
OFDM 전송방식의 수신기를 위한 보간기의 효율적인 심볼 동기방법의 성능분석

김동옥* · 윤종호*

An Efficient symbol Synchronization Scheme with an Interpolator for Receiving in
OFDM

Dong Ok Kim* · Chong Ho Yoon*

요 약

본 논문에서는 보간 방식을 사용하는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 통신 시스템에 적합한 새로운 심볼 시간동기 처리 방법을 제시한다. 제안된 방법은 다음과 같은 과정을 거친다. 먼저, 수신되는 포락선 신호의 평균 전력을 연속적으로 측정함으로써, 대략적인 심볼 시간동기 절차를 수행한다. 이 절차에 의해, 동기 가능여부에 대한 판정을 한다. 만약 동기가 가능하다고 판단되는 경우, 이어서, 짧은 길이의 훈련신호와 수신된 포락선신호간의 상관성을 측정하는 방법을 사용하여, 정확한 심볼 동기 과정을 수행하도록 한다. 마지막으로, 긴 훈련 신호를 사용한 주파수 동기절차를 수행하도록 하는데, 이것은 심볼 시간 동기 과정에서 발생하는 미세한 심볼 동기 오차에 의한 정상도의 회전 효과를 교정할 수 있도록 하기 위함이다. 시뮬레이션 결과로부터, 제안된 동기방법이 주파수 선택적 페이딩 채널 하에서도 우수한 동기특성을 제공할 수 있음을 알 수 있다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a new symbol time synchronization scheme suitable for the OFDM system with an interpolator. The proposed scheme performs the following three steps. In the first step, the coarse symbol time synchronization is achieved by continuously measuring the average power of the received envelope signal. Based on this average power, the detection possibility for the symbol time synchronization is determined. If the signal is sufficient for synchronization, we next perform a relatively accurate symbol time synchronization by measuring the correlation between a short training signal and the received envelope signal. Finally, an additional frequency synchronization is performed with a long training signal to correct symbol synchronization errors caused by the phase rotation. From the simulation results, one can see that the proposed synchronization scheme provides a good synchronization performance over frequency selective channels.

키워드

synchronization, OFDM, symbol

1. 서론

디지털 통신 시스템 복조기에서는 수신된 아날로그 신호로부터 심볼 복원을 위해 송신 심볼을 또는 천이 시점 및 그 정수배의 클럭에 동기화를 정확하게 추정하는 것이 디지털 통신의 복조 과정에서 반드시 필요한 심볼 동기화의 목적이다. 특히 현재 폭넓게 사용되고 있는 디지털 복조기에서는 다른 동기 요소들이 모두 심볼 동기회로에서 선택된 최적의 샘플 지점에서 동작하므로 수신기 동작 중 심볼 동기가 틀려지게 되면, 다른 모든 수신기의 구성 요소들은 심볼 동기가 완전히 맞춰지게 될 때까지 동작을 일시적으로 멈추게 되기 때문에 심볼 동기회로의 상태를 파악하여 정확한 동작이 요구된다[1][2]. 디지털 수신기의 구현에 있어서는 처리 속도에 대한 부담을 줄이기 위해 심볼 동기회로에서 요구되는 샘플수를 최소화하며 반송파 동기회로와는 독립적으로 동작하는 것이 바람직하다[3]. 디지털 시간 동기복원 방법은 크게 결정 지향(Decision Directed : DD) 방법과 비결정 지향(Non-Decision Directed : NDD) 방법으로 나누어진다[4]. 이러한 방법은 롤 오프 인자(roll-off factor) 값이 감소할수록 시간 함수의 기울기가 증가하게 되고 추적 지터의 양이 감소된다. 그러나 이 방법은 시간 함수가 반송파의 위상오차에 직접적인 영향을 받기 때문에 심볼 동기 전에 정확한 반송파 복원이 요구되는 문제를 가지고 있다[5].

따라서 본 논문에서는 주파수 영역에서 파일럿 심볼을 이용하여 보간 기법을 적용해 최선형 도착 경로를 추적하여 심볼간 간섭을 최소화하는 안정적인 심볼 시간 동기 알고리즘을 제안하고자 한다. 본 논문에서는 인접하는 채널 전달 함수의 샘플들 사이에 낮은 복잡도의 다항식 보간법(polynomial interpolation)을 적용하여 직선을 이용한 1차 선형보간법과 파일럿 부반송파의 위상 회전량을 추정하기 위하여 사용된 부반송파의 개수에 따른 추적성능에 대해 모의실험을 하였다.

본 서론에 이어, 제II장에서는 보간기의 구조 및 심볼 동기 알고리즘에 대한 설명을 간단히 보였으며, III장에서는 본 논문에서 제안한 심볼 시간 동기 알고리즘의 기본적인 접근 방법을 기술한다. IV장에서는 제안한 방법에 대한 모의실험에 따른 성능분석과 실험 결과에 대하여 고찰하였으며, 마지막으로 V장에서는

결론을 제시한다.

II. 기존의 동기 방법의 특징

1. 보간기(Interpolation)

보간법이란 주어진 데이터 점들의 정보로부터, 그 점들 사이의 정보를 유추하는 수치적 방법이다. 주어진 데이터 점들을 모두 지나는 식을 구하여 식으로부터 중간점들의 값을 계산할 수 있다.

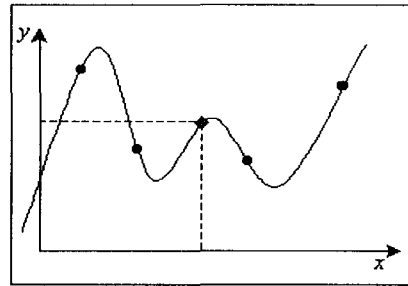


그림 1. 기본적인 보간법 원리

Fig. 1 Basic principle of interpolation

(n+1)개의 데이터 점에서 (x_i, y_i) 를 모두 지나는 식(1)과 같은 다항식을 구한다.

$$f(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad (1)$$

위의 다항식이 모든 데이터 점들을 통과하여야 하므로, 식 (2)가 성립한다.

$$f(x_i) = y_i \quad (i=0, 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

다항식을 구성하기 위하여 n 차의 Lagrange 다항식 $L_i(x)$ 를 이용하면 다음과 같은 식 (3)를 구할 수 있다.

$$f(x) = L_0(x)y_0 + L_1(x)y_1 + \dots + L_n(x)y_n$$

$$L_i(x) = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (3)$$

디지털 수신기에서 보간 심볼 시간 동기회로는 수신 신호의 샘플링 기준 시간을 제공하며 이 샘플링 기준 시간 (주파수)을 발생시키는 발진기의 주파수 제어 방식에 따라 수신기의 구조에도 큰 영향을 미치게 되며 디지털 부분에서 모든 과정을 처리하게 하는 방법

이 요구된다. 먼저 수신 신호의 샘플값을 가지고 반송파 주파수와 위상 오차를 추정 및 제거하며 심볼 시간 오차를 추정하여 전송된 신호를 복원하나, 반면 비동기화된 샘플값을 이용하여 동기 과정과 데이터 결정 과정 등을 수행하기 때문에 보다 많은 연산을 처리할 수 있는 디지털 하드웨어로 구현이 가능하다. VLSI 기술 발달에 따른 프로세서 처리능력의 샘플값을 바탕으로 두 샘플값의 사이값을 계산하는 보간기의 출력값은 심볼 시간 오차에 따라 추정된 값이며, 비이상적인 보간 필터의 영향에 의해 추정된 값은 실제 전송된 신호의 샘플값과 오차나 편이가 발생하게 된다. 따라서 보간법은 수신신호와 상관없이 임의의 고정된 간격으로 샘플링된 신호로부터 좀더 높은 주파수를 가진 신호를 유도하여 신호를 복원하며, 샘플들 사이의 새로운 값을 얻어내는 것으로 인터플레이션과 데시메이션을 사용하여 얻을 수 있다[6]. 보간하는 방법으로 직접 인터플레이션하고 데시메이션을 하여 원하는 샘플 값을 얻어 낼 수도 있지만, 보간필터를 사용하여 새로운 샘플값을 얻어 낼 수도 있다[7].

III. 제안한 수신기의 효율적인 동기방법

기존 방법인 결정 지향 디지털 시간 동기복원 방법은 심볼 주기로 샘플링을 하며, 통신 시스템의 통신 대역폭을 결정하는 펄스 성형 필터의 roll-off 계수의 값이 감소할 수록 시간 함수의 기울기가 증가하게 되고 추적 지터의 양이 감소된다. 따라서, 스펙트럼 효율이 좋고 회로구성이 비교적 간단하며 협대역 신호의 클럭 복원에 적합하다. 그러나, 이 방법은 타이밍 함수가 반송파의 위상오차에 직접적인 영향을 받기 때문에 심볼 동기 전에 정확한 반송파 복원(carrier recovery)이 필요하고 M-ary PAM 신호의 경우 결정해야 할 시스템 변수의 증가로 인해 설계가 어렵게 되는 문제가 있다. 또한 NDD 방법은 하나의 심볼마다 두 개의 샘플링이 필요하지만, 타이밍 함수가 반송파의 위상오차에 영향을 받지 않음으로 인해 반송파 동기 회로 및 등화기와는 독립적으로 클럭복원의 회로 구성이 가능하여 비교적 간단한 구조를 가진 TED(timing error detector)를 이용하여 패턴 노이즈(pattern noise)를 제거할 수 있다. DD 알고리즘과는 달리 M-ary PAM 신호의 경우

에도 알고리즘 수정없이 사용할 수 있는 장점이 있으나 패턴 노이즈가 증가하고 이로 인해 협대역 신호에서는 타이밍 함수의 기울기가 감소하여 지터 발생량이 증가하는 단점을 가지고 있다.

이러한 심볼 시간 동기 알고리즘을 적용한 OFDM 수신기의 경우 상대적으로 매우 큰 강도를 가지는 최선행 도착 직선 경로가 존재하는 라이시안 페이딩 채널에서는 심볼 간 간섭이 발생하지 않지만, 다중 경로 확산 지연이 상당히 길고 각 경로의 강도가 지연에 따라 충분히 감소하지 않는 채널에서는 결과적으로 심볼 간 간섭을 유발하는 심볼 시간 오차가 발생하여 성능의 열화가 나타나게 된다.

따라서, 본 논문에서 제안하는 심볼 시간 동기 알고리즘의 기본적인 접근은 수신기의 채널 추정기로부터 추정된 채널의 주파수 응답을 획득하여 IFFT를 통해 채널의 충격 응답 또는 다중 경로 강도 프로파일을 구하고 시간 영역에서 채널의 에너지가 집중된 일정 범위의 위치를 추적하는 것이다. 채널이 가지는 전체 에너지는 채널의 최대 다중 경로 확산 지연의 시간 범위 내에 집중되어 있으며 일반적으로 이 시간 범위는 OFDM 시스템의 보호구간 길이보다 짧다고 전제할 수 있다. 따라서, IFFT를 통해 구한 채널의 충격 응답을 보호구간 길이의 이동 윈도우를 이용하여 윈도우 내에 포함된 채널의 충격 응답 샘플들의 에너지가 최대가 되는 윈도우의 위치에서 심볼 시간 동기를 획득할 수 있다.

시간 영역에서의 충격 응답은 본래 채널 충격 응답이 지연된 형태를 가지며 AWGN과 심볼간 간섭에 의한 추가잡음 등 모든 잡음을 무시하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$h[n] = h_r[n] \quad (0 \leq n \leq 2N_g - 1) \quad (4)$$

$$= 0 \quad (2N_g \leq n \leq n - 1) \quad (5)$$

위의 충격 응답 $h[n]$ 에서 본 알고리즘에 실제적으로 영향을 미치는 부분은 식 (4)에 해당하는 부분으로 $h_r[n]$ 을 구하기 위해 필요한 채널의 주파수 응답은 다음과 같다.

$$H_r[k] = DFT_{2N_g} \{ h_r[n] \} \quad (6)$$

$$= \sum_{n=0}^{N-1} h[n] \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} n (\frac{N}{2N_g} k)} \quad (7)$$

$$= DFT_N\{h[n]\} \Big|_{\frac{N}{2Ng}k} \quad (8)$$

$$= H\left[\frac{N}{2Ng}k\right] \quad (9)$$

위의 식들로부터 구해진 최종적인 심볼 시간 오차 추정치는 다음의 수식으로 주어진다.

$$\hat{\eta} = \arg \max_n \left\{ \sum_{i=0}^{N_g-1} |h_r[(i+n) \bmod 2N_g]|^2 \right\} \quad (10)$$

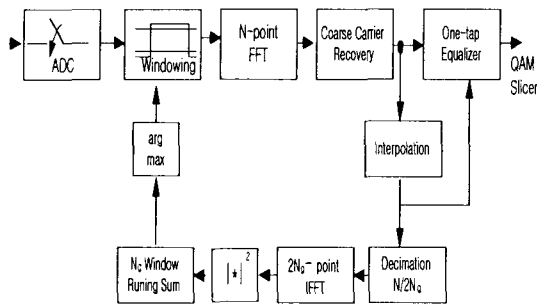


그림 2. 보간을 이용한 심볼 시간 동기 알고리즘 구성

Fig. 2 Construction of Symbol timing Synchronized Algorithm using interpolation

심볼 시간 동기 복원은 앞에서 이루어진 채널 추정의 결과를 이용하여 낮은 복잡도의 IFFT를 통해 시간 영역에서 다중 경로 채널이 가지는 에너지의 영역을 추적하여 심볼 간 간섭을 최소화시키는 최적의 FFT 윈도우의 위치를 OFDM 심볼 단위로 결정한다.

그림2는 보간을 이용한 OFDM수신기의 심볼 시간 동기 블록 다이어그램으로 도시하였다.

IV. 성능 분석 결과

본 논문에서 제안한 심볼 동기 기법의 성능 평가를 위해 모의실험을 수행하였다. 모의실험은 잡음이 없는 환경과 있는 환경을 구분하여 모의실험을 하였으며, 잡음이 없는 환경에서의 파일럿 개수에 따른 추적성능 분석을 위한 환경으로는 1차의 PLL(Phased Locked Loop)을 사용하였으며, 1차 LPF gain은 8.5e-2, sampling timing offset은 선행 32 sample offset으로

하여 SNR를 10, 20, 30[dB]의 각각의 특성을 분석하였다. 또한 파일럿 부반송파의 위상 회전량을 추정하기 위하여 사용된 부반송파의 개수에 따른 추적성능을 살펴보기 위하여 일단 잡음이 없는 환경에서 파일럿 부반송파를 4개 사용할 때의 추적성능을 그림3에 나타내었다. 그림4는 LPF의 이득에 따른 파일럿 부 반송파의 개수에 따른 추적성능을 비교하기 위해 시뮬레이션 환경으로는 1차 LPF gain과 1.2e-1, 1.2e-2, 3.5e-2, 8.5e-2, 그리고 SNR은 20[dB]로 고정하였으며, sampling timing offset를 선행 32 sample offset으로 하였다.

그림4와 같이 1차 LPF의 이득에 따라 초기 포착속도와 지터량에 대한 결과를 통하여 초기 포착 속도를 높이면서 1샘플 이하의 오프셋이 발생하는 이득 8.5e-2를 1차 PLL의 LPF 이득으로 결정하여 파일럿 부반송파의 사용개수에 따른 포착속도를 살펴보고 파일럿 부반송파의 개수와 SNR 환경에 따라 추적 성능을 그림5에 나타내었다.

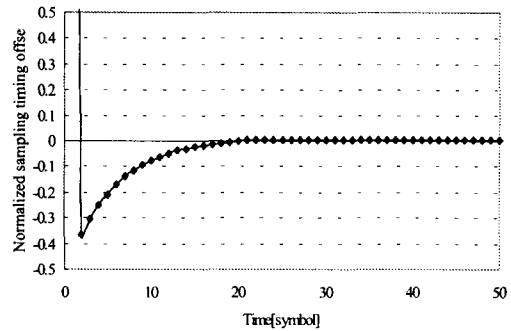


그림 3. 잡음이 없는 환경에서의 파일럿 개수에 따른 추적성능(4개일 경우)

Fig. 3 Tracking performance by number of pilot in noiseless circumstance

파일럿 부반송파의 개수에 따라서 추적속도와 정상 상태에서의 지터량도 줄어드는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 PLL의 추적성능을 향상시키기 위하여 4개의 파일럿 부반송파를 모두 이용하고 이것을 통하여 위상 회전량을 추정하였다.

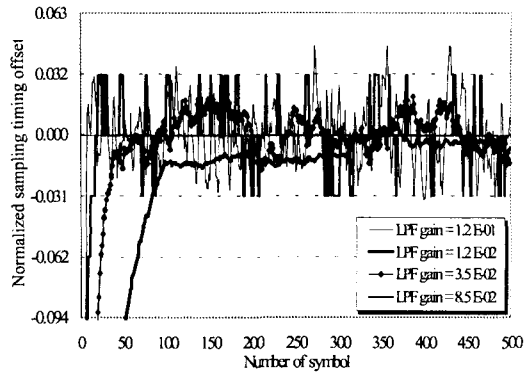


그림 4. LPF 게인에 따른 추적 성능 비교.
Fig. 4 Comparison of pursuit performance results as LPF gain

샘플링 클럭 오프셋이 $\pm 1 \sim 3$ 샘플 있는 경우 64-QAM, 16-QAM의 성좌점을 분석하고, BER 성능을 확인한 결과 최적 샘플 지점에서의 성좌점과 BER 성능에 비하여 2 샘플 이상의 오프셋이 발생했을 경우에는 심한 성능 열화가 나타나는 것을 확인하였다.

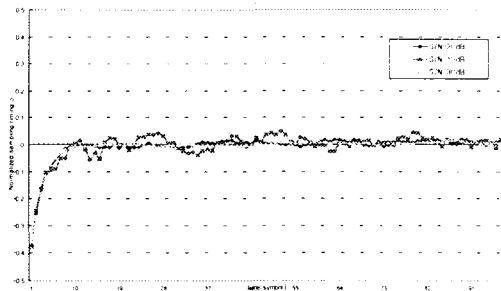


그림 5. SNR 환경에 따른 추적성능곡선
Fig. 5 Tracking performance curve in SNR circumstance

그리고 기존의 MC 및 MMSE 알고리즘은 신호 대 잡음비의 개선에 의한 MSE 성능의 향상에 한계가 있으며, MC 알고리즘 보다는 MMSE 알고리즘이 다소 높은 성능을 나타내고 있다.

여기서도 파일럿 비율이 1/3로 매우 높기 때문에 선형 보간 기법이 가장 나은 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그리고 여기서 그림6는 확률 분포를 보면, 채널 추정의 보간법에 따라 큰 차이를 보이지 않는다. 신

호대 잡음비가 0dB 이상에서 동기 확률은 90% 이상이며, -12dB의 낮은 신호대 잡음비 영역에서도 잔류 심볼 시간 오차가 동기 영역에 집중되어 있는 것으로 보아 제안한 알고리즘은 강건성을 보이고 있다.

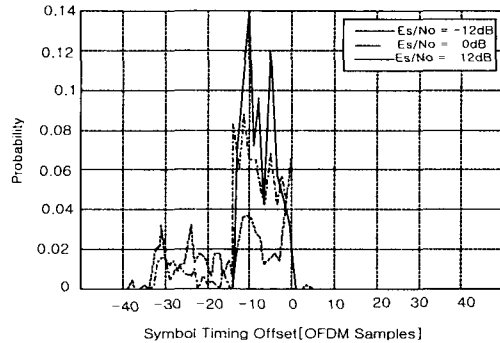


그림 6. 1차 선형 보간을 이용한 심볼 시간 오차 분포도.

Fig. 6 Distribution chart of symbol timing tolerance using 1st segment interpolation

그림7에서 확인 할 수 있듯이 기존의 MC 알고리즘과 MMSE 알고리즘의 경우 심볼간 간섭에 의해 추가되는 잡음이 신호 자체에 의해 신호대 잡음비의 개선과는 무관하다는 것이다.

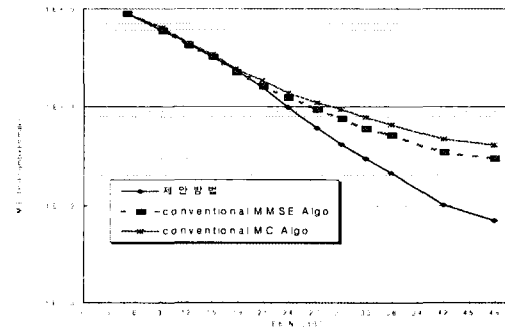


그림 7. 각 알고리즘에 대한 신호대 잡음비에 따른 심볼의 추정 MSE

Fig. 7 Estimated MSE of symbol for SNR of the algorithm

최종적으로 성능 분석을 종합하기 위해 채널 모델 P1 환경에서 64-QAM 변조 방식을 적용했을 때

E_b/N_0 가 0dB에서 40dB까지 3dB 간격으로 모의 전산 실험을 하여 E_s/N_0 에 대한 심볼 오류(Symbol Error Rate ; SER)를 관찰하였다.

그림8에서 보는 바와 같이 완전한 채널 추정을 가정하였을 경우 제안하는 심볼 시간 동기 알고리즘은 주어진 채널에 대한 이론적인 심볼 오류를 만족하였으며 파일럿 비율이 1/3인 경우에 대해 선형 보간 기법을 적용한 채널 추정을 사용하였을 경우 기존의 MC 또는 MMSE 심볼 시간 동기 알고리즘에 비해 높은 신호 대 잡음비 영역에서 우수한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

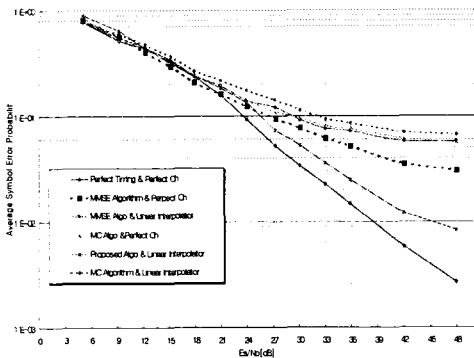


그림 8. 파일럿 비율이 1/3일 때 선형 보간 기법을 적용한 심볼 오류특성

Fig. 8 The error rate characteristic using segment interpolation techniques in when the pilot rate is one third

V. 결론

디지털 수신기의 심볼 시간 동기에 대해 연구하였다. 먼저 파일럿 부반송파의 위상 회전량을 추정하기 위하여 사용된 부반송파의 개수에 따른 추적성능을 살펴보기 위해 잡음이 없는 환경에서 파일럿 부반송파를 4개 사용할 때의 추적성능을 분석한 결과 파일럿 부반송파의 개수에 따라서 추적속도가 향상되며, 지터량도 줄어드는 것을 확인하였다. 소수의 파일럿 심볼만으로 수행하는 보간을 이용한 채널 추정의 성능은 수신 파일럿 심볼의 신뢰도가 채널 추정의 성능에 직접적인 영향을 끼치게 되는 사실을 확인하여 추적성능을 향상

시키기 위하여 4개의 파일럿을 모두 이용하여 보간 기법을 이용 하므로써 본 논문에서 제안하는 심볼 시간 동기 알고리즘은 심볼간 간섭에 의해 추가되는 잡음을 최대한 억제하여 채널 추정을 위해 높은 신뢰도가 요구되는 수신 파일럿 심볼의 성능을 개선 할 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 얻어진 알고리즘으로 무선 환경에서 동기 알고리즘을 정확히 해석하는데 유용하게 적용될 수 있으리라 기대되며, 실시간 통신 및 신뢰성이 요구되는 통신 시스템에 적용할 수 있으리라 본다.

참고 문헌

- [1] L.E. Franks, "Carrier and bit synchronization in data communication a tutorial review," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-28, no. 8, pp. 1107-1120, Aug. 1980.
- [2] H.C. Osborne, "A generalized polarity type costas loop for tracking mpsk signals," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-30, no.10, pp. 2289-2296, Oct. 1982.
- [3] Wei. Gao and Kamilo Feher, "All-digital reverse modulation architecture based carrier recovery implementation for gmsk and compatiblefqpsk," *IEEE Trans. on Broadcasting.*, vol.42, no.1, pp. 55-62, March. 1996.
- [4] 하창우 외2명, "디지털 위성방송 수신용 복조기를 위한 반송파 복원 회로설계", *한국통신학회 논문지*, vol.26, No.11B, pp. 1565-1572, Nov. 2001.
- [5] 김동욱 외1명, "무선디지털 수신기를 위한 보간방식의 반송파 동기 방법", *전자정보통신공학 논문지*, vol.7, No.2, pp. 55-67, Dec. 2001.
- [6] Loke Kun Tan and Henry Samueli, "A 200MHz quadrature digital synthesizer /mixer in 0.8um CMOS," *IEEE J. Solid-State Circuits.*, vol. 30, no.3, pp. 193-200, Mar. 1995.
- [7] David A Sunderland, et al., CMOS/SOS

Frequency Synthesizer LSI Circuit for Spread Spectrum Communications, *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 19, no. 4, pp. 497-505, Aug. 1984.

- [8] Alan V. Oppenheim and Ronald W. Schaffer, *Discrete-time Signal Processing*, Prentice Hall, 1989.
- [9] Floyd M. Gardner, "Interpolation in digital modems-part Implementation and performance," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 41, no. 6, pp. 998-1008, June. 1993.
- [10] Dae young Kim, Madihally J. Narasimha, and Donald C. Cox, "Unbiased timing error estimation in the presence of nonideal interpolation," *IEEE Trans. on Commun.*, vol 45, no. 6, pp. 647-650, June. 1997.
- [11] T. de Couasnon, R. Monnier, and J. Bernard Rault, "OFDM for digital TV broadcasting," *Signal Processing*, vol. 39, pp. 1-32, Elsevier. 1994.
- [12] 서울이동통신(주) 김동욱 외 9명, "고효율 양방향 페이징 기술개발 연구보고서", 정보통신연구보고서, Oct. 1999.
- [13] 김동욱 외 1명, "무선디지털 수신기를 위한 보간방식의 반송파 동기 방법", *전자정보통신공학 논문지*, Vol. 7, No. 2, pp. 55-67, Dec. 2001.



윤종호(尹鐘浩)

1980년 한양대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 1982년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)
 1984년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사)
 1995년 8월 ~ 1996년 8월 University of Arizona 방문교수
 1991년 8월 ~ 현재 한국항공대학교 항공통신정보공학과 정교수

저 자 소 개



김동욱(金東玉)

1990년 서울산업대학교 전자공학과 공학사
 1990년 광운대학교 대학원 전자통신 공학과 공학석사
 2001년 항공대학교 항공통신정보과 대학원 박사수료

※ 관심분야 : 통신시스템, Network System, Wireless Communication. 신호처리