

OFDM 시스템 환경에서 스마트 안테나 시스템용 적응 빔형성 기술의 성능분석

Performance Analysis of an Adaptive Beamforming Technique for a Smart Antenna System in OFDM System Environments

이 원 철(정보통신과)

Weon-Cheol Lee(Dept. of Information and Communications)

Key Words : smart antenna, OFDM, weight vector, beamforming

ABSTRACT: This paper presents an adaptive beamforming technique of a smart antenna system for mobile communication system in OFDM system environments. In order to gain the optimal weight vector, we used an adaptive algorithm based on Lagrange multiplier which is maximizes antenna output. The proposed technique has been applied to OFDM system environments. From the simulations, it is found that the proposed technique has better performance of about 3dB in Rayleigh fading channel than that of the conventional antenna system in OFDM system environments.

1. 서론

이동통신 시스템은 제한된 채널 대역폭을 이용하여 최대의 속도와 최소의 오류 그리고 최대의 용량을 위한 통신용량의 증대 및 통신 품질의 향상을 위해 지속적으로 진화해왔다. 일반적으로 이동통신 시스템의 기지국 안테나는 전방향 안테나가 사용되어 방향에 상관없이 일정한 이득을 주도록 제작한다. 이럴 경우 안테나에 송수신

되는 신호들은 기지국의 송수신 안테나와의 거리에 따라 전력의 정도를 달리하여 송수신되며 송수신 희망 신호에 간섭의 영향을 미친다. 따라서 기지국 안테나는 선택적으로 신호에 이득을 주어 송수신을 할 수 없다. 이러한 간섭의 영향을 줄이기 위해 셀을 여러 섹터로 나누어 여러 개의 안테나를 사용하는 데, 셀을 3개의 섹터로 나누어 3개의 안테나를 사용하여 각 안테나가 120도를 담당하도록 한다면 간섭의 영향을 1/3로 줄일 수 있다. 간섭의 영향을 줄일 수 있는 또 다른 방법은 안테나가 하드웨어적으로 고정되어 정해진 특정 각으로부터 도달하는 신호에 대해 큰 이득을 주고 다른 방향에서 송수신되는 간섭신호에 매우 작은 이득을 주도록 제작하기도 한다.

스마트 안테나 시스템은 원하는 신호원의 방향으로 큰 이득을 줌과 동시에 간섭 신호원에 해당하는 방향으로 이득을 최소화하는 구조를 가진 시스템이다. 즉, 배열 안테나의 빔패턴을 조정하여 이득을 증대시키는 시스템이다^(1,2). 스마트 안테나 시스템은 위와 같은 효과를 이용하여 이득의 증대를 통한 단말기의 송신전력 감소, 단말기의 사용시간 증가, 높은 송신 전력을 필요로 하는 고속 데이터 서비스의 실현, 기지국의 섹터 당 용량 증가 등의 장점을 가지는 시스템을 구현할 수 있다^(3,4). 이러한 스마트 안테나 시스템은 셀 내의 각 단말기에 독립된 빔을 제공하고 원하는 단말기 방향으로 이득을 극대화하도록 빔을 형성하기에 다른 단말기 방향으로 이득을 최소화함으로써 수신 신호의 잡음을 대폭 감소시킬 수 있다. 따라서 기존의 기지국 커버리지보다 확장된 영역에서 기존과 동일한 수준의 서비스를 제공할 수 있는 장점이 있다.

적응형 빔형성 기술은 스마트 안테나 시스템의 가장 발전된 모습으로 다양한 신호 처리 기법을 사용하여 실시간으로 변하는 신호의 방향을 추적하여 최적의 빔패턴을 형성하여 간섭신호를 최소화함과 동시에 수신신호 전력을 극대화하는 기술이다^(5,6).

본 논문에서는 스마트 안테나를 이용한 최적의 빔형성을 위해 원하는 신호의 방향으로 최대의 이익을, 간섭 신호의 방향으로 최소의 이득을 제공하기 위한 최적의 빔패턴을 생성하기 위하여 라그랑제 승수(Lagrange multiplier)를 이용하는 적응 알고리즘을 사용한 적응 빔형성 기술을 사용하였으며 이의 성능분석을 종래의 CDMA 환경이 아닌 OFDM 환경에서 성능을 분석하여 단일 안테나 대비 성능증가를 확인하였다.

2. 시스템 모델

그림 1은 OFDM 환경하에서의 스마트 안테나 시스템의 구조를 나타내고 있다. 그림 1의 상단부는 OFDM 시스템의 송신부를 나타내고 있으며 하단부는 N 개의 안테나 소자로 구성된 배열 안테나를 통해 수신되는 OFDM 시스템의 수신부를 나타내고 있다. 송신부에서는 제일 먼저 음성정보를 포함한 여러 데이터가 QAM mapper를 통해 송신하려는 변조방식에 맞게 매핑되어 출력된다. QAM 매핑을 통해 생성된 신호는 여러 동기와 채널 추정을 위한 파일럿 심볼 생성기에서 만들어진 파일럿 신호와 합쳐진 후 IFFT(size M)를 위해 병렬로 변환된다. 병렬로 변환된 각각의 신호는 OFDM 시스템의 특징인 IFFT를 거친 후 다시 직렬신호로 바뀌어 무선 전송채널을 통해 전송된다.

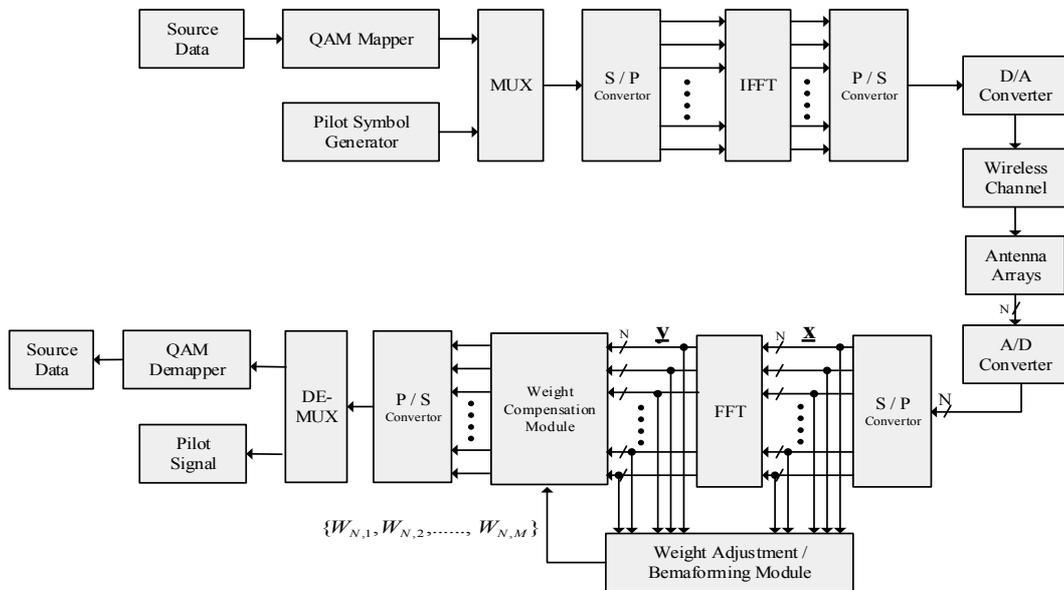


그림 1. OFDM 시스템 환경에서 스마트 안테나 시스템의 블록도

무선통신 시스템의 용량을 증대시키기 위한 방법의 하나로 스마트 안테나 시스템을 이용할 수 있으며, 일반적으로 스마트 안테나 시스템은 신호를 공간에서 선택적으로 수신할 수 있도록 하기 때문에 간섭신호의 효율적인 제거 혹은 감소를 통해 무선통신 시스템의 용량과 품질을 향상시킬 수 있다⁽⁷⁾. 이러한 스마트 안테나 시스

템은 안테나 소자들간의 간격이 가까워서 각 안테나 수신 신호의 전송경로가 같다고 보고 빔형성을 통해 수신 신호를 공간상에서 선택적으로 수신할 수 있게 한다. 무선 채널을 통해 수신된 신호는 송신과정의 역과정을 거치게 되는데 본 논문에서는 그림 1의 시스템 구조에 나타나 있듯이 수신기의 FFT 이전의 신호와 FFT를 거친 후의 신호를 이용하여 라그랑제 알고리즘을 적용한 스마트 안테나 시스템의 적응 빔형성 기술의 성능을 분석한다.

그림 1에 나타나 있듯이 N 개의 선형 배열 안테나는 반파장의 안테나 간격을 갖는 안테나로, 각각의 안테나 소자는 전방향에 대해 동일한 이득을 주는 등방성 안테나라고 가정한다. 단말기로부터의 송신신호가 각 안테나 소자에 θ 의 각도로 입사할 때 각 안테나로부터 수신되는 신호를 합치기 위해서는 각 안테나의 위상차이를 보상해주어야 한다. 본 논문에서는 적응 빔형성 알고리즘을 활용하여 이 위상차를 보상해주어 OFDM 시스템의 수신 성능을 높이고자 한다. 따라서 스마트 안테나 시스템은 각 안테나 수신신호에 채널벡터에 해당하는 적절한 웨이트 벡터 W 를 곱하고 이들의 합을 출력신호로 하여 최종 QAM demapper에서 신호를 판별한다.

단말기로부터 송신신호가 각 안테나 소자에 θ 의 각도로 입사할 때 각 안테나에 수신된 신호는 하향변환기와 A/D 변환을 거쳐 기저대역으로 천이된 후 FFT 변환을 거친 신호는 다음과 같다.

$$\underline{y}_m = \underline{h}_m s_m + \underline{u}_m \quad (1)$$

여기서 \underline{y}_m 는 m 번째 부반송파의 기저대역 신호벡터, \underline{h}_m 는 채널벡터, s_m 는 송신 신호, \underline{u}_m 는 간섭신호를 포함하는 배경잡음을 나타낸다.

그림 2는 스마트 안테나의 산란체 모델을 나타낸다. 그림 2에서 θ 는 원하는 사용자 신호의 입사각을 나타낸다. 일반적으로 스마트 안테나 시스템에서 각 안테나 간격을 반파장으로 하고 각 안테나에 수신된 신호는 동일 전송 경로를 통해 도착되며 단지 안테나 배열에 따른 도착시간 지연이 서로 다르다고 가정할 때 채널벡터는 다음과 같이 표현된다⁽³⁾.

$$\underline{h}_m = \frac{1}{\sqrt{Q}} \sum_{q=1}^Q \alpha_{q,m} \underline{a}(\theta) \quad (2)$$

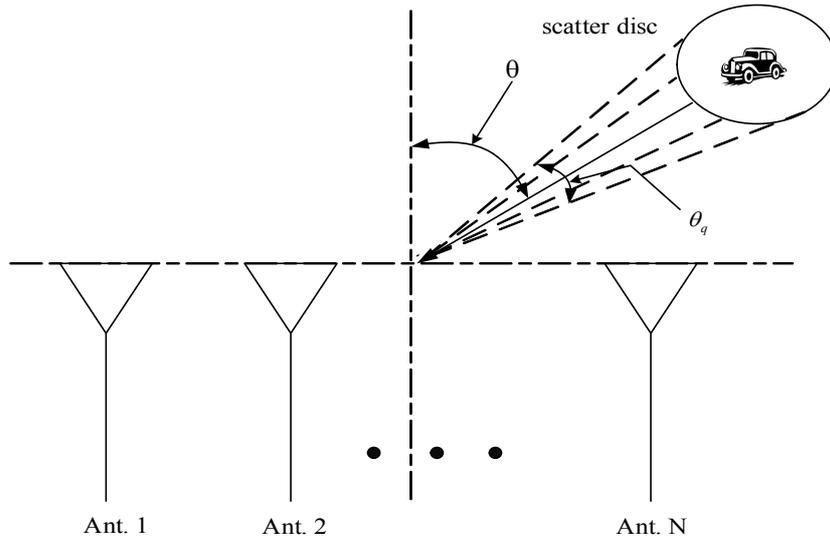


그림 2. 배열 안테나의 산란체 모델

여기서 $\underline{a}(\theta)$ 는 스마트 안테나의 방향벡터(steering vector)를 나타내고 $\alpha_{q,m}$ 는 전송 경로의 페이딩 인자(fading factor)를 나타내며 Q 는 산란체의 수를 나타낸다. 신호의 입사각 θ 는 시간에 따라 변할 수 있기 때문에 이 경우 $\underline{a}(\theta)$ 는 시변(time-varying) 벡터가 된다. 그러나 θ 의 변화는 $\alpha_{q,m}$ 의 변화보다 항상 느리기 때문에 $\underline{a}(\theta)$ 는 신호의 심볼구간에 대해 시불변(time-invariant) 벡터로, 페이딩 인자 $\alpha_{q,m}$ 는 시변 스칼라로 심볼마다 변한다고 가정할 수 있다.

3. 적응 빔형성 알고리즘

스마트 안테나 시스템의 기본 목적인 원하는 방향으로의 최대의 이득을 간섭 신호의 방향으로의 최소의 이득을 제공하기 위한 최적의 빔패턴을 생성하기 위하여 라그랑제 승수(Lagrange multiplier)를 이용하여 스마트 안테나 출력을 최대화하는 웨이트 벡터는 다음의 식을 만족해야 한다.

$$\max E[|w^H y|^2] = E[w^H y y^H w] = w^H \mathbf{R}_{yy} w \quad (3)$$

여기서 \mathbf{R}_{yy} 는 그림 1에 나타난 바와 같이 FFT 후의 신호벡터 y 의 자기상관행렬을 나타낸다. 식 (3)의 마지막 항을 만족하는 최대 고유값을 λ 라고 하면 식 (3)은 다음과 같이 표현된다.

$$\lambda = w^H \mathbf{R}_{yy} w \quad (4)$$

위의 식은 $w^H w = 1$ 의 제한조건을 만족하면 다음과 같은 정규 고유값 문제 (ordinary eigen-value problem)의 최대 고유값에 해당하는 최대 고유벡터를 구하는 것이 된다.

$$\lambda w = \mathbf{R}_{yy} w \quad (5)$$

위의 정규 고유값 문제를 라그랑제 승수에 적용한 것이 정규 라그랑제 알고리즘이다. 상기와 같이 수신전력을 최대화하는 조건을 만족시키는 웨이트 벡터가 정규 고유값 문제를 통해 구한 최대 고유값에 해당하는 고유벡터와 등가임을 알 수 있다.

본 논문에서 수신신호의 전력을 최대화하는 조건을 이용하는 알고리즘은 다음과 같은 방법으로 매 스냅샷마다 최적의 웨이트 벡터를 갱신한다. 즉, 미리 정한 적응이득값(μ), 수신 신호 벡터(y)를 입력값으로 매 스냅샷마다 라그랑제 승수인 감마값(γ)을 계산한 후 웨이트 벡터(w)를 최종적으로 구하는 것을 특징으로 한다. 다시 말하면 본 알고리즘은 원하는 빔패턴을 형성하도록 이득 벡터의 값을 결정함으로써, 안테나 소자에 유기된 신호들과 상기 이득 벡터의 내적 결과인 스마트 안테나의 출력을 원하는 값에 접근시키는 방법이다. 라그랑제 승수를 이용한 비용함수는 다음과 같다^(7,8).

$$J(w, \gamma) = w^H \mathbf{R}_{yy} w + \gamma(1 - w^H w) \quad (6)$$

\mathbf{R}_{yy} 는 스칼라 γ 와 벡터 w 가 각각 최대 또는 최소 고유값과 그에 해당하는 고유벡터인 입력된 신호의 자기상관 행렬이다. 비용함수 $J(w, \gamma)$ 의 그레디언트(gradient)는 다음과 같다.

$$\nabla_w J(w, \gamma) = 2(\mathbf{R}_{yy}w - \gamma w) \quad (7)$$

식 (7)부터 $\nabla = 0$ 을 만족하는 미지수 γ, w 는 각각 자기상관 행렬 \mathbf{R}_{yy} 의 고유값과 고유벡터에 해당한다. 즉, 식 (6)을 웨이트 벡터 w 로 편미분하여 그 결과인 그래디언트(∇)를 0으로 하는 웨이트 벡터를 구함으로써 식 (6)의 최대치 혹은 최소치를 구할 수 있다. 구하려는 웨이트 벡터는 초기 추정치 0으로 시작하고 다음 식에 의하여 반복적으로 갱신된다.

$$\begin{aligned} w(k+1) &= w(k) + \frac{1}{2}\mu \nabla_w J(w(k), \gamma(k)) = w(k) + \mu v(k) \\ &= w(k) + \mu[\mathbf{R}_{yy}(k)w(k) - \gamma(k)w(k)] \\ &= [1 - \mu\gamma(k)\mathbf{I} + \mu\mathbf{R}_{yy}(k)]w(k) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 μ 는 적응 이득, $v(k)$ 는 추적 방향벡터, \mathbf{I} 는 항등 행렬(identity matrix)을 나타내고 k 는 스냅샷 지수(snapshot index)를 의미한다. k 번째 스냅샷일 때 갱신되는 적응 웨이트 벡터는 다음과 같은 제한조건에 만족하여야 한다.

$$w^H(k)w(k) = 1 \quad (9)$$

따라서 자기상관 행렬 \mathbf{R}_{yy} 와 고유값 $\gamma(k)$, 그리고 웨이트 벡터 $w(k)$ 는 새로운 신호를 배열 안테나가 수신하는 매 스냅샷마다 식 (7), (8), (9)의 조건에 의해 갱신되며 자기상관 행렬은 매 스냅샷마다 다음 식에 의해 갱신된다.

$$\mathbf{R}_{yy}(k+1) = \mathbf{R}_{yy}(k) + fy(k)y(k)^H \quad (10)$$

여기서 f 는 0과 1사이의 값을 갖는 망각 인자(forgetting factor)이고 $y(k)$ 는 매 스냅샷마다 스마트 안테나의 수신 신호벡터를 나타낸다. 식 (8)에 보인 바와 같이 웨이트 벡터 $w(k)$ 를 갱신하기 위해서는 매 스냅샷마다 라그랑제 승수인 감마값($\gamma(k)$)을 먼저 계산하여야 한다. 식 (8)을 식 (9)에 대입하여 최적의 감마값을 구하는 이차 방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\mu\gamma^2(k) - 2[1 + \mu w(k)^H \mathbf{R}_{yy}(k)w(k)]\gamma(k) + \mu w(k)^H \mathbf{R}_{yy}(k)^2 w(k) + 2w(k)^H \mathbf{R}_{yy}(k)w(k) = 0$$

(11)

식 (11)을 만족하는 감마값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\gamma(k) = \frac{b - \sqrt{b^2 - ac}}{a}$$

(12)

여기서 a, b, c 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} a &= \mu \\ b &= 1 + \mu w(k)^H \mathbf{R}_{yy}(k)w(k) \\ c &= \mu w(k)^H \mathbf{R}_{yy}(k)^2 w(k) + 2w(k)^H \mathbf{R}_{yy}(k)w(k) \end{aligned}$$

(13)

본 논문에서 제시하는 최적의 웨이트 벡터를 구하는 전체적인 과정을 종합하면 다음과 같다.

- ▷ step 1 : 초기에 각 안테나 소자에 유기된 신호를 이용하여 $w(0) = y(0) / \|y(0)\|$ 로 초기 값을 설정한다. 이때 자기상관 행렬을 $\mathbf{R}_{yy}(0) = y(0)y^H(0)$ 로 하여 계산한다. 여기서 $\|\cdot\|$ 는 놈(norm)을 나타낸다.
- ▷ step 2 : 새로운 신호벡터 $y(k)$ 를 식 (10)에 대입하여 자기상관 행렬을 갱신하고 식 (12)로부터 $\gamma(k)$ 를 구한 후 식 (8)에 의해 웨이트 벡터를 갱신한다.
- ▷ step 3 : 이후 매 스냅샷마다 새로운 수신신호 벡터를 수신하여 위의 과정을 반복한다.

그림 3은 위에서 설명한 정규 라그랑제 알고리즘의 순서도를 나타낸다.

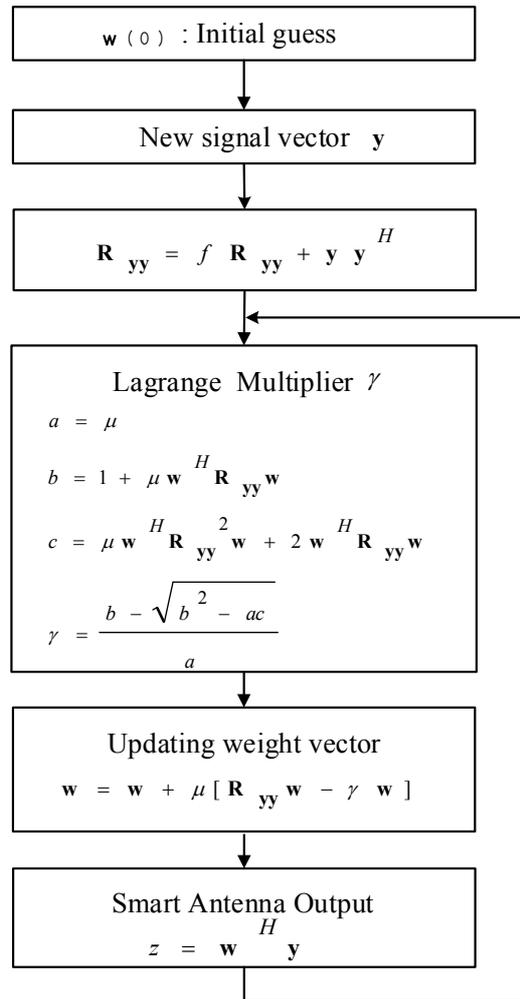


그림 3. 정규 라그랑제 알고리즘의 순서도

4. 성능분석

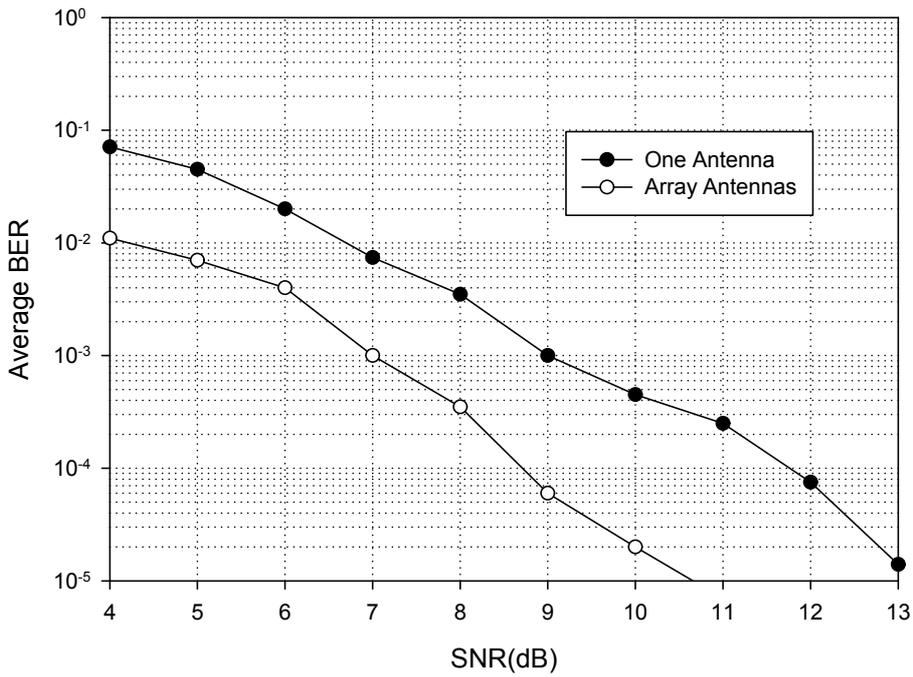
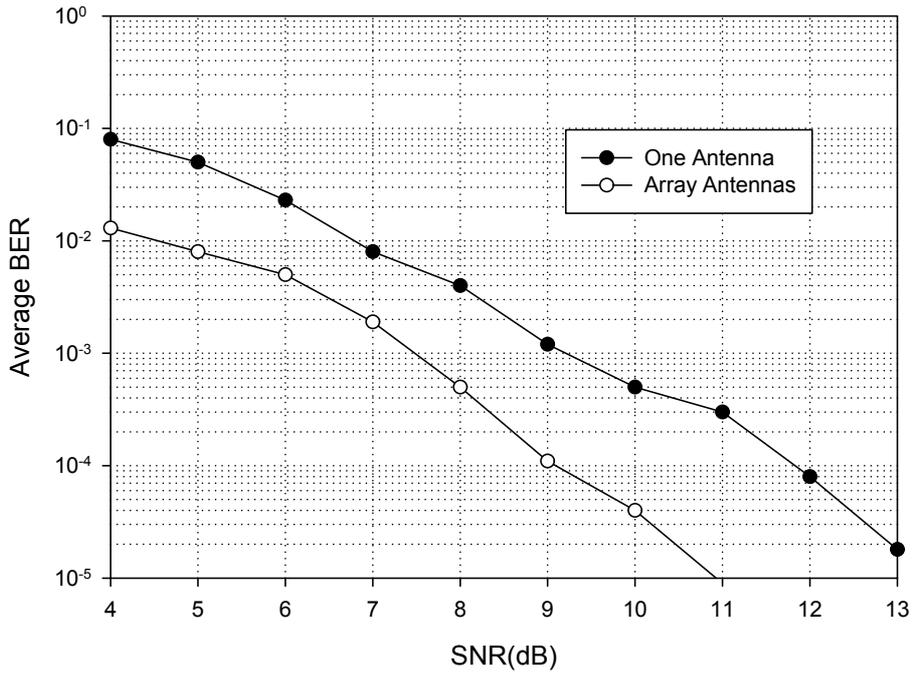
본 논문의 모의실험을 위한 OFDM 시스템 환경의 파라미터는 표 1과 같다. 성능 분석을 위한 모의실험에서 사용된 채널은 레일리 페이딩 채널로 안테나 소자간의 간격은 반파장으로 단말기는 $\pm 60^\circ$ 범위에서 균일하게 분포한다고 가정하였다.

Table 1. Simulation parameters

Item	Value
Carrier Frequency	2.3GHz
Channel Bandwidth	10MHz
Mobile Speed	60km/h
Number of Scatter	20
Multiple Access	OFDMA
Fading Channel	Rayleigh Fading
FFT Size	512, 1024
Modulation	QPSK
Mobile Distribution	Uniform from -60° to 60°
Number of Antenna Elements	6

그림 4는 레일리 페이딩 환경하에서 512개의 부반송파, 사용자 10명, QPSK 변조를 사용하여 단일 안테나 기지국과 스마트 안테나 기지국의 BER을 나타내고 있다. BER 10^{-4} 을 기준으로 비교할 때 단일 안테나에 비해 스마트 안테나의 성능이 약 2.8dB 정도 이득을 얻음을 확인할 수 있다. 그림 5는 1024개의 부반송파를 사용한 단일 안테나 기지국과 스마트 안테나 기지국의 BER을 나타내고 있다. 1024개의 부반송파를 사용하는 경우에는 단일 안테나에 비해 약 3.3dB의 성능 향상을 얻을 수 있었으며 이는 512개의 반송파를 사용하는 경우보다 약 0.5dB의 이득 증가를 확인할 수 있다.

그림 5. SNR에 따른 BER 성능(1024개 부반송파)



5. 결론

본 논문에서는 OFDM 시스템 신호 환경에서 적응 빔형성 기술을 사용하는 스마트 안테나 시스템의 성능을 단일 안테나 시스템과 비교하여 그 성능을 분석하였다. 사용된 적응 빔형성 알고리즘은 수신전력을 최대화하는 조건을 이용하는 알고리즘으로 OFDM 시스템의 FFT 전후의 신호를 이용하여 최적의 웨이트 벡터를 구하고 그 성능을 분석하였다.

OFDM 시스템에서 각각 512개의 부반송파와 1024개의 부반송파를 사용하는 경우에 단일 안테나를 사용하는 경우에 비해 6개의 배열 안테나와 적응 빔형성 알고리즘을 적용한 스마트안테나 시스템이 단일 안테나 시스템에 비해 약 3dB의 성능 향상을 확인하였다.

참고문헌

- (1) J. Liberti and T. Rappaport, *Smart Antennas for Wireless Communications*, Prentice Hall PTR, 1999.
- (2) J. Winters, "Smart antennas for wireless systems," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 5, pp. 23–27, Feb., 1998.
- (3) W. Lee, S. Choi, J. Choi and M. Suk, "An adaptive beamforming technique for smart antennas in WCDMA system," *IEICE Trans. Commun.*, vol. 86–B, no. 9, pp. 2838–2843, Sept. 2003.
- (4) G. Xu and H. Liu, "An Effective Transmission Beamforming Scheme for Frequency Division Duplex Digital Wireless Communication Systems", in *Proc. ICASSP*, vol. 3, pp. 1729– 1732. May 1995.
- (5) J. Błogh and L. Hanzo, *Third Generation Systems and Intelligent Wireless Networking: smart antennas and wireless networking*, John Wiley and Sons, 2002.
- (6) G. Okamoto, *Smart Antenna Systems and Wireless LANs*, Kluwer Academic Publisher, Boston, 1999.
- (7) R. Monzingo and T. Miller, *Introduction to Adaptive Arrays*, Johns Wiley & Sons, NewYork, 1980.
- (8) T. Shan, T. Kailath, "Adaptive beamforming for coherent signals and interference," *IEEE Trans. Acoust. Speech and Signal Proc.*, vol. 33, no. 3, Jun. 1985.