

M-WiMAX 시스템의 DFE 최적화를 위한 IQ 불균형 보상과 AGC 결합 기법

준회원 김 중 훈*, 김 영 범*, 종신회원 장 경 희*

Joint Scheme of IQ Imbalance Compensation and AGC for Optimal DFE in M-WiMAX Mobile Modem

JongHun Kim*, YoungBum Kim* Associate Members, KyungHi Chang* Lifelong Member

요 약

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 방식을 기반으로 하는 M-WiMAX (Mobile-Worldwide Interoperability for Microwave Access) 시스템은 이동성이 있는 고속 데이터 전송에 적합한 전송 방법으로 널리 알려져 있지만, 수신단에서의 LO (Local Oscillator) 에 의해 발생하는 IQ 불균형에 매우 민감한 특성을 보이는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 IQ 불균형이 시스템에 미치는 영향을 분석하고, 이를 보상하는데 있어 이득 불균형의 추정 및 보상이 AGC (Automatic Gain Control) 기능과 중첩함으로써 단일 모뎀에서 DFE (Digital Front-end) 의 소형화 및 고집적화를 위한 두 기능의 결합 기법을 제시한다. 모의 실험을 통해 기존 방법과의 성능 차이가 없음을 보여 제안한 기법에 의한 H/W 구현의 복잡도를 감소시킬 수 있다.

Key Words : M-WiMAX, IQ Imbalance, AGC, Digital Front-end

ABSTRACT

M-WiMAX (Mobile-Worldwide Interoperability for Microwave Access) system, which uses OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) technique, is known to be proper for mobile high-speed data transmission system. Nevertheless, M-WiMAX is seriously sensitive to IQ imbalance caused by the LO (Local Oscillator) at the receiver. In this paper, we analyze the effect of IQ imbalance on the system, and then propose a joint optimization scheme that can optimize DFE (Digital Front-end) of mobile modem by combining operation duplicated between AGC (Automatic Gain Control) and the estimation and compensation of IQ imbalance. Simulation results show that the proposed scheme achieves the same performance of the conventional scheme while reducing the complexity of the H/W implementation.

I. 서 론

M-WiMAX 시스템은 주파수 효율이 높고, 단일 탭 등화기로 채널의 왜곡을 보상할 수 있어 주파수 선택적 페이딩 채널에 강한 특성을 갖는 OFDM 방식을 기반으로 함에 따라, 서비스 간 영역을 넘어

유무선 융합과 모바일 브로드밴드를 전개하면서 전송속도, 이동성, 개인화, 경제성, 망간 융합성 및 단말기 통합성을 지향하는 차세대 무선통신기술에 적합하다. 하지만, 수신단에서의 LO 에 의해 발생하는 IQ 채널 간의 이득 및 위상 불균형으로 ICI (Inter Subcarrier Interference)를 증가시켜 직교성을 저해

※ 본 연구결과는 국토해양부의 연구사업인 “해양 RF 기반 선박용 Ad-hoc 네트워크 개발” 과제에서 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

* 인하대학교 정보통신대학원 이동통신연구실 (t0ma24u@nate.com, kimyb2000@hanmail.net, khchang@inha.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-01-036, 접수일자 : 2009년 1월 30일, 최종논문접수일자 : 2009년 4월 22일

함으로 시스템 성능 열화를 가져온다. 따라서, 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 이들 불균형을 보상하는 방법이 요구된다.

IQ 불균형의 영향에 대해 사전에 다양한 보상 기법들이 연구되었다. 참고문헌 [1]과 [2]는 시간 영역과 주파수 영역에서 적응적 필터를 적용하여 IQ 불균형을 보상하는 기법을 제안하였고, 참고문헌 [3]과 [4]는 IQ 불균형 보상과 더불어 위상 잡음 및 DC 오프셋을 보상하는 결합 기법을 이용하여 front-end의 복잡도를 줄일 수 있는 방안을 제시하고 있다.

본 논문에서는 이러한 front-end의 복잡도를 줄일 수 있는 기법들에 착안하여, IQ 불균형의 추정 및 보상 시 AGC 기능을 통해 IQ 이득 불균형을 동시에 수행하는 기법을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 IQ 불균형이 시스템에 미치는 영향을 분석하고, 3장에서는 IQ 불균형 보상과 AGC의 결합 기법을 설명한다. 그리고 4, 5장에서 모의실험을 통한 성능 분석에 관해 논의하고, 이를 통한 본 논문의 결론을 도출한다.

II. IQ 불균형으로 인한 영향 분석

2.1 IQ 불균형의 신호 모델

직접 변환 방식의 수신기에서 수신된 IQ 채널의 아날로그 신호 처리 과정은 그림 1과 같다. LO의 두 신호 크기가 정확하게 일치하지 않거나, 위상차가 90°가 되지 않는 경우에 IQ 불균형이 발생하게 되어 mixer, AGC, LPF (Low-pass Filter) 및 ADC (Analog-to-digital Convertor) 와 같은 모든 아날로그 소자들이 이득 및 위상 불균형에 의한 영향을 받는다. 따라서, 직교 변환된 신호에 성상도 왜곡이 발생하여 시스템의 오류 확률을 높게 된다.

IQ 불균형의 영향을 살펴보기 위해서 IQ 불균형을 야기시키는 LO 신호 $x_{LO}(t)$ 는 식 (1)로 정의된다.

$$\begin{aligned} x_{LO}(t) &= \cos(\omega_{LO}t) - jg\sin(\omega_{LO}t + \varphi_{err}) \\ &= K_1 e^{-j\omega_{LO}t} + K_2 e^{-j\omega_{LO}t} \end{aligned} \quad (1)$$

where

$$\begin{aligned} K_1 &= (1 + g e^{-j\varphi_{err}}) / 2 \\ K_2 &= (1 - g e^{j\varphi_{err}}) / 2 \end{aligned}$$

여기서, g 와 φ_{err} 는 이득 및 위상 불균형을 나타내고, ω_{LO} 는 LO의 주파수를 나타낸다. 이때, 이득 및 위상 불균형이 존재하지 않을 경우 $g = 1$, $\varphi_{err} = 0$ 이다. 그리고 수신되는 신호 $r(t)$ 는 수신단에서

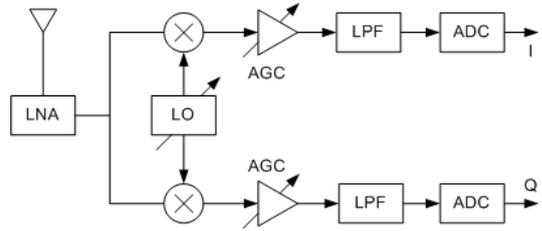


그림 1. 수신단의 analog front-end 구조.
Fig. 1. Analog front-end structure of receiver.

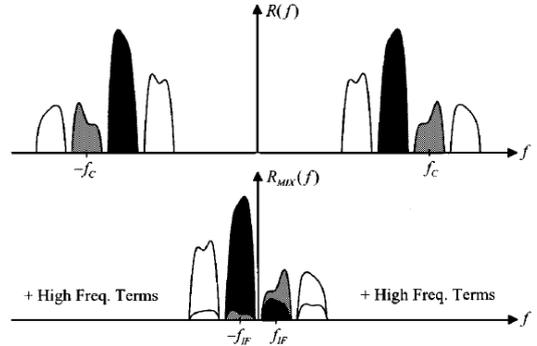


그림 2. 수신된 신호 $r(t)$ 와 mixer 를 통해 출력된 $rMIX(t)$ 의 스펙트럼.
Fig. 2. Spectra of the received signal $r(t)$ and the mixer output signal $rMIX(t)$.

의 mixer 에 의해 그림 2와 같이 실제 보내고자 하는 신호와 동일한 정보를 갖는 image 신호가 존재하는 형태이며, 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$r(t) = s(t)e^{j\omega_c t} + s^*(t)e^{-j\omega_c t} \quad (2)$$

여기서, $s(t)$ 는 송신된 신호이고, *는 켈레 복소수를 나타낸다. ω_c 는 반송파 주파수이다. 이 수신된 신호 $r(t)$ 는 mixer와 LPF를 거쳐 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$r_{LPF}(t) = K_1 s(t) + K_2 s^*(t) \quad (3)$$

위 식을 통해 $K_2 s^*(t)$ 는 IQ 불균형에 의해 발생되며, 이로 인해 에일리어싱 (Aliasing) 영향이 나타남을 그림 2를 통해 알 수 있다^[1].

2.2 IQ 불균형의 영향

IQ 불균형은 기본적으로 식 (3)의 K_1 에 의해 수신된 신호의 성상도 위치를 결정하며, $K_2 s^*(t)$ 로 인해 자기간섭 현상을 유발한다. 또한, 변조 지수가 높을수록 각 성상도 간의 거리가 짧아져 자기간섭 현상에 의한 성능 저하가 가중된다.

2.2.1 단일 반송파와 다중 반송파 시스템에서의 영향

다중 반송파를 사용하는 OFDM 시스템은 수신되는 image 신호의 존재로 인해 FFT 수행 후 출력되는 신호는 식 (4)와 같다.

$$R(k) = K_1 S(k) + K_2 S^*(L-k), \quad 1 \leq k \leq L-1 \quad (4)$$

where $L = FFTLength$

여기서, $S^*(L-k)$ 는 원 신호와 동일한 정보를 갖지만, 역순의 형태로 존재하는 image 신호로 인해 부 반송파간의 직교성에 영향을 주어 ICI가 증가된다. 따라서 수신된 신호는 그림 3 (a)와 같은 신호의 성상도를 갖으며, 이로 인해 시스템 성능에 저하를 가져온다. 반면에, 단일 반송파를 사용하는 DS-CDMA 시스템에서 수신된 신호의 역확산 과정 후 출력되는 신호는 식 (5)와 같다.

$$y = C^H r = K_1 z + K_2 C^H C^* z^* \quad (5)$$

여기서, C 및 C^H 는 확산 부호의 집합인 $[c_0, c_1, \dots, c_{K-1}]$ 및 역확산 부호이며, z 는 사용자 심볼로 $[z_0, z_1, \dots, z_{K-1}]$ 이다. OFDM 시스템과 달리 DS-CDMA (Direct-Sequence Code Division Multiple Access)에서의 간섭은 $C_H C^*$ 에 의해 MUI (Multi-user Interference)를 발생시킨다⁵⁾. 하지만 이는 특정한 scrambling 부호를 적용함으로써 MUI에 의한 성능 열화를 줄일 수 있고, $C_H C^* = I$ 인 경우 역확산된 신호는 단지 자기간섭 영향만을 받기 때문에 그림 3 (b)와 같은 성상도를 갖는다. 즉, OFDM 시스템의 경우에는 단일 반송파 시스템과 달리 IQ 불균형에 의해 각 부반송파 간의 직교성이 저해되어 더 큰 성능 열화를 가져온다.

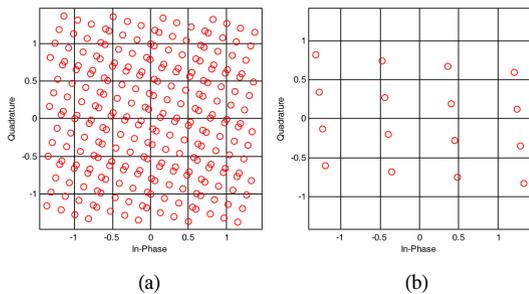


그림 3. IQ 불균형에 의해 왜곡된 신호의 성상도 (16 QAM). (a) 다중 반송파 시스템 (b) 단일 반송파 시스템
Fig. 3. Constellation point of distorted signal due to the IQ imbalance (16 QAM). (a) Multi-carrier system (b) Single-carrier system

III. IQ 불균형 보상과 AGC

일반적인 AGC와 IQ 불균형 보상은 그림 4와 같은 구조로 A/D 변환하여, I와 Q 채널에 대한 이득 및 위상 불균형을 추정 및 보상한 후 AGC 기능을 수행한다.

ADC를 통해 출력되는 신호는 식 (3)으로부터 K_I, K_2 와 $s(t) = s_I(t) + js_Q(t)$ 를 이용하여 식 (6)의 행렬 형태로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} r_I[k] \\ r_Q[k] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{PL} & 0 \\ -\gamma_Q \sin \varphi_{err} & \gamma_Q \cos \varphi_{err} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} s_I[k] \\ s_Q[k] \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서, γ_{PL} 은 채널에 의해 감쇠되는 이득이며, γ_Q 는 γ_{PL} 과 이득 불균형 g 의 곱을 나타낸다. 이 후 IQ 불균형의 이득 추정은 식 (7)과 같이 I 채널을 기준 채널로 Q 채널의 상대적인 왜곡 정도를 파악하고, 위상 추정은 식 (8)과 같이 I 채널과 Q 채널 간의 상호 상관 값으로 측정된다.

$$K_{est} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^L r_Q^2[k]}{\sum_{k=1}^L r_I^2[k]}} \quad (7)$$

$$P_{est} = \frac{\sum_{k=1}^L (r_I[k] \cdot r_Q[k])}{\sum_{k=1}^L r_I^2[k]} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)을 통해 추정된 IQ의 이득 불균형은 식 (9)와 (10)으로 보상하며, 위상 불균형은 식 (11)과 (12)로 보상한다⁶⁾.

$$w_I[k] = \frac{1}{K_{est}} \cdot r_I[k] \quad (9)$$

$$w_Q[k] = r_Q[k] \quad (10)$$

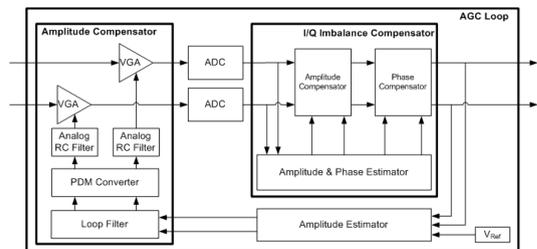


그림 4. 일반적인 IQ 불균형 보상과 AGC 구조
Fig. 4. Conventional scheme of IQ imbalance compensation and AGC.

$$w_I[k] = r_I[k] \tag{11}$$

$$w_Q[k] = \frac{1}{\sqrt{1 - P_{est}^2}} [r_Q[k] - P_{est} r_I[k]] \tag{12}$$

보상된 IQ 채널의 신호는 식 (13)의 AGC 루프에 의해 채널을 통해 감쇠된 이득을 검출하여 VGA (Variable Gain Amplifier)로 보상된다⁷⁾.

$$v(k) = v(k-1) + A \cdot \gamma_{PL} \tag{13}$$

where

$$\gamma_{PL} = \frac{\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \sqrt{w_I^2[k] + w_Q^2[k]}}{V_{ref}}$$

여기서, A는 I 채널과 Q 채널의 루프 필터 이득이다. 이와 같이 독립적으로 수행되는 기존의 보상 회로는 I 채널과 Q 채널의 이득 불균형과 채널로 인해 감쇠되는 이득을 추정하기 위한 과정이 중첩되므로, 본 논문은 H/W 구현 시 이를 최적화하기 위해 IQ 불균형 보상과 AGC의 결합 기법을 제안한다.

3.1 IQ 불균형 보상과 AGC 의 결합 기법

IQ 불균형 보상과 AGC 의 결합 기법은 그림 5와 같은 구조로 이루어진다.

AGC 루프에서 각 채널의 루프 필터 구조를 그림 6으로 구성하여 I 채널에서 γ_{PL} 은 식 (14)로 추정하고 Q 채널에서 이득 불균형과 채널에 의해 감쇠되는 이득 γ_Q 는 식 (15)로 추정함에 따라, 식 (7)과 (13)

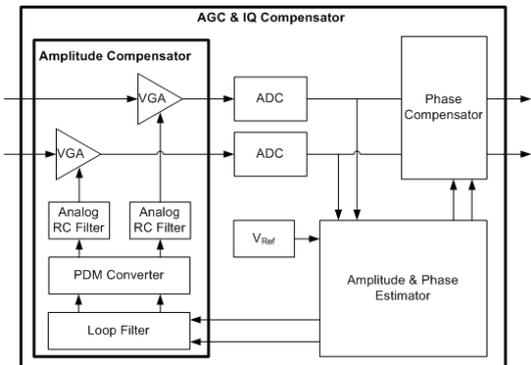


그림 5. 제안된 IQ 불균형 보상과 AGC 결합 구조
Fig. 5. Proposed joint scheme of IQ imbalance compensation and AGC.

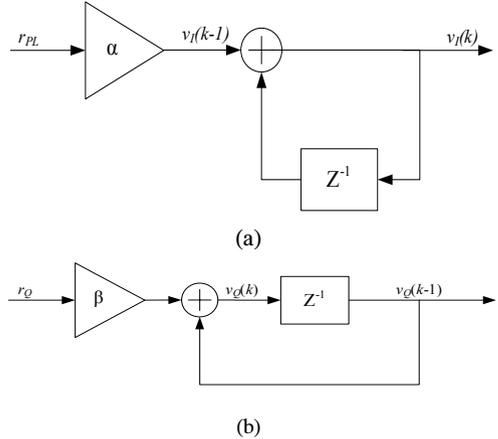


그림 6. I 와 Q 채널의 루프 필터 구조. (a) I 채널 (b) Q 채널
Fig. 6. Loop filter structure of I and Q channel. (a) I channel (b) Q channel

에서 $r_I^2[k]$, $r_Q^2[k]$ 와 $w_I^2[k]$, $w_Q^2[k]$ 의 연산을 $r_I^2[k]$ 와 $r_Q^2[k]$ 만으로 수행할 수 있다. 따라서 이득 추정 시 중복되는 연산 과정을 줄일 수 있으며, 추정된 결과 값은 VGA를 통해 보상함으로써 기존의 이득 보상을 위한 과정인 식 (9)를 필요로 하지 않는다.

$$v_I(k) = v_I(k-1) + \alpha \cdot \gamma_{PL} \tag{14}$$

where

$$\gamma_{PL} = \frac{\frac{1}{L} \sum_{k=1}^L \sqrt{r_I^2[k] + r_Q^2[k]}}{V_{ref}}$$

$$v_Q(k) = v_Q(k-1) + \beta \cdot \gamma_Q \tag{15}$$

where

$$\gamma_Q = \frac{\sum_{k=1}^L r_I^2[k]}{\sum_{k=1}^L r_Q^2[k]}$$

여기서, α 와 β 는 각각 IQ 채널의 루프 필터 이득이다. 위상 불균형에 따른 추정 방법은 식 (8), 보상 방법은 식 (11)과 (12)로 기존의 방식과 동일하다.

IV. 모의 실험을 통한 성능분석

표 1은 본 논문에서 모의실험에 사용된 변수를 나타낸 것이며, 모의실험에서는 제안한 기법의 성능과 일반적인 IQ 불균형과 AGC의 보상 회로와의 성능 비교, 분석한다.

표 1. 모의 실험 파라미터.
Table 1. Simulation parameters.

Parameters	Value
Carrier Frequency	2.3 GHz
FFT Size	1024
CP Length	128
Coding & Mod.	Uncoded 16 QAM
(Free-space) Path Loss	100 dB
SNR	30 dB
Amplitude Imbalance	5 dB
Phase Imbalance	10 °

4.1 모의 실험 결과 및 분석

그림 7은 IQ 불균형 보상과 AGC 후 출력되는 신호의 수렴 정도를 비교한 것으로, 기존 방식과 제안한 기법 모두 30 프레임에서 기준 전력으로 수렴

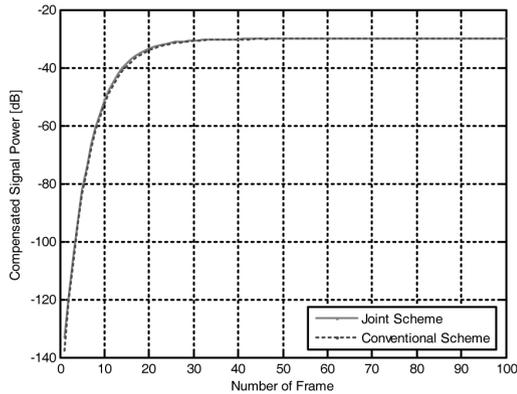


그림 7. IQ 불균형 보상 및 AGC 에 의한 출력 신호.
Fig. 7. Output signal by IQ imbalance compensation and AGC.

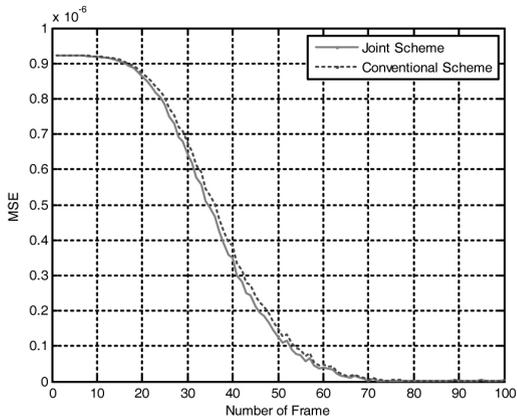


그림 8. 송신 신호 이득과 보상된 신호 이득 간의 MSE 비교.
Fig. 8. MSE between transmitted signal gain and compensated signal gain.

함을 볼 수 있다.

그림 8과 9는 송신 신호와 기존 방식 및 제안한 기법을 통해 보상된 수신 신호 간의 MSE (Mean Square Error) 로써 제안한 기법의 IQ 불균형 보상에 따른 성능 열화가 거의 없음을 알 수 있다.

하지만, 그림 9에서 제안한 기법을 통한 위상 불균형의 추정 시 이득 불균형 γ_0 의 잔류로 인해 기존 방식과의 차를 보이지만, 이득 불균형 보상의 수렴 구간인 30 프레임 이후에는 성능 차가 없음을 알 수 있다.

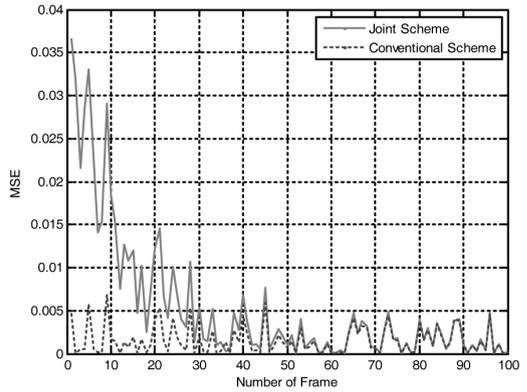


그림 9. 송신 신호 위상과 보상된 신호 위상 간의 MSE 비교.
Fig. 9. MSE between transmitted signal phase and compensated signal phase.

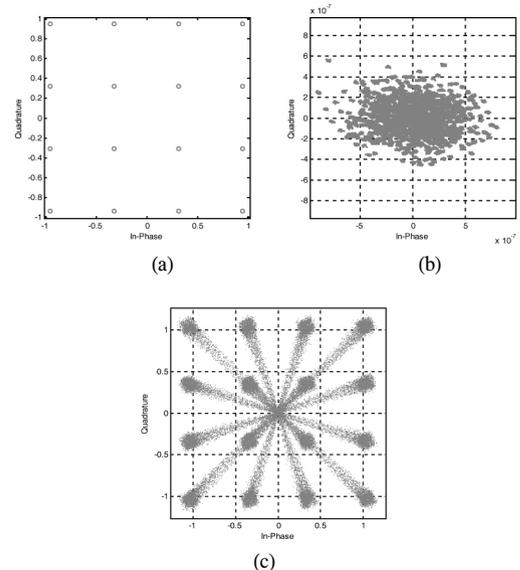


그림 10. 신호 성상도 (a) 송신 신호 (b) 수신 신호 (c) IQ 불균형 보상 및 AGC 과정의 수신 신호.
Fig. 9. Constellation point. (a) Transmitted signal (b) Received signal (c) Received signal on IQ imbalance compensation and AGC

그림 10은 송·수신 신호와 IQ 불균형 보상 및 AGC 과정의 신호에 대한 성장도로써 채널과 IQ 불균형으로 인해 왜곡된 신호에서 제안한 기법을 통해 송신 신호의 성장도로 수렴함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 OFDM 방식을 기반으로 하는 M-WiMAX 시스템에서 발생하는 I 채널과 Q 채널 간의 이득 및 위상 불균형을 보상함에 있어, 이득 불균형의 추정 및 보상이 AGC 기능과 중첩되므로 이를 AGC 루프를 통해 이득 불균형 보상을 동시에 수행하는 방법을 제안하였다. 제안한 AGC와 IQ 불균형을 보상하는 결합 구조의 성능을 모의 실험으로 기존 방식과 비교한 결과, 성능 열화가 거의 없음을 확인하였고, 이를 통해 단말기의 소형화 및 고집적화를 위한 H/W 구현 시 제안한 기법으로 대체함으로 복잡도를 감소시킬 수 있다.

참 고 문 헌

[1] M. Valkama, M. Rendors and V. Koivunen, "Advanced Methods for I/Q Imbalance Compensation in Communication Receivers," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 49, No. 10, pp. 2335-2344, Oct. 2001.

[2] A. Schuchert, R. Hasholzner, P. Antoine, "A Novel IQ Imbalance Compensation Scheme for the Reception of OFDM Signals," *IEEE Trans. Consumer Electronics*, vol. 47, pp. 313-318, August 2001.

[3] J. Tubbax et al., "Compensation of IQ imbalance and phase noise in OFDM systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, pp. 872-877, May 2005.

[4] H.Y. Tseng, W.J. Cho, T.K. Chang, S.M. Phoong, Y.P. Lin, "Compensation of IQ Imbalance and DC Offset for OFDM Transmission over Frequency Selective Channels," *IEEE ICC'08*, pp.641-645, May 2008.

[5] P. Rykaczewski, M. Valkama, and M. Renfors, "Analytical approach to I/Q imbalance in OFDM, CDMA and MC-CDMA Based systems," in *proc. IEEE Radio Wire-less Symp.*, SanDiego, CA, USA, pp. 555-5 58, Jan.2006.

[6] I. Held, O. Klein, A. Chen, and V. Ma, "Low Complexity Digital IQ Imbalance Correction in OFDM WLAN Receivers," in *proc. IEEE VTC'04*, vol. 2, pp. 1172-1176, May 2004.

[7] 강승원, 선태형, 장경희, 임인기, 어익수, "IEEE 802.16e OFDMA-TDD 시스템 digital front end of fixed-point 설계 최적화," *한국통신학회 논문지*, vol. 31, No. 7C, pp. 735-742, 2006. 07.

김 중 훈 (JongHum Kim)

준회원



2007년 8월 남서울대학교 정보통신공학과 (공학사)
2007년 9월~현재 인하대학교 정보통신대학원 석사과정
<관심분야> 4세대 이동통신 시스템, M-WiMAX 및 3GPP LTE 시스템 무선전송 규격

김 영 범 (YoungBum Kim)

준회원



2008년 2월 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 3월~현재 인하대학교 정보통신 대학원 석사과정
<관심분야> 4세대 이동통신 시스템, WiMAX 및 3GPP LTE 동기화 기술, Ad-hoc Network

장 경 희 (KyungHi Chang)

중신회원



1985년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1987년 2월 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1992년 8월 Texas A & M Univ., EE Dept. (Ph.D.)
1989년~1990년 삼성종합기술원

주임연구원

1992년~2003년 한국전자통신연구원, 이동통신연구소 무선전송방식연구팀장 (책임연구원)
2003년~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수
<관심분야> 4세대 이동통신 및 3GPP LTE 무선전송방식, WMAN 및 DMB 시스템 무선전송기술, Cognitive Radio, Cross-layer Design, Cooperative Relaying System, RFID / USN Systems