

# 주파수 도약 수열의 합성 기법

조동식 · 정진호\*

울산대학교

## Synthesis Method for Frequency-Hopping Sequences

Dongsik Jo · Jin-Ho Chung\*

University of Ulsan

E-mail : jinho@ulsan.ac.kr

### 요 약

주파수 도약 수열은 군용 통신, 블루투스, 초광대역 통신 등에서 다양하게 사용되어 온 사용자 고유 부호의 일종이다. 실제 통신 환경에서는 가용 주파수의 개수와 전송 주기 등에 맞는 길이와 알파벳을 가지는 주파수 도약 수열이 필요하다. 따라서, 다양한 파라미터를 가진 주파수 도약 수열의 설계는 주파수 도약 기반 대역확산 통신에서 매우 중요한 문제이다. 이를 위해 본 논문에서는 주파수 도약 수열의 합성을 통해 새로운 길이의 수열을 합성할 수 있는 방법을 탐구한다. 이를 통해 다양한 환경에 적용 가능한 주파수 도약 수열에 대한 가능성을 제시할 수 있다.

### ABSTRACT

The frequency-hopping sequence is a type of user-specific code that has been used in various ways in military communication, Bluetooth, and ultra-wideband communications. In a practical communication environment, a frequency-hopping sequence with an alphabet and a length suitable for the number of available frequencies and transmission period is required. Therefore, the design of the frequency-hopping sequence having various parameters is a very important problem in frequency-hopping spread-spectrum communication. To this end, this paper explores a method of synthesizing a sequence of a new length through the synthesis of existing frequency-hopping sequences. As a result, it is possible to present the possibility of frequency-hopping sequences applicable to various environments of communications.

### 키워드

Frequency-hopping, bluetooth, military communications, ultrawideband

## I. 서 론

주파수 도약 다중 접속(Frequency-hopping multiple-access, FHMA)은 블루투스, 초광대역(UWB), 군사 또는 레이더 애플리케이션 등과 같은 현대 통신 시스템에 널리 사용된다. 이러한 시스템의 경우 주파수의 다중 액세스 간섭을 줄이기 위해 해밍 상관 관계가 낮은 주파수 도약 수열(frequency-hopping sequences, FHS)을 사용하는 것이 바람직하다 [1],[2]. 주파수 도약 수열은 각 시간 슬롯에서 전송에 사용할 주파수를 지정하는 데 사용됩니다. Lempel과 Greenberger는 주어진 길이와 주어진 주파수 집합 크기에 대해 FHS의 최대 해밍 자기 상관에 대한 하한을 설정했다 [3]. Lempel-Greenberger 경계와 관련하여 최적의 FHS의 몇 가지 대수적

또는 조합적 구성이 존재한다 [4],[5]. 최적 FHS의 설계는 FHMA 시스템에 적용하기에 적합한 FHS를 제공할 뿐만 아니라 경계에 관한 최적 FHS의 존재를 검증한다.

실제 통신 환경에서는 가용 주파수 및 전송 주기 등에 맞는 길이와 알파벳을 가지는 주파수 도약 수열이 필요하다. 따라서, 다양한 파라미터를 가진 주파수 도약 수열의 설계는 FHMA 기반 통신에서 매우 중요한 문제이다. 이를 위해 본 논문에서는 주파수 도약 수열의 합성을 통해 새로운 길이의 수열을 합성할 수 있는 방법을 탐구한다. 이를 통해 다양한 환경에 적용 가능한 주파수 도약 수열에 대한 가능성을 제시할 수 있다.

## II. 주파수 도약 수열의 합성

FHS의 최적성은 Lempel-Greenberger bound로 측정되는 반면 FHS 집합의 최적성은

\* corresponding author

Peng-Fan bound [6]로 측정된다. OC-FHS (one-coincidence FHS) 집합은 최대 해밍 상관값이 1로 상한인 FHS 집합을 의미한다. 새로운 OC-FHS 집합의 설계는 FHS 설계에서 중요한 문제 중 하나였다. 1은 복수의 사용자가 사용 가능한 주파수 집합을 공유하는 경우 가능한 최소 해밍 교차 상관 값이기 때문이다. [7]에서는 이러한 OC-FHS를 합성하는 방법이 제시되었다.

가용 주파수가  $f_1, \dots, f_M$ 인 상황에서 길이가  $N$ 인 주파수 도약 수열  $X$ 는 다음과 같이 표시될 수 있다:

$$X = \{X(t) : 0 \leq t \leq N-1, X(t) \in f_1, \dots, f_M\}$$

서로 다른 두 개의 주파수 도약 수열  $X$  (길이  $N_1$ )와  $Y$  (길이  $N_2$ )에 대해서  $N_1$ 과  $N_2$ 가 서로 소라고 가정하자. 새로운 길이의 수열  $Z$ 는 다음과 같이 정의 될 수 있다:

$$Z(t) = (X(t \bmod N_1), Y(t \bmod N_2)), \\ 0 \leq t \leq N_1 N_2.$$

새로운 주파수 도약 수열  $Z$ 는 기존의 두 주파수 도약 수열에 비해 더 긴 길이를 가지며, 해밍 상관값은 각각의 주파수 도약 수열군의 해밍 상관값의 곱으로 나타나게 된다.

이러한 설계 방법에서 시간 지연  $\tau$ 가  $N_1$ 이나  $N_2$ 의 배수가 아닌 경우에는 기존의 두 주파수 도약 수열의 낮은 상관값들이 곱해져서 새로운 수열  $Z$ 의 해밍 상관값도 낮은 특성을 유지하게 된다. 하지만,  $\tau$ 가  $N_1$ 이나  $N_2$ 의 배수일 경우에 높은 해밍 상관값을 가지게 되어 이러한 경우에 대한 해결 방법이 필요하다. 이러한 해결 방법에 대한 후보군들은 다음과 같다:

- 특정 값에서의 해밍 상관값이 곱해질 때 구성 수열을 서로 다른 수열로 배치해서  $N_1$ 이나  $N_2$ 의 배수일 때 상관값이 0이 되게 한다.
- 특정 시간에 해당하는 주파수 도약 수열의 심볼값을 따로 대수적으로 설계해서 해밍 상관값을 낮게 유지한다.

이러한 방법들을 통해서 길이가 더 길어지면서 낮은 해밍 상관 값을 전 구간에서 유지하는 주파수 도약 수열들을 설계할 수 있을 것이다. 또한, Lempel-Greenberger 경계와 Peng-Fan 경계를 최적으로 만족할 수 있도록 각 주파수 도약 수열들의 수학적 특성을 잘 설계할 필요가 있다.

### III. 결론 및 향후 연구

주파수 도약 기술은 물리계층 보안의 핵심 기술 중 하나로서 앞으로 많은 애플리케이션에 적용될 수 있다 [8]. 본 논문에서는 주파수 도약 수열의 합성을 통해 새로운 파라미터의 주파수 도약 수열을 합성하는 방법을 제시하였다. 이를 통해 특정한 시간 간격을 제외한 구간에서 낮은 해밍 상관값을 갖는 주파수 도약 수열을 설계할 수

있을 것으로 예상된다. 또한, 시간 지연  $\tau$ 가  $N_1$ 이나  $N_2$ 의 배수인 경우에도 해밍 상관값을 낮추는 방법의 연구를 통해서 매우 우수한 성질을 갖는 주파수 도약 수열군을 설계할 수 있을 것으로 예상된다. 향후에는 이러한 방법론을 좀더 구체화하여 기존에 알려진 이론적 경계들에 최적인 주파수 도약 수열들의 설계 방법들을 탐구할 것이다. 이를 통하여, 다양한 통신 환경에서 적용 가능한 주파수 도약 수열군들을 제시하는 연구를 진행할 예정이다.

### Acknowledgement

This research was supported by Samsung Research Funding & Incubation Center of Samsung Electronics under Project Number SRFC-TB1803-03.

### References

- [1] D. V. Sarwate, "Reed-Solomon codes and the design of sequences for spread-spectrum multiple-access communications," in Reed-Solomon Codes and Their Applications, S. B. Wicker and V. K. Bhargava, Eds. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1994.
- [2] Wi-Fi and Bluetooth - Interference Issues. [Online]. Available: <http://www.hp.com>
- [3] A. Lempel and H. Greenberger, "Families of sequences with optimal Hamming correlation properties," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 20, no. 1, pp. 90-94, Jan. 1974.
- [4] J.-H. Chung, Y. K. Han, and K. Yang, "New classes of optimal frequency-hopping sequences by interleaving techniques," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 55, no. 12, pp. 5783-5791, Dec. 2009.
- [5] J.-H. Chung and K. Yang, "Optimal frequency-hopping sequences with new parameters," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 56, no. 4, pp. 1685-1693, Apr. 2010.
- [6] D. Peng and P. Fan, "Lower bounds on the Hamming auto- and crosscorrelations of frequency-hopping sequences," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 50, no. 9, pp. 2149-2154, Sept. 2004.
- [7] T.-H. Lee, H.-H. Jung, and J.-H. Chung, "A new one-coincidence frequency-hopping sequence set of length  $p^2-p$ ," Proc. IEEE Information Theory Workshop (ITW 2018), Guangzhou, China, November 25-29, 2018.
- [8] Ailiya, W. Yi, and Y. Yuan, "Reinforcement Learning-Based Joint Adaptive Frequency Hopping and Pulse-Width Allocation for Radar anti-Jamming," proc. IEEE Radar Conference (RadarConf 2020), Sept. 2020.