

OFDM에서 디지털변조 신호와 위상잡음 관계 특성분석

윤성하* · 이영철*

*경남대학교 정보통신공학과

Analysis of Digital Modulation Signal and Phase Noise's Relation Characteristics in the OFDM Systems

Seong-Ha Yun* · Young-Chul Rhee*

*Div. of Information & Comm. Eng., Kyungnam University

E-mail : paulweb76@hanmail.net , micropt@kyungnam.ac.kr

요 약

본 논문은 고속 무선랜에 적용하고 있는 OFDM시스템에서 국부발진기의 위상잡음에 의해서 기저대역의 채널에서 나타나는 위상변위특성을 해석하고, 국부발진기를 포함하는 PLL시스템에서 위상잡음 변화를 수치적인 해석을 하였다. OFDM신호를 QPSK, 16QAM 변조신호로 전송하였을 경우, 위상잡음에 따른 관계를 변조신호의 성상도 및 BER관계로써 분석하였다.

1. 서 론

현대사회에서 급증하는 정보통신의 수요와 다양한 정보 매체의 이용이 늘어남에 따라서 통신의 서비스는 디지털 및 대용량 고속 서비스가 필요하게 되었고, 이러한 요구 조건을 만족하기 위해서 다수 반송파통신을 많이 적용하는데, 그 대표적인 방식이 OFDM 전송방식이다[1]. 이러한 OFDM방식을 채택한 802.11a의 무선랜 서비스는 5GHz 주파수 대역에서 최대 54Mbps의 높은 data rate를 갖게 되며, 밀집한 성상을 갖는 M-QAM과 같은 고차원 변조방식을 사용하며, 위상변조 기법을 사용하는 디지털 통신시스템의 국부발진기는 주파수 안정도와 위상잡음 특성이 수신단의 IF단에서의 C/N_0 와 기저대역신호의 BER특성에 중대한 영향을 미치기 때문에, 입력 반송파와 정확한 동기를 이루도록 주파수 안정성과 위상잡음 특성이 뛰어나야한다. 이러한 위상잡음은 국부발진기(LO)의 주파수 합성기에서 주로 발생하기 때문에, OFDM시스템에서 국부발진기의 위상잡음의 영향으로 나타나는 현상들을 정확하게 분석하여 전체 시스템의 성능에 맞춰 주파수 합성기에서 발생하는 위상잡음의 허용 크기를 정하고, 그에 따른 국부발진기를 설계하는 것이 필요하다[2].

본 논문에서는 OFDM시스템에서 나타나는 위상잡음의 현상을 RF단 및 기저대역에서 해석을 하였으며, 분산값에 따른 위상잡음관계를 성상도 및 변조신호와 BER관계로 해석하고, PLL을 구성하는 시스템의 각 구성원소에서 나타나는 위상잡음의 특성을 분석하였다.

음의 현상을 RF단 및 기저대역에서 해석을 하였으며, 분산값에 따른 위상잡음관계를 성상도 및 변조신호와 BER관계로 해석하고, PLL을 구성하는 시스템의 각 구성원소에서 나타나는 위상잡음의 특성을 분석하였다.

II. OFDM시스템에서의 위상잡음해석

현재 고속 데이터 전송에 가장 적합한 방식으로 OFDM 방식이 가장 많이 사용되고 있다. OFDM신호의 적용 예로는 무선랜 뿐만 아니라 디지털오디오 방송(DAB) 및 디지털 TV, 그리고 TP케이블에서의 high rate전송과 같은 다양한 응용분야에 제안이 되고 있다[2]. OFDM신호는 $1/T$ 간격을 가지는 N개의 사인 곡선으로 구성이 되며, 채널간격의 역수와 동일한 주기 T를 가지는 데이터 심볼들에 의해서 변조가 되기 때문에, 변조된 사인파들의 스펙트럼들이 중복이 되더라도 그들은 직교를 이룬다. 송·수신기에서의 OFDM신호의 변·복조는 IFFT 및 FFT에 의해서 효율적으로 수행될 수 있다. 그림 1은 복조기 블록다이어그램을 나타낸다.

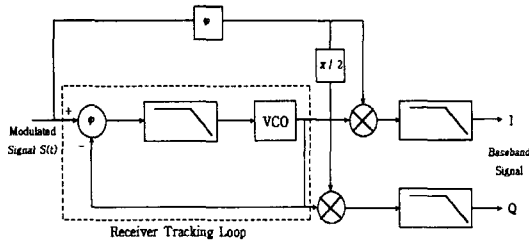


그림 1. 복조기 블록다이어그램

복조기에 사용되는 국부발진기로 인해 위상잡음이 발생하게 되는데, 위상잡음이 신호에 추가된 경우 OFDM신호의 수신 때 발생하는 영향으로 크게 2가지 있다. 수신단에서 신호 성상도를 회전시키는 작용을 하는 common phase error (CPE)와 OFDM신호의 직교성을 파괴하는 inter-carrier interference(ICI)로 구분할 수 있다[2]. 그림 2는 성상도 변화를 나타내는 에러벡터로서 이상적인 심볼위치에서 실제로 수신된 성상도의 위치까지의 거리로 정의된다[3].

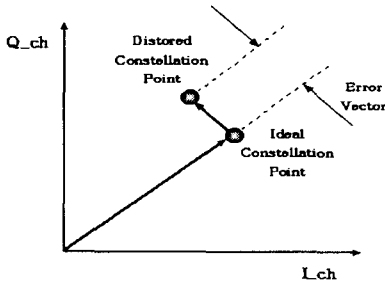


그림 2. 성상도 에러벡터

심볼주기 T동안에, 송신된 OFDM신호의 복소수 포락선은 다음과 같이 표현 된다[4].

$$s(t) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j\frac{2\pi}{T}kt} \quad (1)$$

여기서, N은 부반송파의 수이고, X_k 는 k번째 반송파의 복소수 크기를 나타낸다.

이때, 수신된 신호 $r(t)$ 는 다음과 같다.

$$r(t) = \{s(t) \cdot e^{j\phi_r(t)}\} \cdot e^{j\phi_s(t)} \quad (2)$$

여기서, $\phi_s(t)$ 와 $\phi_r(t)$ 는 송·수신단에 사용되는 국부발진기에서 발생하는 위상잡음이다. 수신단에서 FFT변환을 거쳐서 나오는 k번째 부반송파 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y_k &= \sum_{l=0}^{N-1} r(t) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kt} \\ &= \sum_{l=0}^{N-1} e^{j\phi_s(t)} \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} X_l \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}(l-k)t} \\ &\quad + \sum_{l=0}^{N-1} n_k \cdot e^{j\phi_s(t)} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kt} \\ &= \sum_{l=0}^{N-1} X_l \cdot P_{l-k} + N_k \end{aligned} \quad (3)$$

N_k 는 수신단의 국부발진기에서 위상잡음이 추가된 $n(t)$ 의 샘플된 FFT형태이고, 분산 σ_n^2 를 가진다. 위상잡음 $\phi(t)$ 은 $\phi_i(t) + \phi_r(t)$ 이며, P_k 은 다음과 같다.

$$P_k = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} e^{j\phi(t)} \cdot e^{j\frac{2\pi}{N}kt} \quad (4)$$

위상잡음의 분산에 대한 정확한 해석을 위해서 $e^{j\phi(t)}$ 을 선형 근사화를 하면 다음과 같다[5].

$$e^{j\phi(t)} \approx 1 + j\phi(t) \quad (5)$$

$e^{j\phi(t)}$ 을 사용하여 식(3)에 대입하면 크기항과 위상항을 다음과 같이 분리할 수 있다.

$$M_k = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{2N} \sum_{l=0}^{N-1} \phi^2(t)\right)^2 + \left(\frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \phi(t)\right)^2} \quad (6)$$

$$R_k = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \phi(t)}{1 - \frac{1}{2N} \sum_{l=0}^{N-1} \phi^2(t)} \right) \quad (7)$$

하나의 부반송파 정보신호에는 국부발진기의 위상잡음 영향으로 잡음성 캐리어가 발생하고, 따라서 부반송파 수만큼 잡음성 캐리어가 발생하므로 이로 인해서 자신의 가지고 있는 잡음성 캐리어로부터 크기항 및 위상항이 왜곡을 받고, 결국은 그것을 제외한 N-1개의 다른 잡음성 캐리어로부터 ICI를 받는다[5].

여기서, CPE와 ICI로 인한 전력은 다음과 같다.

$$P_{CPE} = \frac{1}{N^2} \sum_{l=0}^{N-1} \text{var}[e^{j\phi_s(t)}] = \frac{1}{N} \cdot (1 - e^{-4\sigma_s^2}) \quad (8)$$

$$P_{ICI} = P_s \cdot \frac{N-1}{N} \cdot (1 - e^{-4\sigma_s^2}) \quad (9)$$

국부 발진기의 위상잡음을 고려한 SNR은 다음과 같다.

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{with(\phi)} = \frac{P_s}{(P_{CPE} + P_{IC}) + P_n}$$

$$= \frac{\frac{S}{N}_{without(\phi)}}{1 + 4 \cdot \sigma_\phi^2 \cdot \frac{S}{N}_{without(\phi)}} \quad (10)$$

III. PLL에서의 위상잡음 해석

헤테로다인 방식의 수신기의 전체 성능은 LO의 위상잡음 특성에 좌우가 된다. 위상잡음이 수신기의 상호 믹싱이 되는 특성을 결정하며, 그것은 인접채널간섭(ACI) 제거와 수신기의 감도에 영향을 미친다. 그러므로 VCO가 포함된 PLL에서의 위상잡음해석이 중요하다. PLL은 전압제어 발진기(VCO), 위상검출기(PD), 루프필터(LF)로 구성이 된다[6]. 실제 PLL에서는 VCO의 위상잡음 특성이 대부분의 영향을 미치지만, PLL을 구성하는 각 구성원소의 위상잡음도 전체 위상잡음 특성에 영향을 주기 때문에, 정확한 위상잡음을 해석하기 위해서 구성원소에 대한 분석이 역시 필요하며, 세부적인 블록다이어그램은 그림 3과 같다[7].

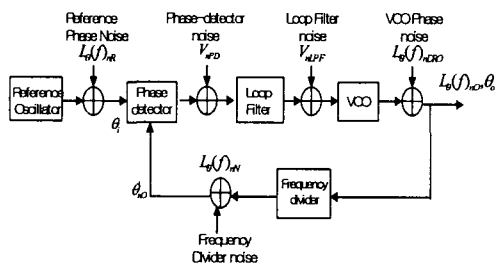


그림 3. PLL 블록다이어그램

여기서, $L_\theta(f)_{nR}$ 은 기준 발진기의 출력 위상잡음, $L_\theta(f)_{nO}$ 는 최종 출력위상잡음, $L_\theta(f)_{nOSC}$ 는 귀환회로를 거쳐 위상검출기로 인가되는 최종 출력 위상잡음, $L_\theta(f)_{nDRO}$ 는 전압제어 유전체공진 발진기의 위상잡음, $L_\theta(f)_{nN}$ 는 분주기 위상잡음, V_{nPD} 는 위상검출기 출력 위상잡음, V_{nLPF} 는 루프필터의 출력 위상잡음으로 정의된다[8].

PLL시스템에서의 출력 위상 잡음의 스펙트럼밀도는 다음과 같다.

$$L_\theta(f)_{nO} = L_\theta(f)_{nR} \cdot N^2 + [L_\theta(f)_{nDN} + \frac{L_\theta(f)_{nV_{PD}} + L_\theta(f)_{nV_{LPF}}}{K_d^2}] \cdot N^2 \quad (11)$$

PLL시스템을 구성하는 각 부분에서의 위상잡음 해석에서 루프필터(LPF)의 위상잡음 관계는 다음과 같다[7].

$$L_\theta(f)_{nLPF} = 4kT \cdot R_{dc} \approx R_{dc \times 1.66} \times 10^{-20} [V^2/Hz] \quad (12)$$

여기서, R_{dc} 는 루프 필터와 위상검출기로부터의 varactor 회로를 분리시키는 decoupling resistor이다. 또 위상검출기에서 위상잡음관계는

$$L_\theta(f)_{nPD} \approx 10^{-14.1 \pm 1}/f + 10^{-17} \quad (13)$$

이며, 주파수 분주기에서의 위상잡음은 다음과 같다[7].

$$L_\theta(f)_{nDN} = L_\theta(f)_{nR}/N^2 + L_\theta(f)_{nadd} \quad (14)$$

이때, 부가적인 위상잡음항은 다음과 같다.

$$L_\theta(f)_{nadd} \approx 10^{-14.7}/f + 10^{-16.5} \quad (15)$$

발진기의 출력 위상 잡음에 대한 스펙트럼 밀도 함수는 다음과 같이 주어진다[7].

$$\frac{L_\theta(f)_{nOSC}}{f_o^2} = \frac{1}{f^3} \frac{10^{-11.6}}{Q_L^2} + \frac{1}{f^2} \frac{10^{-15.6}}{Q_L^2} + \frac{1}{f} \frac{10^{-11}}{f_o^2} + \frac{10^{-15}}{f_o^2} \quad (16)$$

기준 주파수 발진기에서의 위상잡음 관계는 일반적인 평균 수정발진기에 대한 위상잡음은 다음과 같다[7].

$$\frac{L_\theta(f)_{nR}}{f_o^2} = \frac{10^{-37.25}}{f^3} f_o^2 + \frac{10^{-39.4}}{f^2} f_o^2 + \frac{1}{f} \frac{10^{-37.25}}{f_o^2} + \frac{10^{-14.9}}{f_o^2} \quad (17)$$

위상잡음의 분산을 구하는 수식은 다음과 같다[3].

$$\sigma_\phi^2 = \int_{-B/2}^{B/2} L_\theta(f) df = 2 \cdot \int_0^{B/2} L_\theta(f) df \quad (18)$$

여기서 B는 채널대역폭을 나타내며, $L_\theta(f)$ 은 잡음 전력밀도를 나타낸다.

IV. 모의실험 및 분석

본 논문에서는 국부발진기에서 발생하는 위상잡음의 변화성분을 분산에 따라 분류하였으며, 이에 따라 2가지의 변조신호(QPSK, 16QAM)을 이용한 OFDM 신호의 특성을 모의실험을 통해서 비교해 보았다. 그림 4와 그림 5는 위상잡음이 있는 경우와 없는 경우를 각각 나타낸다. 그림 4는 AWGN에서 위상잡음의 분산이 0인 경우를 나타내며, 그림 5는 위상잡음의 분산이 0.08인 경우이며, 위상잡음의 분산이 증가할수록 정상도의 에러백터가 커지므로 BER특성이 떨어짐을 예상할 수 있다.

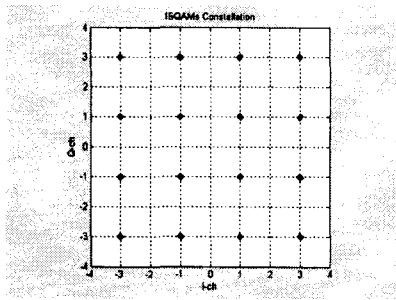


그림 4. 16QAM 정상도(with no phase noise)

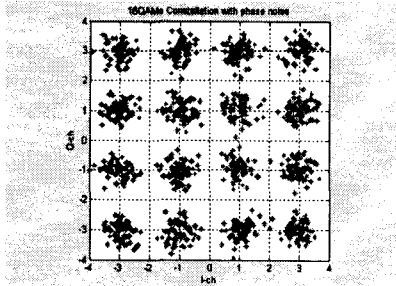


그림 5. 16QAM 정상도(with phase noise)

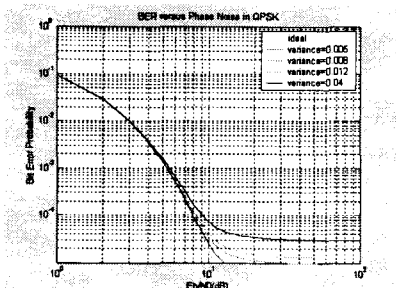


그림 6. 위상잡음에 따른 BER 특성(QPSK)

그림 6과 그림 7은 AWGN환경에서 QPSK와 16QAM변조방식의 BER특성곡선으로써 위상잡음에 따른 성능을 나타내고 있다. BER을 10^{-5} 로 기준으로

했을 경우, QPSK방식은 분산에 따라 대략 0.7dB정도의 차이를 나타내었으며, 16QAM방식의 경우는 대략 2.3dB정도의 성능차이를 나타내었다.

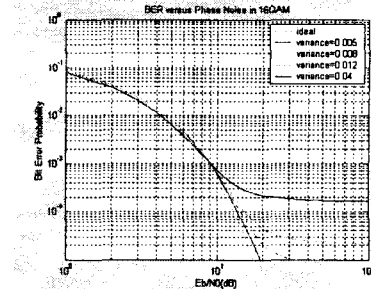


그림 7. 위상잡음에 따른 BER 특성(16QAM)

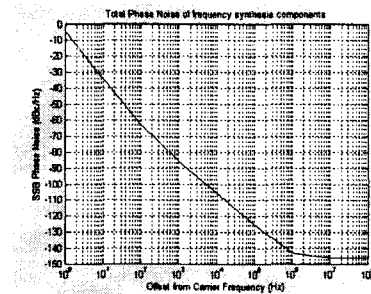


그림 8. 전체 PLL에서의 위상잡음

그림 8은 국부발진기를 포함하는 PLL전체시스템에서의 위상잡음특성을 나타내며, 조건은 발진기의 출력 주파수를 5.15GHz, 기준 발진주파수는 10.05MHz, 분주factor는 512로 가정하였다.

V. 결론

본 논문은 OFDM시스템에서 국부발진기에 의해서 발생하는 위상잡음의 영향을 기저대역에서 분석하고, 이를 토대로 국부발진기를 포함하는 PLL에서의 위상잡음을 해석하였으며, 위상잡음에 따른 변화를 정상도로 나타내었고, 변조신호가 QPSK, 16QAM일 때 위상잡음에 따른 BER특성을 비교분석하였다. 모의실험결과 위상잡음이 있을 때, 에러백터로 인해서 정상도 point에서 많은 차이를 나타내며, QPSK와 16QAM 변조방식에서 같은 분산을 사용하였을 때, 차수가 높은 16QAM이 위상잡음에 좀 더 민감한 특성을 나타냄을 알 수 있었고, 분산이 0.4 이상이 되면 성능이 급격히 나빠짐을 알 수 있다. PLL을 구성하는 시스템의 각 구성원소에서 나타나는 위상잡음의 특성을 분석하여 모의실험한 결과 PLL시스템의 전체 위상잡음은 $-105\text{dBc}@10\text{KHz}$ 의 특

성을 나타내었다. 향후연구로 분석된 위상잡음 특성을 만족하는 PLL시스템을 설계하고자 한다.

참고문헌

- [1] Richard van Nee and Ramjee Prasad, OFDM for Wireless Multimedia Communication, Artech House Publishers, 2000.
- [2] Ana Garcia armada, "Understanding the effects of Phase Noise in OFDM," IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 47, No2, pp.153-159, June 2001.
- [3] J.R.Pelliccio, Heinz Bachmann and Bruce W.Myers, "Phase Noise Effects on OFDM Wireless LAN Performance," Applied Microwave & Wireless, pp.68-80, Jul 2001.
- [4] T.Pollet, M.van Bladel, and M.Moeneclaey, "BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise," IEEE Transactions on communication, Vol. 43, No.2/3/4, pp.191-193, Feb 1995.
- [5] J.H.Stott, "The effect of phase noise in COFDM," EBU Technical Review, summer 1998.
- [6] W.P.Robins, "Phase noise in signal source," IEE Telecommunication series 9, 1991.
- [7] Venceslav F. Kroupa "Noise Properties of PLL systems" IEEE Transaction on Communication, Vol. COM-30, pp.2244-2252, Oct 1987.
- [8] Mohamed K. Nezami "Evaluate The Impact of Phase Noise on Receiver Performance," part 1~2 Microwave & RF, June 1998.