

Мировые рекорды по скорости передачи информации, часть 2

Публикуем продолжение статьи [Мировые рекорды по скорости передачи информации](#).

Как было обоснованно отмечено в комментариях к первой части, мною несправедливо были забыты достижения наших отечественных связистов в плане установки рекордов волоконно-оптических систем связи. В первую очередь хотелось бы исправить эту оплошность.

В 2013 году российская компания "Т8" установила мировой рекорд – передача данных со скоростью 1 Тбит/с на 500,4 км в однопролётной линии без регенерации (были использованы только усилители с удаленной накачкой ROPA). Этим результатом наша отечественная компания смогла побить зарубежный мировой рекорд в 462 км.

Передача данных была осуществлена на DWDM-системе "Волга". При этом системы действительно имеют российское происхождение: разработаны российскими специалистами, а сборка осуществляется на производственной базе в Москве.

Рекорд стал возможен благодаря совмещению высокого качества 100 Гбит/с транспондеров (1 Тбит/с = 10 каналов по 100 Гбит/с) с модуляцией DP-QPSK и использованием волокна SMF-28 ULL компании Corning со сверхнизким затуханием (менее 0.16 дБ/км) и малым значением поляризационно-модовой дисперсии.

Исследователи отметили, что разработанный ими когерентный 100 Гбит/с транспондер обладает самым высоким качеством сигнала отношение сигнал/шум OSNR=12.5 дБ. Инженеры компании также добились увеличения величины электронной компенсации дисперсии с 50 до 75000 пс/нм. По данным показателям на момент проведения эксперимента транспондер превосходил все зарубежные аналоги.

Годом ранее в компании "Т8" поставили рекорд дальности передачи – 4000 км без компенсаторов дисперсии, при этом через каждые 100 км стояли усилители. На такое расстояние была успешно запущена 80 канальная DWDM система с транспондерами 100 Гбит/с, максимальная емкость данной системы составляет 8 Тбит/с. В данной системе были использованы самые современные технологии: когерентный прием 100G в формате DP-QPSK, поляризационное мультиплексирование сигнала, коррекция ошибок SoftFEC, электронная компенсация дисперсии.

В 2015 г. компания "Т8" [провела тестирование 100G оборудования "Волга"](#) без регенерации в реальной линии Москва–Новосибирск. Линия связи проходила через Самару и Екатеринбург с резервированием 1+1, протяженность двух путей составила 4250 и 3400 км соответственно.



В 2014 г. в рамках выставки "Связь-Экспокомм-2014" на стенде "Т8" впервые была продемонстрирована работа прототипа единственной российской DWDM-системы с емкостью 27 Тбит/с. Фотографии ниже были сделаны мною с телефона, поэтому прошу прощения за их качество.





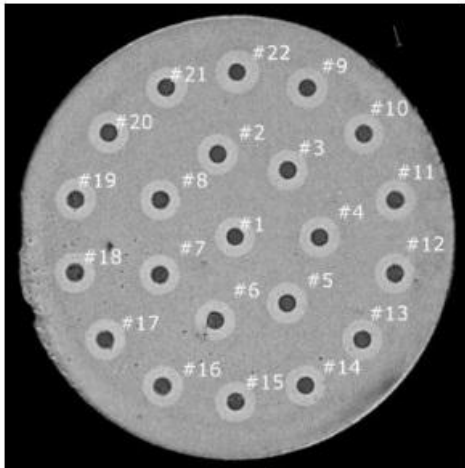




Техническое решение проекта заключается в создании 270 каналов разных длин волн в одном волокне. Каждый из 270 информационных каналов имеет скорость 100 Гбит/с. Расстояние между 100G-каналами в данной системе составляет 33 ГГц. Чтобы облегчить управляемость системы, каждые десять каналов объединены в суперканалы. Суммарная скорость передачи данных, по каждому суперканалу, составит 1 Тбит/с. Всего будет использовано 27 суперканалов.

Продолжим рассматривать ключевые мировые рекорды по скорости передачи информации. Как было отмечено в 1 части статьи, перспективный путь дальнейшего многократного повышения пропускной способности в волокне состоит в разработке и применении многосердцевинных волокон (Multicore fiber, MCF), имеющих от нескольких единиц до множества десятков сердцевин в одной оболочке. Большинство далее рассматриваемых уже зарубежных экспериментальных систем связи основано

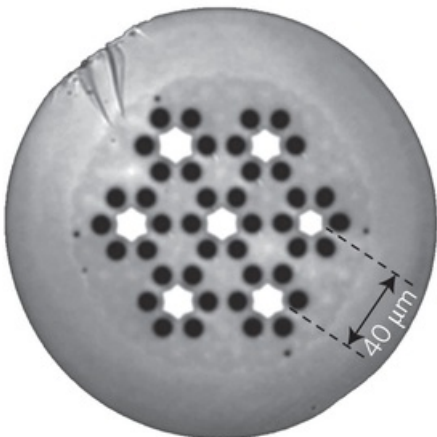
именно на таких волокнах.



В 2014 году международная исследовательская команда из Нидерландов и США объявила о достижении в пропускной способности в одном многосердцевинном волокне **255 Тбит/с** длиной в **1 км**.

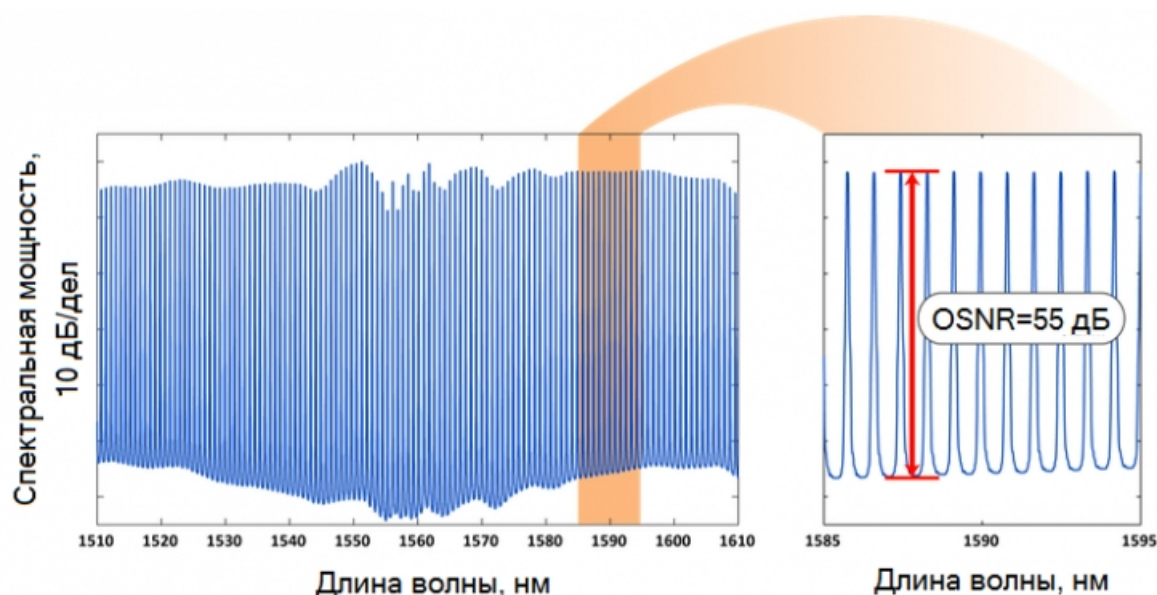
Это эквивалентно скорости передачи около 32 терабайт в секунду, или передачи 1 ГБ трафика за 0.03 мс. Заполнение терабайтного жесткого диска при такой скорости произойдет всего за 31 мс (спасибо, что заметили неточность в 1 части по аналогичному расчету). Данный рекорд в 2550 раз превышает скорость современных магистральных систем с транспондерами на 100 Гбит/с.

Такую пропускную способность удалось организовать благодаря тому, что по каждой из семи, расположенных в форме соты, сердцевине передавалось одновременно три моды.



На одной поднесущей была организована скорость 5.1 Тбит/с, используя 50 поднесущих была достигнута общая пропускная способность 255 Тбит/с. Скорость конечно высокая, но стоит обратить внимание на то, что расстояние данной системы связи пока небольшое.

В 2015 г. Sumitomo Electric Industries, Ltd. (Sumitomo Electric) совместно с RAM Photonics установили новый мировой рекорд скорости передачи в волокне – **2.15 Пбит/с**. Система связи протяженностью **31 км** содержала 22-сердцевинное одномодовое волокно и набор множества высокопроизводительных оптических источников, способных одновременно генерировать несколько сигналов с длинами волн, охватывающих полностью С и L диапазоны от 1510 до 1620 нм с шагом 25 ГГц.

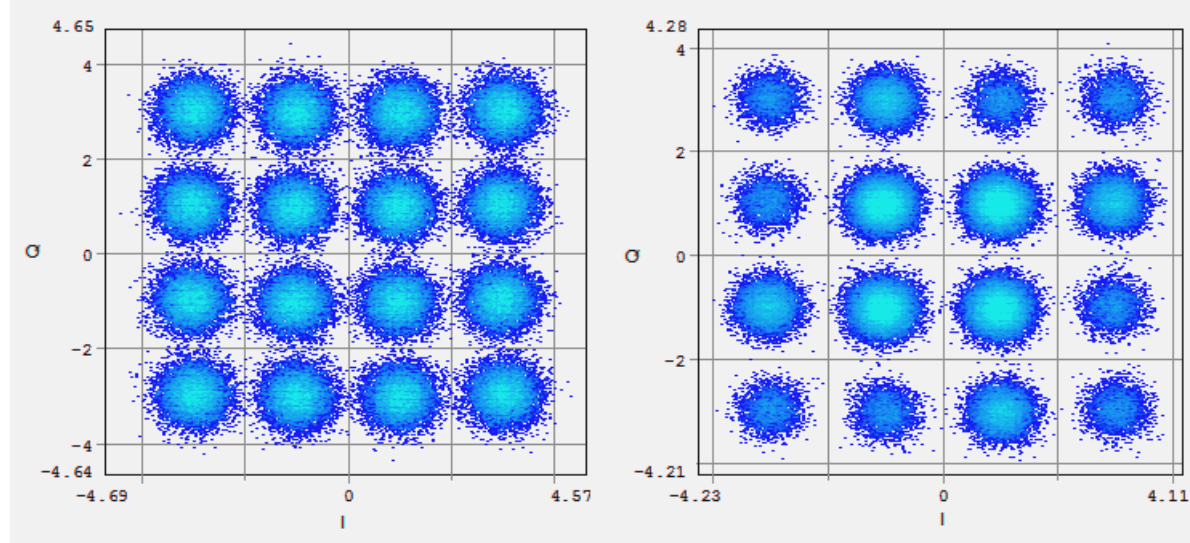


Добиться такой скорости удалось благодаря применению самых современных технологий: супер-канал с поляризационным мультиплексированием и модуляцией 64-QAM с символьной скоростью 24.5 Гбод/с, оптимизации мощности широкополосных оптических усилителей, применения методов цифрового когерентного приема и прямой коррекции ошибок FEC. Общая спектральная эффективность всей системы составила 215.6 бит/с/Гц.

Система высокопроизводительных источников была создана компанией RAM Photonics. Как заявили исследователи, применение данной серии лазеров в совокупности со специальным высоконелинейным волокном, изготовленным Sumitomo, обеспечило узкую ширину спектра излучения, низкий уровень шумов, высокую стабильность частоты несущей, высокую взаимную когерентность и низкую потребляемую мощность.

В 2016 г. Nokia Bell Labs и исследователи из университета Technical University of Munich добились скорости передачи данных **в одном канале 1 Тбит/с**, используя новый метод обработки сигналов – вероятностное формирование сигнального созвездия (Probabilistic Constellation Shaping, PCS). Этот метод в связке с квадратурной амплитудной модуляцией позволил достигнуть значительного улучшения спектральной эффективности оптического канала. Суть метода PCS заключается в том, что сигнальные точки, соответствующие высокой амплитуде, задействуются менее часто, чем с точки с меньшей амплитудой. Осуществляется адаптивное формирование созвездия, которое определяется условиями канала передачи. В результате модулированный сигнал становится более устойчивым к шуму и искажениям. Это позволяет значительно увеличить скорость передачи, например, для QAM-16 в пределах от 15 до 43%.

Классическое и вероятностное формирование сигнального созвездия при QAM-16



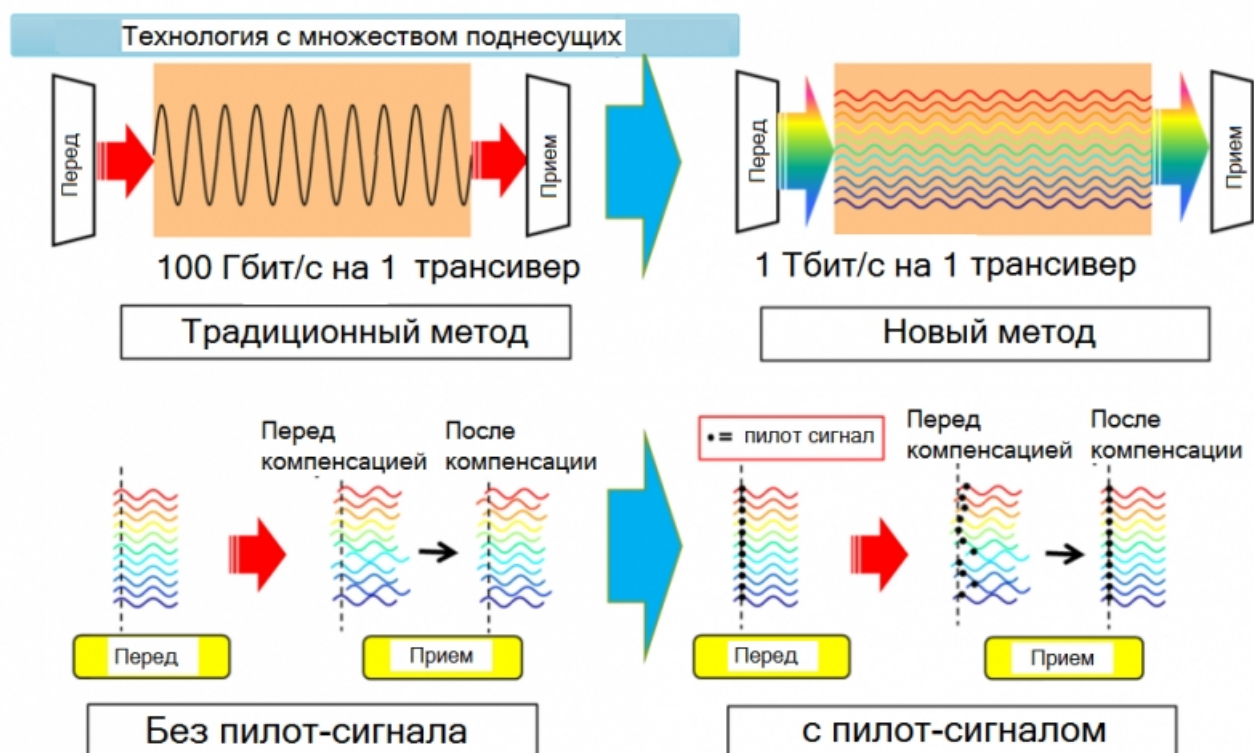
Экспериментальная сеть соединила три европейских города: Дармштадт, Нюрнберг и Берлин (общее расстояние **665 км**). Было организовано четыре супер-канала, используя различные форматы модуляции QAM-16, QAM-36 и QAM-64 в сочетании с вероятностным формированием сигнального созвездия.

В этом же году компания NEC побила рекорд спектральной эффективности трансатлантических сетей передачи, продемонстрировав возможности передачи **34.9 Тбит/с** по одному оптическому волокну на расстояние более чем **6300 км**. Используя С-диапазон инженеры достигли значения спектральной эффективности 8.3 бит/с/Гц, что на 16.9% больше с предыдущего рекорда (предыдущий рекорд был 7.1 бит/с/Гц).

Также в 2016 г. исследователи из лондонского университета установили новый рекорд. Используя только один трансивер, они добились скорости в **1.125 терабит в секунду**. Все серии сериала Игра престолов в HD качестве можно скачать менее чем за одну секунду! Этому результату удалось достичь благодаря использованию усовершенствованных методов цифровой обработки сигналов, которые позволили оптимизировать отношение сигнал-шум (SNR) на приеме. На основе пятнадцати отдельных оптических каналов был сформирован один суперканал. Каждая поднесущая передавала сигнал с модуляцией 256-QAM. Команда исследователей определила наиболее эффективный способ кодирования данных в оптическом канале с учетом ограничений передатчика и приемника. Использование в эксперименте одного когерентного приемника приводило к проблеме изменения параметров каждого оптического суб-канала, поэтому пришлось выполнять оптимизацию формата модуляции и скорости передачи для каждого суб-канала в отдельности, чтобы увеличить производительность системы.

Все это удалось достичь благодаря разработанному компанией Mitsubishi Electric оптическому трансиверу для формирования суперканала передачи со скоростью терабит в секунду. Трансивер формирует 11 поднесущих световых волн одновременно в одном канале. В традиционной системе передачи потребовалось бы 11 приемников для детектирования каждой поднесущей, в то время как здесь с этой задачей справился один трансивер. Как правило, при использовании множества поднесущих каждый сигнал подвергается различным искажениям. Чтобы избежать этой проблемы, исследователи из Mitsubishi Electric использовали пилот-сигналы для точной коррекции всех поднесущих в приемнике.

В эксперименте удалось достичь спектральной эффективности 9.2 бит/с/Гц, что является самым высоким значением в мире в системе передачи с одним оптическим приемником. Длина экспериментальной линии составила **5 км**. Однако исследователи уверяют, что их система будет успешной в предоставлении подобных скоростей не просто на сотни метров, необходимых для сетей центров обработки данных, но и на сотни километров, необходимых для магистральных сетей.



Позднее в октябре 2016 г. компания Nokia Bell Labs совместно с Alcatel-Lucent, используя все тот же метод вероятностного формирования сигнального созвездия PCS, добилась скорости передачи в оптическом волокне **65 Тбит/с** на расстояние **6600 км**, что эквивалентно передаче более 10 миллионов HDTV каналов одновременно.

Как утверждали исследователи, если бы их система сейчас стояла в реальной трансокеанской кабельной линии, то пропускная способность более чем в 13000 раз превышала аналогичное значение трансатлантической кабельной системы 1995 года.

Если помимо лабораторных экспериментов, вспомнить реальные коммерческие трансатлантические системы, то стоит отметить следующее достижение. В 2016 г. после почти двух лет строительства, Google вместе с консорциумом операторов телеком услуг, объявила о завершении проложенной по дну Тихого океана широкополосной кабельной системы "Faster" длиной 9000 километров, которая связывает Японию и западное побережье США. Эта подводная линия связи является самой быстрой в мире в своем роде, пропускная способность канала составляет 60 Тбит/с.

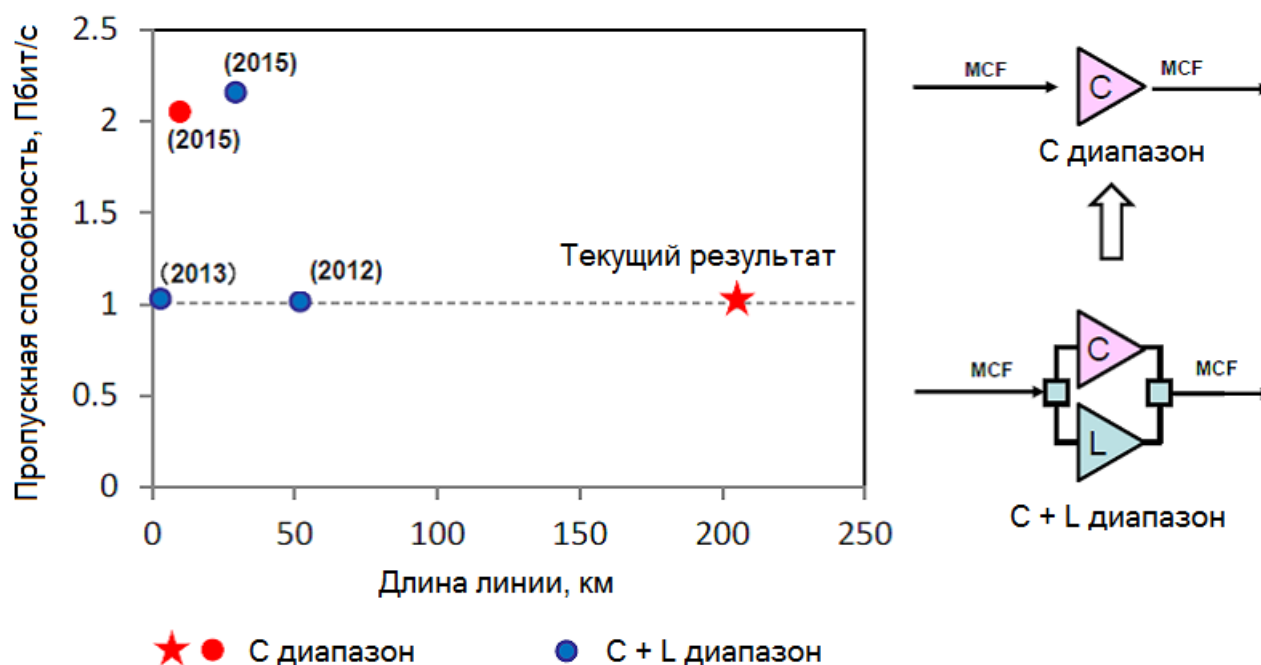
В консорциум, который осуществлял строительство, входят такие корпорации как Google, China Mobile International, China Telecom Global, KDDI (японская телекоммуникационная компания, оператор мобильной связи), Singtel (Singapore Telecommunications Limited) и NEC Corporation. Как член консорциума Google имеет доступ к паре волокон, по которым организовано 100 оптических каналов по 100 Гбит/с каждый.

Двигаемся дальше. На сайте китайской компании FiberHome можно найти сведения, что в 2016 г. ими было разработано новое оптоволокно, способное обеспечить емкость сети в 400 тераБайт в секунду. Здесь же отмечено, что при таких ошеломляющих результатах можно передавать за секунду 40 000 фильмов Blu-ray по 10 гигабайт. Или по одному такому волокну можно передавать телефонные звонки 4,8 миллиарда человек (Только представьте, одного такого волокна хватит даже в том случае, если одновременно будут разговаривать по телефону половина людей на всем Земном шаре).

Если внимательно проанализировать эти приведенные на сайте компании примеры, то наблюдаются нестыковки. Для организации 4,8 миллиарда стандартных цифровых телефонных каналов достаточно скорости не более 308 Тбит/с. С другой стороны, если взять за средний размер фильма качества Blu ray FullHD 10 ГБ, то получится, что для передачи 40 000 фильмов необходима пропускная способность как раз 400 терабайт. К сожалению, более подробной информации об этом волокне найти не удалось.

В 2017 г. Nippon Telegraph and Telephone Corporation (NTT) в сотрудничестве с Technical University of Denmark, Fujikura Ltd., Hokkaido University, the University of Southampton и Coriant GmbH продемонстрировала возможность создания системы передачи сверхбольших емкостей на несколько сотен километров с усилителями. Они построили экспериментальную систему с пропускной способностью 1 Пбит/с на 32-сердцевинном оптическом волокне, работающую на расстоянии 205.6 км.

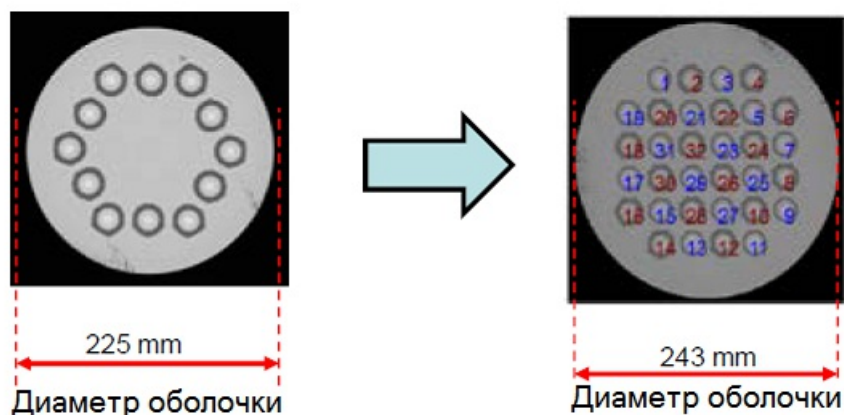
Таким образом, они установили новый мировой рекорд по дальности системы передачи в 1 Пбит/с с использованием оптического усилителя с одним частотном диапазоне C.



С такой скоростью можно передавать в секунду 5000 HD фильмов 2-х часовой продолжительностью на расстояние 1000 км (примерное расстояние между Екатеринбургом и Казанью). Используя 32 сердцевинное волокно, поляризационное мультиплексирование, технологию DWDM, многоуровневую модуляцию QAM-16 и цифровое когерентное детектирование сигнала исследователи добились пропускной способности 31.3 Тбит/с для каждой сердцевины (равно скорости 46 каналов по 680 Гбит/с каждый).

32-сердцевинное волокно получилось неоднородным, оно содержит сердцевинки с двумя различными

типами профилей показателя преломления и имеет структуру квадратной решетки. Это обеспечивает низкий уровень взаимных влияний между сердцевинами в том случае, когда их количество превышает 20.



Однородное 12 сердцевинное ОВ
с кольцевой структурой

Неоднородное 32 сердцевинное
ОВ с решетчатой структурой

Оптическая сеть включала 4 усилительных участка по 51.4 км. Таким образом, данные результаты демонстрируют возможность уже сегодня передачи 1-Пбит/с на расстояние более 200 км. Например, можно было бы организовать подобную оптическую линию между Екатеринбургом и Челябинском и передавать за секунду объем данных, содержащихся в стопке компакт-дисков высотой 3000 м.

В качестве дальнейшего улучшения своих результатов исследователи отмечают, что дальность передачи их системы может быть увеличена в будущем до 1000 км. Для этого с целью увеличения помехоустойчивости необходимо уменьшить канальную скорость оптического канала до 510 Гбит/с, тогда потенциал системы позволит увеличить расстояние передачи до тысячи километров.

P.S. У каждого свои рекорды, некоторые пытаются создать самые быстродействующие системы передачи, но у некоторых другие достижения.

Например, 54 летний итальянец Димитри Панцера в 2017 г. установил мировой рекорд по самому большому количеству шариков мороженого в одном вафельном рожке – 121 штука. Ему также принадлежит предыдущий рекорд – 109 шариков.



В 2017 г. также был установлен рекорд по наибольшей дистанции, на которую лошадь тащила

горящего человека. Австрийца лошадь протащила на целых 582 метра.



В заключение, хочется сказать еще об одном событии – в этом году Лама по кличке Каспа из Великобритании попала в книгу рекордов Гиннеса, прыгнув на высоту 1.13 метра.