

입자군집 최적화 알고리즘을 이용한 배열안테나의 상호결합에 의한 방사패턴 왜곡보상

김재희*, 안치형*, 전중창**

Compensation of Radiation Pattern Distortion by Mutual Coupling in the Array Antenna Using the Particle Swarm Optimization Algorithm

Jae Hee Kim*, Chi-Hyung Ahn*, Joong-Chang Chun**

요약 본 논문은 배열안테나의 상호결합(mutual coupling)에 의한 방사패턴 왜곡을 보상하는 최적화 방법을 제시하도록 한다. 배열안테나에서 안테나 사이의 간격이 좁아지게 되면 안테나 상호간의 커플링에 의해 방사패턴에 왜곡이 발생하게 된다. 상호결합은 각 안테나에 여기되는 신호의 크기와 위상을 변화시키며 이는 방사패턴의 왜곡으로 이어진다. 이런 방사패턴의 왜곡 문제를 해결하기 위하여 상호결합을 고려한 여기신호를 각 배열 요소에 공급하는 방법을 제안하였다. 공급신호의 크기와 위상을 결정하기 위하여 입자 군집 최적화 알고리즘(Particle Swarm Optimization)을 사용하였다. 왜곡 보상을 검증하기 위하여 전방향으로 동일한 방사패턴을 갖는 다이폴안테나를 사용하였으며, 배열안테나의 간격을 0.2파장으로 두어 상호결합이 많이 발생하도록 하였다. 최적화를 통한 안테나의 신호를 선정할 결과 이상적인 방사패턴과 동일한 결과가 나오는 것을 확인하였다.

Abstract This paper proposes the compensation method which decreases the radiation pattern distortion caused by the mutual coupling in an array antenna. If the element distance of an array antenna decreases, the radiation pattern could be distorted by the strong mutual coupling, which changes the magnitude and phase of input signals and causes an unwanted radiation pattern. To remove the pattern distortion, compensated input signals are inserted in an array antenna. The magnitude and phase of input signals are determined by Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm. A 4x1 dipole array antenna with omnidirectional elements is used to confirm the validity of the algorithm, where each element is placed in 0.2 wavelength to evoke the strong coupling. After input signals are optimized by PSO, it is found that the compensated radiation results in the same as the ideal case.

Key Words : Antenna Array, Mutual Coupling, Particle Swarm Optimization, Pattern Compensation

1. 서론

최근 무선통신환경은 데이터의 대용량화와 기구물의 소형화를 추구하는 추세이다. 특히 통신의 데이터량을 늘리고 속도를 개선하기 위하여 다중안

테나 시스템을 채택하고 있으며, 개인용 무선통신을 위해 소형 단말기에 기능을 집적화 하고 있다. USB Dongle에 다중안테나를 사용하는 경우[1], 휴대폰 단말기에 다중안테나를 사용하는 경우[2] 등이

This work was supported by Gyeongnam National University of Science and Technology Grant 2015.

*Korea Railroad Research Institute

**Corresponding Author : Department of Electronics, Gyeongnam National University of Science and Technology (jchun@gntech.ac.kr)

Received September 28, 2016

Revised October 24, 2016

Accepted October 28, 2016

대표적인 예이다. 이러한 소형단말기에 다중안테나를 사용하는 경우 단일 안테나의 사이즈를 줄여야 [3] 할 뿐만 아니라 상호결합에 의한 성능저하 또한 개선해야 한다[4]. 안테나가 근접하게 되면 상호 영향으로 인해 방사패턴을 왜곡시켜 송수신율을 저하시키게 된다.

안테나의 소형화 및 성능 최적화를 위해서는 직관과 경험적으로 설계하는 방법도 있지만 컴퓨터를 이용한 최적화 방법을 사용할 수도 있다. 최근 유전알고리즘이나 입자군집 최적화 알고리즘이 다양한 엔지니어 분야에 적용이 되고 있으며, 안테나 설계 분야에서도 활발하게 적용이 되고 있다[5-8]. 최적화 알고리즘은 안테나 형상 및 파라미터의 최적화에 적용 된다. 안테나 설계를 위해서는 이론에 근거한 다양한 경험이 필요하나 이러한 최적화 설계법은 안테나에 대한 근본적인 이해가 없이 설계가 가능할 뿐만 아니라 생각지 못한 새로운 구조를 제시해 줄 수 있다는 이점을 갖는다.

본 논문에서는 배열안테나의 상호결합에 의한 왜곡된 안테나의 방사패턴을 이상적으로 만들기 위해 안테나의 급전을 최적화 알고리즘인 입자군집 최적화(Particle Swarm Optimization: PSO) 알고리즘을 이용하여 찾는 방법을 제시하고자 한다. 제2장에서는 안테나 방사패턴에 최적화 알고리즘을 적용하기 위한 방법을 제시하고, 제3장에서는 최적화 알고리즘을 적용하여 급전 신호의 크기와 위상 등을 계산한 후 최적화 효과를 검증하도록 한다.

2. 입자군집 최적화 알고리즘의 구현

배열안테나에서 상호결합이 있는 경우, 참고문헌 [9]에 의거하여, 배열의 전체 패턴 $F_{un}(\theta, \phi)$ 는 아래 식과 같이 모든 상호결합을 여기신호에 포함시켜서 표현할 수 있다.

$$F_{un}(\theta, \phi) = g_i(\theta, \phi) \sum_{m=1}^N I_m e^{j\xi_m} \quad (1)$$

여기서 $g_i(\theta, \phi)$ 는 상호결합이 없을 때 단일 안

테나의 방사패턴이며, I_m 은 각 안테나에 여기되는 신호의 크기를, ξ_m 은 각 안테나에 여기되는 신호의 위상을 나타낸다. 식 (1)은 배열 소자 간의 상호결합이 있더라도 안테나에 여기되는 신호의 크기와 위상을 변화시켜서 상호결합이 포함된 방사패턴을 만들 수 있음을 의미한다. 따라서 상호결합이 있는 환경에서 이상적인 방사패턴을 얻기 위해서는 각 안테나에 입력되는 신호의 크기와 위상을 변화시키면 가능하다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 이상적인 방사패턴을 얻기 위하여 각 안테나로 여기되는 최적의 신호의 크기와 위상을 최적화 알고리즘을 이용해 찾고자 한다.

최적화 알고리즘으로는 PSO 방법을 채택하였으며, PSO 알고리즘은 무리지어 움직이는 새의 행동에 기인하여 만들어진 최적화 방법이다[5].

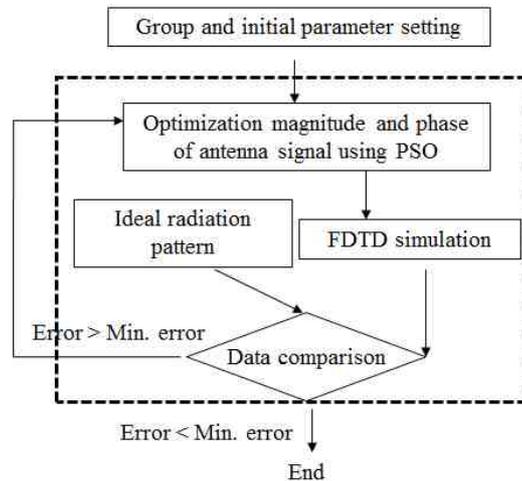


그림 1. 시뮬레이션 개략도
Fig. 1. Simulation flow chart

PSO는 유전알고리즘에 비해 수렴속도가 빠르고 알고리즘이 단순하기 때문에 사용하기 편한 이점을 갖는다. PSO는 MATLAB을 사용하여 PC에서 직접코딩을 하였으며, 안테나의 방사패턴은 FDTD 기반의 상용 소프트웨어인 CST MWS를 이용하여 평가하였다.

시뮬레이션의 개략도를 그림 1에 도시하였다.

우선적으로 배열안테나에 여기할 초기값과 그리고 그룹 개체수를 결정을 한다. 그리고 이상적인 경우에 대해서 안테나에 입력하는 신호에 대해서 방사패턴을 계산을 한다. 이때 방사패턴 계산은 이론적인 array factor(AF)를 계산함으로써 얻을 수 있다. 초기에 설정한 각 안테나의 입력신호(크기 및 위상)에 대해서 FDTD 수치해석 소프트웨어를 이용하여 계산을 한다. 계산된 방사패턴 값과 이상적인 방사패턴을 비교를 하고 만약 두 패턴간 차이가 크다면 PSO 알고리즘을 이용하여 최적화를 한다. 최적화된 값을 사용하여 다시 FDTD 시뮬레이션을 하며 이상적인 패턴과 비교를 한다. 만약 오차가 일정 값 이상이라면 다시 반복하며 최적화된 후 시뮬레이션을 종료한다. 이와 같은 시뮬레이션 방법을 통하여 이론적인 방사패턴과 동일하게 하기 위한 안테나의 입력신호를 결정할 수 있다.

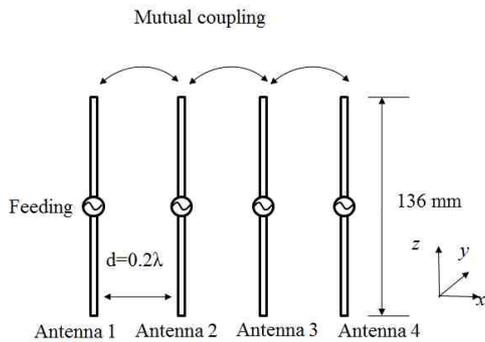


그림 2. 4X1 다이폴 배열 안테나 구조
Fig. 2. 4X1 dipole array antenna

본 논문에서 제시하는 방법을 검증하기 위하여 배열안테나를 선정하였다. 단일 안테나는 다이폴 안테나를 선정하였으며, 안테나간 간격은 커플링을 강하게 하기 위하여 0.2파장 떨어진 것으로 설정하였다. 다이폴 안테나는 H-평면이 전방향으로 무지향적인(omni-directional) 특성을 가지므로 이상적인 배열안테나의 방사패턴은 array factor 만으로 설정할 수 있다. 그림 2는 시뮬레이션에 사용한 안테나의 배치 및 구조를 보여주고 있다. 안테나는 1GHz에 설계를 하였으며 1GHz에 공진하기 위한

안테나의 길이는 136mm 이다. 그리고 안테나 도선의 반경은 0.5mm로 설정하였다. 배열 안테나의 수량은 4개로 선정을 하였으며 각 안테나간 떨어진 간격은 60mm 이다.

3. 방사패턴 최적화 알고리즘의 검증

PSO 알고리즘은 다음과 같이 간략히 수식으로 표현이 가능하다.

$$v_i(t) = \phi v_i(t-1) + \rho_1(x_{pbest} - x_i(t)) + \rho_2(x_{gbest} - x_i(t)) \quad (2)$$

$$x_i(t) = x_i(t-1) + v_i(t) \quad (3)$$

여기서 $\rho_1 = r_1c_1$, $\rho_2 = r_2c_2$ 이며, r_1, r_2 는 0과 1사이의 랜덤수치이다. 관성(ϕ)은 1.0, 수정요소(c_1, c_2)는 2.0으로 설정을 하였다. $x_i(t)$ 는 입력요소(배열안테나의 크기와 위상)이며, $v_i(t)$ 는 PSO알고리즘의 속도에 해당이 된다. PSO를 이용한 방사패턴 최적화를 위해 개체수는 10, 반복수는 100회로 설정하였다. 이상적인 방사패턴과 FDTD 시뮬레이션을 통한 방사패턴을 비교하여 에러를 계산할 때 각도별로 방사패턴 값(dB) 차이를 계산하고 이를 합하여 에러를 만들었다. 에러 값은 작을수록 이론과 일치하게 된다. 값을 최소화하기 위한 Cost Function의 정의를 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$Cost\ Func. = \sum_{\theta=1}^{360} |F_{ideal}(\theta) - F_{FDTD}(\theta)| \quad (4)$$

여기서 $F_{ideal}(\theta)$ 은 이론적으로 계산된 이상적인 방사패턴이며, $F_{FDTD}(\theta)$ 는 수치해석 기반의 상용시뮬레이션을 통해 얻은 방사패턴이다. θ 는 측정각도 이다.

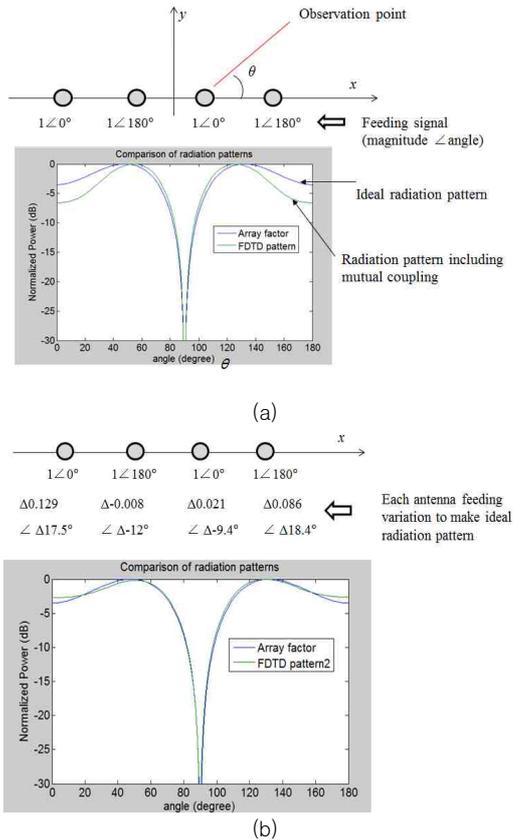


그림 3. 입력신호가 $1\angle 0^\circ, 1\angle 180^\circ, 1\angle 0^\circ, 1\angle 180^\circ$ 에 대해 상호결합이 있는 경우와 이상적인 경우의 방사패턴 비교 (a) 최적화 하기 전 (b) 최적화로 각 안테나의 입력신호를 보상한 경우

Fig. 3. Comparison between ideal radiation pattern and radiation pattern including mutual coupling for the input signals of $1\angle 0^\circ, 1\angle 180^\circ, 1\angle 0^\circ, 1\angle 180^\circ$ (a) without PSO optimization (b) with PSO optimization for the antenna feeding signal

그림 2의 안테나 1 ~ 4에 대해서 왼쪽부터 오른쪽까지 신호의 크기와 위상을 각각 $1\angle 0^\circ, 1\angle 180^\circ, 1\angle 0^\circ, 1\angle 180^\circ$ 으로 여기하였다. 이상적인 AF에 의한 방사패턴과 상호결합이 포함된 FDTD 시뮬레이션 방사패턴 결과를 그림 3(a)에 도시하였다. y 축 방향으로서는 방사패턴에 null 이 발생하는 것은 동일하게 나타나나 x축으로는 0도와 180도 방향에서 이상적인 경우와 방사패턴이 달라지는 것을 확인할 수 있다. AF와 동일한 방사패턴을 얻

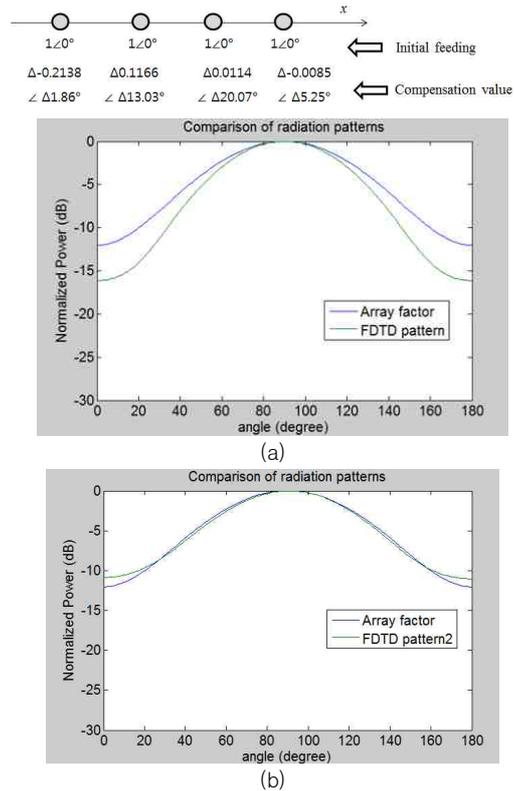


그림 4. 입력신호가 $1\angle 0^\circ, 1\angle 0^\circ, 1\angle 0^\circ, 1\angle 0^\circ$ 에 대해 상호결합이 있는 경우와 이상적인 경우의 방사패턴 비교 (a) 최적화 하기 전 (b) 최적화로 각 안테나의 입력신호를 보상한 경우

Fig. 4. Comparison between ideal radiation pattern and radiation pattern including mutual coupling for the input signals of $1\angle 0^\circ, 1\angle 0^\circ, 1\angle 0^\circ, 1\angle 0^\circ$ (a) without PSO optimization (b) with PSO optimization for the antenna feeding signal

기 위하여 각 안테나를 여기하는 신호의 값을 PSO를 이용하여 최적화 하였으며 최적화된 결과는 그림 3(b)에서 확인할 수 있다. 최적화 결과 초기값과의 차이는 $\Delta 0.129\angle \Delta 17.5^\circ, \Delta -0.008\angle \Delta -12^\circ, \Delta 0.021\angle \Delta -9.4^\circ, \Delta 0.086\angle \Delta 18.4^\circ$ 이며, 이때 이상적인 방사패턴과 각 안테나에 여기되는 신호를 변경하고 상호결합이 있는 방사패턴이 일치하는 것을 확인할 수 있다.

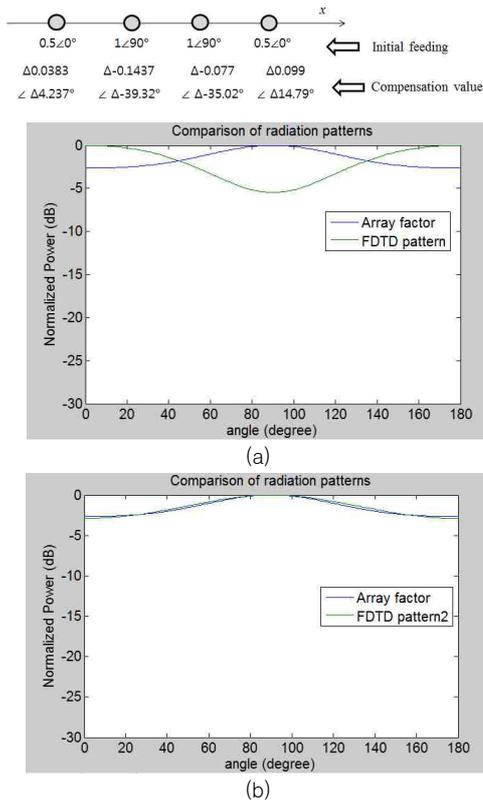


그림 5. 입력신호가 $0.5\angle 0^\circ$, $1\angle 90^\circ$, $1\angle 90^\circ$, $0.5\angle 0^\circ$ 에 대해 상호결합이 있는 경우와 이상적인 경우의 방사패턴 비교 (a) 최적화 하기 전 (b) 최적화로 각 안테나의 입력신호를 보상한 경우

Fig. 5. Comparison between ideal radiation pattern and radiation pattern including mutual coupling for the input signals of $0.5\angle 0^\circ$, $1\angle 90^\circ$, $1\angle 90^\circ$, $0.5\angle 0^\circ$ (a) without PSO optimization (b) with PSO optimization for the antenna feeding signal

다양한 입력신호에 대해서 방사패턴이 어떻게 변하는지에 대해서 살펴보았다. 각 안테나에 여기되는 입력신호가 동일한 경우($1\angle 0^\circ$, $1\angle 0^\circ$, $1\angle 0^\circ$, $1\angle 0^\circ$)에는 90도 방향으로 최대지향성을 갖는 방사패턴을 가지게 된다. 그림 4는 동일한 입력신호를 여기한 경우이며 상호결합이 존재하든 존재하지 않든지 90도 방향에서 최대지향성을 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만 상호결합에 의해 0도와 180도 지점에서 안테나의 방사패턴이 왜곡이 생기는 것을 확인할 수 있다. 입력신호를 보상하기 위하여 동일한 설정을 통한

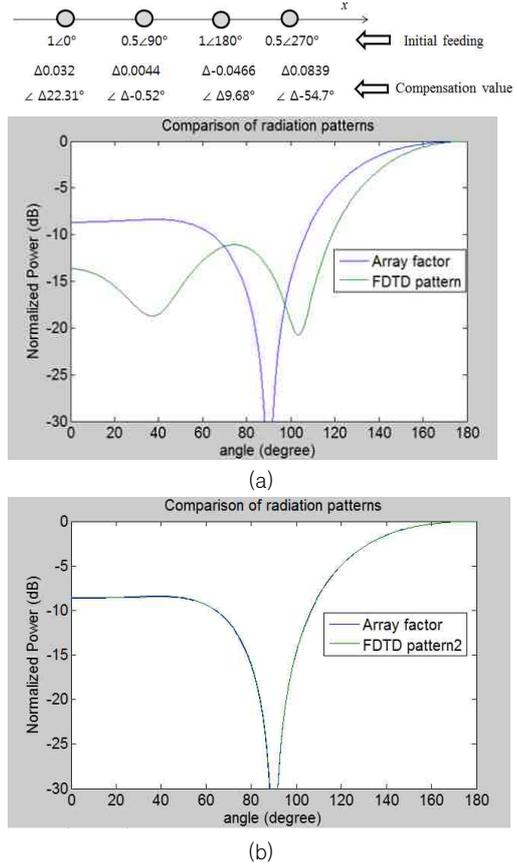


그림 6. 입력신호가 $1\angle 0^\circ$, $0.5\angle 90^\circ$, $1\angle 180^\circ$, $0.5\angle 270^\circ$ 에 대해 상호결합이 있는 경우와 이상적인 경우의 방사패턴 비교 (a) 최적화 하기 전 (b) 최적화로 각 안테나의 입력신호를 보상한 경우

Fig. 6. Comparison between ideal radiation pattern and radiation pattern including mutual coupling for the input signals of $1\angle 0^\circ$, $0.5\angle 90^\circ$, $1\angle 180^\circ$, $0.5\angle 270^\circ$ (a) without PSO optimization (b) with PSO optimization for the antenna feeding signal

PSO알고리즘을 이용한 최적화를 진행하였다. 최적화 결과 입력신호가 각 안테나 별로 $0.7862\angle 1.86^\circ$, $1.1166\angle 13.03^\circ$, $1.0114\angle 20.07^\circ$, $0.9915\angle 5.25^\circ$ 가 되었다. 이 입력신호를 상호결합이 포함된 배열안테나에 여기하였을 경우, 그림 4(b)에서와 같이 이론적인 AF에 의한 값과 일치하는 것을 확인할 수 있다. 입력신호가 $0.5\angle 0^\circ$, $1\angle 90^\circ$, $1\angle 90^\circ$, $0.5\angle 0^\circ$ 인 신호에 대해서는 그림 5(a)에서 보는바와 같이 이론적인 패턴과 상호결합에 포함된 패턴이 서로 반대의 경향을

갖는 것을 확인할 수 있다. 동일한 패턴을 갖기 위한 PSO로 최적화 한 각 안테나의 입력되는 신호의 값은 $0.5383 \angle 4.237^\circ$, $0.8563 \angle 50.68^\circ$, $0.923 \angle 54.98^\circ$, $0.599 \angle 14.79^\circ$ 이다. 최적화된 패턴은 그림 5(b)에 보여지고 있다. 마지막으로 입력신호를 $1 \angle 0^\circ$, $0.5 \angle 90^\circ$, $1 \angle 180^\circ$, $0.5 \angle 270^\circ$ 에 대해서 최적화를 진행하였으며, 최적화를 진행하기 전에는 그림 6(a)에서 보는 바와 같이 90도에 생겨야 할 Null이 상호커플링에 의해 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 그리고 패턴왜곡이 많이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 왜곡보상을 위하여 최적화를 진행한 각 안테나의 입력신호 값은 $1.032 \angle 22.31^\circ$, $0.5044 \angle 89.48^\circ$, $0.9534 \angle 189.68^\circ$, $0.5839 \angle 215.3^\circ$ 이다. 그림 6(b)를 보면 보상을 통해서 패턴이 이론적인 값과 동일하게 되는 것을 확인할 수 있다. 상기의 시뮬레이션 결과들로부터 상호결합이 있는 경우 방사패턴의 왜곡보상을 위해 입력신호의 크기와 위상을 조절할 수 있음을 알 수 있으며, 또한 보상된 결과들로부터 신호의 크기보다는 위상이 더 큰 값으로 보상된 것을 확인할 수 있다.

그림 6의 보상값을 살펴보면 4번째 안테나의 신호의 크기차는 0.0839의 값임에 반해 위상값은 54.7도가 변화함을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 배열안테나에 상호결합이 존재할 경우 안테나의 방사패턴이 왜곡되는 것을 보상하기 위하여 입자군집 최적화 알고리즘을 사용하여 각 안테나에 여기되는 입력신호를 변화시키는 방법을 제시하였다. 각 안테나간 거리가 0.2파장 떨어진 4X1 다이폴 안테나에 대해서 각 배열소자에 여기되는 신호의 크기와 위상을 최적화하여 상호결합이 없는 이론적인 경우와 동일한 방사패턴을 생성하였다. 이로써 최적화 방법에 의하여 신호의 크기와 위상을 조절함으로써 방사패턴이 이론값과 동일하게 산출되는 것을 검증하였다. 본 논문의 결과는 향후 휴대단말기와 같은 좁은 공간에 다수의 안테나가 집적되는 구조에서 안테나 방사패턴의 최적화에 효과적으로 활용될 수 있다.

REFERENCES

- [1] B. Kim, Y. Park, H. Wi, M. Park, Y. Choi, J. Lee, W. Jung, D. Kim, B. Lee, "Isolation Enhancement of USB Dongle MIMO Antenna in LTE 700 Band Applications", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 11, pp. 961-964, 2012
- [2] S. Shoaib, I. Shoaib, N. Shoaib, X. Chen, C. G. Parini, "MIMO Antennas for Mobile Handsets", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, Vol. 14, pp. 799-802, 2015
- [3] Jae-Ruen Shim, "A Novel Monopole Antenna for ISM 2.45GHz/5.8GHz Dual Band Characteristics by a Linear Monopole Antenna Combined with a Crossed Planar Monopole Antenna", *Journal of the Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, Vol. 8, No. 6 pp. 515-519, 2015.
- [4] Hong-Min Lee, "Multi-Band Antenna Using Folded Monopole Line and Log-Periodic Structure", *Journal of the Korea Institute of Information, Electronics, and Communication Technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 142-146, 2014.
- [5] A.P.Engelbrecht, "Fundamentals of Computational Swarm Intelligence", John Wiley & Sons, 2005
- [6] Aaron J. Kerkhoff, Robert L. Rogers, and Hao Ling, "Design and Analysis Planar Monopole Antennas Using a Genetic Algorithm Approach", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 52, No. 10, pp. 2709-2718, Oct. 2004.
- [7] M. Ohira, H. Deguchi, M. Tsuji, and H. Shigesawa, "Multiband Single-layer Frequency Selective Surface Designed by Combination of Genetic Algorithm and

Geometry-refinement Technique”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 52, No. 11, pp. 2925-2931, Nov. 2004.

[8] Y. Ge, K. P. Esselle, “GA/FDTD Technique for the Design and Optimization of Periodic Metamaterials”, *IET Microw. Antennas Propag.*, Vol. 1, No. 1, pp. 158-164, Feb. 2007.

[9] W. L. Stutzman, G. A. Thiele, *Antenna Theory and Design*, 2nd ed., Chap. 3, pp 125-128, John Wiley & Sons, 1998

전 중 창(Joong-Chang Chun) [종신회원]



- 1983년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1991년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
- 2003년 2월 ~ 현재 : 경남과학기술대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

안테나 및 마이크로파 공학, 레이더, 이미지 처리

저자약력

김 재 희(Jae Hee Kim) [정회원]



- 2004년 8월 : 고려대학교 전기전자전파공학부 (공학사)
- 2010년 2월 : 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학박사)
- 2010년 4월 ~ 2012년 7월 :삼성전자 무선사업부 책임연구원
- 2012년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

소형안테나, 무선전력전송, 최적화 알고리즘

안 치 형(Chi-Hyung Ahn) [정회원]



- 2002년 2월 : 인하대학교 전기공학과 (공학사)
- 2004년 2월 : 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학석사)
- 2010년 8월 : TEXAS A&M 전기전자공학과 (공학박사)
- 2010년 10월 ~ 2013년12월 : 삼성전자종합기술원 전문연구원
- 2014년 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

전자파해석, 안테나, 무선전력전송, 무선통신시스템