

핸드오프시 산란체 분포에 따른 적응형 배열 안테나 시스템의 성능 분석

준희원 이재혁*, 정희원 조동균*, 김남수*

Performance analysis of adaptive array antenna system by mobile scatterer distribution at handoff

Jae-Hyuck Lee* Associate Member, Dong-Kyun Cho* Nam-Soo Kim* Regular Members

요약

본 논문은 전파 음영과 이동국 산란체 분포를 고려한 환경하에서 다중 접속 간섭을 효과적으로 제거하기 위해 기지국에 적응형 배열 안테나를 사용한 DS-CDMA 셀룰러 시스템의 핸드오프시 셀 영역 확장에 관한 연구이다. 먼저, 기지국에서 사용자 이동국으로부터 수신된 신호의 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)값은 안테나 엘리먼트 수, 엘리먼트 수에 따른 간섭 이득, 이동국 산란체 분포에 따른 포락선 상관, 그리고 셀 부하율을 고려하여 유도하였다. 둘째로, 수신 SINR값을 핸드오프시 시스템의 오수신 확률(outage probability)에 적용하여 사용자 이동국이 전파음영을 극복하기 위한 부가 송신전력을 계산하였다. 이때, 계산된 부가 송신전력은 핸드오프시 셀 영역 확장을 구하기 위해 이용되어졌다. 분석 결과, 적응형 배열 안테나에 입사되는 다중경로 신호의 빔폭이 증가함에 따라 기지국에서 수신하는 SINR은 작아지고, 핸드오프시 오수신 확률이 증가됨으로써 시스템의 통화 품질을 위해 요구되는 부가 송신전력이 증가되며, 셀 영역이 감소함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we study cell area extension at handoff of DS-CDMA cellular system used adaptive array antenna in the base station to remove multiple access interference effectively in consideration of propagation effect and mobile scatterer distribution. Firstly, SINR for signal that is received from the mobile is derived in consideration of interference gains with antenna element number, envelop correlation with mobile scatterer distribution and cell loading factor. Secondly, additive transmission power of desired mobile to overcome propagation shadowing is calculated in the application of derived SINR to outage probability at handoff. At this time, calculated additive transmission power is used to know cell area extension. From the analysis result, the more beam width of multipath signals that enter to adaptive array antenna is increased, the smaller SINR in the base station is. As the result of that, additive transmission power that is required for quality of system is increased and cell coverage is decreased as outage probability is increased at handoff.

1. 서론

이동통신 시스템은 이동하는 단말기들과 셀 내 기지국간 무선 링크를 통하여 원하는 신호를 주고 받는다. 이러한 이동통신 시스템은 동일 주파수 대

역의 셀 내 여러 사용자들과 기지국간의 무선 링크를 효율적으로 사용하기 위해서 다중 접속기술이 필요하다. 다중 접속기술에는 FDMA(Frequency Division Multiple Access), TDMA(Time Division Multiple Access), 그리고 CDMA(Code Division

* 충청대학교 정보통신 공학부(leeslife@orgio.net, dkcho@chongju.ac.kr, nskim@chongju.ac.kr)
논문번호 : 020336-0730, 접수일자 : 7월 30일

Multiple Access) 방식으로 구분할 수 있다. 이 중에서 CDMA 방식은 기지국의 셀 내 채널 용량과 성능 면에서 가장 우수한 무선 접속방식이다. 일반적으로 CDMA 이동통신 시스템의 성능 및 채널 용량은 셀 간 혹은 셀 내에서 발생하는 동일채널 간섭신호와 경로 손실, 다중경로 페이딩, 신호의 지연 및 도플러 확산등에 의하여 제한된다. 현재 CDMA 이동 시스템에서는 이러한 성능 및 용량 제한현상을 보상하기 위한 기술로 대역확산, 전력제어, 채널코딩, RAKE 수신기, 안테나 다이버시티, 셀의 섹터화 등의 기술을 사용하고 있다¹¹⁾. 그러나 음성 서비스 외에 고속 데이터 서비스와 영상 서비스, 등의 이동 멀티미디어 서비스의 욕구가 증대되면서, 기존의 기술만으로는 고성능, 고용량의 무선 링크를 충족시키는 어렵다. 최근들어 이러한 고성능, 고용량의 무선 링크를 확보할 수 있는 방법으로 적응형 배열 안테나 시스템이 제안 되었다. 적응형 배열 안테나는 특정한 형태로 배열된 각각의 안테나 엘리먼트에 수신된 신호의 크기와 위상을 결합하고 조정 제어하는 신호 처리 과정을 통하여 안테나 빔 패턴 (beam pattern)을 생성함으로써 빔을 원하는 방향으로 조절 수 있는 기능을 제공한다¹¹⁾. 이러한 기능을 통하여 다중 접속 간섭과 잡음이 존재하는 시스템에서 부가적인 스펙트럼 할당 및 원하는 사용자의 부가적인 송신 전력의 증가 없이 채널의 용량을 극대화시킬 수 있다. 또한 단위 면적당 기지국 수를 줄임으로써 기존의 무 지향성 안테나의 문제점인 단위 면적당 많은 기지국의 수와 이로 인한 잦은 핸드오프수행으로 용량 저하 및 불필요한 전력 소모 등의 문제점을 해결할 수 있다. 이러한 적응형 배열 안테나 시스템의 성능은 이동국 산란체에 의해 발생하는 다중경로 신호의 도래각(angle of arrival)과 배열 안테나 간에 입사되는 신호의 상관(correlation)에 직접적인 관계가 있기 때문에 실제적인 도래각의 모델링이 필요하다.

S. A. Hanna는 기지국 수신 안테나 엘리먼트에 입사하는 간섭신호와 원하는 신호의 페이딩을 서로 독립으로 가정하였고, 기지국 안테나에 입사하는 다중경로 신호를 균일 분포로 가정하였다. 일반적으로 이동국 주위의 산란체에 의해 발생하는 다중경로 신호들은 주로 주어진 방향에서 기지국 안테나에 입사 된다²⁾. 이때, 기지국 안테나는 이동국의 LOS(Line Of Sight)신호 및 이동국 주위의 산란체에 의해 발생하는 다중경로 신호를 수신하게 된다. 이러한 연구는 Jack Salz에 의해 연구 되었고, 안테

나 엘리먼트간 거리에 따른 수신 신호의 상관관계를 분석하였다³⁾.

한편, 사용자의 이동에 따른 셀 간 통화로의 원활한 연결을 위해 핸드오프를 수행하게 되는데 DS-SS-CDMA 시스템의 핸드오프에 관한 연구는 A.J.Viterbi에 의해 연구 되었으며, 음영효과(shadowing effect) 및 이동국과 기지국 사이의 거리에 따른 핸드오프시 오수신 확률을 유도하였다⁴⁾.

본 논문은 Jack Salz의 도래각 모델을 이용하여 이동국 주위의 산란체에 의해 발생하는 신호가 $\lambda/2$ 간격(안테나 엘리먼트간 거리)을 갖는 적응형 배열 안테나에 입사할 때, 신호들의 상관관계에 따른 수신 SNR을 유도하고, 유도된 SNR을 이용하여 이동국의 핸드오프시 오수신 확률을 유도하였다. 유도한 오수신 확률을 토대로 적응형 배열 안테나의 엘리먼트수의 증가와 입사되는 신호의 도래각 확산(angle spread)에 따른 전파음영 환경 하에서 시스템의 통화 품질을 유지하기 위해 요구되는 부가 송신전력의 감소량을 계산하였으며, 셀 부하율(cell loading factor)을 고려하여 기지국이 서비스 할 수 있는 셀 영역을 분석하였다.

본 논문의 구성은 II장에서는 벡터 채널과 이동국 주위의 산란체 모델을 정의하고, 적응형 배열 안테나와 셀 환경을 모델링 한다. III 장에서는 수신되는 신호의 SNR값을 유도하고, IV장에서는 안테나 엘리먼트수 변화와 다중경로 신호의 빔폭에 따른 핸드오프시 시스템의 오수신 확률 구하고, V장에서는 수치해석 결과를 논하고, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 해석하고자 하는 역방향 링크의 시스템 모델을 그림 1에 나타내었다. 이 그림에서 안테나 엘리먼트가 M 개인 적응형 선형 배열 안테나를 고려하였다. 원하는 사용자를 0번째 사용자로 가정했을 때, 0번째 사용자의 모든 송신 신호는 평균 각 ϕ_0 의 $2\beta_0$ 이내에서 적응형 배열 안테나의 엘리먼트들에 도착한다고 가정하였다³⁾. 안테나 엘리먼트간 거리는 D 이고, 한 셀에 있는 사용자의 수는 K 명으로 가정하였다.

그림 1에서 0번째 사용자의 r 번째 다중경로 신호가 기지국에 입사하는 도래각의 확률 밀도 함수 $f(\phi_r)$ 는 다음과 같다³⁾.

$$p(\phi_i) = \begin{cases} \frac{1}{2\beta} & -\beta + \phi_0 \leq \phi_i \leq \beta + \phi_0 \\ 0 & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (1)$$

위의 식에서 β 는 산란 체에 의한 도래각 확산이며, ϕ_0 는 0번째 사용자의 평균 도래각이다.

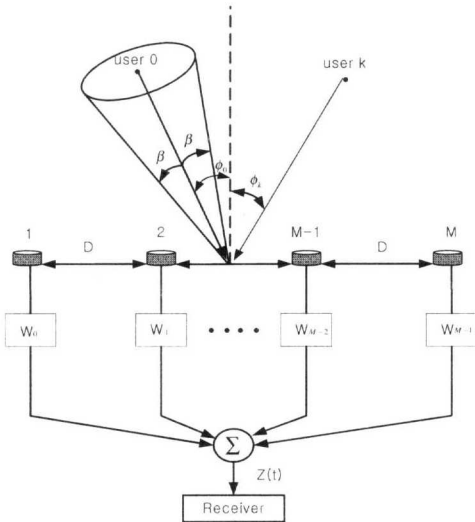


그림 1. 적응형 선형 배열 안테나

이동국 주위의 산란체에 의한 다중경로 신호를 포함한 벡터 채널 임펄스 응답 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h_k(t, \tau) &= \sum_{i=0}^{L-1} \mathbf{a}_k(\phi_{k,i}) \alpha_{k,i}(t) \delta(t - \tau_{k,i}) \\ &= \sum_{i=0}^{L-1} \mathbf{a}_k(\phi_{k,i}) \rho_{k,i} e^{j(2\pi f_{k,i} + \phi_{k,i})} \delta(t - \tau_{k,i}) \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식에서 L 은 다중경로의 수, $\tau_{k,i}$ 는 다중경로로 신호의 시간 지연을 의미한다. 그리고 $\alpha_{k,i}(t)$ 는 무선 채널 환경의 전파세기인 $\rho_{k,i}$ 와 위상 변위인 $\phi_{k,i}$ 그리고 환경에 따른 산란체 또는 다른 움직임은 이동체에 의해 생기는 도플러 주파수 $f_{k,i}$ 로써 복소 채널 파라미터를 나타냈다. 또한, 기지국에서 배열 안테나를 사용하므로 배열 조절 벡터(array steering vector)의 채널 벡터가 존재하고 이를 $\mathbf{a}_k(\phi_{k,i})$ 로 표현하였다. 이 때 배열 조절 벡터 $\mathbf{a}_k(\phi_{k,i})$ 는 1번째 엘리먼트를 기준으로 하고 안테나 엘리먼트 개수를 고려했을 때 다음과 같이 나타낼 수 있다^[1].

$$\mathbf{a}_k(\phi_{k,i}) = [1 e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} D \cos(\phi_{k,i})} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} 2D \cos(\phi_{k,i})} \dots e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} (M-1) D \cos(\phi_{k,i})}]^T \quad (3)$$

협대역 전송의 경우를 가정하면 다중경로 신호의 시간지연은 송신 신호의 심볼 주기보다 작기 때문에 $\tau_{k,i} \approx \tau_0$ 으로 근사화 시킬 수 있다^[1]. 그러므로 그림 1에서 안테나 엘리먼트에 입사되는 신호를 $\mathbf{u}_k(t)$ 로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_k(t) &= [u_{k,0}(t) \dots u_{k,M-1}(t)]^T \\ &= s_k(t) * \mathbf{h}_k(\tau, t) + \mathbf{n}(t) \\ &= \int_{-\infty}^t s_k(\lambda) \mathbf{h}_k(t-\lambda, t) d\lambda + \mathbf{n}(t) \\ &= \sum_{i=0}^{L-1} \mathbf{a}_k(\phi_{k,i}) \alpha_{k,i}(t) s_k(t - \tau_{k,i}) + \mathbf{n}(t) \\ &= s_k(t - \tau_0) \sum_{i=0}^{L-1} \mathbf{a}_k(\phi_{k,i}) \alpha_{k,i}(t) + \mathbf{n}(t) \\ &= s_k(t - \tau_0) \mathbf{b}_k(t) + \mathbf{n}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식에서 $s_k(t)$ 는 $\{+1, -1\}$ 을 갖는 이진 데이터 시퀀스를 나타내고, $\mathbf{b}_k(t) = \sum_{i=0}^{L-1} \mathbf{a}_k(\phi_{k,i}) \alpha_{k,i}(t)$ 는 사용자의 입사 신호에 대한 위치정보(spatial signature)를 나타내며, $*$ 는 길쌈부호(convolution)을 나타낸다. $\mathbf{n}(t)$ 는 잡음전력 σ_n^2 을 갖는 영평균 가우시안 잡음 벡터이다. 엘리먼트에 입사하는 다중경로 L 이 많다고 가정하면 주위진 빔폭에서 입사되는 신호는 영평균 가우시안 분포로써 근사화 할 수 있다^[4]. 이때, 0번째 사용자의 위치정보 벡터를 $\mathbf{b}_0(t)$ 로 표현하면 다음과 같다^[1,4].

$$\mathbf{b}_0(t) = \sum_{i=0}^{L-1} \mathbf{a}_0(\phi_{0,i}) \alpha_{0,i}(t) \quad (5)$$

$$\mathbf{b}_0(t) \approx G(0, \vec{r}_b) \quad (6)$$

$G(0, \vec{r}_b)$ 는 영평균 가우시안 분포를 의미하고 \vec{r}_b 는 채널 벡터 공분산(channel vector covariance)으로 각 주파수(angular frequency), 평균 도래각(ϕ_0), 도래각 확산(β), 안테나 엘리먼트 간거리(D)의 함수이며, 채널 벡터 공분산은 다음과 같다.

$$\vec{r}_b = E[\mathbf{b}_0^H(t) \mathbf{b}_0(t)] \quad (7)$$

만일, 산란체 안에 있는 이동국이 정지하고 있고 다중경로의 신호들이 같은 주파수로써 기지국에 수신된다면 채널 벡터 공분산은 \vec{r}_b 는 \vec{r}_a 로 쓸 수 있으며, 식(3), 식(5)를 이용하여 안테나 엘리먼트 간 거리의 함수로써 산란체에 의해 입사되는 다중경로 신호의 상관을 다음과 같이 표현할 수 있다^[5].

$$\begin{aligned} \vec{r}_a(m, n) &= E[\mathbf{b}_0^H(t) \mathbf{b}_0(t)] = (\alpha_{k,i})^2 \times \frac{1}{2\beta} \int_{-\beta+\phi_0}^{\beta+\phi_0} \mathbf{a}_{-m}^H(v) \mathbf{a}_{-n}(v) dv \\ &= \frac{1}{2\beta} \int_{-\beta+\phi_0}^{\beta+\phi_0} e^{-jZ_{mn} \sin(x)} dx = \frac{1}{2\beta} \int_{-\beta+\phi_0}^{\beta+\phi_0} (\cos(Z_{mn} \sin(x)) - j \sin(Z_{mn} \sin(x))) dx \end{aligned} \quad (8)$$

위의 식에서 $(\alpha_{k,i})^2 = 1$ 로써 가정하였으며, \mathbf{a}_{-m} , \mathbf{a}_{-n} 은 안테나의 m 번째, n 번째 엘리먼트에서의 배열 조절 벡터이며 \vec{r}_a 는 산란체에 의해 들어오는 다중경로 신호의 상관이다. 또한 H 는 Hermitian Transpose이며, $Z_{mn} = 2\pi(D/\lambda)$, 그리고 λ 는 전파상수이다. 식(8)을 잘 알려진 급수 표현식(9), 식(10)을 이용하여 식(6)을 적응형 배열 안테나 엘리먼트간 거리 및 도래각 확산을 고려한 신호의 상관을 표현하면 다음과 같다.

$$\cos(Z_{mn} \sin x) = J_0(Z_{mn}) + 2 \sum_{l=1}^{\infty} J_{2l}(Z_{mn}) \cos(2lx) \quad (9)$$

$$\sin(Z_{mn} \sin x) = 2 \sum_{l=0}^{\infty} J_{2l+1}(Z_{mn}) \sin((2l+1)x) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Re}[\vec{r}_a(m, n)] &= \\ J_0(Z_{mn}) + 2 \sum_{l=1}^{\infty} J_{2l}(Z_{mn}) \cos(2l(\phi_0)) \sin c(2i\beta) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Im}[\vec{r}_a(m, n)] &= \\ 2 \sum_{l=0}^{\infty} J_{2l}(Z_{mn}) \cos((2l+1)\phi_0) \sin c((2l+1)\beta) \end{aligned} \quad (12)$$

위의 식에서 $\text{Re}[\cdot]$, $\text{Im}[\cdot]$ 은 각각 신호의 실수 및 허수부를 나타내며, $J_0[\cdot]$ 는 영차 일종 베셀함수를 나타낸다. 이때, 식(8)의 포락선 상관을 구하면 다음과 같다.

$$\vec{r} = \sqrt{\text{Re}[\vec{r}_a]^2 + \text{Im}[\vec{r}_a]^2} \quad (13)$$

III. 수신 SINR

적응형 배열 안테나의 가중치를 구하는 방법은 MMSE(Minimum Mean Square Error)방법을 이용하였고, 기지국에 입사되는 평균 도래각(ϕ_0)을 알고 있다고 가정하면, 0번째 사용자의 가중치 벡터 \mathbf{w}_0 는 다음과 같이 간단히 표현할 수 있다¹¹⁾.

$$\mathbf{w}_0 = \mathbf{a}_0(\phi_0) \quad (14)$$

한 셀 내에 존재하는 K 명의 사용자로부터 신호들이 M 개의 각 안테나 엘리먼트를 통해 수신된 후 합성기를 지난 신호 $Z_k(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_k(t) = \sum_{k=0}^{K-1} \mathbf{w}_k^H \mathbf{u}_k(t) \quad (15)$$

위의 식을 이용하여 이동국 주위의 산란체 분포를 고려했을 때 0번째 사용자의 적응형 선형 배열 안테나의 빔형성 출력값 $Z_0(t)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$Z_0(t) = \mathbf{w}_0^H \mathbf{u}_0(t) \quad (16)$$

식(7), 식(13)을 이용하여 식(16)의 평균 수신 전력을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_0 &= E[|Z_0(t)|^2] = \mathbf{w}_0^H \mathbf{w}_0 E[s(t-\tau_0)^2] E[\mathbf{b}_0^H(t) \mathbf{b}_0(t)] \\ &= \mathbf{a}_0^H \mathbf{a}_0 E[s(t-\tau_0)^2] E[\mathbf{a}_0^H \mathbf{a}_0] \alpha_0(t)^2 \\ &= M \vec{r} \end{aligned} \quad (17)$$

M : 적응형 배열 안테나의 엘리먼트 수

\vec{r} : 도래각 확산에 의해 입사되는 신호의 포락선 상관

$\alpha_0(t)$: 0번째 사용자의 복소채널 파라미터

위의 식에서 알 수 있듯이 원하는 사용자의 수신전력은 안테나 엘리먼트수 M 과, 도래각 확산에 의한 신호의 포락선 상관 \vec{r} 에 선형적 관계를 가진다. 위의 식에서 $E[s(t-\tau_0)^2]$ 는 1이며, 다중 간섭신호의 전체 평균 전력 I_0 는 다음과 같다¹¹⁾.

$$I_0 = \nu \sum_{k=1}^{K-1} E[|\mathbf{w}_k^H \mathbf{b}_k|^2] \quad (18)$$

여기서, ν 는 음성 활성화(voice activity)계수이며, 식(17), 식(18)을 이용하여 원하는 사용자($k=0$)에 대한 SINR은 다음과 같다¹¹⁾.

$$\text{SINR} = \frac{P_0}{\frac{1}{N}(I_0 + I_a) + \sigma_n^2} \quad (19)$$

위의 식에서 N 는 처리 이득이며, I_0 는 0번째 사용자의 셀 내 평균 간섭전력, I_a 는 타 셀의 평균 간섭전력을 각각 나타낸다. 만약, 안테나 엘리먼트에서 발생하는 다중 간섭신호의 도래각 ϕ_k 가 서로 독립이고 0과 π 내에 균일하게 분포한다고 가정하면, I_0 는 다음과 같다^[1].

$$I_0 = \nu \sum_{k=1}^{K-1} E[|w_0^H b_k|^2] = \nu \sum_{k=1}^{K-1} \bar{I}_k \quad (20)$$

여기서, $\bar{I}_k = \frac{|\alpha_k(t)|^2}{M} E[|a^H(\phi_0)a(\phi_k)|^2]$ 이다.

위의 식에서 \bar{I}_k 에 포함된 두 배열 조절 벡터 내적의 제곱 평균은 베셀 함수의 식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} & E[|a^H(\phi_0)a(\phi_k)|^2] \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} E[e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(m-n)D\cos(\phi_0)}] E[e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(m-n)D\cos(\phi_k)}] \end{aligned} \quad (21)$$

위의 식에서 평균값 $E[\cdot]$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & E[e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(m-n)D\cos(\phi_0)}] \\ &= \int_0^\pi \frac{1}{\pi} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(m-n)D\cos(\phi_0)} d\phi = J_0(\pi(m-n)) \end{aligned} \quad (22)$$

위의 식을 이용하여 \bar{I}_k 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\bar{I}_k = \frac{|\alpha_k(t)|^2}{M} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{M-1} J_0^2(\pi(m-n)) = |\alpha_k(t)|^2 G_s(M) \quad (23)$$

위 식으로 부터 식 (19)을 이용하여 원하는 사용자 셀에서의 SINR을 구하면 다음과 같다.

$$SINR = \frac{M\vec{r}}{\frac{1}{N} \left(\sum_{k=1}^{K-1} |\alpha_k|^2 \nu G_s(M) + I_a \right) + \sigma_n^2} \quad (24)$$

위의 식에서 $G_s(M)$ 은 간섭 이득을 나타내며, 원하는 사용자 셀의 전력을 완전한 전력 제어가 된 P_0 의 전력, 그리고 각각 셀들의 활동 사용자의 수가 K 명으로 동일하다면, 타 셀의 간섭 사용자의 간섭을 고려한 M 개의 안테나 엘리먼트 수를 갖는 적응형 배열 안테나의 도래각 확산에 따른 수신 SINR은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SINR &= \frac{M\vec{r}P_0}{\nu G_s \frac{(M)(K-1)P_0 + \nu G_s(M)I_a}{N} + \sigma_n^2} \quad (25) \\ &= \frac{M\vec{r}P_0}{\frac{\nu G_s(M)(K-1)P_0 + \nu G_s(M)KP_a}{N} + \sigma_n^2} \end{aligned}$$

위 식에서 P_a 는 타 셀에서 수신된 간섭전력을 나타낸다. 만약 각각의 간섭 셀들이 원하는 셀과 같은 특성을 가지고 있다면, 타 셀의 간섭전력은 원하는 사용자 셀의 수신된 전력의 비로써 나타낼 수 있고 다음과 같다^[5].

$$P_a = \epsilon P_0 \quad (26)$$

위 식에서 ϵ 는 타 셀에서 수신된 전력과 원하는 셀에서 수신된 전력의 비이며, CDMA 재사용 효율 (CDMA reuse factor)의 관계로 표현할 수 있고 다음과 같다^[5].

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{\text{desired cell } \cap \text{ference}}{\text{total } \cap \text{ference}} \\ &= \frac{1}{1+\epsilon} \quad (27) \\ &= \frac{\nu(K-1)P_0}{\nu P_0[(K-1) + \epsilon K]} \\ &= \frac{\nu(K-1)P_0}{I_T} < 1 \end{aligned}$$

위의 식에서 F_e 는 CDMA 재사용 효율이며, I_T 는 원하는 셀과 타 셀에서의 전체 간섭 전력을 의미한다. 식(25)의 SINR을 CDMA 재사용 효율을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$SINR = \frac{M\vec{r}P_0}{\frac{\nu G_s(M)(K-1)P_0}{NF_e} + \sigma_n^2} \quad (28)$$

위의 식에서 셀 부하율, 셀 내에서 활동하는 이동국들의 송신 신호와 이동국 주위의 산란체에 의한 신호의 도래각 확산 현상, 음영효과 그리고 송,수신기 거리에 따른 신호의 감쇄를 고려하면 다음과 같은 SINR을 구할 수 있다.

$$I_T = \frac{\nu(K-1)P_m}{F_e \alpha(r, \zeta)} \quad (29)$$

$$X = \frac{I_T}{N\sigma_n^2 + I_T} \quad (30)$$

$$SINR = \frac{\vec{r}MG_{ad}}{\alpha(r, \zeta)} \frac{P_m(1-X)}{\sigma_n^2} \quad (31)$$

식(29)는 셀 내에서 활동하는 이동국들이 동일한 전력 P_m 을 송신한다고 가정하였을 때 $\alpha(r, \zeta)$ 를 고려한 원하는 셀과 타 셀에서의 전체 간섭 전력을 나타내며, $\alpha(r, \zeta)$ 는 이동국과 기지국 사이의 거리 r 과 음영효과 ζ 에 따른 신호의 감쇄를 나타낸다. 식(30)의 X 는 셀 부하율을 나타내며, G_{ad} 는 $1/[XG_i(M) + (1-X)]$ 이고, 수신 $SINR$ 의 중간값 $SINR_{med}$ 는 $P_m(1-X)/\sigma_n^2$ 이다⁵⁾.

IV. 핸드오프시 오수신 확률

그림 2는 셀 반경이 $r=1$ 인 두 개의 셀을 가정하였다. 기지국에 적응형 배열 안테나를 사용한 DS-CDMA 셀룰러 시스템에서 수신 신호의 $SINR$ 값을 기준으로 핸드오프 수행 시 사용자가 셀 경계 지역에 위치할 때 수신 신호의 $SINR$ 값이 시스템의 통화 품질을 유지하기 위해 설정된 임계치 $SINR_{req}$ 이하로 떨어지면 핸드오프가 발생한다. 안테나 엘리먼트 수가 M 개인 적응형 배열 안테나의 수신 $SINR$ 값이 설정된 값 이하로 떨어질 오수신 확률을 $P_{M,H,out}$ 으로 나타내었다.

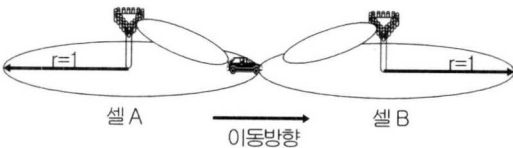


그림 2. 셀 반경($r=1$)인 셀룰러 시스템에서의 핸드오프

A. 하드 핸드오프시 오수신 확률

하드 핸드오프는 사용자 이동국이 다른 송신 주파수를 갖는 셀 사이를 이동할 때와 다른 서비스 업체 사이를 이동할 때 발생하는 핸드오프로 구분된다. 이러한 하드 핸드오프는 셀 B의 기지국이 통화로가 연결되기 전에 셀 A의 기지국에서 통화로를 차단하기 때문에 순간적인 통화로의 끊김 현상이 발생한다⁶⁾. 핸드오프는 셀 경계 지역에 위치한 이동국으로부터 셀 A의 기지국이 수신한 신호의 $SINR$ 값이 임계치 $SINR_{req}$ 보다 작을 경우 발생하며, 기지국이 오수신 할 확률은 다음과 같이 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$P_{M,H,out} = P_r(SINR < SINR_{req}) \quad (32)$$

시스템 설계에 있어서 사용자 이동국의 송신전력은 무선채널의 랜덤한 경로손실을 극복하고자 여유

전력 즉 추가적인 송신전력(γ)이 포함되어 있어 랜덤한 전파손실을 가정하지 않았을 때 보다 추가 송신전력 γ 만큼 크게 된다. 식(31)을 이용하여 수신한 신호의 $SINR$ 을 dB단위로 표현하면 다음과 같다.

$$SINR_{(dB)} = M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \overrightarrow{r}_{(dB)} - 10\mu \log(r) - \zeta_{(dB)} + SINR_{med(dB)} \quad (33)$$

위의 식에서 ζ 는 평균이 0, 표준편차가 σ 를 갖는 가우시안 랜덤 변수이며, r 은 기지국과 사용자의 이동국 사이 거리이고, μ 는 전파환경에 따른 감쇄율로써 무선 채널 주위 환경에 따라 2~6사이의 값을 가지며, μ 는 4로 가정하였다⁶⁾. 핸드오프는 셀 경계지역($r=1$)에서 발생하게 되므로 셀 경계 지역에 위치한 사용자의 이동국으로부터 수신한 신호를 오수신할 경우는 무선 채널의 랜덤한 변화 ζ 가 이동국의 추가 송신전력 γ 보다 클 경우이다. 따라서 식(33)의 $SINR$ 에 대한 이동국의 하드 핸드오프시 오수신 확률 $P_{M,H,out}$ 은 식 (32)을 적용하면 다음과 같다.

$$P_{M,H,out} = \Pr(M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \overrightarrow{r}_{(dB)} - (10\mu \log r + \zeta_{(dB)}) < SINR_{req(dB)} - SINR_{med(dB)}) \\ = \Pr(\zeta_{(dB)} > M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \overrightarrow{r}_{(dB)} + \gamma_{(dB)}) \quad (34)$$

식(34)에서 에러함수를 이용하여 오수신 확률을 구하면, 다음과 같다.

$$P_{H,out} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{\frac{r_{(dB)} + M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \gamma_{(dB)}}{\sigma_{(dB)}}}^{\infty} \exp(-\zeta^2/2\sigma^2) d\zeta \\ = Q\left(\frac{r_{(dB)} + M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \gamma_{(dB)}}{\sigma_{(dB)}}\right) \quad (35)$$

위의 식에서 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp(-y^2/2) dy$ 이다.

B. 소프트 핸드오프시 오수신 확률

그림 2과 같이 두 개의 셀을 고려했을 때, 소프트 핸드오프의 경우는 현재 셀의 통화로가 끊어지기 전에 새로운 셀과 통화로를 연결하기 때문에 두 셀의 기지국에서 수신한 신호의 $SINR_A$ 와 $SINR_B$ 값을 비교하여 $SINR_{req}$ 보다 작은 값에 대해 핸드오프를 수행하게 된다. 따라서 하드 핸드오프에서 발생하는 순간적인 통화의 끊김 현상을 방지할 수 있을 뿐 아니라 셀 용량 및 셀 서비스 영역을 증가시킬 수 있다. 이러한 소프트 핸드오프의 오수

신 확률은 다음과 같다⁶⁻⁷⁾.

$$P_{M,S,out} = \Pr \text{Min}[SINR_A, SINR_B] < SINR_{req} \quad (36)$$

위의 식에서 $SINR_A, SINR_B$ 은 각각 셀 A 와 셀 B 의 기지국에서 수신한 $SINR$ 값이다⁶⁾.

소프트 핸드오프의 경우도 하드 핸드오프와 마찬가지로 무선 채널의 전파 음영 현상을 극복하기 위해 사용자 이동국에 부가 송신전력 γ 가 요구된다. 두 셀 경계지역($r_A, r_B=1$)에서 소프트 핸드오프시 오수신 확률은 하드 핸드오프시의 방법을 사용하여 구할 수 있고 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{M,S,out} &= \Pr \{ \text{Min}[SINR_{A(dB)} - (10\mu \log(r_A) + \zeta_{A(dB)}) \\ & \quad SINR_{B(dB)} - (10\mu \log(r_B) + \zeta_{B(dB)})] < SINR_{req(dB)} \} \\ &= \Pr \{ \text{Min}[\zeta_{A(dB)}, \zeta_{B(dB)}] > \\ & \quad (SINR_{A(dB)}, SINR_{B(dB)}) - SINR_{req(dB)} \} \\ &= \Pr \text{Min}[\zeta_{A(dB)}, \zeta_{B(dB)}] > M_{(dB)} \\ & \quad + G_{ad(dB)} + \overrightarrow{r_{(dB)}} + \gamma_{(dB)} \} \end{aligned} \quad (37)$$

여기서, ζ_A, ζ_B 는 각각 셀 A과 셀 B의 기지국에서 수신한 신호의 음영효과에 의한 채널 현상을 말하며, ζ_A, ζ_B 는 각 기지국 주위의 채널 현상을 나타내는 ξ_A, ξ_B 과 이동국 주위의 채널 현상을 나타내는 ξ 로 나타낼 수 있다⁶⁾. 따라서 기지국 주위의 채널 현상과 이동국 주위의 채널 현상을 고려하여 이동국의 소프트 핸드오프시 오수신 확률을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{M,S,out} &= \Pr \text{Min}[b\xi_{A(dB)}, b\xi_{B(dB)}] > \\ & \quad M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \overrightarrow{r_{(dB)}} + \gamma_{(dB)} - a\xi_{(dB)} \end{aligned} \quad (38)$$

위의 식에서 i 번째 기지국에서 수신한 신호의 음영 효과에 의한 채널 현상은 $\zeta_i = a\xi + b\xi_i$ 이며, $a = b = \frac{1}{\sqrt{2}}$, ξ, ξ_A, ξ_B 는 서로 독립으로 가정한다⁶⁾. 이때 오수신 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{M,S,out} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(\xi^2/2\sigma^2)} d\xi \\ & \quad \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{\frac{M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \overrightarrow{r_{(dB)}} + \gamma_{(dB)} - a\xi_{(dB)}}{b}}^{\infty} e^{-(\xi_i^2/2\sigma^2)} d\xi_A \\ & \quad \times \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_{\frac{M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \overrightarrow{r_{(dB)}} + \gamma_{(dB)} - a\xi_{(dB)}}{b}}^{\infty} e^{-(\xi_i^2/2\sigma^2)} d\xi_B \end{aligned} \quad (39)$$

위의 식을 $\frac{\xi}{\sigma}, \frac{\xi_A}{\sigma}, \frac{\xi_B}{\sigma} = x$ 로 치환하고, Q에러 함수를 사용한 오수신 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{M,S,out} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(x^2/2)} dx \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \overrightarrow{r_{(dB)}} + \gamma_{(dB)} - a\xi_{(dB)}}{b\sigma}}^{\infty} e^{-(x^2/2)} dx \\ & \quad \times \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \overrightarrow{r_{(dB)}} + \gamma_{(dB)} - a\xi_{(dB)}}{b\sigma}}^{\infty} e^{-(x^2/2)} dx \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{-(x^2/2)} [Q(\frac{M_{(dB)} + G_{ad(dB)} + \overrightarrow{r_{(dB)}} + \gamma_{(dB)} - a\xi_{(dB)}}{b\sigma})]^2 dx \end{aligned} \quad (40)$$

V. 수치해석 결과

전파 음영 환경 하에서 다중 접속 간섭을 효과적으로 제거하기 위해 기지국에 적응형 배열 안테나를 사용한 DS-CDMA 셀룰러 시스템에서 이동국 산란체에 의해 수신된 신호들의 상관관계를 이용하여 핸드오프시 시스템의 성능 분석을 하였다. 먼저 기지국이 사용자로부터 수신한 신호의 $SINR$ 값을 안테나 엘리먼트 수, 간섭 이득, 그리고 셀 부하율과 이동국 산란체에 의해 발생하는 도래각 확산에 의한 수신 신호의 상관관계를 이용하여 추출하였다. 추출한 $SINR$ 을 이용하여 핸드오프시 시스템의 오수신 확률을 유도 하였고, 이를 토대로 일정한 통화 품질을 유지하기 위해 요구되는 사용자 이동국의 부가 송신 전력을 계산 하였다. 핸드오프시 오수신 확률을 구하기 위해 셀 부하율 X 를 0.75, 채널의 음영효과에 의한 수신 전력의 표준편차 σ 를 8dB로 가정하였고, 이동국 산란체에 의한 도래각 확산 β 는 각각 0도와 30도로 가정하였다.

그림 3,4는 이동국의 하드 핸드오프시 안테나 엘리먼트 수와 안테나에 입사되는 신호의 도래각 확산에 의한 기지국 오수신 확률과 시스템의 통화 품질을 유지하기 위해 요구되는 사용자 이동국의 부가 송신 전력과의 관계를 나타내었다. 이때 안테나 엘리먼트 수가 증가함에 따라 요구되는 부가 송신 전력은 감소하며, 도래각 확산이 클수록 기지국의 오수신 확률은 증가함을 알 수 있다. 표 1은 안테나 엘리먼트 수와 도래각 확산에 따른 오수신 확률이 0.1인 시스템 설계를 가정할 때, 요구되는 부가 송신 전력을 나타내었다. 표 1에서 보는것과 같이 도래각 확산이 0도일때 안테나 엘리먼트가 1개일 경우 10.25 dB의 부가 송신 전력이 필요하지만 12개일 경우 0.6 dB의 부가 송신 전력이 필요함을 알 수 있으며, 도래각 확산이 30도 일때는 전파 음영 현상

을 극복하기 위해 이동국에 요구 되는 부가 송신 전력이 커짐을 알 수 있다.

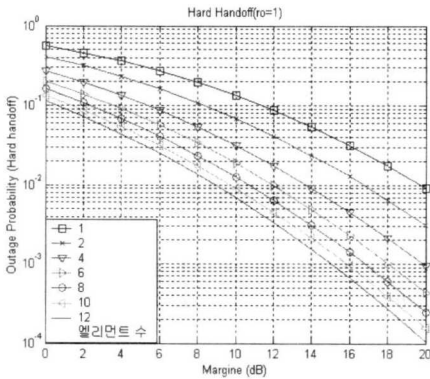


그림 3. 하드 핸드오프시 엘리먼트 수와 도래각 확산에 의해 요구되는 부가 송신 전력과 오수신 확률 ($\beta=0^\circ$)

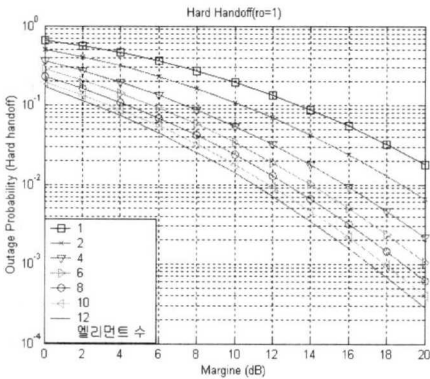


그림 4. 하드 핸드오프시 엘리먼트 수와 도래각 확산에 의해 요구되는 부가 송신 전력과 오수신 확률 ($\beta=30^\circ$)

표 1. 하드 핸드오프시 도래각 확산에 따른 부가 송신 전력 ($X=0.75, P_{M.H.out}=0.1$)

부가송신전력 엘리먼트 수	도래각 확산($\beta=0^\circ$)	도래각 확산($\beta=30^\circ$)
1	10.25 dB	12.3 dB
2	7.53 dB	9.85 dB
4	4.85 dB	6.9 dB
6	3.28 dB	5.33 dB
8	2.17 dB	4.22 dB
10	1.31 dB	3.36 dB
12	0.6 dB	2.65 dB

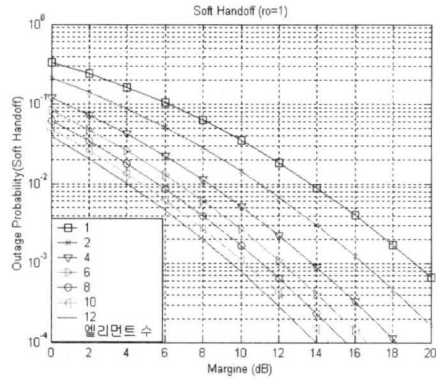


그림 5. 소프트 핸드오프시 엘리먼트 수와 도래각 확산에 의해 요구되는 부가 송신 전력과 오수신 확률 ($\beta=0^\circ$)

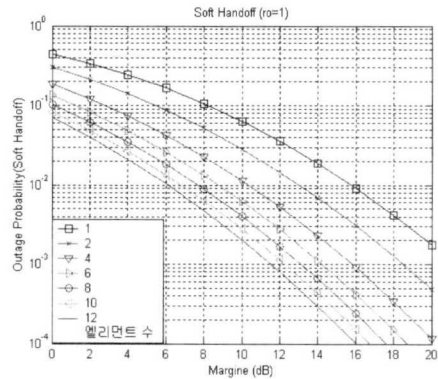


그림 6. 소프트 핸드오프시 엘리먼트 수와 도래각 확산에 의해 요구되는 부가 송신 전력과 오수신 확률 ($\beta=30^\circ$)

그림 5,6에서는 소프트 핸드오프시 안테나 엘리먼트 수와 도래각 확산에 의해 요구되는 부가 송신 전력과 관계의 관계를 나타내었다. 표 2에서는 오수신 확률이 0.1인 시스템을 설계시 도래각 확산과 안테나 엘리먼트 수에 따른 이동국에 요구되는 부가 송신 전력을 나타내었다. 표 2에서 도래각 확산이 0도이고 안테나 엘리먼트 수가 6개일 때 소프트 핸드오프를 수행하면 요구되는 부가 송신 전력은 필요 없음을 알 수 있다. 또한 도래각 확산이 커질 수록 이동국에 요구되는 부가 송신 전력은 커짐을 알 수 있다.

위의 표 1,2를 이용하여 부가 송신 전력의 값으로서 핸드오프시 적응형 배열 안테나를 사용했을 때, 셀의 상대적 확장을 그림 7에 도시하였다. 그림 7에서 안테나 엘리먼트 수의 증가에 따라 셀 영역 확장은 안테나 엘리먼트가 1개일때 보다 6개일때 약 2배의 셀 확장을 가지며, 도래각 확산이 커짐에

표 2. 소프트 핸드오프시 도래각 확산에 따른 부가 송신 전력 ($X=0.75, P_{M.S.out}=0.1$)

부가송신전력 엘리먼트 수	도래각 확산($\beta=0^\circ$)	도래각 확산($\beta=30^\circ$)
1	6.17 dB	8.22 dB
2	3.45 dB	5.51 dB
4	0.77 dB	2.82 dB
6	0 dB	1.26 dB
8	0 dB	0.15 dB
10	0 dB	0 dB
12	0 dB	0 dB

따라 셀 영역의 확장은 감소함을 알 수 있다. 또한 소프트 핸드오프를 수행 할 경우 하드 핸드오프시 보다 큰 셀 영역을 확보 할 수 있다.

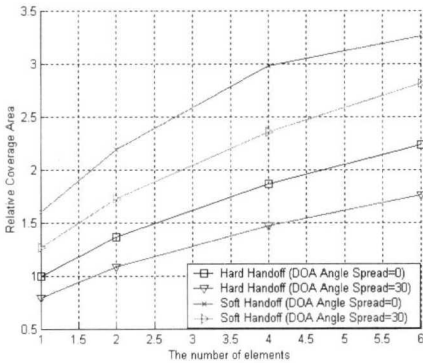


그림 7. 안테나 엘리먼트 수와 도래각 확산에 따른 핸드오프 수행시 상대적 셀 영역 확장.

VI. 결론

본 논문은 Jack Salz의 도래각 모델을 이용하여 이동국 주위의 산란체에 의해 발생하는 신호가 $\lambda/2$ 간격(안테나 엘리먼트간 거리)을 갖는 적응형 배열 안테나에 입사할 때, 신호들의 상관관계에 따른 수신 SINR을 유도하였고, 유도된 SINR을 이용하여 이동국의 핸드오프시 오수신 확률을 구하였다. 오수신 확률을 토대로 적응형 배열 안테나 엘리먼트 수에 따라 시스템의 통화 품질을 위해 요구되는 부가 송신전력의 증감을 알아 보았으며, 안테나 엘리먼트수와 입사하는 다중경로 신호의 빔폭에 따라 셀 영역 증가량을 추출하였다.

분석결과 적응형 배열 안테나에 입사하는 다중경

로 신호의 빔폭이 증가함에 따라 기지국에서 수신하는 SINR은 작아지고 이동국의 핸드오프시 오수신 확률이 증가함을 알 수 있었다. 안테나 엘리먼트의 수의 증가에 따라 셀 영역 확장은 안테나 엘리먼트가 1개일때 보다 6개일때에 약 2배의 셀 확장을 가지며, 도래각 확산이 커짐에 따라 셀 영역의 확장은 감소함을 알 수 있었다.

참고 문헌

- [1] J. C. Liberti and T. S. Rappaport, *Smart antennas for wireless communication*, Prentice hall PTR, 1999.
- [2] S. A. Hanna, M. El-Tanany, and S. A. Mahmoud, "An adaptive combiner for co-channel interference reduction in multi-user indoor radio systems," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, St. Louis, Mo, May 19-22, 1991, pp. 222-227.
- [3] J. Salz and J. H. Winters, "Effect of Fading Correlation on Adaptive Arrays in Digital Mobile Radio," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 4, pp. 1049-1057, November 1994.
- [4] A. F. Naguib, "Adaptive Antennas For CDMA Wireless Networks," *Ph.D. Dissertation*, Stanford University, Stanford, August. 1996.
- [5] L. E. Miller and J. S. Lee, *CDMA systems engineering handbook*, Artech House Publisher, 1998.
- [6] A. J. Viterbi, *Principle of spread spectrum communication*, Addison Wesley, New York, 1995.
- [7] A. J. Viterbi, A. M. Viterbi, K. S. Gilhousen, and E. Z. Zehavi, "Soft handoff extends CDMA cell coverage and increase reverse link capacity," *IEEE J. Select. Area Commun.*, vol. 12, no. 8, pp. 1281-1287, October. 1994.
- [8] R. Janaswamy, *Radio Propagation and Smart antennas for Wireless Communications*, Kluwer Academic, 2001.
- [9] A. F. Naguib, A. Paulraj, and T. Kailath, "Capacity improvement with base station antenna array in cellular CDMA," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, no. 3, pp. 691-698, August. 1994.

