

부분 대역 재밍이 존재하는 채널에서 항재밍 성능을 갖는 연접 극 부호 기법

안형배, 노종선, 안재하*

서울대학교 전기정보공학부 뉴미디어통신공동연구소, *국방과학연구소

ahb0429@ccl.snu.ac.kr, jsno@snu.ac.kr, *anjaha@add.re.kr

Anti-Jamming Concatenated Polar Coding Scheme for Partial Band Jamming Channels

Hyoungbae Ahn, Jong-Seon No, Jaeha Ahn*

Seoul National Univ. Dept. of ECE, INMC, *Agency for Defense Development

요약

본 논문은 가산성 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)과 부분 대역 재밍(partial band jamming, PBJ)이 존재하는 채널에서 주파수 도약 대역 확산(frequency-hopping spread spectrum, FHSS) 통신을 할 때, 도약 채널의 채널 정보를 알고 있을 때 적용 가능한 극 부호 기법을 제안하고 그 성능을 확인하였다. 그 결과 신호 대 잡음비 $E_b/N_0 = 5.44$ dB, 신호 대 재밍비 $E_b/N_j = 5.4$ dB, 대역비(fractional bandwidth) $\rho = 0.2$ 인 환경에서 제안한 부호 길이 2^{18} , 부호율 0.8320의 연접 극 부호는 비트 당 오류율(bit error rate, BER) 1.033×10^{-1} 을 달성하였다.

I. 서론

부분 대역 재밍은 전자전에서 고려하는 재밍의 한 종류로 특정 대역에 재밍의 에너지를 집중함으로써 효율적으로 목표를 달성하는 특성 때문에 대전전자에서 자주 다루어지는 재밍의 한 종류이다. 이러한 재밍을 극복하기 위해 주파수 도약 대역 확산 (frequency hopping spread spectrum, FHSS) 통신 및 도약 채널에서의 재밍을 검출하는 기법 그리고 RS 연접 부호[1], LDPC 부호[2] 등 다양한 부호들이 사용된다.

극 부호는 2008 년에 E.Arikan[3]이 제안한 부호로 정보 비트와 고정 비트(frozen bit)를 특정 규칙에 따라 선형 연산하여 부호를 생성하고, 연속 제거(successive cancellation, SC) 복호를 통해 극 부호가 이론적으로 채널 용량을 달성함을 증명하였다. H.Si[4]는 극 부호의 nested 성질을 이용하여, 감쇠(degraded) 관계에 있는 두 채널 중 하나가 확률적으로 선택되는 환경에서 ergodic 한 채널 용량을 달성하는 연접 극 부호 기법을 제안하였다.

본 논문에서는 부분 대역 재밍 하에서 FHSS 통신을 하고 완벽한 채널 정보를 알고 있는 경우, 도약 채널이 감쇠 관계에 있는 두 채널 중 하나가 확률적으로 선택되는 채널이라는 점을 증명하고, 이를 이용하여 항재밍 성능을 갖는 연접 극 부호를 제안한다.

II. 본론

본 논문에 사용되는 시스템 모델은 그림 1 과 같다. 한 홉의 길이는 $N(= 2^n)$ 이고, $B(= 2^b)$ 개의 홉이 하나의 연접 극 부호를 구성한다. FHSS 이진 위상 천이 변조(binary phase shift keying, BPSK)를 사용하며, 채널에는 가산성 백색 가우시안 잡음(additive white

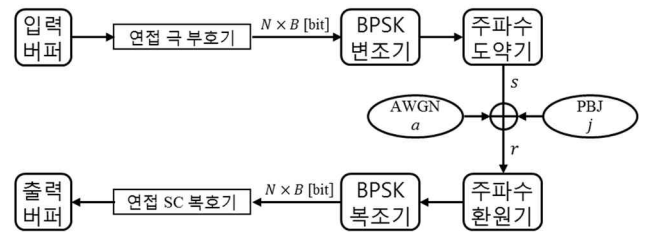


그림 1. 항 재밍 연접 극 부호 시스템 모델

Gaussian noise, AWGN) $a \sim \mathcal{N}(0, N_0)$ 과 대역비(fractional bandwidth)가 ρ 인 부분 대역 재밍 (partial band jamming, PBJ) j 가 존재한다고 가정한다. 수신 신호를 s , 송신 신호를 r 이라 하고, 수신단에서 도약 채널의 정보를 완벽히 안다고 가정할 때 다음과 같이 표현 가능하다.

$$r = \begin{cases} s + a + j & \text{with probability } \rho \\ s + a & \text{with probability } 1 - \rho \end{cases} \quad (1)$$

일반적으로 재밍도 가우시안의 잡음이라고 가정하므로, $j \sim \mathcal{N}(0, N_j/\rho)$ 라고 할 수 있고

$$(a + j) \sim \mathcal{N}(0, N_0 + (N_j/\rho)) \quad (2)$$

이다. 가우시안 잡음 채널에서 잡음 전력이 큰 채널은 그보다 작은 채널에 대해서 감쇠 관계에 있으므로, 도약 채널은 ρ 의 확률로 감쇠된 채널이 선택되는 채널이다.

BPSK 를 사용할 때, 가우시안 채널은 이진 대칭 채널(binary symmetric channel, BSC)로 표현 가능하다. 따라서 도약채널 W 는 아래와 같이 표현 된다

$$W = \begin{cases} W_1 \triangleq \text{BSC}(p_1) & \text{with probability } \rho \\ W_2 \triangleq \text{BSC}(p_2) & \text{with probability } 1 - \rho \end{cases} \quad (3)$$

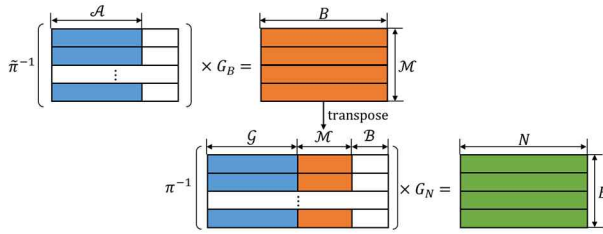


그림 2. 연결 극 부호 부호화 과정

여기서 $Q(x) \triangleq (1/\sqrt{2\pi}) \int_x^\infty \exp(-u^2/2) du$ 라고 정의할 때,

$$p_1 = Q\left(\sqrt{2(E_b/(N_0 + (N_j/\rho)))}\right) \quad (4)$$

$$p_2 = Q(\sqrt{2E_b/N_0}) \quad (5)$$

이다.

사용한 연결 극 부호의 구조는 그림 2와 같다. 이 때,

$$\mathcal{A} = \lfloor (1 - \rho)B \rfloor \quad (6)$$

$$\mathcal{M} = \lfloor N(H(p_1) - H(p_2)) \rfloor \quad (7)$$

$$\mathcal{G} = \lfloor N(1 - H(p_1)) \rfloor \quad (8)$$

$$\mathcal{B} = N - \mathcal{M} - \mathcal{G} \quad (9)$$

이다. 여기서 $H(p) = -p \log p - (1 - p) \log(1 - p)$ 이다. 위와 같은 구조의 연결 극 부호를 순차적으로 SC 복호 하였을 때 ergodic 한 채널 용량을 달성 가능함은 [4]에 증명되어있다.

제안한 부호의 성능을 확인하기 위해, 10^6 프레임을 전송하였을 때 발생하는 비트 오류의 개수를 측정하여 비트 오류율을 측정하였다. 부호율을 고려하지 않았을 때, 측정된 환경의 신호 대 잡음비는 $E_b/N_0 = 5$ dB, 신호 대 재밍비는 $E_b/N_j = 5$ dB 이고 대역비는 $\rho = 0.2$ 이다. 홉의 길이는 $N = 2^{10}$ 이고, 홉의 개수는 $B = 2^8$ 이다. 식 (4)와 (5)에 의해 $p_1 = 0.1523$, $p_2 = 0.0060$ 이고, 사용할 연결 부호의 스펙은 식 (6)~(9)에 의해 $\mathcal{A} = 204$, $\mathcal{M} = 576$, $\mathcal{G} = 393$, $\mathcal{B} = 55$ 이다. 연결 부호의 전체 메시지의 길이 k_{total} 는

$$\begin{aligned} k_{\text{total}} &= \mathcal{A} \times \mathcal{M} + \mathcal{G} \times \mathcal{B} \\ &= 204 \times 837 + 132 \times 55 \\ &= 218112 \end{aligned} \quad (10)$$

로 전체 연결 부호의 부호율은 = 0.8320 이다.

비트에너지 당 잡음의 전력의 세기는 부호율 만큼 보정되고 이는 $10 \log_{10}(\sqrt{0.4448}) = -0.40$ dB 과 같다. 따라서 $E_b/N_0 = 5.4$ dB, $E_b/N_j = 5.4$ dB, $\rho = 0.2$ 인 환경에서 위와 같이 제안한 부호의 비트 당 오류율을 측정한다. 측정결과 BER = 1.033×10^{-1} 이다.

성능 비교를 위하여 비슷한 길이의 부호율 5/6(= 0.8333)인 RS 연결 부호의 이론적인 BER 의 최소치를 구하여 비교하고자 한다. 홉의 개수를 맞추기 위해, 외부 부호인 RS 부호는 GF(2⁶)에서 정의된 길이 252 bit(= 42 symbol)의 단축부호라고 가정한다. 부호율 조건에 의하여 외부 부호의 메시지 길이는 $k_{\text{RS,sym}} \geq 42 \times 56 = 35$ symbol 이다. 내부 부호의 부호율이 최소인 조건에서조차 $E_b/N_0 = 5.4$ dB 인 AWGN 과 $E_b/N_j = 5.4$ dB, $\rho = 0.2$ 인 PBJ 가 존재할 때 한 심볼당 오류율은 1 에

수렴한다. 따라서 주어진 RS 부호를 외부 부호로 갖는 연결부호의 BER 의 최소 값은 아래와 같다.

	Polar-polar	RS concatenated
Code length	2 ¹⁶	near 2 ¹⁶
Code rate	0.8320	0.8333
BER	0.1033	≥ 0.4895

표 1. 연결 극 부호와 RS-convolutional 부호의 성능 비교

$$\begin{aligned} \text{BER} &\geq \frac{1}{2} \lim_{q_1 \rightarrow 1} \lim_{q_2 \rightarrow 0} \sum_{i=0}^{42} \sum_{j=0}^{42-i} \sum_{k=0}^i \binom{42-i}{j} \binom{42-i}{k} \binom{i}{k} f(i, j, k) \\ &= \begin{cases} \rho^i (1 - \rho)^{42-i} q_2^j (1 - q_2)^{42-i-j} q_1^k (1 - q_1)^{i-k} & \text{for } 2(j+k) > 7 \\ 0 & \text{for } 2(j+k) < 7 \end{cases} \\ &= 0.4895 \end{aligned} \quad (11)$$

제안한 연결 극 부호의 BER 이 같은 구조의 RS 연결 부호가 낼 수 있는 BER 의 최소값보다 낮음을 확인하였다.

III. 결론

본논문에서는 수신단에서 도약 채널의 정보를 완벽히 안다고 가정할 때, AWGN 과 PBJ 가 있는 채널에서 FHSS 통신의 도약채널을 확률적으로 선택되는 감쇠 관계의 두 채널로 표현 가능함을 보였다. 또한 이러한 채널에서 ergodic 한 채널 용량을 달성하는 연결 극 부호의 설계를 이용하여, 부호길이 2¹⁸, 부호율 0.8320의 연결 극 부호를 설계하여 해당 부호의 BER 을 측정하였다. 측정 결과 비슷한 부호 스펙을 갖는 RS 연결부호에 비해 항상 BER 이 낮음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 광주과학기술원 전자전특화연구센터를 통한 방위사업청과 국방과학연구소 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] Yu T. Su and Li-Der Jeng, "Antijam Capability Analysis of RS-Coded Slow Frequency-Hopped Systems, IEEE Transactions on Communications, Vol. 48, No. 2 pp.270-280, Feb. 2000
- [2] K. Yang, B. Zhang, H. Wang, and D. Guo, "The Performance Analysis of LDPC Coded SFH/BPSK Anti-Jamming System," Wireless Communications and Signal Processing, 2015 International Conference, Dec. 2015.
- [3] E. Arikan, "Channel Polarization- A Method for Constructing Capacity-Achieving Codes for Symmetric Binary-Input Memoryless Channels," IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 55, No. 7 pp. 3051-3073, Jul. 2009
- [4] H. Si, O. O. Koyluoglu, and S. Vishwanath, "Polar Coding for Fading Channels - Binary and Exponential Channel Cases," IEEE Transactions on Communications, Vol. 62, No. 8 pp. 2638-2650, Aug. 2014