



Blind Estimation of Interleaver for Symbol Unit Channel Coded Sequence

Yeonsoo Jang¹, Dongweon Yoon¹, Kwangmin Hyun², Cheolsun Park³, Sangbom Yun⁴

¹*Department of Electronics and Communications Engineering, Hanyang University*

²*Department of Information and Telecommunication Engineering, Gangneung-Wonju National University*

³*EW Lab., Agency for Defense Development*

⁴*Department of Electronix warfare, LIG Nex 1*

A B S T R A C T

A number of wireless communication systems adopt a channel code for error correction and error correction capability of channel code can be improved by interleaving, which converts burst errors into random errors. However, if information of transmitter's interleaver is not known, a receiver cannot acquire exact data from transmitter because deinterleaving cannot be performed correctly. For this case, interleaver parameters can be estimated by using the linearity of channel code, and related researches have been studied recently. However, previous researches are restricted to estimations of bit unit interleaver when bit unit channel codes are used. Researches for estimation of symbol unit interleaver are insufficient when communications systems adopt symbol unit channel codes such as Reed Solomon code. Thus, in this paper, we propose an estimation method for the symbol unit convolution interleaver when symbol unit channel codes are adopted. We investigate the characteristics of symbol unit convolution interleaved sequence and estimate the parameters such as the number of shift registers and the size of register unit using the linearity of symbol unit channel codes. We verify the proposed estimation algorithm through computer simulations. Then, the detection probabilities for various cases are presented and performance of estimation for noisy channel is analyzed.

© 2014 KKITS All rights reserved

KEYWORDS : Interleaver estimation, Symbol unit channel codes, Reed Solomon codes, Symbol unit interleavers, Convolutional interleavers

ARTICLE INFO: Received 5 November 2014, Revised 12 December 2014, Accepted 12 December 2014.

*Corresponding author is with the Department of Electronics and Communications Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul,

133-791, KOREA.

E-mail address: dwyoon@hanyang.ac.kr

1. 서론

다양한 무선 통신 시스템에서는 채널 부호와 함께 인터리버가 필수적으로 사용되고 있다. 인터리버는 연접 오류를 랜덤 오류로 변화시켜 채널 부호의 오류 정정 성능을 향상시키지만, 수신단에서 송신단 인터리버의 파라미터에 대한 정보가 부족할 경우, 수신된 신호는 마치 암호화된 것처럼 보이기 때문에 정확한 정보를 얻을 수 없게 된다. 이러한 이유로 국방통신 분야 등에서 인터리버의 파라미터를 추정하기 위한 연구가 진행되었다. 초기 인터리버 추정에 대한 연구는 해밍(Hamming) 부호 등과 같은 비트 단위의 채널 부호가 적용되었을 때, 그 선형성을 기반으로 블록 인터리버를 추정하고 있다 [1], [2]. 그 이후에는 컨볼루션(convolution) 부호화된 시퀀스가 블록 인터리빙 되었을 경우, 컨볼루션 부호의 판별식을 이용하여 블록 인터리버를 추정하는 연구와 블록 채널 부호화된 시퀀스가 헬리컬 스캔 인터리빙 되었을 때, 인터리버를 추정하는 연구 등이 추가적으로 진행되었다 [3]-[5].

지금까지의 연구는 해밍 부호 또는 컨볼루션 부호와 같은 비트 단위 채널 부호화된 신호가 적용되었을 때, 비트 단위 인터리버에 대한 추정 연구가 주로 이뤄져왔다. 본 논문에서는 심볼 단위 채널 부호화된 신호가 심볼 단위 컨볼루션 인터리빙 되었을 때, 송신단 인터리버를 추정하는 알고리즘을 제시한다. 또한, 모의실험을 통해 제안된 알고리즘을 검증하고 그 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 2장에서는 심볼 단위 채널 부호 및 심볼 단위 컨볼루션 인터리버의 구조 및 특징을 설명한다. 그리고 3장에서는 심볼 단위 컨볼루션 인터리빙된 신호의 특성을 이용하여 인터리버 추정 알고리즘을 제안한다. 4장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해 제안된 알고리즘을 검증하고 인터리버 추정 성능을 도출하여 정량

적으로 분석하고 5장에서 결론 맺는다.

2. 시스템 모델

2.1 심볼 단위 채널 부호

우선, 심볼 단위 채널 부호의 특성에 대해서 살펴본다. <그림 1>은 심볼 단위 채널 부호어의 구조를 나타낸다.

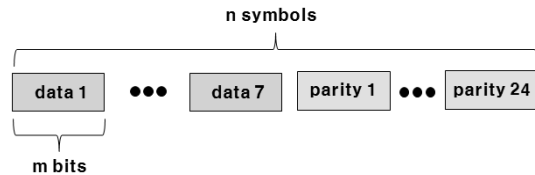


그림 1. 심볼 단위 채널 부호어 구조

Figure 1. Codeword structure of symbol unit channel code

여기서 채널 부호는 (n, k) 형식으로 표시되며 n 은 채널 부호어의 심볼 개수, k 는 정보 심볼 개수를 의미한다. 따라서, 잉여(parity) 심볼의 개수는 $n - k$ 가 된다. 그리고 한 심볼은 m 개의 비트로 구성된다. 이러한 구조를 갖는 대표적인 심볼 단위 채널 부호로는 리드 솔로몬(RS: Reed Solomon) 부호가 있다. RS 부호는 1961년 Reed와 Solomon이 제안한 비 2진 순환부호로써 심볼 단위로 부호화되고 복호되기 때문에 채널 상에서 발생하는 다양한 오류에 강인한 특성을 보이며, 각종 디지털 통신 시스템 및 콤팩트 디스크(CD: Compact Disk)와 같은 정보 저장 매체의 신뢰성 향상을 위해 널리 사용되고 있다 [6], [7].

2.2 심볼 단위 컨볼루션 인터리버

컨볼루션 인터리버는 Ramsey와 Forney에 의해서

제안되었다 [8], [9]. 크기가 상이한 레지스터의 구조로 인해 이전의 입력 신호가 현재의 입력 신호와 섞여서 출력되는 형태로, 블록 인터리버와 달리 메모리에 저장하고 읽어내는 인터리빙의 블록을 일정한 크기로 구분할 수 없으며, 이로부터 반복되는 인터리버의 크기가 정수배로 나타나지 않는 특징이 있다. 그림 <그림 2>는 컨볼루션 인터리버 구조를 나타낸다.

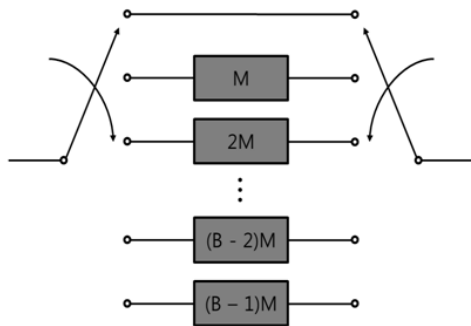


그림 2. 컨볼루션 인터리버 구조
Figure 2. Structure of convolution interleaver

컨볼루션 인터리버는 일반적으로 쉬프트 레지스터의 수 B 와 각 레지스터의 크기 M 으로 특징지어진다. 컨볼루션 인터리버는 i 번째 쉬프트 레지스터에 따라 입력 신호의 각 심볼을 $i \times M$ 거리만큼 지연시켜 출력한다. 이때, 0 번째 쉬프트 레지스터는 저장 장소가 없으므로 입력이 바로 출력된다 [10].

인터리버에 입력되는 채널 부호가 심볼 단위일 경우, 일반적으로 인터리버 역시 심볼 단위로 수행되며, 이는 곧 심볼 단위 컨볼루션 인터리버의 레지스터 크기가 심볼 크기와 동일한 것을 의미한다. 쉬프트 레지스터의 개수가 5인 경우($M=5$), 심볼 단위 컨볼루션 인터리버의 인터리빙 과정을 <그림 3>에 나타내었다. 심볼 단위 컨볼루션 인터리버에 심볼 단위 부호화된 심볼 $[C_1, C_2, C_3, \dots]$ 이 입력되면, 쉬프트 레지스터의 좌측에서부터 차례로 채워진다.

이때, 쉬프트 레지스터에는 초기 값 x 가 저장되어 있다. 출력은 각 쉬프트 레지스터의 끝 단에서 나가게 되므로 최초 출력은 $[C_1, x, x, x, x]$ 이고 다음 출력은 $[C_2, C_2, x, x, x]$ 와 같은 순서로 출력되게 된다. 이를 통해 출력 심볼들은 쉬프트 레지스터의 개수인 5심볼 간격으로 떨어져서 나타나는 것을 확인할 수 있다.

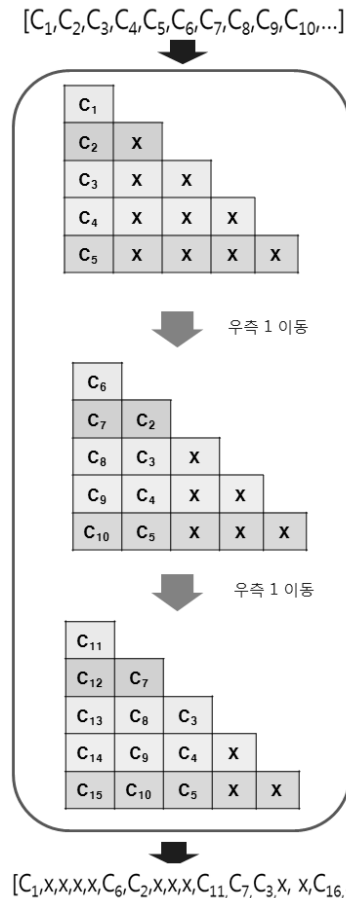


그림 3. 심볼 단위 컨볼루션 인터리버의 인터리빙 과정
Figure 3. Interleaving process of symbol unit convolution interleaver

<그림 3>에서 나타난 심볼 단위 컨볼루션 인터리

버의 출력 심볼 배열 특성을 분석하면, 인터리버의 파라미터 B 와 M 을 추정 가능하다.

3. 인터리버 추정

3.1 심볼 단위 인터리빙된 신호의 선형 특성

앞서 살펴본 바와 같이, 심볼 단위 컨볼루션 인터리빙이 수행된 후에는 정보 심볼과 잉여 심볼이 뒤섞인 형태로 출력된다. 그러나 심볼 단위 컨볼루션 인터리빙 후에 인접 심볼들이 쉬프트 레지스터의 개수 간격으로 떨어져서 분포하는 특성을 이용하면, 인터리버 추정을 위한 행렬을 구성할 수 있다. 그 방법은 다음과 같다.

우선, 열의 크기가 E 인 행렬 P 를 구성하고 수집된 시퀀스를 행 순서로 저장한다. 이때, $E = B \times M$ 이면 <그림 4>와 같이 레지스터 초기 값 영역, 정보 심볼 영역, 잉여 심볼 영역이 명확하게 구분된다.

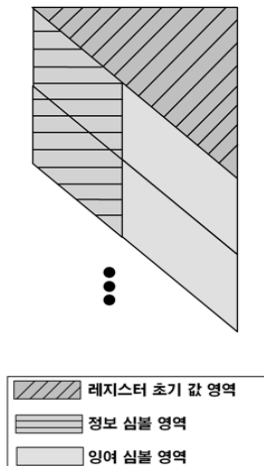


그림 4. 쉬프트 레지스터 초기 값 제거를 위한 시퀀스 배치
Figure 4. Sequence array for initial values elimination of shift register

<그림 4>와 같이 재구성된 행렬의 레지스터 초기 값 부분을 제거하면, 정보 심볼과 잉여 심볼을 같은 행에 배치할 수 있다. 즉, 1열부터 B 열까지는 그대로 두고, $B+1$ 열부터 $2B$ 열까지는 1행을 삭제 후 나머지 행을 위로 1이동, $2B+1$ 열부터 $3B$ 열까지는 1, 2행을 삭제 후 나머지 행을 위로 2이동하는 식으로 마지막 열까지 수행한다. 이와 같은 과정을 통해 최종적으로 <그림 5>와 같이 쉬프트 레지스터 초기 값이 제거된 인터리버 추정 행렬 H 을 얻을 수 있다.

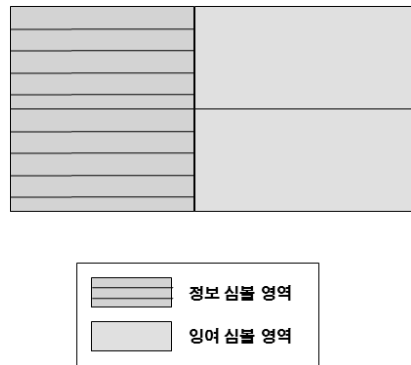


그림 5. 인터리버 추정 행렬 H
Figure 5. H matrix for interleaver estimation

<그림 5>와 같이 재배치된 추정 행렬은 같은 부호어를 구성하는 정보 심볼과 잉여 심볼이 한 행에 놓이게 되므로, 정보 심볼과 잉여 심볼간의 선형성을 나타내게 된다. 이러한 선형성 확인을 위해 인터리버 추정 행렬에 가우스 소거를 적용하여 rank를 확인한다. 이 때, 가우스 소거 후 0으로 나타나지 않는 행의 개수를 t 라고 하면, 추정 행렬의 크기 E 가 $B \times M$ 과 일치할 경우에만 $t < E$ 로 나타나며 그 값은 다음과 같다.

$$t = \text{rank}(H) = k \times m \quad \text{for } E = B \times M \quad (1)$$

식 (1)과 같이 소거 후 남은 행의 개수가 $k \times m$

인 이유는 블록 단위 채널 부호화된 부호어에서 m 비트 크기인 k 개 심볼이 정보 심볼이므로 그 독립성을 유지하고 있기 때문이다. 이와 같이 추정 행렬의 크기 E 가 $B \times M$ 과 일치할 경우 전체 값이 0인 행이 발생하므로, 행 내에서 0비트의 개수에 대한 1비트의 개수 비율이 0으로 나타나게 된다.

추정 행렬의 크기 E 가 $B \times M$ 과 일치하지 않는 모든 경우에는 추정 행렬의 내에서 그 선형성이 나타나지 않기 때문에 t 값이 E 로 나타나게 된다.

$$t = \text{rank}(H) = E \quad \text{for } E \neq B \times M \quad (2)$$

이와 같이 추정 행렬의 크기 E 가 $B \times M$ 과 일치하지 않는 모든 경우에는 0으로 소거되는 행이 발생하지 않기 때문에 행 내에서 0비트의 개수에 대한 1비트의 개수 비율이 0이 아닌 임의의 값을 가지게 된다.

위와 같은 특성에 따라 수집된 신호를 E 의 크기를 증가시켜 가면서 쉬프트 레지스터 초기 값 제거 및 선형성 확인을 수행하면, $E = B \times M$ 인 경우 소거된 행이 나타나기 때문에 이 특성을 이용하여 송신 인터리버를 추정할 수 있다.

3.2 인터리버 추정 알고리즘

앞서 살펴본 특성을 이용하여 심볼 단위 채널 부호화된 신호의 심볼 단위 컨볼루션 인터리버 추정 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

- 1) $E=1$ 로 설정한다.
- 2) 수집된 시퀀스를 열의 크기가 E 인 행렬 P 에 행 순서로 저장한다.
- 3) E 의 약수 J_i 를 구하고, i 는 1로 설정한다.
- 4) P 를 열 별로 E/J_i 크기만큼 쉬프트 레지스터 초기 값을 제거하고 열 방향 이동을 하여 크기

가 $2E \times E$ 인 추정 행렬 H 를 구성한다.

- 5) H 에 대해 가우스 소거를 수행하여 각 행별로 0 비트 개수에 대한 1 비트 개수 비율 값을 ρ 로 저장한다.
- 6) $\min \rho = 0$ 일 경우, 선형성이 존재하여 소거된 행이 발생한 것이므로 $M = J_i$, $B = E/J_i$ 로 최종 결정하고 모든 순서를 마친다.
- 7) $\min \rho \neq 0$ 일 경우, 선형성이 존재하지 않는 것이므로 i 를 1만큼 증가시키고 3번 단계로 돌아간다.
- 8) E 를 1만큼 증가시키고 2번 단계로 돌아간다.

4. 성능 분석

본 장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해 제안된 인터리버 추정 알고리즘을 검증한다. 모의실험에는 (27, 3) RS부호를 사용하였고, 이 때 심볼당 비트수는 5 비트이다. 심볼 단위 컨볼루션 인터리버의 쉬프트 레지스터 개수는 $27(B=27)$, 쉬프트 레지스터의 크기는 $5(M=5)$ 로 설정하였다. <그림 6>에는 인터리버 추정 결과를 나타내었다.

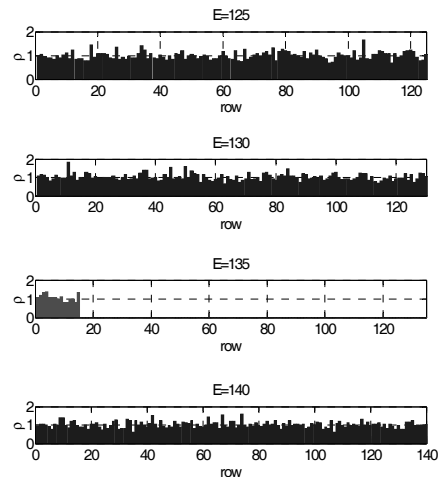


그림 6. 인터리버 추정 결과
Figure 6. Results of interleaver estimation

<그림 6>과 같이 E 를 점차 증가시키며 선형성을 판단했을 때, $E=125, 130, 140$ 값에서는 0으로 소거된 행이 발생하지 않으므로 각 행 별 0 비트 개수에 대한 1 비트 개수 비율인 ρ 가 평균적으로 1에 가깝게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 $E=135, J=5$ 인 경우에는 정보 심볼과 잉여 심볼의 배치가 정렬되므로 선형성이 발생하여, 가우스 소거 후 0인 행이 발생하게 된다. 그에 따라, ρ 가 0인 지점이 나타난다. 결과적으로 심볼 단위 컨볼루션 인터리버의 파라미터 M 과 B 를 각각 5와 27(135/5)로 정확하게 추정가능하다. 이때, ρ 가 0인 지점의 개수를 E 로 나눈 값은 채널 부호의 부호율과 동일하므로, (15/135=3/27) 인터리버 추정과 더불어 채널 부호의 부호율까지 추정이 가능한 것을 확인할 수 있다.

다음으로 다양한 부호율을 갖는 심볼 단위 채널 부호에 대해 잡음 환경에서의 인터리버 추정 성공률을 분석한다. 잡음 채널은 BSC(Binary Symmetric Channel)을 가정하였으며, BER(Bit Error Rate)에 따른 인터리버 파라미터 추정 성공률을 나타내었다. <그림 7>에는 부호어 길이가 27심볼인 RS 부호가 $B=27, M=5$ 인 심볼 단위 컨볼루션 인터리빙되었을 경우 인터리버 파라미터 추정 성공률을 나타내었다.

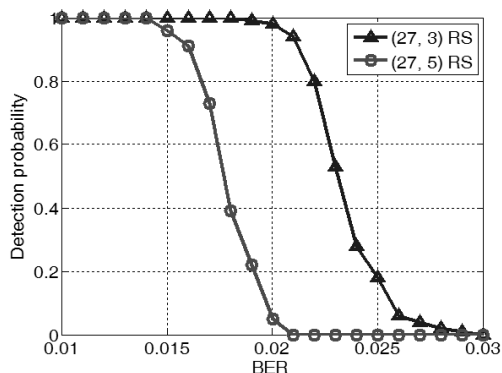


그림 7. 27 RS 부호에 대한 인터리버 추정 성공률
Figure 7. Detection probability of interleave estimation for 27 RS codes

<그림 7>에서 볼 수 있듯이, (27, 3) RS 부호가 적용된 경우 BER 0.02까지 95%이상의 추정 성공률을 보이며, (27, 5) RS 부호가 적용된 경우 BER 0.015까지 95%이상의 추정 성공률을 보이는 것을 확인할 수 있다.

<그림 8>에는 부호어 길이가 28심볼인 RS 부호가 $B=28, M=5$ 인 심볼 단위 컨볼루션 인터리빙되었을 경우 인터리버 파라미터 추정 성공률을 나타내었다.

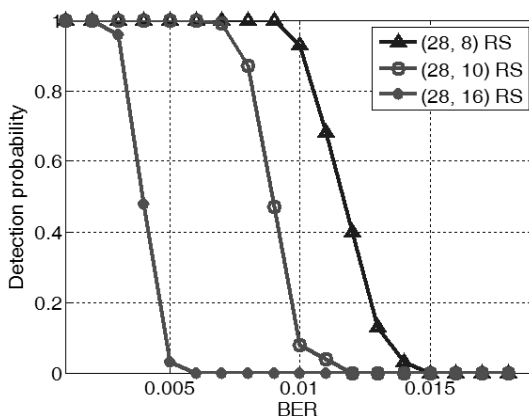


그림 8. 28 RS 부호에 대한 인터리버 추정 성공률
Figure 8. Detection probability of interleave estimation for 28 RS codes

<그림 8>에서 볼 수 있듯이, (28, 8) RS 부호가 적용된 경우 BER 0.009까지 99%이상의 추정 성공률을 보이며, (28, 10) RS 부호가 적용된 경우 BER 0.007까지 99%이상의 추정 성공률을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, (28, 16) RS 부호가 적용된 경우 BER 0.003까지 95%이상의 추정 성공률을 나타낸다.

실험 결과를 통해 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 부호율이 낮은 채널 부호일수록 잡음에 강한 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이는 제안하는 인터리버 추정 알고리즘이 채널 부호의 선형성을 이용하는 구조이고 채널 부호의 부호율이 낮을수록 선형성을 갖는 부분의 비율이 커지기 때문인 것으로 분석된다.

5. 결 론

본 논문에서는 심볼 단위 채널 부호화된 신호의 심볼 단위 컨볼루션 인터리버에 대한 파라미터 추정 알고리즘을 제안하였다. 그리고 컴퓨터 모의실험을 통해 제안된 알고리즘을 검증하였으며 채널 부호의 부호율에 따른 잡음 환경에서의 인터리버 파라미터 추정 성능을 분석하였다. 그 결과 일반적인 성능 기준인 BER 10^{-5} (데이터 기준) 이하, 10^{-3} (음성 기준) 이하에서 제안된 알고리즘이 인터리버 파라미터를 정확하게 추정하는 것을 확인하였다. 본 논문을 통해 제시된 결과는 송신단에 대한 정보가 부족한 여러 통신 신호처리 환경에서 정보 획득을 위한 기반 기술로 활용될 수 있을 것이다.

References

[1] G. Burel and R. Gautier, *Blind estimation of encoder and interleaver characteristics in a non cooperative context*, Proceeding of International Conference on Communications, Internet and Information Technology, pp. 275-280, 2003.

[2] G. Sicot, S. Houcke, and J. Barbier, *Blind detection of interleaver parameters*, Signal Processing, April, Vol. 89, Issue 4, pp. 450-462, 2009.

[3] J. Lee, J. Jeong, D. Yoon, S. Yun, Y. Park, and S. Nah, *Blind reconstruction of helical Scan Interleaver parameters*, Proceeding of Conference of Agency for Defense Development, pp. 360-362, 2010.

[4] J. Jeong, D. Yoon, C. Park, S. Yun, and S. Lee, *Blind block deinterleaving using convolutional code reconstruction method*, Journal of the Institute of Electronics Engineers of Korea, September, Vol. 48, No.

9, pp. 10-16, 2011.

[5] J. Jeong, S. Choi, D. Yoon, C. Park, and S. Yun, *Efficient blind estimation of block interleaver parameters*, Journal of the Korea Information and Communications Society, May, Vol. 37C, No. 5, pp. 384-392, 2012.

[6] R. H. Morelos-Zaragoza, *The Art of Error Correcting Coding*, John Wiley & Sons, 2007.

[7] I. S. Reed and G. Solomon, *Polynomial codes over certain finite fields*, Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, June, Vol. 8, Issue 2, pp. 300-304, 1960.

[8] J. L. Ramsey, *Realization of optimum interleavers*, IEEE Transactions on Information Theory, May, Vol. IT-16, No. 3, pp. 338-345, 1970.

[9] G. D. Forney, *Burst-correcting codes for the classic Bursty Channel*, IEEE Transactions of Communication Technology, Vol COM-19, pp. 772-781, October 1971.

[10] B. Sklar, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*, Prentice-Hall, 2001.

심볼 단위 채널 부호화된 시퀀스에 대한 블라인드 인터리버 추정

장연수¹, 윤동원¹, 현광민², 박철순³, 윤상범⁴

¹한양대학교 전자컴퓨터통신 공학과

²국립 강릉원주대학교 정보통신공학과

³국방과학연구소

⁴엘아이지 넥스원

요 약

다양한 무선 통신 시스템에서는 오류 정정을 위해 채널 부호가 필수적으로 적용되고 있으며, 이러한 채널 부호의 오류 정정 성능은 연립 오류를 랜덤 오류로 바꾸어 주는 인터리빙 과정을 통해 향상될 수 있다. 그러나 수

신단에서 송신단 인터리버에 대한 정보가 부족할 경우, 디인터리빙을 정확히 수행할 수 없으므로 송신된 데이터를 획득하기 어렵다. 이러한 상황에서 인터리버의 파라미터는 채널 부호의 선형성을 기반으로 추정 가능하며, 이와 관련된 연구가 활발하게 이루어져왔다. 그러나 지금까지의 연구 결과는 비트 단위 채널 부호가 적용되었을 경우, 비트 단위 인터리버에 대한 추정 연구에 국한되어 있다. 현재 리드 솔로몬 부호와 같은 심볼 단위 채널 부호가 적용되었을 경우, 심볼 단위로 인터리빙된 시퀀스에 대해 송신단 인터리버 파라미터를 블라인드 추정하는 연구는 미흡한 상황이다. 본 논문에서는 심볼 단위 채널 부호화된 신호가 심볼 단위 컨볼루션 인터리빙 되었을 때, 송신단 인터리버를 추정하는 알고리즘을 제시한다. 이를 위해 우선 심볼 단위 컨볼루션 인터리빙된 시퀀스의 특성을 분석하고, 심볼 단위 채널 부호의 선형성을 이용하여 쉬프트 레지스터의 수, 레지스터 크기 등 인터리버의 파라미터를 추정한다. 모의실험을 통해 제안된 알고리즘을 검증하고 잡음 상황에서의 성능을 분석한다.



Yeonsoo Jang received the bachelor's degree in the Department of Electronics Engineering from Hanyang University in 2009. He is currently pursuing the unified course of the master's and the doctor's at the same university. His research interest includes new modulation techniques, accurate performance evaluations, digital communication theory and systems, and FPGA implementation of communication system.

E-mail address: ysjang83@hanyang.ac.kr



Dongweon Yoon is currently a professor with the department of electronic engineering at Hanyang University, Seoul, Korea.

E-mail address: dwyoon@hanyang.ac.kr



Kwangmin Hyun received the Ph.D. from the Division of Electrical and Computer Engineering at Hanyang University in 2004. Since March 2005, he has been with the department of Information and Telecommunication Engineering at Gangneung-Wonju National University, Wonju, Korea. His research interests are in the areas of communication theory, wireless communications, mobile communications, MIMO, and communication signal processing.

E-mail address: kamihyun@gwnu.ac.kr



Cheolsun Park received the Ph.D. degree in Info. Comm. Engineering from Chungnam National University, Republic of Korea, in 2007. Since 1991, he has been with Agency for Defense Development. His main research interests are communication signal processing, sensor array processing, and communications applications.

E-mail address: csun@add.re.kr



Sangbom Yun is currently an senior engineer in department of E&W(electric warfare) at LIG Nex1 and has researched for signal analysis since 2002.

E-mail address: soryalife@gmail.com