

Passive Star형 광상호연결망에서 광/전(光/電) 변환을 고려한 최적의 방송 스케줄링

이 상수, 홍 만표, 예 홍진,
아주대학교 정보 및 컴퓨터 공학부

Optimal Transmission Schedules with O/E Conversion Overhead in WDM Passive Star Networks

Sangsoo Lee, Manpyo Hong, Hongjin Yeh
Div. of Information & Computer Engineering, Ajou University

요 약

본 논문에서는 파장분할다중화 방식을 사용하는 광상호연결망에서 송신기의 지연시간과 수신 노드에서의 광/전(光/電) 시간을 동시에 고려하여 각 노드의 패킷 수신 간격이 일정하면서도 전체 방송 주기를 최적화 할 수 있는 송수신 스케줄링 알고리즘을 제안하고자 한다. 즉, N 개의 노드로 구성된 스타(star)형 구조에서 K 개의 파장을 사용하여 일정한 간격으로 패킷을 수신할 경우에 최적의 방송주기를 제시하고 그에 따른 스케줄링 알고리즘을 설명하고 있다.

1. 서론¹⁾

파장분할다중화(Wavelength Division Multiplexing)방식을 사용한 광상호연결망(optical interconnections)을 사용하여 더욱 많은 데이터를 보다 빠르게 전달할 수 있는 시도가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 파장분할다중(Wavelength Division Multiplexing) 방식은 여러개의 독립적인 패킷들을 파장의 수만큼 동시에 전송할 수 있으므로 고속의 네트워크를 구성할 수 있다. 하지만, 일반적으로 네트워크에 연결된 노드의 수에 비해서 사용할 수 있는 파장의 수는 매우 적으므로 파장을 공유하여야만 하는데, 이 때 패킷들에 대한 송수신 스케줄링이 무엇보다도 중요하게 된다.

본 논문에서는 N 개의 노드로 구성된 서로 완전(complete)하게 연결된 광상호연결망에서 K 개의 파장이 사용가능할 때의 문제를 다루고 있다. N 은 K 의 배수이고 모든 패킷은 단위시간(unit time)내에 송수신이 완료된다고 가정한다. 각 노드는 파장조정이 가능한 송신기(tunable transmitter)와 특정 파장으로 고정된 수신기(fixed receiver)로 구성되며, 송신기의 파장을 수신할 노드의 수신기에 고정되어 있는 수신파장과 일치시키기 위한 파장조정시간(tuning delay)을 δ 로 정의한다.

전방송(all-to-all broadcast) 송수신 스케줄링 알고리즘에 대한 연구 결과를 살펴보면 N 이 K 의 배수일 경우에 대해서 Lee 등[1]은 송수신 스케줄링 알고리즘을 제안하였고 그에 따른 최적 방송시간의 주기(cycle length)를 구하였다. 한편,

Yeh[2]등은 이 문제를 일반화하여 임의의 N, K, δ 의 값에 대해서 최적 방송시간을 구하고 항상 이를 만족하는 최적의 송수신 알고리즘을 제안하였다.

이러한 연구 결과는 N, K, δ 만을 고려하여 전체 방송 주기를 최적화하였음에도 불구하고 수신 노드의 입장에서 볼 때 패킷의 도착 간격이 일정하지 않다는 문제를 가지고 있다. 즉, 현실적으로 네트워크에서 패킷 전송은 광네트워크를 통해 이루어지지만 이를 처리하는 처리장치는 전기장치가 사용되고 있다. 따라서, 광/전(光/電), 전/광(電/光) 변환이 발생하게 된다. 이때, 광/전 변환에 따른 오버헤드를 고려하여 수신측이 일정한 간격으로 패킷을 받는다면 광/전 변환에서 발생하는 오버헤드 시간을 확보할 수 있게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 방송 시간의 주기를 구하고 3장에서는 그에 따른 송수신 알고리즘을 설명한다. 그리고 마지막으로 4장에서 결론을 내린다.

2. 파장 조정 시간과 방송 주기

N 이 K 의 배수 즉, $N=CK$ (단, C 는 상수)이고, 수신된 패킷에 대한 광/전(光/電) 변환시간을 안정적으로 확보하기 위하여 각각의 노드에서 일정한 간격으로 패킷이 전달되도록 스케줄한다. 이때, 동일 노드간의 패킷 전송을 제외한 전방송(all-to-all broadcast)을 위한 방송시간의 주기를 구하기 위하여, 노드들에 대하여 0부터 $N-1$ 까지 번호를 붙이고 노드 s ($0 \leq s \leq N-1$)의 수신기가 사용하는 파장 w_i (단, $0 \leq i \leq K-1$)를 $i = s \bmod K$ 로 정의한다. 이 때, 같은 파장을 공유하는 노드들의 집합 $R_i = \{s | s \equiv i \pmod K\}$ 는 다음과 같은 성질을 만족한다.

* 이 논문은 1999년도 정보통신부 대학기초 연구지원사업에 의해 작성되었음.

- (1) $R_i \cap R_j = \emptyset$ (단, $i \neq j$)
- (2) $|R_i| = \frac{N}{K}$
- (3) $N = \sum_{i=0}^{K-1} |R_i|$

수신측이 일정한 간격으로 패킷을 받기 위해서는 각 노드들의 집합 R_i 에 대하여 일정한 크기의 블록 B 가 반복되어야 한다. 따라서, 자기 자신을 제외하고 모든 노드에 전송하여야 하므로 주기는 $N-1$ 의 배수가 되어야 한다. 또한, 블록 구성은 방송 주기를 최소화하기 위해서, 블록 크기에서 노드의 집합의 수 $|R_i|$ 를 뺀 시간이 R_i 원소들 사이에 균등히 배분되어야 하고 이 시간을 간격조정시간(shifting delay)이라고 정의한다.

기존 연구 [1], [2]에 의해서 $\delta \leq \lfloor \frac{(N-1)(C-1)}{K} \rfloor$ 일 경우의 최적 방송주기는 $C(N-1)$ 임이 알려져 있다. 또한, 일정한 간격으로 패킷을 수신하는 경우도 이 방송주기가 최적의 방송주기가 되며, 방송 스케줄링은 다음장의 방송 스케줄링 알고리즘을 따르면 된다. 따라서, 이번 장에서는 $\delta \lfloor \frac{(N-1)(C-1)}{K} \rfloor$ 인 경우에 대해서 설명한다.

[Theorem 1] 방송주기 $C(N-1)$ 이상일 때 방송주기가 $N-1$ 만큼 늘어날 때마다 파장조정시간 δ 은 $\lfloor \frac{N-1}{K} \rfloor$ 또는 $\lfloor \frac{N-1}{K} \rfloor + 1$ 만큼 더 확보할 수 있다.

(증명)

파장조정 시간이 전체 방송주기에 영향을 주지 않을 경우에는 즉, $\delta \leq \lfloor \frac{(N-1)(C-1)}{K} \rfloor$ 인 경우의 B 의 각 블록 크기 $|B|$ 는 C 가 된다. 파장조정시간을 확보하기 위해선 $N-1$ 씩 방송주기가 증가하게 된다. $|B|$ 에서 노드들 집합의 수 $|R_i|$ 를 빼고 난 나머지 시간이 $|R_i|$ 의 배수가 되지 않을 경우에는 $N-1$ 만큼 방송 주기가 증가하고 이 증가분을 K 개의 파장이 같은 크기만큼 파장조정시간으로 사용하면, $\lfloor \frac{N-1}{K} \rfloor$ 만큼의 파장조정시간을 더 확보할 수 있게 된다. 이 때, 자기 자신을 제외하고 전송해야 하기 때문에, B 의 각 블록들이 순환 반복하게 된다. 따라서, 패킷 전송 중간의 간격조정시간 δ 시간이 균등하지 못하기 때문에 $(N-1) - K \lfloor \frac{N-1}{K} \rfloor$ 만큼의 시간은 파장조정시간 확보를 위해 사용되어질 수 없다.

이제, $|B|$ 에서 노드들 집합의 수 $|R_i|$ 를 빼고 난 나머지 시간이 $|R_i|$ 의 배수가 되어 균등하게 분배되는 경우를 알아보자. $((|B|-C) \bmod C) = 0$ 이고 방송주기에서 노드 전송 시간과 파장조정시간, 블록을 구성하기 위한 간격조정시간을 뺀 시간이 파장의 크기보다 같거나 크면, 즉 $|B|(N-1) - K \left(\left(|B| - \frac{|B|-C}{C} \right) + \delta \right) + 1 \geq K$ 이면 파장조정 시간을 1만큼 더 확보할 수 있게 되므로, 총 $\lfloor \frac{N-1}{K} \rfloor + 1$ 만큼의 파장조정시간을 확보할 수 있게 된다. 그러나 방송주기에서 노드 전송시간과 파장조정시간, 블록을 구성하기 위한 간격조정시간을 뺀 시간이 파장의 크기보다 작으면 $\lfloor \frac{N-1}{K} \rfloor$ 만큼의 파장조정시간만을 확보하게 된다. ■

[그림 1]은 알고리즘으로 파장조정시간이 지정되면 수신측이 일정한 간격으로 패킷을 받는 경우의 방송주기를 구하게 된다. 또한 방송주기가 결정되면 파장조정시간의 범위를 구할 수도 있다.

Cycle Length

```

diff ← δ - ⌊ (N-1)(C-1) / K ⌋
B ← C
count ← 0
while (diff > 0) {
  if ((B-C) mod C ≠ 0) then
    diff ← diff - ⌊ (N-1) / K ⌋
  else
    if (|B|(N-1) - K((|B| - (|B|-C)/C) + δ) + 1 ≥ K) then
      diff ← diff - (⌊ (N-1) / K ⌋ + 1)
    else then
      diff ← diff - ⌊ (N-1) / K ⌋
  B ← B + 1
  count ← count + 1
}
cycle length ← ((C + count)(N-1))
    
```

[그림 1] 방송주기 알고리즘

3. 방송 스케줄링 알고리즘

Yeh[2]의 알고리즘을 사용하여 $N=9, K=3, \delta=7$ 인 경우를 최적화한 스케줄링은 [그림 2]와 같다. 여기에서 볼 수 있듯이 수신노드 관점에서 보면 패킷 수신 간격이 불규칙함을 볼 수 있다.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
0	3	6							2	5	8								1	4	7									
1		0	3	6							2	5	8									4	7							
2					0	3	6						5	8										1	4	7				
3	7							0	6						2	5	8									1	4			
4	1	7							0	3	6							2	5	8										
5			1	4	7					0	3	6									2	5	8							
6						1	4	7					0	3									2	5	8					
7	5	8							1	4					0	3	6													2
8			2	5							1	4	7										0	3	6					

(a) 송신노드 관점의 최적 스케줄링

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29		
0		1						3	4		5			6	7		8				0			2		3				
1	4	5		6			7	8													0				2		3			
2		8					0	1				3	4		5	6	7													
3	0		1		2				4	5		6	7		8															
4				5		6				7	8										0	1		2		3				
5	7							0	1		2		3		4														6	
6		0		1		2	3		4		5				7		8													
7	3	4		5		6					8										0	1		2						
8		7								0	1		2		3		4		5											

(b) 수신노드 관점의 최적 스케줄링

[그림 2] Yeh[2]에 의한 최적의 방송 스케줄의 예

이제, 수신자 측면에서 패킷 수신 간격이 일정한 스케줄링을 고려해보자. 앞장에서 정의한 방송주기 알고리즘을 이용하여, 각 블록을 다음과 같이 만든다. 앞에서 설명한 것과 같이 블록 B 의 크기는 $\frac{Schedule\ length}{N-1}$ 가 된다. 이 후, 간격조정시간(shifting delay) $|B|-C$ 개를 블록에 다음과 같이 배치해 준다. 노드들의 집합 R_i ($0 \leq i \leq K-1$) 각각에 대해서 노드 번호를 기준으로 내림차순으로 정렬해준 다음 $|B|-C$ 개의 간격조정시간을 낮은 노드 번호부터 높은 노드 번호 방향으로 순환하며 하나씩 노드 사이에 넣어준다. 이 때, 각각의 R_i 에

대해서 간격조정시간을 처음 삽입하는 위치는 다음과 같이 정한다. 높은 노드번호부터 낮은 번호 방향으로 차례로 0번부터 $C-1$ 번까지 번호를 준다면 노드번호 $(C-1-i) \bmod C$ 와 노드번호 $(C-2-i) \bmod C$ 사이가 되게 한다.

실제 방송 스케줄링을 할 때, 간격조정시간이 가장 원편이나 오른쪽에 위치하고 있으면 파장조정시간으로 사용할 수 있지만, 노드들 중간에 끼이게 되면 파장조정시간으로 사용이 불가능해 버려지는 시간이 되게 된다. 또한, 자기 자신을 제외하고 송수신하기 때문에 블록이 순환하게 되어 노드 사이에 끼는 간격조정시간이 반드시 존재하게 된다. 따라서, 중간에 끼이는 간격조정시간들을 최소화하기 위해서는 위와 같이 블록을 구성해야 한다.

이제, 만들어진 블록 $B_i(0 \leq i \leq K-1)$ 를 B_0 부터 B_{K-1} 로 정렬되어 있을 때, 이를 B_0 부터 좌측순환하여 B_i 의 순서를 변경하여 새로운 블록 NB 를 만든다. 즉, 블록 $B_i(0 \leq i \leq K-1)$ 는 $NB_{(i-k) \bmod K}(0 \leq i \leq K-1)$ 가 된다. 예를 들어, $N=9, k=3, \delta=15$ 일 경우에는 블록 B 에서 블록 NB 로 변할 때 B_1, B_2 번의 순서가 서로 바뀌게 된다.

순서가 재구성된 블록들을 사용하여 순서대로 패킷전송시간을 할당한다. 각 블록의 초기 할당 시간은 0번 블록을 제외하고 첫번째 송신 노드에서 앞 블록이 전송을 마치고난 시간에 $\max\{\delta, B\}$ 를 더한 시간이 된다. 이 후 블록을 순환하며 차례로 스케줄링하면 초기 송수신 스케줄링을 구할 수 있게 된다. 이와 같이 구한 초기 송수신 스케줄링에서 방송주기 이후에 스케줄링된 부분을 시간 흐름 반대방향 맨 앞으로 평행이동하면 곧 방송주기를 만족하는 송수신 스케줄링을 얻을 수 있다.

다음의 [그림 3(a)]는 이 과정을 통해 얻어진 광/전(光/電) 변환을 고려한 최적 스케줄링을 보여주고 있다. 한편, 이 스케줄링에서 새로운 송신노드번호를 수신노드번호로 바꾸어서 보면 [그림 3(b)]와 같은 수신노드측면의 스케줄링을 얻을 수 있다. 이를 보면, 모든 노드가 일정한 간격인 4단위시간 후에 패킷을 받게 되는 것을 볼 수 있다. 여기에서 간격조정시간은 *로 표시하였다. 그리고 [그림 4]는 광/전(光/電) 변환을 고려한 최적 송수신 알고리즘이다.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32				
0	6	3							8	5	*	2							7	*	4	1													
1		0	*	6	3								8	5	*	2					7	*	4												
2					0	*	6	3								8	5	*	2									1	7	*	4				
3	7	*	4						0	*	6						2	8	5	*												1			
4				1	7	*					3	0	*	6												2	8	5	*						
5							4	1	7	*					3	0	*	6														2	8		
6	2	8								4	1	7	*											3	0	*						5	*		
7			5	*	2	8								4	1												6	3	0	*			5	*	
8						5	*	2	8							7	*	4	1													6	3	0	*

(a) 송신노드관점에서 본 스케줄링

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32					
2	6			7			8							0		1			3			5			4				5							
6	0		1			2								3					4					7					8							
7	3			4			5							6					8																	
3	0			1			2							4					5					6					7						8	
8	6					0								1					2																5	
0		1			2				3						4					5					6					7					8	
4			3			5				6						7					8					0				1					2	
5				7			8				0					1						2														6
1				4				5									7																			3

(b) 수신노드관점에서 본 스케줄링

[그림 3] 제안된 알고리즘에 의한 최적의 방송 스케줄의 예

Optimal Transmission Schedule Algorithm

```

// make block
for i=0 to K-1 do
    shifting delay ← |Bi - C
    locate1 ← (C-1-i) mod C
    locate2 ← (C-2-i) mod C
    insert(Bi, locate1, locate2, *)
    shifting delay ← shifting delay - 1
    while (shifting delay > 0) {
        locate1 ← (locate1 - 1) mod C
        locate2 ← (locate2 - 1) mod C
        insert(Bi, locate1, locate2, *)
        shifting delay ← shifting delay - 1
    }

// do schedule
start_time ← 0
time ← 0
block_index ← 0
for j=0 to K-1 do
    for l=0 to N-1 do
        block_magnitude ← |NBl
        while (l ≠ Bl(block_index) and block_magnitude > 0) {
            Schedl(l, time) ← NBl(block_index)
            if (l=0) then start_time ← start_time + 1
            time ← (time + 1) mod schedule_length
            block_index ← (block_index + 1) mod |NB|
            block_magnitude ← block_magnitude - 1
        }
        if (l=0)
            while (Schedl(l, start_time) = *)
                start_time ← start_time - 1
        if (δ > |NBl|) then
            time ← start_time + δ
            start_time ← time
        else
            time ← start_time + |NBl|
            start_time ← time
    }

```

[그림 4] 최적 송수신 알고리즘

4. 결론

파장분할다중화 방식을 사용하는 광상호연결망에서 송신기의 지연시간과 수신 노드에서의 패킷 처리시간을 동시에 고려하여 각 노드의 패킷 도착 간격이 일정하면서도 전체 방송주기를 최적화 할 수 있는 송수신 스케줄링 방안을 제시하고 있다. 또한, 수신자 측면에서 패킷 수신 간격이 일정하므로 광/전(光/電), 전/광(電/光) 변환에 따르는 오버헤드를 최소화 할 수 있으므로 광네트워크의 실제 구현상의 어려움을 해결 할 수 있음에 그 의의가 크다. 본 논문에서 제시한 알고리즘은 실험을 통하여 최적 방송주기와 일치하였으며, 현재 수학적으로 이를 증명하고 있다. 그리고 N 이 K 의 배수가 아닐 경우에 대해서도 연구가 진행 중이다.

5. 참고 문헌

- [1] Sang-Kyu Lee, A. Duksu Oh, Hongsik Choi, Hyeong-Ah Choi, "Optimal transmission schedules in TWDM optical passive star networks", Discrete Applied Mathematics (75)1 pp. 81-91, 1997.
- [2] Hongjin Yeh, Kyubum Wee and Manpyo Hong. "Optimal Scheduling Algorithms in WDM Optical Passive Star Networks", WOCS99, 1999
- [3] H. Choi, H.-A. Choi, and M. Azizoglu, "On the All-to-All Broadcast Problem in Optical Network", IEEE Infocom '97 - 16th Conference on Computer Communications, 1997.