

일부 모멘트 기반 정규화 된 직교다항식을 사용한 입력신호에 적응적 기저 생성 기법

이효원, 이남윤
포항공과대학교, 고려대학교

hyowon@postech.ac.kr, namyoon@korea.ac.kr

요 약

본 논문은 주파수 효율을 높이기 위한 방법으로 전 이중 통신 혹은 인접 채널 간섭 제거 문제에 중요한 자가 간섭 신호를 제거할 수 있는 송수신기 시스템을 고려한다. 수신부에서 비선형성을 가진 자가 간섭신호를 비선형 기저 적응형 필터로 제거할 때, 입력신호의 일부 모멘트를 이용하여 서로 직교하는 비선형 기저의 생성 방법을 제안한다. 본 논문의 시뮬레이션 결과로 적응형 필터 중 하나인 least mean square (LMS) 알고리즘을 사용할 때, 분포가 시간에 따라 변하는 비정상적 (non-stationary) 신호에서 기존의 비선형 기저함수 보다 수렴속도가 빠른 것을 확인하였다.

I. 서 론

차세대 무선 통신에서 한정된 주파수 자원을 효율적으로 이용하기 위해, 송신과 수신을 동시에 수행하여 이론적으로 두배의 주파수 효율을 낼 수 있는 대역 내 전 이중통신 (inband full-duplex)이 핵심 기술로 고려되고 있다 [1]. 또한, 현재 사용중인 통신 방법에서 인접 채널 간섭을 줄이는 것으로도 주파수의 효율을 높일 수 있다 [2]. 이 두가지 문제는 하나의 송수신기에서 송신된 신호가 수신기로 들어오는 자가 간섭신호에 의해 발생하는 문제이다. 따라서, 수신기에서 송신신호에 의한 자가 간섭을 충분히 줄이는 것이 주파수 자원의 효율을 높이는 하나의 방안이 될 수 있다. 일반적으로 송신부는 송신신호가 전달되며 발생하는 신호 감쇄를 고려하여, 전력증폭기 (power amplifier, PA)로 신호를 증폭하여 송신한다. 하지만 이 프로세스를 거치며 신호는 비선형성 및 인접채널 간섭을 야기한다. 이를 해결하기 위해 수신부에서 간섭제거와 신호의 비선형성을 함께 처리하는 방법들이 연구되었다. 비선형 기저함수의 가중치 합을 이용하여, 시스템의 비선형 응답을 재생산하는 방법으로, 적응형 필터를 이용하는 방법들이 제안되었다. 비선형 기저함수로 간단한 Hammerstein 다항식 (HP)을 이용하는 것은 더 낮은 간섭제거의 성능을 보여주었지만, 기저함수간 높은 상관관계로 수렴속도가 느린 단점이 있었다. 이러한 사실을 바탕으로 기저함수간 공분산으로부터 화이트닝 행렬을 생성하여, 기저함수간 상관관계를 줄이는 방법 [3]이 제안되었으나 높은 계산 복잡도를 가지는 단점이 있었다. 한편, 신호가 가우시안 분포에 근사 될 때, 해당 분포에서 직교성을 가지는 Itô-Hermite (IH) 다항식을 기저로 사용하는 방법 [4]은 신호가 가우시안 분포가 아닐 때, 직교성이 유지되지 않으므로, 기저함수간 높은 상관관계가 발생하는 단점이 있었다. 본 논문에서는 입력 신호의 일부 모멘트를 이용하여, 입력신호에 적합한 직교다항식을 얻는 방법을 제안한다. 이는 공분산을 이용하는 방법보다 낮은 계산 복잡도를 가지며, 신호의 분포에 제약을 받지 않는 장점이 있다.

II. 본론

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 수신기에 송신기의 신호가 자가 간섭으로 들어오는 단일 입력 단일 출력 송수신기를

고려한다. 통신 시스템에서 기저대역 수신신호 $y[n]$ 은 송신신호 $x[n]$ 가 겪는 PA 와 같은 비선형 응답, 송신기 및 수신기 사이의 채널, 선형 필터 등의 선형 응답, 송신 주파수와 수신 주파수가 다른 경우, 즉, 대역 외 방출 신호를 고려할 수 있는 주파수 차이를 모델링 한다. 메모리 효과가 있는 PA 를 위해, 우리는 잘 알려진 비메모리 PA 모델 중 수식 (1)과 같이 전이 첨도 (transition sharpness) β , 신호 이득 γ 을 파라미터로 가지는 Saleh 모델을 사용하며,

$$f_{PA}(x) = \frac{\gamma x}{1 + \beta |x|^2}, \quad (1)$$

Wiener model 을 이용하여 표현할 때, 수신 신호는 다음과 같이 구체화된다

$$f(x[n], \dots, x[n-M+1]) = e^{j2\pi \frac{\Delta f_c n}{f_{BW}}} \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^{M-1} h_{p,m} |x[n-m]|^{2p-2} x[n-m] \quad (2)$$

여기서 $z[n]$ 은 가산 백색 가우스 잡음으로, $CN(0, \sigma_z^2)$ 을 따르고, P 는 비선형 근사의 최고차항이며 홀수 값을 가지며, M 은 시스템의 총 메모리 효과의 수, $h_{p,m}$ 은 실질적인 비선형 계수, $e^{j2\pi \frac{\Delta f_c n}{f_{BW}}}$ 는 업/다운 컨버전에 의한 주파수 차이를 나타낸 것이다. 이때, Δf_c 및 f_{BW} 는 각각 송수신 반송 주파수의 차이, 신호 대역을 의미한다.

비선형 신호를 근사하기 위한 한가지 방법은 비선형 기저의 가중치 합을 이용하는 것이다. 우리는 다음과 같이 나타나는 비선형 기저를 사용한다.

$$\phi_p(x; c_p) = \sum_{k=1}^p c_{p,k} |x|^{2k-2} x, \quad (3)$$

여기서 p 의 범위는 $p \in \{1, 2, \dots, \frac{P+1}{2}\}$ 이다. 이 때, 근사 된 수신 신호 \hat{y} 는 다음과 같다.

$$\hat{y}[n] = \sum_{p=1}^{(P+1)/2} \mathbf{w}_p^H[n] \phi_p(x[n]; c_p), \quad (4)$$

여기서 \mathbf{w}_p 는 필터 탭의 가중치이며, $M \times 1$ 의 크기를 가진 벡터이고, H 는 Hermitian 연산자, $\phi_p(x[n]; c_p) = [\phi_p(x[n-M+1]; c_p), \dots, \phi_p(x[n]; c_p)]^T$ 이다. 우리는 생성된 \hat{y} 와 수신된 신호 y 의 차이인 $e[n] = y[n] - \hat{y}[n]$ 을 줄이기 위해, 기존의 적응형 필터를 이용하며, 빠른 수렴 속도를 가지는 기저의 계수 c_p 를 선택하는 방법을 제안한다.

2.2 정규화된 직교 다항식

적응형 필터 이론에 따라 입력신호 또는 기저들의 공분산이 단위 행렬일 때, 최소 평균 제곱 (least mean square: LMS)와 같은 알고리즘의 수렴속도가 빠른 것이 알려져 있다. 이를 위해, 다음의 직교화 조건을 만족하는 계수를 찾는 것이 목표이다.

$$E[\phi_p^*(x; \mathbf{c}_p) \phi_k(x; \mathbf{c}_k)] = 0, \quad (5)$$

이 때, k 는 p 보다 작은 양수이다. p 번째 다항식은 $(p-1)$ 개의 수식들을 가지며, 각 다항식의 최고차항의 계수를 1로 가정하여, 수식 (5)에 수식 (3)를 대입하여 수식을 전개하면 최종적으로 다음과 같은 행렬 식이 도출된다.

$$\begin{bmatrix} \mu_2 & \mu_4 & \cdots & \mu_{2p-2} \\ \mu_4 & \mu_6 & \cdots & \mu_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{2p-2} & \mu_{2p} & \cdots & \mu_{4p-6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{p,1} \\ c_{p,2} \\ \vdots \\ c_{p,p-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mu_{2p} \\ \mu_{2p+2} \\ \vdots \\ \mu_{4p-4} \end{bmatrix} = 0. \quad (6)$$

모멘트로 이루어진 $(p \times p)$ 행렬이 비 특이 행렬일 때, 계수를 유일하게 특정할 수 있다. 또한, 이 행렬의 구조의 특징을 활용하여 역행렬을 Schur complement 방법으로 낮은 계산 복잡도 얻을 수 있다.

수식 (5)의 조건은 직교성에 대한 조건으로, $k=p$ 일 때의 값이 1이 나오도록 정규화 과정이 필요하다. 수식 (6)에서 찾은 해를 $\hat{\mathbf{c}}_p$ 라고 할 때, 최고차항이 고려된 계수 벡터는 $\mathbf{c}_p = [1, \hat{\mathbf{c}}_p]^T$ 이다. 정규화 된 다항식을 $\phi_p^{\text{OHP}}(x; \hat{\mathbf{c}}_p)$ 로 정의하고, 다음과 같이 정규화 할 수 있다.

$$\phi_p^{\text{OHP}}(x; \hat{\mathbf{c}}_p) = \frac{\phi_p(x; \mathbf{c}_p)}{\sqrt{E[|\phi_p(x; \mathbf{c}_p)|]^2}} \quad (7)$$

여기서 $\hat{\mathbf{c}}_p$ 는 p 번째 다항식의 정규화 된 직교 계수들의 의미한다.

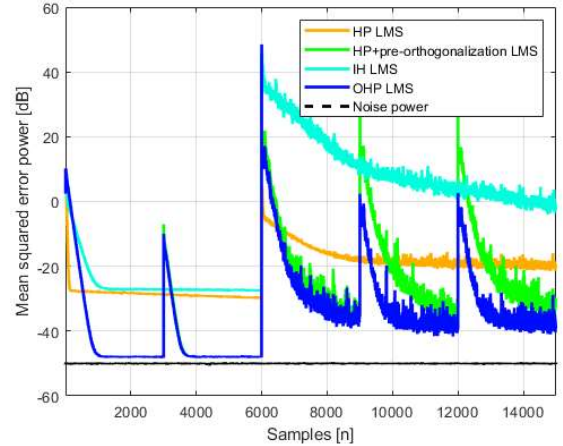
2.3 시뮬레이션 결과

적응형 필터 알고리즘 중 하나인 LMS 알고리즘을 이용하여 자가 간섭을 제거한다. 본 실험에서는 메모리 효과의 길이, 간섭 채널의 길이를 각각 5 개의 탭으로 설정하여 총 메모리 효과의 길이는 9로 설정하였다. 또한, 아날로그 간섭 제거 후, 남은 간섭 신호의 세기 제거하는 것을 고려하여 잡음 신호의 세기를 -50 dBm 으로 가정했다. PA 의 파라미터로 β, γ 는 각각 0.03, 3 으로 설정했다. 송신 신호는 시간에 따라 신호의 분포가 변하는 비정상성 (non-stationary) 상황을 가정하였으며, 처음 6000 개의 샘플은 $[0,1]$ 의 균등 분포 이후 9000 개의 샘플은 균등분포에 가우시안 분포가 더해진 신호를 사용하였다.

LMS 알고리즘은 4 개, 즉, $P=7$ 의 비선형 기저를 사용하였다. 신호가 시간에 따라 분포가 변하므로 3000 샘플마다 다항식 기저의 계수를 업데이트 하였고, 이를 위해 경험적 공분산 및 경험적 모멘트는 업데이트 이후 최대 100 개의 샘플을 이용하였다.

그림 1 은 제안하는 알고리즘과 기존의 IH 다항식 [4], 사전 직교화 다항식 [3]과 평균 제곱 오차 (mean-squared error)를 비교하였으며, 결과에서 볼 수 있 듯 제안하는 기저 (OHP)가 기존의 알고리즘에 비해 더 빠른 수렴속도를 가지는 것을 확인할 수 있다. IH 다항식이 가우시안 분포에 대해 직교성을 가지는 다항식이므로 신호의 분포가 달라지면 성능의 열화가 발생하는 것을 보여준다. 제안하는 알고리즘과 같이 직교 기저를 사용하는 사전 직교화 다항식은 IH 다항식에

비해 좋은 성능을 가지는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 직교 기저를 얻기 위해 샘플로부터 경험적 공분산을 이용하므로, 경험적 모멘트만을 사용하는 제안하는 알고리즘 보다 더 많은 샘플들을 이용해야 한다는 단점이 있고, 이는 그림 1 에서 계수 업데이트 이후 사전 직교화 알고리즘의 수렴속도가 제안하는 알고리즘보다 느린 것으로 확인할 수 있다.



<그림 1. 비정상성 신호에 대해 다양한 기저함수들을 사용한 적응형 필터의 샘플에 따른 평균오차 제곱의 세기 비교>

III. 결론

본 논문에서는 하나의 송수신기에서 수신기에 자가 간섭신호로 비선형 송신신호가 들어올 때, 이를 효율적으로 제거하기 위한 비선형 기저 함수로써 정규화된 직교 다항식을 생성하는 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 샘플로부터 모멘트의 일부분만을 사용하여, 기저 함수간 직교성을 만족하는 계수를 찾는 방법이다. 기존의 직교화 방법에 비해 상대적으로 적은 수의 샘플을 이용한 경험적 모멘트를 사용하므로 정상성 (stationary) 신호를 포함하여 비정상성 신호에서도 동작할 수 있는 장점이 있다.

참 고 문 헌

- [1] M. Jain, J. I. Choi, T. Kim, D. Bharadia, S. Seth, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, and P. Sinha, "Practical, real-time, full duplex wireless," in Proc. 17th Annual International Conference on Mobile computing and Networking, Sep. 2011, pp. 301-312.
- [2] N. Sofi, F. T. Bendimerad and F. Debbat, "Compromise between spectral efficiency and interference elationtion in OFDM system," 2017 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), 2017, pp. 1-7.
- [3] D. Korpi, Y.-S. Choi, T. Huusari, L. Anttila, S. Talwar, and M. Valkama, "Adaptive nonlinear digital self-interference cancellation for mobile inband full-duplex radio: Algorithms and rf measurements," in 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2015, pp.1-7.
- [4] J. Kim and N. Lee, "Adaptive non-linear digital self-interference cancellation for full-duplex wireless systems using Ito-Hermite polynomials," in 2018 IEEE International Conference on Communication Workshops (ICC Workshops), 2018, pp. 1-6.