

부분 대역 재밍 채널에서 연접 극 부호의 설계 및 복호 기법

안 형 배*, 노 종 선*, 김 강 산**, 송 홍 엽**, 안 재 하***

Design and Decoding Scheme of the Concatenated Polar Codes under Partial-Band Jamming Channel

Hyongbae Ahn*, Jong-Seon No*, Gangsan Kim**, Hong-Yeop Song**, Jaeha Ahn***

요 약

본 논문은 부분 대역 재밍(partial-band jamming, PBJ) 채널에 주파수 도약 대역 확산(frequency-hopping spread-spectrum, FHSS) 시스템을 사용할 때 적용 가능한 연접 극 부호의 설계 및 복호 기법을 제안한다. 제안하는 연접 부호의 외부 부호로는 RS(Reed-Solomon) 부호와 극 부호를 고려하였고, 내부 부호는 극 부호로 하나의 내부 부호가 한 홉에 대응되도록 설계하였다. 유한한 길이에서 동작하는 극 부호는 순환중복검사(cyclic redundancy check, CRC) 비트와 연접하여 복호 성능을 향상시킬 수 있고, 복호 결과가 CRC를 만족하는지 여부를 활용하여 복호 실패 여부를 판정할 수 있다. 내부 부호의 CRC 조력 리스트 연속 제거 복호(CRC aided successive cancellation list decoding, CA-SCL decoding) 과정에서 계산된 경로 매트릭을 활용하면, 복호에 실패한 경우를 추가로 판정 가능하며 이를 소실(erasure)로 처리하여 외부 부호 복호 과정에서 이득을 얻어 연접 부호의 성능이 향상된다. 소실 삽입 기법과 더불어서 내부 부호의 복호 결과를 클리핑(clipping)하여, 재밍의 세기가 강할 때 추가적인 복호 성능 향상을 확인하였다. 마지막으로, 연접 부호의 외부 부호로 RS 부호보다 극 부호를 사용하면 연관성 이득으로 인한 성능 향상을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Key Words : partial-band jamming, frequency-hopping spread-spectrum, erasure insertion, clipping, polar codes

ABSTRACT

In this paper, we propose a design and decoding schemes for concatenated codes that can be applied to the PBJ channel using a FHSS system. RS codes and polar codes are considered as the outer codes of the proposed concatenated codes, and inner codes are designed so that one inner code corresponds to one hop with a polar code. In order to improve the finite length performance of polar codes, concatenating with CRC bits is preferred

* The authors gratefully acknowledge the support from Electronic Warfare Research Center at Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), originally funded by Defense Acquisition Program Administration (DAPA) and Agency for Defense Development (ADD).

• First Author : (ORCID:0000-0003-2875-4560)Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University, ahb0429@ccl.snu.ac.kr, 학생회원

* (ORCID:0000-0002-3946-0958)Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National University, jsno@snu.ac.kr, 종신회원

** (ORCID:0000-0002-0635-0007)School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, gs.kim@yonsei.ac.kr, 학생회원
(ORCID:0000-0001-8764-9424)School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, hysong@yonsei.ac.kr, 종신회원

*** Agency for Defence Development, anjaha@add.re.kr

논문번호 : 201810-331-A-RN, Received October 16, 2018; Revised December 31, 2018; Accepted January 2, 2019

and whether or not decoding fails can be determined by using whether the decoding result satisfies the CRC. Using the path metric calculated in CA-SCL decoding of the inner code, it is possible to further determine the case of failure in decoding and process it as an erasure. The performance of the concatenated code is improved by obtaining the coding gain in outer decoding process. In addition to erase insertion technique, we clipped the decoding results of the inner codes and observed additional decoding performance improvements when the jamming power is high. Finally, the performance improvement due to the soft decision gain can be obtained by using polar codes rather than using RS codes as outer codes of the concatenated codes.

I. 서 론

재밍은 신호의 수신을 방해하기 위한 의도적인 간섭 신호로 전술 통신 환경에서 주로 고려된다. 재밍의 종류로는 하나 혹은 여러 개의 톤으로 이루어진 톤(tone) 재밍^[1], 특정 주파수 대역에 걸쳐 스펙트럼 밀도를 갖는 대역 잡음(band noise) 재밍^[2], 공격 대상 신호의 한 심볼 구간 중 특정 시간 대역만을 공격하는 펄스(pulse) 재밍^[3], 공격 대상 신호의 주파수를 감시하고 공격하는 추적(follower) 재밍^[4] 등이 있다. 대역 잡음 재밍으로는 공격 대상 신호의 대역폭 전체를 공격하는 전 대역 재밍(full-band jamming, FBJ)과 공격 대상 신호의 대역폭 일부를 공격하는 대신 조금 더 강한 스펙트럼 밀도로 공격하는 부분 대역 재밍(partial-band jamming, PBJ)이 있다. 방어자 입장에서는 전자보다는 후자가 훨씬 상대하기 까다롭고, 공격자 입장에서도 재머를 설계하기 용이하기 때문에 부분 대역 재밍은 여러 종류의 재밍들 중에서도 중요하게 고려된다.

본 논문에서는 PBJ와 가산성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)이 존재하는 상황에서 주파수 도약 대역 확산(frequency-hopping spread-spectrum, FHSS) 시스템에 맞는 연결 극 부호를 설계 및 적용하여 항재밍 성능을 확인하고자 한다. 항재밍(anti-jamming)이란 재밍 신호가 존재하는 상황에서도 신뢰성 있는 통신을 하기 위한 기법을 의미한다. 각각의 재밍 종류에 맞는 항재밍 기법들이 존재하며, FHSS 기법의 경우 펄스 재밍에는 강인하지만 부분 대역 재밍에는 취약한 성능을 보인다.

II에서는 연결 부호를 사용하여 PBJ 채널에서 FHSS 시스템이 어떻게 항재밍 성능을 가지는지에 대하여 서술하고, 연결 부호로 사용되는 오류정정부호에 대한 배경지식을 서술한다. 연결 부호란 두 종류의 부호를 하나의 부호로 연결하는 오류정정부호의 한 기법으로, 하나의 부호로 부호화된 메시지를 다른 부호로 부호화하여 만들 수 있다. 이때 먼저 부호화를 하

는 부호를 외부 부호라고 하며 나중에 부호화를 하는 부호를 내부 부호라고 한다. 복호 과정은 그 반대로 내부 부호를 먼저 복호한 뒤, 그 결과를 외부 부호를 이용하여 나중에 복호한다. 이러한 연결 부호는 두 부호의 부·부호화 과정이 순차적으로 진행되어야 하기 때문에 내부 혹은 외부 부호 중 하나라도 복호 시간이 증가할 경우 전체 연결 부호의 복호 시간이 늘어난다는 점을 주의해야 한다.

본 논문에서는 연결 부호의 내부 부호로 극 부호(polar codes)^[5]사용한다. 극 부호의 경우 CRC 조력 리스트 연속 제거 복호(CRC-aided successive-cancellation list decoding, CA-SCL decoding)를 사용하면 짧은 길이에서도 복호 성능이 좋다고 알려져 있다.^[6] 이러한 성질 때문에 극 부호는 연결 부호의 내부 혹은 외부 부호로써 좋은 후보이다. 또한 CA-SCL 복호를 사용하면 복호된 부호가 순환중복검사(cyclic-redundancy-check, CRC)를 만족하는지 여부에 따라서 복호에 실패하였는지의 여부를 판단 가능하다. III에서는 이 정보를 활용하였을 때 얼마나 항재밍 성능이 증가하는지 서술한다. 또한 CRC를 만족함에도 불구하고 복호에 실패하는 경우가 있는데, 복호 과정에서 계산되는 경로 메트릭을 추가로 활용하여 CRC를 만족하지만 복호에 실패할 가능성이 높은 경우를 탐지 가능하다. 이러한 경로 메트릭 탐지 기법을 활용하였을 때의 추가적인 항재밍 성능 향상을 서술한다. 마지막으로 클리핑(clipping) 기법을 적용하였을 때의 항재밍 성능 변화도 서술하고자 한다.

분석의 편의성과 군집 오류(burst error)에 대한 오류정정능력 때문에 항재밍 성능을 고려한 외부 부호로는 RS 부호(Reed-Solomon codes)^[7]를 주로 고려한다. IV에서는 연결 부호의 외부 부호로 RS 부호 외에도 극 부호를 사용하였을 때의 성능을 비교하고자 한다. 마지막으로 V에서는 앞서 다룬 내용들을 정리하고 본 논문의 결론을 맺고자 한다.

II. 배경 이론

2.1 PBJ 채널에서의 FHSS 시스템

PBJ란 대역 잡음 재밍의 일종으로, 공격하고자 하는 신호의 주파수 대역 중 일부 대역에만 에너지를 집중하여 공격하는 재밍을 말한다. 여기서, 공격하고자 하는 신호의 주파수 대역 대비 PBJ가 집중하는 집중하는 주파수 대역의 비율을 대역 비(fractional bandwidth)라고 정의하고 ρ 로 표기한다. 집중하는 주파수 대역폭이 좁을수록 더 강한 스펙트럼 밀도의 공격을 가할 수 있으므로 PBJ의 재밍의 세기는 ρ 에 반비례한다. 이러한 ρ 는 0보다 크고 1보다 작거나 같은 값을 가지며 공격자가 정할 수 있다. 부분 대역 재밍에 대항하는 좋은 항재밍 시스템이란 다양한 ρ 와 재밍 전력 밀도 대비 비트 에너지(E_b/N_j)를 갖는 재밍 신호 하에서 목표하는 프레임 오류율 이하를 달성하는 시스템을 의미한다.

FHSS란 대역 확산 통신의 한 종류로 정해진 대역폭 내의 여러 주파수를 의사 무작위(pseudo random) 적으로 도약(hopping)하며 정보를 전송하는 기법이다. 도약 속도(hop rate)가 데이터의 전송 속도(data rate)보다 빠를 경우 빠른 주파수 도약(fast FH)이라 하고 이러한 고속의 도약 신호를 생성하기 위해서는 복잡한 주파수 합성기가 필요하다. 반대로 도약 속도가 데이터의 전송 속도보다 느린 경우 느린 주파수 도약(slow FH)이라 하며 재밍과 페이딩의 영향이 있는 경우 군집 오류(burst error)를 야기할 수 있다. 본 논문에서 다루고자 하는 FHSS는 느린 주파수 도약 대역 확산이며, 페이딩은 존재하지 않는다고 가정한다. 한 홉 동안 적의 재밍 주파수 대역이 변하지 않는다고 가정하면, 한 홉에서의 채널 상태는 일정하고 이러한 채널을 도약 채널이라고 부른다.

PBJ가 존재할 때 FHSS 시스템에서는 한 홉이 도약 주파수에 따라 재밍의 영향 아래에 있을 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 이진 확률변수 H 에 대하여, 도약 채널이 재밍의 영향 아래 있는 사건을

$$H = 0 \tag{1}$$

이라 정의하고, 도약 채널이 재밍의 영향을 받지 않는 사건을

$$H = 1 \tag{2}$$

이라 정의하자.

PBJ의 대역 비를 ρ 라고 할 때, 도약 주파수의 종류가 충분히 많은 경우

$$\Pr\{H=0\}=\rho \tag{3}$$

이고,

$$\Pr\{H=1\}=1-\rho \tag{4}$$

이라 할 수 있다. i 번째 도약 신호의 송신 신호를 $x^{(i)}$, AWGN 잡음을 n , PBJ 잡음을 n_j 라 할 때, 수신 신호 $y^{(i)}$ 는 다음과 같다.

$$y^{(i)} = \begin{cases} x^{(i)} + n + n_j & (\text{with probability } \rho) \\ x^{(i)} + n & (\text{with probability } 1 - \rho) \end{cases} \tag{5}$$

여기서 송신 신호의 변조 비(modulation rate)를 R_r , 변조 차수(modulation order)를 R_m 이라 할 때, n 은

$$n \sim N(0, (2(E_b/N_0)R_rR_m)^{-1}) \tag{6}$$

인 정규 난수이고,

$$n_j \sim N(0, (2(E_b/N_j)R_rR_m\rho)^{-1}) \tag{7}$$

인 정규 난수이다.

PBJ가 존재할 때 FHSS 시스템에서는 연결 부호를 활용하여 좋은 성능을 얻을 수 있다. 한 홉을 구성하는 내부 부호를 직교 구조로 외부 부호와 연결하면 홉간의 다이버시티를 활용하여 좋은 복호 성능을 기대

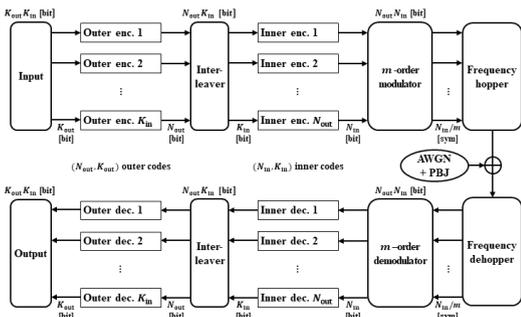


그림 1. 제안하는 FHSS 시스템에서의 연결 부호 구조
 Fig. 1. Proposed block diagram of the concatenated codes in FHSS system

할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 FHSS 시스템에서의 연결 부호의 구조는 그림 1.과 같다. 제안하는 연결 부호는 (N_{out}, K_{out}) 의 외부 부호 K_{in} 개와 (N_{in}, K_{in}) 의 내부 부호 N_{out} 개가 직교 연결된 구조를 갖는다. 각 내부 부호는 한 홉에 대응되므로 한 홉의 길이는 N_{in} 비트이며, N_{out} 개의 홉이 하나의 연결 부호를 이룬다.

2.2 RS 부호

RS 부호는 1960년 I. S. Reed와 G. Solomon이 발표한 유한체에서 정의된 선형 순환 부호(cyclic linear codes)로 군집 오류에 대한 정정 능력이 매우 우수하다고 알려져 있다. $GF(2^q)$ 에서 정의된 RS 부호의 길이는 $N=2^q-1$ 이고, 메시지의 길이가 $K(< N)$ 일 때 부호의 해밍 최소 거리는 $d_{min} = N-K+1$ 이다. 일반적으로 최소 해밍 거리가 d_{min} 인 선형 부호는 최대 $t = \lfloor d_{min}/2 \rfloor$ 개의 오류를 정정 가능하다. R. C. Singleton에 의하면 선형 부호의 해밍 최소 거리는 $N-K+1$ 이하¹⁸⁾이며, 이를 싱글톤 바운드라 정의한다. 싱글톤 바운드를 만족하는 부호를 최대 거리 분리 가능(maximum distance separable, MDS) 부호라고 정의하는데, RS 부호는 대표적인 MDS 부호이다.

또한 RS 부호는 부호와 메시지의 길이를 각각 S 개의 심볼 씩 줄여서 $(N-S, K-S)$ 의 단축 RS 부호(shortened RS codes)를 만들 수 있다. 이러한 단축 RS 부호는 순환 부호의 성질을 만족하지는 않지만, 여전히 MDS의 성질을 만족한다. 즉, $(N-S, K-S)$ 의 단축 RS 부호의 해밍 최소 거리도 $d_{min} = N-K+1$ 이다. 즉, 단축 RS 부호를 이용하면 $GF(2^q)$ 에서 2^q-1 이하의 임의의 길이를 갖는 MDS 부호를 만들 수 있다.

2.3 극 부호

극 부호는 2008년 E. Arıkan이 제안¹⁵⁾한 선형 부호로 이론적으로 채널의 용량(channel capacity)을 달성하는 것이 증명된 최초의 구조적인 부호이다. 연속 제거(successive cancellation, SC) 복호란 이전까지 복호한 결과를 반영하여 다음 심볼을 순차적으로 복호하는 방법이다. E. Arıkan은 본인이 제안한 방법대로 설계한 부호를 채널 용량과 같고 부호 길이가 N 인 부호를 연속 제거 복호하였을 때의 오류율이 $O(N^{-1/4})$ 이하임을 증명하여 채널 용량을 달성함을 증명하였다. 이러한 극 부호는 이론적으로는 채널의 용량을 달성하지만 부호의 길이가 비교적 짧을 때는, 예를 들어 1000 비트 이하의 길이에서는 오류 정정 능력이 turbo

나 LDPC 부호에 비해서 매우 열등하다는 단점이 있다.

짧은 길이에서의 극 부호의 성능을 개선하기 위하여 많은 노력들이 있었으며, 가장 대표적으로는 I. Tal과 A. Vardy의 리스트 연속 제거(successive cancellation list, SCL) 복호¹⁶⁾ 기법이 있다. SCL 복호는 복호 가능한 메시지의 후보를 최대 L 개까지 리스트에 저장하고, 새로운 심볼을 연속 소거로 복호할 때 생성되는 $2L$ 개의 메시지 후보 중 경로 메트릭 값이 작은 상위 L 개의 후보만을 남겨두는 방식으로 진행되는 복호 기법이다. 로그 우도 비(log likelihood ratio, LLR) 기반 SCL 복호 과정에서 경로 메트릭은 다음과 같이 계산된다.¹⁹⁾

$$M_{\text{path}} = -\ln(\Pr\{\hat{\mathbf{u}}_0^{N-1} | \mathbf{y}_0^{N-1}\}) \quad (8)$$

여기서 \mathbf{y} 는 수신 신호 벡터이고, $\hat{\mathbf{u}}$ 는 복호된 메시지 벡터이다. $-\ln(x)$ 은 양수 x 에 대하여 감소함수이므로, 복호 경로 메트릭이 작은 메시지일수록 $\Pr\{\hat{\mathbf{u}}_0^{N-1} | \mathbf{y}_0^{N-1}\}$ 이 크므로 주어진 수신 신호 벡터에서 가장 확률이 높은 복호 결과임을 의미한다. 마지막 심볼까지 복호하였을 때 살아남은 L 개의 메시지 후보 중, 가장 작은 경로 메트릭을 갖는 메시지를 선택하여 복호를 마무리한다.

메시지를 순환 중복 검사(cyclic redundancy check, CRC) 비트와 연결하고 CRC 조력 리스트 연속 제거(CRC-aided SCL, CA-SCL) 복호를 하면 복호 성능이 더욱 증가한다. 이 경우 기존의 SCL 복호와 다르게, 살아남은 L 개의 메시지 후보 중 CRC를 만족하는 메시지 후보를 고른 뒤, 그 중에서 가장 작은 경로 메트릭을 갖는 메시지를 선택한다는 차이점이 있다. 만일 살아남은 L 개의 메시지 후보 중 어느 것도 CRC를 만족하지 못하는 경우 해당 복호는 실패했다고 판정한다. 물론 살아남은 L 개의 메시지 후보 중 하나 이상이 CRC를 만족한다고 하더라도 복호를 성공했다고 장담할 수는 없다. 즉, CA-SCL 복호 과정에서 CRC 만족하는 메시지 후보가 없음을 확인하면, 복호 오류의 일부를 탐지할 수 있다. 살아남은 L 개의 메시지 후보 중 CRC 만족하는 메시지가 존재할 때 추가로 복호 실패를 탐지하는 기법은 III에서 다루겠다.

III. 경로 메트릭을 이용한 소실 삽입 기법

본 장에서는 PBJ가 존재하는 채널에서 FHSS 시스템에서의 연결 부호 성능 향상을 위한 소실 삽입

(erasure insertion) 기법을 다루고자 한다. 소실 삽입 기법이란 연결 부호의 내부 부호를 복호하는 과정에서 오류가 많을 것으로 예상되는 경우 복호 결과를 소실시켜 외부 부호의 해밍 거리 이득을 취하는 기법을 일컫는다. 본 논문에서 다루고자 하는 시스템의 경우, 하나의 내부 부호가 하나의 홉에 대응되므로 한 홉을 복호하는 과정 혹은 한 내부 부호를 복호하는 과정에서 복조 혹은 복호에 오류가 있을 것으로 판단되는 경우 해당 홉의 복호 결과를 소실 처리한다.

PBJ가 존재하는 채널에서는 복조 과정에서 소실 처리를 하는 기법들은 변조 기법에 따라 다양하다. 비동기 FSK를 사용하는 경우 ratio threshold test^[10], Bayesian method^[11] 등과 같이 수신된 도약 신호의 포락선(envelope)을 분석하여 재밍의 영향 유무를 판정한 뒤 소실을 삽입한다. PSK나 QAM과 같이 주파수 고효율의 변조를 사용하는 경우, 수신된 도약 신호의 평균 최소 잡음 전력을 활용^[12]하여 소실을 삽입하는 기법이 존재한다.

이러한 방식의 소실 삽입 기법은 재밍의 탐지 성능 측면에서는 성능이 좋을지 모르겠지만 연결 부호의 복호 관점에서는 문제점이 있다. 재밍의 세기가 약할 경우 수신된 신호를 소실로 처리하지 않더라도 내부 부호 복호가 성공할 수도 있고, 반대로 재밍이 존재하지 않더라도 AWGN의 잡음이 강력하여 내부 부호의 복호가 실패할 수도 있다. 즉, 중요한 것은 도약 신호에서의 재밍의 존재 유무가 아닌 내부 부호 복호의 성공 여부이다. 내부 부호로 CRC와 연결된 극 부호를 사용하는 경우 CA-SCL 복호 과정에서 CRC를 만족하는 메시지의 후보가 존재하는지의 유무를 통해 어느 정도 복호 실패 여부를 판단 가능하다. 평균 최소 잡음 전력 기반 소실 삽입 기법과 비교하였을 때, 별도의 잡음 에너지 계산이 필요하지 않다는 장점과 복호 성공 유무에 따른 소실 삽입 기법이기에 연결 부호의 복호 성능이 더 좋다는 장점이 있다.

하지만, II장 3절에서 언급했듯이 CA-SCL 복호 과정에서 리스트 내에 CRC를 만족하는 메시지가 존재함에도 불구하고 복호에 실패할 수도 있다. Huawei 사는 복호 과정에서 계산된 경로 메트릭의 차이의 비를 활용하여 이러한 복호 실패를 추가로 탐지하는 방법을 제안하였다.^[13] CA-SCL 복호 과정에서 살아남은 L 개의 경로 중 적어도 하나 이상의 복호 경로는 CRC를 만족한다고 가정하자. 또한 L 개의 경로 메트릭 중에서 가장 큰 경로 메트릭을 $M_{path,max}$ 이라 정의하고, CRC를 만족하는 가장 작은 경로 메트릭을

$M_{path,min}$ 이라 정의하자. D_{path} 를 식 (9)와 같이 정의할 때,

$$D_{path} = \frac{M_{path,max} - M_{path,min}}{M_{path,max}} \quad (9)$$

경로 메트릭은 양수이므로 $0 \leq D_{path} < 1$ 을 만족한다.

D_{path} 가 작을수록 $M_{path,min}$ 은 리스트 내의 경로 메트릭 중 $M_{path,max}$ 에 가까운 값을 가진다는 것을 의미한다. $-\ln(x)$ 는 x 에 따른 감소함수이므로, 식 (8)에 의해 복호된 경로 메트릭이 클수록 주어진 수신 신호로부터 복호될 확률이 작아진다. 즉, 이 경우 잘못 복호된 경로가 우연히 CRC를 만족하여 경로 메트릭 $M_{path,min}$ 을 가졌을 확률이 제대로 복호되었을 확률보다 높다. 따라서 살아남은 복호 경로 중에서 CRC를 만족하는 경로가 존재한다고 하더라도, 주어진 채널 환경, 부호의 길이, CRC의 길이, 그리고 리스트의 크기에 맞게 적절히 선택한 문턱 값인 \bar{D}_{path} 에 대하여 $D_{path} < \bar{D}_{path}$ 를 만족하는 경우 복호에 실패하였다고 판단할 수 있다.

그림 2.는 문턱 값인 \bar{D}_{path} 에 대하여 복호 경로 메트릭 차의 비(D_{path}) 기반의 소실 삽입 기법을 사용하였을 때 E_b/N_j 에 따른 연결 부호의 프레임 오류율(frame error rate, FER)을 나타낸 그래프이다. 사용한 연결 부호의 외부 부호 스펙 및 내부 부호의 스펙은 $(N_{out}, K_{out}, n_{CRC,out}, L_{out}) = (64, 42, 8, 8)$, $(N_{in}, K_{in}, n_{CRC,in}, L_{in}) = (128, 65, 12, 32)$ 로 연결 부호의 전체 부호율은 $R = 0.33325$ 이다. 여기서 $n_{CRC,out}$ 과 L_{out} 은 각각 외부 부호의 CRC 길이

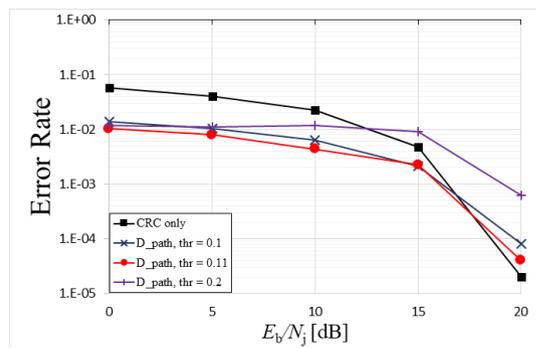


그림 2. \bar{D}_{path} 별 E_b/N_j 에 따른 오류율
Fig. 2. Error rate versus E_b/N_j for each \bar{D}_{path}

와 외부 부호 복호 시 사용되는 리스트의 길이를 의미하며, $n_{CRC, in}$ 과 L_{in} 도 같은 방식으로 정의된다. 변조 방식은 이진 위상 천이(binary phase shift keying, BPSK) 변조를 사용하며, $E_b/N_0 = 5$ dB인 AWGN과 $\rho = 0.1$ 인 PBJ가 존재한다. 그림 1.의 구조로 설계한 시뮬레이터를 바탕으로 주어진 조건에서 다양한 \bar{D}_{path} 값에 대하여 모의실험을 한 결과, 재밍의 세기가 큰 경우 $\bar{D}_{path} = 0.11$ 일 때 연결 부호의 성능이 가장 좋은 것을 확인하였다.

그림 3.은 그림 2.와 같은 환경에서 (A) 평균 최소 잡음 전력 기반, (B) 복호 경로 CRC 만족 여부 기반, 그리고 (C) 복호 경로 메트릭 차의 비(D_{path}) 기반의 소실 삽입 기법을 사용하였을 때 E_b/N_j 에 따른 연결 부호의 FER과 비트 오류율(bit error rate, BER)의 모의실험 결과를 나타낸 그래프이다. (C)에서 사용하는 D_{path} 의 문턱 값은 $\bar{D}_{path} = 0.11$ 이다. (B)와 (C)가 (A)에 비해 압도적으로 성능이 좋은 이유는 복조 기반이 아닌 복호 성공 여부 기반 소실 삽입 기법이기 때문이다. 채널에 걸리는 전체 잡음의 크기가 줄어들수록 $D_{path} < \bar{D}_{path}$ 이지만 복호에 성공할 확률이 증가한다. 따라서 재밍의 크기가 작아질수록 D_{path} 기반의 복호 오류 판정이 실패하여 (B)가 (C)의 성능을 역전한다.

소실 삽입 기법과 더불어 연결 부호의 성능 향상을 위한 기법으로 클리핑이라는 기법이 있다. 소실 삽입 기법이 내부 부호의 복호 혹은 도약 신호의 복조에 실

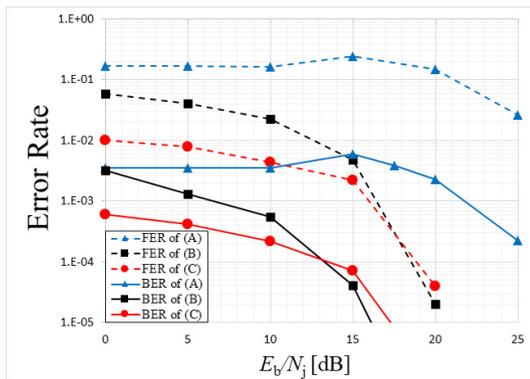


그림 3. 소실 삽입 기법 별 E_b/N_j 에 따른 오류율 (A) 평균 최소 잡음 전력 기반 (B) 복호 경로 CRC 기반 (C) D_{path} 기반
Fig. 3. Error rate versus E_b/N_j for each EI schemes (A) Average minimum noise power based method (B) CRC based method (C) D_{path} based method

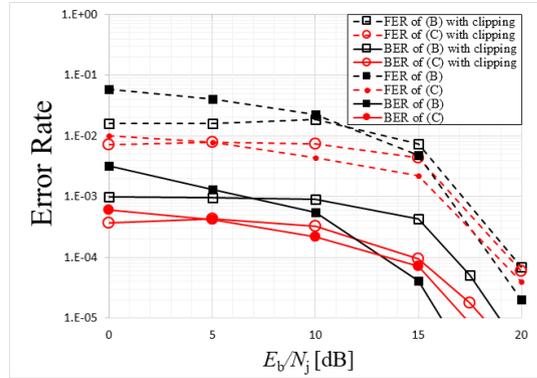


그림 4. 클리핑 유무에 따른 소실 삽입 기법 별 E_b/N_j 에 따른 오류율 (B) 복호 경로 CRC 기반 (C) D_{path} 기반
Fig. 4. Error rate versus E_b/N_j for each EI and clipping schemes (B) CRC based method (C) D_{path} based method

패할 가능성이 높은 경우 복호 결과를 강제로 소실시키는 것이라면, 클리핑은 이와 반대로 성공할 가능성이 높은 경우 복호 결과의 영향을 강제로 한계치까지 끌어올리는 기법이다. 이론적으로 복호 과정에서 LLR은 $(-\infty, \infty)$ 의 임의의 실수 값을 가지지만, 실제 복호기에서는 전력과 계산의 문제 때문에 $(-LLR_{max}, LLR_{max})$ 로 범위가 제한된다. 그림 4.는 그림 2.와 같은 조건에서 (B)와 (C)의 소실 삽입 기법을 사용하였을 때 클리핑 유무에 따른 성능 차이를 나타낸 모의실험한 결과이다. 재밍의 크기가 클 때는 (B)와 (C)로 인한 복호 실패 여부 판정이 잘 맞아떨어져 성능 향상되지만, 재밍의 크기가 작아질수록 판정이 실패하여 클리핑으로 인한 복호 성능 손실이 커지기 때문에 성능이 감소한다.

IV. 외부 부호에 따른 연결 극 부호의 항재밍 성능

본 장에서는 연결 부호의 외부 부호의 종류에 따른 항재밍 성능을 비교 및 분석하고자 한다. 내부 부호로는 극 부호를 사용하며 D_{path} 기반의 소실 삽입 기법을 활용한다. 외부 부호로는 RS 부호와 극 부호를 사용하여 성능을 비교하고자 한다. RS 부호는 II장 2절에서 언급하였듯이 MDS를 만족하고, 소실과 오류를 모두 정정 가능한 복호 기법이 존재하기 때문에 외부 부호로서 좋은 후보이다. 이러한 성질 때문에 RS 부호는 항재밍 성능을 고려한 연결 부호의 설계 과정에서 외부 부호의 후보로 자주 사용된다.

내부 극 부호의 CA-SCL 복호 과정에서 해당 복호 경로의 비트 별 LLR이 저장된다. 즉

$i(0 \leq i \leq N-1)$ 번째 비트의 LLR인 $\ell_N^{(i)}$ 는 식 (10) 과 같이 정의된다.

$$\ell_N^{(i)} \equiv \ln \left(\frac{\Pr\{\mathbf{y}_0^{N-1}, \hat{\mathbf{u}}_0^{i-1} | \hat{u}_i = 0\}}{\Pr\{\mathbf{y}_0^{N-1}, \hat{\mathbf{u}}_0^{i-1} | \hat{u}_i = 1\}} \right) \quad (10)$$

이 값은 외부 부호의 복호 과정에서 연판정(soft decision) 입력으로 사용 가능하다. 또한 CRC를 연결한 극 부호는 짧은 길이에서의 연판정 복호 성능이 좋다고 알려져 있다. 따라서 내부 부호의 복호 결과를 이용한 연판정이 가능하다면, 극 부호도 외부 부호의 좋은 후보로 예상할 수 있다.

그림 5.는 외부 부호로 RS 부호와 극 부호를 사용하였을 때 E_b/N_j 에 따른 오류율을 나타낸 그래프이다. BPSK 변조를 사용하며, $E_b/N_0 = 5$ dB인 AWGN과 $\rho = 0.1$ 인 PBJ가 존재하며, $\bar{D}_{\text{path}} = 0.11$ 을 사용하였다. 동등한 비트 길이와 부호율의 비교를 위하여 외부 부호로 사용하는 RS 부호는 GF(2⁴)에서 정의된 $(N_{\text{out,RS}}, K_{\text{out,RS}}) = (16, 10)$ 의 확장된 RS 부호(extended-RS codes)를 사용하였고, 극 부호는 $(N_{\text{out,polar}}, K_{\text{out,polar}}, n_{\text{CRC, out,polar}})$

$(64, 40, 6, 8)$ 인 CRC 연결 극 부호를 사용하였다. 내부 극 부호는 $(N_{\text{in,polar}}, K_{\text{in,polar}}, n_{\text{CRC, in,polar}}, L_{\text{out,polar}}) = (128, 64, 16, 89)$ 인 CRC

연결 극 부호를 사용하였다. 두 부호 모두 연결 부호의 부호율은 0.3125로 같다. 두 연결 부호의 FER의 성능 차이는 내부 부호의 연판정 복호 결과를 활용하였는지의 여부에서 기인한다. 따라서 내부 부호의 연판정 결과를 외부 부호 복호에 활용할 수 있다면, 외

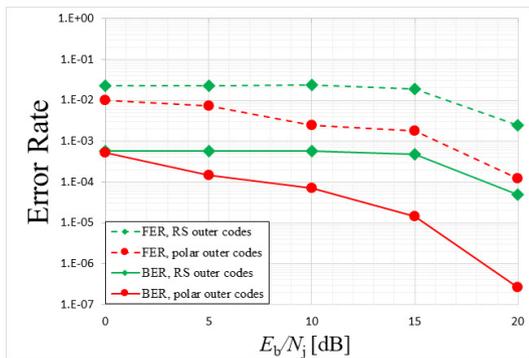


그림 5. 외부 부호 별 E_b/N_j 에 따른 오류율
Fig. 5. Error rate versus E_b/N_j by the outer codes

부 부호로 RS 부호보다 극 부호를 사용하는 것이 더 바람직하다.

V. 결론

PBJ가 존재할 때 FHSS 시스템에서의 연결 부호 성능 향상을 위해 소실 삽입 기법을 활용한다. III장에서는 세 가지 값을 기준으로 소실 삽입 기법을 적용하였을 때 E_b/N_j 에 따른 오류율을 비교하였다. 이 세 가지는 (A) 도약 신호의 평균 최소 잡음 전력 기반 판정, (B) 복호된 내부 극 부호의 CRC 통과 여부 판정, (C) 마지막으로 CA-SCL 복호 과정에서 계산되는 경로메트릭 차의 비율인 D_{path} 를 이용한 판정이다. (A)와 달리 (B)와 (C)는 복호 실패 여부를 기준으로 진행되는 소실 삽입 기법이기에 연결 부호의 성능 측면에서 큰 성능 향상을 확인하였다.

IV장에서는 외부 부호로 RS 부호와 극 부호를 사용하였을 때의 연결 부호의 성능을 비교하였다. 내부 부호의 연판정 결과를 사용할 수 있다면 극 부호도 외부 부호의 좋은 후보가 될 수 있음을 확인하였다. 향후에는 RS 부호의 연판정 복호 기법 중 하나로, P. Trifonov가 제안한 RS 부호의 연속 제거 복호를 사용하였을 때의 성능과 극 부호를 사용하였을 때의 성능을 비교하여 연판정 복호가 가능할 때 어떤 구조를 가진 부호가 외부 부호로 적합한지를 연구해 보고자 한다.

References

- [1] L. Milstein, S. Davidovici, and D. Schilling, "The effect of multiple-tone interfering signals on a direct sequence spread spectrum communication system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 30, pp. 436-446, Mar. 1982.
- [2] A. J. Viterbi and I. M. Jacobs, "Advances in coding and modulation for noncoherent channels affected by fading partial-band and multiple-access interference" in *Advances in Commun. Syst.*, NY: Academic, vol. 4, 1975.
- [3] K. V. Ravi and R. F. Ormondroyd, "Effect of CW and pulse jamming on direct-sequence spread-spectrum code acquisition using a sequential detector," *MILCOM 92 Conf. Record*, pp. 638-643, San Diego, CA, USA, Oct. 1992.

- [4] A. A. Hassan, W. E. Stark, and J. E. Hershey, "Frequency-hopped spread spectrum in the presence of a follower partial-band jammer," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 41, pp. 1125-1131, Jul. 1993.
- [5] E. Arikan, "Channel polarization: A method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 55, pp. 3051-3073, Jul. 2009.
- [6] I. Tal and A. Vardy, "List decoding of polar codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, pp. 2213-2226, May 2015.
- [7] I. S. Reed and G. Solomon, "Polynomial codes over certain finite fields," *J. Soc. Ind. and Appl. Math.*, vol. 8, pp. 300-304, Jun. 1960.
- [8] R. Singleton, "Maximum distance Q-ary codes," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 10, pp. 116-118, Apr. 1964.
- [9] A. B. Stimming, M. B. Parizi, and A. Burg "LLR-Based successive cancellation list decoding of polar codes," *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 63, no. 19, pp. 5165-5179, Oct. 2015.
- [10] A. J. Viterbi, "A robust ratio-threshold technique to mitigate tone and partial band jamming in coded MFSK systems," in *Proc. IEEE MILCOM 1982*, vol. 1, Boston, USA, Oct. 1982.
- [11] C. W. Baum and M. B. Pursley, "Bayesian methods for erasure insertion in frequency-hop communication systems with partial-band interference," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, pp. 1231-1238, Jul. 1992.
- [12] H. Ahn, C. Kim, J.-S. No, J. S. Park, H.-Y. Song, and S. W. Han, "The higher-order-modulated slow-frequency-hopping spread-spectrum system over AWGN under partial-band jamming," *J. KICS*, vol. 42, no. 1, pp. 14-24, Jan. 2017.
- [13] Huawei and HiSilicon, "On nFAR for UL code construction," 3GPP TSG R1-1718506, Prague, Czech Republic, Oct. 2017.

안 형 배 (Hyoungbae Ahn)



2014년 2월 : 서울대학교 전기·정보공학부 졸업
 2014년 3월~현재 : 서울대학교 전기·정보공학부 석박사 통합 과정
 <관심분야> 통신공학, 부호이론

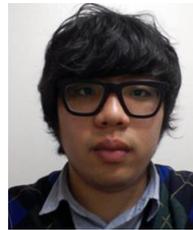
노 종 선 (Jong-Seon No)



1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 공학사
 1984년 2월 : 서울대학교 대학원 전자공학과 공학석사
 1988년 5월 : University of Southern California 전기공학과 공학박사

1988년 2월~1990년 7월 : Hughes Network Systems, Senior MTS
 1990년 9월~1999년 7월 : 건국대학교 전자공학과 부교수
 1999년 8월~현재 : 서울대학교 전기·컴퓨터공학부 교수
 <관심분야> 시퀀스, 협력통신, 시공간부호, 네트워크 코딩, LDPC 부호, OFDM, 이동통신, 암호학

김 강 산 (Gangsan Kim)



2016년 2월 : 연세대학교 전기·전자공학부 졸업
 2016년 3월~현재 : 연세대학교 전기·전자공학부 석박사 통합 과정
 <관심분야> 통신공학, 부호이론

송 흥 엽 (Hong-Yeop Song)



1984년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업

1986년 5월 : University of
Southern California Dept.
of EE. Systems 석사

1991년 12월 : University of
Southern California Dept.

of EE. Systems 박사

1992년 1월~1993년 12월 : Post-Doc Research
Associate, University of Southern California
Dept. of EE. Systems

1994년 1월~1995년 8월 : Senior Engineer,
Qualcomm Inc., San Diego, California.

2002년 3월~2003년 2월: Visiting Professor,
University of Waterloo, Canada

1995년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 교수
<관심분야> 통신공학, 정보이론, 부호이론, 암호이
론, 이산수학

안 재 하 (Jaeha Ahn)



2012년 8월 : 포항공과대학교
전기전자공학과 졸업

2014년 2월 : 포항공과대학교
전기전자공학과 공학석사

2014년 2월~현재 : 국방과학연
구소 연구원

<관심분야> 통신공학, 대전자
전 통신, 군위성통신