호와 상관성 간섭신호의 상관도를 제거하는데 사용된다. 제한행렬  $\hat{A}$ 를 구성하는 표본입사각과 상관성 간섭신호의 입사 방향 사이에 오차가 존재하면 빔 형성기의 성능은 크게 저하된다. 이때 고차제한조건을 이용하여 입사각의 범위를 증대시키면 실제 값과 임의로 설정된 값 사이에 발행하는 오차를 보상 할 수 있다. 오차 제한 조건을 적용한 제한행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{A} = [a(\theta_0), a(\hat{\theta}_1), a^1(\theta_1), \dots, a(\hat{\theta}_g), a^1(\theta_g), \dots, a^D(\hat{\theta}_g)] \quad (11)$$

여기서  $g$ 는 임의로 설정한 표본 입사각 개수이고,  $a^D(\theta_g)$ 는 각각  $\theta_g$  방향의 지향벡터에 대한  $D$ 차 미분을 의미한다. SPT행렬로 상관도를 제거한 입력 공분산 행렬의 최적 가중치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_{opt} = \gamma [R_t + \lambda_0 I]^{-1} a(\theta_0) \quad (12)$$

### III. 안테나보정을 이용한 출력 신호와 MUSIC 알고리즘

디지털 빔 형성에서 원하는 빔을 형성할 때, 배열 안테나 소자의 위상과 크기를 보정함으로써 효율적인 빔을 생성할 수 있다. 디지털 빔 형성의 안테나 소자에 수신되는 위상과 크기의 오차가 보정되지 않으면 성능이 크게 감소된다. 이러한 안테나 위상 및 크기의 오차보정이 디지털 빔 형성 알고리즘이 처리되기 이전에 가중치들을 곱함으로써 보정 될 수 있다. 안테나 보정을 통하여 효과적인 가중치를 구할 수 있다. 여기서 배열 응답 벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다. [10-11]

$$A(f) = \begin{bmatrix} a_1(f)e^{j\phi_1(f)} \\ a_2(f)e^{j\phi_2(f)} \\ \vdots \\ a_M(f)e^{j\phi_M(f)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_1(f) \\ \epsilon_2(f) \\ \vdots \\ \epsilon_M(f) \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서,  $a_M$ 은 진폭,  $\phi_M$ 은 위상,  $f$ 는 중심주파수,  $M$  전체 배열안테나 소자수이다. 배열 응답벡터의 진폭이 1이고 위상이 0인 기준채널로 설정하면 식(13)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(f) = \begin{bmatrix} 1 \\ \epsilon_2(f) \\ \vdots \\ \epsilon_M(f) \end{bmatrix} \quad (14)$$

배열 안테나의 이득 패턴은 조향 각도에 대해  $\cos(\theta)$ 로 감소되므로, 안테나 소자의 이득함수 영향을 고려한 보정된 신호는 다음과 같이 나타 낼 수 있다[12-13].

$$X(f) = \frac{[\cos(\theta)]^{0.5}}{\sqrt{N}} e^{-j\psi} \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi f d \sin(\theta)}{c}} \\ e^{-j\frac{2\pi f d \sin(\theta)}{c}} \\ \vdots \\ e^{-j\frac{2\pi f d \sin(\theta)}{c}} \end{bmatrix}$$

여기서,  $\psi$ 는 신호의 절대위상을 나타낸다. 배열 안테나 소자에 입사되는 신호에서 위상이 보정된 신호의 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(f) = X(f) W_{opt}^H(f) \quad (16)$$

본 연구에서는 적응신호처리기에서 MUSIC (MUltiple Signal Classification) 알고리즘을 적용하여 신호의 도래방향을 추정한다. MUSIC알고리즘은 신호 부공간과 잡음 부 공간으로 구분하여 도래방향을 추정하는 알고리즘이다. MUSIC알고리즘의 공분산 행렬은 고유치와 고유벡터로서 다음과 같이 나타낼 수 있다[14].

$$R_t = E_s \Lambda_s E_s^H + E_n \Lambda_n E_n^H = \sum_{j=1}^K \lambda_j e_j e_j^H + \sigma^2 \sum_{j=K+1}^M e_j e_j^H \quad (17)$$

$\lambda_j$ 는 고유치이고,  $e_j$ 는 고유벡터이다. 여기서,  $E_s$ 는 신호 고유벡터의 신호부분공간이고,  $E_n$ 는 잡음부분공간이다. 가중치가 직교성을 갖고,  $w^H w = I$  이면 출

력 공분산 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = W_{opt}^H A S A^H W_{opt} + \sigma^2 I \quad (18)$$

식(18)을 고유치와 고유벡터형태로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_t = E_s \Delta_s E_s^H + \sigma^2 E_n E_n^H \quad (19)$$

여기서,  $E_s$ 는 신호 고유벡터이고,  $E_n$ 는 잡음 고유벡터이다.  $\Delta_s$ 는 고유치 행렬이다. 빔 공간 MUSIC 알고리즘의 출력 스펙트럼은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \frac{W_{opt}^H a(\theta) a^H(\theta) W_{opt}}{a(\theta) W_{opt} E_n E_n^H W_{opt} a^H(\theta)} \quad (20)$$

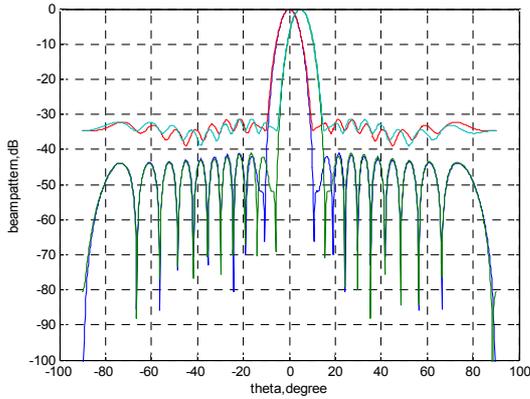
#### IV. 모의 실험

본 논문에서는 적응배열 안테나 시스템을 사용하여 최적의 수신신호를 추정하기 위해서 안테나 보정과 수정된 최적의 가중치를 구하여 목표물을 정확히 추정할 수 있는 디지털 빔 형성 오차보정 기법에 대해서 연구하였다. 적응신호처리 알고리즘은 목표물 추정시 분해능이 높은 MUSIC 알고리즘을 적용하였다. 디지털 빔 형성 기법은 배열 안테나 소자에 수신되는 신호의 위상과 크기로 결정되지만 수신 신호 오차가 보정되지 않으면 시스템 성능이 열화 되어 목표물을 정확히 예측할 수 없다. 본 논문에서는 최적가중치의 해를 구하고, 이에 대한 빔패턴 과 신호 대 잡음비를 변화가면서 위상에 따른 디지털 빔 형성 오차 보정을 모의실험 하였다. 그림2는 디지털 빔 형성이 0° 일 때를 나타낸다. 0°에서 디지털 빔 형성을 하고

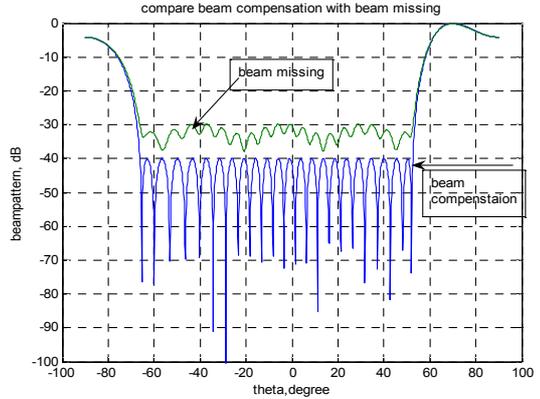
자 했지만 빔의 오차가 생겨서 정확히 원하는 목표물의 빔 지향을 할 수 없어서 오차를 보정한 결과를 나타낸 그래프이다. 디지털 빔 형성의 오차를 보정한 결과 0° 에서 정확히 빔을 지향하고 있다. 그림3은 배열안테나소자 하나가 정상적인 동작을 하지 않을 경우 빔 형성의 결과이다. 이 경우에는 목표물을 정확히 추정할 수 없지만 디지털 빔 형성의 오차보정과 수정된 최적의 가중치로서 안테나 소자 하나가 작동을 하지 못하더라도 정확히 목표물을 추정하고 있다. 본 논문에서 제안한 방법으로 배열소자 하나가 정상 동작하지 않을 경우에도 오차보정을 통하여 빔 형성을 할 수 있는 결과를 보여주고 있다. 그림4는 목표물이 두 개일때 0°와 10° 두 방향에서 원하는 목표물의 도래방향을 추정하였다. 기존 방법으로 원하는 목표물의 추정방향에서는 0°에서 약 5°의 오차가 발생하였다. 그리고 10°에서는 약14°의 오차가 발생하였다. 그리고 목표물 두 개를 정확히 추정하고 있지 못하다. 그림 5는 본 연구에서 제안한 안테나 보정기법과 수정된 최적의 가중치를 이용하여 0°와 10°에서 모두 정확히 원하는 목표물의 도래방향을 추정하였다. 그림4와같이 본 연구 방법이 우수한 이유는 디지털 빔 형성을 하기 이전에 안테나 보정을 취하고 적응신호 알고리즘에서 최적의 가중치를 제공하기 때문에 정확히 목표물의 도래방향을 추정할 수 있다.

<표 1> 모의실험 조건

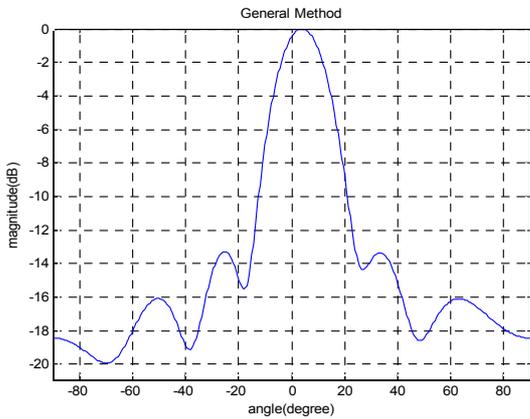
분류	수치
안테나개수	9
신호대잡음비	20dB
안테나 간격	$\lambda/2$
스냅샷 수	100회
목표물 수	2개[0°, 10°]



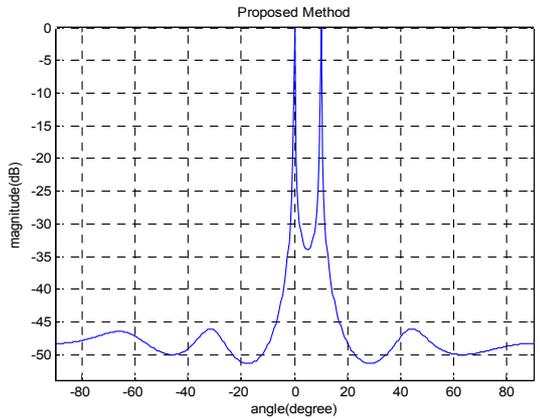
<그림 2> 빔 패턴 보정



<그림 3> 배열 소자 여러 빔 패턴 보정



<그림 4> 기존 알고리즘의 목표물 추정 정확도 method



<그림 5> 제안된 알고리즘의 목표물 추정 정확도

## V. 결론

공간상에서 목표물을 추정하는 방법은 일반적으로 이동통신망과 위성을 이용하여 찾는 방법이 있다. 이동통신망의 방법은 목표물 위 위치추적 범위가 셀의 크기에 따라 의존하기 때문에 오차범위가 크다. 위성 통신을 이용한 위치추적 방법은 실외가 아닌 실내 혹은 음영지역에서는 전파가 목표물에 도달하지 못하기 때문에 이용할 수 없다. 본 논문에서는 목표물을 정확히 추정하기 위해서 적응배열 시스템의 디지털

빔 형성 기법에 대해서 연구하였다. 그리고 기존의 빔 형성 MUSIC 알고리즘과 성능을 비교 하였다. MUSIC 알고리즘은 일반적으로 목표물 도래 방향 추정시 분해능이 우수한 알고리즘이다. 본 연구가 기존의 방법보다 향상된 것은 수정된 최적의 가중치를 구하여 디지털 빔 형성하기 전에 수신 신호 오차를 보정하였다. 위상과 크기로 결정되는 디지털 빔 형성 성능은 수신신호의 안테나 보정이 이루어지지 않으면 시스템의 성능이 열화 되어 목표물 추정이 감소한다. 이러한 안테나 위상 및 크기의 오차보정이 디지털

털 빔 형성 알고리즘이 수행되기 이전에 수정 가중치들을 이행함으로써 보정 될 수 있다. 본 논문에서 연구한 방법 수정된 최적가중치와 안테나 수신신호를 보정하여 디지털 빔 형성의 분해능을 향상시켰다.

## 참고문헌

- [1] Merrill, Skolnik, Introduction to Radar System, McGraw-Hall, 2000.
- [2] Jerry L. Eaves and Edward K. Reedy, Principles of Modern Radar, Van Nostrand Reinhold New York, 1987.
- [3] Burdick, Radar Signal Analysis, Prentice-Hall, 1968.
- [4] 주종혁 · 이명호, "적응배열 레이더 시스템에서 최적 가중치 방법에 대한 연구," 한국정보기술학회, 한국정보기술학회 논문지, 제6권, 제5호, 2008.
- [5] Kai-Bor Yu and Murrow, D. J., "Adaptive digital beamforming radar for monopulse angle estimation in jamming," *IEEE statistical and Array processing Proceedings*, 2000, pp. 272-275.
- [6] Yoshinaga, H, Taromaru, M. and Akaiwa, Y, "Performance of adaptive array antenna with widely spaced antenna elements," *IEEE VTS 50th Vol. 1*, 1999, pp. 72-76.
- [7] Jacek Dmochowski, Jacob Benesty, and Sofiène Affes, "Direction of Arrival Estimation Using the Parameterized Spatial Correlation Matrix," *IEEE Tran on Audio Speech and Language Processing* Vol. 15, No. 4, 2007, pp. 1327-1339.
- [8] David Astély, and Björn Ottersten, "The Effects of Local Scattering on Direction of Arrival Estimation with MUSIC," *IEEE Trans on Signal Processing* Vol. 47, No. 12, 1999, pp. 3220-3234.
- [9] F. Colone, D. Cristallini, Maori, and P. Lombardo, "Direction of arrival estimation performance comparison of dual cancelled channels space time adaptive processing techniques," *IET Journals&Magazines*, Vol. 8, No. 1, 2014, pp. 17-26.
- [10] K. H. Lee, "A Study on Non Blind Algorithm of subarray signal processing for desired signal estimation," *International Journal of Control and Automation(IJCA)*, Vol. 6, No. 3, 2013, pp. 373-380.
- [11] N. Le Bihan, S. Miron, and J. I. Mars, "MUSIC algorithm for vector sensors array using biquaternions," *IEEE Trans, signal processing*, Vol. 55, No. 9, 2007, pp. 4523-4533.
- [12] WenFei, Wan. Qun, Fan Rong, and Wei Hewen, "Improved MUSIC algorithm for Multiple Noncoherent Subarrays," *IEEE Trans signal processing Letters*, Vol. 21, No. 5, 2014, pp. 527-530.
- [13] 한연규, 양현욱, 김경훈, 최승원, "LTE기반 MU-MIMO 시스템에 구현한 빔 포밍 알고리즘," 디지털산업정보학회 논문지, 제8권, 제4호, 2012, pp. 121-127.
- [14] 송철봉, 장재현, 양현욱, 최승원, "LTE기반 하향링크의 Zadoff-chu 시퀀스를 이용한 배열 안테나 Calibration 알고리즘," 디지털산업정보학회 논문지, 제9권, 제4호, 2013, pp. 51-57.

■ 저자소개 ■



조 성 국  
Cho, Sung Kuk

1993년 3월~현재  
강릉원주대학교 멀티미디어공학과  
교수  
1999년 2월 청주대학교 전자공학과(공학박사)  
1989년 2월 청주대학교 산업대학원  
전자계산학과(공학석사)  
1986년 2월 청주대학교 전자공학과(공학사)

관심분야 : wireless multimedia system,  
Signal Processing, operating  
system  
E-mail : skc899@gwnu.ac.kr



이 준 동  
Lee, Jun Dong

1997년 3월~현재  
강릉원주대학교 멀티미디어공학과  
교수  
2001년 2월 홍익대학교 전산학과(이학박사)  
1993년 8월 홍익대학교 전산학과(이학석사)  
1990년 2월 홍익대학교 전산학과(이학사)

관심분야 : 시스템소프트웨어, 모바일,  
임베디드 시스템, 성능분석  
E-mail : jlee@gwnu.ac.kr



양 길 모  
Yang, Gil Mo

1990년 4월~현재  
강릉원주대학교 멀티미디어공학과  
교수  
2001년 2월 충북대학교 정보통신공학부  
(이학박사수료)  
1990년 3월 동경농공대학교 수리정보공학과  
(이학석사)  
1983년 2월 홍익대학교 전산계산학과(이학사)

관심분야 : 데이터베이스, AI  
E-mail : gmyang@gwnu.ac.kr

논문접수일: 2014년 9월 17일
수 정 일: 2014년 10월 2일
게재확정일: 2014년 10월 22일