

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

김찬기, 양필웅, 노종선,
박진수*, 송홍엽*, 한성우**

서울대학교, 연세대학교*, 국방과학연구소**

개요

1 서론

2 부분 대역 재밍에 적합한 DE

3 실험 결과

4 결론

서론

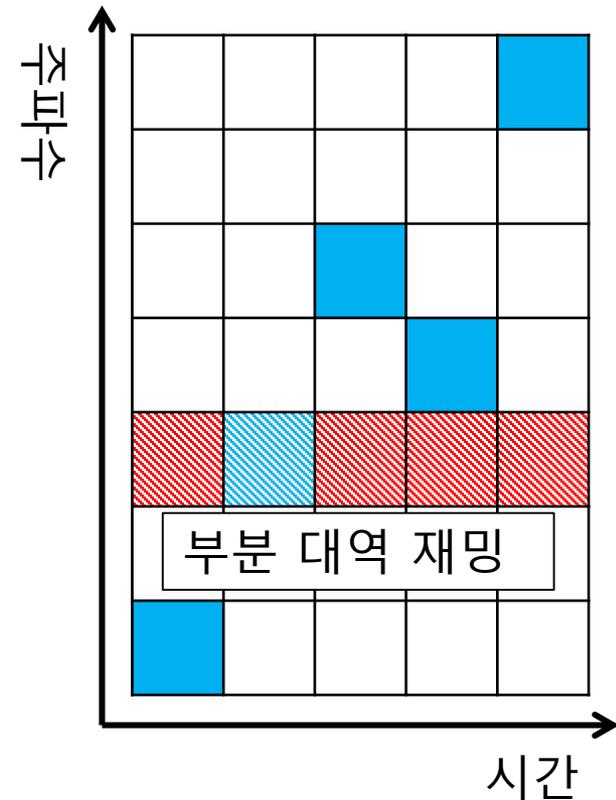
대역확산 시스템(spread spectrum)

PN 부호 사용, 시스템의 보안성 향상

- ✓ 직접 확산(direct sequence)
- ✓ 주파수 도약(frequency hopping)
 - 빠른 주파수 도약(fast frequency hopping)
 - 느린 주파수 도약(slow frequency hopping)

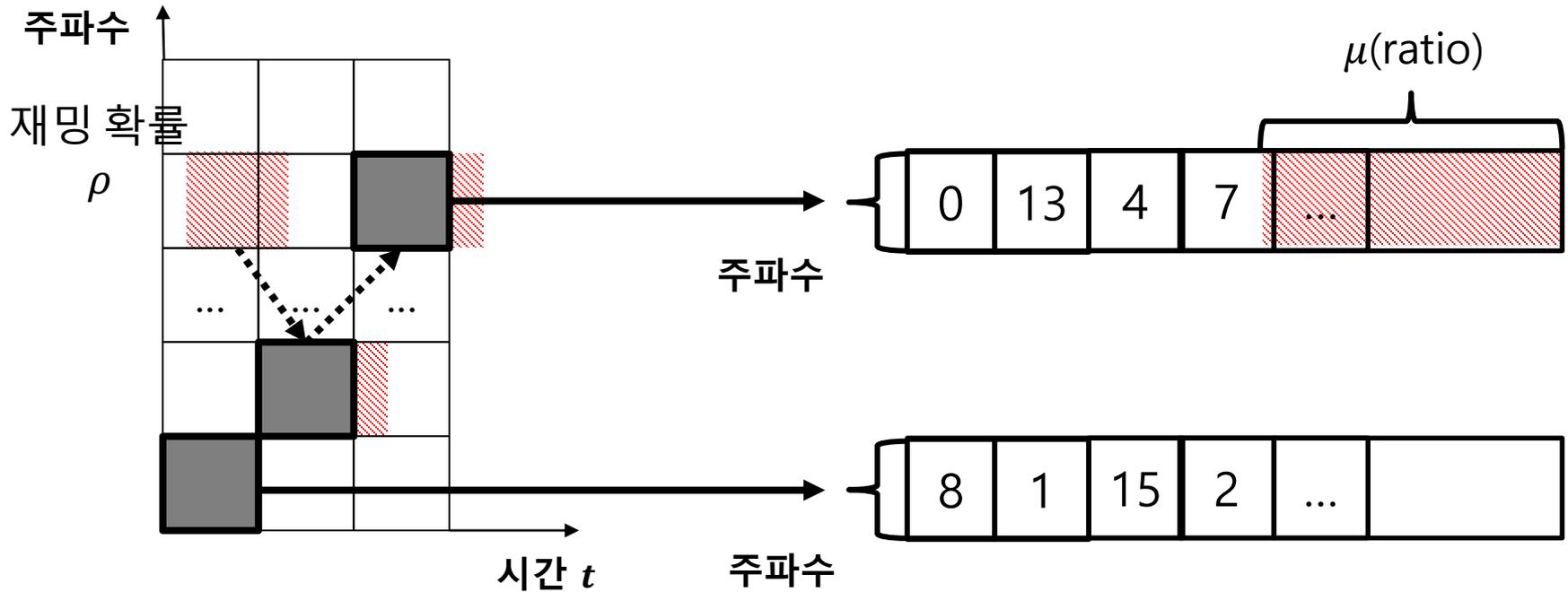
재밍 : 방해 전파를 이용하여, 정상적인 통신을 방해

- ✓ 부분 대역 재밍
 - 주파수 대역의 일부에 방해 전파를 송신
 - 제한된 전력을 사용할 경우 효율적



추적 재밍

- 추적 재밍
 - ✓ 상대의 신호 정보를 파악한 후 그 주파수 대역에 재밍을 삽입
 - ✓ 주파수 도약율이 낮을 경우 더욱 효율적임
 - ✓ PSK/QAM 기반 채널에서 구현함

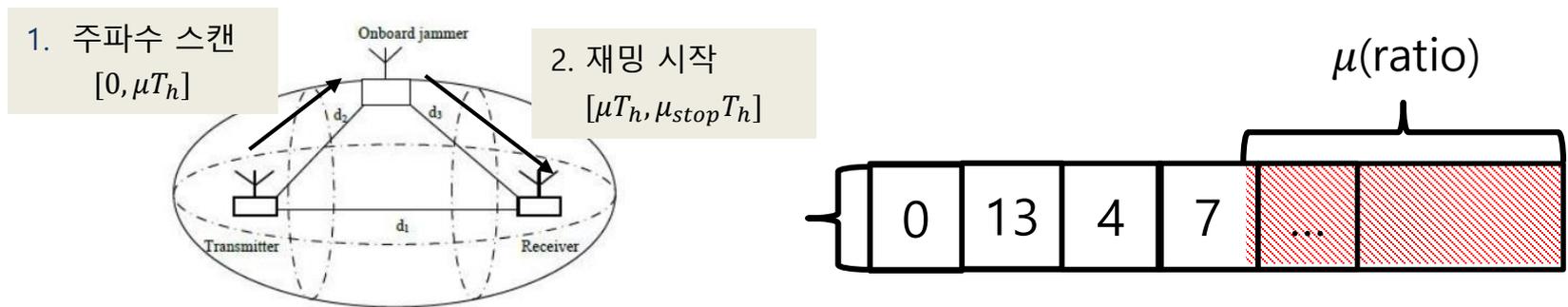


추적 재밍의 채널 모델링

● 추적 재밍의 채널 모델링

- ✓ 주파수 검사 후 재밍 : 주파수를 언제 스캔하느냐에 따라 재밍 시작의 위치가 달라짐
- ✓ 재머의 주파수 스캔 속도 v : ferret receiver, 80,000[channel/s]
- ✓ 주파수 도약 속도 100[hop/s], 대략 2000 개의 channel이 존재한다고 생각 시 한 홉 내의 재머가 주파수를 찾을 확률 $\rho = \frac{800}{2000} = 0.4$
- ✓ 홉의 중간부분에서 재머가 시작할 확률 $\mu \in [\mu_{start}, \mu_{stop}]$ 의 균등 분포를 지님

($\mu_{start}T_h$: 고정모드에서 재머가 주파수를 찾는 시간의 최소)



추적 재밍의 채널 모델링

- ✓ 각 홉의 위치에 따른 한 심볼의 오류 확률이 달라지게 됨, 오류의 확률 분포가 뒤의 심볼일수록 선형적으로 증가하게 됨
- ✓ 균등하지 못한 오류 확률 분포에 대처하기 위해서는 위해서는 기존 방법인 단순히 인터리빙 및, 블록 단위의 처리로는 불충분함. 각 심볼 단위의 처리가 성능을 향상시킬 수 있는 요인이 될 수 있음.
- ✓ LDPC 부호는 그 자체로서도 우수한 성능을 나타낸다는 것이 입증되었으나, 심볼 단위의 부호 설계를 시도하는 데 있어서도 유용할 수 있음

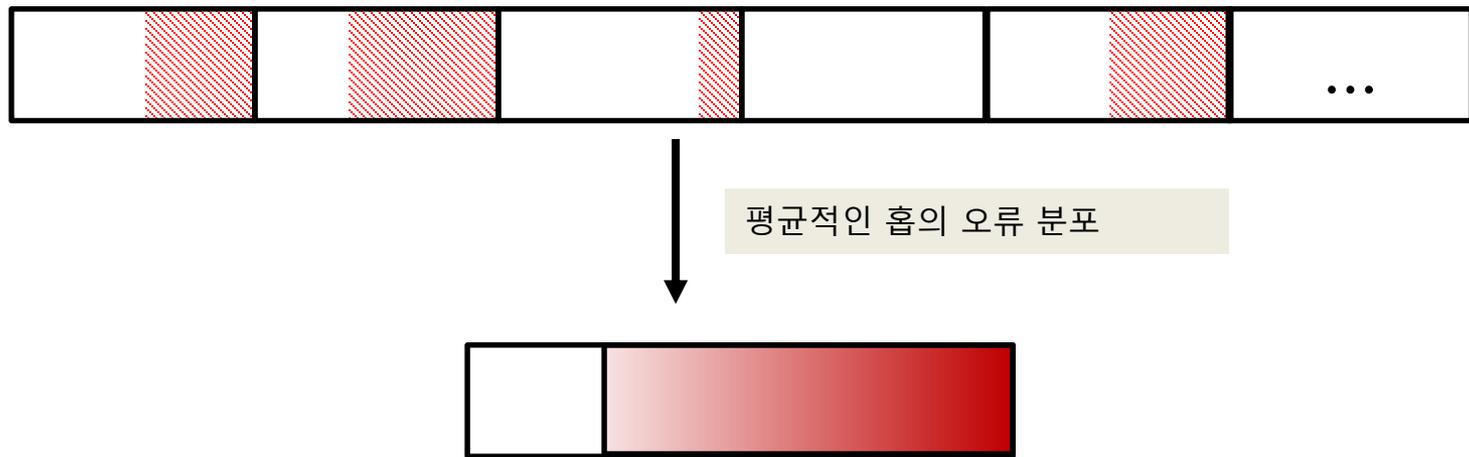
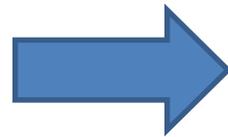
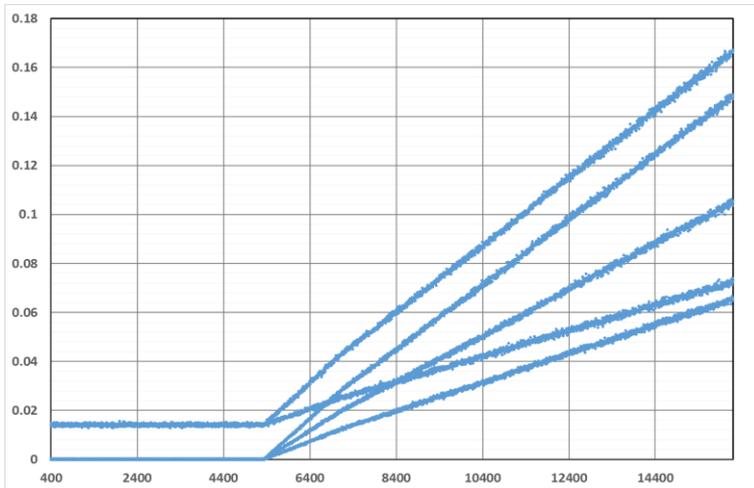


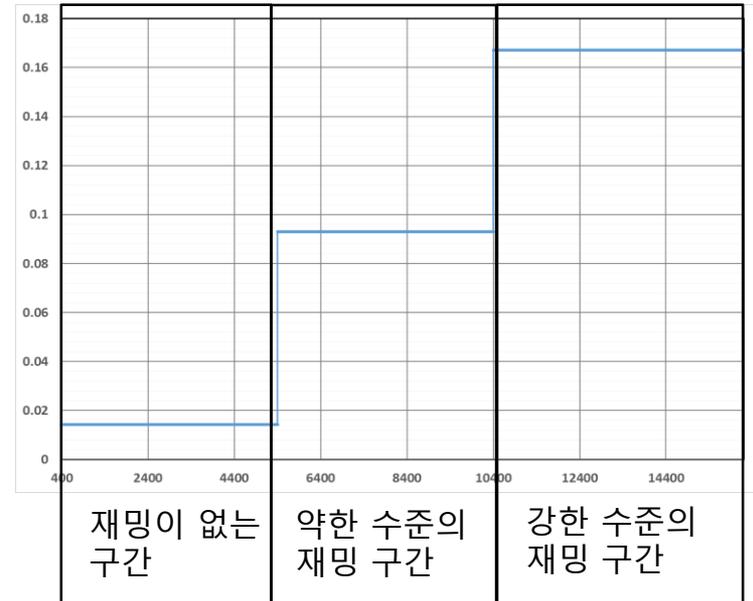
그림 24. 높은 E_b/N_0 에서의 error distribution

추적 재밍의 채널 모델링 : DE에서의 형식 대응

- ✓ Density evolution: LDPC의 구조에 따른 부호화 성능을 이론적으로 분석할 수 있는 방법
- ✓ all-zero 부호값에서의 32-QAM(110B가 참조된 구조) 및 16200, 부호율 1/3, hop 크기 : 180[sym]=900[bit], 18개의 hop이 존재하는 상황에서의 $\frac{E_b}{N_0} = 10[dB]$ 의 그래프
(5bit 단위로, 각 오류 분석이 달라짐)
- ✓ 왼쪽 그래프와 같은 오류 분포가 선형적인 환경에서의 차수 분포를 계산하는 것은 매우 어려우므로, 비슷한 성능으로 대응되는 채널로 변환 후 밀도 진화를 계산

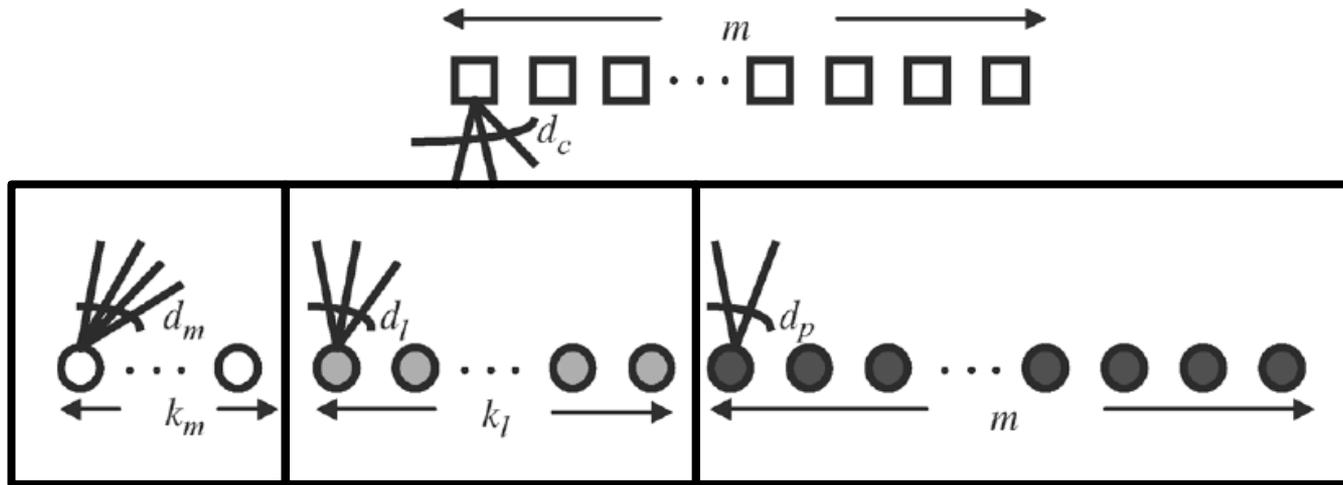


DE에서의 대응



부분 균일 LDPC 부호를 통한 UEP

- UEP(Unequal error protection) : 보내고자 하는 메시지의 위치에 따라 보호 수준의 강도를 다르게 주는 기법으로서 본래 preamble의 보호를 위해 고안됨
- 논문 [1] 의 방법을 참조하여 UEP의 사용 기법을 추적 재밍의 기법에 대응시킴



높은 보호 필요성 →
강한 수준의 재밍
구간으로 대응

중간의 보호 필요성 →
약한 수준의 재밍 구간
으로 대응

낮은 보호 필요성 →
재밍이 없는 구간으로 대
응

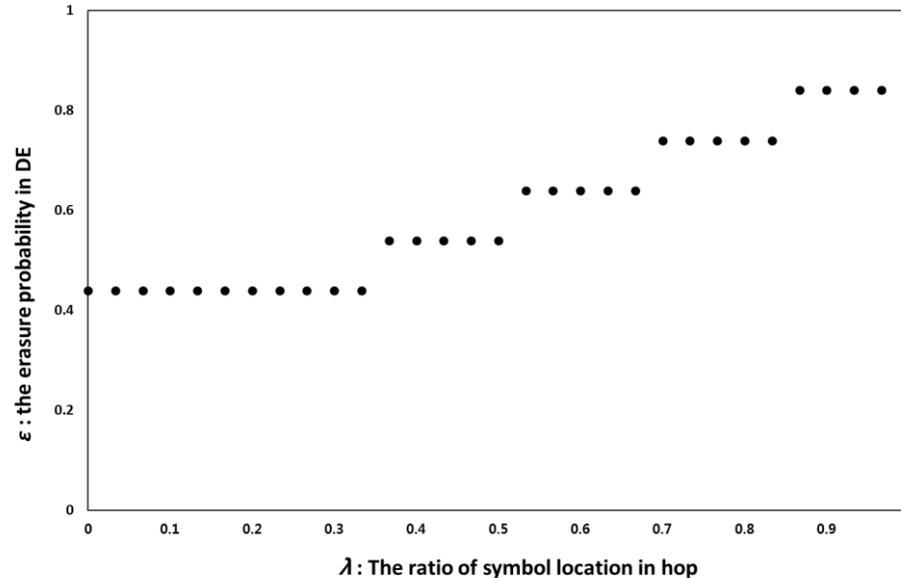
부분 균일 LDPC 부호의 DE : 공식

- 계산의 편의성을 위해 소실 채널의 밀도 진화 기법을 이용
- 어떤 부분 차수 분포 $(d_c, d_{v_1}, d_{v_2}, \dots, d_{v_{n_{frac}}})$ 및 각 부호의 차수가 부여될 곳에 대한 비율 값인 $\lambda = (\lambda_{v_1}, \lambda_{v_2}, \dots, \lambda_{v_{n_{frac}}})$ 이 존재한다고 가정.
- $\varepsilon_i = \left(E \left(\frac{E_b}{N_j} \right) - E \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \right) \times \frac{i-1}{n_{frac}} + E \left(\frac{E_b}{N_0} \right)$ for $i \in [1, n_{frac}]$
- (Variable nodes) : $p_{l+1,i} = \varepsilon_i q_l^{d_{v_i}-1}$ for $i \in [1, n_{frac}]$
- (Check nodes) : $q_l = 1 - \left(1 - \sum_{i=1}^{n_{frac}} \lambda_{v_i} p_{l,i} \right)^{d_c-1}$

Where λ is fraction of each variable nodes

- $E \left(\frac{E_b}{N_j} \right)$: 재밍이 걸렸을 경우의 성능과 비례, ε_i 의 기울기에 영향을 줌
- $E \left(\frac{E_b}{N_0} \right)$: 재밍이 없었을 경우의 성능과 비례, ε_i 의 절편 값에 영향을 줌

Partial regular LDPC 부호의 DE : 예시



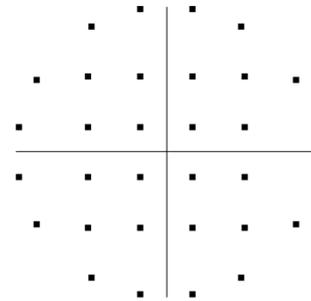
- 위의 채널 환경 및 $R = \frac{1}{3}$ 일 때, $(\lambda_{v_1}, \lambda_{v_2}, \lambda_{v_3}, \lambda_{v_4}, \lambda_{v_5}) = (\frac{1}{3}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6})$ 을 가정
- 앞 slide에서 제시된 DE 공식에 의해, degree 분포(const_1) $(d_c, d_{v_1}, d_{v_2}, d_{v_3}, d_{v_4}, d_{v_5}) = (4, 2, 2, 3, 3, 4)$ 가 0으로 수렴함을 알 수 있음
- 반면 degree 분포(const_2) $(d_c, d_{v_1}, d_{v_2}, d_{v_3}, d_{v_4}, d_{v_5}) = (4, 2, 4, 2, 3, 3)$ 은 위의 채널 환경에서 DE에서 수렴하지 않는 분포임

(만약 위치에 의해 erasure 확률이 영향을 받지 않는다면 두 분포는 같은 성능을 지녀야 함)

Partial regular LDPC 부호 : 채널 조건

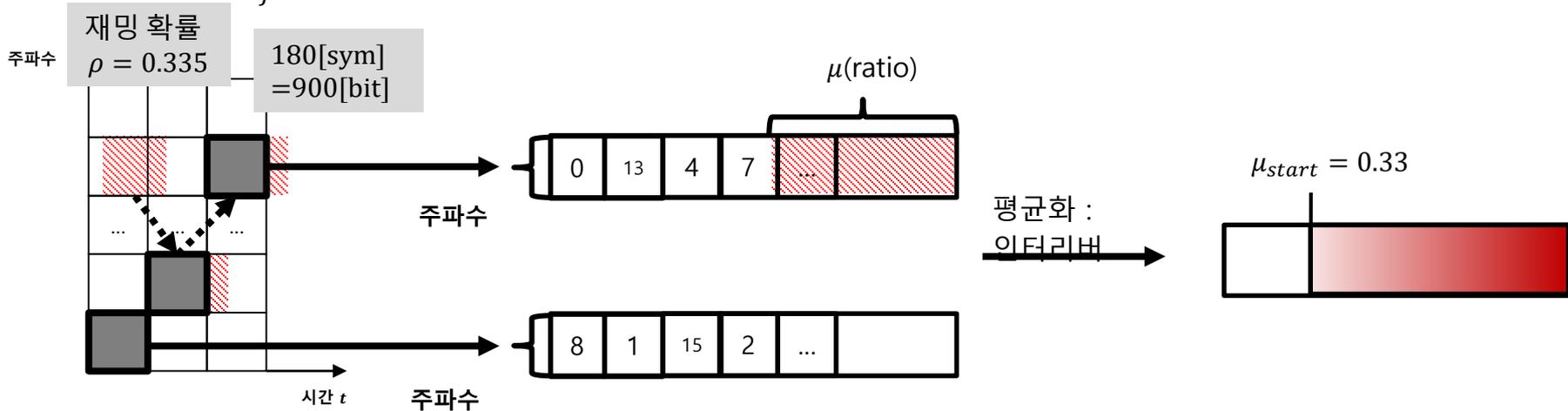
채널 조건

- 변복조 방식 : 32-QAM(MIL-STD-188-110B 규격)
- 주파수 도약 상황 : 한 홉의 크기
180[sym]=900[bit], 주파수 도약을
142[hop/s](128kbps 도약 모드 가정시)
- 부호 길이 : 16200, 부호율 1/3, 한 부호 내의
18개의 홉이 존재
- 재밍 조건 : $\frac{E_b}{N_j} = 0[dB]$ $\rho = 0.335$, $\mu_{start} = 0.33$

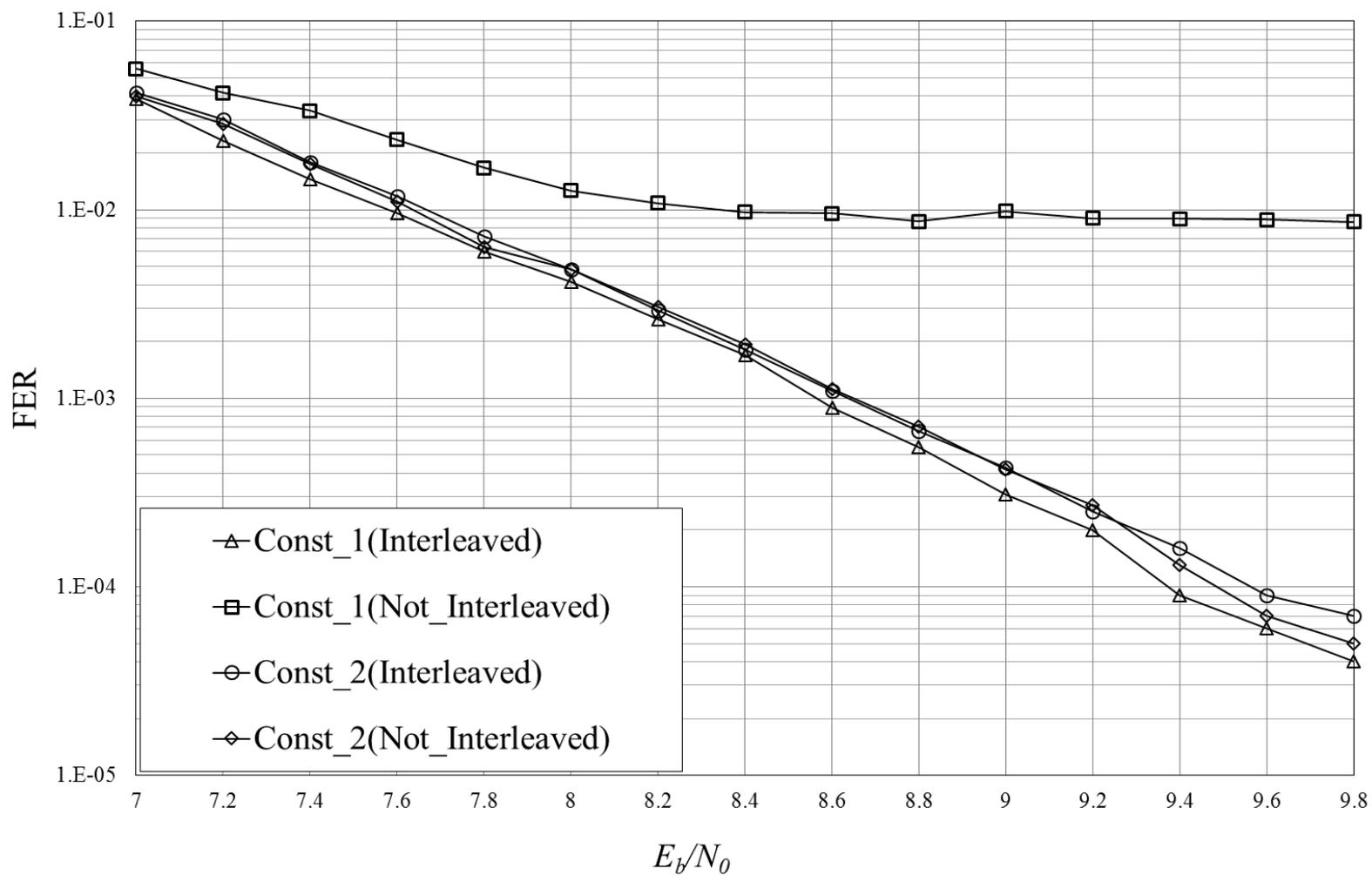


Symbol Number	In-Phase	Quadrature	Symbol Number	In-Phase	Quadrature
0	0.866380	0.499386	16	0.866380	-0.499386
1	0.984849	0.173415	17	0.984849	-0.173415
2	0.499386	0.866380	18	0.499386	-0.866380
3	0.173415	0.984849	19	0.173415	-0.984849
4	0.520246	0.520246	20	0.520246	-0.520246
5	0.520246	0.173415	21	0.520246	-0.173415
6	0.173415	0.520246	22	0.173415	-0.520246
7	0.173415	0.173415	23	0.173415	-0.173415
8	-0.866380	0.499386	24	-0.866380	-0.499386
9	-0.984849	0.173415	25	-0.984849	-0.173415
10	-0.499386	0.866380	26	-0.499386	-0.866380
11	-0.173415	0.984849	27	-0.173415	-0.984849
12	-0.520246	0.520246	28	-0.520246	-0.520246
13	-0.520246	0.173415	29	-0.520246	-0.173415
14	-0.173415	0.520246	30	-0.173415	-0.520246
15	-0.173415	0.173415	31	-0.173415	-0.173415

그림 3. MIL-STD-188-110B에서 제시된 32-QAM 성좌도

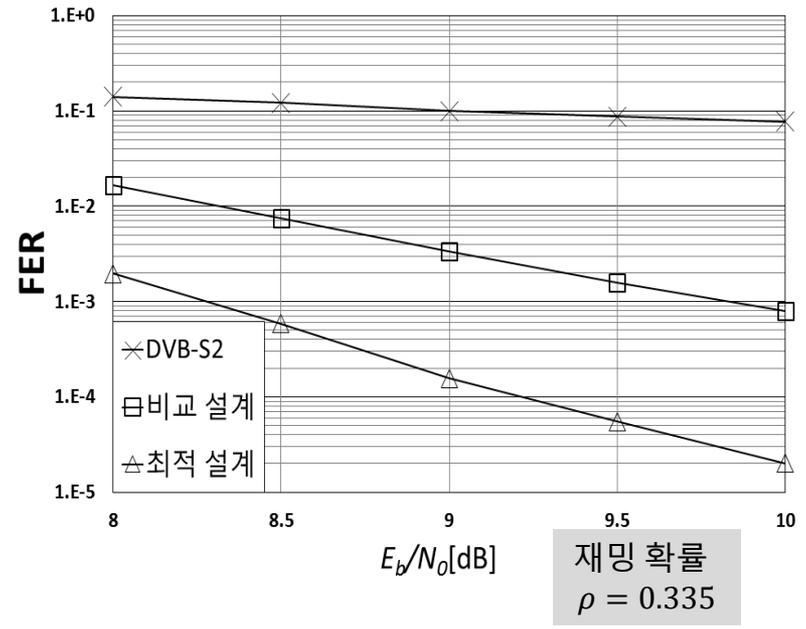
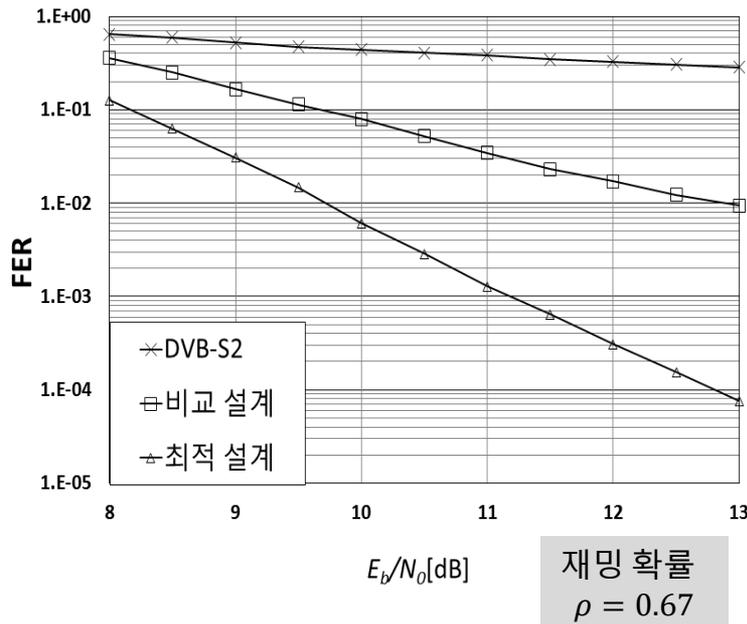


실험 결과



부분 차수 분포 변경 및 DVB-S2와의 비교

- 위의 채널 환경 및 $R = \frac{1}{3}$ 일 때, $(\lambda_{v_1}, \lambda_{v_2}, \lambda_{v_3}, \lambda_{v_4}, \lambda_{v_5}, \lambda_{v_6}) = (\frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6}, \frac{1}{6})$ 을 가정
- 최적 설계 $(d_c, d_{v_1}, d_{v_2}, d_{v_3}, d_{v_4}, d_{v_5}, d_{v_6}) = (4, 2, 2, 2, 3, 3, 4)$ 및 앞서 제시된 차수 분포(const_2)보다 변화시킨 $(d_c, d_{v_1}, d_{v_2}, d_{v_3}, d_{v_4}, d_{v_5}) = (4, 4, 3, 3, 2, 2, 2)$ 을 비교 설계로 설정
- 채널 환경은 $\rho = 0.335, 0.67$ 로 두 값으로 나타낸 점을 제외하면 앞의 시뮬레이션과 동일하게 설정



결론

● 낮은 E_b/N_0 에서 또한 달성 가능

- DVB-S2는 $\frac{E_b}{N_0} = 10[dB]$ 및 $\frac{E_b}{N_j} = 0[dB]$ 인 경우, BER이 2×10^{-4} , FER이 8×10^{-2}
- (6,4) regular LDPC 부호는 같은 조건에서 BER이 1×10^{-4} , FER이 1.7×10^{-3}
- 제안 구조는 $\frac{E_b}{N_0} = 9.8[dB]$ 및 $\frac{E_b}{N_j} = 0[dB]$ 에서 BER이 2.7×10^{-6} , FER이 4×10^{-5} 를 달성

● 이론적 분석의 유효성

- 채널 단순화 및 소실 채널을 이용한 DE에서 나타난 좋은 부호가 실제 전송통신환경이 고려된 부호에서도 유효함을 보임
- 다른 파라미터에 대해서도 LDPC 부호 설계에 있어 partially regular LDPC 부호에 한해서는 DE에 기반한 방법이 유효할 수 있음

● 차후 과제

- 다양한 파라미터에 대한 측정 및 분석 수행
- Encoder 설계에 유용한 partially regular LDPC 부호 설계

참고 문헌

- [1] Rahnavard, 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 연접 부호를 이용한 항재밍 기법." *한국통신학회 종합 학술 발표회 논문집 (추계) 2014 (2014): 518-519.*
- [4] Boutros, Joseph Jean, Albert Guillen I Fabregas, Ezio Bilglieri, Gilles Zemor. "Low-density parity-check codes for nonergodic block-fading channels." *Information Theory, IEEE Transactions on* 56.9 (2010): 4286-4300.