

동기화 에러가 존재하는 스펙트럼 감지 무선 인지 네트워크에서 일차 사용자와 이차 사용자들 간의 충돌 확률 분석

홍승근 *임경래 **이재홍
서울대학교

hsg403@snu.ac.kr *imgrae@snu.ac.kr **jhlee@snu.ac.kr

Performance Analysis of Collision Probability Between Primary User and Secondary Users in Spectrum Sensing Cognitive Radio Network With Synchronization Errors

Seung Geun Hong *Gyeongrae Im **Jae Hong Lee
Seoul National University

요 약

본 논문에서는 스펙트럼 감지 무선 인지 네트워크에서 동기화 에러가 존재하는 환경을 고려한다. 동기화 에러가 존재 할 때 주어지는 오검출 확률(miss detection probability)을 이용하여 일차 사용자와 이차 사용자들 간의 충돌 확률(collision probability)을 유도한다. 유도된 수식을 몬테 카를로 모의실험(Monte Carlo simulation)을 통해 확인한다.

1. 서론

무선 통신이 발전함에 따라 주파수 수요가 크게 증가하고 있는데 반해 현재 사용 가능한 주파수는 한정적이기 때문에 주파수의 효율적인 사용에 대한 연구가 최근 중요하게 다루어지고 있다. 무선 인지 네트워크(cognitive radio network)는 주파수를 효율적으로 사용할 수 있는 기술의 한 방법으로 주파수 사용을 허가 받지 못한 이차 사용자가 주파수 사용을 허가 받은 일차 사용자의 주파수를 기회적으로 사용하도록 한다 [1],[2].

스펙트럼 감지(spectrum sensing) 무선 인지 네트워크에서는 이차 사용자가 일차 사용자의 주파수를 감지하여 비어있는 경우 사용하게 된다. 이때 정확하게 주파수를 감지하기 위해서는 일차 사용자와 이차 사용자 간의 동기화가 필수적이고, 기존 연구들도 완벽한 동기화를 가정된 환경에서 주로 분석을 하였다 [3]. 하지만 일차 사용자로부터 통신을 주고 받지 않는 이차 사용자들은 일차 사용자와의 완벽한 동기화를 달성하기 어려워 동기화 에러가 발생하게 된다 [4].

본 논문에서는 스펙트럼 감지 무선인지 네트워크에서 동기화 에러를 고려하여 충돌 확률(collision probability)을 분석한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 시스템 모델을 제시하고 3 절에서 동기화 에러가 있을 때의 일차 사용자와 이차 사용자들 간의 충돌 확률을 분석한다. 4 절에서는 분석한 결과를 모의실험을 통해 보인다. 마지막 5 절에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 일차 사용자(PT)의 스펙트럼을 N 명의 이차 사용자(ST_n , $n=1, \dots, N$)가 감지하여 사용하는 스펙트럼 감지 무선 인지 네트워크를 고려한다. 일차 사용자와 이차 사용자들의 프레임 길이는 모두 T 로 가정한다. 이차 사용자들의 프레임은 감지 구간과 전송 구간으로 이루어져 있고 이들의 길이는 각각 τ 와 $T-\tau$ 로 가정한다. 샘플링 주파수를 f 로 가정하면, 이차 사용자들의 각 감지 구간에서 감지하는 샘플의 수는 $L = \lfloor \tau f \rfloor$ 로 주어진다. $\lfloor x \rfloor$ 는 x 를 넘지 않는 최대의 정수를 의미한다. 표기의 편의를 위해서 $L = \tau f$ 로 정의한다.

이차 사용자들은 스펙트럼을 사용하기 위해서 사용 전 일차 사용자가 스펙트럼을 사용 중인지 감지를 하는데, 그 결과 스펙트럼이 비어있다고 판단 되는 경우 전송 구간에서 데이터를 전송하게 되고, 그렇지 않으면 데이터를 전송하지 않는다.

본 모델에서는 일차 사용자와 이차 사용자들 간 동기화 에러가 존재한다고 가정한다. PT와 ST_n , $n=1, 2, \dots, N$ 사이의 동기화 에러는 E_n 으로 표시한다. 각 동기화 에러는 구간 $[-e_{\max}, e_{\max}]$ 에서 균등 분포를 따른다고 가정한다.

3. 충돌 확률

동기화 에러가 있는 스펙트럼 감지 무선 인지 네트워크 환경에서 오검출 확률은 이전 프레임에서 PT 의 상태에 따라 달라지게 된다. 검출 문턱값(detection threshold)이 λ 로 주어질 때 이전 프레임에서 PT 가 데이터 전송을 하지 않는 경우 ST_n 의 오검출 확률은 다음과 같이 주어진다 [5].

$$P_{m,i}^{(n)}(\lambda, \tau, E_n) = \begin{cases} 1 - Q\left(\frac{\lambda - \sigma_p^2 - \sigma_w^2}{\sqrt{\sigma_p^4 + 2\sigma_p^2\sigma_w^2 + \sigma_w^4}}\sqrt{\tau f}\right), & E_n \geq 0, \\ 1 - Q\left(\frac{\tau\lambda - (\tau + E_n)\sigma_p^2 - \tau\sigma_w^2}{\sqrt{(\tau + E_n)\sigma_p^4 + 2(\tau + E_n)\sigma_p^2\sigma_w^2 + \tau\sigma_w^4}}\sqrt{f}\right), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 σ_p^2 는 ST_n 이 수신한 PT 신호의 분산, σ_w^2 은 잡음의 분산이다 [ref]. 이전 프레임에서 PT 가 데이터 전송을 하는 경우 오검출 확률은 다음과 같이 주어진다 [5].

$$P_{f,a}^{(n)}(\lambda, \tau, E_n) = \begin{cases} Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_w^2} - 1\right)\sqrt{\tau f}\right), & E_n \geq 0, \\ Q\left(\frac{\tau\lambda + E_n\sigma_p^2 - \tau\sigma_w^2}{\sqrt{-E_n\sigma_p^4 - 2E_n\sigma_p^2\sigma_w^2 + \tau\sigma_w^4}}\sqrt{f}\right), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (2)$$

일차 사용자와 이차 사용자가 충돌하는 경우는 일차 사용자가 데이터를 전송 중일 때 하나 이상의 이차 사용자가 스펙트럼 감지 결과 비어있다고 판단하는 경우 데이터를 전송하게 돼서 충돌이 발생하게 된다. 충돌이 발생하지 않는 경우는 모든 이차 사용자들이 정확하게 스펙트럼을 감지하는 경우이다. 이전 프레임에서 PT 가 데이터 전송을 하지 않는 경우 이차 사용자들이 정확하게 스펙트럼을 감지할 확률은 다음과 같다.

$$P_{nc,a}(\mathbf{E}) = \prod_{n=1}^N [1 - P_{m,a}^{(n)}(\lambda, \tau, E_n)] \quad (3)$$

이때 $\mathbf{E} = [E_1, \dots, E_N]$ 이다. 이전 프레임에서 PT 가 데이터 전송을 하는 경우 이차 사용자들이 정확하게 스펙트럼을 감지할 확률은 다음과 같다.

$$P_{nc,i}(\mathbf{E}) = \prod_{n=1}^N [1 - P_{m,i}^{(n)}(\lambda, \tau, E_n)] \quad (4)$$

각 프레임에서 PT 가 전송할 확률이 α 로 주어질 경우 수식 (3)과 (4)를 이용하면 각 프레임에서 이차 사용자들이 정확하게 스펙트럼을 감지할 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{nc}(\mathbf{E}) = P_{nc,a}(\mathbf{E}) + P_{nc,i}(\mathbf{E}) = \alpha \prod_{n=1}^N [1 - P_{m,a}^{(n)}(\lambda, \tau, E_n)] + (1 - \alpha) \prod_{n=1}^N [1 - P_{m,i}^{(n)}(\lambda, \tau, E_n)] \quad (5)$$

각 동기화 에러들은 독립이고 동일한 균등 분포를 따르므로

이에 대해 평균을 취해주면 충돌하지 않는 확률의 평균을 구할 수 있고 이는 다음과 같다.

$$P_{nc}^{avg}(\lambda, \tau) = \int_{[-e_{max}, e_{max}]^N} \frac{P_{nc}(\mathbf{E})}{2e_{max}} d\mathbf{e} = \alpha Q\left(\frac{\lambda - \sigma_p^2 - \sigma_w^2}{\sqrt{\sigma_p^4 + 2\sigma_p^2\sigma_w^2 + \sigma_w^4}}\sqrt{\tau f}\right) + \frac{1 - \alpha}{(2e_{max})^N} \times \int_{-e_{max}}^0 Q\left(\frac{\tau\lambda - (\tau + e_n)\sigma_p^2 - \tau\sigma_w^2}{\sqrt{(\tau + e_n)\sigma_p^4 + 2(\tau + e_n)\sigma_p^2\sigma_w^2 + \tau\sigma_w^4}}\sqrt{f}\right) de_n + e_{max} Q\left(\frac{\lambda - \sigma_p^2 - \sigma_w^2}{\sqrt{\sigma_p^4 + 2\sigma_p^2\sigma_w^2 + \sigma_w^4}}\sqrt{\tau f}\right) \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{e} = [e_1, \dots, e_N]$ 이다.

(6)을 이용하면 일차 사용자와 이차 사용자들 간의 평균 충돌 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{col}(\lambda, \tau) = 1 - P_{nc}^{avg}(\lambda, \tau) \quad (7)$$

4. 모의실험

본 모의실험에서는 감지 구간의 길이 $\tau = 5$ ms, 샘플링 주파수 $f = 20$ kHz, 잡음의 분산 $\sigma_w^2 = 1$, 검출 문턱값 $\lambda = 1.5$, 최대 동기화 에러 값 $e_{max} = 3$, 그리고 일차 사용자의 전송 확률 $\alpha = 0.5$ 로 두고 실험을 진행하였다.

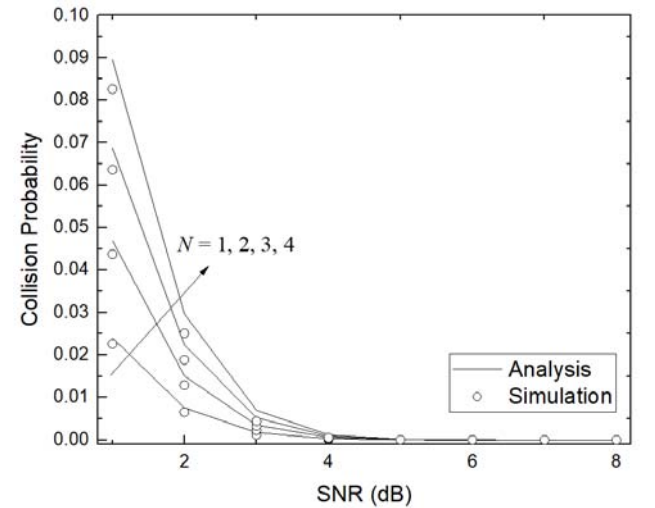


그림 1. 일차 사용자와 이차 사용자들 간의 충돌 확률

그림 1 에은 일차 사용자와 이차 사용자들 간의 충돌 확률을 이차 사용자의 숫자와 SNR 을 변화시키면서 그린 그래프이다. 이차 사용자의 수 N 에 관계 없이 SNR 이 증가하면 충돌 확률이 줄어드는 것을 볼 수 있고 N 이 증가함에 따라 충돌 확률이 늘어나는 것을 볼 수 있다. SNR 에 따라 충돌 확률이 줄어드는 이유는 SNR 클수록 PT 의 신호를 감지하기 쉽기 때문이고 N 이 늘어나면 이차

사용자들이 충돌하는 경우의 수가 많아지므로 자연스러운 현상이다. 분석(analysis) 값과 모의실험(simulation) 값이 일치하지 않는 것을 볼 수 있는데 이는 오검출 확률을 구하는 과정 중 근사를 사용하였기 때문이다. 두 값의 차이는 크지 않고 경향성이 일치하는 것을 보았을 때 적절히 근사가 됐음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 무선 인지 네트워크에서 일차 사용자와 이차 사용자들 간의 동기화 에러가 있는 상황에서 충돌 확률을 분석하였다. 모의실험을 통하여 분석한 결과의 타당성을 검증하였다.

감사의 글

이 논문은 2016 년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1D1A1A01057563).

이 논문은 2016 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No. B0115-16-0001).

참고문헌

- [1] J. Mitola and G. Q. Maguire, Jr., "Cognitive radio: Making software radios more personal," IEEE Personal Commun., vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [2] A. Goldsmith, S. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: an information theoretic perspective," Proc. IEEE, vol. 97, pp. 894- 914, May 2009.
- [3] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. C. Y. Peh, and A. T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 7, no. 4, pp. 1326-1337, Apr. 2008.
- [4] Y.-W. Hong and A. Scaglione, "A scalable synchronization protocol for large scale sensor networks and its applications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 23, no. 5, pp. 3148-3153, May 2005.
- [5] 홍승근, 이재홍, "동기화 에러가 있는 스펙트럼 감지 무선 인지 네트워크에서 충돌 확률 분석," 2016 년 대한전자공학회 하계학술대회, 제주, 대한민국, 2016 년 6 월.