

시델니코프 수열을 활용한 인지통신의 Rendezvous를 위한 채널 탐색 수열

장지웅*

Channel Searching Sequence for Rendezvous in CR Using Sidel'nikov Sequence

Jiwoong Jang*

*Professor, Department of Computer Information Technology, Ulsan College, Ulsan, 44022 Korea

요 약

Rendezvous는 인지통신에서 사용자간의 탐색을 지원하는 프로세스이다. 공통채널을 알 수 없고 채널의 숫자만 알려진 인지통신 환경에서 통신을 원하는 두 사용자가 상대방을 인식하는 것은 매우 중요한 과정이다. 본 논문에서는 시델니코프 수열을 채널 탐색 수열로 활용하여 두 사용자가 가용채널을 탐색하고 서로를 인지하는 방안을 제시하고 분석하였다. 또한, Rendezvous까지 소요시간의 기댓값을 수학적으로 분석하였다. 또한, 2명의 사용자 환경 하에서 모의실험을 통하여 기존의 알고리즘인 JS알고리즘과 GOS알고리즘과의 성능을 비교하여 새로 제안된 수열의 Rendezvous 성능을 TTR 관점에서 검증하였다. 새로 제안된 수열의 성능은 GOS 알고리즘보다 우수하고 JS 알고리즘과 비슷하였다. 그러나 M 이 p 보다 많이 작은 경우에 대해서는 새로 제안된 수열의 성능이 JS알고리즘보다 우수하였다.

ABSTRACT

Rendezvous is a process that assists nodes in a Cognitive Radio Networks (CRNs) to discover each other. In CRNs where a common control channel is unknown and a number of channels are given, it is important how two nodes find each other in a known search region. In this paper, I have proposed and analyzed a channel hopping sequence using Sidel'nikov sequence by which each node visits an available number of channels. I analyze the expected time to-rendezvous (TTR) mathematically. I also verify the Rendezvous performance of proposed sequence in the view of TTR under 2 user environment compared with JS algorithm and GOS algorithm. The Rendezvous performance of proposed sequence is much better than GOS algorithm and similar with JS algorithm. But when M is much smaller than p , the performance of proposed sequence is better than JS algorithm.

키워드 : 인지통신, 랑데부, 채널 탐색 수열, 수열, 시델니코프 수열

Keywords : Cognitive radio, Rendezvous, Channel searching sequence, Sequences, Sidel'nikov sequences

Received 27 September 2021, Revised 5 October 2021, Accepted 11 October 2021

* Corresponding Author Ji-Woong Jang(E-mail:jwjang@uc.ac.kr, Tel:+82-52-230-0683)

Professor, Department of Computer Information Technology, Ulsan College, Ulsan, 44022 Korea

Open Access <http://doi.org/10.6109/jkiice.2021.25.11.1566>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

© This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

Rendezvous 검색은 인지통신[1]-[7]에서 둘 이상의 장치가 가능한 한 빨리 서로를 찾으려는 효과적인 검색의 한 형태이다[8]-[14]. 이 주제는 1960년 Schelling[15]에 의해 논의되었지만, 그의 논의는 사용자의 이동성에 주로 초점을 맞추고 있으며, 1995년에 와서야 Alpern[16]이 사용자가 위치한 환경의 대칭성에 기반한 Rendezvous 형태를 제안하였다. 플레이어가 위치한 지역. 이러한 접근 방식에 비추어 볼 때, 무선통신 환경에서 두 사용자가 서로를 탐색하고 통신링크를 설정하려고 하는 경우에는 각 사용자(노드)가 다른 채널에서 다른 사용자(노드)를 찾아야 하는 동일한 문제를 겪게 된다. 이 문제에 대해 예상되는 최소 회의 시간을 TTR(Time To Rendezvous)라고 한다.

Schelling은 사회 과학에서 조정 문제에 대한 모델로서 Rendezvous 검색의 중요성을 설명하였다. Rendezvous 검색에 대한 검색 및 구조와 관련된 시뮬레이션 접근 방식은 Thomas와 Hulme에 의해 최초로 시도되었다. J. Polson[17]은 Rendezvous 연결을 다음과 같은 두 가지 주요 접근 방식을 구분하였다. 우선, 그는 몇 가지 초기 정보를 제공하여 Rendezvous 프로세스를 돕는 일부 인프라 (예 : 서버 / 기지국)를 가정하고, 이러한 방식을 보조 접근 방식이라고 정의하였다. 또한, Polsan은 두 사용자가 어떤 종류의 중앙 인프라의 도움이나 지원 없이 서로를 발견하는 방식을 비 보조 접근 방식이라고 정의하였다.

현재까지 사용되는 대부분의 다중 채널 무선 통신 네트워크에서는 공통 제어 채널 (CCC: Common Control Channel)을 설정하고 Rendezvous를 위한 초기 정보를 교환하는 방식을 사용하였으며, 이는 보조 방식과 유사하다. 그러나 다음과 같은 이유로 무선 네트워크에서 CCC를 유지하는 것은 매우 어려운 문제이다[18]. (i) CCC로 사용되는 채널 대역은 오래동안 사용이 불가능할 수 있다. (ii) 채널이 방해받거나 높은 간섭을 받을 수 있다. (iii) 채널이 네트워크 통신 시스템에서 병목 문제를 일으킬 수 있다. (iv) 어떤 이유라도 CCC 채널이 저하되는 경우 네트워크의 QoS가 감소된다. (v) 어떤 상황에서도 CCC를 위한 채널을 항상 예약해두어야 한다. 이와 같은 이유로 CCC의 사용에 문제가 발생할 수 있으므로, 최근 비보조 Rendezvous 방식에 대한 연구가 활발

해지고 있다. 비보조 Rendezvous 또는 블라인드 Rendezvous의 경우 다음과 같이 채널 Rendezvous에 대한 두 가지 주요한 접근 방식이 있다.

- 1) 다중 채널 접근 방식 : 이 접근 방식은 기기가 한 번에 여러 채널을 스캔하는 기능을 기반으로 Rendezvous를 수행한다[19].
- 2) 단일 채널 접근 방식 : 이 접근 방식은 한 번에 감지된 하나의 채널을 기반으로 Rendezvous를 수행한다. 즉, SU 노드는 다음과 같이 다양한 방식으로 채널을 하나씩 방문한다. (i) 랜덤 기반[19]; (ii) 목록 기반[19]; (iii) 확률 기반[20]; 및 (iv) 시퀀스 기반[21].

위와 같은 CCC의 문제점을 고려하면, 실제 적용에 있어서는 블라인드 Rendezvous가 우수하다. 이 논문에서는 기기가 Rendezvous 전에 감지하여 채널 목록을 결정할 수 있는 다중 채널 방문 기능을 가정하였다. 이 블라인드 Rendezvous 문제는 다음과 같이 두 가지 경우로 나누어진다.

- 1) Rendezvous를 원하는 두 기기의 사용 가능한 채널이 동일한 대칭환경
- 2) Rendezvous를 원하는 두 기기의 사용 가능한 채널이 서로 다른 비대칭환경

이 논문의 목적은 주파수 탐색을 위한 탐색 패턴으로 Sidel'nikov 수열을 적용하고, 이에 대한 실험적 결과를 통해 기존의 결과들과 비교해보는 것이다. 이 논문의 나머지 부분은 다음과 같이 구성된다. II장은 우리의 시스템 모델을 설명하고, III장 Sidel'nikov 수열에 대한 소개와 해당 수열을 Rendezvous에 어떻게 적용할 것인지에 대해 설명할 것이다. IV장은 새로 제안된 주파수 탐색 패턴을 기존의 패턴과 실험을 통해 비교 분석한 결과를 제시하고 마지막으로 V장에서 결론을 내려 마무리 할 것이다.

II. 시스템 모델

이 장에서는 주 사용자 (PU) 네트워크와 보조 사용자 (SU) 네트워크의 두 가지 유형의 네트워크를 포함하는 시스템 모델을 제시한다. PU는 라이선스를 소유한 네트워크의 사용자이고, SU는 라이선스가 없는 네트워크의 사용자이다. 그림 1은 PU 네트워크의 커버리지 영역에 무작위로 분산된 SU들이 통신을 원하는 방식을 보여주

는 그림이다. 이 논문에서는 네트워크가 시간 슬롯을 사용하고, 모든 시간 슬롯이 동일하고 고정 된 길이라고 가정한다.

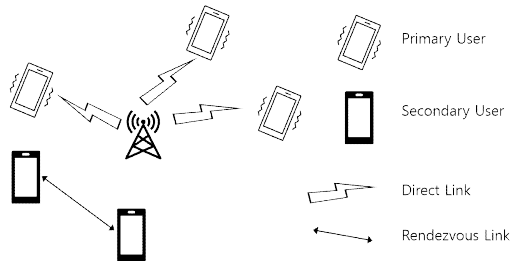


Fig. 1 Network model for Rendezvous

이 논문에서는 SU가 분산 방식으로 동작하는 ad-hoc 네트워크로 간주한다. 또한, 이후 사용되는 시스템은 다음을 가정한다: (i) 각 SU는 동일한 시간 슬롯에서 수신하고 전송하는 하나의 송수신기를 갖는다. (ii) 제어 채널이 사용하지 않는다. (iii) SU는 PU 활성 여부를 알지 못한다. (iv) 채널은 PU에 의해 독립적으로 사용되는 것으로 가정한다. (v) 네트워크의 모든 사용자는 채널의 인덱스를 알고 있다.

각 채널의 상태는 사용자의 관점에서 유휴 상태이거나 사용 중의 상태로 모델링된다. 또한, 인가 대역은 다음과 같이 겹치지 않는 M 개의 직교 채널로 나누어진다.

$$C = c_1, c_2, \dots, c_M \quad (1)$$

스펙트럼 감지 방식을 통하여 각 채널은 Rendezvous 과정 전에 식별 할 수 있다. 또한, Rendezvous를 원하는 기기가 한 번에 여러 채널을 스캔 할 수 있다고 가정하고, 일정 수의 유휴 채널이 식별되면 Rendezvous 절차가 시작된다. 이 논문에서는 $i \neq j$ 인 정수 i, j 에 대해 사용자 i, j 가 동일한 채널환경을 갖는 대칭형 채널 상에서의 Rendezvous에 대해서 다룬다. 또한, 우리는 네트워크에서 시간 동기화를 사용할 수 없는 환경을 가정한다. 즉, 각 시간 슬롯에서 사용자 i 와 j 는 서로 다른 채널로 이동하고, 사용자 i 와 j 가 같은 시간 슬롯에서 동일 채널로 흡을 하면 Rendezvous가 성립된다고 판단한다.

III. 채널 탐색 수열

이번 장에서는 Rendezvous를 위한 채널 탐색 수열을 제안한다.

3.1. 기존 연구 결과

기존의 Rendezvous에 대한 연구는 네트워크 구조에 따라 중앙 집중식과 분산방식으로 나눌 수 있다. 이 논문에서는 분산방식을 위한 주파수 탐색 수열에 대해 논의할 것이므로, 기존 연구 결과 역시 분산 방식에 대해서만 기술한다.

대부분의 다중 채널 무선 통신 네트워크에서 채널 호핑(CH: Channel Hopping)은 Rendezvous를 달성하는데 사용되는 대표적인 기술이다. 채널 호핑의 기본 아이디어는 동일한 채널에서 다른 노드를 만나기 위해 각 노드가 사용 가능한 채널 사이에서 호핑하는 것이다. 채널 호핑 기법[22]은 제한이 적고 다양한 조건에 잘 적용할 수 있다는 장점이 있다.

CH 기술은 네트워크의 다른 사용자가 가능한 한 빨리 동일한 채널을 흡하도록 안내하는 호핑 시퀀스 생성(HSG: Hopping Sequence Generation) 메커니즘을 채택하는 것이다. 대표적인 HSG방식으로는 모듈 식 클록 알고리즘 및 수정된 버전인 MMC[23] 메커니즘이 있다. 그러나 MMC 방식의 경우 두 노드의 선택한 흡 레이트가 동일하면 Rendezvous를 보장 할 수 없다는 문제가 있다. Rendezvous가 보장되는 다른 HSG 방식으로는 직교 시퀀스 방식(GOS: Generating Orthogonal Sequence)[18]이 있다. GOS는 본 논문의 시스템과 동일하게 대칭시스템에서만 동작하는 모델이다.

최근 채널 호핑이 적응형 방식으로 구축되는 적응형 다중 Rendezvous 제어(AMRC: Adaptive Multiple Rendezvous Control)[24] 방식이 새로 제안되었다. 그러나 [24]의 결과는 본질적으로 무작위이며 AMRC는 유한한 시간 내에 Rendezvous를 보장 할 수 없다는 문제가 있다. 또한, Bahl. 등은 [25]에서 선구적인 작업을 발표하고 SSCH라는 프로토콜을 제안하였다. SSCH를 사용하면 각 노드가 다중 (채널, 시드) 쌍을 선택할 수 있으며 CH 시퀀스는 이러한 쌍을 기반으로 결정된다. SSCH는 Rendezvous를 보장하지만 이는 대칭 모델에만 해당된다. Hsu 등은 정족수 시스템을 기반으로 두 개의 CH 알고리즘, 즉 M-QCH와 L-QCH를 제안했는데[26],

이 방식은 노드가 시간 동기화가 보장된 환경에서 Rendezvous를 보장할 수 있다. GOS 알고리즘을 부분적으로 조정하는 Rendezvous 방식으로 Jump-and-Stay(JS)[27] 방식이 있다. JS는 시간 동기화없이 대칭 및 비대칭 시스템 모두에서 보장된 Rendezvous를 제공한다.

3.2. Sidel'nikov 수열

$s(t)$, $0 \leq t \leq N-1$ 가 주기가 N 인 M 진 수열이고, ω_M 이 M 차 복소근인 $\omega_M = e^{j2\pi/M}$ 이라 하자. 이 때, $s(t)$ 의 자기상관 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$R(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1} \omega_M^{s(t)-s(t+\tau)} \tag{2}$$

단, 여기서 $0 \leq \tau \leq N-1$ 이다. Sidel'nikov 는 M -진 수열을 다음과 같이 정의하였다[28].

정의 1[28] : p 가 소수이고 α 가 p^n 개의 원소를 갖는 유한체 F_{p^n} 의 원시원이라 하자. $M|p^n-1$ 이다. 이제 $k=0,1,\dots,M-1$ 에 대해서 S_k 가 다음과 같이 정의되는 F_{p^n} 의 겹치지 않는 부분집합들이라 하자.

$$S_k = \left\{ \alpha^{M+k} \mid 0 \leq i \leq \frac{p^n-1}{M} \right\} \tag{3}$$

그러면 주기 p^n-1 인 Sidel'nikov 수열 $s(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$s(t) = \begin{cases} k, & \text{if } \alpha^t \in S_k, \ 0 \leq k \leq M-1 \\ k_0, & \text{if } t = \frac{p^n-1}{2} \end{cases} \tag{4}$$

단, k_0 는 $0 \leq k_0 \leq M-1$ 인 임의의 정수이다.

$k_0 = 0$ 인 M -진 Sidel'nikov 수열이 균형잡혀 있다 (balanced)는 것은 자명하다. 우리는 M -진 Sidel'nikov 수열을 지시 함수와 F_{p^n} 의 곱셈 character를 사용해서 나타낼 수 있다.

정의 2[28] : 지시 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$I(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } x = 0 \\ 0, & \text{if } x \neq 0 \end{cases} \tag{5}$$

$$f(\alpha^k) = k, \text{ for } 0 \leq k \leq M-1 \tag{6}$$

단, M 은 $p^n-1|M$ 인 정수이다.

정의 3[28] : F_{p^n} 의 M 차의 곱셈의 character는 다음과 같이 정의된다.

$$\Psi_M(\alpha^t) = e^{\frac{j2\pi t}{M}}, \text{ if } \alpha^t \in F_{p^n}^* \tag{7}$$

$$\Psi_M(0) = 0. \tag{8}$$

여기서 α 는 F_{p^n} 에서의 원시원이고 $M|(p^n-1)$ 이고 $0 \leq t < p^n-1$ 이다.

정의1과 2, 정리 3을 이용하면 M 진 Sidel'nikov 수열을 다음과 같이 나타낼 수 있다[r.

$$\omega_M^{s(t)} = \omega_M^{k_0} I(\alpha^t + 1) + \Psi_M(\alpha^t + 1) \tag{9}$$

[28]로부터 우리는 곱셈 character Ψ_M 의 유용한 성질들을 얻을 수 있다.

성질 4[28] : $M|(p^n-1)$ 이라 하자. F_{p^n} 의 곱셈 character $\Psi_M(x)$ 는 다음과 같은 성질을 갖는다.

- 1) $\sum_{x \in F_{p^n}} \Psi_M(x) = 0$
- 2) $a \in F_{p^n}^*$ 일 때, $\overline{\Psi_M(a)} = \Psi_M^{-1}(a) = \Psi_M(a^{-1})$
- 3) $a, b \in F_{p^n}$ 일 때, $\Psi_M(a)\Psi_M(b) = \Psi_M(ab)$
- 4) $a, b \in F_{p^n}^*$ 일 때, $\Psi_M(a)\overline{\Psi_M(b)} = \Psi_M(a/b)$

이제 Sidel'nikov 수열을 이용하면 다음과 같이 Rendezvous의 주파수 탐색 패턴을 생성할 수 있다.

정리 5 : 소수 p 와 $(p^2-1)|M$ 인 양의 정수 M 에 대하여 시스템 상에 M 개의 사용 가능한 주파수 대역이 있다고 가정하자. 이제 $k=0,1,\dots,M-1$ 에 대해서 S_k 가 다음과 같이 정의되는 F_{p^n} 의 겹치지 않는 부분집합들이라 하자.

$$S_k = \left\{ \alpha^{M+k} \mid 0 \leq i \leq \frac{p^n-1}{M} \right\} \tag{10}$$

또한, 주기가 $N=p^2-1$ 인 Sidel'nikov 수열 $s(t)$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$s(t) = \begin{cases} k, & \text{if } \alpha^t \in S_k, 0 \leq k \leq M-1 \\ k_0 = 0, & \text{if } t = \frac{p^2-1}{2}. \end{cases} \quad (11)$$

이제, Sidel'nikov 수열 $s(t)$ 에 정의 2에서 정의된 사상 $f(x)$ 를 적용하여 다음과 같이 정의되는 수열 $g(t)$ 를 만들자.

$$g(t) = f(s(t)), \text{ for } t = 0, 1, \dots, p^2 - 2. \quad (12)$$

이 때, $g(t)$ 는 대칭형 시스템에서 Rendezvous를 보장하는 주파수 탐색 패턴이 된다.

증명: 두 사용자 i, j 에 대해 각각의 사용자에게 주파수 탐색 패턴의 시작점이 t_i 와 t_j 라고 하자. 이 경우 시간 t 에서 사용자 i, j 의 주파수 탐색 패턴값 $s_i(t)$ 와 $s_j(t)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$s_i(t) = s(t+t_i) \quad (13)$$

$$s_j(t) = s(t+t_j) \quad (14)$$

Rendezvous가 발생한다는 것은 $0 \leq t < p^2 - 1$ 에 대하여 $s_i(t) = s_j(t)$ 가 된다는 것이다. 이는 $s(t+t_i) = s(t+t_j)$ 가 된다는 뜻이다. 일반성을 잃지 않고 다음식이 성립하면 $s(t+t_i) = s(t+t_j)$ 이다.

$$\omega_M^{s(t+t_i)} = \omega_M^{s(t+t_j)} \quad (15)$$

위 식은 다음과 같이 정리 된다.

$$\omega_M^{s(t+t_i)} / \omega_M^{s(t+t_j)} = 1 \quad (16)$$

$k_0 = 0$ 이므로 (9)에 의해 위 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \left(I(\alpha^{t+t_i} + 1) + \Psi_M(\alpha^{t+t_i} + 1) \right) \\ & \times \left(I(\alpha^{t+t_j} + 1) + \overline{\Psi}_M(\alpha^{t+t_j} + 1) \right) \\ & = I(\alpha^{t+t_i} + 1)I(\alpha^{t+t_j} + 1) \\ & + I(\alpha^{t+t_i} + 1)\overline{\Psi}_M(\alpha^{t+t_j} + 1) \\ & + I(\alpha^{t+t_j} + 1)\Psi_M(\alpha^{t+t_i} + 1) \\ & + \overline{\Psi}_M(\alpha^{t+t_i} + 1)\overline{\Psi}_M(\alpha^{t+t_j} + 1) \\ & = 1 \end{aligned} \quad (17)$$

위 식은 다음과 같이 4가지 경우로 나누어 생각할 수 있다.

경우 1) $t_i = t_j$

이 경우 $\alpha^{t+t_i} + 1 = \alpha^{t+t_j} + 1 = 0$ 이면, $I(\alpha^{t+t_i} + 1) = I(\alpha^{t+t_j} + 1) = 1$ 이고, $\Psi_M(\alpha^{t+t_i} + 1) = \overline{\Psi}_M(\alpha^{t+t_j} + 1) = 0$ 되므로 (17)이 성립함을 자명하다.

$\alpha^{t+t_i} + 1 \neq 0 (\alpha^{t+t_j} + 1 \neq 0)$ 이면, (17)식은 $\Psi_M(\alpha^{t+t_i} + 1)\overline{\Psi}_M(\alpha^{t+t_j} + 1) = 1$ 이 되어 성립함을 자명하다.

경우 2) $t_i \neq t_j$

$0 \leq t < M$ 에 대해 $\alpha^{t+t_i} + 1 = 0$ 을 만족하는 t 값을 $t = t_s$ 라 하자. 이 경우 (17)은 다음과 같이 정리된다.

$$\overline{\Psi}_M(\alpha^{t_s+t_j} + 1) = 1. \quad (18)$$

위 식이 성립하기 위해서는 $\alpha^{t_s+t_j} = 0$ 이어야 하고 이는 불가능 하다. 동일한 과정을 통하여 $\alpha^{t+t_j} + 1 = 0$ 인 경우도 (17)식이 성립함을 불가능함을 알 수 있다.

$\alpha^{t+t_i} + 1 \neq 0$ 이고 $\alpha^{t+t_j} + 1 \neq 0$ 이면 (17) 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\Psi_M(\alpha^{t+t_i} + 1)\overline{\Psi}_M(\alpha^{t+t_j} + 1) = 1. \quad (19)$$

성질 4에 따라 위 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\Psi_M\left(\frac{\alpha^{t+t_i} + 1}{\alpha^{t+t_j} + 1}\right) = 1. \quad (20)$$

$t+t_i = t', t_j - t_i = \tau$ 라 하면, 위 식은 다음과 같이 정리된다.

$$\Psi_M\left(\frac{\alpha^{t'} + 1}{\alpha^{t'+\tau} + 1}\right) = 1. \quad (21)$$

t' 이 0과 $(p^n - 1)/2 - \tau$ 를 제외한 F_p^n 상의 모든 값을 갖는 동안 $(\alpha^{t'} + 1)/(\alpha^{t'+\tau} + 1)$ 은 1과 $\alpha^{-\tau}$ 를 제외한 F_p^n 상의 모든 값을 갖게 된다. 그러므로 $0 < k < p^n - 1/M$ 인 정수 k 에 대하여 $(\alpha^{t'} + 1)/(\alpha^{t'+\tau} + 1) = \alpha^{kM}$ 인 t' 이 존재하게 되고 그러므로 $0 \leq t' < p^n - 1$ 에 대해 $\Psi_M((\alpha^{t'} + 1)/(\alpha^{t'+\tau} + 1)) = 1$ 을 만족하는 t' 이 $M-1$ 개 존재하게 된다.

이상과 같이 경우 1)과 2)에 의해 $t_i = t_j$ 인 경우와 $t_i \neq t_j$ 인 경우 모두 Rendezvous가 일어남을 알 수 있다.

□

정리 5의 증명과정에서 얻을 수 있는 결과로 다음의 따름정리와 같이 MTTR을 구할 수 있다.

따름정리 6 : 정리 3에서 정의된 주파수 탐색 패턴 $g(t)$ 의 MTTR은 다음과 같다.

$$MTTR = \frac{1 + (M-1)(p^n - 2)}{(p^n - 1)}. \quad (22)$$

증명 : 경우 1)의 경우 항상 Rendezvous가 일어나므로 Rendezvous가 발생할 확률은 1이다. 따라서 무조건 첫 번째 time duration에 Rendezvous가 성립하게 되고 따라서 이 경우 기대 TTR은 1이다. 경우 2)의 경우 $p^n - 1$ 의 기간 동안 $M - 1$ 번 Rendezvous가 발행하므로 Rendezvous가 발생할 확률은 $(M-1)/(p^n - 1)$ 이다. 또한, $p^n - 1$ 의 기간에 걸쳐 Rendezvous를 구하게 되므로 기대 TTR은 $M - 1$ 이 된다.

경우 1)이 발생할 확률이 $1/(p^n - 1)$ 이고 경우 2)가 발생할 확률이 $(p^n - 2)/(p^n - 1)$ 이므로 최종적인 MTTR은 다음과 같이 계산된다.

$$MTTR = \frac{1}{p^n - 1} + \frac{(M-1)(p^n - 2)}{p^n - 1}. \quad (23)$$

□

IV. 모의 실험

이번 장에서는 새로 제안된 Rendezvous를 위한 대칭 채널(Symmetric channel) 상에서의 채널 탐색 수열의 성능을 모의 실험을 통하여 검증한다. 성능의 비교는 C로 작성한 프로그램을 통하여 JS 알고리즘[27]과 GOS 알고리즘[21]의 평균 Rendezvous 시간(MTTR)을 통하여 비교한다.

Sidel'nikov 수열의 존재하기 위한 조건과, JS 알고리즘, GoS 알고리즘의 사용 조건을 모두 만족해야 공정한 비교가 가능하므로, 사용 가능한 주파수대역의 개수 M 과 수열생성에 사용하는 소수 p 는 다음 표 1과 같이 설정한다.

Table. 1 Parameters p, M for simulation

M	8	12	16	24
p	11	13	17	29

표 2와 그림 2.에서 볼 수 있듯이, 본 논문에서 제안한 수열을 주파수 탐색 수열로 사용한 경우 GOS 알고리즘 대비 월등한 성능을 보였으며, M 과 p 의 차이가 큰 경우 JS 알고리즘보다 우수한 성능을 보였다. 이는 JS 알고리즘이 M 이 아닌 p 를 기준으로 하는 알고리즘인 것에 비해, 본 논문에서 제안한 수열을 M 값을 기준으로 하는 알고리즘인 것 때문으로 분석된다.

Table. 2 Simulation result of 2 user TTR

M	8	12	16	24
JS	8.5	10.5	14.3	25.8
Sidel	7.0	12.2	15.4	23
GOS	39.9	55.9	95.8	280

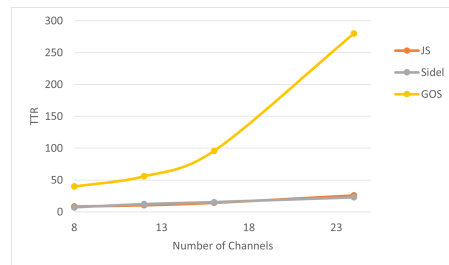


Fig. 2 2 User Simulation Result

V. 결론

본 논문에서는 대칭 채널환경의 무선 네트워크에서 블라인드 Rendezvous를 위한 또 다른 채널 호핑 알고리즘을 연구하였다. 새로 제안한 알고리즘은 시간 동기화가 필요 없이 Rendezvous를 보장할 수 있어 비동기 시스템에 바로 적용이 가능하다. 또한, 수학적 분석과 광범위한 시뮬레이션을 통하여 새로 제안된 알고리즘이 사용 가능한 채널의 수 M 이 수열 생성에 사용하는 소수 p 와 차이가 큰 경우에는 기존의 JS 알고리즘에 비해 우수한 성능을 가지고, GOS 알고리즘 대비 우월한 성능을 가짐을 입증하였다. 비록 새로 제안된 알고리즘의 비대칭 채널환경에서의 성능에 대한 분석을 수행하지 않았으나, 이는 향후 추가 연구를 통해 진행되어야 할 것으로 생각된다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the 2019 Research Fund(201910016) of Ulsan College.

REFERENCES

- [1] D. M. Alias and G. K. Ragesh, "Cognitive Radio networks: A survey," *2016 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, pp. 1981-1986, 2016.
- [2] P. Rawat, K. D. Singh, and J. M. Bonnin, "Cognitive radio for M2M and Internet of Things: A survey," *Computer Communications*, vol. 94, no. 15, pp. 1-29, Nov. 2016.
- [3] F. Salahdine, N. Kaabouch, and H. E. Ghazi, "A survey on compressive sensing techniques for cognitive radio networks," *Physical Communication*, vol. 20, pp. 61-73, Sep. 2016.
- [4] A. Ali and W. Hamouda, "Advances on Spectrum Sensing for Cognitive Radio Networks: Theory and Applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 1277-1304, 2017.
- [5] F. A. Awin, Y. M. Alginahi, E. Abdel-Raheem, and K. Tepe, "Technical Issues on Cognitive Radio-Based Internet of Things Systems: A Survey," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 97887-97908, 2019.
- [6] N. Muchandi and R. Khanai, "Cognitive radio spectrum sensing: A survey," *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, pp. 3233-3237, 2016.
- [7] F. Hu, B. Chen, and K. Zhu, "Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15754-15776, 2018.
- [8] R. Paul and Y. Choi, "Adaptive Rendezvous for Heterogeneous Channel Environments in Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 11, pp. 7753-7765, Nov. 2016.
- [9] B. Yang, M. Zheng, and W. Liang, "A time-efficient rendezvous algorithm with a full rendezvous degree for heterogeneous cognitive radio networks," in *IEEE INFOCOM 2016*, pp. 1-9, 2016.
- [10] Z. Gu, T. Shen, Y. Wang, and F. C. M. Lau, "Efficient Rendezvous for Heterogeneous Interference in Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 19, no. 1, pp. 91-105, Jan. 2020.
- [11] T. Lin, G. Yang, and W. C. Kwong, "A Homogeneous Multi-Radio Rendezvous Algorithm for Cognitive Radio Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 736-739, Apr. 2019.
- [12] Y. Chang, C. Chang, and J. Sheu, "An Enhanced Fast Multi-Radio Rendezvous Algorithm in Heterogeneous Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 4, no. 4, pp. 847-859, Dec. 2018.
- [13] X. J. Tan, C. Zhou, and J. Chen, "Symmetric Channel Hopping for Blind Rendezvous in Cognitive Radio Networks Based on Union of Disjoint Difference Sets," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 11, pp. 10233-10248, Nov. 2017.
- [14] J. Sheu and J. Lin, "A Multi-Radio Rendezvous Algorithm Based on Chinese Remainder Theorem in Heterogeneous Cognitive Radio Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 9, pp. 1980-1990, Sept. 2018.
- [15] T. C. Schelling, *The strategy of conflict*, Harvard University Press, Cambridge, 1960.
- [16] S. Alpern, "The rendezvous search problem," *SIAM J Control Optim*, vol. 33, no. 3, pp. 673-683, 1995.
- [17] J. Polson, "Cognitive radio: The technologies," in *Cognitive Radio Technologies*, B. Fette, Ed. Elsevier, no. 4, pp. 153-155, 2006.
- [18] J. Jia, Q. Zhang, and X. Shen, "Hc-mac: A hardware-constrained cognitive mac for efficient spectrum management," *IEEE JSAC*, vol. 26, no. 1, pp. 106-117, Jan. 2008.
- [19] L. Ma, C. C. Shen, and B. Ryu, "Single-Radio Adaptive Channel Algorithm for Spectrum Agile Wireless Ad Hoc Networks," in *Proc. 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2007*, pp. 547-558, Apr. 2007.
- [20] A. Motamedi and A. Bahai, "MAC Protocol Design for Spectrum-Agile Wireless Networks: Stochastic Control Approach," in *Proc. 2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks DySPAN 2007*, pp. 448-451, Apr. 2007.
- [21] L. A. DaSilva and I. Guerreiro, "Sequence-Based Rendezvous for Dynamic Spectrum Access," *2008 3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 1-7, 2008.
- [22] K. Bian and J. M. Park, "Asynchronous channel hopping for establishing rendezvous in cognitive radio networks," in *INFOCOM Miniconference*, pp. 236-240, 2011.
- [23] N. Theis, R. Thomas, and L. DaSilva, "Rendezvous for

- cognitive radios,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 10, no. 2, pp. 216-227, Feb. 2011.
- [24] C. Cormio and K. R. Chowdhury, “Common control channel design for cognitive radio wireless ad hoc networks using adaptive frequency hopping,” *Ad Hoc Networks*, vol. 8, pp. 430-438, 2010.
- [25] P. Bahl, R. Chandra, and J. Dunagan, “SSCH: Slotted Seeded Channel Hopping for Capacity Improvement in IEEE 802.11 Ad- Hoc Wireless Networks,” in *Proc. ACM MobiCom 04*, pp. 216-230, Sept. 2004.
- [26] A. C. Hsu, D. S. L. Weit, and C. C. J. Kuo, “A Cognitive MAC Protocol Using Statistical Channel Allocation for Wireless Ad-Hoc Networks,” in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference WCNC 2007*, pp. 105-110, Mar. 2007.
- [27] Z. L. Lin, H. Liu, X. Chu, and L. Yiu-Wing, “Jump-Stay based channelhopping algorithm with guaranteed rendezvous for cognitive radio networks,” in *IEEE INFORCOM2011*, pp. 2444-2452, Jun. 2011.
- [28] Y. S. Kim, J. S. Chung, J. S. No, and H. Chung, “On the autocorrelation distributions of Sidel'nikov sequences,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 9, pp. 3303-3307, Sep. 2005.



장지웅(Ji-Woong Jang)

1998년 2월:서울대학교 전기공학부 학사
2006년 2월:서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
2006년 3월~2008년 6월:삼성전자 책임연구원
2008년 8월~2009년 7월:박사후 연구원 (UCSD)
2009년 8월~2012년 8월: LG전자 책임연구원
2012년 9월~현재:울산과학기술대학교 IT응용기술학부 교수
※관심분야 : 신호설계, 무선통신, 인지통신