

주파수 도약 대역 확산 시스템에서 추적 재밍에 강인한 부분 균일 항재밍 LDPC 부호 설계

김찬기, 양필웅, 노종선, 박진수*, 송홍엽*, 한성우**

서울대학교, *연세대학교, **국방과학연구소

{carisis, yangpw} @ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr, *{js.park09, hysong}@yonsei.ac.kr, **hansw79@add.re.kr

Construction of Anti-Jamming Partially Regular LDPC Codes for Follower Jamming under Frequency Hopping Spread Spectrum System

Chanki Kim, Pilwoong Yang, Jong-Seon No, Jin Soo Park*, Hong-Yeop Song*,

Sung Woo Han**

Seoul National Univ., *Yonsei Univ., **Agency for Defence Development

요약

본 논문은 주파수 도약 시스템 및 추적 재밍 환경에 강인한 LDPC 설계 방법에 대한 연구이다. 이 논문에서는 전술통신 시스템에 응용되는 주파수 도약 모델 및 추적 재밍에 대한 모델링을 기반으로 한다. 모델에 의해 각 홉 내의 심볼 위치에 따른 확률적 오류 분포를 유도한 후, 그 오류 분포를 단순화하는 과정을 수행한다. 논문 [1]에 언급된 부분 균일 LDPC 부호를 및 주어진 환경을 이용하여 단순화된 밀도 진화 식을 유도한 후 최적화된 차수 분포를 유도한다. 유도된 차수 분포 및 대조군, 그리고 같은 부호율의 DVB-S2에서 사용된 LDPC 규격에 대해 MIL-STD-141-110B에 기반한 32-QAM 환경에서의 시뮬레이션을 통해 유도된 부분 균일 LDPC 부호가 높은 항재밍 성능이 나타남을 보여줄 수 있었다.

I. 서론

대역 확산 시스템은 높은 보안성이 보장되므로 전술 통신 시스템에 많이 응용된다. 그 중 주파수 도약 시스템은 단위 시간 당 세분화된 주파수 홉 중 하나를 의사 무작위한 규칙에 의해 선택하게 되며, 공격자가 도약 규칙에 대한 정보가 없다면 높은 항재밍 능력을 지니게 된다.

일반적으로 공격자가 도약 규칙을 파악하기는 어렵는데, 특히 빠른 주파수 도약(FFH)의 경우 공격자는 주파수 스캔이 완료되기 전에 이미 다른 주파수 홉으로 이동하기에 공격자는 도약 규칙에 대한 정보를 획득하기 어려워진다. 이런 경우 공격자는 무작위한 대역에 재밍을 걸게 되며 이는 부분 대역 재밍의 대표적인 시나리오가 된다.

위 시나리오가 가졌던 부분 대역 재밍에 대해 채널 부호를 이용한 항재밍 성능을 얻는 연구는 지속적으로 있었다. 특히 Viterbi는 논문 [2]에서 길쌈 부호에 소실 삽입 기법을 처음 도입했으며, 최근의 논문 [3]에서는 RS-BCH 연결 부호에 소실 삽입을 이용하는 기법이 연구되었다.

추적 재밍은 공격자가 주파수 도약 규칙을 완전히 파악하지는 못하지만 높은 확률로 스캔할 수 있다고 가정한다. 따라서 공격자는 파악된 주파수 대역에 재밍을 걸게 되므로 더욱 강력하다. 최근에는 고속 데이터 전송을 위해 느린 주파수 도약(SFH)을 많이 이용하고 있으며, 빠른 주파수 도약에 비해 추적 재밍 상황에서 취약하다.

LDPC 부호는 터보 부호와 함께 차세대 통신 규격에 이용되는 매우 높은 성능을 지닌 부호로 부호 설계의 자유도가 높기에 블록 페이딩[4]과 같은 특수한 채널에 대한 부호로서 연구된 바 있다.

이 논문에서는 주파수 도약 시스템 및 추적 재밍에 대한 가정에 의해 나타나는 특수한 채널 환경에 대해 부분 균일 LDPC 부호에 대해 밀도 진화 기법을 이용해 이론적 분석을 수행하고 이를 전술 통신 환경에서의 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

II. 본론

II.1 주파수 도약 및 추적 재밍 모델

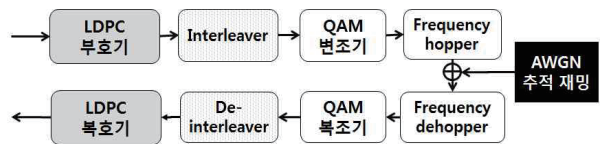


그림 1. 주파수 도약 및 추적 재밍 모델

전체적인 시스템 모델은 그림 1과 같으며 채널 환경으로서 가산성 백색 가우시안 잡음(AWGN) 및 추적 재밍이 동시에 존재하는 상황을 가정한다. 중요한 모수로서 비트 단위의 E_b/N_0 (신호 대 잡음 비) 및 E_b/N_j (신호 대 재밍 비)가 있다. 또한 주파수 도약 시스템에서는 부호 내부의 다수의 고정된 크기의 홉이 존재하며 각 홉마다 재밍이 걸릴 확률인 ρ 및 전체 홉 대비 추적 재밍의 비율인 μ 가 존재한다.

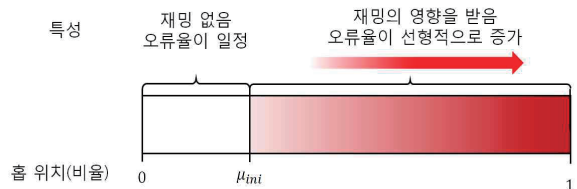


그림 2. 추적 재밍 상황 및 홉 위치에 따른 평균적인 오류율

추적 재밍을 수행하기 위해 공격자는 주파수 스캔을 수행하여야 하며, 본 논문에서는 스캔 속도가 고정되어 있을 경우 추적을 시작한 뒤 신호를 발견하는 순간까지의 시간은 무작위하다고 가정한다. 즉, 각 홉에 적용되는 μ 값이 $[\mu_{mi}, 1]$ 의 균등 분포를 지닌다고 가정한다.

설명된 환경은 그림 2와 같이 표현되며 평균적인 흡의 상대적인 위치에 따른 오류 확률의 변화를 기준으로 두 영역으로 나눌 수 있다. 흡 중 $[0, \mu_{mi})$ 내의 속하는 심볼은 재밍이 물리적으로 접근할 수 없는 영역으로 단순히 AWGN의 오류율이 적용된다. 반면 $[\mu_{mi}, 1]$ 의 영역은 재밍의 위협이 존재하는 영역으로 평균적인 흡의 오류율로 선형적인 형태가 나타난다. 그러나 위와 같은 오류 분포로 LDPC 부호의 이론적인 성능 분석 기법을 적용하는 것은 어려우므로 채널을 단순화할 필요가 있다.

II.2 추적 재밍을 위한 밀도 진화 기법

수식으로 표현하기 위해 제안된 오류 분포의 비례 단순화된 채널 분포를 가정하였으며 또한 소실 채널에서의 밀도 진화 기법을 이용하였다. 또한 논문 [1]에서 이용한 부분 균일 LDPC 부호에 대해 밀도 진화 기법을 적용하였으며 구체적인 표현식은 아래와 같다.

부분 개수 n_{frac} 및 각 부분에 대한 비율 값

$$\lambda = (\lambda_{v_1}, \lambda_{v_2}, \dots, \lambda_{v_{n_{frac}}})$$

및 각 부분의 차수 분포인

$$d = (d_{v_1}, d_{v_2}, \dots, d_{v_{n_{frac}}})$$

가 모두 정의되었다고 가정하자. 그 경우, 밀도 진화식은 임의의 값인 P_1, P_2 에 대해, 아래와 같이 표현된다.

$$\epsilon_i = (P_2 - P_1) \frac{i-1}{n_{frac}} + P_1, \quad i \in [1, n_{frac}]$$

(변수 노드) : $p_{l+1,i} = \epsilon_i q_i^{d_{v_i}-1}, \quad i \in [1, n_{frac}]$

(검사 노드) : $q_{l+1} = 1 - (1 - \prod_{i=1}^{n_{frac}} \lambda_{v_i} p_{l,i})^{d_i-1}$

밀도 진화로부터 고정된 부호율을 지닌 부호에 최적의 차수 분포를 유도할 수 있으며, 이를 위해서는 밀도 진화에서 가장 높은 소실율에 대해 부호의 오류 확률이 0으로 수렴하는 조합을 찾아내는 방법을 사용한다. 본 논문에 제시된 밀도 진화 기법에서는 두 변수 P_1, P_2 를 조절해가며 최적의 차수 분포를 찾아낼 수 있으며 아래의 시뮬레이션에서는 둘 중 한 변수만을 조정하여 분포를 유도하였다.

II.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 MIL-STD-141-110B에 제시된 32-QAM의 변복조 방식을 이용하였으며, 각 흡의 크기는 180 심볼로 가정하였다. 부호는 부호율 1/3 및 부호 길이 16200 비트로 설정하였으며, 이 경우 한 부호 내의 18개의 흡이 속하게 된다. 테스트한 LDPC 부호는 3가지이며 위성 통신 규격인 DVB-S2 및 제안된 밀도 진화 기법을 통해 얻어진 각 흡당 심볼 비율 $\lambda = (\frac{1}{3}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6})$ 에 대응되는 차수 분포 $d = (d_{v_1}, d_{v_2}, \dots, d_{v_{n_{frac}}})$ 에 대해 (4,2,2,3,3,4)으로 만들어진 '설계 1', 그리고 같은 심볼 비율 및 차수 분포 (4,2,4,2,3,3)을 지니며 단순히 패리티검사행렬의 특정 열을 자리바꿈한 대조군인 '설계 2'가 존재한다. '설계 1'과 '설계 2'는 추적 재밍이 아닌 환경에서는 완전히 동일한 성능으로 나타나며 DVB-S2 규격과의 비교시 제안된 설계보다 DVB-S2 규격이 가장 높은 성능으로 나타난다. 그러나 추적 재밍 환경 $\rho = 0.335$ 및 $\mu_{mi} = 0.33, E_b/N_j = 0[dB]$ 로 주어진 환경에서 E_b/N_0 에 따른 프레임 오류율(FER) 변화를 측정된 시뮬레이션 결과는 그림 3과 같이 나타난다.

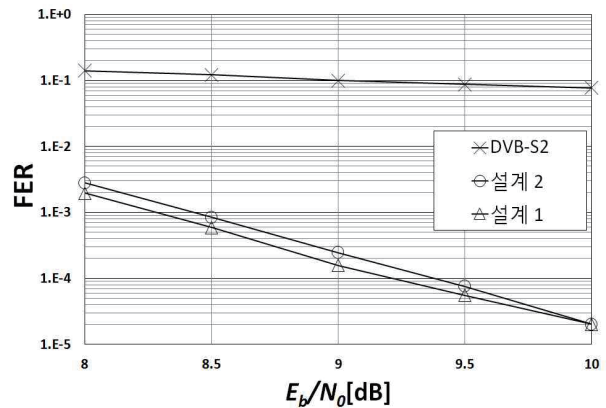


그림 3. 추적 재밍 환경에서의 E_b/N_0 에 따른 프레임 오류율

그림 3의 결과에서 항재밍 능력이 없는 DVB-S2 규격 대비 '설계 1' 및 '설계 2'는 높은 성능으로 나타난다. 그 중 모든 E_b/N_0 구간에서 '설계 1'이 '설계 2'보다 우수한 성능으로 나타나며 앞서 제시된 밀도진화 기법이 실제 시뮬레이션에도 잘 적용됨을 확인할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 주파수 도약 시스템에서 추적 재밍에 대한 더욱 구체적인 모델링을 수행하였고, 그에 적합한 LDPC 부호를 설계하기 위해 단순화된 채널 모델과 변형된 밀도진화 기법을 사용하였다. 마지막으로 주파수 고효율 및 추적 재밍 환경에서 LDPC 통신 규격 및 다른 부분 균일 LDPC 부호와의 시뮬레이션을 통해 제안된 방법을 통해 얻은 최적 차수 분포가 추적 재밍 환경에서도 높은 성능을 지님을 확인할 수 있었다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by EWRC program of Agency for Defence Development of Korea.

참고 문헌

- [1] Rahnvard, Nazanin, Hossein Pishro-Nik, and Faramarz Fekri. "Unequal error protection using partially regular LDPC codes." Communications, IEEE Transactions on 55.3 (2007): 387-391.
- [2] Viterbi, A. J. "A robust ratio-threshold technique to mitigate tone and partial band jamming in coded MFSK systems." Military Communications Conference-Progress in Spread Spectrum Communications, 1982. MILCOM 1982. IEEE. Vol. 1. IEEE, 1982.
- [3] 김찬기, 양필웅, 전보환, 노종선, 박진수, 송홍엽, 한성우. "부분 대역 재밍 및 가산성 백색 가우시안 잡음 채널하의 SFH/NC-BFSK 시스템에서 Erasure insertion 기법 및 RS-BCH 연결 부호를 이용한 항재밍 기법." 한국통신학회 종합 학술 발표회 논문집 (추계) 2014 (2014): 518-519.
- [4] Boutros, Joseph Jean, Albert Guillen I Fabregas, Ezio Biglieri, Gilles Zemor. "Low-density parity-check codes for nonergodic block-fading channels." Information Theory, IEEE Transactions on 56.9 (2010): 4286-4300.