

С.В. КУЛЕШОВ
ПРОБЛЕМЫ КВАНТОВОЙ ИНФОКОММУНИКАЦИИ

Кулешов С.В. Проблемы квантовой инфокоммуникации.

Аннотация. В статье приводится описание особенностей квантовой инфокоммуникации, вводятся определения базовых понятий, рассматриваются исторические предпосылки, возможности применения и перспективы развития.

Ключевые слова: инфокоммуникация, квант различимости, канал передачи данных, дискретные компоненты данных.

Kuleshov S.V. The problems of quantum infocommunication.

Abstract. The paper introduces the features of quantum infocommunication and the basic concept definitions, discusses the historical preconditions, possible applications and development perspectives.

Keywords: infocommunication, quant of distinguishability, data channel, discrete elements of data.

1. Введение. В последние годы благодаря повышению функциональности и увеличению степени интеграции и миниатюризации отдельных электронных компонентов, технологии приближаются к квантовому пределу. Сейчас не только электронные схемы, но и разнообразные приборы пересекают границу из макромира в микромир, делая доступными квантовые технологии — технологии микромира. Здесь под квантовыми технологиями понимаются процессы управления (включая идентификацию) отдельными компонентами информационно-технических систем.

Возможности передачи данных в традиционной парадигме теории связи, которая складывалась на протяжении последних десятков лет после введения в научный оборот ее основных положений, установленных, прежде всего, в работах К. Шеннона, В.А. Котельникова, А.А. Ляпунова, А.А. Харкевича и других авторов, были ориентированы на традиционную элементную базу и не в полной мере отвечают современным потребностям.

Современные технические системы (пакетная передача данных в IP-сетях, 3G-сети, поисковые механизмы в сети Интернет и др.) реализуют физические процессы, для которых уже нет адекватных математических моделей. Все эти процессы не противоречат физическим свойствам окружающей среды, но их математические модели будут необоснованно сложны. Если в процессе исследования и создания новых технологических решений отказаться от моделей не представляется возможным, то наиболее эффективным оказывается метод прямого

компьютерного моделирования [1], который моделирует систему через прямое описание взаимодействий отдельных ее компонентов.

Развиваемые подходы позволяют по-новому взглянуть на передаваемый сигнал и технологию его передачи от источника к получателю, если рассматривать его не в аналоговом, а в цифровом представлении и учитывать определенное «семантическое содержание» передаваемого контента, рассчитанного, прежде всего, на восприятие человеком со всеми присущими этому виду «приемника» ограничениями и особенностями. При этом конечной целью такой инфокоммуникации является достижение определенного оптимума энергоэффективности передачи при обеспечении заданного уровня качества материала, доставляемого таким образом «конечному приемнику» — человеку.

Кроме того, становятся доступными следующие преимущества: гибкое управление контентом, использование «неподходящих» для традиционных видов связи каналов и ряд других.

Следует выделить основные направления, перспективные для предлагаемого подхода: передача, хранение и обработка квантовых данных.

Для последующего изложения уточним основные термины (некоторые из них уже были ранее введены в [2]). В качестве базового понятия будем использовать «цифровой информационный объект» (ЦИО) как цифровое представление объекта реального мира. Следует отметить, что точность цифрового представления объекта (а соответственно и технология его получения) должна быть достаточной для решаемой задачи. Так, например, набор значений пикселей, полученных с сенсора фотокамеры, достаточен для публикации в фотоальбоме, но записей переговоров экипажа недостаточно для полного описания поведения всех систем и процессов, происходящих на борту самолета.

Будем называть квантовыми каналами передачи данных (КК) такие цифровые каналы, в которых уровень помех не влияет на передачу цифровых данных или используются дополнительные средства для коррекции ошибок. Примером такого канала можно считать прикладной уровень стека TCP/IP, используемый для организации взаимодействия с использованием инфраструктурных возможностей сети Интернет, например для организации виртуального канала. Собственно под квантом будем понимать минимальный энергетический эквивалент единицы носителя информационного содержания, достигнутый на текущем технологическом уровне.

2. Физическая природа квантовой инфокоммуникации. Современный уровень понимания физической реальности таков, что для

передачи сообщения на расстояние требуется некоторый носитель, обладающий энергией.

Если рассматривать свет (в общем случае — электромагнитную волну) как носитель информационных сообщений, то для того чтобы получатель сообщения воспринимал источник не как источник освещения (источник потока энергии), но как сообщение, требуется управлять этим источником энергии, то есть осуществить манипуляцию (будем рассматривать только дискретный тип данных в отличие от модуляции, используемой для непрерывных — аналоговых данных). Манипуляцию возможно осуществлять, задав для каждого передаваемого энергетического пакета параметры, определяемые содержимым сообщения, то есть подготавливая последовательные фрагменты (пакеты) данных во времени.

Простейшим случаем организации такой коммуникации является включение/выключение источника излучения для передачи отдельных битов «1» и «0» (так в радиосистеме изобретателя радио А.С. Попова использовалась амплитудная манипуляция). В более сложных современных системах используются большая плотность бит на энергетическую единицу, что позволяет в одном кванте (энергетическом пакете за фиксированный конечный временной отрезок ΔT) закодировать и передать несколько битов данных (рис. 1).

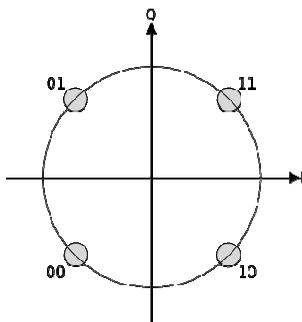


Рис. 1. Для квадратурной фазовой манипуляции имеется возможность различать 4 состояния, что делает возможной передачу 2 бит данных на одну энергетическую единицу.

Величина ΔT пропорциональна величине энергии, которой обладает переданный информационный квант, и обратно пропорциональна битрейту передаваемых данных (при условии неизменной плотности бит на энергетическую единицу).

Соответственно, технологическое развитие определяется уменьшением величины ΔT до значений, которые в управляемом режиме способен обеспечивать передатчик, а кроме того, способен идентифицировать приемник. Здесь приходит на помощь квантовая механика, предлагающая способы манипулирования отдельными объектами физических систем, а также предлагающая методы измерения параметров отдельных объектов в таких системах.

Однако, несмотря на то, что квантовая механика послужила базой для создания технологии квантовой инфокоммуникации, следует отметить и принципиальные их различия. Квантовая механика не предсказывает, что наблюдение должно иметь единственный определенный результат. Наоборот, она предсказывает некий ряд разных результатов и дает вероятность каждого из них. Это значит, что, выполнив одно и то же измерение для многих одинаковых систем, начальные состояния которых совпадают, мы бы обнаружили, что в одном числе случаев результат измерения равен А, в другом — Б и т. д. Мы можем предсказать, в скольких примерно случаях результат будет равняться А и Б, но определить результат каждого конкретного измерения невозможно [3].

В свою очередь, квантовая инфокоммуникация предполагает полную однозначность в определении параметров информационных квантов, сохраненных в памяти или переданных по КК.

Это означает, что технический объект, реализующий функции памяти, должен обеспечивать сохранение состояния информационного кванта сколь угодно долго в пределах функционирования системы, а также его однозначное считывание и повторное изменение (рис. 2) [4].

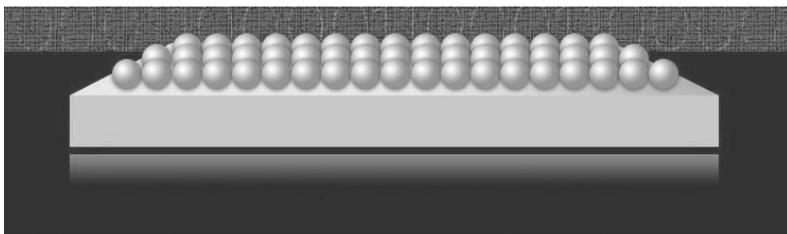


Рис. 2. Молекулярная память.

Искусство обработки данных в рамках квантовой инфокоммуникации состоит в умении преобразовывать дискретные значения (перемещать и копировать между дискретными ячейками) в предположении, что данные изначально дискретны. По сути, под такое определе-

ние подходит подавляющее большинство алгоритмов, работающих с битовым потоком (различные виды сортировок, кодирование, хеширование, и т.п.).

3. Квантовое представление данных и идентификация неразличимости. Отмеченное свойство однозначного считывания переданных и сохраненных значений распространяется не только на КК и устройства хранения данных, но и на сенсоры, формирующие эти данные.

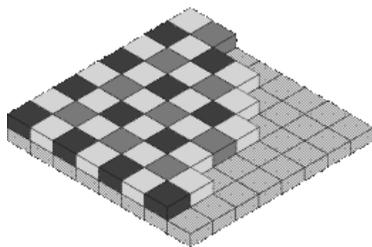


Рис. 3. Изображение, формируемое сочетанием дискретных значений цветовых компонентов.

Особенность таких сенсоров — независимое формирование и кодирование каждого отдельного элемента данных (в случае изображения — пиксела) — рис. 3, в отличие от традиционных аналоговых сенсоров (например, вакуумных передающих трубок), где последовательности элементов собирались в единый непрерывный сигнал, а закон формирования сигнала из элементов определялся физикой процесса и геометрией передающей трубки. При таком «непрерывном» способе представления сигнала способы его обработки определяются функцией взаимодействия компонентов.

Квантовое представление данных предполагает не только отдельное представление всех компонентов, но и механизм идентификации (в данном случае перевода в дискретную форму) значений самих компонентов в случае непрерывной природы регистрируемого физического процесса (рис. 4).

Таким механизмом является идентификация неразличимости [2]. Реализация принципа идентификации неразличимости непосредственно связана с возможностью физического определения дискретных состояний процесса или системы.

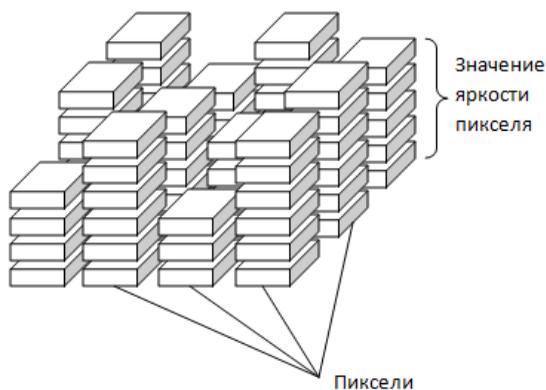


Рис. 4. Квантовая природа представления изображения, полученного с фотосенсора.

В рамках квантовой инфокоммуникации порог различимости соответствует величине выбранного кванта информации. Это означает, что величина флуктуаций элементов физической системы, отвечающих за хранение битов информации, не влияет на представления информационного объекта (рис. 5).

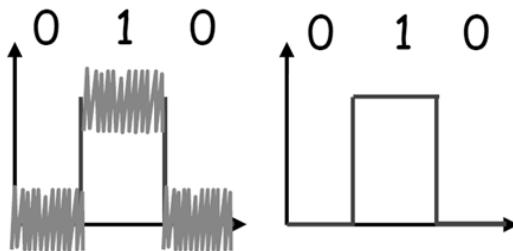


Рис. 5. Флуктуации элементов физической среды не оказывает влияния на представление информационного объекта, передаваемого по КК.

Подобная интерпретация позволяет учитывать информационные параметры объектов через характеристики различимости, а не через статистические свойства источника информационных сообщений.

Следует заметить, что наличие физической границы различимости состояний создает определенный механизм информационной защиты, состоящий в невозможности осуществления идентификации информа-

ционного потока или чтения информационного носителя при отсутствии инструментальных средств, обладающих требуемой разрешающей способностью (пространственной, временной), используемой при создании этого информационного носителя.

4. От передачи данных к квантовой инфокоммуникации.

Можно привести пример из работы [5], где радиочастотный ресурс сравнивается с многополосным скоростным автомобильным шоссе. При этом половина полос перегружена автомобилями, а другая половина полос свободна, но их никто не может использовать, так как не имеет на это лицензии.

Решить проблемы узкополосных радиотехнических систем можно с помощью технологии, использующей сверхширокополосные (СШП), в английской аббревиатуре — UWB (Ultra Wideband), сигналы.

Основная идея технологии заключается в использовании сверхширокополосного сигнала для передачи в пространстве серии сверхкоротких импульсов. Обычно длительность таких импульсов составляет порядка 0,5 нс. Интервал следования импульсов может колебаться в пределах от 10 до 1000 нс. Такой сверхкороткий во временной области импульс (идеализированный «гауссовский» импульс) в частотной области является сверхширокополосным сигналом, поскольку ширина полосы и расположение центральной частоты зависят от длительности импульса [6]. Период повторения импульсов определяет в конечном итоге скорость передачи данных.

Построение UWB-системы беспроводной связи с точки зрения схемотехнических решений — более простая задача, чем создание аналогичных узкополосных систем.

По сути, UWB передатчик состоит из одного транзистора, работающего в цифровом режиме (транзистор закрыт — логический '0', транзистор открыт — '1'). При переходе из одного состояния в другое формируется «ступенька» (электромагнитная волна), которую преобразуют в классический гауссовский импульс (рис. 6). Такой сверхкороткий импульс передается непосредственно через антенну в пространство. В UWB-передатчике нет усилителя, традиционного для узкополосного передатчика. Таким образом, существенно уменьшаются (на порядки) энергетические затраты на передачу сигнала. Это преимущество перед традиционными узкополосными системами является не столько технологическим, сколько коммерческим.

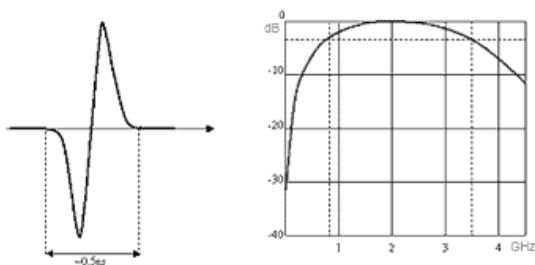


Рис. 6. Единичный короткий импульс.

На другом конце канала связи находится UWB-приемник, который также более прост в схемотехнике, чем узкополосный приемник. Схема построения такой UWB-системы основана на использовании не дискретных элементов, а готовых чипсетов, обеспечивающих работу основных функциональных узлов: таймера (кодирование входной информации в UWB-сигнал), коррелятора (корреляционный приемник сигналов), цифрового процессора (процессор модулирующего сигнала и контроллера).

Построенная по такой принципиальной схеме технология UWB-системы радикально отличается от традиционных «sin wave» архитектур, востребованных в настоящее время в радиосвязи, таких, как CDMA, TDMA или FHSS [6].

Основной технической проблемой здесь является резонанс антенны. Узкая полоса антенны искажает импульс передатчика и приводит к большим потерям.

Таким образом, для обеспечения устойчивой скоростной передачи данных описанная UWB-система требует некоторого усложнения, которое позволило бы более эффективно управлять спектром излучения. Для совершенствования системы потребовалось знание конкретных физических условий распространения волн, и, в первую очередь, разрешенный диапазон частот и предельное значение средней спектральной плотности мощности [7].

Разработчики UWB-систем совместно с правительственными органами, основными заинтересованными компаниями и различными сообществами (общественной безопасности, транспортной безопасности, системы глобального позиционирования) выработали правила использования сверхширокополосных сигналов без создания помех существующим системам связи, мониторинга и навигации. В результате проведенных исследований Федеральная комиссия по связи США

(FCC) выработала спектральные маски для эффективной изотропно-излучаемой мощности (EIRP) при использовании переносных и комнатных систем СШП связи (рис. 7) [8].

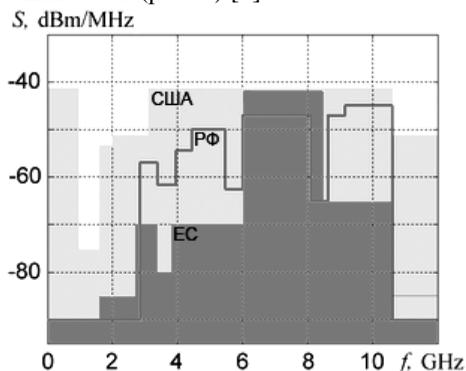


Рис. 7. Спектральные маски для СШП связи внутри помещений: в США, Евросоюзе и Российской Федерации.

Передаваемый с помощью UWB-аппаратуры радиосигнал практически невозможно перехватить с помощью обычной техники или записать его источник — приемник будет воспринимать эту информацию как простые помехи. Даже при перехвате с помощью UWB-сканера, расшифровать его данные не удастся без знания точной частоты передачи сигнала, исчисляемой наносекундами.

Здесь следует отметить, что шумоподобный сигнал является условно скрытым и защищенным только до того момента, пока господствует традиционная «sin wave» архитектура радиосистем, для которых шумоподобный сигнал является «неудобным».

Объективным является только то, что для сканирования с целью перехвата нужно обеспечить разрешение приемника по времени, в несколько раз превышающее частоту передачи. А так как скорость манипуляции битовым потоком и так находится на пределе технологических возможностей, то канал оказывается дополнительно защищен текущим уровнем технологического развития.

5. Некоторые аспекты практической реализации. Сложность практической реализации описанных систем состоит в относительно низких скоростях программного управления отдельными цифровыми выходами реальных процессоров [9].

Предложим простую идею реализации формирователя квантовых пакетов. Существуют быстродействующие программируемые микро-

схемы (например, FPGA) с достаточно большим количеством цифровых выходов. Объединив большое количество цифровых выходов проводниками различной длины с широкополосной антенной, возможно повысить разрешающую способность цифрового источника по времени, перенеся формирование длительностей импульсов и задержек между ними на физические свойства проводников, определяемые скоростью распространения сигналов (рис. 8). Современные микросхемы FPGA способны формировать на своих выходах битовые потоки без применения специальных трансиверов до 1,4 ГГбит/с [10].

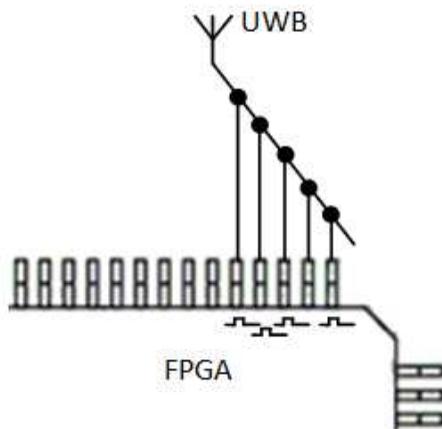


Рис. 8. Идея формирования квантовых инфокоммуникационных сообщений с использованием сравнительно медленных цифровых источников.

Такое сравнительно простое технологическое решение способно приблизить начало практических работ по сверхширокополосной квантовой инфокоммуникации.

6. Заключение. В настоящий момент квантовая коммуникация реализуется «дискретными» типами связи, которая в свою очередь может реализовываться на базе контейнерного подхода. При этом уже начинают проявляться достоинства, присущие квантовой связи, такие как гибкое управление контентом, повышенный уровень безопасности канала, использование «неподходящих» для традиционных видов связи каналов и многие другие. Но до окончательного ухода от «цифровых» типов связи, многие из которых представляют собой принцип «аналоговые данные в цифровой оболочке» или «цифровые данные в аналоговом канале», будет оставаться недостаточная гибкость и энергоэффективность инфокоммуникационных систем.

При этом имеется понимание необходимой регламентации новых типов квантовых инфокоммуникаций. Существующие правила и юридические ограничения в основном касаются ограничений на существующие узкополосные виды связи, защищающие их от взаимного негативного влияния.

Литература

1. Александров В.В., Сойгин А.М. Метод прямого компьютерного моделирования. Препринт № 102, Л.: ЛИИАН, 1989, 23 с.
2. Александров В.В., Кулешов С.В., Цветков О.В. Цифровая технология инфокоммуникации. Передача, хранение и семантический анализ текста, звука, видео. СПб.: Наука, 2008. 244 с.
3. Хокинг С. Краткая история времени. От большого взрыва до черных дыр. Амфора. СПб. 2001
4. Storing data in individual molecules. — [Электронный ресурс]. — Доступ: <http://mit.edu/newsoffice/2013/storing-data-in-individual-molecules.html>
5. Marcia Goodrich Sharing the airwaves: Michigan Tech professor researches cognitive radio. — [Электронный ресурс]. — Доступ: <http://phys.org/news/2010-12-airwaves-michigan-tech-professor-cognitive.html>
6. UWB (Ultra Wideband). // Связист. Нижний Новгород. — [Электронный ресурс]. — Доступ: <http://sviazist.nnov.ru/modules/myarticles/print.php?storyid=54>
7. Использование сверхширокополосных сигналов для персональных беспроводных компьютерных сетей — [Электронный ресурс]. — Доступ: <http://www.imc.org.ua/index3.php?a=misc0504f>
8. FCC 02-48 First Report and Order in the Matter of Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-wideband Transmission systems, adopted Feb. 14, 2002.
9. Кулешов С.В. Гибридные кодеки и их применение в цифровых программируемых каналах передачи данных. // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012, т.10, №5. С. 41–45.
10. Stratix V. FPGAs: Built for Bandwidth. — [Электронный ресурс]. — Доступ: <http://www.altera.com/devices/fpga/stratix-fpgas/stratix-v/stxv-index.jsp>

Кулешов Сергей Викторович — д. т. н., ведущий научный сотрудник лаборатории автоматизации научных исследований СПИИРАН. Область научных интересов: инфологические информационные системы, инфокоммуникационные системы, гибридные кодеки, обработка видеоданных. Число научных публикаций — 70. kuleshov@iias.spb.su, sial.iias.spb.su; СПИИРАН, 14-я линия В.О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ; р.т. +7(812)323-5139, факс +7(812)328-4450.

Kuleshov Sergey Victorovich — Doctor in Tech. Sc., Leading researcher, Laboratory of Research Automation SPIIRAS. Research interests: infology information systems, infocommunication systems, hybrid codecs, video data streams processing. The number of publication — 70. kuleshov@iias.spb.su, sial.iias.spb.su; SPIIRAS, 14-th Line V.O., 39, St. Petersburg, 199178, Russia; office phone +7(812)323-5139, fax +7(812)328-4450.

Рекомендовано лабораторией автоматизации научных исследований СПИИРАН.
Статья поступила в редакцию 09.03.2013

РЕФЕРАТ

Кулешов С.В. Проблемы квантовой инфокоммуникации.

В последние годы благодаря повышению функциональности и увеличению степени интеграции и миниатюризации отдельных электронных компонентов, технологии приближаются к квантовому пределу. Сейчас не только электронные схемы, но и разнообразные приборы пересекают границу из макромира в микромир, делая доступными квантовые технологии — технологии микромира.

Новые технические средства и технологии обработки и передачи сигналов по каналам связи позволяют по-новому взглянуть на передаваемый сигнал и технологию его передачи от источника к получателю, если рассматривать его не в аналоговом, а в цифровом представлении и учитывать определенное «семантическое содержание» передаваемого контента, рассчитанного, прежде всего, на восприятие человеком со всеми присущими этому виду «приемника» ограничениями и особенностями.

Здесь приходит на помощь квантовая физика, позволяющая манипулировать отдельными объектами физических систем, а также предлагающая методы измерения параметров отдельных объектов в таких системах.

Однако, несмотря на то, что квантовая физика послужила базой для создания технологии квантовой инфокоммуникации, следует отметить и принципиальные их различия. Квантовая механика не предсказывает, что наблюдение должно иметь единственный определенный результат. В свою очередь, квантовая инфокоммуникация предполагает полную однозначность в определении параметров информационных квантов, сохраненных в памяти или переданных по квантовому каналу.

Искусство обработки данных в рамках квантовой инфокоммуникации состоит в умении преобразовывать (перемещать и копировать) дискретные значения между дискретными ячейками, не забывая о том, что данные изначально дискретны.

Квантовое представление данных предполагает не только отдельное представление всех компонентов, но и механизм идентификации (в данном случае перевода в дискретную форму) значений самих компонентов в случае непрерывной природы регистрируемого физического процесса. В рамках квантовой инфокоммуникации порог различимости соответствует величине выбранного кванта информации.

SUMMARY

Kuleshov S.V. **The problems of quantum infocommunication.**

In the last years due to increased functionality, integration and miniaturization degree of electronic components, the technologies are approaching quantum limit. Nowadays not only electronic schemes but various instruments are crossing the border between macro and micro worlds making possible to use quantum technologies — the technologies of the micro world.

The new technical means and technologies for signal processing and transmission through communication channels allow us to view at the transmitted signal and transmission technology in new light considering it not in analogous but in digital form and accounting for “semantic aspect” of transmitted content which is primarily focused at human perception with all its inherent limitations and characteristics.

Here comes quantum physics which allows manipulating discrete objects of physical systems and beside this suggesting method for measuring parameters of discrete objects in these systems.

Despite the fact that quantum physics serves as a basis for quantum infocommunication theory creation their principle differences are to be mentioned.

The quantum mechanics does not predict that measurement should have single definite result. In contrast, quantum infocommunication proposes full unambiguity in measuring parameters of information quants stored in memory or transmitted through quantum channels.

The art of data processing in quantum communication framework is in ability to process (move and copy discrete values between discrete cells) keeping in mind that data is originally discrete.

Quantum representation of data suppose not only discrete representation of all components but also the identification mechanism (in this case transposing in discrete form) of components values in case of continuous nature of physical process being registered. In the framework of quantum infocommunication the threshold of identification corresponds to chosen value of information quant.