

# 채널의 1차 2차 통계적 특성이 큐의 성능에 미치는 영향

## Effect of First and Second Order Channel Statistics on Queueing Performance

김 영 용  
(Young Yong Kim)

**Abstract :** We characterize multipath fading channel dynamics at the packet level and analyze the corresponding data queueing performance in various environments. We identify the similarity between wire-line queueing analysis and wireless network performance analysis. The second order channel statistics, i.e. channel power spectrum, is found to play an important role in the modeling of multipath fading channels. However, it is identified that the first order statistics, i.e. channel CDF also has significant impact on queueing performance. We use a special Markov chain, so-called CMPP, throughout this paper.

**Keywords :** Markov chain, queueing performance, channel model, wireless network

### I. 서론

데이터 서비스를 위한 무선 네트워크를 평가하는데 있어서 주요한 문제 중의 하나는 다양한 환경에서 “패킷 데이터 전송의 수율(Throughput)과 지연(Delay)성능”에 대한 다중 경로 감쇄 채널의 동적 변화의 영향을 분석하는 것이다. 일반적으로 유선 네트워크에서 전송 대역폭은 예러가 없고 항상 사용 가능하다고 가정한다. 그러나, 무선 네트워크에서는 유효한 전송 대역폭은 항상 변동이 심하고, 그 값이 잡음(Noise), 거리(Distance), 이동 속도(Mobile Speed), 다중경로 간섭(Multipath Fading), 전력 제어(Power Control) 등과 같은 여러 인자들에 의존한다. 전파 신호의 끊임없는 변동은 다중경로 감쇄와 음영(Shadowing)으로 나눌 수 있다. 다중경로 감쇄는 수신자에게 도착하는 전송 신호의 여러 경로의 간섭에 의해서 나타나는 현상이다. 그리고, 음영은 불규칙한 지형으로 인한 감쇄를 나타낸다. 그 중에 이 논문에서는 다중경로 감쇄만을 다룬다.

초기연구에서 무선 채널을 모델링할 때, 물리계층에서 수신신호의 세기와 비트 오류율(BER)에 의해 측정되는 채널의 동적 변화를 묘사하는데 초점을 맞추었다. 그러나 물리계층보다 상위 계층들의 무선 네트워크 현상은 물리 계층의 모델링에 반영되지 않기 때문에, 종단 사용자의 데이터 전송 성능을 평가하는데 그러한 모델을 적용하는 데는 필연적으로 오차가 발생할 수밖에 없다.

예를 들어, 무선 링크 계층에서 데이터의 기본단위인 패킷 내부에 있는 몇 개의 비트 오류가 전체 패킷의 손실을 가져온다. 게다가, 종단 네트워크 계층에서 기본적인 데이터 단위인 메시지 내부에서 단 한 개의 패킷 손실만 발생해도 많은 네트워크 프로토콜에서 정의한 전체 메시지의 손실을 가져온다.

그러므로, 무선 네트워크 프로토콜 개발에서 종단 사용자

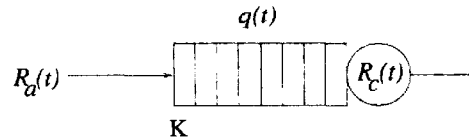


그림 1. 무선 멀티미디어 큐잉 시스템.  
Fig. 1. Wireless multimedia queueing system.

의 데이터 성능을 모의실험하고 분석하기 위해 네트워크 엔지니어가 사용할 수 있는 정교한 패킷 레벨의 무선 채널 모델을 개발하는 것이 가장 중요한 문제 중의 하나이다. 유선 네트워크 분야의 연구결과에 따르면, 비선형 저주파 필터에 의해 큐잉 시스템을 특징지을 수 있다. 이러한 저주파 여파기(Lowpass filter)로 근사될 수 있는 큐잉 시스템에서 입력 신호의 고주파수 변동은 버퍼링에 잘 흡수될 수 있지만, 저주파수 성분의 변동은 여전히 남아있다. 예를 들어, 입력량의 최저 주파수 성분(예를 들어 DC 성분)은 평균 도착 속도이다. 그리고, 그것은 항상 버퍼 블록킹에 의한 패킷 손실이 없다면 큐잉 시스템을 통해서 변하지 않고 남아 있다. 한편 트래픽의 그러한 저주파 특성은 상호 연결된 큐의 네트워크를 통해서 대부분 변하지 않고 남아 있게 된다.

유선 네트워크에서 큐잉 분석은 무선 네트워크로 확장될 수 있다. 본래, 서비스율의 통계적 특성의 영향은 큐잉 과정에 대한 도착율의 영향과 같다. 예를 들어,  $R_c(t)$ 가 채널의 서비스율의 변화의 함수이고  $\mu$ 가  $R_c(t)$ 의 최대값을 일컫는다면,  $R'_c(t) = \mu - R_c(t)$ 를 정의한다면, 큐잉 과정은 다음과 같이 설명될 수 있다.

$$q(t + \Delta) = \max[0, q(t) + R_a(t) + R'_c(t) - \mu] \quad (1)$$

$R'_c(t)$ 가 큐잉 과정에서  $R_a(t)$ 와 같은 역할을 한다는 것은 분명하다.  $R'_c(t)$ 의 통계적 특성은 원래  $R_c(t)$ 의 천이(shift)된 것에 지나지 않는다. 그러므로, 채널의 영향을 무시할 수 있는 유선네트워크의 연구에서 1,2차 통계적 특성에 주목한 바와 같이, 감쇄 채널의 1차, 2차 통계적 특성만이 측정해서 얻

접수일자 : 2001. 12. 15., 수정완료 : 2002. 1. 25.  
김영용 : 연세대학교 전기전자공학부(y2k@yonsei.ac.kr)  
※ 본 논문은 연세대학교 교내 연구지원과 정보통신부 ITRC사업에서 지원하여 연구하였습니다.

을 필요가 있고, 특히 저 주파수 대역에서의 모델링이 중요하다.

이 논문에서는 채널의 특성 중 대기행렬의 성능에 영향을 미치는 통계적 특성을 분석하고 그를 위한 모델링 방법으로 CMPP(Circulant Modulated Poisson Process)라는 특수한 형태의 Markov Chain 모델을 소개한다.

이 논문의 순서는 다음과 같다. 2장에서는 먼저 이 논문에서 사용되는 CMPP 모델에 대해서 소개한다. 3장에서는 채널의 여러 특성에 대한 대기행렬의 성능평가 결과를 살펴보고 4장에서 결론을 맺는다.

**II. CMPP Model**

Markov Chain으로 1차 2차 통계적 특성을 묘사할 수 있는 방법으로는 [7]에서 제시된 CMPP(Circulant Modulated Poisson Process)를 사용할 수 있다. N개의 상태를 갖는 Markov chain을 생각하면 이는 전이율 행렬(Transition Rate Matrix)  $Q$ 와 서비스율 벡터  $\vec{\gamma} = [\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_{N-1}]$ 으로 나타낼 수 있다. 여기서  $\gamma_i$ 는 Markov chain이 i번째 상태에 있을 때의 서비스율을 나타낸다. 여기서  $Q$ 의 각 열은 이전 열의 전이(shift)로 이루어진 구조이므로 이를 CMPP(Circulant Markov Poisson Process)라고 부른다. 여기서  $\vec{a} = [a_0, a_1, \dots, a_{N-1}]$ 라고 할 때 전이율 행렬  $Q$ 는  $Q = circ(\vec{a})$ 로 나타낼 수 있다. 그림 2는 8개의 상태를 가진 CMPP의 예를 나타낸다. 이런 circulant 행렬의 주요한 특징중의 하나는 모든 행렬의 고유값(eigen value)이 서로 다르며 다음과 같은 형태로 나타난다.

$$\vec{\lambda} = \sqrt{N} \frac{\vec{a}}{\gamma} F^* \text{ or } \vec{a} = \frac{1}{\sqrt{N}} \vec{\lambda} F \quad (2)$$

여기서,  $\vec{\lambda} = [\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{N-1}]$ 이며 각 원소는 1번째 행렬의 고유값을 나타낸다. 여기서 F는 fourier 행렬이며  $F^{-1} = F^*$ 의 관계를 가진다. 이때 Q로 규정된 random process는 다음과 같은 PSD(Power Spectral Density)를 가진다.

$$P(\omega) = 2\pi \frac{\gamma^2}{\gamma} \delta(\omega) + \sum_{i=0}^{N-1} \psi_i b_i(\omega) \quad (3)$$

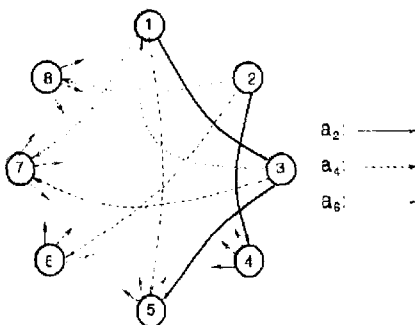


그림 2. 8-state circulant의 예.  
Fig. 2. Example of 8-state circulant.

이때,  $b_i(\omega) = \frac{-2\lambda_i}{\lambda_i^2 + \omega^2}$ 이며  $\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} b_i(\omega) d\omega = 1$ 의 값을 가진다. 여기서 우리는 행렬의 고유치의 값들을 잘 조정함으로써 PSD의 모양을 임의로 만들 수가 있다. 한편 circulant에서 각각의 상태에 존재할 확률은 같고 이 값은  $\pi_i = 1/N$ 으로 주어지므로 CMPP의 CDF를  $F(x) = \int_0^x f(y) dy$ 라고 하면 이는  $\vec{\lambda}$ 에 의해서만 결정되게 된다. 위의 관계를 이용하면 F(x)는 각 단계에서 1/N씩 도약하도록 만들 수 있으며 이를 이용하면 CDF(Cumulative Distribution Function) F(x)는 다음과 같은 관계식을 이용하여 조정할 수 있다.

$$F(x) = \lim_{i \rightarrow \infty} \Pr(\gamma(t) \leq x) = \frac{n_x}{N} \quad (4)$$

여기서,  $n_x$ 는 도착률 중 x보다 작거나 같은 것들의 숫자를 나타낸다. 따라서 우리는 PSD와 CDF를 동시에 만족할 수 있는 Markov Chain인 CMPP 모델을 얻는다. PSD와 CDF 조정의 중요성은 다음 장에서 설명한다.

**III. 채널의 1,2차 통계적 특성의 영향**

편의를 위해, 여기서 우리는 데이터 도착 과정은 M i.i.d. sources로 구성되어 있다고 가정한다. 여기에서 우리는 M=5로 두었다. 각 데이터 소스는 두 개의 상태를 갖는 Markov chain에 의해 모델링되었고, 다음과 같이 정의된다.

$$Q = \begin{bmatrix} -\beta & \beta \\ \alpha & -\alpha \end{bmatrix}, \gamma = [0, \gamma_{on}], \pi = [1-\epsilon, \epsilon] \quad (5)$$

$\beta$ -1과  $\alpha$ -1은 지수분포를 갖는(exponential) ON과 OFF 기간의 평균이다.  $\gamma_{on}$ 은 ON period동안 포아송(Poisson) 패킷 발생 속도이다.  $\epsilon = \beta / (\alpha + \beta)$ 는 ON 주기(period)에서의 확률이다. 각각의 ON 주기는 메시지 발생 시간과 관련될 수도 있다. 통합 소스(aggregate sources)의 power spectrum은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P(\omega) = 2\pi \gamma^2 \delta(\omega) + \gamma + \frac{B_1 \sigma_\gamma^2}{(B_1/2)^2 + \omega^2}$$

이때,  $\gamma = M \epsilon \gamma_{on}$ ,  $B_1 = 2(\alpha + \beta)$ ,

$$\sigma^2 \gamma = M \epsilon (1 - \epsilon) \gamma_{on}^2. \quad (6)$$

로 주어진다.

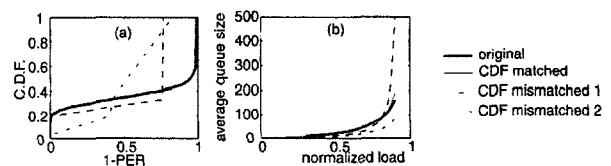


그림 3. CDF 부정합의 영향.  
Fig. 3. Impact of CDF mismatch.

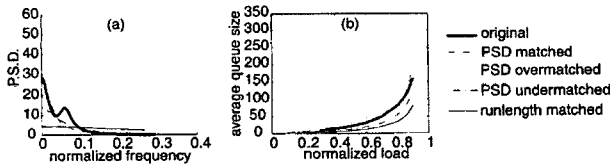


그림 4. PSD 부정합의 영향.  
Fig. 4. Impact of PSD mismatch.

여기서 채널은 Jake의 모델[6]을 사용하여 실제 채널의 특성을 모의 실험하여 사용하였다. 두 가지 채널 상황을 가정하였는데 처음에 상대적으로 빠른 감쇄 변화율은 채널 속도가 48Kbps, 이동노드의 속도가 60 km/h로 나타난다. 위의 데이터 패킷 도착 모델이 주어지면, 패킷 당 480 bits이며, 평균 메시지 크기는 500 Byte로 고정한다. 어떠한 에러 정정 채널 코딩도 가정되어 있지 않다. 양쪽의 경우에,  $E_b/N_0$ 는 10dB로 고정되어 있다. 비트 레벨과 패킷 레벨에서의 비트오류율(BER trace)을 사용하여 큐잉 과정을 모의실험하면 거의 차이가 없다. bit-level BER 변화가 대기행렬 분포(Queueing Solution)에 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 나타내며 비트 레벨의 채널 특성은 채널 통계적 특성의 고 주파수 특성에 기여하기 때문으로 볼 수 있다.

$E_b/N_0=10\text{dB}$ 이고, mobile 속도가 5km/h이며, 2Mbps에서 운용되는 다중경로 감쇄채널을 생각해 보자. 그림 4(a)에서 굵은 선은 Jakes의 방법에 의해 발생된  $\alpha(t)$  trace로부터 변환된  $R_c(t)$  trace에서 축적된 본래 채널의 PSD를 보여준다. 그림 4(b)에서 나온,  $\rho$ 의 함수로서 본래의 평균 큐잉 성능을 얻기 위해서 같은 trace가 컴퓨터 모의실험에서 사용된다. 큐 성능은 패킷 단위로 측정된다.

이제 큐잉 성능 위에서 트래픽을 묘사할 때, 채널 스펙트럼에 맞는 에러의 영향을 조사해 보자. 현존하는 모델링 테크닉[9]은 ON, OFF 사이에서 번갈아 바뀌는 두 개의 상태를 갖는(two-state) Markov chain을 사용하는 것이다.

평균 ON 기간(OFF 기간)은 성공적으로(성공적이지 못하게)전송되는 연속하는 패킷의 평균 run-length에 맞도록 설계된다. 똑같은  $\alpha(t)$  trace는 평균 run-length를 모으기 위해 사용된다. 채널 PSD와 분석적인 평균 대기행렬의 길이는 그림 5에 나와 있다. 보는 바와 같이, 그러한 모델링은 채널의 저주파수 에너지를 심하게 과소 평가해왔고, 그로 인해 적당한 평균 대기행렬의 길이가 원래보다 훨씬 적게 된다. 2개의 상태에 의한 Markov chain 모델에서 사용되는 Bernoulli 함수는 채널 CDF에 맞추는데 결코 정확하지 않으며, 또한 대기행렬 분포의 오차에 많이 기여하게 된다.

이 연구에서, 채널의 PSD와 CDF를 다르게 맞추는 다양한 Markov chain 모델을 만들기 위해서 SMAQ를 사용할 수 있다[7]. 예를 들어, Markov chain 모델과 같은 것은 그림 4에서 처럼 저주파수 채널 PSD를 잘 맞추기 위해 설계되었다. 큐잉 성능은 채널의 저주파수 거동에 의해 주로 영향을 받기 때문에, 평균 대기행렬의 길이는 원래의 것과 거의 일치하여 나타난다. 비교를 위해서, 우리는 두 개의 추가적인 Markov chain 모델을 만들었다. 하나는 저주파수 채널 PSD와 잘 맞지 않는 반면에 다른 하나는 저주파수 채널 PSD와 너무 잘

맞는다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 잘 들어맞지 않는 모델로 인해 queue length가 지나치게 낮게 추정되는 반면, 잘 정합되는 모델은 너무 높게 추정되는 것으로 나타난다. SMAQ tool에 의해 발생하는 이러한 모든 3가지 Markov chain models은 같은 평균 전력과 CDF를 가진다는 것을 주지하라. 다시 말해서, 이러한 세 가지 Markov 모델의 CDF는 동일하고 축적된 1차 채널 통계적 특성과 잘 정합된다. 이상의 예로부터 채널 모델링에서 저주파수 채널 PSD를 큐잉 성능 분석에 정합시키는 것이 중요하다는 것을 분명히 알 수 있다.

마찬가지로 큐잉 분석을 위한 채널 모델링에서 CDF 정합의 중요성을 알 수 있다. 예를 들어, 우리는 다중 MMPs를 만들기 위해 SMAQ를 사용한다. 그리고, 그 모든 MMPs는 그림 3(a)에서 원래 채널과 같은 PSD를 갖지만, 각각은 그림 3(a)에서처럼 다른 CDF를 갖는다(제대로 정합되지 못한 MMP는 2개의 독립적인, 동일하지 않은 two-state Markov modulated processes에 의해 중첩된다). 그림 3의 (b)에서 보이는 것처럼 채널 CDF 또한 큐잉 성능에 중요한 영향을 미치며 부정합의 결과는 평균대기행렬의 크기에 큰 영향을 미친다.

지금까지 우리는 큐잉 분석을 위한 중요한 채널의 통계적 특성에 관심을 가졌고, 그것은 저주파수 대역에서 채널 PSD와 도착 PSD사이의 상호작용과 직접 관련이 있다. 분명히 도착함수의 저주파 에너지에 비해 채널이 비교할 만한 낮은 에너지를 가진다면, Markov chain 채널 모델링은 큐잉 분석에 필요하다. SMAQ tool은 다중경로 감쇄 채널의 CDF나 PSD를 동시에 정합할 수 있는 MMPP(Markov Modulated Poisson Proces)를 만들기 위해 사용된다.

mobile의 속도가 5km/h이고 채널 속도가 2Mbps에서  $E_b/N_0=10, 20\text{dB}$ 인 다중경로 fading 채널의 예를 들기로 한다. trace 측정에 기반을 둔, 본래 PSD와 CDF는 그림 5(a)(b)에서 굵은 선으로 표시되었다. 맨 처음의  $\alpha(t)$  trace로부터 생성된 PER(t)의 일부분은 그림 5(c)에 도시되어 있다.

입력 함수로서 측정된 PSD와 CDF를 제공하기 때문에, SMAQ 틀에 의한 결과는 그림 5(a)(b)에서처럼 측정값과 잘 정합되는 PSD와 CDF를 가진 CMPP를 생성한다. 두 개의 그래프가 전체 범위에서 가상적으로 잘 겹쳐지기 때문에, CDF 정합은 거의 완벽한 것처럼 보인다.

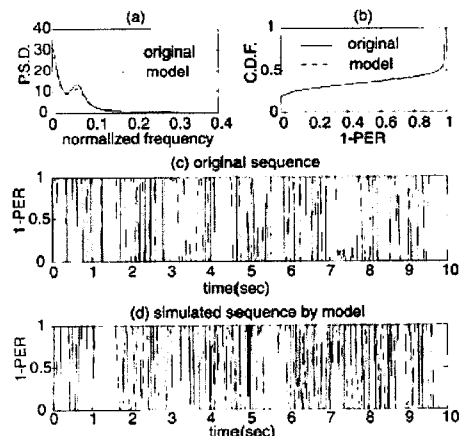


그림 5. Markov chain 모델의 예.  
Fig. 5. Example of Markov chain modeling.

#### IV. 결론

이 논문에서 우리는 패킷 단계에서의 다중경로 감쇄 채널 동적 변화의 특징을 알아보았고, 저주파 채널 PSD와 CDF의 큐잉 분석을 위한 중요성을 살펴보았다. 채널의 변화 성분을 고정성분과 변동성분으로 분리하면 채널의 변동성분을 도착 트래픽의 변동성분처럼 분석할 수 있어서 유선망에서 정립된 이론들을 그대로 무선망에서 적용할 수 있음을 확인하여, 1,2차 통계적 특성의 무선망에서의 영향을 살펴보았다. 한편 비트 레벨 모의실험과 패킷 레벨 모의실험이 큰 차이가 없음을 알아내었다. 이 논문에서 소개된 채널 패킷 레벨의 스펙트럼 분석은 무선 감쇄 채널 상에서 큐잉 성능을 이해하는데 분명히 밑그림을 제공한다. 물리적 레벨의 무선 채널 모델링과 시스템 레벨의 네트워크 성능 분석을 통합하는데 방향을 제공해 준다. 다중 경로 감쇄 채널보다 큐잉 성능에 훨씬 더 많은 영향을 미치는 것으로 예상되는, 감쇄 채널의 모델링은 앞으로의 연구계획 중 하나이다. 왜냐하면 채널 PSD에서 shadowing 채널은 훨씬 더 많은 저주파 에너지를 나타내기 때문이다.

#### 참고문헌

[1] H. Che and S. Q. Li, "Fast algorithm for measurement-based

traffic modeling," *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 53-65 April, 1997.

- [2] R. H. Clarke, "A statistical theory of mobile-radio reception," *Bell Systems Technical Journal*, vol. 47, pp. 957-1000, July-August, 1968.
- [3] B. D. Fritchman, "A binary channel characterization using partitioned Markov chains," *IEEE Transactions on Information Theory*, pp. 221-227, April, 1967.
- [4] M. J. Gans, "A power-spectral theory of propagation in the mobile radio environment," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 21, pp. 27-38, February, 1972.
- [6] W. C. Jakes, Jr., Ed., *Microwave Mobile Communication*, Wiley, New York, 1974.
- [7] S. Q. Li and C. L. Hwang, "Queue response to input correlation functions: Continuous spectral analysis," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, pp. 678-692, December, 1993.
- [8] B. Sklar, *Digital Communications Fundamentals and Applications*, Prentice Hall, NJ, 1988.
- [9] M. Zorzi, R. R. Rao, and L. B. Milstein, "On the accuracy of a first order Markov model for data transmission on fading channels," *Proc. IEEE ICUPC '95*, pp. 211-215. November, 1995.



#### 김 영 용

1991년 서울대 전자공학과 졸업. 동 대학원 석사(1991). University of Texas at Austin Ph.D(1999). 2000년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수. 관심분야는 컴퓨터 네트워크, 이동통신.