광 SCM 전송방식에서 MZ 변조기를 통과한 DS-CDMA 신호의 레이크 수신기에 의한 성능개선

Performance Improvement of DS-CDMA Signal through MZ Modulator in Optical SCM Signal Transmission with Rake Receiver

김회준 · 이도현 · 신성일 · 임명섭

Hoi-Jun Kim · Do-Hyun Lee · Sung-Il Shin · Myoung-Seob Lim

요 약

향후 CDMA(Code Division Multiple Access) 디지털 셀룰러 이동통신망에서는 안테나와 RF(Radio Frequency) 송 · 수신기만을 갖춘 다수의 소형 기지국들을 광섬유를 이용하여 중앙국으로 연결시키는 SCM(Subcarrier Multiplexing) 광링크 시스템의 수요가 많이 예상된다. 본 논문에서는 CDMA RF 신호전송을 위한 SCM 광링크 시스템의 성능분석을 위하여 Mach-Zehnder 변조기(MZM)의 전달함수를 입력신호가 3제곱이 되어 출력되는 비선형으로 모델링 하였다. 그리고 페이딩 채널 영향으로 다중경로 신호성분을 가지고 소형 기지국에 수신되는 여러 다중 가입자 CDMA 신호들이 MZM을 통과한 후 복조되는 과정에서 생기는 다중접속 간섭신호를 유도하여 성능분석을 하고 레이크 수신기를 이용하여 성능개선을 하였다.

Abstract

It is expected in the future that the demand of optical subcarrier multiplexing system, in which a number of small size base stations with only antenna and RF transmission are connected to central station using optical fiber, will be increased in the CDMA digital cellular mobile communication network. In this paper, in order to analysis the performance of optical SCM system for CDMA RF signal transmission, MZ modulator is modelled as a non-linear transfer function with cubic operation. The performance degradation due to multipath signals and other user signals through MZ modulator is analyzed and the performance is improved using the Rake receiver.

Key words : Optical SCM, MZ Modulator, CDMA, Rake Receiver

I. 서 론

최근에 이동통신 서비스가 대중화됨에 따라 이동통신 사용자 수가 점차 증가하고 있다. 따라서 한정된 주파수 자원에서 이동통신 시스템의 가입자 수용용량을 증대시키기 위해 기지국의 무선 서비스 구역(cell)의 서비스 반경이 줄어든 마이크로 셀, 피코 셀이 운영되고 있다. 특히, 대도시에서는 사람들이 많이 모이는 상업지역 중 전파음영 현상이 있는 지하공간이 많이 생겨나고 있다.

따라서 이러한 지역에 안테나와 RF신호 전송 장치만을 갖춘 저비용의 소형 기지국들을 설치하고, 광섬유로 중앙국으로 연결하는 SCM 광링크 시스템이 많이 연구, 개발되고 있다[1]~[3].

그러나, CDMA 이동통신 신호는 여러 명의 가입자가 동일한 주파수를 공유하고, 각 사용자의 신호

「본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-000-00257-0) 지원으로 수행되었음.」

전북대학교 전자정보공학부, 정보통신연구센터(Division of Electronic & Information Engineering, Chonbuk National University, Research Center of Information & Communication)

· 논 문 번 호 : 20030425-068

· 수정완료일자 : 2003년 10월 27일

가 페이딩 채널에서 다중경로를 거쳐 수신부에 수신되므로, 복조과정에서 원하는 가입자 신호의 다중경로 성분중 한 경로 신호를 복조할 때 자기신호의 다른 다중경로 신호성분 및 다른 가입자 신호들의 모든 다중경로 신호성분들로 인해 다중접속 간섭신호가 발생한다. 그리고 SCM 광링크 시스템에서는 RF 신호를 광신호로 변환하는 소자의 비선형성에 의해서 신호가 왜곡될 수 있다.

본 논문에서는 MZM에 입력신호가 3제곱이 되어 출력되는 비선형성과 다중접속 간섭신호가 존재하는 상황을 모델링 하였고, 레이크(rake) 수신기를 사용하여 성능이 개선됨을 보였다. 따라서 앞서 언급한 이동통신의 페이딩 채널에서 여러개의 다중경로 신호성분을 갖는 여러 사용자의 CDMA RF 신호가 안테나에서 수신되어 MZ 변조기를 통과한 후 CDMA 복조기에서 복조되는 과정에서의 간섭신호 성분을 유도하고, BER(Bit Error Rate) 값을 구해 성능 왜곡 현상을 분석하고 성능개선을 하였다.

Ⅱ. 이동통신망을 위한 SCM 광링크 시스템 구조

그림 1은 SCM 광링크 시스템의 전체적인 구조를 나타낸다. 각각의 마이크로 셀에 기지국이 있고 이 기지국을 통해 들어온 CDMA RF 신호가 전기/광 변조기를 통과한 후 광섬유를 통해서 전송된다. 그림 2는 SCM 광링크 시스템의 CDMA 신호의 다중화 방식을 나타낸 그림으로써 각각의 마이크로 셀에서 동일한 주파수를 사용한다. 이를 IF 대역으로 주파수

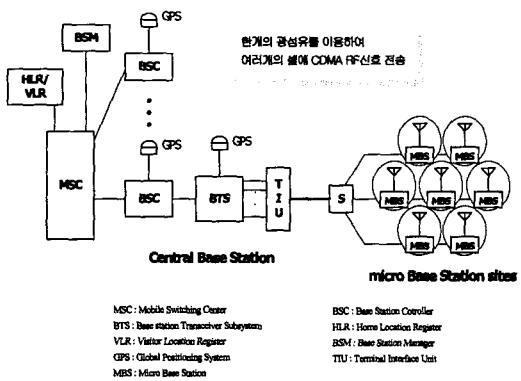


그림 1. SCM 광링크 시스템
Fig. 1. SCM optical link system.

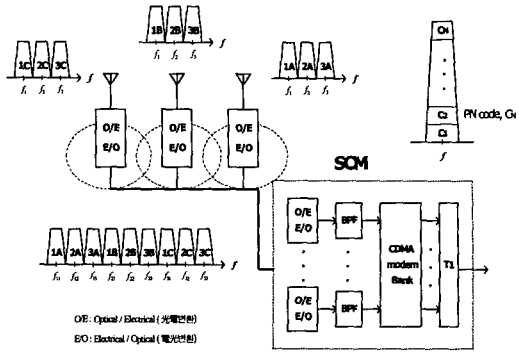


그림 2. SCM 광링크 시스템의 CDMA 신호 다중화
Fig. 2. Multiplexing of CDMA signals in SCM optical link system.

변환을 할 때 각각 다른 주파수를 곱하여 변환해 준다. 변환된 주파수는 전기/광 변조기를 통해 중앙 기지국으로 전송되고 중앙국에서 다시 광/전기 변조기를 통과한 후 기저대역 신호로 천이되어 원하는 신호를 처리하는 과정을 보이고 있다.

Ⅲ. MZ 변조기의 전달함수

광 SCM 방식에서 전기/광 변환소자로 쓰이는 MZ 변조기의 입출력 광 신호의 관계는 식 (1)과 같다[4],[5].

$$E_{out}(t) = \pm E_{in}(t) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_b + V_m(t)}{V_\pi}\right] \quad (1)$$

여기서 $E_{in}(t)$는 입력 광신호의 크기, V_b는 바이어스 전압, $V_m(t)$는 변조 전압이고 V_π는 MZ 변조기에서 위상을 π 만큼 천이시키는데 필요한 전압이다. 최대의 선형적인 변조 능률을 유도하기 위한 바이어스 포인트는 $V_b/V_\pi = 2k+1$이고, $k = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots$이다.

그림 3은 MZ 변조기의 특성 곡선을 나타내고 있는데 V_b/V_π 부분에서 최대의 선형적인 변조 능률을 유도할 수 있고 식 (1)에서 $V_m(t)$가 V_π 보다 상대적으로 작을 때 선형적인 변조가 이루어진다.

위의 식 (1)을 테일러 급수 전개식을 이용하여 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$E_{out}(t) = \pm E_{in}(t) \cdot \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(-1)^i}{(2i+1)!}\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_m(t)}{V_\pi}\right)^{2i+1} \quad (2)$$

여기서 E_{in} 앞의 부호는 $k = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \cdots$일때 양의 값을 가지며, $k = 0, \pm 2, \pm 4, \cdots$일 때 음의

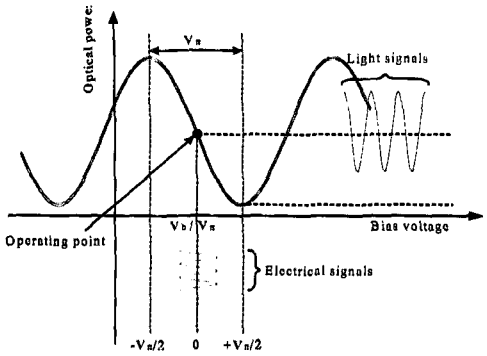


그림 3. MZ 변조기의 특성곡선
Fig. 3. Characteristic curve of MZ modulator.

값을 가진다.

만약 변조신호의 진폭이 작을 때, $V_m(t)/V_\pi \ll 1$ 이면

$$E_{out}(t) \approx \pm E_{in}(t) \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_m(t)}{V_\pi} \quad (3)$$

으로 표현된다. 그러나 변조신호가 V_π에 비해 아주 작으면 선형성은 좋아지나 신호대 잡음비가 나빠지므로 변조신호를 V_π에 비해 너무 작게 할 수는 없다. 따라서 변조신호의 진폭이 커서 입력 신호와 V_π의 크기비가 3.34일 때 고차 비선형에 의한 영향은 크기가 작아 시스템에 영향을 미치지 않는다고 가정하고 식 (2)의 i는 0에서 1까지만 고려해 주면 식 (4)와 같다[6].

$$E_{out}(t) = \pm E_{in}(t) \cdot \left\{ \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_m(t)}{V_\pi} - \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_m(t)}{V_\pi} \right)^3 \right\} \quad (4)$$

Ⅳ. 레이크 수신기를 이용한 성능개선

CDMA 전송방식의 장점은 레이크 수신기를 사용하여 다이버시티 효과를 얻는 것이다. 다중경로의 영향으로 신호들이 서로 다른 시간 차이를 가지고 수신기에 도착하게 되는데 레이크 수신기는 이들 다중경로 신호들을 처리해서 더 나은 성능을 얻을 수 있도록 해 준다. CDMA 방식에서는 수신 신호가 시간차를 가지고 수신이 되어도 서로 독립적인 신호로 분리 인식하므로 마치 시간 다이버시티와 같은 역할을 하는 것이다. 그 과정은 다중경로에 의해서 들어오는 각각의 신호를 별개로 분리해 내고 각각의 경로마다 신호 복조를 하고 역확산 과정을 거친 후, 이

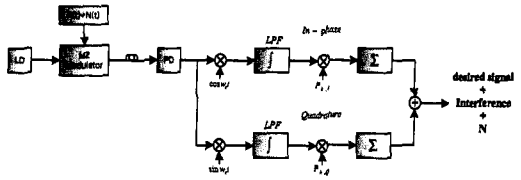


그림 4. 중앙국에서 MZ 변조기를 통과한 수신신호가 QPSK를 거쳐 복조되는 과정
Fig. 4. Demodulation procedure of the received signals through MZ modulator in the base station receiver.

들 신호들을 결합하여 디지털 신호를 얻게 된다.

그림 4와 같이 기지국으로부터 광 신호로 전송된 CDMA RF 신호가 MZ 변조기로 들어올 때 신호는 다음과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=1}^{N} \sum_{l=1}^{L} a_{k,l} d(t-\tau_{k,l}) [p_{I,k}(t-\tau_{k,l}) \cdot \cos\{w_c(t-\tau_{k,l}) + \phi_{k,l}\} + p_{Q,k}(t-\tau_{k,l}) \cdot \sin\{w_c(t-\tau_{k,l}) + \phi_{k,l}\}] + N(t) \quad (5)$$

N : 사용자의 수, L : 멀티패스의 수

$a_{k,l}$: k번째 사용자의 l번째 신호의 크기

d : 신호의 데이터

$p_{I,k}$: k번째 사용자의 동위상 경로(In-phase)쪽의 코드신호

$p_{Q,k}$: k번째 사용자의 직교위상 경로(Quadrature) 쪽의 코드신호

$\tau_{k,l}$: k번째 사용자의 l번째 신호의 랜덤 시간지연

$\phi_{k,l}$: k번째 사용자의 l번째 신호의 랜덤 위상

$N(t)$: 가산성 백색 가우시안 잡음

식 (5)에서 첫 번째 사용자($k=1$)의 j번째 다중경로 신호가 원하는 신호의 데이터이고 나머지 신호는 간섭신호라 할 때 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$r(t) = \frac{a_{1,j}}{\sqrt{2}} d(t-\tau_{1,j}) [p_{I,1}(t-\tau_{1,j}) \cos(w_c t + \theta_{1,j}) + p_{Q,1}(t-\tau_{1,j}) \sin(w_c t + \theta_{1,j})] + \sum_{\substack{k=1 \\ k,l \neq 1,j}}^{N} \sum_{l=1}^{L} \frac{a_{k,l}}{\sqrt{2}} d(t-\tau_{k,l}) \cdot [p_{I,k}(t-\tau_{k,l}) \cdot \cos\{w_c t + \theta_{k,l}\} + p_{Q,k}(t-\tau_{k,l}) \cdot \sin\{w_c t + \theta_{k,l}\}] + N(t) \quad (6)$$

식 (6)에서 계산을 간단히 하기 위해 수신측의 $-w_c\tau_{k,l}+\phi_{k,l}=\theta_{k,l}$로 놓았다. 위상 $\theta_{k,l}$은 각각 $[0,2\pi)$에서 균일한 분포를 가지면서 변환한다.

수신된 데이터를 복원하기 위해 식 (6)을 식 (4)에 대입하여 풀고, MZM을 통과해서 나온 신호에 캐리어를 곱하고 코드신호를 곱하여 역확산을 시킨 후 한 비트 주기동안 적분하고 데이터를 판정하면 된다. 따라서 첫 번째 사용자의 j번째 신호를 복조하는 과정은 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
r_{1,j} &= \sqrt{\frac{2}{T}}\int_{\tau_{1,j}}^{T+\tau_{1,j}}\left[\frac{\pi}{2}\frac{x(t)}{V_\pi}-\frac{1}{6}\frac{\pi^3}{8}\frac{x^3(t)}{V_\pi^3}\right]p_{I,1}(t-\tau_{1,j})\cos(w_ct-\theta_{1,j})\,dt \\
&+\sqrt{\frac{2}{T}}\int_{\tau_{1,j}}^{T+\tau_{1,j}}\left[\frac{\pi}{2}\frac{x(t)}{V_\pi}-\frac{1}{6}\frac{\pi^3}{8}\frac{x^3(t)}{V_\pi^3}\right]p_{Q,1}(t-\tau_{1,j})\sin(w_ct-\theta_{1,j})\,d \\
&=\sqrt{\frac{2}{T}}\int_{\tau_{1,j}}^{T+\tau_{1,j}}\left[\frac{\pi}{2}\frac{1}{V_\pi}(D_I(t)+I_I(t))-\frac{1}{6}\frac{\pi^3}{8}\frac{1}{V_\pi^3}\{D_I^3(t)+3D_I^2(t)I_I(t)\right. \\
&\qquad\left.+3D_I(t)I_I^2(t)+I_I^3(t)\}\right]p_{I,1}(t-\tau_{1,j})\cos(w_ct-\theta_{1,j})\,dt \\
&+\sqrt{\frac{2}{T}}\int_{\tau_{1,j}}^{T+\tau_{1,j}}\left[\frac{\pi}{2}\frac{1}{V_\pi}(D_Q(t)+I_Q(t))-\frac{1}{6}\frac{\pi^3}{8}\frac{1}{V_\pi^3}\{D_Q^3(t)+3D_Q^2(t)I_Q(t)\right. \\
&\qquad\left.+3D_Q(t)I_Q^2(t)+I_Q^3(t)\}\right]p_{Q,1}(t-\tau_{1,j})\sin(w_ct-\theta_{1,j})\,dt \\
&=\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left\{1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right\}d_0 \\
&+\sqrt{\frac{2}{T}}\int_{\tau_{1,j}}^{T+\tau_{1,j}}\left[\frac{\pi}{2}\frac{1}{V_\pi}\{I_I(t)\}-\frac{1}{6}\frac{\pi^3}{8}\frac{1}{V_\pi^3}\{3D_I^2(t)I_I(t)\right. \\
&\qquad\left.+3D_I(t)I_I^2(t)+I_I^3(t)\}\right]p_{I,1}(t-\tau_{1,j})\cos(w_ct-\theta_{1,j})\,dt \\
&+\sqrt{\frac{2}{T}}\int_{\tau_{1,j}}^{T+\tau_{1,j}}\left[\frac{\pi}{2}\frac{1}{V_\pi}\{I_Q(t)\}-\frac{1}{6}\frac{\pi^3}{8}\frac{1}{V_\pi^3}\{3D_Q^2(t)I_Q(t)\right. \\
&\qquad\left.+3D_Q(t)I_Q^2(t)+I_Q^3(t)\}\right]p_{Q,1}(t-\tau_{1,j})\sin(w_ct-\theta_{1,j})\,dt \\
&=\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left\{1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right\}d_0+U(j,l) \qquad (7)
\end{aligned}
$$

여기서

$$
\begin{aligned}
D_I(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}}a_{1,j}d(t-\tau_{1,j})P_{I,1}(t-\tau_{1,j})\cos(w_{ct}+\theta_{1,j}) \\
I_I(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}}a_{1,j}d(t-\tau_{1,j})P_{Q,1}(t-\tau_{1,j})\sin(w_{ct}+\theta_{1,j}) \\
&+\sum_{\substack{k=1\\k,\,l\neq1,j}}^{N}\sum_{l=1}^{L}\frac{a_{k,l}}{\sqrt{2}}d(t-\tau_{k,l})[p_{I,k}(t-\tau_{k,l})\cdot\cos\{w_ct+\theta_{k,l}\} \\
&\qquad+p_{Q,k}(t-\tau_{k,l})\cdot\sin\{w_ct+\theta_{k,l}\}]+N(t) \\
D_Q(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}}a_{1,j}d(t-\tau_{1,j})P_{Q,1}(t-\tau_{1,j})\sin(w_{ct}+\theta_{1,j}) \\
I_Q(t) &= \frac{1}{\sqrt{2}}a_{1,j}d(t-\tau_{1,j})P_{I,1}(t-\tau_{1,j})\cos(w_{ct}+\theta_{1,j}) \\
&+\sum_{\substack{k=1\\k,\,l\neq1,j}}^{N}\sum_{l=1}^{L}\frac{a_{k,l}}{\sqrt{2}}d(t-\tau_{k,l})[p_{I,k}(t-\tau_{k,l})\cdot\cos\{w_ct+\theta_{k,l}\} \\
&\qquad+p_{Q,k}(t-\tau_{k,l})\cdot\sin\{w_ct+\theta_{k,l}\}]+N(t) \\
U(j,l) &= \sqrt{\frac{2}{T}}\int_{\tau_{1,j}}^{T+\tau_{1,j}}\left[\frac{\pi}{2}\frac{1}{V_\pi}\{I_I(t)\}-\frac{1}{6}\frac{\pi^3}{8}\frac{1}{V_\pi^3}\{3D_I^2(t)I_I(t)\right. \\
&\qquad\left.+3D_I(t)I_I^2(t)+I_I^3(t)\}\right]p_{I,1}(t-\tau_{1,j})\cos(w_ct-\theta_{1,j})\,dt \\
&+\sqrt{\frac{2}{T}}\int_{\tau_{1,j}}^{T+\tau_{1,j}}\left[\frac{\pi}{2}\frac{1}{V_\pi}\{I_Q(t)\}-\frac{1}{6}\frac{\pi^3}{8}\frac{1}{V_\pi^3}\{3D_Q^2(t)I_Q(t)\right. \\
&\qquad\left.+3D_Q(t)I_Q^2(t)+I_Q^3(t)\}\right]p_{Q,1}(t-\tau_{1,j})\sin(w_ct-\theta_{1,j})\,dt
\end{aligned}
$$

이다.

따라서 위의 식 (7)을 가지고 수신되는 멀티패스 성분들에 가중치를 주면 최종 결정변수는 다음과 같다.

$$r=\sum_{j=1}^{M}w_{1,j}\,r_{1,j} \qquad (8)$$

여기에서 가중치 $w_{1,j}$는 다이버시티 결합 방법에 따라 결정값이 달라진다.

EGDC(Euqal Gain Diversity Combining)의 경우는 수신된 각각의 멀티패스 신호 성분에 대해 동일한 가중치를 주는 방식이고, SDC(Selection Diversity Combining)의 경우는 수신되는 신호들 중 파워가 가장 큰 성분만을 택하여 가중치를 주는 방식이며, MRC(Maximal Ratio Combining) 기법은 수신되는 멀티패스 성분들의 파워에 따라 각각 서로 다른 가중치를 주어서 결합하는 기법이다. 본 논문에서는 MRC 기법을 사용하여 시뮬레이션 한다.

식 (7)과 (8)로부터

$$r=\sum_{j=1}^{M}w_{1,j}\left[\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left\{1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right\}d_0+U(j,l)\right] \qquad (9)$$

식 (9)에서 간섭신호 $U(j,l)$의 분산항을 구하는데 있어 $|\tau_{k,l}-\tau_{1,j}|\le T$ 경우로써 마이크로 셀 환경으로 가정하였다.

(i) $I_I(t)$ 및 $I_Q(t)$항 각각의 분산

$$
\sum_{j=1}^{M}\sum_{\substack{k=1\\k,\,l\neq1,j}}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\frac{1}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi}{4}\frac{\sqrt{E_b^{k,l}}}{V_\pi}\right\}+w_{k,l}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2 \qquad (10)
$$

(ii) $3D_I^2(t)I_I(t)$ 및 $3D_Q^2(t)I_Q(t)$항 각각의 분산

$$
\sum_{j=1}^{M}\sum_{\substack{k=1\\k,\,l\neq1,j}}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\frac{1}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{9}{16}a_{1,j}^2\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2 \qquad (11)
$$

(iii) $3D_I(t)I_I^2(t)$ 및 $3D_Q(t)I_Q^2(t)$항 각각의 분산

$$
\sum_{j=1}^{M}\sum_{\substack{k=1\\k,\,l\neq1,j}}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\frac{\sin^2(2\theta_{k,l}-2\theta_{1,j})}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]
$$

$$\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{3}{8}a_{1,j}a_{k,l}\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2$$

$$+\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\frac{1}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{3}{8}a_{1,j}^2\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2$$

$$+\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\sum_{p=k}^{N}\sum_{q=l}^{L}\frac{2}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{3}{8}a_{1,j}a_{p,q}\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}w_{p,q}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2$$

$$+\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\sum_{p=k}^{N}\sum_{q=l}^{L}\frac{2}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{3}{16}a_{1,j}a_{p,q}\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}w_{p,q}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2 \quad (12)$$

(iv) $I_I^3(t)$ 및 $I_Q^3(t)$항 각각의 분산

$$\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\frac{1}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{3}{16}a_{1,j}^2\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2$$

$$+\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\frac{\cos^2(2\theta_{k,l}-2\theta_{1,j})}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{3}{8}a_{1,j}a_{k,l}\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2$$

$$+\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\sum_{p=k}^{N}\sum_{q=l}^{L}\frac{2}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{3}{16}a_{1,j}a_{p,q}\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}w_{p,q}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2$$

$$+\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\frac{1}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{3}{8}a_{k,l}\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2$$

$$+\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\sum_{p=k}^{N}\sum_{q=l}^{L}\frac{1}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{3}{4}a_{k,l}a_{p,q}\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}w_{p,q}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2$$

$$+\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\sum_{p=k}^{N}\sum_{q=l}^{L}\frac{1}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{3}{8}a_{k,l}a_{p,q}\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}w_{p,q}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2$$

$$+\sum_{j=1}^{M-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\sum_{p=k}^{N}\sum_{q=l}^{L}\sum_{m=p}^{N}\sum_{n=q}^{N}\frac{12}{N}[(1-\mu_{\varepsilon,l})^2+(\mu_{\varepsilon,l})^2]\left[w_{1,j}\left\{\frac{\sqrt{2}\pi^3}{8}\left(-\frac{1}{6V_\pi^3}\right)\frac{1}{16}a_{p,q}a_{m,n}\sqrt{E_b^{k,l}}\right\}+w_{k,l}w_{p,q}w_{m,n}\left\{\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)\right\}\right]^2 \quad (13)$$

여기서

$$N=\frac{T}{T_c},\qquad 0\le\mu_{\varepsilon,l}\equiv\left(\frac{\tau_{\varepsilon,l}}{T_c}\right)<1$$

따라서 식 (9)~(13)을 풀면 원하는 신호의 항(D), 간섭신호의 평균 분산항(σ_I^2), 그리고 잡음의 분산항(σ_N^2)이 다음과 같이 나온다[6]~[9].

$$D=\sum_{j=1}^{N}w_{1,j}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{1}{8V_\pi^2}\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{8}\right)d_0 \quad (14)$$

$$\sigma_I^2=\frac{4}{3N}\Bigg[\sum_{j=1}^{L-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\Big\{(w_{1,j}G_1+w_{k,l}H)^2+(w_{1,j}G_2\frac{9}{16}a_{1,j}^2+w_{k,l}H)^2+(w_{1,j}G_2\frac{3}{8}a_{1,j}a_{k,l}+w_{k,l}H)^2+(w_{1,j}G_2\frac{3}{8}a_{1,j}^2+w_{k,l}H)^2+(w_{1,j}G_2\frac{3}{16}a_{1,j}^2+w_{k,l}H)^2+(w_{1,j}G_2\frac{3}{8}a_{k,l}+w_{k,l}H)^2\Big\}$$
$$+\sum_{j=1}^{L-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\sum_{p=k}^{N}\sum_{q=l}^{L}\Big\{2(w_{1,j}G_2\frac{3}{8}a_{1,j}a_{p,q}+w_{k,l}w_{p,q}H)^2+4(w_{1,j}G_2\frac{3}{16}a_{1,j}a_{p,q}+w_{k,l}w_{p,q}H)^2+(w_{1,j}G_2\frac{3}{4}a_{k,l}a_{p,q}+w_{k,l}w_{p,q}H)^2+(w_{1,j}G_2\frac{3}{8}a_{k,l}a_{p,q}+w_{k,l}w_{p,q}H)^2\Big\}$$
$$+\sum_{j=1}^{L-1}\sum_{k=1}^{N}\sum_{l=j+1}^{L}\sum_{p=k}^{N}\sum_{q=l}^{L}\sum_{m=p}^{N}\sum_{n=q}^{N}\Big\{12(w_{1,j}G_2\frac{1}{16}a_{p,q}a_{m,n}+w_{k,l}w_{p,q}w_{m,n}H)^2\Big\}\Bigg] \quad (15)$$

$$\sigma_N^2=\sum_{j=1}^{N}w_{1,j}\left[N_0\frac{\pi^2}{4V_\pi^2}+N_0\frac{\pi^6}{64}\left(\frac{1}{6V_\pi^3}\right)^2\left\{\frac{45}{16}a_{1,j}^4+9a_{1,j}^2\sum_{\substack{k=1\\k,l\neq1,j}}^{N}\sum_{l=1}^{L}a_{k,l}^2+\frac{27}{8}\sum_{\substack{k=1\\k,l\neq1,j}}^{N}\sum_{l=1}^{L}a_{k,l}^4+\frac{9}{4}\sum_{\substack{k=1\\k,l=1,j}}^{N}\sum_{l=1}^{L}\sum_{p=k}^{N}\sum_{q=l}^{L}a_{k,l}^2a_{p,q}^2+N_0\frac{27}{4}a_{1,j}^2+N_0\frac{27}{4}\sum_{\substack{k=1\\k,l\neq1,j}}^{N}\sum_{l=1}^{L}a_{k,l}^2+N_0^2\frac{45}{4}\right\}\right] \quad (16)$$

여기서

$$G_1=\frac{\sqrt{2}}{4}\frac{\pi}{V_\pi}\sqrt{E_b^{k,l}}$$

$$G_2=\frac{\sqrt{2}}{8}\left(-\frac{\pi^3}{V_\pi^3}\right)\sqrt{E_b^{k,l}}$$

$$H=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{E_b^{1,j}}{2}}\frac{\pi}{V_\pi}\left(1-\frac{\pi^2a_{1,j}^2}{64V_\pi^2}\right)$$

이다.

식 (14)~(16)으로부터 SNR은 다음과 같다.

$$SNR=\frac{var(D)}{\sigma_I^2+\sigma_N^2} \quad (17)$$

식 (17)을 Q-함수를 이용하여 신호대 잡음비에 대

한 에러 확률을 구할 수 있다.

수신 신호의 크기는 레일레이 분포를 가지는데 이는 독립적인 두 개의 가우시안 랜덤 변수들의 합으로 이루어져 있고 이 변수들을 간단히 변화시키면 레일레이 pdf를 만들 수 있다. 따라서 에러 확률의 평균은 다음과 같다.

$$P_e = \int_0^{\infty} Q(\sqrt{2z}) \frac{1}{z^*} e^{-z/z^*} dz \tag{18}$$

여기서 $z = SNR$, $z^* =$ 평균SNR

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \tag{19}$$

V. 결과 분석

본 장에서는 앞장에서 구한 Q-함수를 이용하여 BER을 통해 성능분석 및 레이크 수신기를 이용한 결과를 그래프로 나타낸다. 시뮬레이션 환경은 다음과 같다.

① 다이버시티 결합 기법 중 MRC(Maximal Ratio Combining) 방법을 사용하므로 $w_{1,j} = \alpha_{1,j}$이다.

② 수신되는 멀티패스 성분들은 다음과 같이 선형적인 감쇄를 갖는다.

$$\alpha_l = \frac{\alpha_1}{l} \quad , \; l = 1, 2, \cdots, L \tag{20}$$

그림 5는 AWGN 하에서 사용자 1명에 다중경로가 3개이고 V_π값이 V_m의 진폭크기의 4배로 설정했을 때, finger 1개와 finger 3개를 이용했을 때의 MZ-SCM 시스템을 통과한 신호와 통과하지 않은 신호의 BER 특성을 비교하였다. 그림에서 no SCM은 IS-95 시스템이 AWGN 하에서 finger 1개를 사용할 때와 3개를 사용했을 때의 성능분석이고 MZ SCM은 MZM을 통과한 수신신호가 AWGN 하에서 IS-95 시스템을 통과할 때 finger 1개를 사용했을 때와 3개를 사용했을 때의 성능분석이다. 그림에서 보듯이 no SCM에서 finger 3개를 사용했을 때가 finger 1개를 사용할 때보다 1 dB 정도의 이득을 볼 수 있는데 MZ SCM에서도 finger 3개를 사용했을 때가 finger 1개를 사용했을 때보다 1 dB 정도의 이득을 볼 수 있었다. 그림 6은 페이딩 하에서의 BER 특성 곡선이다. 페이딩 하에서도 finger 3개를 사용했을 때가 finger 1개를 사용했을 때보다 1 dB 정도의 이득을 볼 수 있었다.

그림 7은 AWGN 하에서 사용자 2명에 다중경로가 각각 3개일 때, 사용자 1의 신호를 복원하기 위해 사용자 1의 신호에 대하여 finger 3개를 사용하고 나머지 사용자의 신호는 간섭신호라 할 때 MZM을 통과한 신호와 그렇지 않은 신호의 BER 특성을 나타내었다. 그림 8은 페이딩 하에서의 사용자 2명에 다중경로가 각각 3개일 때의 BER 특성 곡선이다.

그림 5에서 8까지 보이듯 레이크 수신기의 finger 3개를 사용하였을 경우 finger 1개를 사용하였을 때보다 1 dB 정도의 이득을 얻을 수 있었다.

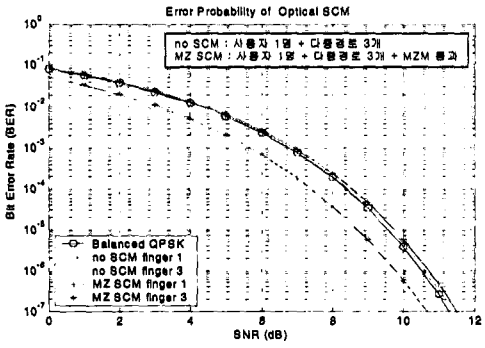


그림 5. 사용자 1명에 $V_\pi = 4V_m$일 때 finger 1개와 finger 3개를 사용했을 때의 신호의 BER 특성(AWGN 환경)

Fig. 5. BER curve of one-finger and three-finger used, when one-user and $V_\pi = 4V_m$(Under AWGN).

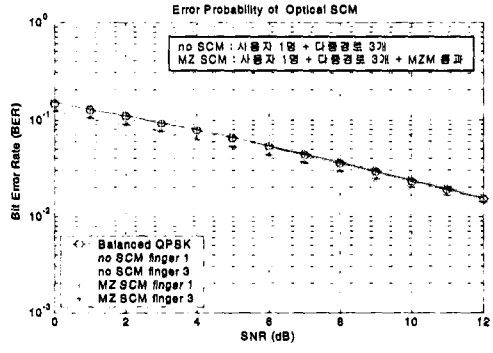


그림 6. 사용자 1명에 $V_\pi = 4V_m$일 때 finger 1개와 finger 3개를 사용했을 때의 신호의 BER 특성(페이딩 환경)

Fig. 6. BER curve of one-finger and three-finger used, when one-user and $V_\pi = 4V_m$(Under fading).

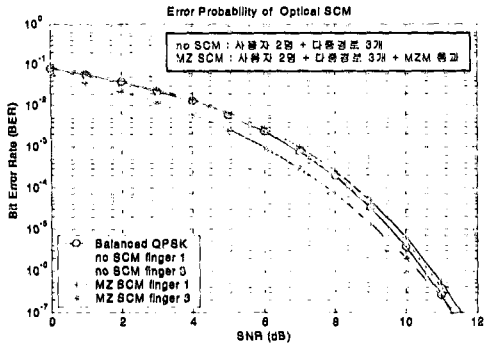


그림 7. 사용자 3명에 $V_\pi = 4V_m$일 때 finger 1개와 finger 3개를 사용했을 때의 신호의 BER 특성(AWGN 환경)

Fig. 7. BER curve of one-finger and three-finger used, when three-user and $V_\pi = 4V_m$(Under AWGN).

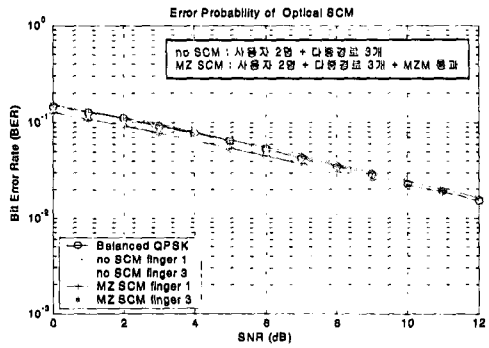


그림 8. 사용자 3명에 $V_\pi = 4V_m$일 때 finger 1개와 finger 3개를 사용했을 때의 신호의 BER 특성(페이딩 환경)

Fig. 8. BER curve of one-finger and three-finger used, when three-user and $V_\pi = 4V_m$(Under fading).

Ⅵ. 결 론

본 논문은 다중경로 페이딩 특성을 가지고 있는 다중접속 간섭신호인 CDMA RF 신호를 전송하는데 있어서 광소자인 MZ 변조기를 사용하는 광 SCM 방식에서 출력신호의 통계적 특성을 분석하여 전송성능을 분석하였다. 여러 개의 다중경로가 있는 페이딩 채널 및 여러 명의 가입자가 있는 환경에서 MZ 변조기의 전달함수 모델은 테일러 전개를 이용하여 입력신호가 3제곱이 되는 비선형 조건 하에서 신호대 잡음비를 유도하여 BER 특성을 파악한 결과 IS-95 시스템에서 레이크 수신기의 finger 3개를 사용하였을 경우 finger 1개를 사용하였을 때보다 1 dB 정도의 이득을 얻을 수 있는데 MZ 변조기를 통과한 신호 역시 finger 3개를 사용하였을 경우 1 dB 정도의 이득을 얻을 수 있었다.

본 논문에서 제시한 분석 방법 및 전송성능의 결과는 DS-CDMA 방식의 PCS 시스템은 물론 광대역 CDMA 방식을 채택하고 있는 IMT-2000 시스템의 광링크 설계에 효율적으로 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] R. Hui, B. Zhu, R. Huang, C. T. Allen, K. R. Demarest and D. Richards, "Subcarrier Multiplexing for High-Speed Optical Transmission", *J. Lightwave Technol.*, vol. 20, no. 3, pp. 417-427, Mar. 2002.

[2] T. E. Darcie, "Subcarrier Multiplexing for Multiple-access Lightwave Networks", *J. Lightwave Technol.*, vol. 5, no. 8, pp. 1103-1110, Aug. 1987.

[3] O. K. Tonguz, H. W. Jung, "Personal communications access networks using Subcarrier multiplexed optical links", *J. Lightwave Technol.*, vol. 14, no. 6, pp. 1400-1409, Jun. 1996.

[4] S. L. Zhang, P. M. Lane and J. J. O'Reilly, "Assessment of the nonlinearity tolerance of different modulation schemes for millimeter-wave fiber-radio systems using MZ modulators", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 45, no. 8, pp. 1403-1409, Aug. 1997.

[5] B. Wilson, Z. Ghassemlooy and I. Z. Darwazeh, "Analogue Optical Fibre Communications", *IEE Telecommunications series 32*, ch. 1, 1995.

[6] 김희준, 임명섭, "광 SCM 전송방식에서 MZ 변조기를 통과한 DS-CDMA 신호의 성능분석", 한국전자파학회 논문지, 13(4), pp. 331-341, 2002년 4월.

[7] John G. Proakis, *Digital Communications*, 3nd, McGraw-Hill, pp. 37-41, 1995.

[8] 전경훈, *Spread-Spectrum Communications*, 홍릉출판사, ch. 4, 1995년.

[9] Jhong Sam Lee, Leonard E. Miller, *CDMA Systems Engineering Handbook*, Artech House Publishers, ch. 9, 1998.

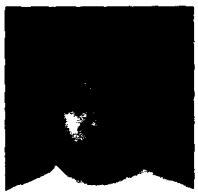
김 회 준

2001년 2월: 전북대학교 물리학/정보통신공학과 (이학사/공학사)
2003년 8월: 전북대학교 정보통신공학과 (공학석사)
[주 관심분야] CDMA 이동통신, Wireless LAN, 광 SCM 전송시스템

신 성 일

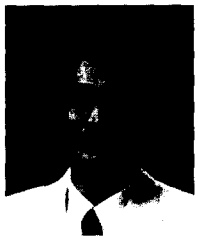
2002년 2월: 전북대학교 정보통신공학과 (공학사)
2002년 3월~현재: 전북대학교 정보통신학과 석사과정
[주 관심분야] CDMA Base-band Modem

이 도 현



2002년 2월: 전북대학교 물리학과 (이학사)
2002년 3월~현재: 전북대학교 정보통신학과 석사과정
[주 관심분야] CDMA 이동통신, ARM

임 명 섭



1980년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1982년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1990년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1984년 1월~1985년 9월: 대우통신 종합연구소.
1985년 9월~1996년 10월: 한국전자통신연구원 이동통신 기술연구단 신호처리연구실장
1996년 10년~현재: 전북대학교 전자정보공학부 부교수, 정보통신연구센터, 전북대학교 IDEC RC 센터장
[주 관심분야] Advanced CDMA Modem기술개발(W-CDMA, MC-CDMA, SSB-DS/CDMA, Cellular System Engineering), Wireless LAN용 DMT 변복조기, HomePNA 2.0 Modem기술개발, 통신신호처리 기술개발, 광SCM 전송시스템