

각도추정 오차가 있는 경우 적응배열 안테나를 사용한 셀룰러 CDMA 시스템의 용량분석

정희원 정 영 모*

Capacity Analysis on Cellular CDMA Systems with Adaptive Array Antenna in the Presence of Angle Estimation Error

Young Mo Chung* *Regular Members*

요 약

적용배열 안테나는 CDMA 이동 통신 시스템의 용량을 증가시킬 수 있는 가장 유망한 기법 중의 하나이다. 본 논문에서는 각도 추정오차가 있는 경우 적용 배열 안테나를 사용한 비동기식 W-CDMA 시스템의 용량을 상향링크 및 하향링크에서 분석하였다. 결과로부터, 용량은 각도 추정 오차에 의하여 감소함을 알 수 있었다. 구체적으로, 9소자 적용배열 안테나에서 5도의 오차가 있는 경우 용량은 상향링크에서 5.2% 하향링크에서 11.6% 감소됨을 관찰할 수 있었다. 또한, 본 논문에서는 환경이 다른 채널에서 용량의 비교도 수행하였다. 그러나 전력 제어로 인하여 라이스 지수의 증가가 거의 용량에 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Adaptive array antennas are one of the most promising techniques for improving the capacity of CDMA mobile communication systems. In this paper, the uplink and downlink capacity for asynchronous W-CDMA system with adaptive array antenna is analyzed when an angle estimation error is present. From the results, it is found that the capacities are decreased by the angle estimation error. Specifically, when 5 degrees of error is present at 9 element adaptive array antenna, the capacities are found to decrease by 5.2% in the uplink and 11.6% in the downlink. Also, in this paper, an attempt for comparing the capacities on different channel environments has been made. However, it is found that the increase of the Rice factor hardly effects the capacity due to the power control.

I. 서 론

차세대 이동 통신 시스템은 음성신호는 물론 데이터 및 영상을 포함하는 멀티미디어 통신 실현을 목표로 하고 있다. 최근 멀티미디어 통신이 가능한 이동 통신 시스템으로 W-CDMA (wideband code-division multiple access) 가 제안되었으며^[7,8], 최대 2Mbps 의 전송을 실현이 가능하다. 그러나 W-CDMA 를 포함한 CDMA 시스템은 다중접속

간섭에 의하여 링크의 용량이 제한되며 서비스의 질이 결정되는 특성을 가진다. 특히 고속의 멀티미디어 전송환경에서는 제한된 대역폭으로 인하여 처리 이득을 크게 하기 어려우므로 다중접속 간섭에 의한 영향을 크게 받는다. 따라서 IMT-2000을 포함하는 차세대의 이동 통신 시스템은 다중접속 간섭을 감소시키며 궁극적으로는 용량을 증가시키기 위한 목적으로 적응배열 안테나와 MUD (multiuser detection) 기술을 적용한다.

* 한성대학교 정보통신학부 정보통신공학과
논문번호 : 99494-1223, 접수일자 : 1999년 12월 23일
* 본 연구는 한국과학재단의 지원으로 수행되었습니다.

적용배열 안테나는 다수의 안테나 소자와 이를 제어하는 프로세서로 이루어져 있으며 보폭 안테나 소자는 선형 혹은 원형으로 배열된다. 프로세서는 다수의 수신신호로부터 원하는 신호의 도착 방위각 (direction of arrival) 을 추적하여 원하는 사용자의 수신신호에 최대의 이득을 갖게 한다. 각도추정 알고리즘으로는 ML 이나 LMS 기법이 많이 사용된다. 그러므로 각도 추정시에는 항상 추정 오차가 존재하게 되며, 특히 신호대 간섭신호 비나 신호대 잡음비가 낮은 경우 각도 추정의 정확도는 더욱 낮아진다. 그리고 안테나 소자간의 커플링이나 제조 공정의 불균일로 인하여 역시 배열안테나의 빔을 완벽하게 원하는 수신신호에 맞추는 것은 매우 어렵다. 이와 같이 여러 원인으로 발생하는 각도 오차는 원하는 신호의 수신전력을 감소시키고 다중접속 간섭을 충분히 억압하지 못하여 결과적으로 링크 용량의 감소를 초래한다.

셀룰러 CDMA 시스템의 링크 용량의 분석은 여러 문헌에서 발표된 바 있다^[1-4]. [1]에서는 셀룰러 CDMA 시스템의 용량을 단위 셀 당의 사용자 수에 따른 outage 확률로 분석하였다. 그리고 최근에는 [2,3]에서 적응 배열 안테나가 적용된 셀룰러 방식의 CDMA 시스템의 상향링크 및 하향링크의 용량이 역시 outage 확률로 분석되었다. [3]에서 적응 배열 안테나는 기지국에 적용이 되었으며, DPSK를 사용한 경우 상향링크의 용량이 분석되었다. 그리고 상향링크와 하향링크 모두의 용량분석은 [2,4]에서 수행되었으며, [4]에서는 M-ary 직교 확산을 포함한 분석 결과가 제시되었다. 그러나 [1-4]의 분석에서는 완벽한 각도추정을 가정하였으며, 각도추정 오차로 인한 성능의 저하는 고려되지 않았다. 또한 [1-4]에서 사용한 시스템의 모델은 제 2세대의 IS-95 CDMA 시스템으로 BPSK 혹은 DPSK 변조를 사용한 실확산을 사용하는 시스템을 분석 대상으로 하였다.

본 논문에서는 적응배열 안테나의 각도추정 오차가 존재하는 경우 셀룰러 CDMA 시스템의 용량을 분석한다. 확산 및 변조방식으로 W-CDMA 시스템이 제시하는 것과 같이 하향 링크에서는 quadriphase 확산과 QPSK 변조를 사용하고 상향 링크에서는 복소 확산과 dual 채널 BPSK 변조를 사용한다. 각 링크의 용량은 outage 확률로 분석하며 단위 셀 당의 사용자에 따른 변화를 제시한다. 한편 이전의 연구에서 채널의 모델로는 로그노말 shadowing 만을 고려하거나^[1], 레일리 페이딩 및 로그노말

shadowing을 같이 고려하여 분석을 수행하였다^[2-4]. 그러나 본 논문에서는 레일리 페이딩 및 shadowing 모델 외에도 microcellular 환경에서 발생하는 Rician 페이딩을 고려한 채널 환경도 고려하여 분석을 수행한다.

II. 시스템 모델

각 셀은 육각형태로 균일한 크기를 가진다고 가정한다. 원하는 사용자가 위치한 셀을 중심으로 첫 번째 tier 는 $1 \leq i \leq 6$ 의 인덱스를 가지고, 두 번째 tier 는 $7 \leq i \leq 18$ 의 인덱스를 가진다. 이제 i 번째 셀의 j 번째 사용자가 전송한 신호를 등가 복소 저역통과 신호로 다음과 같이 표현한다.

$$s_{ij}(t) = \sqrt{P} g_{ij} \lambda_{ij} b_{ij}(t) \otimes c_{ij}(t) \quad (1)$$

여기서 $P g_{ij}^2$, $b_{ij}(t)$, $c_{ij}(t)$ 는 각각 송신 전력, 메시지 신호, 확산 신호이며, λ_{ij} 는 음성 활성 지수이다. 메시지 신호와 확산 신호는 다음과 같다.

$$b_{ij}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_{ij}^k h_b(t - kT) \quad (2)$$

$$c_{ij}(t) = \sum_{k=0}^{(M+1)G-1} C_{ij}^k h_c(t - IT_c) \quad (3)$$

여기서 T 는 심볼 주기, T_c 는 칩 주기이며 $G = T/T_c$ 는 처리 이득이다. 식(2), (3)에서 B_{ij}^k 는 $(\pm 1 \pm j)$ 의 값을 등확률로 가지는 복소 데이터 심볼이며, $C_{ij}^k = U_{ij}^k + jV_{ij}^k$ 이다. U_{ij}^k 와 V_{ij}^k 는 +1 과 -1의 값을 등확률로 가지는 랜덤 확산 부호이며, 이들은 서로 독립이라고 가정한다. 그리고 $h_b(t)$, $h_c(t)$ 는 각각 데이터 펄스 성형 및 칩 성형함수이다. 그리고 (1)식에서 연산 \otimes 는 다음과 같이 링크에 따라 다르게 정의한다. 먼저, 하향링크에서 다음과 같은 real quadriphase 확산을 정의한다^[7].

$$(a + jb) \otimes (c + jd) = ac + jba \quad (4)$$

그리고 상향링크에서는 다음과 같은 복소 확산을 정의한다^[8].

$$(a + jb) \otimes (c + jd) = (ac - bd) + j(bc + ad) \quad (5)$$

이동 통신 환경에서 송신신호는 페이딩과 shadowing 의 과정을 거치며, 수신신호의 포락선은

랜덤변수가 된다. 라이시안 페이딩환경에서 수신 신호의 포락선 z 는 LOS (line of sight) 와 산란성분의 합으로 이루어지며, s^2 을 LOS 성분의 전력, $2\sigma^2$ 을 산란 성분의 전력이라 할 때 라이스 지수 $K_r = s^2/(2\sigma^2)$ 로 정의된다.

이동 통신 환경에서 신호 $s_j(t)$ 가 i 번째 셀의 기지국에 도달한 전력은 다음과 같다.

$$P_{rv} = P_g d_{ij}^2 \cdot |a_{ij}^0|^2 / (d_{ij}^0)^\beta \quad (6)$$

여기서 d_{ij}^0 는 i 셀에 있는 j 사용자로부터 i 셀의 기지국까지의 거리이고 a_{ij}^0 는 라이시안 페이딩 및 shadowing을 고려한 경우의 감쇠이다. 그리고 β 는 경로손실을 나타내는 값으로 보통 2에서 5.5 사이의 값을 가진다 [9].

III. 상향링크의 용량

잡음이 고려되지 않은 배열 안테나의 수신 신호는 $M \times 1$ 벡터로 나타낼 수 있다.

$$r_{ij}(t) = \sqrt{P} \gamma_{ij} a_{ij} s_j(t - \tau_{ij}) e^{-j\omega_c \tau_{ij}} w_{ij} \quad (7)$$

여기서 w_{ij} 는 배열의 응답 벡터, τ_{ij} 는 임의의 지연, 그리고 γ_{ij} 는 경로손실, shadowing, 페이딩, 및 전력 제어가 고려된 감쇠치이다. 모든 셀의 사용자 수는 동일하며, 셀 내에 균일하게 분포한다고 가정한다. 그리고 원하는 사용자는 0번째 셀에 있다고 가정하며, 두번째 tier 까지만 고려하여 outage 확률을 분석한다. 0번째 셀에 있는 단말기들은 0번째 셀의 기지국에 의하여 제어를 받는다. 또한 완벽한 전력제어를 가정하면 모든 j 에 대하여 $P \gamma_{0j}^2 = F$ 이다. 0번째 기지국으로부터 제어 받지 않는 단말기로부터 수신되는 신호는 경로손실, shadowing 및 페이딩에 의하여 수신신호의 전력이 결정된다. 셀 i 에 있는 사용자 j 와 0번째 셀 기지국간의 거리를 d_{ij}^0 라 하고, 이 경로에 의한 감쇠를 a_{ij}^0 라 한다. 그러면 $|r_{ij}|^2 = |g_{ij}|^2 \cdot |a_{ij}^0|^2 / (d_{ij}^0)^\beta$ 이며, $|g_{ij}|^2 = (d_{ij}^0)^\beta / |a_{ij}^0|^2$ 이다. 각각의 단말기는 가장 큰 전력을 수신하는 기지국으로 링크가 설정된다. 주변 셀의 수를 I 개라 하고, 각 셀에는 N 명의 사용자가 있다고 하면, 0번째 셀 기지국에 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{j=0}^I \sum_{k=0}^{N-1} r_{jk}(t) + n(t) \quad (8)$$

여기서 $n(t)$ 은 잡음 벡터로 평균은 0 벡터이며, $E[n(t) n^H(\tau)]/2 = N_0 \delta(t - \tau) I$ 이다. N_0 는 수신기 입력에서 잡음의 단면 전력밀도, I 는 identity 행렬, 그리고 H 는 Hermitian 전치를 의미한다. 칩 성형 필터가 사각펄스 형태를 가지고 0번째 셀의 0번째 사용자의 수신신호와 완벽한 동기화가 이루어진다고 가정한다. 그러면 역확산 및 $t = (n+1)T$ 에서 표본화 과정을 거친 수신신호는 다음과 같다.

$$Y = S + L_1 + L_2 + N \quad (9)$$

이 식에서 첫째항은 원하는 신호, 두번째항은 동일셀의 간섭신호, 세번째항은 다른 셀로부터의 간섭이며, 마지막 항은 잡음이다. 이제, 원하는 사용자 신호의 도착각을 θ_{00} 이라 하고 추정각을 $\hat{\theta}_{00}$ 이라 한다. 그러면 이 추정각으로부터 steering 벡터 a_{00} 가 얻어지며, 완벽한 도착각 추정이 이루어지는 경우 $a_{00}^* \cdot w_{ij} = 1$ 이 된다. 도착각 θ_{ij} 로부터 생성되는 배열 응답 벡터를 w_{ij} 라 한다. 그러면 배열 안테나의 빔패턴은 다음과 같다.

$$u(\hat{\theta}_{00}, \theta_{ij}) = a_{00}^* \cdot w_{ij} \quad (10)$$

원형의 안테나 배열을 가지며 M 의 값이 큰 경우, 이 패턴은 두 각도 차이에만 의존하는 것으로 근사화된다. 즉, $u(\hat{\theta}_{00}, \theta_{ij}) = u(\phi_{ij})$, $\phi_{ij} = \hat{\theta}_{00} - \theta_{ij}$ 이다. 여기서 $|u(\phi_{ij})| \leq 1$ 이며, 동식은 $\phi_{ij} = 0$ 인 경우 성립한다. 이제, 빔 형성기의 출력을 구하면 다음과 같다.

$$Y = a_{00}^* \cdot (S + L_1 + L_2 + N) = S + L_1 + L_2 + N \quad (11)$$

여기서 각 항은 다음과 같다.

$$S = 2\sqrt{P} T B_{00}^* u(\phi_{00}) \quad (12)$$

$$L_1 = \sqrt{P} \sum_{j=1}^{N-1} u(\phi_{0j}) \lambda_{0j} e^{-j\omega_c \tau_{0j}} \quad (13)$$

$$\int_{nT}^{(n+1)T} b_{0j}(t - \tau_{0j}) \otimes c_{0j}(t - \tau_{0j}) \otimes c_{00}^*(t) dt$$

$$L_2 = \sqrt{P} \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{k=0}^{N-1} u(\phi_{jk}) \lambda_{jk} \gamma_{jk} e^{-j\omega_c \tau_{jk}} \quad (14)$$

$$\int_{nT}^{(n+1)T} b_{jk}(t - \tau_{jk}) \otimes c_{jk}(t - \tau_{jk}) \otimes c_{00}^*(t) dt$$

$$N = \alpha_{00}^* \int_{nT}^{(n+1)T} \mathbf{n}(t) \otimes c_{00}^*(t) dt \quad (15)$$

식 (13), (14)에서 λ_v 는 음성 활성화 지수로서 이산 베르누이 랜덤변수이며, 활성 확률을 ν , 비활성 확률을 $1-\nu$ 라 한다. 그리고 L_1, L_2, N 은 랜덤변수가 되며 C_{00}^* 가 C_{ij}^* 및 N 과 독립이므로 $E[L_1]=E[L_2]=E[N]=0$ 이다. 한편, 칩신호는 이진 확산부호와 칩성형 펄스로 표현이 되므로 L_1 은 다음과 같다.

$$L_1 = \sqrt{P} \sum_{j=1}^{N-1} w(\phi_{0j}) \lambda_{0j} e^{-j\omega_c \tau_{0j}} \sum_{k=C}^{(k+1)P-1} C_{00}^k \otimes \left(\int_{IT_c}^{IT_c+\epsilon_{0j}} C_{0j}^{(i-1)} h_c(t-IT_c) h_c(t-(i-1)T_c - \epsilon_{0j}) \otimes b_{0j}(t-\tau_{0j}) dt + \int_{IT_c+\epsilon_{0j}}^{(i+1)T_c} C_{0j}^i h_c(t-IT_c) \cdot h_c(t-IT_c - \epsilon_{0j}) \otimes b_{0j}(t-\tau_{0j}) dt \right) \quad (16)$$

여기서 $\epsilon_{0j} = \tau_{0j} \bmod T_c$ 이다. 그러면 Appendix A로부터 L_1 의 분산은 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_1^2 = 4 \sum_{j=1}^{N-1} |w(\phi_{0j})|^2 \lambda_{0j} G [R_h^2(\epsilon_{0j}) + R_h^2(T_c - \epsilon_{0j})] \quad (17)$$

여기서 $R_h(\epsilon) = \int_0^\epsilon h(t)h(t+T_c-\epsilon)dt$ 로 칩 신호의 부분상관 함수를 나타낸다. 비동기식 셀룰러 CDMA 시스템을 가정하면, ϵ_{0j} 는 $[0, T_c]$ 범위에 균일하게 분포하는 랜덤변수이다. 사각 칩 성형 펄스인 경우에 $R_h^2(\epsilon) = \epsilon^2$ 이므로 식 (17)은 다음과 같이 간략화 된다.

$$\sigma_1^2 = 4PGT_c^2 \sum_{j=1}^{N-1} |w(\phi_{0j})|^2 \lambda_{0j} \chi_{0j} \quad (18)$$

여기서 $\chi_{0j} = 1 - 2\epsilon_{0j}/T_c + \epsilon_{0j}^2/T_c^2$ 이므로 $\chi_{0j} \leq 1$ 이다. 동일한 방법으로 L_2 의 분산을 구할 수 있으며, 다음과 같다.

$$\sigma_2^2 = 4PGT_c^2 \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} |\gamma_{jv}|^2 |w(\phi_{0j})|^2 \lambda_{0j} \chi_{0j} \quad (19)$$

여기서 χ_{0j} 는 랜덤변수로 분포는 χ_{0j} 와 같다. 그리고, 잡음의 분산은 다음과 같다.

$$\sigma_N^2 = \frac{1}{2} E[NN^*] = 2N_0 T. \quad (20)$$

검출기에서 신호의 전력은 $4PT^2 |w(\phi_{00})|^2$ 이므로, 검출기 입력에서 신호대 잡음비는 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{4PT^2 |w(\phi_{00})|^2}{\sigma_N^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2} \geq \frac{G |w(\phi_{00})|^2}{G/(2\lambda) + N_1 + N_2} \quad (21)$$

여기서 $\lambda = PT/N_0$ 이며, N_1 과 N_2 는 다음과 같다.

$$N_1 = \sum_{j=1}^{N-1} |w(\phi_{0j})|^2 \lambda_{0j}, \quad (22)$$

$$N_2 = \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} |\gamma_{jv}|^2 |w(\phi_{0j})|^2 \lambda_{0j}. \quad (23)$$

시스템의 outage 는 신호대 잡음비가 특정 문턱치 λ_{th} 이하로 낮아지는 경우에 발생한다. 따라서 outage 발생확률은 다음과 같이 유도된다.

$$\Pr(out) = \Pr\left(\frac{G |w(\phi_{00})|^2}{\sigma_N^2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2} < \lambda_{th}\right) \leq \Pr\left(N_2 > \frac{G |w(\phi_{00})|^2}{\lambda_{th}} - \frac{G}{2\lambda} - N_1\right) \quad (24)$$

여기서 $|\gamma_{jv}|^2$ 는 랜덤 변수로 $|\gamma_{ij}|^2, i \neq i', j \neq j'$ 과 서로 독립이다. 따라서 $(N \times D)$ 개의 독립인 랜덤변수의 합인 N_2 는 가우시안 랜덤변수로 근사화할 수 있다. 가우시안 랜덤변수의 평균과 분산을 각각 M_x 와 σ_x^2 이라 한다. 그러면 N_1 이 주어진 조건에서 outage 확률은 다음과 같다.

$$\Pr(out|N_1) = Q\left(\frac{G |w(\phi_{00})|^2}{\lambda_{th} \sigma_x} - \frac{G}{2\lambda \sigma_x} - \frac{N_1 - M_x}{\sigma_x}\right). \quad (25)$$

이제, 식 (25)로부터 N_1 에 대한 평균과정을 취함으로써 최종적인 outage 확률을 구할 수 있다.

$$\Pr(out) \leq \int_0^\infty \Pr(out|N_1) \Pr(N_1) dN_1 \quad (26)$$

IV. 하향링크의 용량

상향링크의 분석과 동일하게 상대 이동국이 0번째 셀의 0번째 사용자라고 가정한다. 빔포밍 이후 원하는 상대사용자의 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$r(t) = \sum_{j=0}^J \sum_{v=0}^{N-1} a_{0j}^* \cdot r_{jv}(t) + n(t) \quad (27)$$

여기서 a_0 는 i 번째 셀 사이트에서 측정된 원하는 상대방에 대한 전송배열 응답 벡터이다. N 개의 신호 $a_0^j \cdot r_{ij}(t), j=1,2,\dots,N-1$ 는 동일한 경로로 전파되므로 역시 동일한 감쇠를 겪는다. 따라서 r_{ij}^0 가 0번째 셀 사이트에 있는 0번째 사용자와 i 번째 기지국과의 거리이며 a_i^0 가 그 경로에 따르는 감쇠라고 할 때, $|r_{ij}^0|^2 = |a_i^0|^2 / (r_{ij}^0)^2 = |\gamma_{ij}^0|^2, j=1, 2, \dots, N-1$ 이다. 그리고 또한 $\tau_{ij} = \tau_j, j=1,2, \dots, N-1$ 이다. 그러므로 역확산 이후 표현화된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$Z = \int_{nT}^{(n+1)T} r(t) \otimes c_{00}(t) dt \quad (28)$$

$$= S + L_1' + L_2' + N$$

여기서 \otimes 는 식 (4)에서 제시한 real quadri-phase 역확산을 나타낸다. 그리고 L_1' 은 동일셀에서 발생하는 방해신호, L_2' 는 다른 셀에서 발생하는 방해신호, N 은 잡음항이며, 이들은 다음과 같이 주어진다.

$$S = \sqrt{PT} b_0^* u(\phi_{00}) \quad (29)$$

$$L_1' = \sum_{j=1}^{N-1} u(\phi_{0j}) \lambda_{0j} \int_{nT}^{(n+1)T} b_{0j}(t) \otimes c_{0j}(t) \otimes c_{00}(t) dt \quad (30)$$

$$L_2' = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{N-1} u(\phi_{ij}) \gamma_{ij} e^{-j\omega_c \tau_{ij}} \lambda_{ij} \int_{nT}^{(n+1)T} b_{ij}(t-\tau_{ij}) \otimes c_{ij}(t-\tau_{ij}) \otimes c_{00}(t) dt \quad (31)$$

$$N = \int_{nT}^{(n+1)T} n(t) \otimes c_{00}(t) dt \quad (32)$$

식 (29)와 (30)에서 $\phi_{00} = \theta_{00} - \partial_{00}$ 는 0번째 셀 사이트에서 원하는 사용자에게 대한 각도 추정오차이며, $\phi_{0j} = \theta_{0j} - \partial_{0j}$ 는 같은 셀 사이트 내에 있는 j 번째 사용자와 원하는 사용자 사이의 각도이다. 그리고 식 (31)에서 $\phi_{ij} = \theta_{ij} - \partial_{ij}$ 이며, θ_{ij} 는 i 번째 기지국에서 동일 셀 사이트 내에 있는 사용자에게 대한 각도 추정값이고, ∂_{ij} 는 i 번째 기지국이 0번째 셀 사이트 내에 있는 원하는 사용자에게 대한 각도 추정값이다. 각 셀에서 사용자들은 균일하게 분포하고 있으므로 θ_{ij} 는 $[0, 2\pi)$ 내에서 균일하게 분포하는 랜덤 변수이며, 배열 응답 $u(\phi_{ij})$ 는 2π

를 주기로 하는 주기성을 가진다.

한편 확산 부호 C_{00}^* 는 C_{0j}^* 및 잡음과 독립이다. 그러므로 $E[L_1'] = E[L_2'] = E[N] = 0$ 이며, L_1' 의 분산은 다음과 같이 유도된다.

$$\sigma_{L_1'}^2 = \frac{P}{2} \sum_{j=1}^{N-1} \sum_{l=1}^{N-1} u(\phi_{0j}) u^*(\phi_{0l}) \cdot \lambda_{0j} \lambda_{0l} e^{-j\omega_c(\tau_{0j} + \tau_{0l})} \sum_{c=0}^{(N-1)G-1} \sum_{d=0}^{(N-1)G-1} E\{C_{00}^* X(l, j, \epsilon_{0j}) (C_{00}^* X(l, j, \epsilon_{0j}))^*\} \quad (33)$$

$$X(l, j, \epsilon_{0j}) = \int_{lT_c}^{T_c + \epsilon_{0j}} C_{0j}^{-1} h_c(t - lT_c) \cdot h_c(t - (l-1)T_c - \epsilon_{0j}) \otimes b_{0j}(t - \tau_{0j}) dt + \int_{lT_c + \epsilon_{0j}}^{(l+1)T_c} C_{0j}^{-1} h_c(t - lT_c) h_c(t - lT_c - \epsilon_{0j}) \otimes b_{0j}(t - \tau_{0j}) dt \quad (34)$$

각각의 U_{0j}' 와 V_{0j}' 는 평균이 0이고 서로 독립이다. 따라서 $E[U_{0j}' V_{0l}'] = 0$ 과 $E[U_{0j}' U_{0l}'] = E[V_{0j}' V_{0l}'] = \delta_{j-l} \delta_{l-l}$ 의 관계를 만족한다. 여기서 δ_j 은 이산 시간 델타 함수이다. Appendix A의 접근방법과 유사한 방법으로 간략화 하면 식 (34)의 분산은 다음과 같이 표현된다.

$$E\{C_{00}^* X(l, j, \epsilon_{0j}) (C_{00}^* X(l, j, \epsilon_{0j}))^*\} = \begin{cases} 2\{R_{0j}^2(\epsilon_{0j}) + R_{0j}^2(T_c - \epsilon_{0j})\}, & j=j', l=l' \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (35)$$

한편 하향링크에서는 모든 j 에 대하여 $\tau_{0j} = \tau_0 = 0$ 이므로 식 (35)는 $2T_c^2$ 이다. 따라서 $\sigma_{L_1'}^2$ 는 다음과 같이 간략화 되며, 동일한 접근방법으로 $\sigma_{L_2'}^2, \sigma_N^2$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_{L_1'}^2 = PGT_c^2 \sum_{j=1}^{N-1} |u(\phi_{0j})|^2 \quad (36)$$

$$\sigma_{L_2'}^2 = PGT_c^2 \sum_{i=1}^I |\gamma_{ij}|^2 \sum_{j=1}^{N-1} |u(\phi_{ij})|^2 \lambda_{ij} \lambda_{ij} \quad (37)$$

$$\sigma_N^2 = N_0 T \quad (38)$$

그러므로 결정 소자의 입력단에서 신호대 잡음비는 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{PT^2 |u(\phi_{00})|^2}{\sigma_N^2 + \sigma_{L_1'}^2 + \sigma_{L_2'}^2} \geq \frac{G |u(\phi_{00})|^2}{\frac{G}{\lambda} + N_1' + N_2'} \quad (39)$$

$$N_1 = \sum_{j=1}^{N-1} |u(\phi_{0j})|^2 \quad (40)$$

$$N_2 = \sum_{l=1}^L |\gamma_l|^2 \sum_{m=0}^{M-1} |w(\phi_m)|^2 \quad (41)$$

하향링크의 경우도 상향링크의 경우와 동일하게 신호대 잡음비가 일정 한계치 λ_{th} 이하로 낮아질 경우 시스템의 outage 가 발생하므로 outage 확률은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \Pr(out) &= \Pr\left(\frac{Gu(\phi_m)|^2}{\sigma_N'^2 + \sigma_1'^2 + \sigma_2'^2} < \lambda_{th}\right) \\ &\leq \Pr\left(N_1' + N_2' > \frac{Gu(\phi_m)|^2}{\lambda_{th}} - \frac{G}{\lambda}\right) \end{aligned} \quad (42)$$

V. 결과 및 검토

상향링크 및 하향링크의 outage 계산에서 고려한 전체 셀의 수 L 는 18로 설정하였으며 음성활성화 지수 ν 는 [1,2]에서 사용한 것과 동일하게 0.375로 설정하였다. 그리고 배열 안테나로는 반경이 반 파장의 길이를 가지는 원형 배열 안테나를 선택하였으며, 안테나 소자의 수 M 은 5, 7 및 9로 변화시키며 실험을 하였다. 또한 전방향 안테나에 해당하는 $M=1$ 의 경우도 성능 비교의 목적으로 실험에 포함하였다. [8]의 시스템은 가변 확산 지수를 채택하고 있다. 본 연구에서는 선택 가능한 여러 처리이득 값 가운데서 256을 사용하였으며, shadowing의 분산값은 8dB로 하였다. 그리고 경로손실 $\beta=4$ 로 설정하였으며, 수치 계산에서 신호의 전력에 비하여 열잡음의 전력은 충분히 작다고 가정하였다.

한편, 상향링크에서 outage의 문턱치 λ_{th} 는 7dB로 설정하였으며, 이것은 antipodal 변조기법을 적용한 경우 10^{-3} 의 비트 에러가 발생하는 것에 해당된다. 가우시안 랜덤변수 N_2 의 평균값과 분산은 10000회 반복 계산하여 어떠한 특성을 가지는지 조사하였다. 매회 계산된 결과를 평균하여 단위 셀당 사용자 수에 따른 값을 분석한 결과, 평균값과 분산은 단위 셀당 사용자수의 증가에 따라 역시 증가한다는 것을 관찰하였다. 평균값은 1차의 다항식으로 근사화가 가능하였으며, 분산은 2차의 다항식으로 근사화할 수 있었다. 단위 셀당 평균값과 분산을 나타내는 근사화 다항식을 각각 $M_r(N) = c_1N + c_0$ 와 $\sigma_r^2(N) = c_2'N^2 + c_1'N + c_0'$ 으로 표현하였을 때, 실험으로 구한 각 다항식의 계수를 표 1에 제시하였다.

단위 셀의 사용자 수에 따른 outage 확률 분석결과를 그림 1에 제시하였다. 분석 결과로부터 전방향

표 1. 평균과 분산 다항식의 계수.

M	mean		variance		
	c_1	c_0	c_2'	c_1'	c_0'
5	0.1709	-1.282E-5	-1.282E-5	1.301E-2	7.180E-1
7	0.1100	-1.117E-5	-1.117E-5	1.107E-2	5.795E-1
9	0.1022	0.01460	-1.030E-5	1.066E-2	5.936E-1

안테나를 사용한 경우 단위 셀당 사용자수가 35이면 10^{-4} 의 outage 확률을 얻는다는 것을 알 수 있다. 그러나 적응 배열 안테나를 사용한 경우의 용량은 이것보다 몇 배씩 더 크며, 안테나 소자의 수가 많을수록 용량은 더욱 증가함을 알 수 있다. 예로 $M=5, 7, 9$ 인 경우 $M=1$ 인 경우와 비교하면 용량이 각각 4, 6.14 및 6.8 배만큼 증가함을 알 수 있다.

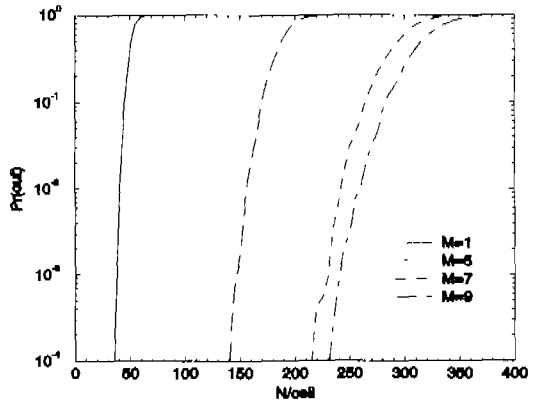


그림 1. 상향링크에서 용량분석 결과.

다음 상향링크의 용량을 $K_r > 0$ 인 라이시안 페이딩 환경에서 분석하고 이 결과를 레일리 페이딩 채널환경에서 얻은 용량과 비교하였다. 분석에서 방해 신호를 발생하는 모든 단말기는 동일한 라이시 지수들 가진다고 가정한다. 그림 2에 $M=9$ 인 경우 채널환경이 상이한 조건에서 수행한 용량비교 결과를 제시하였다. 결과로부터 $K_r=8$ 인 채널에서 약간의 용량증가가 있음을 관찰할 수 있으나 그 값은 크지 않다. 이것은 0번째 셀에서 완벽한 전력제어를 수행한다고 가정하였으므로, 채널의 환경 변화와는 무관하게 셀 내에 있는 모든 단말기로부터 수신되는 전력이 동일하여 용량의 변화가 거의 일어나지 않은 것이라고 판단된다.

그림 3에 각도추정 오차가 존재할 경우 상향링크의 용량 분석 결과물을 제시하였다. 5°의 각도 추정

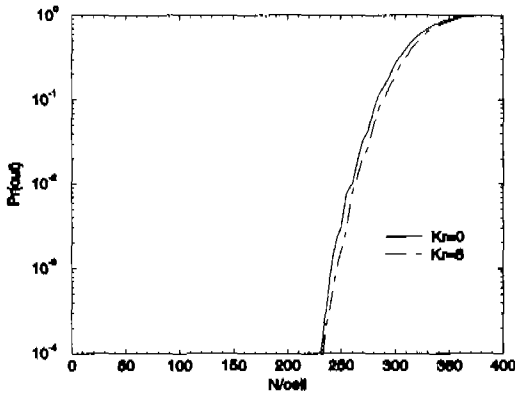


그림 2. Kr 값에 따른 상향링크의 용량비교

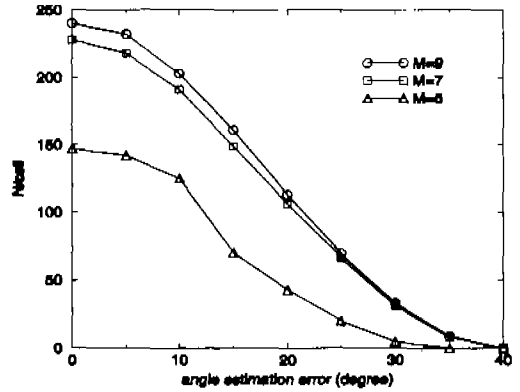


그림 4. 각도추정 오차에 따른 상향링크의 용량 감소

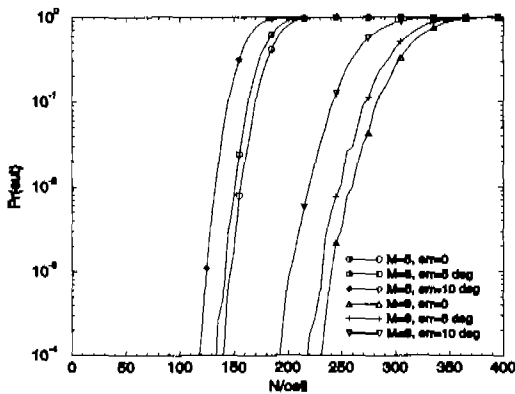


그림 3. 각도추정 오차가 존재하는 경우 상향링크의 용량

오차가 있는 경우, 용량은 약간 감소한다. 그러나 10°의 추정 오차는 상당히 큰 폭으로 용량을 감소시킨다. 즉, 5°의 추정오차는 5.2%의 용량 감소를 초래하는 반면, 10°의 추정오차는 16.5%의 용량감소를 초래한다. 그리고 M=5인 경우도 동일한 추세로 용량이 감소함을 관찰할 수 있다. 추정 오차에 따른 용량의 감소를 더욱 자세하게 분석하기 위하여 M=5, 7, 9인 경우 각도추정 오차를 40°까지 변화시켜 가며 용량을 조사하였다. 각도추정 오차값을 5° 단위로 증가시켰을 때, outage 확률이 10⁻⁴이 되는 단위 셀당 사용자수를 측정된 결과를 그림 4에 제시하였다. 이 결과로부터 각도 추정오차가 5°일 때까지는 역시 용량의 감소가 완만하게 일어난다는 것을 볼 수 있다. 그러나 각도 추정 오차가 10°보다 큰 경우, 용량의 감소는 매우 크다. 특히 30°의 추정 오차는 소자수가 7 혹은 9인 배열안테나를 사용한 시스템의 용량이 전방향 안테나를 사용한 경우의 그것과 동일하게 될 정도로 용량

의 감소를 초래한다. 그리고 소자수가 5인 배열 안테나인 경우에는 각도추정 오차가 22° 정도에서 배열 안테나의 성능이 전방향 안테나의 그것과 동일하게 된다. 각도추정 오차가 더욱 증가하여 40° 정도가 되면, M=9인 경우에도 outage 확률이 10⁻⁴ 이하로는 될 수 없다는 것을 관찰할 수 있다.

하향링크의 outage 확률은 식 (42)의 연산을 10000회 반복하여 수행한 후, 이들 값에 대한 평균을 취하여 구하였다. 상향링크의 환경과 동일하게 하향링크에서도 $G=256$, $\lambda_{dB}=7dB$ 로 설정하였다. 또한, 열잡음의 전력은 신호의 그것에 비하여 충분히 작다고 가정하였으며 안테나의 소자수도 상향링크의 분석시와 동일하게 1, 5, 7, 9로 하였다. 하향링크의 용량분석 결과를 그림 5에 제시하였다. M=5인 경우, 용량은 전방향 안테나를 사용한 것과 비교하여 약 3.5 배의 증가가 있다. 그리고 M=7, 9인 경우에는 용량이 더욱 증가하며, 각각 6배와 6.1배의 용량 증가를 얻을 수 있다. 상향링크의 분석 결

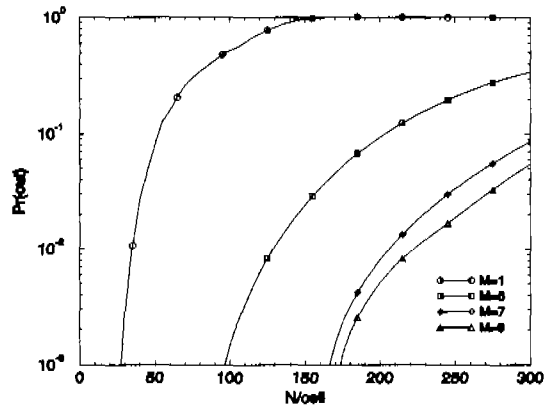


그림 5. 하향링크의 용량

과와 같이 $M=7$ 인 배열 안테나의 성능은 $M=9$ 인 경우의 성능과 거의 동일함을 관찰할 수 있었다. 그러나, $M=5$ 에서 $M=7$ 로 안테나의 소자수가 증가 하게 되면, 상당한 용량의 증가를 얻을 수 있음을 관찰할 수 있다.

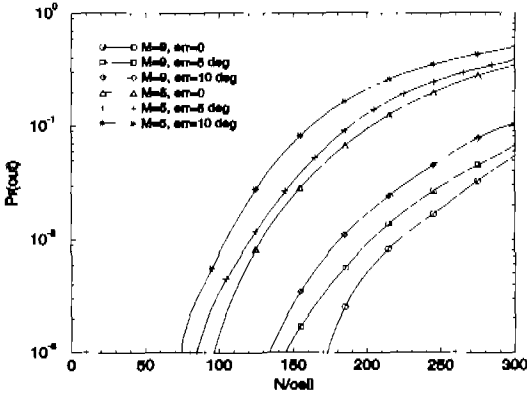


그림 6. 각도추정 오차가 존재하는 경우 하향링크의 용량

다음, 그림 6에 각도추정 오차가 존재하는 경우 outage 확률 계산 결과를 제시하였다. Outage 확률 값 10^{-3} 을 기준으로 하였을 때, 5° 의 각도 추정 오차는 $M=9$ 인 경우 약 11.6% 그리고 $M=7$ 인 경우 11.5% 의 용량감소를 초래한다. 추정 오차값이 10° 로 증가한 경우 오차가 5° 일 때의 용량과 비교하였을 때 $M=9$ 인 경우 15.6%, 그리고 $M=7$ 인 경우 11.6% 의 용량이 감소한다. 각도추정 오차가 이것보다 더 큰 경우의 실험결과는 그림 7에 제시 하였다. 그림 7에서 세로축은 outage 확률이 10^{-3} 으로 되는 단위 셀 당의 사용자수를 나타낸다. 이 결과로부터 $M=7$ 과 9 인 시스템의 용량은 $M=5$ 인 시스템보다 각도 추정 오차에 더욱 영향을 많이 받

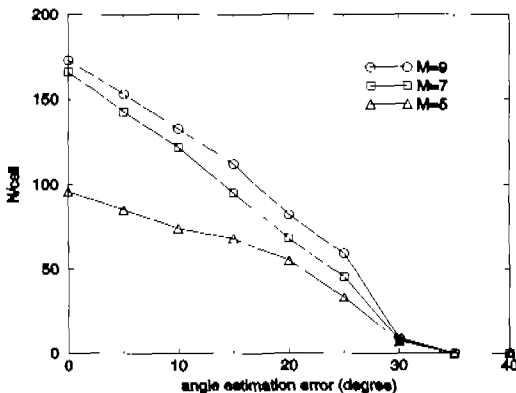


그림 7. 각도추정 오차에 따른 하향링크의 용량 감소

는다는 것을 관찰할 수 있다. 각도 추정오차가 30° 인 경우 이들 세 시스템의 용량은 거의 같게되며, outage를 발생시키지 않는 단위 셀의 사용자수가 10이하로 된다는 것을 관찰할 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 각도 추정 오차가 존재하는 경우 적용 배열 안테나를 사용한 셀룰러 CDMA 시스템의 상향 및 하향링크의 용량을 outage 확률로 분석 하였다. 변조 및 확산 기법으로는 비동기식 W-CDMA 시스템에서 제한한 것과 동일하게 상향 링크에서 복소 확산과 결합한 BPSK modulation 적용하였으며, 하향링크에서는 quadriphase 확산과 결합한 QPSK modulation 사용하였다. 적용 안테나를 적용한 시스템은 전방향 안테나를 사용한 시스템과 비교하여 소자수가 5 이상이면 상당한 용량의 향상을 가진다는 것을 확인하였다. 그러나, 각도 추정 오차는 이러한 용량의 증가치를 상당히 감소시킨다는 것을 분석을 통하여 확인할 수 있었다. 예로, 5° 만큼의 각도 추정 오차가 있는 경우, 상향링크에서는 약 5.2% 하향링크에서는 11.6%의 용량감소가 있었으며, 이러한 용량의 감소는 각도추정 오차의 증가에 따라서 더욱 크게 나타났다. 특히 상향링크에서 40° 의 각도 추정 오차가 발생하면 outage 확률이 10^{-4} 이하로 감소될 수 없다는 것도 관찰하였다. 또한 본 논문에서는 채널 환경의 변화에 따른 용량의 비교 분석도 수행하였는데, 결과로부터 LOS 성분의 증가는 거의 용량을 증가시키지 않음을 관찰 하였다.

Appendix A. 분산의 유도

$$\begin{aligned} \Gamma(i, j) &= \int_{-T}^{(n+1)T} b_{ij}(t-\tau_w) \otimes c_{ij}(t-\tau_w) \otimes c_{00}^*(t) dt \\ &= \Gamma_r(i, j) + j\Gamma_i(i, j) \end{aligned} \quad (a.1)$$

여기서 $\Gamma_r(i, j)$ 와 $\Gamma_i(i, j)$ 는 각각 $\Gamma(i, j)$ 의 실수부와 허수부이다.

$$\Gamma_r(i, j) = \Gamma_{r1}(i, j) + \Gamma_{r2}(i, j), \quad (a.2)$$

여기서 $b'_v(t) = \text{Re}\{b_{ij}(t)\}$, $b'_i(t) = \text{Im}\{b_{ij}(t)\}$ 이며

$$\Gamma_{r1}(i, j) = \sum_{l=0}^{(k+1)G-1} U_{00}^l \left(\int_{IT_c}^{IT_c+\epsilon_{ij}} \{ U_{ij}^{l-1} \xi_1(t) \cdot b_{ij}^r(t-\tau_{ij}) - V_{ij}^{l-1} \xi_1(t) b_{ij}^r(t-\tau_{ij}) \} dt \right) + \int_{IT_c+\dots}^{(i+1)T_c} \{ U_{ij}^l \xi_2(t) b_{ij}^r(t-\tau_{ij}) - V_{ij}^l \xi_2(t) b_{ij}^r(t-\tau_{ij}) \} dt \quad (a.3)$$

$$\Gamma_{r2}(i, j) = \sum_{l=0}^{(k+1)G-1} V_{00}^l \left(\int_{IT_c}^{IT_c+\epsilon_{ij}} \{ U_{ij}^{l-1} \xi_1(t) \cdot b_{ij}^r(t-\tau_{ij}) + V_{ij}^{l-1} \xi_1(t) b_{ij}^r(t-\tau_{ij}) \} dt \right) + \int_{IT_c+\dots}^{(i+1)T_c} \{ U_{ij}^l \xi_2(t) b_{ij}^r(t-\tau_{ij}) + V_{ij}^l \xi_2(t) b_{ij}^r(t-\tau_{ij}) \} dt, \quad (a.4)$$

이다. 그리고 표현의 편의를 위하여 다음을 정의한다.

$$\xi_1(t) = h_c(t-IT_c)h_c(t-(l-1)T_c-\epsilon_{ij}) \quad (a.5)$$

$$\xi_2(t) = h_c(t-IT_c)h_c(t-IT_c-\epsilon_{ij}) \quad (a.6)$$

그런데 $E[U_{00}^l V_{00}^l] = 0$ 이므로 i, j, l' , 및 j' 에 무관하게 $E[\Gamma_{r1}(i, j)\Gamma_{r2}(i, j)] = 0$ 이 됨을 쉽게 알 수 있다. 따라서

$$E[\Gamma_r^2(i, j)] = E[\Gamma_{r1}^2(i, j)] + E[\Gamma_{r2}^2(i, j)] \quad (a.7)$$

이며, 몇 단계의 연산을 통하면 다음을 유도할 수 있다.

$$E[\Gamma_{r1}^2(i, j)] = \begin{cases} 2 \sum_{k=0}^{(k+1)G-1} (R_k^2(\epsilon_{ij}) + R_k^2(T_c - \epsilon_{ij})), & \text{if } i=i' \text{ and } j=j' \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (a.8)$$

그리고 동일한 방법으로 다음을 얻는다.

$$E[\Gamma_{r2}(i, j)\Gamma_{r2}(i', j')] \quad (a.9) \\ = \begin{cases} 2 \sum_{k=0}^{(k+1)G-1} (R_k^2(\epsilon_{ij}) + R_k^2(T_c - \epsilon_{ij})), & \text{if } i=i' \text{ and } j=j' \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

또한 대칭성에 의하여 $E[\Gamma_r(i, j)\Gamma_r(i', j')] = E[\Gamma_r(i, j)\Gamma_r(i, j)]$ 이 된다. 그러므로 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

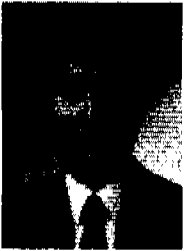
$$E[\Gamma_r(i, j)\Gamma_r(i', j')] \quad (a.10) \\ = \begin{cases} 8 \sum_{k=0}^{(k+1)G-1} (R_k^2(\epsilon_{ij}) + R_k^2(T_c - \epsilon_{ij})), & \text{if } i=i' \text{ and } j=j' \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

참고 문헌

- [1] K. S. Gilhousen and et al., "On the capacity of a cellular CDMA system," *IEEE Trans. on Veh. Tech.*, vol. 40, pp. 303-312, May 1991.
- [2] A. F. Naguib and et al, "Capacity improvement with base-station antenna arrays in cellular CDMA," *IEEE Tans. on Veh. Tech.*, vol. 43, pp. 691-697, Aug. 1994.
- [3] A. F. Naguib and A. Paulraj, "Effects of multipath and base-station antenna arrays on uplink capacity of cellular CDMA," *Proc. GLOBECOM*, pp. 395-399, 1994.
- [4] A. F. Naguib and A. Paulraj, "Performance of wireless CDMA with M-ary orthogonal modulation and cell site antenna arrays," *IEEE J. on Select. Areas in Commun.*, vol. 14, pp. 1770-1783, Dec. 1996.
- [5] D. J. Torrieri, "Performance of direct-sequence systems with long pseudonoise sequences," *IEEE J. on Select. Areas in Commun.*, vol. 10, pp. 770-781, May 1992.
- [6] J. S. Thompson and et al., "Smart antenna arrays for CDMA system," *IEEE Personal Commun. Mag.*, pp. 16-25, Oct. 1996.
- [7] E. Dahlman and et al., "UMTS/IMT-2000 based on wideband CDMA," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 70-80, Sep. 1998.
- [8] T. Ojanperä, and R. Prasad, "An overview of air interface multiple access for IMT-2000/UMTS," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 82-95, Sep. 1998.
- [9] G. L. Stüber, *Principles of Mobile Communication*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1996.

정 영 모(Young Mo Chung)

정회원



1986년 2월 : 서울대학교 공과대학
제어계측공학과 학사

1988년 2월 : 서울대학교 대학원
제어계측공학과 석사

1993년 2월 : 서울대학교 대학원
제어계측공학과 박사

1998년 8월~1999년 7월 : Georiga Institute of
Technology Post-doc.

1995년 3월~현재 : 한성대학교 정보전산학부 정보통신공학과 부교수

<주관심 분야> 이동 통신 시스템, 통신용 신호처리