

분자통신 채널에서 소프트 값을 이용한 해밍부호의 복호에 대한 연구

정호영*

A Study on the Decoding of Hamming Codes using Soft Values on the Molecular Communication Channel

Ho-Young Cheong*

요약 본 논문에서는 소프트 값을 활용한 Hamming 부호의 복호 방식이 분자 통신 채널에도 적용될 수 있음을 보였다. 분자 통신 시스템의 복조기 출력단에서 복호에 활용될 수 있는 소프트 값 기준을 제안하고 이를 활용한 복호 방식이 분자 통신 채널에서도 신뢰도를 향상시킬 수 있음을 모의실험을 통해 보였다. 확산 기반 분자통신 채널을 가정하였으며 BCSK 변조 방식을 이용하여 정보 심벌을 전송하였다. 매 심벌구간 마다 수신기에 흡수되는 분자 수를 적절한 문턱값과 비교하여 복조한 후 흡수된 분자 수는 더 이상 사용되지 않는다. 본 논문에서는 더 이상 사용되지 않는 분자수 정보를 소프트 값으로 복호 과정에 활용하여 복호기의 BER 성능을 개선하였다. BER 성능 향상을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였으며, 비트 당 분자수가 600인 경우 해밍 부호를 사용하지 않은 BCSK 시스템의 오율에 대해 (15,11) 해밍 부호의 오율이 약 5.0×10^{-3} 정도 개선되었으며 이에 대해 소프트 값을 활용한 (15,11) 해밍 부호의 오율은 동일한 정도로 개선되었음을 볼 수 있었다. (7,4) 해밍 부호의 경우에도 (15,11) 해밍 부호와 유사한 결과를 보여준다. 따라서 수신기에 흡수된 분자수와 문턱 값의 차이 값을 소프트 값으로 활용하면 분자통신 채널에서도 해밍 부호의 BER 성능을 크게 개선할 수 있음을 알 수 있다.

Abstract In this paper, it was shown that the decoding method of Hamming codes using soft values can be applied to molecular communication channels. A soft value criterion that can be used for decoding of Hamming codes for a molecular communication channel was proposed, and it has been shown through simulation that the decoding method using these values can improve reliability even in the molecular communication channel. A diffusion-based molecular communication channel was assumed, and information symbols were transmitted using BCSK modulation. After demodulating the number of molecules absorbed by the receiver at each symbol interval with an appropriate threshold, the number of molecules is no longer used. In this paper, the BER performance of the decoder was improved by utilizing information on the number of molecules that are no longer used as soft values in the decoding process. Simulation was performed to confirm the improvement in BER performance. When the number of molecules per bit is 600, the error rate of the Hamming code (15,11) was improved about 5×10^{-3} to the error rate of the BCSK system without the Hamming code. It can be seen that the error rate of (15,11) Hamming code with the soft values was improved to the same extent. In the case of (7,4) Hamming code, the result is similar to that of (15,11) Hamming code. Therefore, it can be seen that the BER performance of the Hamming code can be greatly improved even in the molecular communication channel by using the difference between the number of molecules absorbed by the receiver and the threshold value as a soft value.

Key Words : Binary Concentration Shift Keying, Diffusion-based Molecular Communication, Hamming Code, Soft Value, Syndrome Decoding, Threshold Value

Funding for this paper was provided by Namseoul University in 2019

*Department of Information and Communication Engineering, Namseoul University

Received September 20, 2020

Revised September 26, 2020

Accepted September 29, 2020

1. 서론

나노 기술이 발달하면서 생체 시스템에 적용할 수 있는 나노 시스템에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 특히 나노 시스템 간의 통신 문제가 도전 과제가 되고 있는데 이러한 통신 시스템의 신뢰도 개선은 그 무엇보다도 중요하다[1]. 정보 전달 매개체로서 분자들을 이용하는 분자 통신은 유망한 나노 통신 방식 중 하나이다. 그러나 분자통신 시스템은 사용할 수 있는 에너지가 한정되어 있고 나노 미터 급의 크기를 갖기 때문에 복잡한 통신 시스템은 적용할 수 없다[2]. 일반 전자파 통신과 같이 분자 통신 시스템에서도 신뢰도를 향상시키기 위해 오류 정정 부호를 사용하고 있는데 가장 복잡도가 낮은 해밍 부호를 기본적으로 고려하고 있다. 그러나 단일 오류만을 정정할 수 있는 해밍 부호의 신뢰도 개선 정도는 기대치에 크게 미치지 못하는 것도 사실이다[3][7].

[2]에서는 단일 오류만을 정정할 수 있었던 해밍 부호의 복호 방식을 복잡도가 증가가 거의 없이 2개의 오류까지 정정할 수 있도록 개선하여 일반 통신 채널 환경에 대해 제한한 바 있다. 이를 위해 복조기 출력단의 소프트 값을 활용하고 있는데 이러한 복조 방식은 분자 통신 시스템에도 적용할 수 있다. 분자 통신 시스템은 전자파를 이용한 통신 시스템과 크게 다르며 [2]에서 제안한 복호 방식을 적용하기 위해서는 분자통신 시스템의 복조기 출력단에서 소프트 값을 추출하는 것이 가장 중요하다.

본 논문에서는 [2]에서 제안한 복호 방식이 분자 통신 채널에도 적용할 수 있음을 보이고자 한다. 특히 분자 통신 시스템의 복조기 출력단에서 복호에 활용할 수 있는 소프트 값 기준을 제안하고 이를 활용한 복호 방식이 분자 통신 채널에서도 신뢰도를 개선할 수 있음을 모의실험을 통해 분석하고자 한다.

본 논문에서는 분자 통신의 동작 원리와 채널 모델을 다루었으며 해밍 복호 과정에 이용할 복조기 소프트 값을 자세히 설명하였다. 특히, 소프트 값을 이용한 복호 방식을 제안하였으며 제안한 복호 방식에 대해 시뮬레이션을 수행하여 오류 성능을 분석하였다.

2. 분자통신 시스템과 채널 모델

정보 전달 매개체로서 분자들을 이용하는 분자 통신의 신호 전달 방식은 유체 내의 분자 확산을 이용한 방식, 유체의 흐름을 이용한 방식, 박테리아를 이용한 방식 등 다양한 형태가 있으나 본 논문에서는 가장 일반적으로 이용될 수 있는 분자 확산에 의한 통신 방식을 다루기로 한다.

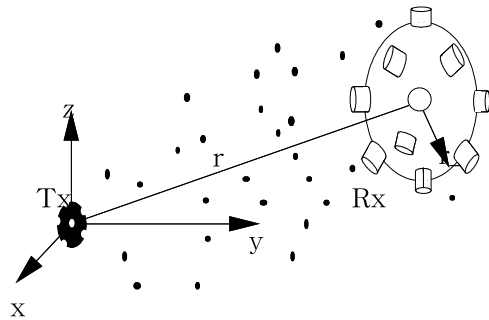


그림 1. 확산 기반 분자통신 시스템
Fig. 1. Diffusion-based molecular communication system

그림 1은 확산 기반 분자 통신 시스템에서 분자들이 수신기를 향해 확산 되어 나가는 과정을 3차원으로 나타낸 것이다. 송신기 Tx에서 분사된 분자들은 유체 내에서 브라운 운동을 통해 수신기로 퍼져 나가며 시간 t 에서 수신기의 표면에 분자들이 흡수될 확률은 식 (1)과 같다[4].

$$F_{hit}^{3D} = \frac{r_r}{d+r_r} \operatorname{erfc}\left(\frac{d}{\sqrt{4Dt}}\right) \quad (1)$$

여기에서 r_r 은 구형 수신기의 반지름이며 d 는 송신기와 수신기 사이의 거리 ($r-r_r$)이고 D 는 확산 계수를 의미한다. 송신기에 분사된 분자들은 시간이 흘러도 수신기에 도달하지 못할 수도 있으며 그 비율은 수신기의 반지름 r_r 과 송수신기 간의 거리 d 에 의해 좌우된다.

본 논문에서 가정한 분자 통신 시스템의 변조기는 전송하고자 하는 이진 심벌에 따라 송신기의 분자 분자 수 혹은 분자 농도를 달리하는 BCSK(binary

concentration-based shift keying)이다[6]. 예를 들어 전송 심벌이 1이면 송신기에서 N 개의 분자들을 한꺼번에 분사하고 심벌이 0이면 분사하지 않는다. 수신기에서는 적절한 문턱 값을 이용하여 심벌을 구분하게 된다.

3. 분자 통신 시스템의 복조기 소프트 값

심벌 1일 때 N 개의 분자들을 분사하고 심벌 0이면 분사하지 않는 BCSK 변조 방식을 가정할 때, 송신기로부터 분사된 분자들은 분자통신 채널을 통해 브라운 운동 형태로 수신기를 향해 확산되어 나간다. 수신기에서는 수신 타임 슬롯 동안 수신기에 흡수되는 분자 수를 측정한 후 적절한 문턱값을 넘으면 심벌 1로 판정하고 문턱값 보다 작으면 심벌 0으로 판정하여 수신한다. 이때 심벌 1을 전송하기 위해 N 개의 분자들을 분사했는데도 불구하고 수신기에서 문턱값 보다 적은 수의 분자들이 흡수되면 오류가 발생하며 그 반대의 경우에도 동일하다. 이때 수신기에서 심벌 1과 0을 판정하기 위해 사용한 수신기에 흡수된 분자 수는 심벌을 판정하는 순간 버려지며 일반 통신 시스템에서의 경판정 과정과 동일하다.

본 논문에서는 수신기에서 심벌 판정 후 버려지는 수신기에 흡수된 분자 수를 소프트 값으로 활용하여 해밍 부호의 복호기 성능을 개선하고자 한다. 이후 한 심볼 구간 동안 수신기에 흡수된 분자 수를 소프트 값으로 부르기로 한다.

그림 2는 심벌 비트 1에 대해 송신기에서 $N=300$ 개의 분자들을 분사한 경우, 수신기에 흡수된 분자수(소프트 값)에서 문턱값을 뺀 크기를 나타낸 것이다. 기호 Δ 와 O 는 각각 오류 비트와 정상 비트에 해당하는 소프트 값과 문턱값의 차이이다. 그림 2에서 오류 비트에 해당하는 차이 값은 거의 0에 근접함을 볼 수 있으며 정상 비트에 해당하는 차이 값은 0보다 훨씬 큰 값을 보인다. 따라서 이러한 차이 값만으로도 오류 비트에 대한 정보를 상당 부분 얻을 수 있다. 오류 비트임에도 불구하고 차이 값이 100 이상 되는 비트 들은 이전 심벌에 해당되는 분자들이 뒤 늦게 수신기에 도착하여 흡수된 영향으로 분석되며 이를 분자통신에서는 ISI(inter-symbol

interference)로 다루고 있다. 그림 2로부터 소프트 값과 문턱값의 차이 값은 [2]에서 제안한 해밍 복호 방식의 소프트 값으로 대신하여 **복호 과정에 동일하게 활용하여 오율 성능을 개선할 수 있다.**

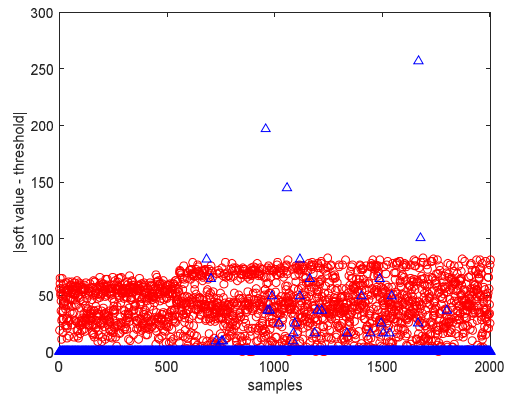


그림 2. 소프트 값과 문턱값 차이의 크기(오류 비트 : Δ , 오류가 발생하지 않은 비트 : O)
 Fig. 2. Difference between soft values and the threshold(erroneous bit : Δ , correct bit : O)

즉 수신기 복조 과정에서 심벌 0과 1을 판별한 후에도 오류 비트와 정상 비트를 구별할 수 있는 정보를 버리지 않고 복호 과정에 활용하면 단일 오류 뿐만 아니라 2개의 오류까지 정정함으로써 오율 성능을 개선할 수 있는 것이다.

4. 분자 통신 복조기의 소프트 값을 활용한 해밍 복호

해밍 복호기에 들어오는 수신 부호(이후 벡터 r 로 표시)는 실수 형태의 복조기 출력 값에 대하여 하드 디시전을 통해 0 혹은 1로 결정된 값들이다. 일반 전자파 통신 채널에서의 복조기 출력 값은 분자 통신 채널의 경우 수신기에 흡수된 분자 수에 해당하며 분자통신에서도 문턱값을 이용해 경판정을 한 후 더 이상 사용하지 않는다. 소프트 값에 포함되어 있던 채널 정보들은 0 혹은 1로 변환 하는 순간 없어지며 이로 인해 복호기의 BER 성능이 저하된다. 분자통신에서는 문턱값이 0이 아니므로 식 (2)

와 같이 표시되는 소프트 값과 문턱값의 차이에 대한 크기 값(이후 i 번째 심벌에 대한 차이 값은 q_i 로 표시함)을 복호 과정에 활용한다.

$$q_i = |r_i - Th_i| \quad (2)$$

본 논문에서는 소프트 값에 대한 하드 디지전 값(0 혹은 1)과 q_i 값을 해밍 복호기에 함께 입력시킨 후 q_i 값을 복호 과정에 활용함으로써 오율 성능을 개선할 수 있음을 보인다.

그림 2에서 설명한 바와 같이 수신기에 흡수된 분자 수가 문턱 값을 넘어 전송 심벌의 반대 영역에 위치하면 오류가 발생되기 때문에 오류 비트에 해당하는 q_i 값은 작을 수밖에 없다. 따라서 q_i 값은 오류 비트와 정상 비트를 구별할 수 있는 정보를 담고 있으며 오류 비트에 비해 정상 비트에 해당하는 q_i 값이 훨씬 크다. 해밍 복호는 채널에서 단일 오류만이 발생하였다고 가정하고 복호하며 2개 이상의 오류 비트가 발생한 경우는 미리 포기하고 복호하기 때문에 성능 열화가 발생할 수 밖에 없다. 그러나 채널 정보를 담고 있는 소프트 값을 복호 과정에 활용할 경우 2개의 오류까지도 정정할 수 있다. 2개의 오류 발생에 해당하는 신드롬이 검출될 경우 기존의 복호 방식은 2 개의 오류 비트에 해당하는 오류 패턴이 다수이므로 더 이상 복호를 진행하지 못하고 오류를 정정하지 못하는데 비해 본 논문에서 제한하는 복호 방식에서는 q_i 값을 이용해 다수의 오류 패턴 중에서 정확한 오류 패턴을 추가로 찾아낼 수 있다.

표 1은 (15,11) 해밍 부호에서 신드롬 [1101]에 해당하는 오류 패턴을 나타낸 것인데, 단일 오류만 가정할 경우 오류 패턴은 [00010000000000]이므로 4 번째 비트에 오류가 발생한 것으로 복호한다. 그러나 2 개의 오류까지 고려하면 8개의 오류 패턴들이 존재해 복호하지 못한다. 그러나 본 논문에서 제안하는 복호 과정은 q_i 값을 활용하여 8 개의 오류 패턴 중 가장 발생 가능성이 큰 하나를 선별할 수 있다.

표 1. (15,11) Hamming 부호의 오류 패턴과 신드롬 벡터 ($m \leq 2$) [2]

Table 1. Example of error pattern and its syndrome vector for (15,11) Hamming code ($m \leq 2$) [2]

오류 패턴 e	신드롬 s
(00010000000000)	(1101)
(00001100000000)	(1101)
(00100001000000)	(1101)
(01000000100000)	(1101)
(00000010000100)	(1101)
(00000000100100)	(1101)
(10000000000001)	(1101)
(00000000001000)	(1101)

예를 들어, 오류 패턴을 $e = (e_1, e_2, \dots, e_{15})$ 라고 표시할 때 오류 패턴 $e_1 = (00001100000000)$ 의 경우 다섯 번째와 여섯 번째 오류 비트가 1이므로 q_5 와 q_6 의 값이 다른 13 개의 q_i 값에 비해 월등히 작을 것이다. 만일 e_1 과 $e_2 = (10000000000001)$ 중 한 개를 선택하여 에러 패턴 \hat{e} 를 추정하는 경우 식 (3)의 기준을 이용하면 정확한 에러 패턴을 구별할 수 있다.

$$\hat{e} = \begin{cases} e_1, & q_5 + q_6 < q_1 + q_{14} \\ e_2, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)의 계산은 각 오류 패턴에 대해 2개 이하의 q_i 값을 계산하므로 복호 복잡도는 거의 증가하지 않는다.

5. 모의실험 및 결과 분석

본 논문에서 제안한 복호 방식의 오율 성능 개선을 확인하기 위해 확산 기반 분자 통신 채널에서 BCSK 변조 방식을 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 송수신기 간의 거리는 $d = 2[\mu m]$, 수신기의 반지름은 $r_r = 4[\mu m]$, 송신 심벌 구간은 $T_s = 0.03[sec]$, 확산 계수는 $D = 100$ 으로 가정하였다. 오류 정정 부호를 사용하지 않은 BCSK 변조 방식에 대한 시뮬레이션은 MUCIN 시뮬레이터 [5]를 사용하여 수행하였으며, 이를 기반으로 해밍 부/복호기를 추가하여 모의실험을 진행하였다. 부호

율이 R_c 인 오류 정정 부호를 사용하여 1 비트의 정보 비트를 전송하는 경우 실제 전송되는 정보 비트는 R_c 비트에 해당한다. 본 논문에서는 부호율 R_c 를 반영하여 부호 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

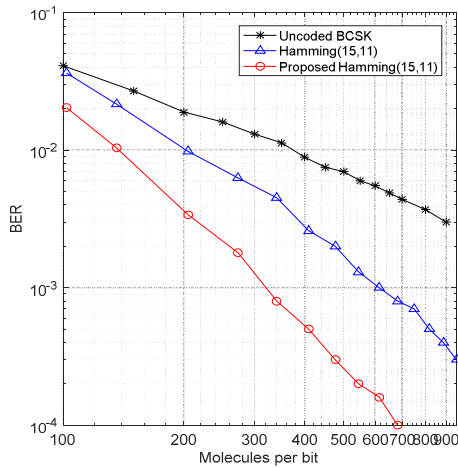


그림 3. 비트 당 분자수에 따른 (15,11) 해밍 부호의 BER 성능
Fig. 3. BER vs molecules per bit for (15,11) Hamming code

그림 3은 비트 당 분사되는 분자수에 따른 (15,11) Hamming 부호의 BER 성능을 나타낸 것이다. 비트 당 분자수가 600인 경우 해밍 부호를 사용하지 않은 BCSK 시스템의 오류에 대해 (15,11) 해밍 부호의 오류가 약 5.0×10^{-3} 정도 개선되었으며 이에 대해 소프트 값을 활용한 (15,11) 해밍 부호의 오류는 동일한 정도로 개선되었음을 볼 수 있다. 이는 기존의 복호 방식이 단일 오류를 정정할 수 있는데 반해 소프트 값을 활용한 복호 방식은 2개의 오류까지 정정할 수 있는 점 때문으로 분석된다.

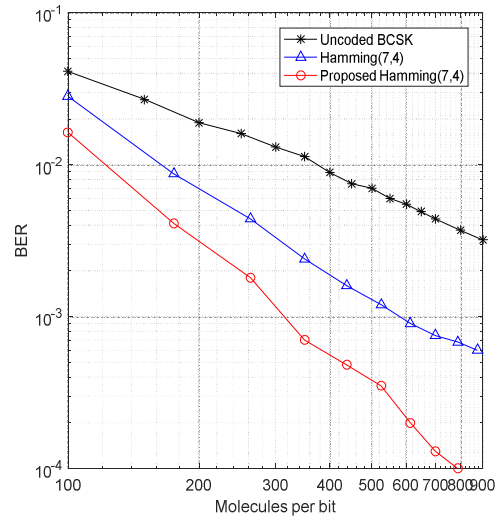


그림 4. 비트 당 분자수에 따른 (7,4) 해밍 부호의 BER 성능
Fig. 4. BER vs molecules per bit for (7,4) Hamming code

그림 4는 비트 당 분사되는 분자수에 따른 (7,4) Hamming 부호의 BER 성능을 나타낸 것으로 비트 당 분자수가 600인 경우 (7,4) 해밍 부호의 오류에 대해 소프트 값을 활용한 (7,4) 해밍 부호의 오류가 약 6.8×10^{-4} 정도 개선되었음을 알 수 있다. 따라서 수신기에 흡수된 분자수와 문턱 값의 차이 값을 소프트 값으로 활용하여 복호기에 적용하면 분자통신 채널에서도 해밍 부호의 BER 성능이 크게 향상될 수 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 일반 전자파 통신 채널에서 소프트 값을 활용한 해밍 부호의 복호 방식이 분자통신 채널에서도 적용되어 BER 성능이 크게 향상될 수 있음을 모의실험을 통해 보였다. 분자 통신 채널에 적용할 수 있는 소프트 값을 제안하고 이를 해밍 복호 과정에 적용 함으로서 단일 오류 정정 부호의 정정 능력을 2 개의 오류정정 능력까지 개선할 수 있음을 보였다. 확산 기반 분자 통신 채널에 대해 시뮬레이션을 수행한 결과 비트 당 분자수가 600일 때 (15,11) 해밍 부호의

오율이 BCSK 오율에 비해 약 5.0×10^{-3} 정도 개선되었으며, 소프트 값을 활용한 (7,4) 해밍 부호의 경우 기존의 (7,4) 해밍 부호 오율에 비해 약 6.8×10^{-4} 정도 개선 되었음을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서 제안한 소프트 값의 기준은 분자 통신 채널의 복호기 성능을 크게 개선할 수 있음을 알 수 있었다.

앞으로 ISI와 잡음 전력이 추가되고 더욱 세밀한 채널 모델링을 통해 분자통신 채널에 대한 오류 정정 부호의 성능 개선 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] Po-Jen Shih, Chia-Han Lee, Ping-Cheng Yeh, Kwang-Cheng Chen, "Channel Codes for Reliability Enhancement in Molecular Communication," IEEE Journal on Selected Areas in Communications (Volume: 31 , Issue: 12 , December 2013 , Vol. 31, Issue 12, pp. 857-867, December 2013.
- [2] Hoyoung Cheong, "An Improved Decoding Scheme of Hamming Codes using Soft Values," The Journal of KIIECT, Vol. 12, No. 1, pp. 37-42, February 2019.
- [3] Yi Lu, Xiayang Wang, Matthew D. Higgins, Adam Noel, Neophytos Neophytou, Mark. S. Leeson, "Energy Requirements of Error Correction Codes in Diffusion-Based Molecular Communication Systems ," Nano Communications Networks, Vol. 11, pp. 24-35, March 2017.
- [4] W. Guo, T. Asyhari, N. Farsad, H. B. Yilmaz, B. Li, A. Eckford, C-B Chae, "Molecular Communications: Channel Model and Physical Layer Techniques," IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 4, pp. 120-127 , 2016.
- [5] H. Birkan, *MolecUlar CommunicatIoN (MUCIN) Simulator*, <https://kr.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/46066-molecular-communication-mucin-simulator>
- [6] W. Guo, , B. Li, S. Wang, and W. Liu, "Molecular Communications with longitudinal carrier waves: baseband to passband modulation," IEEE Communication Letters, Vol. 19, Issue:9, pp. 1512-1515, Sept. 2015.
- [7] Hoyoung Cheong, "An Improved Decoding Scheme of LCPC Codes," The Journal of KIIECT, Vol. 11, No. 4, pp. 430-435, Aug. 2018.

저자약력

정 호 영(Ho-Young Cheong)

[중신회원]



- 1987년 8월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1995년 4월 ~ 현재 : 남서울대학교 정보통신공학과 교수

〈관심분야〉 채널부호, 분자통신