

인지무선통신 환경에서 슬롯-알로하 기법의 전송 효율 분석

Throughput Analysis of Slotted ALOHA in Cognitive Radios

왕 한 호* · 우 중 재†

(Hanho Wang · Choongchae Woo)

Abstract - In cognitive radios, exponentially distributed idle period(EIP) is considered in this paper. In the EIP case, durations of idle periods are be limited and varied by primary traffic arrivals. Accordingly, we first analyze the idle period utilization which can be achieved by the slotted ALOHA in cognitive radio communications. The idle period utilization is a newly defined performance metric to measure the transmission performance of the secondary network as effective time durations utilized for successful secondary transmissions in an idle period. Then, the idle period utilization is maximized through controlling the data transmission time. All technical processes are mathematically analyzed and expressed as closed form solutions.

Key Words : BIST, LFSR, CAM, Test pattern generator, FSM

1. 서 론

인지 무선 통신(cognitive radio)의 개념은 기존 통신 시스템에 독립적으로 할당되어 있는 주파수가 충분히 활용되지 못하고 있다는 주파수 활용도 측정 결과에 근거하여 제안되었다[1]. 인지 무선 통신 기술은 순시적으로 활용되고 있지 않은 유휴 주파수 공간(white space)를 감지하고, 유휴 기간(idle period) 동안 부사용자(secondary user)가 통신할 수 있도록 한다.

특정 주파수에 대한 우선적인 사용 권한을 가지고 있는 사용자를 주사용자(primary user)라고 할 때, 주사용자가 해당 주파수를 사용하지 않는 유휴 기간에만 통신할 수 있는 기기들을 부사용자라 한다. 부사용자의 통신을 가능하도록 하는 인지 무선 통신의 핵심 기술은 주사용자의 주파수 사용 여부를 판단하기 위한 센싱(sensing)기술이며, 인지 무선 통신이 본격적으로 연구되기 시작한 이후로 에너지 센싱과 협력 센싱 등 다양한 주파수 센싱 기술에 제안되었다[2-4].

인지 무선 통신을 사용하게 되는 부사용자의 무선 어플리케이션은 매우 다양하며, 하나의 유휴 기간에 복수의 부사용자가 통신을 시도하게 된다. 인지 무선 통신에서 부사용자는 유휴 상태에 있는 주파수에 대한 독립적 권한이 없으며, 기기종류의 복수 부사용자 단말들이 일원화된 통신 규약을 따르지도 않을 것이므로 다중 접속 방식으로 집중 제어(centralized coordination)된 방법을 사용하기 어렵다. 따라서 분산화 된 제어(distributed coordination) 방식으로 동작

하는 다중 접속 기법이 적용되는 것이 바람직하며, 이에 부합하는 다중 접속 제어 방식으로 임의접속(random access)을 고려할 수 있다[5-8].

기존 연구를 살펴보면, 인지 무선 통신 환경에 기존의 임의 접속 방식을 단순 적용하여 전송률을 실험적으로 평가한 연구 결과가 발표된 바 있으며[5, 6], 스마트 그리드 전력 시스템을 제어하기 위한 무선 통신 어플리케이션으로 인지 무선 통신을 활용하기 위한 연구가 진행되었다[7]. 그러나 이들 연구들은 주사용자의 트래픽 패턴에 따라서 유휴 기간이 가변적이라는 인지 무선 통신 환경의 특수한 상황을 반영하지 않고 있으며, 기존 임의 접속 프로토콜을 단순 적용하였을 뿐, 인지 무선 통신 환경에 적합하도록 개선하기 위한 분석적 접근을 하지 못하고 있다.

본 논문에서는 주사용자의 트래픽 상황에 따라 유휴 기간이 지수 분포(exponential distribution)를 따르는 상황에서 임의 접속의 대표적인 기법인 슬롯-알로하(slotted-ALOHA)의 전송 성능을 분석한다. 인지 무선 통신 시스템은 유휴 기간에만 통신할 수 있으므로 유휴 기간 중 순수 데이터를 전송하는 비율을 성능 평가 지표로 정의하며, 유휴 기간의 조건에 따라 인지 무선 통신의 시스템 파라미터 제어를 위한 전송률 최적화된 기준을 제시하도록 한다.

2. 본 론

2.1 시스템 모델

본 논문에서 고려하고 있는 시스템 모델은 그림 1과 같다. 슬롯-알로하의 하나의 슬롯은 S 로 표시된 센싱 구간과 L 로 표현된 데이터 전송 구간으로 구성된다. 센싱 구간에서는 주사용자 트래픽의 존재 여부를 판정하며 다양한 센싱 기법이 활용될 수 있다. S 의 길이는 인지 무선 통신에 주어진 환경 조건 및 사용하는 센싱 기법에 따라 센싱 정확도를 확보하기 위하여 가변적일 수 있다[4].

* Dept. of Information & Communication Engineering, Sangmyung University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Hanseo University, Korea

E-mail : woo9@hanseo.ac.kr

접수일자 : 2014년 9월 4일

최종완료 : 2014년 12월 18일

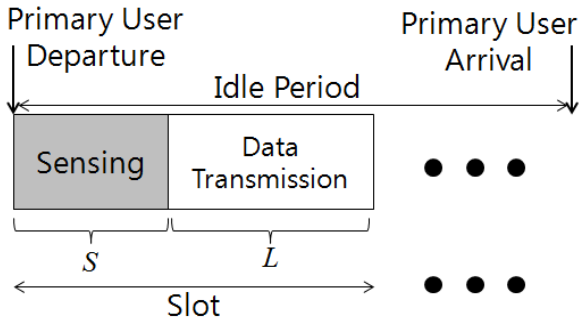


그림 1 인지 무선 통신에서 슬롯-알로하 전송
 Fig. 1 Slotted ALOHA in cognitive radios

하나의 유휴 구간은 특정 주파수 대역에서 주사용자가 트래픽 전송이 완료된 이후 시점으로부터 주사용자의 새로운 트래픽 전송이 시작되는 시점까지의 시간이다. 다양한 종류의 주사용자 트래픽에 대하여 유휴 기간은 지수 분포와 매우 유사한 통계적 특징을 가지고 있다고 알려져 있다[8]. 널리 알려진 바와 같이 지수 분포는 다음과 같이 표현된다[9].

$$f_X(x) = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (1)$$

유휴 기간의 길이가 랜덤 변수이므로 센싱 구간과 데이터 전송 구간의 길이에 따라 유휴 기간에서 데이터 전송을 위하여 활용되는 시간 자원의 길이를 증가시킬 수 있다.

기본적으로 다중 접속 환경을 고려하고 있으므로 N 명의 부사용자가 유휴 기간에 접속을 시도한다. 하나의 슬롯에서 한 사용자가 데이터를 전송할 확률은 P 이며 시스템의 최대 전송량에 대하여 평가하므로 모든 사용자는 전송을 위한 데이터를 가지고 있다고 가정(saturated traffic)한다[6, 7].

2.2 슬롯-알로하 전송률 분석

유휴 기간이 지수 분포를 따를 때 k 개의 슬롯이 전송될 확률은 수식 (1)로부터 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$p_K(k) = \int_0^{(k+1)(L+S)} \frac{e^{-x/\lambda}}{\lambda} dx \quad (2)$$

$$= e^{-\frac{k(L+S)}{\lambda}} - e^{-\frac{(k+1)(L+S)}{\lambda}}$$

수식 (2)에서 $k \in \{0, 1, 2, \dots, \infty\}$ 이다.

한편, 각 슬롯에서 N 개의 사용자가 p 의 확률로 데이터를 전송하기 위하여 송신을 시도할 때 특정 슬롯에서 아무도 전송하지 않을 확률은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_T = 1 - (1-p)^N \quad (3)$$

하나의 유휴 구간에 k 개의 슬롯이 전송될 수 있을 때, 해당 유휴 구간에서 데이터 전송이 발생하지 않는 슬롯과 임의의 접속의 속성 상 충돌이 발생하여 데이터가 수신될 수 없는 상황을 제외하고 C 개의 데이터가 전송될 확률은 수식 (2)와 (3)으로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P_T(k, C) = p_K(k) \binom{C}{k} P_T^k (1-P_T)^{C-k} \quad (4)$$

수식 (4)로부터 k 개의 슬롯 중 실제로 데이터가 전송된 평균 시간을 계산해 보면 다음과 같이 계산된다.

$$T_C(k) = \sum_{C=0}^k C \cdot P_T(k, C) \quad (5)$$

$$= k \cdot P_T \cdot e^{-\frac{(1+2k)(L+S)}{\lambda}} \left(-e^{-\frac{k(L+S)}{\lambda}} + e^{-\frac{(1+k)(L+S)}{\lambda}} \right)$$

모든 k 값에 대하여 평균 전송 시간을 구하고, λ 로 정규화하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$T_C(L) = L \cdot P_S \cdot \sum_{k=0}^{\infty} T_C(k) = \frac{1}{\lambda} \frac{L \cdot P_S \cdot P_{NT}}{e^{\frac{L+S}{\lambda}} - 1} \quad (6)$$

수식 (6)에서 P_S 는 전송하였을 때 충돌이 발생하지 않고 성공할 확률로 다음과 같이 계산된다.

$$P_S = \frac{\binom{N}{1} p(1-p)^{N-1}}{1 - (1-p)^N} \quad (7)$$

수식(6)은 하나의 유휴 기간 중 실제데이터를 전송하는 것에 사용한 시간의 비율이다. 수식 (6)을 구성하고 있는 각각의 변수들에 대하여 살펴보면 우선 P_S 에 대하여 단조 증가한다는 사실을 알 수 있다. 부사용자의 수 N 에 따라 전송 확률을 제어하여 전송 성공 확률 P_S 를 증가시킬 수 있다면 유휴 기간 중 데이터 전송률을 높일 수 있다. 인지 무선 통신을 고려하지 않더라도 일반적으로 예상할 수 있는 결론이다. 다만, 수식 (6)은 P_S 값이 커질 때 T_C 가 증가하는 정량적인 관계를 정확히 표현하고 있다는 점에서 의미가 있다.

다음으로 L 에 대하여 살펴보면 그림 2와 같은 결과를 얻을 수 있다. $\lambda=1000$ 을 적용하였다. 그림 1에 표시된 센싱을 위한 오버헤드(overhead)만 없다면, 데이터 전송을 위한 길이를 최소한으로 유지하는 것이 데이터 전송량을 극대화하기 위한 최선의 방법이다. 유휴 기간은 실수 값이나, 수식 (4)에서와 같이 유휴 기간 내 전송될 수 있는 슬롯의 개수 k 는 자연수이며 같은 유휴 기간의 길이에 대하여 L 의 값이 감소할수록 증가하게 된다. 마치 양자와 오퍼가 양자화 단계가 적을수록 증가하듯이 L 이 작아지면 유휴 기간에 대하여 시간을 나누어 주는 해상도(resolution)가 증가하게 되므로 T_C 는 $S=0$ 일 때 L 이 증가함에 따라 단조 감소한다.

$S>0$ 인 경우 매 슬롯 별로 센싱을 위한 오버헤드 시간이 소비되므로, 데이터 전송 구간을 줄여 유휴 기간을 구분하여 소비하는 해상도를 증가시키더라도 슬롯 수만큼 오버헤드가 증가하여 $S=0$ 인 경우와 같이 가장 짧은 길이의 데이터 전송 구간이 가장 많은 데이터 전송량을 보장하지 않는다. 따라서 오버헤드 대비 상대적으로 넓은 데이터 전송 구간에서 데이터 전송량이 최대가 되는 지점이 발생한다.

$S=0$ 인 것을 실제 운용 환경으로 해석하여 보면 사전에 센싱 정보를 획득할 수 있는 시스템의 제어 정보(out-band signaling) 전달 체계가 있는 경우일 것이다. 이 때 데이터 전송량은 수식(6)만으로 정확히 계산 가능하다. 그러나 $S>0$ 의 경우 N 개의 사용자 중 아무도 데이터를 전송하지 않는

슬롯에 대하여 오버헤드에 대한 계산이 수식 (6)에 반영되어 있지 않아 정확한 전송량 분석을 위하여 추가적인 계산이 필요하다.

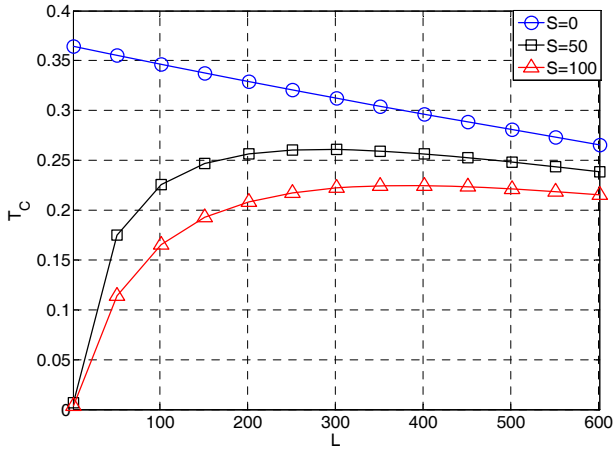


그림 2 유휴 구간 내 데이터 전송 구간 효율 $\rho=0.07, N=10$
 Fig. 2 Data transmission time duration in an idle period when $\rho=0.07, N=10$

2.3 슬롯-알로하 전송률 극대화

인지 무선 통신 환경에서 슬롯-알로하의 성능은 그림 2의 결과와 같이 데이터 전송 구간의 길이에 의하여 결정된다. 따라서 수식 (6)을 극대화하기 위한 L 값을 계산해 볼 필요가 있다. 극대화하기 위한 L 값을 결정하기 위하여 수식 (6)을 미분하여 보면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{T_C(L)}{dL} = -\frac{P_{nt} \cdot P_S e^{(L+S)/\lambda} \cdot (L-\lambda) + \lambda}{\lambda (-1 + e^{(L+S)/\lambda})^2} \quad (8)$$

수식 (6)을 극대화하기 위한 값을 구하기 위하여 수식 (8)이 0이 되는 L 값에 대한 방정식을 풀면 다음과 같은 L_{max} 값을 구할 수 있다.

$$L_{max} = \lambda \cdot (1 + LW(e^{-1 - \frac{S}{\lambda}})) \quad (9)$$

수식 (9)에서 $LW(x)$ 는 램버트더블유(lambertW) 함수로써 $x = we^w$ 를 만족하는 해 w 를 구하는 수치해석 함수이다[10]. 수식 (9)에서 알 수 있는 바와 같이 최적의 데이터 전송 구간의 길이는 전송 확률과 상관이 없으며, 센싱 구간과 평균적인 유휴 구간의 길이에 의하여만 결정되며, 그림 3에 도시되어 있다.

그림 3에서 볼 수 있는 것과 같이 S 값이 증가하면 전송률을 극대화하기 위한 L_{max} 의 값이 증가한다. S 에 소비되는 시간이 증가하면 데이터 전송 구간을 증가시켜야만 효율적인 시간 자원 활용이 됨을 알 수 있으며, 직관적으로 도달할 수 있는 합리적 결론과도 부합한다. 수식(9)에서 제시하고 있는 데이터 전송 구간의 길이를 선택한다면 지수 분포를 갖는 유휴 구간이 존재하는 환경에서 슬롯-알로하 기법을

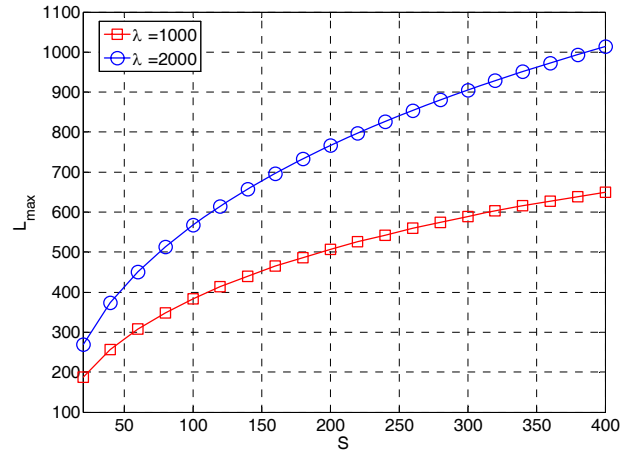


그림 3 데이터 전송 구간을 극대화 하기 위한 데이터 전송 구간 길이 최적화 $\rho=0.07, N=10$

Fig. 3 Optimization of data transmission time duration to maximize throughput when $\rho=0.07, N=10$

사용하는 인지 무선 통신 장치가 그 데이터 전송률을 극대화 할 수 있다.

2. 결 론

본 논문에서는 인지 무선 통신 환경에서 유휴 구간이 지수 분포를 따를 때 슬롯-알로하를 사용하여 부사용자의 전송률을 극대화하기 위한 연구를 제시하였다. 인지 무선 통신 환경의 경우 주파수 센싱을 위한 시간 자원이 소모되므로, 센싱 기간과 유휴 기간의 통계적 특성을 고려하여 데이터 전송을 위한 시간 자원을 할당하는 것이 필요하다. 본 연구를 통하여 데이터 전송 구간을 최적화하여 슬롯-알로하를 사용하는 인지 무선 통신 장치들이 데이터 전송률을 극대화할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2013R1A1A1011297)

References

- [1] Federal Communications Commission, "Spectrum policy task force report, (ET Docket No. 02-135)," Nov. 2002. [Online.] Available: hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-228542A1.pdf.
- [2] X. Huang, G. Wang, F. Hu, "Multitask Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks via Spatiotemporal Data Mining," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no.2, pp. 809-823, Feb. 2013.
- [3] A. S. Kannan, E. M. Manuel, "Performance analysis

of blind spectrum sensing in cooperative environment," Control Communication and Computing (ICCC), 2013, pp. 277-280, Aug. 2013.

- [4] H. Wang, G. Noh, D. Kim, S. Kim, and D. Hong, "Advanced sensing techniques of energy detection in cognitive radios," Journal of Communications and Networks, vol. 12, no. 1, pp. 19-29, Feb. 2010.
- [5] Q. Chen, W. Wong, M. Motani, Y. C. Liang, "MAC Protocol Design and Performance Analysis for Random Access Cognitive Radio Networks," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, no. 11, pp. 2289-2300, Nov. 2013.
- [6] M. E. Bayrakdar, S. Atmaca, A. Karahan, "A slotted ALOHA-Based random access cognitive radio network with capture effect in Rayleigh fading channels," International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), 2013, pp. 72-75, Oct. 2013.
- [7] V. Gungor, D. Sahin, "Cognitive Radio Networks for Smart Grid Applications: A Promising Technology to Overcome Spectrum Inefficiency," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 7, no. 2, pp. 41-46, Jun. 2012.
- [8] S. Geirhofer, L. Tong and B. M. Sadler, "Cognitive radios for dynamic spectrum access in time domain: modeling and exploiting white space," IEEE Commun. Mag., vol. 45, no. 5, pp. 66-72, May 2007.
- [9] A. Papoulis and S. U. Pillai, Probability, Random Variables and Stochastic Process, McGraw-Hill, 2002.
- [10] Robert M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey; D. E. Knuth, "On the Lambert W function," Advances in Computational Mathematics, Vol.5, 1996, Page(s):329-359

저 자 소 개



왕 한 호 (王 瀚 鎬)

저자는 연세대학교 전기전자공학과에서 2004년과 2010년에 각각 학사, 박사 졸업하였다. 현재 상명대학교 정보통신공학과 조교수로 근무하고 있다. 연구 관심 분야는 셀룰러 시스템, 인지 무선 통신 시스템이다.



우 중 재 (禹 重 在)

연세대학교 전기전자공학과에서 2007년 박사학위를 취득하고, 2009년까지 삼성전자 통신연구소에서 근무하였다. 현재한서대학교에서 조교수 재직중이며, 연구 관심 분야는 셀룰러 시스템, 및 임베디드 시스템이다.