

무선인지 시스템을 위한 새로운 전송기술 - 웨이블릿 패킷 변조

(A New Modulation Technique for Cognitive Radio - Wavelet Packet Modulation)

□ 서보석* / *충북대학교 전자공학과

요 약

점차 사용 가능한 대역이 포함됨에 따라 이미 할당된 스펙트럼 자원을 효율적으로 공유하고자 하는 무선인지(cognitive radio) 기술이 대역포화 문제를 해결할 수 있는 주요한 기술로 등장하고 있다. 이 원고에서는 광대역 무선인지 기술에 필요한 물리계층에서의 필요조건을 살펴보고 이에 적합한 변조방식에 대해 살펴본다. 특히 광대역 무선인지 기술에 필요한 유연성을 제공할 수 있고 인접채널 간섭을 크게 감소시킬 수 있는 웨이블릿 패킷 변조(wavelet packet modulation: WPM) 기술에 대해 소개한다.

Keywords : 무선인지(cognitive radio), 웨이블릿 패킷 변조(wavelet packet modulation)

1. 서 론

2000년 Mitola에 의해 처음으로 도입된 무선인지(cognitive radio: CR)의 개념은 '주파수 대역을 효율적으로 사용하기 위해 미사용 대역을 동적으로

감지하고 기존 사용자에게 방해가 되지 않도록 해당 미사용 대역을 사용해서 통신할 수 있도록 하는 주파수 공유 무선 기술'로 정의하고 있다[1-2]. 다른 주파수 공유기술 중의 하나인 UWB(ultra-wideband) 방식과의 기본적인 차이점은 UWB는 기존 사용자 대역의 스펙트럼과 겹치는 반면, CR은 이미 지정된 대역이지만 사용하지 않고 있는 빈 대역을 이용하는 방식이라는 점이다. 또 UWB는 주파수를 공유하고 있는 다른 사용자에게 간섭을 일으키지 않기 위해 저전력으로 송출하고 이에 따라 매우 짧은 근거리 이내에서만 이용되지만 CR은 이런 제약 조건이 없다. 그 대신 비어있는 주파수 대역과 시간대를 선택해야 하므로 이를 감지하기 위한 감지기술과 해당 대역과 빈 시간대에 맞춰 주파수 대역을 변화시키면서 신호를 전송할 수 있는 유연한(flexible) 전송기술을 필요로 한다.

* 이 논문은 2005년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-003-D00197)

물리계층 관점에서 CR을 구현하기 위해서는 통신 가능한 빈 대역을 감지하는 스펙트럼 감지기술 뿐만 아니라, 감지된 대역에 적합한 신호 포맷, 주파수 대역, 변조 방식 등을 유연하게 적응적으로 변화시킬 수 있는 전송기술이 필요하다. 비어있는 대역을 선택하는 방법은 시간과 주파수의 2차원 공간에서 고려할 수 있다. TV 대역과 같이 주 사용자(primary user)가 사용하는 주파수 대역이 고정되어 있는 경우 CR 시스템은 해당 주파수 대역에 적합한 전송 포맷을 선택하면 된다. 그러나 레이더 주파수 대역과 같이 고정된 주파수 대역에서 주기적인 또는 비주기적인 시간대만 사용하는 경우 비어있는 해당 주파수-시간 대역에 최적인 전송신호를 선택해야 한다. 따라서 주파수 대역에서의 분해능 뿐만 아니라 시간 대역에서의 분해능을 가진 변복조 방식이 필요하다.

이와 같은 관점에서 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing: OFDM) 방식은 CR 시스템의 전송방식으로 강력한 후보 중의 하나로 볼 수 있다. OFDM은 광대역의 스펙트럼을 다수의 협대역 부채널로 나누어 병렬

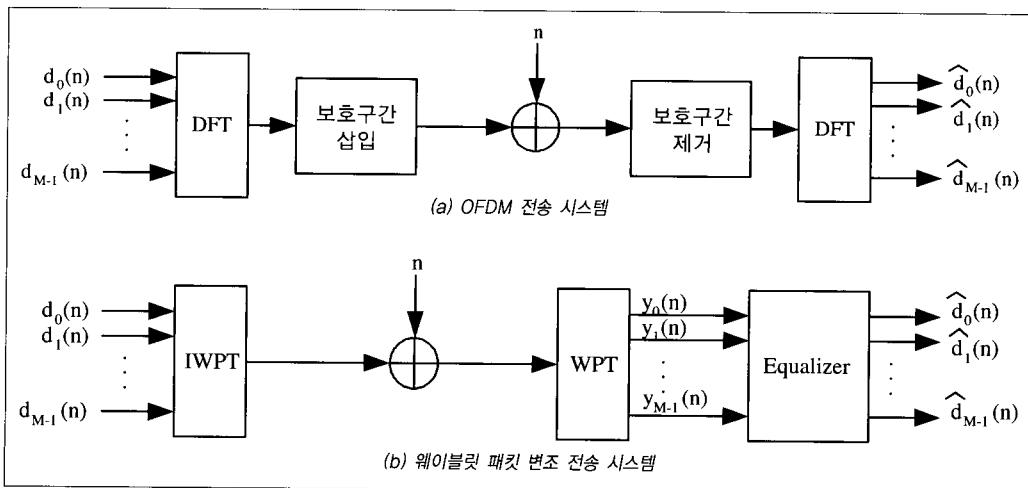
전송하므로, 빈 스펙트럼 대역에 해당하는 부채널에만 데이터를 전송하고 간섭을 유발할 수 있는 부채널에는 데이터를 전송하지 않으므로 채널환경에 적응적으로 대응할 수 있다. 시간 대역 관점에서는 빈 대역이 규칙적으로 발생하거나 예측 가능한 경우를 제외하고는 이용하기 어려운 점이 있다.

한편 OFDM은 부채널에서의 평탄 페이딩 특성을 보장하기 위해 광대역의 경우 부반송파의 수를 크게 해야 한다. 이 경우 FFT(fast Fourier transform) 길이가 증가하여 시스템이 매우 복잡해지는 단점이 있다.

이 원고에서는 CR 시스템을 위한 다른 전송방식으로 웨이블릿 패킷 변조(wavelet packet modulation: WPM) 또는 웨이블릿 패킷 분할 다중화(wavelet packet division multiplexing: WPDM) 방식에 대해 살펴보고자 한다.

2. 웨이블릿 패킷 변조(wavelet packet modulation: WPM)의 개요

<그림 1 (a)>의 OFDM 전송 시스템과 비교할 때,



<그림 1> OFDM과 WPM의 전송 시스템 구조

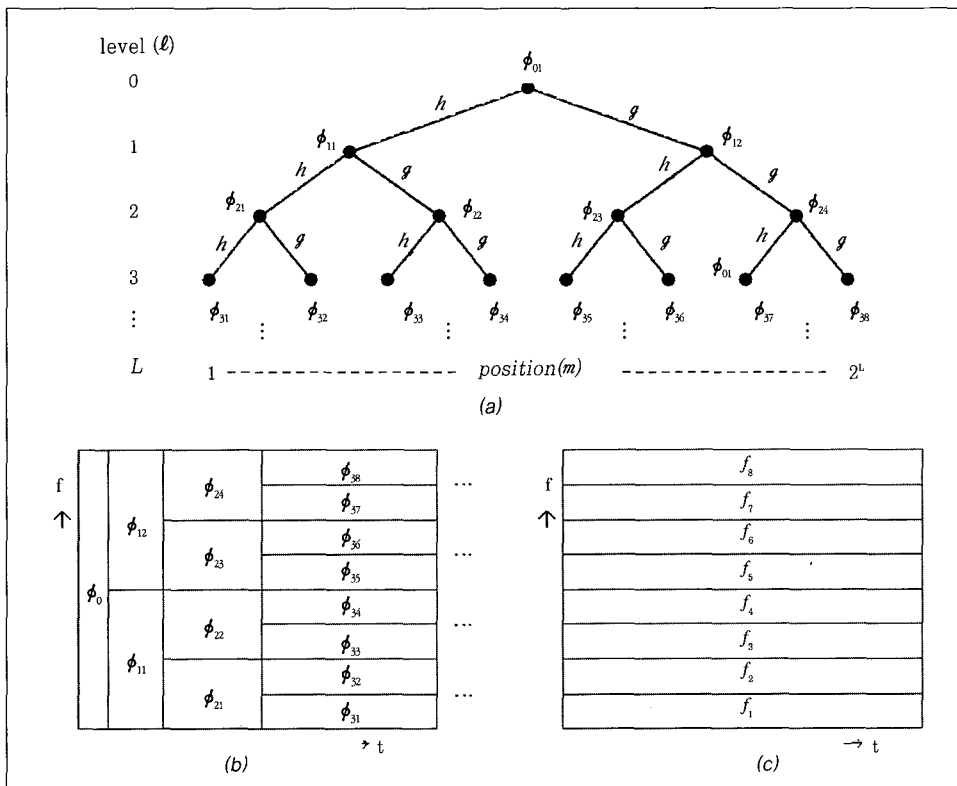
웨이블릿 (또는 웨이블릿 패킷) 변조를 이용한 전송 시스템은 <그림 1 (b)>와 같이 역후리에 변환 (inverse discrete Fourier transform: IDFT) 및 후리에 변환 (discrete Fourier transform: DFT) 부분이 역웨이블릿 패킷 변환 (inverse wavelet packet transform: IWPT) 및 웨이블릿 패킷 변환 (wavelet packet transform: WPT)으로 대체된 것이다. OFDM은 보호구간을 이용하여 심볼간 간섭을 제거하는 반면, WPM 방식은 보호구간을 삽입하지 않고 수신기에서 채널 등화기를 사용하여 심볼간 간섭을 제거한다. 웨이블릿 변조 방식의 채널 등화기는 단일 반송파 변조 방식과 달리, 각 웨이블릿 패킷이 서로 직교하기 때문에 각각의 웨이블릿 패킷에 대해

독립적으로 채널등화를 할 수 있다. 또 순환적으로 진행되는 웨이블릿 패킷 변환과 결합하여 결합 검출을 할 수도 있다. 또 각각의 웨이블릿은 주파수 영역에서도 서로 직교하므로 단일 반송파 변조 전송 시스템의 주파수 영역 등화기와 유사하게 동작한다.

웨이블릿 변조 방식에서 송신신호 $s(t)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다[3].

$$s(t) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{\infty} d_m(n) \phi_{l,m}(t-nT) \quad (1)$$

여기서 $d_m(n)$ 은 n 번째 심볼에 대한 m 번째 부채널의 전송 데이터를 의미하며, $\phi_{l,m}(t)$ 는 2진 나무



<그림 2> 모함수 ϕ_0 로부터 생성되는 웨이블릿의 (a) 나무구조 및 (b) 각 패킷의 시간-주파수 영역 표현, (c) OFDM 부분 송파 신호의 시간-주파수 영역 표현

구조 웨이블릿 분해(decomposition) 단계에서 l 번째 단계의 웨이블릿 패킷 함수를 의미한다 (그림 2 참조). T 는 심볼 구간이고, M 은 전송에 사용하는 부채널의 수를 나타낸다. 여기에서 웨이블릿 패킷 함수 $\phi_{l,m}(t)$ 는 모함수 $\phi_{01}(t)$ 로부터 다음과 같은 관계식을 만족하도록 확장한 것이다.

$$\phi_{l+1,2m-1}(t) = \sum_n h(n) \phi_{l,m}(t - nT) \quad (2)$$

$$\phi_{l+1,2m}(t) = \sum_n g(n) \phi_{l,m}(t - nT) \quad (3)$$

여기서 $T_l = 2^l T_0$ 이고, $h(n), g(n) = (-1)^n h(2k+1-n)$ 의 관계를 가지며, 각각 저역 필터, 고역 필터에 해당한다. <그림 2>의 (a)는 각 분해단계에 따라 생성되는 웨이블릿의 나무구조를 나타낸다. 이 때 각 웨이블릿을 시간-주파수 영역에서 표현하면 그림 (b)와 같은 형태가 된다. 즉 분해 단계가 커질수록 대역폭은 감소하며 심볼길이는 커지게 된다. 이에 비해 OFDM의 각 부반송파의 신호는 동일한 대역폭과 심볼길이를 가지기 때문에 그림 (c)와 같이 나타낼 수 있다.

각 분해 단계의 웨이블릿 함수 사이에는 2배 팽창(dilation) 관계로서 $\phi_{l,1}(t) = 2^{-l/2} \phi_{01}(2^{-l}t)$ 관계식이 성립하며, 동일 단계에 있는 모든 함수는 서로 직교한

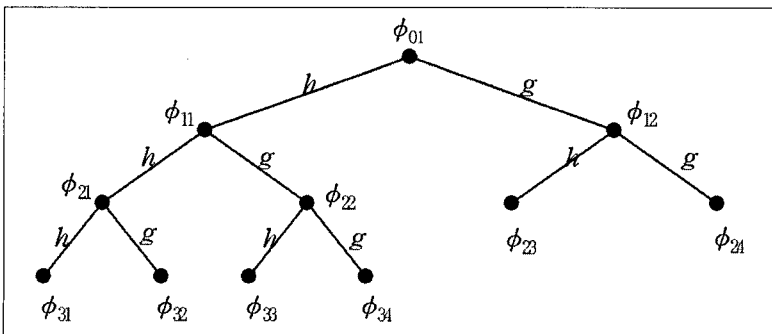
다. 또 동일 단계에서의 평행이동 함수(translation) 사이에도 다음과 같이 직교관계가 성립한다.

$$\langle \phi_{l,m}(t), \phi_{l,m'}(t) \rangle = \delta(m - m') \quad (4)$$

$$\langle \phi_{l,m}(t), \phi_{l,m}(t - nT) \rangle = \delta(n) \quad (5)$$

따라서 주어진 단계 l 에서 웨이블릿 $\phi_{l,m}(t)$ 는 전체가 직교 기저함수를 이루게 된다. (1)식의 WPM 신호는 이러한 동계함수를 기저함수로 고려한 변조 방식이다. 이와 같은 기저함수는 모함수 $\phi_{01}(t)$ 에 의해 모두 결정되며, 이것은 모함수에 따라 통신 시스템의 성능이 결정됨을 의미한다. 같은 단계에 있는 동계함수 사이의 직교성은 심볼간 간섭 제거에 용이하게 이용할 수 있다. 뿐만 아니라 같은 함수가 평행이동한 경우 T_l 의 정수배 이동(즉 심볼구간의 정수배 이동) 뿐만 아니라 몇 표본(현재 4표본 평행 이동시 직교하는 웨이블릿 함수가 제안되어 있음) 이동해도 직교하는 함수가 알려져 있다.

한편 <그림 3>과 같이 비대칭적으로 분해한 나무 구조도 생각할 수 있다. 이 때 각 가지의 종단에 위치한 함수를 웨이블릿 패킷이라 하며, 이들 웨이블릿 패킷 사이에도 직교성이 성립한다. 서로 다른 단계에 있는 함수는 다른 대역폭과 심볼길이를 가진



<그림 3> 모함수 ϕ_{01} 로부터 비대칭적으로 생성된 웨이블릿 패킷

다. 따라서 동계 기저함수를 변조한 (1)식은 다음과 같이 서로 다른 단계에 있는 웨이블릿 패킷을 변조하는 것으로 일반화시킬 수 있다 [4].

$$s(t) = \sum_{(\ell, m) \in S} \sum_{n=0}^{\infty} d_{\ell, m}(n) \phi_{\ell, m}(t - nT_1) \quad (6)$$

여기서 집합 S 는 일반적인 웨이블릿 나무구조에서 웨이블릿 패킷을 이루는 (ℓ, m) 의 집합을 나타낸다. 이 경우 각 웨이블릿 패킷은 서로 다른 모양의 시간-주파수 영역을 차지하므로 다중속도(multirate) 전송 시스템을 용이하게 구현할 수 있다. 또 모함수 $\phi_{01}(t)$ 의 형태는 웨이블릿의 직교조건만 만족하면 되므로 채널 특성에 적합한 다양한 형태의 함수를 설계할 수 있다.

3. WPM의 특징

2장에서 살펴본 바와 같이 WPM 방식은 직교 파형 변조(orthogonal waveform modulation)를 일반화한 것으로, CDM(code division multiplexing)과 OFDM도 각각 직교 파형으로 PN(pseudo random) 부호와 정현파를 사용한 WPM의 특별한 경우로 볼 수 있다. CDM과 OFDM은 각각 시간 영역과 주파수 영역에서 파형을 집중시키고, 주파수 영역과 시간 영역에서 전체 범위에 걸쳐 신호를 확산시킨 방식이다. 이에 비해 웨이블릿 패킷은 시간 영역과 주파수 영역에서 모두 집중된 파형을 설계할 수 있으므로 CDM과 OFDM의 중간적인 특성을 가진다. 이와 같은 성질은 빈 주파수 대역과 시간대에 맞춰 신호를 유연하게 전송해야 하는 CR 시스템에 적합한 전송방식이다.

다른 중요한 특징은 서로 다른 단계에 있는 파형 간에 서로 직교할 뿐만 아니라, 같은 단계에 있는 파

형 사이에도 시간적인 편이가 있으면 서로 직교하는 성질이 있다. 이와 같은 특성은 심볼간 간섭을 효과적으로 제거하는데 유용하게 이용할 수 있다. 또 직교 파형을 채널의 특성에 따라 최적화 하도록 설계할 수 있으므로 채널간 간섭을 감소시킬 수도 있다. 최적 수신을 위한 상관기(correlator)는 QMF(quadrature mirror filter) बैं크(bank)를 이용함으로써 비교적 간단하게 구현할 수 있다[5].

웨이블릿 진폭 변조는 기존의 PAM 방식과 유사하게 서로 직교하는 웨이블릿을 진폭 변조하는 방식으로 매우 높은 대역 효율을 나타낸다[6]. 사용된 웨이블릿 파형은 매우 집중(compact)된 스펙트럼 모양을 가지며, 정해진 파형에 대해 그 파형을 분해한 다이애딕(dyadic)과 서로 직교하며, 또 4 표본 이상 이동한 파형과도 서로 직교하는 성질이 있다. RC(raised-cosine) 파형을 사용하는 PAM과 대역효율을 비교할 때, 기저대역 대역폭은 웨이블릿 진폭변조는 $1.42/T$ 이고, RC 파형은 20%의 롤-오프율(roll-off factor)을 가정할 때 $0.6/T$ 의 대역폭을 가진다. 그러나 통과대역의 경우 웨이블릿 파형은 단일측대파 전송이 가능하고 RC 파형은 양측대파 전송만 가능하므로 필요 대역폭은 각각 $1.42/T$, $1.2/T$ 가 된다. 여기에 웨이블릿은 각각의 다이애딕과 서로 직교하므로 1 단계 다이애딕 확장을 사용할 때 추가로 0.5 bps를 전송할 수 있으며, 이론적인 무한 단계를 사용한다고 가정할 때 $1+0.5+0.25+0.125+\dots = 2$ 가 되어 웨이블릿 진폭변조의 대역효율은 $(2 \text{ b/T})/(1.42/T) \text{ Hz} = 1.41 \text{ b/s/Hz}$ 가 된다. 반면에 RC 파형 변조 방식의 경우 대역효율은 $(1 \text{ b/T})/(1.2/T) \text{ Hz} = 0.83 \text{ b/s/Hz}$ 가 된다. <표 1>은 웨이블릿의 다이애딕 확장에 따른 대역효율을 RC 파형 변조와 비교한 것이다. 이 표를 보면 통과대역에서의 경우 웨이블릿 진폭변조의 대역효율이 RC 파형 변조에 비해 높은 것을 알 수 있다.

〈표 1〉 RC 파형과 웨이블릿 파형의 대역효율 비교

변 조 파 형	대역효율 (기저대역)	대역효율 (통과대역)
Raised Cosine	0.83 b/s/Hz	0.83 b/s/Hz
뮌웨이블릿	0.70 b/s/Hz	0.86 b/s/Hz
뮌웨이블릿 + 1단계 다이애딕 확장	1.06 b/s/Hz	1.15 b/s/Hz
뮌웨이블릿 + 1단계 + 2단계 다이애딕 확장	1.23 b/s/Hz	1.29 b/s/Hz

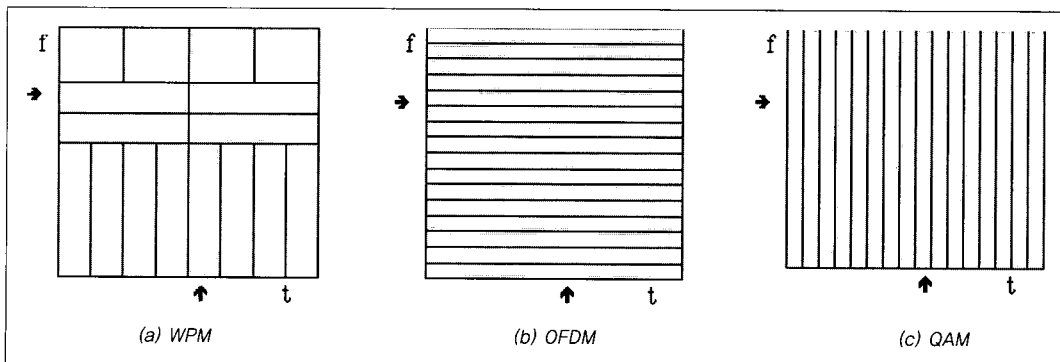
한편 오울관점에서 WPM은 채널의 왜곡 특성에 맞게 시간-주파수 영역에서 파형을 설계할 수 있기 때문에 QAM 또는 OFDM 방식에 비해 더 나은 성능을 나타낸다. 〈그림 4〉는 특정한 시간대, 특정한 주파수 대역에 발생하는 간섭신호의 영향을 보인다. 그림에서 보면 각 시간-주파수 영역의 파형은 평균 전송률이 모두 동일한데, 16개의 파형 중 QAM과 OFDM은 16개 파형 모두 간섭신호의 영향을 받는 반면, WPM은 5개의 파형만이 간섭신호의 영향을 받는다. 한편 WPM은 각 사용자에 할당된 파형이 서로 직교하기 때문에 심볼간 간섭과 채널간 간섭이 발생하지 않는다. 이와 같이 WPM은 특정 채널에 최적인 웨이블릿 파형을 설계할 수 있는 특징이 있다.

WPM을 이용한 웨이블릿 패킷 다중화 방식은 사용자 지정 부호 (signature code)로 웨이블릿 패킷

을 사용한다. 이 경우 웨이블릿 패킷은 서로 직교하므로 다중 사용자 간섭이 발생하지 않는다. 한편 웨이블릿 패킷 변환 (WPT: wavelet packet transform)을 이용하면 2차원 시간-주파수 영역에서 각 사용자 신호의 시간영역 특성과 주파수 영역 특성을 동시에 알 수 있기 때문에 사용자 신호를 결합검출 (joint detection)하기 용이하다.

4. 결 론

이 원고에서는 지금까지 잘 알려져 있지 않은 웨이블릿 변조 방식의 원리와 특성에 대해 살펴보았다. 웨이블릿은 시간-주파수 영역에서 스펙트럼의 집중성, 웨이블릿 파형의 직교성 및 높은 대역효율, 순환 복호의 용이성 등 고속 전송 시스템에 적용하



〈그림 4〉 협대역 임펄스성 간섭신호에 대한 영향

기 적합한 많은 좋은 특성을 가지고 있다. 또 2차원 시간-주파수 영역에서 신호감지가 용이하고, 해당 채널특성에 적합한 파형을 유연하게 설계할 수 있는 등 CR 시스템 구현에 필요한 좋은 특성을 지니

고 있다. 따라서 스펙트럼을 효율적으로 이용하고자 하는 CR 기술의 실현을 위한 새로운 전송방식의 후보로 웨이블릿 변조에 대해서도 연구해 볼 필요가 있다고 생각된다.

참고 문헌

- [1] C. Cordeiro et al., "IEEE 802.22: The First Worldwide Wireless Standard based on Cognitive Radios", New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on, pp.328-337, 8-11 Nov. 2005.
- [2] Haiyun Tang, "Some Physical Layer Issues of Wideband Cognitive Radio Systems", New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on, pp.151-159, 8-11 Nov. 2005.
- [3] J. M. Llorca, W. S. Lu, and V. K. Bhargava, "An Improved Wavelet-Packet-Division Multiple Access System", Communications, Computers and Signal Processing, 1999 IEEE Pacific Rim Conference on, pp. 495-498, 22-24 Aug. 1999.
- [4] K. M. Wong et al., "Wavelet Packet Division Multiplexing and Wavelet Packet Design Under Timing Error Effects", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 45, No. 12, pp. 2877-2890, Dec. 1997.
- [5] A. R. Lindsey, "Wavelet Packet Modulation for Orthogonally Multiplexed Communication", IEEE Trans. on Signal Processing, vol. 45, no. 5, pp. 1336-1339, May 1997.
- [6] J. N. Livingston, C. C. Tung, "Bandwidth Efficient PAM Signaling Using Wavelets", IEEE Trans. on Commun., vol. 44, no. 12, pp. 1629-1631, Dec. 1996.

필자 소개



서보석

- 1987년 : 서울대학교 전자공학과 학사
- 1989년 : 서울대학교 전자공학과 석사
- 1997년 : 서울대학교 전자공학과 박사
- 1998년~1999년 : 삼성전자 연구원
- 1999년~2004년 : 고려대학교 연구전담교수
- 2004년~현재 : 충북대학교 전자공학과 조교수