

페이딩 환경에서 MRC 다이버시티를 이용한 다중반송파 CDMA 시스템 분석

Performance Analysis of Multicarrier CDMA Systems using MRC Diversity in Fading

이정도 · 오창현* · 강희조

Jeong-Do Lee · Chang-Heon OH* · Heau-Jo Kang

요 약

다중반송파 변조방식은 다중경로 페이딩에 강한 특성과 높은 주파수 이용 효율을 갖고 있는 기술이다. 본 논문에서는 같은 대역폭을 사용하는 MC DS-CDMA/MPSK와 DS-CDMA/MPSK 시스템을 MRC 다이버시티를 이용하여 오율 특성을 분석하였다. 그 결과 데이터 통신 서비스에서 요구하는 BER=10⁻⁵을 기준으로 한 경우, 다이버시티 기법을 사용하지 않은 MC-DS/CDMA BPSK 시스템은 E_b/N_o=25 dB, 다이버시티 기법을 사용한 경우는 E_b/N_o=12 dB를 얻었다.

Abstract

Multicarrier modulation is a promising technique for mobile communications system, since it has a strong immunity to multipath fading and increasing bandwidth efficiency. In this paper, the performance of MC DS-CDMA/MPSK has been analysed with that of DS-CDMA/MPSK system using MRC diversity in the same frequency bandwidth. The results show that with no diversity we can see that the BER of about 10⁻⁵ is achieved at E_b/N_o=25 dB, with diversity is reachable up to 12 dB.

I. 서 론

이동통신에 있어서 데이터를 고속으로 전송하는 경우, 주파수 선택성 페이딩으로 인해 심각한 심볼 간섭이 발생한다. 전송 특성 저하에 따른 대책으로 적응등화기 사용이 검토되고 있으나, 전송속도가 커지면 적응등화기에 의한 하드웨어 규모가 급격하게 커지는 단점을 갖고 있다^[1]. 이러한 단점을 보완하는 다중반송파 전송방식은 1990년대 들어 HDSL(1.6 Mbps), ADSL(1.536 Mbps), VHDSL(100 Mbps), HDTV 지상파 방송 등의 다양한 분야에 적용되

고 있으며, 3세대 통신인 IMT-2000에 적용할 예정이다. 따라서 본 논문에서는 다중반송파 전송방식을 사용하여, 주파수 선택성 페이딩에 의한 전송 특성 열화를 피하면서, 동영상을 고속 디지털 전송이 가능한 시스템을 분석한다^{[2],[3]}.

II. DS-CDMA 시스템

그림 1은 페이딩 환경에서 사용자수가 K명인 경우 DS-CDMA 시스템 모델이다. BPSK에서 k번째

동신대학교 전기전자공학과(Dept. of Electrical & Electronic Eng., Dongshin Univ.)

*한국기술교육대학교(School of Information Technology, Korea Univ. of Technology and Education)

· 논문 번호 : 20000628-071

· 수정완료일자 : 2000년 10월 9일

사용자의 2진 데이터 신호 $b_k(t)$ 와 $a_k(t)$ 는 다음과 같이 정의한다^{[4],[5]}.

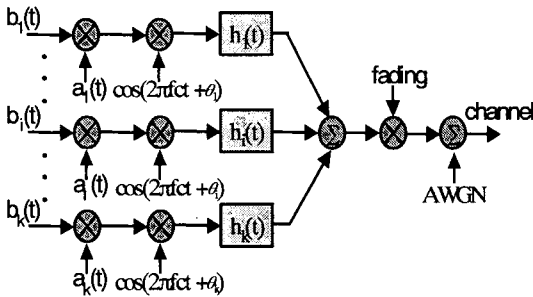


그림 1. DS-SS 송신 시스템 모델

$$b_k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} b_i^{(k)} p_{T_b}(t - iT_b) \quad (1)$$

$$a_k(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} a_i^{(k)} p_{T_c}(t - iT_c) \quad (2)$$

여기서 $p_T(t)$ 는 $[0, T]$ 에서 단일 구형파이고, $b_i^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 i 번째 비트 열이며, $a_i^{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 i 번째 칩 코드이다. 이때, DS-SS 시스템의 처리이득은 다음과 같다^[6].

$$G_{DS} = \frac{1/T_c}{1/T_b} = \frac{T_b}{T_c} \quad (3)$$

여기서, T_b 는 전송신호의 비트 주기이고, T_c 는 PN 코드의 칩 주기이다.

III. MC DS-SS 시스템

그림 2는 k 번째 사용자의 MC DS-SS 시스템 모델이다. 이때 k 번째 사용자의 n 번째 심볼 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$s_n^{(k)}(t) = \sqrt{\frac{E_s}{NT_s}} \cdot b_n^{(k)} \sum_{s=0}^{N-1} c_s^{(k)} e^{j2\pi \frac{s}{T_s} t} f(t - nT_s) \quad (4)$$

여기서 $b_n^{(k)}$ 는 k 번째 정보신호이고, $c_s^{(k)}$ 는 k 번째 의사 잡음 부호이다. 또한, T_s 는 심볼 주기에

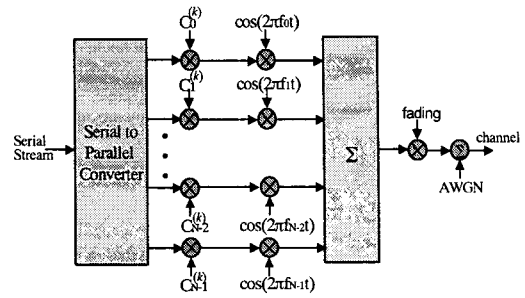


그림 2. MC DS-SS 송신 시스템 모델

고, E_s 는 심볼 에너지이며, $f(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_s \\ 0, & \text{기타} \end{cases}$, 는 각각 심볼 펄스 파형이다. 이때, 페이딩 채널을 통과한 수신 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{K-1} s_n^{(k)}(t - \tau_k) + n(t) \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} s_n^{(0)}(t) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{k=1}^{K-1} s_n^{(k)}(t - \tau_k) + n(t) \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $n(t)$ 는 양측 전력 스펙트럼밀도가 $N_0/2$ 인 백색 정규 잡음이고, τ_k 는 $0 \leq \tau_k < T_s$ ($k = 1, 2, 3, \dots, K-1$)에서 균일한 분포를 갖고, 서로 독립인 확률 변수로서 k 번째 사용자의 지연 시간이다. $\tau_0 = 0$ 으로 가정하면, 0번째 사용자의 n 번째 심볼에 대한 상관기 출력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} z_n^{(0)} &= \sqrt{E_s} b_n^{(0)} + \sqrt{E_s/N} \sum_{k=1}^{K-1} I_n^{(k)} \\ &\quad + \sqrt{E_s/N} \sum_{k=1}^{K-1} I_n^{(k)} + n_w \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 n_w 는 상관기를 통과한 잡음성분이며, $I_{n-1}^{(k)}$ 와 $I_n^{(k)}$ 는 다중접속 간섭성분이다. 이것을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$I_{n-1}^{(k)} = b_{n-1}^{(k)} \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{t=0}^{N-1} c_s^{(0)} c_s^{(k)} e^{-j2\pi \frac{s}{T_s} \tau_k} \cdot \frac{1}{T_s} \int_0^{\tau_k} e^{j2\pi \frac{(t-s)}{T_s} t} dt \quad (7)$$

$$I_n^{(k)} = b_n^{(k)} \sum_{s=0}^{N-1} \sum_{t=0}^{N-1} c_s^{(0)} c_s^{(k)} e^{-j2\pi \frac{s}{T_s} \tau_k} \cdot \frac{1}{T_s} \int_{\tau_k}^{T_s} e^{j2\pi \frac{(t-s)}{T_s} t} dt \quad (8)$$

또한, 정보신호가 T_b 간격으로 직렬 전송되는 경우, N 개의 병렬 가지로 변환되므로 심볼간격은 $T_s = N \cdot T_b$ 가 되고, 병렬 변환된 칩 간격은 T_c 라고 하면, $T_s = N \cdot T_b = G_{MC} \cdot T_c$ 가 된다. 이때 MC DS-CDMA 시스템의 점유대역폭 (B_{MC})은 다음과 같다.

$$B_{MC} = 1/T_c = \frac{G_{MC}}{T_s} \quad (9)$$

여기서 G_{MC} 는 MC DS-CDMA의 처리이득이고, N 은 부반송파 갯수이다. 전송률 $R = 1/T_s$ 일 때, DS-CDMA 시스템의 점유대역폭 (B_{DS})은 다음과 같다.

$$B_{DS} = 2R \cdot G_{DS} = \frac{2G_{DS}}{T_s} \quad (10)$$

윗식에 의해 MC DS-CDMA 신호는 같은 대역폭을 사용하는 심볼과 서로 겹치기 때문에 DS-CDMA 보다 처리이득이 약 2배 정도 크다^[6]. 백색 정규 잡음 환경에서 MC DS-CDMA 오율 성능을 알아보기 위해 식 (5)에서 $\tau_k (k=1, 2, \dots, K-1)$ 를 $\tau_0 = 0$ 을 대입하고, $S_k = s_n^{(k)}(t - \tau_k)$ 라고 가정하면, 백색 정규 잡음의 평균값은 0이고, 분산은 E_s/T_s 이므로, 잡음의 총합은 $\sum_{k=1}^{K-1} S_k + n_w$ 된다. 여기서 n_w 는 다음과 같이 쓸 수 있다^[7].

$$\begin{aligned} n_w &= (K-1) \frac{E_s}{T_s \cdot B_{MC}} + N_0 \\ &= (K-1) \frac{E_s}{N+1} + N_0 \end{aligned} \quad (11)$$

그러므로 BPSK와 QPSK의 비트에러율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{eMC-BPSK} &= Q\left[\sqrt{\frac{E_s}{n_w/2}}\right] \simeq \\ &Q\left[\left\{\frac{(K-1)}{2(G_{MC}+1)} + \frac{N_0}{2E_b}\right\}^{-1/2}\right] \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P_{eMC-QPSK} &= Q\left[\sqrt{\frac{E_s}{n_w}}\right] \simeq \\ &Q\left[\left\{\frac{(K-1)}{(G_{MC}+1)} + \frac{N_0}{2E_b}\right\}^{-1/2}\right] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$ 이다.

백색 정규 잡음 환경에서 DS-CDMA 오율 성능은 참고문헌 [8]에서 사용된 오율식을 바탕으로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$P_{eDS-BPSK} \simeq Q\left[\left\{\frac{(K-1)}{3G_{DS}} + \frac{N_0}{2E_b}\right\}^{-1/2}\right] \quad (14)$$

$$P_{eDS-QPSK} \simeq Q\left[\left\{\frac{2(K-1)}{3G_{DS}} + \frac{N_0}{2E_b}\right\}^{-1/2}\right] \quad (15)$$

IV. 페이딩 환경에서 시스템 성능 분석

본 논문에서는 단파로부터 마이크로파대에 이르는 무선통신로에서 발생하는 여러 가지 형태의 포락선 변동을 나타내는 나카가미 페이딩을 적용한다. 나카가미 페이딩을 받는 수신신호의 순시 진폭 R 에 대한 확률 밀도함수는 다음과 같이 나타낸다^[9].

$$p_N(R) = \frac{2m^m R^{2m-1}}{\Gamma(m)\Omega^m} \exp\left(-\frac{mR^2}{\Omega}\right) \quad (16)$$

단, $\Gamma(\cdot)$: 감마 함수, $\Omega/2$: 수신 평균전력, $m (\geq 1/2)$: 페이딩지수.

또한, 나카가미 페이딩 환경에서 CDMA 확률밀도 함수는 다음과 같다^[5].

$$p_{cdma}(\gamma) = \frac{m^m \gamma^{m-1}}{\Gamma(m)\gamma'} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma'}\right) \quad (17)$$

여기서 γ' 는 평균 수신신호 전력대 잡음 전력 비로 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma' = \left(\frac{2(K-1)}{3PG} + \frac{N_0}{2E_b}\right)^{-1} \quad (18)$$

단, K 는 사용자 수이고, PG 는 처리이득.

AWGN 환경에서 MPSK 에러 확률은 다음과 같다.

$$P_{eG} = \text{erfc}\left[\sqrt{\gamma} \cdot \sin\frac{\pi}{M}\right] \quad (19)$$

최종적으로 나카가미 페이딩 환경에서 MPSK CDMA 시스템의 오율식은 다음과 같이 구한다.

$$P_{eF-N} = \int_0^\infty P_{eG}(\gamma) p_{cdma}(\gamma) d\gamma$$

$$\begin{aligned}
 &= 1 - \sqrt{\frac{4 \sin^2(\pi/M) \gamma'}{\pi m}} \cdot \frac{\Gamma(m+1/2)}{\Gamma(m+1)} \\
 &\cdot \left[1 + \frac{\sin^2(\pi/M) \gamma'}{m} \right]^{-(m+1/2)} \\
 &\cdot {}_2F_1 \left[1, m+1/2 ; 3/2 ; \right. \\
 &\left. \frac{\sin^2(\pi/M) \gamma'}{m + \sin^2(\pi/M) \gamma'} \right] \quad (20)
 \end{aligned}$$

V. MRC 다이버시티 기법을 사용한 성능 개선

MRC 다이버시티 수신시 L 개의 다이버시티 출력은 다음과 같다.

$$\gamma = \sum_{k=1}^L \gamma_k \quad (21)$$

여기서 γ_k 는 각 다이버시티 가지의 신호 대 잡음비(SNR)이고, 각 다이버시티 가지에서의 페이딩과 잡음의 영향이 독립적이라면, 나카가미 페이딩 환경에서 수신신호 γ 의 순시 SNR에 대한 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다⁹⁾.

$$p_{mrc}(\gamma) = \frac{\gamma^{mL-1}}{\Gamma(mL)} \left(\frac{m}{\gamma'}\right)^{mL} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma'}\right) \quad (22)$$

단, $\Gamma(\cdot)$; 감마 함수, γ ; 순시 SNR, L ; 다이버시티 가지수.

나카가미 페이딩 채널에서 MRC 다이버시티 수신시 MPSK 신호의 심벌 오류식은 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned}
 P_{MRC} &= \int_0^\infty P_{eF-N} p_{mrc}(\gamma) d\gamma \\
 &= 1 - \int_0^\infty \text{erf}\left(\sqrt{\gamma} \sin \frac{\pi}{M}\right) \frac{\gamma^{mL-1}}{\Gamma(mL)} \left(\frac{m}{\gamma'}\right)^{mL} \exp\left(-\frac{m\gamma}{\gamma'}\right) d\gamma \\
 &= 1 - \frac{2 \sin \frac{\pi}{M}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\Gamma(mL)} \left(\frac{m}{\gamma'}\right)^{mL} \int_0^\infty \gamma^{mL-1/2} \\
 &\cdot \exp\left(-\left[\left(\sin \frac{\pi}{M}\right)^2 + \frac{m}{\gamma'}\right] \gamma\right) \cdot {}_1F_1\left(1; \frac{3}{2}; \gamma \sin^2 \frac{\pi}{M}\right) d\gamma \\
 &= 1 - \frac{2 \sin \frac{\pi}{M}}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(mL+1/2)}{\Gamma(mL)} \left(\frac{m + \left(\sin \frac{\pi}{M}\right)^2 \gamma'}{\gamma'}\right)^{-1/2} \\
 &\cdot {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, 1-mL; \frac{3}{2}; \frac{\left(\sin \frac{\pi}{M}\right)^2 \gamma'}{m + \left(\sin \frac{\pi}{M}\right)^2 \gamma'}\right) \quad (23)
 \end{aligned}$$

VI. 시스템 성능 비교 분석

본 논문에서는 같은 대역폭을 사용하는 DS-CDMA와 MC DS-CDMA 시스템 성능을 비교하였고, 시스템 성능 개선 기법으로는 MRC 다이버시티 기법을 사용하였다. 유도한 오류식을 비트 에너지 대 잡음 전력비 (E_b/N_o), 다중 접속 사용자수 (K), 처리이득 (G_{DS} , G_{MC}), 다이버시티 가지 (L) 등을 함수로 하여 계산한 결과를 그림 3~6으로 나타냈다.

그림 3에서는 사용자 5명, $m=3$ 그리고 $G_{MC}=512$ 인 경우, BER 10^{-5} 에서 다이버시티 기법을 사용

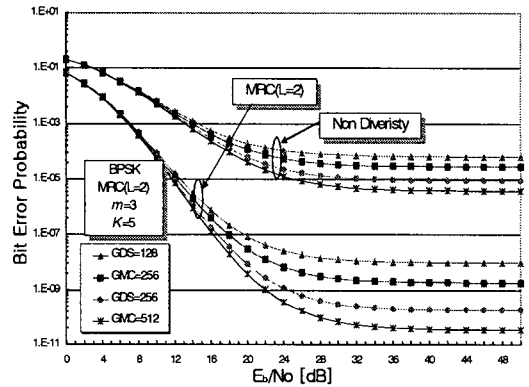


그림 3. MRC 다이버시티를 사용한 BPSK 시스템의 E_b/N_o 변화에 따른 오율성능(사용자 5명)

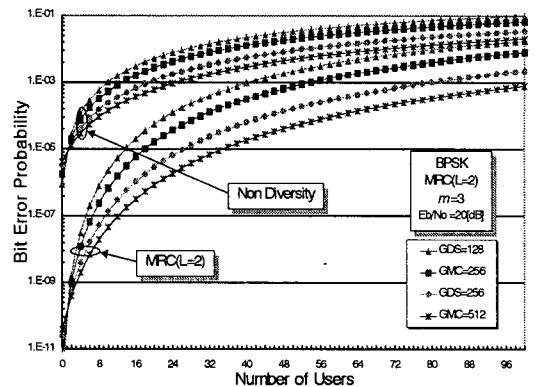


그림 4. MRC 다이버시티를 사용한 BPSK 시스템의 사용자 수 변화에 따른 오율성능($E_b/N_o=20$ dB)

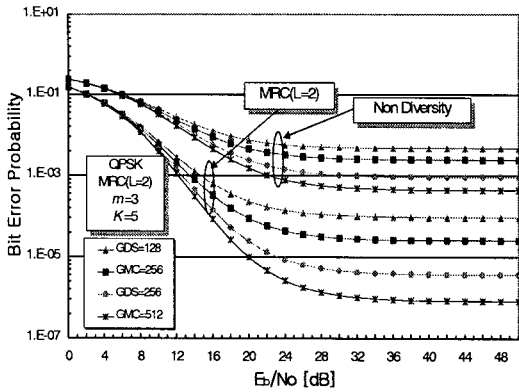


그림 5. MRC 다이버시티를 사용한 QPSK 시스템의 E_b/N_o 변화에 따른 오율성능(사용자 5명)

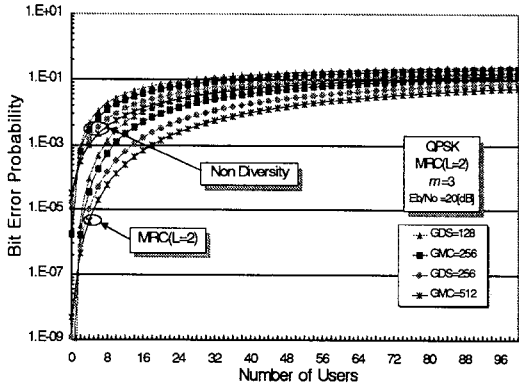


그림 6. MRC 다이버시티를 사용한 QPSK 시스템의 사용자 수 변화에 따른 오율성능($E_b/N_o=20$ dB)

하지 않은 경우는 $E_b/N_o=25$ dB, 다이버시티 기법을 사용한 경우는 약 12 dB 정도 필요함으로 다이버시티 이득 13 dB가 발생하였다.

그림 4에서는 $m=3$, $E_b/N_o=20$ dB일 때, 사용자 수에 따른 그래프이다. 사용자 수가 증가할수록 커브 곡선이 포화됨을 알 수 있다. 그리고, BER 10^{-5} 에서 다이버시티 기법을 사용하지 않은 경우 수용할 수 있는 사용자는 2명이고, 다이버시티 기법을 사용한 경우는 36명을 수용할 수 있었다.

그림 5에서는 사용자 5명, $m=3$ 그리고 $G_{MC}=512$ 인 경우, BER 10^{-3} 에서 다이버시티 기법을 사

용하지 않은 경우는 $E_b/N_o=22$ dB, 다이버시티 기법을 사용한 경우는 약 12 dB 정도 필요함을 알 수 있었다.

그림 6에서는 $m=3$, $E_b/N_o=20$ dB일 때, 사용자 수에 따른 그래프이다. BER 10^{-3} 에서 다이버시티 기법을 사용하지 않은 경우 사용자는 4명이고, 다이버시티 기법을 사용한 경우는 18명을 수용할 수 있었다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 대역폭 효율이 높은 MC-DS/CDMA 시스템과 DS-CDMA 시스템을 비교하였다. 그 결과 같은 대역폭에서 사용하는 경우, 전반적으로 반송파수가 증가함에 따라 처리이득이 커지므로 DS-CDMA/MPSK 신호 보다 MC DS-CDMA/MPSK 신호가 오율 특성이 좋음을 알 수 있었고, BER= 10^{-5} 을 기준으로 한 경우, MC-DS/CDMA BPSK 시스템은 13 dB정도 다이버시티 이득을 얻었으며, BER= 10^{-3} 을 기준으로 한 경우, MC-DS/CDMA QPSK 시스템은 10 dB 정도 다이버시티 이득을 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] S. B. Weinstein and P. M. Ebert, "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete fourier transform," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 19, no. 5, pp. 628-634, Oct., 1971.
- [2] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission : An idea whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 28, no. 3, pp. 5-14, May, 1990.
- [3] S. Hara and R. Prasad, "Overview of multicarrier CDMA," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 35, no. 12, pp. 126-133, Dec., 1997.
- [4] R. C. Dixon, *Spread Spectrum Systems*, Wiley-Interscience, 1976.
- [5] G. R. Cooper, C. D. McGillem, *Modern Communication and Spread Spectrum*, New York :

McGraw-Hill, 1986.

- [6] S. Kondo and L. B. Milstein, "On the performance of multicarrier DS CDMA system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, no. 2, pp. 238-246, Feb., 1996.
- [7] P. Fettweis, *Multi-Carrier Spread-Spectrum*, Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [8] M. B. Pursley, "Performance evaluation for

phase-coded spread-spectrum multiple-access communication-part I : System analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 25, no. 8, pp. 795-799, Aug., 1977.

- [9] E. Al-Hussaini and A. Al-Bassiouni, "Performance of MRC diversity systems for the detection of signals with Nakagami fading," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 33, no. 12, pp. 1315-1319, Dec., 1985.

이 정 도



1967년 5월 3일생
 1994년 2월: 동신대학교 전자공학과(공학사)
 1996년 2월: 동신대학교 전자공학과(공학석사)
 2000년 2월: 동신대학교 전기전자공학과(공학박사)

2000년 5월~현재: (주)SP컴텍 연구소 전임연구원
 [주 관심분야] 이동통신, 위성통신, 밀리미터파 통신

강 희 조



1994년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과(공학박사)
 1994년 7월~1995년 12월: 전자통신연구원 위성망연구소 초빙연구원
 1996년 8월~1997년 8월: 오사카대학교 공학부 통신공학과 post

Doc.

1998년 3월~1998년 8월: 전자통신연구원 무선이동위성통신시스템 연구소 초빙연구원
 2000년 6월~현재: 한국전자과학회 호남지부 지부장
 1990년 3월~현재: 동신대학교 전기전자공학부 교수
 [주 관심분야] 무선통신, 이동통신 및 위성통신, 환경전자공학, 무선광통신, 밀리미터파 통신, ITS 통신시스템, 멀티미디어 통신, PELD

오 창 현



1965년 2월 10일생
 1988년 2월: 한국항공대학교 항공통신정보공학과(공학사)
 1990년 2월: 한국항공대학교 대학원 항공통신정보공학과(공학석사)
 1996년 2월: 한국항공대학교 대학원 항공전자공학과(공학박사)

1993년~1999년 2월: 삼성전자 CDMA 개발팀(선임연구원)

1999년 3월~현재: 한국기술교육대학교 정보통신공학과 조교수

[주 관심분야] IMT-2000, 이동통신, 무선통신