이진 부호 기반 Successive Integer Forcing 연구

채성호, *안석기
광운대학교, *한국전자통신연구원

shchae@kw.ac.kr, *seokki.ahn@etri.re.kr

Successive Integer Forcing with Binary Channel Codes

Sung Ho Chae, *Seok-Ki Ahn
Kwangwoon Univ, *Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI)

요 약

본 논문은 기존 Integer Forcing Multiple-Input Multiple-Output (IF MIMO)를 개선하여, 기존 IF MIMO 기법보다 항상 우수한 성능을 달성하는 Successive IF 를 이진부호로 구현하는 방법을 제안한다. 제안된 successive IF 기법은 기존 IF MIMO 와 달리 합 복조를 순차적으로 수행하며, 이 과정에서 얻을 수 있는 잡음 감소 효과로 인하여 기존 IF MIMO 기법 대비 항상 향상된 성능을 달성할 수 있다. 또한 successive IF 와 MMSE-SIC 기법을 결합하여 채널변화에 강인한 특성을 가지는 successive cancellation IF (SC-IF) 기법을 추가적으로 제안한다.

Ⅰ. 서 론

6 세대 통신은 사물인터넷, 가상/증강현실, 실시간 고화질 비디오 스트리밍, 자율주행 등의 새로운 서비스를 지원하기 위해, 5 세대 통신 대비 2 배 이상의 높은 주파수 효율을 달성해야 한다 [1]. 주파수 효율을 높이기 위한 핵심기술로 multiple-input multiple-output (MIMO)을 활용한 다중화 (multiplexing) 전송을 들 수 있다. 하지만 현재 널리 쓰이고 있는 minimum mean square error (MMSE) 기법 등의 선형 MIMO 수신기법은 구현 복잡도는 낮으나 복호 과정에서 잡음 증폭이 너무 심하기 때문에, 현실적인 signal-to-noise ratio (SNR) 영역에서는 3 layer 이상의 MIMO 다중화 전송이 불가능하다는 큰 한계점이 있다. 반면, maximal likelihood (ML) detection 등의 비선형 수신기법을 사용하는 경우, 선형 수신기에 비해 잡음 증폭은 상당히 줄일 수 있으나 계산 복잡도가 크게 증가한다는 단점이 있어서 실제 통신 시스템에서는 잘 쓰이지 않고 있다.

이러한 문제를 해결하기 위하여, 최근 정보이론 학계에서는 새로운 선형 MIMO 다중화 송수신 기법인 integer-forcing (IF) MIMO 기법이 제안되었다 [2]. IF MIMO 기법은 수신단에서 선형 필터를 사용하여 유효정수채널행렬을 만든 뒤, 각 수신 안테나에서 데이터 스트림들의 정수 합을 먼저 복호하고, 그 후에 복호된 정보를 바탕으로 원본 데이터 스트림들을 복원하는 기법이다. 이때 잡음 증폭을 최소화하는 방향으로 유효정수채널행렬을 결정할 수 있는 자유도가 있으므로, 데이터 스트림을 먼저 분리한 뒤 복호를 수행하기 위해 유효정수채널행렬을 항상 단위행렬로 설정해야 하는 기존 선형기법 대비, 잡음 증폭을 크게 줄일 수 있다는 장점이 있다. 단 이러한 복호 동작이 가능하기 위해서는 데이터 스트림들의 정수 합이 또다른 부호어가 되어야 하는 조건이 필요하다. 이를 위해, 기존 문헌에는 lattice 부호(code) 기반의 IF MIMO 기법이 제안되었으나 [2], lattice 부호는 상용 이진 부호에 비해 구현 복잡도가 매우 높다는 단점이 있다. 이를 해결하고자 매우 최근에, IF MIMO 기법을 상용화된 이진부호로 구현하는 채널 부호화 기법 및 송수신 알고리즘이 개발되었다 [3]. 논문 [3]에서 제안된 아이디어는 송신단에서는 multi-level coding 과 natural bits-to-symbol mapping 을 사용하며, 수신단에서는 multi-stage 복호를 사용하여, 결과적으로 multi-level 부호에 속한 각 레벨의 이진부호를 마치 lattice 부호처럼 사용할 수 있도록 한다. 제안된 기법은 MMSE successive interference cancellation (SIC) 기법과 비슷한 복잡도를 가지며, 채널 변화가 작은 환경에서는 상용 선형 MIMO 기법 대비 큰 성능 이득을 달성한다.

본 연구에서는, 논문 [3]에서 제안된 IF MIMO 기법을 개선하여, 기존 IF MIMO 기법보다 항상 우수한 성능을 보이는 Successive IF 기법을 이진부호로 구현하는 방법을 제안한다. 또한 IF MIMO 는 데이터 스트림들의 정수 합이 또다른 부호어가 되도록 하기 위해, 유효정수채널행렬을 채널변화와 관계없이 부호어의 심볼들을 모두 전송하는 동안 같은 값으로 고정해야 하는데, 그 결과 채널 변화가 상당히 큰 환경에서는 기존 수신기법인 MMSE-SIC 보다 성능이 열화 된다는 단점이 발생한다. 실제 통신 환경에서는 주파수/시간 축에서의 채널변화가 큰 경우도 존재하기 때문에 이에 대한 해결책은 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 채널 변화에 강인하도록 기존 IF MIMO 송수신 알고리즘을 개선하여, 실제 통신환경에서 항상 기존 선형 기법보다 높은 전송률을 달성하는 새로운 기법을 제안하고자 한다.

Ⅱ. 제안 송수신 기법

본 논문에서는 분량상 제안 기법에 대한 핵심 아이디어만을 설명하며, 구체적인 송수신 알고리즘 및 수학적 분석은 [4]에 기술되어 있다.

논문 [3]에서 제안된 기존 IF MIMO 기법에서는, 송신단에서 각 부호어의 전송이 모두 끝난 뒤, 모든 수신 안테나에서 동시에 독립적으로 데이터 스트림들의 정수 합을 복호하고 (즉, 합 복호 (sum decoding)), 그 후 유효정수채널행렬의 역행렬을 합 복호기의 출력값에 곱하여 원래의 데이터 스트림을 복원하는 방법을 사용하였다. 반면에 본 논문에서 새롭게 제안하는 successive IF 기법은 위와 같은 병렬적 합 복호가 아닌, 첫번째 수신안테나에서 시작하여 마지막 수신 안테나까지 차례대로 합 복호를 수행하는 순차적 합 복호를 수행한다. 좀 더 구체적으로 살펴보면, 부호어들의 선형 정수 결합 역시 또 다른 부호어라는 성질을 이용하여 첫 번째 수신안테나에서 합 복호를 수행한 뒤, 복호된 정보를 바탕으로 첫 번째 수신안테나에서 관측되는 유효 잡음 성분을 추출한다. 수신단에서 선형 필터를 적용하게 되면 각 수신 안테나에서 관측되는 유효 잡음 성분들 사이에는 상관관계가 존재하기 때문에, 첫 번째 안테나에서

관측되는 유효 잡음 성분을 추출하여 나머지 수신안테나의 수신 신호에 적절히 빼면, 결과적으로 나머지 수신안테나에서 합 복호를 수행할 때 영향을 주는 유효 잡음전력을 크게 낮출 수 있다. 그 후, 두 번째 수신 안테나의 합 복호를 수행하고, 이를 바탕으로 두 번째 수신안테나에서 관측되는 유효 잡음 성분을 추출한다. 이와 같은 과정을 모든 수신 안테나에 대해 순차적으로 적용한다. 모든 수신안테나에서의 합 복호가 끝난 후, 기존 IF MIMO 기법과 동일하게 유효정수채널행렬의 역행렬을 합 복호기의 출력값에 곱하여 데이터 스트림을 복원한다.

이와 같은 successive IF 기법은, 순차적 합 복조 과정에서 얻을 수 있는 잡음 감소 효과로 인하여 기존 IF MIMO 기법보다 항상 향상된 성능을 달성할 수 있다. 하지만 부호어를 전송하는 동안 채널의 변화와 관계없이 유효정수채널행렬을 하나의 값으로 고정해서 사용한다는 점은 기존 IF MIMO 기법과 동일하기 때문에, 채널 변화가 심해지면 기존 IF MIMO 기법보다는 그 정도가 작긴 하지만, 성능이 열화 된다는 공통된 한계점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이점을 개선하기 위하여, successive IF 와 MMSE-SIC 기법을 결합한 successive cancellation IF (SC-IF) 기법을 추가적으로 제안한다. SC-IF 기법은 아래와 같은 단계로 구성되는 알고리즘으로 수행된다.

① 수신단은 수신신호를 IF 필터와 MMSE 필터에 병렬로 각각 통과시킨다. IF 필터 통과 후 얻은 유효채널에서, 각 수신 안테나에서의 채널용량의 최소값을 계산한다. 또한 MMSE 필터 통과 후 얻은 유효채널에서, 각 수신 안테나에서의 채널용량의 최대값을 계산한다. 그 후 두 값을 서로 비교한다.

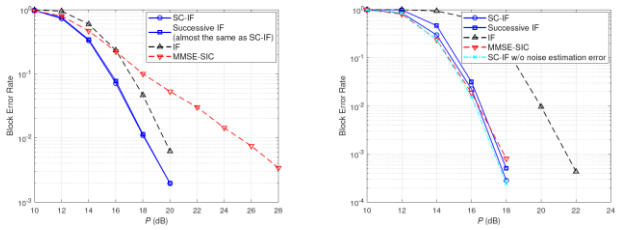
② 1 번 단계에서 만약 MMSE 필터 통과 후 얻은 최대 채널용량이 IF 필터 통과 후의 최소 채널용량보다 크다면, 해당 스트림에 대하여 합 복호가 아닌 단일 스트림 복호를 수행한 뒤, SIC 를 수행한다. 그 후 해당 스트림에 대한 SIC 를 통해 얻은 새로운 채널 입출력 관계를 고려하여, 1 번 과정을 다시 수행한다.

③ 1 번 단계에서, 만약 2 번과 반대 상황이라면, successive IF 합 복호를 수행한다.

이와 같은 SC-IF 기법은 MMSE-SIC 기법과 successive IF 기법을 모두 포함하는 기법으로서, MMSE-SIC 의 채널 변화에 대한 강인성 특성을 이어받아, 기존 IF MIMO 기법에 비해 채널 변화에 매우 강인하다. 또한 MMSE-SIC 를 통해 SNR 이 높은 스트림들을 우선적으로 복호한 뒤 SIC 를 수행하면, 나머지 스트림들의 합 복호 시의 유효 SNR 을 증가시킬 수 있기 때문에, 나머지 스트림들에 대한 successive IF 복호 성능을 향상시킬 수 있다는 장점이 있다. 또, 앞에서 설명한 1 번 단계를 거칠 때 마다 유효정수채널행렬을 다시 구하므로, 채널에 알맞게 유효정수채널행렬을 적응적으로 변화시킬 수 있다는 장점이 있다. 반면 채널 변화가 적거나 채널 상관관계가 큰 경우에는 MMSE-SIC 보다 successive IF 성능이 훨씬 우수한데, SC-IF 는 successive IF 기법을 포함하고 있으므로 이러한 환경에서도 여전히 성능이 우수하다. 따라서 SC-IF 는 MMSE-SIC 와 successive IF 의 장점을 모두 포함하고 있으며, 결과적으로 채널변화, 채널상관관계, 달성주파수효율 (target spectral efficiency) 등의 파라미터와 관계없이 전 SNR 영역에서 기존 IF MIMO, successive IF 를 포함한 모든 선형 MIMO 기법 보다 우수한 성능을 보인다 [4].

Ⅲ. 성능 분석

그림 1 은 채널 상관계수가 0 인 tapped delayed line (TDL)-A 채널에서 부호율이 0.6 인 5 세대 NR LDPC 부호를 사용하여 4x4 MIMO 64QAM 전송 시, SC-IF 기법, successive IF, 기존 IF, MMSE-SIC 기법의 block error rate (BLER) 성능을 비교한 결과를 보여준다. 채널 변화량에 따른 BLER 성능 경향을 살펴보기 위해 채널변화가 거의 없는 채널 (very short RMS delay spread)과 채널변화가 매우 큰 채널 (very long RMS delay spread)을 고려하였다. 그림 1 에서도 알 수 있듯이, 채널변화가 없는 경우에는 기존 IF MIMO, successive IF, SC-IF 의 성능이 모두 MMSE-SIC 보다 우수하다. 또한, 채널변화가 매우 큰 경우에는 기존 IF MIMO 기법의 성능이 상당히 열화 된다는 것을 확인할 수 있으며, successive IF 기법은 상대적으로 채널 변화에 강인하지만, MMSE-SIC 대비 BLER=0.01 기준 0.2dB 정도 열화된 성능을 보인다. 하지만 SC-IF 는 MMSE-SIC 를 포함하는 기법이기 때문에, 채널 변화가 심한 경우에도 동일한 성능을 달성할 수 있다.



(a) TDL-A channel with very short RMS delay spread (δ = 10 ns). (b) TDL-A channel with very long RMS delay spread (δ = 1000 ns).

그림 1: 채널변화량에 따른 제안기법의 BLER 성능

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) grant funded by the Korean government (MSIT) (2021-0-00749, RF Performance Verification Platform Development for 5G+ Communication System).

참 고 문 헌

[1] Samsung Research."6G white paper: The Next Hyper Connected Experience for All", pp. 1-46, Dec. 2020. (https://cdn.codeground.org/nsr/downloads/researchareas/20201201_6G_Vision_web.pdf)

[2] J. Zhan, B. Nazer, U. Erez, and M. Gastpar, "Integer-forcing linear receivers," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 60, no. 12, pp. 7661- 7685, Dec. 2014.

[3] S. H. Chae, M. Jang, S.-K. Ahn, J. Park, and C. Jeong, "Multilevel coding scheme for integer-forcing MIMO receivers with binary codes," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 16, no. 8, pp. 5428- 5441, Aug. 2017.

[4] S.-K. Ahn, S. H. Chae, K. T. Kim, and Y.-H. Kim, "Successive Cancellation Integer Forcing via Practical Binary Codes", submitted to IEEE Trans. Wireless Commun.