

블라인드 신호 감청기술

The Listen-in Technique for Blind Signals

나 선 필* **박 철 순*** **장 원***
Nah, Sun-Phil Park, Cheol-Sun Jang, Won

ABSTRACT

In this paper, we propose a new listen-in technique to overcome the problems and the shortcomings which could possibly meet in the previous listen-in methods to deal with the blind signal manually according to operator's decision. In the proposed listen-in method, receiving the signals, classifying the modulation types, and demodulating the signals can be done automatically without operator's intervention. We realize the listen-in technology by developing the high speed frequency tuner, the automatic modulation recognizer, and the signal demodulator. In conclusion, we confirm and show that the developed equipment has a good performance in classifying the modulation type through the computer simulation and the field test.

주요기술용어(주제어) : Signal Tuning, Automatic Modulation Recognition, Signal Demodulator, Phase Locked Loop, Direct Digital Frequency Synthesis, Intermediate Frequency, Digital Downconverter

1. 머리말

통신 전자전체계는 안테나를 통하여 수신한 신호에 대해 방향을 탐지하고 음성신호를 감청하며 유사시에 통신을 방해하는 등의 다양한 역할을 수행한다. 특히 음성신호 감청기술은 적 동향에 대한 첩보수집에 있어서 가장 기본이 되는 수단으로 체계의 성능을 평가하는 중요한 척도중의 하나이다. 이러한 음성신호의 감청을 위해 기존의 통신 전자전 장비에서는 각 변조형식별로 고안된 복조기 뱅크를 이용하였다. 즉 운용자가 신호에 대한 변조형식을 임의로 판단하여 복조

기 뱅크에서 해당 복조기를 선택한 후 복조된 결과를 확인하여 변조형식과 일치하면 감청을 수행하고 일치하지 않으면 다른 변조형식에 대해 위의 절차를 반복하는 방식이다. 이 방식은 경험이 풍부한 운용자를 필요로 하며 원하는 신호의 감청을 위해 많은 예비시간이 필요하다는 단점이 있다. 또한 무선통신을 위한 신호 환경은 전통적인 무선통신기 뿐만 아니라 주파수 도약방식을 사용하는 무선통신기 등 새로운 무선통신기의 등장으로 점점 더 고밀도화 되고 변조방식도 다양화 되고 있는 추세이다. 따라서 통신신호의 탐지 및 감청이 운용자의 판단에 따라 수동으로 이루어질 경우에는 향후 전개될 복잡한 신호 환경에 효과적인 대처가 어려울 것으로 예상되며 이것이 신호에 대한 사전정보가 없는 상황에서 운용자의 개입없이 신호를 감청할 수 있는 기술이 필요한 이유다.

† 2005년 10월 28일 접수~2005년 12월 20일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

주저자 이메일 : spnah@add.re.kr

블라인드 신호는 감청에 필요한 사전정보가 전혀 없는 신호를 의미한다. 이러한 신호를 감청하기 위해서는 반송주파수, 변조방식 그리고 심볼을 등과 같이 신호의 감청에 필요한 정보를 정확하게 추정할 수 있어야 한다. 특히 변조방식은 아날로그 및 디지털 변조신호의 복조에 반드시 필요한 파라미터로 변조방식을 자동으로 식별하기 위한 다양한 기법이 연구되어 왔다. 대표적인 예로서, Azzouz는 참고문헌 [1]에서 4개의 특징 파라미터를 이용한 아날로그 변조신호 식별알고리즘과 5개의 특징 파라미터를 이용한 디지털 변조신호 식별알고리즘 그리고 9개의 특징 파라미터를 이용하여 아날로그 및 디지털 변조신호가 동시에 존재하는 경우에 대한 식별알고리즘을 구분하여 설명하고 있다. 위의 세가지 경우 모두 신호에 대한 변조판단은 의사결정 트리방식을 적용하였다. Boudreau는 참고문헌 [2]에서 10 종류의 아날로그 신호와 디지털 신호가 혼재된 신호 환경에서 스펙트럼 모니터링 시스템에 실시간 자동 변조인식 알고리즘을 구현한 사례를 기술했다. 수신신호에 대한 변조판단은 의사결정 트리방식을 적용하였고 9개의 특징 파라미터를 사용하였다.

본 논문에서는 미지의 아날로그 및 디지털 변조신호에 대한 감청을 위해 고주파 동조기, 자동 변조인식기 그리고 신호 복조기로 나누어 구현한 결과를 기술하였다. 아날로그 신호는 진폭변조(AM) 신호, 주파수변조(FM) 신호 그리고 위상변조(PM) 신호를 대상으로 하였고 디지털 신호는 BFSK와 BPSK 신호를 대상으로 하였다. 변조신호의 식별에는 5개의 특징 파라미터를 사용하였고 변조판단은 의사결정 트리방식을 적용하였다. 논문의 구성은 1장 머리말에 이어 2장에서는 블라인드 신호에 대한 감청 절차를 기술하였다. 3장에서는 고속주파수 동조방법과 성능에 대해 살펴보고 4장에서는 자동변조인식 방법 및 절차 그리고 5장에서는 신호복조 방법에 대하여 기술하였으며 6장에서 논문의 결론을 맺었다.

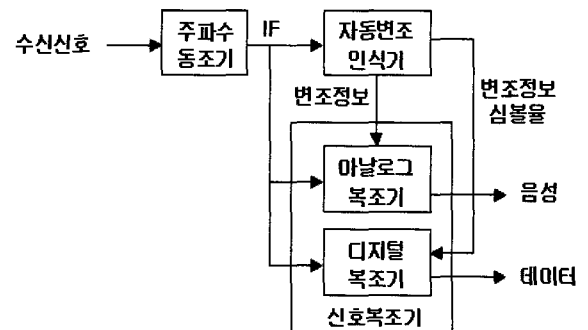
2. 블라인드 신호 감청

일반적으로 송수신기 간에 통신이 이루어지기 위해

서는 송신기에서 변조한 신호를 수신기에서 복조할 수 있어야 된다. 그러나 통신이 시작되는 시점에는 수신 신호의 복조를 위해 필요한 신호 파라미터를 수신기가 알 수 없기 때문에 이를 위한 해결방법으로 Training Sequence를 사용한다. 즉, 수신기가 이미 알고 있는 심볼들을 사전에 약속된 절차에 따라 송신하면 수신기는 수신된 심볼들을 이용하여 신호복조가 가능하도록 수신기를 설정하는 방법이다. 실제 데이터는 그 후에 전송된다. 블라인드의 의미는 이 Training Sequence를 사용할 수 없는 경우를 의미하며 대표적인 예로는 통신 전자전 분야 또는 방송망 등이 있다.

본 장에서는 이러한 블라인드 신호를 감청하기 위한 수신기 구성을 기술하였다. 감청 수신기는 그림 1과 같이 고주파 동조기, 자동변조 인식기 그리고 신호 복조기로 나누어 구현하였다. 신호 복조기는 아날로그 신호를 복조하기 위한 모듈과 디지털 신호를 복조하기 위한 모듈로 나누어 소프트웨어로 구현하였다.

고주파 동조기는 통신신호를 디지털 도메인에서 처리할 수 있는 수준의 중간주파수(IF) 신호로 변환하여 자동변조 인식기와 신호 복조기에 전달하는 역할을 수행한다. 자동변조 인식기는 신호 복조에 필요한 파라미터를 추정하여 신호 복조기에 전달한다. 아날로그 복조기에는 수신신호에 대한 변조방식 정보가 전달되고 디지털 복조기에는 변조방식과 심볼을 정보가 전달된다. 자동변조 인식기는 A/D 변환된 디지털 데이터에서 식별에 필요한 특징 파라미터를 추출하고 의사결정 알고리즘을 이용하여 수신신호에 대한 변조



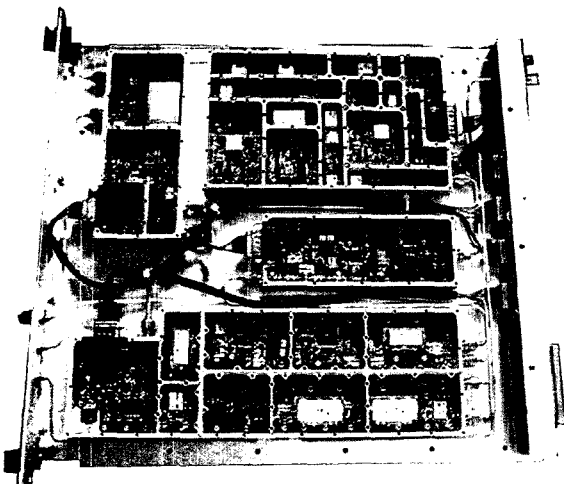
[그림 1] 블라인드 신호 감청절차

방식을 식별한다. 심볼율은 디지털 데이터에서 순시 주파수와 순시위상을 측정하여 정규화 한 후 영교차점(Zero crossing point)을 찾아 히스토그램을 구하여 추정하였다. 신호 복조기는 고주파 동조기에서 전달되는 중간주파수 신호에 대해 자동변조 인식기에서 추정한 변조 정보를 이용하여 복조를 수행한다. 진폭 변조 신호, 주파수변조 신호 그리고 위상변조 신호는 아날로그 복조모듈에서 복조된 후 음성으로 스피커에 출력되거나 필요시 저장장치에 저장된다. BFSK 신호나 BPSK 신호는 디지털 복조모듈에서 복조된 후 오프라인 분석을 위해 저장장치에 저장된다.

3. 고속 주파수 동조기

블라인드 신호 감청을 위한 첫 번째 단계인 주파수 동조는 수신신호를 대역폭 10MHz의 중간주파수로 변환하는 기능을 수행하며 저잡음 증폭모듈과 주파수 합성모듈 그리고 주파수 변환모듈로 구현하였다^[3]. 그림 2는 개발이 완료된 주파수 동조기의 실물 사진이다.

저잡음 증폭모듈은 안테나와 직접 연결되는 모듈로 V/UHF 대역의 입사신호에 대해 이득을 조절하고 대역 평탄도를 맞춘 후 주파수 변환모듈의 입력레벨에 맞도록 신호를 증폭하여 전달하는 역할을 수행한다.



[그림 2] 주파수 동조기

[표 1] 주파수 동조기 주요성능

항 목	HF 동조기	V/UHF 동조기
주파수 범위	3~30MHz	30~500MHz
주파수 분해능	1Hz	10Hz
동조속도	35us(Typ.)	35us(Typ.)
IF/Image 억압	80dBc	80dBc
IF 밴드폭	500kHz	1MHz
IF 주파수	21.4MHz	21.4MHz

주파수 합성모듈은 주파수 변환모듈이 입력신호를 중간 주파수로 고정시키기 위해 필요한 가변 주파수를 발생하는 역할을 수행한다. 일반적인 주파수 합성은 위상고정루프(PLL)를 사용하거나 디지털 주파수 합성방식(DDFS)을 사용한다. 위상고정루프를 사용하는 합성방식은 피드백 루프를 가지고 있기 때문에 빠른 주파수 변환이 어렵다는 단점이 있는 반면에 광대역 주파수합성에 유리하고 전력소모가 적다는 장점이 있다. 직접 디지털 주파수 합성방식은 피드백 루프가 없기 때문에 빠른 주파수 변환에 적합하지만 광대역 주파수 합성이 어렵다는 단점이 있다. 향후 대부분의 군용통신에 사용될 주파수 도약신호의 탐지를 위해서는 빠른 주파수 변환과 광대역 주파수 합성 특징을 모두 만족해야 하기 때문에 고속 주파수 동조기에서는 광대역 주파수 변환에는 위상고정루프를 사용하고, 정교한 주파수 변환에는 디지털 주파수 합성방식을 사용하는 하이브리드 방식으로 주파수 합성모듈을 구성하여 위의 특성을 만족하도록 주파수 합성모듈을 구현하였다. 주파수 변환모듈은 주파수 합성모듈의 출력신호를 이용하여 저잡음 증폭모듈로부터 전달되는 V/UHF 대역 신호를 21.4MHz의 중간주파수로 변환한 후 자동변조인식기와 신호 복조기에 전달하는 기능을 수행한다. 표 1에 개발이 완료된 HF 대역과 V/UHF 대역 동조기의 주요 성능을 요약하였다.

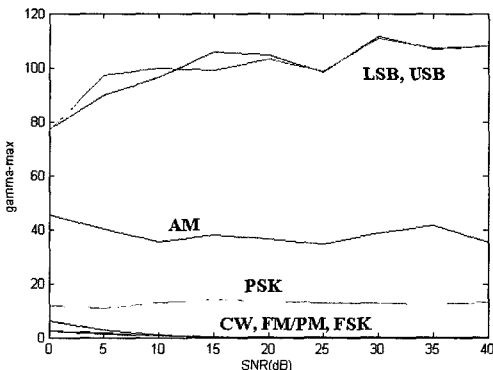
4. 자동변조 인식기

자동변조 인식은 입력 신호원의 변조방식을 식별하

여 복조가 자동으로 이루어 지도록 복조기를 선택하는 역할을 수행하며 전처리 단계, 신호특징 추출단계 그리고 변조인식 단계로 나누어 소프트웨어로 구현하였다^[4]. 전처리 단계는 정확한 신호 특징추출을 위해 잡음이나 페이딩 효과등으로 왜곡된 수신신호를 복원하는 단계로 페이딩 보상, 주파수 옵셋제거, 이상값 및 잡음제거 등의 기능을 수행한다. 신호 특징추출 단계에서는 시뮬레이션을 통해 아날로그 신호와 디지털 신호가 혼재된 신호환경에서 변조방식 식별에 가장 우수한 성능을 보인 특징 파라미터를 설정하였다. 첫 번째 파라미터는 수신신호의 진폭이 변하는 변조방식과 변하지 않는 변조방식을 구분하기 위한 파라미터로 신호의 순시진폭을 정규화하여 푸리에 변환하였을 때 신호크기의 최대값을 의미하며, 수식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\gamma_{\max} = \max \frac{|DFT(a_{cn})|^2}{N_s} \quad (1)$$

여기서 a_{cn} 은 순간 진폭을 정규화한 후 '0'값을 기준으로 중심화한 값이다. N_s 는 데이터 개수이다. 이 특징 파라미터를 사용하면 그림 3의 신호 대 잡음비(SNR)에 따른 파라미터 특성에서 알 수 있듯이 CW 신호, FM 신호, FSK 신호와 같이 진폭변화가 일정한 특성을 가지는 변조방식과 AM 신호, SSB(LSB, USB)신호와 같이 진폭변화가 일정하지 않는 특성을 가지는 변조방식을 구분할 수 있다.



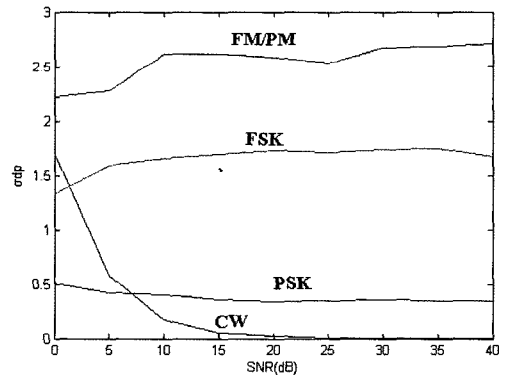
[그림 3] SNR에 따른 γ_{\max}

두 번째 파라미터는 선형 위상요소를 제거한 순시 위상의 표준편차이다. 이 파라미터는 CW 신호와 같이 순시위상의 변화량이 일정한 변조방식과 FM 신호와 같이 순시위상의 변화량이 큰 변조방식을 구분하는데 사용한다. 그림 4는 이 파라미터의 신호 분류 특성을 나타낸다.

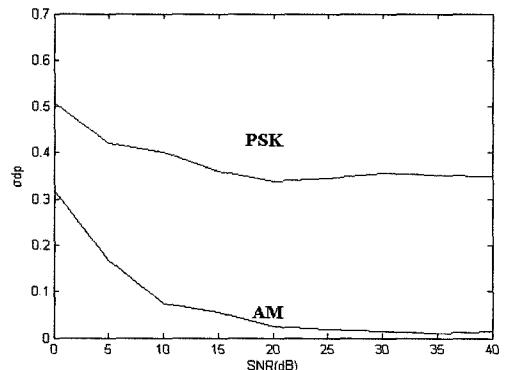
이 파라미터에 대한 계산식은 식 (2)와 같다.

$$\sigma_{dp} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \left(\sum_{a_n(i) > a_t} \phi^2(i) \right) - \left(\frac{1}{N_s} \sum_{a_n(i) > a_t} \phi(i) \right)^2} \quad (2)$$

여기서 a_t 는 진폭 임계치, N_s 는 데이터 개수, ϕ 는 순시위상이다. 이 파라미터는 AM 신호와 PSK 계열의 신호에 대한 식별에도 사용할 수 있으며 변조방식



[그림 4] SNR에 따른 σ_{dp}



[그림 5] SNR에 따른 σ_{dp}

별 파라미터 값은 그림 5와 같다.

세 번째 파라미터는 반송주파수 주변에서의 스펙트럼 대칭성을 이용한 것으로 식으로 표현하면 아래의 식 (3)과 같다.

$$Sym_f = \frac{P_L - P_U}{P_L + P_U} \quad (3)$$

$$P_L = \sum_{i=1}^{f_{cn}-1} |fft(x(i))|^2, P_U = \sum_{i=f_{cn}+2}^{f_{cn}^*2} |fft(x(i))|^2$$

$$f_{cn} = \frac{f_c N_s}{f_s} - 1$$

여기서 f_c 는 중심주파수, f_s 는 샘플링 주파수, N_s 는 데이터 개수를 의미하며 $x(i)$ 는 측정데이터이다. 식 (3)에서의 P는 스펙트럼의 대칭성을 나타내는 파라미터로 단측파대 성분을 갖는 LSB 신호는 -1에 가까운 값을 갖고, USB 신호는 +1에 가까운 값을 갖게 되며 양측파대 신호인 AM 신호나 PSK 신호등은 0에 가까운 값을 갖게 된다. 그림 6은 이 파라미터의 SNR에 따른 변조신호 분류특성을 나타낸다.

네 번째 파라미터로는 순시주파수의 침도를 이용하였으며 계산식은 아래의 식 (4)와 같다.

$$\gamma_{2f} = \frac{E(f_N^4(t))}{(E(f_N^2(t)))^2} \quad (4)$$

f_N 은 순간 주파수를 정규화한 후 '0'값을 기준으로 중심화한 값이다. 그림 7을 보면 FM 신호와 FSK 신호에 대한 순시주파수의 침도가 PSK 신호에 대한 순시주파수의 침도보다 작다. 이 특성을 분류기준으로 사용하였다.

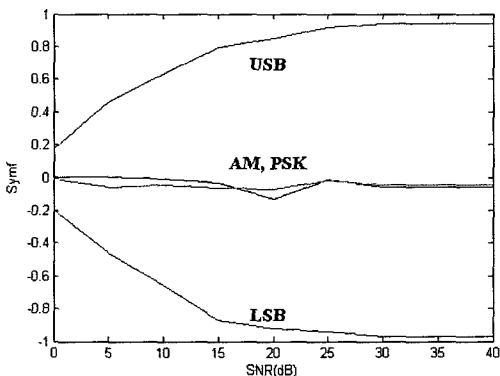
다섯 번째 파라미터는 네 번째 파라미터의 변형으로 순시주파수 스펙트럼의 침두치를 대역폭으로 나눈 값을 사용했다. 계산식은 아래의 식 (6)과 같다.

$$\gamma_{2hf} = \frac{E\{f_s^4(t)\}}{\{E\{f_s^2(t)\}\}^2} / B.W \quad (6)$$

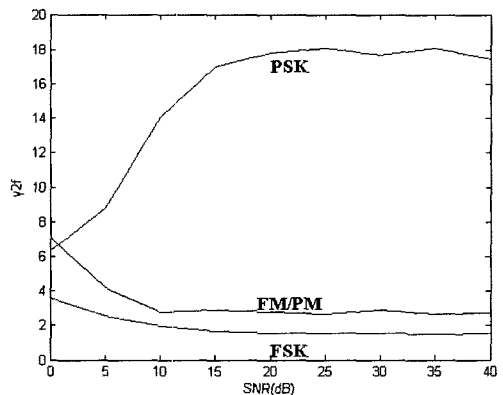
f_s 는 순시 주파수 스펙트럼에 대한 히스토그램이고 BW는 대역폭을 의미한다. FSK 신호의 경우 순시주파수 히스토그램을 구하면 BFSK 신호의 경우 2개의 침두치가 나타나지만 FM 신호의 경우 침두치가 나타나지 않는다. SNR에 따른 위의 특성 파라미터 값은 그림 8과 같다.

위의 특성 파라미터들을 사용하면 아날로그 및 디지털 변조방식 신호가 혼재된 신호환경에서 수신신호에 대한 변조방식 판단이 가능하다. 변조방식 판단은 그림 9와 같이 직관적이고 단순한 의사결정 트리 (Decision Tree) 방식을 채택하여 수신신호에 대한 실시간 변조방식 인식기를 구현하였다.

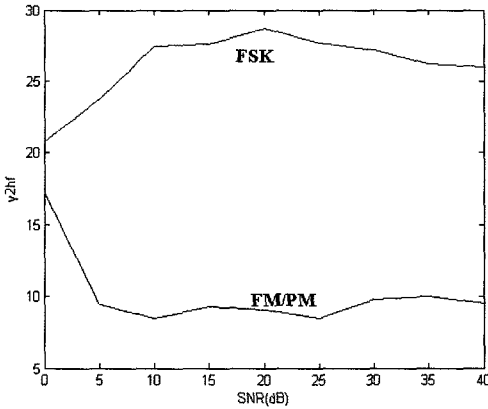
야외시험을 통하여 확인한 변조방식 식별성능은 아래의 표 2와 같다. 표 2의 세로축은 송신 변조방식이



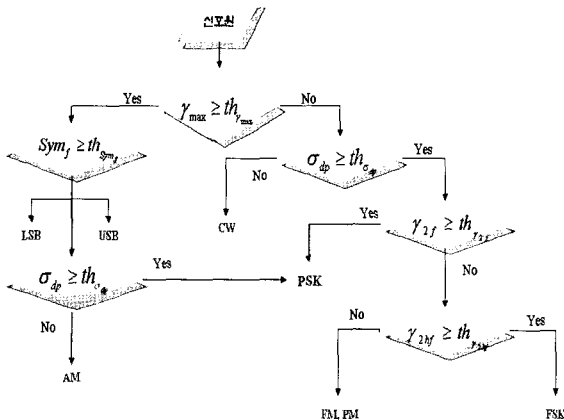
[그림 6] SNR에 따른 Sym_f



[그림 7] SNR에 따른 γ_{2f}



[그림 8] SNR에 따른 γ_{2hf}



[그림 9] 의사결정 트리

[표 2] 자동변조 인식성능

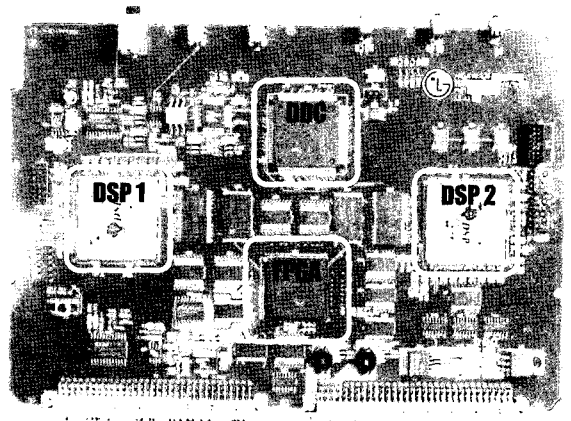
송신	식별된 변조방식						
	CW	AM	LSB	USB	FM	FSK	PSK
CW	100						
AM	3	88	3	2	4		
LSB			92		8		
USB		1		94	5		
FM					100		
FSK						100	
PSK							100

고 수신측은 식별된 변조방식을 의미한다.

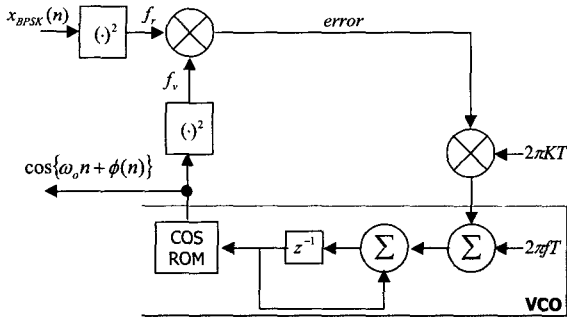
감청수신기에 대한 야외시험에서 수신기가 수신한 신호레벨은 -100dBm(SNR 15dB) 이었고 평균 96%의 정확도를 달성하였다. 시험 환경이 모두 다르기 때문에 참고문헌^[1,2]에 언급된 방법과 정확한 성능비교는 어렵지만 가장 많이 사용되는 주파수변조(FM) 신호와 진폭변조(AM) 신호의 경우 우수한 성능을 보임을 알 수 있다.

5. 신호 복조기

블라인드 신호감청의 마지막 단계인 신호 복조는 주파수 동기기의 출력인 중간주파수(IF) 신호에 대해 자동변조인식기에서 제공하는 변조방식과 심볼율에 대한 정보를 이용하여 복조를 수행한다. 복조기는 기존의 복잡한 아날로그 회로를 배제하고 소프트웨어 갱신만으로 복조기의 추가 및 변경이 가능하도록 FPGA와 DSP 기반의 하드웨어를 채택하였다^[5]. 그림 10은 개발이 완료된 신호 복조기 실물사진이며 DSP 1에는 자동변조인식 소프트웨어가 탑재되고 DSP 2에는 복조 소프트웨어가 탑재된다. 주파수 동기기를 통해 입력된 아날로그 중간주파수 신호는 A/D 변환기를 통해 디지털화 된다. 디지털 하향 변환기(DDC)는 NCO를 사용하여 디지털 IF 신호를 기저대역 신호로 변환 한 후 디지털 FIR 필터로 필터링하고



[그림 10] 신호 복조기



[그림 11] 반송파 복구 블록도

Decimation하여 I 채널 신호와 Q 채널 신호를 생성한다. 이 I/Q 신호를 이용하여 DSP 2에서 신호의 복조를 수행한다.

복조대상 아날로그 신호는 AM 변조신호, FM 변조신호, PM 변조신호 그리고 단측파대 변조방식인 LSB 신호와 USB 신호이고 디지털 신호는 BFSK 변조신호와 BPSK 변조신호이다. 아날로그 신호에 대한 복조기는 기존의 복조방식을 적용하여 소프트웨어로 구현하였고 복조기 선택은 변조 정보를 이용하였다. 디지털 신호에 대한 복조는 변조 정보와 심볼을 이용하였다. FSK 변조신호에 대한 복조기는 주파수 상관기를 이용하여 비동기 방식으로 구현하였다. PSK 변조신호에 대한 복조기는 동기방식으로 구현하였으며 위상동기를 맞추기 위해 그림 11과 같은 반송파 복구방법을 적용하였다.

위상은 수신된 신호로부터 θ_{PSK} 를 제외한 위상에 대하여 동기를 이루어야 한다. 여기서 $\phi(n)$ 는 위상 오차이고 f_c 은 PSK 신호에서 위상 성분을 제거한 신호이며, K 는 위상고정루프의 전체 이득이다. 복구된 반송파 $\cos(\omega_0 n + \phi(n))$ 는 $\cos(\omega_0 n + \theta_{PSK} + \phi(n))$ 와 곱해지고 저대역통과필터(LPF)를 거친 결과인 $\cos(\theta_{PSK})$ 를 이용해 데이터를 판별했다.

6. 맺음말

본 논문에서는 운용자의 판단에 따라 수동으로 신호를 감청하는 기존의 감청방법에 대한 문제점을 제

시하였고 이 문제점을 극복하기 위하여 고속 주파수 동조기와 자동변조 인식기 그리고 신호 복조기로 구성된 새로운 방식의 감청기술을 제안하였다.

고속 주파수 동조기는 위상 고정루프(PLL)의 광대역 특성과 디지털 주파수합성기(DDFS)의 속도 특성을 결합한 하이브리드 방식으로 구현하였고 자동변조 인식기는 전처리 단계와 특징 파라미터 추출단계 그리고 변조방식 식별단계로 구분하여 소프트웨어로 구현하였다. 특징 파라미터는 다양한 변조방식의 신호가 혼재된 신호환경에서 가장 우수한 식별 성능을 보이는 파라미터를 추출하였고 변조방식 식별의 실시간 구현을 위하여 의사결정 트리방식을 채택하였다. 신호 복조기는 기존의 복잡한 아날로그 회로를 축소하고 펌웨어(firmware) 갱신만으로 복조기의 기능 변경이 가능하도록 FPGA와 디지털 신호처리 프로세서(DSP) 기반의 하드웨어를 채택하여 소프트웨어로 복조기를 구현했다. 따라서 새로운 무선통신기가 등장할 경우 하드웨어의 교체없이 신호복조에 필요한 파라미터와 복조 알고리즘의 갱신만으로 신속하고 효과적인 대응이 가능하다. 새로운 방식의 감청기술은 컴퓨터 시뮬레이션 및 야외시험을 통하여 변조방식 식별에 우수한 성능을 보임을 확인하였다.

향후 발전사항으로는 SNR에 따른 가변 임계치를 적용하여 SNR이 낮은 신호환경에서 변조방식 식별 정확도를 향상시키기 위한 연구가 필요하다. 또한 정보수집 효율성 향상을 위하여 디지털 변조방식의 복조데이터를 텍스트로 변환하기 위한 실시간 코드인식 기술 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] E. E. Azzouz, A. K. Nandi, "Automatic Modulation Recognition of Communication Signals", Kluwer, 1996.
- [2] D. Boudreau, C. Dubuc, F. Patenaude, M. Dufour, J. Lodge, Robert Inkol, "A Fast Automatic Modulation Recognition Algorithm and Its Implementation in a Spectrum Monitoring Application", MILCOM 2000.

Page(s): 732-736 vol. 2.

[3] 최준호, 나선필, “고속 디지털 FFT 탐색 수신장치 개략설계”, 국방과학연구소, TEDC-509-050330, 2005. 7.

[4] 나선필, 박철순, 장원, “자동변조 인식기 개략설계”, 국방과학연구소, TEDC-509-050591, 2005. 7.

[5] 박철순, 나선필, 장원, “통신신호 복조기 개략설계”, 국방과학연구소, TEDC-509-050589, 2005. 7.