

Wavelet Bases에 기초한 직교 다중화 변복조 방식

박대철*, 박태성*
 한남대학교 정보통신공학과

Orthogonally Multiplexed Modulation Schemes Based on Wavelet Packet Bases

Daechul Park* and Taesung Park*
 Dept. Info. and Comm. Engr.
 Hannam University

요약

본 논문은 웨이블릿 패킷에 기초한 직교 다중화 변복조 방식을 소개하고 특히 시스템 설계자 입장에서 전송 신호의 특성을 시간-주파수 공간에서 신호 파형을 설계하고 채널 특성에 맞게 설계 할수 있는 구조를 제공하는 WPM(Wavelet Packet Modulation) 방식을 기술하였다. 직교 기저 함수 집합을 만들어 시간-주파수 공간을 임의적으로 Partitioning하고 간섭 잡음 채널에 더 잘 적용할 수 있는 구조를 찾는 방법을 소개 하였고 튜닝 알고리즘의 실험적인 결과를 가지고 WPM변조 방식의 간섭 잡음에 대한 우수한 성능을 갖음을 보였다.

1. 서론

웨이브릿 (혹은 보다 일반화된 웨이블릿 패킷) 기저함수는 신호처리, 통신,컴퓨터비전, 응용수학,지질학 등의 분야에서 상당한 관심을 받아왔고 그 응용성을 찾아볼 수 있다. 이 같은 웨이블릿 함수에 대한 관심은 기본 모형 함수의 dilation과 translation에 기초한 흥미있는 다해상도 구조를 제공해 주기 때문일 것이다. 신호처리 분야에서만 보더라도 웨이블릿의 가능성있는 분야는 음성해석, 압축, 영상 및 비디오 압축, 데이터 신호처리, 특징점 추출, 디지털 시그널링, 대역 확산 통신, 다중 액세스 통신 등 지금도 많은 연구가 진행중이다. 본 논문에서 논의 할 웨이블릿에 기초한 변복조 기법은 시스템 설계자 입장에서 전송신호의 특성을 융통성 있게 선택해 줄 수 있게 해 줄 뿐만아니라 시간-주파수 공간에 신호 파형을 채널 특성에 맞게 선택적으로 분포시킬 수 있는 능력을 갖는다. 또한 기존의 변조 기법인 QAM, Multi-tone 변조 방식과의 공통성과 차이점을 나타내주는 방법으로 전개해 나가고자 한다. 더욱이 기저 함수 집합을 만들어 시간-주파수 공간을 임의적으로 Partitioning하고 잡음 채널에 더 잘 적용할 수 있는 구조를 찾는 방법을 소개 하였다.

2. 웨이블릿에 기초한 변조기법들

웨이브릿에 기초한 변조 기법은 여러 변조 방식들이 중요한 목표로 삼고있는 시간-주파수 공간에 전송 신호

에너지의 분포를 전송단에서 보다 더 효과적으로 제어할 수 있도록 해준다. 보통 변조 기법은 전송 신호 에너지를 허용된 최대한의 시간-주파수 공간에 골고루 분포 시키려고 한다.

웨이브릿 변조 기법은 일반적인 형태의 QAM의 특별한 경우라고 볼 수 있다. QAM에서 2진

데이터 시퀀스 $\{d_i\}$ 으로부터 B-bit block은 $M = 2^B$

심볼 $\{s_i\}$ 을 갖는 신호 공간의 성상도에서 취한 한 개의 심볼로 mapping된다. 전송할 심볼 시퀀스가 주어졌다면 QAM 신호 파형의 일반적인 형태는 다음과 같이 쓸 수 있다

$$m(t) = \sum_{i \in I} \sqrt{\frac{E_i}{T_i}} s_i \phi_i\left(\frac{t}{T_i}\right)$$

여기서 s_i 는 i 번째 데이터 심볼이고, T_i 는 M 개의 심볼이 단위 시간대에 전송 될 수 있도록 선택된 정규화된 시간 인자이다. E_i 는 i 번째 데이터 심볼을 전송하는데 사용된 에너지를 나타낸다. $\phi_i(t)$ 는 i 번째 심볼을 변조하기 위해 사용된 펄스 모양을 나타낸다. I 는 심볼에 대한 인덱스를 나타내는 정수 집합이다.

2.1 M-band 웨이블릿 변조(MWM)

MTM(Multitone Modulation)에 사용된 복소수 지수 함수 대신에 변조 파형으로서 직교 M-band 웨이블릿 함수를 사용하는 방법이 여러 저자들에 제안 되었다[1,2,3]. MTM과 유사한 방법으로 M-band 웨이블릿 함수를 사용하는 경우는 다중 직교 subchannel로 나뉘어 각 subchannel에 대한 pulse shaping 함수로서 M-band scaling 함수 $\phi_i(t)$ 와 M-band wavelet 함수 $\psi_i(t)$ 를 사용하게 된다. MWM 신호 파형은 L-level로 전체 대역폭을 동일한 M개의 서브밴드로 분해되기때문에 M블럭 데이터 시퀀스에 대한 변조 파형을 주어진 파라미터(M 블럭의 지원 구간 $T=1$, 심볼의 평균에너지 = $E_i @ level = l$)를 사용하여 표현하면

$$m(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[\sqrt{E_0} s_{kM}^0 \phi(t-k) + \sum_{\ell=1}^{M-1} \sqrt{E_{\ell}} s_{kM+\ell}^{\ell} \psi_{\ell}(t-k) \right]$$

따라서 전송할 심볼들 $\{s_{kM+\ell}^{\ell}\}$ 은 M-band wavelet

변환의 역 변환인 합성(Synthesis)식에서 계수값으로 사용된다. 여기서 주어진 TX 구현(implementation)에 사용된 모든 Scaling 함수와 Wavelet 함수는 똑같은 대역폭과 시간 구간을 갖는다.

MTM의 경우와 달리 Scaling과 wavelet 함수는 일반적으로 시간 영역에서 overlap이 발생하지만 사용된 pulse shaping 함수의 직교성 때문에 zero ISI를 갖는다.

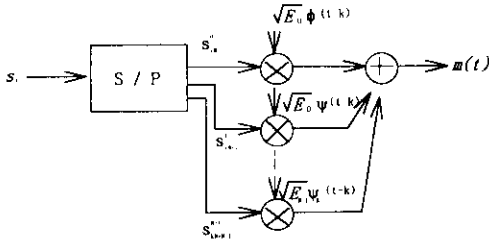


그림 1 MWM 트래시버 구조

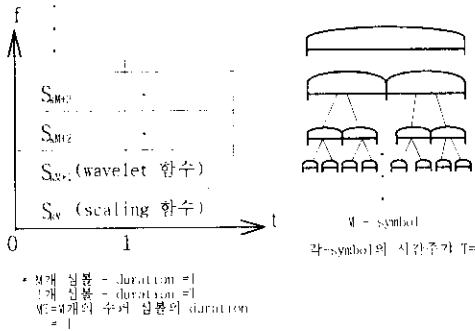


그림 2 이상적인 MWM의 시간-주파수 공간도

2.2 Multi-Scale Modulation (MSM)

MSM 변조는 시간과 주파수 영역에서 dyadic partitioning에 의해 일어지는 직교 dyadic 웨이브릿 함수를 pulse shaping 함수로 사용하여 일어난 것이다. 이 기저 함수는 data 대역폭의 nonuniform partitioning으로 인해 주파수 영역에서 dyadic scaling 방법으로 에너지 분포를 제어하게 해준다. 따라서 MWM이나 MTM과 달리 모든 개별 심볼에 대한 시간 구간이 동일하지 않고 개별 심볼 대역폭 또한 동일하지 않다.

MTM(혹은 DWM(Dyadic Wavelet Modulation))에 대한 변조 파형식을 아래의 파라미터를 사용하여 표현하면

$$E_i = E_{\ell}, T_i = 1$$

$$\phi_i(t) = \begin{cases} \phi_n^0(t), & \ell = 0 \\ \psi_n^m(t), & \ell \neq 0 \end{cases}$$

여기서 $\phi_n^0(t)$, $\psi_n^m(t)$ 는 각각 dyadic scaling 함수와 wavelet 함수이다.

위 관계식을 (1)식에 대입하여 정리하면 변조 파형은

$$m(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left[\sqrt{E_0} s_{kM}^0 \phi_n^0(t) + \sum_{\ell=1}^{M-1} \sqrt{E_{\ell}} s_{kM+\ell}^{\ell} \psi_n^m(t) \right]$$

MWM의 경우와 같이 전송할 심볼들 $\{s_{kM+\ell}^{\ell}\}_{\ell=0}^{M-1}$ 은 DWT(Dyadic Wavelet Transform)의 역 변환인 합성식에서 계수값으로 사용된다. DWM의 고유한 특성인 non-uniform Scaling이 시간-주파수 공간 그림에서 보면 분명해진다.(그림 3참조)

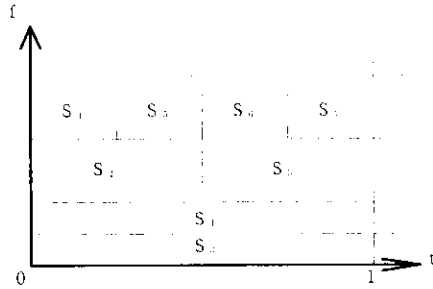


그림 3 DWM에 대한 이상적인 TF Tiling

이 경우는 MTM과 MWM의 경우와 같이 같은 심볼 인덱스를 갖는 일련의 전송 파형을 Subchannel이라고 볼 수 있다. QAM의 경우 subchannel을 TDM방식으로 나누고, MTM과 MWM은 FDM방식으로 나눈다고 볼 수 있지만 DWM의 경우는 TDM과 FDM의 혼합 방식으로 해석할 수 있다.

2.3 Wavelet Packet Modulation (WPM)

WPM의 구조적 유연성은 여러 유형의 간섭 환경에서도 더 잘 적용할 수 있으며 성능은 WPM의 특수한 경우인 MSM과 MWM의 유용성을 유지해 준다. 어떤 간섭 환경에 대하여 WPM을 QAM, MSM과 비교하여 봄으로써 WPM의 TF-cell(개별 심볼)의 간섭에 대한 우수성을 나타내고자 한다. 예를 들어 협대역 채널이 데이터 대역의 고주파 성분과 작용하고 동시에 임펄스 간섭 신호가 Supersymbol 구간의 어느 시점에 작용한다고 하자. 최대 레벨(scale)수를 N=4라고 할 때 QAM, MSM, MWM, WPM은 $2^4 = 16$ 개의 TF-cell로 분해된다. MSM의 경우 원 데이터를 분해하면 N+1=5개의 scale(혹은 level)로 표현 되고 각 scale마다 scaling 함수와 wavelet 함수를 직교 파형 함수로 볼 수 있다. MWM의 경우 최종 scale까지 모든 방향으로 dyadic 분해 과정을 거치면 16개의 등대역폭의 직교 함수 파형용

언을 수 있다. QAM이 경우는 16개의 데이터에 대한 파형을 블록으로 처리하여 놓은 것으로 볼 수 있다. 마지막으로 WPM의 경우는 주어진 협대역 주파수 재밍과 임펄스 간섭을 적게 받는 형태로 Supersymbol Tuning 알고리즘에 의해 Wavelet packet분해가 이루어져 언어지게 된다.

주어진 간섭과 재밍 환경에서 각 변조 방식을 비교해 보면 그림 4에서 보듯이 Tone잡음과 Impulse잡음에 대한 각 변조 방식의 TF-cell의 영향 받는 수를 계산해 보면 WPM의 경우는 전체 16개중 모두 5개이고 MSM은 16개중 12개이고 MWM과 QAM은 16개 모두 영향을 받는다. 따라서 WPM의 특징은 채널 불안정성에 기인한 잡음 영향을 고립시킬수 있는 구조적 유연성을 제공해 주고 있다. 이것이 곧 다차원 시그널링에 대한 시간-주파수 간섭 잡음을 동시에 완화시킬 수 있는 훌륭한 방법을 제공해 준다[2,5].

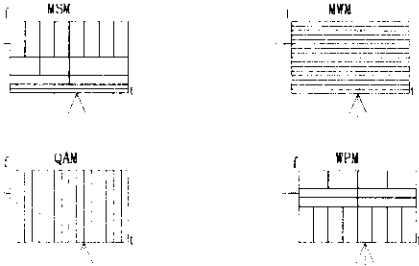


그림 4 QAM, MSM, MWM, WPM 방식의 협대역 주파수 및 임펄스 간섭 잡음에 대한 오류 심볼의 분포

3. 수퍼심볼 튜닝 알고리즘

다차원 WPM 신호의 일반적인 형태는

$$m_{WPM}(t) = \sum_{i=1}^L \sqrt{2^{-\ell}} E \sum_{k=-\infty}^{\infty} s_k^i \psi_n(2^{-\ell} t - k)$$

로 표현된다. 여기서 s_m^i 는 일반적으로 복소수 QAM심볼로 언어지는 2^{ℓ} 스케일의 i 채널상의 n_i 번째 값을 나타낸다. QAM 소스 데이터가 웨이브릿 패킷 역변환의 계수값으로 사용 되어져 합성후 Supersymbol을 형성하게 된다. WPM파형은 단일 rate의 QAM 소스로부터 나온 데이터를 2-ch 필터뱅크의 분해에 의해 언어진 partition $P = \{ (\ell_1, n_1), (\ell_2, n_2), \dots, (\ell_J, n_J) \}$ 정보를 이용하여 J 개의 채널로 역다중(Demux)되어 웨이브릿 패킷 역변환에 의해 만들어진다. 여기서 중요한 문제는 WPT에 의해 언어지는 partition P 를 주어진 잡음 환경에서 S/N비를 최적화하도록 P 를 찾아야한다. 채널 간섭의 유형에 따라 partition P 를 얻는 과정은 단

순할 수도 매우 복잡할 수있다. 따라서 본 연구에서 소개한 채널 간섭의 유형을 협대역 주파수 재밍과 짧은 시간의 임펄스 간섭만을 고려 하고자 한다. 웨이브릿 패킷에 기초한 다차원 시그널링 방식에서 TF-cell의 시간-주파수 공간에서의 처리는 주어진 잡음 환경에 대하여 심볼 잡음 성능을 최적화 해주는 partition을 체계적으로 찾을 수 있도록 시작적으로 안내해 준다. 이 같은 partition set P 를 찾는 데 가능한 경우의 수가 scale이 증가함에 따라 기하급수적으로 증가 하기 때문에 최적의 partitioning을 주는 웨이브릿 패킷 변환 알고리즘을 개발하여야 한다. 일반적으로 dyadic 웨이브릿 패킷 라이브러리를 사용하는 경우 partitioning의 수에 대한 순환식 $|P_{N+1}| = |P_N|^2 + 1$ 이 성립한다.

scale $N=5$ 인 경우 $|P_5| = 458330$ 개의 가능한 웨이브릿 패킷 라이브러리가 존재하기 때문에 완전 탐색을 통해 S/N비를 최대화하는 partition을 찾는 것은 일반적으로 어려운 문제이다.

본 연구에서는 시간-주파수 공간의 직교 웨이브릿 패킷 함수 set의 시간 국부성(localization)과 주파수 국부성의 변화를 통해 협대역 주파수 잡음과 임펄스 형태의 간섭 잡음을 체계적으로 극복하는 슈퍼 심볼 튜닝 원리를 설명하고 튜닝 알고리즘을 간략히 소개하고자 한다.

먼저 관련 용어를 정리하면 2개의 하위 scale 패킷의 합성(synthesis)을 역방향 튜닝이라고 하고, 상위 한 개의 패킷이 2개의 하위 패킷으로의 분해(decomposition)를 순방향 튜닝이라고 하자.

● 튜닝을 위한 법칙

수퍼 심볼 튜닝 제 1 법칙은 어떤 scale에서 패킷의 역(혹은 순)방향 튜닝이 partition 비용(혼신된 TF-cell의 수)을 감소 시킨다면 그 패킷의 순(혹은 역)방향 튜닝은 partition비용을 증가 시킨다.

간단히 말하면 비용을 줄여주는 방향으로 가는 것이 올바른 선택임을 말해준다. 합성 과정은 TF-cell의 시간축 방향으로 좁혀주는 즉 패킷 함수의 시간 해상도를 높여준다. 따라서 이 경우는 시간 공간상의 임펄스 잡음의 존재를 고립화 시킬 수 있다. 반면 순방향 튜닝에 의한 시간축 방향으로 심볼을 확산 시키는 것은 임펄스 잡음의 혼신을 더 많이 가져올 가능성을 높여준다. 비슷한 방법으로 분해에 의한 개선 즉 순방향 튜닝 과정은 TF-cell의 주파수축 방향으로 좁혀주는 즉 패킷 함수의 대역 해상도를 높여준다. 따라서 이 경우는 주파수 공간의 Tone 잡음의 존재를 고립화 시켜 혼신을 피할 수 있도록 해준다.

수퍼 심볼 튜닝 제 2 법칙은 어떤 scale에서 패킷의 순(혹은 역)방향 튜닝이 partition비용을 증가시키게 한다면 더 이상의 순(혹은 역) 방향 튜닝은 비용을 감소시켜 주지 않는다.

다시 말하면 비용을 증가시키는 방향은 잘못된 선택임을 말해준다. 이 법칙은 TF-cell이 주파수 혹은 시간축 방향으로 확산될 때 성능이 저하되면 어느 방향으로

든 더 이상의 확산은 단지 재밍 간섭의 가능성을 높여 줄 뿐임을 말한다.

이 두 법칙을 기본으로 하여 수퍼 튜닝 알고리즘의 절차를 간단히 플로우 차트로 표시하면 그림과 같다.

● 수퍼 심볼 튜닝 실험

시간과 주파수 재밍이 동시에 존재하는 경우에 대한 수퍼 심볼 알고리즘의 수행 결과에 대하여 살펴보고자 한다. 먼저 가상적인 간섭 잡음 환경에 대한 정보가 필요하다. 우리의 경우 두가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 실험을 위한 파라미터는 전체 64개의 개별 심볼로 구성된 수퍼 심볼을 만들었고 최대 6-level 까지 분해가 가능하다. Tone 잡음은 단일 톤 잡음을 가정하였고 위치는 64개의 주파수 bin 중에 4번째에 위치한다고 가정하였고 시간 임펄스 간섭 잡음은 1과 3번째에 위치한다고 가정하였다. 이 경우 수퍼 심볼 알고리즘을 적용하였을 때 얻어진 Partitioning 정보는 $P = \{(-5, 0), (-5, 1), (-4, 1), (-3, 1), (-2, 1), (-1, 1)\}$ 을 얻었고 이에 대한 TF-cell 그림은 보면 아래와 같다. 그림에서 보아 알 수 있듯이 64개의 심볼 중 간섭 영향을 받는 심볼의 수는 8개에 지나지 않는다.

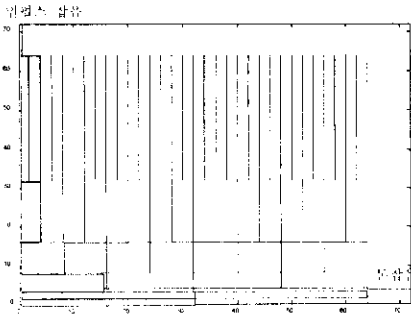


그림 5 64 TF-cell로 구성된 수퍼 심볼에서 간섭 영향에 대한 잡음의 localization

Tone 잡음은 2개의 split 톤 잡음을 가정하였고 위치는 64개의 주파수 bin 중에 5번째와 40번째에 위치한다고 가정하였고 시간 임펄스 간섭 잡음은 1과 3번째에 위치한다고 가정하였다. 이 경우 수퍼 심볼 알고리즘을 적용하였을 때 얻어진 Partitioning 정보는 $P = \{(-4, 0), (-5, 2), (-5, 3), (-3, 1), (-2, 1), (-4, 8), (-5, 18), (-5, 19), (-3, 5), (-2, 3)\}$ 을 얻었고 이에 대한 TF-cell 그림은 보면 아래와 같다. 그림에서 보아 알 수 있듯이 64개의 심볼 중 간섭 영향을 받는 심볼의 수는 이 경우에도 12개에 지나지 않는다.

4. 결론

제안된 WPM변조 기법은 기존의 MSM, MWM, MTM, QAM 방식에 비해 광범위한 간섭 환경에 적용적으로

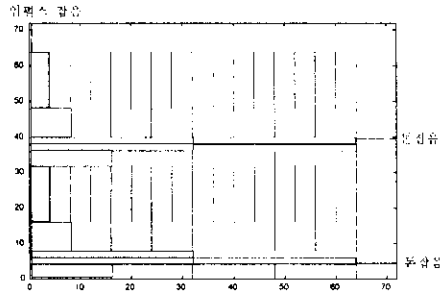


그림 6 64 TF-cell로 구성된 수퍼 심볼에서 간섭 영향에 대한 간섭 잡음의 localization

대처 할 수 있는 융통성 있는 신호 파형 설계와 간섭 잡음에 덜 민감한 구조를 제공해준다. IDWPT에 의해 합성된 supersymbol을 튜닝하는 과정을 통하여 간섭

잡음을 localization 시킴으로써 협대역 주파수 와 임펄스 재밍의 영향을 최소화 할 수 있음을 보였다. 또한 WPM 신호 파형의 전력 스펙트럼 밀도 함수는 QAM과 동일한 전력 스펙트럼을 갖으며 QAM과 등가 전송 대역폭을 갖음을 말해준다. 이론적으로 볼 때 pulse shaping 함수의 직교 함수 분해에 의한 차원의 증가는 대역 효율성을 개선시키지 못함을 알 수 있다.

과포화 다중 액세스 통신 시스템에서 다수 사용자 검출 알고리즘의 해결을 위한 한 방법으로 제안되고 있는 웨이브릿 패킷 다중 액세스 방식, 웨이브릿 패킷에 기초한 대역 확산 통신 시스템의 설계, 통신 보호 등에 웨이브릿 패킷 이론의 응용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

참고 문헌

[1] R.E. Learned et. al., "Wavelet-packet based multiple access communication," in *Proc. SPIE* vol. 2303-20, Int. Symp. on Optics, Imaging, and Instrumentation, July, 1994
 [2] A.R. Lindsey, "Multi-dimensional signaling via wavelet packets," *Proc. SPIE* vol. 2491-29., Wavelet applications for dual use, April, 1995
 [3] P.P. Ghandi, S.S. Rao, and R.S. Pappu, "Wavelets for Baseband Coding of Waveforms" *Proc. IEEE Globecom94*, pp. 363-367, Nov., 1994
 [4] X.F. Wang, W.-S Lu and A. Antoniou, "Multuser Detection for Multiple-Access Communications Using Wavelet-Packet Transforms," *Proc. PR Conf. on Comm., Comp., and Signal Processing(PACRIM97)*, Aug. 20-22, 1997, Victoria, B.C., Canada, pp. 607-610
 [5] A. R. Lindsey and M. J. Medley, "Wavelet Transforms and Filter Banks in Digital Communications," *Proc. SPIE Conf. on Wavelet Applications for Dual Use*, Orlando, FL, April 8-12, 1996, Vol. 2762