

논문 2012-49TC-2-1

인지 무선 시스템에서 전송률 향상을 위한 최적의 프레임 길이 제어 방법

(Optimal Frame Length Control for Throughput Enhancement in
Cognitive Radio Systems)

노 고 산*, 방 극 준**, 홍 대 식***

(Gosan Noh, Keuk-Joon Bang, and Daesik Hong)

요 약

본 논문에서는 인지 무선 시스템에서의 새로운 프레임 길이 제어 방법을 제안한다. 제안된 방법에서는 유휴 기간 동안 시간이 지남에 따라 일차 사용자 패킷이 도착할 확률이 지속적으로 증가하는 특성을 이용한다. 증가하는 일차 사용자 패킷 도착 확률에 따라 이차 사용자의 프레임 길이를 줄이면, 스펙트럼 센싱은 시간이 지남에 따라 더 자주 실행되며 일차 사용자의 도착 유무는 더욱 빠르게 검출될 수 있다. 간섭 제한량을 만족시키는 조건 하에 이차 사용자의 전송률을 극대화하는 최적의 프레임 길이를 구한다. 또한, 이러한 프레임 길이 제어 방법을 사용하였을 때의 상당량의 전송률 향상이 있음을 보인다.

Abstract

We propose a new frame length control scheme for cognitive radio systems. In the proposed algorithm, the property that the probability of a primary packet arrival continually increases as time elapses during the primary user's idle period is utilized. When reducing the secondary frame length in accordance with the increasing primary packet arrival probability, spectrum sensing is conducted more frequently as time elapses and the primary packet arrival is detected more quickly. We obtain the optimal frame lengths by maximizing the secondary throughput while satisfying the interference constraint. Numerical results show a significant throughput enhancement via the frame length control.

Keywords : 인지 무선, 스펙트럼 센싱, 전송률 향상

I. 서 론

인지 무선은 효율적인 스펙트럼 이용을 가능하게 함으로써 무선 통신 이용의 급격한 증가로 인한 스펙트럼 고갈 문제를 해결하기 위해 제안되었다^[1]. 인지 무선을 통해 스펙트럼을 공유할 수 있으며 이는 스펙트럼 센싱

을 통해 구현될 수 있다. 스펙트럼 공유는 스펙트럼을 소유한 일차 사용자(Primary user)와 스펙트럼 센싱을 하여 일차 사용자에게 주는 간섭을 피하면서 사용해야 하는 이차 사용자(Secondary user)사이에 이루어진다.

스펙트럼 센싱은 프레임 단위로 실행된다. 개별 이차 사용자는 센싱 프레임 동안에 스펙트럼 센싱을 하고 전송 프레임 동안에 자신의 데이터를 전송한다^[2-3]. 이것과 관련하여 스펙트럼 센싱은 고정된 센싱 시간과 고정된 데이터 전송 시간을 가지는 형태로 이루어져왔다^[2-3]. 이와 관련하여 [2]에서는 센싱 시간과 전송률 사이의 상관관계를 이용하여 최적의 센싱 시간을 구하였다. 또한 [3]에서는 무작위로 도착하는 일차 사용자 패킷을

* 학생회원, *** 평생회원-교신저자, 연세대학교 (Yonsei University)

** 평생회원, 인덕대학교 (Induk University)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0018938)

접수일자: 2011년11월8일, 수정완료일: 2012년2월17일

고려하여 최적의 센싱 주기를 구하였다.

고정된 센싱 및 전송 시간을 가지는 스펙트럼 센싱 기법을 이용하면 이차 사용자의 스펙트럼 점유 기간 동안 일차 사용자를 검출할 수 있다. 그러나 여기에서 더 나아가서 본 논문에서는 이차 사용자의 전송 중 일차 사용자 패킷이 들어오는 특성을 이용한다. 이차 사용자의 전송이 시작된 이후, 비록 일차 사용자 패킷의 정확한 도착 시간을 예측할 수는 없더라도 일차 사용자 패킷의 도착 확률이 시간이 지남에 따라 지속적으로 증가할 것임을 예측할 수 있다. 이 특성을 스펙트럼 센싱 동작에 이용하면 일차 사용자와 이차 사용자 사이의 간섭을 줄이면서 스펙트럼 사용 효율을 향상시킬 수 있다.

그러므로 본 논문에서는 이차 사용자의 프레임 길이가 시간이 지남에 따라 줄어드는 새로운 프레임 길이 제어 기법을 제안한다. 이차 사용자의 프레임 길이를 줄임으로써 스펙트럼 센싱은 시간이 지남에 따라 더 자주 실행되고 일차 사용자 패킷의 도착은 더 빨리 검출된다. 일차 사용자 패킷의 트래픽은 균등(Uniform), 지수(Exponential), 그리고 파레토(Pareto) 분포를 고려한다^[4-6]. 최적의 프레임 길이를 찾기 위해 일차 사용자에 대한 간섭 조건을 만족시키는 조건 하에서 이차 사용자

의 전송률을 최대화하는 최적화 문제를 정의하고 해결한다. 또한, 제안된 패킷 길이 제어 방법을 통해 얻을 수 있는 성능 향상을 수치적으로 보인다.

II. 시스템 모델 및 프레임 구조

1. 스펙트럼 공유를 위한 트래픽 모델

본 논문에서는 일차 사용자가 이차 사용자에 대하여 우선 순위를 가지는 계층적 스펙트럼 접속 모델을 사용한다. 일차 사용자는 대역폭 W 와 심볼 주기 T_s 를 가지며 유휴(Idle) 상태와 사용(Busy) 상태 중 하나에 해당한다. 각 상태에 대한 시간은 유휴 주기와 사용 주기로 표현한다.

비록 제안된 방식이 일반적인 트래픽 모델에 적용될 수 있지만 본 논문에서는 분석을 위해 균등, 지수, 그리고 파레토 분포를 고려하며, 각 모델은 공통의 도착률 λ 와 처리율 μ 를 가진다고 가정한다. 균등 분포는 분석하기 쉬운 장점이 있으며 음성 패킷 통신에 가장 적합하게 모델링이 된다고 알려져있다^[4]. 지수 분포는 무선 LAN과 같은 무선 패킷 전송을 대표하며^[5], 파레토 분포는 인터넷 트래픽 같은 자기 상관(Self similar) 특성

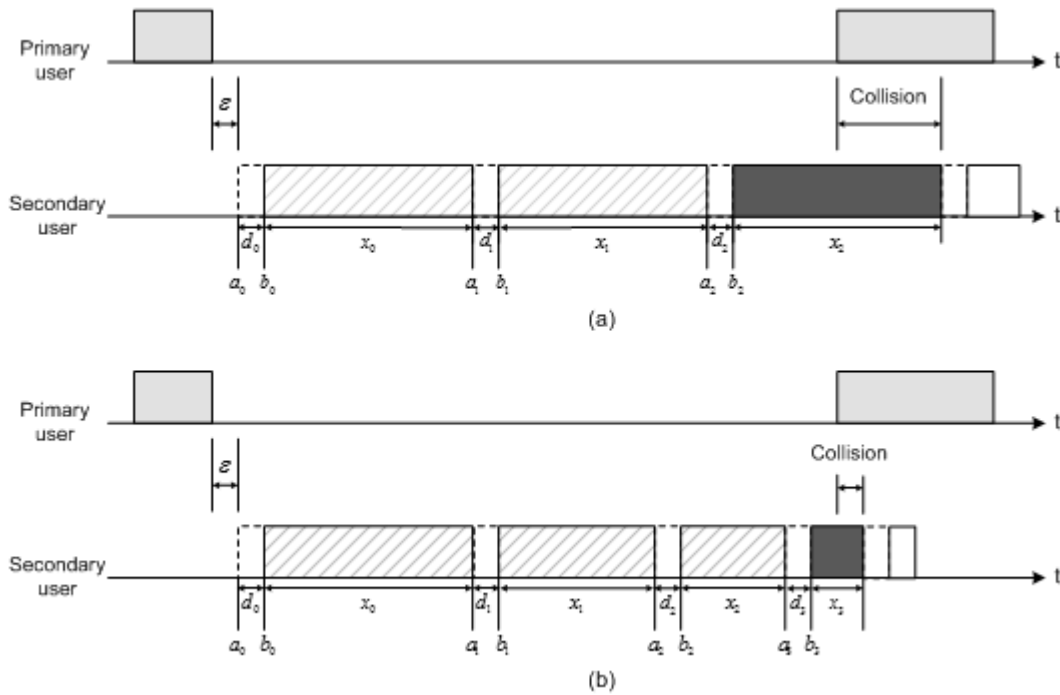


그림 1. 기존의 고정 길이 프레임 전송과 제안된 변동 길이 프레임 전송의 센싱 및 전송 구조 동작의 예

Fig. 1. Examples of the conventional fixed-length frame transmission and the proposed variable-length frame transmission.

을 가지는 긴 꼬리 분포(Heavy-tailed distribution)을 대표한다.

2. 센싱 및 전송 구조

기존의 고정된 길이를 가지는 프레임 전송 방식^[2~3]과 제한된 변동 길이를 가지는 프레임 전송 방식의 센싱 및 전송 구조를 그림 1에서 비교하였다. 먼저 a_k 와 b_k 는 각각 이차 사용자의 k 번째의 센싱 및 전송 프레임이 시작하는 시간을 의미한다. 한편 d_k 와 x_k 는 k 번째 프레임에서의 센싱 및 전송 시간을 의미한다. 또한, 첫 번째 프레임의 전송이 시작하기 전에 ϵ 만큼의 처리 시간이 필요하며 이차 사용자는 a_0 의 첫 프레임 시작 시간을 안다고 가정한다.

기존의 고정된 프레임 길이의 전송(그림 1 (a))에서는 모든 프레임이 같은 길이를 가지게 된다^[2~3]. 그러므로 각 프레임에서 이차 사용자는 고정된 길이의 센싱과 전송 과정을 반복하게 된다. 이 방식은 간단하기는 하지만 일차 사용자 트래픽의 특성을 반영하기 힘들다는 단점이 있다. 유희 주기가 시작된 이후 다음 일차 사용자 패킷이 들어올 확률은 시간이 지남에 따라 증가하게 되므로 일차 사용자와 이차 사용자 사이에 충돌이 일어날 확률이 증가하는 특성이 있다.

제안하는 변하는 프레임 길이의 전송(그림 1 (b))에서는 이차 사용자의 데이터 프레임 길이를 시간에 따라 증가하는 일차 사용자 패킷 도착 확률에 따라 줄여준다. 즉, 각 프레임에서 이차 사용자는 해당 데이터 프레

임의 시작 시간 b_k 에 대하여 최적의 데이터 프레임 길이 x_k^* 를 구해준다. 그럼으로써 이차 사용자는 전송 중에 일차 사용자 패킷이 들어왔을 때 더 빨리 발견하여 스펙트럼을 비워줄 수 있게 되며 이로 인해 일차 사용자와 이차 사용자 사이의 충돌을 줄일 수 있다.

III. 프레임 길이 제어

1. 문제 정의

앞서 가정한 바와 같이 일차 사용자 패킷 도착 모델로 균등, 지수, 그리고 파레토 분포를 사용하며 각각 시간에 대한 누적 분포 함수(Cumulative distribution function; CDF)가 정의된다. 먼저 균등 분포와 지수 분포에 대한 CDF는 각각 $P^{Unif}(t) = t/T_{max}$ 와 $P^{Exp}(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ 로 주어지며, $T_{max} = 2/\lambda$ 는 균등 확률 변수가 가질수 있는 최대값이며 가정한 균등 분포와 지수 분포가 동일한 평균값을 가지도록 주어진다. 파레토 분포의 일차 사용자 패킷 도착 시간에 대한 CDF는 $P^{Par}(t) = 1 - (m/t)^\xi$ 로 주어지며, 여기에서 m 은 분포의 최소 값이고 ξ 는 평균과 분산을 결정하는 값이다^[7]. 마찬가지로 동일한 평균값을 위해 $\xi = 1/(1 - \lambda m)$ 을 적용한다. 위와 같은 가정 하에 그림 2는 일차 사용자 패킷 도착 확률을 시간에 따라 그린 그림이다. 이전 일차 사용자 패킷 전송이 끝난 후, 다음 패킷이 들어올 확률이 시간에 따라 증가한다는 것을 모든 트래픽 모델에 대하여 확인할 수 있다. 그러나 각 확률의 특성은 모델 별로 차이가 있다.

성능 평가를 위해 평균 전송 시간(이차 사용자가 충돌 없이 전송할 수 있는 평균 시간)과 평균 충돌 시간(일차 사용자가 충돌을 경험하는 평균 시간)을 정의한다. 이와 관련하여 전송 시간 최적화^[8]와 충돌 시간 제한^[9]이 고려되었다. 그 이유는 음성 통신이나 파일 전송 등의 많은 무선 서비스의 특성을 반영하기 위함이다^[10]. 만약 충돌이 발생한다고 하더라도 전체 통신의 작은 부분만 방해받을 것이기 때문이다. 그러므로 평균 충돌 확률 대신에 평균 충돌 시간을 고려한다^[3].

제안된 방식을 사용할 경우 전송 시간이 길어지고 충돌 시간이 짧아질 것이 예상된다. 이 때 목표는 평균 충돌 시간을 주어진 값 이하로 유지하면서 이차 사용자의 평균 전송률을 최대화하기 위해 얼마의 프레임 길이가 필요한 것인지를 밝히는 것이다. 이러한 프레임 길이

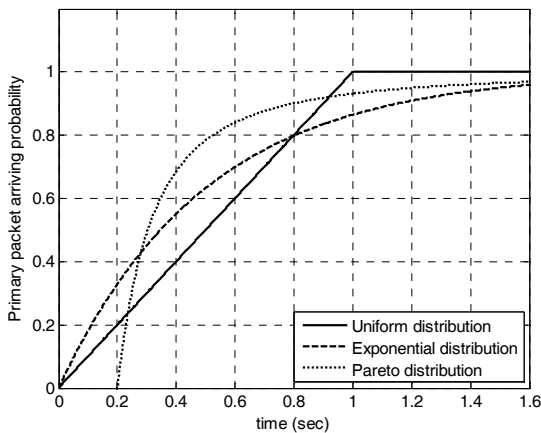


그림 2. 시간에 따른 일차 사용자 패킷의 도착 확률의 예. ($\lambda = 3pkts/s$, $m = 200ms$)

Fig. 2. Example of primary user packet arrival probability with time.

최적화 문제는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \max_{\bar{x}} R &= \frac{P_{Idle}}{T} \sum_{k=0}^{K-1} \phi_k(b_k, x_k) C_0 \\ s.t. \psi_k(b_k, x_k) &\leq \eta_k, k = 0, 1, \dots, K-1. \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 $\bar{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{K-1}]$ 은 이차 사용자의 프레임 길이에 대한 K 차원의 벡터이다. 한편, $P_{Idle} = \mu/(\lambda + \mu)$ 는 일차 사용자가 유휴 상태에 있을 평균 확률이며^[2], $T = 1/\mu$ 는 평균 유휴 주기이다. $\phi_k(b_k, x_k)$ 는 k 번째 이차 사용자의 프레임이 충돌 없이 사용할 수 있는 평균 전송 시간이며 $C_0 = \log_2(1 + \gamma_s)$ 는 γ_s 가 이차 사용자의 신호대잡음비(Signal-to-noise ratio; SNR)이라고 할 때 이차 사용자의 채널 용량이다. 목적 함수 (1)에 대하여 이차 사용자의 유효 전송률 R 은 일차 사용자의 유휴 주기 비율 P_{Idle} 이 반영된 평균 유휴 주기 T 동안 전송된 총 데이터를 의미한다. 한편, $\psi_k(b_k, x_k)$ 는 무작위로 도착하는 일차 사용자 패킷에 대한 k 번째 이차 사용자의 평균 충돌 시간이며 η_k 는 평균 충돌 시간에 대한 제한량이다. 그러므로 각 프레임에 대하여 간섭 제한 조건 $\psi_k(b_k, x_k) \leq \eta_k$ 는 일차 사용자의 보호를 위하여 필요하다.

평균 전송 시간 $\phi_k(b_k, x_k)$ 은 다음의 식과 같이 구해진다.

$$\phi_k(b_k, x_k) = \int_{b_k T_s}^{(b_k + x_k) T_s} (1 - P(t)) dt. \quad (2)$$

k 번째 전송 프레임의 시작 시간 b_k 와 길이 x_k 가 있을 때, $\phi_k(b_k, x_k)$ 는 k 번째 프레임 길이와 해당 프레임이 일차 사용자 패킷과 충돌하지 않을 확률을 곱함으로써 다음과 같이 나타내어진다.

$$\phi_k^{Unif}(b_k, x_k) = x_k T_s - \frac{T_s^2}{2 T_{max}} (2b_k x_k + x_k^2), \quad (3)$$

$$\phi_k^{Exp}(b_k, x_k) = -\frac{e^{-\lambda b_k T_s}}{\lambda} (e^{-\lambda x_k T_s} - 1), \quad (4)$$

$$\phi_k^{Par}(b_k, x_k) = \frac{m^\xi}{1 - \xi} \left(((b_k + x_k) T_s)^{1 - \xi} - (b_k T_s)^{1 - \xi} \right), \quad (5)$$

한편, 각 트래픽 모델에 대한 평균 충돌 시간

$\psi_k(b_k, x_k)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\psi_k(b_k, x_k) = \int_{b_k T_s}^{(b_k + x_k) T_s} P(t) dt = x_k T_s - \phi_k, \quad (6)$$

(1)에 정의된 최적화 문제를 풀기 위하여 볼록함(Convex) 여부를 판별하는 것이 중요하다. 만약 최적화 문제가 볼록함이면 임의의 지역 최적값이 전체 최적값으로 되기 때문이다^[11]. 볼록함 여부의 증명은 다음의 정리를 따른다.

정리 1. 최적화 문제 (1)은 볼록함이다.

증명: 최적화 문제 (1)이 볼록함을 보이기 위해서는 다음의 두 가지 조건을 만족하여야 한다. 첫째는 목적 함수가 볼록함이어야 한다는 것이고, 둘째는 제약 조건이 볼록함이어야 한다는 것이다^[11]. 그리고 임의의 함수는 이차 도함수가 음수이거나 양수일 때 오목함 또는 볼록함이다.

균등 분포에 대하여 다음과 같은 이차 도함수 특성을 가진다.

$$\frac{\partial^2 \phi_k^{Unif}(b_k, x_k)}{\partial x_k^2} = -\frac{T_s^2}{T_{max}} \leq 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_k^{Exp}(b_k, x_k)}{\partial x_k^2} = -\lambda T_s e^{-\lambda(b_k + x_k) T_s} \leq 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_k^{Par}(b_k, x_k)}{\partial x_k^2} = -\xi m^\xi T_s ((b_k + x_k) T_s)^{\xi - 2} \leq 0, \quad (9)$$

■

2. 최적 조건

정리 1에서 살펴본 것처럼 최적화 문제 (1)은 볼록함이며 KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 조건에 의해 최적화를 위한 필요충분조건을 만족시킨다고 할 수 있다^[11]. 다음의 정리는 각 트래픽 모델에 대한 KKT 조건을 나타낸 것이다.

정리 2. 균등 분포에 대하여 최적화 문제 (1)에 대한 최적의 프레임 길이 x_k^* 는 부등호 제약조건이 활성화 되었을 때

$$x_k^* = -b_k + \sqrt{b_k^2 + \frac{2\eta_k T_{max}}{T_s}}, \quad (10)$$

와 같이 나타내어지고 부등호 제약조건이 비활성화 되었을 때

$$x_k^* = -b_k + \frac{T_{\max}}{T_s}. \quad (11)$$

와 같이 나타내어진다.

증명: 먼저 부등호 제약 조건을 완화시키기 위한 라그랑지안(Lagrangian)을 다음과 같이 정의한다^[11].

$$L(\bar{x}, \bar{\nu}) = -\frac{P_{Idle}}{T} \sum_{k=0}^{K-1} \left(x_k T_s - \frac{T_s^2}{2T_{\max}} (2b_k x_k + x_k^2) \right) C_0 + \sum_{k=0}^{K-1} \nu_k \left(\frac{T_s^2}{2T_{\max}} (2b_k x_k + x_k^2) - \eta_k \right) \quad (12)$$

여기에서 ν_k 는 부등호 제약 조건에 대한 라그랑지 승수이며 $\bar{\nu} = [\nu_0, \nu_1, \dots, \nu_{K-1}]$ 은 라그랑지 승수에 대한 K 차원의 벡터이다. 이에 대하여 다음과 같은 KKT 조건을 구할 수 있다.

$$\frac{T_s^2}{2T_{\max}} (2b_k x_k^* + x_k^{*2}) \leq \eta_k, \quad (13)$$

$$\nu_k^* \geq 0, \quad (14)$$

$$\nu_k^* \left(\frac{T_s^2}{2T_{\max}} (2b_k x_k^* + x_k^{*2}) - \eta_k \right) = 0, \quad (15)$$

$$-\frac{P_{Idle}}{T} \sum_{k=0}^{K-1} \left(x_k T_s - \frac{T_s^2}{2T_{\max}} (2b_k x_k + x_k^2) \right) C_0 + \sum_{k=0}^{K-1} \nu_k \left(\frac{T_s^2}{2T_{\max}} (2b_k x_k + x_k^2) - \eta_k \right) = 0. \quad (16)$$

여기에서 (13)과 (14)는 각각 부등호 조건과 라그랑지 승수를 나타낸다. 한편 (17)은 상보여유조건(Complementary slackness condition)이며 (18)은 라그랑지안의 일차 도함수가 0이 되는 조건이다. 만약 부등호 조건이 활성화인 경우의 최적해는

$$x_k^* = -b_k + \sqrt{b_k^2 + \frac{2\eta_k T_{\max}}{T_s^2}}, \quad (17)$$

$$\nu_k^* = \frac{P_{Idle}}{T} \left(\frac{T_{\max}}{T_s (b_k + x_k^*)} - 1 \right) C_0. \quad (18)$$

이며 부등호 조건이 비활성화인 경우의 최적해는

$$x_k^* = -b_k + \frac{T_{\max}}{T_s}, \nu_k^* = 0, \quad (19)$$

이다. ■

정리 2에서의 최적의 해 x_k^* 은 b_k 에 대한 단조감소함수이며 균등 분포 모델에서 시간이 지남에 따라 프레임 길이를 지속적으로 줄여야 하는 것을 확인할 수 있다.

정리 3. 지수 분포에 대한 최적의 프레임 길이는 다음과 같다.

$$x_k^* = \frac{1}{\lambda T_s} \left(W(e^{-(\lambda b_k T_s + \zeta_k)}) + \zeta_k \right), \quad (22)$$

여기에서 $W(z)$ 는 램버트 W함수이며 $W(z)e^{W(z)} = z$ 의 해로 정의된다^[12]. 한편, $\zeta_k = e^{-\lambda b_k T_s} + \lambda \eta_k$ 로 정의한다.

증명: 라그랑지안 완화와 KKT 조건을 이용하면

$$-\frac{P_{Idle}}{T} e^{-\lambda(b_k + x_k^*)T_s} C_0 + \nu_k^* (1 - e^{-\lambda(b_k + x_k^*)T_s}) = 0, \quad (23)$$

을 구할 수 있으며 부등호 제약 조건이 활성화된 경우

$$x_k^* T_s + \frac{e^{-\lambda b_k T_s}}{\lambda} (e^{-\lambda b_k T_s} - 1) = \eta_k, \quad (24)$$

의 방정식을 해결하면 된다. 대수적인 연산과 치환을 통해 (24)는 $e^{\alpha x_k^2} = \beta x_k^* + \delta$ 로 나타낼 수 있으며, 이 때, 각각의 정의는 $\alpha = -\lambda T_s$, $\beta = -\frac{\lambda T_s}{\exp(-\lambda b_k T_s)}$,

그리고 $\delta = \frac{\lambda \eta_k}{\exp(-\lambda b_k T_s)}$ 가 된다. 이 방정식의 해는

$$x_k^* = -\frac{1}{\alpha} W\left(\frac{\alpha}{\beta} e^{-\alpha \delta / \beta}\right) - \frac{\delta}{\beta} \text{이다}^{[12]}. \text{ 치환하면 (22)의}$$

해를 구할 수 있다. 한편, 부등호 제약 조건이 비활성화인 경우의 해는 존재하지 않는다. ■

지수 분포를 가정한 경우에도 x_k^* 는 b_k 에 대하여 단조감소함수인 것을 확인할 수 있다.

정리 4. 파레토 분포에 대한 최적의 프레임 길이는 다음 식의 해와 같다.

$$x_k T_s - \frac{m^\xi}{1-\xi} \left((b_k + x_k) T_s \right)^{1-\xi} - (b_k T_s)^{1-\xi} = \eta_k, \quad (25)$$

여기에서 최적의 해는 수치적인 방법으로 구할 수 있다.

증명: 파레토 분포를 가정한 경우 다음과 같은 KKT 조건을 구할 수 있다.

$$-\frac{P_{Idle}}{T} (m^\xi ((b_k + x_k^*) T_s)^{-\xi}) C_0 + \nu_k^* (1 - m^\xi ((b_k + x_k^*) T_s)^{-\xi}) = 0. \quad (26)$$

부등호 제약 조건이 활성화된 경우 (26)을 정리하면 (25)와 같은 방정식이 되며 이를 해결하면 최적의 프레임 길이를 구할 수 있다. 한편, 부등호 제약 조건이 비활성화된 경우 지수 분포의 경우처럼 해가 존재하지 않는다. ■

파레토 분포를 가정한 경우에도 x_k^* 는 b_k 에 대하여 단조감소함수인 것을 확인할 수 있다.

제안한 방법을 통해 실제로 어떻게 프레임 길이를 제어하는지 예를 들어 설명하도록 한다. 그림 3은 프레임 진행에 따른 최적의 프레임 길이를 그래프로 그린 것이다. 두 종류의 간섭 제한량 $\eta = 0.01$ 을 가정하였다. 그래프에서는 모든 트래픽 모델에 대하여 프레임

표 1. 제안된 프레임 길이 제어 방법
Table 1. Proposed frame length control scheme.

1. initialize: $k \leftarrow 0$
2. repeat
3. if $k = 0$ then
4. $a(k) \leftarrow \epsilon$
5. else
6. $a(k) \leftarrow b(k-1) + x(k-1)$
7. end if
8. $b(0) \leftarrow a(k) + n_D$
9. if the primary traffic is uniform then
10. $x(k) \leftarrow \text{Minimum of (10) and (11)}$
11. else if the primary traffic is exponential then
12. $\zeta(k) \leftarrow e^{-\lambda b(k) T_s} + \lambda \eta_k$
13. $x(k) \leftarrow \frac{1}{\lambda T_s} \left(W(e^{-(\lambda b_k T_s + \zeta_k)}) + \zeta_k \right)$
14. else if the primary traffic is Pareto then
15. $x(k) \leftarrow \text{Solution of (25)}$
16. until $k = K-1$ or $x(k) < x_{\max}$

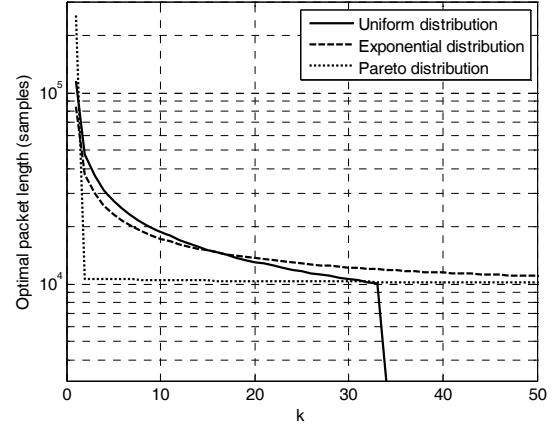


그림 3. 프레임 진행에 따른 최적의 프레임 길이 ($1/\lambda = 0.333$ sec, $1/\mu = 0.1$ sec, $\xi = 1.0638$)

Fig. 3. Optimal frame length as the frame proceeds.

진행에 따라 최적의 프레임 길이가 감소하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, η 가 클수록 더 긴 프레임 길이를 요구하는 것을 알 수 있었다. 이는 간섭 제한량이 완화될수록 이차 사용자는 더 긴 프레임을 사용할 여지가 더 크기 때문이다.

먼저 균등 모델에 대하여는 $k = 33$ 에서 급격하게 변화하는 점을 찾을 수 있고 이 이상에서는 더 이상 전송을 하지 않고 끝내는 것을 알 수 있다. 이 지점 이후로는 일차 사용자 패킷 도착 확률이 1이 되기 때문에 전송을 하지 않는 것이 유리하기 때문이다.

다음으로 지수 모델과 파레토 모델에 대하여는 전송 중단 점이 존재하지 않는 것을 알 수 있는데, 이는 일차 사용자 도착 확률이 균등 모델의 경우와는 달리 시간이 지나도 1이 되지 않는 때문이다. 그러므로 프레임 길이가 지속적으로 줄어들기는 하지만 0이 되지 않는다. 한편, 파레토 모델에 대하여는 m 이하의 시간에서는 패킷 도착 확률이 0을 유지함을 알 수 있으며 이 기간 동안 이차 사용자는 일차 사용자와의 충돌의 위험 없이 전송을 할 수 있다. m 이후로는 프레임 길이가 짧아지게 된다.

제안된 프레임 길이 제어 방법은 표 1에 정리하였다. 제안된 방법은 반복적으로 x_k 를 계산하여 이 시간 만큼 프레임 길이를 결정한다.

IV. 수치적 결과

이 장에서는 제안된 프레임 길이 제어의 성능을 평가하기 위한 수치적 결과를 보인다. 이 때, 센싱 시간과 간섭 제한량은 항상 일정하다고 가정한다(모든 k 에 대하여 $d_k = d$ 과 $\eta_k = \eta$ 이 성립). 스펙트럼 센싱에는 에너지 검출기를 이용하며, 이 때 10개 이하의 적은 샘플 수로도 99% 이상의 일차 사용자 신호를 검출할 수 있다^[13]. 센싱 시간은 $d = 10$ 개의 샘플을 가정하며 대역폭은 $W = 1\text{MHz}$ 를 가정한다. 트래픽 값들은 모델별로 각각 $1/\lambda = 0.333\text{sec}$, $1/\mu = 0.1\text{sec}$, $m = 0.02$, $\xi = 1.0638$ 을 가정한다. 한편, 이차 사용자의 SNR은 $\gamma_s = 10\text{dB}$ 를 가정한다. 그리고 각각의 결과에 대하여 10,000 회의 평균치를 적용한다.

그림 4는 제안된 프레임 길이 제어에 의한 이차 사용자의 유효 전송률을 일차 사용자에 대한 간섭 제한량에 따라 그린 그래프이다. 비교를 위해 기존의 고정된 길이를 가지는 전송 기법에 의한 유효 전송률의 그래프도 그렸다. 이를 통해 다음의 결과를 얻을 수 있다. 첫째, 제안된 방식의 유효 전송률은 프레임 길이가 고정된 기존의 방식보다 높다는 것을 관찰할 수 있다. 제안된 방식은 일차 사용자 패킷 도착 확률에 맞추어 프레임 길이를 변화시키지만 기존의 방식은 그러지 못하기 때문이다. 둘째, 제안된 방식에서 유효 전송률은 η 가 증가할수록 증가한다는 것이다. 간섭 제한량이 늘어날수록 이차 사용자는 더 긴 프레임 길이를 가질 수 있고 스펙

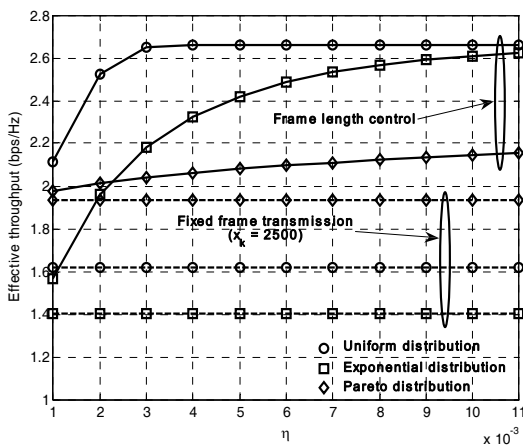


그림 4. 일차 사용자에 대한 간섭 제한량에 따른 이차 사용자의 유효 전송률 그래프
Fig. 4. Effective throughput of the secondary user with the interference constraint to the primary user.

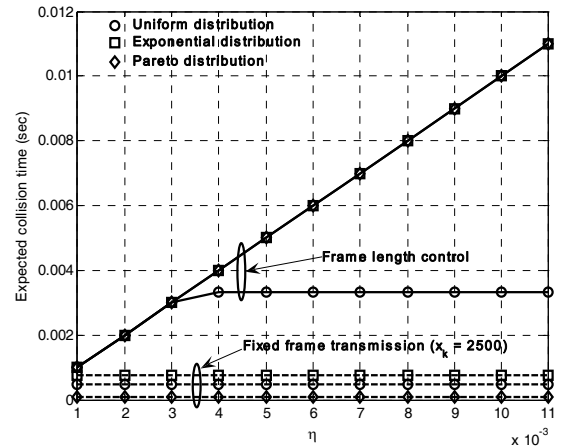


그림 5. 일차 사용자에 대한 간섭 제한량에 따른 이차 사용자의 평균 충돌 시간 그래프
Fig. 5. Average collision time of the secondary user with the interference constraint to the primary user.

트럼 사용 기회가 많아지기 때문이다. 셋째, 제안된 방식에 의한 유효 전송률은 트래픽 모델에 따라 달라진다는 것이다. 균등 모델에 의한 유효 전송률은 $\eta \geq 0.004$ 이상의 높은 간섭 제한량 조건에서 포화된다. 그 이유는 최대 유효 전송률을 얻을 수 있는 최적의 프레임 길이가 간섭 제한량보다 작기 때문이며, 이 때 부등호 제한 조건에 의해 영향을 받지 않게 된다. 반대로, 지수 모델과 파레토 모델에 대한 유효 전송률은 지속적으로 증가하게 되는데 이는 최적의 프레임 길이가 부등호 제한 조건에 의해서만 결정되기 때문이다.

그림 5는 일차 사용자의 간섭 제한량에 대하여 평균 충돌 시간을 그린 그래프이다. 제안된 방식에 의한 평균 충돌 시간은 간섭 제한 조건을 만족시키는 것을 알 수 있다. 한편, 균등 모델에서는 $\eta \leq 0.004$ 의 범위에서 부등호 제한 조건이 활성화 되며 $\eta \geq 0.004$ 의 범위에서 활성화 되지 않는 것을 알 수 있다. 반면, 지수 모델과 파레토 모델에서는 평균 충돌 시간이 항상 부등호 제한 조건을 만족시키는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 일차 사용자에 대한 간섭 제한 조건을 만족시키면서 이차 사용자의 전송률을 향상시킬 수 있는 프레임 길이 제어법을 제안하였다. 현실의 다양한 트래픽 분포를 반영하여 균등, 지수, 파레토 트래픽 모

델을 고려하였다. 시간에 따라 증가하는 일차 사용자 패킷의 도착 확률에 맞추어 이차 사용자의 프레임 길이를 줄임으로써 충돌을 상당히 줄일 수 있었다. 또한, 본 논문에서는 블록폴 최적화 기법을 이용하여 평균 충돌 시간을 제한하는 조건 하에 이차 사용자의 유효 전송률을 극대화하는 최적의 프레임 길이를 구하였다. 제안된 프레임 길이 제어에 의한 성능 향상이 있음을 수치적 결과를 통해 보일 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A survey of dynamic spectrum access: Signal processing, networking, and regulation policy," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 3, pp. 79.89, May 2007.
- [2] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. 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.
- [3] Y. Pei, A. T. Hoang, and Y.-C. Liang, "Sensing-throughput tradeoff in cognitive radio networks: How frequently should spectrum sensing be carried out?" in *Proc. IEEE Int. Symp. Personal, Indoor and Mobile Radio Commun., (PIMRC 2007)*, Sep. 2007, pp. 1.5.
- [4] J. N. Daigle and J. D. Langford, "Models for analysis of packet voice communications systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 4, no. 6, pp. 847.855, Sep. 1986.
- [5] S. Geirhofer, L. Tong, and B. M. Sadler, "Dynamic spectrum access in the time domain: Modeling and exploiting white space," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 45, no. 5, pp. 66.72, May 2007.
- [6] S. Borst, M. Mandjes, and M. van Uitert, "Generalized processor sharing with light-tailed and heavy-tailed input," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 11, no. 5, pp. 821.834, Oct. 2003.
- [7] W. Stallings, *High-speed Networks and Internets, 2nd ed.* Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2002.
- [8] L. Dai and K. B. Letaief, "Throughput maximization of ad-hoc wireless networks using adaptive cooperative diversity and truncated ARQ," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 56, no. 11, pp. 1907.1918, Nov. 2008.
- [9] T. Shu, M. Krunz, and S. Vrudhula, "Joint optimization of transmit power-time and bit energy efficiency in CDMA wireless sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 11, pp. 3109.3118, Nov. 2006.
- [10] S. Huang, X. Liu, and Z. Ding, "Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Commun., (INFOCOM 2008)*, Apr. 2008, pp. 2101.2109.
- [11] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2004.
- [12] Wikipedia, "Lambert W function . wikipedia, the free encyclopedia," 2009. [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Lambert_W
- [13] M. Oner and F. Jondral, "On the extraction of the channel allocation information in spectrum pooling systems," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 558.565, Apr. 2007.

저 자 소 개



노 고 산(학생회원)
2007년 연세대학교 전기전자
공학부 학사 졸업.
2007년~연세대학교 전기전자
공학부 석박사통합과정.
<주관심분야 : 무선 통신, 인지
무선, 무선 자원 관리>



홍 대 식(평생회원)-교신저자
1990년 Purdue University
Electrical Engineering
박사 졸업
1991년~현재 연세대학교
전기전자공학과 교수

<주관심분야 : 디지털통신, 통신신호처리, 5G시
스템, cognitive radio 시스템>



방 극 준(평생회원)
1981년~1985년 연세대학교
전자공학과 공학사
1993년~1995년 연세대학교
산업대학원 전자공학과
공학석사
1995년~1999년 연세대학교 대학원
전자공학과 공학박사

1984년~1991년 삼성전자
1991년~1994년 (주)아리스트 벤처창업
2000년~현재 인덕대학교 방송영상미디어과
부교수

<주관심분야 : 디지털방송전송방식, 방통융합>