

논문 2006-43TC-2-9

차분방법에 의한 OFDM 심볼 동기검출 방식

(A Symbol Synchronization Detection by Difference Method for OFDM Systems)

주 창 복*, 박 남 천*

(Chang-Bok Joo and Nam-Chun Park)

요 약

본 논문에서는 멀티페스 채널의 자연프로필이나 채널에 부가되는 잡음에 영향을 받지 않으면서 정확한 GI검출 성능을 보이는 간단한 구조의 수정차분방식의 동기검출 방식에 있어서 동기 검출점에서의 S/N비율과 동기점 검출성능과의 관계를 보여준다. 컴퓨터 시뮬레이션에서는 IEEE802.11a 표준의 OFDM 프레임을 사용하고 쇼트와 롱 트레이닝의 4심볼을 심볼 동기타이밍 검출에 사용한다. 수신 OFDM신호위상이 1심볼내에서 $\pi/2$ 이내로 일어나는 최소위상채널은 물론 π 까지 회전하는 비최소위상 채널에서도 수정차분방식은 채널에 부가되는 잡음전력의 크기에 관계없이 OFDM신호의 1샘플간격 이내의 오차로 타이밍을 검출해내는 성능을 보인다.

Abstract

In this paper, we introduce modified difference type symbol timing detection method of simple structure and show the relations between S/N ratio and timing detection performance which less influenced by multipath channel delay profile and added noise level and it show very exact GI detection performance characteristics. In the computer simulations, 4 symbol time duration of short and long training of IEEE802.11a standard OFDM frame are used for symbol synchronization timing detection. The computer simulation results show the very exact symbol timing detection performance characteristic within 1 sample error of OFDM signal regardless channel delay profile from minimum phase channels of phase rotation $\pi/2$ to non-minimum phase channels of phase rotation π of received OFDM signal and added noise level in channel.

Keywords : OFDM, symbol synchronization, multipath delay profile, non-minimum phase channel, phase rotation.

I. 서 론

최근 인터넷접속 등에 의한 데이터나 화상전송 등과 같이 여러 가지 통합된 멀티미디어무선통신의 요구가 높아지고 있다. 이를 요구에 답하기 위해서는 고품질, 고속도인 데이터 통신을 가능하게 하는 무선통신의 광대역화가 필요불가결하게 된다. 광대역 무선통신에서는

다수의 자연파에 의해 발생하는 심볼간 간섭의 문제가 있다.

이러한 문제의 대책의 하나로 직교관계를 갖는 다수의 서브캐리어를 이용해서 전송하는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)방식이 ADSL(asymmetric digital subscriber line)로부터 차세대 이동통신과 홈네트워킹 시스템에 이르기까지 여러 가지로 많은 응용에 적용되고 있다.^[1, 2]

무선통신의 광대역화에 의한 대용량이나 고속전송에 적용되는 OFDM방식에서의 요소기술로는 전송로추정과 채널등화, 멀티페스 수신 상태로부터의 타이밍 동기 검출 등을 들 수 있다.

* 정희원, 경남대학교 전자공학과

(Dept. of Electronic Engineering, Kyungnam Univ.)

※ 본 연구는 2005년도 경남대학교 학술연구비 지원에 의해 수행되었음.

접수일자 : 2005년11월8일, 수정완료일 : 2006년2월15일

OFDM에 있어서 동기 검출에는 캐리어 주파수 동기와 심볼 동기 타이밍의 검출을 들 수 있으며, 심볼 동기 타이밍은 데이터 심볼 중의 보호구간(GI; guard interval)을 검출하여 정확한 FFT(Fast Fourier Transform) 윈도우 위치를 찾기 위한 것이다.

일반적으로 트레이닝 심볼이나 가드인터벌의 주기적 특성을 이용하는 심볼 동기검출 방식은 보통 상관에 기초하는 상관방식(correlation based method)^[3-6]과 차분에 기초하는 차분방식(subtraction based method)^[7-9]으로 분류할 수 있다.

상관방식에 있어서는 검출수행과정에서 수신된 신호 전력이나 잡음전력 즉, 전송로특성에 크게 의존하여 상관연산의 결과로 얻어지는 상관피크의 레벨이 크게 변동하는 특성이 있다. 그러므로 상관방식에 있어서 이 상관피크의 레벨변동은 GI검출의 오차원인으로 된다. 특히 페이딩의 영향이 큰 채널에서는 이 오차가 크게 된다.

한편 차분에 기초하는 차분방식에서는 트레이닝 심볼 기간에 대응되는 샘플수 길이만큼의 이동평균 윈도우를 사용하는 문제와 타이밍점의 결정에 있어 채널에 부가된 잡음전력레벨에 따르는 적합한 임계레벨을 사용하여야 하는 문제^[8]가 있다.

본 논문에서는 이동평균 윈도우나 채널에 부가된 잡음전력레벨에 따르는 적합한 임계레벨을 사용하지 않고 멀티패스의 지연프로필이나 부가되는 채널잡음에 영향을 받지 않으면서 정확한 GI검출 성능을 보이는 간단한 구조의 수정차분방식을 채용하였다. 그리고 종래의 대표적인 상관방식과의 동기 타이밍점 검출성능을 비교 검토해 보기 위해 6파와 11파의 모델화 채널과 실측된 21파의 멀티패스 지연프로필의 전력선채널에 적용하여 동기 검출점에서의 S/N 비율과 동기점 검출성능과의 관계를 비교, 분석하여 보았다.

컴퓨터 시뮬레이션에서는 IEEE802.11a 표준의 OFDM 프레임을 사용하고 쇼트와 롱 트레이닝의 4심볼을 심볼 동기타이밍 검출에 사용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 일반적인 GI(guard interval) 검출방식에 대해 살펴보고 III장에서는 본 논문에서 채용한 차분화 심볼타이밍 검출방식에 대해 기술한다. IV장에서는 검출성능의 비교와 성능평가를 위하여 채용한 이상적 채널과 멀티패스의 모델화 채널 및 멀티패스의 실측채널에 적용하여 수행한 실험과 결과에 대해 분석하고 V장에서 결론을 맺는다.

II. GI 검출방식

1. 상관방식

상관검출에 의한 심볼 타이밍 검출방식은 그림 1과 같은 블록도로 나타내진다.

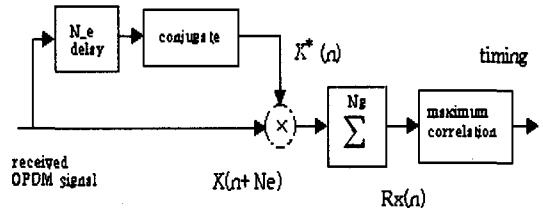


그림 1. 상관방식의 심볼 타이밍 검출방법
Fig. 1. Symbol timing detection by correlation method.

이 방식은 상관연산을 이용해서 상관피크의 위치를 검출하는 것에 의해 수신되는 OFDM신호에 포함되어 있는 GI를 검출하는 방식이다.^[10] 즉, 수신되어오는 n 샘플번 째의 OFDM 신호 $X(n)$ 과 FFT의 유효 심볼길이분을 지연시켜 복소공액시킨 신호 $X^*(n - N_e)$ 와의 곱을 취하고 GI길이 N_g 에 걸쳐 합을 구하는 방식으로 나타내진다.

지금 n 샘플번째의 OFDM신호의 값을 $X(n)$ 으로 하면 n 샘플번째의 GI 길이에 대한 상관값 $R_X(n)$ 은 다음의 식과 같이 표현된다.

$$R_X(n) = \sum_{n=1}^{N_g} \{ X^*(n) \cdot X(n + N_e) \} \quad (1)$$

여기서 N_e 는 FFT(Fast Fourier Transformation)의 주기로 유효 심볼길이분의 샘플수, N_g 는 GI길이분의 샘플수, $X^*(n)$ 은 $X(n)$ 의 복소공액을 나타낸다.

식 (1)의 연산을 OFDM 신호의 모든 샘플에 대해서 행하면 GI위치의 샘플에서 상관피크가 판측되어진다. 이 상관 피크의 위치점을 기준으로 심볼의 시작점을 결정한다.

상관방식에 있어서 상관연산의 결과는 수신된 신호 $X(n)$ 의 신호전력이나 잡음전력 즉, 전송로특성에 크게 의존하여 얻어진 상관피크의 레벨이 크게 변동한다. 이 상관피크의 레벨변동이 GI검출의 오차원인으로 된다. 특히 페이딩의 영향이 큰 환경하에서는 이 오차가 크게 된다.

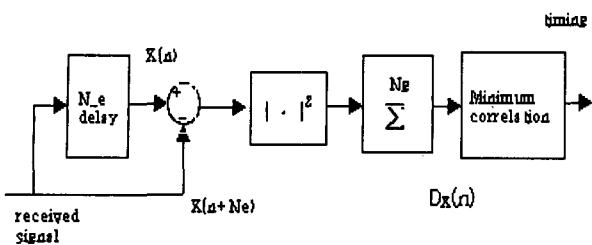


그림 2. 차분방식의 심볼 타이밍 검출방법

Fig. 2. Symbol timing detection by difference method.

2. 차분방식

그림 2는 차분에 기초한 심볼 타이밍 검출방식을 보인 블록도로 채널을 통하여 수신되어진 OFDM 신호를 유효 심볼길이 N_g 만큼 지연시킨 신호와의 차분을 구한 다음 크기만을 취하여 GI길이 N_g 에 걸쳐 가산할 때 최소가 되는 위치로 GI를 검출하는 심볼 타이밍으로 결정하는 방식이다.

그림 2의 차분화 심볼 동기타이밍 검출방식은 그림 1과 같은 상관방식의 GI검출에 있어서 전송로특성에 의존하여, 수신신호의 레벨변화에 대해서 상관피크의 레벨이 크게 변동하는데서오는 문제점을 보완하여 안정한 GI검출이 가능한 방법이라 생각한다.

그림 2에서와 같이 수신 OFDM 신호와 FFT의 유효 심볼길이분을 지연시킨 신호와의 차를 구한 다음 절대치를 취하여 GI길이에 걸쳐 가산 합을 산출한다. n 샘플 번째의 OFDM 신호를 $X(n)$ 이라하면 차분신호의 특성함수인 가산함수 $D_X(n)$ 은 다음과 같이 나타내진다.

$$D_X(n) = \sum_{n=1}^{N_g} |X(n) - X(n + N_e)| \quad (2)$$

이 방식에서는 신호의 곱의 가산 연산이 아닌 차분 가산을 이용하기 때문에 수신 OFDM신호의 레벨변동에 대해서 그림 1의 상관방식보다 보다 더 안정된 GI 검출이 가능하게 된다.

상기에서와 같은 상관과 차분에 의한 심볼 타이밍의 검출은 차분화방식이 상관방식보다 안정되고 오차가 적은 보다 나은 타이밍 검출성능을 보이지만, 수신신호의 레벨변동을 가져오는 페이딩 채널에서는 채널의 지연 프로필에 의한 영향으로 여전히 정확한 심볼 타이밍의 결정에 있어 에러를 발생시키는 문제점을 가지고 있다.

III. 수정된 차분 심볼타이밍 검출방식

본 논문에서는 수신신호의 레벨변동을 가져오는 페

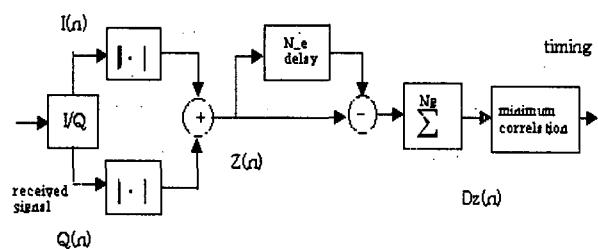


그림 3. 수정된 차분화 타이밍 검출방법

Fig. 3. Symbol timing detection by modified difference method.

이렇게 채널에서 채널의 지연 프로필에 의한 영향으로 정확한 심볼 타이밍의 결정에 에러를 발생시키는 문제점으로 차분신호에 의한 특성함수의 펄스형태에 있다는 것을 관찰하였다.

즉, 채널의 지연프로필에 의한 영향으로 차분신호에 의한 특성함수는 동기점을 중심으로 비대칭적으로 나타나는 형태를 보인다. 이러한 문제를 해결할 수 있게 하기 위하여 그림 3과 같은 구성의 수정된 차분방식이 적합하게 됨을 알게 되었다.

본 논문에서는 이 구성을 그림 2의 차분방식에 대하여 수정차분방식이라 부르기로 한다.

그림 3은 이 방식에 의한 심볼타이밍 검출을 행하는 블록도를 나타내보인 것이다. 그림 3에서와 같이 I/Q의 분리에 의해 OFDM 신호의 I성분과 Q성분을 분리하고 분리된 I성분과 Q성분의 절대치의 합을 차분 가산의 연산을 행하는 방식을 취하였다.

그림 3에서와 같이 OFDM신호의 n 번째 샘플의 $I(n)$, $Q(n)$ 신호성분 크기의 합을 취하는 $Z(n)$ 을

$$Z(n) = |I(n)| + |Q(n)| \quad (3)$$

와 같이 정의하고, 이 $Z(n)$ 에 대한 차분을 이용하는 방식으로 하면 2.2의 차분방식에 의한 경우보다도 더 정확한 타이밍점을 검출할 수 있는 방법으로 되었다.

이 변형된 차분방법에서는 크기 $Z(n)$ 과 유효심볼길이 N_e 샘플분의 시간앞선 OFDM 신호의 크기 $Z(n - N_e)$ 와의 차분에 대해 GI길이인 N_g 샘플분의 합을 구하는 특성함수로 가산함수 $D_Z(n)$ 을 다음과 같이 연산하도록 한다.

$$D_Z(n) = \sum_{n=1}^{N_g} |Z(n) - Z(n + N_e)| \quad (4)$$

표 1. 시뮬레이션 조건(IEEE802.11a)
Table 1. Simulation condition(IEEE802.11a).

symbol interval	4μsec(N=80)
No. of subcarriers	48
freq. spacing	0.3125MHz(=20MHz/64)
IFFT/FFT period	$T_{FFT} : 3.2\musec(N_e=64)$
GI duration	$T_{GI} : 0.8\musec(N_g=16)$
data rate	9~54Mbps
subcarrier mod.	BPSK/QPSK/16QAM/ 64QAM
training symbol GI duration	$T_{DR} : 1.6\musec(T_{FFT}/2)$
short training sequence duration	8μsec($10 \times T_{FFT}/4$)
long training sequence duration	8μsec($T_{DR} + 2 \times T_{FFT}$)

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터시뮬레이션 조건은 IEEE802.11a의 무선랜 규격으로 표 1과 같다.

샘플수 64의 IFFT/FFT주기, OFDM 심볼 보호구간은 유효 심볼길이의 1/4, 데이터 변조방식은 BPSK/QPSK/16QAM/64QAM, 데이터는 IEEE802.11a의 무선랜 규격에서와 같이 선두에 쇼트, 롱 트레이닝(short, long training) 심볼과 시그널심볼을 프리엠블 심볼로 부가된 프레임으로 구성하여 몇 가지 패턴의 채널에 대하여 심볼 타이밍을 검출해 보였다.

심볼 동기는 변조/복조가 각각 IFFT/FFT에 의해 이루어지기 때문에 필요한 것으로 수신단에서는 N_e 개의 샘플신호를 FFT하여 복조가 이루어지기 때문에 샘플의 시작위치를 정확히 일치시켜야 정확한 복조가 이루어진다.

수신단에서의 캐리어주파수 움셋이나 채널의 지연프로필에 의한 심볼 움셋의 영향은 모든 서브캐리어의 위상회전을 일으켜 심볼간의 간섭과 서브캐리어간 간섭이 발생한다. 시간영역에서 샘플의 시작위치가 $\delta (= iT_s, i$ 는 정수, T_s 는 샘플간격) 샘플만큼 차이가 발생하는 경우 i 번째 심볼주기에 FFT에 입력되는 N_e 개의 샘플신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_n = x_{n+\delta} + w_n, n = 0, 1, 2, \dots N_e - 1 \quad (5)$$

멀티페스 지연프로필의 채널에서 심볼간의 간섭을 받

지 않으면서 서브캐리어사이의 직교성도 유지되는 임의의 위치에서 심볼동기를 이루면 왜곡이 발생하지 않는다. 따라서 심볼 샘플의 복조성능에 영향을 주지 않는 심볼 움셋의 범위는 최대 지연스프레드를 τ_{max} 라 하면 다음과 같이 주어진다^[11].

$$\frac{\tau_{max}}{T_s} - N_g < \delta \leq 0 \quad (6)$$

1. 동기 타이밍점에서의 S/N비 특성

OFDM 심볼의 가드인터벌(guard interval; GI) 검출에 의한 동기점 검출성능에 대한 평가에서는 비트에너지 대 잡음전력밀도의 비인 ebn0(=Eb/N0)값에 따라 쇼트, 롱 트레이닝 심볼에서의 상관함수 또는 특성함수의 평균파형의 피크점 또는 최소점의 첨예성과 평균파형에 대한 미분파형의 모양을 비교해 보았다.

사각 멜스파형에 대한 상관함수는 삼각파형으로 나타내어지며 미분에 의해 삼각파형은 양극의 사각 멜스모양으로 된다. 잡음이 부가된 레일리 페이딩채널을 통하여 수신된 프레임 심볼의 쇼트, 롱 트레이닝의 4개 심볼기간에 대한 상관함수의 평균파형(상관평균)은 상관값이 최대 또는 최소점에서의 미분값이 0으로 되므로 이에 대한 미분파형은 그림 4와 같이 양극 멜스의 모양을하게 된다.

그림 4에서와 같이 상관 피크점 또는 최소점에서 정의하는 신호에너지 S와 잡음전력 N는 검출 동기점(0점)을 전후한 양극의 사각 멜스파 형태에서 구간 A, B의 평균 진폭의 합이 S로 되며 사각 멜스파형의 구간 A, B의 멜스진폭에 부가되어 나타나는 파형은 잡음으로써 그 전력을 각각 N1과 N2로 나타내면 전체 잡음전력은 $N=N_1+N_2$ 로 된다.

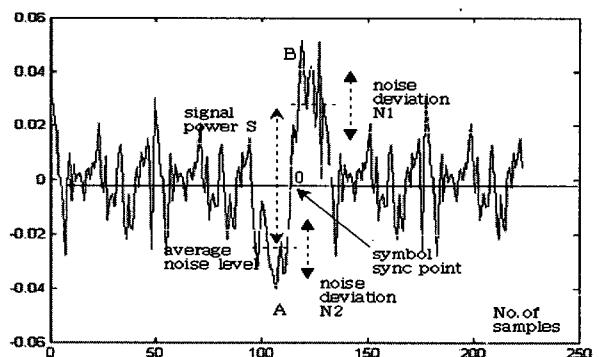


그림 4. 상관함수의 미분파형의 예

Fig. 4. Example of difference waveform of correlated function.

상관평균 과정의 피크점 또는 최소점에서의 첨예성은 이 S/N의 비가 클수록 날카로운 모양을 하게 되며 동기 점으로써의 검출신뢰가 높아지게 된다.

2. 이상적 채널모델에서의 검출성능 비교

그림 5는 이상적인 채널모델에 대한 진폭과 위상 주파수스펙트럼 및 이 채널에서 9Mbps 데이터 전송율의 BPSK에서 ebn0에 따른 동기 타이밍점의 검출결과를 보인 것이다.

본 논문에서의 정확한 심볼 타이밍 점은 심볼의 샘플 수 80에서 FFT의 구간 64샘플수만큼 지연시키고 보호 구간으로 복사하여 사용하는 후방 16샘플 구간에 대한 상관에 의하여 정확한 심볼 동기 타이밍점은 $m=65$ 가 된다.

그림 5(a)에서와 같은 이상적이 채널 프로필에서 ebn0에 따른 동기 타이밍점의 검출성능을 살펴보면, 각 검출 점에서의 S/N비는 상관방식이 가장 낮으면서

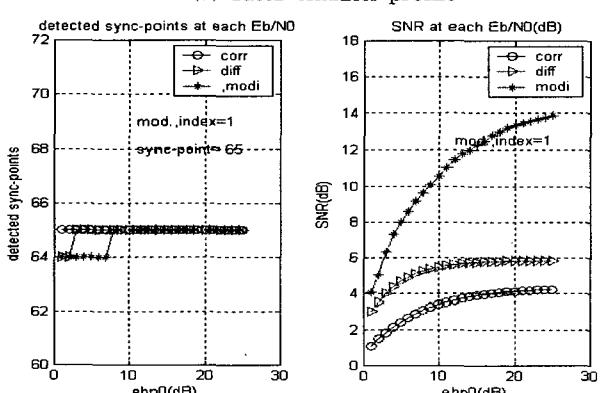
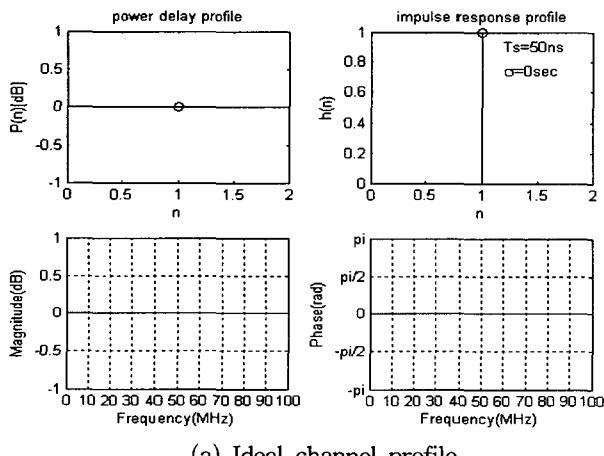


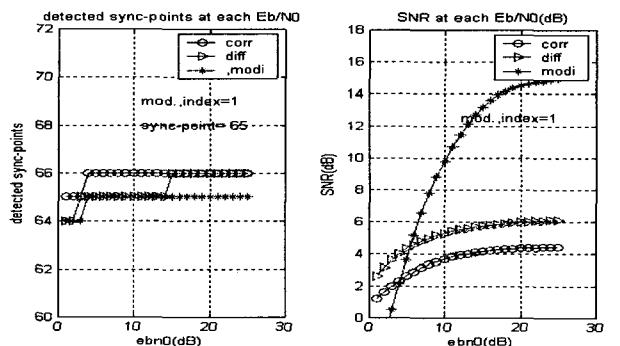
그림 5. 이상적 채널프로필의 ebn0에 따른 동기점 검출 성능(BPSK, 9Mbps)

Fig. 5. Detected symbol sync., points with ebn0 in ideal channel profile(BPSK, 9Mbps).

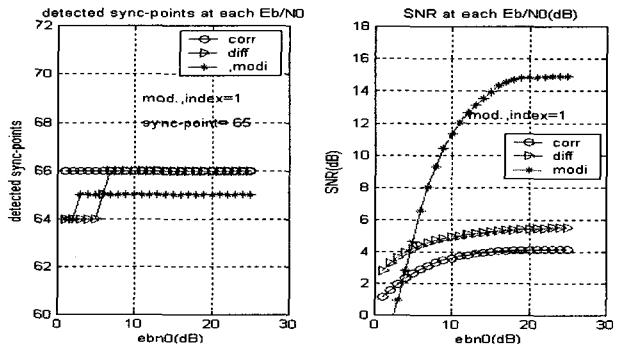
이상적인 검출결과를 보여주고 있다. 상관방식과 차분 방식 및 수정차분방식에서는 ebn0가 각각 1dB, 3dB, 8dB이상에서 정확한 동기 타이밍점을 검출해내는 것을 알 수 있으며 각각의 ebn0 값에서의 S/N비는 1dB, 4dB, 9.7dB로 수정차분방식, 차분방식 및 상관방식의 순으로 낮은 값을 나타내 보이고 있다.

3. 멀티패스 모델화 채널에서의 검출성능 비교

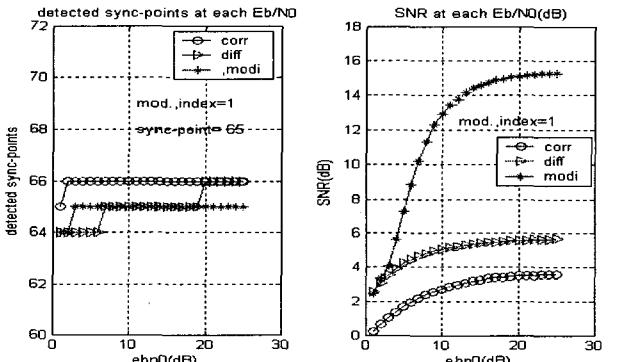
그림 6은 그림 8(a)와 같이 3dB 전력레벨차이로 이루



(a) Detected sync., points and S/N ratio(2-ray profile)



(b) Detected sync., points and S/N ratio(3-ray profile)



(c) Detected sync., points and S/N ratio(5-ray profile)

그림 6. 2피/3피/5파의 채널모델에서 ebn0에 따른 동기 점 검출성능(BPSK, 9Mbps, 채널모델1 그림 8(a))

Fig. 6. Detected symbol sync., points with ebn0 in 2-ray/3-ray/5-ray channel model(BPSK, 9Mbps, Fig. 8(a)).

어지는 11파 지연프로필의 모델화 채널에서 처음 2파만을 취한 RMS지연스프레드가 $\sigma=2.3579 \times 10^{-8}$ [sec]인 2파 모델과 3파로 이루어지는 $\sigma=3.6452 \times 10^{-8}$ [sec]인 3파 채널모델, 5파로된 $\sigma=5.41 \times 10^{-8}$ [sec]의 5파 모델의 각각에 대해서 9Mbps 데이터 전송율의 BPSK에서 ebn0에 따른 동기 타이밍점의 검출결과를 나타내보인 것이다.

그림 6은 그림 5(b)와 비교할 때 상관방식과 차분방식은 지연파의 영향을 받아 $\delta > 0$ 으로 되고, 1샘플간격만큼 동기점이 어긋나 있음을 볼 수 있다.

그림 6(a)는 2파 모델인 경우로 그림 5(b)와 비교할 때 상관방식과 차분방식은 지연파의 영향을 받아 1샘플만큼 동기점이 어긋나 있으나 수정차분방식에서는 더 낮아진 ebn0에서부터 정확한 동기 위치점을 검출해내고 있다.

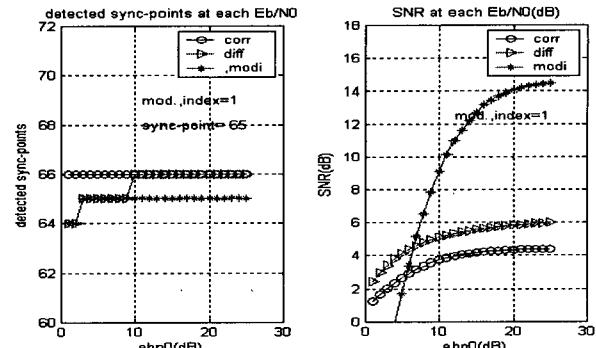
또한 그림 6(b),(c)의 3파와 5파의 채널모델에서도 상관방식과 차분방식은 1샘플만큼 동기점이 어긋나 있는 반면 동일한 지연파의 영향을 받으면서 수정차분방식은 더욱 낮아진 ebn0에서 정확한 동기점을 검출하고 있을 보여주고 있다.

그림 8(a)의 위상스펙트럼에서와 같이 채널의 위상지연 특성이 $\pi/4$ 이내로 일어나는 멀티파스 지연프로필의 채널에 대해서는 그림 6에서와 같이 수정차분방식은 다른 방식들에서의 S/N비 곡선이 포화점까지 매우 가파르게 증가하는 모양과 보다 높은 값을 가지면서 정확하게 동기 타이밍점을 검출해내는 성능을 보여주는 반면, 상관파크검출방식과 차분방식에서는 S/N비도 낮아지면서 동기 검출점이 1샘플간격만큼 어긋나는 결과를 보여준다.

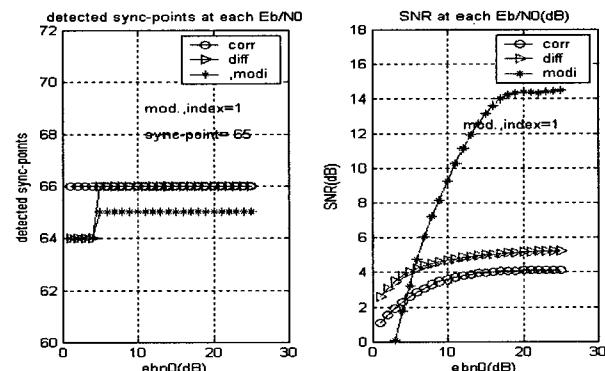
그림 7은 그림 8(b)에서와 같이 1dB 전력레벨차이로 이루어지는 5파 지연프로필의 모델화 채널에서 처음 2파만을 취한 RMS지연스프레드가 $\sigma=2.4835 \times 10^{-8}$ [sec]인 2파 모델과 $\sigma=4.0288 \times 10^{-8}$ [sec]의 3파, $\sigma=6.8358 \times 10^{-8}$ [sec]의 5파 모델의 각각에 대해서 그림 6에서와 같이 9Mbps의 데이터 전송율의 BPSK에서 ebn0에 따른 동기 타이밍점의 검출결과를 나타내보인 것이다.

그림 7에서도 그림 6에서와 같이 수정차분방식은 다른 방식들과 비교하여 초기 S/N비의 기울기 변화가 빠르게 일어나며 정확하게 동기 타이밍점을 검출해내는 성능을 보여주는 반면, 상관방식과 차분방식에서는 RMS 지연스프레드가 커짐에 따라 그림 7(c)에서와 같이 S/N비가 낮아지면서 동기 검출점도 수 샘플간격만큼 어긋나는 결과를 보여준다.

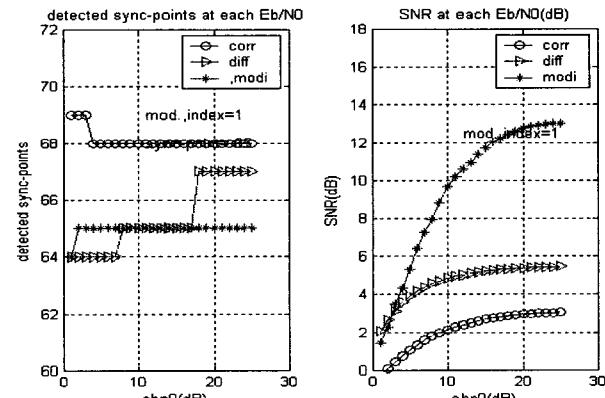
이상적인 채널모델에서의 그림 5(b)와 비교할 때 상



(a) 2-ray channel model



(b) 3-ray channel model



(c) 5-ray channel model

그림 7. 2파/3파/5파의 채널모델에서 ebn0에 따른 동기 점 검출성능(BPSK, 9Mbps 채널모델2 그림 8(b))

Fig. 7. Detected symbol sync., points with ebn0 in 2-ray/3-ray/5-ray channel model(BPSK, 9Mbps, Fig. 8(b)).

관방식과 차분방식은 지연파의 영향을 받아 2~3샘플만큼 동기점이 어긋나 있음을 볼 수 있다. 그러나 변형된 차분방식은 보다 더 낮아진 ebn0에서 정확한 동기 위치점을 검출해내고 있다.

그림 8은 4가지 채널모델의 전력지연프로필과 진폭 및 위상 주파수스펙트럼들을 나타내 보인 것이다.

그림 8에서 채널 1은 순차로 3dB씩 전력이 감소해가는 11파 모델의 전력지연프로필로 RMS 지연스프레드

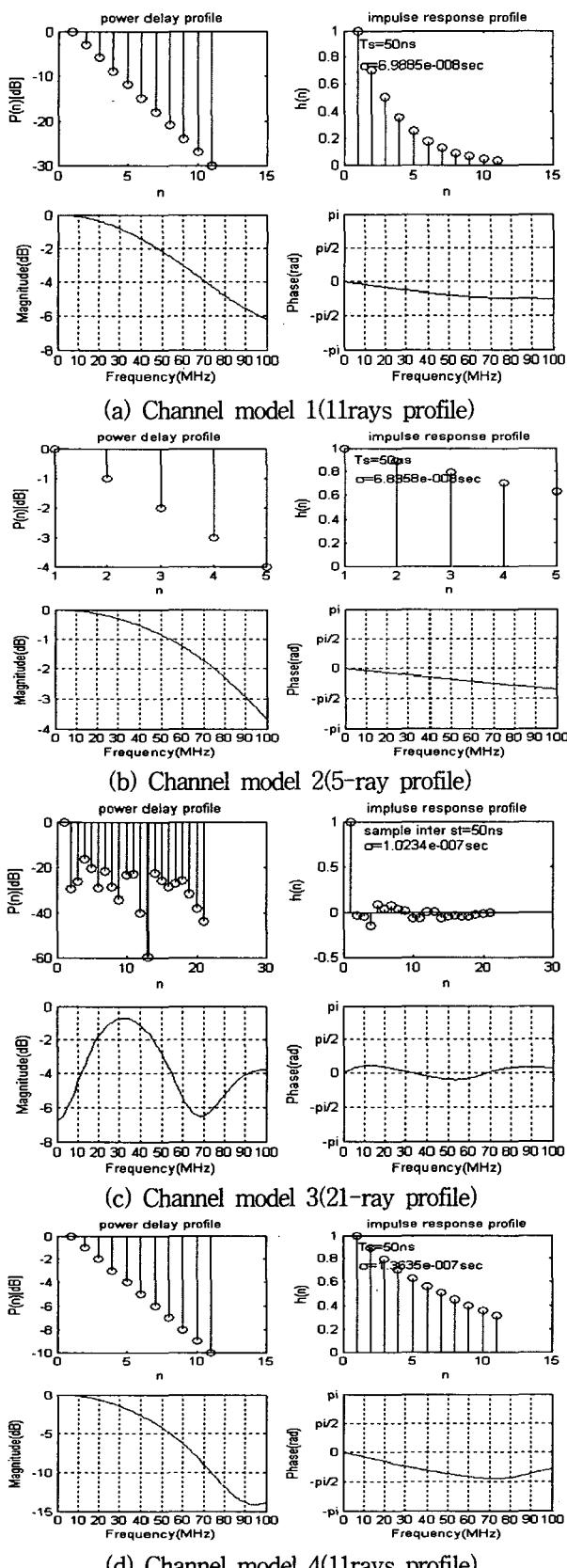


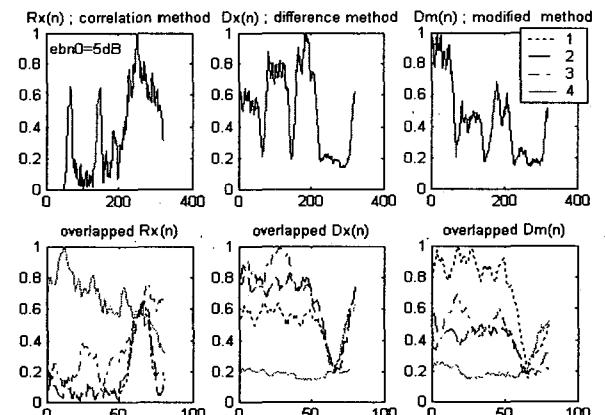
그림 8. 모델화 채널의 지연프로필과 주파수스펙트럼 특성

Fig. 8. Channel delay profile models and frequency spectrum characteristics.

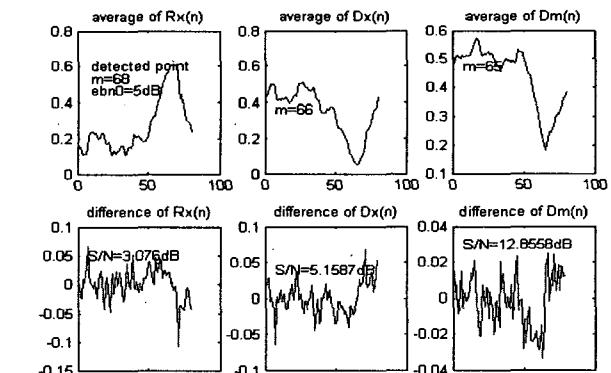
가 $\sigma=6.9885 \times 10^{-8}[\text{sec}]$ 이고, 모델화 채널 2는 1dB씩 전력이 감쇠해가는 5파의 전력지연프로필로 RMS 지연스프레드가 11파 모델과 비슷한 $\sigma=6.8358 \times 10^{-8}[\text{sec}]$ 의 레일리 페이딩채널을 가정했다.

또한, 채널 3은 RMS지연스프레드는 채널 1,2보다 길지만 직접파에 의해 지배되는 21파의 실측 전력선채널 중의 하나로, 최대 지연스프레드는 $1\mu\text{sec}$ 에 이르고 RMS지연스프레드는 $0.1\mu\text{sec}$ 로 54Mbps의 전송속도에서도 그다지 심볼간 간섭을 일으키지 않는 채널모델이다. 채널 4는 최대 전력레벨차이를 10dB가 되도록 채널모델 2를 11파까지 확장시켜 보인 채널모델이다.

그림 9(a)는 채널모델 1에서 데이터를 54Mbps의 64QAM 매핑신호에 대하여 $\text{ebn}_0=5\text{dB}$ 인 경우, 프레임의 선두 프리엠블 4심볼의 320개 샘플신호에 대해 구한



(a) Correlated and overlapped functions over the 4 preamble symbols



(b) Average function of overlapped waveforms of (a) and it's difference waveforms

그림 9. 모델화 채널 1에서 프리엠블의 4심볼의 상관함수와 미분파형(64QAM, $\text{Eb}/\text{N}_0=5\text{dB}$)

Fig. 9. Correlation functions over the 4 preamble symbols & its average and difference waveforms in channel 1(64QAM, $\text{Eb}/\text{N}_0=5\text{dB}$).

상관방식과 차분방식에서의 상관함수와 특성함수 및 4개의 심볼에 대해 구한 상관함수를 1개의 심볼구간에 중첩시켜 나타낸 것을 보여준다.

그림 9(a)의 첫 번째는 식 (1)의 상관방식에서의 상관함수도이고 두 번째는 식 (2)의 차분 특성함수도이며 세 번째는 식 (4)의 수정차분 특성함수의 그림을 나타낸다.

그림 9(b)는 그림 9(a)의 4심볼에 대한 상관과 특성함수의 평균 즉, 상관평균함수와 이들 함수에 대한 미분파형을 차례로 나타내 보인 것이다.

그림 9(b)에 나타나 있는 것과 같이 채널 1에서 $ebn0=5dB$ 인 경우 데이터율 54Mbps의 64QAM 매핑신호에 대해 검출된 심볼 동기 타이밍점은 차례로 $m=68, 66, 65$ 이며, 각 방식에서의 평균함수의 미분파형이 보여주는 사각펄스의 형태를 비교해 볼 수 있다.

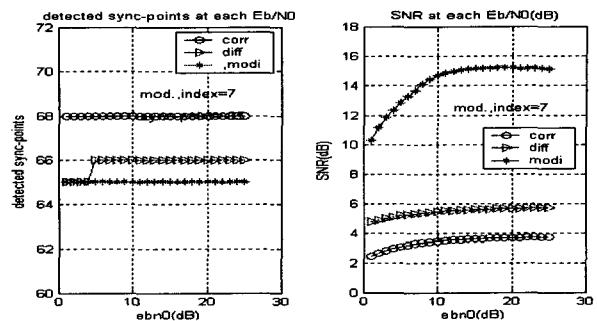
잡음이 부가된 형태의 사각펄스의 모양은 수정차분방식에서 잘 나타나고 있으며 S/N비가 클수록 좋은 사각펄스의 모양을 나타낸다.

그림 10은 그림 8의 각각의 모델화 채널들에 대해 데이터율 54Mbps의 64QAM 매핑신호에서 $ebn0$ 에 따른 동기점 검출성능의 비교를 위해 나타내 보인 것이다.

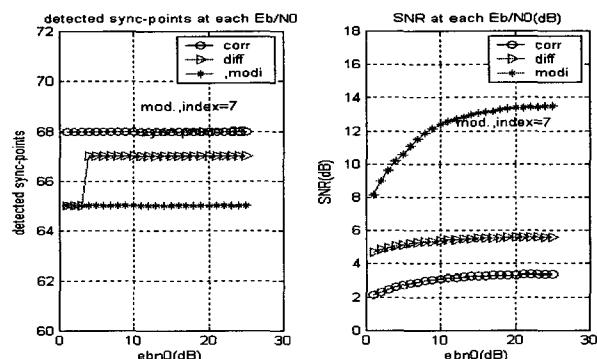
그림 10에서와 같이 심볼간 간섭의 영향이 커지게 되는 지연프로필로 됨에 따라 S/N비가 차례로 낮아져 감을 볼 수 있으며, 각 $ebn0$ 에서의 동기 검출점이 2~6샘플만큼 어긋나는 상관방식과 1~2샘플만큼 어긋나는 차분방식에 비교하여 수정차분방식의 검출성능이 매우 우수함을 볼 수 있다.

한편, 그림 10(c)에서와 같이 자연스프레드는 길지만 단일의 채널특성과 같은, 직접파의 영향이 지배하는 채널에서의 $ebn0$ 에 따른 검출점은 그림 5에서와 같이 모두 정확하게 검출해 내고 있으며, 이러한 경우에 S/N비도 매우 높아져 있고 또한, 포화영역까지의 S/N비 기울기의 변화관계를 보면 수정차분방식에서 가장 크게 변화해 가고 있는 것을 볼 수 있다.

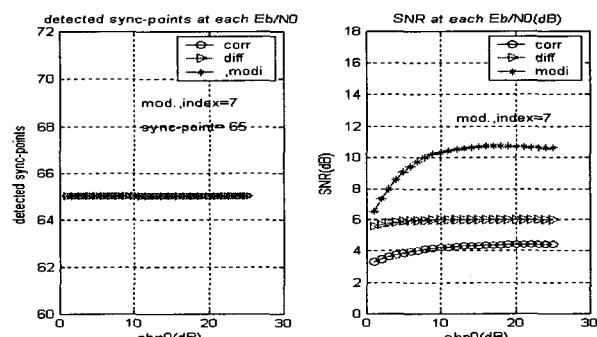
또한, 채널모델 4와 같이 수신 OFDM신호의 위상회전이 1심볼내에서 $\pi/2$ 이내로 일어나는 채널이라 하더라도 지연파간의 진폭차이가 작고 멀티페스의 수가 많아 ISI의 영향에 의한 수신진폭레벨의 변화가 크게 일어나게 되는 채널에서의 검출성능을 보이는 그림 10(d)에서와 같이 수정차분방식은 1샘플 오차의 검출 성능을 보여주었다.



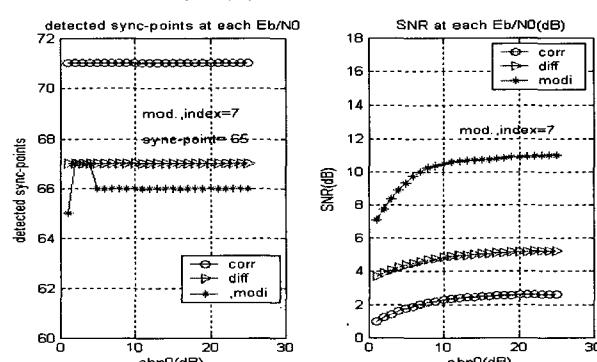
(a) Detected sync., points and S/N ratio(channel 1)



(b) Detected sync., points and S/N ratio(channel 2)



(c) Detected sync., points and S/N ratio(channel 3)



(d) Detected sync., points and S/N ratio(channel 4)

그림 10. 그림 8의 채널모델에서 $ebn0$ 에 따른 S/N비와 동기점 검출성능(64QAM, 54Mbps)

Fig. 10. Detected symbol sync., points & S/N with $ebn0$ in channel models of Fig. 8(64QAM, 54Mbps).

이와 같이 수정차분방식은 수신 OFDM 신호의 위상 회전이 1심볼내에서 $\pi/4$ 이내로 일어나는 임의의 멀티 패스 채널이나 $\pi/2$ 이내로 일어나는 최소 위상채널은 물론 π 까지 회전하는 비최소 위상채널^[12]모델에서와 같은 심각한 ISI를 일으키는 채널에 대해서도 1샘플간격 이내의 오차로 되는 동기타이밍 검출 성능을 보여준다.

이상에서와 같이 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 통하여 각 방식에서의 동기타이밍 검출성능의 비교에서, 수정 차분방식은 하드웨어적 구조가 간단하면서도 1 샘플간격의 이내의 오차로 동기타이밍을 검출해 내는 방식임을 나타내 보였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 멀티패스 채널의 지연프로필이나 채널에 부가되는 잡음에 영향을 받지 않으면서 정확한 GI 검출 성능을 보이는 간단한 구조의 수정차분방식의 동기검출 방식을 채용하여 차분방식과 종래의 대표적인 상관방식과의 동기타이밍 검출성능을 비교 검토해 보기 위해 5파와 11파의 모델화 채널과 21파 멀티패스의 실측 전력선채널에 적용하여 ebn0에 따른 동기 검출점에서의 S/N비와 동기점 검출성능과의 관계를 비교, 분석하여 보았다.

컴퓨터 시뮬레이션에서는 IEEE802.11a 표준의 OFDM 프레임을 사용하고 쇼트와 롱 트레이닝의 4심볼을 심볼 동기타이밍 검출에 사용하였다.

여러 가지 지연프로필의 채널에 대해 행해본 컴퓨터 시뮬레이션의 결과 본 논문에서의 수정차분방식은 채널의 위상지연 특성이 $\pi/4$ 이내로 일어나는 멀티패스 지연프로필의 채널은 물론 $\pi/2$ 이내로 일어나는 최소 위상채널에 대해서 피크점 검출의 상관방식과 최소점 검출의 차분방식에 대해 보다 정확한 동기점을 검출해내는 성능을 보여준다.

한편, 수신 OFDM신호의 위상회전이 1심볼내에서 $\pi/2$ 이내로 일어나는 경우라 하더라도 지연파간의 진폭 차이를 1dB로 가정한 11파의 모델화 채널에서와 같이 지연스프레드도 크고 또한, ISI의 영향을 크게 받게 되는 경우에는 검출점에서의 S/N비율이 크게 낮아지고 검출점도 정확한 타이밍점으로부터 다소 어긋나는 경향을 보여주었다.

그러나 이러한 채널모델에 대해서도 수정차분방식은 OFDM신호의 1샘플간격 이내의 오차로 타이밍점을 검출해내는 성능을 나타내 보였다.

특히 본 논문에서의 수정차분방식은 수신 OFDM신호위상이 1심볼내에서 π 까지 회전하는 비최소 위상 채널에서도 채널에 부가되는 잡음전력의 크기에 관계없이 정확한 동기점을 검출하는 성능을 발휘한다.

참 고 문 헌

- [1] L.J. Cimini, Jr, "Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing", *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-33, no. 7, pp. 665-675, 1985.
- [2] A.S. Bahai and B.R. Saltzberg, "Multi-carrier digital communications", Kluwer Academic Pub., 1999.
- [3] J. J. van de Beek, M. Sandell, M. Isaksson, and P. O. Borjesson, "Low-complex frame synchronization in OFDM systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Universal Personal Commun.*, pp. 982-986, Nov. 1995.
- [4] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Low-overhead, low-complexity burst synchronization for OFDM," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1301-1306, June 1996.
- [5] T. M. Schmidl and D. C. Cox, "Robust frequency and timing synchronization for OFDM," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 12, pp. 1613-1621, Dec. 1997.
- [6] H. Minn, M. Zeng, and V. K. Bhargava, "On timing offset estimation for OFDM systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 4, no. 7, pp. 242-244, July 2000.
- [7] P. J. Tourtier, R. Monnier, and P. Lopez, "Multi-carrier modem for digital HDTV terrestrial broadcasting," *Signal Processing*, pp. 379-403, Dec. 1993.
- [8] M. Speth, F. Classen, and H. Meyr, "Frame synchronization of OFDM systems in frequency selective fading channels," in *Proc. IEEE VTC*, pp. 1807-1811, May 1997.
- [9] K. Takahashi and T. Saba, "A novel symbol synchronization algorithm with reduced influence of ISI for OFDM systems," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, vol. 1, pp. 524-528, 2001.
- [10] R. V. Nee and R. Prasad, "OFDM for wireless multi-media communications", Artech House, 2000.
- [11] rlawotjr, 조용수, 조중휘, "이동통신용 모뎀의 VLSI 설계", pp. 102-121, 대영사, 2001.
- [12] AT& T Bell Lab., *Transmission systems for communications*, 5th edition, pp. 264-267, 1984.

저 자 소 개



주 창 복(정회원)
 1975년 한국항공대학교
 전자공학과 학사.
 1977년 고려대학교
 전자공학과 석사
 1987년 고려대학교
 전자공학과 박사
 1981년 3.~경남대학교 공과대학 전자공학과 교수
 <주관심분야: 디지털/RF통신시스템설계 및 통신
 신호처리>



박 남 천(정회원)
 1978년 경북대학교
 전자공학과 학사
 1980년 경북대학교
 전자공학과 석사
 1987년 경북대학교
 전자공학과 박사.
 1980년 3.~경남대학교 공과대학 전자공학과 교수
 <주관심분야: 디지털신호처리>