

# 느린 주파수 도약 환경에서 부분 대역 재밍에 강인한 protograph 기반 LDPC 부호 설계

김찬기, 안형배, 노중선, 김강산\*, 송홍엽\*, 안재하\*\*

서울대학교, \*연세대학교, \*\*국방과학연구소

{carisis, ahb0429}@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr, \*{gs.kim, hysong}@yonsei.ac.kr, \*\*anjaha@add.re.kr

## Design of Protograph Based LDPC Codes for Partial-band Jamming under Slow Frequency Hopping Spread Spectrum System

Chanki Kim, Hyoung-Bae Ahn, Jong-Seon No, \*Gangsan Kim,, \*Hong-Yeop Song, \*\*Jaeha Ahn  
Seoul National Univ., \*Yonsei Univ., \*\*Agency for Defence Development

### 요약

본 논문에서는 느린 주파수 도약 대역 재밍 환경에서 부분 대역 재밍에 강인한 protograph 기반 LDPC 부호를 설계 방법을 다루고, 이를 변형된 PEXIT 알고리즘을 이용한 이론적 방법 및 실질적인 시뮬레이션을 통해 제안된 설계의 우수성을 확인한다. 이를 위해 느린 주파수 도약 환경 및 부분 대역 재밍에 대한 시스템 모델을 설명한다. Protograph 기반 LDPC 부호의 설계를 위해 특정 구조의 기초 행렬을 제안하고, 본 시스템 환경 및 제안된 LDPC 부호의 우수함을 PEXIT을 변형하여 설명한다. 마지막으로 802.16e에서 사용된 상용 LDPC 부호 및 규격 LDPC 부호와의 시뮬레이션을 통해 유한 길이의 LDPC 환경에서도 성능이 우수함을 보인다.

### I. 서론

군 통신 환경에서 주파수 도약 시스템은 환경의 특수한 요구 조건을 만족하기 위해 도입하고 있다. 재밍은 공격자가 의도적으로 군통신을 방해하기 위해 삽입하는 간섭 신호로, 항재밍은 군통신 시스템의 주요한 요구 조건이다. 주파수 도약 시스템은 주파수 대역을 무작위하게 도약하므로, 공격자가 신호가 있는 대역을 찾아 재밍을 삽입하는 것을 어렵게 한다. 도약의 상대적인 속도에 따라 빠른 주파수 도약 및 느린 주파수 도약으로 구분하며, 빠른 주파수 도약이 항재밍 성능이 높지만 데이터 전송 속도가 낮다.

최근 차세대 전장 환경에 대비한 고속 데이터 전송 군 통신 시스템 설계를 위해, 느린 주파수 도약 시스템이 활용될 수 있다. 느린 주파수 도약에 의해 도약 속도를 늦추는 대신 다른 기법을 통해 필요한 항재밍 성능을 확보할 수 있는데, 항재밍 부호 기법이 그 중 하나이다. 부호 기법은 낮은 전력 대 잡음 비 (SNR)로 비트 오류율을 낮추고, 전체 프레임을 보호하는 기법으로 재밍에 의해 발생하는 군집 오류에 특화된 오류 정정부호를 설계하여 항재밍 성능을 확보할 수 있다. 대표적으로 RS 연결 부호 [1]에서 이와 같은 시도가 이루어진 바 있다.

LDPC 부호는 높은 복호 성능 및 낮은 복호 복잡도로 인해, 802.16e, DVB-S2와 같은 현존 규격에서 활용되고 있으며, 극 부호와 함께 5G 환경에서 도입될 부호로 각광받고 있다. Protograph 기반 LDPC 부호는 낮은 부호화 복잡도로 통신 규격에서 일반적으로 활용되며, 기초 행렬을 이용한 부호 설계 및 성능 분석이 용이하다. Protograph 기반 LDPC 부호의 점근적 성능을 측정하기 위해 PEXIT 알고리즘이 활용된다. [2]

본 논문에서는 느린 주파수 도약 및 부분 대역 재밍 모델에 대해 설명한다. 설명한 모델을 바탕으로, 제안한 특정 구조의 기초 행렬의 성능이 일반적인 규격 LDPC 부호보다 점근적으로 우수함을 PEXIT 알고리즘을 통해 보인다. 마지막으로, 유한 길이의 LDPC 부호에 대해 동 부호길이의 802.16e 규격의 LDPC 부호와 시뮬레이션을 수행하여, 유한 길이의 LDPC 부호에서도 성능이 우수함을 보인다.

### II. 본론

#### II.1 시스템 모델

$k$ 개의 정보 비트가 LDPC 부호에 의해  $n$ 개의 비트로 부호화되어 한 프레임을 형성한다. 변복조는 BPSK로 하나의 홉은  $h$ 개의 비트가 포함되며, 느린 주파수 도약에 의해 한 프레임 내에서는 작은 수의  $L = n/h$ 개의 홉이 포함된다. 잡음  $n \sim N(0, N_0/2)$  및 부분 대역 재밍  $j \sim N(0, N_j/2)$ 는 다른 분산을 지닌 가우시안 분포를 보인다고 가정하며, 또한 재밍의 분산이 잡음 분산 대비 매우 크다고 가정한다. 그 경우, 송신단의 변조 값  $x_i \in \{-1, 1\}$  및 수신단에서 받는 채널 값  $y_i$ 의 관계는 다음과 같다.

$$y_i = \sqrt{E_s} x_i + n + \delta(\lfloor i/h \rfloor) j, i \in [0, n-1]$$

여기서  $\delta(t)$ 는 1이 될 확률이 상수 값  $\rho$ 인 이진 확률 과정이며, 즉, 각 홉이 재밍이 존재할 확률은  $\rho$ 로 홉 간 상호독립이다.

LDPC 복호기는 각 홉의 재밍 유무 및 잡음의 분산 등의 채널 정보를 알고 있다고 가정하며, 연관정의 신뢰 전파 (BP, belief propagation) 알고리즘으로 복호한다고 가정한다.

#### II.2 항재밍 protograph 기반 LDPC 설계 및 PEXIT 알고리즘

Protograph 기반 LDPC 부호의 기초 행렬  $a \times b$   $B$ 는 원소는  $(n-k) \times n$  패리티 검사 행렬  $H$ 의 submatrix로 그림 1와 같이 대응된다.

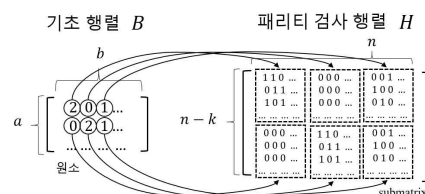


그림 1. Protograph 기반 LDPC 부호에서 기초 행렬 및 패리티 검사 행렬

따라서, protograph 기반 LDPC 부호의 각 차수를 결정하고, 설계하는 과정은 기초 행렬  $B$ 의 원소 값을 결정하는 과정과 같다. 어떤 기초 행렬의 성능 우열을 보이는 과정은 PEXIT 알고리즘을 활용함으로써 가능하다. 기존의 PEXIT 알고리즘은 AWGN 환경에 특화되어 있으며 재밍이 존재하는 경우를 위해 변형된 PEXIT 알고리즘은 대부분 논문 [2]의 방법을 따르나, 처음 initialization 과정이 변형된다. Initialization 과정에서 채널 상호 정보 값  $I_{ch}^{(j)}, j \in [b-1]$  중 첫  $b/L$ 개의 값을 0으로 고정하며 남은 채널 상호 정보 값은 기존과 같이 결정한다. 그 이후반복에 따른 교환 상호 정보 값이 1로 수렴하는 최소의  $E_b/N_0$ 을 찾으며 이를 BP threshold로 정의한다. BP threshold가 낮은 LDPC 부호가 더 높은 성능을 지닌다고 볼 수 있다.

제안된 PEXIT 알고리즘을 이용하여, 부호율이  $1/2$ 로 생성되도록  $L = 3, 3 \times 6$ 인 기초행렬에 대해 그림 2의 구조를 가정하자.

$$B = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & a_1 & a_2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & a_1 & a_2 \end{pmatrix}$$

그림 2. 제안하는 기초 행렬 구조

기초 행렬을 완성하기 위해  $(a_1, a_2)$ 의 값을 결정하는 과정에서 modified PEXIT 알고리즘에 의해 기존 PEXIT에 의한 BP threshold를 높이지 않으면서, 최소 BP threshold를 지닌 값을 선택한다. 다만  $a_1 = a_2$  조건의 정규 LDPC 구조의 경우, protograph가 아닌 일반적인 정규 LDPC 부호의 BP threshold 값과 같다는 점을 활용할 수 있다.

PEXIT 알고리즘에 의해 일반  $(d_v, d_c) = (3, 6)$  정규 LDPC 부호, 제안된 기초 행렬에 의해 생성된 LDPC 부호의 정규 및 비정규에서의 최소 BP threshold 값인,  $[a_1, a_2]$ 에 대해 기존 PEXIT 알고리즘에 의한 AWGN에서의 값 및 변형된 알고리즘에 의한 BP threshold는 표 1과 같다.

BP thres.(dB)	(3,6) 정규	[3,3]	[1,3]
Modified	4.569	4.291	4.072
AWGN	1.163	1.163	0.881

표 1. PEXIT에 의한 BP threshold 값 비교

Modified PEXIT에 의해 제안하는 기초 행렬에 의한 BP threshold가 정규 (3,6) 부호보다 낮게 나타났다.  $a_1 = a_2$ 인 정규 구조보다 비정규 구조의 경우가 낮은 BP threshold가 낮게 나타났다.

### II.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위해 아래의  $(n, k) = (2304, 1152)$ 인 802.16e, (3,6) 정규 LDPC 부호,  $[a_1, a_2] = [3, 3], [1, 3]$ 의 제안된 기초 행렬에 의한 protograph LDPC 부호에 대해 실험을 진행하였다. 실험 환경에서 BPSK 및 홉 당 768비트가 포함되며, 한 프레임 당 3개의 홉이 속하도록 설정하였다. 또한 각 홉이 재밍이 걸릴 확률을  $\rho = 0.01$ 인 경우에 대해 측정하였으며, 수신기가 채널 정보를 파악하므로, 재밍이 걸린 위치에서 LLR을 0으로 설정한 후 복호를 진행하였다. 재밍의 전력값을 보여주는  $E_s/N_j$  값을 매우 낮게 설정하여, 재밍이 걸린 홉에 대해서는 각 비트당 절반의 비트가 오류가 되도록 하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 3과 같다.

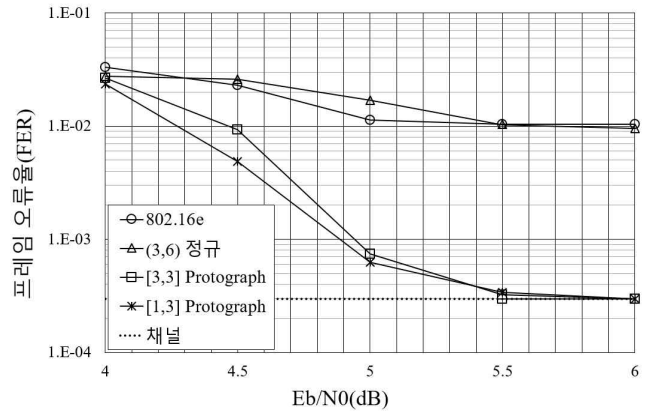


그림 3. 시뮬레이션 결과

그림 3에서 802.16e 및 (3,6) 정규 부호는 성능이 일정 수준에서 정체되는 반면, 제안한 구조에 의한 부호는 프레임 오류율이 상당히 낮은 수준까지 감소하였다. 그림 3 중 '채널'의 성능은 3개의 홉 중 하나의 홉에 재밍이 존재할 경우까지 수정가능하다고 가정할 후의 성능으로, 현 부호율에서 2개 이상의 홉 내의 재밍을 고칠 수 없으므로, 표기된 위치는 고칠 수 있는 최대의 성능이 된다. 그런 점에서, 제안한 부호가 일정  $E_b/N_0$  이상에서 가능한 최대의 성능이 나타남을 확인할 수 있다.

### III. 결론

본 연구에서는 느린 주파수 도약 대역 재밍 환경에서 부분 대역 재밍에 강인한 protograph 기반 LDPC 부호를 설계 방법을 제안하였다. 이를 이론적으로 검증할 수 있는 변형된 PEXIT 알고리즘 및 유연 길이의 LDPC 부호에 대한 시뮬레이션을 통해 제안된 설계의 우수성을 확인하였다. 제안된 기초 행렬 외에도 다양한 부호율 및 큰 기초 행렬에 대한 protograph LDPC 부호의 설계가 가능할 것으로 보이므로, 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 광주과학기술원 전자전통화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

[1] C. D. Frank and M. B. Pursley, "Concatenated coding for frequency-hop spread-spectrum with partial-band interference," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 44, pp. 377-387, Mar. 1996.

[2] L. Gianluigi and M. Chiani, "Protograph LDPC codes design based on EXIT analysis," *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, Washington DC:USA, 2007.