다상 DFT 필터뱅크를 이용한 도약신호 검출에 관한 연구

권정아* · 이치호** · 정의림***

A Study on Frequency Hopping Signal Detection Using a Polyphase DFT Filterbank

Kwon Jeong-A* · Lee Cho-Ho** · Jeong Eui-Rim***

본 논문은 2012년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원과 국방과학연구소 지원
(과제번호:UD110085ED)을 받아 수행된 연구임.

요 약

시간에 따라 중심주파수를 바꾸는 도약신호를 도약주기, 도약 주파수 등에 대한 정보 없이 검출하는 것은 대단히 어렵다고 알려져 있다. 본 논문에서는 도약 신호가 존재하는 광대역 샘플링 신호로부터 도약신호의 중심주파수, 도약 주기 등의 정보를 검출하는 알고리즘을 제안하였다. 도약 신호를 검출하기 위한 일반적인 방법으로는 다수의 협대역 필터가 필요하지만 이러한 구현은 비효율적이므로 본 논문에서는 다상 DFT 필터뱅크를 도입하였다. 또한 다상 DFT 필터뱅크의 출력으로부터 도약신호를 검출하는 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 검출 알고리즘은 메모리 사이즈나 구현 복잡도를 줄이기 위해 이진 이미지 신호처리에 기반하여 개발되었다. 제안하는 알고리즘의 성능은 모의실험과 FPGA (field programmable gate array) 구현을 통하여 확인하였다.

ABSTRACT

It is known that the detection of hopping signals without any information about hopping duration and hopping frequency is rather difficult. This paper considers the blind detection of hopping signal's information such as hopping duration and hopping frequency from the sampled wideband signals. In order to find hopping information from the wideband signals, multiple narrow-band filters are required in general, which leads to huge implementation complexity. Instead, this paper employs the polyphase DFT(discrete Fourier transform) filterbank to reduce the implementation complexity. This paper propose hopping signal detection algorithm from the polyphase DFT filterbank output. Specifically, based on the binary image processing, the proposed algorithm is developed to decrease the memory size and H/W complexity. The performance of the proposed algorithm is evaluated through the computer simulation and FPGA (field programmable gate array) implementation.

키워드

다상 DFT 필터뱅크, 주파수 도약신호, 이미지 신호처리, 2-D 이진 이미지

Key word

Polyphase DFT filterbank, Frequency-hopping signals, Image signal processing, 2-D binary image

* 준회원 : 한밭대학교 전파공학과 석사

접수일자 : 2013. 01. 02

** 정회원 : 국방과학연구소

심사완료일자 : 2013. 02. 07

*** 종신회원 : 한밭대학교 전파공학과 교수(교신저자, erjeong@hanbat.ac.kr)

I. 서 론

신호들이 혼재되어 있는 무선채널환경에서 협대역 주파수대역 내에 존재하는 신호들을 탐지하여 그 신호의 정보를 추출해야 하는 상황이 종종 있다. 그 예로써 상업적인 측면에서 특정 주파수대역에서 사용 중인 허가받지 않은 불법 전파원을 탐지하여 해당 신호원을 사용하고 있는 사용자의 위치를 발견하는데 이용될 수 있으며, 군사적인 측면에서 적 통신신호를 탐지하기 위해 사용될 수도 있다.

주파수 도약시스템은 넓은 주파수 대역에서 한 순간에는 협대역을 사용하지만 시간에 따라 중심주파수를 바뀌가며 사용자간 간섭을 최소화 하며 통신하는 방식이다. 군사적인 측면에서 주파수 도약시스템은 외부의 고의적인 제밍 환경 하에서 우수한 항제밍 성능(Anti-Jamming Capability)을 제공함과 동시에 광대역 무선 채널 환경에서 주파수 다이버시티를 이용하여 효율적이고 높은 신뢰성으로 통신을 할 수 있다는 장점이 있다. 이뿐만 아니라, 보안(Security) 및 저피탐율(Low Probability of Intercept) 측면에서 타 통신방식에 비해 장점이 있기 때문에 특히 군용 통신을 위한 중요한 통신 방식으로 각광을 받아왔다. 그러나 신호를 탐지하는 입장에서 주파수 도약신호를 아무런 정보 없이 탐지하는 것은 매우 어렵다. 그 이유는 주파수 도약시스템을 사용한 통신 방식은 그 시스템 특성상, 정보를 전송하기 위해서 하나의 고정된 반송파를 사용하는 대신에 광대역에서 다양한 주파수로 도약하는 통신방식을 이용하기 때문에 정확한 시간 및 주파수 동기 없이 데이터 검출이 불가능하기 때문이다 [1].

그동안 이러한 주파수 도약신호를 검출하기 위한 다양한 기법들이 연구되어 왔으나, 대부분의 기법들은 신호의 자기상관 값을 이용하여 주파수 도약신호 유무를 판단하며 충분한 시간 구간동안의 평균을 취해야 정확도가 올라가기 때문에 검출에 느린 단점을 보인다. 본 논문에서는 주파수 도약신호 검출을 위해 다상 DFT(discrete Fourier transform) 필터뱅크를 적용하여 광대역 신호를 여러 개의 겹치지 않는 협대역 신호로 효율적으로 분리한다. 본 논문에서는 이러한 다상 DFT 필터뱅크의 출력신호를 이용하여 도약주기 및 도약주파수 등의 정보를 추출하는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 다상 DFT 필터의 출력을 일정시간

구간 동안 메모리에 저장하여 도약정보를 추출하는 방법으로 구현된다. 이로 인해 도약정보 추출까지 시간 지연이 존재하고 메모리의 용량이 채널수와 저장하는 시간에 비례하여 커지는 문제가 존재한다. 본 논문에서 다루는 도약신호 추출은 도약 신호의 탐지 등이 목적이고 실시간 통신이 목적이 아니기 때문에 시간 지연은 큰 문제가 되지 않는다. 하지만 메모리 크기는 구현 시 큰 문제가 될 수 있는데, 본 논문에서는 도약 정보 추출에 필요한 메모리 크기와 계산 복잡도를 줄이기 위하여 다상 DFT 필터뱅크 출력 신호를 이진 이미지로 변환하여 이미지 신호처리에 기반하여 추출 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 컴퓨터 모의실험과 FPGA (field programmable gate array) 구현을 통하여 검증한다.

II. 관련 연구

2.1. 라디오미터를 이용한 신호 유무 감별

전력 감별(power detection) 방식 중 가장 간단한 방식으로 대역통과필터 결과 값의 절대값 제곱을 취해 신호의 크기를 구한 결과와 기준 값과 비교하여 신호 유무를 판별하는 방식이다. 계산 과정이 간단하여 신호 유무를 판단하는 시간을 단축시킬 수 있는 장점이 있지만 낮은 SNR (signal to noise ratio)에서 성능이 떨어지는 단점이 있다. 실제 라디오미터는 전체 대역폭을 협대역으로 겹치지 않는 대역통과필터들로 나누고 전력을 측정한다. 그런데 일반적으로 대역통과필터는 입력신호보다 수십 배에 해당하는 대역폭을 갖는 대역통과필터로 구성되어 있기 때문에 넓은 대역폭 내에 존재하는 잡음으로 인해 낮은 SNR에서 전력측정이 이루어지게 되고 이로 인해 검출 정확도가 떨어지게 된다. 물론 대역통과필터의 대역폭을 좁게 설계하면 되지만 이 경우 하드웨어 복잡도가 많이 증가하게 된다 [2][3].

그림 1. 라디오미터 구조
Fig. 1 Radiometer structure

2.2. 자기상관함수(Auto-correlation)를 이용한 신호 유무 감별

그림 2. 자기상관함수 구조
Fig. 2 Auto-correlation structure

자기상관은 어떠한 신호가 잡음과 함께 있을 때 그 신호 검출에 주로 이용된다. 현재 신호와 과거 신호가 얼마나 닮았는가를 수학적으로 표현하여, 현재 수신 신호와 이를 지연시킨 신호를 곱하여 충분한 시간 구간동안 평균을 취하여 검출하는 방법이다. 이 방식은 라디오미터 방식보다 정확도가 높긴 하지만 긴 시간 구간동안 평균을 취해야 하기 때문에 판별에 걸리는 시간이 길다는 단점이 있다 [3].

2.3. 주기정상성 특성(Cyclostationary feature) 검출을 통한 신호 유무 감별

일반적으로 디지털 변조 신호는 주기적으로 반복적인 통계적 특성을 가진다. 이러한 주기적 특성으로 인해 신호의 주파수 성분 내에서 상관성이 존재하게 되고 이러한 상관성을 이용하여 신호를 감별하는 방식이 주기정상성 특성 검출을 이용하는 방식이다. 이 방식은 신호의 유무뿐만 아니라 변조신호의 종류, 대역폭 등의 정보를 추출할 수 있다.

이와 같이 주기정상성 특성 검출은 신호의 종류와 특성까지 검출할 수 있다는 장점이 있지만, 에너지 검출에 비해 훨씬 복잡한 검출기 회로를 요구하며 검출에 필요한 시간도 긴 단점이 있다. 또한 최신 디지털 변조 신호에 대해서는 추출 성능이 떨어지는 것으로 알려져 있다 [4].

본 논문에서는 검출시간이 길게 걸리고 시간 해상도가 떨어지는 자기 상관함수 방식이나 주기정상성 특성 검출은 사용하지 않고, 비교적 간단하지만 검출시간이 짧고 시간 해상도가 높은 라디오미터를 이용하여 신호를 검출하는 방식을 이용하되 다상 DFT 필터뱅크를 적용하여 라디오미터의 성능을 개선하고자 한다.

III. 다상 DFT 필터뱅크

3.1. 구조 및 설계 사양

[그림 3]은 본 논문에서 이용하고자 하는 다상 DFT 필터뱅크의 구조이다. 일반적으로 전체 관찰 대역폭을 M 개의 겹치지 않는 채널로 나누고자 할 때 M 개의 대역통과필터가 필요하지만 다상 DFT 필터뱅크를 이용하여 이를 구현하면 프로토타입 저역통과필터 1개와 M -point FFT(fast Fourier transform) 1개만으로 구현이 가능하다. 따라서 분해하고자 하는 필터 개수가 많아질수록 일반적인 방식에 비해 구현 복잡도가 월등히 우수하다. 다상 DFT 필터뱅크에서는 프로토타입 저역통과필터 설계가 중요한데, 나누고자 하는 협대역의 대역폭에 맞게 정확하게 필터를 만들어야 찾고자 하는 신호를 정확하게 검출할 수 있다 [5][6].

그림 3. 다상 DFT 필터뱅크 구조
Fig. 3 polyphase DFT filter-bank structure

이처럼 다상 DFT 필터뱅크를 이용하면 여러 대역통과필터를 비교적 간단한 하드웨어로 구현이 가능하기 때문에 라디오미터의 각 대역통과필터의 대역폭을 신호의 대역폭만큼 좁게 설계할 수 있고, 이러한 협대역 필터 출력의 SNR은 상대적으로 높기 때문에 라디오미터의 성능을 크게 높일 수 있다.

그림 4. 입력 신호(위),
프로토타입 저역통과필터(아래)
Fig. 4 Input signal (upper),
Prototype lowpass filter (lower)

[그림 4]의 위 그림은 본 논문에서 구현한 입력 신호의 스펙트럼을 나타내는데 샘플링 주파수 2MHz, 8개의 채널로 나눌 것을 가정하여 4번째 채널에만 톤 신호를 생성한 결과이고 아래 그림은 입력 신호를 8개의 채널로 나누어 신호를 검출 하기 위한 프로토타입 저역통과필터의 특성을 나타낸다.

3.2. 구현 결과

3.2.1. 매트랩(MatLab) 모의실험 결과

입력신호로 4번 채널에만 톤 신호를 넣어주었기 때문에 4번 채널에 전력이 나타나는 것을 [그림 5]를 통해서 확인 할 수 있으며 다른 채널(5번 채널)에는 전력이 없는 것을 [그림 6]을 통해서 확인 할 수 있다. 4번을 제외한 모든 채널에는 전력이 나타나지 않았다.

그림 5. 4번 채널 전력 밀도 스펙트럼
Fig. 5 4th Channel power density spectrum

그림 6. 5번 채널 전력 밀도 스펙트럼
Fig. 6 5th Channel power density spectrum

3.2.2. FPGA 구현 결과

다상 DFT 필터 뱅크를 FPGA로도 구현하여 매트랩 결과와 비교하였다. [그림 7]은 FPGA로 다상 DFT 필터 뱅크를 구현한 결과를 보이고 있다. [그림 7]에서 1번부터 8번 채널까지 신호의 전력 스펙트럼을 보이고 있으며, 마지막 그림은 각 채널의 신호전력의 평균을 취해서 나타낸 결과이다. 매트랩 모의실험과 동일한 결과로 4번 채널에만 전력이 존재하고 나머지 채널에는 전력이 검출되지 않음을 확인할 수 있다. 이 실험으로부터 다상 DFT 필터 뱅크를 이용하여 여러 개의 대역통과필터를 구현할 수 있고 정상적인 출력을 얻을 수 있음을 확인하였다.

그림 7. FPGA 결과 (1번부터 8번 채널)
Fig. 7 FPGA results (1 to 8 channels)

IV. 제안하는 도약 신호 검출 알고리즘

4.1. 도약 신호 생성

본 논문에서는 임의의 도약신호를 다상 DFT 필터뱅크를 적용한 검출기에서 정확하게 검출하는 것을 보이고자 한다. 그래서 검출할 가상의 도약신호를 생성하였다. 신호의 설계사양으로 샘플링 주파수는 2MHz, 도약신호의 순시대역폭은 250kHz, SNR은 15dB, 도약 주기는 1초로 설계하였다.

4.2. 다상 DFT 필터 뱅크 적용

생성된 가상의 도약 신호를 검출하기 위해 다상 DFT 필터뱅크를 적용한다. 샘플링 주파수가 2MHz이고, 도약신호의 순시대역폭이 250kHz이므로 8개의 채널로 나뉘지게 된다. [그림 8]은 도약신호를 다상 DFT 필터뱅크를 통과 후 8개의 각 채널에서의 출력신호 크기를 시간에 따라 보이고 있다. 그림에서 가로축은 시간, 세로축은 채널 1번~8번까지 채널 번호를 나타낸다. 시간에 따라 도약신호의 주파수가 이동하는 것을 확인할 수 있다.

그림 8. 다상 DFT 필터뱅크 채널별 도약신호
Fig. 8 Polyphase DFT filter-bank channel hopping signal

4.3. 2차원 이미지 신호처리를 이용한 도약신호 감별
도약 신호 검출 문제를 쉽게 풀기 위하여 본 문제를 이미지 신호처리로 접근한다. [그림 9]는 다상 DFT 필터뱅크 출력의 매 샘플의 제곱을 나타낸다.

그림 9. 2-D (2차원) 전력 감별
Fig. 9 2-D (2-dimensional) power detection

가로축은 시간(샘플 수), 세로축은 채널(주파수), 색 깔은 전력을 의미하며 적색은 고 전력, 청색은 저 전력을 나타낸다. [그림8]의 스펙트럼에서 신호의 흐름이 [그림 9]에서도 동일하게 나타나고 있음을 확인하였다. 그러나 신호의 전력이 다양한 색으로 표현되므로 정확하게 도약신호만 검출해 낼 수 없다. 그래서 신호가 있고 없음 으로 단 두 가지 값으로 2-D 이진 이미지를 나타냈다. 이진 이미지로 만들기 위해 비교의 기준이 되는 임계값 (Threshold)이 필요하다.

본 논문에서는 검출하고자 하는 픽셀을 중심으로 가로 5픽셀, 세로 5픽셀의 전체 25블록의 전력 평균을 구하여 5dB 높은 값으로 임계값을 결정했다. 실험적으로 찾은 임계값이므로 추후 임계값에 대한 최적화 연구가 필요하다. 이 임계값과 비교하여 임계값보다 작으면 신호가 없는 것으로 간주하여 0(잡음), 크면 신호가 있는 것으로 판단하여 1(신호)로 바꾼다. 2-D의 모든 신호에 대해 이와 같은 작업을 반복하여 만든 2-D 바이너리 이미지가 [그림 10]과 같다. 신호의 있고 없음으로만 나타나기 때문에 직관적이고 시간 해상도가 뛰어나다. 하지만 잡음에 의해 임계값을 넘는 점이 불특정한 위치에 발생하고, 신호의 포락선 변화 및 잡음으로 인해 신호가 존재하는 구간에서 전력의 단절이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 10. 2-D 바이너리 이미지
Fig. 10 2-D binary image

따라서 이진 이미지로부터 곧바로 도약신호를 정확하게 검출 할 수 없다. 이를 해결하기 위해 다음 절에서 새로운 알고리즘을 제안한다.

4.4. 잡음 제거 및 신호 단절 보상

정확하게 도약 신호를 검출하기 위한 제안한 알고리즘은 다음과 같다. 본 논문에서 제안한 알고리즘은 각 행 (주파수)을 순서대로 관찰하면서 수행한다. 먼저 잡음 제거를 위한 알고리즘은 [그림 11]과 같다. 신호가 없는 구간에서는 0으로만 나타나야 하지만 잡음으로 인해 튀는 전력이 관찰될 수 있고 이로 인해 신호가 없는 구간에서도 마치 신호가 있는 것처럼 보인다.

그림 11. 제안한 잡음 제거 알고리즘
Fig. 11 Proposed noise removal algorithm

이를 보상하기 위하여 0과 0사이에 정해진 길이보다 짧은 1이 존재하는 경우 이 1은 신호라기 보단 잡음에 가까우므로 1을 0으로 변경한다. 얼마나 짧은 1을 0으로 봐야하는지 결정해야 하는데, 본 논문에서는 길이 7 이하의 1을 0으로 변환하는 것으로 결정하였다. 신호의 잡음을 제거하고 난 다음에는 신호의 단절을 보상해야 한다. [그림 12]는 신호 단절 보상을 위해 제안한 알고리즘이다.

그림 12. 제안한 신호 단절 보상 알고리즘
Fig. 12 Proposed disconnected signal compensation algorithm

잡음 제거와 동일한 방법으로 각 행 단위로 처리한다. 그림과 같이 신호가 있는 구간은 1로 나타나지만 1과 1 사이에 정해진 길이(7개 이하의 0)보다 짧은 0이 존재하는 경우 이 0은 신호가 없기보단 신호가 있는 것에 가까우므로 0을 1로 변경한다.

그림 13. 잡음 제거 및 신호 단절 보상 결과
Fig. 13 Noise removal and result

[그림 13]과 [그림 14]는 제안한 잡음 제거와 신호 단절 보상을 위한 알고리즘을 수행한 결과이다.

먼저, [그림 13]은 잡음 제거를 한 결과로 잡음으로 존재했던 짧은 신호들이 모두 제거된 것을 확인했다. [그림 14]는 신호 단절 보상까지 한 결과로 단절된 신호를 완벽하게 보상한 모습이다. 이로써 도약신호를 시간의 흐름에 따라 성공적으로 검출하고 있음을 확인할 수 있다.

그림 14. 신호 단절 보상 결과
Fig. 14 Disconnect signal compensation result

V. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 주파수 도약신호를 검출하기 위한 방법으로 다상 DFT 필터뱅크의 적합성을 구현을 통해 확인하였다. 실제로 주파수 도약신호 검출기에 응용하기 위해 가상의 도약신호를 생성하여 다상 DFT 필터뱅크를 적용해 보았으며, 도약신호를 검출하는 알고리즘을 제안하고 그 성능을 확인하였다. 향후 연구 과제로는 도약신호 뿐 아니라 고정신호, 단일 burst 신호, 레이더 신호 등이 혼재된 환경에서 도약신호만을 구분하는 알고리즘 개발, 다중 경로 채널 환경에서의 성능 검증 및 알고리즘 최적화가 있다.

참고문헌

- [1] 주증민, "다중 신호 환경에서 히스토그램 분석을 통한 주파수도약신호 추출 기법," KISTI, pp1-2, 2006.
- [2] A. Sonnenschein, "Radiometric detection of spread-spectrum signals in noise of uncertain power", *IEEE Trans. Communications*, vol. 28, no.3, pp. 654-660, 1992.
- [3] A. Polydoros, "LPI Detection of Frequency-Hopping Signals Using Autocorrelation Techniques", *IEEE Trans. Communications*, vol. 3, no.5, pp. 714-726, 1985.
- [4] S. Enserink, A cyclostationary feature detector, Twenty-Eighth Asilomar Conference, vol. 2, pp. 806-810, 1994.
- [5] Alfred Mertins, "Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications", John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- [6] Crochiere, Multirate Digital Signal Processing, Prentice Hall, 1983.

저자소개

권정아(Jeong-A Kwon)

2011년 한밭대학교
전파공학과 학사
2013년 한밭대학교 정보통신전문
대학원 전파공학과 석사

※ 관심분야: 디지털 신호처리, 모델 설계, etc.

이치호(Chi-Ho Lee)

1996년 아주대학교
전파공학과 학사
1998년 광주과학기술원
정보통신공학과 석사

2002년 광주과학기술원 정보통신공학과 박사
2002년 ~ 2005년 광주과학기술원 초고속광네트워크
연구센터 연구교수
2003년 ~ 2004년 미국 미조리주립대학교 교환교수
2005년 ~ 현재 국방과학연구소 선임연구원
※ 관심분야: 디지털통신시스템, 통신전자전

정의림(Eui-Rim Jeong)

1995년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 학사
1997년 한국과학기술원 전기 및
전자공학과 석사

2001년 한국과학기술원 전자 전산학과 박사
2009년 1월 ~ 현재: 한밭대학교 정보통신공학과
부교수
※ 관심분야: 통신신호처리, 전치왜곡, 모델설계