

# 피드포워드 방식을 이용한 송신 배열 안테나의 비선형 보상과 경로 보정의 결합 기술

정회원 김민\*, 종신회원 은창수\*\*

## A Technique Combining the Nonlinear Compensation and the Path Calibration by Using the Feedforward Scheme in Transmitting Array Antenna Systems

Min Kim\* *Regular Member*, Changsoo Eun\*\*° *Lifelong Member*

### 요 약

본 논문에서는 피드포워드 방식을 이용하여 전력 증폭기의 비선형성 보상과 스마트 안테나 시스템의 경로 결합 보정을 결합하는 새로운 기술을 제안하였다. 배열 안테나의 각각의 경로들이 동일한 특성을 갖도록 하기 위한 보상과 보정을 위해 선형 식에 3차 항을 추가한 다항식과 피드포워드 방식을 사용하였다. 이 방식은 원래의 기저대역 신호를 변형하지 않으므로, 시스템의 기저대역 부와는 독립적인 스마트 안테나 시스템에 적용할 수 있다. 컴퓨터 모의실험을 통하여, 단 하나의 3차 항을 추가함으로써 전력 증폭기의 비선형 효과를 효율적으로 보상하고, 배열 안테나의 각 경로의 선형 결합들 역시 부차적으로 보정할 수 있다.

**Key Words** : Smart antenna, array antenna system, feedforward, compensation, calibration

### ABSTRACT

We propose a new scheme combining the compensation of HPA nonlinearity and the calibration of the path imperfections in the downlink OFDM smart antenna systems. We use a two term third-order polynomial (without second-order term) and the feedforward method for compensation and calibration to make each path of the antenna array have equal characteristics. Since the proposed scheme does not alter the base-band signal, it can be applied to the smart antenna system independently of the base-band signal processing section. The result of computer simulations shows that, with the addition of only one third-order term, the adverse nonlinear effects can be effectively compensated, and the those of linear imperfections can be calibrated as well.

### I. 서 론

스마트 안테나 시스템은 여러 개의 안테나 배열을 사용하고, 각각의 안테나에 입력되는 신호들의

위상을 조절하여 원하는 방향으로 빔과 널(null)을 생성하여 송수신하는 것이다. 하지만 하드웨어의 편차 때문에 진폭과 위상에 약간씩의 오차라도 발생한다면 스마트 안테나의 빔 패턴은 처음의 의도와

\* 충남대학교 전자전파정보통신공학과 이동통신 연구실(niceant@gmail.com)

\*\* 충남대학교 전자전파정보통신공학과, 교수(eun@ieee.org), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2012-04-164, 접수일자 : 2012년 4월 2일, 최종논문접수일자 : 2012년 4월 23일

다르게 형성되어 보정이 요구된다. 그리고 효율을 높이기 위해 증폭기를 포화영역까지 사용하게 되면 문제가 더욱 복잡해진다. 즉, 빔 형성도 제대로 되지 않을 뿐 아니라 신호의 품질도 심각하게 저하된다. 현재까지 여러 가지 보정(calibration) 기술들이 발표되었으나 완벽한 선형 증폭기를 가정하므로 배열 안테나의 선형 결합만 보정하고<sup>1,2)</sup>, 증폭기의 비선형성은 별도의 보상 시스템을 이용하여 문제를 해결해야만 했다<sup>3,4)</sup>. 만약 보정 기술을 약간 수정하여 비선형 보상(compensation)이 함께 이루어진다면, 효율적인 스마트 안테나를 구현할 수 있을 것이다.

본 논문에서는 비선형성 보상과 선형 결합의 보정을 결합하는 새로운 방식을 제안한다. 보상과 보정을 동시에 수행하기 위해 선형 보정식에 비선형 항인 3차 항 하나를 추가한다. 보상과 보정 알고리즘으로는 피드포워드 방식을 사용하였다. 이 방식은 아날로그 피드포워드 방식을 디지털 방식으로 응용한 것으로 구조가 간단하고, 아날로그 부품들의 특성 변화에 적응적으로 대처할 수 있는 장점이 있다. 그리고 기저대역 신호를 변형하지 않으므로 통신 시스템의 기저대역 부위는 독립적으로 스마트 안테나 시스템의 RF 부에 적용할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성한다. II장에서는 배열 안테나 시스템에서 발생할 수 있는 경로 결함에 대해 살펴본다. III장에서는 디지털 피드포워드 방식에 대해 설명한다. IV장에서는 제안한 방법에 대해 성능을 분석하고 타당성을 살펴보고, VI장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 배열 안테나 시스템의 경로 결함

스마트 안테나 시스템에서 발생할 수 있는 결함들은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 비선형 결합과 선형 결합이 그것인데, 비선형 결합은 주파수 혼합이나 전력 증폭기와 같은 비선형 장치에 의해 발생하는 것으로 주로 신호의 PAPR이 클 경우 전력 증폭기의 비선형성이 문제가 된다. 선형 결합으로는 인접한 경로들 사이에서 발생하는 상호 결합, 안테나에 각각의 신호를 연결하기 위한 케이블이나 전송선로의 길이 차, 부품 오차와 온도, 습도, 진동의 변화 등에 의한 채널 불균형 등이 있다<sup>5)</sup>. 본 논문에서는 송신 시스템에 대해서만 살펴본다. 수신 시스템에서는 증폭기의 비선형성이 이 논문에서 논하는 형태로 영향을 미치는 것이 아니기 때문이다.

잡음을 무시하면, 선형 결합들은 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>5)</sup>.

$$\mathbf{x}[n] = \mathbf{Y}_0 \mathbf{LGA}(\theta) \mathbf{s}[n] \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{x}[n]$ 은 경로에 흐르는 신호 전류 성분의  $M \times 1$  스냅샷(snapshot) 벡터 이고,  $\mathbf{Y}_0$ 는 정규화된  $M \times M$  어드미턴스 행렬,  $\mathbf{L}$ 은 케이블 또는 전송선로의 길이 차에 의한 위상 오차를 나타내는  $M \times M$  행렬,  $\mathbf{G}$ 는 경로 불균형을 나타내는  $M \times M$  행렬,  $\mathbf{A}(\theta)$ 는  $M \times L$  방향(steering) 행렬,  $\mathbf{s}[n]$ 는  $L \times 1$  소스(source) 전압 벡터, 그리고  $M$ 은 안테나 개수를 나타낸다.

지금까지 발표된 대부분의 보정 방법들은 선형 결합만을 대상으로 하였다<sup>11,12)</sup>. 이러한 방법들을 비선형 및 선형 결합이 동시에 존재하는 배열 안테나에 적용할 경우, 비선형성은 보상하지 못하고 선형 결합만 보정하게 된다. 그와 같은 경우, 비선형성에 의해 어떤 효과가 나타나는지 알아보기 위해, 배열 안테나의 모든 경로에 동일한 비선형성이 존재할 경우에 대해 살펴보기로 하자. 모의실험을 위해, HPA로써 TWT (traveling wave tube) 증폭기 모델을 사용하였다. TWT 증폭기의 출력 신호의 진폭  $A$ 와 위상  $\phi$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다<sup>6)</sup>.

$$A[r[n]] = \frac{\alpha_a r[n]}{1 + \beta_a r^2[n]} \quad (2)$$

$$\phi[r[n]] = \frac{\alpha_p r^2[n]}{1 + \beta_p r^2[n]} \quad (3)$$

실험에 사용된 파라미터는  $\alpha_a = 2$ ,  $\beta_a = 1$ ,  $\alpha_p = 2.53$ ,  $\beta_p = 2.82$ 이고,  $r[n]$ 는 정규화된 입력을 나타낸다.

그림 1은 모든 경로에 선형 결합은 존재하지 않고 식 (2)와 (3)과 같은 비선형성이 모든 경로에 동일하게 존재할 경우의 신호 성장도를 나타낸 것이다. 원하는 빔의 방향은  $30^\circ$ 라고 가정하였다. 그림 1에서 비선형에 의해 성장도가 회전하고 흩어지는 것을 볼 수 있다. 그림 2는 빔 패턴을 보인 것이다. 실선은 이상적인 경우, 점선은 모든 경로에 동일한 비선형성이 존재하는 경우를 나타낸 것이다. 주 빔은 원하는 방향으로 형성되지 않았고, 두 번째 빔 역시 잘못된 방향으로 형성된 것을 볼 수 있다. 위

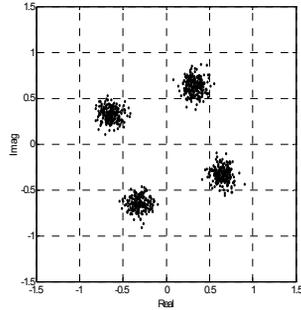


Fig. 1. QPSK signal constellation of the array antenna system with the identical nonlinearity in all the paths.

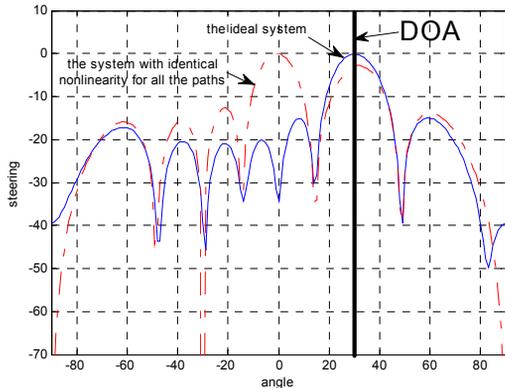


Fig. 2. Comparison of beam patterns of the ideal system and the system with the identical nonlinearity in all the paths.

결과들은 비선형이 존재할 경우, 기존의 보정을 통해서 충분한 효과를 기대할 수 없으며, 비선형 보상을 통해 성능 향상의 여지가 있음을 보여준다. 뿐만 아니라 각각의 경로에 서로 다른 비선형이 존재할 경우, 그 효과는 더욱 크게 나타날 것임을 예상할 수 있다. 본 논문에서는 비선형성뿐만 아니라 선형 결합에 의해 발생할 수 있는 효과까지도 함께 보상하기 위해 기존의 보정식에 단 하나의 비선형 항을 추가하고 피드포워드 방식을 이용하여 비선형성 보상과 보정을 동시에 수행하는 방법을 제안한다.

### III. 피드포워드 방식<sup>[7]</sup>

그림 3은 배열 안테나의 각각의 신호 경로를 나타낸 것이다. 신호는 D/A 변환기를 거쳐 아날로그 신호로 변환되고, 그때 주파수 상향 변환에 의해 RF 신호로 변환된다. RF 신호는 전력 증폭기와 안테나의 의해 전송된다. 보상과 보정은 기저대역에서 처리되므로 보상과 보정을 위한 신호는 D/A

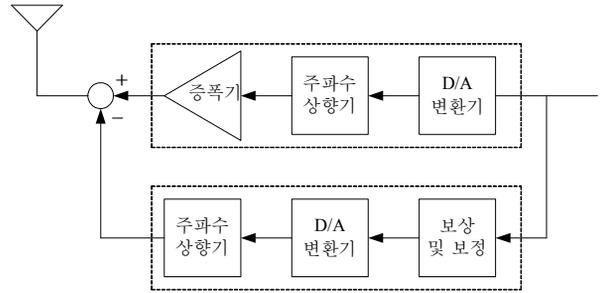


Fig. 3. Compensation and calibration using the feedforward scheme for each signal path and HPA in downlink.

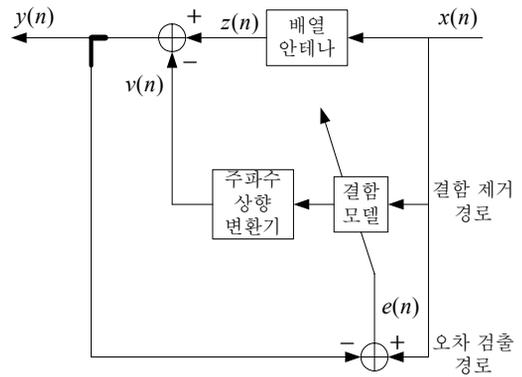


Fig. 4. The block diagram of the digital feedforward scheme using the nonlinear and linear imperfection model.

변환기를 거쳐 주파수 상향 변환되고, 출력 신호에서 빼줌으로써 보상과 보정이 완성된다. 그림 4는 비선형 및 선형 결합 모델을 이용한 디지털 피드포워드 방식을 블록도로 나타낸 것이다. 입력 신호  $x[n]$ 은 배열 안테나의 각각의 경로와 오차 신호  $e[n]$ 을 검출하기 위한 오차 검출 경로, 그리고 비선형 및 선형 결합을 모델링하고 그 효과를 제거하기 위한 결합 제거 경로로 나누어 입력된다. 결합에 의한 왜곡 성분이 포함되어 있는 출력 신호  $y[n]$ 은 오차 검출 경로로 피드백되어, 입력 신호와 비교되어 오차 신호를 검출하는 데 사용된다. 검출된 오차 신호는 결합 모델의 계수를 추정하는 데 이용되고, 결합 모델은 추정된 결합 신호  $v[n]$ 을 출력한다. 추정된 결합 신호  $v[n]$ 을 출력 신호에서 빼줌으로써 보상과 보정이 이루어진다.

오차 신호  $e[n]$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$e[n] = x[n] - y[n] = x[n] - (z[n] - v[n]) \quad (7)$$

여기서  $y[n] = z[n] - v[n]$ 은 결합의 효과가 제거된 신호이며, 오차 신호가 0에 가까울수록 최종 출

력 신호  $y[n]$ 은 입력 신호  $x[n]$ 에 근접한다.

본 논문에서는 HPA 비선형성의 보상과 선형 결합의 보정을 함께 수행하기 위해 단 하나의 3차 항만을 추가한다. 1차 항과 3차 항의 계수 추정을 위해 수렴 속도가 빠른 VSS-LMS 알고리즘<sup>[8][9]</sup>을 사용한다. 비선형 및 선형 결합을 모델링하는 3차 다항식은 다음과 같이 표현된다.

$$p[n] = h_1x[n] + h_3x[n]|x[n]|^2. \quad (8)$$

계수 갱신은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{h}[n+1] = \mathbf{h}[n] + \mu[n]e[n]\mathbf{x}[n] \quad (9)$$

여기서  $\mathbf{h}$ 는 3차 다항식의 계수를 나타내는 벡터이고, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{h} = [h_1, h_3] \quad (10)$$

그리고  $\mathbf{x}[n]$ 은 입력 신호와 그의 3차 항으로 구성된 벡터이고, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{x}[n] = [x[n], x[n]|x[n]|^2] \quad (11)$$

또,  $\mu[n]$ 은 스텝의 크기를 나타내고 다음과 같이 정의된다.

$$\mu[n+1] = \alpha\mu[n] + \gamma e^2[n] \quad (12)$$

여기서  $\alpha, \gamma$ 는 갱신 량을 결정하기 위한 상수이다. 본 논문에서는 적응적 알고리즘을 사용하기 때문에, 주 경로와 피드포워드 경로 간에 발생할 수 있는 불균형 요소들은 오류 신호로 검출되어 반영되므로 적응적으로 보상 및 보정할 수 있다.

#### IV. 모의실험

본 장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안한 방식의 성능을 살펴본다. 입력 신호로는 모바일 WiMax 신호를 사용하였다. 모바일 WiMax 신호의 대역폭은 8.75 MHz, 샘플링 주파수는 10 MHz, 반송파 간격은 9.76 KHz, 그리고 FFT 사이즈는 1024이다. 표 1은 모의실험에 사용된 시스템 파라미터들을 나타낸 것이다. 모의실험은 반 파장 간격으로 떨어져 있는, 8 개로 구성된 중앙 급전식 다이폴 배열 안테나를 가정하였다.

임피던스 정합을 위해 부하 임피던스 값은 안테나 임피던스의 공액 복소수로 설정하였다. 임피던스 부정합이 발생할 경우, 반사파에 의한 정재파가 발생한다. 반사파 신호는 이동통신의 다중 경로 신호와 유사하고 이는 신호처리의 관점에서는 메모리 효과로 볼 수 있다. 메모리 효과가 있는 경우 볼테라 시리즈 모델, 해머스타인 모델, 그리고 위너 모델 등을 이용하여 보상 및 보정할 수 있는데, 메모리 효과가 있는 경우는 다음 연구에 반영할 예정이다.

Table 1. Array antenna system parameters used in the simulations.

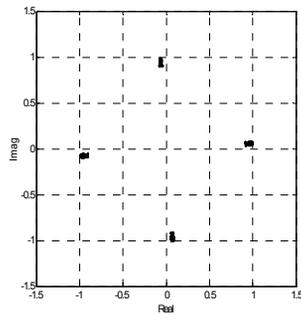
파라미터	값
배열 구조	동일한 선형 배열 안테나
상호 안테나 간격	1/2 $\lambda$
중심 주파수	2.3 GHz
안테나 갯수	8
DOA	30°

표 2는 선형 결합에 대해 나타낸 것이다<sup>[5]</sup>. 첫 번째 열은 각각의 경로를 번호로 표시한 것이고, 두 번째 열은 각 경로 사이의 상호 임피던스를 나타낸 것이다. 세 번째 열은  $\lambda$ 의 10% 이내에서 랜덤하게 분포된 케이블 길이 차에 의한 위상 변화를 나타낸 것이다. 네 번째 열은 10% 이내에서 랜덤하게 분포된 각각의 신호 경로의 이득과 위상을 나타낸 것이다.

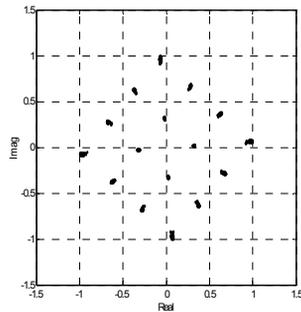
Table 2. The linear imperfections used in the simulations.

경로	$Z_{MC}(\Omega)$	케이블 경로 차	이득과 위상 변화
1	74 + 42i	$e^{i1.3855}$	1
2	-12 + 29i	$e^{i1.4236}$	1.0217 $e^{i0.1241}$
3	4 + 18i	$e^{i1.4011}$	0.9432 $e^{-i0.3447}$
4	-3 - 11i	$e^{i1.5014}$	1.0546 $e^{-i0.2136}$
5	1 + 10i	$e^{i1.3907}$	1.0641 $e^{i0.4392}$
6	-1 - 7i	$e^{i1.4533}$	0.9279 $e^{-i0.3892}$
7	0	$e^{i1.4849}$	1.0783 $e^{i0.5583}$
8	0	$e^{i1.4318}$	0.9594 $e^{i0.2614}$

다음은 증폭기는 모두 동일하고 선형적이라고 가정하고, 선형 결함을 보정하지 않았을 경우 이상적인 시스템과 그 정상도와 빔 패턴을 비교해본다. 그림 5는 QPSK와 16-QAM 신호의 정상도를 나타낸 것으로, 선형 결함에 의해 위상 회전이 발생하는 것을 보여준다. 그림 6은 빔 패턴을 나타낸 것이다. 선형 결함을 가진 시스템의 빔 패턴을 나타내는 점선은 주엽 뿐만 아니라 부엽과 널 역시 원하는 방향으로 형성된 것을 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 5. Signal constellations of the antenna array system with linear imperfections.

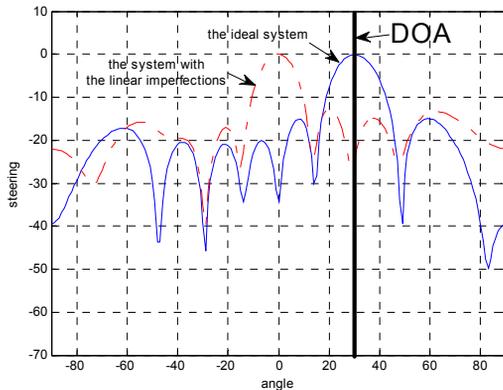


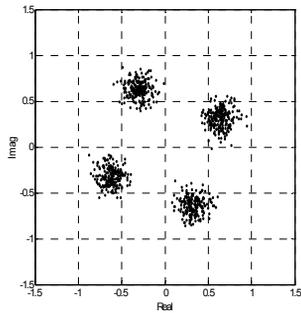
Fig. 6. Comparison of beam patterns of the ideal system and the system with linear imperfections.

HPA의 비선형성들은 성능과 신호 품질을 더욱 떨어뜨린다. 다음은 HPA의 비선형성과 선형 결함이 함께 존재 할 경우에 대해 살펴보자. 표 3은 모의실험에 사용된 식 (2), (3)의 파라미터 값들이다. 그림 7은 QPSK와 16-QAM 신호의 정상도를 나타낸 것이고, 비선형 및 선형 결함들에 의해 위상 회전뿐만 아니라 정상도까지 흩어지는 것을 보여준다. 그림 8은 배열 안테나의 빔 패턴을 나타낸 것이다. 비선형 및 선형 결함이 함께 존재하는 시스템의 빔 패턴을 나타내는 점선은 빔과 널의 위치가 원하는 방향과는 완전히 다른 방향으로 형성된 것을 보여준다.

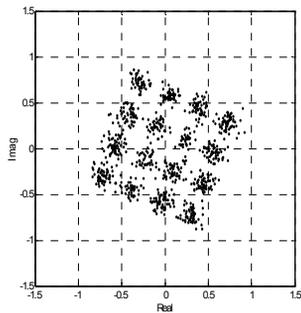
Table 3. The nonlinear coefficients of the HPA used in the simulations.

Amplifier #	HPA의 비선형 계수
1	$\alpha_a = 2, \beta_a = 1, \alpha_p = 2.53, \beta_p = 2.82$
2	$\alpha_a = 1.9, \beta_a = 0.9, \alpha_p = 2.3, \beta_p = 2.7$
3	$\alpha_a = 2, \beta_a = 1.1, \alpha_p = 2.5, \beta_p = 2.9$
4	$\alpha_a = 2, \beta_a = 1.1, \alpha_p = 2.4, \beta_p = 2.8$
5	$\alpha_a = 2.1, \beta_a = 1.1, \alpha_p = 2.3, \beta_p = 2.7$
6	$\alpha_a = 2, \beta_a = 0.9, \alpha_p = 2.4, \beta_p = 2.5$
7	$\alpha_a = 1.8, \beta_a = 0.9, \alpha_p = 2.6, \beta_p = 2.5$
8	$\alpha_a = 2.2, \beta_a = 1, \alpha_p = 2.7, \beta_p = 2.8$

다음은 비선형의 효과에 대해 알아보기 위해, 단 하나의 선형 항에 의해 보상과 보정된 경우에 대해 살펴본다. 그림 9는 QPSK 신호와 16-QAM 신호의 정상도를 나타낸 것이고, 선형 항에 의해 위상 회전과 정상도 불일치를 보정한 것을 보여준다. QPSK 신호의 경우, NMSE (normalized mean-squared error)가 약 -1 dB에서 약 -30 dB로 향상되었다. 16-QAM 신호의 경우, NMSE가 약 -1 dB에서 약 -30 dB로 향상되었다. 그림 10은 배열 안테나의 빔 패턴을 나타낸 것이다. 그림에서 선형 보정으로도 정상도는 어느 정도 보정이 되나 빔과 널들의 방향은 보정이 되지 않음을 보여준다.

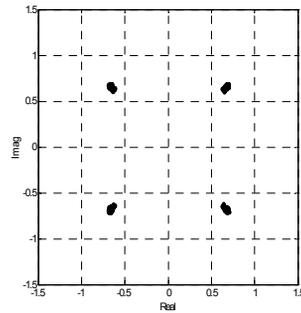


(a)

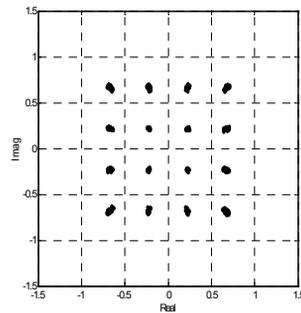


(b)

Fig. 7. Signal constellations of the antenna array system with both the nonlinear and the linear imperfections.



(a)



(b)

Fig. 9. Signal constellations after the calibration using a linear term only.

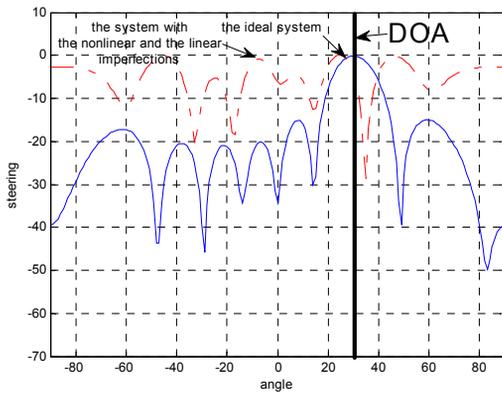


Fig. 8. Comparison of beam patterns of the ideal system and the system with both the nonlinear and the linear imperfections.

선형 항만으로는 비선형 및 선형 결함을 함께 보상과 보정을 하지 못하므로, 비선형 효과까지 보상하기 위해 하나의 3차 비선형 항을 추가한다. 그림 11은 QPSK와 16-QAM 신호의 정상도를 나타낸 것으로, 선형 항에 3차 비선형 항을 추가하여 보상과 보정을 동시에 수행하면 위상 회전과 정상도 불일치를 보상하는 것을 보여준다. QPSK와 16-QAM 신호 모두 NMSE가 약 -1 dB에서 약 -50 dB로 향상되었다. 그림 12는 배열 안테나의 빔 패턴을 나

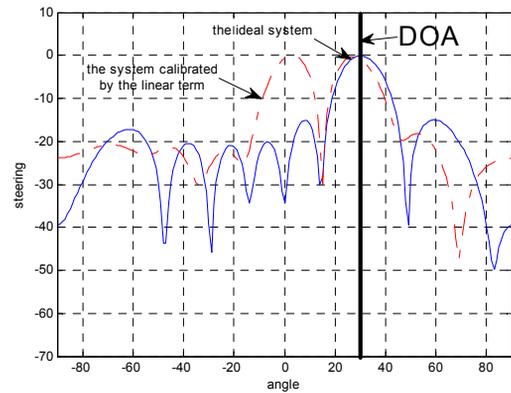


Fig. 10. Comparison of beam patterns of the ideal system and the system calibrated using a linear term only.

상되었다. 그림 12는 배열 안테나의 빔 패턴을 나타낸 것이다. 그림의 점선은 빔 패턴이 원하는 방향으로 제대로 형성된 것을 보여준다.

마지막으로, 비선형성에 의해 발생하는 주파수 재성장에 대해 살펴본다. 그림 13은 이상적 신호, 보상과 보정을 하지 않은 신호, 선형 보정 후의 신호, 그리고 비선형 보상과 선형 보정을 모두 거친 신호의 주파수 스펙트럼을 나타낸 것이다. 선형 항에 의해서와 선형 항과 3차 비선형 항에 의해 보상과 보

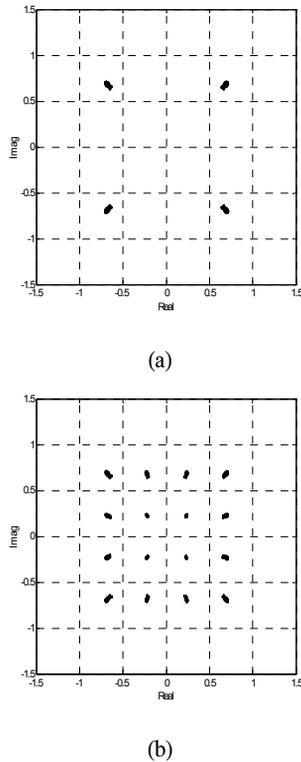


Fig. 11. Signal constellations after compensation and calibration using a third-order polynomial.

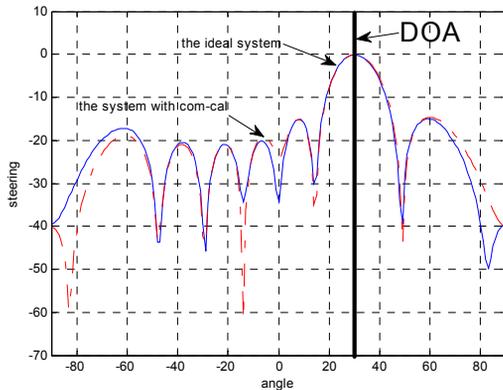


Fig. 12. Comparison of beam patterns of the ideal system and the system after compensation and calibration using a third-order polynomial.

정된 후, 주파수 재성장이 각각 약 20 dB와 약 25dB 정도 억압된 것을 확인할 수 있다.

전치 보정 및 보상 구조를 사용한 경우와 비교해 보면, 피드포워드 방식이 NMSE가 10 dB 정도 더 낮고 주파수 재성장이 5 dB 정도 더 감소하지만, 빔 패턴의 경우 간접 학습 구조가 약간 더 정확하게 형성됨을 확인할 수 있다<sup>[10]</sup>.

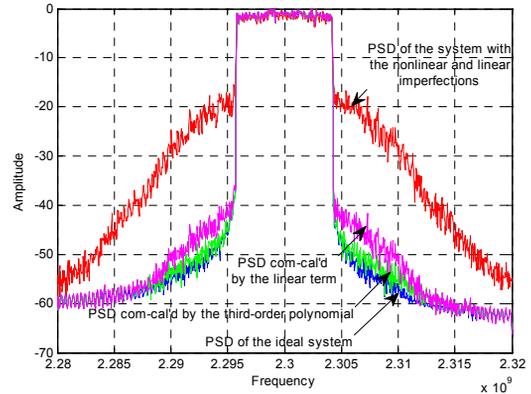


Fig. 13. Comparison of PSDs of the ideal system and the systems with and without compensation and calibration.

## V. 결 론

본 논문에서는 전송 배열 안테나 시스템에 대해 비선형성 보상과 경로 보정을 결합하는 새로운 방법을 제안하였다. 보상과 보정을 위해 선형 항에 3차 비선형 항을 더한 다항식을 이용하였고, 아날로그 방식의 피드포워드 기법을 디지털 신호 처리 기술에 응용하여 사용하였다. 모의실험 결과는 전력 증폭기가 포화영역 근처까지에서 동작하더라도 신호의 성상도, 빔 패턴의 왜곡, 대역 재성장 등의 문제점들이 모두 효율적으로 제거됨을 보였다. 위 결과들로부터, 피드포워드 방식은 선형 항에 단 하나의 3차 비선형 항을 추가함으로써 증폭기의 비선형성을 효율적으로 보상할 뿐만 아니라, 선형 결합 또한 부차적으로 보정할 수 있어서 선형적이고 효율적인 스마트 안테나 시스템을 구성할 수 있음을 알 수 있다. 그리고 본 논문에서는 적응적 알고리즘을 사용하기 때문에, 주 경로와 피드포워드 경로 간에 발생할 수 있는 불균형 요소들은 오류 신호로 검출되어 반영되므로 적응적으로 보상 및 보정할 수 있다. 피드포워드 방식은 전치 보상 방식에 비해 각 신호 경로마다 RF 부를 별도로 마련하여야 하지만, 입력 신호를 변형하지 않으므로 전치 보상 방식과 달리 시스템의 기저대역 부와 독립적으로 적용할 수도 있는 장점이 있다. 또한 입력 신호가 광대역이 되면 전력 증폭기에서 메모리 효과를 무시할 수 없는데 피드포워드 방식을 이용하면 증폭기의 비선형성과 선형 결합뿐만 아니라 메모리 효과 또한 효율적으로 보상과 보정할 수 있을 것이다<sup>[7]</sup>.

참 고 문 헌

March 2012.

[1] D. Asztely, A. L. Swindlehurst, B. Ottersten, "Auto Calibration for Signal Separation with Uniform Linear Array," *Digital Signal processing* 1997, Vol. 1, pp. 403-406, 1997.

[2] G. V. Tsoulos, M. A. Beach, "Calibration and Linearity Issues for an Adaptive Antenna System," *Vehicle Technology conference* 1997, Vol. 3, pp. 1597-1600, 1997.

[3] K. G. Johannsen, "Scan beam antenna intermodulation improvement due to spatial dispersion," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 23, pp. 543-557, 1987.

[4] M. Beach, H. Xue, R. Davies and J. McGeehan, "Linearity considerations in adaptive antenna array applications," in *Processing of the Sixth International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, Vol. 2, pp. 682-686, Sept. 1995.

[5] Schurhuber Robert, *Receiver Imperfections and Calibration of Adaptive Antennas*, Ph. D. Thesis, Technischen University at Dresden, 1998.

[6] Adel A. M. Saleh, "Frequency-Independent and Frequency-dependent Nonlinear Models of TWT Amplifiers," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 29, No. 11, pp. 1715-1720, Nov. 1981.

[7] Min Kim, Hayeon Shin, Changsoo Eun, "Compensation of the Nonlinearity of the High-power Amplifiers with Memory Using a Digital Feedforward Scheme," To be published in *IEEK Journal*, April 2012.

[8] Raymond H. Kwong, Edward W. Johnston, "A Variable Step Size LMS algorithm," *IEEE Trans. Signal processing*, Vol. 40, No. 7, pp. 1633-1642, July 1992.

[9] Simon Haykin, *Adaptive filter theory*, 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice Hall, Inc., pp. 299-359, 1991.

[10] Sunmun Lim, Min Kim, Changsoo Eun, "A Technique Combining the Path Calibration and Nonlinear Compensation in a Transmitting Antenna Array System," Submitted to *IEEK*,

김 민 (Min Kim)



정회원

2004년 8월 충남대학교 정보통신공학부 졸업  
 2007년 2월 충남대학교 정보통신공학과 석사  
 2007년 3월~현재 충남대학교 전자전파정보통신공학과 박사과정

<관심분야> 무선통신, 신호처리

은 창 수 (Changsoo Eun)



중신회원

1985년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업  
 1987년 2월 서울대학교 대학원 자공학과 석사  
 1995년 12월 오스틴 텍사스주립대학교 전기및컴퓨터공학과 박사

<관심분야> 통신 신호처리, 통신 시스템 및 RF 회로