

하이브리드 디지털 RDA 시스템의 설계와 평가

박해규*, 유흥균^o

Design and Evaluation of Hybrid Digital Retrodirective Array Antenna System

Hae-Gyu Park*, Heung-Gyoon Ryu^o

요 약

디지털 RDA 시스템은 입사된 신호의 방향으로 신호를 전송 하는 시스템이다. 디지털 RDA 시스템은 멀티패스 환경에서 신호가 동시에 수신될 경우 각 경로 신호의 벡터합의 형태로 수신되기 때문에 수신신호를 경로 별로 분리하지 못하는 단점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 하이브리드 디지털 RDA 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 2가지 모드로 동작하게 된다. 하나는 디지털 RDA 모드, 두번째는 디지털 빔포밍 모드이다. 디지털 RDA 모드는 멀티패스의 영향이 적을 경우에 적용되게 되고 멀티패스의 영향이 큰 상황에서는 디지털 빔포밍 모드가 동작하게 된다. 디지털 빔포밍 모드로 동작하게 될 경우에 우리는 MUSIC 알고리즘을 통해서 신호의 입사 방향에서 최적의 경로를 찾고 최적의 경로를 통해서 통신을 하게 된다. 제안된 시스템을 통해서 우리는 멀티패스 환경에서 디지털 RDA가 가지게 되는 단점을 보완할 수 있다.

Key Words : Digital RDA, Digital beamforming, MUSIC algorithm, Resolution

ABSTRACT

Digital RDA system is retransmit into the opposite direction of the incident signals. Digital RDA system have a disadvantage that this system do not signal classification in multipath environment. because multipath signal is shown as vector sum of multipath signal, digital RDA system required complex signal process for multipath signal classification. In this paper, to solve these problem we propose hybrid digital RDA system which combination of the MUSIC algorithm and the digital RDA system. Proposed system has two modes. First mode is digital RDA mode. Secornd mode is digital beamforming mode. Digital RDA mode is used in situations where the less the impact of multipath. Digital beamforming mode is applied to multipath effects is greater. In secornd mode, we find optimal path using MUSIC algorithm. After than the proposed system uses only the optimal path. Through the proposed system in a multipath environment with digital RDA can be used to supplement a disadvantage.

I. 서 론

Retro Directive Antenna(RDA) 시스템은 신호의

입사방향을 위상공액을 통해서 입사된 방향으로 신호를 전송 시켜주는 기술이다. 지금까지 아날로그 RDA에 관한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다¹⁻²⁾. 아날로그

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2013R1A2A2A01005849).

• First Author : Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, haekue@naver.com, 학생회원

◦ Corresponding Author : Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원

논문번호: KICS2013-03-134, Received March 19, 2013; Revised June 13, 2013; Accepted May 7, 2014

RDA 시스템의 경우, 멀티패스 환경에서 다수의 신호가 수신되더라도 간단한 회로의 구성으로 모든 신호를 위상공역 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 우리는 아날로그 RDA를 디지털 신호로 처리하는 디지털 RDA에 대한 연구를 진행하였다^[1]. 디지털 RDA는 멀티패스 신호와 같이 여러 신호가 동시에 수신될 경우에 모든 신호가 합쳐져 각 신호의 벡터 합 방향으로 신호의 방향을 추정하게 되는 단점을 가지고 있다. 하지만 디지털 RDA는 아날로그 RDA와 달리 시스템 구성에 유연성을 가지고 있는 장점이 있다.

빔포밍은 안테나에서 방사된 신호가 공간에서 특정한 방향을 따라 집중 시키는 기술이다. 통신에서 안테나는 원하지 않는 방향으로의 방사를 방지하고 희망하는 신호 방향에서 최대 이득을 가지는 단일 채널을 제공한다. 디지털 빔포밍은 배열 안테나로부터 디지털 신호를 받아들이고 그 신호에 대해 공간적인 처리를 행하는 구조를 말한다. 디지털 빔포밍이 가지는 장점은 빔을 분리하여 제어 할 수 있다는 점이다. 디지털 빔포밍을 이용하여 RDA와 같은 동작을 하기 위해서는 MUSIC 알고리즘과 같은 신호 처리가 필요하다. MUSIC 알고리즘은 다중 신호가 존재할 때 부분 공간 분석을 통해서 도래각을 추정하는 대표적인 알고리즘이다^[2]. MUSIC 알고리즘의 Spatial 스펙트럼은 입력 신호의 공분산 행렬의 고유값 분해를 통해서 얻을 수 있다. Spatial 스펙트럼의 값이 일정 임계치 이하의 경우에는 잡음 구간으로 판단하며 이상이면 신호 구간으로 판정한다. MUSIC 알고리즘은 모든 후보각에 대한 검색을 수행하기 때문에 입사각 추정을 하기 위한 검색속도가 느리다는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 디지털 RDA에 MUSIC 알고리즘이 결합된 하이브리드 디지털 RDA 시스템을 제안한다. 디지털 RDA는 MUSIC 알고리즘에 비해 계산 복잡도가 낮은 장점을 가지고 있다. 하지만 멀티패스와 같은 다중 신호가 동시에 수신될 경우 신호를 분리해 내지 못하는 단점을 가지고 있다. 디지털 빔포밍의 경우 디지털 RDA에 비해 계산 복잡도는 높지만 다중 신호를 수신할 경우에 신호를 경로별로 분리해 낼 수 있는 장점이 있다. 이 제안하는 시스템은 디지털 RDA와 MUSIC 알고리즘의 장점을 취합하여서 상황에 따른 스위칭을 통해 동작하게 된다. 만약 멀티패스의 영향이 강할 경우에는 MUSIC 알고리즘을 통해서 동작하게 되고 멀티패스의 영향이 미미할 경우에는 디지털 RDA가 동작하게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같이 구성하였다. 2장에서는 기존연구로써 MUSIC 알고리즘에 대한 소개와

디지털 RDA 시스템의 기본동작을 확인한다. 3장에서 제안한 시스템에 대한 소개를 하고 4장에서는 시뮬레이션 결과를 보이고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 기존연구

2.1 MUSIC(Multiple Signal Classification)

Algorithm

MUSIC 알고리즘은 다중 신호의 입사방향을 추정할 수 있는 대표적 알고리즘이다. 만약 선형 M-array 안테나에 k개의 신호가 입사될 경우에는 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$X(t) = \sum_{p=1}^P a(\phi_p) * s_p(t) + n(t) = AS + n \quad (1)$$

협대역 신호 $S_p(t)$ 는 송신부에서 송신된 신호를 의미하고 $n(t)$ 는 AWGN 노이즈를 의미한다. 지향벡터 행렬 A 는 다음과 같다.

$$A = [a(\phi_1) \ a(\phi_2) \ \dots \ a(\phi_k)] \quad (2)$$

여기서 $a(\phi) = e^{-j2\pi dsin\theta/\lambda}$ 이고 d 는 안테나 간의 거리를 의미한다. 위의 식(1)로부터 얻을 수 있는 입력 공분산 행렬은 아래의 식으로 표현된다.

$$R = E[XX^H] = AR_s A^H + \delta^2 I \quad (3)$$

공분산 행렬 R 은 직교하는 신호 부공간과 잡음 부공간을 가지고 있다. 잡음 부공간 E_N 은 R 의 고유치 분해를 통해서 구할 수 있다.

MUSIC 알고리즘은 신호의 잡음 부공간을 이용해서 신호의 입사 방향을 추정할 수 있다. 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$a(\phi)^H E_N E_N^H a(\phi) = 0 \quad (4)$$

식(4)를 만족시키는 ϕ 를 입사되는 신호의 입사방향으로 판단한다. MUSIC 알고리즘의 공간 스펙트럼은 다음의 식을 통해서 구할 수 있다.

$$P(\phi) = \frac{1}{a(\phi)^H E_N E_N^H a(\phi)} \quad (5)$$

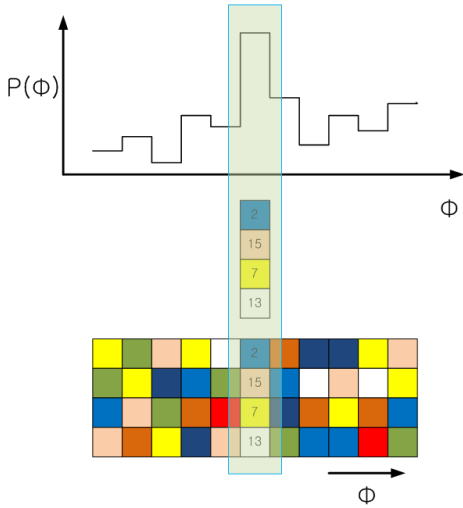


그림 1. MUSIC 알고리즘의 공간 스펙트럼
Fig. 1. Spatial spectrum of MUSIC algorithm

그림 1은 식(5)를 통해서 구해진 공간 스펙트럼을 간단한 그림으로 표현하였다. 공분산 행렬을 통해서 나온 데이터 값을 후보각 Φ 마다 비교하여 유사도가 높은 값에서 가장 큰 값을 가지게 되고 이때의 후보각 Φ 를 입사신호의 방향으로 추정한다.

2.2. 디지털 RDA 시스템

그림 2는 bandpass sampling을 기반으로 하는 디지털 역지향성 안테나의 시스템 구성도를 나타낸 그림이다. 디지털 RDA 시스템에 bandpass sampling을 적용하는 이유는 RF 소자의 숫자를 줄이기 위해서 사용되었습니다. bandpass sampling을 사용할 경우에 frequency down-conversion이 더 이상 필요하지 않게 되는 장점이 있습니다. 디지털 PLL은 위상 검파기와 loop filter 그리고 VCO로 구성되어 있다. 디지털 RDA 시스템에서는 위상 검파기와 디지털 PLL의 출력을 통해서 위상을 위상공액 시킨다.

θ 의 각도로 수신안테나로 신호가 수신될 경우에

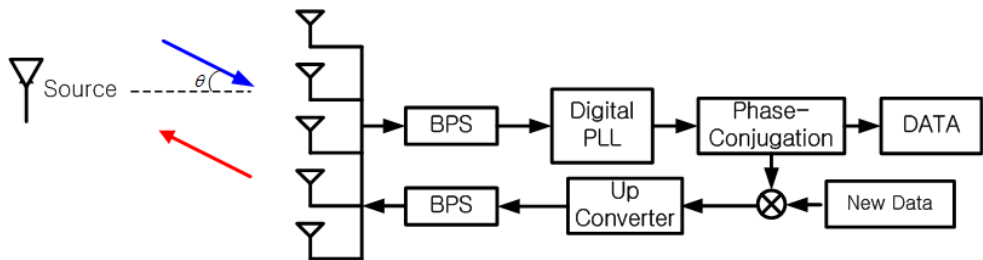


Fig. 2. Block-diagram of digital RDA system.
그림 2. 디지털 역지향성 안테나 시스템 구성도

나타나는 위상 지연은 다음의 식으로 표현 가능하다.

$$\Delta\phi = 2\pi f \frac{d}{c} \sin\theta \quad (6)$$

위 식에서 $\Delta\phi$ 는 두 인접 안테나 사이의 위상지연, f 는 입사파의 주파수, c 는 빛의 속도, d 는 안테나 사이의 거리, θ 는 입사각을 의미한다.

디지털 RDA 시스템의 경우 수신 신호의 위상 검출을 통해서 위상 공액의 방향으로 신호를 재전송하기 때문에 수신 신호의 위상 검출 과정은 매우 중요하다. QPSK의 경우를 예를 들면, 경관정된 신호 데이터 (I_n, Q_n)와 수신된 신호(I'_n, Q'_n)간의 위상 차이는 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} e^{j\theta} &= e^{j(\phi'_n - \phi_n)} \\ &= \cos(\phi'_n - \phi_n) + j\sin(\phi'_n - \phi_n) \\ &= \cos\phi'_n \cos\phi_n + \sin\phi'_n \sin\phi_n \\ &\quad + j(\sin\phi'_n \cos\phi_n - \cos\phi'_n \sin\phi_n) \end{aligned} \quad (7)$$

위의 식을 QPSK 신호점을 기준으로 표현하면 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다.

$$\begin{aligned} e^{j\theta} &= \frac{I'_n}{\sqrt{(I'_n)^2 + (Q'_n)^2}} \frac{I_n}{\sqrt{I_n^2 + Q_n^2}} \\ &\quad + \frac{Q'_n}{\sqrt{(I'_n)^2 + (Q'_n)^2}} \frac{Q_n}{\sqrt{I_n^2 + Q_n^2}} \\ &\quad + j\left(\frac{I'_n}{\sqrt{(I'_n)^2 + (Q'_n)^2}} \frac{I_n}{\sqrt{I_n^2 + Q_n^2}} \right. \\ &\quad \left. - \frac{Q'_n}{\sqrt{(I'_n)^2 + (Q'_n)^2}} \frac{Q_n}{\sqrt{I_n^2 + Q_n^2}}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

QPSK 신호의 경우 $\sqrt{I_n^2 + Q_n^2} = \sqrt{2}$ 이고 $|\phi| < 30^\circ$ 인 경우에 $\phi \approx \sin\phi$ 으로 근사화 가능하다.

$$\phi \approx \sin \phi = \frac{1}{\sqrt{2((I_n')^2 + (Q_n')^2)}}(I_n Q_n' - I_n' Q_n) \quad (9)$$

위에 식에서 위상 정보만 얻을 경우 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$\phi = (I_n Q_n' - I_n' Q_n) \quad (10)$$

식 (10)을 이용해서 얻은 위상정보를 통해서 수신된 신호의 역방향으로 신호를 전송하게 된다.

III. 하이브리드 디지털 RDA 시스템

RDA 시스템은 신호의 입사 방향을 위상공약을 통해서 입사신호의 역으로 신호를 재송신하는 시스템이다. 디지털 RDA는 멀티패스 환경에서 여러 방향에서 신호가 입사될 경우 신호의 방향이 벡터합의 방향으로 추정되는 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 강한 멀티패스 환경에서 MUSIC 알고리즘을 사용한 디지털 빔포밍을 적용하고 약한 멀티패스 환경에서는 디지털 RDA 시스템을 적용하여 각 시스템의 장점을 취합한 하이브리드 디지털 RDA 시스템을 제안한다.

그림 3은 제안하는 하이브리드 디지털 RDA 시스템의 구성도이다. 송수신단 모두 다중 배열 안테나로 구성되어 있고 송신단에도 수신단과 같은 시스템이 구성되어 있다.

그림 4-(a) 하이브리드 디지털 RDA 시스템에서 디지털 빔포밍 모드에서의 초기 동작을 나타낸다. 송신단의 다중 배열 안테나 중에서 하나의 안테나만 동작하여 무지향성으로 신호를 송신하게 된다. 그림 4-(b)의 송신된 신호는 다중경로로 수신되고 수신신호의 입사방향을 MUSIC 알고리즘을 통해서 최적 경로를 찾아내고 최적의 경로로 다시 송신 하게 된다. 그림

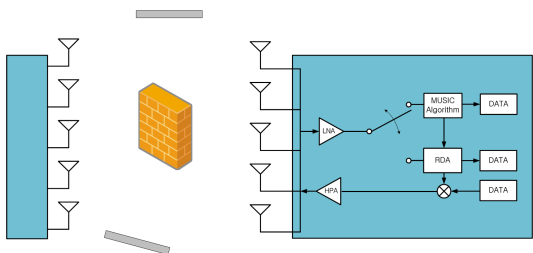
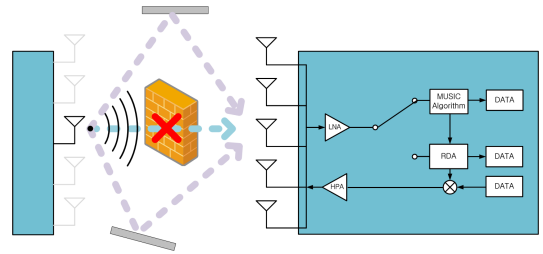
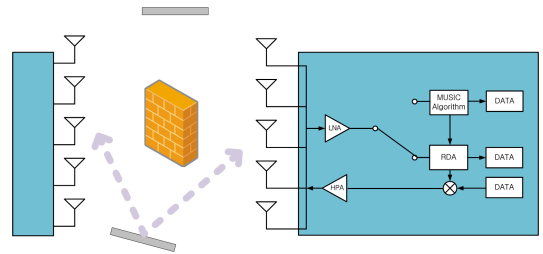


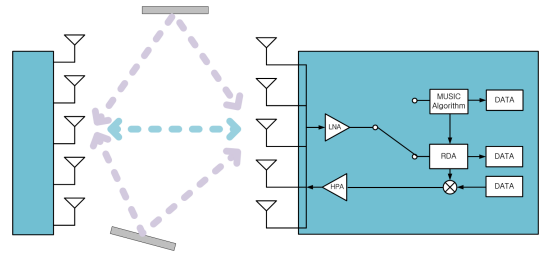
Fig. 3. Block diagram of the proposed hybrid digital RDA system
그림 3. 제안된 하이브리드 디지털 RDA 시스템 구성도



(a)Initial operation situation of MUSIC algorithm.
(a) MUSIC 알고리즘의 초기 동작 상황.



(b) Optimal path selection & Retransmit.
(b) 최적 경로 선택 및 재송신.



(c)Operation of digital RDA.
(c) 디지털 RDA의 동작.

Fig. 4. Operation of hybrid digital RDA system
그림 4. 하이브리드 디지털 RDA 시스템 동작

4-(c)는 멀티패스가 약할 경우에 디지털 RDA로 동작할 경우를 나타낸다.

IV. Simulation

시뮬레이션 환경은 표 1과 같이 배열 안테나 소자는 5개와 7개를 고려하였으며 채널 특성은 LOS 신호가 없고 2개의 멀티패스가 발생하는 채널을 임의로

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation Parameter.

Number of element	5, 7
Channel	[0 0.9285 0.3714]
Signal attenuation	Block2<Block1
Modulation	QPSK

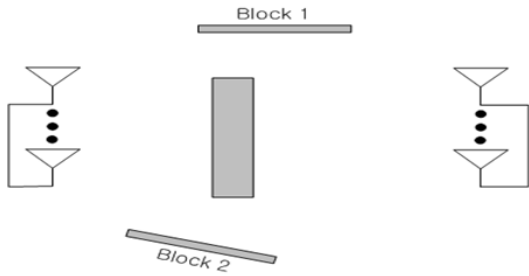
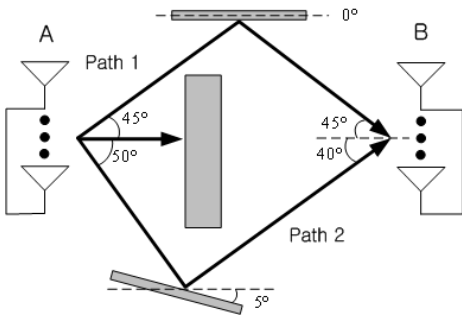


그림 5. 시뮬레이션 모델(w/o LOS)
Fig. 5. Simulation model (w/o LOS)

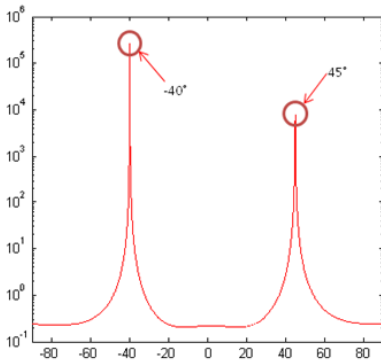
고려하였다. 변조 방식은 QPSK를 사용하였으며 시뮬레이션 환경은 그림 5의 경우를 고려하였다. 그림5의 block1의 신호 감쇄율이 block2의 감쇄율 보다 큰 경우를 가정하였다.

4.1 Estimation of DOA

그림 5는 제안된 시스템의 디지털 빔포밍 모드에서 최적 경로를 찾기 위한 시뮬레이션의 환경 모델을 나



(a)Initial operation environment
(a)초기 동작 환경.



(b) Spatial spectrum of initial operation environment.
(b)초기 동작 환경의 Spatial 스펙트럼

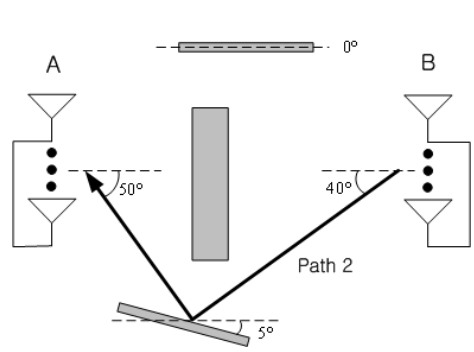
그림 6. 도래각의 추정(w/o LOS)
Fig. 6. Estimation of DOA(w/o LOS)

타낸 그림이다. Block 1과 block2로 인해서 2개의 멀티패스가 발생하며 장애물로 인하여 LOS 신호는 발생하지 않는다.

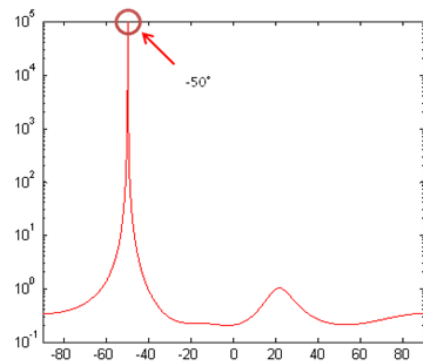
그림 6은 제안된 시스템에서 초기 동작에서 신호의 입사 방향을 MUSIC 알고리즘을 통해서 추정한 결과이다. 그림 6의 (b)에서 -40° 는 path2를 의미하고 45° 는 path1을 의미한다. 그림 6의 (b)의 스펙트럼을 통해서 path2의 신호 강도가 더 높은 것을 확인 할 수 있다.

그림 6의 (b)를 통해서 path 1보다는 path2가 최적의 경로로 판단한다. 그림 7-(a)는 최적 경로로 판단한 path 2로 신호를 송신하게 되고 송신 신호의 입사방향을 그림7의 (b)를 통해서 판단한다. 이처럼 송수신 간의 신호 방향을 MUSIC 알고리즘을 통해서 파악한 후 디지털 빔포밍 모드로 동작하게 된다.

그림 8은 디지털 RDA 시스템에서 멀티패스신호 (2-path)가 수신되었을 경우와 최적의 경로 1개의 경로를 통해서 수신되었을 경우의 BER 성능을 나타낸다. 디지털 RDA 시스템에서 멀티패스 환경에서 수신



(a) transmit operation environment.
(a) 송신 동작 환경



(b) Spatial spectrum of transmit operation environment.
(b) 송신 동작 환경의 Spatial 스펙트럼

그림 7. 도래각의 추정(w/o LOS)
Fig. 7. Estimation of DOA(w/o LOS)

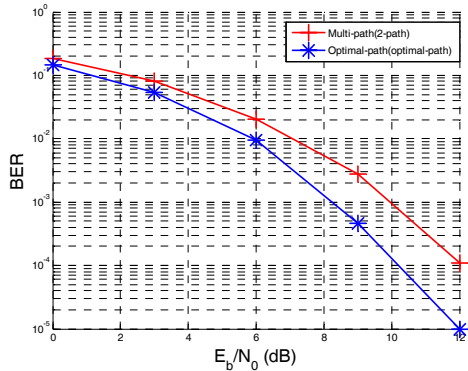


그림 8. 하이브리드 RDA 시스템의 BER 성능.
Fig. 8. BER performance of hybrid RDA system.

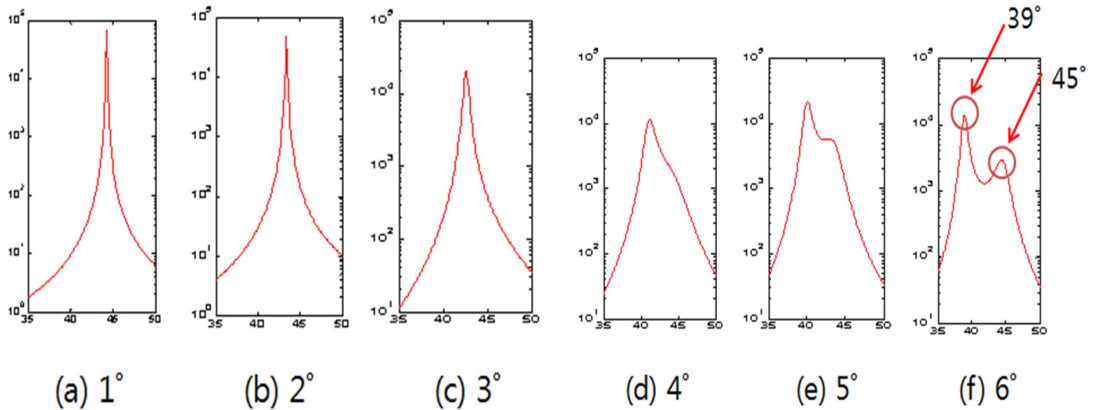
신호의 입사 방향 추정이 정확하지 않기 때문에 수신된 경로 모두를 이용하는 경우보다 최적의 1개의 경

로를 사용할 경우의 BER 성능이 높게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 제안한 시스템은 MUSIC 알고리즘을 통해서 최적의 경로를 탐색하고 디지털 RDA 시스템에 적용시켜서 성능 향상을 도모한다.

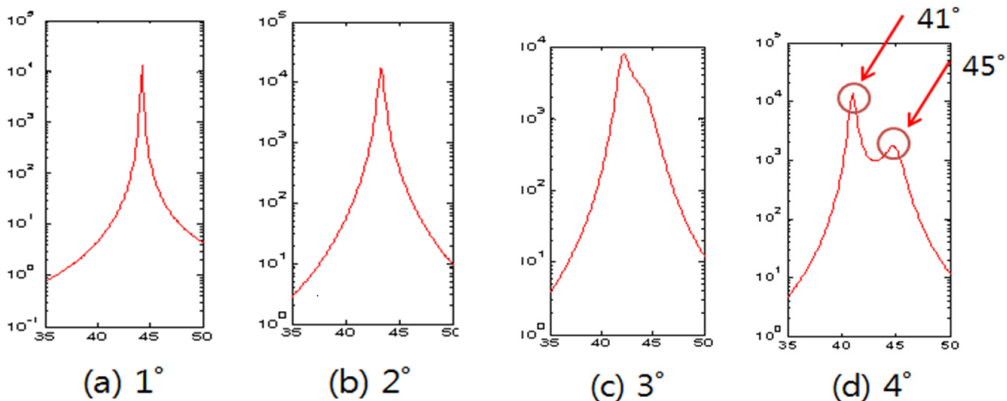
4.2 Resolution of MUSIC Algorithm

제안한 하이브리드 RDA 시스템을 적용하기 위해서는 MUSIC이 높은 분해능을 가져야 한다. 다음의 그림 9는 안테나 element에 따른 분해능을 나타낸다.

그림 9의 (a)는 Array element가 5개인 경우 신호간의 각도 차이를 MUSIC 알고리즘이 분해해 내는지를 나타낸 그림이다. SNR=10dB에서 진행 하였으며 최소 6°의 차이가 발생하였을 때 신호의 방향을 분리해 낼 수 있었다. 그림 9의 (b)에서는 Array element가 7개이고 SNR=10dB에서 시뮬레이션 한 결과이다.



(a) Resolution of MUSIC algorithm (Array number=5).
(a) MUSIC 알고리즘의 분해능(안테나 소자=5).



(b) Resolution of MUSIC algorithm (Array number=7).
(b) MUSIC 알고리즘의 분해능(안테나 소자=7).

그림 9. MUSIC 알고리즘의 분해능
Fig. 9. Resolution of MUSIC algorithm

(b)의 경우에는 최소 4°의 차이가 발생할 경우에 신호를 분리해 내는 것을 확인 할 수 있었다.

V. Conclusion

본 논문에서는 디지털 RDA가 멀티패스 환경에서 신호의 방향이 벡터합의 형태로 추정되기 때문에 정확한 신호의 입사 방향 추정을 하지 못하는 문제점을 보완하기 위해서 하이브리드 디지털 RDA 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템은 멀티패스 상황에 따라서 2가지 모드로 동작하게 된다. 디지털 RDA 모드와 디지털 빔포밍 모드의 유기적인 스위칭을 통해서 디지털 빔포밍과 디지털 RDA가 가지는 단점을 최소화 할 수 있으며 두 시스템의 장점을 활용할 수 있다. 디지털 빔포밍 모드에서 MUSIC 알고리즘의 분해능은 10dB에서 각 4°(Array number=7), 6°(Array number=5) 정도로 고속 이동 통신 환경에 적용하기에는 만족스러운 성능을 보여주지 못했다. 이 경우 안테나 소자의 수를 늘리거나 SNR을 높임으로써 해결할 수 있지만 동일 array element와 동일 SNR에서 보다 높은 분해능을 가지게 하는 연구가 진행되어야 할 것이다.

References

[1] C. Pon, "Retrodirective array using the heterodyne technique," *IEEE Trans. Antennas & Propagat.*, vol. 12, no. 2, pp 176-180, Mar. 1964.

[2] J. Sun, "A bandpass sampling retrodirective antenna array for time division duplex communications," M.A.Sc. Thesis, Dalhousie University, Halifax, NS, Canada, 2007.

[3] J. Bok, S. H. Lee, D. J. Shin, and H.-G. Ryu, "Analysis of Performance of Digital Retrodirective Antenna Technology in High-Speed Rail," *J. KIEES*, vol. 23, no. 11, pp. 1264-1271, Nov. 2012.

[4] J. Sun, X. Zeng, and Z. Chen, "A direct RF-undersampling retrodirective array system," in *Proc. IEEE RWS*, pp. 631-634, Jan. 2008.

[5] J. Wang, Y. Zhao, and Z. Wang, "A MUSIC like DOA estimation method for signals with low SNR," *Millimeter Waves, GSMM*, pp. 321-324, Nanjing, Apr. 2008.

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

[7] J. Sun, X. Zeng, and Z. Chen, "A direct RF-undersampling retrodirective array system," in *Proc. IEEE RWS*, pp. 631-634, Jan. 2008.

[8] R. Y. Miyamoto, Y. Qian, and T. Itoh, "A reconfigurable active retrodirective/direct conversion receiver array for wireless sensor systems," in *IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, Phoenix, AZ, vol. 2, pp. 1119-1122, May 2001.

[9] E. D. Sharp and M. Diab, "Van Atta reflector array," *IRE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 8, no. 4, pp. 436-438, Jul. 1960.

박 해 규 (Hae-Guy Park)



2014년 2월 : 충북대학교 전자공학과 졸업
 2014년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정
 <관심분야> 무선통신시스템, 이동통신시스템

유 흥 균 (Heung-Gyoon 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
 2009년 : SPACOMM 2009 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상
 <관심분야> 무선 통신 시스템, 위성통신, B3G/4G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리