

ZCZ 확산부호 설계 및 분석

정회원 Jia Hou*, 박주용**, 황기연*, 김정수*, 이문호*

Analysis of Spreading code design for Zero Correlation Zone

Jia Hou*, Ju Yong Park**, Gi Yean Hwang*, Jung Su Kim*, Moon Ho Lee* *Regular Members*

요약

ZCZ(Zero Cross-correlation Zone) 부호(code)는 다중 사용자 CDMA 시스템에서 낮은 상관 영역(low correlation zone) 제공하고 상호 채널간섭(co-channel interference)을 제거하는 좋은 성능을 보이고 있다. 본 논문에서는 복소 확산기술(complex spreading scheme)을 이용해 이와 같은 상관관계의 성질을 갖는 확산 부호설계(spreading code design)를 분석하고 그들의 효율성을 이동통신시스템에 적용한다. 또한 자켓 다위상 비트열(Jacket polyphase sequence)을 예로 들어 개선된 성능과 일반 성질을 제시했다.

ABSTRACT

Zero Cross-correlation Zone (ZCZ) code has a good performance in Multi-user CDMA system to get low correlation zone and reject co-channel interference. In this paper, we do analysis of spreading code design to obtain this kind of property of correlations with a complex spreading scheme and denote their effective performance for mobile communication system. In addition, a Jacket polyphase sequence is as an example to show the improved performance and regular properties.effective performance for mobile communication system. In addition, a Jacket polyphase sequence is as an example to show the improved performance and regular properties.

I. 서론

ZCZ(Zero Cross-correlation Zone) 부호는 Suehiro 와 Fan에 의해 제안된 상향링크(uplink)와 하향링크(downlink) 신호 설계를 위한 혁신적인 확산 변조 방법이다^{[1][2]}. 본 논문에서는 확산코드 설계와 상관 함수를 결합하여 CDMA 시스템을 위한 다중 사용자 시스템의 분해 기법(analysis scheme)을 제안하는데, 이 방법은 remapping 부호 부분과 DFT 나 Walsh 부호처럼 직교변환 부분으로 확산부호가 나누어진다. 이러한 아이디어에 근거하여 새로운 코드를 설계 하기 위해 두 개의 예제를 제시하는데, 하나는 ZCZ 코드와 같은 성능을 갖는 복소확산(complex spreading) ZCZ 부호이고 다른 하나는 ZCZ 부호와 유사 하지만 보다 큰 ZCZ를 갖는 Jacket ZCZ 부호이다.

II. ZCZ Code의 개요

이동통신 응용의 관점에서 보면 비트 열(sequence)은 좋은 상호상관(cross-correlation) 성질을 갖는 것이 중요하다. 일반적인 DS/CDMA 시스템에서 확산부호는 아주 낮은 자기상관(auto-correlation)과 상호상관 sidelobe를 갖도록 설계해야 한다. 그러나 그와 같은 설계는 불가능하기 때문에 상관영역이 영(0)인 비트 열을 만드는 것이 필요하다^[3]. 최근 그와 같은 방법이 [4]에 의해 제안되었다. 먼저, F_N 을 다음과 같은 N-포인트 DFT 행렬로 가정한다.

$$F_N = \begin{bmatrix} W_N^0 & W_N^0 & \Lambda \\ W_N^0 & W_N^{-1} & \Lambda \\ M & M & W_N^{-(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

* 전북대학교 정보통신공학과 다차원이동통신 연구실, 정보통신연구센터(hjstock@163.net, infoguy@orgio.net, moonho@chonbuk.ac.kr)

** 서남대학교 전기전자멀티미디어공학부 (jypark@tiger.seonam.ac.kr)

논문번호 : 020069-0207, 접수일자 : 2002년 2월 7일

* 본 연구는 한국학술진흥재단 선도연구자 지원 연구과제(2001-041-E00207) 지원으로 수행되었습니다.

여기서 $W_N = \exp(ejx/N)$.

ZCZ 비트 열은 식 (2)처럼 kronecker 함수처럼 얻어질 수 있다.

$$F_N \otimes u = \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ \vdots \\ M \\ vN \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 u 는 식(3)과 같이 DFT행렬의 요소에 의해 표시된다.

$$u = [W_N^0 W_N^0 \Lambda W_N^0 W_N^{-1} W_N^{-2} \Lambda W_N^{-(N-1)} W_N^0 \Lambda W_N^{-(N-1)} \Lambda W_N^{-(N-1)(N-1)}] \quad (3)$$

그래서 v 가 우리가 계산하는 ZCZ 부호이다. 예를 들어 $N = 4$ 이고 u 가 다음과 같을 때

$$u = (1,1,1,1,-j,-1,j,1,-1,1,-1,1,j,-1,-j) \quad (4)$$

ZCZ 부호는 식 (5)와 같이 구해진다.

$$v = \begin{bmatrix} v1 \\ v2 \\ v3 \\ v4 \end{bmatrix} = F_4 \otimes u \quad (5)$$

여기서,

$$v1 = (1,1,1,1,-j,-1,j,1,-1,1,-1,1,j,-1,-j,1,1,1,1,-j,-1, \\ j,1,-1,1,-1,j,-1,-j,1,1,1,1,-j,-1,j,1,-1,1,-1,j, \\ -1,-j,1,1,1,1,-j,-1,j,1,-1,1,-1,j,-1,-j) \\ v2 = (1,1,1,1,-j,-1,j,1,-1,1,-1,1,j,-1,-j,-j,-j, \\ -j,-j,-1,j,1,-j,j,-j,j,-j,1,j,-1,-1,-1, \\ -1,-1,-1,j,1,-j,-1,1,-1,1,-1,-j,1,j,j,j, \\ j,j,j,1,-j,-1,j,-j,j,-j,j,-1,-j,1)$$

M
M

이고, 따라서 주기적인 ZCZ 비트 열을 얻을 수 있다.

III. ZCZ 확산 코드 설계의 분석

그림 1 에 보인 것처럼 복소 확산 모델에 대해

ZCZ 부호를 설계하기 위해 상관함수의 구성한다.

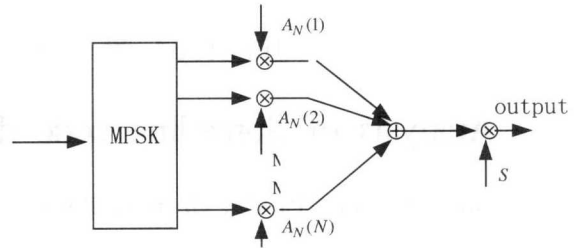


그림 1. 복소 확산 다중 사용자 시스템

먼저, d_i 는 MPSK로부터 출력되는 데이터이고, M 은 다중 사용자의 메시지를 처음 확산시킨 $A_N(i)$ 의 출력이다. 따라서 식(6)과 같이 표시할 수 있다.

$$M = \sum_{i=1}^N d_i \otimes A_N(i) \quad (6)$$

이와 같은 방법으로 remapping 부호는 첫 번째 확산 함을 수정하여 전송한다. 이 함수는 다음 식(7)과 같이 표시할 수 있다.

$$M \otimes S = (\sum_{i=1}^N d_i \otimes A_N(i)) \otimes S \\ = (d_1 \otimes A_N(1) \otimes S + d_2 \otimes A_N(2) \otimes S + \Lambda + d_N \otimes A_N(N) \otimes S) \quad (7)$$

예를 들어, 식(6)에 근거하여 $N=2$ 인 경우, A_N 은 다음과 같이 2x2 Walsh 함수(Walsh function) 행렬로 놓을 수 있다.

$$A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

이때 $A_M(1)$ 과 $M \otimes S$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_N(1) = [1 \ 1], A_N(2) = [1 \ -1] \\ M \otimes S = d_1 \otimes [1 \ 1] \otimes S + d_2 \otimes [1 \ -1] \otimes S \\ = d_1 \otimes [S \ S] + d_2 \otimes [S \ -S] \quad (8)$$

직교변환(orthogonal transform)에서 자기상관은 최대값, 상호상관은 영(zero)값을 갖는다는 점을 고려하면, ZCZ 구조는 식(9)와 같이 수식화 할 수 있다.

$$ZCZ = [R(AA) \ R(AB) \ R(BB) \ R(BA)] \quad (9)$$

여기서 R(AA)와 R(BB)는 직교변환의 경우 자기상관 값을 의미하고, R(AB)와 R(BA)는 상호상관 값을 나타낸다. 또한, remapping 부호 S를 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = [A_N(1)A_N(2)] = [111-1] \quad (10)$$

여기서

$$A_N(1) = [a, b] = [a \ a]$$

$$A_N(2) = [c \ d] = [1 \ -1], S = [a \ b \ c \ d] \text{이다.}$$

이때 식(8)은 식(11)처럼 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} & d_1 \otimes [a \otimes S \ b \otimes S] + d_2 \otimes [c \otimes S \ d \otimes S] \\ &= d_1 \otimes [a \cdot a \cdot a \cdot b \cdot a \cdot c \cdot a \cdot d \quad b \cdot a \cdot b \cdot b \cdot b \cdot c \cdot b \cdot d] \\ &+ d_2 \otimes [c \cdot a \cdot c \cdot b \cdot c \cdot c \cdot c \cdot d \quad d \cdot a \cdot d \cdot b \cdot d \cdot c \cdot d \cdot d] \\ &= d_1 \otimes c1 + d_2 \otimes c2 \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 c1 과 c2 의 구조는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} c1 &= [a \cdot a \cdot a \cdot b \cdot a \cdot c \cdot a \cdot d \quad b \cdot a \cdot b \cdot b \cdot b \cdot c \cdot b \cdot d] \\ &= [R_1(A_N(1)A_N(1)), R_1(A_N(1)A_N(2)), R_2(A_N(1)A_N(1)), R_2(A_N(1)A_N(2))] \\ c2 &= [c \cdot a \cdot c \cdot b \cdot c \cdot c \cdot c \cdot d \quad d \cdot a \cdot d \cdot b \cdot d \cdot c \cdot d \cdot d] \\ &= [R_1(A_N(2)A_N(1)), R_1(A_N(2)A_N(2)), R_2(A_N(2)A_N(1)), R_2(A_N(2)A_N(2))] \end{aligned}$$

이러한 두 개의 코드는 그림 2에 나타난 것처럼 자기상관과 상호상관 값에 의해 식(12)와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} c1 &= [auto1, cross, auto1, cross], \\ c2 &= [cross, auto2, cross, auto2] \end{aligned} \quad (12)$$

직교함수는 식(13)처럼 자기상관과 상호상관 함수의 곱이 영(zero)이 된다.

$$cross \cdot auto = 0 \quad (13)$$

식(12)의 코드에 대해 상호상관 함수는 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R(c1, c2) = 0 \quad (14)$$

따라서 원하는 비트 열이 얻어지며, 그들의 상관 값은 그림 2에 보인 바와 같다. 성능 또한 그림 3에 보인 것처럼 PN 부호보다는 우수하고 ZCZ 부호와는 유사할 정도로 우수함을 보이고 있다.

더욱이 이 상관 판정(correlation's criterion)을 이용하면 다중 사용자 CDMA 시스템을 위한 다른

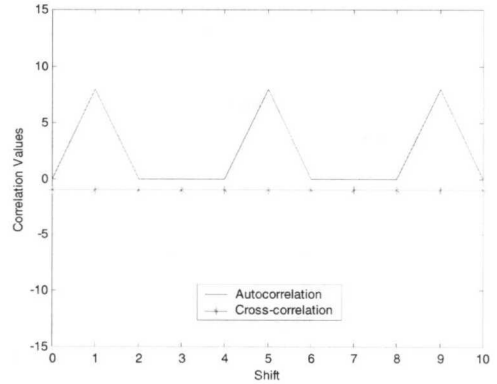


그림 2. ZCZ 부호의 복소 확산으로부터 얻은 상관값

유용한 부호들을 설계할 수 있다. 예를 들어, ZCZ 부호 또한 그의 한 응용 예라 할 수 있는데 다음과 같이 증명할 수 있다. DFT행렬로부터 ZCZ 부호는 식(15)와 같이 얻어진다.

$$v = F_4 \otimes u \quad (15)$$

$$\begin{aligned} K &= \sum_{i=1}^N d_i \otimes v(i) \\ &= \sum_{i=1}^N d_i \otimes F_4(i) \otimes u \\ &= \left(\sum_{i=1}^N d_i \otimes F_4(i) \right) \otimes u \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 F_N 은 A_N 처럼, μ 는 S 처럼 생각할 수 있다. 반면에 ZCZ 부호는 상관함수 분석의 설계판정

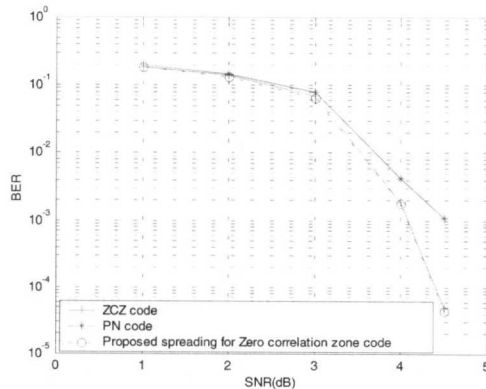


그림 3. Rayleigh 페이딩하에서 PN부호와 제한한 ZCZ 확산부호 및 4-iteration 1024비트의 터보디코더의 ZCZ부호의 성능

(design criterion)으로부터 얻어지는 특별한 경우로 볼 수 있다. 따라서 변환(transform)이나 직교행렬(orthogonal matrix)에 근거하여, 상관 함수에 따라 그들을 다시 매핑(mapping)하기 위해 ZCZ 부호, complementary 부호 등과 같은 수준의 성능을 가질 만한 새로운 부호를 설계할 수 있다.

IV. 확산 부호의 설계

본 논문에서는 상관함수를 고려하여 다중 레벨(multi-level) 전송을 위한 새로운 poly-phase 비트열을 설계하고자 한다.

Jacket 변환은 [5][6]에 의해 fast 알고리즘이 일 반화되어 있어 여기에 도입하면 용이하게 적용될 수 있다. 먼저, poly-phase Jacket 변환의 경우 자기 상관과 상호상관을 고려하여 식(9)와 같이 부호를 얻을 수 있다. 그리고 기본 행렬은 식 (17)처럼 놓을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \otimes J_N \quad (17)$$

식 (17)로부터 식(18)과 같이 정의되는 새로운 비트열을 일반화 할 수 있다.

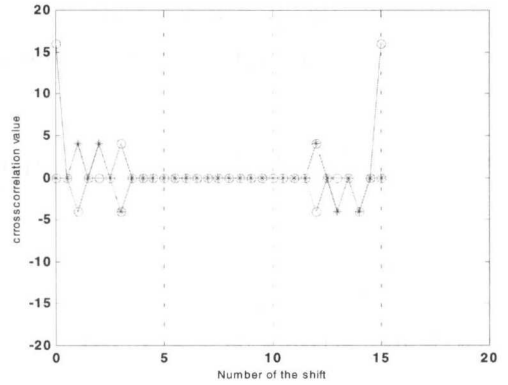
$$\begin{aligned} V_{J_N} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \otimes J_N \\ &= \begin{bmatrix} V1 \\ V2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_N & J_N & -J_N & J_N \\ -J_N & J_N & J_N & J_N \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 V1과 V2의 상관은 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

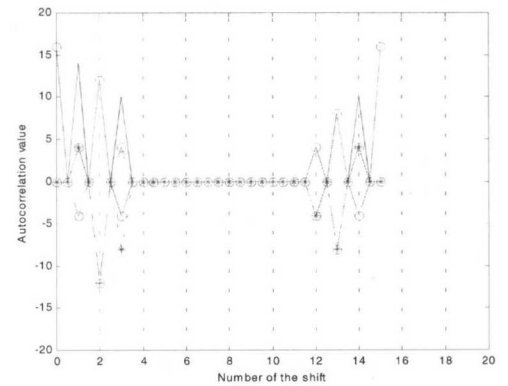
$$R(V1,V2) = J_N(-J_N) + J_N J_N + (-J_N)J_N + J_N J_N = 0 \quad (19)$$

그리고 식 (19)의 이러한 관계는 식(9)와 유사하다. 즉, $R = [Cross \ Auto \ Cross \ Auto]$ 이다.

poly-phase 변조 확산에 대한 이러한 새로운 다중레벨 비트열은 그의 상관 값에 대해 아주 흥미 있는 성질을 갖게 되는데, 이는 영 상관 영역이 비트열을 천이 시킴으로써 쉽게 발생할 수 있다는 것이다. 표 1에 V_j 부호의 예를 보이고 있다. 그림 4에서 자기상관과 상호상관 영역은 모두 같은 영 상관 영역을 가지며, 이 영역은 ZCZ 부호와 유사한 V_j 경우의 주기 T에서 3T의 구간에 해당한다는 것



(a) Autocorrelation of the V_{J_1} .



(b) Cross-correlation of the V_{J_1} .

그림 4. V_{J_1} 의 영 상관 영역.

을 알 수 있다.

그러나 새로운 부호의 영 상관 영역은 식(20)과 같은 간단한 알고리즘에 의해 얻어질 수 있다.

$$ZCZone = \left[\frac{N}{4}T \quad \text{to} \quad \left(N - \frac{N}{4} \right)T \right] \quad (20)$$

여기서 T는 J_N 부호의 주기를 나타내며, 이것은 또한 간단한 천이 영역을 발생시킴으로써 보다 큰 영 상관 영역을 발생시킬 수 있다. Jacket 변환은 반복적인 성질을 가지고 있어서 [21] 식 (21)과 같이 표현할 수 있다.

$$J_N = J_{N/2} \otimes [H]_2 \quad (21)$$

여기서 $N=2,4,8,16, \dots$ 이다. 그리고 새로운 부호 설계는 식 (22)와 같이 나타낼 수 있으며 그의 컴퓨터 모의 실험은 그림 5에 보이고 있다. 여기서 새

로운 Jacket 부호는 PN부호 보다 우수한 성능을 보이고 있는데, 이는 ZCZ 부호의 라인을 근사적으로 수 dB 정도 접하는 정도의 우수한 성능을 보이고 있으나, ZCZ 부호와 PN부호 보다 많은 전력(power)을 소모한다 점을 간과해서는 안 된다.

$$A(J_N) = \begin{bmatrix} J_{N/2} \otimes [H]_2 & J_{N/2} \otimes [H]_2 & -J_{N/2} \otimes [H]_2 & J_{N/2} \otimes [H]_{21} \\ -J_{N/2} \otimes [H]_2 & J_{N/2} \otimes [H]_2 & J_{N/2} \otimes [H]_2 & J_{N/2} \otimes [H]_2 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} J_{N/2} & J_{N/2} & J_{N/2} & J_{N/2} & -J_{N/2} & -J_{N/2} & J_{N/2} & J_{N/2} \\ J_{N/2} & -J_{N/2} & J_{N/2} & -J_{N/2} & -J_{N/2} & J_{N/2} & J_{N/2} & -J_{N/2} \\ -J_{N/2} & -J_{N/2} & J_{N/2} & J_{N/2} & J_{N/2} & J_{N/2} & J_{N/2} & J_{N/2} \\ -J_{N/2} & J_{N/2} & J_{N/2} & -J_{N/2} & J_{N/2} & -J_{N/2} & J_{N/2} & -J_{N/2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

표 1. J_4 로부터 설계한 새로운 부호

A_1	1	1	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	
A_2	1	-j	j	-1	1	-j	j	-1	-1	j	-j	1	1	-j	j	-1
A_3	1	j	-j	-1	1	j	-j	-1	-1	-j	j	1	1	j	-j	-1
A_4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1
A_5	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
A_6	-1	j	-j	1	1	-j	j	-1	1	-j	j	-1	-1	-j	j	-1
A_7	-1	-j	j	1	1	j	-j	-1	1	j	-j	-1	-1	j	-j	-1
A_8	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1

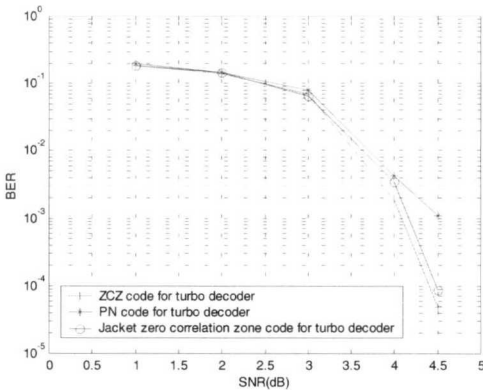


그림 5. 터보 디코더를 사용한 Rayleigh 페이딩하에서 Jacket 영상관 영역 부호와 ZCZ 부호 및 PN 부호의 성능 비교

V. 결론

상관 함수를 분석하고 재 mapping 방법을 직교 행렬과 결합하여 새로운 부호 설계 방법에 대해 본 논문에서 제안했다. 이러한 착상에 근거하여 다중 사용자 CDMA 시스템을 위해 ZCZ 부호와 Jacket 영상관 부호 같은 훌륭한 확산 비트 열을 쉽게 일반화할 수 있다. 따라서 이 방법은 CDMA 시스템에서 변조, 주파수 도약(frequency hopping), 확산

스펙트럼을 위한 새로운 확산 기술을 제안하는데 효율적으로 사용될 수 있다.

참고 문헌

- [1] Pingzhi Fan, and Li Hao, "Generalized Orthogonal Sequences and Their Applications in Synchronous CDMA Systems," IEICE Trans. Fundamentals, VOL.E83-A, No.11, Nov. 2000.
- [2] P.Z.Fan, N. Suehiro, and N. Kuroyanagi, "A novel interference-free CDMA system," PIMRC '99, No.2, pp.440- 444, Osaka, Japan, 1999.
- [3] P. Z. Fan, N. Suehiro, N. Kuroyanagi and X. M. Deng, "Class of binary sequences with zero correlation zone," Elect. Letters, Vol. 35, No. 10, pp777-779, 13th May 1999.
- [4] N. Suehiro, S. Matsufuji, T. Imoto and P. Z. Fan, "New Periodic Sequence Sets without Crosscorrelation Based on The Kronecker Product with Rows of DFT Matrices and New ZCCZ Sequence Sets," IST 2001, pp. 1-4, Tehran, Iran, 1-3 Sept. 2001.
- [5] Moon Ho Lee, "A New Reverse Jacket Transform and Its Fast Algorithm," IEEE Trans. On Circuit and System, vol. 47, no. 1, Jan. 2000.
- [6] Moon Ho Lee, B. S. Rajan, and J. Y. Park, "A Generalized Reverse Jacket Transform," IEEE Trans. Circuits Syst. II, vol. 48, no. 7, July 2001.

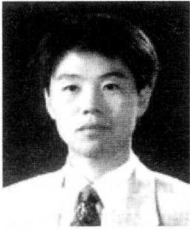
후 가(Hou Jia)



1992년 2월 : 중국우한대학교
통신공학과 학사
2000년 8월~현재 : 전북대학교
정보통신공학과 석사과정
<주관심 분야> 통신공학, 채널
코딩, 위성 및 이동통신 공학,
Space-Time code, LDPC

박 주 용(Ju-yong Park)

정회원



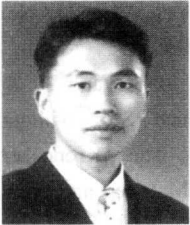
1982년 2월 : 전북대학교
전자공학과 졸업
1986년 2월 : 전북대학교
전자공학과 석사
1994년 2월 : 전북대학교
전자공학과 박사

1991년 3월~현재 : 서남대학교 전기전자멀티미디어
공학부 교수

<주관심 분야> 디지털통신, 채널코딩, 이동통신, Space-
Time code, LDPC

황 기 연(Gi-yeon Hwang)

정회원



1998년 2월 : 서남대학교
전자공학과 학사
2001년 2월 : 서남대학교
컴퓨터정보통신학과 석사
2001년 3월~현재 : 전북대학교
정보통신공학과 박사과정

<주관심 분야> 디지털통신, OFDM, 채널코딩, 위성
및 이동통신

김 정 수(Jeong-su Kim)

정회원



1996.2 : 순천대학교
전자공학과 (학사)
1998.2 : 전북대학교
정보통신공학과 (석사)
2000.2 : 전북대학교
컴퓨터공학과 (박사수료)

2002.6~현재 : 한국사이버대학교 전임강사

<주관심 분야> 이동통신, 변복조, 채널코딩

이 문 호(Moon-ho Lee)

정회원



1967년 2월 : 전북대학교
전기공학과 학사
1990년 2월 : 동경대학
전자과 공학박사
1980년 3월~현재 : 전북대학교
전자정보공학부 교수
(정보통신 연구센터소장)

<주관심 분야> 이동통신, 채널코딩 및 암호이론, 영
상신호처리