

# 광대역 위성 네트워크를 위한 데이터 손실량 기반 최적 타임슬롯 스케줄링

장근녕, 박유진  
연세대학교 경영학과

## Abstract

본 논문에서는 광대역 위성 네트워크에서 각 단말에서의 패킷 손실량 기대값을 분석하고, 패킷 손실량 기대값의 총합을 최소화하는 타임슬롯 스케줄링 방법을 제시한다. 이를 위해 각 단말에서의 패킷 손실량 기대값을 구하는 방법을 제시하고, 타임슬롯 스케줄링을 위한 최적화 모형을 정형화하고, 정형화된 모형을 해결하기 위한 방법을 제시한다. 실험을 통해 제시한 방법이 기존 방법에 비해 패킷 손실량 기대값의 총합을 의미 있게 감소시킴을 보인다.

## 1. 서론

멀티미디어 인터넷 서비스(multimedia Internet service)를 제공하기 위한 DVB-RCS(Digital Video Broadcasting - Return Channel via Satellite) 네트워크와 같은 대화형 광대역 위성 네트워크(interactive broadband satellite network)에 대한 개발이 선진국을 중심으로 전 세계적으로 활발하게 이루어지고 있다[2,4,6]. ETSI(European Telecommunications Standards Institute)[1]에 의해 표준화된 DVB-RCS 네트워크는 허브(hub), GEO(geostationary earth orbit) 위성, 다수의 단말(terminal) 등으로 구성되어 있는 대화형 광대역 위성 네트워크이다.

DVB-RCS와 같은 광대역 위성 네트워크의 효율적인 구현을 위해서는 부족한 리턴 링크 자원의 효율적인 활용이 필요하고, 이를 위해 리턴 링크의 자원을 효율적으로 활용하기 위한 타임슬롯 스케줄링 체계 개발을 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[3,7]. 지금까지의 연구 결과를 종합해 보면 다양한 특성을 갖는 멀티미디어 서비스를 제공하는 환경 하에서는 CFDAMA(Combined Free/Demand Assignment Multiple Access 방식이 가장 대표적인 것으로 나타나고 있다[3]. 현재까지 CFDAMA에 기반을 두어 개발된 대표적인 방식을 살펴보면, P\_CFDAMA (Pure CFDAMA), R\_CFDAMA (Round-robin CFDAMA), W\_CFDAMA (Weighted CFDAMA), PR\_CFDAMA (PRedictive CFDAMA) 등이 있다[7]. P\_CFDAMA, R\_CFDAMA, W\_CFDAMA 등에서 각 단말의 타임슬롯 수요는 현재 버퍼에서 대기하고 있는 패킷의 수로 결정된다. 이용 가능한 타임슬롯의 수가 단말의 전체 타임슬롯 수요보다 적으면, 각 단말에 할당되는 타임슬롯의 수는 요청 수요의 비율에 따라 결정된다. 이용

가능한 타임슬롯의 수가 전체 타임슬롯 수요보다 많으면 전체 수요를 충족시키고 타임슬롯이 남는채, 이 남은 여유 슬롯(free slots)은 P\_CFDAMA에서는 할당되지 않고 버려지고, R\_CFDAMA에서는 각 단말에 균등하게 할당되고, W\_CFDAMA에서는 단말의 타임슬롯 요청 수요의 비율에 따라 할당된다. PR\_CFDAMA에서는 각 단말의 타임슬롯 수요를 버퍼에서 대기하고 있는 타임슬롯의 수로 결정한다는 점에서는 이전의 방법과 동일하지만, 여유 슬롯을 수요 변화 추이를 예측하여 할당한다.

이들 방식에서는 단말들이 요청한 타임슬롯 수요가 이용 가능한 타임슬롯의 수보다 많으면, 요청한 수요에 비례하여 타임슬롯이 할당된다. 따라서 요청한 수요가 이용 가능한 타임슬롯의 수보다 많을 때, 각 단말에 어느 정도의 패킷이 앞으로 도착할 것인가에 대한 정보를 반영하지 않고 있고, 결국 패킷 손실량과 지연 정도 측면에서 최적의 할당을 하지 못하고 있다고 할 수 있다. 각 단말에 도착하는 패킷은 이용 가능한 타임슬롯이 없을 경우 버퍼에 저장되는데, 이 때 버퍼에 공간이 없으면 패킷 손실이 발생한다. 이러한 패킷 손실은 시스템 관점에서 볼 때 가급적 감소시키는 것이 바람직하다[5].

본 논문에서는 각 단말에서의 패킷 손실량 기대값을 분석하고, 패킷 손실량 기대값의 총합을 최소화 하는 타임슬롯 스케줄링 방법을 제시한다. 이를 위해 각 단말에서의 패킷 손실량 기대값을 구하는 방법을 제시하고, 타임슬롯 스케줄링을 위한 최적화 모형을 정형화하고, 정형화된 모형을 해결하기 위한 방법을 제시한다.

2절에서는 단말의 패킷 손실량 기대값을 분석하고, 3절에서는 최적 타임슬롯 스케줄링 모형과 알고리즘을 제시하고, 4절에서는 실험 결과를 제시하고, 5절에서는 결론을 제시한다.

## 2. 패킷 손실량 분석

리턴 링크(return link; 위성을 거쳐 단말에서 허브로의 링크)에서의 다중접속체계(multiple access scheme)는 MF-TDMA(Multi-Frequency Time Division Multiple Access)에 근거를 두고 있다. 리턴 링크에 할당되는 라디오 자원은 다수의 단말에 의해 공유된다. 단말은 허브에 CR(capacity request) 메시지를 전송하고, 이 메시지를 받은 허브는 TBTP(terminal burst time plan)를 생성하여 단말에 전송한다. TBTP를 받은 단말은 이를 통해 자신에게 어떤 타임슬롯들이 할당되었는지를 파악하게 된다. 이러한 프로시저는 매 슈퍼프레임

(superframe)마다 실시된다.

단말은 허브에 CR 메시지를 전송하고, 허브는 단말이 요청한 수요를 이용하여 TBTP 테이블을 생성한다. 단말은 이 테이블에 따라 자신에게 할당된 타임슬롯을 기다리게 된다. 단말에게 수신한 TBTP 테이블을 읽을 수 있는 충분한 시간을 제공하기 위해서는 타임슬롯 할당 시간을 최대한 줄일 필요가 있다.

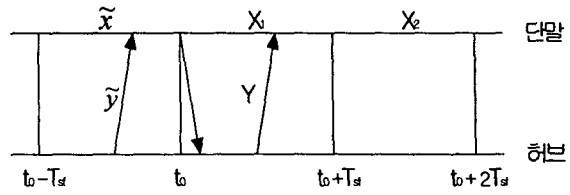
버퍼 크기(buffer size)를  $B$  라 하고,  $t_0$  시점에 버퍼에 대기하고 있는 패킷의 수를  $O_0$  라 하자.

$\bar{x}$  를  $[t_0 - T_{sf}, t_0)$  에 발생한 타임슬롯 수요량이라 하고,  $\bar{y}$  을  $[t_0, t_0 + T_{sf})$  에 사용하도록 할당된 타임슬롯 수라 하자. 또한,  $X_1$  과  $X_2$  를  $[t_0, t_0 + T_{sf})$  와  $[t_0 + T_{sf}, t_0 + 2T_{sf})$  에 발생할 것으로 예상되는 타임슬롯 수요량이라 하고,  $Y$  를  $[t_0 + T_{sf}, t_0 + 2T_{sf})$  에 사용하도록 할당되어야 하는 타임슬롯 수라 하자. 이 때  $t_0 + T_{sf}$  시점에 버퍼에 대기하고 있는 패킷의 수는  $O_1 = \min\{\max\{O_0 + X_1 - \bar{y}, 0\}, B\}$  이고, 따라서  $[t_0 + T_{sf}, t_0 + 2T_{sf})$  기간의 패킷 손실량은  $L = \max\{O_1 + X_2 - Y - B, 0\}$  이다. 이 값은 다음과 같이 정리된다.

- (1)  $O_0 + X_1 - \bar{y} \leq 0$  이면,  
 $L = \max\{X_2 - Y - B, 0\}$
- (2)  $0 < O_0 - X_1 - \bar{y} \leq B$  이면,  
 $L = \max\{X_1 + X_2 - Y - (B + \bar{y} - O_0), 0\}$
- (3)  $O_0 + X_1 - \bar{y} > B$  이면,  
 $L = \max\{X_2 - Y, 0\}$

$f(x_1)$  과  $f(x_2)$  를 각각  $X_1$  과  $X_2$  의 확률 질량함수(probability mass function)이라 할 때,  $[t_0 + T_{sf}, t_0 + 2T_{sf})$  에 사용하도록  $y$  개를 할당하면(즉,  $Y = y$  이면) 패킷 손실량  $L$  의 기대값  $E[L|y]$ 은 다음과 같이 계산되어진다.

$$\begin{aligned}
 E[L|y] &= \sum_{x_1=0}^{\bar{y}-O_0} f(x_1) \times \sum_{x_2=\bar{y}+B}^{\infty} (x_2 - y - B) f(x_2) \\
 &+ \sum_{x_2=y+(B+\bar{y}-O_0)-x_1}^{\infty} \sum_{x_1=\bar{y}-O_0+1}^{B+\bar{y}-O_0} (x_1 + x_2 - y - (B + \bar{y} - O_0)) f(x_1) f(x_2) \\
 &+ \sum_{x_1=B+\bar{y}-O_0+1}^{\infty} f(x_1) \times \sum_{x_2=Y_2}^{\infty} (x_2 - y) f(x_2)
 \end{aligned}$$



[그림 1] 단말과 허브간의 메시지 전송 체계

### 3. 최적 타임슬롯 스케줄링

패킷 손실량 기대값의 총합을 최소화하는 모형 TELP(Total Expected Lost Packets)는 다음과 같이 정형화되어진다.

(TELP)

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \sum_{i \in R} E[L_i | y_i] \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in R} y_i \leq N \\
 & y_i \geq m_i^L, \forall i \\
 & y_i \leq m_i^U, \forall i \\
 & y_i : \text{nonnegative integers.}
 \end{aligned}$$

여기서  $R$  은 단말의 집합을 나타내고,  $y_i$  는 단말  $i$  에 할당되는 타임슬롯 수를 나타내고,  $E[L_i | y_i]$ 는 단말  $i$  에  $y_i$  개의 타임슬롯이 할당되었을 때 패킷 손실량 기대값을 나타낸다.  $N$  은 이용 가능한 총 타임슬롯 수를 나타내고,  $m_i^L$  과  $m_i^U$  는 각각 단말  $i$  에 대한 최소 타임슬롯 할당수와 최대 타임슬롯 할당수를 나타낸다.

TELP는 아래의 PTELP로 변형되어진다.

(PTELP)

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \sum_{i \in R} (\lambda_0 - \sum_{j=1}^{m_i^U} \lambda_j x_{ij}) \\
 \text{s.t.} \quad & \sum_{i \in R} \sum_{j=1}^{m_i^U} x_{ij} \leq N \\
 & x_{ij} \geq x_{i(j+1)}, \forall i \in R, j = 1, \dots, m_i^U - 1 \\
 & x_{ij} = 1, \forall i \in R, j = 1, \dots, m_i^L \text{ (if } m_i^L \geq 1) \\
 & x_{ij} = 0, 1.
 \end{aligned}$$

여기서  $x_{ij}$  는 단말  $i$  에  $j$  개 이상의 타임슬롯이 할당되면 1의 값을 가지고, 그렇지 않으면 0의 값을 가지는 이진정수변수이다.  $\lambda_0$  는 단말  $i$  에 타임슬롯을 0 개 할당했을 때 패킷 손실량 기대값을 나타내고,  $\lambda_j (j \geq 1)$  는 단말  $i$  에 타임슬롯을  $j-1$  개에서  $j$  개로 한 개 증가시켰을 때 패킷 손실량 기대값의 감소분을 나타낸다.

Lemma 1. 모든 단말  $i$  에 대해서  $\lambda_{ij} \geq \lambda_{i(j+1)}$ ,  $j = 1, \dots, m_i^U - 1$  이면, PTELP의 최적해는 다음과 같다. 먼저,  $x_{ij}^* = 1, \forall i \in R, j = 1, \dots, m_i^L$  (if  $m_i^L \geq 1$ ) 로 두고,  $\lambda_{ij}$  (단,  $\forall i \in R, j = m_i^L + 1, \dots, m_i^U$ ) 값들 중에서 값이 큰 순서대로  $N - \sum_{i \in R} m_i^L$  개의  $(i, j)$  에 대해서  $x_{ij}^* = 1$  로 두고, 나머지  $(i, j)$  에 대해서  $x_{ij}^* = 0$  으로 두는 것이다. 또한, TELP의 최적해는  $y_i^* = \sum_{j=1}^{m_i^U} x_{ij}^*$  이다.

Lemma 2. 단말  $i$  에서  $f(x_1)$  과  $f(x_2)$  가 이산일 양분포(discrete uniform distribution)이면,  $\lambda_{ij} \geq \lambda_{i(j+1)}$ ,  $j = 1, \dots, m_i^U - 1$  이다.

프로시저 TS(Timeslot Scheduling)를 통해 PTELP의 해를 구할 수 있다. 단 모든 단말  $i$  에 대해서  $\lambda_{ij} \geq \lambda_{i(j+1)}$ ,  $j = 1, \dots, m_i^U - 1$  이면, 최적해가 구해진다.

**Procedure TS**

```

Step 1. (최소 요구량 할당)
FOR( $\forall i \in R$ )
  IF( $m_i^L \geq 1$ ) {
    FOR( $j = 1; j = m_i^L; j++$ ) ( $x_{ij} = 1, N = N - 1.$ )
  }
Step 2. (잔여 타임슬롯 할당)
FOR( $\forall i \in R, m_i^L + 1 \leq j \leq m_i^U$ ) /단,  $\lambda_{ij}$ 가 큰 것부터/ {
   $x_{ij} = 1, N = N - 1.$ 
  IF( $N = 0$ ) {exit.}
}
FOR( $\forall i \in R$ ) {
  FOR( $1 \leq j \leq m_i^U - 1, j + 1 \leq k \leq m_i^U$ ) {
    IF( $x_{ij} < x_{ik}$ ) ( $x_{ij} = 1, x_{ik} = 0.$ )
  }
}

```

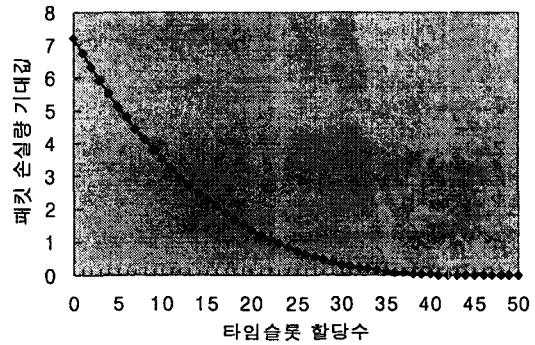
**4. 실험 결과**

여기에서는 3절에서 제시한 최적 타임슬롯 스케줄링의 성능을 실험을 통해 분석한다. 실험에서 단말의 집합  $R = \{1, 2, \dots, 10\}$ , 이용 가능한 총 타임슬롯의 수  $N$  은 100, 각 단말에 대한 최소 타임슬롯 할당량  $m_i^L$  와 최대 타임슬롯 할당량  $m_i^U$  는 각각 0과 50, 버퍼 사이즈  $B$  는 50으로 가정하였다.  $f(x_1)$  과  $f(x_2)$  는 다음과 같이 가정하였다.

$$f(x_1) = f(x_2) = \frac{1}{\bar{X} + 1}, \quad x_1, x_2 = 0, 1, \dots, \bar{X}.$$

여기서  $\bar{X}$  는 단말에 따라 달리 가정하였는데, 단말  $i$  에 대해서  $\bar{X} = B - 2 \times (i + 1)$  로 가정하였다.  $\bar{y}$  와  $O_0$  는 세 가지로 가정하였다. 첫째는 모든 단말에 대해  $\bar{y} = O_0 = 10$  으로 가정하는 것이고(Case 1), 둘째는 모든 단말에 대해  $\bar{y} = 10$  으로 가정하고  $O_0$  는 단말 1, ..., 10 에 대해 각각 5, 6, ..., 14, 15 로 가정하는 것이고(Case 2), 셋째는 모든 단말에 대해  $\bar{y} = 10$  으로 가정하고  $O_0$  는 단말 1, ..., 10 에 대해 각각 15, 14, ..., 6, 5 로 가정하는 것이다(Case 3).

[그림 2]는 Case 1에서 단말 1의 타임슬롯 할당 수 증가에 따른 패킷 손실량 기대값의 변화를 나타낸다. 그림을 통해  $\lambda_{1j} \geq \lambda_{1(j+1)}$ ,  $j = 1, \dots, m_1^U - 1$  가 성립함을 알 수 있다.



[그림 2] 타임슬롯 할당수 증가에 따른 패킷 손실량 기대값의 변화

[표 1]에는 TELP 모형에 대한 실험 결과가 정리되어 있다. [표 1]에서 CFDAMA는 요청한 수요에 비례하여 타임슬롯을 할당하는 CFDAMA 방식에 의해 타임슬롯을 할당했을 때의 결과를 나타낸다. Case 1의 경우 TELP 모형의 최적해는 단말 1에서 10에 각각 23, 20, 17, 14, 11, 8, 5, 2, 0, 0 개의 타임슬롯을 할당하는 것이고, 이 때의 패킷 손실량 기대값의 총합은 7.24이다. 이 값은 CFDAMA 방식에 비해 4.23 만큼 작다.

[표 1] TELP 모형 실험 결과

구분		패킷 손실량 기대값의 총합	각 단말별 타임슬롯 할당수
Case 1	TELP	7.24	23, 20, 17, 14, 11, 8, 5, 2, 0, 0,
	CFDAMA	11.47	모두 10
Case 2	TELP	6.58	19, 17, 15, 13, 11, 9, 7, 5, 3, 1
	CFDAMA	11.28	5, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15
Case 3	TELP	8.31	26, 22, 18, 14, 10, 7, 3, 0, 0, 0
	CFDAMA	11.60	15, 14, 13, 12, 11, 9, 8, 7, 6, 5

## 5. 결론

본 논문에서는 광대역 위성 네트워크에서 각 단말에서의 패킷 손실량의 기대값을 분석하고, 패킷 손실량 기대값의 총합을 최소화 하는 타임슬롯 스케줄링 방법을 제시하였다. 실험을 통해 제시한 방법이 기존 방법에 비해 패킷 손실량 기대값의 총합을 상당히 감소시킴을 보였다.

본 논문에서는 일정 시점에서 성능을 분석하였지만, 보다 실제적인 분석을 위해서는 연속선상에서의 실험이 필요하다. 또한, 이산일양분포뿐만 아니라 보다 다양한 형태의 트래픽에 대한 성능 분석이 필요하다.

## 참고문헌

- [1] ETSI, Digital video broadcasting (DVB): Interaction channel for satellite distribution systems, ETSI EN 301 790 (v.1.2.2), 2000.
- [2] J. Farserotu, and R.A. Prasad, "A survey of future broadband multimedia satellite systems, issues and trends," IEEE Commun. Mag., pp. 128 - 133, 2000.
- [3] T. Le-Ngoc and S.V. Krishnamurthy, "Performance of combined free/demand assignment multiple access scheme in satellite communications," International J. Satellite Commun., vol. 14, pp. 11-21, 1996.
- [4] T. Le-Ngoc, V. Leung, P. Takats, and P. Garland, "Interactive multimedia satellite access communications," IEEE Commun. Mag., vol. 41, no. 7, pp. 78-85, 2003.
- [5] M. Mobbasser and V.C.M. Leung, "A new buffer management scheme for multimedia

terminals in broadband satellite networks," Proc. Hawaii International Conference on System Sciences, 2002.

- [6] J. Neale, R. Green, and A. Landovskis, "Interactive channel for multimedia satellite networks," IEEE Commun. Mag., pp. 192-198, 2001.
- [7] Z. Jiang and V.C.M. Leung, "A predictive demand assignment multiple access protocol for Internet access over broadband satellite networks," Int. J. Satell. Commun. Network, vol. 21, pp. 451-467, 2003.