

시-공간 벡터 채널에서 배열 안테나를 적용한 DS-CDMA 시스템의 대역폭과 각도 퍼짐에 따른 효과

전준수, 유중찬, 박현수, 최민석 *김철성
전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학과,
*전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학과, RRC
Tel : 062-530-0796 / 핸드폰 : 011-602-0456

Performance Analysis of DS-CDMA System with Smart Antenna for Angular Spread and Bandwidth in Spatio-temporal Vector Channel

Jun-Soo Jeon, Jung-Chan Ryu, Hyun-Su Park, Min-Seok Choi, *Cheol-Sung Kim
Dept. of Computer & Information Engineering, Chonnam National University, RRC
E-mail : angelric@naver.com

Abstract

In this paper, the performance of wideband CDMA system with smart antenna is analyzed for different bandwidth(1.25MHz, 2.5MHz, 5MHz) and angular spread at base station. In detail, the spatio-temporal wideband multipath vector channel model is proposed. And the received signals in 2D-RAKE receiver are rigorously analyzed in proposed vector channel model. We consider the effect of correlation between any two elements of antenna array. Several multipaths within one chip are distinguished into each one and the strongest signal is selected as a desired one. As a result, the performance of W-CDMA system with smart antenna in spatio-temporal wideband vector channel has been improved in proportion to the increase of angular spread and bandwidth.

1. 서론

이동 통신 시스템의 성능 및 용량은 셀 간 혹은 셀 내에서 발생하는 동일 채널 간섭 신호와 경로 손실, 다중경로 페이딩, 신호의 지연 및 도플러 확산 및 음영 현상 등의 무선 전파 채널 특성에 의해 근본적으로 제한된다. 따라서 현재의 이동 통신 시스템은 이러한 성능 및 용량 제한 현상에 대한 보상 기술로 전력 제어, 채널 코딩, RAKE 수신기, 다이버시티 안테나, 셀의 색터화, 주파수 분할, 대역 확산 등의 기술을 모두 응용하고 있는 실정이다. 그러나 이동 통신 서비스의 욕구가 점차 다양해지면서 그 수요도 크게 늘어남에 따라 기존

의 기술만으로는 증대되는 고성능, 고용량의 필요를 충족시키기는 점차 어려워질 것으로 판단된다

본 논문에서는 기지국에 스마트 안테나를 적용한 1.25MHz, 2.5MHz, 5MHz의 세가지 확산 대역폭을 갖는 DS-CDMA 시스템의 성능을 수신신호의 각도 퍼짐을 고려하여 통계적으로 분석하였다. 그리고 성능 분석에 필요한 시-공간 광대역 다중경로 벡터 채널 모델과 수신 신호 모델을 제안하였으며 최적의 성능을 얻을 수 있는 2D-RAKE 수신기의 구조를 제안하였다.

II. 채널 모델화

스마트 안테나에 대한 기존 연구에서 사용한 벡터 채널 모델들은 시스템의 대역폭에 관계없이 한 칩 구간 내에는 공간적으로 임의의 한 방향에 존재하는 하나의 클러스터에 의한 다중경로 성분만 존재한다고 가정하고 해석하고 있으며 대부분 각도 퍼짐을 고려하지 않았다,

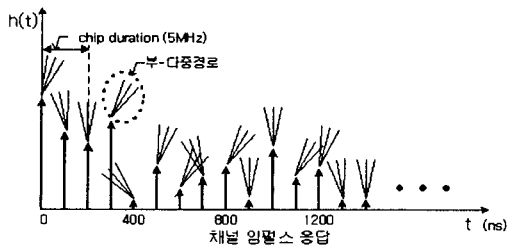


그림 1. 시-공간 광대역 벡터 채널 모델 따라서 채널에서 발생하는 클러스터에 의한 각도퍼짐의

효과와 다중경로에 대한 영향을 시-공간적으로 정확하게 분석할 수 없었다.

그러나 본 논문에서는 그림 1과 같이 한 칩 구간 내에는 채널의 해상 시간의 정수배 되는 시간에 존재하는 하나 이상의 다중경로들을 시-공간적으로 분리하였으며 분리된 다중 경로 성분 중 최대 전력을 갖는 성분을 원하는 사용자의 신호로 찾아내고 채널 추정 방법을 이용하여 가중치 벡터를 구하여 빔 패턴을 형성하는 방법으로 성능 분석을 행하였다. 이때 채널의 분해가능시간은 광대역 실측 JTC모델에 적용하도록 100[nsec]로 두었으며, 한 칩 구간내의 다중경로의 수는 채널의 분해가능시간과 시스템 대역폭의 역수인 한 칩 구간에 의해 결정됨을 그림 1를 통해 알 수 있다. 부-다중경로들의 AoA는 AoS 이내에 균일 분포를 갖는다고 가정한다^[2].

JTC 채널 모델에서 k 번째 사용자의 채널 임펄스 응답에 클러스터링 현상을 가정하고 클러스터의 각도피침이 고려된 배열응답벡터인 $\mathbf{a}(\cdot)$ 을 적용한 최종 결과 식은 다음과 같다.

$$\mathbf{h}_k(t) = \sum_{d=1}^D \sum_{l=1}^L \rho_{k,d,l} \delta(t - \tau_{k,d,l}) e^{j\beta_{k,d,l}} \times \mathbf{a}(\theta_{k,d} + s_{k,d,l} \Delta_{k,d}) \quad (1)$$

$$\mathbf{a}(\theta_{k,d} + s_{k,d,l} \Delta_{k,d}) = [1 \ e^{-j\phi_{k,2}} \ \dots \ e^{-j\phi_{k,M}}]^T \quad (2)$$

$$\phi_{k,m} = \sum_{l=1}^L \frac{2\pi}{\lambda} d_{l,m} \sin(\theta_{k,d} + s_{k,d,l} \Delta_{k,d}) \quad (3)$$

식 (1)에서 k, d, l 은 각각 사용자, 다중경로, 부-다중경로를 구분하는 지수이다. 각 다중경로는 서로 다른 시간지연, $\tau_{k,d}$ 를 갖고, AoA인 $\theta_{k,d}$ 에서 $s_{k,d,l} \Delta_{k,d}$ 만큼의 AoS를 갖는 L개의 부-다중경로 성분의 합으로 구성되어있고, 각 부-다중경로는 서로 다른 크기와 위상을 갖는다. $\mathbf{a}(\cdot)$ 는 방향벡터이고, 이 값은 안테나 배열 구조에 따라 식 (2)와 식(3)과 같이 결정 된다^[3]. 식 (2)와 식 (3)에서 $d_{l,m}$ 은 첫 번째 안테나 소자와 m번째 안테나 소자와의 거리이고, λ 는 반송파의 파장이며 M은 안테나의 개수이며 각 안테나는 등 간격으로 선형적으로 배열하였다. 식 (1)에서 $\sum_{l=1}^L \rho_{k,d,l} \cdot e^{(j\beta_{k,d,l})}$ 을 크기 성분이 포함된 채널 벡터, $\rho_{k,d}$ 로 두면 사용자 k 에 대한 채널응답벡터는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{h}_k(t) = \sum_{d=1}^D \rho_{k,d} \delta(t - \tau_{k,d}) \quad (4)$$

$$\rho_{k,d} = \sum_{l=1}^L \rho_{k,d,l} \cdot e^{(j\beta_{k,d,l})} \mathbf{a}(\theta_{k,d} + s_{k,d,l} \Delta_{k,d}) = [\rho_{k,d} \langle 1 \rangle \ \rho_{k,d} \langle 2 \rangle \ \dots \ \rho_{k,d} \langle M \rangle]^T \quad (5)$$

III. 2D-RAKE 수신기에서 수신 신호

해석

그림 2는 본 논문에서 사용한 스마트 안테나 시스템용 2D-RAKE 수신기의 구조로 입력신호의 낮은 SINR을 개

선하고자 상관기를 빔 형성기 전단에 두어서 신호의 SINR 값을 높인 후에 입력신호로 사용하였다.

본 논문에서 변수 우측에 표기된 <윗첨자>와 <아래첨자>는 각각 디지털 빔 형성 블록의 지수와 배열 안테나 지수를 나타내며, 안테나 지수 1의 안테나를 기준 안테나로 두었다.

M개의 배열 안테나에 수신되는 총신호 중 <n>번째 빔 형성 블록에서 처리될 다중경로 신호들은 다음과 같다^[4].

$$\mathbf{r}^{(n)}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{d=1}^D \sqrt{2P_b} m_k(t - \tau_{k,d}^{(n)}) c_k(t - \tau_{k,d}^{(n)}) \times \cos(\omega_c t + \phi_{k,d}^{(n)}) \rho_{k,d}^{(n)} + \mathbf{N}^{(n)}(t) \quad (6)$$

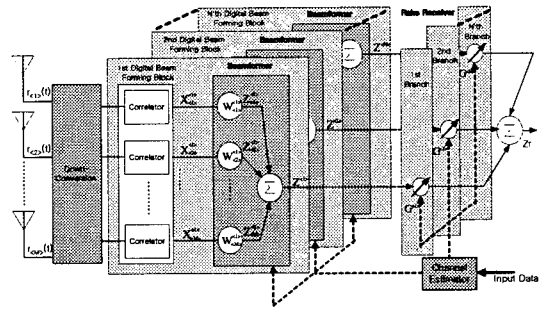


그림 2. 2D-RAKE 수신기의 구조

식 (6)에서 P_b 는 비트전력이고, $\tau_{k,d}^{(n)}$, $\rho_{k,d}^{(n)}$, $\mathbf{N}^{(n)}(t)$ 은 각각 <n>번째 빔 형성 블록에서 처리될 k 번째 사용자의 d 번째 다중경로의 시간지연, 방향벡터, 가산성 잡음벡터를 의미하며, $\phi_{k,d}^{(n)}$ 은 $-\omega_c \tau_{k,d}^{(n)}$ 이다.

<n>번째 빔 형성 블록에서 처리될 다중경로 신호들 중 첫 번째 사용자($k=1$)의 가장 큰 신호를 갖는 경로 ($d=d_{max}$)를 원하는 사용자의 신호가 수신되는 경로로 가정하고, BPSK 변조방식과 완벽한 코드동기, 캐리어 동기를 가정하면, <n>번째 빔 형성 블록에서 복조와 역확산을 취한 후, 시간 i 에서 심볼당 샘플링을 취한 후의 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다^[4].

$$\mathbf{X}^{(n)}(i) = \sqrt{\frac{P_b}{2}} d_1(i) \rho_{1,d_{max}}^{(n)}(i) + \mathbf{J}_{\infty}^{(n)}(i) + \mathbf{I}_{\infty}^{(n)}(i) + \mathbf{N}_{\infty}^{(n)}(i) = \sqrt{\frac{P_b}{2}} d_1(i) \rho_{1,d_{max}}^{(n)}(i) + \mathbf{N}_T^{(n)}(i) \quad (7)$$

식 (7)에서 $\rho_{1,d_{max}}^{(n)}$ 는 <n>번째 빔 형성 블록의 첫 번째 사용자의 다중경로 중 가장 큰 신호를 갖는 경로의 방향벡터이고, $\mathbf{J}_{\infty}^{(n)}(i)$, $\mathbf{I}_{\infty}^{(n)}(i)$, $\mathbf{N}_{\infty}^{(n)}(i)$ 는 각각 <n>번째 빔 형성 블록의 상관기의 출력에서 “원하는 사용자의 다중경로 성분 중 가장 큰 신호를 갖는 경로를 제외한 나머지 성분(자기간섭)”, “원하지 않는 사용자의 다중경로 성분(다중접속간섭)”, “가산성 잡음 성분”을 의미한다. 그리고 <n>번째 빔 형성 블록의 상관기 출력 중 총 간섭잡음 성분 $\mathbf{N}_T^{(n)}(i)$ 은

$J_{\infty}^{(n)}(i) + I_{\infty}^{(n)}(i) + N_{\infty}^{(n)}(i)$ 이다^[4].

간섭잡음 각각의 통계적 특성은 화이트(white)하다^[5]. 식 (7)에서 행렬 $X^{(n)}(i)$ 의 $\langle m \rangle$ 번째 안테나에 해당하는 신호 중 자기간섭의 분산과 다중접속간섭의 분산을 통계적으로 구해보면 식 (8)과 식(9)로 쓸 수 있다^[2].

$$\sigma_{J_{\infty}}^2 \langle n \rangle = \sum_{d=1, d \neq d_{\max}}^D \frac{P_b}{2} |\rho_{1,d} \langle n \rangle|^2 \frac{PG}{2} T_c^2 \quad (8)$$

$$\sigma_{I_{\infty}}^2 \langle n \rangle = \sum_{k=2}^K \sum_{d=1}^D \frac{P_b}{2} |\rho_{k,d} \langle n \rangle|^2 \frac{2}{3} \cdot PG \cdot T_c^2 \quad (9)$$

여기에서 T, T_c, PG 는 각각 심볼 구간, 칩 구간, 처리이득을 의미한다.

IV. Beamforming-RAKE 수신기의 성능

분석

채널 추정기에 의해 얻어지는 $\langle n \rangle$ 번째 빔 형성기의 가중치 벡터는 식 (10)과 같다.

$$W_{1,d_{\max}}^{(n)} = \beta^{(n)} \cdot \rho_{1,d_{\max}}^{(n)}(i)^H \quad (10)$$

여기에서 $\beta^{(n)}$ 은 $1/\sqrt{\rho_{1,d_{\max}}^{(n)}(i)^H \cdot \rho_{1,d_{\max}}^{(n)}(i)}$ 로, $\langle n \rangle$ 번째 MRC 가지의 가중치 값인 $G^{(n)}$ 은 $|\rho_{1,d_{\max}}^{(n)}(i)|$ 로 설정하면, 2D-RAKE 수신기의 최종 출력 신호는 식 (12)와 같고, 총 간섭 신호의 분산은 식 (13)과 같다^[2].

$$|\rho_{1,d_{\max}}^{(n)}(i)| = \frac{\rho_{1,d_{\max}}^{(n)}(i)^H \cdot \rho_{1,d_{\max}}^{(n)}(i)}{\sqrt{\rho_{1,d_{\max}}^{(n)}(i)^H \cdot \rho_{1,d_{\max}}^{(n)}(i)}} = \sqrt{\sum_{m=1}^M |\rho_{1,d_{\max}} \langle n \rangle|^2} \quad (11)$$

$$Z_T = \sqrt{\frac{P_b}{2}} \sum_{k=1}^N d_1(k) |\rho_{1,d_{\max}}^{(n)}(i)|^2 + N_T^{(n)}(i) \quad (12)$$

$$\sigma_{Z_T}^2 = \sigma^2 \sum_{m=1}^M |\rho_{1,d_{\max}} \langle n \rangle|^2 \quad (13)$$

식 (12)에서 총잡음(자기간섭+다중접속간섭+가산성잡음)을 가우시안 분포로 근사화 시키면, 조건부 에러확률 $P_e(r_b)$ 는 SINR(r_b)이 주어질 때 가산성 잡음 환경에서의 조건부 에러확률을 구하는 방법과 동일하게 된다. 즉 $P_e(r_b) = Q(\sqrt{2}r_b)$ 이다. 이 때 변조방식은 BPSK로 가정하였으며, SINR(r_b)는 식 (12)와 식 (13)에 의해서 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$r_b = \frac{E_b}{N_0} \frac{\left(\sum_{n=1}^N |\rho_{1,d_{\max}} \langle n \rangle|^2 \right)^2}{\sum_{n=1}^M |\rho_{1,d_{\max}} \langle n \rangle|^2} = \frac{E_b}{N_0} \sum_{n=1}^N |\rho_{1,d_{\max}} \langle n \rangle|^2 \quad (14)$$

여기에서 $E_b = P_b \cdot T$ 이고, $N_0 = \sigma^2 \cdot 4T$ 이다.

다음으로 평균 에러확률 P_e 는 다음과 같다.

$$P_e = \int f_{r_b}(r_b) P_e(r_b) dr_b \quad (15)$$

각 안테나 소자 사이의 원하는 경로에 대한 상관값을 고려하면 식(14)은 다음과 같이 식 (16)로 쓸 수 있다^[5].

$$r_b = \frac{E_b}{N_0} \sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M \gamma_{1,d_{\max}} \langle n \rangle \left| u_{d_{\max}, \langle m \rangle} \langle n \rangle \right|^2 \quad (16)$$

여기에서 $\gamma_{1,d_{\max}} \langle n \rangle$ 은 $\rho_{1,d_{\max}} \langle n \rangle(i)$ 의 상관행렬의 고유

치(eigenvalue) 중 $\langle m \rangle$ 번째 값이고, $u_{d_{\max}, \langle m \rangle} \langle n \rangle$ 은 i.i.d(independent, identically, distributed)이고 평균이 0인 복소 가우시안 랜덤 변수이다.

V. 모의 실험

모의 실험에 사용할 채널은 광대역 채널모델에서 널리 통용되는 JTC 채널모델을 가정하였고, JTC 전력지연 프로파일로는 표 1에서와 같은 실외 도심 고층 보행자 환경의 전력 파라미터를 사용하였다. 채널 A는 시간 지연이 비교적 짧은 경우이고 채널 B는 시간 지연이 긴 경우이다.

표 1. JTC 채널모델의 실외 도심 고층 건물지역의 보행자 환경에서 탭 지연 선로 파라미터

Tap	Channel A		Channel B	
	Relative Delay(nsec)	Average Power(dB)	Relative Delay(nsec)	Average Power(dB)
1	0	-2.4	0	-3.8
2	100	-6.0	200	-4.8
3	200	-9.6	800	-8.9
4	300	-13.2	1200	-12.2
5	500	-20.4	2300	-11.6
6	700	-27.6	3700	-28

표 1에서 상대지연은 첫 번째 다중경로 성분과의 시간 차이를 의미하고, 평균 전력은 전체 송신 전력으로 정규화한 값이다. 경로의 빔 패턴 형성을 위해 완벽한 채널추정을 가정하였으며, 1.25MHz, 2.5MHz, 5MHz의 시스템 대역폭, 3.84Mcps의 칩률, 1,2,4개의 RAKE 가지, 그리고 10Kbps의 심볼 전송률을 사용하였다.

Table 1 The parameter used in the simulation

대역폭	1.25MHz	2.5MHz	5MHz
반송파주파수	1.9GHz	1.9GHz	1.9GHz
심볼전송율	10Kbps	10Kbps	10Kbps
처리이득	125	250	500
RAKE의 가지수	1개	2개	4개

모든 데이터는 +1로 가정하고 완벽한 전력제어와 코드 동기를 가정하였으며 채널 코딩은 사용하지 않았다. 100번의 시행에 의해 평균 SINR을 구하였고, 평균에러확률을 구하기 위하여 100만개의 데이터를 발생시켰다. 간섭신호는 시간적, 공간적으로 화이트하다고 가정하였다.

총 사용자 수(K) 100명에 해당하는 다중경로들의 입사각($\theta_{k,d}$)을 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 사이의 각도에서 랜덤하게 발생시켰으며, 각도 퍼짐은 10° 와 60° 를 고려하였다. 한 사용자당 사용한 JTC 전력지연 프로파일에 해당하는 6개(D)의 다중경로 성분을 발생시키고 각 다중경로에 해당하는 20개(L)의 부-다중경로를 발생시켰다. 그리고 한 칩 내에 들어오는 다중경로 성분 중 최대 전력을 갖는 성분을 원하는 사용자의 신호로 찾아내어 빔 패턴을 형성하는 방법으로 각각 다른 세가지 시스템 대역폭 1.25MHz, 2.5MHz, 5MHz의 성능을 각도퍼짐에 따라 분석하였다.

VI. 결 론

본 논문에서는 기지국에 스마트 안테나를 적용한 1.25MHz, 2.5MHz, 5MHz의 세가지 확산 대역폭을 갖는 DS-CDMA 시스템의 성능을 수신 신호의 각도 퍼짐에 따른 성능을 분석하였다. 또한 시-공간 광대역 다중 경로 백터 채널 모델과 수신 신호 모델을 제안하였으며 최적의 성능을 얻기 위해 2-D RAKE 수신기를 적용하였다. 그 결과, 한 칩 구간 내에 다수개의 다중경로를 분리함에 의해서 채널의 현상을 좀 더 실제적으로 분석 할 수 있었다. 각도 퍼짐에 커짐이면 이에 비례한 공간 다이버시티 효과를 부가적으로 얻을 수 있었고 대역폭이 넓은 시스템일수록 더 많은 수의 2D-RAKE 수신기의 가치를 이용함으로써 더 많은 성능 개선을 보였다. 이에 따라 각도 퍼짐이 증가함에 따라 대역폭이 큰 시스템일수록 성능 개선의 정도가 커짐을 알 수 있었다. 그러므로 각도 퍼짐이 큰 도심 지역 채널 환경에서 넓은 대역폭을 사용하는 시스템에 2D-RAKE 수신기를 적용한 스마트 안테나 기법을 사용한다면 보다 나은 서비스를 제공할 수 있을 것으로 기대되며, 이는 고속 대용량의 데이터를 전송해야 하는 차세대 이동통신 시스템에서 유효하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] R. L. Choi, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "MISO CDMA transmission with simplified receiver for wireless communication handsets," IEEE Trans. Communications, Vol. COM-49, pp. 888 - 898, May., 2001.
- [2] 전준수, 김철성, "광대역 다중경로 실측 채널 모델에서 스마트 안테나를 적용한 광대역 CDMA 시스템의 각도퍼짐에 따른 성능분석", 한국전자과학회 논문지, vol. 14, no. 5, pp. 558-567, 2003. 5.
- [3] Joseph C. Liberti, Theodore S. Rappaport "Smart Antenna for Wireless Communications", Prentice-Hall, 1999.
- [4] Jun-Soo Jeon, Jeong-Won Lee, and Cheol-Sung Kim, "Performance of DS-CDMA system with smart antenna for different bandwidth in the wideband multipath channel," IEEE 57th Vehicular Technology Conference, pp. S02E03, Jeju, Korea, April 2003.
- [5] Monica Dell'Anna and A. Hamid Aghvami, "Performance of optimum and sub-optimum combining at the antenna array of a W-CDMA system", IEEE, 1999.

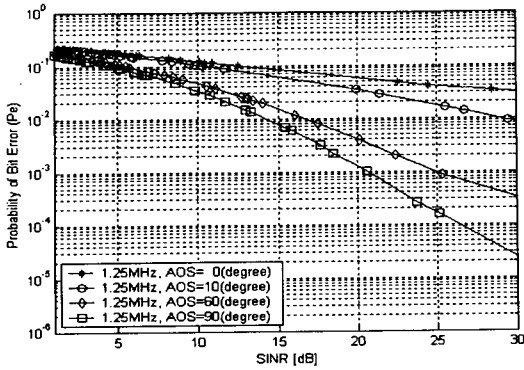


그림3 Comparison of average error probability vs. SINR(1.25 MHz system)

그림 3는 1.25MHz 시스템에서 SINR에 대한 BER을 각도 퍼짐에 따라 분석한 결과이다. 각도 퍼짐이 커질수록 에러 확률 10^{-3} 을 만족하는 SINR은 더 낮아짐을 알 수 있으며 각도 퍼짐이 0° 의 경우에는 floor가 발생하여 10^{-3} 을 만족하는 SINR이 없음을 알 수 있다.

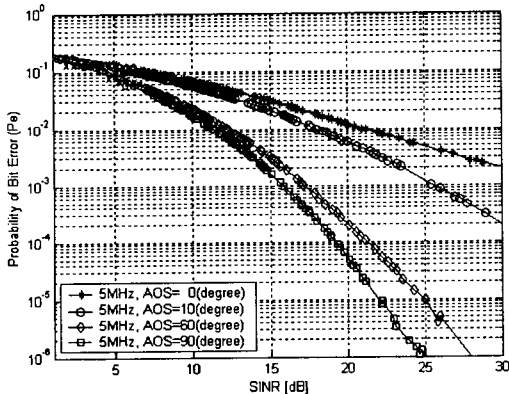


Figure 4 Comparison of average error probability vs. SINR (5MHz system).

그림4에서는 5MHz 시스템에서 SINR에 대한 BER을 각도 퍼짐에 따라 분석한 결과이다. 그림 3의 1.5MHz 시스템에 비해서 각도 퍼짐이 동일할 때 더 큰 폭의 성능 향상이 보임을 확인할 수 있다. 표2 는 그림 3, 그림4에서 $BER = 10^{-3}$ 을 만족하는 SINR을 시스템 대역폭과 각도 퍼짐에 따라 분석한 결과이다. 이 결과로부터 각도 퍼짐이 동일 할 때 대역폭이 큰 시스템일수록 성능 개선의 정도가 더 커짐을 알 수 있다.

Table 2 SINR acceptable $BER = 10^{-3}$ from fig3, 4

Bws \ A	0°	10°	60°	90°
1.25MHz	N/A	39dB	25dB	21dB
2.5MHz	N/A	34dB	22dB	17.5dB
5MHz	38dB	26dB	17dB	16dB

*본 연구는 한국과학재단 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음