



A Study on the Structure and Performance of the Lightwave Communication Link Using an Avalanche Photodiode

Jae-Yeon Choi*

Department of Information & Communication Engineering, Namseoul University

ABSTRACT

In this paper, we present the new techniques to analyze how to design a lightwave communications link. Specially, we introduce a direct detection, single mode fiber link utilizing a light emitting diode source, and either a pin photodiode or avalanche photodiode receiver, We discuss about a point to point link, even though an optical fiber communications link is usually part of a larger communications network. The optical fiber link has enormous bandwidth. Wavelength division multiplexing is one way of utilizing this bandwidth. Ideally, the purpose is to find a set of parameter values for the various subsystems in the link that will satisfy certain performance objectives. There can be a large number of parameters, each having a range of valid values. Processing power of computers is increasing at a rapid rate, and one way to take advantage of this increased power is to let the computer handle the details of searching for the optimal set of parameter values. The research for an acceptable design is based on multiple simulations, and is a trial and error search if done manually. we give a general method of the modeling approach, the key blocks and parameters of a lightwave communications link.

© 2016 KKITS All rights reserved

KEYWORDS : APD, Light-emitting diode source, WDM, Photodetector, Optical filtering

ARTICLE INFO: Received 18 July 2016, Revised 7 October 2016, Accepted 7 October 2016.

*Corresponding author is with the Department of Information & Communication Engineering, Namseoul University, 91 Daehak-ro Seonghwan-eup Sebuk-gu

Cheonan-si Chungcheongnam-do, 31020, S.KOREA
E-mail address: cjy@nsu.ac.kr

1. 서론

에벌런치 광다이오드를 사용한 광파통신링크에서 광검출기의 특성을 결정지을 때 만나는 주된 문제는 에벌런치 광다이오드 검출기에 대한 것인데[1], 검출기 출력의 통계적 형태가 고정된 형태가 아닌, 전송된 심볼에 의존한다는 것이고, 또한 광파의 분포형태가 해석적 복잡도를 갖는다는 것이다[1][2]. 전송된 파형이 이상적인 이진형태이고, 왜곡없이 전달되었다면, 이러한 복잡함은 해석적으로 극복하지 못할 문제는 아니다. 그러나 실제 광섬유에서, 이러한 이상적인 희망은 더 이상 유지되지 않고, 불확실한 상황에서의 의사결정을 목적으로 확률적 시스템의 모의실험에 이용되는 절차인 몬테카를로 시뮬레이션은 현실적으로 평가성능에 필수적이다[3][4]. 이것은 에벌런치 광다이오드 검출기의 출력을 의사랜덤하게 생성시켜야 한다는 것이고, 광파시스템에서 오류는 일반적으로 매우 적기 때문에 실행시간의 향으로 몬테카를로 모의실험을 표현할 수 있다. 그러므로, 이것은 실행시간 감소 기법의 효과적인 적용의 한 응용형태이다 [3][5]. 우리가 명시적으로 그것을 여기서 다루지 않아도 시스템의 트레이드오프에 대하여 시뮬레이션의 형태로 효과적인 접근방법에 대해 논할 것이다.

광섬유 통신 링크는 어마하게 넓은 대역폭을 갖고 있지만 우리는 논제의 범위를 점대점링크에 한정할 것이다. 파장분할다중화는 이 대역폭을 활용하는 하나의 방법이다[4][6].

이상적으로는 어떤 성능목표를 만족하는 통신 링크에서 여러 가지 부시스템에 대한 파라미터값을 찾는 것이 목표이다. 그렇지만, 이것만이 고유한 세트값을 갖는 것이 아니고, 각각 유효값의 범위를 가지는 수많은 파라미터들이 있다. 최근 빠른 속도로 컴퓨터의 처리능력이 증가하고 있으며, 이

런 증가하는 능력의 장점을 이용하는 하나의 방법으로 컴퓨터가 파라미터값의 최적의 세트를 찾는 것이다[7-9]. 용인되는 설계에 대한 탐색은 다중의 시뮬레이션에 기초하고, 수작업으로 수행시에는 시행착오탐색으로 행하여야 한다. 비트오율과 같은 몬테카를로 시뮬레이션 실행의 출력은 잡음에 의해 손상되기 때문에, 전통적인 최적화기법은 이 탐색을 자동화하는 데는 사용하지 않는다. 평균장어닐링(Mean field annealing : MFA)은 몬테카를로 시뮬레이션 출력의 통계적 잡음에 의해 혼동되지 않는 효율적인 최적화 기법이다. MFA는 또한 수많은 파라미터를 다룰 수 있고, MFA와 연동하여 동작하는 자동화된 설계 기법은 간단한 비선형 통신 링크에 대하여 최적의 송수신 펄스 모양을 찾는 데 사용되어 왔다[9][10]. 설계과정의 자동화하는 데 관하여 좀더 언급할 내용들이 있지만, 이것은 논점에서 약간 벗어나기 때문에 더 이상 언급하지는 않는다. 모델링접근법에 대하여 우리는 광파통신링크의 키블럭과 파라미터들에 집중하여 논하도록 한다. 광파통신링크에서 비트오율은 대체적으로 매우 낮기 때문에 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 광파 통신 링크의 정확한 비트오율평가를 얻는 것은 긴 실행시간을 초래한다. 더구나 부가적으로 광파 링크는 어떤 고유한 모델링시도를 취하는 데, 우리는 한 모델을 개발하는 데 있어서 세세하게 계산적 효율 문제와 모델링기법을 소개한다. 그리고, 시뮬레이션 결과를 소개하므로써 사례연구를 도출하고, 설계과정에서 그것들을 활용하도록 한다.

2. 광파 통신 링크의 구조 설계

2.1 블록 다이어그램

여기서는 디지털 광파 통신 링크의 자세한 블록도

를 시뮬레이션에 기초한 해석에 맞는 블록도로 감소시키는 과정을 제시한다. 직접 검출의 광섬유 통신 링크의 서브시스템 레벨의 블록도는 <그림 1>과 같다. 이 예의 전체에서 이진 신호를 다루고, 논의된 기법들은 다중레벨신호에 응용가능하다. 최고위 레벨에서는 송신기, 광섬유, 수신기의 세 개의 블록이 있다.

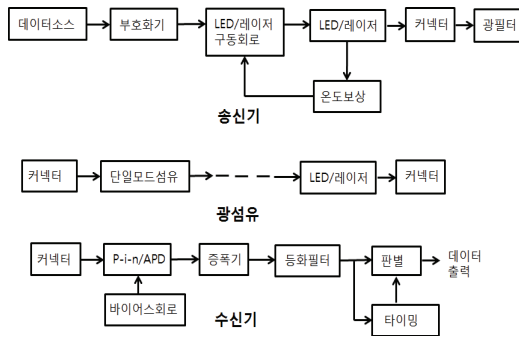


그림 1. 광파 통신 링크의 서브시스템 블록도
Figure 1. Subsystem level block diagram of a lightwave communications link

송신기는 동작 파장이 850, 1300, 또는 1550 nm의 세가지중 하나의 영역에서 LED나 반도체 레이저를 이용한다. RF 시스템과 유사하게 광시스템의 효율적인 시뮬레이션 모델은 10^{14} Hz 정도의 광 송파의 재생을 요구하지는 않는다. 유도매체를 따라 이동하는 빛의 가장 일반적이고 정확한 모델은 맥스웰방정식에 기초한다. 광섬유에서의 손실 메커니즘은 Rayleigh산란, 분자 격자 흡수에 근거를 두고 있고, 기계적이고 분자레벨의 양자모델을 포함하는 광파통신링크의 시뮬레이션모델은 효율적이지 못하다. 블록사이의 상호작용 때문에 블록간의 비분리성을 두기위하여 커넥터/splice 블록을 광파통신 시스템에 여러 개 두었다. 레이저와 커넥터와 광섬유는 격리된 모델이 이상적이나[11][12], 실제적으로는 광의 반사를 고려해야 하기 때문에 격리된 모델로 간주하는 것은 현실적이지 못하다[13].

오히려 레이저나 광섬유 모델은 반사된 신호의 영향을 포함하도록 수정되어야 하는데, 반면에 LED 송신기는 이러한 반사를 허용하지 않고, 이런 경우에는 커넥터를 감쇄기처럼 설계하는 것이 적합하다. 여러 가지 라인코딩 구조를 채용하여 대역폭과 신호의 통계적 성질을 선택할 수도 있다. 변조된 광신호는 커넥터, 단방향 결합기 또는 광필터를 포함하는 광부품들을 통과한다. 광필터는 파장분할 다중화를 이용하여 각각의 유저를 구분하는데 사용된다[14-17].

광신호를 전기적 신호로 바꾸는 것은 p-i-n다이오드나 에벌런치 광다이오드(APD, Avalanche photodiode)를 이용하여 수행한다[18]. 이 소자에서 광검출잡음은 비부가적이고, 비가우시안이다. 광검출기 다음의 소자들은 타이밍정보를 추출하기전에 신호를 증폭하고, 필터한다. 여과된 신호는 어떤 신호레벨이 보내졌는지를 판별하기위해 스톨레쉬홀드와 비교결정을 하게 된다.

복잡도를 줄여서 재구성한 시뮬레이션 블록도가 <그림 2>에 나와 있다.

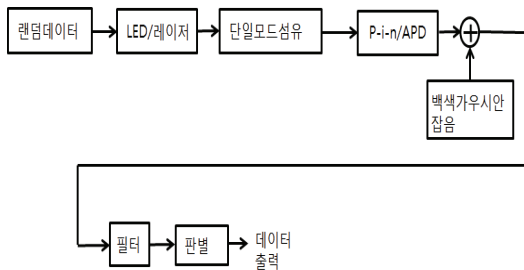


그림 2. 광파 통신 링크의 모의실험 블록도
Figure 2. Simulation block diagram of the lightwave communications link

이 모델에서는 여러 가지 고려되어야할 파라미터들이 있는데, 랜덤데이터는 데이터율(data rate), 랜덤시드(random seed)등을 고려해 주어야 하고, LED/레이저는 on/off시간과 스펙트럼, 전력과 전류

의 특성을 고려하여야 한다. 단일모드섬유에서는 데이터분산과 데이터손실, 파장을 고려해야하고, p-i-n/APD는 이온화율과 평균이득을 감안해야한다. 백색잡음은 분산과 랜덤시드, 필터는 대역폭과 차수 및 형태, 판별기는 스레쉬홀드레벨과 표본화시간을 각각 반영하도록 한다. 증폭기의 열적잡음은 추가적인 가우시안 잡음에 포함하도록 한다. 이 실험에서 비트오율(BER)은 최적의 표본화 시간에서 수신신호를 표본화함으로써 얻는다.

2.2 광검출기 모델링

광검출기의 양자효율은 각 입사 광자당 생성되는 전기적 전하 반송자(정공전자쌍)의 평균비율이다. 정공전자쌍은 p-i-n다이오드에 임펄스형태의 출력전류를 만들어 낸다. 애벌런치 광다이오드에서 충돌과 이온화는 일차적인 전하반송자에 추가하여 2차적인 전하반송자를 생산한다. 이것은 일차반송자와 2차반송자의 합에 비례하는 면적에 출력 전류 임펄스를 만들어 낸다. 각 디바이스 사이에 천이시간은 무시한다. 시뮬레이션 모델의 정확성에 근거한 표본화 영향은 반드시 고려하도록 한다. 실제적인 광검출기에서 광자의 도착은 포아송과정(Poisson Process)인데, 이는 작지만 충분한 시간간격에 대하여 각 구간은 하나의 광자를 포함하거나 광자를 포함하지 못한 다는 것을 의미한다. 따라서 샘플간의 시간 T_s 를 작은 값으로 정하는 것은 실용적이지 못하다. 좀더 현실적인 T_s 값은 그 구간 안에 수십에서 수백의 전하반송자가 포함되도록 결정한다. 그러므로 광검출기의 시뮬레이션 모델은 전하반송자의 수에 비례하는 면적에서의 임펄스로 구성되도록 한다. 시뮬레이션의 대역폭을 정하는 것은 랜덤변수 생성기 출력의 대역폭을 결정한다. 실제 시스템에서 광검출기의 출력은 수신기에서 판별과정 이전에 필터된다.

3. 시스템 설계

3.1 설계 파라미터의 결정

LED소스에 초당 45, 140, 560 Mb/s의 데이터율에 대하여 실험을 진행하도록 하는데, 양자효율(quantum efficiency)이 0.8에 대하여 p-i-n다이오드와 애벌런치 광다이오드를 채택하였다. 수신기의 필터는 364MHz에서 3dB 대역폭을 갖는 이차 버터워쓰 필터로 하였다. 필터 입력에서 열적 백색가우시안 잡음의 잡음전력스펙트럼밀도는 MHz당 $2 \times 10^{-6} (\mu A)^2$ 로 하면, p-i-n 광검출기를 고려할 때 기준점에서 4×10^{-9} 의 비트오율에 대하여 140 Mb/s에서 $-40 dBm$ 의 감광도를 갖는다. 열적잡음의 전력스펙트럼밀도가 일정하다고 간주하고 데이터율과 광검출기에 독립적이라고 하면, 이 값은 실험 전반에 걸쳐서 사용되어진다. p-i-n 광검출기에 암전류(I_d)는 $5 nA$ 이다. 애벌런치 광다이오드를 사용할 때는 평균이득 G 와 이온화율 k , 암전류를 명시하여 사용한다. 소스 스펙트럼 데이터는 광섬유에 입력된다.

3.2 파장분할 다중화와 광필터링

많은 광섬유 링크는 증설시 저비용의 목적과 가능한 대역폭을 최대한 사용하기위하여 파장분할다중화를 이용한다. 광스펙트럼은 파장분할다중화 필터링 디바이스와 광섬유 감쇠특성의 자연적 필터링으로 얻을 수 있는 데, 필터링양과 광섬유의 분산은 서로 트레이드오프의 관계이다.

부품의 노화와 온도의 변동은 LED의 중심파장을 쏠리게 하는 원인이 된다. 이러한 움직임은 전체적인 링크성능에 좋지않은 영향을 준다. 온도보상을 하지않은 LED는 $60^\circ C$ 의 주변 온도변화에 대

하여 30nm의 변화를 주는데 이에따라 온도보정을 하거나 온도변화에 해당하는 양만큼의 링크양을 증가하여야 한다. 멀티플렉서와 디멀티플렉서에 파장분할다중화 필터들을 추가하여 링크의 비트오율성능을 개선할 수 있다. 이러한 필터의 특성을 <그림 3>에 나타내었다. 이 경우에 부가적인 감쇠의 음(-)의 영향으로 스펙트럼구조의 분산을 줄이는 이점을 얻을 수 있다.

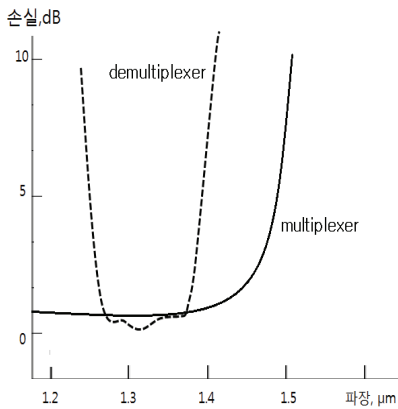


그림 3. 파장분할다중화장치의 스펙트럼 특성
Figure 3. Spectral characteristics of Wavelength division multiplexer devices

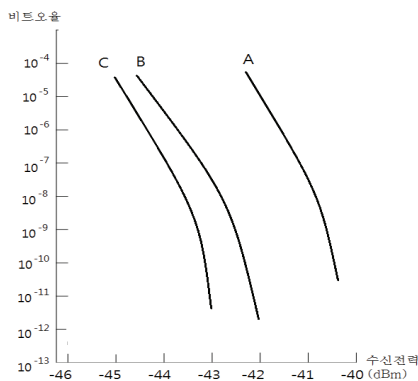


그림 4. 애벌런치포토다이오드의 수신 성능
Figure 4. Avalanche photodiode receiver performance

<그림 4>는 세 개의 서로다른 애벌런치 포토다이오드에 대한 비트오율 곡선을 보여준다.

데이터율은 560 Mb/s이고, 파장은 1.33 μm, 애벌런치포토다이오드를 사용하였으며, 양자효율은 0.8이고 A,B,C곡선 모두 이득은 5이다. A곡선은 게르마늄 애벌런치포토다이오드이며, 이온화율은 0.8, 암전류는 100 nA이다. B곡선은 게르마늄 애벌런치포토다이오드이며, 이온화율은 0.8, 암전류는 5 nA이다. C곡선은 인듐갈륨비소 애벌런치포토다이오드이며, 이온화율은 0.1, 암전류는 5 nA이다.

타이밍 지터 영향을 분석하기위해 수신기에서 타이밍 옵셋의 효과를 <그림 5>에 나타내었다.

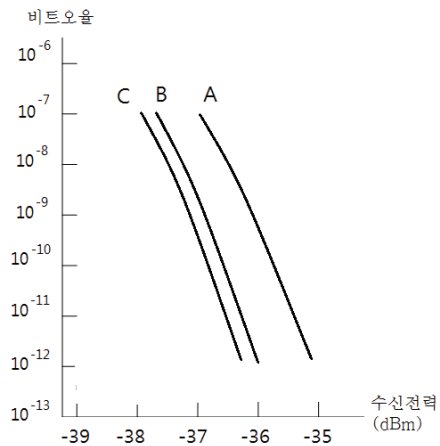


그림 5. 여러 타이밍 옵셋에 대한 애벌런치포토다이오드의 수신 성능
Figure 5. Avalanche photodiode receiver performance for different timing offsets

데이터율은 560 Mb/s이고, 파장은 1.33 μm, p-i-n 다이오드를 사용하였으며, 양자효율은 0.8이다. C곡선은 최적 샘플링의 경우이고, A곡선은 최적샘플링의 0.25 T 샘플링이고, B곡선은 최적샘플링의 0.1 T 샘플링이다.

4. 결 론

에벌런치 포토 다이오드의 파라미터는 평균이득, 이온화율, 암전류 값인데, 이것들은 사용된 반도체 재료와 기하학적 구조, 디바이스의 도핑에 따라 결정된다. 가장 최적의 성능은 인듐갈륨비소로 된 에벌런치 포토 다이오드일 때임을 알 수 있었고, 저 이온화율과 저 암전류값을 갖음을 확인하였다. 게르마늄 포토다이오드의 경우는 다른 것들에 비해 잡음성능이 좋지 못하고, 큰 암전류는 큰 이온화율보다 더 성능에 좋지 못하다. 타이밍지터의 영향을 보면 실제 시스템에서 최적의 포인트에 타이밍이 있는 것도 아니고, 고정오프셋에 있는 것도 아니다. 복구된 타이밍신호의 랜덤변화를 설명할 수 있는 것은 타이밍신호가 주어진 오프셋에 의해 벗어나는 확률을 실험하여 결정된 비트오율 조정하는 것이다.

References

- [1] W. D. Rumlmer, *A new selective fading model: Application to propagation data*, Bell Syst. Tech. Journal, Vol. 54, No.5, pp.1307-1371, 1979.
- [2] M. A. Soto, X. Angulo-Vinuesa, S. Martin-Lopez, S. H. Chin, J. D. Ania-Castañon, P. Corredera, E. Rochat, M. Gonzalez-Herraez, and L. Thévenaz, *Extending the real remoteness of long-range brillouin optical time-domain fiber analyzers*, Journal of Lightwave Technology, Technology Vol. 32, Issue 1, pp. 152-162, 2014.
- [3] W. Belardi, and J. C. Knight, *Hollow antiresonant fibers with low bending loss*, Optics Express Vol. 22, Issue 8, pp. 10091-10096, 2014.
- [4] P. Balaban, *Statistical model for amplitude and delay of selective fading*, AT&T Tech. Journal, Vol. 64, No.10, pp. 2525-2550, 1985.
- [5] W. Belardi, and J. C. Knight, *Hollow antiresonant fibers with reduced attenuation*, Optics Letters Vol. 39, Issue 7, pp. 1853-1856, 2014.
- [6] D. P. Stapor, and P. Hayes, *On the number of symbols processed in quasianalytic communications link simulation*. Presented at 2nd IEEE International Workshop on Computer Aided Modeling, Analysis and Design of Communication Links and Networks, University of Massachusetts, Amherst, MA, pp. 12-14, Oct. 1988.
- [7] N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A. E. Willner, and S. Ramachandran, *Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers*, Science, Vol. 340, Issue 6140, pp. 1545-1548, Jun. 2013.
- [8] J. G. Proakis, *Digital communications*, 2nd ed., McGraw-Hill, New York, 1989.
- [9] H. H. Refai, J. J. Sluss Jr., and H. H. Refai, *The transmission of multiple RF signals in free-space optics using wavelength division multiplexing*, Proc. SPIE 5793, Atmospheric Propagation II, 136, 2005.
- [10] P. Balaban, H. P. Corrales, and V. K. Prabhu, *Statistical performance estimation of digital radio over fading channels*, Conference Record of the IEEE Int. Conf. on Commun., ICC '91, Denver, Jun. 1991.
- [11] M. C. Wu, O. Solgaard, and J. E. Ford, *Optical MEMS for lightwave communication*, Journal of Lightwave Technology, Vol.24, Issue: 12, pp. 4433-4454 Dec. 2006.

- [12] D. Renker, *Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 567, Issue 1, pp. 48-56, 2006.
- [13] R. A. Nobakht, D. E. V. d. Bout, J. K. Townsend, and S. H. Ardalan, *Optimization of transmitter and receiver filters for digital communication systems using mean field annealing*, IEEE J. Selected Areas Commun. Vol.8, No.8, pp. 1472-1480. 1990.
- [14] J. K. Townsend, and K. S. Shanmugan, *On improving the computational efficiency of digital lightwave link simulation*, IEEE Trans. Commun. 38, pp. 2040-2048, 1990.
- [15] A. E. Elrefaie, J. K. Townsend, M. B. Romeiser, and K. S. Shanmugan, *Computer simulation of digital lightwave links*, IEEE Journal of Selected Areas Communication, Vol. 6, No. 1, pp. 94-105, 1988.
- [16] W. T. Barnett, *Multipath propagation at 4, 6, and 11 GHz*, Bell Syst. Tech. J. Vol. 51, No. 2, pp. 321-361. 1972.
- [17] S. W. Tyler, J. S. Selker, M. B. Hausner, C. E. Hatch, T. Torgersen, C. E. Thodal, and S. G. Schladow, *Environmental temperature sensing using Raman spectra DTS fiber-optic methods*, Water Resources Research, Vol. 45, Issue 4, Apr. 2009.
- [18] P. P. Webb, R. J. McIntyre, and J. Conradi, *Properties of avalanche photodiodes*, RCA Rev. 35, pp. 234-278, 1974.

애벌런치 광다이오드를 이용한 광파통신 링크의 구조 및 성능 연구

최재연

남서울대학교 정보통신공학과

요 약

본 논문에서는 광파 통신 링크를 설계하는 방법을 분석하기 위한 새로운 기술을 제시하고, 특히, p-i-n 다이오드 또는 애벌런치 포토다이오드와 같은 광투사 다이오드를 이용한 직접 검파, 단일 모드 광섬유 링크 소개하고, 성능 및 비트오율을 파라미터에 따라 분석한다. 대부분의 통신망에서 광섬유 통신링크가 사용되고 있고, 광섬유링크는 넓은 대역폭을 갖고 있다. 이러한 대역폭을 이용하기 위한 파장분할 다중화에 대하여 분석하고, 여러 파라미터 집합으로 다양한 서비스 시스템의 적절한 값들을 찾아내어 목표한 성능을 만족시키도록 한다. 유효값의 범위에 따라 많은 파라미터값을 갖지만, 컴퓨터의 처리 능력이 급속하게 증가하고 있으며, 증가 된 능력을 사용하는 한 가지 방법은 컴퓨터가 매개 변수들의 최적의 조합을 검색하여 세부 사항을 처리하는 것인데, 애벌런치 포토 다이오드의 파라미터들 즉 평균이득, 이온화율, 암전류 값에 따른 비트오율과 p-i-n 다이오드에서 샘플링주기에 따른 비트오율분석을 통하여 광파통신링크의 성능을 분석한다.



Jae-Yeon Choi received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electronic communication engineering from Hanyang University, Seoul Korea in 1985, 1987 and 1998, respectively. From 1987 to 1989, he was with Samsung Advanced Institute of Technology. From 1989 to 1992, he was with LG Information & Communication Research Center. Since 1996 he has been with Department of Information & Communication, Namseoul University, Korea, where he is now a professor. E-mail : cjy@nsu.ac.kr