

Internet Engineering Task Force (IETF)  
Request for Comments: 9035  
Updates: 8138  
Category: Standards Track  
ISSN: 2070-1721

P. Thubert, Ed.  
L. Zhao  
Cisco Systems  
April 2021

## A Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL)

### Destination-Oriented Directed Acyclic Graph (DODAG) Configuration Option for the 6LoWPAN Routing Header

Протокол RPL - опция DODAG Configuration для заголовка 6LoWPAN Routing

#### Аннотация

Этот документ обновляет RFC 8138, задавая бит в опции RPL<sup>1</sup> DODAG<sup>2</sup> Configuration для индикации применения сжатия в RPL Instance и задания поведения узлов, соответствующих RFC 8138, при установленном и сброшенном флаге.

#### Статус документа

Документ относится к категории Internet Standards Track.

Документ является результатом работы IETF<sup>3</sup> и представляет согласованный взгляд сообщества IETF. Документ прошёл открытое обсуждение и был одобрен для публикации IESG<sup>4</sup>. Дополнительную информацию о стандартах Internet можно найти в разделе 2 в RFC 7841.

Информацию о текущем статусе документа, ошибках и способах обратной связи можно найти по ссылке <https://www.rfc-editor.org/info/rfc9035>.

#### Авторские права

Авторские права (Copyright (c) 2021) принадлежат IETF Trust и лицам, указанным в качестве авторов документа. Все права защищены.

К документу применимы права и ограничения, указанные в BCP 78 и IETF Trust Legal Provisions и относящиеся к документам IETF (<http://trustee.ietf.org/license-info>), на момент публикации данного документа. Прочтите упомянутые документы внимательно. Фрагменты программного кода, включённые в этот документ, распространяются в соответствии с упрощённой лицензией BSD, как указано в параграфе 4.e документа IETF Trust Legal Provisions, без каких-либо гарантий (как указано в Simplified BSD License).

## Оглавление

1. Введение.....	1
2. Терминология.....	2
2.1. Связанные документы.....	2
2.2. Глоссарий.....	2
2.3. Уровни требований.....	2
3. Расширение RFC 6550.....	2
4. Обновление RFC 8138.....	3
5. Варианты перехода.....	3
5.1. Существование.....	3
5.2. Несогласованность состояний при переходе.....	3
5.3. Возврат.....	4
6. Взаимодействие с IANA.....	4
7. Вопросы безопасности.....	4
8. Литература.....	4
8.1. Нормативные документы.....	4
8.2. Дополнительная литература.....	4
Благодарности.....	5
Адреса авторов.....	5

## 1. Введение

При создании сетей LLN<sup>5</sup> обычно сосредотачиваются на экономии энергии, являющейся одним из наиболее дефицитных ресурсов. Оптимизация маршрутов в «RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks» [RFC6550], такая как маршрутизация по DODAG к корневому узлу и связанное с этим сжатие маршрутных заголовков, предложенное в [RFC8138], связаны с этой проблемой.

<sup>1</sup>Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks - протокол маршрутизации для сетей LLN.

<sup>2</sup>Destination-Oriented Directed Acyclic Graph - ориентированный на получателя направленный ациклический граф.

<sup>3</sup>Internet Engineering Task Force - комиссия по решению инженерных задач Internet.

<sup>4</sup>Internet Engineering Steering Group - комиссия по инженерным разработкам Internet.

<sup>5</sup>Low-Power and Lossy Network - сеть со слабым питанием и потерями.

Включение [RFC8138] в работающей сети требует перехода (flag day), при котором сеть обновляется и перезагружается. В противном случае, являющиеся листьями узлы, не поддерживающие сжатие [RFC8138], не смогут взаимодействовать с сетью, а узлы, служащие маршрутизаторами, будут отбрасывать пакеты, делая часть сети «чёрной дырой». Эта спецификация обеспечивает возможность «горячего» обновления работающей сети, при котором сжатие активируется лишь после обновления всех узлов.

Этот документ дополняет [RFC8138] и указывает, следует ли использовать его в RPL DODAG с новым флагом опции RPL DODAG Configuration. Установка нового флага контролируется корнем и флаг распространяется по сети как обычные сигналы RPL. Флаг сбрасывается для отключения сжатия в процессе перехода, по завершении которого (например, по информации от системы управления сетью) флаг устанавливается для всего графа DODAG.

## 2. Терминология

### 2.1. Связанные документы

Используемая в документе терминология включает определения из «Terms Used in Routing for Low-Power and Lossy Networks» [RFC7102]. Термины, связанные с LLN, определены в «Terminology for Constrained-Node Networks» [RFC7228].

Термины RPL, RPL Packet Information (RPI), RPL Instance (индексируется RPLInstanceID) определены в «RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks» [RFC6550]. RPI - это абстрактная информация, определяемая RPL для включения в пакеты данных, например, в опцию RPL [RFC6553] заголовка IPv6 Hop-By-Hop. Термин RPI часто применяется в расширенном смысле для обозначения RPL Option. Сообщения DODAG Information Solicitation (DIS), Destination Advertisement Object (DAO), DODAG Information Object (DIO) также определены в [RFC6550].

Термины RPL-Unaware Leaf (RUL) и RPL-Aware Leaf (RAL) применяются в соответствии с «Using RPL Option Type, Routing Header for Source Routes, and IPv6-in-IPv6 Encapsulation in the RPL Data Plane» [RFC9008]. RPL-Aware Node (RAN) указывает узел, являющийся RAL или маршрутизатором RPL и поддерживает доступность своих адресов и префиксов путём их вставки в RPL. RUL использует «Registration Extensions for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) Neighbor Discovery» [RFC8505] для получения услуг доступности от родительского маршрутизатора, как указано в «Routing for RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) Leaves» [RFC9010].

### 2.2. Глоссарий

#### 6LoRH

6LoWPAN Routing Header - заголовок маршрутизации 6LoWPAN.

#### 6LoWPAN

IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network - IPv6 в персональной беспроводной сети со слабым питанием.

#### DIO

DODAG Information Object - информационный объект DODAG (сообщение RPL).

#### DODAG

Destination-Oriented Directed Acyclic Graph - ориентированный на адресата ациклический направленный граф.

#### LLN

Low-Power and Lossy Network - сеть со слабым питанием и потерями.

#### MOP

RPL Mode of Operation - режим работы RPL.

#### RAL

RPL-Aware Leaf - понимающий протокол RPL лист.

#### RAN

RPL-Aware Node - понимающий протокол RPL узел (маршрутизатор RPL или понимающий RPL лист).

#### RPI

RPL Packet Information - информация пакета RPL.

#### RPL

Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks - протокол маршрутизации для сетей LLN.

#### RUL

RPL-Unaware Leaf - не понимающий протокол RPL лист.

#### SRH

Source Routing Header - заголовок заданной источником маршрутизации.

#### Sub-DODAG

Субграфом DODAG для узла является DODAG с корнем в узле, являющийся частью графа DODAG, к которому относится узел. Граф формируется другими узлами основного DODAG, чьи пути к корню основного DODAG идут через этот узел.

### 2.3. Уровни требований

Ключевые слова **необходимо** (MUST), **недопустимо** (MUST NOT), **требуется** (REQUIRED), **нужно** (SHALL), **не следует** (SHALL NOT), **следует** (SHOULD), **не нужно** (SHOULD NOT), **рекомендуется** (RECOMMENDED), **не рекомендуется** (NOT RECOMMENDED), **возможно** (MAY), **необязательно** (OPTIONAL) в данном документе интерпретируются в соответствии с BCP 14 [RFC2119] [RFC8174] тогда и только тогда, когда они выделены шрифтом, как показано здесь.

## 3. Расширение RFC 6550

Опция DODAG Configuration определена в параграфе 6.7.6 [RFC6550]. Назначение опции расширено для распространения конфигурационных данных, влияющих на создание и поддержку DODAG, а также распространение рабочих параметров RPL через DODAG. Исходная опция DODAG Configuration включала 4 резервных бита для будущих флагов.

В этой спецификации определён новый флаг сжатия RFC 8138 (T), устанавливаемый для включения поддержки [RFC8138] в графе DODAG. Флаг T занимает позицию 2 резервного поля флагов в опции DODAG Configuration (отсчёт с

```

0          1          2          3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
|  Type = 0x04 | Opt Length = 14 | |T| |A|           ...           |
+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+-----+
                                <- flags ->

```

Рисунок 1. Частичное представление опции DODAG Configuration.

0 для старшего бита) и сбрасывается (0) в унаследованных реализациях, как указано в параграфах 20.14 и 6.7.6 [RFC6550].

Параграф 4.1.2 в [RFC9008] обновляет [RFC6550] указанием применимости определения флагов лишь к режимам работы (Mode of Operation или MOP) от 0 до 6. Для MOP = 7 **должно** применяться сжатие заголовков 6LoWPAN [RFC8138], которое в других случаях **недопустимо** использовать.

Опция RPL DODAG Configuration обычно помещается в сообщения DIO, распространяемые вниз по DODAG для формирования и последующей поддержки графа. Опция DODAG Configuration копируется без изменений от родителей к потомкам. В [RFC6550] сказано: «Узлам, не являющимся корнем DODAG, **недопустимо** менять эту информацию при распространении опции DODAG Configuration.» Поэтому унаследованные родители распространяют установленный корнем флаг T и он попадает на все узлы DODAG.

## 4. Обновление RFC 8138

Узлу **следует** генерировать пакеты в сжатом формате [RFC8138] тогда и только тогда, когда установлен флаг T. Это поведение можно переопределить в конфигурации и системе управления сетью. Переопределение может потребоваться, например, для включения сжатия в сети, где все узлы поддерживают [RFC8138], но корень не поддерживает эту спецификацию и не может установить флаг T или сбросить его локально при наличии проблем.

Решение об использовании [RFC8138] принимается отправителем пакета в зависимости от его возможностей и сведений о состоянии флага T. Инкапсулирующий пакет маршрутизатор является источником результирующего пакета и отвечает за сжатие внешних заголовков в соответствии с [RFC8138], но сжимать инкапсулированный пакет **недопустимо**.

Предполагается, что внешняя цель [RFC9008] не поддерживает [RFC8138]. В большинстве случаев пакеты для внешней цели и от неё туннелируются между граничным маршрутизатором (6LoWPAN Router или 6LR), обслуживающим эту цель, и корнем, независимо от режима MOP в RPL DODAG. Внутренний пакет обычно не сжимается с помощью [RFC8138], поэтому для исходящих пакетов граничному маршрутизатору нужно просто деинкапсулировать (сжатый) внешний заголовок и переслать (декомпрессированный) внутренний пакет в направлении внешней цели.

Граничный маршрутизатор, пересылающий пакет внешней цели, **должен** сначала выполнить его декомпрессию. Во всех других случаях маршрутизатор **должен** переслать пакет в использованной источником форме (со сжатием или без него).

RUL [RFC9010] является одновременно листом и внешней целью. Узел RUL не участвует в RPL и зависит от внешнего маршрутизатора, обеспечивающего подключение. В случае RUL пересылка в направлении внешней цели реально означает доставку пакета.

## 5. Варианты перехода

Узел, поддерживающий [RFC8138], но не поддерживающий эту спецификацию, может использоваться лишь в однородной сети. Включение сжатия [RFC8138] без использования указывающей это сигнализации, требует перехода (flag day), в течение которого все узлы должны быть обновлены, а после этого сеть должна быть перезагружена с включением сжатия 6LoRH [RFC8138].

Целью этой спецификации является переход без использования flag day. В частности, цель заключается в отказе от флага T. Хотя возможен возврат к прежнему состоянию (см. параграф 5.3), операцию возврата **следует** завершить до того, как в сети появятся узлы, не поддерживающие [RFC8138].

### 5.1. Существование

Поддерживающий эту спецификацию узел может работать в сети с включённым или отключённым сжатием 6LoRH [RFC8138] и соответствующим флагом T в сети, находящейся в процессе перехода (см. параграф 5.2).

Узел, не поддерживающий [RFC8138], может взаимодействовать с узлами сети, где сжатие 6LoRH [RFC8138] отключено. Если сжатие включено, для всех RAN предполагается способность обработки сжатых пакетов. Узел, не способный сделать это, может оставаться подключённым к сети в качестве RUL, как описано в [RFC9010].

### 5.2. Несогласованность состояний при переходе

Когда корень устанавливает флаг T, информация постепенно распространяется через DODAG по мере отправки сообщений DIO. Некоторые узлы увидят флаг и начнут передавать пакеты в сжатом формате, а другие узлы в том же RPL DODAG ещё не будут знать о них. В режиме Non-Storing корень начнёт применять [RFC8138] с заголовком SRH 6LoRH (SRH-6LoRH), который направит все пути к родительскому маршрутизатору или листу.

Для гарантированной пересылки пакета через RPL DODAG в исходной форме все узлы RPL должны поддерживать [RFC8138] на момент переключения. Ответственность за установку флага T ложится на администратора сети. Предполагается, что имеющиеся средства управления сетью и обновления позволяют администратору сети узнать, что все узлы, которые могут присоединиться к DODAG, были обновлены. Для экземпляра RPL с несколькими корнями все узлы, участвующие в RPL Instance. Могут присоединиться к любому графу DODAG. Сеть **должна** работать со сброшенным флагом T, пока все узлы RPL не будут обновлены для поддержки этой спецификации.

### 5.3. Возврат

При отключении сжатия 6LoRH [RFC8138] в сети администратор **должен** дождаться, пока все узлы сбросят флаг T перед тем, как разрешить отказ от сжатия в сети. Информацию о режиме сжатия **следует** раскрывать в интерфейсе управления узлом.

Узлы, не поддерживающие [RFC8138], **не следует** развёртывать в сети со включённым сжатием заголовков. Если такой узел подключён к сети, он может работать лишь в качестве RUL.

## 6. Взаимодействие с IANA

Эта спецификация обновляет реестр «DODAG Configuration Option Flags for MOP 0..6» [RFC9008] (ранее «DODAG Configuration Option Flags» [RFC6550]), путём выделения нового флага (таблица 1).

Таблица 1. Новый флаг опции DODAG Configuration.

Номер бита	Описание	Документ
2	Включение сжатия RFC 8138 (T)	RFC 9035

Агентство IANA добавило этот документ в качестве ссылки для строки MOP 7 в реестре RPL «Mode of Operation».

## 7. Вопросы безопасности

Следует отметить, что в RPL [RFC6550] каждый узел LLN, понимающий RPL и имеющий доступ в домен RPL, может организовать любую атаку, основанную на RPL (см. [RFC7416]). Этот документ обычно применяется к развёрнутым системам и не меняет для них требований к защите и операциям. Предполагается применение механизмов защиты, определённых для RPL.

Установка флага T до обновления всех маршрутизаторов может приводить к потере пакетов. Для нового флага применяется та же защита, что и для остальной информации в содержащей флаг опции DODAG Configuration. Доступ к новому флагу является лишь одной из многих атак, возможных в случае отправки злоумышленником в сеть повреждённых опций конфигурации.

Установка или сброс флага T может нарушать согласованность сети, но до завершения обновления всех узлов для поддержки [RFC8138] они могут пересылать обе формы. Источник отвечает за управление сжатием пакета, а все маршрутизаторы должны использовать выбранный источником формат. Поэтому результатом несогласованности может быть лишь присутствие в сети обеих форм пакетов, что ведёт к дополнительному расходу пропускной способности для пакетов без сжатия.

Атакующий может сбросить флаг T, чтобы вынудить дочерние или нижележащие узлы субграфа DODAG потреблять больше энергии. И наоборот, он может установить флаг T, чтобы узлы нисходящего направления сжимали пакеты даже при нежелательности компрессии, что может приводить к потере пакетов. В дереве атакующий может отбрасывать пакеты, идущие к объекту атаки или от него. Таким образом, упомянутые выше атаки будут более сложными и более заметными, чем простое отбрасывание выбранных пакетов. Узел нисходящего направления может иметь других родителей и видеть бит в обоих состояниях - такую ситуацию можно обнаружить и выдать сигнал.

## 8. Литература

### 8.1. Нормативные документы

- [RFC2119] Bradner, S., "Key words for use in RFCs to Indicate Requirement Levels", BCP 14, [RFC 2119](https://www.rfc-editor.org/info/rfc2119), DOI 10.17487/RFC2119, March 1997, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc2119>>.
- [RFC6550] Winter, T., Ed., Thubert, P., Ed., Brandt, A., Hui, J., Kelsey, R., Levis, P., Pister, K., Struik, R., Vasseur, JP., and R. Alexander, "RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks", [RFC 6550](https://www.rfc-editor.org/info/rfc6550), DOI 10.17487/RFC6550, March 2012, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc6550>>.
- [RFC7102] Vasseur, JP., "Terms Used in Routing for Low-Power and Lossy Networks", RFC 7102, DOI 10.17487/RFC7102, January 2014, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc7102>>.
- [RFC8138] Thubert, P., Ed., Bormann, C., Toutain, L., and R. Cragie, "IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) Routing Header", RFC 8138, DOI 10.17487/RFC8138, April 2017, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc8138>>.
- [RFC8174] Leiba, B., "Ambiguity of Uppercase vs Lowercase in RFC 2119 Key Words", BCP 14, [RFC 8174](https://www.rfc-editor.org/info/rfc8174), DOI 10.17487/RFC8174, May 2017, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc8174>>.
- [RFC8505] Thubert, P., Ed., Nordmark, E., Chakrabarti, S., and C. Perkins, "Registration Extensions for IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Network (6LoWPAN) Neighbor Discovery", [RFC 8505](https://www.rfc-editor.org/info/rfc8505), DOI 10.17487/RFC8505, November 2018, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc8505>>.
- [RFC9010] Thubert, P., Ed. and M. Richardson, "Routing for RPL (Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks) Leaves", [RFC 9010](https://www.rfc-editor.org/info/rfc9010), DOI 10.17487/RFC9010, April 2021, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc9010>>.

### 8.2. Дополнительная литература

- [RFC6282] Hui, J., Ed. and P. Thubert, "Compression Format for IPv6 Datagrams over IEEE 802.15.4-Based Networks", RFC 6282, DOI 10.17487/RFC6282, September 2011, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc6282>>.
- [RFC6553] Hui, J. and JP. Vasseur, "The Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPL) Option for Carrying RPL Information in Data-Plane Datagrams", [RFC 6553](https://www.rfc-editor.org/info/rfc6553), DOI 10.17487/RFC6553, March 2012, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc6553>>.
- [RFC7228] Bormann, C., Ersue, M., and A. Keranen, "Terminology for Constrained-Node Networks", [RFC 7228](https://www.rfc-editor.org/info/rfc7228), DOI 10.17487/RFC7228, May 2014, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc7228>>.

[RFC7416] Tsao, T., Alexander, R., Dohler, M., Daza, V., Lozano, A., and M. Richardson, Ed., "A Security Threat Analysis for the Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks (RPLs)", RFC 7416, DOI 10.17487/RFC7416, January 2015, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc7416>>.

[RFC9008] Robles, M.I., Richardson, M., and P. Thubert, "Using RPI Option Type, Routing Header for Source Routes, and IPv6-in-IPv6 Encapsulation in the RPL Data Plane", [RFC 9008](#), DOI 10.17487/RFC9008, April 2021, <<https://www.rfc-editor.org/info/rfc9008>>.

## **Благодарности**

Авторы признательны Murray Kucherawy, Meral Shirazipour, Barry Leiba, Tirumaleswar Reddy, Nagendra Kumar Nainar, Stewart Bryant, Carles Gomez, Éric Vyncke, Roman Danyliw и особенно Benjamin Kaduk, Alvaro Retana, Dominique Barthel, Rahul Jadhav за глубокий обзор и конструктивные предложения.

Большое спасибо Michael Richardson, который всегда был готов прийти на помощь.

## **Адреса авторов**

**Pascal Thubert** (редактор)

Cisco Systems, Inc.

Building D

45 Allee des Ormes - BP1200

06254 MOUGINS - Sophia Antipolis

France

Phone: +33 497 23 26 34

Email: [pthubert@cisco.com](mailto:pthubert@cisco.com)

**Li Zhao**

Cisco Systems, Inc.

Xinsi Building

No. 926 Yi Shan Rd

Shanghai

200233

China

Email: [liz3@cisco.com](mailto:liz3@cisco.com)

## **Перевод на русский язык**

Николай Малых

[nmalykh@protokols.ru](mailto:nmalykh@protokols.ru)