양자 키 분배 프로토콜 BB84 와 B92 에서 도청률과 기저의 수에 따른 error rate 비교

이선아, 문봉교
동국대학교 컴퓨터공학과
cosmos1526@dgu.edu, bkmoon@dgu.edu

Comparisons of error rate according to eavesdropping rate and basis number in quantum key distribution protocols BB84 and B92

Sun-Ah Lee, Bong-Kyo Moon
Dept. of Computer Science Engineering, Dongguk University

요 약

양자 암호통신에서는 키를 실시간으로 안전하게 분배하는 양자 키 분배방식이 핵심이다. 본 논문에서는 양자 키 분배 방식인 BB84 protocol 과 B92 protocol 을 python 으로 구현(이를 Lee's code 라 명명)한다. 기존에 존재하는 양자 simulator 와 LEE's code 를 이용해 error rate 의 차이를 두 가지 관점(기저에 따른 차이, 도청률에 따른 차이)에서 비교한다. 이를 바탕으로 어떤 protocol 이 도청자로부터 더 취약한지 알아본 결과, B92 protocol 의 QBER 이 항상 높으므로 도청자를 잡아내기는 쉽지만, 기저가 두 가지 밖에 없으므로 도청자의 공격에는 취약함을 알 수 있다.

1. 서론

일반적으로 사용되는 암호화 방법에는 비밀키 암호화(대칭 키 암호화)와 공개키 암호화 (비대칭 키 암호화)가 있다. 비밀키 암호화에서는 하나의 키를 둘이서 나눠가져 암호화, 복호화 할 때 같은 키가 사용되는데 이를 대칭 키 암호화라고도 한다. 하지만 비밀키 암호화는 키로 암호화 한 뒤 키 전달과정에서 누군가가 키를 획득한다면 쉽게 복호화해서 정보를 탈취할 수 있다. 이를 보완하기 위한 것이 공개키 암호화이다. 공개키 암호화는 암호화와 복호화 할 때 사용되는 키가 서로 달라 비 대칭 키 암호화라고도 한다. 공개키 암호화 알고리즘의 대표적인 예로는 RSA 가 있다. RSA 는 소인수분해를 사용하는데 두 개의 큰 소수의 곱과 추가연산을 통해 하나는 공개키로 다른 하나는 개인키로 만든다.

하지만 양자컴퓨터를 이용한 소인수분해 알고리즘이 개발되면서 매우 큰 숫자도 소인수분해가 가능해져 도청자가 키를 탈취할 수가 있게 되었다. 이를 해결하기 위해 양자 암호통신이 등장하였다. 양자 암호통신에서 양자 키 분배는 비밀 키 방식을 사용한다. 비밀 키를 만들기 위한 과정이 양자 상태에서 이루어진다.

본 논문에서는 양자 키 분배 방식인 BB84 와 B92 protocol 을 구현하고 두 가지 관점에서 QBER (Quantum Bit Error Rate)를 비교한다.

2. 양자 암호 프로토콜

가. 양자의 3 가지 특성

양자암호는 중첩, 얽힘, 불확정성의 양자의 3 가지 특성을 이용한다. 중첩은 양자가 두 가지 성질을 동시에 가질 수 있음을 의미한다. 따라서 측정하기 전까지는 정확한 양자 상태를 알 수 없다. 하지만 한번 측정하면 하나의 성질만 갖게 되기 때문에 복제가 불가능하다. 얽힘은 하나의 근원에서 발생된 두 양자가 서로 관계를 갖고 있음을 의미한다. 한쪽을 측정하는 순간 그 양자의 상태가 정해지고, 나머지 양자도 상태가 정해진다. 불확정성은 양자의 위치와 속도라는 서로 다른 물리량을 동시에 정확하게 측정할 수 없음을 의미한다. 따라서 양자의 상태를 정확하게 복제하는 것이 불가능하다. 양자암호는 이 3 가지 특성으로 키 분배의 안정성을 보장할 수 있다.

나. 양자 암호 프로토콜 소개

(1) BB84 protocol

BB84 protocol 은 Charles Bennet 과 Gilles Brassard 가 1984 년에 제안한 프로토콜로 최초의 양자 키 분배 방식이다. 송신자(Alice)와 수신자(Bob)사이에 One - Time Password (일회성 암호)를 생성한다. bit 는 0 과 1 을 사용하고, basis (편광필터)로는 수직수평기저(+)와 대각 기저(x)를 사용한다. 광자에 신호를 실어서 보내는 양자채널과 고전채널인 퍼블릭 채널을 사용한다.

Basis	0	1
+	↑	→
×	↗	↘

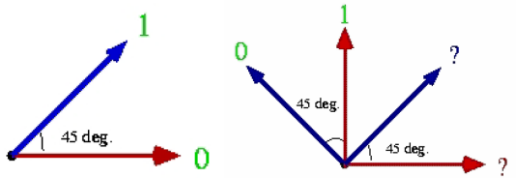
[그림 1] bit와 편광 필터에 따른 편광 신호[1]

BB84 protocol 의 과정은 다음과 같다.

1) 송신자가 임의의 bit 와 편광필터를 생성한다.
2) 필터에 대응되는 편광신호를 생성해 양자채널로 전송한다.
3) 수신자는 측정을 위해 편광필터를 bit 의 개수만큼 선택한다.
4) 선택한 편광 필터로 값을 측정한다.
5) 송신자와 수신자는 퍼블릭 채널로 동일한 필터 사용 여부를 확인한다.
6) 다른 필터를 사용한 비트는 제외하고 동일한 필터를 사용한 비트만 저장한다.
7) 송신자와 수신자가 저장한 데이터를 비밀키로 사용한다.

(2) B92 protocol

B92 protocol 은 Charles Bennet 이 1992 년에 제안한 프로토콜이다. BB84 protocol 과 비슷하지만 더 사용하기 쉽게 만들어졌다. 송신자와 수신자는 각각 두 개의 비 직교기저를 사용한다.



[그림 2] 비직교 기저의 예시 참고[2]

B92 protocol 의 과정은 다음과 같다

1) 송신자가 0° 와 45° 중 하나를 선택한다. 0° 면 bit 0, 45° 면 bit 1 을 선택한다.
2) 수신자가 90° 와 135° 중 하나를 선택한다. 90° 면 bit 1, 135° 면 bit 0 을 선택한다.
3) 송신자와 수신자가 선택한 기저의 차이가 45° 가 아니면 100%의 확률로 통과하지 못하고, 45° 이면 50%의 확률로 통과하지 못한다.
4) 통과된 비트는 비밀키로 사용한다.

3. 연구 목적 및 제안 모델

본 논문에서는 파이썬 코드를 이용하여 양자 키 분배 방식인 BB84 protocol 과 B92 protocol 을 직접 구현(이를 LEE's code 로 명명) 한다. 기존에 존재하는 양자 simulator 와 LEE's code 를 이용해 error rate 의 차이를 두 가지 관점에서 비교한다.

우선, BB84 와 B92 는 기저의 개수에 차이가 있으므로 기존에 존재하는 양자 simulator 에 동일한 시뮬레이션을 수행한 후 기저에 따른 error rate 를 각각 비교한다. 다음으로 [2]의 결과(도청률에 따른 QBER)를 바탕으로 도청률에 따른 error rate 를 각각 비교한다. 이를 바탕으로 어떤 protocol 이 도청자로부터 더 취약한지 확인하는 것이 본 연구의 목적이다.

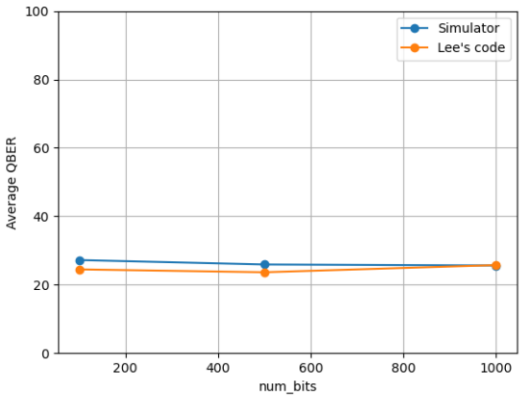
가. 실험방법

첫 번째로 기저가 QBER 에 어떤 영향을 미치는지 알기 위해 BB84 protocol 과 B92 protocol 의 QBER 을 각각 비교한다. 이 때 QBER 은 (오류가 생긴 bit 수)/(검사한 bit 수)로 한다[3]. 이 때 송신자가 생성한 총 bit 의 개수를 100 개 500 개 1000 개로 늘려가면서 QBER 을 체크한다. 각 경우를 10 번씩 반복해 평균을 구한다. bit 의 개수에 따른 평균 QBER 을 산점도 형태로 나타내기 위해 python 의 pandas, matplotlib 를 사용했다. 또한 simulator 와의 비교를 위해 [4],[5] 두 개의 simulator 를 사용했다.

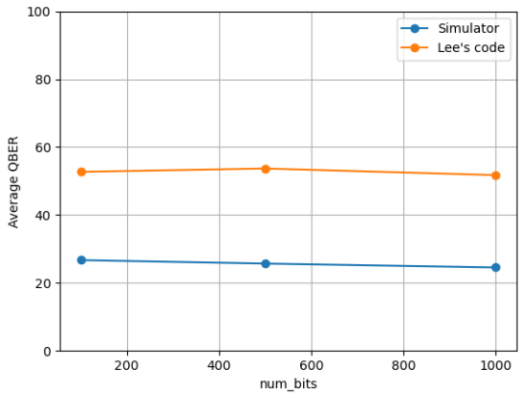
두 번째로 도청률을 다르게 설정하여 error rate 를 비교하기 위해 [2]의 결과와 Lee's code 를 비교했다. 이 때 도청률은 0%~100%까지 골고루 설정했다.

4. 결과 및 분석

가. 기저에 따른 QBER 차이



[그림 3] Simulator 와 Lee's code 의 BB84protocol QBER 비교



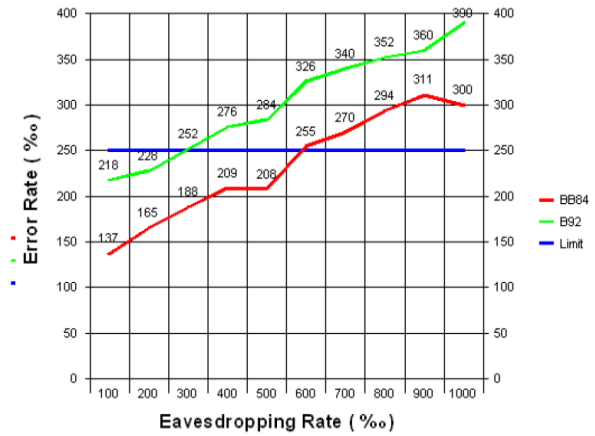
[그림 4] Simulator 와 Lee's code 의 B92protocol QBER 비교

먼저 기저에 따른 차이를 보자. BB84 protocol[그림 3]에서는 Lee's code 와 simulator 의 평균 QBER 이 거의 일치했다. 하지만 B92 protocol [그림 4]에서는 Lee's code 의 평균 QBER 이 훨씬 높게 나왔다.

BB84 protocol 은 서로 직교하는 수직수평기저와 대각기저를 사용하고, B92 protocol 은 두 개의 비직교 기저를 사용한다. BB84 에서 도청자가 기저를 예측 할 때, 송신자와 다른 기저를 예측해(1/2) 신호가 바뀌는 경우(1/2) 중간에 신호가 손상이 될 확률은 1/4 이 된다. 하지만 B92 protocol 에서는 송신자와 도청자가 선택한 기저의 차이가 45° 일 확률이 1/2 이고 그 때 통과하지 못할 확률이 1/2 이므로 이 때의 확률은 1/4 이고, 기저의 차이가 45° 가 아닐 확률이 1/2 이고 그 때는 100% 통과하지 못하기 때문에 이 경우의 확률은 1/2 이어서 총 확률은 3/4 이 된다. 따라서 B92 protocol 의 평균 QBER 이 훨씬 높게 나온 것이라고 예측된다.

나. 도청률에 따른 QBER 차이

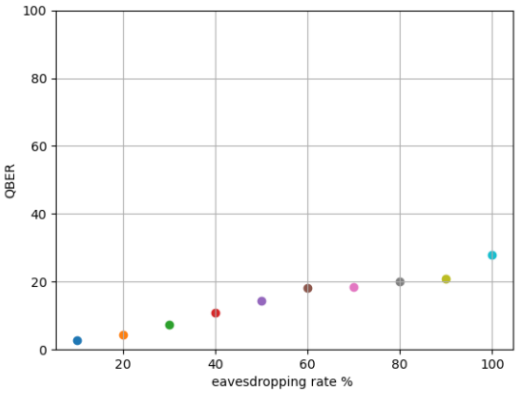
(1) [2]의 결과



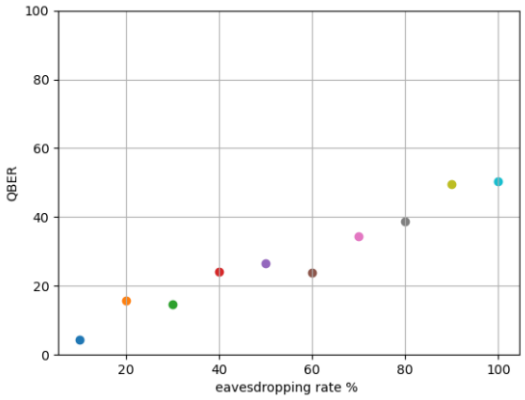
[그림 5] 도청률에 따른 QBER 차이 참고[2]

첫 번째로 [그림 5]의 도청률에 따른 QBER 의 차이를 보자. 도청률은 도청자가 전체 비트의 개수 중에 몇 %를 도청한 것인지 나타낸 비율이다. 따라서 도청률이 올라갈수록 도청자가 많이 간섭했다는 의미이므로 도청률이 증가할 수록 error rate 도 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 앞서 말한 기저에 따른 QBER 차이에서와 마찬가지로 BB84 protocol 보다 B92 protocol 의 error rate 가 항상 높게 나왔다.

(2) LEE's code



[그림 6] BB84protocol 에서 도청률에 따른 QBER 차이



[그림 7] B92protocol 에서 도청률에 따른 QBER 차이

두 번째로 LEE's code 의 도청률에 따른 QBER 의 차이를 보자. (1)의 결과처럼 BB84 와 B92 둘 다 도청률이 증가할수록 error rate 가 증가하는 경향이 나타난다. 또한 항상 B92 protocol 의 QBER 이 BB84 protocol 의 QBER 보다 높다는 것도 알 수 있다.

5. 결론

첫 번째로 기저에 따른 QBER 의 차이를 보자. simulator 와 Lee's code 둘 다 BB84 protocol 의 QBER 은 비슷했지만 B92 protocol 은 Lee's code 의 결과가 더 높았다. B92 가 두 개의 비 직교기저를 사용하기 때문에 도청자가 올바른 기저를 선택하기 쉽고, bit 를 사용할 수 있는지 알아보기 위해

각도의 차이(45°)를 이용하기 때문에 Lee's code 에서 B92 의 error rate 가 더 높게 나온 것으로 예상된다.

두 번째로 도청률에 따른 QBER 차이를 보면 BB84 와 B92 둘다 도청률이 높아질수록 QBER 은 커진다. 이는 도청자가 간섭할 수록 올바른 bit 를 공유할 확률이 적어지므로 당연한 결과이다. 또한 앞서 말한 기저에 따른 QBER 의 차이의 결과처럼 BB84 보다 B92 의 QBER 이 항상 높게 나왔다.

따라서 B92 protocol 의 QBER 이 항상 높으므로 도청자를 잡아내기 쉬움을 알 수 있다. 하지만 기저가 두 가지 밖에 없으므로 도청자의 공격에는 취약하다.

참고문헌

[1] Rupesh Kumar Sinha, Dr. Mrinal Mishra, Dr. S.S. Sahu, "Quantum Key Distribution: Simulation of BB84 Protocol in C", Conference Proceeding of 2nd International Conference on Engineering Technology, Science and Management Innovation (ICETSMI-2017) at National Institute of Technical Teachers Training & Research (NITTTR),MHRD, Govt of India, Chandigarh, India, 15th January 2017 ,p72-73

[2] Ergün GÜMÜŞ, G.Zeynep AYDIN, M.Ali AYDIN, "QUANTUM CRYPTOGRAPHY AND COMPARISON OF QUANTUM KEY DISTRIBUTION PROTOCOLS" ,ISTANBUL UNIVERSITY-Journal of electrical&electronics engineering, 8, 1, p509, 2008

[3] Logan O. Mailloux, Michael R. Grimaila, Douglas D. Hodson , Gerald Baumgartner , Colin McLaughlin, "Performance Evaluations of Quantum Key Distribution System Architectures", Copublished by the IEEE Computer and Reliability Societies, p32, January/February 2015

[4] https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/cryptography-bb84/Quantum_Cryptography.html, University of St Andrews, QuVis

[5] https://www.st-andrews.ac.uk/physics/quvis/simulations_html5/sims/cryptography-b92/B92_photons.html, University of St Andrews, QuVis