

論文94-31A-12-2

적응 디지털 전치왜곡기를 이용한 선형화된 전력증폭기의 구현 (Implementation of a Linearized Power Amplifier using a Adaptive Digital Predistorter)

柳炳烈*, 鄭倉圭**, 金南秀***, 朴漢奎****

(Byeong Yeol Ryu, Chang Kyoo Jung, Nam Soo Kim and Han Kyu Park)

要約

본 논문에서는 비선형 전력 증폭기에 의한 선형변조신호의 왜곡과 스펙트럼의 확산을 방지하기 위하여 디지털 적응전치왜곡기를 이용한 선형화된 전력증폭기를 구현하였다. 선형화 시스템은 기저대역에서 전치 왜곡기능을 수행하는 DSP56001 신호처리기와 90° 위상천이기, 전력분배/결합기, 주파수 혼합기로 이루어진 360 MHz대의 직교변복조기와 비선형 전력증폭기로 구성하였다. 전송신호는 디지털랜덤 기저대역신호를 $\pi/4$ -shift QPSK 변조하여 사용하였으며, 기저대역신호의 전력을 양자화한 값과 증폭기의 출력값을 전치왜곡기에 입력시킨 후 적응알고리즘을 이용하여 전치왜곡기의 출력을 구하였다.

전력증폭기의 선형화 실험결과 선형화된 비선형 전력증폭기의 주로브 대 부로브 비가 비선형 전력증폭기에 비해 약 15dB 향상되어 전송된 신호의 왜곡이 감소되고 인접채널로의 스펙트럼 확산이 줄어들었다.

Abstract

In this paper, the linearized power amplifier using digital adaptive predistorter is implemented in order to restrict spectral spreading and adjacent channel interference.

The linearized system is composed of a DSP56001 processor that executes predistortion in baseband, 90° phase shifter, power splitter/combiner, quadrature modulator/demodulator of 360MHz band, and nonlinear amplifier. A $\pi/4$ -shift QPSK is used to modulate digital random signals. As the quantized power of baseband signal and the output of amplifier are fed to the predistorter, and predistorting values are calculated using an adaptive algorithm.

In the experiment, a peak to sidelobe ratio of the linearized amplifier is improved up to 15dB in comparison with conventional nonlinear amplifier, which means that the distortion of transmitted signal is decreased and adjacent channel interference was reduced.

*正會員, 金星社 映像미디어 研究所 ATV Gr.
(Image & Media Lab, GoldStar)

**正會員, 延世大學校 電子工學科
(Dept. of Elec. Eng., Yonsei Univ.)

***正會員, 清州大學校 情報通信工學科

(Dept. of Computer & Comm. Eng.,
Cheongju Univ.)

****正會員, 延世大學校 電波工學科
(Dept. of Radio Eng., Yonsei Univ.)

接受日字: 1994年 3月 22日

1. 서론

이동통신의 발달과 수요증가로 인한 주파수자원의 고갈을 해결하기 위해 최근 주파수대역폭 효율이 높은 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)와 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)¹과 같은 우수한 선형 변조방식에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다.

그러나 스펙트럼 효율이 우수한 변조방식은 선형특성을 가짐에도 불구하고 대부분의 전송시스템에서 사용되는 전력 증폭기의 비선형성² 때문에 신호가 왜곡되어 시스템 성능이 저하되고 스펙트럼의 대역외(out-of-band)확산 현상이 발생하여 인접채널간의 간섭을 일으키게 된다. 따라서 전력증폭기의 비선형 특성을 보완하기 위해 선형증폭기의 설계나 증폭기의 선형영역동작, 증폭기의 선형화 등과 같은형증폭기술이 대두되고 있다.

1983년 Feher가 제안한 기저대역 선형화방식³은 전치왜곡을 가하는 LUT(Look-Up-Table) 값이 고정되어 있어 여러가지 요인에 의해 발생하는 증폭기의 이득특성 변화에 적응하지 못하는 단점이 있으며 같은 해에 Namiki가 제안한 자동제어 전치왜곡방식⁴은 비선형특성을 나타내는 차수를 증가시키에 따라 시스템이 복잡하고 일정 대역폭을 가진 제한된 변조 방식에만 사용된다. Feher의 방식을 보완하여 1987년 Nagata의 매핑 전치왜곡방식⁵은 증폭기의 이득 특성변화에는 적응하지만 기저대역 신호의 실수부와 허수부를 LUT의 번지지정에 이용하므로 LUT의 용량이 크며 수렴속도가 느린 단점을 가진다. 이를 해결하기 위해서 기저대역 신호의 전력을 LUT의 번지지정에 이용하여 기억용량을 줄이고 수렴속도도 빠른 방식이 1990년 Caver⁶에 의해 제안되었으나 하드웨어 구성이 어렵다는 단점을 지니고 있다.

따라서 본 논문에서는 증폭기의 비선형특성을 기저대역에서 보상하는 적응 전치왜곡기법을 사용하여 하드웨어 구현을 용이하게 하였으며, 전치왜곡기가 증폭기의 비선형 특성변화에 적응하도록하기 위하여 전송신호와 증폭기에 의해 왜곡된 수신신호의 순시전력을 이용하여 적응 알고리즘을 수행하였으며, 완성된 LUT로 입력신호를 전치왜곡시켜 비선형증폭기를 선형화하는 방식을 제안하였다.

II. 전력증폭기의 비선형특성

통신시스템에서의 비선형성은 전력증폭기나 전송시스템에서 사용되는 비선형기기들에 의해서 발생되며,

특히 변조된 반송파 통신시스템에 사용되는 전력증폭기에 의해 크게 영향을 받는다. 최대전력효율을 얻기 위하여 입력 back off를 작게하면 신호의 왜곡현상이 발생하고, 전력증폭기의 비선형성을 개선하기 위하여 입력 back off를 증가시키면 선형성은 유지하나 전력효율은 떨어지는 단점이 있다. 일반적으로 전력증폭기의 비선형특성은 진폭왜곡특성과 위상왜곡특성으로 구분되며, 진폭왜곡특성은 AM/AM 특성을 나타내는 함수로서 입력 back off가 클 때는 상수가 되지만 작아지면 입력전력의 함수로 나타나며, 위상왜곡특성은 증폭할 전체 다중캐리어 파형의 포락선 범위가 각 캐리어에서의 위상변위로 전환되는 AM/PM 특성이다. 따라서 포락선 비선형 특성을 가진 증폭기의 출력은 입력 신호의 진폭에 의해서만 왜곡됨을 알 수 있다.

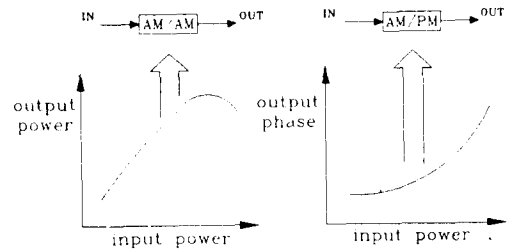


그림 1. 증폭기의 비선형특성

Fig. 1. Nonlinear characteristics of amplifier.

III. 전력증폭기의 선형화시스템 구성

1. 선형화 시스템

본 연구에서는 전력증폭기의 비선형특성을 보정하기 위하여 디지털 적응알고리즘을 적용하여 전체 변조시스템을 선형화하였다. 전력증폭기의 적응선형화를 위한 시스템의 구조는 그림 2와 같이 기저대역 변조신호 발생부, 전치왜곡부, A/D 및 D/A 변환부, 상향/하향 직교변복조부, 전력증폭부로 나눌 수 있으며 각 부분은 다음으로 구성되어 있다.

기저대역 변조신호 발생부는 랜덤데이터 생성기와 $\pi/4$ -shift QPSK 변조기로 구성되며, 전치왜곡부는 실제 증폭기의 출력을 이용하여 입력 변조신호의 전치왜곡된 신호를 발생시킬 LUT를 완성하는 부분이다. LUT의 번지지정은 기저대역 변조신호의 전력으로 하며 적응처리는 증폭기의 출력신호를 선형화시키기 위하여 적응 선형화 알고리즘을 내장하여 LUT

의 내용을 최신화시킨다.

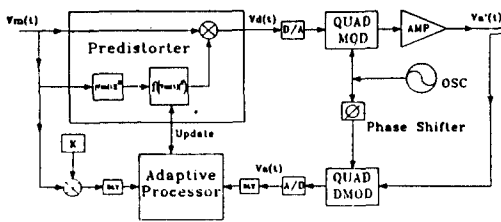


그림 2. 적응 선형화 시스템 구성도
Fig. 2. Schematic diagram of adaptive linearized system.

여기서 변조신호와 왜곡된 증폭기 출력신호를 하향 변환하였을 경우 신호간의 동기를 위해 지연장치가 필요하다. A/D 및 D/A 변환부는 전치왜곡부를 거친 디지털신호를 아날로그양으로 바꾸는 D/A 변환부와 증폭기의 출력을 하향직교복조하여 적응 전치왜곡기에 디지털 신호를 입력시키는 A/D 변환부로 구분된다. 상향/하향 직교 변복조부는 기저대역신호를 전력증폭기의 송신주파수 대역까지 상승/강하시키는 부분이며, 전력 증폭기를 통과하여 하향 직교복조부로 되먹임되는 신호와 송신신호와 위상차를 보정해주는 위상천이기가 있다. 전력증폭기를 메모리가 없는 비선형 디바이스로 모델링하면 k 번째 입력 Vd와 출력 Va는 다음과 같이 관련지을 수 있다.¹⁶⁾

$$V_a(k) = G(X_d(k))V_d(k), \quad X_d = |V_d|^2 \quad (1)$$

여기서 G(Xd)는 증폭기의 복소이득함수로서 AM/AM, AM/PM 특성을 가지고 있으며 특히 입력의 순시전력에만 좌우되고, 입력의 위상에는 영향을 받지 않는다. 전치왜곡기의 입, 출력신호 Vm, Vd는

$$V_d(k) = f(X_m(k)) V_m(k), \quad X_m = |V_m|^2 \quad (2)$$

이고, 입력신호의 전력이 양자화되어 LUT의 주소가 되고 f(Xm)는 그 주소에 해당하는 값이 된다이 값은 입력신호와 곱해져서 출력신호의 이득과 위상이 입력신호의 전력과 관계없이 일정하도록 하는 전치왜곡값이다. 복소이득상수가 K인 선형증폭기를 가정하면 선형출력값 VL은

$$V_L(k) = K V_m(k) \quad (3)$$

이고, 전력증폭기를 선형화하려면 비선형증폭기의 출력값 Va는 VL에 수렴하여야 한다. 여기서 K는 f(Xm)와 입력신호의 곱의 출력값이 수렴할 증폭이득과 위상 값이다.

2. 기저대역 전치왜곡기의 구현

본 논문에서는 전력증폭기의 비선형특성을 보정하는 LUT 함수 f(Xm(k))를 구하기 위해 적응선형화 알고리즘을 사용하였다. e(f)는 실제 증폭기의 출력과 목표로 하는 선형증폭기의 출력과의 오류이다.

$$e(f) = V_a(f) - K V_m \quad (4)$$

오차값은 LUT의 f(Xm)에 의해 결정되며, f는 e(f) = 0 하는 근이 된다.

할선법에 의한 LUT 내용의 최신화는 식 5를 따른다.

$$f_i(k+1) = \frac{f_i(k-1)e(f_i(k)) - f_i(k)e(f_i(k-1))}{e(f_i(k)) - e(f_i(k-1))} \quad (5)$$

여기서 fi(k)는 i번째 LUT 내용이 k번째 반복되었을 때의 값이다. 또한 입력신호의 전력을 양자화하여 i번째의 오차를 저장하는 오류표를 구성하여, 메모리 용량은 증가하나 프로그램의 간편함과 하드웨어 구성을 용이하게 하였다. 따라서 변조신호 Vm이 i번째 양자화 스텝에 해당되는 값일 때마다 반복과정을 통해 LUT의 내용과 오류표값이 최신화된다.

본 연구에서 사용한 적응전치왜곡기는 32KHz의 출력 샘플링율을 갖는 Arial사의 신호처리 보드로서 모토롤러 DSP56001 처리기, 2채널의 16비트 A/D 및 D/A 변환기, 입력신호와 출력신호를 저장하기 위한 192 Kword×2 의 데이터 메모리와 디지털 적응 알고리즘과 데이터 신호처리 프로그램을 저장할 192 Kword의 프로그램 메모리로 구성되어 있다. 메모리 매핑의 경우, 기저대역 신호와 증폭기 출력신호는 외부메모리에 저장하고 실제 선형화에 사용되는 변수 즉

LUT이전값(f(k-1)), 현재값(f(k)), 그리고 오차의 이전값(e(k-1))들은 내부메모리에 저장하여 처리속도를 빠르게 하였다.

IV. 전력증폭기의 적응 선형화 실험 및 결과고찰

1. 직교 변복조기 설계 및 제작

직교 변조기는 기저대역 신호를 할당된 RF로 변조하여 전력증폭기에 입력시키는 기능을 하며, 복조기

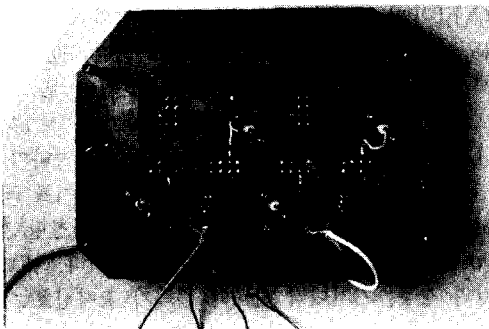
는 증폭기의 비선형특성을 보상하기 위해 증폭기 출력의 일부를 기저대역으로 되먹임시키는 복조과정에 사용된다. 직교 변복조기를 구성하는 90° 위상천이기는 Mini-Circuits사의 PSCQ-2-4.0, 주파수혼합기는 SRA-1, 전력분배/결합기는 MSC-2-1 을 사용하였으며, 그림 3과 같이 국부발진기에서 복소변복조기까지의 마이크로스트립라인 경로는 위상지연을 일정하게 하기 위해서 각기 동일한 경로길이를 갖도록 제작하였다. 그러나 이 경우 전력 증폭기를 거쳐 되먹임되는 과정에서 신호의 지연으로인한 위상차로 복조가 불가능하므로 본 논문에서는 마이크로스트립라인으로 변복조 과정에서 발생하는 위상차를 보상하였다.

이2. 사용 주파수대역이 10~1000 MHz, 최대전력이 3 dBm이다. Mixer의 국부발진기는 Wiltron사의 programmable sweep generator를 사용하여 중심 주파수가 360 MHz, 전력은 8 dBm으로 조절하였고 스펙트럼 측정을 위해 10-40 GHz까지 측정 가능한 HP사의 spectrum analyzer를 사용하였다.

선형화 시스템에서 발생한 직류전압 왜생(DC offset)은 전송할 신호를 보내기 전에 크기가 0 volt 인 직류전압 측정용 테스트 신호를 보내어 소프트웨어적으로 보정하였다. 입력신호는 1000개의 디지털 랜덤신호를 각 비트당 32개 오버샘플링을 수행한 후 감쇄율이 0.5인 raisedcosine 필터 파형 형성기를 통하여 만든 후 이 데이터를 DSP56001 보드의 외부 메모리에 저장하였다.



(a) 앞면



(b) 뒷면

그림 3. 구현된 선형화 시스템의 아날로그부
 Fig. 3. Analog part of implimented linearized system.

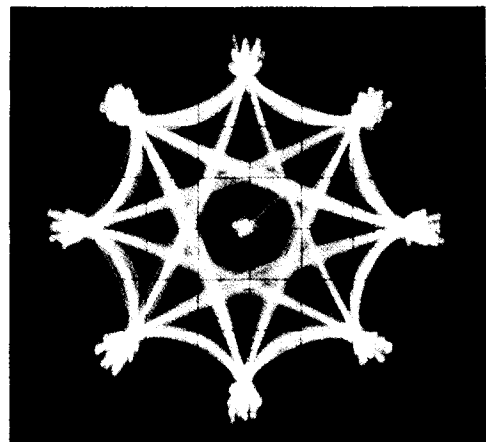


그림 4. 기저대역 신호의 성상도
 Fig. 4. Constellation of baseband signal.

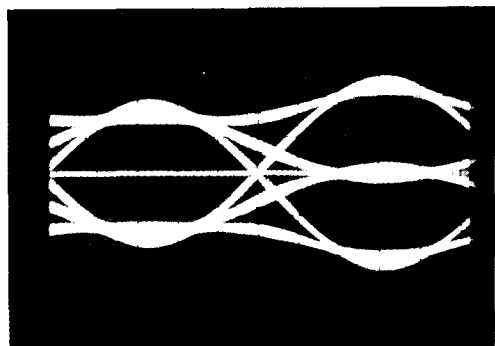


그림 5. 기저대역 신호의 눈모양도 (I 채널)
 Fig. 5. Eye pattern of baseband signal. (I channel)

2. 적응선형화 시스템 실험 및 결과고찰
 사용한 비선형 증폭기는 Mini-Circuits 사의 ZFL-1000G 전력증폭기로서 이득이 27dB, VSWR

그림 4는 기저대역 신호의 정상도로서 기저대역 신호의 최대 출력전압이 0.6 volt이며 그림 5는 동상채널의 눈모양도를 나타내었다. 그림 6은 비선형 전력 증폭기를 거친 다음의 정상도로서 증폭기의 AM/AM, AM/PM 특성에 의해 상당히 왜곡되었음을 알 수 있으며 이를 보정하여 전치왜곡기가 있는 비선형 전력증폭기를 거친 후의 신호의 정상도를 그림 7에 나타내었다. 적응 선형화 알고리즘상에서 정한 복소이득상수 K 값에 수렴할 정도로 충분히 많은 입력 데이터가 통과한 뒤이기 때문에 전송하고자 하

는 원래 신호의 정상도와 유사함을 알 수 있다.

그림 8, 그림 9, 그림 10은 각각 비선형 전력증폭기를 거치기 전, 거친 후, 전치왜곡기를 이용하여 선형화된 비선형 전력증폭기를 거친 후의 전력밀도 스펙트럼이다. 중심주파수가 360 MHz에서 주로브의 대역폭을 약 6 KHz일때 비선형 증폭기의 출력 스펙트럼과 전치왜곡기가 있는 전력증폭기의 출력 스펙트럼을 비교한 결과 선형화된 증폭기가 주로브 대 부로브 비(Peak to sidelobe ratio)가 약 15 dB 향상되었음을 알 수 있다.

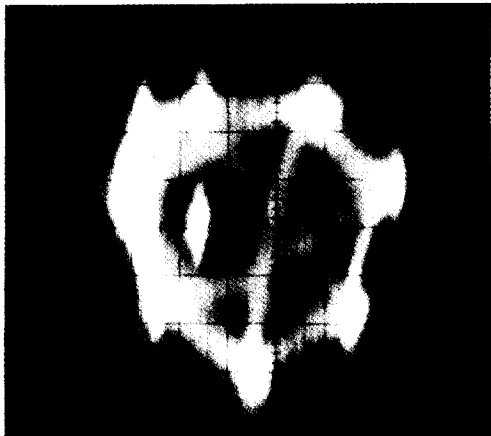


그림 6. 비선형증폭기의 출력신호 정상도
Fig. 6. Constellation of nonlinear amplifier's output.

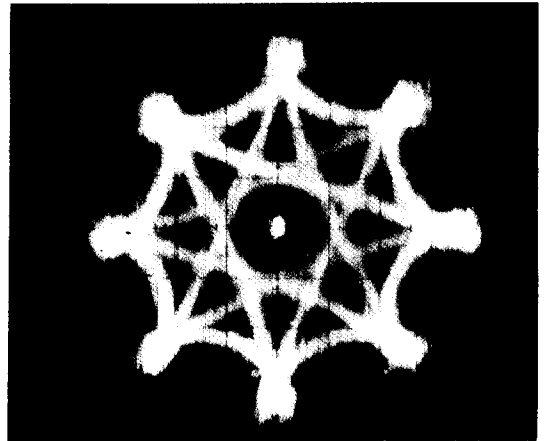


그림 7. 선형화된 비선형증폭기의 출력신호 정상도
Fig. 7. Constellation of output signal of linearized nonlinear amplifier.

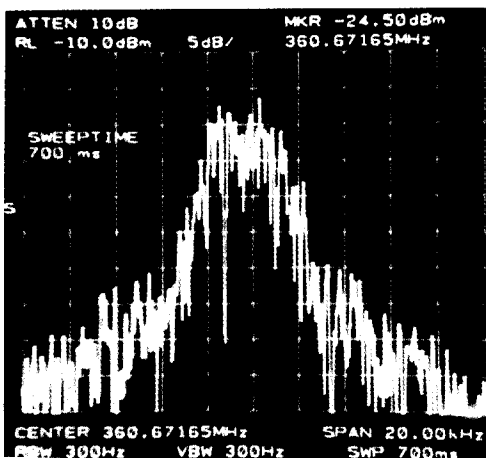


그림 8. 비선형증폭기 입력단신호의 전력밀도 스펙트럼
Fig. 8. Power spectral density of input signal of nonlinear amplifier.

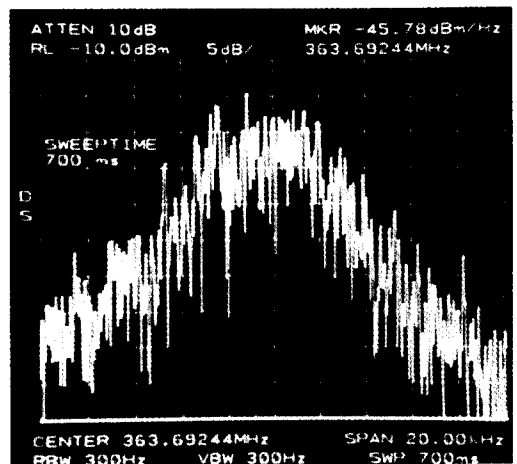


그림 9. 비선형증폭기를 통과한 후의 전력밀도 스펙트럼
Fig. 9. Power spectral density of output signal of nonlinear amplifier.

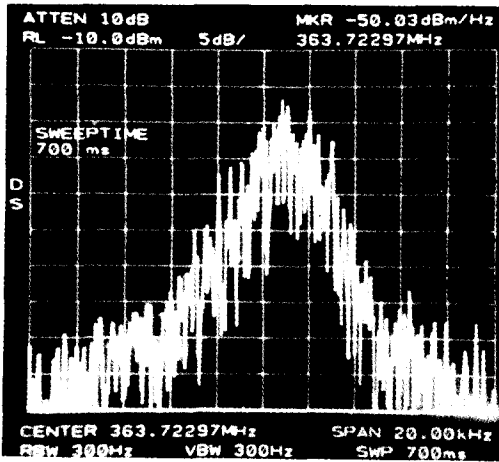


그림 10. 선형화된 비선형증폭기를 통과한 후의 전력밀도 스펙트럼

Fig. 10. Power spectral density of output signal of linearized nonlinear amplifier.

V. 결론

본 논문에서는 비선형 특성을 가진 전력증폭기의 대역의 확산 현상을 보정하기 위하여 디지털 적응 전치 왜곡기를 이용하여 선형화된 전력증폭기를 구현하였다. 전력증폭기의 선형화 시스템은 기저대역에서 전치 왜곡기능을 수행하는 DSP 56001 보드와 90° 위상전 이기, 전력분배/결합기, 혼합기로 구성된 360 MHz대의 직교변복조기와 이득조절이 가능한 비선형 전력증폭기로 구성하였다. 입력신호는 1,000개의 랜덤신호를 $\pi/4$ -shift QPSK 변조한 후 감쇄율이 0.5 인 raised cosine 파형형성필터를 통과시켜 만들었다.

실험결과, 전력증폭기를 선형화한 경우, 증폭기를 거친 후의 신호의 정상도는 입력데이터 샘플이 증가할수록 송신한 신호의 정상도에 수렴하였다. 또한 전력밀도 스펙트럼의 주로브 대 부로브 비의 경우 비선형 증폭기보다 전치왜곡기가 있는 비선형 증폭기가 약 15 dB로 향상되어 인접채널간의 간섭을 줄일 수 있고, 수신단에서 복조할 경우 비트에러율을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

본 시스템은 위성통신의 고출력 증폭기의 선형화와 이동통신 기지국 시스템의 전력증폭기의 선형화 등

무선통신 시스템에서 사용되는 디바이스의 비선형특성을 보정하는 시스템에 응용할 수 있을 것이다.

參考文獻

- [1] Kamilo Feher, Digital modulation techniques in an interference environment, Don white consultants, Inc., 1977.
- [2] R. Blum, M.C. Jeruchim, "Modeling nonlinear amplifiers for communication simulation," IEEE VTC, pp.1468-1492, 1989.
- [3] Henri Girard and Kamilo Feher, "A new baseband linearizer for more efficient utilization of earth station amplifiers used for QPSK transmission," *IEEE Journal on Selected Areas Commun.*, Vol. SAC-1 No. 1, January, 1983.
- [4] Junji Namiki, "An automatically controlled predistorter for multilevel quadrature amplitude modulation," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. COM-31, No.5, pp.707-712, May, 1983.
- [5] Yoshihiko Akaiwa, Yoshinori Nagata, "Highly efficient digital mobile communications with a linear method," *IEEE Journal of Selected Areas Commun.*, Vol. SAC-5, No. 5 pp.890-895, June, 1987.
- [6] James K. Cavers, "Amplifier linearization using a digital predistorter with fast adaption and low memory requirements," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, Vol. 39, No. VT-4, pp.374-382, Nov., 1990.
- [7] Shawn P. Stapleton, James K. Cavers, "An adaptive predistorter for a power amplifier based on adjacent channel emission," *IEEE Trans. on Vehicular Tech.*, Vol. VT-41, No.1, pp.49-57, Feb., 1992.

著者紹介



柳炳烈(準會員)

1967年 5月 15日生. 1991年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1993年 8月 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1993年 9月 ~ 현재 금성사 영상 미디어연구소 ATV Gr. 재직중.

주관심 분야는 RF 변복조, RF 신호처리 등임.



鄭倉圭(正會員)

1965年 6月 22日生. 1988年 2月 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1990年 8月 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사)

1991年 3月 ~ 현재 연세대학교 대학원 전자공학과 박사과정 재학중. 주관심 분야는 RF 변복조, 직접변환수신 시스템, RF 신호처리 등임.

金南秀(正會員)

1957年 10月 16日生. 1981年 2月 광운대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1983年 2月 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사). 1991年 3月 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1994年 3月 - 현재 청주대학교 정보통신공학과 조교수. 주관심 분야는 디지털 이동통신 시스템 설계, RF 신호처리 등임.

朴漢奎(正會員) 第 31 卷 A編 第 9 號 參照

현재 연세대학교 전과공학과 교수