

УДК 004.942, 519.876.5

Протокол сетевого кодирования IPv6NC на основе расширенных заголовков IPv6

Владимиров С. С.

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

Предмет исследования. В статье представлен новый протокол сетевого кодирования IPv6NC, основанный на применении расширенных заголовков сетевого протокола IPv6. **Цель работы:** разработка нового протокола сетевого кодирования IPv6NC для возможности реализации механизмов многоадресной передачи и ретрансляции с сетевым кодированием в различных системах передачи данных. **Используемые методы:** анализ существующих принципов и моделей сетевого кодирования, а также применение расширенных заголовков протокола IPv6 для передачи параметров сетевого кодирования. **Основные результаты.** Описаны подходы к применению сетевого кодирования, для которых применим представленный протокол. Рассмотрены параметры сетевого кодирования, которые необходимо передавать в заголовках пакетов для выполнения сетевого кодирования. Представлен порядок кодирования параметров сетевого кодирования в формате тип–длина–значение для стандартных расширенных заголовков IPv6. Приведена структура специального расширенного заголовка для передачи параметров сетевого кодирования. **Научная новизна** заключается в том, что впервые для протокола IPv6 используются расширенные заголовки с сетевым кодированием. **Практическая значимость.** Разработанный протокол предназначен для реализации многоадресной передачи и ретрансляции с сетевым кодированием в различных системах передачи данных.

Ключевые слова: сетевое кодирование, IPv6, расширенные заголовки, IPv6NC

Введение

Развивающаяся с начала 2000-х годов технология сетевого кодирования находит применение в специализированных протоколах, предназначенных для современных и перспективных сетей пятого и шестого поколений. Сетевое кодирование позволяет уменьшать задержку доставки данных при многоадресной передаче данных и ретрансляции пакетов, а также повышать безопасность передачи данных при многопоточковой передаче. Как правило, протоколы, реализующие принципы сетевого кодирования, разрабатываются для применения на транспортном и сеансовом уровнях модели OSI, а также на уровне приложений. Существуют и протоколы сетевого уровня, основанные на принципах сетевого кодирования, но они имеют ограниченное применение, так как требуют поддержки на всем маршрутизирующем оборудовании по пути следования пакетов [1–6].

Библиографическая ссылка на статью:

Владимиров С. С. Протокол сетевого кодирования IPv6NC на основе расширенных заголовков IPv6 // Информационные технологии и телекоммуникации. 2024. Т. 12. № 1. С. 57–69. DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-1-57-69. EDN: FJDHCO

Reference for citation:

Vladimirov S. IPv6NC Network Coding Protocol Based on IPv6 Extension Headers. *Telecom IT*. 2024. Vol. 12. Iss. 1. PP. 57–69 (in Russian). DOI: 10.31854/2307-1303-2024-12-1-57-69. EDN: FJDHCO

В современных и перспективных сетях передачи данных в связи с увеличением количества одновременно работающих устройств, требующих наличия двустороннего доступа к глобальной сети Интернет, возрастает роль сетевого протокола IPv6. В первую очередь это связано с развитием технологий Интернета Вещей и концепции массовой межмашинной связи, являющейся одной из основных услуг, заявленных для сетей связи пятого и шестого поколений [7–10].

Принципы организации работы протоколов позволяют использовать протоколы транспортного и более высоких уровней независимо от применяемого сетевого протокола. Однако, в отличие от IPv4, протокол IPv6 имеет встроенный функционал, который позволяет реализовать механизмы сетевого кодирования, не требуя применения специального протокола верхнего уровня.

Функционал протокола IPv6 для реализации сетевого кодирования

В протоколе IPv6 присутствует функционал расширенных заголовков, позволяющий внедрять в IPv6 механизмы, отсутствующие в базовом варианте протокола [11–12].

Согласно принципам сетевого кодирования, обработка пакетов данных выполняется на конечных узлах, а также на некоторых промежуточных маршрутизирующих узлах, непосредственно выполняющих процедуру сетевого кодирования. Среди расширенных заголовков IPv6, соответствующих этим условиям, можно отметить заголовок Hop-by-Hop Options, который должен обрабатываться на каждом промежуточном узле, а также заголовок Destination Options, который обрабатывается только получателем. Для кодирования параметров, передаваемых в этих заголовках, используется формат тип–длина–значение, что позволяет формировать новые параметры, решающие требуемые задачи [11–12]. Также для реализации сетевого кодирования может быть реализован специальный расширенный заголовок, который не будет ограничен форматом существующих заголовков.

Следует отметить, что для применения сетевого кодирования полезно использование расширенного заголовка Routing, позволяющего отправителю указать маршрут прохождения пакетов. Это дает отправителю возможность формировать маршруты, обеспечивающие получение наибольшего выигрыша от применения сетевого кодирования в случае, например, многоадресной передачи [11–12]. Протокол сетевого кодирования, основанный на применении расширенных заголовков IPv6, назовем IPv6NC (*от англ. Network Coding – сетевое кодирование*).

Параметры для выполнения сетевого кодирования

Для определения передаваемых параметров, необходимых для сетевого кодирования, проанализируем существующие подходы и соответствующие им протоколы сетевого кодирования.

Традиционно рассматривается три подхода к применению сетевого кодирования:

- многоадресная передача;
- ретрансляция пакетов;
- многопоточная передача.

Первые два подхода могут быть реализованы на сетевом уровне, поскольку не требуют установления соединения между узлами. Третий подход предполагает многопоточную передачу между парой сетевых узлов с согласованием параметров передачи, что требует установления соединения и является задачей, решаемой на транспортном уровне. Таким образом, будем рассматривать реализацию средствами IPv6 только для первых двух подходов.

Многоадресная передача с сетевым кодированием, выполняемая в сети с топологией «бабочка» и аналогичных топологиях, представлена на рисунке 1. Узлы S_1 и S_2 одновременно передают пакеты P_1 и P_2 узлам R_1 и R_2 , используя многоадресную передачу. Из-за того, что при передаче пакетов присутствует общий маршрут G_C-G_D , пакеты на нем передаются последовательно (рисунок 1а), в результате чего узел R_1 получает пакет P_2 с задержкой на один шаг [3, 5].

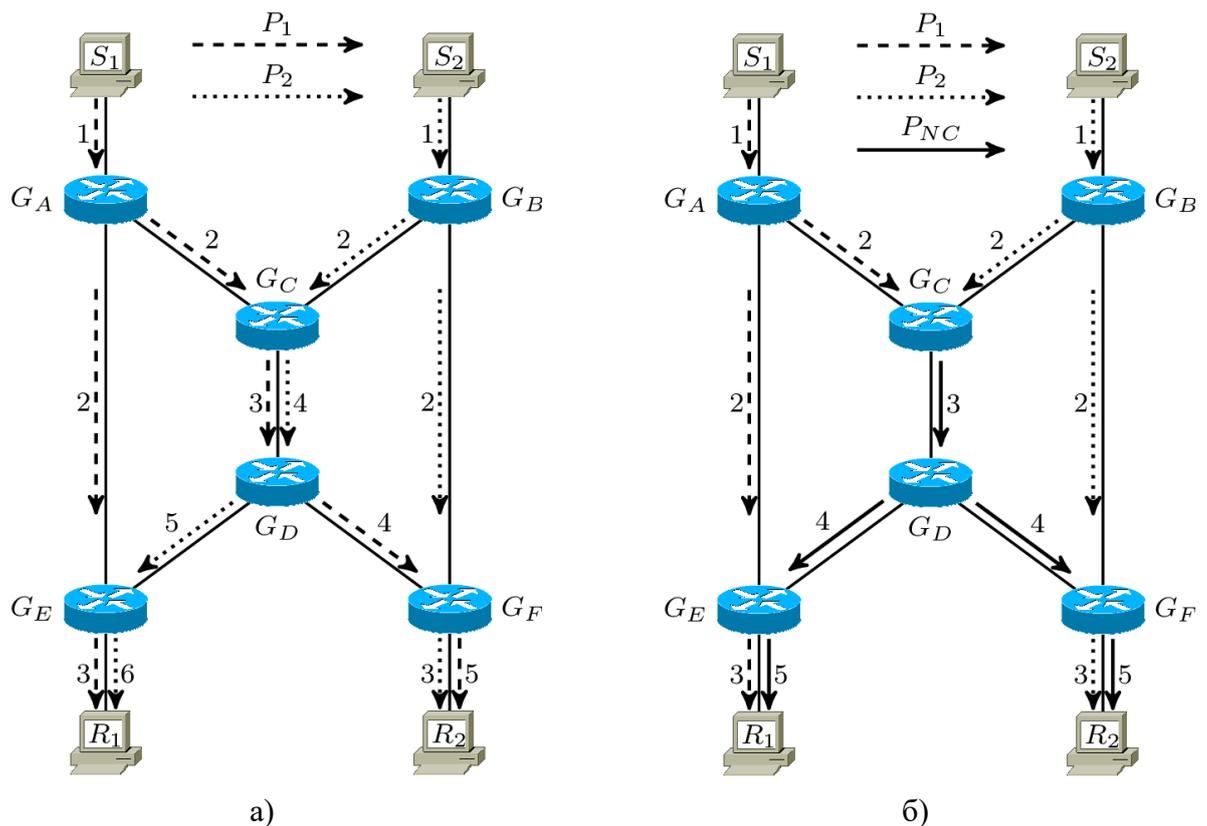


Рис. 1. Многоадресная передача в сети с топологией «бабочка»:
а) без сетевого кодирования; б) с применением сетевого кодирования

Применение сетевого кодирования на узле G_C позволяет вместо последовательной передачи двух пакетов P_1 и P_2 передать их линейную комбинацию – пакет $P_{NC} = P_1 \oplus P_2$ (рисунок 1б). В итоге каждый из узлов R_1 и

R_2 получает его одновременно и может восстановить предназначенные ему исходные пакеты [3, 5].

Этот подход реализован в протоколе сеансового уровня Network Coding Datagram Protocol (NCDP) [5, 13–15].

В пакетах протокола NCDP передаются следующие поля:

- тип пакета;
- идентификатор сеанса;
- флаг, определяющий тип сетевого протокола (IPv4 или IPv6) и, соответственно, длину сетевого адреса;
- флаг, определяющий факт проведения сетевого кодирования;
- флаг, отмечающий начало и конец сеанса;
- номера пакетов, участвующих в формировании закодированного пакета;
- длины полей данных исходных пакетов;
- IP-адреса источников исходных пакетов.

Учитывая, что рассматривается подход, основанный на применении протокола IPv6, использование отдельного флага, определяющего тип сетевого протокола, не требуется. Также следует отметить, что адрес одного из источников может передаваться в теле базового заголовка IPv6. Поле идентификатора сеанса и флаг начала / конца сеанса относятся к управлению соединением и не требуются на сетевом уровне. Поскольку в рамках сетевого протокола не требуется реализовывать механизмы управления соединением, то указывать тип пакета также нет необходимости.

Ретрансляция с сетевым кодированием, показанная на рисунке 2, реализована в протоколе Network Coding Relay Protocol (NCRP) [6, 16].

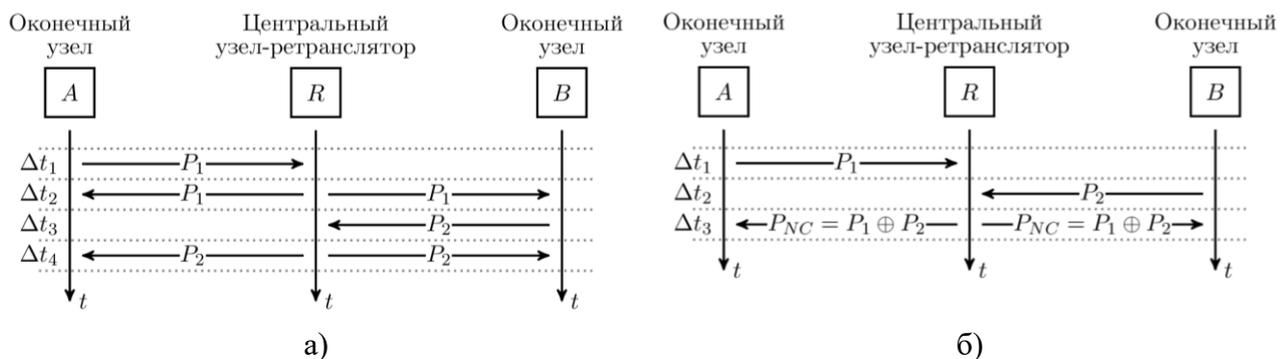


Рис. 2. Ретрансляция с сетевым кодированием:
а) обычная ретрансляция; б) ретрансляция с сетевым кодированием

Как видно из сравнения обычной ретрансляции на рисунке 2а) и ретрансляции с сетевым кодированием на рисунке 2б), сетевое кодирование обеспечивает обмен пакетами P_1 и P_2 между узлами A и B за 3 временных интервала вместо четырех [3, 6, 16].

В пакетах протокола NCRP передаются следующие поля:

- тип пакета;
- флаг, определяющий факт проведения сетевого кодирования;

- флаг типа заголовка, поскольку протокол NCRP позволяет формировать заголовок пакета двумя способами;
- флаг, определяющий назначение пакета (данные или управляющая информация);
- номера пакетов, участвующих в формировании закодированного пакета;
- длины полей данных исходных пакетов;
- адреса источников исходных пакетов;
- адреса получателей исходных пакетов.

Следует учитывать, что протокол NCRP может использоваться на различных уровнях модели OSI совместно с разными технологиями передачи и, соответственно, поля заголовка могут отличаться от приведенных.

При реализации подхода в рамках IPv6 механизм формирования заголовка пакета различными способами не требуется, что позволяет не использовать флаг типа заголовка. Также не будут реализовываться флаг назначения пакета, относящийся к управлению соединением, и поле типа пакета.

Можно видеть, что в основном поля протоколов, реализующих различные подходы сетевого кодирования, пересекаются, но также есть и поля, специфичные для конкретного подхода. В случае реализации универсального механизма управления сетевым кодированием средствами протокола IPv6 необходимо обеспечить передачу всех параметров, необходимых для каждого из подходов.

Таким образом, для реализации сетевого кодирования в рамках IPv6 требуются следующие параметры:

- флаг, определяющий факт проведения сетевого кодирования;
- номера пакетов, участвующих в формировании закодированного пакета;
- длины полей данных исходных пакетов;
- адреса источников исходных пакетов;
- адреса получателей исходных пакетов.

Флаг F_{NC} , определяющий факт проведения сетевого кодирования, устанавливается на кодирующем узле и должен быть доступен всем маршрутизирующим узлам. Таким образом, этот флаг удобно размещать в расширенном заголовке Hop-by-Hop Options. Поскольку значения опций этого расширенного заголовка как минимум занимают 1 октет, дополнительно могут быть реализованы еще 7 битовых флагов, что позволяет при необходимости расширять функционал протокола. С учетом кодирования параметров в формате тип–длина–значение флаги при передаче будут занимать 3 октета, как показано на рисунке 3.

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Параметр Флаги сет. код.								Длина поля данных параметра $L_{\text{парам.}} = 1$								Флаги (резерв)				F_{NC}			

Рис. 3. Параметр для передачи флагов сетевого кодирования

Прочие параметры необходимы конечному получателю и могут быть переданы в расширенном заголовке Destination Options. Номера пакетов необходимы для того, чтобы сопоставить исходные пакеты P_1 и P_2 с закодированным пакетом P_{NC} и фактически являются идентификаторами исходных пакетов. Таким образом, пакеты могут нумероваться циклически с периодом минимально достаточным для того, чтобы избежать дублирования. Будем использовать номера размером 2 октета. С учетом кодирования параметров в формате тип–длина–значение каждый номер при передаче будет занимать 4 октета, как показано на рисунке 4.

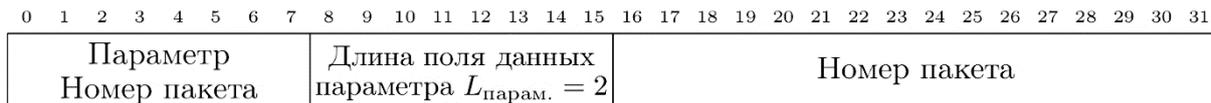


Рис. 4. Параметр для передачи номеров исходных пакетов

Длины полей данных передаются параметром с размером поля значения 2 октета, что соответствует по размеру полям длины нагрузки протоколов IPv6 и основных транспортных протоколов. С учетом кодирования параметров в формате тип–длина–значение каждая длина при передаче будет занимать 4 октета, как показано на рисунке 5. Если оба исходных пакета имеют одинаковую длину, то ее можно не передавать, поскольку размер пакета IPv6 указывается в базовом заголовке.

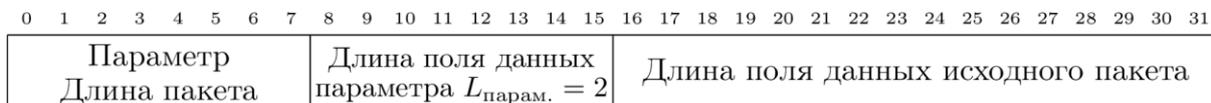


Рис. 5. Параметр для передачи длин поля данных исходных пакетов

Адреса источников и получателей в формате тип–длина–значение будут занимать 18 октетов каждый, как показано на рисунке 6. При этом один адрес источника и один адрес получателя уже содержатся в базовом заголовке IPv6.

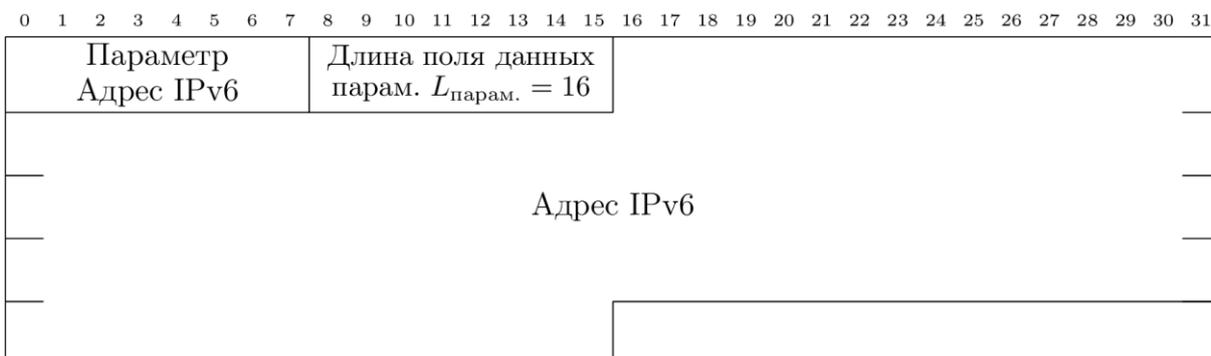


Рис. 6. Параметр для передачи адресов исходных пакетов

Соответственно, при кодировании параметров сетевого кодирования в формате тип–длина–значение суммарно потребуется передать до 55 октетов служебной информации.

Следует отметить, что при обработке расширенных заголовков сетевые узлы, не выполняющие операции сетевого кодирования, могут не распознать соответствующие параметры. Следовательно, старшие два бита типа параметров сетевого кодирования должны быть равны 00, что согласно стандарту IPv6 позволит сетевым узлам пропустить их и продолжить обработку пакетов [11, 12].

Параметры сетевого кодирования в стандартных расширенных заголовках

На рисунке 7 представлен заголовок пакета IPv6 с расширенными заголовками Hop-by-Hop Options и Destination Options, содержащими параметры сетевого кодирования. Для примера взят вариант многоадресной передачи (см. рисунок 1), где в качестве адреса получателя используется групповой адрес. Расширенный заголовок Hop-by-Hop Options выделен серым цветом.

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31																															
0x06				Класс трафика								Метка потока																			
Размер поля данных																0x00 (0) Hop-by-Hop Options				Количество переходов											
Адрес первого отправителя IP_{S_1}																															
Групповой адрес получателя IP_G																															
0x3C (60) Destination Options				Длина расш. загол. 0 слов								Параметр Флаги сет. код.				$L_{\text{парам.}} = 1$															
Резерв				1				Заполнение 0 ... 0																							
Следующий заголовок				Длина расш. загол. 4 слова								Параметр Номер пакета 1				$L_{\text{парам.}} = 2$															
Номер пакета 1																Параметр Номер пакета 2				$L_{\text{парам.}} = 2$											
Номер пакета 2																Параметр Длина пакета 1				$L_{\text{парам.}} = 2$											
Длина поля данных пакета 1																Параметр Длина пакета 2				$L_{\text{парам.}} = 2$											
Длина поля данных пакета 2																Параметр Адрес отправителя 2				$L_{\text{парам.}} = 16$											
Адрес второго отправителя IP_{S_2}																															
Заполнение 0 ... 0																															

Рис. 7. Заголовок пакета IPv6 с параметрами сетевого кодирования в стандартных расширенных заголовках

К недостаткам использования расширенного заголовка Destination Options для передачи параметров сетевого кодирования можно отнести дополнительную избыточность, возникающую из-за передачи параметров в формате тип–длина–значение. Дополнительная избыточность составляет 2 октета на параметр и для рассмотренного на рисунке 7 примера равна 12 октетов. Также следует дополнительно учитывать 7 октетов заполнения расширенных заголовков до требуемой по стандарту длины, кратной 8 октетам. Решением является применение для параметров сетевого кодирования специального расширенного заголовка, который будем называть Network Coding Parameters.

Расширенный заголовок Network Coding Parameters

Поскольку для уменьшения избыточности в специальном заголовке сетевого кодирования решено отказаться от нумерования параметров, для однозначности обработки этот расширенный заголовок должен иметь строгую структуру, при которой они передаются в определенном порядке. При этом, для того чтобы была возможность не передавать ненужные для конкретного пакета параметры, используется специальное поле флагов, которые показывают наличие конкретного параметра в расширенном заголовке.

Учитывая необходимые параметры, указанные ранее, поле флагов должно позволять передавать 8 различных параметров:

- два номера исходных пакетов, которые кодируются флагами F_{M1} и F_{M2} , соответственно;
- две длины полей данных исходных пакетов, которые кодируются флагами F_{L1} и F_{L2} , соответственно;
- два адреса отправителей исходных пакетов, которые кодируются флагами F_{S1} и F_{S2} , соответственно;
- два адреса получателей исходных пакетов, которые кодируются флагами F_{R1} и F_{R2} , соответственно.

Для их кодирования достаточно одного октета. С учетом запаса на дальнейшую модернизацию протокола размер поля флагов установлен равным 2 октета. Полная структура расширенного заголовка Network Coding Parameters представлена на рисунке 8. Поскольку длина расширенного заголовка является переменной, необходимое заполнение до кратности 8 октетам не указано – приведены только значащие поля.

Для сравнения на рисунке 9 представлен полный заголовок пакета IPv6, соответствующий примеру на рисунке 7 с учетом использования специального расширенного заголовка Network Coding Parameters. Дополнительная избыточность при использовании расширенного заголовка Network Coding Parameters составляет 4 октета, что обеспечивает выигрыш в 8 октетов по сравнению с использованием расширенного заголовка Destination Options (см. рисунок 7). Заполнение расширенных заголовков до необходимой кратности составляет 7 октетов (как и в случае, показанном на рисунке 7).

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
Следующий заголовок		Длина распр. загол.		Флаги параметров (резерв)		F_{N1}		F_{N2}		F_{L1}		F_{L2}		F_{S1}		F_{S2}		F_{R1}		F_{R2}													
Номер пакета 1										Номер пакета 2																							
Длина поля данных пакета 1										Длина поля данных пакета 2																							
Адрес первого отправителя IP_{S1}																																	
Адрес второго отправителя IP_{S2}																																	
Адрес первого получателя IP_{R1}																																	
Адрес второго получателя IP_{R2}																																	

Рис. 8. Структура расширенного заголовка Network Coding Parameters

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31		
0x06		Класс трафика		Метка потока																													
Размер поля данных										0x00 (0) Hop-by-Hop Options										Количество переходов													
Адрес первого отправителя IP_{S1}																																	
Групповой адрес получателя IP_G																																	
Тип заголовка Net. Cod. Parameters		Длина распр. загол. 0 слов		Параметр Флаги сет. код.		$L_{\text{парам.}} = 1$																											
Резерв		$F_{NC} = 1$		Заполнение 0...0																													
Следующий заголовок		Длина распр. загол. 3 слова		Флаги параметров (резерв)		$F_{N1} = 1$		$F_{N2} = 1$		$F_{L1} = 1$		$F_{L2} = 1$		$F_{S1} = 0$		$F_{S2} = 1$		$F_{R1} = 0$		$F_{R2} = 0$													
Номер пакета 1										Номер пакета 2																							
Длина поля данных пакета 1										Длина поля данных пакета 2																							
Адрес второго отправителя IP_{S2}																																	
Заполнение 0...0																																	

Рис. 9. Заголовок пакета IPv6 с параметрами сетевого кодирования в расширенном заголовке Network Coding Parameters

Процедура сетевого кодирования с использованием расширенных заголовков IPv6

Рассмотрим процедуру обработки пакетов при их формировании на стороне отправителя, при сетевом кодировании на маршрутизирующем узле и сетевом декодировании. Для примера возьмем случай многоадресной передачи с сетевым кодированием в сети «бабочка» (см. рисунок 1). Узлы-отправители S_1 и S_2 имеют IP-адреса IP_{S1} и IP_{S2} , соответственно. Узлы-получатели R_1 и R_2 объединены в группу мультивещания с адресом IP_G . Пакеты P_1 и P_2 , отправляемые узлами S_1 и S_2 , соответственно, имеют номера N_{P1} и N_{P2} . Для простоты будем считать, что оба пакета имеют одинаковый размер передаваемых данных и переносят блоки данных D_1 и D_2 , соответственно. Схема обработки пакетов представлена на рисунке 10. Для простоты показаны только те узлы, на которых происходит обработка пакетов для выполнения операций сетевого кодирования и декодирования: S_1 , S_2 , G_C , R_1 и R_2 . Маршрутизаторы G_A , G_B , G_D , G_E и G_F , выполняющие только маршрутизацию пакетов опущены.

Узел-отправитель S_1 формирует пакет P_1 . В заголовке IPv6 в качестве адреса источника указывается адрес IP_{S1} , а в качестве адреса получателя – групповой адрес IP_G . Флаг сетевого кодирования в расширенном заголовке Hop-by-Hop Options устанавливается равным 0. В расширенном заголовке Destination Options (Network Coding Parameters) указывается только номер пакета N_{P1} . В поле данных инкапсулируется блок данных D_1 . Аналогично формируется и пакет P_2 на узле-отправителе S_2 .

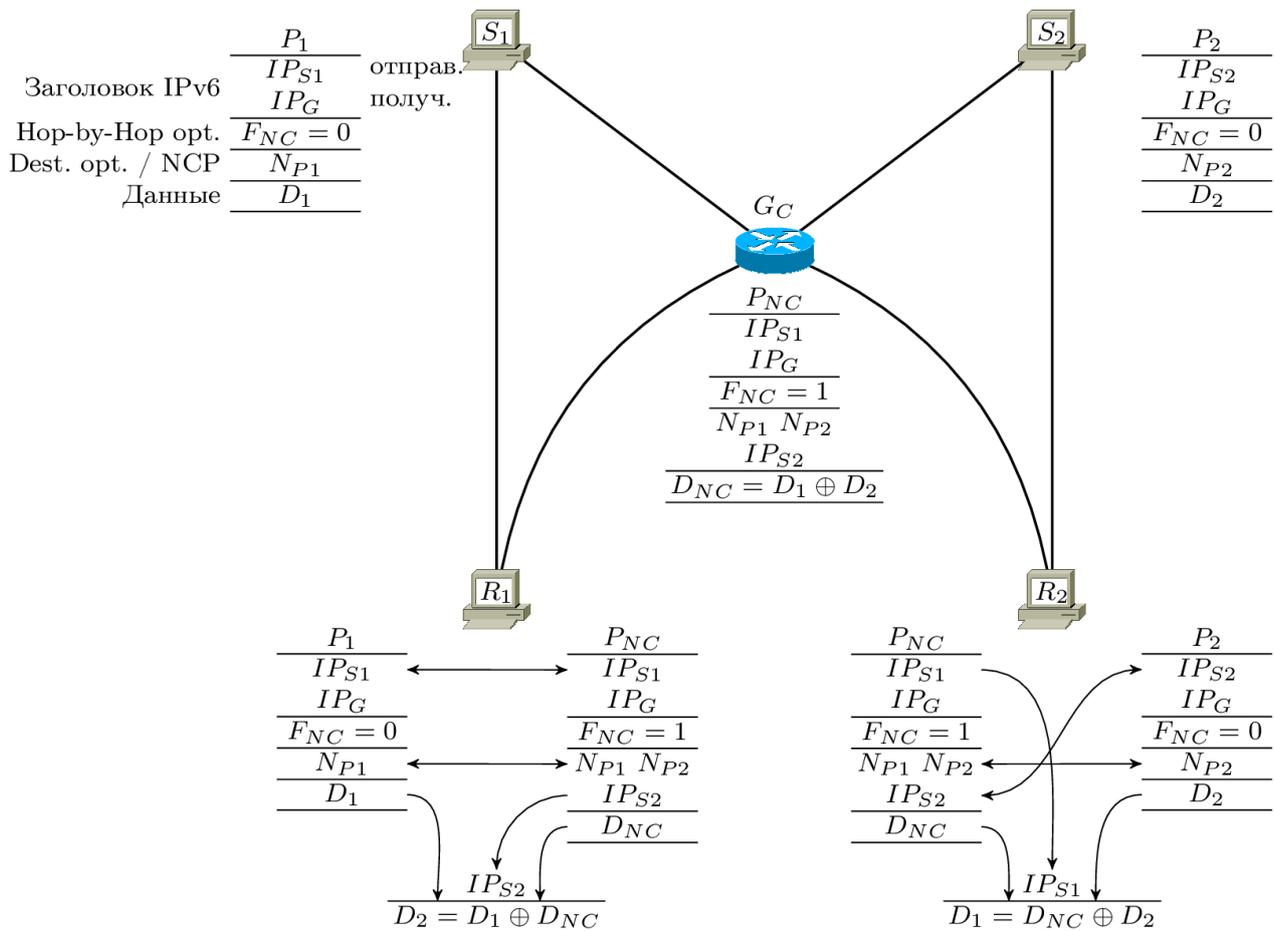


Рис. 10. Схема обработки заголовков пакетов протокола IPv6NC на примере сети «бабочка»

Сформированные пакеты отправляются в сеть. Когда узел R_1 получает пакет P_1 , он записывает его в буфер памяти. То же самое делает и узел R_2 , получив пакет P_2 . Маршрутизатор G_C , получив пакеты P_1 и P_2 , выполняет их сетевое кодирование, формируя пакет P_{NC} . В заголовке IPv6 остаются адрес источника IP_{S1} и групповой адрес получателя IP_G . Флаг сетевого кодирования в расширенном заголовке Hop-by-Hop Options становится равным 1. В расширенном заголовке Destination Options (Network Coding Parameters) теперь указываются номера N_{P1} и N_{P2} обоих исходных пакетов, а также добавляется адрес второго отправителя IP_{S2} . Содержимое блока данных формируется операцией сетевого кодирования, как показано на рисунке 10. Поскольку по условию размер блоков данных обоих исходных пакетов одинаков, его не нужно указывать отдельно.

Получив пакет P_{NC} , узел R_1 сопоставляет адрес отправителя IP_{S1} и номер пакета N_{P1} с хранящимся в приемном буфере пакетом P_1 . Затем определяет адрес второго отправителя IP_{S2} и номер N_{P2} . Далее выполняет процедуру сетевого декодирования, восстанавливая блок данных D_2 , как показано на рисунке 10.

Аналогичные действия производит и узел R_2 , сопоставляя пакеты P_2 и P_{NC} и восстанавливая блок данных D_1 .

Заключение

Представленный протокол IPv6NC позволяет реализовать механизмы многоадресной передачи и ретрансляции с сетевым кодированием в различных системах передачи данных. Возможность использования как стандартных расширенных заголовков Hop-by-Hop Options и Destination Options протокола IPv6, так и специального расширенного заголовка Network Coding Parameters обеспечивает гибкость применения протокола с точки зрения его внедрения в существующие сети и системы передачи, позволяя оптимизировать работу протокола под конкретный сценарий применения.

В дальнейшем планируется провести тестирование работы протокола IPv6NC в различных сценариях сетевого кодирования с применением виртуальной модельной сети с целью определения его временных характеристик.

Литература

1. Yeung R. W., Zhang Z. Distributed source coding for satellite communications // *IEEE Transactions on Information Theory*. 1999. Vol. 45. PP. 1111–1120. DOI: 10.1109/18.761254
2. Ahlswede R., Cai N., Li S.-Y. R., Yeung R. W. Network information flow // *IEEE Transactions on Information Theory*. 2000. Vol. 46. PP. 1204–1216. DOI: 10.1109/18.850663
3. Fragouli C., Soljanin E. Network Coding Fundamentals // *Foundations and Trends in Networking*. 2007. Vol. 2. Iss. 1. PP. 1–133. DOI: 10.1561/13000000003
4. Владимиров С. С., Гутовский А. С., Фомин А. И. Обзор протоколов сетевого кодирования в современных системах передачи данных // Всероссийская научно-методическая конференция магистрантов и их руководителей «Подготовка профессиональных кадров в магистратуре для цифровой экономики» (ПКМ-2021): сборник лучших докладов конференции (Санкт-Петербург, 30 ноября – 02 декабря 2021 г.) СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2022. С. 184–188. EDN: FTFFJF
5. Vladimirov S. S., Vybornova A., Muthanna A., Koucheryavy A., El-Latif A. A. Network Coding Datagram Protocol for TCP/IP Networks // *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. PP. 43485–43498. DOI: 10.1109/access.2023.3266289. EDN: TNEZMC
6. Владимиров С. С., Бородин А. С., Фомин А. И., Кучерявый А. Е. Протокол ретрансляции с сетевым кодированием // *Электросвязь*. 2023. № 6. С. 47–53. DOI: 10.34832/ELSV.2023.43.6.006. EDN: DFXQTK
7. Nolan K., Kelly M. IPv6 Convergence for IoT Cyber-Physical Systems // *Information*. 2018. Vol. 9. Iss. 4. P. 70. DOI: 10.3390/info9040070
8. Волков А. Н., Мутханна А. С. А., Кучерявый А. Е. Сети связи пятого поколения: на пути к сетям 2030 // *Информационные технологии и телекоммуникации*. 2020. Т. 8. № 2. С. 32–43. DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-2-32-43. EDN: ZWNTDB
9. Кучерявый А. Е., Киричек Р. В., Маколкина М. А., Парамонов А. И., Дунайцев Р. А. и др. Новые перспективы научных исследований в области

сетей связи на 2021–2024 годы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Т. 8. № 3. С. 1–19. DOI: 10.31854/2307-1303-2020-8-3-1-19. EDN: XDGHAO

10. Gkagkas G., Vergados D. J., Michalas A., Dossis M. The Advantage of the 5G Network for Enhancing the Internet of Things and the Evolution of the 6G Network // Sensors. 2024. Vol. 24. Iss. 8. P. 2455. DOI: 10.3390/s24082455

11. RFC 8200. Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification. IETF, 2017.

12. RFC 7045. Transmission and Processing of IPv6 Extension Headers. IETF, 2013.

13. Владимиров С. С., Фомин А. И. Концепция протокола многоадресной передачи на основе метода сетевого кодирования // Информационные технологии и телекоммуникации. 2021. Т. 9. № 1. С. 26–36. DOI: 10.31854/2307-1303-2021-9-1-26-36. EDN: HXMEZM

14. Владимиров С. С., Кучерявый А. Е. Тестирование протокола сетевого кодирования NCDP в сети с ромбовидной топологией // Электросвязь. 2021. № 9. С. 42–46. DOI: 10.34832/ELSV.2021.22.9.005. EDN: PQNFFA

15. Владимиров С. С. Протокол многоадресной передачи с сетевым кодированием NCDP в сетях TCP/IP // Электросвязь. 2022. № 5. С. 2–15. DOI: 10.34832/ELSV.2022.30.5.001. EDN: KBEIT

16. Владимиров С. С., Гутовский А. С. Концепция протокола радиоудлиителя на основе метода сетевого кодирования // Перспективные технологии в средствах передачи информации: материалы 14-ой международной научно-технической конференции (Владимир, 06–07 октября 2021 г.). Владимир: Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 2021. С. 117–121. EDN: IPRZDL

Статья поступила 20 сентября 2024 г.
Одобрена после рецензирования 29 октября 2024 г.
Принята к публикации 30 октября 2024 г.

Информация об авторе

Владимиров Сергей Сергеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.
E-mail: vladimirovs@sut.ru

IPv6NC Network Coding Protocol Based on IPv6 Extension Headers

S. Vladimirov

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Subject of the research. The paper presents a new IPv6NC network coding protocol based on the use of IPv6 network protocol extension headers. **Purpose.** Development of a data transfer protocol based on the analysis of existing principles and models of network coding, as well as the use of IPv6 protocol extension headers to transfer network coding parameters. **Methods.** Analysis of existing principles and models of network coding, as well as the use of IPv6 extension headers for transmitting network coding parameters. **Results.** The paper describes application of developed protocol for different network coding approaches and presents network coding parameters to be transmitted in packet headers to perform network coding and guideline of their representation in the type-length-value format for standard IPv6 extension headers. Also the paper gives the structure of a special extension header for transmitting network coding parameters. **Novelty.** For the first time, IPv6 uses extension headers for network coding. **Practical relevance.** The developed protocol is intended for the implementation of multicast transmission and relay with network coding in various data transmission systems.

Key words: network coding, IPv6, extension headers, IPv6NC

Information about Authors

Sergey Vladimirov – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Telecommunication Networks and Data Transmission (The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications).
E-mail: vladimirovs@sut.ru