

Теория строения скрытых систем¹

Коваленко Геннадий Александрович

Аннотация. Существующие определения анонимности и безопасности конечных пользователей в сетевых коммуникациях часто являются расплывчатыми, неясными и противоречащими друг другу. Такая реальность восприятия стала следствием недостающей теоретической основы, которая могла бы структуризировать, и в некой степени даже стандартизировать, основные подходы к построению или использованию скрытых систем. Практическая реализация, которая далеко вышла за пределы теоретического понимания, становится в конечном счёте деструктивной и стагнирующей формой выражения скрытых систем, отодвигая на второй план развитие их содержания. Понимание термина «анонимность», посредством декомпозиции его составляющих, способно дать оценку дальнейшего вектора развития анонимных и безопасных систем.

Ключевые слова: скрытые системы; анонимные сети; тайные каналы связи; клиент-безопасные приложения; сетевые коммуникации; сетевые архитектуры; стадии анонимности; теоретически доказуемая анонимность; криптографические протоколы; мощность анонимности; мощность доверия; централизованные сети; децентрализованные сети; гибридные сети;

1. Введение

Децентрализация, как первичная форма Интернет-коммуникаций в целом, появляется на фоне академических исследований [1, с.70], повлекших за собой глобальное развитие информационных технологий. Первичная система представляла собой не только внешний прогресс, относительно себя, но и имманентную эволюцию, выявляя в своей реализации отрицательные стороны и внутренние противоречия. Фактором её развития и одновременно гибели стала проблема масштабируемости связей. Невозможность в построении широкоэмитальных и широкомасштабных соединений повлекли за собой потребность в промежуточных узлах, основаниях концентрации линий связи, тем самым, зародив ядро централизации, как точку отчёта дальнейшей проблематики.

Централизация, как вторая форма развития Интернет-коммуникаций, появляется на фоне разложения и отмирания первичной, децентрализованной оболочки [2]. Представляя свои плюсы масштабируемости, централизация начала претерпевать внутренние этапы развития, как итерации наложения слоёв абстракций и отрицания децентрализации, противоречиво став для последней фазой её собственной эволюции. При каждой новой итерации своего прогресса, централизованная система всё больше масштабировалась, всё

¹Скрытые системы — множество сетевых технологий направленных на обеспечение и поддержание приемлемого уровня анонимности конечных субъектов (отправителя и получателя) в совокупности с безопасностью объектов (информацией). При этом анонимность и безопасность могут реализовываться в разной степени, что делает класс таких систем достаточно обширным. К системам подобного рода относятся анонимные сети и клиент-безопасные приложения.

сильнее углублялась корнями, всё чаще репрезентировала себя, образуя тем самым симулякры [3, с.111] второго порядка. Одновременно с этим, система нейтрализовывала внешние атаки, ранее губительные для её ядра, но ныне безвредные для её функционирования, подобно атакам в обслуживании [1, с.869] (DDoS) или эксплуатации уязвимостей с учётом изъятия внутренней информации. В следствие такого развития, система постепенно начала порождать общество всё более абстрагируемое от понимания её механизма, всё более догматичное и фрагментированное. Инициатор системы стал её созерцателем, система стала воспроизводством созерцателей. В итоге структура запустила собственную инициализацию своих внутренних интересов, инвертированно направленных на пользователей, тем самым кардинально изменив способ взаимодействия с ними. При выстроенном императиве, система начала образовывать множество симулякров третьего порядка ориентируемых на незначимость или сокрытие истинного уровня безопасности, подменяя реальность иллюзорностью происходящего в своём внутреннем слое за полями созданных абстракций. Итогом таковых ложных представлений стал «театр безопасности» [4], направленный на поддержание имеющегося порядка вещей (системы), с целью сокрытия реального уровня соблюдаемой конфиденциальности.

Внешние угрозы информационной безопасности хоть и становятся полностью безвредными для централизованной системы в ходе её эволюции, но такое утверждение ничего не говорит об отсутствии внутренних угроз. Само масштабирование начинает порождать внутренние угрозы, быть противоречием системы, её развитием и конечным отрицанием. Всё большее расширение, продолжительная концентрация связей, неостановимая монополия соединений вызвало аккумулятивную реакцию внутренних интересов её же участников. Внутреннему сотруднику компании теперь становится выгодно продавать информацию об её пользователях при всё большем расширении системы; государству становится выгодно концентрировать линии связи в одном сингулярном пространстве, в следствие возможности контроля за обществом и его деятельностью; рекламодателю становится выгодно вкладывать свои средства в массовую систему с наиболее релевантным алгоритмом выдачи реклам на базе конфиденциальной информации клиентов, тем самым повышая свою прибыль [5][6]. И данная проблема информационной безопасности со стороны централизованных систем не может быть решена ей же, потому как она в самом базисе и своём ядре рассчитана на собственную масштабируемость и репрезентацию. Именно поэтому, жизнь централизованной системы прямо пропорционально начинает зависеть от количества слоёв абстракций, от количества копий без собственных оригиналов.

Гибридность, как третья форма развития Интернет-коммуникаций, отрицает централизацию, и в то же время, синтезирует её с децентрализацией. Оставляя масштабируемость, но отрицая внутреннее развитие централизации, происходит синтез внешнего развития децентрализации, как способа транспарентного доказательства функционирования без слоёв абстракций и симулякров третьего порядка. Такая система более невосприимчива к внутренним и внешним атакам, более нет внутреннего сотрудника, разглашающего информацию; государству становится не под силу эффективно собирать информацию; рекламодателю становится невыгодно вкладывать свои финансы. Подобный прогресс также несёт за собой и относительный регресс, потому как сама жизнеспособность системы начинает зависеть от участников выдвигающих себя на роль её поддержания, подобно энтузиастам, волонтерам или, в лучшем случае, нодам, способных получать прибыль от донатов или внутреннего механизма (криптовалюты). В любом случае в таких системах более нет постоянного финансирования, а централизованные системы (в частности и само государство) начинают быть враждебными к её существованию [7]. Порождённость

централизацией и враждебность к ней являются ключевыми факторами противоречия и главным фактом разложения гибридности, посредством её будущего разделения и расщепления.

Децентрализация, как четвёртая форма развития Интернет-коммуникаций, становится масштабируемой и одновременно безопасной средой пользователей. Более не существует проблем гибридности, потому как ликвидировать систему централизацией с этого момента становится невозможным из-за её ризоморфного характера, как отрицания иерархического. Любой пользователь становится в конечном счёте олицетворением самой системы, её участником и формой поддержания. На данном этапе безопасность информации начинает эволюционировать и переходить на более качественную ступень безопасности её субъектов. Система децентрализованная лишается всех своих первичных недостатков начальной формы и становится в конечном счёте снятием итераций отрицания.

2. Проблематика

При рассмотрении вопросов, базируемых на безопасности каналов связи, использующих криптографические протоколы с участниками *A* и *B*, а также с доверенным участником *T*, концентрация внимания сосредоточена в большей мере как раз на последнем. Это логично, ведь доверенный, промежуточный субъект информации *T* становится «законно» установленным атакующим первоначальными субъектами *A* и *B*, способным совершать MITM атаки (man in the middle) и переводящим систему в неустойчивое состояние, состояние требующее абсолютного доверия [8]. Приведённая атака ссылается на нерешённую проблему доверия², разрушительную и губительную по своей сути, но при этом затмевающую более скрытую и деструктивную, мощь которой в современном мире превосходит прямолинейные MITM атаки. Одной из задач нашей статьи является выявление данного метода нападения, его анализ и последующие решения.

Возможность атаки со стороны принимающего субъекта есть суть проблемы, возникающая на фоне криптографических протоколов адаптируемых под защиту связи «клиент-сервер», где сервер выдвигается как получатель информации, а клиент как отправитель. При этом, в большинстве случаев сервер вовсе не является настоящим получателем, а представляет собой лишь промежуточный, интерстициальный узел, как это изображено на *Рисунок 1*, целью которого является связывание двух и более клиентов между собой, образуя тем самым условно новый тип связи «клиент-клиент», который в свою очередь полностью игнорируется криптографическими протоколами. Такая проблема критична в самом базисе компьютерных сетей, т.к. выдаёт всю информацию субъектов (интересы, сообщения, контактную информацию, политические взгляды и т.д.) в предельно открытом, прозрачном, транспарентном состоянии субъекту-посреднику [9][10]. Примером такого явления служат современные мессенджеры, социальные сети, форумы, чаты, файловые сервисы и т.д., где общение не происходит напрямую (как это предполагается в криптографических протоколах), а всегда проходит сквозь стороннюю точку, представляющую собой сервис или платформу связи.

²Проблема доверия — невозможность построения безопасной, монолитной и саморасширяющейся системы, основанной полностью на криптографических алгоритмах для конечных субъектов, без использования промежуточных узлов, удостоверяющих идентификацию абонентов, либо без сторонних каналов связи с заранее установленным доверием. Задача возникает на фоне сложности передачи публичных ключей. В децентрализованных, ризоморфных системах данная проблема куда более значима, т.к. оставляет лишь метод использования сторонних каналов связи, то-есть прямого доверия, через которое уже может образовываться сеть доверия.

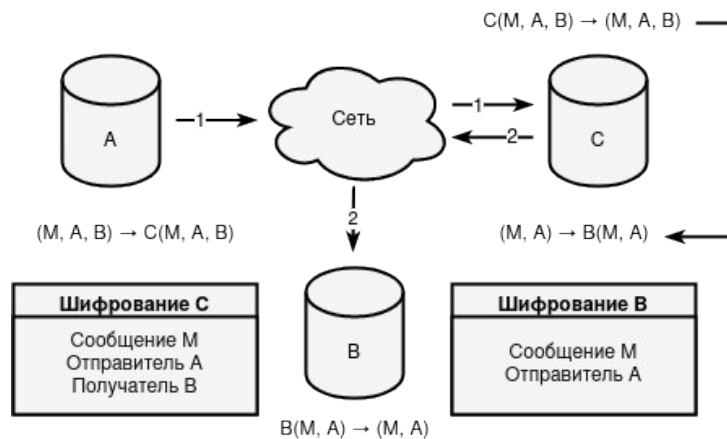


Рисунок 1. Коммуникация субъектов A, B посредством общего сервиса C

Описанное явление начинает претерпевать кардинальные изменения, т.к. возвращает фундаментальную проблему и задачу классической криптографии — борьбу с прослушиванием, которая должна была решиться (и решилась теоретически) лишь с появлением раздела асимметричной криптографии [11]. Данная апория куда серьезнее и значимее, нежели классическая MITM атака и требует куда меньшее количество затрат атакующего для слежки большего количества атакуемых. Это есть паноптикум современного общества, где атакующие и атакуемые меняются местами, инвертируют способ слежения и делают заложника инициатором собственного подслушивания. Теперь жертвы самостоятельно подключаются к заведомо прослушиваемой связи, выбирают множество возможных опций слежения за собственным «Я», в то время как атакующие лишь создают аналогичные соединения, воспроизводят платформы слежения в таком необходимом количестве, чтобы затмевать своим присутствием сам факт существования более защищённых альтернатив. Таким образом, с одной стороны конфиденциальность современных сервисов становится лишь декорацией, театром безопасности, симулякрот ссылающимся на несуществующую, гипостазированную безопасность, как на магическое слово маркетинга, а с другой стороны само удобство сервисов начинает быть фундаментом, мыслью, философией, пропагандой противопоставляющей себя безопасности, конкурирующей с ней, постепенно и незаметно заменяющей её, как «*Cumothoa exigua*».

Такое развитие приводит к возникновению систем доверия, где не только сами доверительные узлы становятся атакующими, но и промежуточные получатели, что приводит к куда более значительным и значимым рискам компрометации хранимых и передаваемых объектов между истинными субъектами. Эволюционируя, система начинает поддерживать неявные соединения между разнородными платформами связи, дублируя информацию на множество платформ с целью последующего массового сбора информации, обмена, маркетинга и продажи релевантной рекламы. В результате все вышеописанные факторы приводят к явному нарушению конфиденциальности конечных пользователей системы с определённым деанонимизирующим последствием.

Тем не менее безоговорочно аннигилировать такую систему доверия не представляется возможным из-за реального ухудшения оптимизации и производительности программ, последующих трудностей построения архитектуры приложений, и в конечном счёте, из-за невозможности полного искоренения доверия как такового [12, с.267]. Таким образом, необходимо не уничтожать, а заменять данную систему более безопасной, отодвигать её на второй план, в нишу, в которой только она способна быть полезной. Во всех других случаях,

необходимо строить и разрабатывать иную систему, механизм которой стремился бы к уменьшению мощности доверия³, в которой собственная её структура представляла бы защиту объектов и анонимат субъектов. К системам подобного рода уже частично относятся анонимные сети, клиент-безопасные приложения и тайные каналы связи, анализ и развитие которых представлен в последующих разделах и подразделах.

3. Сетевые архитектуры и движение моделей

Все сетевые коммуникации строятся на определённых топологиях, архитектурах задающих последующее их применение. Топологию можно рассматривать как со стороны более низкого уровня, вида «звезда», «ячеистая», «шина», «кольцо» и т.п., так и со стороны более прикладного уровня, как «многограновая», «одноранговая», «гибридная». На первый взгляд, таковые определения дают однозначные соответствия: «многограновая» = «звезда» ИЛИ «звезда+иерархическая» ИЛИ «иерархическая», «одноранговая» = «ячеистая» ИЛИ «полносвязная», «гибридная» = «иерархическая+полносвязная» ИЛИ «звезда+ячеистая» и т.д. Но по мере изучения будут явно прослеживаться противоречия таковых суждений, при которых «одноранговая» архитектура может становиться «звездой», «гибридная» – «иерархической» и прочее.

За основу терминологии сетевых архитектур будет браться именно прикладной уровень, т.к. низкоуровневый, в большей мере, описывает не как само взаимодействие субъектов между собой, а как способ технической коммуникации между таковыми точками. Если выбирался бы низкоуровневый подход в плане описания, то он несомненно порождал бы дополнительные противоречия, при которых, как пример, иерархическая система становилась бы системой децентрализованной. Многограновая же архитектура, в большей мере изучающая взаимодействие субъектов между собой, предполагает, что таковая иерархичность как раз наоборот является следствием централизованности системы.

3.1. Определение сетевых архитектур

Многограновые сети разделяются на две модели: централизованные и распределённые. Централизованная или классическая клиент-серверная архитектура является наиболее распространённой моделью из-за своей простоты, где под множество клиентов выделяется один сервер, выход из строя которого приводит к ликвидации всей сети. Распределённая многограновая система предполагает множество серверов, принадлежащих одному лицу или группе лиц с общими интересами, на множество клиентов, тем самым решая проблему уничтожения сети при выходе из строя одного или нескольких серверов. Из вышеописанного также следует, что классическая централизованная структура является лишь частным случаем более общей распределённой модели, или иными словами, сам факт

³Мощность доверия — количество узлов, участвующих в хранении или передаче информации, представленной для них в открытом описании. Иными словами, такие узлы способны читать, подменять и видоизменять информацию, т.к. для них она находится в предельно чистом, прозрачном, транспарентном состоянии. Чем больше мощность доверия, тем выше предполагаемый шанс компрометации отдельных узлов, а следовательно, и хранимой на них информации. Принято считать одним из узлов получателя. Таким образом, нулевая мощность доверия $|T| = 0$ будет возникать лишь в моменты отсутствия каких-либо связей и соединений. Если $|T| = 1$, это говорит о том, что связь защищена, иными словами, никто кроме отправителя и получателя информацией не владеют. Во всех других случаях $|T| > 1$, что говорит о групповой связи (то-есть, о существовании нескольких получателей), либо о промежуточных узлах, способных читать информацию в открытом виде.

распределённости становится следствием централизации. Сети на основе многогранговой архитектуры расширяются изнутри, относительно своего ядра, и не допускают расширения извне.

В одноранговых (peer-to-peer) системах все пользователи однородны, имеют одинаковые возможности, могут представлять одни и те же услуги маршрутизации [1, с.792]. Сами одноранговые сети могут быть разделены на три модели: централизованные, децентрализованные и распределённые (условно). Централизованные одноранговые сети представляют собой соединения на базе одного или нескольких, заранее выделенных или динамически выделяемых серверов-ретрансляторов, исключение которых приводит к блокированию всей сети. Отсутствие прав серверов в такой модели начинает порождать равноправность их клиентов. Распределённые сети не выделяют какой-либо центр или узел связи, сохраняя факт одновременной и полной коммуникации узла со всеми другими нодами, иными словами, со всей сетью (иногда под распределённой связью подразумевают необходимое N -ое количество соединений, необязательно со всей сетью). В децентрализованных же сетях возможно образование неравномерного распределения соединений и появление «неофициальных» узлов-серверов, часто используемых другими нодами в качестве последующей маршрутизации. Таким образом, децентрализованная модель в своём определении куда сильнее подвержена концентрированию линий связи, чем модель распределённая. Тем не менее, распределённая сеть является лишь конфигурацией децентрализованной и полноценно в отрыве от последней рассматриваться не может. Сети на основе одноранговой архитектуры расширяются извне, за исключением начальной фазы одноранговой централизации.



Рисунок 2. Сетевые архитектуры и их декомпозиция в моделях

Гибридная система объединяет свойства многогранговых и одноранговых архитектур, пытаясь взять и удержать как можно больше положительных и меньше отрицательных качеств (сама гибридность системы может рассматриваться в разных значениях и проявлениях, как пример на уровне топологий: шина+кольцо, кольцо+полносвязная, звезда+ячеистая и т.д., или на уровне прикладного рассмотрения: одноранговая+многогранговая). Плюсом многогранговых архитектур является возможность разделения логики на серверную и клиентскую, а также более быстрая и/или статичная скорость маршрутизации. Плюсом одноранговых архитектур может являться высокая отказоустойчивость за счёт внешнего расширения сети и возможность построения безопасной «клиент-клиент» связи. Минусом гибридных архитектур на ранних стадиях развития является их возможный, осуществимый и более вероятностный переход в многогранговые системы (по сравнению с одноранговыми) за счёт большого уплотнения серверов принадлежащих одному лицу, либо группе лиц с общими интересами.

3.2. Движение моделей как развитие сетевых архитектур

Развитие сетевых архитектур в плане синтеза безопасности и анонимности проходит в следствие движения принадлежащих им моделей. Весь нижеизложенный анализ данного раздела будет действенен только в пределах исторически-длительного развития скрытых систем и не пригоден к обширному историческому анализу всего развития одноранговых, многогранговых или гибридных сетевых архитектур в целом. Так например, если отбросить определения безопасности и анонимности, а взять в качестве основы только сетевые коммуникации, то ARPANET, являясь первой формой одноранговой децентрализации, порождает сеть Интернет, которая становится второй, финальной, эволюционированной формой одноранговой децентрализации, что на корню противоречит нижесказанному. Также, если исходить только из безопасности, игнорируя при этом полностью или частично анонимность, то исторически сеть Napster, являясь одноранговой централизованной моделью, моментально (после своего отмирания) порождает сеть Gnutella, как синтез многогранговой и одноранговой централизации, что также противоречит части нижесказанного, потому как исключает фазы и этапы возникновения гибридных архитектур. Далее, если же исходить только из анонимности, игнорируя безопасность, то исторически становится невозможным целостное определение многогранговой архитектуры, потому как таковая, становясь отрицанием анонимности, становится одновременно и её исключением. Через исключение в свою очередь становится невозможным целостное рассмотрение многогранговой распределённой модели, потому как таковая в своей совокупности начинает уже содержаться в гибридных архитектурах, которые и становятся способными самостоятельно воссоздавать первично качественную анонимность, что является непосредственным противоречием. Таким образом, весь нижеизложенный материал необходимо пропускать через призму развития безопасности и анонимности как единого неразрывного целого.

Становление многогранговой централизованной (классической) системы является следствием отрицания одноранговой начальной децентрализованной модели, как формы нежизнеспособной к нарастающим реалиям масштабируемости. На данном этапе одноранговый узел, словно единая личность, расщепляется (чтобы собраться вновь) на два субъекта – клиент и сервер. Таковое разделение предполагает разграничение прав между обработкой информации со стороны сервера и её инициализацией со стороны клиента. В подобной системе информация становится отчуждённой от её первичного создателя непосредственно и передана в «руки» сервиса хранения. Клиентам, в конечном счёте, становится избыточно, проблематично (и даже архаично) создавать прямолинейные связи между друг другом, потому как их информация благоприятно начинает переходить в удобочитаемое и отсортированное состояние без дополнительных проблем и трудностей в плане ручной настройки соединений и способа хранения данных. Инициализация единой точки отказа становится главным фактором развития иерархичности, когда многогранговая централизованная система начинает нести бремя значительных рисков компрометации всей хранимой информации. Действительно, соединяя всех клиентов между собой, сервер буквально становится целостной сетью и единой, сингулярной точкой отказа, что в итоге приводит к возникновению благоприятной почвы для развития множества векторов нападения.

Становление многогранговой распределённой системы из классической централизованной является важным составляющим фактором эволюции существующих иерархических сетей. Данное «разложение», как отрицание явной централизации,

начинается на этапе разделения функций, приравнивая сервер к определённому действию, как это изображено на *Рисунок 3*. В такой начальной фазе, сервера становятся взаимосвязанными общей целью обслуживания, но не скованными выполнением общих задач. Из этого следует, что отказ в обслуживании одного сервера начинает влиять только на частную задачу (текущего сервера) и продолжает влиять на общую цель (группы серверов). Таким образом, затрагивая один сервер, сама система продолжает функционировать, хоть и не выполняя полный спектр запланированных действий. Последующей фазой развития уже становится взаимозаменяемость серверов, выполняющих узкоспециализированную задачу, посредством их дублирования, тем самым решая проблему отказоустойчивости в целом. В данном контексте стоит заметить, что иерархичность структуры продолжает сохраняться, даже при добавлении множества серверов с однородными функциями, не перерастая в одноранговую систему полноценно. Представленное явление проходит в следствие внутреннего алгоритма расширения системы, доступ к которому осуществляется наиболее высшими звеньями уже существующей и выстроенной иерархической цепи. Поэтому, даже если внутри централизованных систем будет существовать N -ое количество одноранговых, сама сеть не перестанет быть многогранной, до тех самых пор, пока будет существовать механизм восстановления и удержания иерархичности. Т.к. иерархичность в любом своём проявлении порождает централизацию, то во всех последующих упоминаниях под термином «централизация» будет пониматься именно конечная фаза эволюции многогранной архитектуры — распределённая модель.

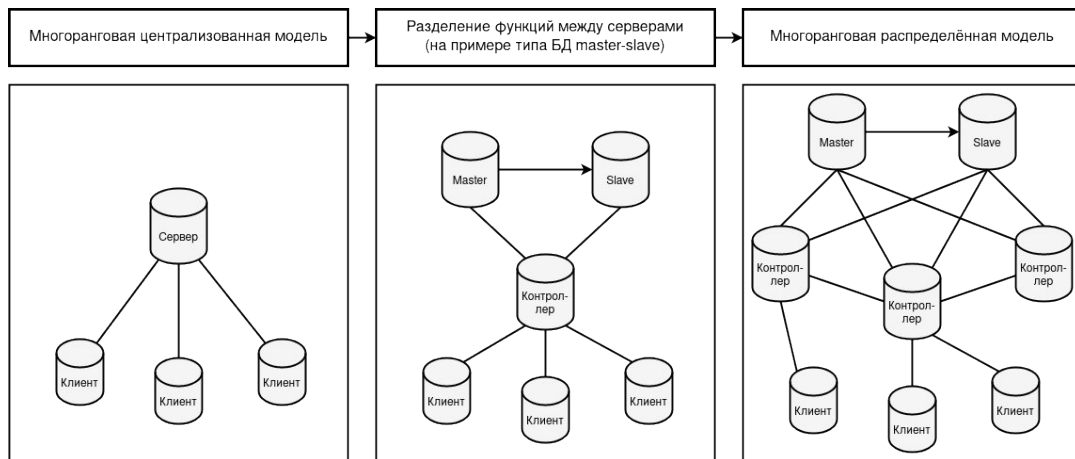


Рисунок 3. Развитие многогранной архитектуры на примере типа БД «master-slave»

Становление одноранговой централизованной системы является следствием «переосмысления» многогранной централизации, её отрицанием. Инвертируя способ взаимодействия между клиентом и сервером, данная модель делает последнего лишь держателем сети, придатком коммуникаций. В такой системе все пользователи становятся однородными и равноправными только за счёт отсутствия прав сервера, главной функцией которого, в конечном счёте, становится перенаправление пакетов между клиентами сети. Вследствие этого, сервера в одноранговой централизации лишаются дополнительных прав многогранной архитектуры, лишаются быть полноценными посредниками между несколькими субъектами, тем самым и лишаясь функций сохранения, обработки и выдачи получаемой информации. При поверхностном анализе, централизация одноранговая, как этап развития сетевых коммуникаций, становится лишь упрощением централизации многогранной. При более же углубленном анализе выявляется, что таковая модель способна не только дублировать сервера практически в неограниченном количестве (за счёт

отсутствия какой бы то ни было логики кроме ретрансляции), что частично отсылает нас к способу функционирования многогранговой распределённости, но также и расширяться извне, что присуще одноранговым архитектурам. Таким образом, можно утверждать, что одноранговая централизация становится альтернативным вектором развития многогранговой централизации.

Становление одноранговой (финальной) децентрализованной системы не является прямым следствием развития централизованной модели. Централизация одноранговая по историческим причинам способствовала инициализации децентрализованной философии, но не за счёт последовательных этапов улучшения, а за счёт фактора нежизнеспособности в «сожительстве» с многогранговой системой [13] в начальной фазе своего существования. Последняя в буквальном смысле «поглотила» примитивную одноранговую централизацию, привела к концентрированному методу выстраивания связей и иерархическому способу существования системы. Таким образом, децентрализованная модель должна была стать более качественным выражением и проявлением одноранговой архитектуры, чем централизованная. Итогом такого процесса стало объединение клиентской составляющей с серверной частью, породив тем самым узлы связи, как отдельные сетевые единицы коммуникации, возникшие из эволюции гибридных архитектур. Частным случаем продолжительного развития одноранговой децентрализации является становление распределённой системы, как следствия нарастающей концентрации линий связи со стороны децентрализованной модели, претерпевающей этапы «коррозии» централизацией и приводимой к возникновению «узких» мест среди нескольких сетевых множеств. Противоречием децентрализованных моделей является их постоянное движение к сосредоточению соединений, от хаотичности к порядку, от безопасности к отказоустойчивости, — таковыми становятся основные векторы регресса децентрализации основанные на выборе наиболее стабильных узлов. Решением становится иная и более качественная концентрация линий связи, основанная на объединении узлов посредством многочисленных соединений, в противовес единому центру коммуникаций, и как следствие, фактор стабильности возобновляется уже в количественном выражении узлов.

Становление гибридной архитектуры проходит в следствие синтеза одноранговой централизации и многогранговой распределённости. С одной стороны, одноранговая централизация частично избавляет систему от ядра внутренней иерархии, разбавляя её внешними одноранговыми связями. С другой стороны, многогранговая распределённость преобразовывает примитивные редирект-функции, изменяя их форму дополнительными действиями, и тем самым сохраняет внешнюю иерархию между сервером-клиентом. Внешним противоречием гибридности, на первый взгляд, становится сильная схожесть либо с многогранговыми распределёнными моделями, либо с одноранговыми децентрализованными. В совокупности же, гибридная архитектура представляет собой скорее переходное состояние, то-есть фазу развития систем и их моделей, нежели собственное и статичное положение. И действительно, гибридная архитектура описывается как синтез одноранговой централизации с многогранговой распределённостью, являясь причиной их последующей негации, приводимой уже к определению децентрализованной модели одноранговой архитектуры, как единовременного отрицания одноранговой централизации и многогранговой распределённости, то-есть отрицания гибридности. Именно поэтому, гибридная архитектура на этапе своего становления имеет больше свойств схожих с централизацией, где отличительной особенностью данной модели становится способность к единовременному внешнему (свойственно одноранговым архитектурам) и внутреннему (свойственно многогранговым архитектурам) масштабированию. В последующем, по мере своего развития, гибридность претерпевает ряд метаморфозов и становится в конечном счёте

неотличимой (относительно некоторого множества субъектов) от децентрализованной модели. Это можно наблюдать на примере сетей Tor и Bitcoin, которые являясь одновременно гибридными, представляют разнородный вид гибридности, где в одном случае Tor более приближен к распределённой модели многограновой архитектуры (централизованной модели гибридности), а Bitcoin к децентрализованной модели одноранговой архитектуры (децентрализованной модели гибридности).

Метаморфозы сетевых моделей кратко представляются через призму детерминированного конечного автомата, изображённого на *Рисунок 5*, состояния которого изменяются по мере исторической на то необходимости и направленности. Так например, действия (a , d , g) можно рассматривать как необходимость в переосмыслении, в прямом отрицании, (b , f) – необходимость в развитии, во внутреннем отрицании, ($c+e$) – необходимость в объединении, в синтезе отрицаний. Из всего вышеприведённого возможно составить выражения, относящиеся к развитию каждой определённой модели, где многограновая централизация = (a), многограновая распределённость = (ab), одноранговая централизация = (ad), гибридная централизация = ($abc+ade$), гибридная децентрализация = ($abc+ade$)(f) и, в конечном итоге, одноранговая децентрализация = ($abc+ade$)(fg).

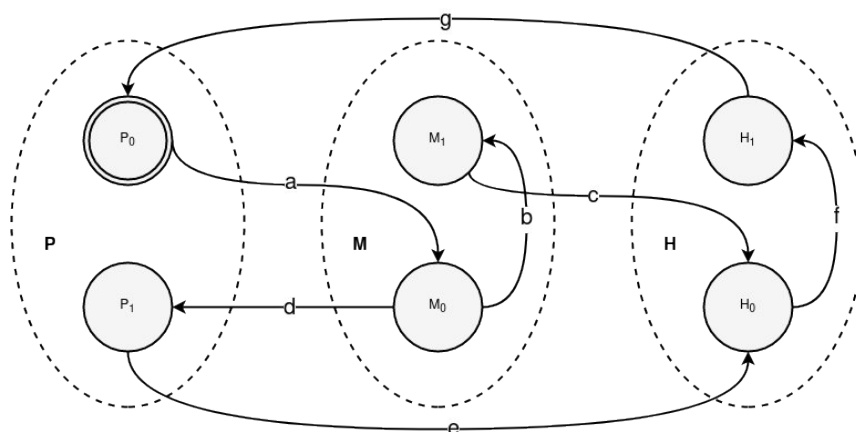


Рисунок 5. Конечный автомат развития сетевых архитектур посредством движения их моделей, где $\{P, M, N\}$ – сетевые архитектуры: P – одноранговая, M – многограновая, N – гибридная

Также стоит отметить, что развитие децентрализованной модели не является примитивно однородным, как это может показаться на первый взгляд, потому как таковая система в своём историческом понимании приобретает двойственное значение. С одной стороны, децентрализация становится первичной формой сетевых коммуникаций, инициализацией и точкой отчёта всех последующих архитектурных решений. С другой стороны, децентрализация, посредством этапов отрицаний и снятия, начинает быть более совершенной формой, и в конечном счёте выражением финализации форм движения сетевых архитектур. Таким образом, по исторически-закономерным причинам, первичная децентрализация вырождается только в многограновую централизацию, а конечная её форма — в более высокую стадию децентрализации. В итоге децентрализация становится замыканием всего сетевого развития, одновременно являясь его началом и финалом.

4. Определение и этапы становления скрытых систем

Скрытые системы представляют собой общий и обширный класс сетевых коммуникаций способных поддерживать анонимность субъектов и/или безопасность

передаваемых объектов. В определённой степени таковые системы могут быть нацелены на безопасность передаваемых объектов в степени большей, отодвигая анонимность на второй план, либо наоборот, делая систему анонимной, но полноценно не заботясь о безопасности объекта после получения точкой назначения. Но так или иначе, в любом из представленных случаев таковые системы полноценно никогда не исключают свои второстепенные качества, что даёт возможность определённых комбинаций. При данных композициях сочетаются свойства и безопасности, и анонимности, что делает таковые системы полными. Полные скрытые системы, в свою очередь, являются решением основной проблематики данной работы.

4.1. Определение анонимных сетей

Скрытые, тёмные, анонимные сети — есть сети, соединяющие и объединяющие маршрутизацию вместе с шифрованием. Маршрутизация обеспечивает критерий анонимности, направленный на субъект, шифрование — критерии конфиденциальности, целостности, аутентификации, направленные на объект. Без маршрутизации легко определяются отправитель/получатель, без шифрования легко определяется передаваемое сообщение [1, с.912]. Таким образом, только в совокупности этих двух свойств сеть может являться скрытой [14][15].

В современном мире большинство скрытых сетей представляют оверлейные соединения, иными словами соединения, которые основаны на уже существующей сети (например, сети Интернет). Но так или иначе, это не говорит, что скрытые сети не могут существовать сами по себе и быть однородной структурой, т.к. первоначальная архитектура может быть изначально нацелена на анонимность и безопасность, как например, это описано в проекте NETSUKUKU [16]. Именно по историческим причинам, современные скрытые сети имеют оверлейные уровни безопасности.

Любая анонимная сеть основывается либо на одноранговой (ризоморфной), либо на гибридной (комбинированной) архитектуре сети, исключая при этом многоранговую (иерархическую). Последняя архитектура является прямым отрицанием анонимности, направленным на её подавление посредством концентрации линий связи. Гибридная архитектура совмещает в себе некоторые свойства многоранговой и одноранговой архитектур.

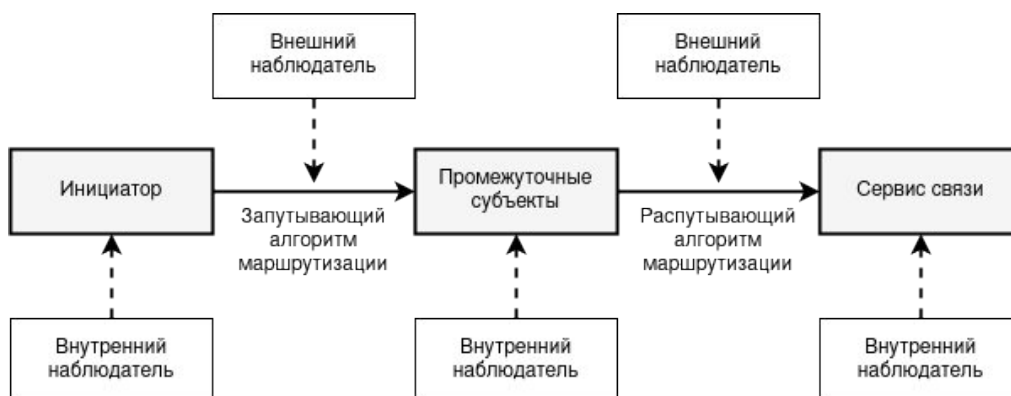


Рисунок 6. Внешние и внутренние наблюдатели (атакующие) в критериях запутывающего алгоритма маршрутизации

Маршрутизация в анонимных сетях не является примитивной и ставит эффективность распространения объектов на второй план, потому как главной целью становится создание

запутывающего алгоритма, который приводил бы к трудоёмкости анализа истинного пути от точки отправления до точки назначения. Производительность, эффективность «чистой» маршрутизации теряется, заменяясь особенностью алгоритма. В таких условиях, сами скрытые сети становятся медленными и сложными в применении, что также частично или полноценно отодвигает их прикладное и повседневное использование в настоящее время.

В задачах такого типа маршрутизации лежат модели угроз, в которых учитываются возможности атакующих. Главным антагонистом в подобных условиях становится государство, как внешний, глобальный наблюдатель, способный просматривать в широком масштабе распространение объектов по сети. В таком случае алгоритм маршрутизации должен уметь запутывать внешнего противника, не предоставлять возможности выявлять закономерности отправления, получения, запросов и ответов участниками анонимной сети. Другими, и не менее серьёзными противниками, являются внутренние атакующие, когда сами её же участники становятся отрицанием системы, её разложением. Предполагается, что внешние наблюдатели, помимо анализа трафика сети, способны также блокировать работающие узлы в системе, тем самым рассматривая их уникальные комбинации и паттерны поведения. Внутренние же наблюдатели способны наполнять сеть кооперируемыми узлами и совершать помимо маршрутизации также дополнительные действия, как отправление и получение информации. Наблюдатели без дополнительных функций называются пассивными атакующими, в противном случае – активными. В таких реалиях алгоритм маршрутизации должен отстранять буквально каждого субъекта (отправителя, получателя и промежуточного) от полноценного анализа принимаемых и отправляемых пакетов.

В своей совокупности, в синтезе, сговоре внешних и внутренних атакующих, способны проявляться атаки, которые ранее были бы невозможности по отдельности. Абстрагировано, основные методы нападений, как множества, можно изобразить в виде *Таблицы 1*. При этом, из определения активных атак выясняется, что таковые являются надмножеством пассивных, то-есть $A \in C$ и $B \in D$.

	Внутренние атаки	Внешние атаки
Пассивные атаки	A	B
Активные атаки	C	D

Таблица 1. Пассивные / Активные и Внутренние / Внешние нападения как множества векторов направленных на анонимные сети

Скрытыми сетями с теоретически доказуемой анонимностью принято считать замкнутые (полностью прослушиваемые) системы, в которых становится невозможным осуществление пассивных атак с определёнными условностями по количеству узлов неподчинённых сговору. Говоря иначе, с точки зрения пассивного атакующего, апостериорные знания (полученные вследствие наблюдений) должны оставаться равными априорным (до наблюдений), тем самым сохраняя равновероятность по N -ому множеству субъектов сети.

Из специфичной формы маршрутизации выявляются критерии на основе которых можно утверждать, что сеть является анонимной. Так например, сети Tor, I2P, Mixminion, Herbivore и т.п. являются анонимными сетями, потому как обеспечивают анонимность субъектов, за счёт запутываемой маршрутизации, и безопасность объектов в коммуникациях между инициаторами и платформами связи. Сети RetroShare, Freenet, Turtle, Bitmessage и т.п. не являются анонимными сетями, т.к. маршрутизация представляет собой только сам

факт передачи (в некой степени и специфичный из-за гибридного или однорангового характера сетевой архитектуры), транспортирования информации без непосредственного применения запутывающего алгоритма, хоть самолично системы и обеспечивают высокий уровень безопасности объектов. Не являются скрытыми сетями также сети, предоставляющие исключительно анонимность субъектов в отрыве от безопасности передаваемых объектов. Такое событие крайне специфично, но возможно на примере «чистых» DC-сетей, как неклассических форм первой стадии анонимности (более подробно в подразделах «Становление сетевой анонимности» и «Двойственная форма первой стадии анонимности»).

4.2. Определение клиент-безопасных приложений

Клиент-безопасные приложения или приложения базируемые на безопасной линии связи «клиент-клиент» представляют собой абстрагирование передаваемых / хранимых объектов от промежуточных субъектов, тем самым приводя мощность доверия $|T|$ к своему теоретически минимально заданному значению. В таких условиях, клиент-безопасные приложения становятся ключевым фактором в построении тайных каналов связи.

Основным следствием пониженной мощности доверия является возможность доказательства безопасности приложения ориентируясь только на его клиентскую составляющую. Это в свою очередь говорит, что ранее существующие сервера, как сервисы связи, теперь являются лишь промежуточными узлами, созданными для транспортирования, либо хранения информации в полностью зашифрованном или аутентифицированном виде. Любое редактирование существующей или создание ложной информации на стороне сервиса будет сразу же обнаружено клиентской составляющей.

Одной из основных особенностей таких систем является криптографическая идентификация субъектов информации. Так как подобные системы более не являются многограновыми, то субъекты становятся неспособными применять в чистом и привычном виде схемы типа «логин/пароль» в целях своей авторизации. Авторизация и последующие аутентификации относительно всех клиентов сети выявляются из асимметричной пары ключей. Публичный ключ (или его хеш) становится в конечном счёте идентификацией субъекта, а все посылаемые пользователем сообщения подписываются приватным ключом, тем самым аутентифицируя инициатора связи. Схема «логин/пароль» способна применяться в таких системах, но уже локально, для защиты приватного ключа конкретно выбранного участника сети.

Таковые системы крайне разнородны в своём проявлении и могут представлять альтернативу классическим сервисам связи. Так например, вполне реальным становится замена существующих мессенджеров, социальных сетей, форумов, распределённых хранилищ, цифровых валют и т.д. на приложения с безопасной линией связи «клиент-клиент». Таким образом, клиент-безопасные приложения становятся новыми платформами связи, более качественными в своём проявлении, чем классические альтернативы.

4.3. Определение тайных каналов связи

Секретные, тайные, эзотерические каналы связи — есть соединения, располагаемые в заведомо замкнутом, незащищённом, враждебном окружении и имеющие характеристики безопасной передачи информации. В отличие от определения [17, с.147], в нашем случае под тайными каналами будут пониматься системы «неорганически вживляющиеся» в уже существующую. При этом анонимность, родственная скрытым сетям, не является базисом

секретных каналов связи и, следовательно, может быть отброшена из-за ненужности или по необходимости. Так, например:

1. Первой формой тайных каналов связи принято считать сохранение экзотеричности субъекта и экзотеричности объекта, благодаря использованию криптографических методов преобразования информации. Но стоит также заметить, что такой принцип сохраняется и при использовании стеганографических методов [18], поскольку субъект остаётся открытым, а объект остаётся закрытым (только вместо сокрытия информации, скрывается сам факт её существования). При этом, если в секретных каналах связи используются именно криптографические методы, то они не ограничиваются только идентификацией субъектов (целостностью, аутентификацией), но также и применяют практику шифрования объектов (конфиденциальность). Примером такого поведения может служить использование программ типа PGP [17, с.785][19] на форумах, мессенджерах, социальных сетях.

2. Второй формой тайных каналов связи принято считать абстрактную анонимную сеть (более подробно в разделе «Абстрактные анонимные сети»). Виртуальная маршрутизация абстрактных анонимных сетей имманентна, способна сводиться к передаче объекта внутри единого, сингулярного приложения, связывающего всех субъектов изнутри. Таким приложением является сервер (или группа серверов находящихся в сговоре), при помощи которого клиенты передают друг другу и принимают друг от друга информацию. Так как приложение располагает полным знанием того, кто является отправителем и кто является получателем, то сам сервер становится создателем сети на основе которой располагается тайный канал связи. При всём этом, такое приложение, в задаче о тайных каналах связи, аналогично и равносильно государству, в задаче о построении анонимных сетей.

Тайные каналы связи, использующие стеганографию, всегда имеют некий контейнер, в который помещается истинное сообщение [18, с.8]. Под контейнером может пониматься ложное, неявное, сбивающее с пути сообщение, которое чаще всего носит нейтральный характер. Из этого также следует, что в зависимости от размера контейнера, зависит и размер самого исходного сообщения, тем самым, стеганографический подход рассчитан на сообщения малых размеров и мало пригоден для передачи целых файлов. Примером контейнера может служить изображение, аудио-запись, видео-файл, то есть всё, что может хранить дополнительную или избыточную информацию, которая останется незаметной для человеческих глаз и ушей. Одним из примеров сокрытия информации может служить замена каждого старшего бита в изображении, битами исходного сообщения. Таким образом, если размер изображения (то есть, контейнера) будет равен 2MiB (без учёта метаданных), то максимальный размер исходного сообщения не будет превышать 256KiB.

Использование стеганографии, вместе с криптографией, может помочь в случаях, когда имеется вероятность или возможность нахождения скрытого сообщения в контейнере за время меньшее, чем необходимое. Тем самым, даже если исходное сообщение было найдено, оно будет иметь зашифрованный вид. Здесь стоит учитывать тот факт, что при шифровании размер информации увеличивается (добавляется хеш, подпись, текст дополняется до блока), а из этого уже следует, что максимальный размер исходного сообщения уменьшается.

Существует ещё один, третий способ сокрытия информации, относящийся к криптографическим, но при этом обладающий некоторыми стеганографическими свойствами, качествами, особенностями [17, с.720]. Это не является последовательным

объединением, использованием методов, как это было описано выше, а скорее оказывается их слиянием, синтезом и симбиозом. В таком методе истинная информация скрывается в цифровой подписи ложного сообщения на основе общего, согласованного ключа, где главной чертой и исключительностью является стойкость ко взлому, сродни сложности взлома цифровой подписи. При этом, сама подпись — есть контейнер, скрывающий существование сообщения методом аутентификации ложной информации.

Теоретически, тайные каналы связи рекуррентно могут находиться и в других секретных каналах, либо анонимных сетях (по причине того, что тайные каналы могут быть воссозданы совершенно в любых системах и ситуациях), тем не менее, подобный подход является очень сомнительным (по причине избыточности накопленных слоёв шифрования), специфичным (по причине редкости практического использования) и затратным (по причине уменьшения производительности программ, уменьшения ёмкости контейнеров).

Из-за высоких накладных расходов (в частности описанных выше), в тайных каналах связи (как правило) не предполагается существование сервисов связи, присущих анонимным сетям, в том числе и в своей второй форме. Иными словами каждый получатель становится конечной точкой маршрута, а не возможным промежуточным субъектом, ретранслирующим информацию истинному субъекту с заранее известным, транспарентным открытым текстом.

4.4. Становление сетевой анонимности

Термин «анонимность» представляет собой достаточно сложное и комплексное понятие, потому как таковое зависит от контекста. Так например, анонимность может предполагать собой использование псевдонимов при письме или живописи, использование масок с целью сокрытия лиц при законных и незаконных действиях, в благотворительности с отсутствием каких бы то ни было инициалов, в Интернете с целью сокрытия своего сетевого трафика и т.д. Чтобы дать более точное понимание анонимности, необходимым следствием является сокращение способов использования данного термина. В нашей статье наиболее важной становится анонимность направленная на сетевые коммуникации.

Сетевая анонимность хоть и является более узким термином, или вернее сказать подмножеством термина «анонимность», но до сих пор остаётся комплексным понятием. Единственным отличием становится независимость от контекста, потому как контекстом становится сам факт сетевых коммуникаций как среды исследования. Это и позволяет конкретизировать анонимность и выявлять основные векторы её развития.

Потому как сетевая анонимность есть объект фрагментированный со стороны определений и терминологий, то можно предположить неоднородность и факт становления, развития в определённых этапах. Вкратце, анонимность действительно становится возможным трактовать как некую градацию, поэтапность, которой присуще шесть стадий, выявляющих процесс её формирования посредством фаз отрицаний и внутренних противоречий.

1. Первая стадия является исходной точкой анонимности, тезисом, монадой примитивно не представляющей анонимность, пустотой инициализирующей мощность анонимности⁴ $|A| = 0$. Примером является существование только прямого, прямолинейного,

⁴Мощность анонимности — количество узлов, выстроенных в цепочку и участвующих в маршрутизации информации от отправителя до получателя, при этом, не будучи никак связанными между собой общими целями и интересами. Из этого следует, что многограновая архитектура по умолчанию имеет мощность анонимности $|A| = 1$ (вне зависимости от количества серверов). Нулевая мощность анонимности $|A| = 0$ возникает при существовании прямых соединений между субъектами

примитивного соединения «клиент-клиент» между двумя одноранговыми субъектами, что равносильно их стабильному состоянию. По причине отсутствия промежуточных субъектов мощность доверия на данном этапе представляет минимально возможную величину.

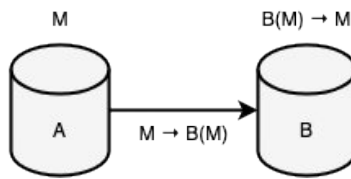


Рисунок 7. Первая стадия анонимности (прямое соединение)

2. Вторая стадия, становясь антитезисом, начинает отрицать первый этап, приводить систему к первичному метастазису, изменять собственным преобразованием способ взаимодействия между субъектами, добавлять к своей оболочке новую роль промежуточного узла, сервера, подчиняющего всех остальных субъектов к частно-личному сервису. Таким образом, архитектура становится многогранной, клиенты начинают зависеть от платформ связи, а мощность анонимности повышаться до константного значения. Этап обеспечивает (инициализирует) только анонимность «клиент-клиент», но игнорирует при этом анонимность «клиент-сервер», что и приводит к статичной мощности анонимности $|A| = 1$. Иными словами, сервер начинает обладать достаточной информацией о клиентах, клиенты в свою очередь начинают коммуницировать посредством сервера, что приводит их к фактическому разграничению, к взаимной анонимности и зависимости от общей платформы. В данной ситуации стоит заметить, что анонимность и безопасность идут вразрез друг с другом, противопоставляют себя друг другу, т.к. с одной стороны безопасность связи «клиент-клиент» становится скомпрометированной и дискредитированной, и в то же время, с другой стороны её же анонимность становится инициализирующей и первой простейшей формой анонимата. Такое противоречие (ухудшения безопасности и улучшения анонимности) не является случайным, а представляет собой правило и закономерность, в чём можно будет убедиться далее. Описанную стадию вкратце именуют псевдо-анонимностью, а клиентов — анонимами.

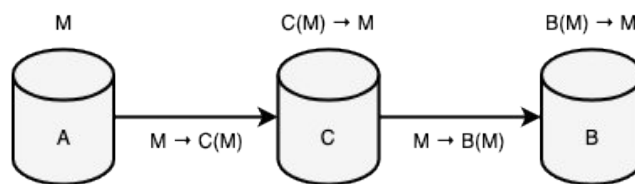


Рисунок 8. Вторая стадия анонимности (соединение посредством сервиса)

(иными словами при отсутствии какой бы то ни было маршрутизации).

$$|A| = |Q(R)|,$$

где R - множество узлов участвующих в маршрутизации,
 Q - функция выборки списка подмножеств узлов, подчиняющихся одному
лицу или группе лиц с общими интересами.

Так например, если $R = \{A, B, C\}$ — это множество узлов участвующих в маршрутизации, а подмножество $\{A, B\} \in R$ — кооперирующие узлы, то $Q(R) = [\{A, B\}, \{C\}]$ и, как следствие, $|A| = |Q(R)| = 2$.

3. Третья стадия, являясь синтезом предыдущих стадий, представляет примитивную маршрутизацию, а следовательно и примитивную анонимность, нескольких прокси-серверов несвязанных между собой. Именно на данном этапе сеть становится раздробленной, неопределённой, гибридной за счёт чего и повышается мощность анонимности методом стремления к статичному значению $\lim_{|A| \rightarrow C}$, где C — количество прокси-серверов. Данный метод предполагает выстраивание цепочки узлов, через которые будет проходить пакет. Мощность анонимности на данном этапе действительно повышается, но и безопасность самих субъектов ещё никак не обеспечивается. Связано это всё потому, что шифрование на данном этапе есть свойство добавочное (сродни второй стадии), не обеспечивающее защиту связи «клиент-клиент», а следовательно, и не приводящее к уменьшению мощности доверия. На Рисунках 8, 9, 11, 12. изображён абстрактный субъект @, способный быть как настоящим получателем, так и промежуточным субъектом — сервисом.

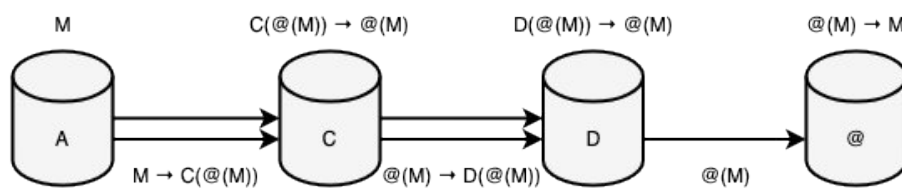


Рисунок 9. Третья стадия анонимности (Прокси транслирование)

4. Четвёртая стадия, как развитие третьего этапа, инициализирует способ изменчивости, множественного шифрования, полиморфизма информации посредством её туннелирования. К такому этапу относятся VPN сервисы (виртуальные частные сети) как N -ое сочетание прокси-серверов со внутренними слоями шифрования [20], где мощность доверия и мощность анонимности эквивалентно третьей стадии. Отличительной особенностью четвёртого этапа является существование выходных узлов, постепенно «раскрывающих» истинный пакет, созданный до первичного туннелирования на отправляющей стороне, из-за чего и появляется возможность к сокрытию метаданных, связующих инициатора сообщения и сервер назначения. В связи с этим, данный этап изменяет способ маршрутизации, придаёт ему свойство полиморфизма как изменчивости закрытой информации по мере перехода от одного узла к другому, и отстраняет промежуточные узлы к анализу и сравниванию зашифрованной информации. Таким методом скрывается настоящая связь между субъектами посредством их объекта, а следовательно и анонимат начинает обретать более истинный характер, при котором стремление системы к увеличению и сдерживанию мощности анонимности становится более качественным, в сравнении с третьей стадией.

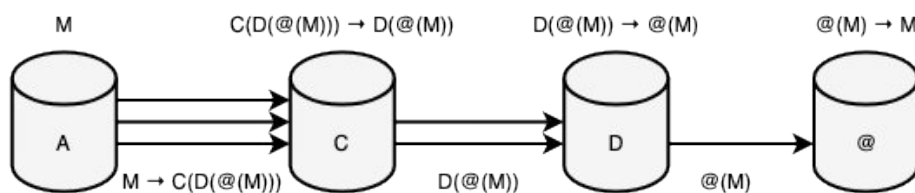


Рисунок 10. Четвёртая стадия анонимности (VPN туннелирование)

5. Пятая стадия, являясь синтезом первого этапа и отрицанием третьего, становится точкой окончательной замены сетевого адреса криптографическим, при которой идентификация субъектов отделяется от концепции сетевых протоколов, подчиняя узлы абстрактно-криптографической модели. Строятся платформы сетевой связи как базисы, поверх которых разрастаются криптографические соединения, инкапсулируя взаимодействия субъектов со своим основанием. Именно на данном этапе мощность доверия вновь становится минимально возможной величиной, а потому и все приложения построенные на пятой стадии анонимности, имеют уровень безопасности зависимый только (или в большей мере) от качества самой клиентской части. Примером такой стадии могут являться чаты, мессенджеры (Bitmessage), электронная почта, форумы (RetroShare), файловые сервисы (Freenet, Filetopia), блокчейн платформы (Bitcoin, Ethereum) и т.д. [21][22], где главным фактором идентификации клиентов являются криптографические адреса (публичные ключи, хеши публичных ключей). Сеть начинает представлять собой не только гибридный, но и одноранговый характер поведения узлов с возможным и дополнительным динамическим способом определения мощности анонимности, как $0 < |A| \leq N$, где N — количество узлов в сети, обуславливаемым слепой маршрутизацией [1, с.398] и криптографической идентификацией. При этом, стоит заметить, что на данном этапе не существует какого бы то ни было полиморфизма информации (как это было в четвёртой стадии), что приводит к внутренним противоречиям одновременного прогресса и регресса анонимности. Поэтому пятую стадию можно вкратце охарактеризовать игнорированием анонимности (экзотеричностью) со стороны субъекта и её сохранением (эзотеричностью) в передаваемом объекте. На *Рисунок 11*, под сетью понимается переключение системы из состояния сетевой идентификации к идентификации криптографической, вследствие чего происходит абстрагирование информации об отправителе для получателя и о получателе для отправителя непосредственно.

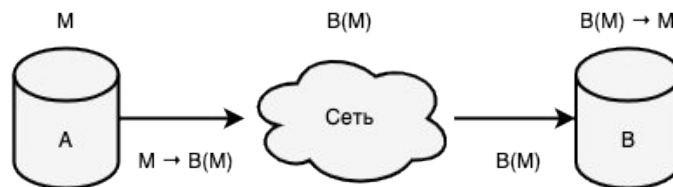


Рисунок 11. Пятая стадия анонимности (соединение посредством абстрактной сети)

6. Шестая стадия приводит к единовременному отрицанию и синтезу четвёртой стадии, как системы неориентированной на анонимную идентификацию субъектов, и пятой стадии, как системы ненаправленной на анонимную связь между субъектами. В такой синергии объединяются свойства полиморфизма (анонимное связывание) и криптографической идентификации (анонимное определение), что приводит не только к анонимату отправителя информации, но и к обезличиванию получателя, вследствие чего определение анонимности становится более качественным и цельным. Мощность анонимности на данном этапе становится эквивалентно четвёртому этапу, равно как и мощность доверия (причина ухудшения мощности доверия относительно пятой стадии приведена в разделе «Проблематика анонимных сетей»). Примером шестой стадии является большинство скрытых сетей, наподобие Tor (onion routing) [23], I2P (garlic routing) [24], Mixminion (mix network) [25] и т.д. На *Рисунок 12*, изображён прототип функционирования системы Tor с запросом ориентированным на внутренний ресурс (в качестве упрощения показана схема с двумя промежуточными узлами).

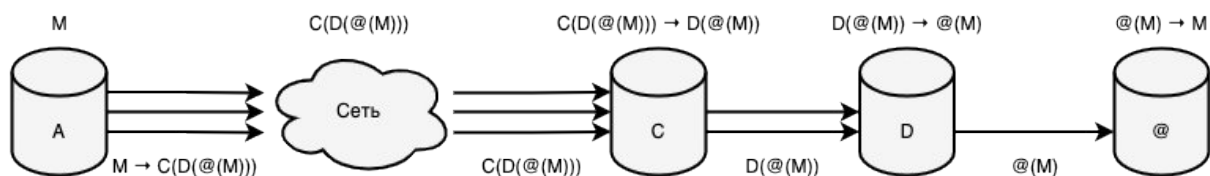


Рисунок 12. Шестая стадия анонимности (абстрактная сеть + туннелирование)

Стоит заметить, что четвёртая и пятая стадии появляются параллельно друг другу, что приводит к сложности (а скорее даже к невозможности) точного опознавания и определения последовательности развития анонимности в целом. Такой порядок стадий был взят по количеству качественных изменений. Так например, в четвёртой стадии (относительно третьей) был добавлен только полиморфизм информации, в то время как в пятой стадии была уменьшена мощность доверия, появилась криптографическая идентификация, возник новый способ маршрутизации и вернулась поддержка одноранговых соединений. С другой стороны, пятая стадия также справедливо могла стать четвёртой, базируясь не на развитие анонимности субъектов, а на развитие безопасности объектов. В таком случае, пятый этап являлся бы финальной формой, в то время как текущая четвёртая стадия не проектировалась бы вовсе.

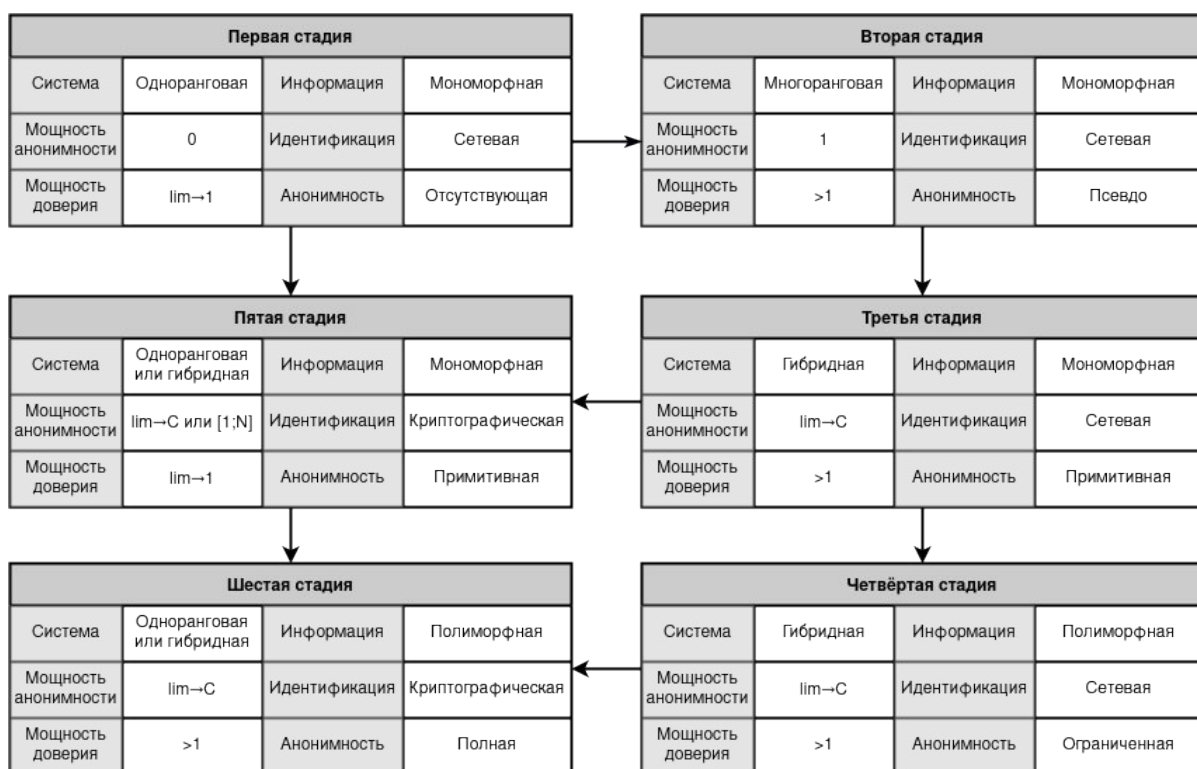


Рисунок 13. Развитие анонимности как процесс формирования стадий

Также стоит отметить, что вторая и пятая стадии анонимности характеризуются импловзивным характером поведения информации в степени большей, чем все остальные стадии, потому как первые предполагают не только метод распространения объектов, но также и способность их сдерживания для последующего извлечения и потребления. Такие стадии именуются платформами связи, т.к. сама коммуникация между субъектами начинает

обеспечиваться не только поточным транспортированием объектов (как самого факта передачи), но и «подгрузкой», посредством промежуточных субъектов, ранее сохранённых объектов, в основании которых уже содержится информация об отправителе и/или получателе. Другие же стадии абстрагируются от конечного потребителя информации и акцентируют внимание только на сам способ передачи. Исключением всего вышесказанного является лишь первая стадия анонимности, где сам факт передачи и является способом финального получения информации.

Защита, определяемая связью «клиент-клиент», зарождается на моменте первой стадии анонимности и в последствии сразу же заменяется клиент-серверным шифрованием второго этапа. Такая быстрая подмена и разложение прямой коммуникации на платформу связи обусловлена неспособностью и ограниченностью первой стадии к эксплозии, расширению сетевых «границ», при которой субъекты не способны массово связываться без создания промежуточных узлов. Последующее и более качественное возрождение безопасной «клиент-клиент» коммуникации, убирающее ограничение в расширении, появляется на пятом этапе и ровно там же заканчивается, потому как целью всех последующих стадий уже является сокрытие субъектов информации посредством методов транспортирования объекта на базе криптографических адресов, где более не ставится вопрос истинности принимающей стороны.

Главным достоинством пятой стадии анонимности является возможность к идентификации субъектов в одноранговых и гибридных системах на основании криптографических методов, что ведёт к целостности, а также к аутентификации передаваемой информации, не зависимой от сторонних узлов и серверов [26, с.223]. Дополнительно может появляться свойство конфиденциальности, где информация начинает представлять собой суть секретного, тайного, зашифрованного, а не открытого и общего объекта. Но и само свойство конфиденциальности на данном этапе — есть дополнительный критерий, а следовательно, может быть удалён, если таковой является избыточным для самой системы. Как пример, в криптовалютах имеются свойства целостности и аутентификации, но не всегда конфиденциальности.

На основе пятой стадии анонимности становится возможным формирование тайных каналов связи первой формы как это представлено на *Рисунок 14*. Такое свойство достигается появлением криптографической идентификации субъектов, благодаря которому становится возможным абстрагироваться от сетевой идентификации.

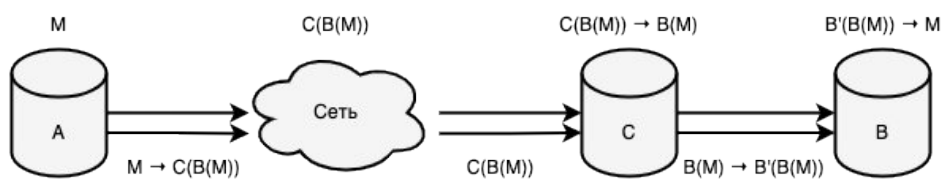


Рисунок 14. Тайный канал связи на базе пятой стадии анонимности, где *A*, *B* – отправитель / получатель, *C* – сервис связи

На основе определённого подмножества пятой и шестой стадий анонимности (более подробно в разделе «Абстрактные анонимные сети») становится возможным формирование тайных каналов связи второй формы.

Таким образом, тайные каналы связи в общих своих свойствах полностью абстрагируются от первичной сети, выстраивают собственные способы коммуникаций и начинают базироваться на пятой или шестой стадии анонимности.

Из всего вышесказанного можно вывести основные критерии (пункты) анонимности на базе которых будет доступно формирование анонимных сетей с повышенным уровнем безопасности (полные скрытые системы).

1. Анонимность обязана быть внутренней, относительно анализа со стороны узлов, и внешней, относительно анализа трафика сети. Данный критерий должен обуславливаться разрывом связи между субъектами посредством их объекта на основании запутывающего алгоритма маршрутизации.

2. Анонимность обязана быть двунаправленной относительно субъектов информации и применяться как к отправителю — инициатору связи, так и к получателю — платформе связи или конечному адресату. Данный критерий должен обуславливаться разрывом связи между идентификацией сетевой и криптографической.

3. Анонимность обязана предотвращать сохранение данных и метаданных в транспарентном состоянии для промежуточных узлов. Данный критерий должен обуславливаться заменой всех платформ связи пятой стадией анонимности, тем самым уменьшая мощность доверия до теоретически возможного минимума.

Скрытая система наделённая только первыми двумя пунктами является анонимной сетью и принадлежит либо пятой, либо шестой стадии анонимности (более подробно в разделе «Абстрактные анонимные сети»). Скрытая система наделённая только последними двумя пунктами является клиент-безопасным приложением и принадлежит исключительно пятой стадии анонимности. Скрытая система наделённая сразу тремя критериями анонимности является полной и принадлежит не отдельной стадии анонимности, а их комбинациям (более подробно в подразделе «Проблематика анонимных сетей»). Система наделённая только одним пунктом из трёх не является скрытой. Под системой с первым пунктом может пониматься VPN туннелирование (четвёртая стадия анонимности), а под вторым – сервисы связи (вторая стадия анонимности). Не существует систем исключительно с третьим пунктом, ровно как и комбинации третьего пункта с первым (исключая второй). Связано это с тем, что третий критерий является следствием второго (обратное суждение неверно). Все вышеприведённые дескрипции можно представить в более кратком описании:

1. VPN туннелирование \in первый пункт
2. Сервисы связи \in второй пункт
3. Анонимные сети = первый пункт \cap второй пункт
4. Клиент-безопасные приложения = второй пункт \cap третий пункт
5. Полные скрытые системы = первый пункт \cap второй пункт \cap третий пункт

Таким образом, на основании вышеприведённых критериев можно выявить базовое определение анонимности относительно общего вида скрытых систем, где под сетевой анонимностью будет пониматься разрыв большинства логических связей между транспортируемым / хранимым объектом и его субъектами, а также между идентификацией сетевой и криптографической.

4.5. Двойственная форма первой стадии анонимности

При начальном рассмотрении первой стадии анонимности выражается простейшая форма, инициализирующая развитие анонимата, при которой прямолинейность соединений создаёт примитивность её организации. Но при дальнейшем и более детальном анализе анонимных сетей можно заметить исключительно противоречивое свойство первой стадии анонимности, сперва исключаящее, а при пересмотре образующее теоретически абсолютную анонимность в свойственной прямолинейности субъектов. Данное качество возникает при генерации объекта способного скрывать всю информацию о субъекте, включая и сам факт своей передачи и своего хранения. В подобной системе не существует никакой криптографической идентификации (что исключает все стадии выше четвёртой) и условно маршрутизации (что исключает все стадии выше первой). На основе таких качеств выявляется три парадокса.

1. Первая стадия анонимности исключает из своего рассмотрения промежуточные субъекты. Если данная стадия переходит в состояние анонимной сети, то внутри неё способны зарождаться сервисы связи, основанные либо на второй, либо на пятой стадиях анонимности. Таким образом, получатель в анонимной сети становится не равен конечному получателю, что противоречит определению первой стадии анонимности.

2. Мощность доверия в первой стадии анонимности имеет минимально возможную величину. Если данная стадия переходит в состояние анонимной сети, то внутри неё способны зарождаться сервисы связи, основанные на второй стадии анонимности. Таким образом, появляются промежуточные узлы исполняющие роль конечных получателей, что приводит к повышению мощности доверия и как следствие противоречит определению первой стадии анонимности.

3. Мощность доверия в первой стадии анонимности имеет минимально возможную величину. При исключении промежуточных узлов, мощность доверия не уменьшается, потому как проблема переходит на плоскость множества конечных получателей (т.к. анонимность базируется только на широкополосной открытой связи без сокрытия информации от третьих лиц), что противоречит определению первой стадии анонимности.

Все парадоксы базируются на самой двойственной форме первой стадии, когда таковая одновременно вбирает в себя и выраженное транспортирование объекта, и конечное его хранение. Парадоксы своим существованием фактически расщепляют двойственность и образуют новое подмножество, как неявную градацию первой стадии анонимности. Во всех последующих упоминаниях вышеописанный этап с присущими парадоксами будет отображаться как «первая[^] стадия анонимности», со знаком циркумфлекса. В качестве примера существования первой[^] стадии анонимности выделяют скрытые сети базируемые на проблеме обедающих криптографов [27] (DC-сети), такие, как Dissent [28] и Herbivore [29]. Чистая форма первой[^] стадии анонимности приводит к следующим недостаткам.

1. Масштабируемость. Первая[^] стадия анонимности приводит к необходимости выстраивания большого количества прямых соединений, что приводит к проблеме масштабируемости, где каждый новый пользователь обязан подключаться ко всем существующим участникам сети. Проблема решается переводом первой[^] стадии анонимности на градации высшего порядка, образуя промежуточные узлы полностью не влияющие на уровень анонимности в сети. Dissent переводит систему на третью стадию анонимности, Herbivore на третью при локальной топологии и на пятую при глобальной.

2. Коллизии. В один период времени может существовать только один отправитель сообщения. При параллельной генерации сообщений двумя и более участниками сети происходит коллизия, приводящая к наложению информации. В большей части исследований проблема решается выставлением расписания генерации сообщений, что приводит к обязательной последовательности. Для схем подобного рода в Dissent используются перемешивания, а в Herbivore малые группы.

3. Чистая анонимность. В исходном виде анонимность первой[^] стадии идёт в полном отрыве от безопасности передаваемого объекта, где распространение информации происходит только на основе широковещательного соединения, при котором получателем сообщения является вся система. Для обеспечения безопасной линии связи от отправителя до единственного получателя (истинного или промежуточного) должен происходить переход первой[^] стадии анонимности на пятую градацию в концепции тайного канала связи.

Таким образом, первая[^] стадия анонимности, как чистая форма выражения анонимата, является неприменимой в современных реалиях из-за критичных недостатков, что приводит к необходимости комбинировать данную стадию с градациями высшего порядка. Также можно выявить интересную закономерность, которая разделяет первую стадию анонимности на два вектора развития — на доказуемую безопасность объектов без анонимности субъектов (классическая первая стадия) и доказуемую анонимность субъектов без безопасности объектов (первая стадия с парадоксами или неклассическая форма).

Первый вектор базируется на безопасности объектов, вследствие чего, становится возможным последующий полиморфизм информации, как метод построения запутывающей маршрутизации. Второй вектор базируется на анонимности субъектов, вследствие чего, становится необходимым совмещение с тайным каналом связи, как методом нацеленным на обеспечение безопасности объектов. Оба вектора в конечном счёте сводятся в точке абсолютной анонимности субъектов с приемлемым уровнем безопасности объектов на основе криптографической идентификации, как это изображено на *Рисунок 15*.

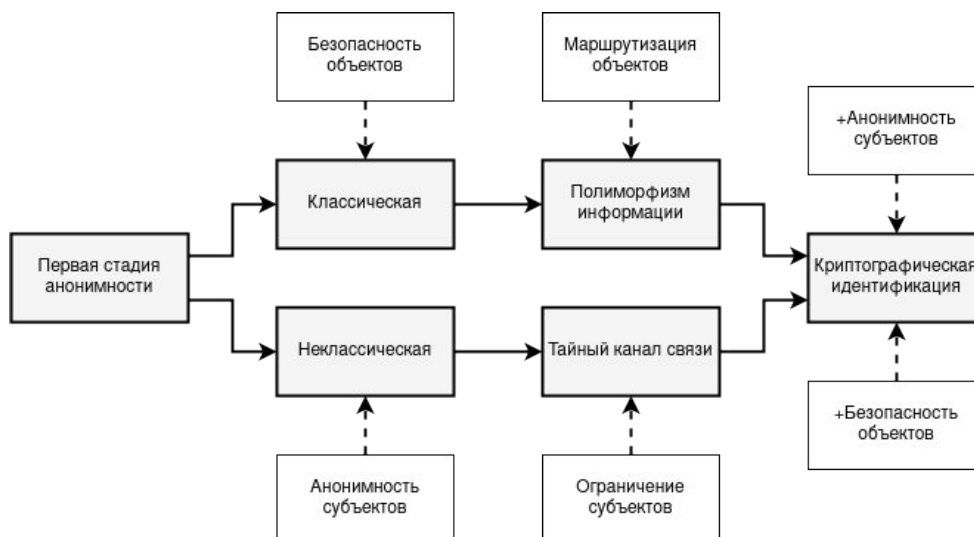


Рисунок 15. Двойственный вектор развития скрытых сетей относительно первой стадии анонимности

В завершение данного раздела стоит заметить одну важную составляющую. Первая[^] стадия анонимности, поначалу, словно не имеет никакой маршрутизации, что явным образом противоречит термину «анонимная сеть». Существование тайного канала связи никак не изменяет картину, потому как он внедряется в уже готовую систему и, как следствие, оставляет мощность анонимности на прежнем, первоначальном уровне. Тем не менее маршрутизация, хоть и специфичная, но существует в первой[^] стадии. Это можно доказать тем фактом, что участники такой сети кооперируют и объединяют информацию в одну выходную последовательность бит, где даже при связи «все-ко-всем» передаётся уже «скрещиваемая» информация. Если информация в процессе своеобразной маршрутизации претерпевает изменения от одного узла к другому, то это представляет форму полиморфизма информации. Таким образом, развитие анонимных сетей на базе DC-сетей является лишь инверсивным способом применения основных конструкторов «анонимности субъектов» и «безопасности объектов», относительно классической формы первой стадии анонимности, а значит приводит к равенству «первая[^] стадия анонимности + тайный канал связи = шестая стадия анонимности».

4.6. Проблематика анонимных сетей

При существовании и полной реализации, а также доступности скрытых сетей, проблема, связанная с мощностью доверия, возвращается. Это кажется парадоксальным, ведь сама задача ещё решилась на пятой стадии анонимности, когда мощность доверия становилась минимально возможной величиной. Сложность заключается именно в том, что при достижении анонимности, стремление к уменьшению мощности доверия начинает игнорироваться, становится второстепенным и добавочным критерием, в то время как стремление к увеличению мощности анонимности начинает переходить в доминирующее состояние. Таким образом, осуществляется трансфузия двух свойств, где анонимные сети начинают инициироваться противоположным, инволютивным действием к пятой стадии анонимности, а именно — игнорированием анонимности (экзотеричностью) со стороны передаваемого объекта и её сохранением (эзотеричностью) в субъекте.

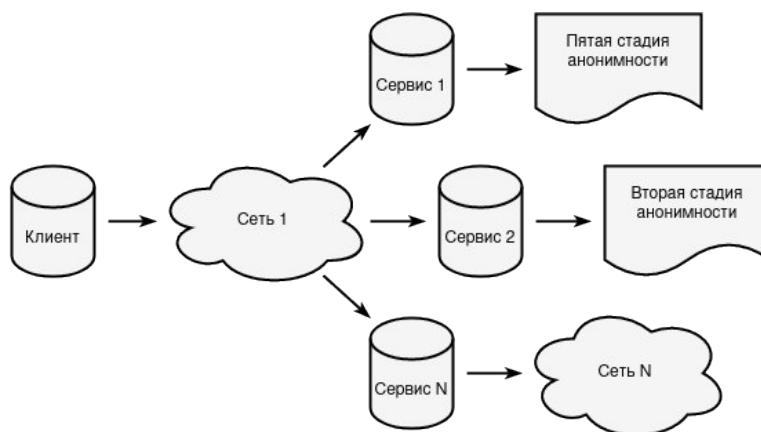


Рисунок 16. Взаимодействие скрытых сетей со внутренними сервисами

Сутью проблемы является возможность создания сервисов внутри скрытых сетей не основанных на пятой стадии анонимности (Рисунок 16), что приводит к возникновению приложений на базе второй стадии, представляющих угрозу информационной безопасности. Это связано с тем фактом, что анонимные сети в массе своей являются лишь способом маршрутизации к конечному субъекту, представляют собой некую платформу сервисов и

позволяют размещать внутри себя приложения базируемые на клиент-серверной, многограновой архитектуре, тем самым откатывая, регрессируя структуру защиты информации до второй стадии анонимности, делая её защиту централизованной, примитивной, а саму информацию транспарентной к серверному приложению.

В качестве примера можно привести сеть Тор. Доступ к сервису осуществляется вполне анонимно, но при этом сам способ хранения информации в данном приложении полностью зависит от его владельца. Это приводит к тому, что мощность доверия будет приближаться к обычному среднестатистическому сервису построенному на мощности анонимности равной единице. Иначе говоря, нет разницы, где приложение будет воссоздано, т.к. первоначальная проблема доверия будет оставаться в неизменно исходной форме.

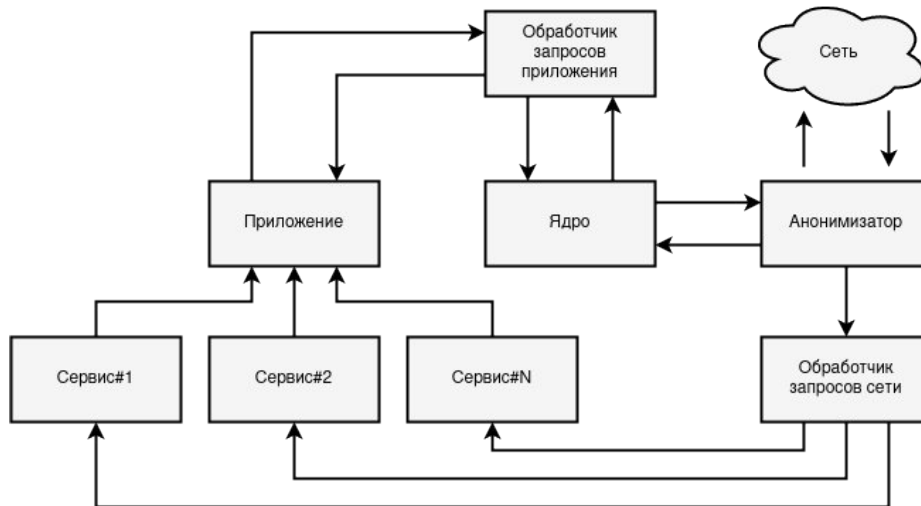


Рисунок 17. Архитектура приложения анонимной сети с несколькими принимающими сервисами

Решить данный вопрос можно лишь ограничением допустимых сервисов со стороны самой скрытой сети. Таким образом, анонимная сеть в своей базе и основе должна быть имманентной и импловивной, содержать N -ое количество приложений построенных только на пятой стадии анонимности. Доступ к любым другим сервисам, не имеющих пятую стадию анонимности, или скрытым сетям, не реализующих безопасную архитектуру, должен быть закрыт и ликвидирован. Только методом агглютинации и интерференции, будет возможна синергия свойств анонимности и безопасности. Примером таких сочетаний могут служить связи Tor+Bitcoin, I2P+Filetopia и т.п., или более монолитные технологии Monero [30], Dash [31] и т.д. Только на данном основании скрытые системы становятся полными.

5. Абстрактные анонимные сети

Среди анонимных сетей можно выявить класс систем с теоретически доказуемой анонимностью и максимально разграничивающим свойством, приводящим к наибольшему разрыву связей между объектом (как информации) и его субъектами (в лице отправителя и получателя). Из-за своей специфичной архитектуры передача информации может осуществляться в любой дуплексной среде, что полностью отрывает распространение объектов от своей сетевой архитектуры и переводит маршрутизацию в этап виртуального транслирования.



Рисунок 18. Абстрактные анонимные сети являются подмножеством класса теоретически доказуемой анонимности

Тем не менее у такой концепции существуют и свои недостатки, где одним из основных является невозможность построения поточной связи из-за отсутствия постоянных соединений, что в определённой степени может становиться уязвимостью к активным нападениям (более подробно данный момент будет показан в подразделе «Модель абстрактных анонимных сетей на базе очередей»).

Примечательной особенностью абстрактных анонимных сетей является их способность к формированию анонимата в тайных каналах связи, как систем с неприсущей им по умолчанию внутренней анонимностью. Анонимные сети, с подобными характеристиками, будут именоваться абстрактными.

5.1. Модель абстрактных анонимных сетей на базе очередей

Одним из возможных способов (как шагов) построения таковых систем является необходимость в доказуемой устойчивости системы по отношению хотя бы к одному из наблюдателей, будь то внешнему или внутреннему. При этом в качестве внешнего берётся наивысшая форма в лице глобального наблюдателя, а в качестве внутреннего берутся узлы, заполняющие всю сеть (с определённой минимальной условностью по количеству несвязанных между собой узлов).

Простота системы является также важным качеством теоретически доказуемой анонимности. Если система будет иметь массу условностей, то даже при теоретической её доказуемости, практическая реализация может составить огромное количество трудностей, ошибок или неправильных использований, что приведёт к фактической дискредитации самой теории, и таковая анонимность в конечном счёте останется лишь теоретической. Одной из самых простых возможных реализаций абстрактной системы является использование очередей генерации пакетов в сети.

Для начала предположим, что необходимо защититься от внешнего глобального наблюдателя. Также предположим, что существует три узла в сети $\{A, B, C\}$, где один из них отправитель информации, а другой – получатель. Целью атакующего становится сопоставление факта отправления с инициатором и/или получения с сервисом связи (получателем). В идеальной системе (теоретически доказуемой) вероятность обнаружения запроса составит $1/3$. Ровно такая же картина должна быть с фактом ответа на запрос. В сумме при трёх участниках и при условии ИЛИ факт обнаружения равен $2/3$. При существовании N узлов несвязанных между собой общими целями и интересами, вероятность становится равной $2/N$. Итоговая система должна удовлетворять данным свойствам.

системы, само кооперирование не приведёт к нарушению протокола, потому как предполагается, что сама генерация пакетов, а конкретно время генерации, не является секретом.

3. Каждый действующий субъект сети выставляет минимум одного существующего пользователя в роли маршрутизирующего узла для поддержания анонимности. Причисление маршрутизатора в сговор атакующих приведёт к деанонимизации субъектов, использующих данного промежуточного участника. Поэтому, в практическом применении для снижения рисков связанных с деанонимизацией субъектов посредством контроля ретранслятора, необходимо выбирать сразу несколько маршрутизирующих узлов, формируя тем самым цепочку нод и повышая мощность анонимности.

4. Каждый действующий субъект сети знает период и время генерации нового пакета на маршрутизирующем узле. Такое условие необходимо для предотвращения от атак направленных на нестабильные системы с учётом существующего сговора внешних и внутренних наблюдателей.

5. Каждое сообщение зашифровывается монолитным криптографическим протоколом с множественным туннелированием и проходит сквозь маршрутизирующие узлы (более подробно в разделе «Монолитный криптографический протокол»). Такое свойство приведёт к сильному разрыву связей между объектом и его субъектами, а также между идентификацией сетевой и криптографической.

6. Каждый субъект хранит все свои сообщения, готовые к отправлению по сети, в очереди. Помимо очереди субъект должен содержать автодополняющийся пул ложных сообщений. Данное свойство необходимо для пункта 7.

7. Если на момент T_{ni} , где $i \in N$, i – номер периода, очередь пуста, то-есть не существует ни запроса, ни ответа, ни маршрутизации, то отправляется сообщение из пула ложных сообщений. При таком случае, данное сообщение фактически никто не получает.

8. Если приходит сообщение представляющее собой маршрутизацию, то оно ложится в очередь и при наступлении локального времени T_{ni} отправляется по сети. Пункт 5 обеспечивает несвязность объекта с его субъектами, поэтому при получении сообщения-маршрутизации, промежуточный принимающий узел увидит только факт маршрутизации.

9. При необходимости отправить запрос, субъект сначала анализирует текущее время с периодом маршрутизатора, с целью отправить сообщение на второй итерации периода маршрутизирующего узла. Если ещё не прошла собственная итерация периода, то перед запросом в очередь вставляется ложное сообщение, данный запрос отправляется по сети. Пункт 3 обеспечивает несвязность идентификации сетевой и криптографической, что не даёт отправителю никакой информации о получателе, кроме его публичного ключа.

10. При необходимости отправить ответ, субъект сначала анализирует текущее время с периодом маршрутизатора, с целью отправить сообщение на второй итерации периода маршрутизирующего узла. Если ещё не прошла собственная итерация периода, то перед ответом в очередь вставляется ложное сообщение, данный ответ отправляется по сети. Пункт

3 обеспечивает несвязность идентификации сетевой и криптографической, что не даёт получателю никакой информации об отправителе, кроме его публичного ключа.

Явным недостатком данной архитектуры становится подверженность атакам отказа в обслуживании (DDoS), как для конкретного субъекта, перегружая его очередь сообщениями, так и для всей сети. Связано это с тем, что в основе системы используются очереди, сохраняющие и накапливающие сообщения, а также слепая маршрутизация, порождающая наибольшую несвязанность объекта с его субъектами за счёт полного распространения информации по всем участникам сети.

В любом случае преднамеренные атаки на сеть с целью отказа в обслуживании можно предотвратить проверяемостью на принадлежность субъектов к периоду генерации сообщений, но при всё большем расширении сети сами её участники станут давлением и причиной ухудшения производительности. Результатом такого исхода становится линейная увеличивающаяся нагрузка на сеть $O(N)$ прямо пропорционально количеству действующих узлов N в сети. Иными словами, каждый субъект должен будет обрабатывать в T_n период $N-1$ пакетов, постоянно расшифровывая их, что и становится достаточно ресурсозатрачиваемой операцией.

Тем не менее в выстроенной системе становится достаточно легко доказать невозможность атаки со стороны внешнего наблюдателя, анализирующего дифференциальность сети. Если каждый субъект соблюдает генерацию пакета по локальному периоду (даже гипотетически с разными значениями T_n), то становится невозможным установление факта отправления, получения, маршрутизации или ложной генерации, потому как наблюдатель, в конечном счёте, способен лишь видеть определённые зашифрованные сообщения генерируемые каждый промежуток времени равный T_n . Также, если внешним наблюдателем будут блокироваться определённые субъекты информации, кардинально данный подход ситуации не изменит.

Атака внутренних наблюдателей с приведённым выше условием является качественно более сложной и мощной (даже относительно большинства внутренних нападений на практике), потому как q субъектов контролируют всю сеть за исключением трёх субъектов, а следовательно атакующие фактически являются не только внутренними наблюдателями, но и в массе своей монолитным глобальным наблюдателем. В качестве упрощения доведём нападения до теоретически возможной комбинации, в отображении сговора внешних и внутренних наблюдателей. Аудит будет базироваться на 10 пункте, когда субъекту должен сгенерироваться ответ на отправленный запрос. При анализе системы может встретиться два разных случая – частный (а) (наиболее благоприятный в определении анонимности) и общий (б) (дающий больший простор действий для нападающих).

Частный случай удобно рассматривать на примере основных способов деанонимизации и методов их предотвращения. Общий же случай более реален в настоящем мире, потому как частный неустойчив к отказам в обслуживании (если субъект переподключиться, то изменится сдвиг периода) и требует из-за этого постоянного кооперирования субъектов между собой по времени (чтобы сама генерация информации была одновременной). Таковые условия поведения частного случая делают общий более приоритетным в анализе теоретической анонимности, потому как он становится «стабильным» за счёт невозможности своего дальнейшего ухудшения.

а) Частный случай. Предположим, что существует крайне стабильная система при которой каждый узел из множества $\{A, B, C\}$ выставил в один и тот же промежуток времени значение равное T_n без отставания по времени относительно всех остальных участников

сети. Все участники генерируют запрос секунда в секунду каждые T_{ni} по периоду. Предположим, что $T_n = 3$, тогда генерацию можно представить в виде Таблицы 2.

	$T_{n1-2}=t_1$	$T_{n1-1}=t_2$	$T_{n1}=t_3$	$T_{n2-2}=t_4$	$T_{n2-1}=t_5$	$T_{n2}=t_6$	$T_{n3-2}=t_7$	$T_{n3-1}=t_8$	$T_{n3}=t_9$
А			+			+			+
В			+			+			+
С			+			+			+

Таблица 2. Стабильная система со множеством участников $\{A, B, C\}$ и $T_n = 3$

Если отсутствует маршрутизация от субъекта С, то легко определимым становится вычисление истинного субъекта генерирующего настоящее сообщение. И действительно, если существует сговор внутреннего и внешнего наблюдателей, то возможен сценарий, при котором внутренний наблюдатель, в роли инициатора, генерирует сообщение и отправляет его одному из участников $\{A, B\}$. Спустя период T_n (при условии, что у получателя не существует сообщений в очереди) инициатор получает ответ, предварительно сохраняя его зашифрованную версию. Далее внутренний наблюдатель обращается к внешнему с зашифрованной версией сообщения, тот в свою очередь по своим записям проверяет где впервые был создан таковой пакет. Узел на котором появилось впервые подобное сообщение и является истинным субъектом информации в лице получателя.

Теперь предположим, что маршрутизация субъекта С существует. Если внутренний наблюдатель хочет раскрыть субъектов $\{A, B\}$, то можно предположить, что ему необходимо каким-либо образом обойти ретрансляцию субъекта С. Но исключить узел С из сети не является решением, потому как прекратится вся последующая связь с субъектом А или В. Другим способом раскрытия (и куда более продуктивным) является уже исключение одного субъекта из множества $\{A, B\}$, иными словами заблокировать участника сети на определённый период времени mT_n . Тогда в таком случае активный внешний наблюдатель блокирует одного из субъектов $\{A, B\}$, после этого активный внутренний наблюдатель посылает запрос на одного из субъектов множества $\{A, B\}$. Если отправитель получает ответ, значит истинным получателем информации является не исключённый участник, в противном случае – исключённый.

Для предотвращения активных атак со стороны сговора внешних и внутренних наблюдателей необходимо добавить дополнительный (но не единственно возможный) 11₁ пункт, который представляет новую псевдо роль субъектов в качестве контролирующих узлов. Такая атака приводит к невозможности деанонимизации субъектов посредством частичного блокирования, потому как её следствием станет взаимоблокировка субъектов. Тем не менее добавление данного пункта скажется на том, что сама сеть выйдет из класса абстрактных анонимных сетей, потому как добавится необходимость в поточном распространении информации.

11₁. Каждый действующий субъект сети выставляет минимум одного существующего пользователя в роли контролирующего узла для предотвращения от активных атак методом исключения участников системы. Суть такого пользователя в понимании его существования. Если связь с подобным субъектом будет разорвана, то все последующие действия автоматически прекращаются. Само соединение функционирует за пределами механизма очередей, что, тем не менее, не приводит к снижению уровня анонимности, потому как все субъекты начинают подчиняться этому правилу односторонне (в такой концепции не

существует функций типа запрос/ответ, существуют только поточные уведомления своего присутствия).

Хоть теоретически сама атака становится невозможной, но в практическом смысле и в долгосрочном наблюдении она более чем реальна. Связано это с тем, что одноранговая архитектура как таковая приводит к постоянному и динамичному изменению связей между субъектами. Это в свою очередь может приводить к исключениям групп субъектов связанных контролируемыми узлами, потому как последние обязаны быть действующими и настоящими участниками системы.

Ещё одним возможным решением вышеописанной проблемы может стать использование доверенных соединений среди участников сети. Такой подход ограничивает действия активных внутренних наблюдателей и за счёт данного свойства позволяет снизить риски деанонимизации, а также сохранить абстрактность системы (по сравнению с пунктом 11₁).

11₂. Каждый действующий субъект сети выстраивает связи с другими участниками, основываясь на субъективности к уровню доверия, устанавливая и редактируя белый список на своей стороне. Чтобы успешно подключиться к сети такого рода, субъекту необходимо стать доверенным узлом, то есть пользователем, которому кто-либо доверяет. Сложность исполнения атаки на подобную сеть будет сводиться к сложности встраивания подчиняемых узлов, потому как каждый получатель информации, в конечном итоге, должен будет заранее устанавливать список возможных отправителей.

Сети с таким свойством именуются friend-to-friend (F2F) сетями [32]. Естественным недостатком является малая экспансия, как возможность масштабирования системы. С другой стороны, как раз такое качество позволяет дополнительно (и довольно эффективно) сдерживать недостатки самой структуры, когда увеличивающееся количество субъектов приводит к регрессу производительности системы. В общем представлении такой метод защиты достаточно эффективен против внутренних активных наблюдателей (особенно с практической точки зрения), но теоретически является более сложной моделью. Анонимность такого случая начинает базироваться на гипотетически большем количестве связей между участниками, чем при выстраивании константно заданного количества маршрутизирующих узлов, что и приводит к дополнительным рискам деанонимизации субъектов.

Также ещё одним возможным решением может стать синтез подходов, что закономерно объединит не только положительные, но и отрицательные стороны этапов 11₁ и 11₂. В следствии такого соединения система перестанет быть абстрактной (за счёт необходимости в поточном поддержании соединений), появится свойство малой экспансии (за счёт принадлежности к F2F-сети) и увеличится сложность практической реализации (за счёт, соответственно, синтеза двух подходов). Тем не менее, теоретическая безопасность выйдет на более лучший уровень, потому как если один из доверенных субъектов станет скомпрометированным, то останется дополнительный слой защиты в лице маршрутизаторов.

б) Общий случай. Предположим, что существует нестабильная система при которой каждый узел из множества $\{A, B, C\}$ выставил в разный промежуток времени значение равное T_n с отставанием по времени относительно всех остальных участников сети. Все участники генерируют запрос в разные секунды, но также сохраняя локальный период равный T_n .

Предположим, что $T_n = 3$, тогда генерацию можно представить в виде Таблиц 3, 4, 5 относительно расположения субъекта C к другим участникам.

	$T_{n-2}=t_1$	$T_{n-1}=t_2$	$T_{n1}=t_3$	$T_{n2-2}=t_4$	$T_{n2-1}=t_5$	$T_{n2}=t_6$	$T_{n3-2}=t_7$	$T_{n3-1}=t_8$	$T_{n3}=t_9$
A		+			+			+	
B			+			+			+
C	+			+			+		

Таблица 3. Нестабильная система со множеством участников $\{A, B, C\}$ и $T_n = 3$, где узел C находится в начале генерации

	$T_{n-2}=t_1$	$T_{n-1}=t_2$	$T_{n1}=t_3$	$T_{n2-2}=t_4$	$T_{n2-1}=t_5$	$T_{n2}=t_6$	$T_{n3-2}=t_7$	$T_{n3-1}=t_8$	$T_{n3}=t_9$
A	+			+			+		
B			+			+			+
C		+			+			+	

Таблица 4. Нестабильная система со множеством участников $\{A, B, C\}$ и $T_n = 3$, где узел C находится в середине генерации

	$T_{n-2}=t_1$	$T_{n-1}=t_2$	$T_{n1}=t_3$	$T_{n2-2}=t_4$	$T_{n2-1}=t_5$	$T_{n2}=t_6$	$T_{n3-2}=t_7$	$T_{n3-1}=t_8$	$T_{n3}=t_9$
A		+			+			+	
B	+			+			+		
C			+			+			+

Таблица 5. Нестабильная система со множеством участников $\{A, B, C\}$ и $T_n = 3$, где узел C находится в конце генерации

В качестве упрощения и абстрагирования предположим, что ни для какого субъекта не существует контролирующего участника или F2F-соединений, а следовательно и пунктов 11_1 и 11_2 как таковых. Существуют только субъекты $\{A, B\}$ (один из которых является настоящим получателем) и постоянный маршрутизатор C . Основной целью анонимизации в нестабильных коммуникациях становится сведение действий субъекта A к аналогичным действиям субъекта B , и наоборот, посредством маршрутизатора C . Действительно, если C станет замыкающим узлом в момент времени T_{ni} при ответе любого субъекта множества X , то возникнет максимальная неопределённость равная $1/|X|$.

Анализируя сетевые коммуникации в нестабильных системах внешний наблюдатель способен сопоставить для каждого субъекта его период равный T_n и сдвиг относительно определённого субъекта. В сговоре со внутренним наблюдателем появляется возможность деанонимизации субъекта на базе приведённого сдвига. Предположим, что игнорируется условие пунктов 9 и 10 с необходимостью генерировать пустое сообщение на основе периодов маршрутизирующего узла. Далее, пусть существует сеть на базе Таблицы 2, где внутренний наблюдатель располагает всеми сведениями полученными от внешнего атакующего и на основе этого генерирует сообщение в момент времени T_{n1} и отправляет его по сети. Если будет получен ответ в момент $T_{n1+1} = T_{n2-2}$ от маршрутизатора C , то это говорит только о том, что получателем сообщения является участник B , потому как субъект A становится способным выдать ответ маршрутизирующему узлу только в период $T_{n1+2} = T_{n2-1}$, по причине его умышленного пропуска в момент T_{n1-1} атакующей стороной. Такой вид атаки приводит к полной деанонимизации субъектов.

Предотвращением атаки является отправление истинного пакета на вторую итерацию периода маршрутизирующей стороны (относительно текущего времени). Теперь репродуцируем вышеописанную атаку на систему с таким условием. Также предположим, что сетью является система на базе Таблицы 3. Если атакующий сгенерирует сообщение в момент времени T_{n1} , то получит ответ только в момент T_{n3-2} . Получателем в такой системе может оказаться любой из множества $\{A, B\}$, потому как ответ может быть отправлен как в момент времени T_{n2-1} (субъект A), так и в T_{n2} (субъект B). Чтобы субъект B отправил ответ именно в T_{n2} , то перед ним он помещает в очередь ложное сообщение, тем самым отодвигая отправление истинного сообщения по сети на одну итерацию. Аналогичные ситуации распространяются и на Таблицы 3, 4.

Таким образом на основе всего вышеописанного, наиболее сильной атакой является сговор внешних и внутренних активных атакующих, при которой необходимым условием противодействия становится либо существование постоянной поточной линии связи, что, в свою очередь, приведёт к негации абстрактности и невозможности применения данной системы в тайных каналах связи, либо принадлежность системы к классу F2F-сетей, что, в свою очередь, приведёт к малым возможностям экспансии.

В результате, если исходить из необходимости синтеза простоты и безопасности системы, то наилучшим вариантом становится выбор F2F-сетей. Это также способно привести к ещё большему упрощению структуры скрытой сети без последующего регресса уровня анонимности за счёт исключения полиморфизма информации как явления (то есть пункта 3, связанного с маршрутизацией посредством множественного шифрования). Такое действие приведёт к следующим выводам:

1. Исчезнет необходимость в промежуточных узлах и кооперировании с ними для установления периодов. Как следствие, не будет надобности в условностях отправления сообщений на конкретной итерации периода маршрутизирующего узла.
2. Исчезнет необходимость в использовании механизмов несвязываемости размеров сообщений (подробнее в подразделе «Противодействие обнаружению динамики размерности пакетов» раздела «Монолитный криптографический протокол»).
3. Исчезнет необходимость в анализе частного и общего случаев, потому как таковые являются следствием существования маршрутизирующих узлов и полиморфизма информации. И как следствие, пункт 3 заменится пунктом 11₂.

Вышеописанные действия переводят шестую стадию анонимности на пятую градацию, при этом доказывая своим существованием не обязательную принадлежность скрытых сетей к последнему этапу анонимата, потому как запутывающим алгоритмом становится «очередь», скрывающая факт истинной передачи информации между субъектами, взамен комбинации «очередь+полиморфизм».

Основным отличием таковых подходов становятся иные векторы нападения, где при алгоритме «очередь» атаки начинают принадлежать способам компрометации доверенных узлов, а при алгоритме «очередь+полиморфизм» – компрометациям маршрутизирующих узлов. В обоих случаях требуется сговор скомпрометированного узла с внешним глобальным наблюдателем. При удовлетворении условия нескомпрометированности ключевых субъектов, анонимность двух алгоритмов будет удерживаться на определённо заданном уровне.

5.2. Анализ сетевых коммуникаций в абстрактных скрытых сетях

По умолчанию способ распространения всех абстрактных скрытых сетей сходится ко связи «все-ко-всем», то-есть когда каждый пользователь при генерации запроса отправляет свой пакет всем своим соединениям. Данное свойство связано с необходимостью минимального количества субъектов в системе для достижения анонимности с отсутствием противоречивости связей. Допустим, связь «один-к-одному» с двумя субъектами, заданная как $(A \leftrightarrow B)$, также является и фактической связью «все-ко-всем», и «все-к-одному», что приводит к противоречивой определённости. Такая же ситуация с возможностью представления связей «один-к-одному» и «все-к-одному» при помощи трёх субъектов. Поэтому минимальной структурой представления сетевых коммуникаций является связь «все-ко-всем» с тремя участниками сети.

В данном концепте, такой подход схож с реализациями DC-сетей, но имеет определённое и принципиальное отличие – сети на базе «проблемы обедающих криптографов» по умолчанию не являются абстрактными, потому как при изменении связи «все-ко-всем» на иную, добавляются накладные расходы для удержания теоретически доказуемой анонимности. Это в свою очередь говорит о том, что таковая сеть недостаточно абстрагирована от сетевых коммуникаций, что и доказывает непринадлежность классу абстрактных скрытых сетей.

Исключая DC-сети как основы из рассмотрения, можно утверждать, что абстрактные анонимные сети способны базироваться лишь и только на первом векторе развития анонимных сетей, где их особенностью становится безопасность объектов. Уже из данного определения, возможно сконструировать абстрактные системы вида «пятая стадия анонимности → первая^ стадия анонимности → тайный канал связи», где пятый этап способен адаптировать все виды соединений ко связи «все-ко-всем», а тайный канал – отстранять всех субъектов от анализа транспортируемого объекта, что приводит к возможности применения DC-сетей с присущей им теоретической доказуемостью анонимата в виде абстрактных анонимных сетей. В итоге такое расширение анонимной сети (первая^ стадия анонимности → тайный канал связи), с добавлением дополнительной пятой градации, способно быть применимым не только как улучшенная (более гибкая) версия анонимной сети, но и как эзотерический канал с доказуемой анонимностью.

В общем виде, существует всего три основных типа связей, как это представлено на Рисунке 20, в то время как все остальные соединения являются лишь их побочными гибридами.

- | | | |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 1. «все-ко-всем» | $(A \leftrightarrow B, B \leftrightarrow C, C \leftrightarrow A)$ | [распределённая], |
| 2. «все-к-одному» | $(A \leftrightarrow D, B \leftrightarrow D, C \leftrightarrow D)$ | [централизованная], |
| 3. «один-к-одному» | $(A \leftrightarrow B, B \leftrightarrow C, C \leftrightarrow D)$ | [децентрализованная]. |

Во-первых, стоит сказать, что все приведённые выше связи являются одноранговыми, в том числе и связь централизованная. Данные соединения рассматриваются в вакууме абстрактной сети, а следовательно, все они априори предполагают одноранговую, peer-to-peer модель. Разделение связей рассматривает лишь расположение и сочетание субъектов относительно друг друга, а не дополнительную нагрузку, повышение прав или разделение полномочий.

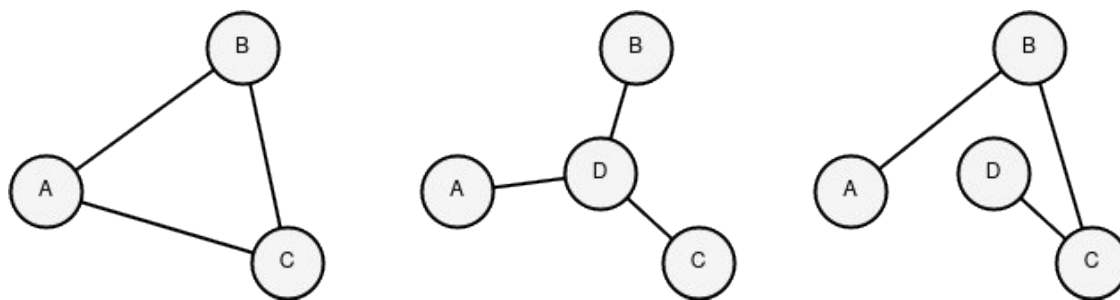


Рисунок 20. Связи: «все-ко-всем», «все-к-одному», «один-к-одному» (слева направо)

Во-вторых, стоит заметить, что связи «все-к-одному» и «один-к-одному» схожи между собой куда больше, чем отдельно каждое из представленных со связью «все-ко-всем». Для полного представления распределённой связи достаточно трёх узлов, в то время как для двух оставшихся необходимо уже четыре узла. Связано это с тем, что если представить децентрализованную связь при помощи трёх субъектов, то результатом такого преобразования станет связь централизованная, и наоборот, что говорит об их родстве, сходстве и слиянии более близком, нежели со связью распределённой.

В-третьих, централизованная связь по своей концепции распространения информации стоит ближе к связи распределённой, нежели связь децентрализованная. Сложность распространения объекта между истинными субъектами информации в распределённых и централизованных системах равна $O(1)$, в то время как в децентрализованных сложность равна $O(N)$.

В-четвёртых, по критериям отказоустойчивости децентрализованная связь стоит ближе к распределённой, нежели связь централизованная. В связи «все-ко-всем», при удалении одного субъекта, сеть остаётся целостной и единой. В связи «один-к-одному», при удалении одного субъекта, сеть может разделиться на N децентрализованных сетей. В связи «все-к-одному», при удалении одного субъекта, сеть может прекратить своё существование вовсе.

Таким образом, схожесть и однородность связей можно представить как (децентрализованная \leftrightarrow централизованная) \leftrightarrow (централизованная \leftrightarrow распределённая) \leftrightarrow (распределённая \leftrightarrow децентрализованная). При цикличности трёх элементов, инициализируется общий эквивалент представленный в формации соединений «все-ко-всем».

Далее, если предположить, что существует четыре субъекта $\{A, B, C, D\}$ со связью «все-к-одному», где центральным узлом является точка D , то анализ безопасности абстрактной анонимной сети будет сводиться к осмотру действий от узла D ко всем остальным субъектам и от любого другого узла к субъекту D . В одном случае будет происходить прямая широкоэмиттерная связь, в другом же случае, будет происходить передача сообщения для последующей множественной репликации.

Если предположить, что субъект D не способен генерировать информацию, а создан только для её ретранслирования, то это эквивалентно его отсутствию как таковому. Действительно, если пакет имманентен в своём проявлении (не выдаёт никакую информацию о субъектах), то все действия внутреннего узла D тождественны внешнему наблюдателю, а как было утверждено ранее, абстрактная сеть невосприимчива к такому виду деанонимизации. Следовательно, узел D становится словно фантомом, ретранслирующим субъектом не влияющим на безопасность и анонимность сети, базируемой на связи «все-к-одному». Из этого также следует, что абстрактная система может применяться и в тайных каналах связи, где безопасность приложения выстраивается в заведомо подконтрольной, враждебной и централизованной инфраструктуре.

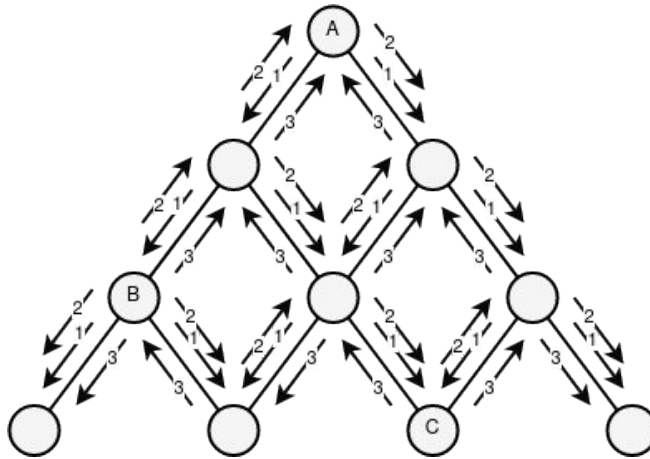


Рисунок 21. Маршрутизация пакета на базе абстрактной анонимной сети из 10 узлов, где *A* - отправитель, *B* - маршрутизатор, *C* - получатель

Теперь, если субъект *D* способен генерировать информацию, то создавая сеть и имплюзируя её в себя, субъект сам становится сетью, в которой он априори соединён со всеми, что приводит это суждение к связи «один-ко-всем». Связь же «все-ко-всем», состоит из множества связующих «один-ко-всем» относительно каждого отдельного субъекта, коим и является узел *D*, а это, в свою очередь приводит к классическому (ранее заданному) определению абстрактной анонимной сети. Таким образом, связь «все-к-одному» внутри себя уже содержит логическую составляющую связи «все-ко-всем» через которую и доказывается её безопасность.

Доказать безопасность связи «один-к-одному» возможно через неопределённость посредством её слияния со связью «все-к-одному», которое определяется при трёх участниках сети. Такое свойство неоднородности и неоднозначности предполагает, что сеть становится одновременно и централизованной, и децентрализованной. Следовательно, доказав ранее безопасность связи «все-к-одному», автоматически доказывается и безопасность связи «один-к-одному» для конкретно заданного случая.

Далее, если предположить, что существует четыре субъекта $\{A, B, C, D\}$ со связью «один-к-одному», то базируясь на итеративности передачи информации в децентрализованных системах, можно декомпозировать любую модель в более замкнутую. Таким образом, сеть $\{A, B, C, D\}$ фактически может расщепиться на две подсети $\{A, B, C\}$ и $\{B, C, D\}$, мостом которой являются субъекты $\{B, C\}$. Каждая отдельная подсеть представляет собой ту же неопределённость, внутри которой присутствует централизованная система. В результате, безопасность связи «один-к-одному» сводится ко связи «все-к-одному», и как следствие, ко связи «все-ко-всем».

Таким образом, вне зависимости от типа соединений, абстрактная скрытая сеть будет оставаться безопасной, даже при условии существования единственного сингулярного сервера, связывающего всех клиентов между собой. Простота построения централизованной сети в абстрактной анонимной сети приводит противоречиво к выражению истинной отказоустойчивости, а также к живучести подобных систем, регенерирующих лишь от одной сетевой единицы. Данное свойство (в большей мере) отличает абстрактные системы от всех других скрытых сетей.

6. Монолитный криптографический протокол

Ядром всех скрытых систем являются криптографические протоколы. Наиболее приоритетными протоколами, в конечном счёте, становятся простые, легко читаемые и легко реализуемые. В массе своей, практические составляющие реального мира часто приводят к необходимости выбирать компромиссы между теоретической безопасностью и практической производительностью. В нашем же примере, будет представлен протокол направленный на поддержание конкретно теоретической безопасности, как главной цели, исключая какие бы то ни было компромиссы. Это может показаться слишком безрассудным, тем не менее, протокол останется практически реализуемым и даже применимым. Таковой, по концепции, будет схож с протоколом Bitmessage. Главной особенностью протокола станет его самодостаточность [33, с.80] и простота [12, с.58], а также возможность применения в тайных каналах и анонимных сетях (включая абстрактные системы).

6.1. Определение и программная реализация

Протокол определяется восьмью шагами, где три шага на стороне отправителя и пять шагов на стороне получателя. Для работы протокола необходимы алгоритмы КСГПСЧ (криптографически стойкого генератора псевдослучайных чисел), ЭЦП (электронной цифровой подписи), криптографической хеш-функции, установки / подтверждения работы, симметричного и асимметричного шифра.

Участники протокола:

А - отправитель,

В - получатель.

Шаги участника А:

$$1. K = G(N), R = G(N),$$

где G - функция-генератор случайных байт,
 N - количество байт для генерации,
 K - сеансовый ключ шифрования,
 R - случайный набор байт.

$$2. H_p = H(R || P || PubK_A || PubK_B),$$

где H_p - хеш сообщения,
 H - функция хеширования,
 P - исходное сообщение,
 $PubK_x$ - публичный ключ.

$$3. C_p = [E(PubK_B, K), E(K, PubK_A), E(K, R), E(K, P), H_p, E(K, S(PrivK_A, H_p)), W(C, H_p)],$$

где C_p - зашифрованное сообщение,
 E - функция шифрования,
 S - функция подписания,
 W - функция подтверждения работы,
 C - сложность работы,
 $PrivK_x$ - приватный ключ.

Шаги участника В:

$$4. W(C, H_p) = P_w(C, W(C, H_p)),$$

где P_w - функция проверки работы.
 Если \neq , то протокол прерывается.

$$5. K = D(PrivK_B, E(PubK_B, K)),$$

где D - функция расшифрования.
 Если \neq , то протокол прерывается.

$$6. PubK_A = D(K, E(K, PubK_A)),$$

Если \neq , то протокол прерывается.

$$7. H_p = V(PubK_A, D(K, E(K, S(PrivK_A, H_p))))),$$

где V - функция проверки подписи.

Если \neq , то протокол прерывается.
8. $H_p = H(D(K, E(K, R))) || D(K, E(K, P)) || \text{PubK}_A || \text{PubK}_B$,
Если \neq , то протокол прерывается.

Данный протокол игнорирует способ получения публичного ключа от точки назначения. Это необходимо по причине того, чтобы протокол был встраиваемым и мог внедряться во множество систем, включая одноранговые сети, не имеющие центров сертификации, и тайные каналы связи, имеющие уже установленную сеть по умолчанию.

Также протокол способен игнорировать сетевую идентификацию субъектов информации, замещая её идентификацией криптографической. При таком подходе аутентификация субъектов начинает становиться сингулярной функцией, относящейся лишь и только к асимметричной криптографии, и как следствие, прикладной уровень стека TCP/IP начинает симулятивно заменять криптографический слой по способу обнаружения отправителя и получателя, как это показано на *Рисунках 22, 23*. Из вышеописанного также справедливо следует, что для построения полноценной информационной системы необходимым является симулятивная замена транспортного и прикладного уровня последующими криптографическими абстракциями. Под транспортным уровнем может пониматься способ передачи сообщений из внешней (анонимной сети) во внутреннюю (локальную), под прикладным — взаимодействие со внутренними сервисами.

Сеанс связи в приведённом протоколе определяется самим пакетом, или иными словами один пакет становится равен одному сеансу за счёт генерации случайного сеансового ключа. Описанный подход приводит к ненужности сохранения фактического сеанса связи, исключает внешние долговременные связи между субъектами посредством имманентности и абстрагирования объектов, что приводит к невозможности рассекречивания всей информации, даже при компрометации одного или нескольких сеансовых ключей.

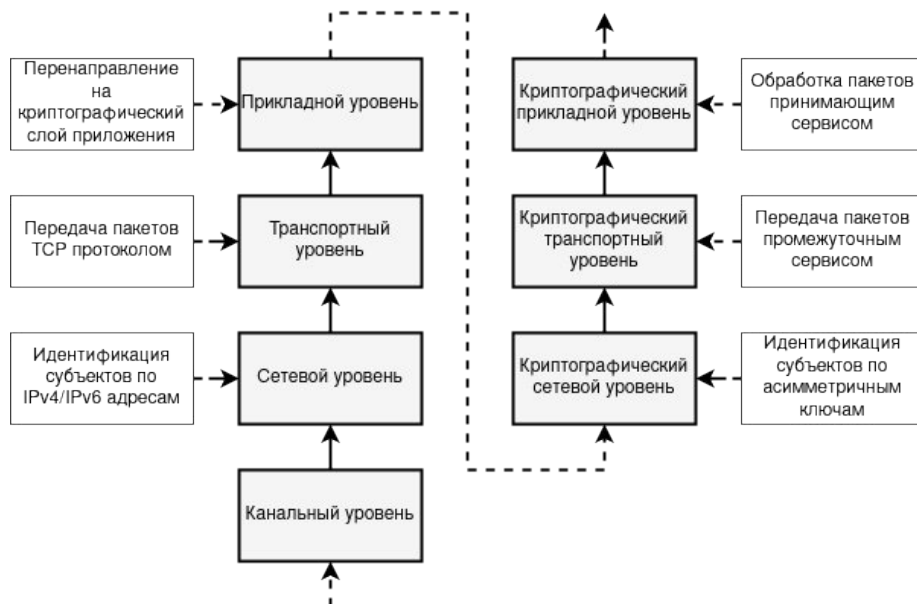


Рисунок 22. Расширение стека протоколов TCP/IP на базе криптографических абстракций

Безопасность протокола определяется в большей мере безопасностью асимметричной функции шифрования, т.к. все действия сводятся к расшифрованию сеансового ключа приватным ключом. Если приватный ключ не может расшифровать сеансовый, то это

говорит о том факте, что само сообщение было зашифровано другим публичным ключом и потому получатель также есть другой субъект. Функция хеширования необходима для проверки целостности отправленных данных. Функция проверки подписи необходима для аутентификации отправителя. Функция проверки доказательства работы необходима для предотвращения спама.

Пример программного кода [34][35] для шифрования информации:

```
import (
    "bytes"
    "encoding/hex"
)
func Encrypt(sender *PrivateKey, receiver *PublicKey, data []byte) *Package {
    var (
        pubsend      = PublicKeyToBytes(&sender.PublicKey)
        session       = GenerateBytes(N)
        randBytes     = GenerateBytes(N)
    )

    hash := HashSum(bytes.Join(
        [][]byte{
            randBytes,
            data,
            pubsend,
            PublicKeyToBytes(receiver),
        },
        []byte{}),
    ))

    return &Package{
        Head: HeadPackage{
            Sender:      EncryptS(session, pubsend),
            Session:     EncryptA(receiver, session),
            RandBytes:   EncryptS(session, randBytes),
        },
        Body: BodyPackage{
            Data:  EncryptS(session, data),
            Hash:  hash,
            Sign:  EncryptS(session, Sign(sender, hash)),
            Proof: ProofOfWork(hash, C),
        },
    }
}
```

Шифрование подписи сеансовым ключом является необходимым, т.к. взломщик протокола, для определения отправителя (а именно его публичного ключа) может составить список уже известных ему публичных ключей и проверять каждый на правильность подписи. Если проверка приводит к безошибочному результату, то это говорит об обнаружении отправителя.

Шифрование случайного числа (соли) также есть необходимость, потому как, если злоумышленник знает его и субъектов передаваемой информации, то он способен пройти методом «грубой силы» по словарю часто встречаемых и распространённых текстов для выявления исходного сообщения.

Использование одной и той же пары асимметричных ключей для шифрования и подписания не является уязвимостью, если применяются разные алгоритмы кодирования [12, с.257] или сама структура алгоритма представляет различные способы реализации. Так например, при алгоритме RSA для шифрования может использоваться алгоритм ОАЕР, а для

подписания – PSS. В таком случае не возникает «подводных камней» связанных с возможным чередованием «шифрование-подписание». Тем не менее остаются риски связанные с компрометацией единственной пары ключей, при которой злоумышленник сможет не только расшифровывать все получаемые сообщения, но и подписывать отправляемые [33, с.99][33, с.291]. Но этот критерий также является и относительным плюсом, когда личность субъекта не раздваивается и, как следствие, данный факт не приводит к запутанным ситуациям чистого отправления и скомпрометированного получения (и наоборот).

Протокол пригоден для многих задач, включая передачу сообщений, запросов, файлов, но не пригоден для передачи поточной информации, подобия аудио звонков и видео трансляций, из-за необходимости подписывать и подтверждать работу, на что уходит много времени. Иными словами, протокол работает с конечным количеством данных, размер которых заведомо известен и обработка которых (то есть, их использование) начинается с момента завершения полной проверки.

Недостатком протокола является отсутствие последовательности между несколькими пакетами. Иными словами невозможно определить нумерацию, что в некой степени переводит часть полноценного протокола на логику приложения, как например передача файлов. Это, в свою очередь, обосновывается упрощением протокола, где не требуются хранилище или база данных для хранения последовательности пакетов со стороны каждого входящего объекта. Также в некоторых приложениях последовательность сообщений не критична, как например в электронной почте или мессенджерах, где необходим лишь сам факт уже существующего дубликата (данный момент можно проверить хешем пакета).

Другим недостатком является постоянное применение функции подписания, которая считается наиболее ресурсозатрачиваемой, с практической точки зрения, операцией. При большом количестве поступаемых сообщений, возникнет и необходимость в большом количестве подписания. При этом использование MAC, взамен ЭЦП, является недопустимым, потому как таковая имитовставка создаст буквально поточную связь между субъектами информации (создаст дополнительные связи между субъектами и генерируемым объектом), усложнит протокол и может привести теоретически к более чем одному возможному вектору нападения на протокол.

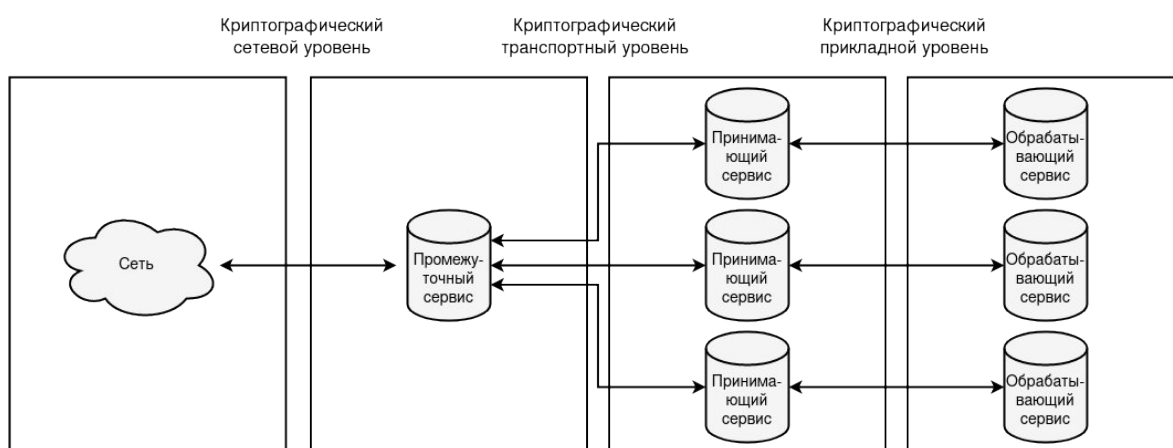


Рисунок 23. Расширенный стек протоколов на примере сервисов в анонимной сети

Для улучшения эффективности, допустим при передаче файлов, программный код можно изменить так, чтобы снизить количество проверок работы в процессе передачи, но с первоначальным доказательством работы на основе случайной строки (полученной от точки

назначения), а потом и с накопленным хеш-значением из n -блоков файла, для i -ой проверки. Таким образом, минимальный контроль работы будет осуществляться лишь $\lceil M/nN \rceil + 1$ раз, где M — размер файла, N — размер одного блока. Если доказательство не поступило или оно является неверным, то нужно считать, что файл был передан с ошибкой и тем самым запросить повреждённый или непроверенный блок заново.

Пример программного кода для расшифрования информации:

```
import (
    "bytes"
    "encoding/hex"
)
func Decrypt(receiver *PrivateKey, pack *Package) (*PublicKey, []byte) {
    // Check hash size.
    If len(pack.Body.Hash) != HashSize {
        return nil, nil
    }

    // Check proof of work.
    if !ProofIsValid(pack.Body.Hash, C, pack.Body.Proof) {
        return nil, nil
    }

    // Decrypt session key.
    session := DecryptA(receiver, pack.Head.Session)
    if session == nil {
        return nil, nil
    }

    // Decrypt public key.
    bpubsend := DecryptS(session, pack.Head.Sender)
    if bpubsend == nil {
        return nil, nil
    }
    pubsend := BytesToPublicKey(bpubsend)
    if pubsend == nil {
        return nil, nil
    }
    pubsize := PublicKeySize(pubsend)
    if pubsize != KeySize {
        return nil, nil
    }

    // Decrypt rand bytes.
    randBytes := DecryptS(session, pack.Head.RandBytes)
    if randBytes == nil {
        return nil, nil
    }

    // Decrypt data.
    data := DecryptS(session, pack.Body.Data)
    if data == nil {
        return nil, nil
    }

    // Check hash.
    check := HashSum(bytes.Join(
        [][]byte{
            randBytes,
            data,
            PublicKeyToBytes(pubsend),
            PublicKeyToBytes(&receiver.PublicKey),
        }
```

```

        },
        []byte{},
    ))
    if !bytes.Equal(pack.Body.Hash, check) {
        return nil, nil
    }

    // Decrypt signature.
    sign := DecryptS(session, pack.Body.Sign)
    if sign == nil {
        return nil, nil
    }

    // Check signature.
    if !Verify(pubsend, pack.Body.Hash, sign) {
        return nil, nil
    }

    return pubsend, data
}

```

Протокол также способен обеспечивать полиморфизм информации методом установки промежуточных получателей (маршрутизаторов) и созданием транспортировочных пакетов, представленных в форме множественного шифрования. Как только узел сети принимает пакет, он начинает его расшифровывать. Если пакет успешно расшифровывается, но при этом сама расшифрованная версия является шифрованным экземпляром, то это говорит о том, что данный принимающий узел — это промежуточный получатель, целью которого является последующее распространение «расшифрованной» версии пакета по сети. Базовый механизм распространения и получения объектов схож с Bitmessage, но в отличие от него, здесь существует свойство полиморфизма, которое образуется методом дополнительной цепной маршрутизации и способное к сокрытию субъектов информации. Рекуперация, в совокупности с конечной рекурсией, будет происходить до тех пор, пока не будет расшифрован последний пакет, предполагающий существование истинного получателя, либо до тех пор, пока пакет не распространится по всей сети и не окажется забытым, по причине отсутствия получателя (будь то истинного или промежуточного). Стоит также заметить, что маршрутизаторы при расшифровании пакета могут узнавать криптографический адрес отправителя, именно поэтому стоит отправлять транспортировочные пакеты из-под криптографического псевдо-адреса отправителя.

Пример программного кода для создания транспортировочного пакета:

```

import (
    "bytes"
)
func RoutePackage(sender *PrivateKey, receiver *PublicKey, data []byte, route []*PublicKey) *Package {
    var (
        rpack    = Encrypt(sender, receiver, data)
        psender = GenerateKey(N)
    )
    for _, pub := range route {
        rpack = Encrypt(
            psender,
            pub,
            bytes.Join(
                [][]byte{
                    ROUTE_MODE,
                    SerializePackage(rpack),
                },
            ),
        )
    }
}

```

```

    []byte{}),
    )
}
return rpack
}

```

Весь представленный программный код на языке Go представлен только как шаблон, показывающий способ шифрования и расшифрования непосредственно. Проблемой здесь является простота и примитивность анализа сетевого трафика по JSON-формату, что может привести к последующим блокировкам всех сетевых построений на основе данного код, а также игнорирование факта изменения размерности пакета, что может привести к деанонимизации субъектов информации (более подробно в подразделе «Противодействие обнаружению динамики размерности пакетов»). Необходимым решением предотвращения простоты анализа трафика должно служить вынесение сеансового ключа за пакет JSON-формата, последующее шифрование им пакета и конкатенация зашифрованного пакета с зашифрованным сеансовым ключом. Если размер асимметричного ключа заведомо известен, то будет известен и размер зашифрованного сеансового ключа, что не приведёт к каким-либо проблемам расшифрования информации. Другая проблема заключается в отсутствии каких бы то ни было видимых метаданных (хеш-значения, доказательства работы), которые бы помогли в борьбе со спамом, что в свою очередь является крайне важным критерием для большинства децентрализованных систем. Таким образом, отсутствие метаданных равносильно отсутствию отказоустойчивости, что отсылает на противоречие эквивалентности полностью анализируемого и неподверженного анализу пакетам. В связи с этим, вопрос об отказоустойчивости скрытых сервисов в замкнутой системе посредством блокировок остаётся открытым.

6.2. Противодействие обнаружению динамики размерности пакетов

Теперь, если анализировать непосредственно сами пакеты, в моменты их перемещения по сети, то можно наблюдать точно заданную тенденцию при которой их размер будет стремиться к уменьшению. Это связано с тем фактом, что сам пакет имеет свойство полиморфизма, которое инициализируется на отправляющей стороне и постепенно финализируется на пути к принимающей. Такая закономерность способна выявлять роль субъектов информации, при которой достаточно проанализировать лишь размер пакета с позиции двух отправок ($A \rightarrow B$) \rightarrow ($B \rightarrow C$) и если пакет, в таком случае, уменьшается на заведомо известную величину D^5 , то это свидетельствует о крайне высокой вероятности, что

⁵Детерминированная разница размеров пакета между зашифрованной и открытой версией, имеющая единственный слой шифрования. Зашифрованный пакет состоит из зашифрованного заголовка, зашифрованных данных (основной информации), зашифрованной случайной строки, зашифрованного сеансового ключа, зашифрованного публичного ключа, хеша, зашифрованной подписи и доказательства работы. При этом, динамическим размером обладает только поле с основной информацией, в то время как все остальные поля имеют статические размеры, что и приводит к возможности анализа пакета по динамике постоянного стремления к уменьшению, исходя из его константной дифференции.

$$D = S(E(P)) - S(P),$$

где S - функция вычисления размера информации,
 E - функция шифрования информации,
 P - первоначальная информация.

сам узел В является только промежуточным получателем. Чтобы решить данную проблему, необходимо рассматривать структуру пакета со стороны его размерности. Так например, если сообщение размером $S(P)$ создаётся на отправителе и сразу же шифруется всеми слоями размером равным $S(E)$, то результатом такой функции является размер полиморфного пакета $S(P) + S(E) = S(E(P))$. При этом, т.к. $S(E)$ предполагает собой все слои шифрования, то данный размер можно представить в виде суммы каждого отдельного шифрования, где $S(E) = S(E_1) + S(E_2) + \dots + S(E_n) \rightarrow S(E_n(\dots(E_2(E_1(P))))\dots) = S(E(P))$. При этом каждый отдельный слой шифрования $S(E_i)$ равен любому другому слою $S(E_j)$, что даёт тождество вида $S(E_1) + S(E_2) + \dots + S(E_n) \equiv nS(E_1) = S(E)$. Таким образом, проблема представлена удалением каждого отдельного элемента $S(E_i)$ из общей суммы $S(E)$, что также приводит к постоянному уменьшению числа n на единицу и к детерминированному вычислению $D = S(E_i)$. Решением задачи является добавление пустой, неиспользуемой информации V_i случайного размера к каждому элементу $S(E_i)$, что, следовательно, приведёт к метаморфозу свойств детерминированности числа D , переходящего в алеаторность посредством неравенства $S(V_i || E_i) \neq S(V_j || E_j)$ и к невозможности представления размера $S(V || E)$ через выражение $nS(V_1 || E_1)$.

Хоть на данном этапе и невозможно определить число D , т.к. оно уже становится случайным, исходя из выражения $S(V_i || E_i)$, тем не менее, стремление полиморфного пакета к своему собственному разложению остаётся, а это говорит, что остаётся возможным вероятностный анализ его размерности. Также, если идти от обратного и предположить, что существует отправление вида $(A \rightarrow B) \rightarrow (B \rightarrow C)$ и при этом, первый пакет оказывается меньше последующего, то данный факт говорит только о том, что второй пакет является самостоятельно сгенерированным и считается либо запросом, либо ответом, а узел В либо отправителем, либо получателем. Одним из решений данной проблемы может являться создание отдельного поля в пакете, указывающего на следующего получателя (будь то истинного или промежуточного) с той лишь целью, чтобы маршрутизатор мог дополнять пакет на некую величину размера M^6 , приводящую к константному размеру K^7 [14, с.6]. Данный способ удаляет вышеописанные проблемы полностью, но выдаёт промежуточным узлам дополнительную информацию о последующих получателях пакета, одним из которых станет истинный получатель. Критичный характер данной проблемы приведёт к

⁶Переменная величина M применяется для замещения удалённых слоёв шифрования, сохраняя размер любой стадии полиморфного пакета на уровне константной величины K .

$$M_n = \sum_{i=1}^n S(V_i || E_i),$$

где $S(V_i)$ - размер случайной информации для каждого слоя шифрования,
 $S(E_i)$ - размер отдельного слоя шифрования,
 n - количество удалённых слоёв шифрования.

⁷Константная величина K является доминирующей концепцией большинства скрытых сетей, т.к. скрывает объём передаваемой информации посредством фиксации размерности пакета (объём может частично разглашать функцию пакета или его динамику, что является уязвимостью и приводит к необходимости её решения).

$$K_j = S(P) + \sum_{i=j}^n S(V_i || E_i) + M_{j-1},$$

где j - стадия полиморфного пакета,
 n - количество слоёв шифрования.

негэнтропии, автоматической деградации абстрактной скрытой системы, где будет существовать возможность формирования списка потенциальных получателей на основе ограничения диапазона множества узлов всей сети и приводящий к зарождению выходных нод, определённо знающих (или вероятностно распознающих) истинных получателей.

Ещё одним и более корректным способом решения проблемы является использование случайной величины R^8 , вместо константной величины K . В то время как сама уязвимость и проблема образуется и воссоздаётся из детерминированности, то и константная величина K порождённая ей же, не способна в корне предотвращать схожие проблемы. На место величины K встаёт величина R , приводящая к хаотичности размерности пакетов, к диффузии детерминированных качеств и к неопределённому выявлению субъектов информации. Такой подход базируется на необходимости генерации вероятностного псевдо-пакета случайного и большего размера (чем истинный пакет) на маршрутизирующей или принимающей стороне. Таким образом, промежуточный/принимающий узел начинает становиться одновременно и псевдо-получателем для всех остальных участников сети.

Из вышеописанного также следует вывод, что если $X \in \{\text{пакет меньшего размера, пакет большего размера}\}$, а $Y \in \{\text{отправитель/получатель, маршрутизатор}\}$, то при их импликации $X_i \rightarrow Y_j$ все суждения будут являться ложными. Доказать хаотичность действий вероятностной величины R и неразрешимость детерминированного анализа можно следующими логическими выражениями:

1. Если новый пакет меньше предыдущего, то субъектом данного объекта является истинный отправитель, либо получатель.

Ложно, т.к. маршрутизатор может «раскрыть» пакет, тем самым уменьшив его размер.

2. Если новый пакет меньше предыдущего, то субъектом данного объекта является маршрутизатор.

Ложно, т.к. ответ может быть меньше запроса.

3. Если новый пакет больше предыдущего, то субъектом данного объекта является истинный отправитель, либо получатель.

Ложно, т.к. маршрутизатор может сгенерировать псевдо-пакет большего размера.

4. Если новый пакет больше предыдущего, то субъектом данного объекта является маршрутизатор.

Ложно, т.к. ответ может быть больше запроса.

Для второго и четвёртого пунктов также действенно следующее правило — если истинный запрос/ответ по логике приложения всегда меньше ответа/запроса, то положение вероятностным образом меняется на противоположное при использовании переменных величин $\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$.

7. Заключение

⁸Случайная величина R является противоположной концепцией константной величины K и представляет неопределённость размерности пакета со стороны маршрутизирующей стороны, где с вероятностью 1/2 может быть создан и отправлен новый, «пустой» псевдо-пакет случайного и большего размера, скрывающий, посредством алеаторности, дальнейший анализ динамики истинного пакета.

В данной работе были проанализированы скрытые системы, представляющие безопасность и безымянность пользователей — анонимные сети и тайные каналы связи. Была приведена градация анонимности в компьютерных сетях, базируемая на её мощности. Было найдено противоречие, при котором стремление к уменьшению мощности доверия становится второстепенным свойством, как только достигается этап формирования анонимной сети. Решением проблемы становится объединение пятой стадии анонимности со стадией скрытой сети. Из определения абстрактных скрытых сетей была также выявлена возможность создания тайных каналов связи с доказуемой анонимностью субъектов, за счёт осуществимости применения виртуальной маршрутизации в замкнутых системах. В части о тайных каналах связи было расширено определение пятой стадии анонимности, за счёт внесения стеганографических методов как возможной альтернативы криптографическим. В конце статьи был представлен протокол безопасной передачи информации, вместе с примерами программного кода, на основе которого могут базироваться в последующем анонимные сети и тайные каналы связи.

Список литературы

1. Таненбаум, Э., Уэзеролл, Д. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл. — СПб.: Питер, 2017. - 960 с.
2. Попова, А. Интернет как сетевая или иерархическая структура: концепция сети в постмодернистской философии и социальных науках конца XX-го и начала XXI-го вв. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/internet-kak-setevaya-ili-ierarhicheskaya-struktura-kontseptsiya-seti-v-postmodernistskoy-filosofii-i-sotsialnyh-naukah-kontsa-xx-go-i> (дата обращения: 02.01.2022).
3. Бодрийяр, Ж. Символический обмен и смерть / Ж. Бодрийяр. — М.: «Добросвет» 2000. - 387 с.
4. Шнайер, Б. Beyond Security Theater [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://www.schneier.com/essays/archives/2009/11/beyond_security_thea.html (дата обращения: 16.03.2022).
5. Меньшиков, Я., Беляев, Д. Утрата анонимности в век развития цифровых технологий [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/utrata-anonimnosti-v-vek-razvitiya-tsifrovyyh-tehnologiy> (дата обращения: 04.01.2022).
6. Молчанов, А. Парадокс анонимности в Интернете и проблемы ее правового регулирования [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/paradoks-anonimnosti-v-internete-i-problemy-ee-pravovogo-regulirovaniya> (дата обращения: 12.07.2022).
7. Симаков, А. Анонимность в глобальных сетях [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/anonimnost-v-globalnyh-setyah> (дата обращения: 04.01.2022).
8. Анохин, Ю., Янгаева, М. К вопросу о MITM-атаке как способе совершения преступлений в сфере компьютерной информации [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-mitm-atake-kak-sposobe-soversheniya-prestupleniy-v-sfere-kompyuternoy-informatsii> (дата обращения: 04.01.2022).
9. Молоков, В. К вопросу о безопасном шифровании в интернет-мессенджерах [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-voprosu-o-bezopasnom-shifrovanii-v-internet-messendzherah> (дата обращения: 04.01.2022).

10. Вишнеvская, Ю, Коваленко, М. Анализ способов и методов незаконного распространения личных данных пользователей мессенджеров, социальных сетей и поисковых систем [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sposobov-i-metodov-nezakonnogo-rasprostraneniya-lichnyh-dannyh-polzovateley-messendzherov-sotsialnyh-setey-i-poiskovyh-sistem> (дата обращения: 30.12.2021).
11. Diffie, W., Hellman, M. New Directions in Cryptography [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://ee.stanford.edu/~hellman/publications/24.pdf> (дата обращения: 19.12.2020).
12. Шнайер, Б., Фергюсон, Н. Практическая криптография / Б. Шнайер, Н. Фергюсон. - М.: Издательский дом «Вильямс, 2005. - 420 с.
13. Садаков, Д., Сараджишвили, С. Рекомендательный протокол децентрализованной файлообменной сети [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/rekomendatelnyy-protokol-detsentralizovannoy-fayloobmennoy-seti> (дата обращения: 29.03.2022).
14. Chaum, D. Untraceable Electronic Mail, Return Addresses, and Digital Pseudonyms [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.lix.polytechnique.fr/~tomc/P2P/Papers/Theory/MIXes.pdf> (дата обращения: 16.08.2022).
15. Ершов, Н., Рязанова, Н. Проблемы сокрытия трафика в анонимной сети и факторы, влияющие на анонимность [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/problemy-sokrytiya-trafika-v-anonimnoy-seti-i-factory-vliyayushchie-na-anonimnost> (дата обращения: 02.01.2022).
16. NETSUKUKU RFC документация [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://netsukuku.freaknet.org/sourcedocs/main_doc/ntk_rfc/ (дата обращения: 31.12.2021).
17. Шнайер, Б. Прикладная криптография. Протоколы, алгоритмы и исходные коды на языке C / Б. Шнайер. — СПб.: ООО «Альфа-книга», 2018. - 1040 с.
18. Шелухин, О., Канаев, С. Стеганография. Алгоритмы и программная реализация / О. Шелухин, С. Канаев. — М.: Горячая линия - Телеком, 2018. - 592 с.
19. Карпов, Д., Ибрагимова, З. Способы и средства обеспечения анонимности в глобальной сети Интернет [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sposoby-i-sredstva-obespecheniya-anonimnosti-v-globalnoy-seti-internet> (дата обращения: 15.07.2022).
20. Рябко, Е. Калейдоскоп vpn технологий [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/kaleydoskop-vpn-tehnologiy> (дата обращения: 02.01.2022).
21. Накамото, С. Биткойн: система цифровой пиринговой наличности [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://bitcoin.org/files/bitcoin-paper/bitcoin_ru.pdf (дата обращения: 19.12.2020).
22. Warren, J. Bitmessage: A Peer-to-Peer Message Authentication and Delivery System [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://bitmessage.org/bitmessage.pdf> (дата обращения: 31.12.2021).
23. Perry, M. Securing the Tor Network [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.blackhat.com/presentations/bh-usa-07/Perry/Whitepaper/bh-usa-07-perry-WP.pdf> (дата обращения: 03.01.2022).
24. Astolfi, F., Kroese, J., Oorschot, J. I2P - Invisible Internet Project [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://staas.home.xs4all.nl/t/swtr/documents/wt2015_i2p.pdf (дата обращения: 03.01.2022).

25. Danezis, G., Dingledine, R., Mathewson, N. Mixminion: Design of a Type III Anonymous Remailer Protocol [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20170312061708/https://gnunet.org/sites/default/files/minion-design.pdf> (дата обращения: 03.01.2022).
26. Рябко, Б., Фионов, А. Криптография в информационном мире / Б. Рябко, А. Фионов. - М.: Горячая линия - Телеком, 2019. - 300 с.
27. Chaum, D. The Dining Cryptographers Problem: Unconditional Sender and Recipient Untraceability [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.cs.cornell.edu/people/egs/herbivore/dcnets.html> (дата обращения: 24.07.2022).
28. Goel, S., Robson, M., Polte, M., Gun Sirer, E. Dissent in Numbers: Making Strong Anonymity Scale [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dedis.cs.yale.edu/dissent/papers/osdi12.pdf> (дата обращения: 24.07.2022).
29. Corrigan-Gibbs, H., Wolinsky, D., Ford, B. Proactively Accountable Anonymous Messaging in Verdict [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://dedis.cs.yale.edu/dissent/papers/verdict.pdf> (дата обращения: 24.07.2022).
30. Alonso, K., KOE. Zero to Monero: First Edition A technical guide to a private digital currency; for beginners, amateurs, and experts [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.getmonero.org/library/Zero-to-Monero-1-0-0.pdf> (дата обращения: 28.12.2021).
31. Duffield, E., Diaz, D. Dash: Privacy-Centric Crypto-Currency [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20150514080026/https://www.dashpay.io/wp-content/uploads/2015/04/Dash-WhitepaperV1.pdf> (дата обращения: 28.12.2021).
32. Popescu, B., Crispo, B., Tanenbaum, A. Safe and Private Data Sharing with Turtle: Friends Team-Up and Beat the System [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://turtle-p2p.sourceforge.net/turtleinitial.pdf> (дата обращения: 29.12.2021).
33. Шнайер, Б., Фергюсон, Н. Практическая криптография / Б. Шнайер, Н. Фергюсон. - М.: Издательский дом «Вильямс», 2005. - 420 с.
34. Донован, А., Керниган, Б. Язык программирования Go / А.А. Донован, Б.У. Керниган. — М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2018. - 432 с.
35. Программная реализация протокола go-peer [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://github.com/number571/go-peer> (дата обращения: 20.03.2022).