고속 광대역 모뎀의 주파수 오프셋 추정 및 보상 알고리즘

김도훈, 조진웅, 이충용*
전자부품연구원, 연세대학교*
e-mail:speedo@keti.re.kr

A frequency offset estimation and compensation algorithm for high speed modem

Do-Hoon Kim, Jin-Woong Cho, Chung-Yong Lee*
Korea Electronics Technology Institute, Yonsei University*

요 약

본 논문은 OFDM 방식의 고속 광대역 모뎀의 주파수 오프셋을 추정하고 보상하는 알고리즘에 관한 것이다. 설계된 주파수 오프셋 추정 및 보상 알고리즘은 프리앰블 구간에서 초기 CFO(carrier frequency offset)를 추정 및 보상하고, 데이터 전송구간에도 잔류 CFO를 추정하고 보상하도록 동작한다. 초기 CFO보상은 시간축에서 동작하고, 잔류 CFO 보상은 FEQ 뒤에서 파일럿 캐리어의 정보를 이용하여 이루어진다. 잔류 주파수 오프셋을 보상할 때에는 ADC/DAC의 SFO(sampling frequency offset)도 추정하여 잔류 CFO와 동시에 보상하게 된다.

1. 서론

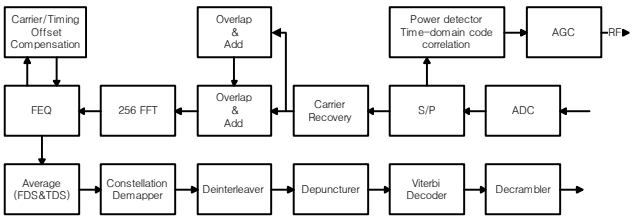
최근 들어 통신, 방송을 중심으로 한 다양한 신규 무선 기술이 개발되어 서비스가 도입되고, 각종 산업에서 무선 서비스에 대한 수요가 급격히 확대됨에 따라 주파수에 대한 수요가 폭발적으로 증가하고 있는 상황이다. UWB(Ultra-Wideband)는 낮은 전력으로 초고속 통신을 실현하는 근거리 무선통신기술로써 이러한 주파수 부족 현상을 극복할 수 있는 새로운 통신방식이다.

이러한 UWB 전송방식 중의 하나인 MB-OFDM(Multi-Band Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 앞서 설명한 전송특성을 만족하는 시스템으로써 사무실이나 가정과 같은 작은 공간에서 10m정도의 근거리에 있는 PC, TV, PMP, 디지털 카메라, 프린터 등을 연결하는 무선 근거리 통신 기술로 개발이 활발히 진행되고 있다 [1]. 본 논문에서는 MB-OFDM 방식의 UWB 모뎀에서 사용된 주파수 오프셋의 추정 및 보상 알고리즘을 설명하고 있다. II장에서는 수신기 구조에 대해서 간략하게 설명을 하고, III장에서는 설계된 CFO (Carrier Frequency Offset) 추정 및 보상 알고리즘을 중심으로 설명을 하고 있다. IV장에서는 결론을 간략하게 설명한다.

2. 수신기 설계

2.1. 수신기 구조

수신데이터는 S/P(Serial to Parallel) 블록을 통과하여 베이스 밴드의 디지털 블록으로 입력된다. 입력된 데이터를 이용하여 패킷 검출 회로는 대략적인 심볼의 위치를 찾게되고, 이를 바탕으로 AGC(Auto Gain Control)을 수행한다. AGC가 완료된 데이터는 수신기가 오버플로우를 발생시키지 않고 올바르게 동작할 수 있는 상태가 된다. 이후 심볼 동기회로와 RF단에서 발생한 캐리어 주파수 오프셋을 보상하는 회로가 동작한다. 이 회로를 구성하기 위해서는 복잡한 복소수 곱셈기가 필요한데, 초기화 과정에서 동시에 동작하는 구간이 없기 때문에 블록을 공유하도록 디자인하여 회로 크기를 많이 줄일 수 있었다.



[그림 1] 수신기 구조

심볼 동기회로는 프리앰블데이터와 수신데이터의 상관관계를 계산하여 최고값을 찾는 형태로 동작한다. 이 회로는 병렬로 입력되는 데이터를 매 클럭마다 곱셈기 및 덧셈기를 동작시켜야 하기 때문에 매우 복잡하게 구현될 수 있다. 따라서 곱셈기의 사용을 최대한 억제하고, 다양한 채널 환경에서 심볼동기 회로가 잘 동작할 수 있는 범위내에서 심볼동기를 위한 데이터의 개수도 최소화하였다.

3. 주파수 오프셋 추정 및 보상 알고리즘

3.1 초기 CFO 추정 및 보상 알고리즘

CFO 추정 및 보상 회로는 수신데이터의 자기 상관치를 이용하여 오프셋을 추정한 다음 arctan회로를 이용하여 위상을 계산하여 S/P 블록 뒤에서 바로 보상하는 구조로 되어 있다. 사용되는 데이터 갯수는 시스템의 복잡도와 성능을 고려하여 결정되었다. 이때 사용되는 복소곱셈기는 AGC에서 사용되는 것과 같은 구조이기 때문에 동작시간의 차이에 의해 서로 공유할 수 있도록 설계되었다. 이러한 보상후에 남아 있는 잔류 CFO는 FEQ(Frequency Equalizer) 뒤에서 다시 한번 잔류 주파수 오프셋을 추정하고 및 보상 하도록 하였다. 초기 CFO는 다음과 같은 방식으로 추정된다.

$$x_n(m) = \sum_{k=0}^{N-1} X_{n,k} e^{j2\pi km/N} \quad , \quad -\Delta_g \le m \le N-1 \tag{1}$$

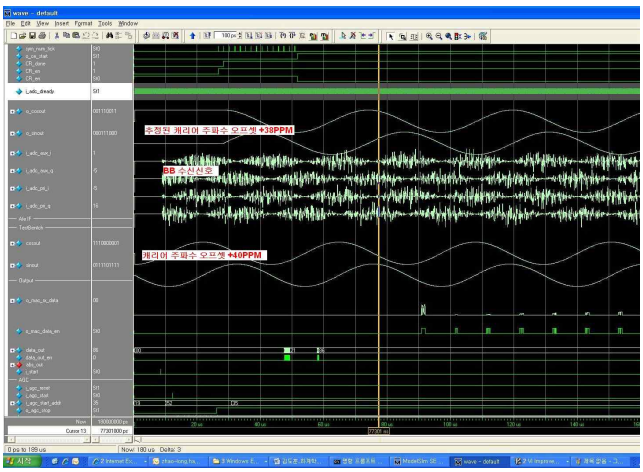
여기서 $X_{n,k}(0 \le k \le N-1)$는 n번째 심볼, k번째 subcarrier에 해당하는 IFFT 입력 신호, Δ_g는 guard interval, N은 actual symbol duration, $N_s \equiv \Delta_g + N$는 total OFDM symbol duration을 나타낸다. 따라서 수신신호 $y_n(m)$는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} y_n(m) &= x_n(m) e^{j2\pi f_{off} mT/N} \\ &= x_n(m) e^{j2\pi(f_i+\varepsilon)mT/N} \quad , \quad 0 \le m < N-1 \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 f_i는 정수값을, ε는 $-1/2 \le \varepsilon < 1/2$ 인 소수값을 가진다. 따라서 $y_n(m)$과 $y_{n+1}(m)$의 상관관계를 계산하면 다음과 같이 CFO 값을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} y_n(m) * y_{n+1}^*(m) &= y_n(m) * y_n^*(m+N_s) \\ &= x_n(m) e^{j2\pi f_{off} mT/N} x_n^*(m+N_s) e^{-j2\pi f_{off}(m+N_s)T/N} \\ &= x_n(m) x_n^*(m+N_s) e^{-j2\pi f_{off} N_s T/N} \quad , 0 \le m < N-1 \\ &= x_n^2(m) e^{-j2\pi f_{off} N_s T/N} \end{aligned} \tag{3}$$

위의 식에 arctan값을 취하면 주파수 오프셋(f_{off})을 얻을 수 있다.그림 2는 설계된 verilog 코드의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 각각 +40ppm의 CFO와 SFO(Sampling Frequency Offset)가 존재하는 상황에서 초기 CFO를 추정하고 보상하는 결과를 보여준다. 회로의 추정값과 실제 오프셋의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.



[그림 2] 초기 캐리어 오프셋 추정 시뮬레이션 결과

3.2 잔류 CFO 및 SFO 추정 및 보상 알고리즘

잔류 CFO과 SFO는 OFDM 심볼내의 파일럿 정보를 이용하여 다음과 같은 방법으로 추정된다.

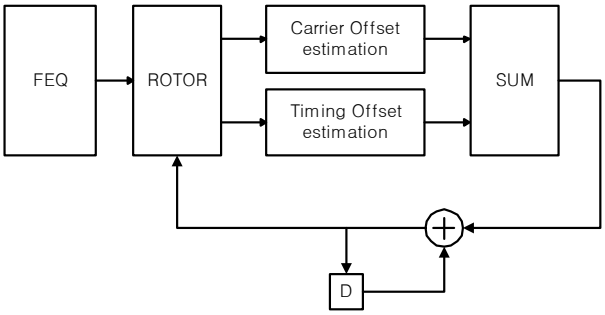
$$\begin{aligned} P &= R \bullet X^* \\ &= (R_r X_r + R_i X_i) + j(R_i X_r - R_r X_i) \end{aligned}$$

R : received pilot
X^* : local pilot

$$\begin{aligned} &\text{carrier frequency offset} = \arctan(\textstyle\sum P) \\ &\text{sampling frequency offset} = \frac{1}{60}\arctan(P_{-55}^* P_5 + P_{-45}^* P_{15} + P_{-35}^* P_{25} + P_{-25}^* P_{35} + P_{-15}^* P_{45} + P_{-5}^* P_{55}) \\ &= \frac{1}{60}\arctan(P_{75}^* P_5 + P_{85}^* P_{15} + P_{95}^* P_{25} + P_{105}^* P_{35} + P_{115}^* P_{45} + P_{125}^* P_{55}) \end{aligned} \tag{4}$$

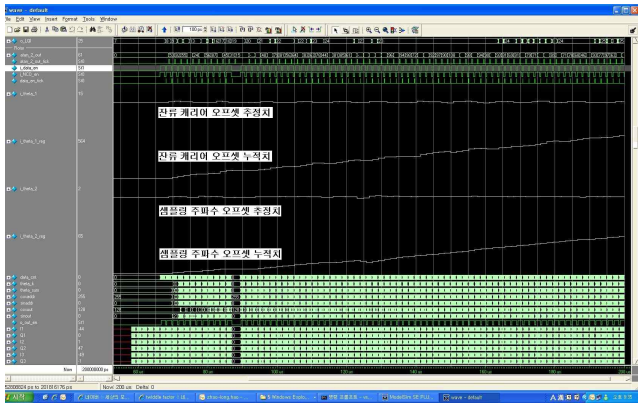
여기서 P는 파일럿 캐리어를 나타내고 있다. 잔류 CFO를 추정할 때에는 파일럿 캐리어의 평균을 계산한 후 추정된 위상값을 바탕으로 CFO를 계산한다. SFO는 등간격의 파일럿 캐리어의 상관관계를 바탕으로 arctan를 수행하여 계산한다. FEQ에서 출력된 데이터는 잔류 CFO 및 SFO를 보상하는 회로를 거친다. 이는 OFDM 방식의 특성상 오프셋이 크

지 않을 경우 시간축상에서 위의 오프셋을 보상하는 방법보다는 주파수상에서 오프셋을 보상하는 방법이 성능상에 잇점이 있기 때문에 이런 형태로 구현하였다.



[그림 3] 주파수오프셋 보상 회로

위의 그림3은 잔류 CFO를 추정하고 SFO를 추정하여 이를 합산한 값을 누적한 후 피드백시키는 알고리즘을 보여준다. 특히 SFO는 서브 캐리어 번호가 클수록 번호에 비례해서 영향을 주기 때문에 주파수가 높은 서브캐리어에 영향을 많이 주게 되어서, 이를 보상해주지 않으면 시스템의 성능에 많은 영향을 주게 된다.[3] 아래 그림 4는 잔류 CFO 추정 회로와 SFO 추정 회로의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 설계된 verilog코드는 각각 +40ppm의 주파수 오프셋이 있는 환경에 동작하고 있으며 초기 CFO가 추정 및 보상된 후 약 1~2ppm의 잔류 CFO와 +-40ppm의 SFO가 있는 상황에서 설계된 회로가 정상적으로 동작하고 있음을 보여주고 있다. 각각의 주파수 오프셋이 양수이기 때문에 추정된 에러는 0에 근접한 일정한 값이고, 누적치는 시간의 흐름에 대해서 계속 증가하여 주파수 오프셋을 따라 가고 있음을 알 수 있다. 본 설계에서는 추정된 값이 누적할 때 적당량 크기를 조절하기 때문에 누적치가 일정한 선형이 되도록 하였다. 그렇지 않으면 누적치가 출렁거리게 되어 성능에 영향을 줄 가능성이 크게 된다.



[그림 4] 잔류 CFO와 SFO 보상 회로의 시뮬레이션 결과

3. 연구결과

주파수 오프셋 보상 알고리즘은 하드웨어 크기는 다른 모뎀 블럭에 비해서 작지만, 모뎀의 성능에 큰 영향을 미치는 중요한 역할을 한다. 제안된 알고리즘은 verilog 로 설계하여 Modelsim 6.1f를 통해 시뮬레이션 결과를 얻었다. 최종 시뮬레이션 결과를 통해 설계 블록은 최대 40PPM의 주파수 오프셋을 추정 및 보상할 수 있음을 확인하였고, 반복된 비트 시뮬레이션을 통해 하드웨어 블록 최적화도 완료하였다.

참고문헌

[1] MultiBand OFDM Alliance (MBOA) Special Interest Group (SIG) / Wimedia Alliance, Inc. (WiMedia), "Multi-Band OFDM Physical Layer Specification," Release 1.1, July, 2005.

[2] A. Batra *et al.*, "Design of a multiband OFDM system for realistic UWB channel environments," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 52, no.9, pp. 2123 - 2138, Sep. 2004.

[3] M. Sliskovic, "Sampling frequency offset estimation and correction in OFDM systems," *The 8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 200, ICECS 2001*, vol. 1, pp. 437 - 440, Sep 2-5 2001.

[4] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2001.