Network Working Group
Request for Comments: 4213
Obsoletes: 2893
Category: Standards Track

E. Nordmark
Sun Microsystems, Inc.
R. Gilligan
Intransa, Inc.

October 2005

Базовые механизмы перехода для хостов и маршрутизаторов IPv6

Basic Transition Mechanisms for IPv6 Hosts and Routers

Статус документа

Этот документ содержит проект стандарта протокола Internet для сообщества Internet и служит приглашением к дискуссии в целях развития и совершенствования предложенного протокола. Информацию о текущем статусе протокола и состоянии стандартизации можно найти в документе Internet Official Protocol Standards (STD 1). Документ может распространяться свободно.

Авторские права

Аннотация

Этот документ задаёт механизмы совместимости с IPv4, которые могут быть развёрнуты на хостах и маршрутизаторах IPv6. Приведены спецификации двух механизмов - двойной стек и настраиваемое туннелирование. Механизм с двойным стеком протоколов предполагает полную реализацию обеих версий протокола IP (IPv4 b IPv6), а механизм настраиваемого туннелирования позволяет передавать пакеты IPv6 через инфраструктуру маршрутизации IPv4 без ее изменения.

Этот документ служит заменой RFC 2893.

Оглавление

1. Введение

Ключевым элементом успешного перехода на IPv6 является совместимость с большой базой установленных хостов и маршрутизаторов IPv4. Обеспечение совместимости с IPv4 при развёртывании IPv6 упростит задачу перевода сети Internet на протокол IPv6. В этой спецификации определены два механизма, которые могут быть реализованы на хостах и маршрутизаторах IPv6 для обеспечения совместимости с хостами и маршрутизаторами IPv4.

Описанные в документе механизмы разработаны для развёртывания на хостах и маршрутизаторах IPv6, которым требуется взаимодействие с хостами IPv4 и возможность использования инфраструктуры маршрутизации IPv4. Предполагается, что такая совместимость потребуется для большинства узлов Internet в течение длительного (возможно, неопределённого) срока.

Предлагаемые здесь механизмы включают:

- Dual IP (двойной стек IP) - метод обеспечения полной поддержки обеих версий протокола IP (IPv4 и IPv6) на хостах и маршрутизаторах.
- Настраиваемое туннелирование IPv6 через IPv4 - метод организации туннелей «точка-точка» за счёт инкапсуляции пакетов IPv6 с заголовками IPv4 для передачи через маршрутную инфраструктуру IPv4.

Механизмы, определённые здесь, предназначены на роль основных инструментов перехода - расширяемого набора методов, которые разработчики и пользователи могут применять для упрощения перехода на новую версию протокола. Использование конкретных инструментов определяется реальными потребностями. Разработчики и сайты самостоятельно принимают решения о выборе конкретных методов решения своих задач.

В этом документе определяется базовый набор механизмов перехода, который не исчерпывает всего спектра имеющихся механизмов. В других документах описаны дополнительные механизмы перехода и обеспечения совместимости.

1.1. Терминология

Ниже определены основные термины, используемые в этом документе.

Типы узлов

IPv4-only node (только IPv4)
Хост или маршрутизатор, на котором развернут только протокол IPv4. Такие узлы не понимают протокол IPv6. Установленная база хостов и маршрутизаторов IPv4, существовавших до начала перехода относится к этому типу узлов.

IPv6/IPv4 node (IPv6 и IPv4)
Хосты и маршрутизаторы, поддерживающие протоколы IPv4 b IPv6.

IPv6-only node (только IPv6)
Хост или маршрутизатор, который поддерживает IPv6, но не поддерживает IPv4. Работа узлов этого типа в данном документе не рассматривается.

IPv6 node (узел IPv6)
Любой хост или маршрутизатор, поддерживающий IPv6. Узлы типа IPv6/IPv4 и IPv6-only относятся к узлам IPv6.

IPv4 node (узел IPv4)
Любой хост или маршрутизатор, поддерживающий IPv4. Узлы типа IPv6/IPv4 и IPv4-only относятся к узлам IPv4.

Методы, используемые при переходе

IPv6-over-IPv4 tunneling (туннелирование IPv6 через IPv4)
Метод инкапсуляции пакетов IPv6 в пакеты IPv4, которые могут передаваться через инфраструктуру маршрутизации IPv4.

Configured tunneling (настраиваемое туннелирование)
Туннелирование IPv6-over-IPv4 при котором адреса IPv4 конечных точек туннеля определяются конфигурационными параметрами этих точек. Все туннели предполагаются двухсторонними. Туннель обеспечивает (виртуальный) канал «точка-точка» для уровня IPv6 с использованием заданных в конфигурации адресов IPv4 в качестве адресов конечных точек нижележащего уровня.

Другие механизмы перехода, включая иные методы туннелирования, выходят за пределы этого документа.

Ключевые слова **необходимо** (MUST), **недопустимо** (MUST NOT), **требуется** (REQUIRED), **нужно** (SHALL), **не следует** (SHALL NOT), **следует** (SHOULD), **не нужно** (SHOULD NOT), **рекомендуется** (RECOMMENDED), **возможно** (MAY), **необязательно** (OPTIONAL) в данном документе интерпретируются в соответствии с [RFC2119].

2. Работа Dual IP

Наиболее простым способом обеспечения совместимости узлов IPv6 с узлами, поддерживающими только IPv4, является полная реализация протокола IPv4. Узлы, полностью поддерживающие оба протокола IPv4 и IPv6, называют узлами IPv6/IPv4. Такие узлы способными передавать и принимать как пакеты IPv4, так и пакеты IPv6. Они могут напрямую взаимодействовать с узлами IPv4, используя пакеты IPv4, и с узлами IPv6, используя пакеты IPv6.

Даже на узлах, способных поддерживать обе версии протокола, тот или иной из двух стеков может быть отключён. Включенный стек имеет выделенный ему адрес IP, но доступность для стеков тех или иных приложений явно не определена. Таким образом, узлы IPv6/IPv4 могут работать в одном из трёх режимов:

- стек IPv4 включён, а IPv6 отключён.;
- стек IPv6 включён, а IPv4 отключён.;
- оба стека протоколов включены.

Узлы IPv6/IPv4 с отключённым стеком IPv6 будут работать, как узлы IPv4-only. Аналогично, узлы IPv6/IPv4 с отключённым стеком IPv4 будут работать, как IPv6-only. Узлы IPv6/IPv4 **могут** поддерживать конфигурационные параметры для включения и отключения их стеков IPv4 или IPv6.

Метод настраиваемого туннелирования, описанный в разделе 3, может использоваться в дополнение к методу Dual IP.

2.1. Настройка адресов

Поскольку узлы IPv6/IPv4 поддерживают обе версии протокола, для них в конфигурации могут задаваться адреса как IPv4, так и IPv6. Узлы IPv6/IPv4 используют механизмы IPv4 (например, DHCP) для получения адресов IPv4 и механизмы IPv6 (например, автоматическая настройка конфигурации [RFC2462] и/или DHCPv6) для получения адресов IPv6.

2.2. DNS

Система доменных имён (DNS[1]) используется как в IPv4, так и в IPv6 для отображения имён хостов на адреса IP и обратно. Для адресов IPv6 в документе [RFC3596] определён новый тип записей о ресурсах - AAAA. Поскольку узлы IPv6/IPv4 должны обеспечивать взаимодействие с узлами IPv4и IPv6, они должны поддерживать библиотеки преобразования, способные работать как с записями IPv4 типа A, так и с записями IPv6 типа AAAA. Отметим, что поиск

[1]Domain Naming System.

записей A и AAAA не зависит от протокола, используемого для передачи пакетов DNS (IPv4 или IPv6), поэтому не делается допущения о том, что серверы DNS знают о возможностях поддержки IPv4/IPv6 на запрашивающих узлах.

Вопросы использования IPv6 с DNS и рабочие рекомендации более подробно рассмотрены в других документах (например, [DNSOPV6]).

Библиотеки преобразования DNS (resolver) на узлах IPv6/IPv4 **должны** поддерживать обработку записей обоих типов AAAA и A. Однако, если запросы возвращают записи AAAA с адресом IPv6 и записи A с адресом IPv4, библиотека преобразования **может** упорядочивать возвращаемые приложению результаты с учётом версии пакетов IP, используемых в коммуникациях с конкретным узлом - сначала IPv6 или сначала IPv4.

Приложениям **следует** поддерживать возможность задания желаемых типов записей (IPv4, IPv6 или оба типа [RFC3493]). Это определяет, какие семейства адресов преобразователь будет искать. Если приложение не указывает своего выбора или запрашивает оба типа, для библиотек преобразования **недопустима** фильтрация записей.

Поскольку большинство приложений пытаются использовать адреса в порядке, возвращаемом преобразователем, это может оказывать влияние на выбор версии IP «предпочитаемой» приложением.

Реальные механизмы упорядочения выходят за пределы этого документа. Более подробно выбор адресов рассмотрен в [RFC3484].

3. Механизмы настраиваемого туннелирования

В большинстве вариантов развёртывания инфраструктура маршрутизации IPv6 будет строиться достаточно долго. Пока будет создаваться инфраструктура IPv6, существующая инфраструктура маршрутизации IPv4 будет продолжать функционирование и может использоваться для передачи трафика IPv6. Туннелирование обеспечивает возможность использования существующей инфраструктуры маршрутизации IPv4 для доставки трафика IPv6.

Хосты и маршрутизаторы IPv6/IPv4 могут туннелировать дейтаграммы IPv6 через области маршрутной топологии IPv4 за счёт их инкапсуляции в пакеты IPv4. Туннелирование можно организовать множеством способов:

- Router-to-Router. Маршрутизаторы IPv6/IPv4, соединённые через инфраструктуру IPv4, могут туннелировать между собой пакеты IPv6. В этом случае туннель представляет собой один сегмент сквозного пути пакетов IPv6.
- Host-to-Router. Хосты IPv6/IPv4 могут туннелировать пакеты IPv6 на промежуточные маршрутизаторы IPv6/IPv4, доступные через инфраструктуру IPv4. Этот тип туннеля представляет собой первый сегмент сквозного пути доставки пакетов.
- Host-to-Host. Хосты IPv6/IPv4, связанные через инфраструктуру IPv4 могут туннелировать пакеты IPv6 между собой. В этом случае туннель будет представлять собой весь сквозной путь доставки пакетов.
- Router-to-Host. Маршрутизаторы IPv6/IPv4 могут туннелировать пакеты IPv6 конечным получателям IPv6/IPv4. В этом случае туннель представляет собой последний сегмент сквозного пути доставки пакетов.

Настраиваемое туннелирование может использоваться во всех перечисленных случаях, но больше всего оно подходит для туннелирования между маршрутизаторами по причине необходимости явной настройки конечных точек туннелей.

Основными элементами туннелирования являются:

- входной узел туннеля (инкапсулятор), создающий заголовок инкапсуляции IPv4 и передающий инкапсулированный пакет;
- выходной узел туннеля (декапсулятор), принимающий инкапсулированный пакет, выполняющий при необходимости сборку фрагментов, удаляющий заголовок IPv4 и обрабатывающий принятый пакет IPv6;
- инкапсулятору может потребоваться поддержка информации о состоянии для каждого туннеля, включающей такие данные, как MTU для туннеля, чтобы соответствующим образом обрабатывать пакеты IPv6, пересылаемые в туннель.

При настраиваем туннелировании адреса конечных точек туннеля определяются на инкапсуляторе из конфигурационных параметров, хранящихся для каждого туннеля. Когда пакеты IPv6 передаются через туннель, адреса отправителя и получателя в инкапсулирующем заголовке IPv4 задаются в соответствии с параграфом 3.5.

Решение вопроса о туннелировании обычно принимается на основе маршрутной информации в инкапсуляторе. Обычно это происходит с использованием таблицы маршрутизации, которая направляет пакеты в соответствии с адресами их получателей, используя методы сравнения масок и префиксов.

Декапсулятор проверяет соответствие пакетов с номером протокола 41 настроенным на нем туннелям и принимает только пакеты, в которых адрес отправителя IPv4 соответствует настроенному на декапсуляторе туннелю. Следовательно, оператор должен гарантировать, что конфигурация адресов IPv4 для туннелей совпадает на стороне инкапсулятора и декапсулятора.

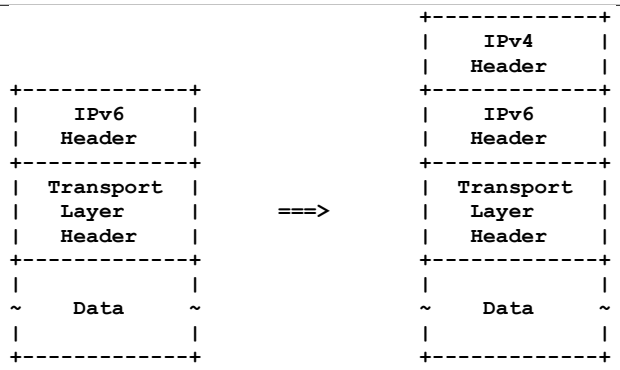
3.1. Инкапсуляция

Инкапсуляция дейтаграмм IPv6 в пакеты IPv4 показана на рисунке.

Кроме добавления заголовка IPv4 инкапсулятор решает некоторые более сложные вопросы:

- определяет необходимость фрагментирования и передачи сообщений ICMPv6 packet too big[1] отправителям пакетов;

[1]Слишком большой пакет.



Инкапсуляция IPv6 в IPv4.

- способ передачи сообщений ICMPv4 от маршрутизаторов вдоль туннеля отправителю исходных пакетов, как сообщений ICMPv6.

Эти вопросы рассмотрены в последующих параграфах.

3.2. MTU для туннеля и фрагментация

В примитивном варианте инкапсулятор может рассматривать процесс инкапсуляции, как IPv6, использующий протокол IPv4 в качестве канального уровня с очень большим значением MTU (до 65535-20 байтов; 20 байтов расходуются на инкапсулирующий заголовок IPv4). Инкапсулятору нужно лишь передавать сообщения ICMPv6 packet too big отправителям пакетов, размер которых превышает это значение MTU. Однако такая схема не будет эффективной и не обеспечит взаимодействия по перечисленным ниже трём причинам. Следовательно, **недопустимо** использовать такую примитивную схему.

1) Возникает избыточная фрагментация. Фрагментации на уровне IPv4 следует избегать, поскольку могут возникать проблемы с производительностью в результате потери блоков данных, размер которых меньше размера при повторе передачи [KM97].

2) Любая фрагментация IPv4 внутри туннеля (между инкапсулятором и декапсулятором) будет приводить к сборке фрагментов в конечной точке туннеля. Для туннелей, завершающихся на маршрутизаторах, потребуется дополнительный расход памяти и других ресурсов на сборку фрагментов IPv4 в полный пакет IPv6 до его пересылки.

3) У инкапсулятора может не быть возможности узнать о способности декапсулятора дефрагментировать такие пакеты IPv4 (см. параграф 3.6) и способности декапсулятора обрабатывать столь большие блоки IPv6 MRU[1].

Следовательно, инкапсулятору **недопустимо** трактовать туннель, как интерфейс с MTU = 64 кбайт, а взамен этого следует использовать статически заданное фиксированное значение MTU или **необязательный** механизм динамического определения MTU на основе MTU на пути IPv4 к конечной точке туннеля.

При реализации обоих механизмов решение о выборе конкретного варианта **следует** принимать на основе конфигурационных параметров, задаваемых для конечных точек каждого туннеля.

3.2.1. Статическое значение MTU для туннеля

Узел, использующий статическое значение MTU для туннеля, трактует туннельный интерфейс, как интерфейс с фиксированным MTU. По умолчанию значение MTU **должно** лежать в диапазоне от 1280 до 1480 байтов (включительно), но **следует** устанавливать значение 1280 байтов. Если используемое по умолчанию значение отличается от 1280, реализация **должна** иметь конфигурационный параметр, позволяющий изменить значение MTU.

Узел должен быть способен воспринимать фрагментированные пакеты IPv6, размер которых после сборки не превышает 1500 октетов [RFC2460]. Этот документ также включает требования (см. параграф 3.6) для количества сборок фрагментов IPv4 и IPv6 MRU, которые **должны** поддерживаться всеми декапсуляторами. Это гарантирует взаимодействие при всех фиксированных значениях MTU из диапазона 1280 - 1480 байтов.

Большие фиксированные значения MTU, поддерживаемые в соответствии с данной спецификацией, недопустимо использовать, пока на административном уровне не гарантируется возможность сборки пакетов такого размера на стороне декапсулятора.

Выбор подходящего значения MTU зависит от множества факторов, часть которых перечислена ниже:

- когда пакеты IPv4 с номером протокола 41 будут передаваться через среду, которая может иметь меньшее значение path MTU (например, IPv4 VPN[2]), выбор большого значения может привести к излишней фрагментации IPv4;

- при использовании туннеля для транспортировки туннелированных пакетов IPv6 (например, мобильный узел с настраиваемым туннелем IPv6-in-IPv4 и туннельный интерфейс Ipv6-in-IPv6), выбор слишком малого значения может приводить к излишней фрагментации IPv6.

Если предполагается наличие многоуровневой инкапсуляции, представляется разумным рассмотреть поддержку динамического определения MTU с целью минимизации фрагментирования и оптимизации размера пакетов.

При использовании статического MTU для туннеля, в инкапсулирующем заголовке IPv4 **недопустимо** устанавливать флаг DF[3]. В результате этого инкапсулятор не должен получать сообщений ICMPv4 о недопустимо большом размере для инкапсулированных им пакетов.

[1]Maximum Receive Unit - максимальный принимаемый блок.
[2]Virtual Private Network - виртуальная частная сеть.
[3]Don't Fragment - не фрагментировать.

3.2.2. Динамическое значение MTU для туннеля

Динамическое определение MTU является **необязательным**. Однако при его реализации **следует** выполнять рекомендации, содержащиеся в данном документе.

Фрагментация внутри туннеля может быть сведена к минимуму за счёт определения инкапсулятором значений IPv4 MTU в туннеле с помощью протокола IPv4 Path MTU Discovery Protocol [RFC1191] и записи результирующего значения MTU для всего пути. Уровень IPv6 в инкапсуляторе может в этом случае рассматривать туннель, как канальный уровень со значением MTU, равным IPv4 MTU для пути за вычетом размера инкапсулирующего заголовка IPv4.

Отметим, что это не предотвращает фрагментации IPv4 в тех случаях, когда значение MTU для пути IPv4 будет давать для IPv6 MTU значение менее 1280 байтов (любой канальный уровень, используемый IPv6, должен иметь значение MTU не менее 1280 байтов [RFC2460]). В этом случае уровень IPv6 «видит» канальный уровень с MTU = 1280, а инкапсулятор использует фрагментацию IPv4 для пересылки 1280-байтовых пакетов IPv6.

Инкапсулятору **следует** реализовать приведённый ниже алгоритм для решения вопроса об использовании фрагментации IPv4 при пересылке через туннель пакетов IPv6, размер которых превышает MTU для пути через туннель, и возврате отправителю сообщений ICMPv6 о недопустимом размере пакетов [RFC1981]:

```
if (IPv4 path MTU - 20) < 1280
        if размер пакета > 1280 байтов
                        Передать сообщение ICMPv6 packet too big с MTU = 1280 и отбросить пакет   else
                        Инкапсулировать пакет без установки флага DF в заголовке IPv4. Полученный
                пакет IPv4 может быть фрагментирован уровнем IPv4 на инкапсуляторе или
                  другом маршрутизаторе по пути IPv4.
          endif
else
        if размер пакета > (IPv4 path MTU - 20)
                        Передать сообщение ICMPv6 «packet too big» с MTU = (IPv4 path MTU – 20) и
                отбросить пакет.
        else
                        Инкапсулировать и установить флаг DF в заголовке IPv4.
        endif
endif
```

Инкапсуляторы с большим числом туннелей могут выбирать между статическим и динамическим определением MTU независимо для каждого туннеля. В случаях, когда один узел использует большое число туннелей, полезно кэшировать информацию о состоянии туннелей и отбрасывать неиспользуемые записи из кэша.

Отметим, что при использовании динамических значений MTU для туннелей могут возникать «чёрные дыры» IPv4 MTU, когда сообщения ICMPv4 о недопустимом размере пакетов будут отбрасываться межсетевыми экранами или не будут генерироваться маршрутизаторами [RFC1435, RFC2923].

3.3. Hop Limit

Туннели IPv6-over-IPv4 моделируются с точки зрения IPv6, как «один интервал». Туннель является «чёрным ящиком» для пользователей и не детектируется средствами диагностики сетей типа traceroute.

Модель на базе «одного интервала» реализуется реализуется за счёт процессов инкапсуляции/декапсуляции, которые устанавливают значение поля IPv6 hop limit, как при пересылке через любой другой канал данных (т. е., они уменьшают значение поля hop limit на 1 при пересылке пакета IPv6). Исходный и конечный узлы не меняют значение этого поля.

Значение TTL в инкапсулирующем заголовке IPv4 выбирается по усмотрению реализации протокола. Предлагаемые в настоящее время значения опубликованы в документе Assigned Numbers [RFC3232][ASSIGNED]. Разработчики **могут** обеспечивать механизмы, позволяющие администратору задавать значение IPv4 TTL, как IP Tunnel MIB [RFC4087].

3.4. Обработка сообщений ICMPv4 об ошибках

В ответ на переданные в туннель пакеты инкапсулятор может получать сообщения ICMPv4 об ошибках от маршрутизаторов IPv4 в туннеле. Эти пакеты адресуются инкапсулятору, поскольку он является источником IPv4 для пакета.

Обработка сообщений ICMPv4 применима только для динамического определения MTU, хотя эти функции могут использоваться и при статическом задании MTU для туннеля.

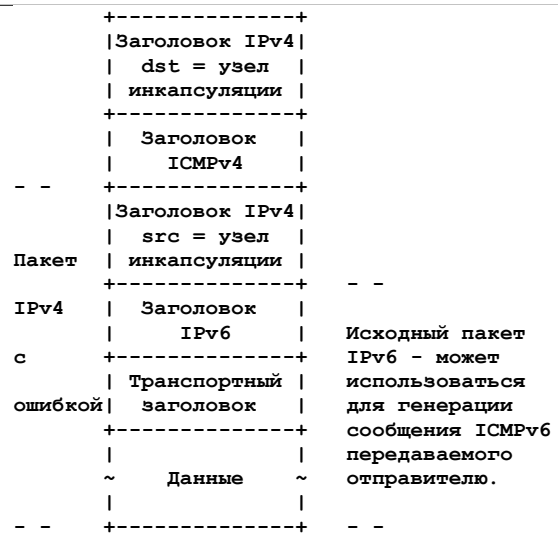
Сообщения ICMPv4 о недопустимо большом размере пакетов обрабатываются в соответствии с механизмом IPv4 Path MTU Discovery [RFC1191] и полученное в результате значение MTU для пути записывается уровнем IPv4. Это значение MTU для пути используется IPv6 для решения вопроса о генерации сообщений ICMPv6 packet too big, как описано в параграфе 3.2.2.

Обработка других типов сообщений ICMPv4 зависит от доступности информации из инкапсулированного пакета, вызвавшего ошибку.

Многие старые маршрутизаторы IPv4 возвращают лишь 8 байтов данных после заголовка IPv4 в вызвавшем ошибку пакете. Этой информации недостаточно для включения адресных полей заголовка IPv6. Более современные маршрутизаторы IPv4 могут возвращать количество данных после заголовка IPv4, достаточное для включения полного заголовка IPv6 и, возможно, некоторого объёма данных (см. [RFC1812]).

Если объем данных из вызвавшего ошибку пакета достаточно велик, инкапсулятор **может** извлечь информацию из инкапсулированного пакета IPv6 и использовать ее для генерации сообщения ICMPv6 исходному отправителю IPv6, как показано на рисунке.

При получении сообщений ICMPv4, отличных от packet too big, полезно записывать эти события в системный журнал, как ошибки, связанные с туннелем. При достаточно объёме данных узел **может** передавать сообщения ICMPv6 типа



Сообщение ICMPv4, возвращаемое инкапсулятору

unreachable[1] с кодом address unreachable[2] отправителю IPv6 (код address unreachable подходит, поскольку с точки зрения IPv6 туннель является каналом, а этот код служит для связанных с каналами ошибок [RFC2463]).

Отметим, что в случаях превышения MTU для пути IPv4, если данных, связанных с сообщением ICMPv4 об ошибке, недостаточно или сообщение ICMPv4 не вызывает генерации сообщения ICMPv6 при достаточном объёме данных, будет отбрасываться не менее двух пакетов (взамен отбрасывания не менее одного для случая одноуровневого определения MTU). Рассмотрим случай, когда хост IPv6 подключён к маршрутизатору IPv4/IPv6, который соединён с сетью, где генерируется сообщение ICMPv4 об избыточном размере пакета. Сначала маршрутизатору нужно определить значение MTU (IPv4) для туннеля, что вызовет потерю по крайней мере одного пакета, а потом хосту нужно узнать значение MTU (IPv6) от маршрутизатора, что приведёт к потере ещё по крайней мере одного пакета. Тем не менее во всех случаях может теряться более одного пакета, если одновременно приходит множество избыточно больших пакетов.

3.5. Создание заголовка IPv4

При инкапсуляции пакета IPv6 в дейтаграмму IPv4 поля заголовка IPv4 устанавливаются следующим образом:

Version
4

IP Header Length (в 32-битовых словах)
5 (в инкапсулирующем заголовке нет опций IPv4).

Type of Service
0, если явно не задано иное (см. [RFC2983] и параграф 9.1 [RFC3168], где рассматривается использование поля ToS и туннелирование).

Total Length
Размер данных из заголовка IPv6 плюс размер заголовков IPv6 и IPv4 (т. е., размер данных IPv6 + 60 байтов).

Identification
Генерируется, как для прочих пакетов IPv4, передаваемых системой.

Flags
Флаг DF устанавливается в соответствии с параграфом 3.2. При фрагментировании в пакетах, не содержащих последний фрагмент устанавливается флаг MF[3].

Fragment Offset
Устанавливается в соответствии с фрагментированием.

Time to Live
Устанавливается реализацией, как описано в параграфе 3.3.

Protocol
41 (номер протокола для IPv6).

Header Checksum
Контрольная сумма заголовка IPv4 [RFC791].

Source Address
Адрес IPv4 для инкапсулятора (адрес, заданный администратором, или адрес выходного интерфейса).

Destination Address
Адрес IPv4 для конечной точки туннеля.

При инкапсуляции пакетов узел должен гарантировать использование корректного адреса отправителя, чтобы пакеты были приемлемы для декапсулятора, как описано в параграфе 3.6. Настройка адреса отправителя приемлема, в частности, для случаев, когда автоматическое определение адреса отправителя может давать результаты, меняющиеся с течением времени. Это часто возникает при наличии множества адресов и множества интерфейсов или при частом изменении маршрутов. Поэтому в таких случаях **следует** обеспечивать возможность административно задавать адрес отправителя для туннеля.

3.6. Декапсуляция

Когда хост или маршрутизатор IPv6/IPv4 получает дейтаграмму IPv4, направленную по одному из его собственных адресов IPv4 или адресу связанной с ним multicast-группы и поле протокола имеет значение 41, это говорит о том, что

[1]Недоступен.
[2]Адрес недоступен.
[3]More Fragments - есть ещё фрагменты.

пакет может относиться к туннелю и нужно проверить его принадлежность к одному из настроенных туннельных интерфейсов (путём просмотра адресов отправителя и получателя), собрать фрагменты (если использовалась фрагментация IPv4), удалить заголовок IPv4 и передать полученную в результате дейтаграмму IPv6 на уровень IPv6 этого узла.

Декапсулятор **должен** убедиться в корректности адреса источника туннеля до начала обработки пакета, чтобы предотвратить проблемы, связанные с подменой адресов (см. раздел 4). Такая проверка выполняется также для пакетов, доставленных транспортным протоколам на декапсуляторе. Проверка выполняется путём сравнения адреса отправителя IPv4 с адресом инкапсулятора, заданном на декапсуляторе. Пакеты, для которых адреса не соответствуют, **должны** отбрасываться; сообщения ICMP при этом генерировать **не следует**. Однако, если реализация обычно передаёт сообщения ICMP при получении пакетов неизвестных протоколов, она **может** передать сообщение (например, ICMPv4 Protocol 41 Unreachable).

Побочным эффектом такой проверки адресов является отбрасывание узлом (без уведомления) пакетов с некорректным адресом отправителя и пакетов, которые были получены узлом но не адресованы ему напрямую (например, широковещательных пакетов).

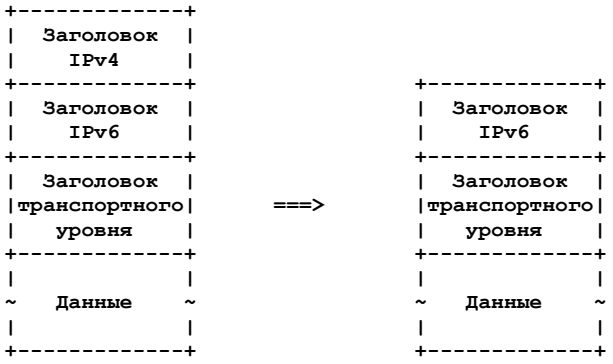
Независимо от других форм входной фильтрации IPv4, которые администратор может задать, реализация **может** выполнять фильтрацию входящих пакетов (т. е., проверять, что пакеты, приходят с интерфейса в направлении маршрута пересылки к конечной точке туннеля, подобно проверке RPF[1] [RFC3704]). Поскольку такая проверка может создавать проблемы в туннелях, маршрутизируемых по нескольким каналам, **рекомендуется** по умолчанию отключать эту проверку. Пакеты, не прошедшие проверку, **следует** отбрасывать; генерировать сообщения ICMP при этом **не следует**.

Декапсулятор **должен** быть способен поддерживать на туннельных интерфейсах значение IPv6 MRU не менее 1500 байтов и не менее самого большого из значений MTU (IPv6) на этом декапсуляторе.

Декапсулятор **должен** быть способен собирать фрагменты IPv4 пакетов размером (после сборки) до 1500 байтов и не менее наибольшего значения MTU (IPv4) для интерфейсов декапсулятора. Значение 1500 байтов обусловлено результатом инкапсуляции с использованием статического MTU (параграф 3.2.1), тогда, как инкапсуляторы с динамическим выбором (параграф 3.2.2) могут создавать пакеты размер которых определяется наибольшим значением MTU на декапсуляторе (отметим, что это значение строго совпадает с MTU интерфейса последнего маршрутизатора IPv4 перед данным декапсулятором, но для большинства каналов значения MTU одинаковы для всех соседей).

Ограничение на размер собираемых пакетов позволяет инкапсулятору динамически определять значение MTU и использовать преимущества больших значений MTU для пути IPv4. Реализация **может** иметь конфигурационный параметр, позволяющий установить больший размер буфера сборки для туннеля, нежели указано выше, но использовать меньшие размеры буферов **недопустимо**.

Декапсуляция показана на рисунке.



Декапсуляция IPv6 из IPv4

Декапсулятор выполняет сборку фрагментов IPv4 перед декапсуляцией пакета IPv6.

При декапсуляции пакета заголовок IPv6 не меняется (см. [RFC2983] и параграф 9.1 [RFC3168] в части поля ToS и туннелирования). Если пакет будет пересылаться дальше, значение hop limit уменьшается на 1.

Инкапсулирующий заголовок IPv4 отбрасывается и корректность полученного пакета проверяется при передаче уровню IPv6. При реконструкции пакета IPv6 размер **должен** определяться по значению поля IPv6 payload length, поскольку в пакете IPv4 могло использоваться заполнение (т. е., после отбрасывания заголовка остаток может превышать размер пакета IPv6).

После декапсуляции узел **должен** без уведомления отбрасывать пакеты с некорректным адресом отправителя IPv6. В список некорректных адресов отправителей **следует** включать по крайней мере:

- все групповые адреса (FF00::/8);
- все loopback-адреса (::1);
- все совместимые с IPv4 адреса IPv6 [RFC3513] (::/96), исключая незаданный адрес для детектирования дубликатов[2] (::/128);
- все отображаемые на IPv4 адреса IPv6 (::ffff:0:0/96).

В дополнение к этому на узле следует настроить входную фильтрацию [RFC2827][RFC3704] по адресам отправителей IPv6, подобным адресам любого из интерфейсов узла. Например,

[1]Strict Reverse Path Forwarding - строгая проверка обратного пути пересылки.
[2]The unspecified address for Duplicate Address Detection.

1) если туннель направлен в Internet, узел следует настроить на проверку того, что его префиксы не используются в адресах отправителей;

2) если туннель направлен в периферийную сеть, на узле следует настроить проверку того, что адреса отправителей относятся к данной периферийной сети.

В первом случае список префиксов обычно требуется задавать вручную, а во втором проверка может выполняться автоматически (например, с использованием строгой проверки RPF), если интерфейс обозначен, как работающий в направлении периферийной сети.

Рекомендуется обеспечивать администратору возможность управления строгой фильтрацией на входе в направлении периферийных сетей с помощью одной конфигурационной опции.

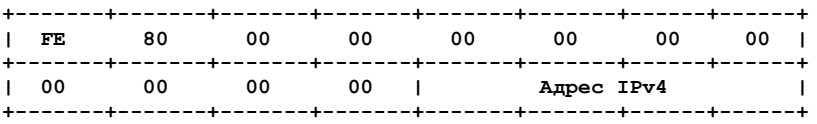
3.7. Адреса Link-Local

Настраиваемые туннели имеют интерфейсы IPv6 (через «канальный уровень» IPv4) и поэтому **должны** иметь адреса link-local. Эти адреса используются, например, протоколами маршрутизации, работающими через туннели.

Идентификатор интерфейса [RFC3513] в таких случаях может быть основан на 32-битовом адресе IPv4 соответствующего интерфейса или сформирован иным способом, обеспечивающим разумную вероятность уникальности идентификаторов на разных концах туннеля.

Отметим, что может оказаться желательным формирование адреса link-local так, чтобы минимизировать вероятность и влияние смены этого адреса при изменении топологии или замене оборудования.

Если для формирования адреса IPv6 link-local используется адрес IPv4, идентификатором интерфейса будет адрес IPv4, дополненный слева нулями (prepend). Отметим, что бит Universal/Local имеет значение 0, показывающее, что идентификатор интерфейса не является уникальным в глобальном масштабе. Адрес link-local формируется путём добавления идентификатора интерфейса в конец адресного префикса FE80::/64.



Когда хост имеет более одного адреса IPv4 на рассматриваемом физическом интерфейсе, выбор одного из этих адресов IPv4 для формирования адреса link-local осуществляется администратором или разработчиком.

3.8. Обнаружение соседей через туннели

Реализации с настраиваемыми туннелями **должны** по крайней мере воспринимать (и отвечать на них) пакеты зондирования, используемые для определения недоступности соседа (NUD[1]) [RFC2461]. Реализациям **следует** также передавать тестовые пакеты NUD для обнаружения отказов в сконфигурированных туннелях, чтобы можно было перейти на использование другого пути к адресату. Отметим, что механизм Neighbor Discovery позволяет отказаться от передачи пакетов NUD на каналах между маршрутизаторами, если протокол маршрутизации отслеживает доступность в обоих направлениях.

Предполагается, что настраиваемые туннели **не** имеют адресов link-layer для обнаружения соседей даже при наличии адреса link-layer (IPv4). Это означает, что:

- отправителям пакетов Neighbor Discovery **не следует** включать опцию Source Link Layer Address или Target Link Layer Address на туннельном канале;
- получатель **должен** в любом случае обрабатывать пакет Neighbor Discovery, отбрасывая без уведомления опции Source Link Layer Address и Target Link Layer Address, полученные в туннельном канале.

Отказ от использования опций адресов link-layer согласуется с практикой использования механизма Neighbor Discovery на других каналах «точка-точка».

4. Угрозы, связанные с подменой адресов отправителей

Приведённая выше спецификация включает правила проверки адресов отправителя для туннелей (в частности входная фильтрация [RFC2827][RFC3704]), выполняемой в общем случае до декапсуляции пакетов. При использовании туннелей IP-in-IP (независимо от версии IP) важно, чтобы это не использовалось для обхода любых входных фильтров, применяемых для пакетов, не относящихся к туннелям. Таким образом, приведённые в этом документе правила построены таким образом, чтобы использование входной фильтрации для IPv4 и IPv6 не давало простого пути обхода фильтров.

В этом случае без специфической входной фильтрации на декапсуляторе атакующий может использовать вставку пакетов со следующими адресами:

- внешний адрес отправителя IPv4 - реальный адрес IPv4 атакующего;
- внешний адрес получателя IPv4 - адрес IPv4 декапсулятора;
- внутренний адрес отправителя IPv6 - Alice (декапсулятор или узел вблизи его);
- внутренний адрес получателя IPv6 - Bob.

Даже при реализации входных фильтров (IPv4) на всех маршрутизаторах IPv4 между атакующим и декапсулятором, а также входных фильтров (IPv6) на всех маршрутизаторах IPv6 между декапсулятором и хостом Bob указанные выше пакеты не будут отфильтрованы. В результате Bob будет получать пакеты, которые похоже на пакеты от хоста Alice, хотя реальный отправитель является совсем другим.

[1]Neighbor Unreachability Detection.

Решением этой проблемы будет восприятие инкапсулятором исключительно тех пакетов, адреса отправителей которых явно указаны в числе других сторон туннелей, как описано в параграфе 3.6. Хотя и это решение не обеспечивает полной защиты в случаях отсутствия входных фильтров, оно, тем не менее, существенно повышает уровень безопасности. Более подробно проблемы угроз рассмотрены в следующем разделе документа.

5. Вопросы безопасности

Базовые вопросы безопасности при использовании протокола IPv6 рассмотрены в работе [V6SEC].

Разработчики туннельных решений должны осознавать, что туннель, хоть и является каналом (как определено в [RFC2460]), модель угроз для туннеля может существенно отличаться от моделей угроз для других типов каналов, поскольку туннель потенциально может включать весь Internet.

Некоторые механизмы (например, Neighbor Discovery) опираются на значение Hop Count = 255 и/или адреса link-local, как некую гарантию происхождения пакета на другой стороне канала в полудоверенной среде. Туннели более уязвимы к нарушению таких допущений, нежели физические каналы, поскольку атакующий из любой точки Internet может отправлять пакеты IPv6-in-IPv4 декапсулятору туннеля, что приведёт к попаданию подставных инкапсулированных пакетов IPv6 на интерфейс настраиваемого туннеля, если проверки при декапсуляции не способны обнаруживать такие подставные пакеты.

По этой причине в данном документе указывается, что декапсуляторы выполняют перечисленные ниже проверки (см. также параграф 3.6) для снижения уровня угроз:

- адрес отправителя IPv4 в пакет **должен** совпадать с заданным в конфигурации адресом другой стороны туннеля;
- независимо от имеющейся входной фильтрации IPv4 администратор может настроить, а реализация **может** выполнять входную фильтрацию IPv4 для проверки получения пакетов IPv4 с ожидаемого интерфейса (по причине возможных проблем такая проверка по умолчанию может быть отключена);
- пакеты IPv6 с некоторыми обычно некорректными адресами отправителя IPv6 **должны** отбрасываться (см. параграф 3.6);
- следует выполнять входную фильтрацию IPv6 (обычно требует настройки со стороны оператора) для проверки получения пакетов IPv6 с ожидаемого интерфейса.

Первая из проверок особо важна. Для обхода этой проверки атакующему потребуется узнать адрес другой стороны туннеля (это весьма сложно) и суметь подставить его в пакеты (достаточно просто).

Если остаточные угрозы после проверки адресов отправителей в туннеле представляются значимыми, следует использовать туннелирование с аутентификацией, например, IPsec [RFC2401] (предпочтительно) или GRE[1] с заранее созданным секретным ключом [RFC2890]. Поскольку настраиваемые туннели организуются в той или иной степени вручную, организация ключей не должна создать существенных проблем. Организация защищённых IPsec туннелей IPv6-in-IPv4 описана в отдельном документе [V64IPSEC].

Если туннелирование осуществляется в рамках одного административного домена, подобающая входная фильтрация на краю домена может избавить от внешних угроз. Следовательно, короткие туннели являются более предпочтительными, чем длинные, которые могут проходить через Internet.

В дополнение к сказанному реализация **должна** трактовать интерфейсы к разным каналам, как раздельные (например, обеспечить, чтобы пакеты Neighbor Discovery, прибывающие по одному каналу, не оказывали влияния на другие каналы). Это особенно важно для туннельных каналов.

При отбрасывании пакетов, не прошедших проверку по адресам отправителя IPv4 для туннеля узлу не следует «подтверждать» существование туннеля, поскольку эта информация может использоваться для проверки доступности адресов конечных точек туннелей. По этой причине в данной спецификации сказано, что такие пакеты **должны** отбрасываться, а сообщения ICMP об ошибках генерировать **не следует**, если реализация обычно не передаёт сообщений ICMP о недоступности получателя для неизвестных протоколов (в этом случае **можно** передавать тот же код). Как должно быть очевидно, возврат другого кода ICMP может показать, что включён стек IPv6 (или обработка туннелей для протокола 41). Поведение реализации должно быть согласованным, иначе она становится прозрачной для зондирования.

6. Благодарности

Авторы благодарят членов рабочих групп IPv6, ngtrans[2] и v6ops за их предложения и рецензирование этого документа. Особо следует отметить (в алфавитном порядке) Jim Bound, Ross Callon, Tim Chown, Alex Conta, Bob Hinden, Bill Manning, John Moy, Mohan Parthasarathy, Chirayu Patel, Pekka Savola и Fred Templin за множество полезных предложений. Pekka Savola помог при редактировании окончательной версии спецификации.

7. Литература

7.1. Нормативные документы

[RFC791] Postel, J., "Internet Protocol", STD 5, RFC 791, September 1981.

[RFC1191] Mogul, J. and S. Deering, "Path MTU discovery", RFC 1191, November 1990.

[RFC1981] McCann, J., Deering, S., and J. Mogul, "Path MTU Discovery for IP version 6", RFC 1981, August 1996.

[RFC2119] Bradner, S., "Key words for use in RFCs to Indicate Requirement Levels", BCP 14, RFC 2119, March 1997.

[RFC2460] Deering, S. and R. Hinden, "Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification", RFC 2460, December 1998.

[1]Generic Routing Encapsulation - базовая инкапсуляция маршрутных данных.
[2]Next Generation Transition - переход к следующему поколению (IP).

[RFC2463] Conta, A. and S. Deering, "Internet Control Message Protocol (ICMPv6) for the Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification", RFC 2463, December 1998.

7.2. Дополнительная литература

[ASSIGNED] IANA, "Assigned numbers online database", http://www.iana.org/numbers.html

[DNSOPV6] Durand, A., Ihren, J., and Savola P., "Operational Considerations and Issues with IPv6 DNS", Work in Progress[1], October 2004.

[KM97] Kent, C., and J. Mogul, "Fragmentation Considered Harmful". In Proc. SIGCOMM '87 Workshop on Frontiers in Computer Communications Technology. August 1987.

[V6SEC] Savola, P., "IPv6 Transition/Co-existence Security Considerations", Work in Progress[2], October 2004.

[V64IPSEC] Graveman, R., et al., "Using IPsec to Secure IPv6-over-IPv4 Tunnels", Work in Progress[3], December 2004.

[RFC1435] Knowles, S., "IESG Advice from Experience with Path MTU Discovery", RFC 1435, March 1993.

[RFC1812] Baker, F., "Requirements for IP Version 4 Routers", RFC 1812, June 1995.

[RFC2401] Kent, S. and R. Atkinson, "Security Architecture for the Internet Protocol", RFC 2401, November 1998.

[RFC2461] Narten, T., Nordmark, E., and W. Simpson, "Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6)", RFC 2461, December 1998.

[RFC2462] Thomson, S. and T. Narten, "IPv6 Stateless Address Autoconfiguration", RFC 2462, December 1998.

[RFC2827] Ferguson, P. and D. Senie, "Network Ingress Filtering: Defeating Denial of Service Attacks which employ IP Source Address Spoofing", BCP 38, RFC 2827, May 2000.

[RFC2890] Dommety, G., "Key and Sequence Number Extensions to GRE", RFC 2890, September 2000.

[RFC2923] Lahey, K., "TCP Problems with Path MTU Discovery", RFC 2923, September 2000.

[RFC2983] Black, D., "Differentiated Services and Tunnels", RFC 2983, October 2000.

[RFC3056] Carpenter, B. and K. Moore, "Connection of IPv6 Domains via IPv4 Clouds", RFC 3056, February 2001.

[RFC3168] Ramakrishnan, K., Floyd, S., and D. Black, "The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP", RFC 3168, September 2001.

[RFC3232] Reynolds, J., "Assigned Numbers: RFC 1700 is Replaced by an On-line Database", RFC 3232, January 2002.

[RFC3484] Draves, R., "Default Address Selection for Internet Protocol version 6 (IPv6)", RFC 3484, February 2003.

[RFC3493] Gilligan, R., Thomson, S., Bound, J., McCann, J., and W. Stevens, "Basic Socket Interface Extensions for IPv6", RFC 3493, February 2003.

[RFC3513] Hinden, R. and S. Deering, "Internet Protocol Version 6 (IPv6) Addressing Architecture", RFC 3513, April 2003.

[RFC3596] Thomson, S., Huitema, C., Ksinant, V., and M. Souissi, "DNS Extensions to Support IP Version 6", RFC 3596, October 2003.

[RFC3704] Baker, F. and P. Savola, "Ingress Filtering for Multihomed Networks", BCP 84, RFC 3704, March 2004.

[RFC4087] Thaler, D., "IP Tunnel MIB", RFC 4087, June 2005.

8. Отличия от RFC 2893

Основной причиной внесения большого числа изменений послужило стремление упростить документ, сохранив в нем только широко используемые механизмы.

RFC 2893 описывает механизм автоматического туннелирования. Однако в RFC 3056 [RFC3056] описан механизм более общего назначения, который даёт каждому узлу с (глобальным) адресом IPv4 префикс /48 IPv6, которого достаточно для всего сайта.

Ниже перечислены отличия от RFC 2893:

- удалены ссылки на записи A6 и сохранены ссылки на AAAA;
- удалено автоматическое туннелирование и совместимые с IPv4 адреса;
- удалён используемый по умолчанию настраиваемый туннель с адресом IPv4 Anycast Address;
- удалён раздел Source Address Selection[4], поскольку он был включён в другой документ ([RFC3484]);
- удалено упоминание 6over4;
- список литературы разделен на две части (нормативные документы и дополнительная литература);
- удалены слова «or equal» в выражении «if (IPv4 path MTU - 20) is less than or equal to 1280»[5];

[1]Работа опубликована в RFC 4472. *Прим. перев.*
[2]Работа опубликована в RFC 4942. *Прим. перев.*
[3]Работа опубликована в RFC 4891. *Прим. перев.*
[4]Выбор адреса отправителя.
[5]< вместо ≤. *Прим. перев.*

- Удалён текст: «However, IPv6 may be used in some environments where interoperability with IPv4 is not required. IPv6 nodes that are designed to be used in such environments need not use or even implement these mechanisms.»[6]
- Раздельно описаны классы со статическим (Static MTU) и динамическим (Dynamic MTU) определением MTU; указано, что динамический механизм является **необязательным**, но при его реализации следует выполнять правила параграфа 3.2.2;
- Указано, что по умолчанию статическое значение MTU лежит в диапазоне от 1280 до 1480 байтов и может быть настраиваемым; рассмотрено использование больших значений для Static MTU;
- заданы минимальные правила сборки фрагментом IPv4 и IPv6 MRU для повышения уровня взаимодействия и минимизации «чёрных дыр»;
- явно указаны ссылки на [RFC2983] и [RFC3168] в описании поля ToS;
- исправлена ссылка на реестр Assigned Numbers (online-версия) с указанием RFC Assigned Numbers is obsolete;
- исправлен текст о входной фильтрации; в частности, указано, что фильтрация применима к пакетам, доставленным транспортным протоколам на декапсуляторе, а также к пересылаемым декапсулятором пакетам, а также указано, как проверка на декапсуляторах помогает при наличии входной фильтрации IPv4 и IPv6;
- удалено одностороннее туннелирование; предполагается, что все туннели являются двухсторонними и организуются между адресами конечных точек (а не узлами);
- удалены рекомендации по анонсированию адресов в DNS, поскольку они не относятся к данной спецификации, и даны ссылки на соответствующие документы;
- удалено требование **следует** (SHOULD) для формирования адресов link-local на базе адресов IPv4;
- добавлено требование **следует** для реализации опции установки адреса отправителя в туннеле, а также обсуждена польза этой опции;
- добавлено более строгое описание проверки адреса отправителя - оба адреса (IPv4 и IPv6) **должны** проверяться, а фильтрация типа RPF является опциональной;
- переписан раздел «Вопросы безопасности» с уточнением угроз при туннелировании;
- добавлено примечание об использовании TTL=255 при инкапсуляции;
- в параграфе 3.2 расширено обсуждение использования «бесконечного» значения IPv6 MTU, явно ведущего к проблемам взаимодействия;
- добавлено явное требование при использовании обоих методов определения MTU выбирать один метод для каждого канала независимо;
- отмечено, что обработка сообщений ICMPv4 об ошибках применима только при динамическом определении MTU;
- разъяснено описание фильтрации записей DNS; API **следует** использовать и при его отсутствии фильтрация **недопустима**; упорядочение выходит за пределы спецификации и описано в RFC3484;
- отмечено, что адрес получателя IPv4 может быть групповым;
- **рекомендовано** обеспечивать опцию включения строгой фильтрации на входе для каждого интерфейса;
- обобщён текст о данных в сообщениях ICMPv4;
- внесено множество редакционных правок.

Адреса авторов

Erik Nordmark
Sun Microsystems
17 Network Circle
Menlo Park, CA 94025
USA
Phone: +1 650 786 2921
EMail: erik.nordmark@sun.com

Robert E. Gilligan
Intransa, Inc.
2870 Zanker Rd., Suite 100
San Jose, CA 95134 USA
Phone : +1 408 678 8600
Fax : +1 408 678 8800
EMail: bob.gilligan@acm.org

Перевод на русский язык

Николай Малых
nmalykh@protokols.ru

[6]Однако IPv6 может использоваться в некоторых средах, где взаимодействие с IPv4 не требуется. Узлам IPv6, предназначенным для таких сред, не требуется использовать и даже поддерживать этот механизм.

Полное заявление авторских прав

Интеллектуальная собственность

IETF не принимает какой-либо позиции в отношении действительности или объема каких-либо прав интеллектуальной собственности (Intellectual Property Rights или IPR) или иных прав, которые, как может быть заявлено, относятся к реализации или использованию описанной в этом документе технологии, или степени, в которой любая лицензия, по которой права могут или не могут быть доступны, не заявляется также применение каких-либо усилий для определения таких прав. Сведения о процедурах IETF в отношении прав в документах RFC можно найти в BCP 78 и BCP 79.

Копии раскрытия IPR, предоставленные секретариату IETF, и любые гарантии доступности лицензий, а также результаты попыток получить общую лицензию или право на использование таких прав собственности разработчиками или пользователями этой спецификации, можно получить из сетевого репозитория IETF IPR по ссылке http://www.ietf.org/ipr.

IETF предлагает любой заинтересованной стороне обратить внимание на авторские права, патенты или использование патентов, а также иные права собственности, которые могут потребоваться для реализации этого стандарта. Информацию следует направлять в IETF по адресу ietf-ipr@ietf.org.

Подтверждение

Финансирование функций RFC Editor обеспечено Internet Society.