

# JTC 채널 모델에서 W-CDMA의 대역폭에 따른 성능 분석

정회원 이주석\*, 오동진\*\*, 김철성\*\*

## Analysis of W-CDMA systems with different bandwidths over JTC channel model

Ju-Seog Lee\*, DongJin Oh\*\*, Cheol-Sung Kim\*\* *Regular Members*

### 요약

일반적으로 CDMA 시스템의 해석에서 시스템의 대역폭에 관계없이 한 칩 구간 내에 일정한 평균 전력을 갖는 한 개의 다중 경로 성분만을 고려하고 있다. 그러나 본 논문에서는 고정된 채널 모델에서 시스템의 대역폭에 따라 한 칩 구간 내의 다중 경로 성분들의 수를 달리하고, 이 다중경로 성분들에 자기 상관 함수의 기울기와 상대적인 위상을 고려하여 페이딩의 영향을 해석하였다. 이러한 페이딩이 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위해 출력 신호의 통계적 분포를 나타내는 출력 신호의 확률 밀도 함수를 구하였다, 그리고 이 출력 신호에 대한 조건부 에러 확률을 이용하여 사용자 수에 대한 평균 에러 확률을 유도하였다.

광대역 다중 경로 채널 모델로 실측 채널 모델인 JTC 채널 모델을 사용하고, 시스템의 성능 개선을 위해 MRC 레이크 수신기를 사용하였다. 그리고 W-CDMA 시스템의 대역폭에 따른 성능을 공정하게 비교하기 위해 사용자 수를 성능비교의 파라미터로 설정하고 동일한 주파수 대역폭 내에서 hybrid FDMA/CDMA 시스템을 가정하여 비교하였다. 모의 실험의 결과로부터 이용 가능한 많은 다중 경로 성분이 존재할 때 고정된 채널 모델에서 시스템의 분해능이 좋을수록 성능이 우수함을 알 수 있었다.

### ABSTRACT

Conventionally, in a CDMA system analysis, we assume only a single path within one chip duration. But, in this paper, we assume various number of multipaths within one chip duration according to spreading bandwidth in fixed channel model. Thus we take into account of the effects of autocorrelation and relative phases among multipath components within one chip duration according to different bandwidth, and analyze fading effects. And we derive the pdf of output signal. Then, we derive the average error probability versus the number of users from derived pdf.

We use a Maximal Ratio Combining (MRC) RAKE receiver under the JTC channel model which is one of the popular realistic wideband channel models. And we employ hybrid FDMA/CDMA systems to compare the performance of W-CDMA system for the same occupied total bandwidth. Then, we compare and analyze them for different bandwidth based on the number of users as a parameter. From the simulation results for different bandwidth, better performance can be obtained for wider bandwidth system where more resolvable multipath components are available.

\* 순천제일대학교 전자정보통신학부 (jslee@suncheon.ac.kr) \*\* 전남대학교 정보통신공학부 (chskim@chonnam.chonnam.ac.kr)

논문번호 : 010178-0710, 접수일자 : 2001년 7월10일

\* 본 연구는 정보통신연구진흥원 연구과제(2001-074-3) 지원 및 전남대학교 정보통신연구소 관리로 수행되었습니다.

### I. 서론

최근 셀룰러 무선 시스템의 응용 분야에서 많은 관심을 끌고 있는 광대역 CDMA (W-CDMA) 방식은 넓은 확산 대역폭을 사용함으로써 고속 전송률을 요구하는 IMT-2000과 같은 제 3세대 무선통신 시스템을 유연성 있게 지원할 수 있는 장점을 갖고 있다. 이러한 이유로 W-CDMA 시스템의 성능 분석에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[1]</sup>.

일반적으로 CDMA 시스템의 해석에서 CDMA 시스템의 대역폭에 관계없이 한 칩 구간 내에 일정한 평균 전력을 갖는 한 개의 다중 경로 성분만을 고려하지만<sup>[2]</sup>, 본 논문에서는 고정된 채널 모델에서 시스템의 대역폭에 따라 한 칩 구간 내의 다중 경로 성분들의 수를 달리하였다. 그리고 이 다중경로 성분들에 자기 상관 함수의 기울기와 상대적인 위상을 고려하여 페이딩의 영향을 해석하였다<sup>[3-5]</sup>. 이러한 페이딩이 시스템에 미치는 영향을 알아보기 위해 출력 신호의 통계적 분포를 나타내는 출력 신호에 대한 확률 밀도 함수를 구하였다. 그리고 이 출력 신호에 대한 조건부 에러 확률을 이용하여 사용자 수에 대한 평균 에러 확률을 유도하였다.

한 칩 구간 내의 다중 경로 성분들의 수를 달리하기 위해 본 논문에서는 고정된 채널 모델에서 서로 다른 대역폭을 갖는 시스템에 대해 성능을 비교 분석하였다. 그리고 대역폭에 따른 성능을 공정하게 비교하기 위해 동일한 주파수 대역폭에서 hybrid FDMA/CDMA를 사용하여 성능을 비교하였다.

2장에서는 다중 경로 채널을 선형 필터로 모델화하고, 실측 채널 모델인 JTC(Joint Technical Committee) 채널 모델을 광대역 다중 경로 채널로 사용하였다<sup>[6,7]</sup>.

3장에서는 JTC 채널 모델에서 DS-SS 시스템의 성능 분석을 위해 MRC 레이크 수신기의 출력 신호에 대한 확률 밀도 함수를 구하고, 이 출력 신호에 대한 조건부 에러 확률을 이용하여 사용자 수에 대한 평균 에러 확률을 이론적으로 유도하였다.

4장의 모의실험에서는 JTC 채널 모델의 실외 2개 지역을 모의 실험 환경으로 선정하고 출력 신호의 확률 밀도 함수와 사용자 수에 대한 평균 에러 확률을 CDMA 시스템의 대역폭에 따라 각각 비교 분석했다.

마지막으로 5장에서는 결론과 향후 연구 방향에 대한 제안을 하였다.

### II. 광대역 다중경로 채널의 모델화

W-CDMA 시스템의 성능을 평가, 분석하기 위해 적절한 광대역 다중 경로 채널 모델을 모델화 할 필요가 있다. 이를 위해 Turin이 제안한 수학적 모델인 모델을 사용해서 채널을 선형 필터로 모델화하였다. 이 선형 필터와 채널의 임펄스 응답을 다음 그림 1 과 식 (1)에 나타냈다<sup>[6]</sup>.

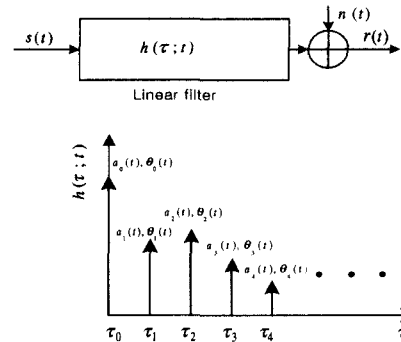


그림 1. 광대역 다중 경로 채널 모델.

$$h(\tau; t) = \sum_l a_l(t) \delta(t - \tau_l(t)) \exp(j\theta_l(t)). \quad (1)$$

여기서  $a_l$ 은 경로 크기(path amplitudes),  $\tau_l$ 은 경로 도착 시간(path arrival times),  $\theta_l$ 는 경로 위상(path phases) 이다.

본 논문에서는 다중 경로 페이딩 채널을 선형 필터로 가정하고 이 필터의 계수들을 실측 JTC 채널 모델로부터 구하였다. 그리고 이 채널 모델의 임펄스 응답은 다음 식 (2)와 같다<sup>[7]</sup>.

$$h(\tau; t) = \sum_{l=0}^L \sqrt{p_l} g_l(t) \delta(t - \tau_l), \quad (2)$$

여기서  $p_l$ 은 JTC 채널의 지연 전력 프로파일의  $l$ 번째 성분의 크기이고  $g_l(t)$ 는  $l$ 번째 전력 지연 프로파일을 가중하는 평균이 "0"인 독립적인 복소 가우시안 시변과정(independent zero-mean complex Gaussian time variant process)을 나타낸다. 복소 가우시안 과정의 평균이 "0"이므로 그 크기의 확률 밀도 함수는 레일리 분포이고 다음 식 (3)과 같다.

$$f(a_l(t)) = \frac{a_l(t)}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{a_l(t)^2}{2\sigma^2}\right\}, \quad (3)$$

여기서  $a_l(t)$ 는  $a_l(t)\mu_l$ 이며  $a_l(t)$ 는  $E[a_l]$ 이 "1"로 정의된 정규화된 레일리 랜덤 변수이고  $\mu_l$ 은  $l$ 번째 다중 경로 세기의 기대치이다.

$g(t)$ 는 크기가  $a_l(t)$ 이고 위상이  $\theta_l(t)$ 인 랜덤 변수로 나타낼 수 있다. 다중 경로의 위상  $\theta_l(t)$ 는  $(0, 2\pi)$ 에서 균일 분포를 갖는 상호 독립인 랜덤 변수로 사전 확률(a priori probability)을 가정할 수 있다. 그리고 경로 시간 지연  $\tau_l$ 의 분포는 그룹 반사 특성(group reflection characteristic)을 고려한 수정된 포아송 분포를 갖는다. 채널이 시불변 채널이라고 가정하면  $a_l(t)$ 와  $\theta_l(t)$ 는  $a_l$ 과  $\theta_l$ 이 되므로 식 (2)을 다음 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$h(\tau; t) = \sum_{l=0}^L \sqrt{p_l} a_l \delta(t - \tau_l) \exp(j\theta_l), \quad (4)$$

여기서  $\sqrt{p_l} a_l$ 은  $l$ 번째 경로의 신호의 세기,  $\tau_l$ 은 시간 지연,  $\theta_l$ 은 천이된 위상이다.

### III. 다중경로 페이딩 채널에서 W-CDMA 의 해석

W-CDMA 시스템을 해석하기 위해 수신 신호는  $k+1$ 개의 DS 파형으로 구성되고, 서로 비동기적으로 동작한다고 가정하자. 그리고 변조 신호는 동기 BPSK 신호라고 가정하고 DS-SS 수신기를 사용하여 해석하였다<sup>[8]</sup>.

해석을 위해 완전한 전력 제어, 코드, 반송파, 비트 동기를 가정하자.  $k$ 번째 사용자의 전송 신호는 다음 식 (5)와 같다.

$$s_k(t) = m_k(t) c_k(t) \cos(\omega_0 t), \quad (5)$$

여기서  $m_k(t) \in \{-1, +1\}$ 는  $k$ 번째 사용자의 이진 랜덤 데이터이고  $c_k(t)$ 는  $k$ 번째 사용자의 확산 부호이다.

JTC 채널 모델을 통해 수신된 전체 신호  $r(t)$ 는 다음 식 (6)과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L \sqrt{p_l} a_{k,l} m_k(t - \tau_{k,l}) c_k(t - \tau_{k,l}) \cos\{\omega_0(t - \tau_{k,l}) + \theta_{k,l}\} + n(t), \quad (6)$$

여기서  $k=0$ 은 원하는 사용자의 신호를 나타내고,  $k=1, 2, \dots, K$ 은 원하지 않는 사용자를 나타낸다.

$l=0$ 은 맨 처음 도착하는 신호를 나타내고,  $l=1, 2, \dots, L$ 은 첫번째, 두번째, ...,  $L$ 번째 다중 경로 신호를 나타낸다.  $p_l$ 은  $l$ 번째 전력 지연 프로파일의 크기를 나타내고  $a_{k,l}$ 은 임펄스 응답에서  $k$ 번째 사용자의  $l$ 번째 다중 경로의 크기를 나타내는 정규화된 레일리 랜덤 변수이다.  $n(t)$ 는 전력스펙트럼 밀도가  $\frac{N_0}{2}$ 인 AWGN (additive white Gaussian noise) 이다.  $\tau_{k,l}$ 은 임펄스 응답에서  $k$ 번째 사용자의  $l$ 번째 다중 경로 신호의 시간 지연을 나타내고,  $\theta_{k,l}$ 은 이에 해당되는 위상 천이를 나타낸다. 시간 지연  $\tau_{0,0}$ 과 위상 천이  $\theta_{0,0}$ 을 해석의 편의상 "0"이라고 가정하고, 다른 시간 지연과 위상 천이를  $\tau_{0,0}$ 와  $\theta_{0,0}$ 를 기준으로 한 상대적 위상 천이  $\phi_{k,l}$ 로 표현하면 다음 식 (7)과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=0}^K \sum_{l=0}^L \sqrt{p_l} a_{k,l} m_k(t - \tau_{k,l}) c_k(t - \tau_{k,l}) \cos(\omega_0 t + \phi_{k,l}) + n(t), \quad (7)$$

여기서  $\phi_{k,l}$ 는  $-\omega_0 \tau_{k,l} + \theta_{k,l}$ 이고,  $\tau_{0,0}$ 와  $\phi_{0,0}$ 는 "0"이다.

수신된 전체 신호  $r(t)$ 는 세 개의 서로 다른 성분으로 나누어 다음 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$r(t) = \sum_{l=0}^L \sqrt{p_l} a_{0,l} m_0(t - \tau_{0,l}) c_0(t - \tau_{0,l}) \cos(\omega_0 t + \phi_{0,l}) + \sum_{k=1}^K \sum_{l=0}^L \sqrt{p_l} a_{k,l} m_k(t - \tau_{k,l}) c_k(t - \tau_{k,l}) \cos(\omega_0 t + \phi_{k,l}) + n(t) = s_0(t) + s_i(t) + n(t), \quad (8)$$

여기서  $s_0(t)$ 는 원하는 사용자의 다중 경로 성분,  $s_i(t)$ 는 원하지 않는 사용자의 다중 경로 성분이고  $n(t)$ 는 잡음 성분을 나타낸다.

수신 신호  $r(t)$ 가 국부 발진기와 상관기를 통과한 후  $t$ 가  $T$ 에서 출력  $Z$ 는 다음 식 (9)와 같다.

$$Z = \int_0^T 2r(t) c_0(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0) dt = \int_0^T 2\{s_0(t) + s_i(t) + n(t)\} c_0(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0) dt = S + I + N, \quad (9)$$

여기서  $\theta_0$ 는 수신기의 국부 발진기의 위상이다. 그

리고 S, I, N은 각각  $s_o(t)$ ,  $s_s(t)$ ,  $m(t)$ 가 상관기를 통과한 후 그에 해당되는 성분들로서 랜덤변수이고 다음 식 (10), (11) 및 (12)로 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S &= \int_0^T 2s_o(t)c_0(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0) dt \\
 &= \int_0^T \sum_{i=0}^L 2\sqrt{p_i}a_{0,i} m_0(t-\tau_{0,i})c_0(t-\tau_{0,i})c_0(t) \\
 &\quad \cos(\omega_0 t + \psi_{0,i}) \cos(\omega_0 t + \theta_0) dt \\
 &= \sum_{i=0}^L \sqrt{p_i}a_{0,i} \cos(\psi_{0,i} - \theta_0) \\
 &\quad \int_0^T m_0(t-\tau_{0,i})c_0(t-\tau_{0,i})c_0(t) dt, \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I &= \int_0^T 2 \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^L \sqrt{p_i}a_{k,i} m_k(t-\tau_{k,i})c_k(t-\tau_{k,i}) \\
 &\quad c_0(t) \cos(\omega_0 t + \psi_{k,i}) \cos(\omega_0 t + \theta_0) dt \\
 &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^L \sqrt{p_i}a_{k,i} \cos(\psi_{k,i} - \theta_0) \\
 &\quad \int_0^T m_k(t-\tau_{k,i})c_k(t-\tau_{k,i})c_0(t) dt \\
 &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^L \sqrt{p_i}a_{k,i} \cos \psi'_{k,i} \\
 &\quad \int_0^T m_k(t-\tau_{k,i})c_k(t-\tau_{k,i})c_0(t) dt, \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$N = \int_0^T 2n(t)c_0(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0) dt, \quad (12)$$

여기서  $\psi'_{k,i}$ 는  $\psi_{k,i} - \theta_0$ 이고  $T$ 가  $\frac{1}{2\omega_0}$ 보다 매우 크기 때문에 ( $T \gg 2\omega_0$ ),  $2\omega_0$ 의 주파수를 가지는 성분의 적분은 무시하자.

식 (10)에서 시간 오프셋  $\tau_{0,i}$ 이 존재하더라도 이 값이  $T$ 에 비해 매우 작기 때문에  $[0, T]$ 의 구간에서  $m_0(t-\tau_{0,i})$ 는 거의 일정하므로 다음 식 (13)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S &= \sum_{i=0}^L \sqrt{p_i}a_{0,i} \cos(\psi_{0,i} - \theta_0) m_0(t-\tau_{0,i}) \\
 &\quad \int_0^T c_0(t-\tau_{0,i})c_0(t) dt, \quad (13)
 \end{aligned}$$

여기서 확산 부호의 자기 상관 함수는 다음 식 (14)와 같다.

$$R_c(\tau_{0,i}) = \int_0^T c_0(t-\tau_{0,i})c_0(t) dt. \quad (14)$$

그리고 확산부호는 PN(pseudo noise) 부호를 사용하고, 자기상관 함수의 부분 상관의 영향을 무시

하였다. 또한 원하는 사용자의 전송 데이터 비트  $m_0(t)$ 가 +1이라고 가정하면 위 식 (13)을 다음 식 (15)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
 S &= \text{Re} \left[ \sum_{i=0}^L \sqrt{p_i}a_{0,i} \exp(j\psi_{0,i}) R_c(\tau_{0,i}) \right. \\
 &\quad \left. \exp(-j\theta_0) \right] \\
 &= \text{Re} \{ [R \exp(j\theta')] \{ \exp(-j\theta_0) \} \} \\
 &= \text{Re} [R \exp\{j(\theta' - \theta_0)\}], \quad (15)
 \end{aligned}$$

여기서  $R$ 은 다음 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned}
 R &= \sum_{i=0}^L \sqrt{p_i}a_{0,i} \exp(j\psi_{0,i}) R_c(\tau_{0,i}) \\
 &= |R| \exp(j\theta') \quad (16)
 \end{aligned}$$

그리고  $|R|$ 과  $\theta'$ 는 각각  $R$ 의 크기와 위상이다. 완전한 반송파 동기를 가정했으므로 수신기의 국부 발진기의 위상  $\theta_0$ 와 수신 신호의 위상  $\theta'$ 은 같다고 가정하였다. 그러므로 식 (14)을 다음 식 (17)과 같이 쓸 수 있다.

$$S = |R|. \quad (17)$$

지금까지 성능 분석을 위한 기존의 방법은 시스템의 대역폭에 관계없이 한 칩 구간 내에 한 개의 다중 경로 성분( $a_0$ )만이 존재하는 것으로 가정하고 있다. 따라서 고정된 채널 대역폭에서 한 칩 구간 내에 여러 개의 다중 경로 성분이 존재할 경우에는 그림 2에서처럼 여러 다중 경로 성분들의 평균 전력을 더해 한 개의 평균 전력을 갖는 다중 경로 성분( $a'$ )이 존재하는 것으로 가정하였다<sup>[2]</sup>.

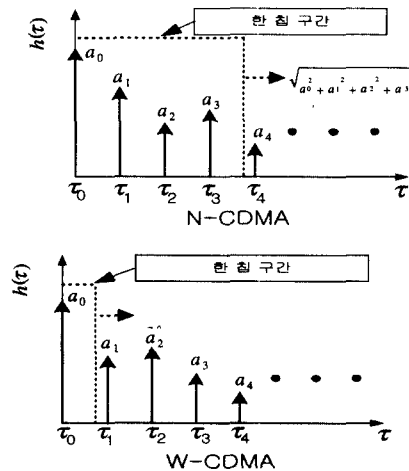


그림 2. 대역폭에 따른 N-CDMA와 W-CDMA의 다중 경로의 영향 (기존의 방법).

광대역 다중 경로 채널 모델은 채널 모델의 대역 폭보다 작거나 같은 대역폭을 갖는 이동 통신 시스템의 해석에 사용된다. 이러한 광대역 채널 모델에 기초하여 협대역 시스템을 분석하면, 한 칩 혹은 한 비트 구간 동안에 높은 해상도를 갖는 즉, 분해 가능한 다중 경로 성분들이 랜덤하게 더해져서 수신기의 출력에서 한 값으로 나타난다. 그러나 모든 다중 경로를 분해할 수 있을 정도로 칩 구간이 매우 짧은 경우 즉, 광대역 CDMA의 경우는 한 칩 구간 내에 단지 한 개의 다중 경로 성분만이 존재하고 다른 다중 경로 성분들은 자기 상관 함수의 특성에 의해 그 영향을 무시할 수 있다.

본 논문에서 이러한 방법을 사용하여 그림 3과 같이 한 칩 구간 내에 존재하는 다중 경로 성분들에 자기 상관 함수의 기울기와 위상을 고려하여 이들을 페이저의 합( $a', \theta'$ ) 또는  $(a_0, \theta_0)$ 으로 표현할 수 있음을 제안한다. 따라서 한 칩 구간 내에 존재하는 다중 경로 성분들이 발생시키는 페이딩에 대한 영향을 보다 정확하게 분석할 수 있다. 이러한 페이딩의 영향은 출력 신호의 통계적 분포에 의해 나타나므로 출력 신호의 확률밀도 함수를 구하였다. 그리고 이 출력 신호의 조건부 여러 확률을 이용하여 사용자 수에 대한 평균 여러 확률을 유도하였다.

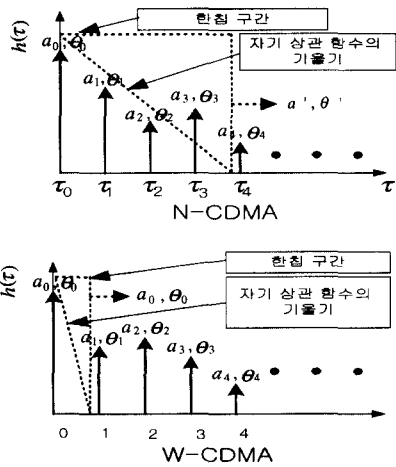


그림 3. 대역폭에 따른 N-CDMA와 W-CDMA의 다중 경로의 영향 (제한한 방법).

본 논문에서는 채널의 시간 해상도를 100 [nsec], 즉 채널의 대역폭을 10MHz로 하고 시스템의 대역폭에 따라 다중 경로의 수를 달리하였다.

수신 신호의 통계적 특성은 식 (16)와 (17)에서 다음 식 (18)과 같다.

$$S = \left| \sum_{i=0}^L \sqrt{p_i} a_{0,i} \exp(j\psi_{0,i}) R_c(\tau_{0,i}) \right|. \quad (18)$$

랜덤 변수 S를 실수 부분 U와 허수 부분 V로 표현하면 다음 식 (19)와 같고 U와 V는 다음 식 (20), (21)과 같다.

$$S = |R| = \sqrt{U^2 + V^2}, \quad (19)$$

$$U = \sum_{i=0}^L \sqrt{p_i} a_{0,i} \cos(\psi_{0,i}) R_c(\tau_{0,i}), \quad (20)$$

$$V = \sum_{i=0}^L \sqrt{p_i} a_{0,i} \sin(\psi_{0,i}) R_c(\tau_{0,i}). \quad (21)$$

여기서 식 (20)와 (21)에서 주어진 I에 대해서 PN 확산 부호의 자기상관 함수  $R_c(\tau_{0,i})$ 은  $\tau_{0,i}$ 의 증가에 대해 그 크기가 선형적으로 감소하는 가중치 함수이다. 그리고  $a_{0,i}$ 은 정규화된 레일리 랜덤 변수이고  $\psi_{0,i}$ 은 균일 랜덤 변수이다. 그러므로 U와 V의 확률 밀도 함수가 가우시안 분포를 갖는다. 따라서 그림 4에서 한 칩 구간 내에 존재하는 신호 S의 확률 밀도 함수는 레일리 분포를 갖고 다음 식 (22)와 같다.

$$f(s) = \frac{s}{\sigma^2} \exp\left\{-\frac{s^2}{2\sigma^2}\right\}. \quad (22)$$

다음으로 I와 N의 통계적 분포를 살펴보자. 먼저 각 상관기의 출력에서 간섭 I의 통계적 특성은 중심극한 정리에 의해 가우시안 분포를 갖는다고 가정할 수 있으므로 다음 식 (23), (24)으로 표현할 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$E[I] = 0, \quad (23)$$

$$\text{Var}[I] = KT^2 \frac{E[a_{k,i}^2]}{3H} \sum_{i=0}^L p_i, \quad (24)$$

여기서 K는 사용자의 수, H는 처리 이득, T는 비트 구간이다.

마지막으로, 식 (12)에서 가상성 가우시안 잡음 N의 통계적 특성을 구하면 다음 식 (25), (26)과 같이 표현할 수 있다.

$$E[N] = 0, \quad (25)$$

$$\text{Var}[N] = N_0 T. \quad (26)$$

본 논문에서는 CDMA 시스템의 성능 개선을 위

해 레이크 수신기를 사용하였다. 레이크 수신기는 시간 다이버시티를 사용하고 시간 지연된 다중 경로 성분들을 개별적인 상관기를 사용해서 결합한다. 그리고 결합 방법으로 성능이 가장 우수한 MRC (Maximal Ratio Combining)를 채택하고, M개의 가지를 갖는 레이크 수신기를 그림 4에 나타냈다<sup>[8]</sup>.

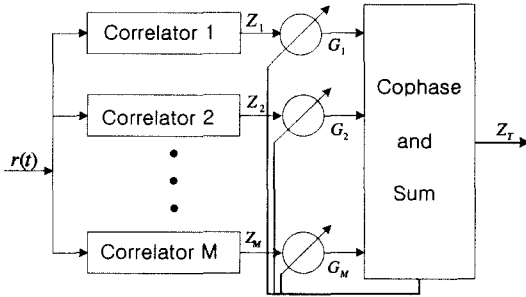


그림 4. M개의 가지를 갖는 레이크 수신기.

그림 4에서 M개의 상관기의 출력을 나타내는 랜덤 변수가  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_M$  일 때 각각의 출력에  $G_1, G_2, G_3, \dots, G_M$ 의 가중치 계수를 곱하고 이를 가지 이득이라 한다. 그러므로 i번째 상관기의 출력은 다음 식 (27)과 같다.

$$Z_i = S_i + I_i + N_i, \tag{27}$$

여기서  $S_i, I_i, N_i$ 는 각각 i번째 상관기의 출력에서의 신호의 크기, 간섭의 크기, 잡음의 크기를 나타내는 랜덤변수다. 그리고  $I_i$ 와  $N_i$ 는 상관기의 출력에서 서로 통계적으로 독립이므로  $I$ 와  $N$ 으로 나타낼 수 있다. 그리고 레이크 수신기의 출력을 나타내는 랜덤변수  $Z_T$ 는 다음 식 (28)과 같다.

$$\begin{aligned} Z_T &= G_1 Z_1 + G_2 Z_2 + \dots + G_M Z_M \\ &= S_T + I_T + N_T. \end{aligned} \tag{28}$$

MRC를 가정하면 식 (17), (24) 및 (26)의 통계치는 다음 식 (29), (30) 및 (31)과 같다<sup>[9]</sup>.

$$S_T = \sum_{i=1}^M G_i S_i, \tag{29}$$

$$Var[I_T] = Var[I] \sum_{i=1}^M E[G_i^2], \tag{30}$$

$$Var[N_T] = Var[N] \sum_{i=1}^M E[G_i^2], \tag{31}$$

여기서  $G_i$ 는 가지 이득이고,  $Var[I]$ 와  $Var[N]$ 은 각 상관기 출력의 간섭 성분과 잡음 성분의 분산을 나타낸다.

각 상관기 출력 신호의 자승의 대한 확률 밀도 함수는 레일리 랜덤 변수의 자승이므로 지수 분포를 갖는다. 그리고 MRC 다이버시티를 사용한 경우에 레이크 수신기의 출력 신호는 각 상관기의 출력 신호의 자승의 합이 되므로, 이 확률 밀도 함수는 지수 랜덤 변수의 합과 같고 다음 식 (32)으로 쓸 수 있다<sup>[10,11]</sup>.

$$f(s_T) = \frac{M}{\prod_{i=1}^M \xi_i} \sum_{i=1}^M \frac{\exp(-\xi_i s_T)}{\prod_{j=1, j \neq i}^M (\xi_i - \xi_j)}. \tag{32}$$

$Z_T$ 의 각 성분  $S_T, I_T, N_T$ 의 통계적 분포로부터  $S_T$ 가 주어진 가정하에서  $Z_T$ 에 대한 조건부 분포를 구하면 다음 식 (33), (34)와 같다.

$$\begin{aligned} E[Z_T | S_T] &= E[S_T + I_T + N_T] \\ &= s_T + E[I_T] + E[N_T] \\ &= s_T. \end{aligned} \tag{33}$$

$$\begin{aligned} Var[Z_T | S_T] &= Var[I_T + N_T] \\ &= Var[I_T] + Var[N_T], \end{aligned} \tag{34}$$

페이딩 채널이 시스템에 미치는 영향은 출력 신호의 확률 밀도 함수에 잘 나타나므로, 이 출력 신호에 대한 조건부 에러 확률을 이용하여 사용자 수에 대한 평균 에러 확률을 본 논문에서 유도하였다. 식 (33)과 (34)를 이용하여 조건부 평균 에러 확률을 구하면 다음 식 (35)와 같다.

$$\begin{aligned} f_{error}(s_T) &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{E[Z_T | S_T]}{\sqrt{Var[Z_T | S_T]}} \right) \\ &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{s_T}{\sqrt{Var[I_T] + Var[N_T]}} \right). \end{aligned} \tag{35}$$

그러므로 평균 에러 확률은 다음 식 (36)과 같다.

$$P_e = \int f_{error}(s_T) f(s_T) ds_T \tag{36}$$

식 (24)의 분산이 사용자 수에 따라 변화하기 때문에 위 식 (36)을 출력 신호의 크기  $s_T$ 로 적분하면 사용자 수에 따른 평균 에러 확률을 다음 식 (37)과 같이 구할 수 있다<sup>[13,12]</sup>.

$$P_e = \int f_{error}(s_T) f(s_T) ds_T$$

$$= \frac{1}{2} \prod_{i=1}^M \zeta_i \sum_{j=1}^M \frac{1}{\zeta_j \prod_{i=1, i \neq j}^M (\zeta_i - \zeta_j)} \left[ 1 - \operatorname{erfc} \left( \frac{\zeta_i}{2\beta} \right) \exp \left( -\frac{\zeta_i^2}{4\beta^2} \right) \right] \quad (37)$$

여기서  $M$ 은 전체 상관기의 수를 나타내고  $\frac{1}{\zeta_i}$ 은  $i$  번째 상관기의 출력 신호의 기대치를 나타낸다. 그리고  $\beta$ 는  $\frac{1}{\sqrt{\operatorname{Var}\{I_T\} + \operatorname{Var}\{N_T\}}}$ 이다.

#### IV. 모의 실험

본 장에서는 광대역 다중경로 페이딩 채널에서 서로 다른 대역폭을 갖는 W-CDMA 시스템의 출력 신호의 확률 밀도 함수와 성능을 본 논문에서 제안한 방법 즉, 고정된 채널에서 시스템의 대역폭에 따라 한 칩 구간의 다중경로 성분에 자기상관 함수의 기울기와 위상을 고려하고, 한 칩 구간내의 다중 경로의 수를 달리하는 방법을 사용하여 모의 실험을 하였다. 그러나 시스템의 대역폭에 관계없이 한 칩 구간 내에서 한 개의 다중경로 만을 고려하는 기존의 방법은 본 논문에서 제안한 방법과는 차별화 되기 때문에 모의 실험하지 않았다.

채널을 선형 필터로 가정하고, 이산 WSSUS 채널인 JTC 채널 모델을 광대역 다중 경로 채널 모델로 사용하였다. 그리고 시분변이고 주파수 선택적인 채널 환경을 고려하였다.

대역폭에 따른 시스템의 성능을 공정하게 비교하기 위하여 hybrid FDMA/CDMA 시스템을 채택하였다. 그리고 동일한 총 대역폭에서 사용자 수를 파라미터로 설정하여 성능을 비교하였다<sup>[2]</sup>. 또한 다중 경로 성분을 이용하여 시스템의 성능을 개선하기 위하여 MRC를 채용한 레이크 수신기를 사용하였다.

모의실험에서 CDMA 시스템의 대역폭에 따른 성능을 비교하기 1.25MHz, 10MHz을 갖는 시스템을 고려하고, 10[Kbps]의 데이터 전송율(data rate)을 고려했다.

본 논문에서는 JTC 채널 모델의 실외 지역에서 다중 경로 확산이 빈번히 발생하는 짧은 지연 확산을 갖는 두 가지 환경을 모의 실험 환경으로 선정하고 tapped delay line parameter를 표 1에 나타냈다<sup>[7]</sup>.

표 1. 보행자 환경과 차량 환경의 도심 지역에서 tapped delay line parameters.

Tap	보행자 환경		차량 환경	
	relative delay (nsec)	average power (dB)	relative delay (nsec)	average power (dB)
1	0	0	0	0
2	100	-3.6	200	-4.9
3	200	-7.2	500	-3.8
4	300	-10.8	700	-1.8
5	500	-18.0	2100	-21.7
6	700	-25.2	2700	-11.5

여기서 Tab의 수는 각 채널에 존재하는 전력 지연 프로파일의 수를 나타내고, 상대 지연은 전력 지연 프로파일이 존재하는 지연 시간이고, 평균 전력은 이 지연 시간에서 전력 지연 프로파일의 평균 전력을 나타낸다. 여기서 상대 지연 시간 (100[nsec])이 시간 해상도를 나타내므로 JTC 채널의 대역폭은 10MHz 임을 알 수 있다. 그러므로 시스템의 대역폭이 10MHz인 광대역 시스템은 한 칩 구간 내에 한 개의 다중 경로 성분만이 존재하고, 시스템의 대역폭이 1.25MHz인 협대역 시스템에서는 한 칩 구간 내에 여덟 개의 다중 경로 성분이 존재하고 페이저의 합으로 나타난다.

다음은 한 칩 구간 내의 다중 경로의 수를 달리 할 때 즉, 서로 다른 대역폭을 갖는 시스템의 출력 신호에 대한 통계적 분포를 구하기 위해 식 (32)와 수치적으로 방법으로 구한 경우의 출력신호의 확률 밀도 함수를 그림 5와 그림 6에 비교하였다. 이때 수치적인 방법으로 확률 밀도 함수를 구하기 위해 식 (18)을 사용해서 출력신호를 구하고, 이 출력 신호들의 히스토그램을 이용해서 확률 밀도 함수를 구했다.

아래의 그림 5와 그림 6에서는 광대역 시스템은 한 칩 구간 내에 한 개의 다중 경로 성분만이 존재하고 동위상 회로에 의해서 상관기 출력들을 더하므로 협대역 시스템보다 큰 신호 성분들이 많이 존재하는 것을 볼 수 있다. 간섭 성분이나 잡음 성분이 가우시안 분포를 갖는다고 가정하면 출력 신호의 확률 밀도 함수에 작은 출력 신호 성분들이 많이 존재할 때 즉, "0" 쪽으로 확률 밀도 함수의 형태가 치우쳐 있을 때 간섭 성분이나 잡음 성분에 영향을 많이 받기 쉽다. 그러므로 상대적으로 작은 출력 신호 성분들이 많이 존재하는 협대역 시스템이 광대역 시스템보다 성능이 열악할 것이라는 것을 예측할 수 있다. 그러나 광대역 시스템은 협대역

시스템에 비해 넓은 대역폭을 점유하므로 최종적인 성능 비교는 서로 동일한 대역폭을 점유한다는 가정 하에 성능을 비교해야 한다.

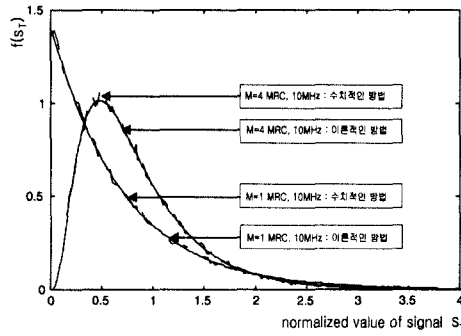


그림 5. 보행자 환경의 도심 지역에서 수신 신호의 확률 밀도 함수의 비교

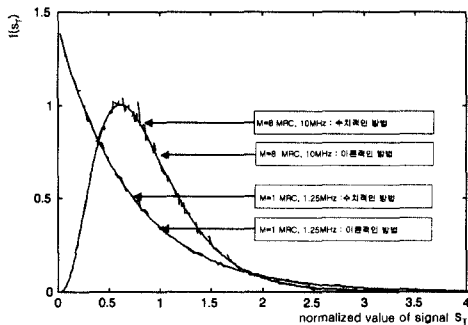


그림 6. 차량 환경의 도심 지역에서 수신 신호의 확률 밀도 함수.

다음으로 본 논문에서 이론적으로 구한 식 (37), 즉 출력 신호  $S_T$ 에 대한 조건부 에러 확률을 사용하여 구한 평균 에러 확률을 이용하여 시스템의 성능을 분석하였다. 식 (37)과 수치적인 방법으로 구한 경우의 사용자 수에 대한 평균 에러 확률을 서로 다른 대역폭을 갖는 두개의 CDMA 시스템에 대해 각각 비교, 분석하고 그림 7과 8에 나타냈다. 여기서 수치적인 방법의 평균 에러 확률은 식 (18)을 이용해서 수치적으로 구한 확률 밀도 함수와 식 (35)의 조건부 에러 확률을 식 (36)에 대입해서 구했다.

위의 모의실험 결과로부터 본 논문에서 이론적으로 구한 사용자 수에 대한 평균 에러 확률이 수치적으로 구한 사용자 수에 대한 평균 에러 확률과 일치함을 7과 8에서 볼 수 있다. 이 결과는 출력의 신호의 확률 밀도 함수를 나타내는 식 (32)이 시스템의 출력 신호의 분포를 정확하게 표현하기

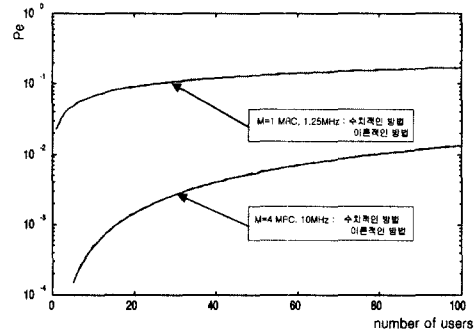


그림 7. 보행자 환경의 도심 지역에서 사용자 수에 대한 평균 에러 확률의 비교

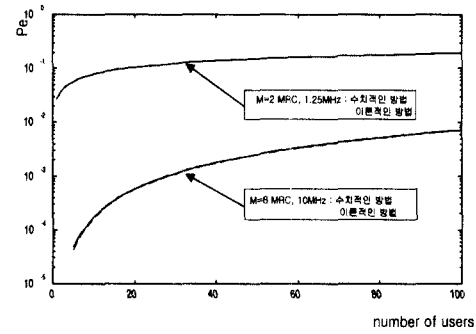


그림 8. 차량 환경의 도심 지역에서 사용자 수에 대한 평균 에러 확률의 비교

때문이다.

Milstein<sup>[2]</sup>은 전력 지연 프로파일로 지수형 MIP (Multipath Intensity Profile)를 사용하고 기존의 방법으로 성능을 분석하였다. 그리고 시스템의 대역폭에 따른 성능을 공정하게 비교하기 위해 hybrid FDMA/CDMA 시스템을 사용하였다. 그러나 본 논문에서는 보다 정확한 성능 분석을 위해 한 칩 구간 내의 다중 경로 성분들에 자기 상관 함수의 기울기를 도입하여 다중 경로 성분의 수를 달리하고 상대적인 랜덤 위상을 고려하여 실측 JTC 채널 모델에서 성능을 분석하였다.

본 논문에서 시스템의 대역폭에 따라 성능을 공정하게 비교하기 위해 사용한 hybrid FDMA/CDMA 시스템은 다음 그림 9와 같다<sup>[2]</sup>.

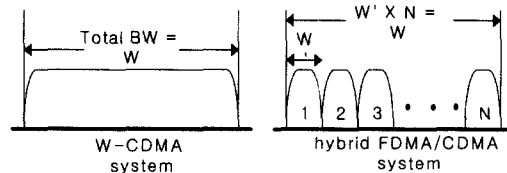


그림 9. W-CDMA과 hybrid FDMA/CDMA 시스템의 대역폭.



10MHz의 CDMA 시스템에서는 총 8개의 1.25MHz시스템이 존재하고 각 주파수별로 서로 다른 사용자를 수용할 수 있으므로 1.25MHz에서의 사용자 수를 8배하여 10MHz에서의 사용자 수와 비교하였다. 그리고 사용자 수에 대한 성능 비교의 결과를 표 2와 3에 나타냈다.

아래의 표 2와 3에서 보행자 환경보다는 차량 환경에서 10MHz 시스템의 성능이 1.25MHz 시스템 보다 우수하게 나타나는 것은 차량 환경에 많은 수의 전력 지연 프로파일들이 존재하므로 레이크 수신기에서 많은 다중 경로 성분들의 전력을 이용할 수 있기 때문이다. 그리고 광대역 시스템은 대역폭이 넓어서 해상도가 좋기 때문에 한 칩 구간 내에 단지 한 개의 다중 경로 성분만이 페이저로 나타나기 때문이다. 또한 동위상 회로를 사용하여 상관기의 출력을 더하므로 큰 출력 신호 성분들이 많이 존재하기 때문에 페이딩의 영향을 감소시킬 수 있다. 그러므로 광대역 시스템이 협대역 시스템 보다 성능이 우수한 것을 알 수 있다. 이와 같이 이용 가능한 많은 다중 경로 성분이 존재할 때 고정된 채널에서 분해능이 좋을수록 시스템의 성능이 보다 우수함을 알 수 있다.

표 2. 보행자 환경의 도심 지역에서 서로 다른 대역폭을 갖는 CDMA 시스템에 대한 평균 에러 확률의 비교

대역폭 사용자수	10MHz×1	1.25MHz×8
16	$1.0 \times 10^{-3}$	$3.1 \times 10^{-2}$
32	$2.9 \times 10^{-3}$	$4.4 \times 10^{-2}$
48	$5.2 \times 10^{-3}$	$5.3 \times 10^{-2}$
64	$7.6 \times 10^{-3}$	$6.1 \times 10^{-2}$
80	$1.0 \times 10^{-2}$	$6.7 \times 10^{-2}$

표 3. 차량 환경의 도심 지역에서 서로 다른 대역폭을 갖는 CDMA 시스템에 대한 평균 에러 확률의 비교

대역폭 사용자수	10MHz×1	1.25MHz×8
16	$3.9 \times 10^{-4}$	$3.7 \times 10^{-2}$
32	$1.3 \times 10^{-3}$	$5.2 \times 10^{-2}$
48	$2.4 \times 10^{-3}$	$6.2 \times 10^{-2}$
64	$3.8 \times 10^{-3}$	$7.1 \times 10^{-2}$
80	$5.2 \times 10^{-3}$	$7.8 \times 10^{-2}$

V. 결론

CDMA 시스템의 해석에서 일반적으로 CDMA

시스템의 대역폭에 관계없이 한 칩 구간 내에 일정한 평균 전력을 갖는 한 개의 다중 경로 성분만을 고려하지만, 본 논문에서는 고정된 채널에서 시스템의 대역폭에 따라 한 칩 구간 내의 다중 경로 성분들의 수를 달리하였다. 그리고 이 다중경로 성분들에 자기 상관 함수의 기울기와 상대적인 위상을 고려하여 페이딩의 영향을 해석하였다. 이러한 페이딩의 영향은 출력 신호의 통계적 분포에 나타나므로 시스템의 출력 신호에 대한 확률 밀도 함수를 구하였다. 그리고 이 출력 신호에 대한 조건부 에러 확률을 이용하여 사용자 수에 대한 평균 에러 확률을 유도하였다. 또한 한 칩 구간 내의 다중 경로 성분들의 수를 달리하기 위해 고정된 채널 대역폭에서 서로 다른 대역폭을 갖는 시스템에 대해 성능을 분석하였다.

모의 실험에서 실측 JTC 채널 모델을 광대역 다중 경로 채널 모델로 사용하고 JTC 채널 모델의 실의 두 개 지역을 모의 실험 환경으로 선정하였다. 이 환경에서 이론적인 방법과 수치적인 방법으로 구한 확률 밀도 함수와 사용자 수에 대한 평균 에러 확률을 CDMA 시스템의 대역폭에 따라 각각 비교 분석한 결과, 출력 신호의 확률 밀도 함수가 서로 일치하기 때문에 평균 에러 확률도 이론적인 방법과 수치적인 방법이 서로 일치함을 확인할 수 있었다. 그리고 대역폭에 따른 시스템의 성능을 공정하게 비교하기 위해 hybrid FDMA/CDMA 시스템을 사용하여 표 2와 3에서 비교한 결과, 차량 환경과 보행자 환경에서 10MHz 시스템이 1.25MHz 시스템 보다 성능이 우수함을 알 수 있다. 보행자 환경보다는 차량 환경에서 10MHz 시스템의 성능이 우수하게 나타나는 것은 차량 환경에 많은 수의 전력 지연 프로파일이 존재하므로 레이크 수신기에서 많은 다중 경로 성분들의 전력을 이용할 수 있기 때문이다. 이와 같이 hybrid FDMA/CDMA 시스템을 사용해서 서로 다른 대역폭을 갖는 시스템의 성능을 비교 분석한 결과, 이용 가능한 많은 다중 경로 성분이 존재할 때 고정된 채널에서 시스템의 분해능이 좋을수록 성능이 우수함을 알 수 있었다.

더 나아가, 본 논문에서 제안한 방법에 보다 실제적인 확산 부호의 자기상관함수의 기울기를 적용하여 평균 에러 확률을 유도하면 실제 시스템의 성능을 더 정확하게 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

[1] F. Adachi, M. Sawahashi, and H. Suda, "Wideband DS-SS-CDMA for Next-Generation Mobile Communications Systems," IEEE Commun. Mag., vol. 36, no. 9, pp. 56-69, Sept. 1998.

[2] T. Eng and L. B. Milstein, "Comparison of hybrid FDMA /CDMA Systems in frequency-selective Rayleigh Fading," IEEE J-SAC, vol. J-SAC 12, no. 5, pp. 938-951, June 1994.

[3] C. S. Kim, J. S. Lee and H. Jeong, "On the capacity of W-CDMA systems with different bandwidth over JTC channel model," Proc. of 3rd CIC, Korea, vol. 1, pp. 32-36, Aug. 1998.

[4] 이주석, 부수일, 김철성, "광대역 레일리 채널에서 서로 다른 대역폭을 갖는 W-CDMA 시스템의 성능에 관한 연구," 한국통신학회 논문지, vol. 24, no. 6A, pp. 767-774, 1999.

[5] 이주석, "광대역 다중경로 채널에서 W-CDMA 시스템의 대역폭에 따른 성능분석," 전남대학교 박사학위 논문, 2000. 2.

[6] G. L. Turin et al., "A statistical model of urban radio propagation," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. VT-21, pp. 1-9, Feb. 1972.

[7] Deployment/Testing Ad Hoc Group, "Joint Technical Committee(AIR) Standards Contribution," Sept, 1994. [1994 revision 6.]

[8] T. S. Rappaport "Wireless Communications," IEEE Press, first Edition, 1996.

[9] M. B. Pursley, "Performance evaluation far phase-coded spread spectrum multiple access communication-Part I: System analysis," IEEE Trans. on Comm., vol. COM-25, pp. 795-799, Aug. 1977.

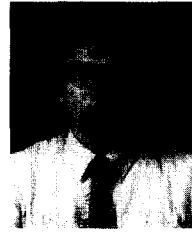
[10] A. Papoulis, Probability, Random Variables and Stochastic Processes, New York: McGraw-Hill, 1984.

[11] G. P. Efthymoglou, V. A. Aalo and H. Helmken, "Performance analysis of coherent DS-SS-CDMA systems in a Nakagami fading channel with arbitrary parameters," IEEE Trans. on Veh. Technol., vol. VT-46, no. 2, pp. 289-297, May 1997.

[12] I. S. Gradshteyn and L. M. Ryzhik, Tables of Integrals, Series and Products, New York: Academic Press, 1980.

이 주 석(Ju-Seog Lee)

정회원

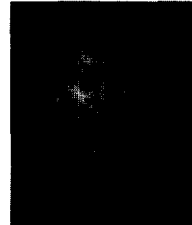


1985년 2월 : 조선대학교  
전자공학과 졸업  
1991년 2월 : 조선대학교  
전자공학과 석사  
2000년 2월 : 전남대학교  
전기공학과 박사  
1988년 : 대우전자

1992년~현재 : 순천제일대학 전자정보통신학부 교수  
<주관심 분야> 이동통신시스템, 신호처리, 부호화

오 동 진(Dong-Jin Oh)

정회원



1991년 2월 : 전남대학교  
전자공학과 졸업  
1993년 2월 : 전남대학교  
전자공학과 석사  
2000년 2월 : 전남대학교  
전기공학과 박사

1997년 2월~1998년 1월 :

Univ. of Adelaide 방문 연구원

2000년 3월~현재 : 전남대학교 정보통신공학부 강사  
<주관심 분야> 이동통신 시스템, MODEM 기술

김 철 성(Cheol-Sung Kim)

정회원



1977년 2월 : 서울대학교  
전자공학과 졸업  
1979년 2월 : 서울대학교  
전자공학과 석사  
1987년 12월 : University of  
Arizona 박사

1979년 12월~1983년 3월 : 국방과학연구소

1987년 11월~1989년 2월 : 한국전자통신연구소 이  
동통신 연구실장

1989년 3월~1995년 3월 : 전남대학교 전자공학과 교수

1995년 3월~2001년 3월 : 전남대학교 컴퓨터공학과  
교수

1997년 2월~1998년 2월 : UCSD, 방문교수

현재 : 전남대학교 정보통신공학부 교수

<주관심 분야> 이동통신시스템, CDMA, 디지털 통  
신방식