



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2013년03월26일
 (11) 등록번호 10-1246783
 (24) 등록일자 2013년03월18일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H04L 1/00 (2006.01) *H03M 13/00* (2006.01)
 (21) 출원번호 10-2007-7030969
 (22) 출원일자(국제) 2006년05월26일
 심사청구일자 2011년05월24일
 (85) 번역문제출일자 2007년12월31일
 (65) 공개번호 10-2008-0028896
 (43) 공개일자 2008년04월02일
 (86) 국제출원번호 PCT/US2006/020861
 (87) 국제공개번호 WO 2007/005160
 국제공개일자 2007년01월11일
 (30) 우선권주장
 11/174,005 2005년06월30일 미국(US)
 (56) 선행기술조사문헌
 US5699369 A
 US6421387 B1
 US6278716 B1

(73) 특허권자
돌비 레버러토리즈 라이선싱 코오포레이션
 미합중국, 캘리포니아 94103, 샌프란시스코 포트리로 애비뉴100
 (72) 발명자
바우어, 클라우스
 미국, 캘리포니아 94103, 샌 프란시스코, 포트레로에비뉴 100, 씨/오 돌비 레버러토리즈 라이선싱 코오포레이션
지앙, 웨뉴
 미국, 캘리포니아 94103-4813, 샌 프란시스코, 포트레로에비뉴 100, 씨/오 돌비 레버러토리즈 라이선싱 코오포레이션
 (74) 대리인
박경재

전체 청구항 수 : 총 12 항

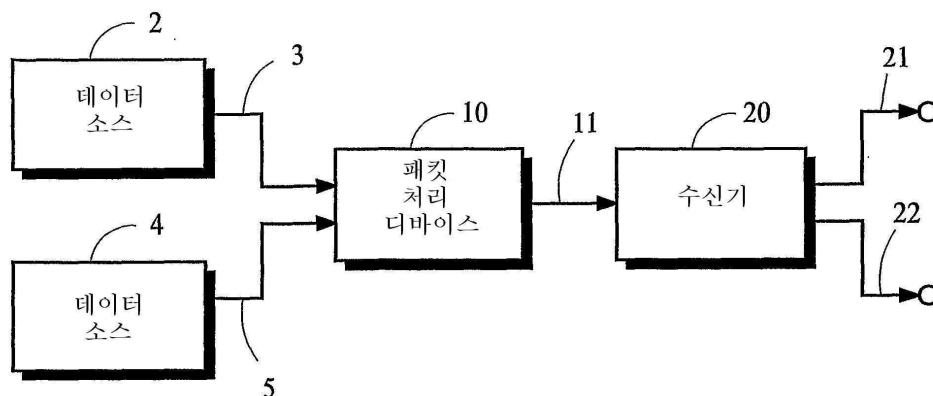
심사관 : 정은선

(54) 발명의 명칭 **무선 네트워크들로 멀티미디어 스트리밍의 순방향 오류정정을 최적화하기 위한 방법 및 시스템**

(57) 요약

통신 시스템에서 패킷들의 유실은 패킷 유실의 계산된 확률에 응하여 한 세트의 오류 정정(EC) 파라미터들을 적응시킴으로써 최적으로 최소화될 수 있다. 계산된 확률은 한 세트의 통신 파라미터들에 적용되는 도출된 알고리즘들로부터 얻어진다. 알고리즘들은 통신 시스템의 베르누이-분포 트래픽 모델들 및 일정 비트 레이트(CBR) 트래픽 모델들로부터 도출된다. 패킷 유실의 근사화 확률을 계산하는 매우 효율적인 알고리즘을 도출하기 위해 콜랩스-상태 모델이 사용된다. 알고리즘들에 대한 대안적 애플리케이션들이 또한 개시된다.

대표도 - 도1



특허청구의 범위

청구항 1

통신 시스템에서 패킷의 제공을 제어하는 방법으로서,

한 세트의 패킷으로 배열된 정보를 전달하는 소스 신호를 제공하는 제1 데이터 소스와,

상기 소스 신호를 수신하고, 상기 패킷 세트의 패킷의 적어도 일부에 대한 정보를 버퍼 크기를 갖는 버퍼에 저장하며, 적어도 일부가 버퍼에 저장된 정보의 패킷을 포함하는 출력 신호를 전송하는 패킷 처리 디바이스로서, 상기 패킷 세트의 패킷 중 적어도 일부에 대한 정보는 충분한 상기 버퍼에 의해 일어난 유실에 의해 상기 출력 신호로부터 생략된, 상기 패킷 처리 디바이스와,

상기 출력 신호에서 패킷의 적어도 일부를 수신하는 수신기를 포함하는,

통신 시스템에서 상기 수신기의 패킷의 제공을 제어하는 방법에 있어서,

(a) 상기 버퍼 크기와,

임의의 경합 데이터 소스로부터 경합 패킷이 주어진 시간 간격 동안 상기 패킷 처리 디바이스에 의해 수신되는 상호간섭 확률과,

상기 버퍼가 비어있지 않을 때 시간 간격 동안 상기 패킷 처리 디바이스가 패킷을 성공적으로 전송하는 전송 확률을

나타내는 파라미터를 전달하는 하나 이상의 신호를 수신하는 단계와,

(b) 상기 파라미터로부터 하나 이상의 유실 확률 측정을 유도하는 단계로서, 각 측정은 데이터 패킷의 정보가 유실되는 확률을 나타내고, 유실 확률의 각 측정은 충분한 상기 버퍼에 의해 일어난 유실을 설명하는 프로세스에 의해 유도되며,

(1) 상기 프로세스는 베르누이 프로세스(Bernoulli process)에 따른 확률 분포를 갖는 확률 프로세스에 따라 패킷 처리 디바이스에 소스 신호의 패킷이 도착하는 모델의 해(solution)를 나타내고, 상기 버퍼 크기에 무관한 계산 복잡도를 가지며, 상기 유실 확률은 도착 확률, 전송 확률, 및 제로 내지 1의 상호간섭 확률의 모든 값에 대해 제로 내지 1의 값을 갖거나, 또는,

(2) 상기 프로세스는 확정적 프로세스에 따라 상기 패킷 처리 디바이스에 상기 소스 신호의 패킷이 도착하는 모델의 해를 나타내는, 상기 유도 단계와,

(c) 상기 패킷 처리 디바이스의 버퍼가 충분하기 때문에 데이터 패킷의 정보가 유실되는 가능성을 감소시키기 위해 상기 제1 데이터 소스의 동작을 적용하는 단계로서,

상기 패킷 세트는 제1 수의 데이터 패킷과 제2 수의 오류-정정 패킷을 포함하고,

상기 수신기는 손상 또는 분실 정보를 복구하기 위해 수신된 패킷에 오류 정정 프로세스를 적용하고,

상기 파라미터는 또한 상기 제1 및 제2 수와, 상기 시간 간격 동안 상기 패킷 처리 디바이스에 의해 상기 제1 데이터 소스로부터 패킷이 수신되는 도착 확률을 나타내고,

데이터 패킷의 정보가 유실되고 상기 오류 정정 프로세스에 의해 복구되지 않는 확률을 나타내는 유실 확률의 측정은 상기 파라미터로부터 유도되고,

상기 제1 데이터 소스의 동작은 상기 유실 확률의 측정에 대응하여 상기 제1 또는 상기 제2 수를 변경하거나; 또는

복수의 도착 확률 각각에 대한 유실 확률의 각 측정은 상기 파라미터로부터 유도되고, 각각의 도착 확률은 상기 시간 간격 동안 상기 제1 데이터 소스로부터 패킷이 상기 패킷 처리 디바이스에 의해 수신되는 확률을 나타내고,

상기 제1 데이터 소스의 동작은 상기 복수의 유실 확률에서 최소 유실 확률이 유도되는 도착 확률을 선택하고, 상기 선택된 도착 확률을 보다 밀접하게 반영하는 방식으로 상기 패킷 처리 디바이스가 패킷을 수신하도록 상기 제1 데이터 소스의 동작을 변경하는, 상기 단계를

포함하는, 패킷 제공 제어방법.

청구항 2

제1항에 있어서, 상기 프로세스는 상기 소스 신호 내 패킷들이 확정적 프로세스에 따라 상기 처리 디바이스에 도착하고 패킷들이 일정한 레이트로 도착하는 상기 모델의 헤를 나타내며, 상기 도착 확률은 상기 일정 레이트에 비례하는, 패킷 제공 제어방법.

청구항 3

제1항에 있어서, 상기 도착 확률은 확정적 프로세스에 따라 상기 처리 디바이스에 도착하는 상기 소스 신호에 패킷들의 제1 확률 분포에 따르며,

상기 상호간섭 확률은 확률적 프로세스에 따라 상기 처리 디바이스에 도착하는 경합 패킷의 제2 확률 분포에 따르는, 패킷 제공 제어방법.

청구항 4

제1항에 있어서, 상기 도착 확률은 베르누이 프로세스에 따라 상기 처리 디바이스에 도착하는 상기 소스 신호 내 패킷들의 제1 확률 분포에 따르며,

상기 프로세스는 근사화 없이 상기 유실 확률의 측정을 도출하며 상기 제2 수 및 제3 수의 곱에 비례하는 계산 복잡도를 가지며, 상기 제3 수는 상기 제1 수 및 제2 수의 합과 같은 것인, 패킷 제공 제어방법.

청구항 5

제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 프로세스는 임계값 미만의 정상상태 확률을 갖는 버퍼 점유율의 상태들을 제외시킴으로써 근사화에 의해 상기 유실 확률의 상기 측정을 도출하는, 패킷 제공 제어방법.

청구항 6

제5항에 있어서, 상기 프로세스는 제4 수를 3제공한 수, 제1 수 및 제5 수와의 곱에 비례하는 계산 복잡도를 가지며, 상기 제4 수는 상기 임계값 이상의 정상상태 확률을 갖는 버퍼 점유율의 상태들의 카운트를 나타내며, 상기 제5 수는 상기 도착 확률에 반비례하는, 패킷 제공 제어방법.

청구항 7

제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에 있어서, 상기 버퍼 크기, 상기 제1 및 제2 수들, 상기 도착 확률, 상기 전송 확률 및 초기 유실 확률을 나타내는 정보에 제2 프로세스를 적용함으로써 상기 상호간섭 확률을 도출하는, 패킷 제공 제어방법.

청구항 8

제7항에 있어서, 상기 제2 프로세스는 임계값 미만의 정상상태 확률을 갖는 버퍼 점유율의 상태들을 제외시킴으로써 근사화에 의해 상기 상호간섭 확률의 상기 측정을 도출하는, 패킷 제공 제어방법.

청구항 9

통신 시스템에 있어서,

한 세트의 패킷들로 배열된 정보를 전달하는 소스 신호를 제공하는 제1 데이터 소스,

상기 소스 신호를 수신하며, 상기 한 세트의 패킷들 내 패킷들의 적어도 일부에 대한 정보를 버퍼 크기를 갖는 버퍼에 저장하고, 정보의 패킷들 중 적어도 일부가 상기 버퍼에 저장되었던 상기 정보의 패킷들을 포함하는 출력신호를 전송하며, 상기 한 세트의 패킷들 내 상기 패킷들의 적어도 일부에 대한 정보는 충만된 상기 버퍼에 의해 야기되는 유실들에 기인하여 상기 출력신호로부터 생략되는, 패킷 처리 디바이스, 및

상기 출력신호 내 상기 패킷들의 적어도 일부를 수신하는 수신기를 포함하고,

상기 제1 데이터 소스, 상기 패킷 처리 디바이스 및 상기 수신기 중 하나 이상은 제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에 따른 방법을 수행하도록 된, 통신 시스템.

청구항 10

제9항에 있어서, 상기 한 세트의 패킷들은 제1 수의 데이터 패킷들 및 제2 수의 오류-정정 패킷들을 포함하며, 상기 수신기는 손상된 혹은 분실 정보를 복구하기 위해서 상기 수신된 패킷들에 오류 정정 프로세스를 적용하는, 통신 시스템.

청구항 11

통신 시스템에서 패킷들의 제어를 제어하기 위한 제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에 따른 방법을 수행하는 장치에 의해 실행될 수 있는 프로그램의 명령들을 저장하는 컴퓨터 판독 가능한 기록매체에 있어서, 상기 통신 시스템은

한 세트의 패킷들로 배열된 정보를 전달하는 소스 신호를 제공하는 제1 데이터 소스,

상기 소스 신호를 수신하며, 상기 한 세트의 패킷들 내 패킷들의 적어도 일부에 대한 정보를 버퍼 크기를 갖는 버퍼에 저장하고, 정보의 패킷들 중 적어도 일부가 상기 버퍼에 저장되었던 상기 정보의 패킷들을 포함하는 출력신호를 전송하며, 상기 한 세트의 패킷들 내 상기 패킷들의 적어도 일부에 대한 정보는 충만된 상기 버퍼에 의해 야기되는 유실들에 기인하여 상기 출력신호로부터 생략되는, 패킷 처리 디바이스, 및

상기 출력신호 내 상기 패킷들의 적어도 일부를 수신하는 수신기를 포함하는, 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

청구항 12

제11항에 있어서, 상기 한 세트의 패킷들은 제1 수의 데이터 패킷들 및 제2 수의 오류-정정 패킷들을 포함하며, 상기 수신기는 손상된 혹은 분실 정보를 복구하기 위해서 상기 수신된 패킷들에 오류 정정 프로세스를 적용하는, 컴퓨터 판독 가능한 기록매체.

명세서

기술분야

[0001] 본 발명은 수신기들에 전송을 위해 패킷들로 배열된 정보 스트림들을 처리하는 디바이스들의 동작을 최적화하는 것에 관한 것으로, 특히 수신기에서 패킷 유실들을 최소화하기 위해 디바이스들의 동작을 적응시키는 것에 관한 것이다. 본 발명은 무선 네트워크들로 멀티미디어 정보를 전달하는 패킷들의 스트림들을 전송하는 시스템들에서 잇점이 있게 사용될 수 있다.

배경기술

[0002] 무선 네트워크들로 실시간 멀티미디어 트래픽의 전달은 3세대 셀룰라, WIFI 및 WIMAX 무선 네트워크들에서 중요한 애플리케이션이 될 것으로 예상된다. 이들 애플리케이션들에서, 이미지들 및 사운드들을 나타내는 디지털 데이터와 같은 멀티미디어 정보는 패킷들로 구성된다. 멀티미디어 소스들은 최종-사용자 수신기들에 무선 통신 채널들로 패킷들을 전송하는 무선 액세스 포인트들과 같은 처리 디바이스들에 이들 패킷들의 스트림들을 보낸다. 처리 디바이스가 즉시 패킷을 전송할 수 없다면, 이것이 전송될 수 있을 때까지 큐 혹은 버퍼에 패킷을 임시로 저장한다. 예를 들면, 처리 디바이스는 무선 통신 채널이 다른 처리 디바이스에 의해 사용되고 있는 중일 때 패킷을 전송할 수 없을 수도 있다.

[0003] 최종 사용자에게 의해 수신되는 멀티미디어 정보의 인지되는 질은 패킷 유실, 패킷 지연 및 지연 지터를 포함한 다수의 요인들에 의해 악영향을 받을 수 있다. 패킷 유실은 최종 사용자 수신기에 의해 수신되지 않은 분실 패킷들, 및 수신되었지만 이들이 전달하는 정보가 손상된, 손상된 패킷들을 포함한다. 이들 패킷 유실들은 (1) 잡음성 통신채널들, (2) 복수의 전송기들에 의해 보내지는 패킷들과의 동시 전송들 혹은 "충돌들", 및 (3) 패킷들이 전송되기 전에 패킷들을 임시로 저장하기 위해 처리 디바이스들에서 사용되는 버퍼들의 오버플로에 의해 야기될 수 있다. 버퍼 오버플로는 처리 디바이스가 이의 버퍼에 패킷을 임시로 저장해야 하지만 버퍼가 이미 충만하여 있을 때 일어날 수 있다. 잡음성 통신 채널들에 의해 야기되는 패킷 유실들 및 충돌들은 여기에서는 유형 I 유실들이라 칭하며 버퍼 오버플로에 의해 야기되는 패킷 유실들은 여기에서는 유형 II 유실들이라 칭한다.

[0004] 유형 I 및 유형 II 패킷 유실들의 인지되는 영향들을 감소시키기 위해서 다수의 기술들이 제안되었다. 순반향 오류 정정(FEC)으로서 알려진 한 기술은, 유실들을 야기한 상태들이 너무 빈번하지 않고 너무 오래 지속하지 않

는다면, 분실 혹은 손상된 패킷들에 의해 전달되는 정보를 수신기가 복구할 수 있게 한다. FEC에 의해 취급될 수 있는 오류-유발 상태들의 길이 및 빈도는 2개의 파라미터들 n 및 k 에 의해 제어되고, 여기서 "FEC 패킷들"의 수 $(n-k)$ 는 k 개의 멀티미디어 패킷들과 결합되어 총 n 개의 멀티미디어+FEC 패킷들을 가진 한 세트의 패킷들을 형성한다. 수신기가 손상 없이 n 패킷들 중 적어도 k 개를 수신할 수 있다면, 분실 및 손상된 패킷들에 기인한 어떠한 유실들이든 정정될 수 있다. n 패킷들 중에서 k 패킷들보다 더 적게 손상 없이 수신된다면, 하나 이상의 패킷들에 대한 정보 유실들은 복구될 수 없다.

[0005] 불행하게도, FEC는 코스트를 갖는다. FEC 패킷들의 추가된 수 $(n-k)$ 는 충돌들에 기인하여 지연들의 위험을 증가시키며 각 세트의 패킷들을 전송하는데 필요한 시간 혹은 채널 대역폭을 증가시킨다. FEC 파라미터들 (n,k) 의 값들은 경합 요구들 간의 절충을 최적화하기 위해 선택될 수 있다. 더 높은 비 $\phi=n/k$ 는 가능한 오류 정정 수준을 증가시키지만 지연들도 증가시켜 필요로 채널 대역폭을 ϕ 배만큼 증가시킨다.

[0006] FEC 파라미터들 (n,k) 은 명시된 레이트의 패킷 유실들에 대해 보호, 지연 및 대역폭에 대한 요건을 충족시키기 위해 선택될 수 있다. 불행하게도, 모든 요건을 동시에 충족시키는 것은 불가능할 수 있고 여러 가지 요건들간에 절충이 필요할 수도 있다. 또한, 가용 채널 대역폭은 비 ϕ 에 실제적인 한계를 부과한다. 매우 높은 비는, 다른 데이터 소스들로부터 패킷들의 고갈을 야기하거나 통신 채널의 가용 대역폭을 초과하는 대역폭 요건을 부과할 수 있다. FEC 파라미터들의 최적의 선택은 다른 데이터 소스들에 의해 제공되는 패킷들에 의해 요구되는 대역폭뿐만 아니라 채널의 가용 대역폭을 고려해야 한다.

[0007] 그러나, 실제로, 통신 시스템들에서 상태들은 급속하게 변할 수 있다. 대역폭에 최소의 증가로 요망되는 수준의 보호를 제공하는 FEC 파라미터들의 최적의 선택은, FEC 파라미터 값들 (n,k) 이 적응적으로 설정될 것을 요구한다. 필요한 것은 낮은 계산 복잡도를 갖는 프로세스에 의해 구현될 수 있는 이들 FEC 파라미터들을 적응시키는 방법이다. 이것은 전형적인 네트워크 장비에 낮은 비용으로 탑재될 수 있는 가장 적당한 처리 능력만을 구비한 디바이스들을 사용하여 FEC 시스템이 자신을 실시간으로 적응시킬 수 있게 할 것이다.

[0008] 본 발명에 따른 적응형 FEC 시스템은 상태들을 주기적으로 측정하고 FEC 파라미터들을 적응시키는 시스템의 부분에 이들 측정들을 제공하는 기능들이 가능할 수 있다면 보다 효과적으로 구현될 수 있다. 이러한 측정 기능의 존재는 이 개시의 나머지 내내 가정된다. 기본적으로 어떠한 특정한 측정 기능도 본 발명에 필수는 아니다. 설명을 용이하게 하기 위해서, 다음의 논의는 기능이 이하 기술되는 통신 시스템 모델들에 입력 파라미터들로서 필요한 모든 트래픽 레이트들 및 유실들을 측정하는데 사용될 수 있는 것으로 가정한다. 본 발명의 구현은 유형 II 패킷 유실들의 영향들을 최소화하기 위해서 FEC 파라미터 값 (n,k) 을 적응시키기 위해 다른 파라미터들과 함께 이들 측정들을 사용할 수 있다.

[0009] 발명의 개시

[0010] 본 발명의 목적은 계산적으로 효율적인 프로세스를 사용하여 패킷 유실들의 영향들을 최소화하기 위해 패킷 통신 시스템에서 오류 정정 파라미터들의 적응을 제공하는 것이다.

[0011] 본 발명의 일 면은 제1 수의 데이터 패킷들 및 제2 수의 오류-정정 패킷들을 포함하는 한 세트의 패킷들로 배열된 정보를 전달하는 소스 신호를 제공하는 제1 데이터 소스; 상기 소스 신호를 수신하며, 상기 한 세트의 패킷들 내 패킷들의 적어도 일부에 대한 정보를 버퍼 크기를 갖는 버퍼에 저장하고, 정보의 패킷들 중 적어도 일부가 상기 버퍼에 저장되었던 상기 정보의 패킷들을 포함하는 출력신호를 전송하며, 상기 한 세트의 패킷들 내 상기 패킷들의 적어도 일부에 대한 정보는 충만된 상기 버퍼에 의해 야기되는 유실들에 기인하여 상기 출력신호로부터 생략되는, 패킷 처리 디바이스; 및 상기 출력신호 내 상기 패킷들의 적어도 일부를 수신하며 손상된 혹은 분실 정보를 복구하기 위해 이들 수신된 패킷들에 오류 정정 프로세스를 적용하는 수신기를 포함하는 통신 시스템에서 패킷들의 제공을 제어한다. 상기 제어는 (a) 상기 버퍼 크기, 상기 제1 및 제2 수들, 제1 데이터 소스로부터의 패킷이 시간간격 동안 패킷 처리 디바이스에 의해 수신될 도착확률, 상기 버퍼가 비어있지 않을 때 시간간격 동안 상기 패킷 처리 디바이스가 패킷을 성공적으로 전송할 전송 확률, 임의의 경합 데이터 소스로부터 경합 패킷이 시간간격 동안 상기 패킷 처리 디바이스에 의해 수신될 상호간섭 확률을 나타내는 파라미터들을 전달하는 하나 이상의 신호들을 수신하는 단계; 및 (b) 상기 파라미터들로부터, 데이터 패킷 내 정보가 유실되고 상기 오류 정정 프로세스에 의해 복구되지 않을 유실 확률의 측정을 도출하는 단계로서, 상기 유실 확률의 상기 측정은 충만된 상기 버퍼에 의해 야기되는 유실들을 설명하는 프로세스에 의해 도출되며, (1) 상기 프로세스는 상기 버퍼 크기에 무관한 계산 복잡도를 가지며 상기 유실 확률은 도착 확률, 전송 확률 및 제로 내지 1의 상호

간섭 확률의 모든 값들에 대해 제로 내지 1의 값을 갖거나, 혹은, (2) 상기 프로세스는 확정적 프로세스에 따라 상기 패킷 처리 디바이스에 상기 소스 신호 내 패킷들이 도착하는 모델의 해(solution)를 나타내는 것인, 상기 단계; 및 (c) 상기 유실 확률의 측정에 의하여 상기 제1 수 혹은 상기 제2 수를 적용시키는 단계에 의해 달성된다.

[0012] 본 발명의 또 다른 면은 한 세트의 패킷들로 배열된 정보를 전달하는 소스 신호를 제공하는 제1 데이터 소스; 상기 소스 신호를 수신하며, 상기 한 세트의 패킷들 내 패킷들의 적어도 일부에 대한 정보를 버퍼 크기를 갖는 버퍼에 저장하고, 정보의 패킷들 중 적어도 일부가 상기 버퍼에 저장되었던 상기 정보의 패킷들을 포함하는 출력신호를 전송하며, 상기 한 세트의 패킷들 내 상기 패킷들의 적어도 일부에 대한 정보는 충만된 상기 버퍼에 의해 야기되는 유실들에 기인하여 상기 출력신호로부터 생략되는, 패킷 처리 디바이스; 및 상기 출력신호 내 상기 패킷들의 적어도 일부를 수신하는 수신기를 포함하는 통신 시스템에서 패킷들의 제공을 제어한다. 상기 제어는, (a) 상기 버퍼 크기, 임의의 경합 데이터 소스로부터 경합 패킷이 시간간격 동안 상기 패킷 처리 디바이스에 의해 수신될 상호간섭 확률, 및 상기 버퍼가 비어있지 않을 때 시간간격 동안 상기 패킷 처리 디바이스가 패킷을 성공적으로 전송할 전송 확률을 나타내는 파라미터들을 전달하는 하나 이상의 신호들을 수신하는 단계; (b) 복수의 도착 확률들 각각에 대한 각각의 유실 확률을 파라미터들로부터 도출하는 단계로서, 각각의 유실 확률은 데이터 패킷 내 정보가 유실되고 충만하여 있는 버퍼에 의해 야기되는 유실들을 설명하는 프로세스에 의해 도출될 확률을 나타내며, 각각의 도착 확률은 제1 데이터 소스로부터 패킷이 시간간격 동안 패킷 처리 디바이스에 의해 수신될 확률을 나타내며, (1) 상기 프로세스는 상기 버퍼 크기에 무관한 계산 복잡도를 가지며 상기 유실 확률은 도착 확률, 전송 확률 및 제로 내지 1의 상호간섭 확률의 모든 값들에 대해 제로 내지 1의 값을 갖거나, 혹은, (2) 상기 프로세스는 확정적 프로세스에 따라 상기 패킷 처리 디바이스에 상기 소스 신호 내 패킷들이 도착하는 모델의 해를 나타내는 것인, 상기 단계; (c) 복수의 유실 확률들에서 최소 유실 확률이 도출되는 상기 도착 확률을 선택하는 단계; 및 (d) 상기 선택된 도착 확률을 보다 가깝게 반영하도록 상기 패킷 처리 디바이스가 패킷들을 수신하게 상기 제1 데이터 소스의 동작을 적용시키는 단계에 의해 달성된다.

[0013] 발명 및 이의 바람직한 실시예들의 다양한 특징들은 다음의 논의 및 첨부한 도면들을 참조함으로써 더 잘 이해될 수 있다. 다음 논의 및 도면들의 내용들은 단지 예로서 개시된 것이며 본 발명의 범위에 제한을 나타내는 것으로 이해되어서는 안 된다.

실시예

[0017] A. 도입

[0018] 1. 통신 시스템

[0019] 도 1은 하나 이상의 데이터 소스들(2, 4)이 패킷들로 배열되는 정보를 전달하는 소스 신호들을 제공하는 통신 시스템의 개략도이다. 패킷들의 적어도 일부 패킷들로 전달되는 정보는 예를 들면 멀티미디어 정보일 수 있다. 데이터 소스(2)에 의해 제공되는 소스 신호는 이들 패킷들의 서빙이 본 발명의 요지이기 때문에 "주 패킷들"이라고 하는 다수 세트들의 패킷들로 배열되는 정보를 전달한다. 다수 세트들의 주 패킷들은 주 데이터 패킷들 및 주 오류-정정(EC) 패킷들을 포함한다. 세트는 세트 내 총 n 개의 주 패킷들에 대해서, 주 데이터 패킷들의 수 k와 주 EC 패킷들의 수 (n-k)를 포함한다. 데이터 소스(4)와 같은 다른 데이터 소스들은, "경합 패킷들"이 주 패킷들을 서빙하는데 필요한 자원들과 경합하기 때문에 "경합 패킷들"이라 칭하는 패킷들로 배열되는 정보를 전달하는 소스 신호들을 제공하는데, 그러나, 이들 다른 데이터 소스들로부터의 소스 신호들은 동일 유형의 정보를 전달할 필요가 없으며 경합 패킷들은 데이터 소스(2)에 대해 기술된 것과 동일한 방식으로 배열될 필요는 없다.

[0020] 데이터 소스들(2, 4) 각각으로부터의 소스 신호들은 각각 통신경로들(3, 5)을 따라 패킷 처리 디바이스(10)에 전달된다. 이들 통신 경로들(3, 5)은 예를 들면 금속 와이어들 및 광섬유들을 포함한 매우 다양한 매체들에 의해 구현될 수 있다. 패킷 처리 디바이스(10)는 데이터 소스들(2, 4) 각각으로부터 패킷들을 수신하고 패킷들의 적어도 일부에 대한 정보를 큐 혹은 버퍼에 저장한다. 패킷 처리 디바이스(10)는 통신 경로(11)를 따라 정보의 패킷들을 수신기(20)에 전송한다. 도면에 도시된 예에서, 수신기(20)는 데이터 소스들(2, 4)로부터 정보의 패킷들을 처리한다. 이것은 필요로 되는 EC 프로세스를 데이터 소스(2)로부터 수신된 정보의 주 패킷들에 적용하고 결과로 나온 정보를 통신 경로(21)을 따라 전달한다. 이것은 데이터 소스(4)로부터 정보의 경합 패킷들을 통신 경로(22)를 따라 전달한다. 통신 시스템은 요망될 때 다른 수신기들, 전송기들 및 데이터 소스들을 포함할 수 있다.

[0021] 이 통신 시스템은 서비스 질 프로세스들 혹은 추가의 EC 프로세스들과 같은 다른 기술들을 탑재할 수 있다. 서

비스 질 프로세스는 모든 패킷 유실들을 방지 혹은 감소시키는데 사용될 수 있다. 이것은 주 패킷들에 대해서, 예를 들면, 수신기(20)가 수신을 응신하지 않은 이들 주 패킷들을 데이터 소스(2) 혹은 패킷 처리 디바이스(10)에게 재전송하게 함으로써 달성될 수 있다. 위에 언급되고 이하 논의되는 EC 프로세스 외에도 하나 이상의 EC 프로세스들이 또한 사용될 수 있다. 이들 추가의 EC 프로세스들은 유형 I 유실들을 감소시키기 위해서 패킷 처리 디바이스(10) 및 수신기(20)에서 이행될 수 있다. 이들 추가의 프로세스들의 탑재는 경로 대역폭의 일부가 패킷들의 재전송에 그리고 제2 EC 프로세스의 추가의 EC 패킷들에 대해 필요로 되기 때문에 통신 경로(11)로 원 패킷들이 보내질 수 있는 레이트를 감소시킬 것이다. 결국, 유형 I 유실들의 확률은 그에 따라 증가할 것이다. 서비스 질 및 추가의 EC 프로세스들의 사용은 이하 논의되는 통신 모델들에 포함되지 않지만, 그러나 원한다면 포함될 수도 있을 것이다.

[0022] 도 1에 도시된 개략도는 통신 시스템의 실제 구현에서 바람직할 수 있으나 본 발명을 설명하는데는 필요하지 않은 다수의 성분들은 포함하지 않는다. 예를 들면, 도면은 통신 경로(11)가 비어있는지 여부, 즉 다른 패킷 처리 디바이스들이 현재 통신경로(11)를 사용하고 있는지 여부, 혹은 수신기(20)에 의한 수신을 하지 못하게 할 수도 있을 어떤 유형의 간섭이 존재하는지 여부를 확증하는데 필요할 성분들은 도시하지 않았다. 또한, 패킷 유실들 혹은 패킷들을 재전송할 필요성에 관한 어떤 정보를 수신기(20)로부터 얻는데 필요할 성분들도 도시되지 않았다.

[0023] 2. 통신 시스템 모델

[0024] 본 발명의 여러 가지 면들의 구현들은 통신 시스템의 모델들로부터 도출되는 알고리즘들을 사용하여 유형 II 유실 확률의 계산에 기초한다. 모델들은 이하 기술되는 몇가지 파라미터들의 함수로서 유형 II 주 패킷 유실의 확률을 도출한다. 이들 파라미터들 각각은 유형 II 유실들의 확률에 영향을 미치게 되는 버퍼 점유 수준에 영향을 미친다.

[0025] 통신 시스템의 모델은 EC 파라미터들 (n, k) 에 변화들이 주 데이터 패킷 레이트들에 어떻게 영향을 미치는지를 고려할 수 있고, 그럼으로써 유형 II 주 패킷 유실들을 최소화하는 적응형 EC 시스템이 설계될 수 있게 한다. 이하 기술되는 도출에서, 방법은 패킷 처리 디바이스(10)에 모든 패킷들의 도착 패턴들, 패킷 처리 디바이스(10) 내 버퍼의 크기, 및 통신 경로(11)의 사용가능성을 고려한다. 그러면 이 모델은 유형 II 주 패킷 유실들의 확률을 계산하여 EC 프로세스에 의한 오류 복구 후에 주 데이터 패킷들의 유실을 최소화하게 EC 파라미터들 (n, k) 을 적응시킬 수 있는 알고리즘을 도출하는데 사용된다.

[0026] 이하 기술되는 통신 모델은 위에 언급된 적응형 EC 프로세스 이외의 어떠한 프로세스도 유형 II 유실들을 완화시키는데 사용되지 않는 것으로 가정한다. 모델에 포함되지 않는 프로세스의 일 예는 수신기(20)가 수신을 응신하지 않은 어떤 주 패킷들을 데이터 소스(2)가 다시 보내는 서비스 질 보호 프로세스이다. 수신기(20)는 이것이 수신하는 패킷들에 대해 데이터 소스(2)에 응신들을 보낸다. 데이터 소스(2)가 어떤 기간 내에 응신을 수신하지 않는다면, 이것은 유실된 것으로 추정되는 하나 이상의 주 패킷들을 다시 보낸다. 이 프로세스는 유형 I 및 유형 II 유실들 둘 다를 완화시킨다. 1회보다 더 보내지는 주 패킷들은 패킷 처리 디바이스(10)에 주 패킷들의 도착하는 레이트를 증가시키고 이는 버퍼 점유율을 증가시키며 유형 II 유실들의 레이트를 증가시킨다는 사실을 고려함으로써 이러한 프로세스를 포함시키는 것이 가능하다. 패킷들의 다시 보내지는 빈도는 유실 확률에 따른다.

[0027] a) 기본 방법

[0028] 이하 기술되는 바와 같이, (1) 데이터 소스(2)로부터 패킷 처리 디바이스(10)에 도착하는 주 패킷들의 레이트, (2) 다른 데이터 소스들로부터 패킷 처리 디바이스(10)에 도착하는 경합 패킷들의 레이트들, (3) 주 패킷이 패킷 처리 디바이스(10)에 의해 전송되고 손상 없이 수신기(20)에 의해 수신될 확률, (4) 패킷 처리 디바이스(10) 내 버퍼 혹은 큐의 크기, 및 (5) EC 파라미터들 (n, k) 의 함수로서 버퍼 점유율을 기술하는 2개의 마코프 기반의 정상상태 모델들이 전개되고 해결된다. 이들 모델들 중 하나는 베르누이 프로세스에 준하는 확률분포의 확률적 프로세스에 따라 패킷 처리 디바이스(10)에 주 패킷들이 도착하는 시스템을 기술한다. 이외의 모델은 일정 비트 레이트(CBR) 프로세스에 준하는 확정적(deterministic) 프로세스에 따라 패킷 처리 디바이스(10)에 주 패킷들이 도착하는 시스템을 기술한다. 어떠한 EC 프로세스도 사용되지 않는다면, 이들 모델들 각각은 버퍼 점유율의 함수로서, 데이터 소스(2)에 의해 제공되는 한 세트의 주 패킷들 내 임의의 단일 데이터 패킷에 대해 유형 II 유

실의 확률을 계산하는데 사용된다. EC 프로세스가 사용된다면, EC 복구 후에 주 데이터 패킷 유실의 확률이 EC 파라미터들 (n,k) 의 함수로서 계산된다.

[0029] 두 개의 모델들에 대한 수학적 분석은 현저하게 다르다. CBR 트래픽에 대해서, 정상상태 마코프 모델을 해결하기 위해 단일 값 분해가 사용된다. (Press et al., Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing, 2nd ed., Cambridge University Press, 1992. 참조). 베르누이-분포 트래픽에 대해서, 마코프 모델에 대한 닫힌 형태(closed-form)의 해를 확증하기 위해 선형 재귀 방정식들(recurrent equation)의 이론이 적용된다. 또한, EC 복구 후에 패킷 유실 확률의 계산은 2종류들의 트래픽에 대해 다르다. 베르누이-분포 트래픽에 대해서, 데이터 패킷들 및 EC 패킷들의 통계학적으로 독립인 도착들이 가정되며, 이것은 패킷 유실 확률을 판정에 단일 조합 인수(combinatoric argument)를 적용할 수 있게 한다. CBR 트래픽에 대해서, 데이터 및 EC 패킷들의 정확한 도착 패턴을 반영하는 반복적인 수학적 절차가 전개된다. 각각의 모델에 대해서, 경합 패킷들에 대한 트래픽은 베르누이 분포인 것으로 가정된다. 이것은 데이터 소스(2) 및 수신기(20)가 경합 패킷들에 대한 실제 프로세스를 알지 못함을 내포하기 때문에 개략적 가정이다. 그러나, 데이터 소스(2)에 의해 보내지는 주 패킷들에 대한 도착 프로세스는 알고 있고 제어될 수 있기 때문에, 이 트래픽에 대한 서로 다른 프로세스들의 효과들이 조사될 수 있다.

[0030] 본 발명은 패킷 처리 디바이스(10)가 통신 경로(11)에 대한 라디오 주파수(RF) 혹은 다른 무선 기술을 사용하여 멀티미디어 패킷들을 전송하는 통신 시스템들에서 잇점이 있게 사용될 수 있지만, 그러나 본 발명은 어떤 특정의 데이터 패킷에 혹은 임의의 특정의 통신 기술로 제한되는 것은 아니다. 다음 모델들에 영향을 미치는 무선 통신 경로의 유일한 특성은 주 패킷이 성공적으로 전송 혹은 수신되지 않을 확률을 평가할 수 있게 하는 것이다. 이 확률을 제로로 혹은 어떤 임의로 작은 값으로서 감소시킴으로써 유선 혹은 광학 기술은 대신하여 모델링될 수 있다.

[0031] b) 도출 개요

[0032] 다음 절들은 일반적인 통신 모델을 기술하며, 개개의 패킷들의 유실 확률을 계산하기 위한 일반적인 알고리즘을 도출하며, 베르누이-분포 트래픽에 대한 해석적 통신 모델을 도출하고, CBR 트래픽에 대한 통신 모델을 도출하고, 각 모델에 대한 EC 복구 후에 유실 확률을 계산한다. CBR 트래픽에 대한 유실 확률을 계산하는데 사용되는 알고리즘은 계산적으로 복잡하기 때문에, 훨씬 덜 복잡한 유실 확률에 대한 근사를 계산하는 알고리즘이 도출된다.

[0033] B. 통신 시스템 모델들

[0034] 1. 개요

[0035] 이하 논의되는 2개의 통신 모델들은 도 1에 도시된 시스템과 같은 통신 시스템의 동작을 기술한다. 모델은 수신기(20) 외에도 하나 이상의 수신기들이 존재할 수 있게 한다. 이들 모델들에 따라, 패킷 처리 디바이스(10)는 데이터 소스들로부터 패킷들을 수신하고 이들을 버퍼에 저장한다. 이어서 패킷은 버퍼로부터 가져와 통신 경로(11)를 따라 전송된다. 모델들은 패킷들이 선입선출(FIFO) 순서로 저장되고 버퍼로부터 가져오는 것으로 가정한다. 패킷이 도착하였을 때 버퍼가 충분하여 있다면, 패킷은 폐기된다. 이하 기술되는 기술들은 다른 큐(queuing) 정책들을 수용할 수 있지만 수학적 분석은 더 복잡할 수 있는 모델들을 도출할 수 있다.

[0036] 이하 논의되는 모델들은 패킷 처리 디바이스(10)가 시간 슬롯들이라 하는 균일한 시간간격을 동안 패킷들을 수신 및 송신하는 이산 시간 모델들이다. 모델을 간이화하기 위해서, 모든 패킷들은 동일 고정된 크기를 갖는다.

[0037] 모델들은 임의의 주어진 시간 슬롯에 패킷 처리 디바이스(10)가 주 패킷 및 경합 패킷을 수신할 수 있고 패킷을 전송할 수 있는 것으로 가정한다. 이러한 가정은 계산들을 간단하게 하지만, 그러나, 가정은 보다 일반적인 모델들을 도출하기를 원한다면 완화될 수 있다. "베르누이-트래픽 모델"은 베르누이 확률 분포를 갖는 확률적 프로세스에 의해 기술될 수 있도록 패킷 처리 디바이스(10)에 주 패킷들이 도착하는 통신 시스템을 기술한다. 이들 패킷들 중 하나가 임의의 주어진 시간 슬롯 내에 패킷 처리 디바이스(10)에 도착할 확률은 기호 p_A , $0 \leq p_A \leq 1$ 로 나타낸다. "CBR-트래픽 모델"은 각각의 m 시간 슬롯들마다 1회의 일정한 레이트로 패킷들이 도착하는 확정적 프로세스에 의해 기술될 수 있도록 패킷 처리 디바이스(10)에 주 데이터 패킷들이 도착하는 통신 시스템을 기술한다. 용이한 논의를 위해서, 비 $1/m$ 은 도착 확률이라도 칭하고 기호 p_A 로 나타낸다. 패킷들은 고정된 량의 정

보 혹은 다수의 비트들을 전달하는 것으로 가정되기 때문에, 일정한 패킷 도착 레이트는 일정 비트 레이트(CBR)와 같고, 따라서 제2 모델은 CBR-트래픽 모델이라 칭한다.

[0038] 두 모델들은, 데이터 소스(2) 이외의 데이터 소스들에 의해 제공되는 패킷들인 모든 경합 패킷들은 베르누이 확률 분포를 갖는 확률적 프로세스에 의해 기술될 수 있도록 패킷 처리 디바이스(10)에 도착하는 것으로 가정한다. 경합 패킷이 임의의 주어진 시간 슬롯 내에 패킷 처리 디바이스(10)에 도착할 확률은 기호 p_c , $0 \leq p_c \leq 1$ 로 나타낸다. 이 가정은 경합 패킷들을 보내기 위해 다른 데이터 소스들에 의해 사용되는 프로세스들은 일반적으로 모르기 때문에 대부분의 애플리케이션들에 적합하다. 경합 패킷들의 도착을 측정 혹은 추정하는데 사용될 수 있는 임의의 기술이, 경합 패킷들의 도착 프로세스에 대한 분포를 도출하기 위해 사용될 수 있고, 이하 기술되는 기술들은 도착 프로세스를 반영하는 모델을 구성하는데 사용될 수 있다. 그러나, 도착 프로세스를 모른다면, 베르누이 분포는 개략적 가정이다. 이하 기술되는 모델들은 모든 경합 패킷들의 누적 도착 확률 p_c 만에 관계되기 때문에, 이들 모델들은 경합 트래픽에 대한 단지 하나의 데이터 소스의 존재를 가정한다. 이 하나의 소스는 복수의 데이터 소스들의 누적 효과를 나타낼 수 있다.

[0039] 또한, 두 모델들은 적어도 한 패킷이 버퍼에 저장되는 각각의 시간 슬롯동안, 패킷 처리 디바이스(10)가 버퍼로부터 패킷을 성공적으로 가져와 이를 기호 p_b , $0 \leq p_b \leq 1$ 로 나타내는 확률로 통신 경로(11)로 전송하는 것으로 가정한다. 패킷은 전달하는 정보가 수신기(20)에 의한 손상 없이 수신된다면 성공적으로 전송된 것으로 간주된다. 패킷 내 정보는 다른 디바이스들에 의한 동일 통신 경로를 따라 전송되는 다른 패킷들과의 충돌에 의해서, 혹은 잡음에 의해서 혹은 그외 상호간섭에 의해 손상될 수 있다. 바람직한 구현들에서, 손상의 위험은 통신 경로(11)가 패킷 전송을 시도하기 전에 비어있는지를 패킷 처리 디바이스(10)에서 판정하게 함으로써 감소된다.

[0040] 패킷에 의해 전달되는 정보에 대한 특정 애플리케이션에 따라, 손상된 정보는 사용가능할 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 예를 들면, 부분적으로만 손상된 비디오 프레임 내 손상된 비디오 정보는 어떤 경우들에 있어선 손상되지 않은 비디오 정보에 기초한 예측에 의해 대체될 수 있다. (Wah et al., "A Survey of Error-Concealment Schemes for Real-Time Multimedia and Video Transmissions over the Internet," IEEE Int. Symposium on Multimedia Software Eng. 2000, Taipei, Taiwan. 참조). 이 예와는 반대로, 고도로 압축된 오디오 정보를 전달하는 손상된 패킷 내 정보를 복구 혹은 대체하는 것이 가능하지 않을 수도 있다. 이하 기술되는 모델들은 부분적으로 손상된 패킷들이 임의의 유용한 정보를 내포하지 않고 패킷이 수신기(20)에 손상 없이 전송될 확률 p_b 를 사용하는 것으로 가정한다. 원한다면, 손상된 패킷들이 적어도 부분적으로 복구될 수 있는 확률은 패킷이 수신기(20)에 의해 부분적으로 손상되어 수신될 추가의 확률을 정의함으로써 모델에 통합될 수 있다. 적합한 확률 p_b 는 통신 경로(11)의 길버트 모델을 사용하여 이 추가의 확률로부터 도출될 수 있다. (Bolot et al., "Adaptive FEC-based error control for Internet telephony," IEEE Infocom 2003, San Francisco. 참조).

[0041] 복수의 경합 데이터 소스들을 갖는 시스템들에서, 평균하여 하나보다 더 많은 경합 패킷이 시간 슬롯 내 도착할 수 있는 것이 가능하고, 이것은 $p_c > 1$ 관계로 표현될 수 있다. 계산들을 간이화하기 위해서, 다음 모델들은 $0 \leq p_c, p_A, p_D \leq 1$ 로 가정한다. 이 가정은 $p_c, p_A, p_D \leq 1$ 이 되도록 각 시간 슬롯의 길이를 감소시킴으로써 충족될 수 있다.

[0042] 모델들 및 이에 이은 이하 기술되는 도출들은 패킷 유실들을 고찰하나 지연 및 지연 지터는 고려하지 않는다. 또한, 모델들은 데이터 소스들에서 수신기들로부터 흐르는 패킷 트래픽을 고찰하며 수신기들로부터 데이터 소스들로 흐르는 신호들을 고찰하지 않는다.

[0043] 2. 버퍼 동작의 분석

[0044] 이하 기술되는 모델들은 패킷 처리 디바이스(10)가 길이 L의 큐 혹은 버퍼를 갖는 것으로, 그리고 각 시간 슬롯에서 디바이스가 데이터 소스(2)로부터 수신된 임의의 주 패킷과 다른 데이터 소스들로부터 수신된 임의의 경합 패킷을 이 버퍼에 저장하려 하는 것으로 가정한다. 이들 모델들에 따라서, 버퍼에 패킷들을 저장하기 위해 디바이스에 의해 수행되는 동작들은 다음과 같이 기술될 수 있다.

[0045] 1. 임의의 주어진 시간 슬롯에서, 디바이스는 p_A 확률을 가지고 데이터 소스(2)로부터 주 패킷을 수신하고 확률 p_c 로 또 다른 소스로부터 경합 패킷을 수신한다. 주 패킷 및 경합 패킷 둘 다 동일 시간 슬롯에서 수신된다면,

어느 한 패킷은 동일 확률로 다른 패킷 전에 도착할 수도 있는 것으로 가정된다. 즉, 경합 패킷은 0.5의 확률로 주 패킷 전에 도착하는 것으로 가정된다.

[0046] 2. 주어진 시간 슬롯 내에 도착할 수 있는 주 및 경합 패킷들의 총 수 j 는 집합 $\{0,1,2\}$ 내 임의의 수일 수 있다. 도착하는 패킷들은 버퍼에 저장될 수도 있고 혹은 다음 규칙들에 따라 폐기될 수도 있다.

[0047] a) 이들 패킷들의 도착 바로 전에 버퍼 점유율의 수준이 $L-j$ 이하이면, 모든 도착하는 패킷들은 버퍼에 저장된다.

[0048] b) $j=2$ 이고 버퍼 점유율의 수준이 $L-1$ 이면, 두 개의 도착하는 패킷들 중 먼저 것이 버퍼에 저장되고 나중에 도착하는 패킷은 폐기된다.

[0049] c) 그렇지 않다면, 모든 도착하는 패킷들은 폐기된다.

[0050] 3. 임의의 주어진 시간 슬롯에서, 확률 p_0 로 패킷 처리 디바이스(10)는 버퍼로부터 패킷을 가져와서 패킷이 전달하는 정보가 손상 없이 수신되도록 이를 통신 경로(11)를 따라 전송한다. 패킷들은 FIFO 순서로 버퍼에 저장되고 버퍼로부터 가져오게 된다. 버퍼가 비어있다면, 어떠한 패킷도 가져오지 않고 전송되지 않는다. 버퍼 점유율의 수준은 패킷이 가져와 전송된다면 1만큼 감소된다.

[0051] 이하 기술되는 모델들은 버퍼의 통계적 점유율을 기술하는 정상상태 벡터를 포함한다. 이 벡터는 다음과 같이 표현된다.

[0052]
$$P=(P_N) \quad 0 \leq N \leq L \text{에 대해서} \quad (1)$$

[0053] 여기서 P_N =시간 슬롯의 끝에서 버퍼가 N 패킷들을 저장할 확률이고,

[0054] L = 버퍼의 크기 혹은 길이이다.

[0055] 이 정상상태 벡터는 파라미터들 p_A , p_C , p_D 및 L 의 함수로서 표현될 수 있다. 이 함수에 대한 표현들은 이하 도출된다.

[0056] C. 패킷 유실 확률

[0057] 1. 도입

[0058] 데이터 소스(2)로부터 주 패킷은, 주 패킷이 디바이스에 도착할 때 시간 슬롯 동안, (1) 버퍼 점유율이 L 이거나 (2) 버퍼 점유율이 $L-1$ 이고 경합 패킷이 주 패킷 전에 도착한, 이들 상태들 중 어느 하나가 존재한다면 패킷 처리 디바이스(10)에 의해 폐기된다. 도착하는 주 데이터 패킷이 주어진 시간 슬롯에서 폐기될 확률 P_{loss} 는 다음 식으로서 표현될 수 있다.

$$P_{loss} = \frac{1}{2} P_{L-1} p_C + P_L \quad (2)$$

[0059] $1/2$ 인자는 주 패킷 및 경합 패킷이 동일 시간 슬롯에 도착할 때, 경합 패킷이 주 패킷 전에 도착할 확률이 0.5와 같다는 가정을 반영한다.

[0061] 정상 상태 벡터 P 는 엔트리들이 P 의 서로 다른 상태들간의 천이의 확률을 나타내는 천이 행렬로부터 계산될 수 있다. 천이 행렬의 일반화된 파라미터 표현이 먼저 전개된다. 이 일반화된 표현은 파라미터들에 대해 적합한 선택들을 행함으로써 베르누이-트래픽 및 CBR-트래픽 모델들에 적용될 수 있다.

[0062] 2. 천이 행렬

[0063] 천이 행렬은 기호 T 로 표기되고 표기 $T_{a,b}$ 는 연속한 시간 슬롯들 사이에서 버퍼 점유율의 수준이 a 에서 b 로 변할 확률을 나타내는데 사용되며, 여기서 $0 \leq a, b \leq L$ 이다. 버퍼 점유율의 수준은 임의의 전송된 패킷이 버퍼로부터 제거된 후에 각 시간 슬롯의 끝에서 측정된다. 표기 $((T_{a,b})^u)$ 는 u 시간 슬롯들에 걸쳐 버퍼 점유율의 수준이 a 에

서 b로 변할 확률을 나타내는데 사용되며, 여기서 $u \geq 1$ 이고; 따라서 $T_{a,b} = (T_{a,b})^1$ 이다.

[0064] 천이 행렬의 원소들은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$T_{a,b} = \left. \begin{array}{ll} q_A q_C + q_A p_C p_D + p_A q_c p_D & \text{for } a=0, b=0 \\ p_A p_C q_D & \text{for } a=k-2, b=k, 2 \leq k \leq L \\ p_A p_C p_D + p_A q_c q_D + q_A p_C q_D & \text{for } a=k-1, b=k, 1 \leq k \leq L-1 \\ q_A q_C q_D + q_A p_C p_D + p_A q_c p_D & \text{for } a=k, b=k, 1 \leq k \leq L-2 \\ q_A q_C p_D & \text{for } a=k+1, b=k, 0 \leq k \leq L-1 \\ q_A q_C q_D + q_A p_C p_D + p_A q_c p_D + p_A p_C p_D & \text{for } a=L-1, b=L-1 \\ p_A q_C q_D + q_A p_C q_D + p_A p_C q_D & \text{for } a=L-1, b=L \\ p_D & \text{for } a=L, b=L-1 \\ q_D & \text{for } a=L, b=L \\ 0 & \text{for all other } a \text{ and } b \end{array} \right\} \quad (3)$$

[0065] 여기서 q_A = 어떠한 주 패킷도 시간 슬롯 내에 도착하지 않을 확률, 혹은 $q_A = 1 - p_A$;

[0067] q_C = 어떠한 경합 패킷도 시간 슬롯 내에 도착하지 않을 확률, 혹은 $q_C = 1 - p_C$;

[0068] q_D = 데이터 패킷이 시간 슬롯 내에 성공적으로 전송되지 않을 확률, 혹은 $q_D = 1 - P_D$.

[0069] 데이터 패킷은 시도된 전송이 실패하는 이들 시간 슬롯들 내에 성공적으로 전송되지 않으며, 어떠한 전송도 시도되지 않으며, 패킷은 서비스 질 보호 프로세스의 일부로서 재전송된다.

[0070] 예를 들면, 원소 $T_{0,0}$ 는, 버퍼가 한 시간 슬롯의 끝에서 비어있을 때, 버퍼는 다음 시간 슬롯의 끝에서도 비어있을 확률을 나타낸다. 이 상황은 확률들이 식(3)에 나타낸 바와 같이 $T_{0,0}$ 에 대한 3개의 항들 각각에 의해 표현되는 3개의 가능한 상황들 중 어느 것의 결과로서 일어날 수 있다. 제1 항 $q_A q_C$ 는 다음 시간 슬롯 내에 어떠한 주 패킷 및 어떠한 경합 패킷도 도착하지 않을 확률을 나타낸다. 제2 항 $q_A p_C p_D$ 는 어떠한 주 패킷도 도착하지 않으며 경합 패킷은 도착하여 버퍼에 저장되며 패킷이 버퍼로부터 제거되어 전송될 확률을 나타낸다. 제3 항 $p_A q_C p_D$ 는 주 패킷이 도착하여 버퍼에 저장되고 어떠한 경합 패킷도 도착하지 않으며 패킷이 버퍼로부터 제거되어 전송될 확률을 나타낸다.

[0071] D. 베르누이-트래픽 모델에 대한 유형 II 패킷 유실의 확률

[0072] EC 보호가 없이 베르누이 분포 트래픽에 대한 유형 II 패킷 유실의 확률을 계산하기 위한 모델이 먼저 전개된다. 그에 이어 이 모델은 EC 보호가 되면서 베르누이 분포 트래픽에 대한 패킷 유실의 확률을 계산하게 수정된다.

[0073] 1. EC 보호없는 베르누이 분포 트래픽에 대한 정상상태 모델

[0074] 베르누이-트래픽 모델을 전개하는 제1 단계는 EC 보호 없는 베르누이 분포 트래픽에 대해 정상상태 벡터 P에 대한 계산을 도출하는 것이다. 마코프 모델들의 많은 애플리케이션들에서, 정상상태 벡터 P에 대한 분명한 식을 도출하는 것은 가능하지 않으나 이 벡터는 행렬 분해의 특이값 분해의 결과로서 표현될 수 있다. 불행하게도, 이 방법은 닫힌 형태가 아닌 해를 가져오며 계산적으로 매우 복잡하기 때문에 주목되지 않는다. 대신에, P에 대한 닫힌 형태 표현을 확증하기 위해 선형 재귀 방정식들의 이론이 사용된다. 이것은 정리 2에서 간단하게 될 정리 1에서 P에 대해 먼저 다소 복잡하고 계산적으로 비용이 드는 식을 도출함으로써 행해진다.

[0075] 정리 1은 이하 보인 바와 같이 증명된다.

[0076]

정리 1

$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^{L-1} \frac{W^j}{Y^j} B_j + \frac{Z}{P_D}} \quad (4)$$

$$P_j = P_0 \frac{W^j}{Y^j} B_j, \quad L-1 \geq j \geq 1 \quad (5)$$

$$P_L = \frac{P_0}{P_D} Z \quad (6)$$

[0077]

[0078]

여기서,

$$B_j = \sum_{l=0}^{\frac{j}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j-l}{l}, \quad 1 \leq j \leq L-1 \quad (7)$$

$$W = P_A P_C + q_A P_C q_D + P_A q_C q_D \quad (8)$$

$$X = P_A P_C q_D \quad (9)$$

$$Y = q_A q_C P_D \quad (10)$$

$$Z = (1 + Y - P_D - q_A q_C q_D) \frac{W^{L-1}}{Y^{L-1}} B_{L-1} - (W - X) \frac{W^{L-1}}{Y^{L-2}} B_{L-2} - X \frac{W^{L-3}}{Y^{L-3}} B_{L-3} \quad (11)$$

[0079]

[0080]

정리 1은 귀납에 의해 증명된다. 식(3)에 주어진 천이 행렬의 정의로부터, 다음 관계들이 도출될 수 있다.

[0081]

$$P_0 = P_0 (q_A q_C + q_A P_C P_D + P_A q_C P_D) + P_1 q_A q_C P_D \quad (12)$$

$$P_1 = P_1 (q_A q_C q_D + q_A P_C P_D + P_A q_C P_D) + P_0 (P_A P_C P_D + P_A q_C q_D + q_A P_C q_D) + P_2 q_A q_C P_D \quad (13)$$

$$P_j = P_j (q_A q_C q_D + q_A P_C P_D + P_A q_C P_D) + P_{j-1} (P_A P_C P_D + P_A q_C q_D + q_A P_C q_D) + P_{j+1} q_A q_C P_D + P_{j-2} P_A P_C q_D, \quad 2 \leq j \leq L-2 \quad (14)$$

$$P_{L-1} = P_{L-1} (q_A q_C q_D + q_A P_C P_D + P_A q_C P_D + P_A P_C P_D) + P_L P_D + P_{L-2} (P_A P_C P_D + P_A q_C q_D + q_A P_C q_D) + P_{L-3} P_A P_C q_D \quad (15)$$

$$P_L = P_L q_D + P_{L-1} (P_A q_C q_D + q_A P_C q_D + P_A P_C q_D) + P_{L-2} P_A P_C q_D \quad (16)$$

[0082]

[0083]

식(7) 내지 식(11)에 주어진 정의들을 사용하여, 식(12) 내지 식(15)에 주어진 관계들은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_1 Y = P_0 W \quad (17)$$

$$P_2 Y = P_1 (W + Y) - P_0 (W - X) \quad (18)$$

$$P_{j+3} Y = P_{j+2} (W + Y) - P_{j+1} (W - X) - P_j X, \quad 0 \leq j \leq L-4 \quad (19)$$

[0084]

$$P_L P_D = P_{L-1} (1 + Y - P_D - q_A q_C q_D) - P_{L-2} (W - X) - P_{L-3} X \quad (20)$$

[0085]

식(17), 식(18) 및 식(19)에 주어진 관계들은 $j=1, 2, 3$ 에 대해 식(5)에 주어진 관계를 내포한다. 식(19)에서 관계는 식(5)이 $j, j+1$ 및 $j+2$ 에 대해 성립한다면 $4 \leq j+3 \leq L-1$ 에 대해서도 성립함을 보이는데 사용될 수 있다. 식(19)에 관계를 다시 쓰기 위해 식(5)에 주어진 정의를 사용하면, 정리 1이 다음을 증명함으로써 증명될 수 있음

을 보일 수 있다.

[0086]

$$Y \frac{W^{j+3}}{Y^{j+3}} B_{j+3} = (W+Y) \frac{W^{j+2}}{Y^{j+2}} B_{j+2} - (W-X) \frac{W^{j+1}}{Y^{j+1}} B_{j+1} - X \frac{W^j}{Y^j} B_j \quad (21)$$

[0087]

이것은 다음과 같다.

[0088]

$$W^3 B_{j+3} = W^3 B_{j+2} + W^2 Y B_{j+2} - W^2 Y B_{j+1} + W X Y B_{j+1} - X Y^2 B_j \quad (22)$$

[0089]

이것은 다음처럼 재배열될 수 있다.

[0090]

$$W^3 B_{j+3} - W^3 B_{j+2} - W X Y B_{j+1} = W^2 Y B_{j+2} - W^2 Y B_{j+1} - X Y^2 B_j \quad (23)$$

[0091]

다음과 같음을 알 수 있다.

[0092]

$$\binom{i+1}{j} = \binom{i}{j} + \binom{i}{j-1} \quad (24)$$

$$\binom{i}{0} = 0 \quad (25)$$

[0093]

여기서 $\binom{i}{j}$ 은 j 순서없는 출력들이 i 가능성들에서 선택될 수 있는 방법들의 수와 같은 2항식 계수를 나타낸다. 식(7)의 표현들을 사용하여, 식(23)의 좌변에 항들은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

[0094]

$$W^3 B_{j+3} = W^3 \sum_{l=0}^{\frac{j+3}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j+3-l}{l} \quad (26)$$

[0095]

$$W^3 B_{j+2} = W^3 \sum_{l=0}^{\frac{j+2}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j+2-l}{l} \quad (27)$$

$$W X Y B_{j+1} = W X Y \sum_{l=0}^{\frac{j+1}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j+1-l}{l} = W^3 \sum_{l=1}^{\frac{j+3}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j+1-(l-1)}{l-1} \quad (28)$$

식(24) 및 식(25)에 관계들을 적용하고, 이들 항들을 결합하여 간단히 함으로써, 식(23)의 좌변은 다음과 같이 제로와 같음을 보일 수 있다.

[0096]

$$\begin{aligned} W^3 B_{j+3} - W^3 B_{j+2} - W X Y B_{j+1} = & \\ A^3 \sum_{l=1}^{\frac{j+2}{2}} \left(\frac{BC}{A^2} \right)^l & \left[\binom{j+3-l}{l} - \binom{j+2-l}{l} - \binom{j+2-l}{l-1} \right] + \\ A^3 \left(\binom{j+3}{0} - \binom{j+2}{0} \right) & + A^3 \sum_{l > \frac{j+2}{2}}^{\frac{j+3}{2}} \left(\frac{BC}{A^2} \right)^{l-1} \left[\binom{j+3-l}{l} - \binom{j+1-(l-1)}{l-1} \right] = 0 \quad (29) \end{aligned}$$

[0097] 식(23)의 우변에 항들은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$W^2 Y B_{j+2} = W^2 Y \sum_{l=0}^{\frac{j+2}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j+2-l}{l} \quad (30)$$

$$W^2 Y B_{j+1} = W^2 Y \sum_{l=0}^{\frac{j+1}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j+1-l}{l} \quad (31)$$

$$XY^2 B_j = W^2 Y \sum_{l=1}^{\frac{j+2}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j-(l-1)}{l-1} \quad (32)$$

[0098]

[0099] 식(24) 및 식(25)에 관계들을 적용하고, 이들 항들을 결합하고 간단히 함으로써, 식(23)의 우변은 다음과 같이 제로와 같음을 보일 수 있다.

$$\begin{aligned} W^2 Y B_{j+2} - W^2 Y B_{j+1} - XY^2 B_j = & \\ W^2 Y \sum_{l=1}^{\frac{j+1}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \left[\binom{j+2-l}{l} - \binom{j+1-l}{l} - \binom{j+1-l}{l-1} \right] - & \\ W^2 Y \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \left[\binom{j+2}{0} - \binom{j+1}{0} \right] - & \\ W^2 Y \sum_{l > \frac{j+1}{2}}^{\frac{j+2}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \left[\binom{j+2-l}{l} - \binom{j+1-l}{l-1} \right] = 0 & \end{aligned} \quad (33)$$

[0100]

[0101] 식(23), 식(29), 식(33)으로부터 식(5)은 $j+3$ 에 대해 성립하게 된다. $j=L$ 에 대해서, 식(5) 및 식(20)으로부터

$$\sum_{j=0}^L P_j = 1$$

식(6)이 된다. 식(5) 및 식(6), 및 이라는 사실로부터 식(4)이 된다.

[0102]

정리 1에서 B_j 에 대해 도출된 식들은 $B_0=1$ 을 정의함으로써 식(7)에 나타낸 바와 같이 B_j 의 정의를 확장함으로써 간단히 될 수 있다. 이것은 다음과 같이 보임으로써 행해진다.

[0103]

보조정리 1

$$B_{j+1} = B_j + \left(\frac{XY}{W^2} \right) B_{j-1}, \quad j \geq 1 \quad (34)$$

[0104]

[0105] 식(34)에 관계는 다음과 등가이다.

$$\begin{aligned} \binom{j+1}{0} + \sum_{l=1}^{\frac{j}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j+1-l}{l} + \sum_{l > \frac{j}{2}}^{\frac{j+1}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j+1-l}{l} = & \\ \binom{j}{0} + \sum_{l=1}^{\frac{j}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j-l}{l} + \sum_{l=1}^{\frac{j}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j-l}{l-1} + \sum_{l > \frac{j}{2}}^{\frac{j+1}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j-l}{l-1} & \end{aligned} \quad (35)$$

[0106]

[0107] 식(25)로부터, 식(35)의 좌변에 제1 항과 식의 우변의 제1 항은 둘 다 1과 같음을 보일 수 있다. 식(24)로부터, 식(35)의 좌변의 제2 항은 식(36)에 보인 바와 같이 식의 우변의 제2 항과 제3 항의 합과 같음을 알 수 있다.

$$\sum_{l=1}^{\frac{j}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j+1-l}{l} = \sum_{l=1}^{\frac{j}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j-l}{l} + \sum_{l=1}^{\frac{j}{2}} \left(\frac{XY}{W^2} \right)^l \binom{j-l}{l-1} \quad (36)$$

[0108]

[0109]

조사로부터, $l=1$ 에서 $\frac{j}{2}$ 까지의 합이 범위 내에 있지 않다면 식(35)의 좌변의 제3 항과 식(35)의 우변의 제4 항은 합이 항들은 둘 다 제로이고 합이 항들이 합이 범위 내에 있다면 둘 다 1과 같음을 알 수 있다. 이것은 보조정리 1을 확증하며, 이것은 항들 B_j 가 일반화된 피보나치 수들로서 표현될 수 있음을 나타낸다.

[0110]

보조정리 2

[0111]

급수는 다음과 같이 이제 정의된다.

[0112]

$$x_0=x_1=1 \text{ and } x_i = K_A x_{i-1} + K_B x_{i-2} \text{ for } i \geq 2 \quad (37)$$

[0113]

여기서 K_A 및 K_B 는 양의 실수들이다.

[0114]

α 및 β 가 식 $x^2=K_A x + K_B$ 의 근들로서 정의되거나, 혹은

$$\alpha = \frac{K_A + \sqrt{K_A^2 + 4K_B}}{2}$$

$$\beta = \frac{K_A - \sqrt{K_A^2 + 4K_B}}{2}$$

[0115]

[0116]

이고 서로 같지 않게 제약된다면, 선형 재귀 방정식들의 이론으로부터 다음과 같음이 알려져 있다.

[0117]

$$x_i = \frac{1}{\sqrt{K_A^2 + 4K_B}} \left[(1-\beta)\alpha^i + (\alpha-1)\beta^i \right] \quad (38)$$

[0118]

식(37) 및 식(38)의 조사에 의해서, 식(38)은 $i=0,1$ 에 대해 성립함을 알 수 있고, 귀납법에 의해서 식(38)은 $i \geq 2$ 에 대해서 성립함을 알 수 있다. 식(37)에 나타난 관계를 식(34)에서 B_j 에 대한 식에 적용함으로써, K_A 및 K_B 는 다음의 값들을 가짐을 알 수 있다.

[0119]

$$K_A = 1$$

$$K_B = \frac{XY}{W^2}$$

[0120]

이것은 다음과 같다.

[0121]

$$\alpha = \frac{1+K_C}{2}$$

$$\beta = \frac{1-K_C}{2}$$

[0122]

여기서

$$K_C = \sqrt{1+4\frac{XY}{W^2}} \quad (39)$$

이다.

[0123]

이것은 $\beta=1-\alpha$ 임을 내포한다. 식(38)에서 β 를 대입하기 위해 이 관계를 사용함으로써, 식(7)에 나타난 B_j 에 대한 식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$B_j^* = \frac{1}{K_C} \left[\left(\frac{1+K_C}{2} \right)^{j+1} - \left(\frac{1-K_C}{2} \right)^{j+1} \right] = \frac{1}{K_C} \frac{(1+K_C)^{j+1} - (1-K_C)^{j+1}}{2^{j+1}} \quad (40)$$

[0124]

[0125]

이것은 식(7)에 표현보다 계산적으로 덜 복잡하다.

[0126]

B_j 및 K_C 에 대해 대입으로서 식(39) 및 식(40)에 관계들을 사용하면 식(4)에 항은 다음과 같이 다시 쓸 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{L-1} \frac{W^j}{Y^j} B_j^* &= \\ \frac{W}{YK_C} \left[\left(\frac{1+K_C}{2} \right)^2 \cdot \sum_{j=0}^{L-2} \frac{(W(1+K_C))^j}{(2Y)^j} - \left(\frac{1-K_C}{2} \right)^2 \cdot \sum_{j=0}^{L-2} \frac{(W(1-K_C))^j}{(2Y)^j} \right] &= \\ \frac{W}{YK_C} \left[\left(\frac{1+K_C}{2} \right)^2 \left(\frac{(W(1+K_C))^{L-1}}{(2Y)^{L-1}} - 1 \right) \frac{1}{\frac{W(1+K_C)}{2Y} - 1} - \left(\frac{1-K_C}{2} \right)^2 \left(\frac{(W(1-K_C))^{L-1}}{(2Y)^{L-1}} - 1 \right) \frac{1}{\frac{W(1-K_C)}{2Y} - 1} \right] & \quad (41) \end{aligned}$$

[0127]

[0128]

정리 1에서 도출된 알고리즘들보다 계산적으로 덜 복잡한 정상상태 벡터 P 를 계산하기 위한 알고리즘들은 식 (4), 식(5) 및 식(6)을 다음과 같이 다시 씌으로써 얻어질 수 있다.

$$P_0 = \frac{1}{1+K_D + \frac{Z^*}{p_D}} \quad (42)$$

$$P_j = P_0 \frac{W^j}{Y^j} B_j^*, \quad T-1 \geq j \geq 1 \quad (43)$$

$$P_T = \frac{P_0}{p_D} Z^* \quad (44)$$

[0129]

[0130]

여기서

$$K_D = \frac{W}{YK_C} \left[\left(\frac{1+K_C}{2} \right)^2 \frac{(W(1+K_C))^{L-1}}{(2Y)^{L-1}} - 1 \right] \frac{1}{\frac{W(1+K_C)}{2Y} - 1} - \left(\frac{1-K_C}{2} \right)^2 \frac{(W(1-K_C))^{L-1}}{(2Y)^{L-1}} - 1 \right] \frac{1}{\frac{W(1-K_C)}{2Y} - 1}$$

$$B_j^* = \frac{(1+K_C)^{j+1} - (1-K_C)^{j+1}}{2^{j+1} K_C}, \quad 1 \leq j \leq L-1$$

$$W = p_A p_C + q_A p_C q_D + p_A q_C q_D$$

$$X = p_A p_C q_D$$

$$Y = q_A q_C p_D$$

$$Z^* = (1+Y - p_D - q_A q_C q_D) \frac{W^{L-1}}{Y^{L-1}} B_{L-1}^* - (W-X) \frac{W^{L-1}}{Y^{L-2}} B_{L-2}^* - X \frac{W^{L-3}}{Y^{L-3}} B_{L-3}^*$$

[0131]

[0132] 이다.

[0133] 2. 베르누이-트래픽 모델을 위한 패킷 유실 확률

[0134] EC 보호가 사용되지 않을 때, 임의의 한 주 패킷을 유실할 확률은 식(2) 및 식(42) 내지 식(44)을 사용하여 계산될 수 있다. EC 보호가 베르누이 분포 트래픽에 대해 사용될 때, 데이터 패킷을 유실할 확률은 EC 패킷을 유실할 확률과는 독립적이라고 가정될 수 있다. 추가의 EC 패킷들을 ϕ 배만큼 주 패킷들의 도착 레이트를 증가시킨다. 결국, 도착 확률은 동일 율만큼 증가되고, 이것은 다음 식으로서 표현될 수 있다.

$$P_A \rightarrow \phi \cdot P_A = \frac{n}{k} P_A \quad (45)$$

[0136] EC 보호가 사용될 때, i 데이터 패킷들이 유실되고 적어도 $s=(n-k-i+1)$, EC 패킷들이 유실되고, 여기서 $i>0$, $s>0$ 이라면 주 데이터 패킷이 유실되고 복구되지 않을 것이다. EC 복구 없이 데이터 패킷을 유실할 확률은 식(46)에서 i 주 데이터 패킷들을 수신할 확률에 적어도 s 주 EC 패킷들을 수신할 확률을 곱함으로써 계산될 수 있다.

$$P_i(k, n) = \binom{k}{i} (P_{loss})^i (1 - P_{loss})^{k-i} \sum_{m=s}^{n-k} \binom{n-k}{m} (P_{loss})^m (1 - P_{loss})^{n-k-m} \quad (46)$$

[0137] 여기서 $p_i(k, n) = i$ 데이터 패킷들 및 적어도 s EC 패킷들을 유실할 확률; 및

[0139] $s = \max(0, n-k-i+1)$ 이다.

[0140] 식(46)에 나타난 확률 P_{loss} 는 식(45)에 나타난 P_A 에 대한 수정된 값을 사용하여 식(2)에 나타난 바와 같이 계산된다. P_{loss} 는 이제 주 데이터 패킷 혹은 주 EC 패킷이 폐기될 확률을 나타낸다.

[0141] EC 복구없이 주 데이터 패킷을 유실할 확률 E_{loss} 는 다음과 같다.

$$E_{loss} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k i \cdot p_i(k, n) \quad (47)$$

[0143] EC 복구 후에 주 데이터 패킷을 복구할 확률 E_{rec} 은 다음과 같다.

$$E_{rec} = 1 - E_{loss} \quad (48)$$

[0145] E. CBR-트래픽 모델에 대한 유형 II 패킷 유실의 확률

[0146] 1. EC를 갖춘 CBR-트래픽 모델에 대한 전송 방법

[0147] 위에 보인 정상상태 벡터 P 를 계산하기 위한 알고리즘은 통신 시스템의 베르누이-트래픽 모델을 위해 도출되었다. 다음 절들은 통신 시스템의 CBR-트래픽 모델을 위한 벡터 P 를 계산하기 위한 알고리즘을 도출한다. 이 모델에서, 시간 슬롯들은 1부터 무한대로 번호가 매겨지고 주 데이터 패킷들은 시간 슬롯들 $t=m, 2m, \dots$, 여기서 $m>1$, 에서 패킷 처리 디바이스에 도착한다. $m-1$ 중간 시간 슬롯들 동안엔 어떠한 주 데이터 패킷들도 도착하지 않는다. 일련의 k 주 데이터 패킷들은 일련의 $(n-k)$ 주 EC 패킷들과 결합되어 한 세트의 n 주 패킷들을 형성한다. $m=4$, $k=3$ 및 $n=5$ 인 한 세트의 패킷들의 예가 도 2에 도시되었다. D1으로 표기된 제1 세트 내 k 주 데이터 패킷들은 $k \cdot m$ 시간 슬롯들의 범위의 간격에 걸쳐 m 시간 슬롯들의 각 간격에 한번 패킷 처리 디바이스(10)에 도착한다. D2로 표기된 다음 세트 내 주 데이터 패킷들은 $k \cdot m$ 시간 슬롯들 범위의 다음 간격 동안 동일한 방식으로 도착한다. EC1으로 표기된 제1 세트에 대한 $(n-k)$ EC 패킷들은, 다음 한 세트의 주 패킷들의 데이터 패킷들 사이의 자유 시간 슬롯들에서 도착한다. 이 방법의 가능성을 보증하기 위해서, EC 파라미터들 (n, k) 에 대한 값들은, 다음 식으로 표현될 수 있는 것으로서 EC 패킷들의 수 $(n-k)$ 가 다음 k 데이터 패킷들에 대한 자유 시간 슬롯들의 수를 초과하지 않도록 제약된다.

$$n-k \leq k \cdot (m-1) \tag{49}$$

[0148]

[0149] 이 도착 방법은 다음 식에 의해 공식적으로 기술될 수도 있다.

$$e_i = \left\{ \begin{array}{l} m, \quad 2 \leq i \leq k \\ 1, \quad i = k+1 \\ 1, \quad k+2 \leq i \leq n, \quad t_i \neq 1(\text{mod } m) \\ 2, \quad k+2 \leq i \leq n, \quad t_i = 1(\text{mod } m) \end{array} \right\} \tag{50}$$

[0150]

[0151] 여기서 $e_i = t_i - t_{i-1}$, $2 \leq i \leq n$ 에 대해서; 및

[0152] $t_i =$ 패킷 처리 디바이스(10)에 한 세트의 주 패킷들에 i 번째 패킷이 도착하는 시간 슬롯이다.

[0153] 식(50)에서 첫 번째 줄은 제1 주 데이터 패킷을 제외하고 한 세트의 주 패킷들의 모든 데이터 패킷들에 속한다. 제2 라인은 세트 내 마지막 데이터 패킷에 바로 이어지는, 세트 내 제1 주 EC 패킷에 속한다. 제3 라인은 다음 한 세트의 패킷들 내 데이터 패킷에 바로 이어지지 않는 주 EC 패킷들에 속하고, 마지막 라인은 다음 한 세트의 패킷들 내 데이터 패킷에 바로 이어지는 이들 주 EC 패킷들에 속한다.

[0154] 이하 도출되는 CBR-트래픽 모델은 패킷 처리 디바이스(10)가 항상 주 데이터 패킷인, 한 세트의 주 패킷들에서 제1 패킷을 폐기하는 것으로 가정한다. 이 패킷은 이것이 폐기되는 확률이 임의의 이전 주 패킷이 폐기되는 확률과는 독립적이 되도록 폐기된다. 한 세트의 주 패킷들 내 모든 후속 패킷들에 대해서, 주 패킷이 폐기되는 확률은, 이전 주 패킷의 유실 확률과, 이전 주 패킷이 처리 디바이스(10)에 도착하였을 때 버퍼의 점유율 수준을 사용하여 반복에 의해 계산된다. 이 반복적 방법은 주 패킷이 폐기될 때는 언제나 버퍼 점유율의 수준이 적어도 $L-1$ 인 사실을 나타내는, 식(2)에 나타난 표현과 일관된다. 선행 주 패킷이 도착하였을 때 점유율 수준이 적어도 $L-1$ 이었던 상태는, 선행 패킷이 폐기되지 않았고 버퍼 점유율이 제로와 $L-1$ 사이의 보다 낮은 레벨에 있었던 상태에 비해, 다음 주 패킷이 도착할 때 점유율 수준이 적어도 $L-1$ 이 될 확률을 증가시킨다. 결국, 패킷 처리 디바이스(10)가 선행 주 패킷을 폐기하였는지 여부는 버퍼 점유율 수준에 관한 어떤 정보를 제공하며, 그러면 이것은 다음 주 패킷이 폐기될 확률에 관한 어떤 정보를 제공한다.

[0155] 2. CBR-트래픽 모델에 대한 천이 행렬

[0156] 베르누이-트래픽 모델에 대해 위에 기술된 천이 행렬은 여기에서는 CBR-트래픽 모델에 적용된다. 베르누이-분포 트래픽에 있어서, 도착 프로세스는 프로세스가 도착 확률 p_A 에만 의존하기 때문에 모든 시간 슬롯들에 대해 통계적으로 동일하다. 결국, 위에 논의된 천이 T 행렬은 임의의 2개의 연속한 시간 슬롯들의 확률들간의 천이를 잘 기술할 수 있다. CBR 트래픽에 대해서, 평균 혹은 복합 도착 확률은 $p_A = 1/m$ 이지만, CBR 트래픽에 대한 도착 프로세스는 확정적이고 각 시간 슬롯은 두 부류들 중 한 부류에 들 수 있다. 시간 슬롯들 $i=1(\text{mod } m)$ 에 있어서, 주 패킷들이 도착하고 이들 시간 슬롯들에 대한 천이 행렬 F는 p_A 에 대해 1값을 대입하고 q_A 에 대해 제로 값을 대입함으로써 식(3)으로부터 얻어질 수 있다. 시간 슬롯들 $i \neq 1(\text{mod } m)$ 에 있어서, 어떠한 주 패킷들도 도착하지 않으며 이들 시간 슬롯들에 대한 천이 행렬 G는 p_A 에 대해 제로 값을 대입하고 q_A 에 대해 1 값을 대입함으로써 식(3)으로부터 얻어질 수 있다. 천이 행렬들 F 및 G의 곱들은 일련의 시간 슬롯들에서 패킷들의 도착을 명시한다. 패킷 도착과 함께 각 시간 슬롯은 F 행렬에 의해 나타내어지고 패킷 도착이 없이 각 시간 슬롯은 G 행렬로 나타내어진다.

[0157] 3. EC 보호 없는 CBR-트래픽 모델에 대한 패킷 유실 확률

[0158] EC 보호 없이 CBR-트래픽 모델에서 버퍼 점유율에 대한 정상상태 벡터 π 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\pi = (FG^{m-1})^T \pi \tag{51}$$

[0160] 여기서 T는 행렬 곱의 전치를 나타낸다.

[0161] 식(51)은 행렬 $(FG^{m-1})^T$ -I의 특이값 분해에 의해 해결될 수 있고, 여기서 I는 모든 대각 엔트리들이 1인 대각 행렬로서, 1차원 해 공간을 얻고, 다음 식을 사용하여 π 에 대한 최종 값을 결정한다.

$$\sum_{i=0}^L \pi_i = 1 \tag{52}$$

[0162]

[0163] 주 데이터 패킷의 유실 확률은 정상상태 벡터 P를 사용하기보다는 정상상태 벡터 π 를 사용하여 식(2)와 유사한 식으로부터 계산될 수 있다.

$$P_{loss} = \frac{1}{2} \pi_{L-1} P_C + \pi_L \tag{53}$$

[0164]

[0165] 4. EC 보호를 갖는 CBR-트래픽 모델에 대한 패킷 유실 확률

[0166] EC 보호 없이 CBR-트래픽 모델에 대한 유실 확률을 계산하기 위한 식을 도출하는데 사용되는 방법은 EC 보호를 갖는 CBR-트래픽 모델을 위한 식을 도출하기 위해 확장될 수 있다. 이것은 한 세트의 k 데이터 패킷들의 임의의 주 데이터 패킷이 복구될 수 없는 확률을 계산함으로써 행해진다.

[0167] a) 주 패킷들을 위한 전송 방법의 정의

[0168] 한 세트의 패킷들 내 n 주 패킷들 중 첫 번째가 유실될 확률은 제1 주 데이터 패킷이 도착하는 시간 슬롯 바로 전의 시간 슬롯에 대한 버퍼 점유율의 정상상태 벡터 S로부터 결정될 수 있다. 이 정상상태 벡터는 한 세트의 주 패킷들의 k 데이터 패킷들이 도착하는 한 세트의 $m \cdot k$ 시간 슬롯들에 대해 도출된다. 이전의 한 세트의 주 패킷들에 대한 $(n-k)$ EC 패킷들은 제1 w 시간 슬롯들 동안 도착하며, 여기서

$$w = \left\lfloor \frac{m}{m-1} (n-k) \right\rfloor \tag{54}$$

[0169]

[0170] 이다. $m \leq w$ 이라면, 현재 한 세트의 주 패킷들의 데이터 패킷들의 일부는 제1 w 시간 슬롯들 동안 도착한다. 식(49)로부터, $w \leq m \cdot k$ 임을 알 수 있다.

[0171] 추가의 값들은 다음과 같이 정의된다.

$$u = w \pmod{m} \tag{55}$$

$$z = m - u \tag{56}$$

$$f = \min(u, 1) \tag{57}$$

$$y = \frac{k \cdot m - w - f \cdot z}{m} \tag{58}$$

[0172]

[0173] 값 $z-1$ 은 고찰되는 $k \cdot m$ 시간 슬롯들의 w번째의 시간 슬롯과 다음 주 데이터 패킷간의 시간 슬롯들의 수와 같다. 값 y는 데이터 패킷들이 전혀 개재된 EC 패킷들을 갖고 있지 않은 m 시간 슬롯들의 사이클들 혹은 기간들의 수와 같다. 정상상태 S는 이들 값들에 관하여 표현될 수 있다. 식(62)은 도 3에 도시된 바와 같이 $m-1 > w$ 에 대한 상황들을 기술하며, 여기서 $m=4, k=4, n=6, w=2, u=2, z=2, f=1$ 및 $y=3$ 이다. 식(63)은 도 4에 도시된 바와 같이 $m-1 < w$ 에 대한 상황들을 기술하며, 여기서 $m=4, k=4, n=8, w=5, u=1, z=3, f=1$ 및 $y=2$ 이다. w는 모든 $m \geq 2$ 에 대해 $m-1 \pmod{m}$ 과 일치하지 않기 때문에 $w=m-1$ 에 대해선 어떠한 식도 필요하지 않다. 이것은 조사에 의해 $m=2$ 에 대해선 알 수 있다. $m=2$ 일 때, w는 우수이어야 하고 $m-1 \pmod{m}$ 과 일치할 수 없다. $m > 2$ 에 대해서, 이러한 모순은 정반대를 가정함으로써, 즉 다음 식과 같도록 하는 값 $(n-k)$ 이 존재한다고 가정함으로써 모순에 의해 증명될 수 있다.

[0174]
$$\left\lfloor \frac{m(n-k)}{m-1} \right\rfloor = r \cdot m - 1 \quad (59)$$

[0175] 정의에 의해서

[0176]
$$\left\lfloor \frac{m(n-k)}{m-1} \right\rfloor = \frac{m(n-k)}{m-1} - \frac{d}{m-1} \quad (60)$$

[0177] 이고, 여기서 $0 \leq d \leq m-2$ 이고, 이것은 식(59)과 함께 다음과 같음을 내포한다.

[0178]
$$n - k - r \cdot (m-1) = \frac{d - m + 1}{m} \quad (61)$$

[0179] 식(61)에 보인 표현은 좌변이 정수이지만 우변은 정수가 될 수 없기 때문에 성립할 수 없다. 이것은 식(59)에 표현된 가정에 모순되고, 이것은 w 가 $m-1 \pmod{m}$ 에 일치될 수 없음을 의미한다.

[0180] 위에 기술된 도착 프로세스의 정의에 의해서, 정상상태 벡터 S 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[0181]
$$S = \left(F^{w-m+1} (G^{z-1} F)^f (G^{m-1} F)^y F^{m-1} \right)^T S \quad \text{for } m-1 < w \quad (62)$$

[0181]
$$S = \left(F (G^{m-1} F)^y F^w G^{z-1} \right)^T S \quad \text{for } m-1 > w \quad (63)$$

[0182] 정상상태 벡터 S 는 π 대신에 S 에 대한 식(52)을 사용함으로써 식(51)으로부터 벡터 π 가 도출되는 바와 동일한 방식으로 결정될 수 있다.

[0183] b) EC 복구 확률

[0184] CBR-트래픽 모델에서 EC 프로세스를 사용하여, 폐기된 데이터 패킷을 복구하는 확률의 계산은 다음의 5 단계들에서 설명되는 바와 같이 계산될 수 있다.

[0185] 단계 1: 이 단계는 버퍼 점유율의 수준이 시간 슬롯 j 의 끝에서 g 로 주어졌을 때 버퍼 점유율의 수준이 시간 슬롯 $j+m-1$ 의 끝에서 h 일 조건부 확률을 판정한다. 이 확률 $U(m-1, g, h)$ 은 다음 식으로서 표현될 수 있고,

[0186]
$$U(m-1, g, h) = F^{x_1} G^{x_2} F^{x_3} G^{x_4} \dots F^{x_v} \quad \text{for } 0 \leq g, h \leq L \quad (64)$$

[0187] 여기서 x_j 는 양의 정수들이며;

[0188]
$$\sum_{j=1}^v x_j = m-1.$$

[0189] 이다. 조건부 확률의 정의는, $m-1$ 중간 시간 슬롯들 중에는 F 행렬로 나타내어지는, 주 패킷이 도착하는 어떤 시간 슬롯들이 있고, G 행렬로 나타내어지는, 어떠한 주 패킷도 도착하지 않는 어떤 시간 슬롯들이 있다는 사실을 나타낸다. 특히, $(j-1)$ 번째의 데이터 패킷을 도착하였을 때의 시간 슬롯의 끝에서 버퍼 점유율이 g 였다고 하였을 때, j 번째 주 패킷이 도착하기 전에 시간 슬롯의 끝에서 버퍼 점유율이 h 인 조건부 확률들 $R(e_{j-1}, g, h)$ 이 $2 \leq j \leq n$ 에 대해 계산된다.

$$R(e_j - 1, g, h) = \left\{ \begin{array}{ll} (F^{m-1})_{g,h}, & 2 \leq j \leq \left\lfloor \frac{w}{m} \right\rfloor \\ (F^u G^{q-1})_{g,h}, & j = \left\lfloor \frac{w}{m} \right\rfloor + 1, u \geq 1, z \geq 2 \\ (G^{m-1})_{g,h}, & j = \left\lfloor \frac{w}{m} \right\rfloor + 1, u = 0 \\ (G^{m-1})_{g,h}, & \left\lfloor \frac{w}{m} \right\rfloor + 1 < j \leq k \\ \delta_{g,h}, & k+1 \leq j \leq n \end{array} \right. \quad (65)$$

[0190]

[0191] 여기서 $(F^x)_{g,h}$ = x 제곱을 한 행렬 F의 행 g 및 열 h의 원소;

[0192] $(G^y)_{g,h}$ = y 제곱을 한 행렬 G의 행 g 및 열 h의 원소;

[0193] $(F^x G^y)_{g,h}$ = 행렬 곱 $F^x G^y$ 의 행 g 및 열 h의 원소; 및

$$\delta_{g,h} = \begin{cases} 1, & g = h \\ 0, & g \neq h \end{cases}$$

[0194]

[0195] 이다.

[0196] 항 $R(e_j - 1, g, h)$ 이 $2 \leq j \leq n$ 에 대해서만 정의되기 때문에, j를 이 간격밖에 있게 하는 임의의 한 세트의 파라미터들 w, m, q, u는, 발생하지 않고 무시하게 될 조건을 나타낸다.

[0197] 단계 2: 이 단계는 도착하는 주 패킷이 폐기되거나 혹은 주 패킷이 도착하는 시간 슬롯 바로 전의 시간 슬롯의 끝에서 버퍼 점유율의 수준이 h일 경우엔 폐기되지 않을 조건부 확률들을 판정한다. 패킷이 폐기되지 않는 조건들은 다음과 같다.

[0198] . $h \leq L-2$ 이거나, $h=L-1$ 임과 아울러 $k=L-2$ 이라면, 도착하는 패킷은 폐기되지 않는다.

[0199] . 주 패킷이 도착하는 시간 슬롯의 끝에서의 버퍼 점유율이 r일 때 $h=r=L-1$ 이라면, 도착하는 패킷은, 경합 패킷은 도착하지 않고 확률 q_{cD_0} 를 갖고 버퍼로부터 패킷이 전송되거나, 경합 패킷이 도착은 하나 주 패킷 후에 도착하고 패킷이 확률 $\frac{1}{2}p_{cD_0}$ 를 갖고 버퍼로부터 전송되는, 이들 2 조건 중 어느 하나에 해당된다면 폐기되지 않는다.

[0200] . 주 패킷이 도착하는 시간 슬롯의 끝에서 버퍼 점유율이 r일 때 $h=L-1$ 이고 $r=L$ 이라면, 도착하는 패킷은, 경합 패킷이 도착하지 않고 확률 q_{cQ_0} 를 갖고 어떠한 패킷도 버퍼로부터 전송되지 않거나, 경합 패킷이 도착은 하지만 주 패킷 후에 도착하고 확률 $\frac{1}{2}p_{cQ_0}$ 를 갖고 버퍼로부터 어떠한 패킷도 전송되지 않는, 이들 2 조건 중 어느 하나에 해당된다면 폐기되지 않는다.

[0201] . $h=L$ 이라면, 도착하는 주 패킷은 폐기된다.

[0202] 현재 시간슬롯에서 주 패킷이 도착되고 이전 시간 슬롯의 끝에서 h의 버퍼 점유율이 주어졌을 때, 버퍼 점유율이 현재 시간 슬롯의 끝에서 r과 같고 도착하는 주 패킷이 폐기되지 않을 조건부 확률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E_{h,r} = \left\{ \begin{array}{ll} F_{h,r}, & h \leq L-2 \\ F_{h,r}, & h = L-1, r \leq L-2 \\ q_C p_D + \frac{1}{2} p_C p_D, & h = r = L-1 \\ q_C q_D + \frac{1}{2} p_C q_D, & h = L-1, r = L \\ 0, & \text{all other } h \text{ and } r \end{array} \right\} \quad \text{for } 0 \leq h, r \leq L \quad (66)$$

[0203]

[0204]

마찬가지로, 현재 시간슬롯에서 주 패킷이 도착되고 이전 시간 슬롯의 끝에서 h의 버퍼 점유율이 주어졌을 때, 버퍼 점유율이 현재 시간 슬롯의 끝에서 r과 같고 도착하는 주 패킷이 폐기될 조건부 확률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$E_{h,r}^* = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & h \leq L-2 \\ 0, & h = L-1, r \leq L-2 \\ \frac{1}{2} p_C p_D, & h = r = L-1 \\ \frac{1}{2} p_C q_D, & h = L-1, r = L \\ 0, & h = L, r < L-1 \\ p_D, & h = L, r = L-1 \\ q_D, & h = r = L \\ 0, & \text{all other } h \text{ and } r \end{array} \right\} \quad \text{for } 0 \leq h, r \leq L \quad (67)$$

[0205]

[0206]

단계 3: 이 단계는, 버퍼 점유율이 세트의 (j-1)번째 주 패킷이 도착하는 시간 슬롯의 끝에서 g라는 조건이 주어졌을 때, 이 한 세트의 주 패킷의 j번째 패킷이 도착하고 j번째 주 패킷이 폐기되지 않는 시간 슬롯의 끝에서 버퍼 점유율이 r일 조건부 확률을 판정한다. 이 조건부 확률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A(g, r, j) = \sum_{h=0}^L R(e_j - 1, g, h) E_{h,r} \quad \text{for } 0 \leq g, r \leq L, 2 \leq j \leq n \quad (68)$$

[0207]

[0208]

마찬가지로, 세트의 (j-1)번째 주 패킷이 도착하는 시간 슬롯의 끝에서 버퍼 점유율이 g이라는 조건이 주어졌을 때 한 세트의 주 패킷의 j번째 패킷이 도착하고 j번째 주 패킷이 폐기되는 시간 슬롯의 끝에서 버퍼 점유율이 r일 조건부 확률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$B(g, r, j) = \sum_{h=0}^L R(e_j - 1, g, h) E_{h,r}^* \quad \text{for } 0 \leq g, r \leq L, 2 \leq j \leq n \quad (69)$$

[0209]

[0210]

단계 4: 이 단계는, 한 세트의 주 패킷들 내 첫 번째 a 패킷들 중에서 b가 폐기되고, 여기서 $1 \leq a \leq n$ 및 $0 \leq b \leq a$, 버퍼 점유율의 수준이 a번째 패킷이 도착하는 시간 슬롯의 끝에서 d인 확률 $M(a, b, c)$ 을 판정한다. $a=1$ 인 경우, 확률 $M(a, b, d)$ 은 식(62) 및 식(63)에서 위에 정의된 벡터 S의 함수로서 표현될 수 있다. $a>1$ 인 경우, 확률 $M(a, b, d)$ 은 다음 식들에 나타난 바와 같이 $A(k, g, j)$ 및 $B(k, g, j)$ 를 사용하여 재귀적으로 정의될 수 있다.

$$M(1, 0, 0) = S_0 q_C p_D$$

$$M(1, 0, 1) = S_0 (q_C q_D + p_C p_D) + S_1 q_C p_D$$

$$M(1, 0, d) = S_{d-2} p_C q_D + S_{d-1} (q_C q_D + p_C p_D) + S_d q_C p_D, \quad \text{for } 2 \leq d \leq L-2$$

[0211]

$$M(1,0,L-1) = S_{L-3} p_C q_D + S_{L-2} (q_C q_D + p_C p_D) + S_{L-1} (q_C p_D + \frac{1}{2} p_C p_D)$$

$$M(1,0,L) = S_{L-2} p_C q_D + S_{L-1} (q_C q_D + \frac{1}{2} p_C q_D)$$

$$M(1,1,d) = 0, \quad \text{for } 0 \leq d \leq L-2$$

$$M(1,1,L-1) = S_{L-1} \frac{1}{2} p_C p_D + S_L p_D$$

$$M(1,1,L) = S_{L-1} \frac{1}{2} p_C q_D + S_L q_D$$

$$M(a,0,d) = \sum_{j=0}^L M(a-1,0,j) \cdot A(j,d,a), \quad \text{for } 2 \leq a \leq n$$

$$M(a,b,d) = \sum_{j=0}^L M(a-1,b,j) \cdot A(j,d,a) + \sum_{j=0}^L M(a-1,b-1,j) \cdot B(j,d,a), \quad \text{for } 2 \leq a \leq n, 1 \leq b \leq a-1$$

$$M(a,a,d) = \sum_{j=0}^L M(a-1,a-1,j) \cdot B(j,d,a), \quad \text{for } 2 \leq a \leq n$$

[0212]

[0213]

단계 5: 이 단계는 k 주 데이터 패킷들 중에서 v가 폐기되고, 첫 번째 a EC 패킷들 중에서 b가 폐기되고, a번째 EC 패킷이 도착하는 시간슬롯의 끝에서 버퍼 점유율이 d인 확률 D(a,b,d,v)을 판정하며, 여기서 1 ≤ a ≤ n-k, 0 ≤ b ≤ a 및 0 ≤ v ≤ k이다. a=1에서 확률 D(a,b,d,v)는 M(k,v,j), A(j,d,k) 및 B(j,d,k)의 함수로서 표현될 수 있다. a>1인 경우, 확률 D(a,b,d,v)는 다음 식들로 나타낸 바와 같은 D(a-1,b,d,v), A(j,d,k) 및 B(j,d,k)을 사용하여 재귀적으로 정의될 수 있다.

$$D(1,0,d,v) = \sum_{j=0}^L M(k,v,j) \cdot A(j,d,k+1)$$

$$D(1,1,d,v) = \sum_{j=0}^L M(k,v,j) \cdot B(j,d,k+1)$$

$$D(a,0,d,v) = \sum_{j=0}^L D(a-1,0,j,v) \cdot A(j,d,a+k), \quad \text{for } 2 \leq a \leq n-k$$

$$D(a,b,d,v) = \sum_{j=0}^L D(a-1,b,j,v) \cdot A(j,d,a+k) + \sum_{j=0}^L D(a-1,b-1,j,v) \cdot B(j,d,a+k), \quad \text{for } 2 \leq a \leq n-k, 1 \leq b \leq a-1$$

$$D(a,a,d,v) = \sum_{j=0}^L D(a-1,a-1,j,v) \cdot B(j,d,a+k), \quad \text{for } 2 \leq a \leq n-k$$

[0214]

[0215]

k 주 데이터 패킷들 중에서 v는 폐기되고 (n-k) EC 패킷들 중에서 b가 폐기되는 확률 H(v,b)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$H(v,b) = \sum_{d=0}^L D(n-k,b,d,v) \quad \text{for } 0 \leq v \leq k \quad (70)$$

[0216]

[0217]

EC 프로세스에 의해 복구되는 데이터 패킷들의 수에 대한 평균 혹은 기대값 E_{rec}은 다음 식으로서 표현될 수 있

다.

$$E_{rec} = \sum_{v=0}^k \sum_{b=0}^{n-k} H(v,b) \cdot J(v,b) \tag{71}$$

$$J(v,b) = \begin{cases} k, & v+b \leq n-k \\ k-v, & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서,

F. CBR-트래픽 모델에 대한 근사화 알고리즘들

E_{rec} 에 대한 근사값만을 계산하는 알고리즘들은, 식(48)에 나타난 E_{rec} 의 정확한 계산이 식(42), $k=L-1$ 에 대해 식(43), 및 이것은 $O(1)$ 의 계산 복잡도로 이행될 수 있는, 식(44), 및 $O(nk)$ 의 계산 복잡도를 갖는 식(46)의 적용을 계산하는 것을 요구하기 때문에 베르누이-트래픽 모델들에 있어서는 필요하지 않다. E_{rec} 를 계산하기 위한 알고리즘의 전체 계산 복잡도는 $O(nk)$ 이다. 이들 복잡도 지수들은 모든 필요한 2항식 계수들이 사전에 계산되어 나중 사용을 위해 저장된 것으로 가정한다. E_{rec} 의 계산은, C 프로그래밍 언어로 작성되고 캘리포니아주 산타 클라라 인텔사로부터 입수될 수 있는 3.4 GHz 펜티엄(등록상표) 마이크로프로세서를 구비한 컴퓨터에 의해 실행되는 구현을 사용하여 $L=400$ 에 대해서 1msec 미만을 요구한다. 이것은 많은 애플리케이션들의 실시간 요건을 충족시킬 만큼 충분히 빠르다.

불행하게도, E_{rec} 에 대한 근사값을 계산하는 알고리즘은 위에 기술된 정확한 알고리즘의 계산 복잡도가 매우 높기 때문에 CBR-트래픽 모델에 대해서 필요하다.

1. 정확한 알고리즘의 복잡도

상술한 5단계 알고리즘에 의해 유도된 식(71)은, 근사화 없이 기대값 E_{rec} 을 계산하는데 사용될 수 있기 때문에 여기에서는 정확한 알고리즘이라 한다. 단계 1은 $m \cdot k$ 행렬 곱셈을 수행한 다음, $(L+1) \times (L+1)$ 행렬의 특이값 분해(singular value decomposition)를 계산한다. 이러한 연산은 $O(mkL^3)$ 의 계산 복잡도를 갖는다. 단계 2와 단계 3을 수행하는데 필요한 연산의 계산 복잡도는 무시할 수 있다. 확률 $M(a,b,d)$ 를 계산하기 위한 단계 4의 연산은 $O(k^2L)$ 의 계산 복잡도를 갖는다. 확률 $D(a,b,d,v)$ 을 계산하기 위한 단계 5의 연산은 $O((n-k)^2kL^2)$ 의 계산 복잡도를 갖는다. 5단계 알고리즘의 전체 복잡도는 약 $O(mkL^3 + k^2L + (n-k)^2kL^2)$ 이다. 그러나, 실제 구현에서, 버퍼 L 의 사이즈는 값 n,k 보다 한 자릿수 또는 두 자릿수 크기가 더 클 것이고, 이에 따라, 알고리즘의 전체 복잡도는 약 $O(mkL^3)$ 이 된다.

표 1에서 엔트리들은 C 프로그래밍 언어로 작성되고 3.4 GHz 펜티엄 프로세서를 갖춘 컴퓨터에 의해 실행되는 5단계 알고리즘의 구현을 사용하여 서로 다른 버퍼 크기들에 대한 E_{rec} 을 계산하는데 필요한 시간량을 나타낸다. 단계 1에서 특이값 분해는 Press et al., "Numerical Recipes in C++: The Art of Scientific Computing," 2nd ed., Cambridge University Press, 1992에 기술된 svdcmp 루틴에 의해 구현되었다.

버퍼크기 L	시간 msec
400	1558
300	623
200	155
100	15
50	<1

표 1

전형적인 멀티미디어 무선 네트워크들에서, 패킷 처리 디바이스(10)는 통상적으로 300 이상 패킷들의 버퍼 저장 용량을 구비한 많은 시판되는 IEEE 802.11 기반 무선 액세스 포인트들(AP)에 의해 구현될 수 있다. 표 1에 엔트

리들은 이러한 AP에 대해 기대값 E_{rec} 을 계산하기 위해 위에 언급된 예시적인 구현에 의해 필요로 되는 적어도 623 msec를 나타낸다. 불행하게도, 계산들은 많은 멀티미디어 애플리케이션들에 대해서 EC 파라미터들 (n,k)의 실시간 적응을 할 수 있게 적어도 한자릿수 더 작은 시간량 내에 수행되어야 한다. 훨씬 적은 시간에 E_{rec} 에 대한 근사값을 계산할 수 있는 더 낮은 복잡도 알고리즘의 도출은 이하 기술된다.

[0229] 2. 콜랩스(Collapsed)-상태 모델

[0230] 위에 기술된 5단계 알고리즘의 목적은 EC 복구 후에 정보 유실을 최소화하는 EC 파라미터들 (n,k)을 결정하는 것이다. 이 알고리즘은 버퍼 오버플로에 기인하여 패킷 처리 디바이스(10)에 의해 하나 이상의 패킷들이 폐기되었기 때문에 패킷 유실들이 일어날 때만 계산될 필요가 있다. 버퍼 오버플로는 버퍼 점유율의 수준이 L 혹은 거의 L일 때 일어날 것이며, 패킷 처리 디바이스(10)에서 경합 패킷 및 주 패킷 둘 다의 누적 도착 레이트는 버퍼로부터 디바이스가 패킷들을 전송하는 레이트보다 높다. 즉, 정상상태 벡터 S의 엔트리들 S_k 는 L에 매우 가까운 k의 모든 값들에 대해 하지만 거의 몇 개의 값들에 대해 제로이거나 거의 제로이다.

[0231] 수치적 실험들은 이들 예상들을 확증한다. 도 5 내지 도 7에 그래프들은 서로 다른 경합 트래픽 레이트들 p_c 에 대해 정상상태 확률 S_k 의 분포들을 나타낸다. 모든 3개의 예들에서, $m=4$, $n=6$, $k=5$ 및 $p_D = 0.8$ 이다. 모델은 $p_c=0.5$ 일 때 일어나는, 도착 레이트들의 합 p_A+p_c 가 p_D 와 같을 때 평형 상태를 달성할 것이다. 도 5에 도시된 예에 대해서, $p_c=0.52$ 이고, 이것은 평형 레이트보다 약간 위이다. 도면에 도시된 바와 같이, 정상상태 확률들 S_k 는 증가하는 k에 따라 급격하게 상승하나, 0.01보다 큰 정상상태 확률들은 $k>95$ 의 값들에 대해서만 발견될 수 있다. p_c 가 증가되어 누적 도착 레이트 p_A+p_c 가, 각각 도 6 및 도 7에 나타낸 바와 같이 이를테면 $p_c=0.6$ 및 $p_c=0.66$ 같이, 전송 레이트 p_D 보다 커지게 될지라도, 정상상태 확률들 S_k 는 k가 L에 매우 가깝지 않다면 여전히 제로이거나 제로들에 가깝다.

[0232] 이러한 거동은 양호한 근사화 알고리즘을 개발하는데 사용될 수 있다. 제로 혹은 거의 제로에 가까운 정상상태 확률 S_k 를 갖는 트래픽 모델의 임의의 상태는 시스템이 근본적으로 결코 이 상태에는 있지 않기 때문에 시스템 거동에 현저한 영향을 전혀 미치지 않는다. 도 5 내지 도 7에 도시된 예들에서, $S_k \approx 0$ 를 갖는 대다수의 모든 상태들은 정상상태 모델의 다이내믹스에 거의 혹은 전혀 영향을 미치지 않는다. 결국, 이들 상태들은 현저하게 계산의 결과를 변경함이 없이 정상상태 벡터 S의 계산에서 무시될 수 있으며, E_{rec} 의 계산된 값을 현저하게 변경하지 않음으로써 무시될 수 있다.

[0233] 이러한 관찰에 기초하여, 정상상태들 k에 대해서만 E_{rec} 를 계산하는 근사화 알고리즘이 도출될 수 있고, 여기서 $S_k > \epsilon$ 이고 ϵ 는 작은 임계값이다. 이 근사화 알고리즘은 $S_k > \epsilon$ 에 대한 모든 상태들 k는 개개의 벡터 원소들 $C_k = S_{k+L_0}$ 로 표현되는 콜랩스-상태 벡터 C를 사용하며, $S_k \leq \epsilon$ 에 대한 그의 모든 다른 상태들 k는 단일 상태 C_0 에 콜랩스된다. $k \leq L_0$ 에 대한 $S_k \leq \epsilon$ 인 것으로 가정되고, L_0 는 버퍼 점유율의 임계값이다. 결국, 콜랩스-상태 벡터 C는 $0 < k < L-L_0$ 에 대해서, $L-L_0+1$ 엔트리들 C_k 만을 갖는다.

[0234] $L+1$ 엔트리들을 갖는 정상상태 벡터 S는 L을 값 $L-L_0$ 로 대체하여 식(3)에 나타낸 천이 행렬을 재정의함으로써 $L-L_0+1$ 엔트리들만을 갖는 콜랩스-상태 벡터 C에 의해 근사적으로 나타낼 수 있다. $0 \leq a, b \leq L-L_0$ 에 대해서 상태 C_a 와 상태 C_b 간의 천이 확률은 $T_{a+L_0, b+L_0}$ 로서 정의된다. 이 천이 행렬은 $a, b > 0$ 이라면 버퍼 점유율의 다이내믹스를 정확하게 기술하나 $a=0$ 이거나 $b=0$ 이라면 버퍼 점유율의 다이내믹스를 근사적으로만 기술한다. 이러한 근사화는 콜랩스 상태 C_0 가 단지 ϵL_0 만의 확률로 매우 드물게 일어나는 것으로 가정되기 때문에 임계값 ϵ 이 충분히 작게 선택된다면, C_k , $1 \leq k \leq L-L_0$ 에 대해서 계산들의 정확성에 어떠한 현저한 영향도 미치지 않을 것이다.

특히, 절대 차 $|C_k - C_{k+L_0}|$ 는 $1 \leq k \leq L-L_0$ 에 대해서 매우 작다.

[0235] 콜랩스 상태 벡터 C는 특이값 분해를 식(62) 혹은 식(63)에 적용하고 이어서 위에 기술된 바와 같이 벡터 π 를

벡터 C로 대체한 식(52)을 사용하여 결과를 정규화함으로써 계산될 수 있다. 벡터 C를 계산한 후에, E_{rec} 에 대한 근사값은 벡터 S가 아니라 벡터 C를 사용함으로써 식(71)으로부터 계산될 수 있다. 도 5 내지 도 7에 도시된 예 들은 값 L_0 가 값 L에 가까울 것으로 예상될 수 있음을 암시하며, 이것은 $O(mkL^3)$ 에서 $O(mk(L-L_0)^3)$ 로 계산 복잡 도를 감소시킨다. 표 I에서 버퍼 크기 L을 값 $L-L_0$ 로 대체함으로써, 본 구현의 실행 시간들은 L_0 가 L에 충분히 가까울 때 한 자릿수 혹은 두 자릿수 크기만큼 감소될 수 있음을 알 수 있다. L_0 에 대한 값은 근사화 알고리즘의 구현이 많은 멀티미디어 애플리케이션들의 실시간 요건을 만족시킬 수 있게 선택될 수 있다.

[0236] 값 L_0 는 근사화 알고리즘이 사용될 수 있기 전에 결정되어야 한다. 수치 시뮬레이션들은 $p_A+p_C>p_D+\mu$, $\mu=0.1$, 일 때는 언제나 근사화 알고리즘의 정확도를 현저하게 저하시키지 않고, $L_0=10$ 만큼 작은 L_0 가 선택될 수 있음을 보였다. μ 의 서로 다른 값들에 대해 적합한 한 세트의 값들 L_0 은, L_0 의 어떤 값들이 수락가능한 수준들의 정확 도로 근사화 알고리즘이 E_{rec} 를 추정하게 하는지를 결정하기 위해 식(71)에 의해 계산되는 E_{rec} 에 대한 정확한 값을 사용함으로써 근사화 알고리즘에 사용하기 위해 사전에 계산될 수 있다.

[0237] 이 콜랩스-상태 근사화 기술은 근본적으로 임의의 트래픽 모델에 대한 감소된 계산 복잡도를 갖는 알고리즘을 얻는데 사용될 수 있다.

[0238] G. 애플리케이션들

[0239] 위에 기술된 기술들은 패킷 통신 시스템에서 다양한 애플리케이션들을 구현하기 위해 알고리즘들을 도출하는데 사용될 수 있다.

[0240] 한 애플리케이션은 파라미터들 p_A , p_C , p_D , L 및 EC 파라미터들 (n,k) 이 주어졌을 때 EC 복구 후에 주 데이터 패킷의 유실 확률을 계산하기 위해 위에 기술된 알고리즘들을 사용한다.

[0241] 한 애플리케이션은 EC 복구 후에 주 데이터 패킷들의 유실을 최소화하기 위해 EC 파라미터들 (n,k) 을 결정하고 적용시킨다. 이것이 행해질 수 있는 한 방법은 먼저, 고찰되는 통신 시스템에 대해 가능한 모든 쌍들의 파라미 터 값들 (n,k) 을 결정하는 것이다. 통신 경로 대역폭 및 최대 허용가능한 지연과 같은 시스템에 부과되는 어떤 제약들은 EC 파라미터들 (n,k) 의 선택에 제약을 부과한다. 대역폭에 제한들은 비 ϕ 에 제한을 부과하며 지연에 제한은 파라미터 n에 제한을 부과한다. 모든 가능한 한 세트의 파라미터 값들 (n,k) 은 지연 및 대역폭의 수락가 능한 최대 량들을 확증하고 이들 요건들을 만족시키는 모든 쌍들의 EC 파라미터들 (n,k) 을 확인함으로써 결정될 수 있다. 위에 도출된 알고리즘들은 연관된 유실 확률을 계산하기 위해서 파라미터들 p_A , p_C , p_D , L 및 모든 가 능한 EC 파라미터 값들 혹은 이의 부분집합에 적용될 수 있다. 가장 낮은 유실 확률을 달성하는 EC 파라미터 값 들 (n,k) 은 최적의 한 세트의 파라미터들로서 선택될 수 있다.

[0242] 또 다른 애플리케이션은 데이터 소스(2)가 주 패킷들을 전송하기 위한 최적의 레이트를 결정한다. 이 애플리케 이션에서, EC 파라미터들 (n,k) 에 대한 값들이 선택되고 위에서 도출된 알고리즘들은 연관된 유실 확률을 계산 하기 위해 서로 다른 패킷 도착 레이트들 p_A 에 적용된다. 많은 경우들에 있어서, 실제적 고찰들은 고찰될 수 있 는 레이트들에 제한들을 부과한다. 가장 낮은 유실 확률을 달성하는 레이트는 데이터 소스에 대한 최적 전송 레 이트를 설정하는데 사용될 수 있다.

[0243] 대안적으로, 도출된 알고리즘들은 가장 낮은 유실 확률을 달성하는 설정들을 결정하기 위해 EC 파라미터들 (n,k) 및 패킷 도착 레이트들 모두 다에 대한 한 범위의 값들에 적용될 수 있다.

[0244] 또 다른 애플리케이션은 파라미터들 p_A , p_D , L과, EC 파라미터들 (n,k) 및 EC 복구 후에 주 데이터 패킷들을 유 실하는 레이트가 주어졌을 때 경합 패킷의 도착 확률인 p_C 를 계산한다. 위에 기술된 애플리케이션들은 파라미터 들 p_A , p_C , p_D 및 L에 대한 값들은 알고 있는 것으로 가정한다. p_C 에 대한 값을 알고 있지 않다면, p_C 의 값은 EC 보호가 제공되지 않은 경우엔 파라미터들 p_A , p_D , P_{loss} 및 L로부터 얻어질 수 있고, EC 보호가 제공된 경우엔 파 라미터들 p_A , n, k, p_D , E_{loss} 및 L로부터 얻어질 수 있다. p_C 를 계산하는 반복적 프로세스는 예를 들면 데이터 소스(2)에서 이행될 수 있다. 이 프로세스는 데이터 소스(2)로부터 p_A , n, k에 대한 값들을 얻을 수 있고, 수신 기(20)로부터 p_D 및 P_{loss} 혹은 E_{loss} 에 대한 값들을 얻을 수 있다. L에 대한 값은 흔히 선행적으로 알게 되지만,

이렇게 하지 않고 알지 못한다면 패킷 처리 디바이스(10)로부터 얻어질 수 있다. 반복이 수행될 수 있는 방법은 다음 절에 기술된다. 이 프로세스에 의해 계산되는 p_c 의 값은 위에 기술된 알고리즘들에의 입력 파라미터와 같은 다른 애플리케이션들에서 사용될 수 있다.

[0245] 어떠한 EC 보호도 제공되지 않는다면, 베르누이-트래픽 시스템에 대한 p_c 의 값은 식(2) 및 식(42) 내지 식(44)에 의해 정의되는 관계들로부터 결정될 수 있다. CBR-트래픽 시스템에 있어서, 값은 식(2)에 의해 정의된 관계들 및 식(53)에 관련하여 위에 기술된 기술로부터 결정될 수 있다. 어느 한 유형의 시스템에 있어서, 이들 식들에 의해 정의되는 관계들은 p_c 와 P_{loss} 간의 단조 일 대 일 맵핑을 확장한다. 이 맵핑 특성을 사용하여, p_c 는 p_c 의 값에 수렴하는 반복적 바이너리-칩(binary-chop) 탐색에 의해 결정될 수 있다.

[0246] EC 보호가 제공된다면, 베르누이-트래픽 시스템에 대한 p_c 의 값은 식(2) 및 식(48)에 의해 정의된 관계들로부터 결정될 수 있다. CBR-트래픽 시스템에 있어서, 값은 식(2) 및 식(71)에 의해 정의된 관계들로부터 결정될 수 있다. 어느 한 유형의 시스템에 있어서, 이들 식들에 의해 정의되는 관계들은 p_c 와 E_{rec} 간에 단조 일 대 일 맵핑을 확증한다. 이 맵핑 특성을 사용하여, p_c 는 p_c 의 값에 수렴하는 반복적 바이너리-칩 탐색에 의해 결정될 수 있다.

[0247] 많은 구현들에서, n 및 k 의 가능한 선택들은 대역폭 및 지연 요건에 의해 제한된다. 앞 절들에서 기술된 알고리즘들은 EC 복구 후에 유실 확률을 최소화하는 n 및 k 의 모든 가능한 선택들 중에서 EC 파라미터들 (n, k)을 찾는 데 사용될 수 있다. p_c 에 대한 값은 지금 기술된 바와 같이 결정되며, n 및 k 의 모든 가능한 값들에 대한 탐색은 최적 값들을 찾기 위해 수행된다.

[0248] H. 구현

[0249] 도 1을 참조하면, 통신 경로들(3, 5, 11, 21, 22)은 근본적으로 임의의 기술 및 이를테면 금속 와이어들을 통한 전기 신호들, 광섬유를 통한 광학 신호들, 및 공간을 통한 라디오-주파수(RF) 방출들과 같은 매체들에 의해 구현될 수 있다. 본 발명은 통신 경로(11)가 무선 RF 경로이고 이외 모든 다른 통신 경로들이 전기 혹은 광학적 경로들인 도 1에 제시된 것과 같은 통신 시스템들에서 잇점이 있게 사용될 수 있다.

[0250] 본 발명의 여러 면들을 실시하는데 요구되는 기능들은 이산 로직 성분들, 집적회로들, 하나 이상의 ASIC들 및/또는 프로그램으로 제어되는 프로세서들을 포함한 매우 다양한 방법들로 구현되는 성분들에 의해 수행될 수 있다. 이들 성분들이 구현되는 방법은 본 발명에서 중요하지 않다.

[0251] 본 발명의 소프트웨어 구현들은 초음파 내지 자외 주파수들을 포함한 스펙트럼 전체에 대해 기저대 혹은 변조된 통신 경로들과 같은 다양한 기계 독출가능한 매체들, 혹은 자기 테이프, 카드들 혹은 디스크, 광학 카드들 혹은 디스크, 및 종이를 포함한 매체들 상에 검출가능한 마킹들을 포함한 근본적으로 임의의 기록 기술을 사용하여 정보를 전달하는 저장 매체들에 의해 전달될 수 있다.

도면의 간단한 설명

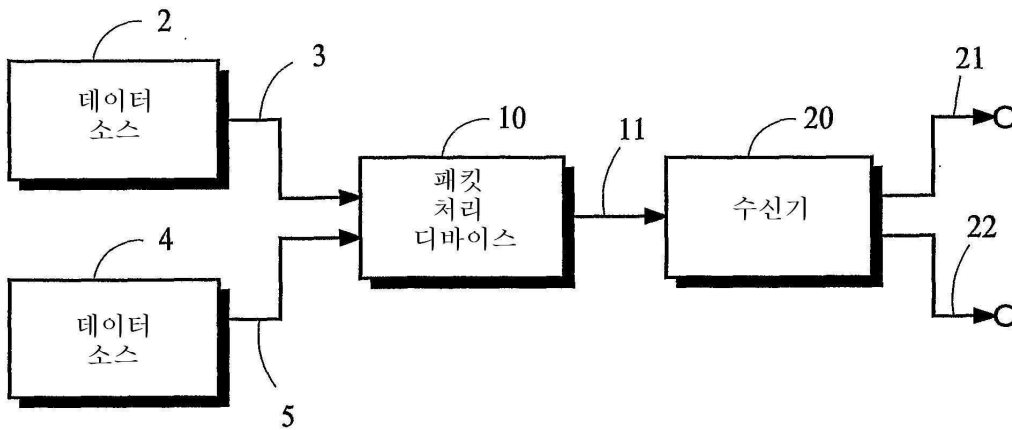
[0014] 도 1은 통신 시스템의 개략도이다.

[0015] 도 2-4는 CBR-트래픽 모델에 따른 시간 슬롯들로 배열된 다수 세트들의 주 패킷들의 개략도이다.

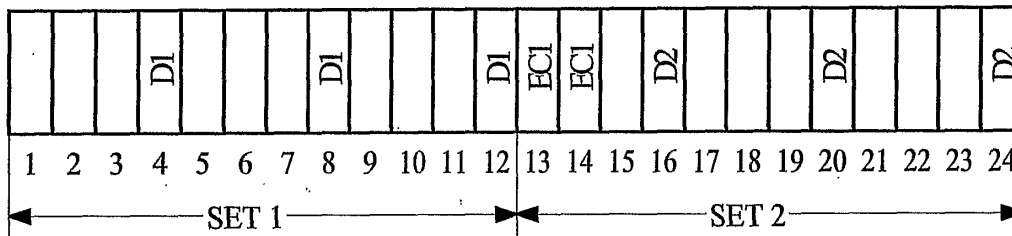
[0016] 도 5-7은 버퍼 점유율의 상태의 함수로서 정상상태 확률들의 그래픽 도이다.

도면

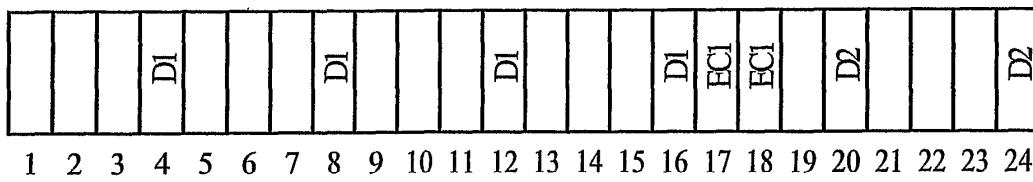
도면1



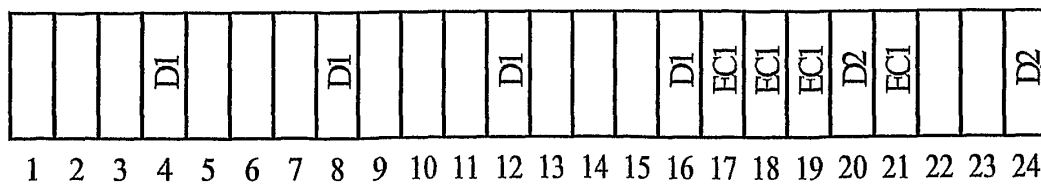
도면2



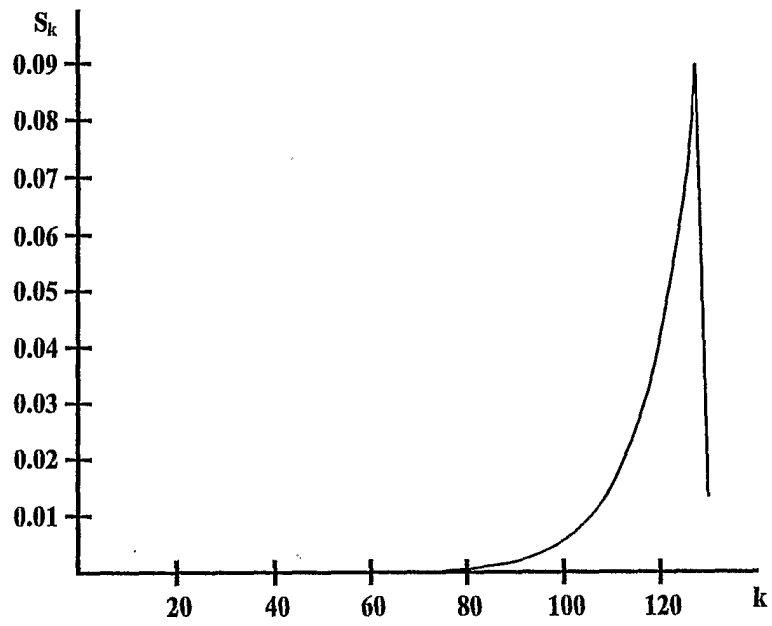
도면3



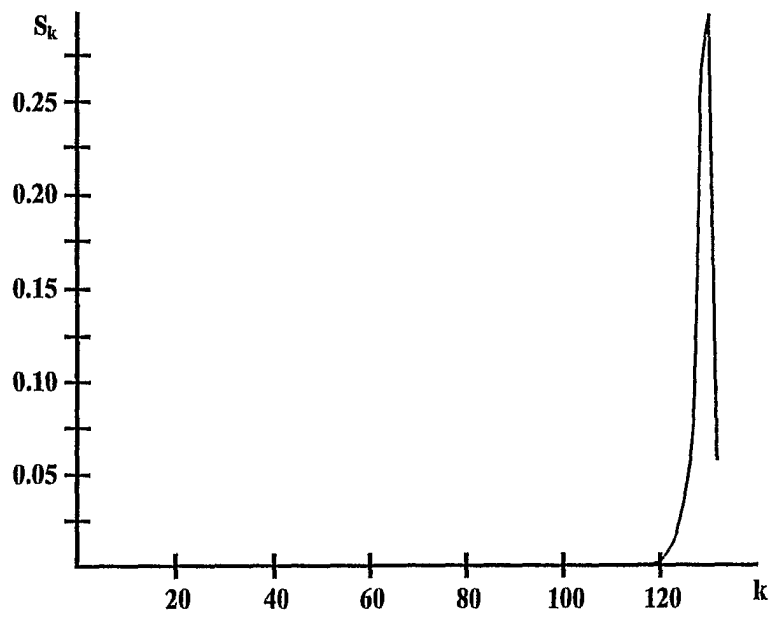
도면4



도면5



도면6



도면7

