

아날로그 자기간섭 제거회로의 비선형성을 고려한 자기간섭 제거 성능 분석

곽종우, 채찬병*

연세대학교, *연세대학교

kjw8216@yonsei.ac.kr, *cbchae@yonsei.ac.kr

요약

본 논문은 전이중 통신의 핵심 기술인 multi-tap 회로 기반 아날로그 자기간섭 제거기술의 성능을 소자의 비선형성을 고려하여 사실적으로 분석한다. Multi-tap 회로의 구성 요소인 위상 천이기와 감쇠기의 해상도가 자기간섭 제거량에 미치는 영향은 현재까지 연구된 바 없었다. 본 논문의 연구 결과, 위상 천이기와 감쇠기의 해상도가 자기간섭 제거량에 매우 큰 영향을 줄 수 있음을 확인하였으며 이를 수학적으로 분석하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 사용하려는 소자의 해상도를 얻을 수 있는 자기간섭 제거 성능을 식을 통해 예측할 수 있게 함으로써 효율적인 전이중 통신 시스템 설계의 단초를 제공하였다.

I. 서론

동일대역 전이중 통신(In-band full-duplex)은 동일대역에서 동시에 송수신을 진행하여 주파수 효율 및 전송 속도를 증대시키는 기술이다[1,2,3]. 이 경우 송신 신호는 관심 신호에 간섭으로 작용하며, 이를 자기간섭 효과(Self-interference)라고 한다. 전이중 통신의 난관 중 하나는, 관심신호와 자기간섭 신호를 동시에 수신해야 한다는 점이다[4,5]. 일반적으로 자기간섭 신호의 세기는 관심신호에 비해 월등히 크기 때문에, 자기간섭 신호의 세기를 충분히 줄여주지 않는 경우 수신단의 analog-to-digital converter(ADC)가 포화되는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 다양한 아날로그 자기간섭 제거(Self-interference cancellation) 기술이 제안되었다.

본 논문은 회로를 이용해 자기간섭 신호를 복제하여 이를 제거함으로써 자기간섭 제거를 달성하는 회로기반 아날로그 자기간섭 제거기술[1]의 성능을 분석한다. 본 논문은 이를 통해 그동안 아날로그 자기간섭 제거 성능의 요소로 고려되지 않았던, 회로 소자의 분해능이 자기간섭 제거 성능에 큰 영향을 끼침을 확인하였으며, 그 영향을 수학적으로 분석하였다.

II. 본론

본 논문에서는 그림1과 같은, multi-tap 회로 기반의 아날로그 자기간섭 제거 기반의 전이중 통신 시스템을 고려하였다. 위 전이중 통신 시스템에서 자기간섭 신호는 다음의 세 단계에 거쳐 억제된다. 1) 편파안테나, circulator와 같은 소자에 의한 자기간섭 신호의 억제, 2) 자기간섭 신호와 반대되는 신호를 출력하여 자기간섭 신호를 제거하는 multi-tap 회로 기반의 아날로그 자기간섭 제거, 3) 잔여 자기간섭 신호를 추정하여 제거하는 디지털 자기간섭 제거. Multi-tap 회로의 각 tap은 시간 지연기, 위상 천이기, 감쇠기로 구성된다. 각 소자의 값은 회로의 주파수 응답이 자기간섭 채널과 반대가 되도록 조정된다. 즉 multi-tap 회로 기반 자기간섭 제거의 성능은 회로가 자기간섭 채널을 얼마나 잘 모사해낼 수 있는지에 좌우된다. [6]에서는 자기간섭 채널 추정의 정확도와 multi-tap 회로의 시간 지연기값 설정에 따른 자기간섭 제거 성능을 분석하였으나, 가변 소자인 위상 천이기와 감쇠기의 해상도가 고려되지 않았다는 한계가 있었다. 위상 천이기와 감쇠기의 해상도는 multi-tap 회로가 자기간섭 채널을 잘 모사해내는 정도와 직결되는 요소로, 성능 분석에 반드시 고려되어야 하는 요소이다.

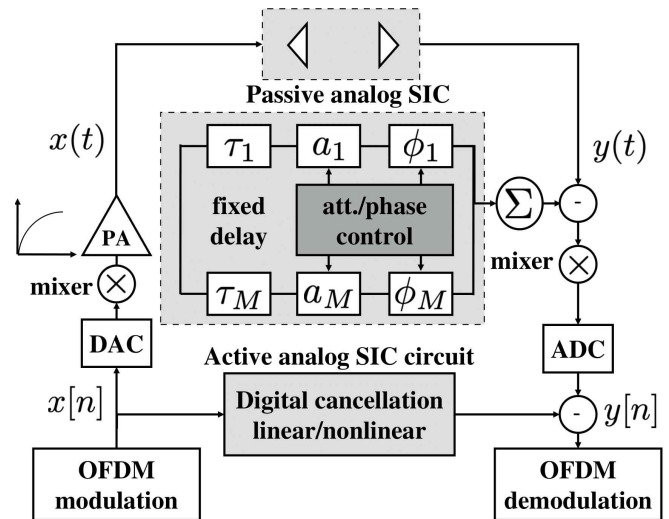


그림 1 전이중 통신 블록 다이어그램

본 논문에서는 B -bit의 위상 천이기와 stepsize가 δ (in dB scale)인 감쇠기를 고려하였다. 시간 지연기의 값은 각각 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_M$ 으로 가정한다. 자기간섭 채널 추정에 다음과 같은 오차가 존재한다고 가정한다.

$$\hat{H}(k) = H(k) + N(k). \quad (1)$$

식 (1)에서 $\hat{H}(k)$, $H(k)$ 그리고 $N(k)$ 는 각각 k 번째 부반송파의 자기간섭 채널 계인 추정값, 자기간섭 채널 계인, 잡음을 나타낸다. Multi-tap 회로의 감쇠기 값(a_o)과 위상 천이기 값(ϕ_o)값은 다음과 같이 회로의 주파수 응답과 추정된 자기간섭 채널간의 차이를 최소화하는 최적화 문제의 해로 결정된다.

$$a_o, \phi_o = \arg \min_{a, \phi} \sum_{k=0}^{K-1} (\hat{H}(k) - H_{\text{cir}}(k))^2. \quad (2)$$

식 (2)에서 $H_{\text{cir}}(k)$ 는 k 번째 부반송파의 회로 주파수 응답 계인을 의미한다. 위상 천이기와 감쇠기의 해상도를 고려하지 않은 경우 회로의 주파

수 응답은 다음과 같다.

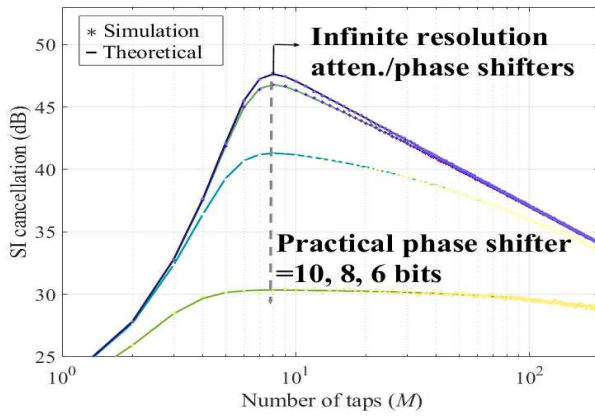


그림 2 Multi-tap 회로의 tap 개수와 소자의 해상도에 따른 자기간섭 제거 성능의 비교

$$\mathbf{H}_{\text{dr}}^o = \mathbf{\Omega} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{\Omega}^* \hat{\mathbf{H}}. \quad (3)$$

식 (3)에서 $\mathbf{\Omega}$ 와 \mathbf{R} 은 회로의 고정된 시간지연값 설정에 의해 결정되는 행렬로, 각각은 다음과 같다.

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} e^{-j\Delta_\omega \tau_1} & e^{-j\Delta_\omega 2\tau_1} & \dots & e^{-j\Delta_\omega K\tau_1} \\ e^{-j\Delta_\omega \tau_2} & e^{-j\Delta_\omega 2\tau_2} & \dots & e^{-j\Delta_\omega K\tau_2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-j\Delta_\omega \tau_M} & e^{-j\Delta_\omega 2\tau_M} & \dots & e^{-j\Delta_\omega K\tau_M} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{\Omega} \mathbf{\Omega}^*.$$

M 은 회로의 tap 개수이다. B -bit의 위상 천이기와 stepsize가 δ (in dB scale)인 감쇠기를 고려하는 경우 i 번째 tap의 위상천이기와 감쇠기에서 발생하는 양자화 오차는 다음과 같은 균일확률변수로 모델링할 수 있다.

$$n_1^a \sim \mathcal{U}(\frac{-\delta}{2}, \frac{\delta}{2}), \quad n_1^\phi \sim \mathcal{U}(\frac{-2\pi}{2^{B+1}}, \frac{2\pi}{2^{B+1}}), \quad (5)$$

이 multi-tap 회로의 자기간섭 제거 성능의 평균값은 다음과 같이 유도된다

$$\begin{aligned} \rho_{rd} = & \frac{1}{K} \text{tr}\{\mathbf{E}[\mathbf{H}\mathbf{H}^*]\} + \frac{(\mathbf{P}\mathbf{A}_1)^2 - 2\mathbf{P}\mathbf{A}_1}{K} \text{tr}\{\mathbf{\Omega} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{\Omega}^* \mathbf{E}[\mathbf{H}\mathbf{H}^*]\} \\ & + \frac{\sigma^2}{K} [(\mathbf{P}\mathbf{A}_1)^2 \mathbf{M} + (\mathbf{A}_2 - (\mathbf{P}\mathbf{A}_1)^2 \mathbf{K} \text{tr}\{\mathbf{R}^{-1}\}) \\ & + (\mathbf{A}_2 - (\mathbf{P}\mathbf{A}_1)^2) \text{tr}\{\mathbf{\Omega} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{\Omega}^* \mathbf{E}[\mathbf{H}\mathbf{H}^*]\}. \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 $\text{tr}\{\cdot\}$ 는 행렬의 trace 연산자, $\mathbf{E}\{\cdot\}$ 는 평균 연산자, σ^2 는 채널 추정 잡음의 분산, P, A_1, A_2 는 위상 천이기와 감쇠기의 해상도와 관련된 상수로 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P &= \frac{2^B}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2^B}\right), \\ A_1 &= \frac{20}{\delta \ln(10)} (10^{\frac{\delta}{40}} - 10^{\frac{-\delta}{40}}), \\ A_2 &= \frac{10}{\delta \ln(10)} (10^{\frac{\delta}{20}} - 10^{\frac{-\delta}{20}}). \end{aligned} \quad (7)$$

그림2는 multi-tap 회로의 tap 개수에 따른 자기간섭 제거 성능을 나타낸 것이다. 맨 위의 그래프는 이상적인 감쇠기와 위상 천이기의 경우에 해당한다. 자기간섭 채널의 tap은 각각 {0dB, -25dB, -30dB, -35dB, -40dB, -45dB, -50dB, -55dB, -60dB, -65dB, -70dB, -75dB}의 감쇠값을 갖도록 설정하였다. 자기간섭 채널추정의 SNR은 30dB로 설정하였다. 유도한 식이 시뮬레이션과 잘 맞음을 확인하였으며, 소자의 해상도 열화에 따라 자기간섭 제거 성능이 크게 저하됨을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 multi-tap 회로의 감쇠기와 위상 천이기의 해상도를 고려한 자기간섭 제거 성능을 수학적으로 분석하였으며 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다. 그동안의 연구에서 감쇠기와 위상천이기의 해상도는 고려된 바 없었으나, 본 연구 결과 위상 천이기와 감쇠기의 해상도가 multi-tap 회로의 자기간섭 제거 성능에 큰 영향을 끼치는 것을 확인하였다. 사용할 소자의 해상도에 따른 자기간섭 제거 성능을 식을 통해 예측하게 함으로써 효율적인 전이중 통신 시스템 설계의 단초를 제공하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. S. Sim, M. Chung, D. Kim, J. Chung, D. K. Kim and C. Chae, "Nonlinear Self-Interference Cancellation for Full-Duplex Radios: From Link-Level and System-Level Performance Perspectives," in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 9, pp. 158-167, 2017.
- [2] M. Chung, M. S. Sim, J. Kim, D. K. Kim and C. Chae, "Prototyping real-time full duplex radios," in IEEE Communications Magazine, vol. 53, no. 9, pp. 56-63, September 2015.
- [3] M. Chung, M. S. Sim, D.-K. Kim, and C.-B. Chae, 'Compact Full Duplex MIMO Radios in D2D Underlaid Cellular Networks: From System Design to Prototype Results,' IEEE Access, Special Section on Recent Advances in Full Duplex Radios and Networks, vol. 5, pp. 16601-16617, Sep. 2017
- [4] J. W. Kwak, M. Soo Sim, I. Kang, J. S. Park, J. Park and C. Chae, "A Comparative Study of Analog/Digital Self-Interference Cancellation for Full Duplex Radios," 2019 53rd Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, 2019.
- [5] G. Y. Suk, S.-M. Kim, J. Kawk, S. Hur, E. Kim, and C.-B. Chae, "Full duplex integrated access and backhaul for 5G NR: Analyses and prototype measurements," 2020. arXiv:2007.03272, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2007.03272>
- [6] D. Liu. et al., "On the analog self-interference cancellation for full-duplex communications with imperfect channel state information." IEEE Access., 5, 9277-9290, 2017