Моделирование релятивистской системы квантового распределения ключей

Введение в предметную область

Проблемы классической криптографии

- проблема обнаружения подслушивателя;
- основанность на предположениях об ограниченности злоумышленника в средствах, мощностях, интеллекте и др.;
- асимметричная криптография требует бóльших вычислительных мощностей, чем симметричная;
- абсолютная криптостойкость доказана только для шифрования по методу Вернама «одноразовый блокнот»;
- проблема первоначальной секретности.

В данной работе речь пойдет о квантовом распределении ключей, что является синонимом квантовой криптографии. Как известно, классическая криптография делится на симметричную и асимметричную. У каждой имеются свои достоинства и недостатки, однако потребоность в квантовой криптографии возникает из следующих предпосылок: на слайде

В симметричной криптографии используется один и тот же ключ как для шифрования, так и для расшифровки сообщения, что приводит к проблеме: как передать участникам передачи секретный ключ? Эту проблему и решает квантовая криптография.

Квантовое распределение ключей — механизм:

- использующий фундаментальные принципы квантовой механики,
- в результате работы которого:
  - либо получается общая для двух участников коммуникации строка случайных бит, известная только им;
  - либо происходит детектирование злоумышленника в канале связи

Суть квантовой криптографии сводится к следующему. Имеются два легитимных пользователя, каждый из которых обладает случайной строкой бит. По определенному протоколу квантовой криптографии (фундаментальные принципы квантовой механики), а затем протоколу коррекции ошибок (в канале присутствуют помехи) эти строки приводятся к общему виду. В итоге получается секретный ключ, который можно использовать с любым методом шифрования. Если в канале связи присутствует подслушиватель, он же злоумышленник, то обе стороны будут об этом достоверно знать, могут оценить уровень информации, доступный злоумышленнику о ключе, и в случае превышения некоторой критической величины, зависящей от протокола, не станут использовать полученный ключ.

Квантовое распределение ключей — механизм:

- использующий фундаментальные принципы квантовой механики,
- в результате работы которого:
  - либо получается общая для двух участников коммуникации строка случайных бит, известная только им;
  - либо происходит детектирование злоумышленника в канале связи

Важно, квантовая криптография не позволяет передать какой либо секретной информации, а лишь получить ключ шифрования, секретность которого гарантированна.

Протоколы квантовой криптографии, в отличие от классических протоколов, опираются не на вычислительную сложность каких-либо алгоритмов, а на фундаментальные законы природы, что позволяет делать предположения о неограниченных возможностях злоумышленника относительно канала связи и передаваемых по нему данных, вычислительных мощностях и т.п.

В области квантовой криптографии уже имеется много наработок и разработано достаточное число протоколов.
Основные практические проблемы:

- лазеры не могут испустить ровно один фотон,
- потери в канале связи.

Нерелятивистские протоколы используют только ограничения квантовой механики.
Релятивистский протокол = квантовая механика + специальная теория относительности.

Работы в области квантовой криптографии начали появляться с 1984 года, и с тех пор было предложено несколько различных протоколов, теоретическая секретность которых была строго доказана. Однако на практике реализовать эти протоколы не удается в силу несовершенства используемой аппаратуры, в частности имеются две основные проблемы:

- Лазер не может выдать ровно один фотон, как это требуется в теории. С некоторой, пусть и маленькой, но ненулевой вероятностью, он может испустить два, три и больше фотонов одновременно, чем может воспользоваться злоумышленник (т.н. PNS атака).
- В канале связи, особенно если это открытое пространство, присутствуют потери пакетов, чем также может воспользоваться злоумышленник, производя некоторые действия над посылаемыми данными и в случае неудовлетворительного для себя результата блокируя посылку,

В области квантовой криптографии уже имеется много наработок и разработано достаточное число протоколов.
Основные практические проблемы:

- лазеры не могут испустить ровно один фотон,
- потери в канале связи.

Нерелятивистские протоколы используют только ограничения квантовой механики.
Релятивистский протокол = квантовая механика + специальная теория относительности.

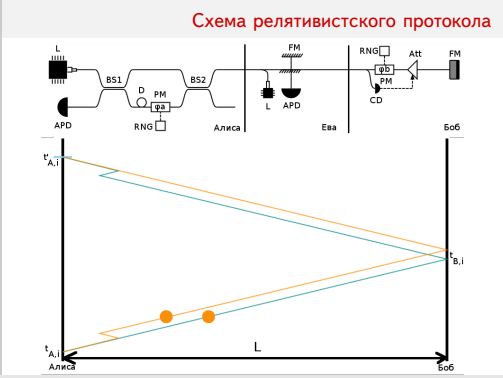
Все описанные протоколы крк используют ограничения квантовой механики на невозможность достоверного различения неортогональных состояний и на невозможность копирования произвольного квантового состояния. И все они не учитывают тот факт, что фотоны движутся со скоростью света, а СТО утверждает, что передать информацию быстрее, чем со скоростью света - невозможно. Если воспользоваться этим ограничением СТО, получим релятивистский протокол квантового распределения ключей, который делает указанные проблемы несущественными.

Цель дипломной работы

Целью данной дипломной работы является создание программных средств:

1. моделирования и визуализации релятивистского протокола квантового распределения ключей в открытом пространстве,
2. моделирования и визуализации каскадного протокола коррекции ошибок по аутентичному каналу.

Целью данной дипломной работы является моделирование и визуализация такого протокола квантового распределения ключей, а также моделирование и визуализация наиболее используемого в реальных приложениях каскадного протокола коррекции ошибок.



Принципиальная схема протокола показана на слайде. Суть протокола сводится к разведению частей состояния в пространстве-времени так, что по отдельности они не несут никакой полезной информации. Для того, чтобы получить информацию о ключе, эти части нужно свести вместе в одну точку пространства Минковского, на что требуется конечное время. Алиса (слева) включает свой детектор только в определенные временные промежутки, когда, по ее расчетам, должно прийти ответное состояние. Если в канале передачи присутствует злоумышленник, то он потратит некоторое время сначала на сведение частей состояние вместе, получение необходимой ему информации, а затем на разведение частей обратно. В результате состояние придет к Алисе с задержкой, которая будет задетектирована.

В канале связи (в частности если это открытое пространство) неизбежно присутствуют помехи, вносящие ошибки в ключ. Их необходимо исправить, выдав как можно меньше информации о ключе возможному подслушивателю.

После проведения квантовой части протокола, требуется коррекция ошибок в силу наличия помех в канале связи. Коррекция ошибок производится по аутентичному каналу, то есть который можно свободно прослушивать, но невозможно изменить передаваемые по нему данные (газеты, twitter итд).

В канале связи (в частности если это открытое пространство) неизбежно присутствуют помехи, вносящие ошибки в ключ. Их необходимо исправить, выдав как можно меньше информации о ключе возможному подслушивателю.

Рассматриваемый каскадный протокол коррекции ошибок проходит в несколько шагов. Происходит разбитие ключа на несколько блоков, вычисляется некоторая характеристика каждого блока (например, четность), Алиса посылает свои четности, Боб сверяет со своими, и сообщает, в каких блоках четность не совпала. Эти блоки формируют множество блоков с нечетным числом ошибок, с которым происходит вся дальнейшая работа.

В канале связи (в частности если это открытое пространство) неизбежно присутствуют помехи, вносящие ошибки в ключ. Их необходимо исправить, выдав как можно меньше информации о ключе возможному подслушивателю.

До тех пор, пока это множество не пусто, из него выбирается один блок наименьшего размера, и производится дихотомический поиск ошибки, то есть сначала сравниваются четности первых половин соответствующих блоков. Если они совпадают, то ошибка кроется во второй половине, если различаются — в первой. Таким образом находится позиция, содержащая ошибку.

В канале связи (в частности если это открытое пространство) неизбежно присутствуют помехи, вносящие ошибки в ключ. Их необходимо исправить, выдав как можно меньше информации о ключе возможному подслушивателю.

Каскадным протокол называется из-за следующей схемы работы. Все блоки, которые на прошлых проходах содержали в себе только что исправленную позицию, вносятся в множество с нечетным числом ошибок. Если же они там уже были, то удаляются. Таким образом обнаружение ошибки в блоке третьего прохода вызовет каскадное обнаружение ошибки в блоках первого или второго прохода, что в свою очередь вызовет обнаружение ошибки в еще каком-либо блоке, и так до тех пор, пока множество блоков с нечетным числом ошибок не окажется пустым.

Определение

Семейство $\mathcal{F}$ функций $\mathcal{A} \to \mathcal{B}$ называется *универсальным*, если

$$[f(x_1) = f(x_2)] < \frac{1}{|\mathcal{B}|} \quad \forall x_1, x_2 \in \mathcal{A} : x_1 \neq x_2,$$

а f выбирается из $\mathcal{F}$ в соответствии с равномерным распределением.

Теорема

Пусть X — случайная величина в алфавите $\mathcal{X}$ с вероятностным распределением P_X и энтропией Реньи $R(X)$. Кроме того, пусть G — случайная величина, отвечающая случайному выбору (внутри равномерного распределения) члена универсального семейства хеш-функций, отображающих $\mathcal{X} \to \{0,1\}^r$. Тогда

$$H(G(X)|G) \geq R(G(X)|G) \geq r - \frac{2^{r-R(X)}}{\ln 2}. \quad (1)$$

После проведения процедуры коррекции ошибок Алисе и Бобу известно примерное количество информации, которое могло стать доступным Еве в ходе работы протокола распределения ключей и коррекции ошибок. Зная эту величину, они могут провести сжатие ключа путем хеширования функциями из универсального семейства хеш-функций, определение которых вы видите на слайде. Сама хеш функция выбирается случайным образом из заранее известного универсального семейства хеш-функций, то есть является случайной величиной. В результате Алиса и Боб получат ключ меньшей длины, но информация Евы о нем будет бесконечно малой. В итоге цель достигнута: стороны имеют общий секретный ключ, о котором злоумышленник ничего не знает.

Моделирование релятивистской системы квантового распределения ключей

Описание практической реализации и полученных результатов

Полученные результаты

1. Показано существование и дано обоснование секретности протокола квантовой криптографии, обеспечивающего безусловную секретность в условиях потерь в линии связи и неоднофотонности источника.
2. Рассмотрен и проанализирован один из протоколов коррекции ошибок, который в настоящее время является стандартом в квантовом распределении ключей.
3. Разработаны программы, визуализирующие процессы:
   - распределения ключей по релятивистскому протоколу с имитацией атак подслушивателя и последующим детектированием возникающих из-за этого задержек,
   - коррекции ошибок по протоколу Cascade.

Для моделирования и визуализации релятивистского протокола квантового распределения ключей и каскадного протокола коррекции ошибок было написано две программы. Обе написаны на языке C#, требуют установленного .NET 4.5, используют шаблон проектирования MVVM, и богатые возможности платформы Windows Presentation Framework (WPF) по анимации контента.

Снимки экрана программы коррекции ошибок были показаны ранее, а сейчас я хочу продемонстрировать основную разработку - визуализация релятивистского протокола, пока позволяет время.