

최적의 Bluetooth GFSK 신호 수신을 위한 Viterbi 기반 저복잡도 FSM 설계

권택원^{1*}, 이규만²

¹건양대학교 융합IT학과, ²건양대학교 기업소프트웨어학부

Design of Low-Complexity FSM based on Viterbi for Optimum Bluetooth GFSK Signal Receiver

Taek-Won Kwon^{1*}, Kyu-Man Lee²

¹Department of Convergence Information Technology, Konyang University,

²Department of Enterprise Software, Konyang University

요약 Bluetooth는 다양한 소비자 전자 장치 간의 연결 매체로 널리 사용되는 공통 무선 기술이다. Bluetooth 수신기는 주로 신호 대 잡음비 성능 개선을 위해 일반적으로 Viterbi 알고리즘을 채택하지만 전송단에서의 irrational modulation index(무리수 변조 지수)로 수신단의 지속적인 탐색 및 추정이 필요하며 이를 위한 복잡한 하드웨어와 계산을 요구한다. 본 논문에서는 이러한 복잡도 문제를 해결하기 위해 비동기 최대 우도 추정(MLE, Maximum-likelihood Estimation) 기반 8-state Viterbi FSM을 제안한다. 본 논문에서 제안한 최적의 Viterbi FSM은 전송단에서의 변조 지수에 대한 사전 정보 및 추정이 필요 없으며 GFSK(Gaussian Frequency Shift Keying) 심볼 검출이 가능하다. 제안한 알고리즘에 대한 성능은 HV1/HV2 패킷을 사용하여 평가하였으며, 시뮬레이션 결과는 DD(Decision Direct)와 같은 이상적인 접근 방식과 비교하여 10^{-3} BER에서 약 2dB 성능 향상을 보여주었다.

주제어 : GFSK, MLSE(Maximum-Likelihood Sequence Estimation), non-coherent, Viterbi

Abstract Bluetooth is a common wireless technology that is widely used as a connection medium between various consumer electronic devices. The Bluetooth receiver usually adopts a Viterbi algorithm to improve signal-to-noise ratio performance, but requires complex hardware and calculations for continuous search and estimation for the irrational modulation indexes at the transmission. This paper proposes a non-coherent maximum estimation based 8-State Viterbi FSM to solve these complexity problems. The proposed optimal Viterbi FSM can detect Gaussian frequency-shift keying symbol without any prior information and estimation for the modulation indexes. The HV1/HV2 packets are used for the estimation of the proposed algorithm and the simulation results have shown performance improvements with about 2dB for 10^{-3} BER compared to other ideal approaches such as decision direct method.

Key Words : GFSK, MLSE(Maximum-Likelihood Sequence Estimation), non-coherent, Viterbi

*This paper was supported by Konyang University Research Fund in the second half of 2020.

*Corresponding Author : Taek-Won Kwon(twkwon@konyang.ac.kr)

Received November 26, 2021

Revised December 8, 2021

Accepted January 20, 2022

Published January 28, 2022

1. 서론

GFSK(Gaussian Frequency-shift Keying)는 Bluetooth 5.0 및 Bluetooth low-energy (BLE)[1]을 포함하는 간단하고 비용 효율적인 수신기 구조를 위해 널리 사용되는 변조 방식이다. 차동 위상 검출(differential phase detection)은 쉬운 구현 및 저비용의 관점에서 널리 사용되지만, 통신 범위에 제한이 있으며 링크 품질에 대해 성능 저하 문제가 발생될 수 있다. 이러한 수신 성능 문제는 단순화된 MAP(Maximum a posteriori) [2] 혹은 Viterbi 알고리즘을 사용하여 개선 해결책이 제시되었다[3]. 그러나, 이러한 제안은 coherent sequence detection이 필요하며, 전송단의 변조 지수에 대한 사전 정보를 요구하는데[4] 이러한 검출은 실시간으로 위상 벡터를 계산해야 되기 때문에 저비용 설계에 적합한 방식이 아니다. 또한, Bluetooth의 변조 지수는 0.28 ~ 0.35 무리수 사이에서 실시간으로 가변되는데 이에 대응하기 위한 Viterbi Trellis는 변조 지수 추정을 위해 매우 큰 하드웨어가 요구되어 구현에 어려움이 있다. 따라서, 실시간 변조 지수 추정을 위해 이진 연속 위상 변조(CPM, continuous phase modulation) 검출 알고리즘을 사용한 최적 수신기 구조가 제안되고 있지만 여전히 개방된 문제이다[6,7].

본 논문의 주요 아이디어는 전송된 시퀀스가 현재와 이전 심볼간의 위상차로 재정의될 수 있는 점을 활용하여 수신단에서 전송된 심볼간의 주기에서 현재와 이전의 위상차를 검출하고 송신단에서의 심볼 전송 상태 다이어그램을 설계할 수 있다. 이러한 상태 다이어그램은 8-state FSM으로 구현 가능하며 이를 위한 Viterbi Trellis를 간단한 구조로 설계할 수 있다. 제안한 알고리즘은 전송단에서의 실시간 가변 변조 지수로 인한 수신단에서의 구현 복잡성을 극복할 수 있으며, 기존 DD(decision direct) 기법에 비해 향상된 성능을 보여 주었다.

2. 신호 모델

GFSK는 이진 연속 위상 변조 (CPM, continuous phase modulation)[8]에 기반한 신호이다. CPM 방식에서는 신호 각주파수 $\omega(t)$ 가 주파수 펄스 모양 $g(t)$ 의 진폭 변조에 의해 식 (1)에서와 같이 n -th 심볼

a_n 의 스트림으로 생성된다. 여기에서 h 는 변조 지수인 scaling factor이며, T 는 전송 신호 간격이다.

$$\omega(t) = 2\pi \cdot h \cdot \sum_k^{+\infty} a_k \cdot g(t-kT) \quad (1).$$

위상차 $\varphi(t)$ 는 식 (1)에서의 각주파수 $\omega(t)$ 를 적분하여 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \int_{-\infty}^t \omega(\tau) \cdot d\tau \quad (2). \\ &= 2\pi \cdot h \cdot \sum_k^{+\infty} a_k \cdot \int_{-\infty}^t g(\tau-kT) \cdot d\tau \end{aligned}$$

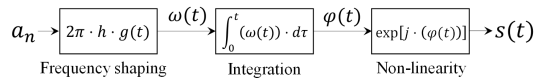


Fig. 1. The GFSK modulator.

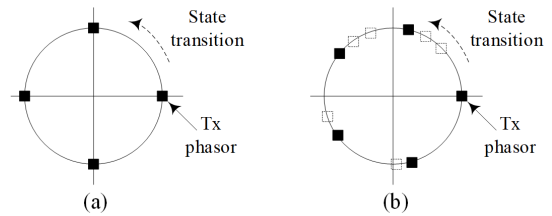


Fig. 2. Possible phases of the GFSK modulation according to the rational and irrational modulation index. (a) Rational modulation index of 0.5. (b) Irrational modulation index 0.28~0.35.

전송 심볼이 $\{-1, +1\}$ 로 제한된 정규화된 위상 펄스를 갖는 이진 변조의 경우, 전송 심볼 a_n 은 $\pm h \cdot \pi$ radian만큼 시프트 위상을 갖는다. 연속 위상 변조 베이스밴드 (CPM baseband)는 $s(t) = \exp[j \cdot \varphi(t)]$ 로 생성되며, GFSK 신호에 대한 주파수 펄스 $g(t)$ 는 식 (3)과 같이 가우시안 펄스로 얻어진다.

$$g(t) = \frac{1}{4T} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{t+T/2}{\sigma T \sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{t-T/2}{\sigma T \sqrt{2}} \right) \right] \quad (3),$$

여기서 $\sigma = \sqrt{\ln 2} / 2\pi K_{BT}$ 이며, $\operatorname{erf}(x)$ 함수의 적분은 오류 함수를 나타낸다. K_{BT} 는 변조된 신호가 차지하는 정규화된 대역폭이다[8]. 일반적인 GFSK 변조

기는 Fig. 1과 같이 제시될 수 있다. 전송된 심볼 a_n 는 순간 각주파수에 의해 변조된다. 이어서 식 (2)에서와 같이 적분에 의해 위상으로 변환되는데 위상 송신기는 Fig. 2-에서와 같이 변조 지수 $h=0.5$ 과 $h=0.28 \sim 0.35$ [1]를 고려할 수 있다. Fig. 2-a에 같이 변조 지수가 고정된 Bluetooth low-energy(BLE)의 경우, 위상 송신기는 고정된 네 개의 값을 갖는데, 0이 연속으로 전송된다면, 송신 심볼은 항상 네 개중 가능한 위치 하나에 매핑된다. 이러한 가정에서는 Viterbi 구조를 사용한 최대 우도 시퀀스 추정(MLSE, maximum likelihood sequence estimation)를 적용함으로써 GFSK 신호를 최적의 성능으로 검출할 수 있다[9].

그러나 Fig. 2-b는 무리수를 갖는 변조 지수에 대해 가능한 모든 전송 위상을 나타낸 것인데, 심볼 0가 연속적으로 전송되면 전송 벡터는 2π 만큼 위상 변이로 임의의 위상을 가질 수 있다. 따라서 송신단에서의 변조 지수에 대한 정보를 수신단에서 주어진더라도 송신기 상태 모델을 추정하는데 복잡한 Viterbi 구조가 요구된다. 예를 들면, Fig. 2-b에서와 같이 변조 지수가 $0.315 = 63/200$ 인 경우 Viterbi 디코더의 복잡성은 각 심볼 주기별로 400-state를 처리해야 한다. 이러한 무리수 (0.28~0.35) 변조 지수에 대한 최적의 수신단 설계를 위해 위상차 FSM에 기반한 MLSE를 3장에서 제안한다.

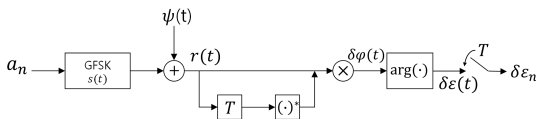


Fig. 3. The continuous time GFSK transceiver with differential detection.

3. 수신기 제안

3.1 가우시안 위상 궤도에서의 차등 위상 검출

GFSK 신호에 대한 일반적인 복조 방식은 심볼 전송 T 에 의한 신호간의 위상 시프트를 측정하는데 Fig. 3과 같이 차등 위상 검출(differential phase detection) 기법을 사용한다. Fig. 3에서 수신기 필터와 백색 가우시안 노이즈(AWGN)로 인한 신호 왜곡을 무시한 경우, 심볼주기에 의한 신호 사이의 이상적

인 위상 시프트 $\delta\varphi(t)$ 는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \delta\varphi(t) &= \arg r(t) \cdot r(t-T)^* \\ &= 2\pi \cdot h \cdot \sum_k^n a_k \cdot [q(t-k \cdot T) - q(t-(k+1) \cdot T)], \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 $q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) \cdot d\tau$ 이며 AWGN $\psi(t)$ 를 고려하면 신호간의 위상 시프트는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$\delta\epsilon(t) = \arg r(t) \cdot r(t-T)^* = \delta\varphi(t) + \psi(t). \quad (5)$$

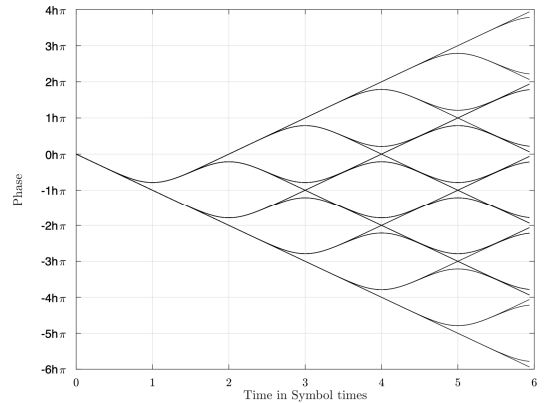


Fig. 4. The phase trajectories of signals modulated with binary GFSK.

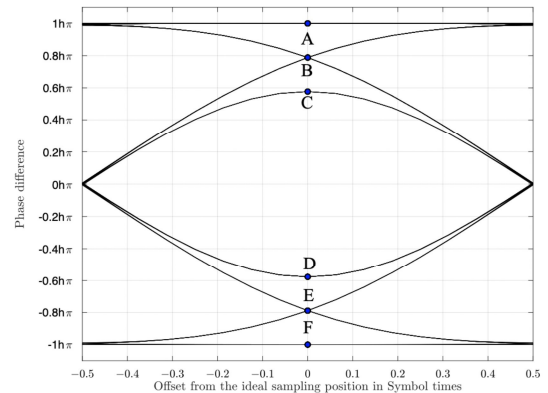


Fig. 5. The eye diagram of the adjacent symbols due to GFSK phase trajectories.

식 (4)와 (5)로부터, GFSK 위상 펄스 $q(t)$ 에 대한 위상 궤도의 형상은 Fig. 4와 같이 그려 질 수 있다. 심볼간에 위상 시프트는 $\pm h \cdot \pi$ 와 동일하거나 부분 응답 시스템에서의 특성으로 시프트가 누적된다. Gaussian 위상 펄스 $q(t)$ 는 전송 심볼 $a_n = \pm 1$ 가 차동 검출기 출력에서 $\delta\epsilon_n = \pm h \cdot \pi$ 위상 점프가 발생하면 L 심볼에 영향을 줄 수 있다. 예를 들면, $L = 3$ 인 Bluetooth의 경우 2개의 이전 심볼, a_{n-1} 및 a_{n+1} 는 a_n 의 심볼에 의해 위상 shift가 발생된다. Fig. 5에서와 같이 $\{A, B, C\}$ 는 $\{+h\pi, +0.7886h\pi, +0.5772h\pi\}$ 이며, $\{D, E, F\}$ 는 $\{-0.5772h\pi, -0.7886h\pi, -h\pi\}$ 가 되어 임펄스 반응의 대칭으로 C, B, A 각각에 대칭된다. Fig. 5의 eye diagram은 식 (4)와 (5)에 의해서 유도될 수 있다.

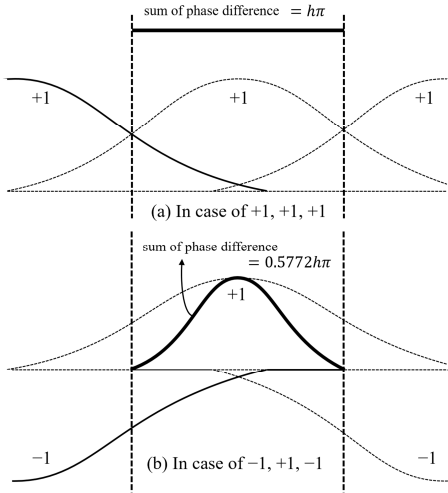


Fig. 6. The sum of phase difference in 3-consecutive digits.

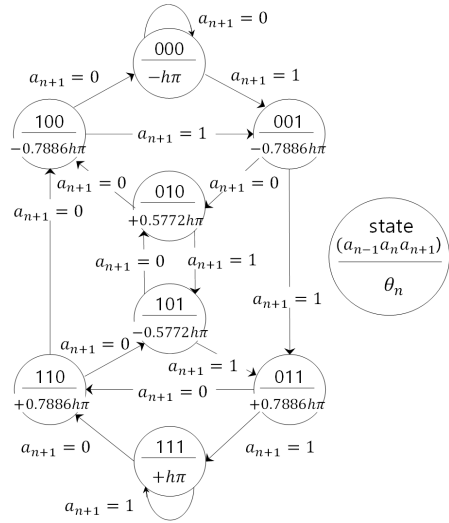


Fig. 7. The proposed phase difference FSM.

3.2 MLSE를 위한 위상차 FSM

Fig. 5의 $\{A, B, C\}$ 혹은 $\{D, E, F\}$ 3개의 값을 기반으로 3개의 심볼, a_{n-1}, a_n, a_{n+1} 및 현재와 이전 심볼간 위상차 $\theta_n = \varphi_n - \varphi_{n-1}$ 를 기반으로 위상차 FSM을 설계할 수 있다. 3개의 심볼 a_{n-1}, a_n, a_{n+1} 이 $+1, +1, +1$ 로 전송되면 Fig. 6-a에서와 같이 위상차 합은 GFSK 위상 펄스로 인해 $+h\pi$ 가 된다. 또한, $-1, +1, -1$ 로 심볼 a_{n-1}, a_n, a_{n+1} 가 전송되면 Fig. 6-b에서와 같이 위상차 합은 $+0.5772h\pi$ 이 된다. 이와 같이 MLSE를 위한 위상차 FSM은 Fig. 7과 같이 제안할 수 있다. 제안된 FSM은 a_{n-1}, a_n, a_{n+1} 의 세 자리 심볼로 구성된다.

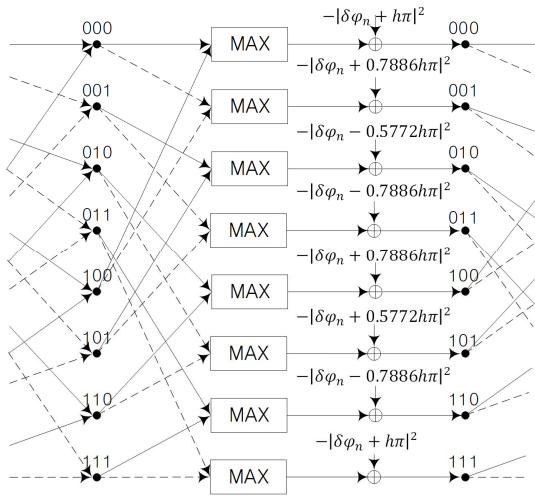


Fig. 8. Viterbi trellis based on the proposed phase difference FSM.

제안한 위상차 FSM을 기반으로 한 Viterbi Trellis 구조는 Fig. 8과 같으며 실선은 $a_{n+1} = 0$ 에 대한 것이며 $a_{n-1} = 1$ 은 점선으로 도시되어 있다. 일반적인 Viterbi Trellis와의 중요한 차이점은 분기 메트릭 연산으로써 식 (6)에서 분기 메트릭은 $\delta\varphi_n$ 와 θ_n 사이의 제곱 유클리드 거리 계산으로 얻을 수 있다. 여기서 $\delta\varphi_n$ 은 현재와 이전 수신 신호 사이의 위상차이고 θ_n 는 현재와 이전 전송 신호 간의 추정된 위상차이다.

$$\text{Branch Metric} = |\delta\varphi_n - \theta_n|^2 \quad (6)$$

제안한 Viterbi 디코더는 Fig. 9에서와 같이 3-traceback 메모리, 8-state 상태 레지스터 및 ACS(add-compare-select) 연산기로 구성 될 수 있다.

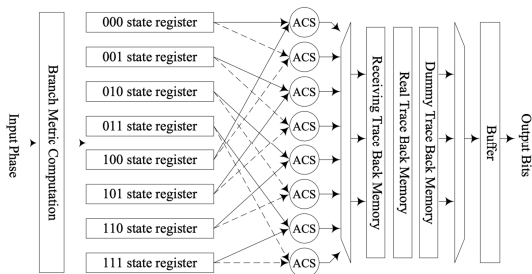


Fig. 9. Block diagram of the proposed Viterbi architecture.

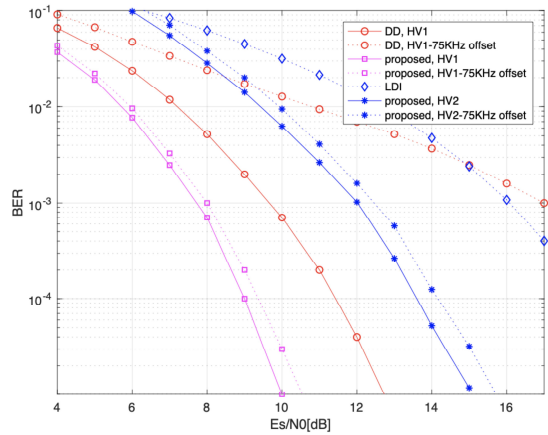


Fig. 10. BER performance comparison of the proposed Viterbi FSM vs. conventional differential detection for HV1/HV2 packets with 75KHz offset.

4. 시뮬레이션 결과

제안한 알고리즘의 성능 평가를 위해 Bluetooth 사양으로써 널리 사용되는 고품질 음성 패킷 HV1과 HV2를 적용하였다. Fig. 10에서 실선은 HV1/2 패킷 환경에서 가우시안 잡음만으로 평가하였으며, 점선의 HV1/2는 가우시안 잡음 환경하에서 75KHz 주파수 오프셋이 부가된 환경에서의 결과이다. HV1/2 패킷은 0.315 변조 지수와 함께 1/3 및 2/3-rate convolutional code로 10 및 20-byte 정보로 전송된다. 또한, 75KHz 주파수 오프셋을 적용하여 알고리즘의 robustness를 검증하였다. Fig. 10에서와 같이 기존 DD(decision direct)기법에 비해 오프셋 유무와 관계없이 제안한 Viterbi FSM에서 성능 개선이 있음을 증명하였다. 특히, 오프셋이 없는 패킷에 대해서는 제안한 FSM으로 기존 방식에 비해 10^{-3} 의 BER에서 2dB 성능 개선을 보였으며 오프셋 패킷의 경우에도 오프셋이 없는 것과 비교해서 0.5dB 이내의 성능 저하를 보임으로써 성능의 견고성이 확보됨을 보였다. 이러한 성능 견고성은 송신 신호에 가우시안 필터의 영향이 인접 심볼에 영향을 끼친 상태로 전송된 수신 신호에서 이를 상쇄할 수 있는 역 가우시안 필터 탭을 decoder state transition으로 구현하여 Viterbi 디코더를 통해 인접 심볼 영향을 제거하였기 때문이다.

5. 결론 및 제언

본 논문에서는 무리수를 갖는 변조 지수와 주파수 오프셋이 있는 GFPM 신호에 대한 MLSE 기반의 비동기 위상 차등 검출 방식을 제안하였다. 제안한 최적의 Viterbi FSM은 전송단에서의 변조 지수에 대한 사전 정보 및 추정이 필요 없으며, 8-stage Viterbi Trellis, 각 심볼 주기에서 0 및 1에 대한 16개의 Branch Metric 계산, 그리고, 8개의 비교 로직으로 간단하게 구현될 수 있다. 제안된 방식의 BER 성능은 기존 decision direct 방식에 비해 2dB 성능 개선을 보였으며, 오프셋이 있는 경우에도 약 0.5dB 수준의 성능 저하를 보여 알고리즘의 견고성을 확보하였다.

REFERENCES

- [1] H. H Lee, S. H Cho, J. H Lee, S. I Myong, & S. S Lee. (2012). Recent Trends on Technology and Standardization of Next-Generation Optical Access Networks. *2012 Electronics and Telecommunications Trends, 27(2)*, 89-98.
- [2] H. H Lee, S. S Lee & J. H Lee. (2012). Recent Trends for Next Generation Optical Access Networks. *2012 Electronics and Telecommunications Trends, 27(3)*, 168-178.
- [3] IITP. (2018). Wired and wireless communication service subscription status, <https://www.iitp.kr>.
- [4] John Wiley & Sons. (2011). *Broadband optical access networks: emerging technologies and optical-wireless convergence*. Hoboken : L. Kazovsky
- [5] J. H. Park, G. Y. Kim, H. J. Park & Jin Hee Kim. (2008). FTTH Deployment Status & Strategy in Korea: GW-PON Based FTTH Field Trial and Reach Extension Strategy of FTTH in Korea. In *IEEE GLOBECOM 2008-2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, (pp. 1-3). IEEE.
- [6] R. Róka. (2014). Analysis of Possible Exploitation for Long Reach Passive Optical Networks. *SIMULTECH 2014*, (pp. 195-202). IEEE.
- [7] John Wiley & Sons. (2012). *Gigabit-capable passive optical networks*. D. Hood & E. Trojer
- [8] K. O Kim, K. H Doo, H. H Lee, S. H Kim, H Park, J. Y Oh & H. S Chung. (2019). High Speed and Low Latency Passive Optical Network for 5G Wireless Systems. *Journal of Lightwave Technology, 37(12)*, 2873-2882.
- [9] F. An et al. (2013). SUCCESS-HPON : A Next-Generation Optical Access Architecture for Smooth Migration from TDM-PON to WDM-PON. *IEEE Communications Magazine, 43(11)*, S40-S47
- [10] M. E. Abdalla, S. M. Idrus & A. B. Mohammad. (2013). Hybrid TDM-WDM 10G-PON for high scalability next generation PON. *ICIEA 2013*, (pp. 1448-1450). IEEE.
- [11] Y. C. Chung. (2013). High-speed coherent WDM PON for next-generation access network. *ICTON 2013*, (pp. 1-4). IEEE.
- [12] J. D Park, E. S Jung, B. K Kim, T. Y Kim, J. J Yoo, B. W Kim & B. T Kim. (2004). Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network Technology. *Electronics and Telecommunications Trends, 19(6)*, 43-54.
- [13] G. Kramer, B. Mukherjee & A. Maislos. (2008). *Ethernet Passive Optical Networks*. McGraw-Hill
- [14] K. KwangOk & C. HwanSeok. (2015). Performance analysis by burst overhead length in symmetric-rate 10G-EPON reach extender. *ICTC 2015*, (pp. 1163-1166). IEEE.
- [15] E. Karasan & E. Ayanoglu. (1998). *Performance of WDM transport networks*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16*, 1081-1096.
- [16] ETRI. (2005). *ETRI Technical Evaluation Team MIC, FG-2005-03-18*.

권택원 (Taek-Won Kwon)

[충청]



- 2004년 2월 : 경북대학교 전자공학과 공학박사
- 2004년 2월 ~ 2015년 10월 : 삼성전자 S.LSI 사업부
- 2015년 11월 ~ 현재 : 건양대학교 창의융합대학 융합IT학과 교수
- 관심분야 : 고집적회로설계
- E-Mail : twkwon@konyang.ac.kr

이규만 (Kyu-Man Lee)

[충청]



- 2001년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (박사수료)
- 2001년 3월 ~ 2015년 2월 : 삼성전자 S.LSI 사업부 무선 모듈 개발팀
- 2015년 3월 ~ 현재 : 건양대학교 창의융합대학 기업소프트웨어학부 교수
- 관심분야 : 재난 및 무선 ICT 융합
- E-Mail : kmlee@konyang.ac.kr