

논문 2020-15-22

# 인지무선네트워크에서 블라인드 스펙트럼 랑데부 지연의 단축

(Achieving Agility in Blind Spectrum Rendezvous in Cognitive Radio Networks)

변 상 선\*

(Sang-Seon Byun)

Abstract: : In cognitive radio networks, secondary transmitters should cease its transmission immediately on detecting of primary transmission in the spectrum they are accessing. Then they should exploit another idle spectrums and handoff to the newly found idle spectrums, which is called spectrum rendezvous. With regards to spectrum rendezvous, most of related work presume the existence of dedicated common control channel used by secondary users for exchanging the information of idle spectrums. However, this presumption is not feasible in real world cognitive radio scenario. Therefore we address a blind spectrum rendezvous scheme with no need of separate control channel. Furthermore we consider maintaining one or more extra spectrums (channels) to expedite the spectrum rendezvous. Our scheme lets secondary users maintain extra spectrums by exchanging the spectrum information periodically during normal communications. The one of the extra spectrums are regarded as a candidate spectrum that the users can handoff to on detecting the primary transmission. We evaluate that our blind scheme can help to reduce the rendezvous delay in a real world cognitive radio environments with USRPs.

Keywords : Cognitive radio, Spectrum rendezvous, Common control channel, Spectrum handoff, USRP

## 1. 서 론

인지무선 네트워크 (cognitive radio networks: CRNs) 에서 2차사용자 (secondary user: SU)는 1차사용자 (primary user: PU)의 전송이 감지되면, 즉각 송신을 중단하고, 새로운 유휴 스펙트럼을 찾아서 전송을 가급적 신속하게 재개해야 한다. 이 경우, 새로운 유휴 스펙트럼은 2차송신자와 2차수신자 모두에게 유휴한 것으로 감지되어야 한다. 이러한 절차를 스펙트럼 랑데부 (또는 채널 랑데부) 라

고 하는데, 성공적인 스펙트럼 랑데부를 위해 많은 관련 연구들은 별도의 공용 제어 채널 (common control channel)을 가정한다.

즉, 2차사용자들은 위에서 언급한 상시 사용가능한 공용 제어 채널을 통해 1차전송의 감지, 통신 가능한 새로운 유휴 채널 정보를 서로에게 알린다. 하지만, 공용 제어 채널이 존재한다는 가정은 인지 무선의 사용 환경과 근본적으로 충돌된다. 인지무선 기능은 전용 통신 채널 (주파수)을 할당 받지 않은 비면허 사용자 (unlicensed user)를 위한 것인데, 상시 공용 제어 채널이 이미 존재한다는 가정은 인지 무선의 필요성에 모순이 된다.

특히, 기지국이 존재하지 않는 애드혹 인지무선 네트워크 (ad-hoc cognitive radio networks) 환경에서 상시 공용 제어 채널의 운영은 매우 비현실적이다. 2차사용자가 상시 접근할 수 있는 공용 채널이 이미 존재하는 환경에서는 굳이 인지무선 기능을 통해 스펙트럼을 발굴하는 노력을 할 필요가 없

\*Corresponding Author (ssbyun@cup.ac.kr)

Received: Apr. 25, 2020, Revised: Jun. 23, 2020,

Accepted: Jul. 30, 2020.

S.S. Byun: Catholic University of Pusan (Assoc. Prof.)

※ 이 논문은 2018년도 부산가톨릭대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음.

다. 게다가, 공용 채널이 일시적으로라도 사용이 불가능하게 되거나 통신 품질이 저하되는 경우에는 인지 무선 기능의 사용이 불가능할 수도 있다.

이러한 모순을 지적하고, 몇몇 연구들이 공용 제어 채널 없이 동작하는 블라인드 (blind) 스펙트럼 랑데부 기법 [1-4] 을 제안하고 있다. 블라인드 스펙트럼 랑데부는 별도의 공용 제어 채널이나 기지국 등의 중앙 관리 노드의 도움 없이 2차사용자끼리 스펙트럼 랑데부를 수행함을 일컫는다.

이 논문에서는 기존 블라인드 기법에 주기적인 채널 정보 교환을 통해 랑데부 시간을 단축하는 방법을 제안한다. 제안하는 방법을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 2차사용자들은 정상적인 통신을 하는 동안에도 유휴 채널을 주기적으로 탐지한다.
- (2) 2차사용자들은 탐지된 유휴 채널 정보를 주기적으로 교환한다.
- (3) 모든 2차사용자들에게 공통적으로 유휴하다고 탐지되는 가용채널들 가운데 하나를 백업 채널로 정한다.
- (4) 1차전송이 탐지되면 정해진 백업 채널로 핸드오프를 수행한다.
- (5) 랑데부가 성공하면 통신을 재개하고, 실패하면 통상적인 랑데부 절차를 수행한다.
- (6) 시간적으로 송수신 노드간에 채널 동기화를 요구하지 않는다.
- (7) 1차사용자의 채널 점유로 인한 송신 중단 및 랑데부 개시 과정을 실제 구현한다.

통상적인 랑데부 절차는 2차사용자들이 각각에게 가용한 채널들을 순차적으로 순환하면서 통신이 재개 될 수 있는 채널을 찾는 과정이다. 여기서, 2차사용자들의 랑데부 완료가 가급적 신속하게 이루어질 수 있도록 가용 채널로의 접근이 미리 약속된 순서대로 이루어지도록 한다.

추가적으로, 2개의 백업 채널을 유지하여, 첫 번째 백업채널로 핸드오프가 실패했을 경우, 즉시, 랑데부를 시도할 수 있는 채널을 하나 더 운영하는 방법을 제안한다.

제안하는 방법은 유한상태기계로 모델링 되며, USRP (Universal Software Radio Peripheral)에 직접 구현되어 그 성능을 검증한다.

이 논문은 나머지는 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 관련연구를 소개한다. 3절에서는 본 논문에서 제안하는 스펙트럼 랑데부 기법에 대해서 기술한다. 4절에서는 URSP를 이용한 제안하는 랑데부

기법의 성능 평가 결과를 기술하고, 5절에서는 결론을 통해 본 논문을 끝맺는다.

## II. 관련연구

관련연구 [1]은 2차사용자간에 접근 가능한 채널 구성이 다른 환경에서도 적용될 수 있는 Oblivious 블라인드 랑데부 기법을 제안한다. 이 기법은 시간적으로 동기화되지 않은 2차사용자 간에도 랑데부를 할 수 있도록 하는데, 항상 통신을 하고 있는 두 2차사용자들에게 동시에 접근 가능한 채널이 항상 하나 이상 존재한다는 것을 가정하고 있다.

관련연구 [2]는 2차송신자가 가용 채널을 T 시간 간격으로 순환하고, 2차수신자는 가용 채널을  $M \times T$  시간 간격으로 2차송신자의 채널 순환 순서와 같은 순서로 순환함으로써 (여기서 M은 가용채널의 개수), 랑데부 성공을 보장하는 방법을 제안한다. 하지만, 이 기법은 두 2차사용자에게 공통으로 가용한 채널이 한 번의 채널 순환에서 발견되지 않게 되면 재차 채널 순환을 하게 되어 1차사용이 빈번한 환경에서는 지나치게 긴 랑데부 지연시간을 갖게 된다.

관련연구 [3]은 각 채널에서 1차사용자 전송확률을 미리 계산하고 이 계산된 확률이 낮은 순으로 채널을 순환하는 방식의 블라인드 랑데부 기법을 제안한다. 하지만, 시간적으로 완벽하게 동기화된 채널을 가정하고, 확률 계산을 위해 각 채널에서 1차사용자의 전송 패턴 (패킷 길이, 전송률)을 지속적으로 감지해야 한다. 이는 단순한 에너지 탐지 기법이 아닌 1차사용자가 전송하는 패킷을 2차사용자가 완전히 읽을 수 있어야 한다는 제한이 있다. 게다가, 1차전송이 빈번한 실제 인지 무선 환경에서 모든 채널에서 1차사용자 전송확률을 계산하는 것이 가능할 것인지는 의문이 있다.

관련연구 [4]는 2차사용자 주변의 helper 노드를 통해 블라인드 랑데부를 수행하는 방법을 제안한다. 이 helper 노드는 2차사용자들과 상시 연결되어 있고, 채널 스캔을 통해 2차사용자들 사용할 채널을 결정한다. 이는 2차사용자들이 helper 노드와도 랑데부를 수행해야 한다는 단점이 있다.

관련연구 [5]는 2차사용자들을 그룹으로 묶어서 그 그룹을 구성하는 2차사용자들이 가상의 백본 (backbone) 역할을 하도록 하는 인지무선 환경을 고려한다. 즉, 가상의 백본 역할을 하는 2차사용자

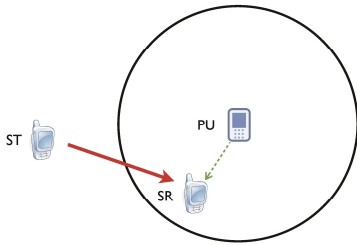


그림 1. 2차수신자(SR)만이 1차사용자 (PU)를 감지하는 경우  
 Fig. 1 The situation where only the secondary receiver (SR) detects primary user

그림은 인접 노드와 별도의 제어 채널 없이 통신 채널을 확보하도록 한다. 하지만, 모든 2차사용자들은 즉시 가용한 채널을 상시 확보하고 있어야 한다고 가정하고 있고, 1차전송이 감지되었을 때의 랑데부 과정은 고려하고 있지 않다.

관련연구 [6]은 일정 시간 이내에 블라인드 랑데부를 성공하는 Modular Clock Algorithm이라는 채널 순환 방법을 제안한다. 각 2차사용자가 즉시 가용한 채널 집합에 대해서 이 알고리즘을 수행하는데, 즉시 가용한 채널 집합이 매우 빠르게 변화하는 환경 (즉, 1차전송이 빈번한 환경)에서 지속적으로 랑데부가 성공하는지 실제 인지 무선환경에서 검증이 요구된다. 게다가, 1차전송의 감지를 통한 랑데부의 개시 과정에 대해서는 논문에서 다루지 않는다.

관련연구 [7]은 2차사용자의 대역폭 요구량에 맞는 비인접 멀티채널을 확보하는 방법을 제안한다. 1차사용자가 사용하지 않는 채널들을 지속적으로 탐지하여 백업 채널 리스트를 확보하고, 1차전송이 감지되면 바로 랑데부를 수행하도록 한다. 하지만, 1차전송의 감지에 따른 랑데부 절차와 2차송신자와 수신자간 같은 채널로 동기화하는 과정에 대해서는 다루지 않았고, 실제 인지 무선환경에서 구현이 되기에는 백업 채널 선정 방법이 지나치게 복잡하다.

### III. 스펙트럼 랑데부 과정

#### 1. 인지무선 환경

이 논문에서 고려하고 있는 인지무선 환경은 다음과 같다.

- (1) 두 2차사용자가 통신을 하고 있는데, 그 중 하나는 2차송신자 (secondary transmitter: ST) 이고 나머지 하나는 2차수신자 (secondary receiver: SR) 이다.
- (2) 1차사용자 (primary user: PU)의 전송이 두 2차사용자 가운데, 한 2차사용자에게만 감지될 수도 있다. (그림 1 참조).
- (3) 두 2차사용자는 통신에 사용할 주파수의 목록을 리스트 (즉, 채널 리스트)의 형태로 가지고 있는데, 두 사용자는 동일한 채널 리스트를 유지한다. 예를 들어, 2번 채널이 2.105 GHz로 지정되어 있으면, 이는 두 2차사용자에게 공히 적용된다. 따라서, 채널 색인만으로 주파수를 선택할 수 있다.
- (4) 언더레이 (underlay) 인지 무선 환경을 고려한다. 즉, 1차전송이 감지되는 즉시, 그 채널을 이용한 송신을 완전히 중단해야 한다.

#### 2. 전형적인 블라인드 스펙트럼 랑데부

전형적인 블라인드 스펙트럼 랑데부는 어떠한 백업 채널 없이, 스펙트럼 랑데부 과정을 수행한다. 1차전송이 감지되면 2차사용자간에 미리 정해진 순서대로 핸드오프를 시도한다. 이 때, 두 사용자는 통신 지속 및 재개 성공을 판단하기 위해 주기적으로 서로에게 비콘 (beacon)을 전송한다. 별도의 제어 채널을 두지 않으므로, 비콘은 정상적인 통신에 사용되는 주파수를 통해 전송된다. 실험에서, 이 비콘은 매 20ms마다 상대방에게 전송되도록 한다.

전형적인 블라인드 스펙트럼 랑데부 과정은 그림 2에 도식된 유한상태기계로 표현된다. 위 유한상태기계의 각 상태는 아래와 같이 정의된다.

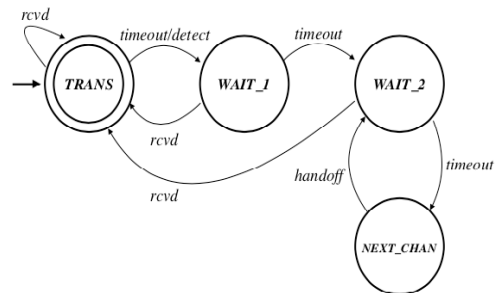


그림 2. 전형적인 블라인드 스펙트럼 랑데부를 위한 유한상태기계

Fig. 2 Finite state machine for typical blind spectrum rendezvous

- (1) *TRANS*: 정상적인 통신을 하고 있는 상태이다. 이 상태에서는 2차송신자와 수신자는 유휴 채널 정보를 주기적으로 주고 받는다 (*rcvd*).
- (2) *WAIT\_1*: 비콘 수신에 타임아웃 (timeout) 되거나 1차전송이 감지 (detect) 되어 대기하는 상태인데, 비콘이 손실되거나 1차전송이 감지되는 경우에 *TRANS* 상태에서 전이된다. 이 상태에서 비콘이 수신 되는 경우 (*rcvd*)에는 다시 *TRANS*로 전이되고, 재차 타임아웃이 발생하는 경우에는 *WAIT\_2* 상태로 전이된다.
- (3) *WAIT\_2*: *WAIT\_1* 상태에서 비콘 수신에 일정 시간 동안 실패하여 타임아웃이 발생하면 전이되는 상태이다. 여기서 재차 타임아웃이 발생하면 채널 랑데부를 시도하는 상태 (*NEXT\_CHAN*)로 전이한다. 이 상태에서는 *WAIT\_1* 상태와 마찬가지로 비콘이 성공적으로 수신되면 *TRANS* 상태로 전이된다. 이 *WAIT\_2* 상태를 두는 이유는 비콘 손실 또는 짧은 1차전송으로 인한 불필요한 채널 랑데부가 발생하는 경우를 줄이기 위함이다. *WAIT\_1* 상태에서와 마찬가지로 이 상태에서 비콘이 성공적으로 수신되면 (*rcvd*) *TRANS* 상태로 전이한다.
- (4) *NEXT\_CHAN*: 이 상태에서는 스펙트럼 랑데부를 수행한다. 이 상태에서는 채널 리스트 가운데 가용한 채널을 순차적으로 접근하면서 상대에게 비콘을 송신한다. 비콘이 성공적으로 수신되면 (*rcvd*) *TRANS* 상태로 전이한다.

그림 3의 예를 이용하여 랑데부 과정을 기술하면 다음과 같다. SU1에게 유휴한 채널은 2번과 4번, 5번이고, SU2에게 유휴한 채널은 1번과 3번, 4번, 5번이다. 1번 채널을 사용하여 통신을 수행하다 SU1이 1차전송을 감지하고, 랑데부 과정이 시작된다고 가정한다. 그러면, SU2는 SU1으로부터 비콘이 전송되지 않아 타임아웃이 발생하여 새로운 채널로 랑데부를 시도한다. SU1과 SU2는 각자 순차적으로 유휴한 채널에 접근하며 비콘을 전송한다. 4번 채널이 두 사용자에게 모두 유휴하고, 상대로부터 전송된 비콘이 성공적으로 수신되면 랑데부를 성공한다. 각 유휴채널에서 비콘 송신 후 상대로부터 전송된 비콘을 두 사용자 모두 성공적으로 수신해야 통신이 재개 되는데, 만약, 너무 빠르게 채널을 순회하거나 비콘을 기다리는 시간을 동일하게 하면 비콘 수신에 실패하거나, 랑데부 완료에 너무 많은 시간을 소모할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 각 채널에서 비콘 수신을 기다리는 시간을

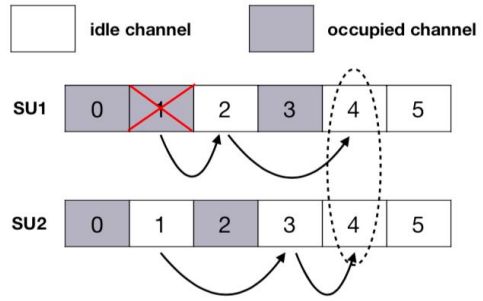


그림 3. 랑데부 과정: SU1과 SU2에게 모두 유휴한 것으로 탐지된 채널들 가운데 색인 값이 가장 작은 채널 (4번 채널)로 랑데부를 수행함

Fig. 3 Illustration of rendezvous process: SU1 and SU2 perform rendezvous to the channel detected idle by both, i.e. channel 4

임의의 값으로 설정한다. 본 논문에서는 40ms와 400ms 사이의 임의의 값을 비콘 수신을 위한 타이머로 설정한다.

### 3. 하나의 백업채널을 사용하는 랑데부

하나의 백업채널을 사용하는 방법에서는 2차사용자들이 정상적인 통신 상태에서 지속적으로 유휴한 채널을 탐지하고, 이 탐지된 결과를 주기적으로 서로 공유하도록 한다. 이를 위해, 이 유휴 채널 정보는 앞서 기술한 비콘에 피그백 (piggyback)되어 전송된다. 유휴 채널 정보는 비트맵의 형태로 전송되는데, 예를 들어, 5개의 채널이 있고, 채널 색인이 0부터 시작한다고 가정하면,

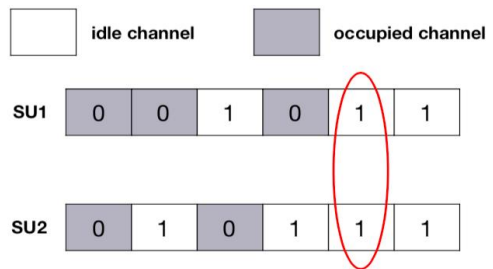


그림 4. 백업채널의 선정: SU1과 SU2 모두에게 유휴한 것으로 탐지된 채널들 가운데, 색인이 가장 작은 채널 (4번채널)을 백업 채널로 선정함

Fig. 4 Selection of the backup channel: the channel with the lowest index and detected idle by both SU1 and SU2 is chosen as the backup channel

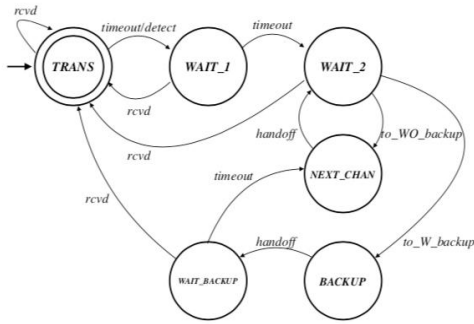


그림 5. 하나의 백업채널을 갖는 블라인드 스펙트럼 랑데부를 위한 유한상태기계

Fig. 5 Finite state machine for the blind spectrum rendezvous with a single backup channel

1번 채널과 4번 채널만 유휴상태로 탐지되는 경우, 01001을 전송한다.

유휴채널의 탐지는 2차사용자가 정상적인 통신 상태에서 주기적으로 짧은 시간 동안 채널 리스트에 있는 주파수들을 순회하며 이루어진다. 상대 2차사용자로부터 유휴 채널 정보를 받으면, 자신이 유지하고 있는 유휴 채널 정보와 비교하여, 자신과 상대가 모두 유휴하다고 판단한 채널들 가운데, 가장 색인값이 가장 작은 채널을 백업 채널로 지정한다 (그림 4 참조).

유휴 채널 정보는 앞서 기술했듯이 비콘에 피기백 (piggyback) 되어 전송되는데, 유휴 정보의 변화가 감지되는 순간에는 상대방에게 즉시 전송하도록 한다. 1차전송을 감지하여 핸드오프를 수행해야하는 경우, 유지되고 있는 백업채널로 핸드오프를 시도한다. 만약, 백업채널로 핸드오프를 성공하게 되면, 통신을 재개하고, 실패하게 되면 II. 2에 기술된 전형적인 블라인드 랑데부를 수행한다. 랑데부 과정을 유한상태기계로 표현하면 그림 5와 같고, 각 상태는 아래와 같이 정의된다.

- (1) TRANS, WAIT\_1, NEXT\_CHAN은 전형적인 블라인드 스펙트럼 랑데부를 위한 유한상태기계에서와 동일하게 정의된다.
- (2) WAIT\_2: TRANS 상태에서 유지된 백업 채널이 있으면 (to\_W\_backup) BACKUP 상태로 전이되고, 없으면 (to\_WO\_backup) NEXT\_CHAN 상태로 전이된다.
- (3) BACKUP: 이 상태에서는 백업 채널로 핸드오프를 실시한다 (handoff).
- (4) WAIT\_BACKUP: 백업 채널로 핸드오프 한 후 기다리는 상태이다. 여기서는 상대방에게 자신의 유휴

채널 정보를 송신하고, 상대방으로부터 유휴 채널 정보가 수신되면 (rcvd) TRANS 상태로 전이된다. 만약, 유휴 채널 정보가 수신되지 않으면 (timeout) NEXT\_CHAN 상태로 전이되고, 전형적인 블라인드 랑데부 과정을 시작한다. 두 사용자 모두가 백업 채널이 더 이상 유휴하지 않은 것으로 탐지하는 경우, 유휴 채널 정보를 전송할 수 없다. 따라서, 타임아웃이 발생하게 되어 전형적인 블라인드 랑데부 과정을 시작하게 된다. 두 2차사용자 가운데 한 사용자만 해당 백업 채널이 점유된 것으로 탐지하게 될 경우에는 그 점유를 탐지한 사용자가 유휴 채널 정보를 송신하지 못해 타임아웃이 발생하게 되고, 역시 블라인드 랑데부 과정을 개시하게 된다.

4. 두 개의 백업채널을 사용하는 랑데부

앞서 기술했듯이 하나의 백업 채널을 사용하는 경우, 핸드오프 시점에 한 사용자 또는 두 사용자 모두에게 백업 채널이 점유된 것으로 탐지되면, 전형적인 블라인드 랑데부를 시작하게 되고 핸드오프 완료가 지연된다. 이를 보완하기 위해 두 개의 백업채널을 사용하는 랑데부 과정도 고려한다.

두 개의 백업 채널을 사용하는 경우의 랑데부 과정은 그림 6에 묘사된 유한상태기계로 정의된다. 하나의 백업 채널을 갖는 경우와 비교할 때, BACKUP\_2 상태와 WAIT\_BACKUP\_2 상태를 추가로 갖는다.

BACKUP\_2 상태는 첫 번째 백업 채널로 핸드오프

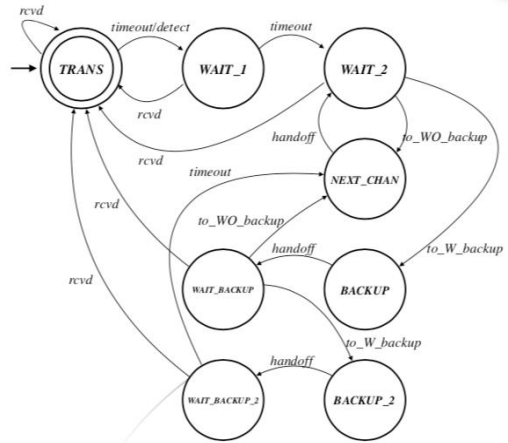


그림 6. 두 개의 백업채널을 갖는 블라인드 스펙트럼 랑데부를 위한 유한상태기계

Fig. 6 Finite state machine for the blind spectrum rendezvous with two backup channels

를 실패했을 경우에 ( $to\_W\_backup$ ) 전이되는 상태이며, 이 상태에서 두 번째 백업 채널로 핸드오프를 하면  $WAIT\_BACKUP\_2$  상태로 전이된다.

$WAIT\_BACKUP$  상태와  $WAIT\_BACKUP\_2$  상태에서 수행되는 작업은 하나의 백업 채널을 운용하는 경우와 마찬가지로, 자신의 유휴 채널 정보를 전송하고, 상대방부터 유휴 채널 정보가 전송되기를 기다린다. 그리고, 두 상태에서 상대의 유휴 채널 정보가 성공적으로 수신되면 ( $rcvd$ ),  $TRANS$  상태로 전이한다. 만약,  $WAIT\_BACKUP\_2$  상태에서 실패하면  $NEXT\_CHAN$  상태로 전이되어 전형적인 블라인드 랑데부를 수행한다.

#### IV. 실험에 의한 성능 평가

##### 1. 실험 환경

이 논문에서 제안하는 스펙트럼 랑데부 기법을 평가하기 위해 USRP E-100 소프트웨어 라디오 플랫폼을 이용한다. USRP E-100에 UCLA-IEEE 802.15.4 모듈 [8]을 설치하고, 이 모듈내에 전형적인 블라인드 스펙트럼 랑데부 기법과 백업 채널을 사용하는 기법을 각각 구현하여 다양한 1차전송이 있는 환경에서 랑데부 지연 시간을 측정 및 비교한다.

IEEE 802.15.4 모듈을 선택한 이유는 USRP E-100 플랫폼에서 가장 안정적으로 동작하는 물리계층 모듈이고, 다양한 스펙트럼 랑데부 기법의 추가 구현이 용이하기 때문이다.

실험에는 총 2대의 USRP를 사용하여, 하나는 2차송신자 (ST), 다른 하나는 2차수신자 (SR)의 역할을 수행하도록 한다. 두 2차사용자가 독립적으로 1차전송을 감지하는 상황을 연출하기 위해, 각 USRP 내에서 1차전송이 임의로 발생한 것으로 시뮬레이션 한다.

1차전송은  $T_{on}$ 초 동안 발생되고,  $T_{off}$ 초 동안 중단되도록 설정하는데, 각각,  $T_{on}$ 과  $T_{off}$ 를 평균으로 하는 지수분포에 의해 결정되도록 한다. 다양한 1차전송 빈도 하에서 성능을 평가하기 위해,  $\langle T_{on}, T_{off} \rangle$ 에  $\langle 2, 8 \rangle$ ,  $\langle 5, 5 \rangle$ 의 평균값을 각각 적용한다.

채널은 5개를 사용하는 경우와, 10개를 사용하는 경우로 나누어서 실험을 진행한다.

##### 2. 실험 결과

이 논문에서 제안하는 채널 랑데부 기법의 성능을 측정하기 위해, 2차송신자에서 256 바이트의 짧은 패킷을 초당 10회 전송하도록 하고, 2차수신자에서 시간에 따른 패킷 수신 추이를 관찰한다.

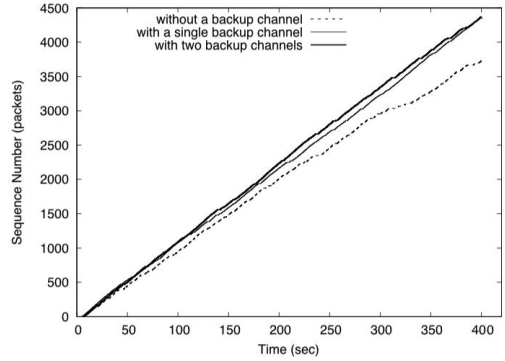


그림 7.  $\langle T_{on}, T_{off} \rangle = \langle 2, 8 \rangle$ 과 5개의 채널을 사용하는 경우의 패킷 수신 추이

Fig. 7 Transition of packet receptions when  $\langle T_{on}, T_{off} \rangle = \langle 2, 8 \rangle$ , and 5 channels are used

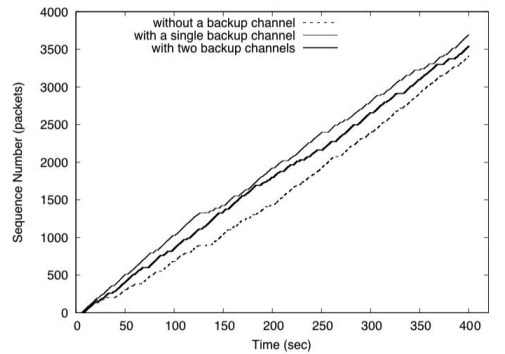


그림 8.  $\langle T_{on}, T_{off} \rangle = \langle 5, 5 \rangle$ 과 5개의 채널을 사용하는 경우의 패킷 수신 추이

Fig. 8 Transition of packet receptions when  $\langle T_{on}, T_{off} \rangle = \langle 5, 5 \rangle$ , and 5 channels are used

그림 7은 비교적 1차전송이 가벼운 환경에서, 즉,  $\langle T_{on}, T_{off} \rangle = \langle 2, 8 \rangle$ , 5개의 채널을 사용했을 경우의 패킷 수신 추이 측정 결과를 보이고 있다. 그래프에서 보이듯이, 백업 채널을 사용하는 경우 빠른 랑데부로 인해 같은 시간에 더 많은 패킷을 성공적으로 수신하는 것을 알 수 있다. 다만, 2개의 백업채널을 사용함으로써 얻는 이득인 미미한 것으로 관찰된다.

그림 8은  $\langle T_{on}, T_{off} \rangle = \langle 5, 5 \rangle$  인 환경에서 5개의 채널을 사용했을 경우의 측정 결과를 보이고 있다. 그래프에서 보이듯이, 하나의 백업 채널을 사용하는 경우에 같은 시간에 가장 많은 패킷을 수신하는 것을 알 수 있다. 이는 2개의 백업채널을 사용해도, 상대적으로 빈번한 1차전송으로 인해 2개의 백업 채널을 획득하기

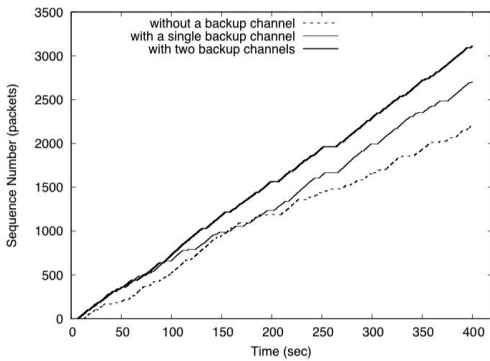


그림 9.  $\langle T_{on}, T_{off} \rangle = \langle 5, 5 \rangle$ 과 10개의 채널을 사용하는 경우의 패킷 수신 추이

Fig. 9 Transition of packet receptions when  $\langle T_{on}, T_{off} \rangle = \langle 5, 5 \rangle$ , and 10 channels are used

가 용이하지 않고, 또, 획득에 성공해도 재차 1차전송에 점유되어 핸드오프에 실패하는 경우가 발생하기 때문으로 분석된다.

그림 9은  $\langle T_{on}, T_{off} \rangle = \langle 5, 5 \rangle$  인 환경에서 10개의 채널을 사용했을 경우의 측정 결과를 보이고 있다. 그래프에서 보이듯이, 두 개의 백업 채널을 사용하는 경우에 같은 시간에 가장 많은 패킷을 수신하는 것을 알 수 있다. 채널이 많은 경우에는 2개의 백업 채널을 확보하는 것이 비교적 용이하고, 또, 확보된 백업 채널로의 핸드오프를 성공할 확률도 높아지는 것을 알 수 있다.

## V. 결론

우리는 이 논문에서 별도의 제어 채널이 없는 인지무선 환경에서, 빠른 블라인드 스펙트럼 랑데부를 위해 백업 채널을 유지하는 기법을 제안한다. 우리가 제안하는 기법은 유한상태기계로 모델링 되고, 실제 소프트웨어 라디오 플랫폼에 구현하여 그 성능을 검증한다. 백업 채널을 사용하는 것이 그렇지 않은 경우 보다 같은 시간 동안 더 많은 패킷을 수신할 수 있음이 실험을 통해 관찰된다.

두 개의 백업 채널을 사용하는 기법도 제안하는데, 5개의 채널 보다는 10개의 채널을 운용하는 경우에 이 기법이 좋은 성능을 보이는 것으로 관찰된다. 다만, 순차적인 유희 채널 탐색 방법으로 인해, 채널의 개수가 많아질수록 핸드오프도 지연되는 것이 관찰된다.

본문에는 기술하지 않았지만, 1차사용이 매우 빈

번한 환경에서는 백업 채널의 확보가 오히려 성능을 저하 시키는 것이 실험을 통해 관찰된다. 이는 1차전송이 매우 빈번한 경우에는 백업 채널의 확보도 어려울 뿐만 아니라, 성공적으로 확보가 된다고 해도 핸드오프를 재차 1차전송이 개시되면서 전형적인 블라인드 스펙트럼을 결국 수행하기 때문으로 분석된다.

블라인드 랑데부는 송수신자간에 채널 정보를 통신 간에 수시로 교환해야하므로 대역폭의 낭비가 발생한다. 채널 정보 교환 주기를 짧게 할수록 대역폭의 낭비가 심해진다. 이를 줄이기 위해 채널 정보 교환 주기를 길게 할 경우 갱신되지 않은 백업 채널 정보 수신으로 인해 랑데부 시간이 지연될 수 있다. 우리는, 이를 위해 1차전송의 빈도를 감지하고 이 빈도를 채널 정보 교환주기에 반영하는 연구를 차후 수행하고자 한다.

우리는 채널 환경에 따른 백업 채널 운용 방법의 동적인 변경, 비콘 전송 주기 및 수신 타이머의 유연한 설정 방법 등에 관한 연구를 지속해 나갈 것이다. 그리고, 확률모델을 통해, 채널 환경에 따른 최적의 백업 채널 운용 방법 (백업 채널의 수, 비콘 전송 주기 등)을 찾는 연구를 지속할 것이다.

## References

- [1] Z. Gu, Q.S. Hua, W. Dai, "Fully Distributed Algorithms for Blind Rendezvous in Cognitive Radio Networks," Proc. of ACM MobiHoc, pp. 155-164, 2014.
- [2] J. Li, H. Zhao, J. Wei, D. Ma, L. Zhou, "Sender-jump Receiver-wait: A Simple Blind Rendezvous Algorithm for Distributed Cognitive Radio Networks," IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 17, No. 1, pp. 183-196, 2018.
- [3] Y. Song, J. Xie, "Prospect: A Proactive Spectrum Handoff Framework for Cognitive Radio ad Hoc Networks Without Common Control Channel," IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 11, No. 7, pp. 1127-1139, 2012.
- [4] K. Wang, L. Chen, K. Bian, W. Wang, P. Zhou, "On Cooperative Channel Rendezvous in Cognitive Radio Networks," IEEE Access, Vol. 7, pp. 57500-57515, 2019.

- [5] Y. Dai, J. Wu, C. Xin, "Efficient Virtual Backbone Construction Without a Common Control Channel in Cognitive Radio Networks," IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 25, No. 12, pp. 3156-3166, 2014.
- [6] N. Thesis, R. Thomas, L. DaSilva, "Rendezvous for Cognitive Radios," IEEE Transactions on Mobile Computing, Vol. 10, No. 2, pp. 216-227, 2011.
- [7] H. Kim, K. Shin, "Fast Discovery of Spectrum Opportunities in Cognitive Radio Networks," Proc. IEEE Symposium on New Frontiers in DYSpan, pp. 1-12, 2008.
- [8] T. Schmid, "GNU Radio 802.15.4 En- and Decoding," NESL Technical Report, 2016.

### Sang-Seon Byun (변상선)



He received B.S., M.S., and Ph.D. degrees in Computer Science from Korea University, Seoul, Korea in 1996, 2002, and 2007, respectively. He has been affiliated with the Department of Electronics and Telecommunications, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway as a research scientist from 2007 to 2012. He has also worked as a research professor in the School of Information and Communications, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Gwangju, Korea. Currently, he is an associate professor of the Department of Computer Engineering, Catholic University of Pusan, Busan, Korea. His research interests encompass the field of cognitive radio networks and UWB radar signal processing.  
Email: ssbyun@cup.ac.kr