

고속 추적 특성을 위한 디지털 역지향성 배열 안테나 시스템 설계와 특성 평가

김 소 라*, 유 흥 균^o

System Design and Evaluation of Digital Retrodirective Array Antenna for High Speed Tracking Performance

So-Ra Kim*, Heung-Gyun Ryu^o

요 약

역지향성 배열 안테나 시스템은 기존의 빔형성 기술들에 비하여 복잡도가 낮고 간단하여 시스템 동작 속도가 빠르다. 따라서 고속이동체 환경에서의 빔추적에 용이하다. 하지만 역지향성 배열 안테나는 다중경로 환경 또는 다중 사용자 신호에 따른 AOA(angle of arrival) 추정에 어려움이 있다. 이러한 AOA 추정의 불확실성을 개선 하기 위해 MUSIC 알고리즘과 결합한 디지털 역지향성 배열 안테나 시스템을 제안한다. 본 논문에서는 위상을 추정하는 디지털 PLL 하나를 통하여 위상을 찾는 디지털 역지향성 배열 안테나 시스템을 설계하며 시속 300Km/h의 속도의 이동체를 송수신 거리 100m일때, 원 경로를 따라 움직이는 환경에서의 역지향성 배열 안테나 시스템의 성능을 확인하였고, 다중경로 환경을 고려 하였을 때 시스템의 성능 또한 확인하였다. 고속 추적 모델에 따라 AOA를 추적한 결과 10dB의 SNR에서는 오차크기의 평균이 4.2°, SNR이 20dB인 경우에는 오차크기 평균이 1.3°이다.

Key Words : Beam forming, Digital RDA, Phase conjugation, beam tracking, hybrid beamforming.

ABSTRACT

The retrodirective array antenna system is operated faster than existing techniques of beamforming due to its less complexity. Therefore, it is effective for beam tracking in the environment of fast vehicle. On the other hand, it also has difficulty in estimating AOA according to multipath environment or multiuser signals. To improve the certainty of estimating AOA, this article proposes hybrid digital retrodirective array antenna system combined with MUSIC algorithm. In this paper, the digital retrodirective array antenna system is designed according to the number of antenna array by using only one digital PLL which finds angle of delayed phase. And we evaluate the performance of the digital retrodirective array antenna for the high speed tracking application. Performance is studied by simulink when the speed of mobile is 300km/h and the distance between transmitter and receiver is 100m and then we have to confirm the performance of the system in multi path environment. As a result, the mean of AOA (Angle Of Arrival) error is 4.2° when SNR is 10dB and it is 1.3° when SNR is 20dB. Consequently, the digital RDA shows very good performance for high speed tracking due to the simple calculation and realization.

※ 이 논문은 2012년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

♦ 주저자 : 충북대학교 전자공학과, crazillusion@nate.com, 학생회원

° 교신저자 : 충북대학교 전자공학과, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2013-04-178, 접수일자 : 2013년 4월 18일, 최종논문접수일자 : 2013년 8월 1일

I. 서 론

스마트 세대라고 해도 과언이 아닐 만큼, 지난 몇 년간 스마트폰과 태블릿PC 등의 사용자 수가 증가하였다. 지난 2012년 12월 한국의 경우 전국민의 약 60% 스마트폰 사용자며 전세계 스마트폰 사용자는 11억 명으로 집계된 바 있다. 또한 스마트 통신기기를 통하여 주로 이용하는 서비스는 정보검색 또는 일반 적인 웹 서핑, 미디어 재생, 메신저 등인 것으로 조사되었다^[2]. 통계에서 알 수 있듯이 이제는 언제 어디서든 작은 스마트 기기를 통하여 웹 서핑뿐만 아니라, 사진, 동영상, 음악 등의 높은 데이터의 정보들은 송수신한다. 스마트폰 태블릿PC 뿐만 아니라 무선 통신 기기의 발전과 또한 방송과 통신을 융합한 융합미디어를 통한 변화가 급속히 전개됨에 따라 주파수 자원은 고갈 되어 가고 있다. 때문에 주파수 자원 사용 효율의 극대화 실현을 위한 CR(cognitive Radio) 기술과 소프트웨어 기반의 무선 통신 기술이 강조되고 있으며 공간적인 방향성을 갖는 안테나를 이용하는 빔형성 기술과 스마트 안테나 기술이 제안되고 활발히 연구 되고 있다. 빔포밍 기술은 여러 안테나의 배열을 이용하여 특정 방향과 각도로 빔을 형성하여 안테나 이득을 높이는 방식으로 차세대 무선통신기술에 핵심적인 기술 중 하나이다. 각 안테나 요소들에 가중치를 두게 되면 특정 각도로 안테나 이득을 얻을 수 있다. 빔포밍 기술 중에서도 사전 위치 정보 없이 신호를 재전송할 수 있는 특별한 기술인 역지향성 안테나 기술이 있다. AOA 추적 알고리즘과 MIMO, 아날로그 혹은 디지털 빔형성 기술 등이 연구되고 있는 가운데 본 논문의 빔형성 기술 중 하나인 디지털 역지향성 배열 안테나 기술은 아직 국내외에서 활발히 진행되지 않고 있다. MUSIC이나 ESPRIT와 같은 도래각 추정기법은 채널 추정과 MIMO 디코딩을 통하여 신호처리를 하여 신호를 분리하는 기술로 다중환경이나, 다중 사용자의 환경에서도 신호를 분해하는 능력이 좋으나 신호처리의 계산량이 높고 복잡하므로 고속이동체에서 적합하지 않다. 그에 반하여 디지털 역지향성 안테나 시스템은 사전 정보 없이 입사된 신호의 위상을 오실레이터 없이 데이터를 통하여 추적하고 위상을 반대로 돌려 수신된 방향으로 재전송을 할 수 있는 시스템이다. 아날로그 역지향성 안테나와 비교하여 발진기를 통한 주파수 합성이나 RF 변환기 설계 에서 발생하는 문제들을 피할 뿐만 아니라 시스템의 복잡도와 비용을

상당히 줄일 수 있다. 또한 간단한 구현으로 수정과 보정이 쉽다는 특성이 있다. 이러한 특성으로 디지털 역지향성 안테나는 고속이동체 환경에서의 빠른 빔 추적이 가능하다. 기존의 제안된 역지향성 배열 안테나 기술에는 코너 반사 기술과 Van Atta 배열 기술이 있다. 먼저 코너 반사는 입사각과 반사각이 같은 특성을 사용한 기술이며 van Atta 배열 기술은 중심 배열 안테나에서 같은 간격의 쌍으로 연결된 평면의 혹은 선형의 배열이다^[3]. 이는 평면파로 신호가 수신될 때 각 배열안테나에서 수신된 신호는 쌍으로 연결된 라인을 통해 반대위상을 가지고 입사된 방향으로 신호를 보내는 방식이다^[4].

전자, 전기, 통신 기술 등 전분야 과학 기술이 발전 함에 따라 크기가 작고 소모 전력이 적은 디지털 칩들이 개발되면서 작고 최적의 성능을 내는 수신기에서 많은 부분을 디지털 소자들이 담당하고 있다^[6,8]. 또한 여러 가지 수신 채널이 존재하기 때문에 신호들은 서로 간섭하게 된다. 따라서 수신 채널 신호의 위상 및 크기에 대한 보정이 점점 중요한 요소가 되고 있다. 때문에 기존의 하드웨어적으로 보정하는 방식이 소프트웨어 기반의 보정 방식으로 바뀌고 있다^[9]. 따라서 빔형성 기술에서도 RF, IF단에서 처리되는 아날로그 시스템뿐만 아니라 디지털 빔형성 연구가 진행되어야 한다. 또한 역지향성 배열 안테나 기술도 구성과 계산 복잡도가 낮은, 여러 가지 신호처리가 용이한 디지털 신호처리로 이루어진 디지털 역지향성 배열 안테나가 연구되어야 할 것이다.

본 논문은 고속이동체 환경에서의 빔추적을 위한 디지털 역지향성의 기술을 제안하며 디지털 역지향성의 다중경로 환경에서의 성능을 보안하기 위한 방안으로 MUSIC 알고리즘과 결합한 하이브리드 역지향성 안테나 시스템을 제안한다.

본 논문은 먼저 2장에서 설계한 위상 추정기와 디지털 위상동시루프(PLL) 그리고 위상 공액기를 포함한 전체적인 디지털 역지향성 안테나 시스템 모델에 대한 설계와 또 array 개수에 따라 설계된 역지향성 안테나 시스템에 대하여 설명하며 하이브리드 시스템을 제안한다. 3장에서 시뮬링크를 통하여 300Km/h의 고속이동체를 100m 거리에서 원 경로 또는 직선 경로로 추적하여 결과를 분석하며, 4장 결론을 끝을 맺는다.

II. 역지향성 안테나 시스템

배열 안테나 사용의 경우 각 배열 안테나 마다 다른 위상지연이 발생되어 수신된다. 역지향성 안테나 시스템은 위상지연을 계산하여 지연된 위상의 180°회전하여 원신호로 돌려보내는 시스템이다.

빔의 도착 각 (AOA) θ 와 그에 따른 각 안테나 마다 지연된 위상(phase delay) 의 관계는 식 1과 같다.

$$\Delta\phi = 2\pi f d \sin\frac{\theta}{c} \quad (1)$$

역지향성 디지털 안테나는 디지털 PLL에 의하여 지연된 위상을 계산하게 되는데 디지털 PLL은 위상차를 계산하는 위상추정기와 NCO, 루프필터로 이루어진 닫힌 루프이다^[10].

2.1. 위상추정기 설계

개의 배열 안테나를 갖는 디지털 역지향성 배열 안테나 시스템에서 위상 추정기의 동작을 간단히 설명하자면, 첫 번째 배열 안테나로 수신된 신호를 기준으로 지연된 각을 찾아 크기가 1이며 위상이 반대인 신호를 곱하여 다시 지연될 위상을 미리 지연시켜 신호를 송신한다. 때문에 재전송하여 받은 신호는 위상지연 없이 수신될 수 있다. 배열안테나의 개수가 늘어나면, 각각 배열 안테나로 들어온 신호마다 위상 추정기로 지연된 각을 찾을 수도 있다. 하지만 PLL이 포함된 위상추정기는 전력 소모가 크며 시스템에 부담이 있다. 때문에 먼저, 두 개의 배열 안테나 시스템에서처럼 첫 번째 배열안테나와 두 번째 배열안테나로 수신된 신호를 위상 추정기에서 비교하여 첫 번째 지연된 위상 ϕ_1 을 찾고 크기가 1이며 위상이 반대인 위상 공액 신호를 발생시킨다. 지연된 위상은 첫 번째 지연된 위상의 정수 배를 갖기 때문에 발생한 위상 공액 신호를 사용하여 두 번째와 세 번째 위상지연을 찾으며 식으로 표현하면 식2-3과 같다.

$$1e^{\phi_{2j}} = 1e^{2\phi_{1j}} = (1e^{\phi_{1j}})^2 \quad (2)$$

$$1e^{\phi_{3j}} = 1e^{3\phi_{1j}} = 1e^{\phi_{1j}} \cdot 1e^{\phi_{2j}} \quad (3)$$

열 안테나 개수가 늘어나 각각의 안테나 별로 신호를 수신한다 해도 각 수신된 심벌을 비교하여 간단한 계산으로도 각을 추정 할 수 있다.

2.2. 고속 이동 추적 모델과 분석

고속 이동체의 경우, 수신되는 신호의 각이 달라지는 경우는 그림 1과 같이 크게 원을 따라 움직이는 경우와 직선으로 움직이는 경우이다. 수신되는 신호의 각 또는 도착하는 각 AOA라고 할 수 있는 θ 의 변화는 원 경로일 경우 식4, 직선경로일 경우 식 5와 같다.

$$\theta = \left(\frac{360}{2\pi L} Vt\right) \quad (4)$$

$$\theta = \tan\left(\frac{Vt}{L} - \tan\theta_0\right) \quad (5)$$

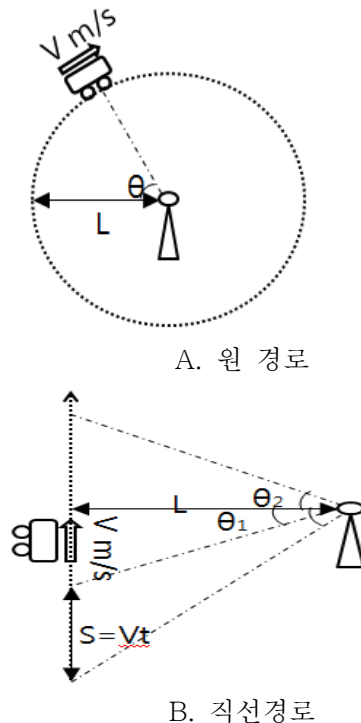


그림 1. 이동체를 고려한 빔 생성 경우.
Fig. 1. Beam forming consider mobile user

수신되는 신호의 각은, 고속이동체가 최고의 속력일 때, 송신 거리가 짧을수록 직선 운동이 원 운동의 경우에 비해서 변화가 큼을 알 수 있다. 따라서, 역지향성 안테나 시스템이 고속 이동체와 송신 하는 경우 위상을 빠르고 정확하게 추적하는지 성능을 분석하기 위하여 속도와 거리에 따른 위상 변화에 대한 추적과, 신호 대 잡음 비에 따른 위상 추적 성능을 보았으며 Simulink로 구성한 블록도는 그림 2와 같다. 시간에 따라 고속이동체의 위치가 달라지며, 도달하는 신호의 각이 달라지고 신호의 각에 따라 각 안테나 요소에서 수신되는 신호의 위상 지연이 달라짐을 고려하여 구성하였다.

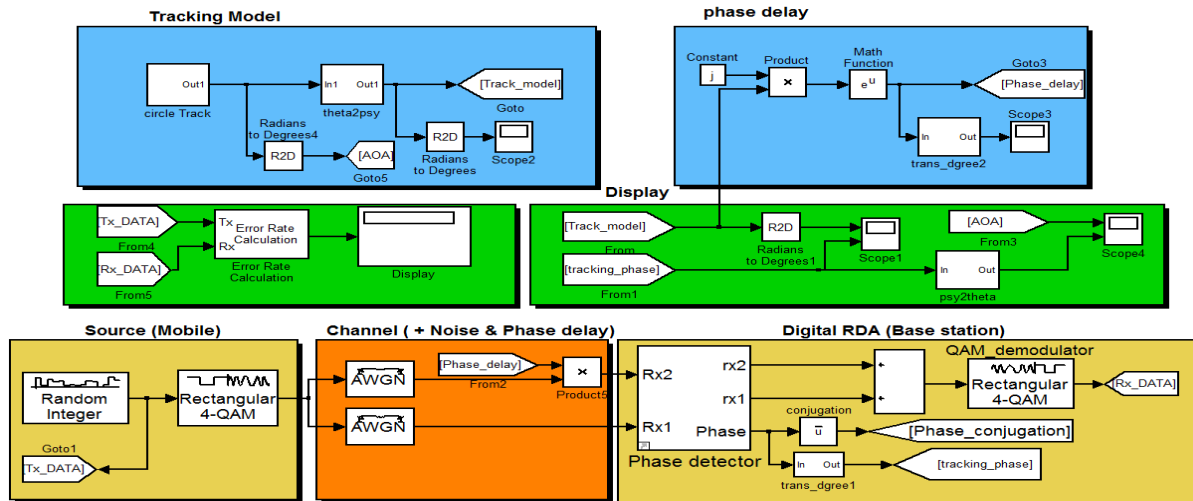


그림 2. 고속이동체 추적성능을 위한 역지향성 배열 안테나 시스템의 simulink 블록도
Fig. 2. Simulink of digital RDA for fast tracking.

2.3. 하이브리드 빔포밍 시스템

송수신간의 위치를 모를 경우 송신기는 전방향으로 신호를 보내며 이때 다중 경로 환경에 따라 신호가 여러 방향에서 수신하게 된다. 이러한 환경에서 역지향성 배열 안테나

시스템은 수신된 신호가 섞인 채 디지털 신호처리를 통한 위상을 찾게 되어 오차가 큰 위치를 추적 하게 된다. 이러한 약점을 보완하기 위하여 하이브리드 빔포밍 시스템을 제안한다. 하이브리드 시스템은 역지향성 배열 안테나 시스템의 다중 환경이나 다중 사용자 환경에서의 수신신호의 간섭으로 위상 추정에 오차가 생기는 약점을 보완하기 위해 제안하는 시스템으로 공분산 행렬을 사용하여 위상을 찾아내는 빔포밍 기술과 결합시킨 시스템이다.

빔포밍 기술인 MUSIC 알고리즘과 디지털 역지향성 안테나 기술을 접합한 하이브리드 빔포밍 시스템의 블록 구성도는 그림3과 같다.

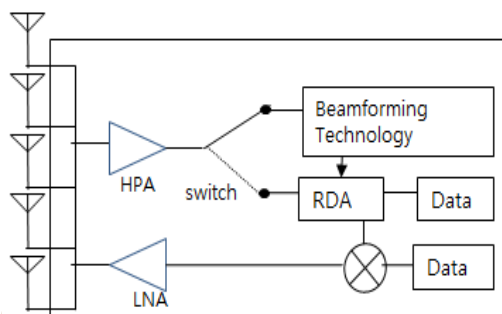


그림 3. 하이브리드 빔포밍 시스템 블록도
Fig. 3. Hybrid beamforming system.

MUSIC 알고리즘의 경우 다중 경로 환경에서 각각 다른 각도로 수신된 경우라도 공분산 행렬의 상관을 통해 비교적 정확히 수신되는 가장 센 신호를 판별 할 수 있다. 이러한 성질을 통하여 다중 경로 환경에서 LOS 같은 환경으로 조성할 수 있게 되며 다중 경로 환경의 효과가 줄어든 상황에서는 디지털 역 지향성 시스템이 복잡도나 추적 속도 면에서 유리하게 작용할 수 있게 된다.

III. 시뮬레이션 결과

그림4와 5 그리고 그림 6은 각 SNR이 10dB, 20dB이고 안테나 배열 개수가 8개인 역지향성 안테나 시스템의 위상 추적 성능을 나타내는 그림이다. 현재 국내의 가장 빠른 열차인 KTX의 속도를 참고하여 300km/h속력을 내는 고동이동체를 가정하였다. 또한 이동체는 디지털 역지향성 안테나 시스템을 가진 수신 체로부터 거리 L은 100m떨어진 거리에서 원 경로로 움직일 때, 0.5초간 각이 변화되며 수신되는 신호를 추적하는 그림이다. Transmit AOA는 시간에 따라 달라지는 각이며 Transmit Phase delay는 달라진 각에 따른 위상지연이다. 이 신호에 따라 역지향성 안테나 시스템에서는 위상지연을 계산하여 추적하며 그 각을 180° 돌리기 전의 출력이 Tracking Phase delay이다. 추적된 위상지연을 신호가 도달하는 각 θ 로 나타낸 것이 Tracking AOA 이다. 한편 Phase delay는 θ 에 따라 안테나 요소에 발생하는 위상지연 ϕ 이다.

그림 4를 보면, 이동 거리에 비례하여 수신신호

의 각이 점점 커지는걸 알 수 있으며 0.5초후 수신 신호는 약 24°로 커졌으며 이에 따라 약 73° 위상이 지연되었다. 전체적인 경향을 봤을 때 실시간으로 위상을 추적하는 것을 볼 수 있으나 신호 대 잡음비에 따라 오차의 범위가 달라진다. 시간에 따라 각이 변화하는 이러한 환경에서는 10dB 일 때 오차크기의 평균은 4.2°, 최대 오류 크기 값은 19.5°이다.

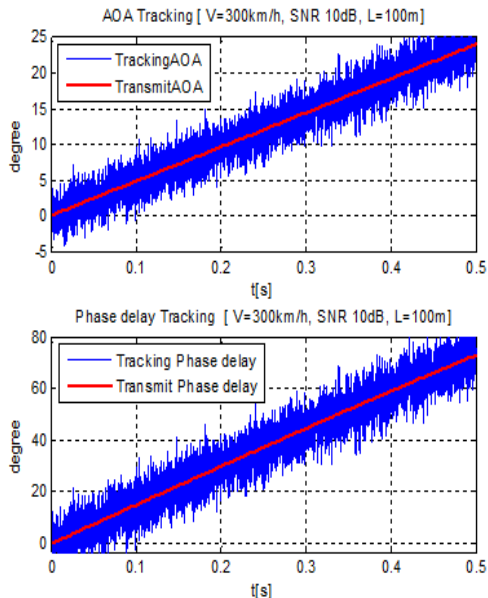


그림 4. 고속 이동 추적 성능 비교 [SNR=10dB].
Fig. 4. Comparison of fast tracking performance [SNR=10dB].

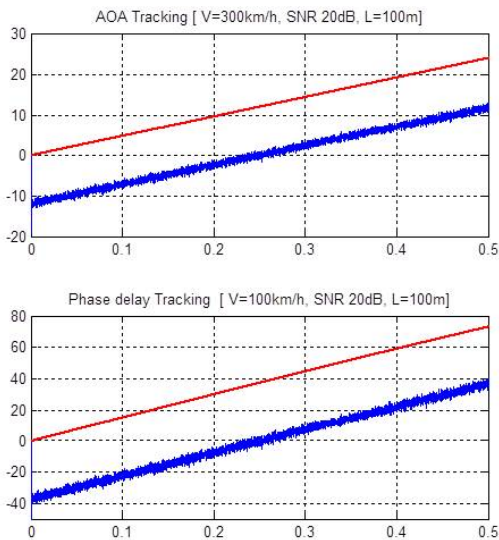


그림 5. 다중경로 환경에서의 고속 추적 성능 비교
Fig. 5. Comparison of fast tracking performance in multipath environment. [SNR 20dB]

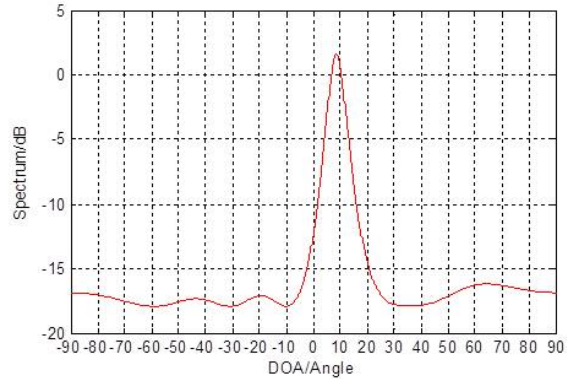


그림 6. 다중 경로 환경에서의 MUSIC 알고리즘의 결과
Fig. 6. Result of MUSIC algorithm in multi-path environment.

그림 5는 다중경로 환경에서의 고속 추적 성능 비교이다. 처음 신호를 송신할때는 특정한 방향이 없이 전방향으로 신호가 송신되며, 다중경로로 인하여 하이브리드 시스템에 수신된 신호가 각각 10°, -45°, 20°으로 수신됨을 가정 하였다. 이때, 수신된 신호의 각이 가장 작을수록 경로손실이 적으며 10°, -45°, 20°로 수신된 신호의 전력이 각각 0.5:0.2:0.3의 전력비로 수신되었다고 가정하였다. 그림 5에서 빨간 선은 트랙에 따라 움직이는 이동체의 AOA를 나타낸 것이며 파란선은 디지털 역지향성 안테나에서 추적한 결과 이다. 이 때, 각각의 신호가 섞여 추적이 되므로 약 10°정도의 오차가 발생함을 볼 수 있다.

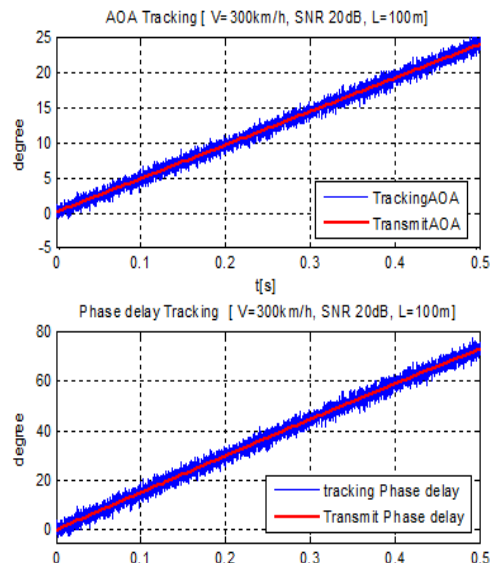


그림 7. 고속이동 추적 성능 비교 [SNR=20dB].
Fig. 7. Comparison of fast tracking performance. [SNR 20dB]

제한한 바와 같이 하이브리드 시스템에서는 먼저 MUSIC 알고리즘을 통하여 가장 센 신호의 방향을

찾아 송신기에 정보를 전달하며, 전방향 송신으로 방향을 찾은 송신기는 받은 정보를 기반으로 빔포밍기법을 통해 한방향으로만 송신한다. 따라서 전방향 송신으로 인한 다중경로환경은 거의 LOS 환경이 되며 이는 디지털 역지향성 안테나 시스템에게 있어 최적의 환경이 된다. 같은 조건에서 디지털 역지향성 배열 안테나 시스템의 성능은 그림6과 같으며 이때 오차크기 평균은1.3°, 최대 오차크기 값은 6°이다.

IV. 결 론

본 논문에서는 역지향성의 안테나의 트래킹 성능을 시뮬레이션으로 확인하였다. 잡음의 크기나 배열 안테나 개수에 따라 오차범위가 달라지긴 하지만, 안테나 8개일때 20dB의 SNR에서 AOA의 오류는 평균 1°로 확인하였다. 시물링크를 통한 시뮬레이션이지만 이는 충분히 디지털 역지향성 배열 안테나는 일단 실시간으로 빠른 추적이 가능하며 앞으로 고속 데이터, 고속 트래킹의 통신시대에 불가피한 기술일 것이다.

References

[1] L. C. Van Atta, "Electromagnetic reflector," *US patent No. 2908002*, Oct. 1959.

[2] J. H. Reed, *Software Radio: A Modern Approach to Radio Engineering*, Prentice Hall PTR, 2002.

[3] R. Y. Miyamoto and T. Itoh, "Retrodirective arrays for wireless communication," *IEEE Microwave Mag.*, vol. 3, no 1, pp. 71-79, Mar. 2002.

[4] L. Prakasam, T. Roy, and D. Meena, "Digital signal generator and receiver design for S-band radar," in *Proc. IEEE Radar Conf.*, pp. 1049-1054, Boston, U.S.A., Apr. 2007.

[5] M. A. Sanchez, M. Garrido, M. Lopez-vallejo, J. Grajal, and C. Lopez-barrio, "Digital channelized receivers on FPGAs platforms," in *Proc. IEEE Radar Conf.*, pp. 816-821, Arlington, U.S.A., May 2005.

[6] W. M. Waters and B. R. Jarrett, "Bandpass signal sampling and coherent detection," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-18,

no. 6, pp. 731-736, Nov. 1982.

[7] B. Brautigam, M. Schwerdt, M. Bachmann, and M. Stangl, "Individual T/R module characterisation of the TerraSAR-X active phased array antenna by calibration pulse sequences with orthogonal codes," in *Proc. IEEE Int. Geosci. Remote Sensing Symp. (IGARSS 2007)*, pp. 5202-5205, Barcelona, Spain, July 2007.

[8] S. R. Kim and H. G. Ryu "Phase tracking settling time and BER performance evaluation in the digital retrodirective array antenna system," *J. Korean Inst. Electromagnetic Eng. Sci. (KIEES)*, vol. 24, no. 1, pp. 55~63, Jan, 2013.

[9] C. Loadman, "A DSP Based Retrosirective Array for Duplex Digital communication at 2.4GHz," M.S. Thesis, Dalhousie Univ. Halifax, Canada, 2006.

김 소 라 (So-Ra Kim)



2012년 2월 충북대학교 전자공학과(공학사)
 2012년 3월~현재 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 <관심분야> 무선 통신 시스템, 이동 통신 시스템

유 흥 균 (Heung-Gyun Ryu)



1988년~현재 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 1996년~현재 IEEE, IET 논문 심사위원
 2002년 한국전자과학회 학술상 수상
 2008년 ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상
 <관심분야> 무선 통신시스템, 위성통신, B4G/5G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리