

# 매시브 다중안테나 전이중 시스템을 위한 실시간 자기간섭제거 알고리즘

이진녕, 김종현, 최경준, 김광순  
연세대학교 전기전자공학과

{jnlee, jhkim, kjchoi}@dcl.yonsei.ac.kr, ks.kim@yonsei.ac.kr

## Real-Time Self-Interference Cancellation Algorithm for Massive MIMO Full-Duplex System

Jinnyeong Lee, Jong Hyun Kim, Kyung Jun Choi, Kwang Soon Kim  
Department of Electrical & Electronical Engineering, Yonsei Univ.

### 요 약

본 논문에서는 다중안테나 전이중 통신 시스템의 실시간 구현 방법에 대해 논의하고, 구체적인 알고리즘을 통해 간섭이 효율적으로 제거되는 것을 확인하였다. 단일 안테나 시스템에서의 전이중 통신에서 증폭기를 통해 발생하는 입력 신호의 비선형 성분들만을 고려했던 것과 달리, 다중 안테나 시스템에서는 모든 안테나의 입력 신호도 같이 고려되어야 한다. RLS 적응 알고리즘을 통해 실시간으로 구현하였고, 그때의 안테나 수가 증가함에 따른 복잡도 및 성능 결과를 확인하였다.

### I. 서 론

최근 통신 시스템의 발전으로 무선 스펙트럼 자원에 대한 수요가 급격하게 증가함에 따라, 높은 주파수 효율을 얻기 위한 연구가 수년간 진행되어 왔다. 이와 같은 다양한 연구들 중, 최근 들어 가장 주목을 받고 있는 기술 중 하나가 바로 전이중 (FD, Full-Duplex) 통신이다 [1]. FD 통신은 기존의 반이중 (HD, Half-Duplex) 통신인 주파수 분할 다중화 (FDD) 방식과 시분할 다중화 (TDD) 방식의 각각의 장점을 이용하면서도 주파수 효율을 높이기 위해, 같은 주파수 밴드에서 송신과 수신을 동시에 수행하는 기술이다. 이와 같이 송신과 수신을 동시에 할 경우 자기간섭 (Self-Interference)이 발생하게 되는데, 이러한 자기간섭은 아날로그 소자들을 통한 아날로그 자기간섭 제거와 디지털 자기간섭 제거를 통해 잡음 단계까지 낮출 수 있고, 이와 관련해 상당 부분 연구가 진행되었다. 하지만 실제 통신 시스템에서 이러한 전이중 통신을 적용하기 위해서는 이동성 등을 지원할 수 있도록 실시간 구현이 불가피하다.

본 논문에서는 실시간 안테나 FD 통신의 구현 방법에 대해 논의하고, RLS 적응 알고리즘을 적용하여 성능 결과를 확인하였다. 또한 이를 다중 안테나 FD 통신 시스템으로 확장하여 알고리즘을 적용하고, 안테나 수가 증가함에 따른 복잡도 및 성능에 대해 알아본다.

### II. 시스템 모형

그림 1은 본 논문에서 고려하는 실시간 전이중 통신의 상태 머신이다. 비동작 상태 (Idle State)에서 전이중 통신을 시작하게 되면 아날로그 획득 (Analog Acquisition) 상태로 넘어가 LOS 간섭 성분을 먼저 제거하는 아날로그 자기간섭 제거를 수행하고, 수렴하게 될 경우 디지털 획득 (Digital Acquisition) 상태로

넘어가 나머지 NLOS 간섭 성분을 제거하는 디지털 자기간섭 제거를 수행한다. 마지막으로 수렴하여 간섭이 잡음 단계까지 낮춰지면 트래킹 (Tracking) 상태로 넘어가 실시간 전이중 통신을 수행한다.

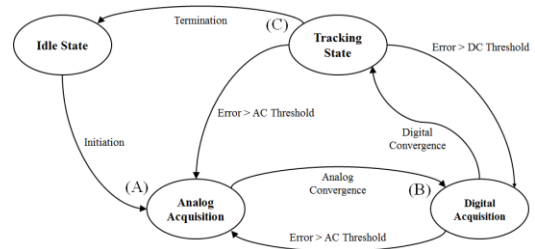


그림 1. 실시간 전이중 통신 상태 머신

그림 2는 가변 이득과 지연 연결선으로 구성된 실시간 아날로그 자기간섭 제거의 블록다이어그램이다. 채널의 LOS 성분의 진폭과 지연을 정확히 알 수 있다면, 1 개 혹은 2 개의 탭으로 아날로그 자기간섭 제거를 할 수 있고, [2]처럼 가변 지연 연결선의 해상도 한계를 극복하기 위해 여러 탭의 고정된 지연 연결선들 통해서도 제거할 수 있다.

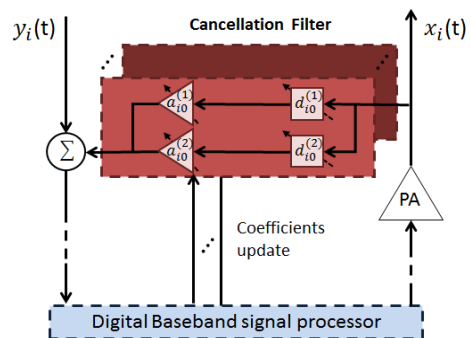


그림 2. 실시간 아날로그 자기간섭 제거

아날로그 간섭 제거 후, 남은 간섭 성분은 디지털 자기간섭 제거를 통해 잡음 단계까지 떨어져야 한다. 간섭 제거를 위해서 증폭기 소자로 인한 비선형 성분을 입력 신호로 모델링하고, 자기간섭 성분을 재구성하여 제거해줄 수 있다 [2]. 그림 3 은 이와 같은 자기간섭 재구성을 통한 디지털 자기간섭 제거를 실시간 적응 알고리즘에 적용한 것이며, 본 논문에서는 점화적 최소자승 (Recursive Least Square)으로 실시간 디지털 자기간섭 제거 알고리즘을 구현하였다.

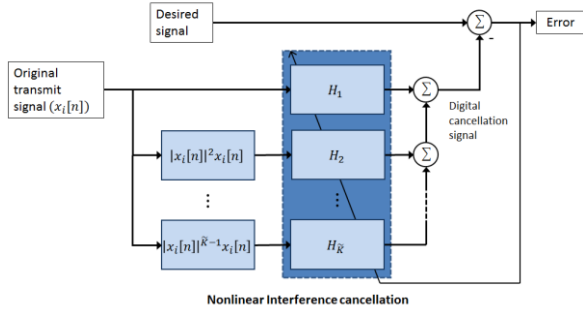


그림 3. 실시간 디지털 자기간섭 제거

디지털 자기간섭 제거의 한계점을  $E_{Threshold}$  라고 했을 때, RLS 를 통한 실시간 디지털 자기간섭 제거 알고리즘을 정리하면 그림 4 와 같다.

- 1: **While**  $\|e[n]\| < E_{Threshold}$  :
- 2: Update the input symbol  $\mathbf{X}[n]$
- 3: Compute the filter output  
 $\hat{\mathbf{d}}[n] = \mathbf{X}^T[n] \mathbf{h}[n-1]$
- 4: Compute the error  
 $\mathbf{e}[n] = \mathbf{d}[n] - \hat{\mathbf{d}}[n]$
- 5: Compute the Kalman gain  
 $\mathbf{K}[n] = \mathbf{R}^{-1}[n-1] \mathbf{K}^* [n] (\lambda N_{sym} \cdot \mathbf{I}_{N_{sym}} + \mathbf{X}^T[n] \mathbf{R}^{-1}[n-1] \mathbf{K}^* [n])^{-1}$
- 6: Update the matrix  $\mathbf{R}^{-1}[n]$  for the next iteration  
 $\mathbf{R}^{-1}[n] = \lambda^{-1} (\mathbf{R}^{-1}[n-1] - \mathbf{K}[n] \mathbf{X}^T[n] \mathbf{R}^{-1}[n-1])$
- 7: Update the filter coefficients for the next iteration.  
 $\mathbf{h}[n] = \mathbf{h}[n-1] + \mathbf{K}[n] \mathbf{e}[n]$
- 8: **End**

그림 4. RLS 디지털 자기간섭 제거 알고리즘

여기서  $\|e[n]\|$  는 각 벡터성분의 절대값의 제곱의 평균으로 정의한다.  $\mathbf{X}[n]$  은 각 안테나의 입력 신호와 각각의 비선형 성분을 모두 고려한 심볼 길이  $N_{sym}$  의 입력 신호의 행렬,  $\mathbf{h}[n]$  은  $M$  개의 탭을 갖는 FIR 필터 벡터이며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{X}[n] = [\mathbf{x}[(n-1)N_{sym} + 1] \quad \mathbf{x}[(n-1)N_{sym} + 2] \quad \dots \quad \mathbf{x}[nN_{sym}]]$$

$$\mathbf{h}[n] = [\mathbf{h}_1^{(1)}[n] \quad \dots \quad \mathbf{h}_1^{(K)}[n] \quad \mathbf{h}_2^{(1)}[n] \quad \dots \quad \mathbf{h}_2^{(K)}[n] \quad \dots \quad \mathbf{h}_{N_{sym}}^{(1)}[n] \quad \dots \quad \mathbf{h}_{N_{sym}}^{(K)}[n]]^T$$

where,

$\mathbf{x}_j^{(k)}[m]$  is  $k^{th}$  order recent input history vector of  $j^{th}$  antenna

$$\mathbf{x}[m] = [\mathbf{x}_1^{(1)}[m] \quad \dots \quad \mathbf{x}_1^{(K)}[m] \quad \mathbf{x}_2^{(1)}[m] \quad \dots \quad \mathbf{x}_2^{(K)}[m] \quad \dots \quad \mathbf{x}_{N_{sym}}^{(1)}[m] \quad \dots \quad \mathbf{x}_{N_{sym}}^{(K)}[m]]^T$$

$\mathbf{h}_j^{(k)}[m]$  is  $k^{th}$  order filter coefficient vector of  $j^{th}$  antenna

$$\mathbf{h}_j^{(k)}[m] = [H_{j1}^{(k)}[m] \quad H_{j2}^{(k)}[m] \quad \dots \quad H_{jM}^{(k)}[m]]$$

여기서의 초기값은 각각  $\mathbf{X}_j^{(k)}[m] = 0 (m \leq 0)$ ,  $\mathbf{h}[0] = \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{R}^{-1}[0] = \delta \cdot \mathbf{I}$  와 같고,  $\mathbf{K}[n]$  은 칼만 이득,  $\mathbf{R}^{-1}[n]$  은 역상관 행렬,  $\lambda$  는 망각 인자 (Forgetting factor,  $0 \leq \lambda \leq 1$ ) 이다.

그림 5 는 직사각형 안테나 배열의 무선랜 환경에 RLS 기반 실시간 알고리즘을 적용한 결과이다. 송신 전력은 20dBm, 잡음 레벨은 -90dBm 이고, 증폭기 소자의 비선형성은 19 승까지 구현하였다. 심볼도 마찬가지로 무선랜 환경에 맞게 64 OFDM 길이에 4 분의 1 CP 길이를 고려하였다. 시뮬레이션 결과 잡음이 섞여 있는 상황에서도 알고리즘을 통하여 필터 계수를 정확히 추정하여 자기간섭을 잡음 수준 이하로 낮추는 것을 확인할 수 있다.

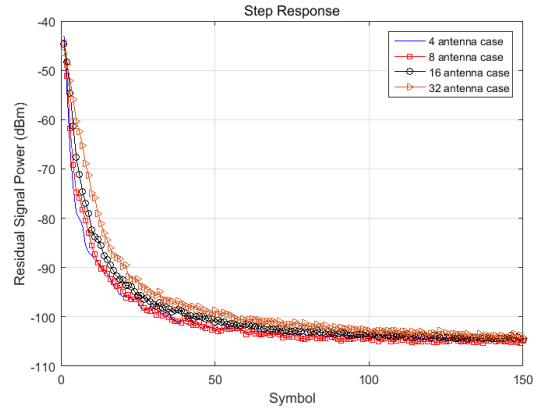


그림 5. 안테나 수에 따른 계단 응답 특성

기존 방식을 실시간 알고리즘으로 구현할 경우 곱하기만 고려한 복잡도는 안테나 4 개일 경우 7,144,080, 8 개일 경우 33,894,480, 그리고 16 개일 경우 187,705,680 의 디지털 탭 수가 필요하여, 복잡도가 안테나 수가 증가함에 따라 급격하게 증가함을 확인할 수 있다.

### III. 결론

본 논문에서는 다중 안테나 전이중 통신을 실시간 적응 알고리즘을 통해 구현하였고, 성능 결과를 통해 간섭 성분의 크기가 잡음 수준까지 낮춰지는 것을 확인하였다. 또한 안테나 수가 증가함에 따라 복잡도가 급격하게 증가하는 것을 고려하여, 안테나 수에 따른 복잡도의 증가폭이 더 작은 저 복잡도의 새로운 실시간 알고리즘이 필요함을 확인할 수 있었다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구원진흥센터의 정보통신·방송개발사업 [B0101-15-1367, 고성능, 고효율의 차세대 무선랜 무선전송 원천기술 개발]과 [B0126-15-1017, 주파수 센싱 기반의 스펙트럼 관리 및 미래전파통신 플랫폼 연구] 사업의 일환으로 수행하였음.

### 참고 문헌

- [1] A. Sabharwal, et. al., "In-band full-duplex wireless: Challenges and opportunities," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 32, no. 9, pp. 1637- 1652, 2014.
- [2] D. Bharadia, E. McMillin and S. Katti , "Full duplex radios", *Proc. ACM SIGCOMM* , pp.375 -386 , 2013
- [3] L. Anttila, D. Korpi and V. Syrjälä, "Cancellation of Power Amplifier Induced Nonlinear Self-Interference in Full-Duplex Transceivers," in *Proc. 47th Asilomar Conf. Signals, Syst. Comput.*, pp. 1-6, 2013.