

4G-LTE 및 5G-NR 시스템 기반 간섭제거 중계기의 상향링크 적응 알고리즘

홍 승 모*, 김 중 훈*

Uplink Adaptive Algorithm for Interference Cancellation Repeater Based on 4G-LTE and 5G-NR Systems

Seungmo Hong*, Chonghoon Kim*

요 약

4G-LTE 및 5G-NR과 같은 3GPP기반 시스템에서 단말은 기지국과의 초기접속 시 PRACH (Preamble Random Access Channel)신호를 발신한다. 이로 인해 간섭제거 중계기에는 무신호 상태에서 갑자기 높은 전력의 협대역 신호가 지속적으로 입력되므로, 간섭제거 알고리즘의 오동작으로 인해 시스템이 발진을 일으킬 가능성이 매우 크다. 본 논문에서는 이러한 신호대역 스펙트럼 및 전력의 급격한 변화를 가지는 협대역 입력에 대해서도 발진 없이 간섭제거 기능을 유지할 수 있는 적응 알고리즘을 제안한다.

Key Words : On-Channel Repeater, ICS Repeater, LMS, 3GPP, PRACH

ABSTRACT

In a 3GPP-based system such as 4G-LTE and 5G-NR, a UE transmits a PRACH(Preamble Random Access Channel) signal in the initial connection with a base station. As a result, the interference canceling repeater suddenly receives a high-power narrow-band signal continuously in a non-signal state, so that the interference cancellation algorithm may malfunction

and the system is likely to cause oscillation. In this paper, we propose an adaptive algorithm that can maintain the interference cancellation function without oscillation even for narrow band input with sudden change of the signal band spectrum and power.

I. 서 론

4G-LTE 및 5G-NR와 시스템에서는 신호의 스펙트럼이 주파수 영역에서 RB(resource block) 단위로 시간영역에서 심플 주기로 수시로 변한다. 이러한 비백색(non-white)신호에 대한 적응 알고리즘으로는 기존의 간섭제거 중계기 (interference cancellation system: ICS)관련 연구^[1]에서 주로 사용되어온 NLMS (Normalized Least Mean Square)알고리즘보다 DCT(discrete cosine transform)-LMS와 같은 변환 영역(transform domain) 적응 알고리즘이 보다 적합하다. 또한 상향링크에서 PRACH 신호는 케환 채널의 변화와 관계없이 무신호 입력상태에서 입력되므로 이러한 급격한 입력 변화에도 오동작이 없는 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 NLMS 와 DCT-LMS 알고리즘의 급격한 입력 전력 변동에 대한 응답을 통합하여 오

동작 및 발진의 원인을 분석하고 오동작을 최소화 하는 개선된 알고리즘을 제안하였다. LTE의 PRACH 신호와 유사한 입력의 모의실험을 통하여 수정된 알고리즘들의 성능을 입증하였고, 특히 수정된 DCT-LMS 알고리즘은 LTE 및 NR 기반 ICS에 적합함을 보였다.

LTE의 PRACH 신호와 유사한 입력의 모의실험을 통하여 수정된 알고리즘들의 성능을 입증하였고, 특히 수정된 DCT-LMS 알고리즘은 LTE 및 NR 기반 ICS에 적합함을 보였다.

II. 본 론

2.1 ICS 모델의 적응알고리즘 분석

그림 1 은 간섭 제거 중계기의 디지털 영역 구조를 나타내는 블록다이어그램이다. ICS입력 $d[k]$ 는 UE(user equipment)신호 $s_i[k]$ 와 케환신호 $s_j[k]$ 가

※ 본 연구는 중소벤처기업부의 World Class 300 Project(R&D) (S2521647)의 지원으로 수행되었습니다.

* First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-2578-0974) Soongsil University, School of Electronics Engineering, omnu@ssu.ac.kr, 정희원

* (ORCID:0000-0001-9922-0510) Soongsil University, chkim@ssu.ac.kr, 정희원

논문번호 : 201908-148-A-LU.R1, Received August 7, 2019; Revised September 6, 2019; Accepted September 9, 2019

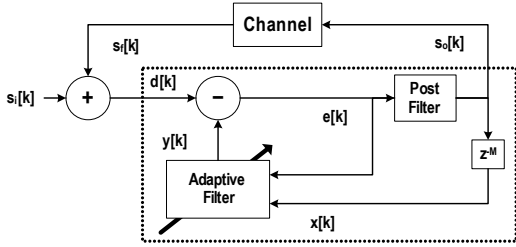


그림 1. 간섭제거 중계기(ICS)의 블록다이어그램
Fig. 1. Block diagram of the ICS repeater.

다해진 것이며 적응필터에 의해 퀘환신호 성분이 제거된 신호 $e[k]$ 는 후치필터(Postfilter)를 통해 출력되고($s_o[k]$), 출력 성분 다시 ICS내부에서 지연을 거쳐 회귀신호 $x[k]$ 로 적응필터에 사용된다. 후치 필터는 구현된 디지털 시스템에서 발진으로 인해 overflow가 발생하더라도 RF출력과 내부 회귀신호 간의 상관관계를 유지하여 적응 알고리즘으로 하여금 원상태로 복귀할 수 있도록 하는 역할을 한다.

샘플 시간 k 에서 회귀샘플 $x[k]$ 로 생성된 열벡터 $\mathbf{x}_k = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_N(k)]$ (단 $x_n(k) = x[k-n+1]$, N 은 적응필터 계수의 개수와 계수 벡터(행벡터) $\mathbf{w}_k = [w_1(k), w_2(k), \dots, w_N(k)]^T$, 그리고 변환 행렬 \mathbf{T} 에 의해 변환된 회귀벡터 및 계수벡터를 각각 $\tilde{\mathbf{x}}_k = \mathbf{x}_k \mathbf{T}^H$, $\tilde{\mathbf{w}}_k = \mathbf{T} \mathbf{w}_k$ 라 할 때 입력과 적응필터 출력간의 오차는 $e[k] = d[k] - \tilde{\mathbf{x}}_k^H \tilde{\mathbf{w}}_k$ 이며 계수 적응알고리즘은 다음과 같이 표현된다^[2]. Tilde는 변환영역의 벡터를 나타낸다.

$$\tilde{\mathbf{w}}_{k+1} = \tilde{\mathbf{w}}_k + \mu \Delta \tilde{\mathbf{w}}_k, \quad \Delta \tilde{\mathbf{w}}_k = e[k] \mathbf{D}_k^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_k^H \quad (1)$$

식(1)의 정규화 행렬 \mathbf{D}_k 는

$\mathbf{D}_k = \text{diag}(p_1(k) + \epsilon, p_2(k) + \epsilon, \dots, p_N(k) + \epsilon)$ 로 정의되며, ϵ 은 나누기 0을 피하기 위한 상수, μ 값은 수렴상수를 나타낸다.

변환행렬 \mathbf{T} 는 NLMS의 경우 항등행렬($\mathbf{T} = \mathbf{I}$)이며 DCT-LMS의 경우에는 다음과 같다.

$$T_{nk} = \sqrt{\frac{2}{N}} K_n \cos\left(\frac{(n-1)(2k-1)}{2N}\right) \quad (2)$$

여기서 $n, k \in [1, N]$ 이며 K_n 은 $n=1$ 일 때 $1/\sqrt{2}$, $n > 1$ 일 때 1이다. 행렬의 n 번째 대각 원소 $p_n(k)$ 는 근사적으로 $p_n(k) = \overline{|x_n(k)|^2}$, 즉 $|x_n(k)|^2$ 의 이동 시

간평균(moving time average)으로 간주할 수 있으며, NLMS의 경우 회귀신호의 평균전력, DCT-LMS의 경우는 회귀신호의 n 번째 모드의 평균전력을 의미한다. 신호 $s_i[k]$ 가 정상과정(stationary process)이고 시스템이 정상상태(steady state)이면 식(1)의 벡터 $\Delta \tilde{\mathbf{w}}_k$ 의 원소 $\Delta \tilde{w}_n(k)$ 의 기대치는 직교성에 의해 0이며, $\Delta \tilde{w}_n(k)$ 의 분산은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E\{|\Delta \tilde{w}_n(k)|^2\} = \frac{E\{|e[k]|^2\} E\{|\tilde{x}_n(k)|^2\}}{(\overline{|x_n(k)|^2} + \epsilon)^2} \quad (2)$$

다시 $E\{|\tilde{x}_n(k)|^2\} = \overline{|x_n(k)|^2} \gg \epsilon$ 을 가정하면 식(2)를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$E\{|\Delta \tilde{w}_n(k)|^2\} \approx \frac{E\{|e[k]|^2\}}{\overline{|x_n(k)|^2}} \quad (3)$$

한편 ICS구조의 특징은 오차 $e[k]$ 가 ICS의 출력 신호 $s_o[k]$ 가 되며,

$$x[k] = e[k-M] \quad (4)$$

으로 회귀신호는 지연된 오차신호가 된다는 점이다. 이 때 지연값 M 은 오차신호와 회귀신호간의 상관관계가 없도록 충분히 크다고 가정한다.

식(3) 및 (4)로부터 입력의 상태 변화에 따른 적응필터 계수 변화를 유추할 수 있다. 채널 상태가 변동이 없는 상황에서 시간 k 부터 이전보다 큰 전력의 신호가 계속 입력되면 $|\Delta \tilde{w}_n(k)|$ 의 값이 커져 계수의 변화를 일으키며, 이 상태는 식(4)에 의해 입력의 변화가 회귀 신호에 반영되어 $|\Delta \tilde{w}_n(k)|$ 값이 이전 상태로 복귀될 때 까지 누적된다. 실제 채널의 응답은 변화가 없으므로 이러한 계수 변화는 채널 추정의 오류가 되어 발진의 원인이 된다. 반면 이전 보다 작은 전력의 입력에는 $|\Delta \tilde{w}_n(k)|$ 값이 오히려 감소함으로 계수의 변동은 크게 일어나지 않는다.

2.2 제안된 적응 알고리즘

식(3) 및 (4)에 의한 분석에 따라, 갑자기 큰 전력이 입력된 후 이 상태가 회귀신호에 반영되기 전까지의 시간동안 계수오류의 누적으로 발진의 가능성이 가장 커짐을 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 문제를 해

결하기 위해 식(1)의 $\Delta\tilde{\mathbf{w}}_k$ 를 다음과 같이 수정한 알고리즘을 제안한다.^[3]

$$\Delta\tilde{\mathbf{w}}_k = \frac{e[k]}{\sqrt{p_e(k) + \epsilon}} \mathbf{D}_k^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{x}}_k^H \quad (5)$$

$$p_e(k) = \beta p_e(k-1) + (1-\beta)|e[k]|^2 \approx \overline{|e[k]|^2}$$

식(5)를

$$E\{|\Delta\tilde{w}_n(k)|^2\} \approx \frac{E\{|e[k]|^2\} E\{|\tilde{x}_n[k]|^2\}}{(P_e(k) + \epsilon)(P_x(k) + \epsilon)} = \frac{E\{|e[k]|^2\}}{|e[k]|^2} \quad (6)$$

으로 나타내며, 큰 전력의 신호가 입력될 경우 $|\Delta\tilde{w}_n(k)|$ 값은 처음에는 크지만 분모의 시간 평균항의 증가에 의해 급격히 감소하므로 누적되는 계수의 변화는 식(6)에 의한 누적에 비해 대폭 감소되며, 채널 추정 오류가 발생하더라도 적응알고리즘에 의해 곧 보상되어 발진을 일으킬 가능성이 대폭 감소된다.

2.3 모의실험

모의실험은 그림 1의 시스템을 c++언어로 코딩하여 수행하였다. 입력 데이터율은 25MSPS를 가정하였고, 후치필터는 65Tap-FIR, 지연값 $M=70(2.8 \text{ us})$, 입력 신호는 LTE의 PRACH를 대신하여 AWGN을 대역폭 1.08 MHz의 필터를 통과시켜 1ms동안 유지하도록 했으며, 여기에 Noise Floor로 -76dB의 AWGN을 더하였다. 케환 채널은 지연 640ns, 페이딩을 모사 하기위해 PRACH 시작점에서 케환 이득 9.93dB, 1ms 후 10.36dB로 dB 스케일에서 선형적으로 변동되도록 설정 하였다. 적응필터의 계수 탭 $N=40$ 이고 모든 알고리즘은 간섭제거 후 신호와 원 신호 간의 평균 제곱 오차가 -15dB가 되도록 수렴 상수(μ)를 설정하였다.

그림 2는 0.1ms 이전 까지 잡음 레벨이 입력되고 이후 잡음레벨로부터 30, 35, 40, 45dB의 전력을 가진 입력에 대한 ICS의 응답을 나타낸 것이다. 입력 레벨이 높을수록 발진이 일어난 시간이 증가하며 특히 NLMS 보다 DCT-LMS가 발진이 일어나기 쉬움을 알 수 있다. 수정된 알고리즘은 어느 경우에도 발진 없이 간섭 제거된 출력을 내고 있다.

그림 3은 잡음 레벨로부터 35dB 인 입력에 대해 신호 입력으로부터 0.5ms 지난 시점에서의 출력 스펙트럼을 그린 것이다. NLMS 알고리즘들은 신호 바깥

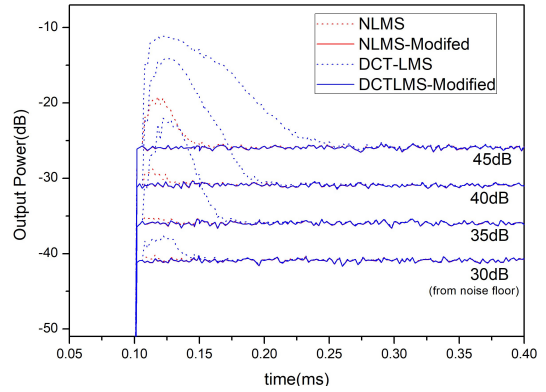


그림 2. 잡음레벨 기준으로 30, 35, 40, 45dB의 입력 신호 (PRACH)에 대한 ICS출력응답(400회 실험 평균)
Fig. 2. ICS output response for PRACH input signal with 30, 35, 40, and 45dB power based on noise level (average of 400 experiments)

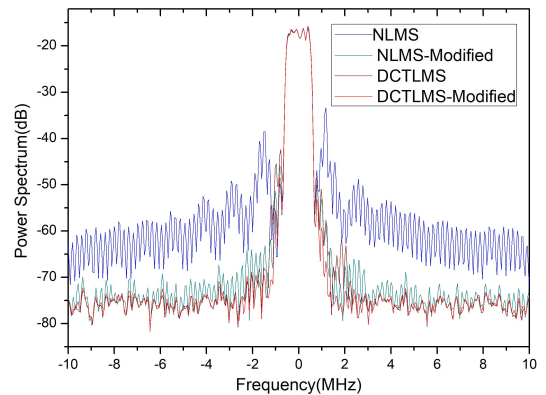


그림 3. PRACH가 시작되고 0.5ms 이후의 출력 스펙트럼 (10회 실험 평균)
Fig. 3. Output Spectrum at 0.5ms after PRACH (average of 10 experiments)

대역의 레벨이 불안정한 데 비해 DCT-LMS 알고리즘들은 비 백색(non-white) 입력 신호에 대해서도 우수한 성능을 가지는 특성으로^[3] 전 대역에 걸쳐 안정된 응답을 보여주었다.

III. 결 론

본 논문에서는 ICS에서 신호대역 스펙트럼 및 전력의 급격한 변화를 가지는 협대역 입력에 대해서도 발진간섭제거 기능을 유지할 수 있도록 기존의 적응 알고리즘의 개선 방안을 제시하였으며, 수정된 DCT-LMS 알고리즘이 LTE 및 NR 기반의 ICS에 적합함을 보였다.

References

- [1] C. Kim, "Implementation of Bi-Directional single adaptive algorithm for TDD-Based interference cancellation repeater," *J. KICS*, vol. 44, no. 6, pp. 1048-1054, 2019.
- [2] B. Widrow and E. Walach, *Adaptive Inverse Control: A Signal Processing Approach*, p. 388, Reissue Edition, Wiley-IEEE Press, 2007.
- [3] Ali H. Sayed, *Adaptive filters*, IEEE Press (John Wiley & Sons), pp. 420-423, Apr. 2008.