

УДК 621.39

Обоснование оптической маршрутизации для реализации обобщенной многопротокольной коммутации по меткам в инфокоммуникационных сетях

Justification of optical routing for the implementation of generalized multiprotocol label switching in infocommunication networks

Репин / Repin B.

Борис Григорьевич
(rbg@inbox.ru)
кандидат военных наук.
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» МО РФ (ВАС им С. М. Буденного),
доцент кафедры сетей связи и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Ясинский / Yasinski S.

Сергей Александрович
(yasinsky777@mail.ru)
доктор технических наук, доцент.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
ведущий специалист.
г. Санкт-Петербург

Романенко / Romanenko P.

Павел Геннадьевич
(pa-roman@yandex.ru)
кандидат технических наук, доцент.
ВАС им. С. М. Буденного,
начальник кафедры сетей связи и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Аникеев / Anikeev A.

Александр Иванович
(aai1956@yandex.ru)
ВАС им. С. М. Буденного,
преподаватель кафедры сетей связи и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Султанов / Sultanov R.

Руслан Сергеевич
(ruslan_vax@mail.ru)
ВАС им С. М. Буденного,
адъюнкт кафедры сетей связи и систем коммутации.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: инфокоммуникационная сеть – infocommunication network; оптическая маршрутизация – optical routing; многопротокольная коммутация по меткам – multiprotocol label switching; многоуровневое представление транспортной сети – multilevel representation of the transport network.

После многоуровневого представления оптической транспортной сети предложен научный подход к обоснованию оптической маршрутизации в перспективных инфокоммуникационных сетях Единой сети электросвязи РФ. Существо этого подхода заключается в совместном применении технологии построения оптических транспортных сетей с обобщенной многопротокольной коммутацией по меткам за счет повышения интеллектуальности сетевых механизмов.

After a multilevel representation of the optical transport network, a scientific approach to substantiating optical routing in promising infocommunication networks of the Unified Telecommunication Network of the Russian Federation is proposed. The essence of this approach is the joint application of optical transport network construction technology with generalized multiprotocol label switching by increasing the intelligence of network mechanisms.

Введение

Переход к инфокоммуникационным сетям (ИКС) связан с развитием автоматизированных систем управления связью и интеграцией в них существующего задела в области управления ресурсами связи в сетях связи общего пользования (ОП) Единой сети электросвязи РФ (ЕСЭ РФ), виртуализации сетевых и вычислительных ресурсов, а также с использованием новых технологических решений по обеспечению устойчивости в условиях воздействий дестабилизирующих факторов.

Однако оказывается, что полученные наработки по реализации перспективных технологий в сети связи ОП в недостаточной мере нашли реализацию при построении сетей электросвязи других категорий, т. е. выделенных, технологических, специального назначения и других сетей связи для передачи информации при помощи электромагнитных систем [1]. При этом надо учитывать, что при построении ИКС всех категорий ЕСЭ РФ должно обеспечиваться предоставление набора как связных, так и информационных услуг пользователям с гибкими возможностями по управлению ими и их персонализации. Особенно это должно распространяться не только для нужд пользователей сети связи ОП, но и в первую очередь для нужд органов государственной власти, нужд обороны страны, безопасности государства и обеспечения правопорядка. Предоставление этих услуг унифицировано и осуществляется соответствующими программно-аппаратными комплексами услуг, тем самым обеспечивается предоставление всем пользователям полного спектра услуг, связанных как с обменом информацией и ее передачей, так и с ее обработкой, хранением и накоплением. Основой архитектурного построения ИКС является телекоммуникационная сеть (ТКС), состоящая из транспортной сети (ТС) и сетей доступа (СД) [2]. В современных ИКС транспортная сеть является многопротокольной (МП) и обеспечивает перенос разных видов информации с использованием различных протоколов передачи информационных потоков (ИП).

Фундаментальный принцип построения всех ТС – полная прозрачность для клиентских сервисов. Это означает буквально: все биты интерпретируются одинаково, их исходное упорядочивание сохраняется, данные не изменяются, сеть не пытается вникать в содержимое и изолирует трафик клиента от воздействия трафика окружающих клиентов. Исходя из этого, могут быть спроектированы взаимодействия клиент–сервис, которые должны оперировать независимо друг от друга, находясь как бы в разных слоях архитектуры ТС [2].

Понятие "транспорт" исторически связано с сетями физического уровня (ФУ) эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС), т. е. первого

уровня, например, реализуемого технологиями синхронной цифровой иерархии (SDH) и волнового мультиплексирования (WDM). Однако эволюционный сдвиг развития телекоммуникационных технологий в сторону предпочтения услуг пакетной передачи ИП привел к тому, что и каналный (второй) уровень (КУ) ЭМВОС приобрел не менее важную роль, чем ФУ. Кроме этого оказалось, что долгосрочную пакетную емкость, обеспечиваемую маршрутизаторами сетевого (третьего) уровня (СУ) ЭМВОС, стали в ряде случаев рассматривать как часть ТС.

С сетевой точки зрения различные технологии переплетаются и комбинируются в разных уровнях. В сетях пакетной коммутации значительный прогресс в области маршрутизации и приоритизации трафика, управления полосой пропускания, построения виртуальных частных сетей, резервирования ресурсов и обеспечения качества обслуживания (QoS) был достигнут благодаря появлению стандарта MPLS (MultiProtocol Label Switching – МП коммутация по меткам). Использование дополнительных меток, помещаемых в передаваемые пакеты, и специальных алгоритмов их распространения по сети, разделение транспортного и управляющего уровней и ряд других новшеств сделали преимущества протокола MPLS перед традиционной маршрутизацией вполне очевидными. При использовании протоколов MPLS доступная используемая пропускная способность (ПС) увеличивается, а критически важные приложения, такие как передача голоса и видео, гарантируют 100% бесперебойную работу [3].

Протокол MPLS в настоящее время активно адаптируется под требования Международного союза электросвязи к традиционным транспортным сетям, в результате учета которых разработан протокол (MPLS-TP – это MPLS с транспортным профилем), который задает направление будущего развития ТС. Этот протокол содержит только ту часть MPLS, которая необходима для создания туннеля, ориентированного на установление соединения. MPLS-TP, как более совершенная разновидность MPLS, специально предназначен для применения в ТС с удалением избыточных функций, не имеющих отношения к пакетной коммутации, и добавлением ключевых функциональных возможностей: сквозная OAM (Operations, Administration, and Maintenance – управление отказами, производительностью и конфигурациями); зарезервированная коммутация, обеспечивающая полную детерминированность сети; QoS [2, 3].

Разработанный на принципах построения MPLS-TP протокол обобщенной МП коммутации по меткам, т. е. GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching), открывает возможность существенного повышения эффективности информационного обмена пользователями ИКС за счет повышения интеллектуальности сетевых механизмов, начиная от оконечных узлов и заканчивая ТКС.

Так как одним из важнейших преимуществ GMPLS перед MPLS и MPLS-TP является возможность управления установлением оптических соединений и иными соединениями в рамках ФУ и КУ сети, изначально остановимся на исследовании многоуровневого представления, а затем на обосновании целесообразности применения технологии GMPLS за счет повышения интеллектуальности сетевых механизмов, начиная от конечных узлов и заканчивая ядром сети на ФУ, КУ и частично сетевом уровне ЭМВОС с возможностью существенного повышения эффективности информационного обмена между пользователями ИКС.

Многоуровневое представление оптической транспортной сети для реализации GMPLS

Транспортная сеть на основе MPLS-TP – это пакетная сеть, обеспечивающая управляемые сквозные соединения к сетям клиентского уровня, опирающаяся на хорошо известные и широко используемые технологии и стандарты сетей IP/MPLS, но без всей его избыточности, не имеющей отношения к приложениям на основе соединений, и без пробелов в транспортной функциональности [4, 5, 6]. Использование на ФУ волоконно-оптических линий передачи с технологией обработки оптических сигналов по принципу коммутации длин волн (лямбда-коммутация), где этот принцип заимствован из принципа коммутации IP-пакетов в протоколе MPLS, позволяет более эффективно создавать оптические ТС (OTN) в комплексе с технологией MPLS-TP и протоколом GMPLS [7].

Оптическую транспортную сеть можно представить в виде трех взаимодействующих плоскостей (уровней): плоскости данных (ПД), плоскости контроля (ПК) и плоскости управления (ПУ). В ряде случаев ПК и ПУ объединяют в единую плоскость.

Плоскость данных включает в себя сетевое оборудование: интерфейсные карты (линейные и клиентские), коммутационное оборудование, волоконно-оптическую инфраструктуру.

Плоскость управления совмещает функции управления сетевыми элементами (EMS) и функции управления сетью (NMS).

Плоскость контроля, находящаяся между ПД и ПУ, обеспечивает работу стека протоколов маршрутизации GMPLS. Для построения пути система управления должна «видеть» актуальную топологию сети, а значит, распространять информацию о доступности и состоянии ресурсов в системе, за что отвечает функция обнаружения ресурса.

Стек протоколов OTN состоит из четырех блоков (уровней), которые в виде структурной схемы приведены на рис. 1 [8, 9]:

OPU (Optical Channel Payload Unit – блок пользовательских данных оптического канала) отвечает

за доставку данных между пользователями сети. Занимается инкапсуляцией пользовательских данных, таких как кадры SDH, Ethernet и сети асинхронной передачи данных (ATM), в блоки OPU, выравниванием скоростей передачи пользовательских данных и блоков OPU, а на приемной стороне извлекает пользовательские данные и передает их пользователю;

ODU (Optical Channel Data Unit – блок данных оптического канала) так же, как и протокол OPU, работает между конечными узлами сети OTN. В его функции входит мультиплексирование и демultipлексирование блоков OPU;

OTU (Optical Channel Transport Unit – транспортный блок оптического канала) работает между двумя соседними узлами сети OTN, которые поддерживают функции электрической регенерации оптического сигнала, называемые также функциями 3R (retiming, reshaping и regeneration);

Och (Optical Channel – оптический канал) реализуется как спектральный канал с плотным волновым мультиплексированием (DWDM).

Работа механизма выравнивания OTN зависит от одного из двух режимов отображения нагрузки:

- синхронный режим нагрузки – мультиплексор OTN синхронизирует приём и передачу от синхроимпульсов, находящихся в принимаемом потоке пользовательских данных;

- асинхронный режим нагрузки – мультиплексор OTN синхронизируется от собственного источника синхроимпульсов, который не зависит от пользовательских данных.

Подуровень ODU в настоящее время определяет пять клиентских сигналов со скоростями данных: 1,25, 2,5, 10, 40 и 100 Гбит/с. OTN поддерживает ряд вариантов мультиплексирования сигналов ODU: четыре ODU1 могут быть мультиплексированы в ODU2; шестнадцать ODU1 или четыре ODU2 могут быть мультиплексированы в ODU3; комбинация ODU1 и ODU2 может быть мультиплексирована в ODU3. Кроме этого, OTN также поддерживает виртуальную конкатенацию. В качестве примера рассмотрим вариант мультиплексирования сигналов, когда четыре ODU1 могут быть мультиплексированы в ODU2.

В технологии OTN применяется процедура прямой коррекции ошибок, в которой используются коды Рида-Соломона RS(255,239). В этом самокорректирующемся коде данные кодируются блоками по 255 байт, из которых 239 байт являются пользовательскими, а 16 байт представляют собой корректирующий код. Коды Рида-Соломона позволяют исправлять до 8 ошибочных байт в блоке из 255 байт, что является очень хорошей характеристикой для самокорректирующего кода. Применение кода Рида-Соломона позволяет улучшить отношение мощности сигнала к мощности шума на 5 дБ. Этот эффект дает возможность увеличить расстояние между регенераторами сети до 20 км или использовать менее мощные передатчики сигнала.

Особенности маршрутизации в оптической транспортной сети для реализации GMPLS

Маршрутизация в OTN на ФУ является более сложным механизмом, чем маршрутизация на СУ [8]. При формировании маршрута надо учитывать физические параметры, например, задержки пакетов, ПС на данной длине волны, оптическое отношение сигнал/шум и т. д.

В отличие от классического MPLS, MPLS-TP не поддерживает режим без установления соединения, у него более простые возможности, он менее сложен и более управляем. Он открывает путь к транспортной технологии с низкой стоимостью коммутации на КУ, где устранена вся избыточность маршрутизации СУ. Следовательно, MPLS-TP может рассматриваться как основа OTN.

Архитектура пакетной OTN (P-OTN) предоставляет оператору поддержку технологий интернета операторского класса (Carrier-Ethernet) и MPLS, дает хорошую масштабируемость на фоне упрощения пакетной сети и обеспечивает минимальную удельную стоимость полосы пропускания на единицу передаваемой информации. Трудно переоценить роль P-OTN в будущем при построении мультисервисных сетей нового поколения. В перспективе для P-OTN эволюция может пойти по архитектурному или функциональному пути [11]. В любом из этих двух путей эволюции технология MPLS-TP будет фигурировать в качестве ключевого элемента для будущих сетей P-OTN.

Пакетная сеть MPLS-TP использует обобщенный протокол MPLS, то есть GMPLS, для обеспечения детерминированного и ориентированного на подключение поведения с использованием виртуального

канала или туннеля (LSP), что делает его надежным транспортным протоколом. MPLS-TP также использует целевой протокол граничного маршрутизатора меток (LDP) для настройки псевдопроводов (PWS) поверх GMPLS LSP и для предоставления соединений «точка-точка» (VPWS) и соединений точкой до нескольких точек (VPLS), а также много иных функциональных решений [7].

Спецификация GMPLS расширяет классическое понятие метки. Если в сетях MPLS под нее отводится специальное 32-байтное поле в заголовке пакета, то в GMPLS для этих целей используется последовательность байтов произвольной длины. По сути дела, в качестве метки теперь может выступать любой параметр, однозначно идентифицирующий информационный поток. Это длина волны, на которой в сети DWDM передается конкретный оптический сигнал, параметры диапазона длин волн (идентификатор диапазона, его нижняя и верхняя границы), метки SDH, служащие для обозначения конкретного уровня иерархии, и т. д. В отличие от использования обычных меток MPLS, сами данные не маркируются, но метка, представленная в виде значения длины волны, однозначно определяет способ передачи ИП, к которому она относится. Значение метки непосредственно задействуется только протоколами сигнализации GMPLS для согласования параметров передачи между устройствами оптической коммутации, а также для резервирования ресурсов (длины волны, временного слота и т. п.) под определенные типы трафика.

Появление технологии GMPLS способствовало значительному упрощению иерархии протоколов в оптических сетях. При этом функции управления трафиком, традиционные для сетей MPLS, стали доступными не

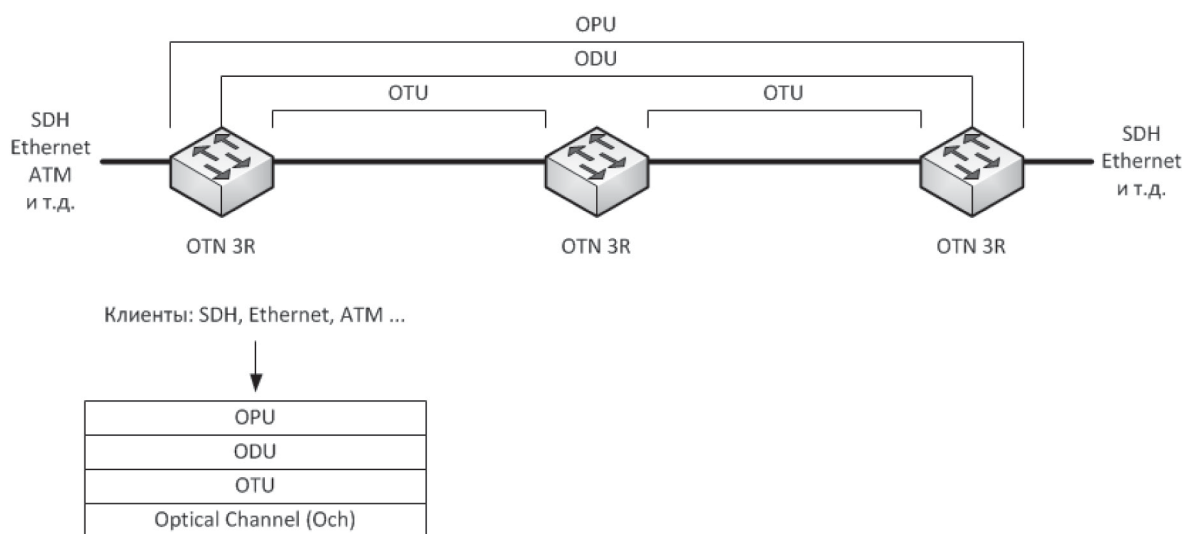


Рис. 1. Стек протоколов OTN из четырех блоков

только маршрутизаторам и АТМ-коммутаторам, но и оптическим кросс-коннекторам, оптическим коммутаторам и мультиплексорам ввода-вывода предыдущего поколения.

Оптическая сеть должна динамически оценивать все параметры, которые в конечном счете оказывают влияние на качество предоставляемых услуг. Наиболее значимые параметры должны определяться конкретным приложением, запрашивающим маршрут между источником и приемником. Так, для передачи сверхширокополосного видео высокой четкости учет задержки не критичен, однако важна полоса, обеспечиваемая высокоуровневым форматом модуляции, чувствительным к соотношению сигнал/шум оптического сигнала на приеме. При передаче трафика реального времени должна гарантироваться минимальная задержка, так как даже один лишний узел LSP с OTN-коммутацией, вносящий несколько десятков микросекунд, может ухудшить показатель качества для данного соединения.

Запишем общую формулу для задержки ($mdelay$) на выходе сетевого узла, которая складывается из задержек в оптоволокне ($link$) и сетевом узле (NE). Тогда метрика, определяющаяся задержкой для вершины v , может быть записана следующим образом [11, 12]:

$$mdelay(v) = mdelay_link(v) + mdelay_NE(v).$$

Учет качества оптического сигнала реализуется с использованием соответствующей математической модели, которая приведена в научной работе [11] Е. Богдановой. В этой модели учитываются следующие частотные параметры и параметры качества [11]:

- значение оптического отношения сигнал/шум, рассчитанного для предыдущего узла в маршруте;
- коэффициент шума оптического усилителя;
- коэффициент усиления оптического усилителя;
- центральная частота оптического канала;
- полоса оптического канала;
- уровень мощности на входе оптического усилителя в сетевом элементе с учетом потерь в оптических компонентах данного узла и входящей оптической линии.

В работе [11] введены ограничения, которые не в полной мере позволяют учитывать качества оптического сигнала. Так, поиск маршрута ведется для одноканальной системы, следовательно, нелинейные физические эффекты, влияющие на качество сигнала, не учитываются. Также предполагается, что в системе достаточное число свободных длин волн, и маршрут не блокируется по причине отсутствия свободной длины волны на каком-либо сегменте. Все это отмечает автор в своей работе [11].

Маршрутизация в оптической сети OTN/DWDM требует взаимодействия всех логических плоскостей сети: ПД, ПК и ПУ. Метрика маршрута – это линейная комбинация, учитывающая с соответ-

ствующими сервису коэффициентами изменение задержки или оптического отношения сигнал/шум. Оптимальные маршруты могут отличаться в зависимости от выбранных весовых коэффициентов.

При формировании метрики маршрута необходимо одновременно учитывать параметры разной природы и рассчитывать оптимальный маршрут. Соединение может устанавливаться по критерию минимальной задержки или максимальной ПС, требующей высокого соотношения сигнал/шум на приеме.

Заключение

Повышение эффективности функционирования ТС может быть достигнуто за счет интеграции пакетных технологий IP и оптических транспортных сред. Для этого нужно прийти к такой организации управления трафиком, которая поможет осуществить переход от технологии IP, функционирующей на СУ, непосредственно к оптическим транспортным механизмам ФУ.

Широко применяемая в современных транспортных сетях технология MPLS повышает масштабируемость сетей IP и улучшает качество обслуживания, создавая коммутируемые по меткам тракты (LSP) при помощи специальных маршрутизаторов (LSR).

Разработанный на принципах MPLS протокол GMPLS за счет повышения интеллектуальности сетевых механизмов, начиная от конечных узлов и заканчивая ядром сети, открывает возможность существенного повышения эффективности информационного обмена. Важнейшим преимуществом GMPLS над MPLS является возможность установления оптических соединений на основе меток на ФУ транспортной сети.

Наличие мощных встроенных механизмов коррекции ошибок в технологии OTN обеспечивает эффективную обработку сильно зашумленного и искаженного оптического сигнала. Время доставки пакета в сети IP MPLS не гарантируется, а в сети OTN передача трафика происходит с жесткой привязкой к тактовым частотам и, таким образом, время доставки пакетов между портами сети строго детерминировано, что повышает эффективность совместной реализации в ТС этих двух перспективных технологий. Кроме этого, технология построения сетей OTN в интересах сетей с технологией GMPLS становится наиболее конкурентно оправданной из-за следующих характеристик:

- переключение на резервный канал в сети OTN осуществляется за время соизмеримое либо меньшее, чем декларируется в сетях IP MPLS;
- возможности мониторинга и управления трафиком для сетей OTN развиты в большей степени, чем для IP MPLS в силу изначальной ориентированности на магистральные ТС;
- возможен вывод детальной статистики о состоянии портов и сервисов в режиме реального времени,

анализ и визуализация трафика, так как сети MPLS обладают более простым набором функционалов мониторинга и управления.

В дальнейших исследованиях по учету качества работы оптического сигнала при построении маршрутов передачи пакетов в ТС, создаваемой на базе технологий OTN и GMPLS, следует перейти:

– к поиску маршрутов для многоканальной системы с целью учета влияния на качество сигнала нелинейных физических эффектов;

– к учету реальных ситуаций в процессе функционирования сети в плане того, что в сети OTN недостаточное число свободных длин волн, а маршрут может блокироваться по причине отсутствия свободной длины волны на каком-либо сегменте.

12. Богданова, Е. Транспортная сеть 5G/IMT-2020 / Е. Богданова // Первая миля. – 2019. – № 7 (84). – С. 40–47.

Литература

1. О связи : федеральный закон от 07.07.2003 N 126-ФЗ ; в ред. от 30.12.2021 (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2022) // Собрание законодательства РФ. Официальный интернет-портал правовой информации – <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102082548>.

2. Принципы построения мультисервисной сети ПАО «Ростелеком» / С.Л. Гавлиевский, В.Г. Карташевский, Д.В. Проскура [и др.]. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2021. – 228 с.

3. Гольдштейн, А. Б. Технология и протоколы MPLS / А.Б. Гольдштейн, Б.С. Гольдштейн. – Санкт-Петербург : БХВ – Санкт-Петербург, 2005. – 304 с.

4. РД 45.195-2001. Применение транспортных технологий связи, использующих в качестве среды передачи оптическое волокно. – Москва : Минсвязи России, 2001. – 69 с.

5. Меккель, А. М. Полностью оптическая транспортная сеть в современных рекомендациях МСЭ-Т / А.М. Меккель // Четвертая отраслевая конференция – форум "Технологии информационного общества". Тезисы докладов (Москва, 5–7 апреля 2010 г.). – Москва, 2010. – С. 62.

6. Тенденции развития оптических систем дальней связи / А.В. Леонов, О.Е. Наний, М.А. Слепцов, В.Н. Трещиков // Прикладная фотоника. – 2016. – Т. 3, № 2. – С. 123–145.

7. Будылдина, Н. В. Оптимизация сетей с многопротокольной коммутацией по меткам / Н.В. Будылдина, Д.С. Трибунский, В.П. Шувалов. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2010. – 144 с.

8. Комплексное решение для оптических линий связи от компании T8: высокоскоростное DWDM-оборудование и мониторинг состояния оптической инфраструктуры / Газовая промышленность. – 2021. – № 8 (820). – С. 24–25.

9. Власов, И. И. Что такое OTN? / И.И. Власов, Д.В. Сладких // Вестник Связи. – 2008. – № 1. – С. 81–85.

10. Schmitt, A. Интегрированная OTN коммутация виртуализирует оптические сети / A. Schmitt // Infonetics Research. – June, 2012.

11. Богданова, Е. Оптическая маршрутизация в транспортной сети IMT-2020/5G / Е. Богданова // Первая миля. – 2020. – № 1 (86). – С. 62–71.