

OFDM 기반의 WiBro 시스템에서 효과적인 주파수 오프셋 보상 기법에 관한 연구

A Study on Efficient Frequency Offset Compensation Method for OFDM based WiBro Systems

김은철*, 하광준**, 박재성*, 김진영*
(Eun Cheol Kim*, Kwang Jun Ha**, Jae Sung Park*, and Jin Young Kim*)

Abstract : In this paper, we present and analyze a robust frequency offset estimation scheme for orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems over radio communication channels. When there exists frequency offset, the loss of orthogonality occurs and the interference problem among several subcarriers in OFDM signals is introduced. The guard interval of OFDM signals is employed for estimating the frequency offset. Furthermore, in order to enhance the frequency offset estimation performance, a ternary sequence is utilized. A frequency offset is estimated based on the synchronized correlator output. The proposed frequency offset estimation scheme can be applied to track the carrier frequency offset of OFDM systems.

Keywords: OFDM, frequency offset compensation, ternary sequence.

I. 서론

직교 주파수 분할 다중화 (OFDM : orthogonal frequency division multiplexing) 방식은 다수의 직교하는 부 반송파를 이용하여 다중화 하는 디지털 변조방식이다. 이는 다중 반송파 전송 (multi-carrier transmission)의 한 종류로써, 낮은 전송률의 여러 반송파를 이용하여 신호를 전송한다. OFDM 방식의 가장 중요한 특징 중 하나는 복잡한 등화기가 없어도 된다는 것이다. 또한 이 시스템은 반송파간 간섭 및 심볼간 간섭에 강한 특징을 가지고 있다 [1-3].

그러나 여러 개의 부 반송파가 직교하도록 해야 하기 때문에 OFDM 시스템은 채널에서의 주파수 오류에 매우 민감하다. 반송파의 주파수 오류는 송·수신기 사이의 오실레이터가 일치하지 않거나 무선통신 채널에서의 도플러 효과 때문에 발생한다. 그 결과 각 반송파 여파기의 출력 신호의 크기가 감소하고, OFDM 신호의 부 반송파간의 직교성을 잃게 된다. 결국 반송파의 주파수 오류는 부 반송파간에 간섭이 일어나도록 하여 OFDM 시스템의 전체적인 성능을 감소시킨다. 따라서 본 논문에서는 OFDM 시스템에서 주파수 오프셋이 발생하는 경우 효과적으로 주파수 오프셋을 추정하고 보상하는 알고리즘을 제안하였다.

기존의 보호대역 기반 (GIB : guard interval based)의 주파수 오프셋 추정 알고리즘은 추가적인 심볼이 필요하지 않기 때문에, 시스템 성능에 영향을 주지 않으면서 주파수 오프셋을 추정하였다 [4]. 하지만 GIB 방법은 가우시안 (Gaussian) 채널이 아닌 무선통신 채널에서는 주파수 오프셋 보상 성능이 심

각하게 감소하는 단점을 가지고 있다. GIB 주파수 오프셋 추정 방법의 단점을 보완하기 위해서 m-시퀀스 (m-sequence) 기반 (MSB : m-sequence based) 주파수 오프셋 추정 알고리즘이 제안되었다 [5]. 이는 m-시퀀스를 시간영역에서 직접 데이터에 추가하여 주파수 오프셋을 보상하는 방법이다. 그리고 [6]에서는 MSB 방법의 성능을 개선하기 위해서 변형된 MSB 방법이 제안되었다.

본 논문에서는 3진 시퀀스 (ternary sequence)를 추가로 사용하면서도, 시스템 성능에 미치는 영향을 최소화 하고 무선통신 채널에서 효과적으로 주파수 오프셋을 보상할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. [5]에서의 방법과 비슷하게 OFDM 프레임 중에서 복사되어 보호대역 부분에 추가될 부분 중 가장 앞부분에 3진 시퀀스를 더하여 주파수 오프셋 보상 성능을 개선하고자 하는 것이다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 제 II장에서는 제안된 주파수 오프셋 추정 개념을 적용한 OFDM 시스템 모델을 소개한다. 그리고 제안된 주파수 오프셋 추정 알고리즘을 제 III장에 나타내었다. 제 IV장에서는 시뮬레이션 결과를 보여주고, 본 논문의 결론을 제 V장에서 제시하였다.

II. OFDM 시스템 모델

OFDM 시스템에서 반송파 주파수 오류는 신호 전력대 잡음 전력 비 (SNR : signal power to noise power ratio)를 감소시킨다. 이는 반송파 주파수 오프셋이 0일 때에만 부 반송파에 변조된 심볼이 직교하는데, 주파수 오프셋으로 인해 부 반송파간에 간섭이 발생하고 이는 곧 직교성을 감소시키기 때문이다.

본 논문에서는 주파수 오류를 추정하고 보상하기 위해 [4]의 GIB 방법을 변형하였다. 우리는 성능 개선을 위하여 3진 시퀀스를 사용하였다.

그림 1은 제안된 3진 시퀀스 기반의 (TSB : ternary sequence based) 주파수 오프셋 추정 개념을 적용한 OFDM 시스템을

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 20xx. x. x., 채택확정 : 200x. x. xx.

김은철 : 광운대학교 전파공학과

(eum6210@kw.ac.kr)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT핵심기술개발 사업의 일환으로 수행하였음. [2007-S-029-02, 가정용/기업용 WiBro 시스템 기술개발].

나타낸다. 순환 전치 (CP : cyclic prefix)를 삽입하기 전에 3진 시퀀스를 OFDM 블록의 마지막 L 샘플의 앞부분에 더한다. 이 때 전체 시스템 성능이 3진 시퀀스에 의해 영향을 받지 않도록 하기 위해 3진 시퀀스의 길이는 가능한 짧아야 한다. 그리고 그림 2에 나타난 바와 같

이 L 샘플을 복사하고 이 블록의 앞부분에 추가하여 CP를 생성한다. 심볼간 간섭을 줄이기 위해서 CP의 길이는 채널의 충격 응답보다 길어야 한다.

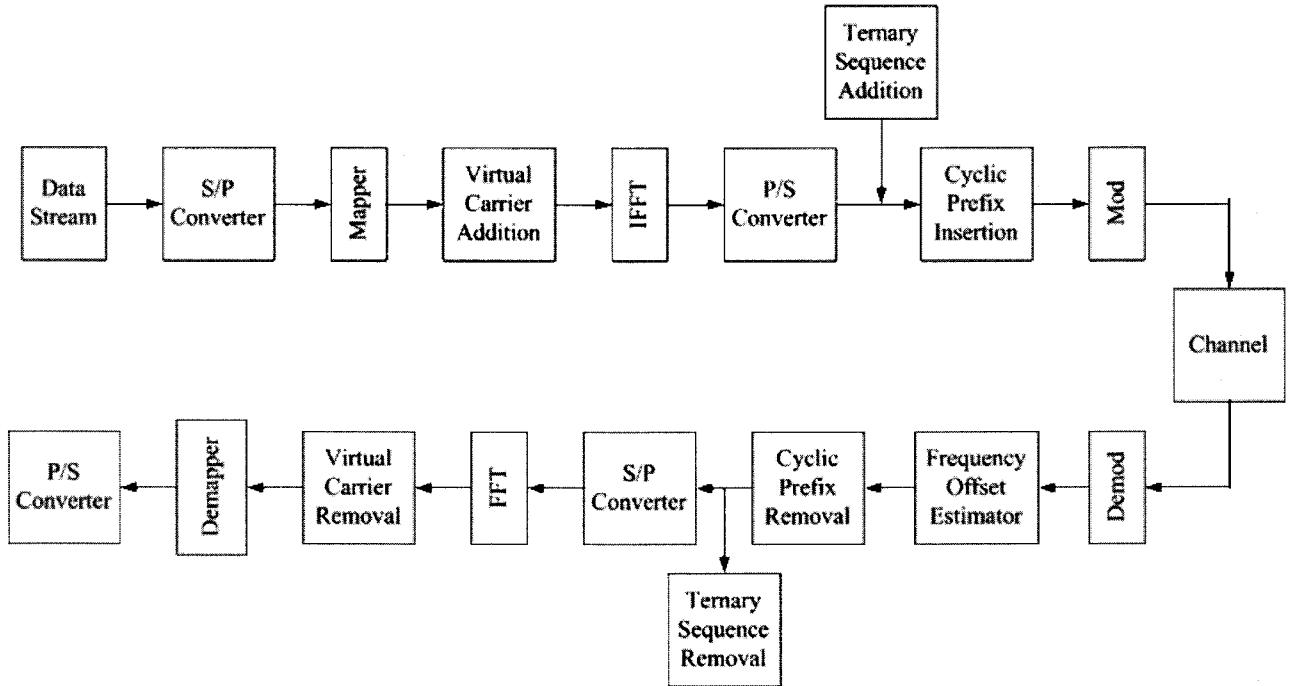


그림 1. 주파수 오프셋 추정 개념이 적용된 OFDM 시스템.
Fig. 1. OFDM system with frequency offset estimation scheme.

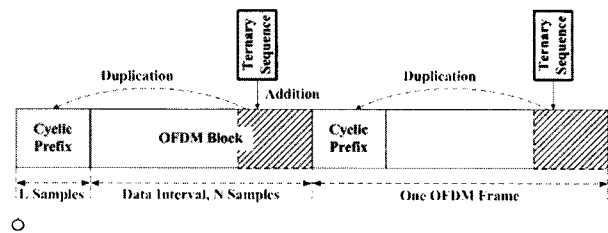


그림 2. 3진 시퀀스를 적용한 OFDM 신호 구조.
Fig. 2. Structure of OFDM signals with ternary sequence.

III. 주파수 오프셋 보상

OFDM 신호에 더해진 3진 시퀀스에 대한 정보는 이미 송·수신기가 알고 있는 것으로 가정한다. 따라서 수신된 OFDM 신호로부터 3진 시퀀스를 제거하면 수신단에서 보낸 원 신호를 복원해 낼 수 있다. OFDM 프레임에서 보호대역은 OFDM 블록의 마지막 L 샘플을 복사하여 생성한 것이고, 나머지 N 샘플은 독립적이다. 따라서 3진 시퀀스와 수신된 신호와의 상관관계를 통하여 주파수 오프셋을 추정할 수 있다.

OFDM 프레임의 마지막 L 샘플의 집합을 l 이라 하고, l 의 복사본인 CP를 l' 라 하자. 관찰된 것을 $r(k)$, $k = 1, \dots, 2N + L$,라 하면, 특정 시간 θ 에서 송·수신기 오실레이터 사이의 주파수 오프셋 ε 의 최대 우도 함수 [4]는 식 (1)과 같다.

$$\Lambda_r(\theta, \varepsilon) = \sum_{k=\theta-L+1}^{\theta} 2(1-\rho) \text{Re}\{r(k) \cdot e^{j2\pi\varepsilon} \cdot r^*(k-N)\} - \rho \cdot |r(k) \cdot e^{j2\pi\varepsilon} \cdot r(k-N)|^2$$

$$= \sum_{k=\theta-L+1}^{\theta} [e^{j2\pi\varepsilon} \cdot r(k) \cdot r^*(k-N) + e^{-j2\pi\varepsilon} \cdot r^*(k) \cdot r(k-N)] - \rho \sum_{k=\theta-L+1}^{\theta} [r(k)r^*(k) + r(k-N)r^*(k-N)] \quad (1)$$

여기서 $\rho = \frac{E\{s(k)^2\}}{E\{s(k)^2\} + E\{n(k)^2\}} = \frac{SNR}{SNR + 1}$ 는

CP에서 샘플 $r(k) \in l$ 와 $r(k-N)$ 의 상관 계수이다. 식 (1)을 ε 에 대하여 1번 미분을 하면 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial \Lambda_r(\theta, \varepsilon)}{\partial \varepsilon} = j2\pi \cdot \sum_{k=\theta-L+1}^{\theta} [r(k) \cdot r^*(k-N) e^{j2\pi\varepsilon} - r^*(k) \cdot r(k-N) e^{-j2\pi\varepsilon}] \quad (2)$$

$\Lambda_r(\theta, \varepsilon)$ 를 최대화 하는 ε 을 얻기 위해서 식 (2)를 0으로 놓으면, 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$e^{j2\pi\hat{\varepsilon}} = C \cdot \sum_{k=\theta-L+1}^{\theta} r^*(k) \cdot r(k-N) \quad (3)$$

여기서 $C = \frac{1}{\sum_{k=\theta-L+1}^{\theta} r^*(k) \cdot r(k-N)}$ 는 양의 스케일링

요소이다. 결론적으로 주파수 오프셋에 대한 최대 우도 추정은 식 (4)와 같다.

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2\pi} \angle \left(\sum_{k=\theta-L+1}^{\theta} r(k) \cdot r^*(k-N) \right) \\ = \frac{1}{2\pi} \tan^{-1} \frac{\sum_{k=\theta-L+1}^{\theta} \text{Im}\{r(k) \cdot r^*(k-N)\}}{\sum_{k=\theta-L+1}^{\theta} \text{Re}\{r(k) \cdot r^*(k-N)\}} \quad (4)$$

IV. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에서 사용될 OFDM 시스템 파라미터는 표 1에 나타나 있다. 시뮬레이션은 Jake's 모델 [7]을 사용하여 시변 다중경로 채널에서 수행하였다.

표 1. OFDM 시스템 파라미터.

Table 1. OFDM system parameters.

파라미터	값
부 반송파 개수	1024
변조	QPSK
중심 주파수	2.3 GHz
부 반송파 주파수 간격	9.765625 kHz
보호대역	128 samples
도플러 주파수	694 Hz
신호 전력대 잡음 전력 비	15 dB

주파수 오프셋 보상 성능의 향상됨을 증명하기 위하여 본 논문에서 제안한 TSB 방법의 결과와 기존의 GIB, MSB 및 변형된 MSB 방법의 주파수 오프셋 보상 결과를 비교하였다.

그림 3은 신호 전력대 잡음 전력 비율이 18 dB인 경우, 무선통신 채널에서 각각의 주파수 오프셋 보상 방법에서 관측된 샘플 수에 따른 RMS (root mean square) 주파수 오류 성능을 나타낸다. MSB 방법에서는 127 비트의 m-시퀀스를 사용하였고, 변형된 MSB 방법에서는 63 비트의 m-시퀀스를 반복하여 사용하였다. 또한 TSB 방법에서는 73 비트의 3진 시퀀스를 사용하였으며, 변형된 MSB 방법과 마찬가지로 변형된 TSB 방법에서는 73 비트의 3진 시퀀스를 반복하여 사용하였다.

TSB 방식은 변형된 MSB나 GIB 방식과 주파수 오프셋 보상 성능이 비슷하지만 MSB 방식보다는 뛰어난 성능을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 변형된 TSB 방식의 주파수 오프셋 보상 성능이 기존의 TSB 방식보다 뛰어난 것을 알 수 있다.

이는 시퀀스의 주기성이나 반복성이 주파수 오프셋에 시스템을 더 강인하게 하기 때문이다.

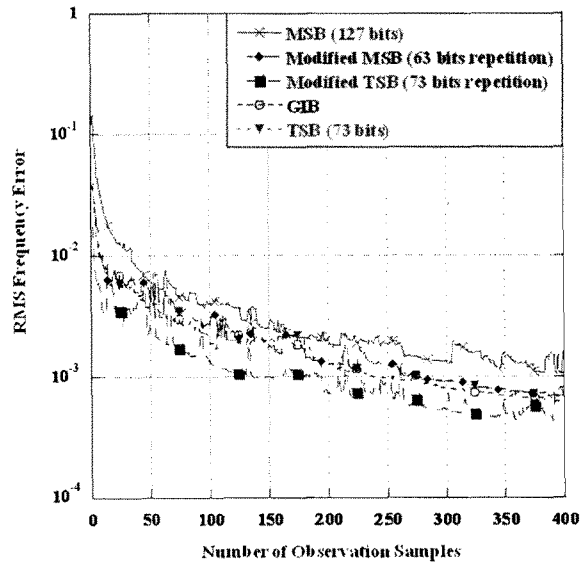


그림 3. 무선통신 채널에서 관측된 샘플수에 따른 RMS 주파수 오류 성능 (SNR=18 dB).

Fig. 3. RMS frequency error versus the number of observation samples performance in radio communication channel (SNR=18 dB).

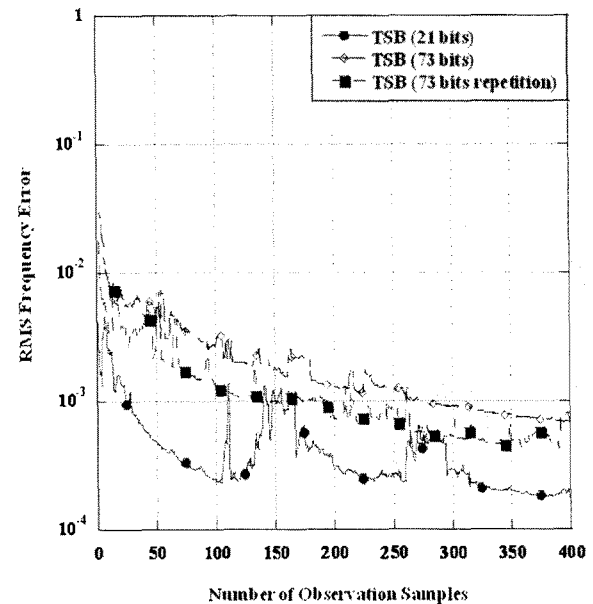


그림 4. 무선통신 채널에서 3진 시퀀스의 비트 수에 따른 RMS 주파수 오류 성능 (SNR=18 dB).

Fig. 4. RMS frequency error performance according to the number of bits of ternary sequence in radio communication channel (SNR=18 dB).

그림 4는 3진 시퀀스의 비트 수에 따른 TSB 방식의 주파수 오프셋 보상 성능을 나타낸다. 앞에서 말한 바와 같이 3진 시퀀스를 OFDM 프레임에 추가할 때 시스템 성능에 미치는 영향을 최소화 하여야 하고, 이를 위해서는 추가되는 시퀀스의 길이가 짧을수록 좋다. 그림 4에 나타난 바와 같이 73 비트의 3진 시퀀스를 단독으로 사용하는 것 보다는 반복하여 사용하

는 것이 시스템 성능 개선에 효과적이긴 하지만, 3진 시퀀스의 길이를 2배로 하여 OFDM 프레임에 추가하였으므로 변형된 TSB 방식은 TSB 방식 보다 OFDM 시스템의 원래 성능에 악영향을 미칠 수 있다. 즉 추가되는 3진 시퀀스는 부 반송파 간의 직교성을 감소시켜서 부 반송파간에 간섭을 발생시킬 수 있다. 그런데 21 비트의 3진 시퀀스를 사용한 경우가 73 비트의 3진 시퀀스를 사용한 경우보다 주파수 오프셋 보상 성능이 더 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 따라서 변형된 TSB 방식을 사용하지 않고 기존의 TSB 방식을 사용하여도 21 비트의 3진 시퀀스를 이용하면 주파수 오프셋 보상 성능을 더 향상시킬 수 있다.

V. 결론

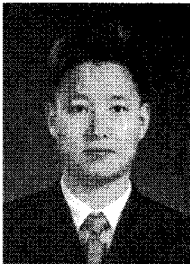
본 논문에서는 OFDM 시스템에서 주파수 오프셋 보상 성능을 향상시키기 위한 3진 시퀀스 기반의 방안을 제안하였다. OFDM 프레임의 마지막 L 샘플의 앞부분에 3진 시퀀스를 추가한 후, 이 L 샘플을 복사하고 이 블록의 앞부분에 추가하여 CP를 생성하고, 수신기에서는 송신기에서 사용한 3진 시퀀스의 수신된 신호와의 상관을 통하여 주파수 오프셋을 추정 및 보상하는 것이다.

실험 결과 TSB 방법은 기존의 제안된 방법에 비하여 뛰어난 성능을 보이는 것일 확인하였다. 특히 짧은 길이의 3진 시퀀스를 이용하여 OFDM 시스템에 영향을 거의 주지 않으면서 주파수 오프셋 보상 성능을 더욱 향상시킬 수 있는 것을 확인하였다.

본 논문의 결과는 OFDM 기반의 시스템에서 주파수 오프셋을 추정할 때 적용될 수 있다.

참고문헌

- [1] L. Hanzo, M. Munster, B. J. Choi, and T. Keller, *OFDM and MC-CDMA for broadband multi-user communications, WLANs and broadcasting*, New York: Wiley, 2003.
- [2] S. B. Weinstein and P. M. Ebert, "Data transmission by frequency-division multiplexing using the discrete Fourier transform," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 19, no. 5, pp. 628-634, Oct. 1971.
- [3] J. A. C. Bingham, "Multicarrier modulation for data transmission: An idea whose time has come," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 28, no. 5, pp. 5-14, May 1990.
- [4] M. Hsieh and C. Wei, "A low-complex frame synchronization and frequency offset compensation scheme for OFDM systems over fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, no. 5, pp. 1596-1609, Sep. 1999.
- [5] J. L. Zhang, M. Z. Wang, and W. L. Zhu, "A novel OFDM frame synchronization scheme," in *Proc. of ICCAS & WeSino Expo'02*, New York, USA, vol. 1, pp. 119-123, July 2002.
- [6] S. W. Kim and J. Y. Kim, "Frame synchronization of an OFDM system in an impulsive noise channel," in *Proc. of ITC-CSCC '06*, Chiang Mai, Thailand, pp. 109-112, July 2006.
- [7] W. C. Jake, *Microwave Mobile Communications*, New York: Wiley, 1974.



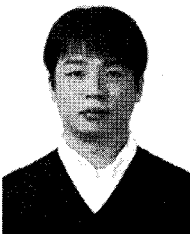
김 은 철

2003년 광운대학교 전자공학부 (공학사). 2005년 광운대학교 전파공학과 (공학석사), 2005년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 박사과정 재학중. 관심분야는 이동통신, 디지털통신, 동기화.



하 광 준

2001년 광주과학기술원 정보통신공학과(공학석사). 2001~2002년 국방과학연구소. 2002년~현재 KT 인프라연구소 선임연구원. 관심분야는 WiBro, RAS, AP 설계, HSDPA Femtocell 개발.



박 재 성

2008년 광운대학교 전자공학부 (공학사). 2008년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 MIMO, 채널 부호화, 동기화.



김 진 영

1998년 서울대 전자공학과 (공학박사). 1998년 ~ 2000년 미국 Princeton University, Research Associate. 2000년 ~ 2001년 SK텔레콤 네트워크 연구원 책임연구원. 2001년 ~ 현재 광운대학교 전파공학과 교수. 관심분야는 디지털 통신, 신호처리, 채널 부호화.