

СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ПОДВОДНОЙ СВЯЗИ В МИРЕ И В РОССИИ

Часть 2

И.Лукин, к.т.н., главный научный сотрудник, председатель совета директоров ОАО "СУПЕРТЕЛ",
Е.Богданова, инженер ОАО "СУПЕРТЕЛ",
Е.Ганецкий, технический директор ОАО "СУПЕРТЕЛ",
А.Сигаев, к.ф.-м.н., начальник сектора ОАО "СУПЕРТЕЛ"/ Sigaevan@gmail.com,
И.Толстихин, начальник отдела ОАО "СУПЕРТЕЛ",
В.Удовиченко, к.т.н, ведущий научный сотрудник ОАО "СУПЕРТЕЛ"

УДК 621.39

Как показала девятая конференция SubOptic 2016, на отрасль подводной оптической связи надвигается глобальный дефицит емкости. Какие технические, организационные и экономические меры можно противопоставить этой угрозе?

ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

Глобальные коммуникационные системы быстро приближаются к фундаментальному пределу информационной емкости для существующих технологий передачи по оптическому волокну (ОВ). На сегодняшний день развитие кабельных сетей стимулируется падающей стоимостью передачи одного бита, но с 2020 года начнется сокращение возможностей роста емкости сетей. Емкость станет дефицитным товаром. Это негативно скажется на экономике: придется или нормировать пропускную способность, или повышать цены. В любом случае последствия для экономики будут разрушительными. В докладах были представлены основные пути преодоления этого ограничения.

Известная формула Шеннона для емкости линии передачи $C = B \log_2(1 + S/N)$ дает представление о том, что главным источником дополнительной емкости в волокне является полоса усиливаемых длин волн B . Отношение S/N в скобках находится под знаком логарифма, и выше некоторого значения его увеличение становится неэффективным, а выше формата модуляции 16 QAM отдача от этого слагаемого резко падает.

С этим простым представлением и связаны предложения по поиску резервов емкости.

Первым решением является **освоение L-диапазона**. Компанией TE SubCom продемонстрирована линия с технологией C+L для подводной системы и структура усилителя для этого диапазона с двухчастотной накачкой*. Достигнутая емкость линии составила 44 Тбит/с при дальности 9100 км.

Следующий шаг в преодолении лимита – **увеличение числа пар ОВ за счет увеличения световодящих жил в волокне**. В докладе ученых из корпорации NEC** были представлены результаты исследования предельной скорости передачи по волокну при ограничениях, обусловленных уровнем напряжения в линии, и найдены соотношения, связывающие общую емкость линии и напряжение питания. На рис.1 приведены графики из этой работы, демон-

* TU3.A4 Technology for C+L undersea systems, Stuart Abbott, Alexei Pilipetskii, Dmitri Foursa, Haifeng Li (TE SubCom).

** TH1.A1 Capacity limits of submarine cables Eduardo Mateo, Yoshihisa Inada, Takaaki Ogata, Satoshi Mikami, Valey Kamalov, Vijay Vusirikala.

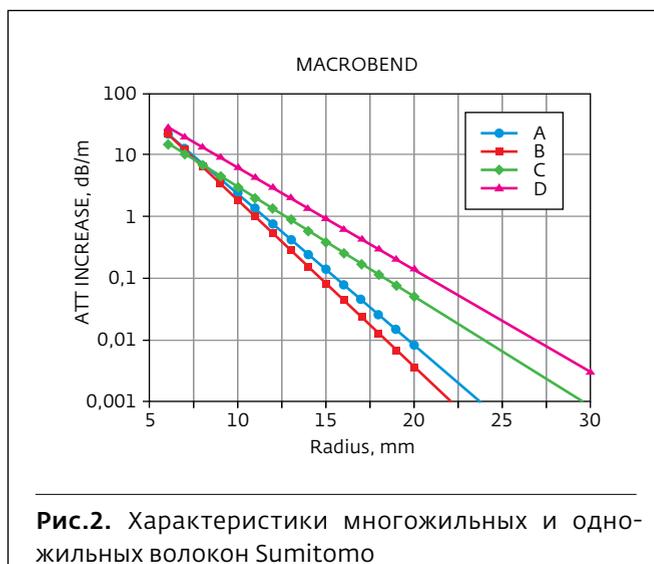
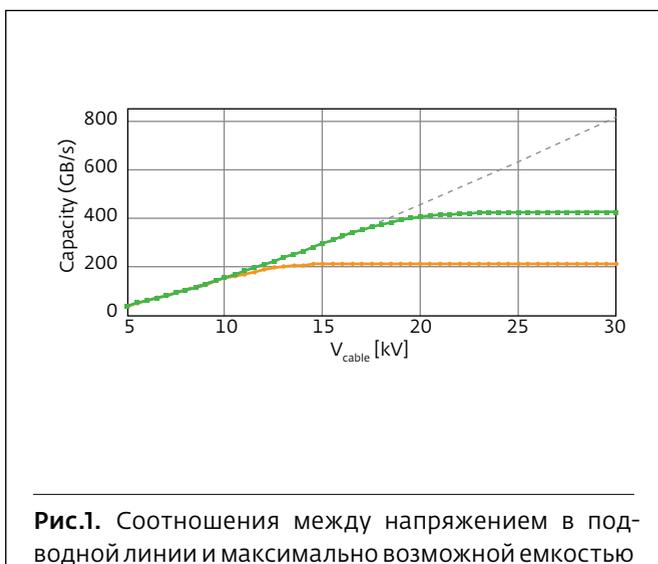


Таблица 1. Сравнение диаметра поля моды и эффективной площади моды волокон G.652 и перспективного волокна Corning

Тип волокна	MDF (мкм)	A _{eff} (мкм ²) (Вычисленная по MDF)
SMF-28e+fiber (G.652)	Среднее: 10,46	80,6
SMF-28 Ultra fiber (G.652)	Среднее: 10,51	83,6
Vascade EX3000 fiber	Нижний предел: 13,61 Среднее: 13,80 Верхний предел: 13,99	146,7 150,7 154,6

стрирующие предельную зависимость пропускной способности от напряжения в линии при различном числе пар волокон. Нижняя линия соответствует кабелю с шестью парами ОВ, верхняя – с 12 парами.

Промышленность уже разработала такие волокна. На рис.2 приведены образцы многожильных ОВ и их характеристики, представленные компанией Sumitomo. Как можно видеть из рисунка, площадь поля моды A_{eff} у новых волокон имеет увеличенные значения.

Увеличение допустимого уровня мощности в волокне. В связи с переходом к когерентной передаче сигналов требования к ОВ изменились. Если раньше большое внимание уделялось разработке волокон с контролируемой хроматической дисперсией и минимальной поляризационно-модовой дисперсией, то теперь главными требованиями становятся большая эффективная площадь и малое оптическое затухание. Если положительный эффект от уменьшения затухания очевиден, то увеличение эффективной площади требует повышенного внимания к чувствительности волокна

к изгибам и потерям на сращивание. Большая площадь моды позволяет поднять мощность в линии – следовательно, увеличить на 2–3 дБ OSNR на выходе. Ряд докладов был посвящен этой теме.

Новые волокна приносят и новые проблемы. Одна из проблем использования ОВ с увеличенной площадью моды – повышенные потери при сварке с волокнами, имеющими другие значения площади A_{eff}. В докладе компании Corning приводились сведения о решении проблемы сварки волокон различной апертуры – с большой площадью 150 мкм² поля моды Corning Vascade EX3000* и обычного G.652 (табл.1).

В результате получены потери, уменьшенные путем подбора режима вытяжки области сварки с 0,29 до 0,17 дБ для различных типов волокон, что сравнимо с потерями при сварке ОВ с одинаковым диаметром модового поля.

* TU1A.1 Reduction of splice loss between fibers with dissimilar effective areas Sergejs Makovejs, Aramais Zakharian, John D. Downie, Jason Hurley, Jeff Clark, Sergey Ten (Corning Incorporated).

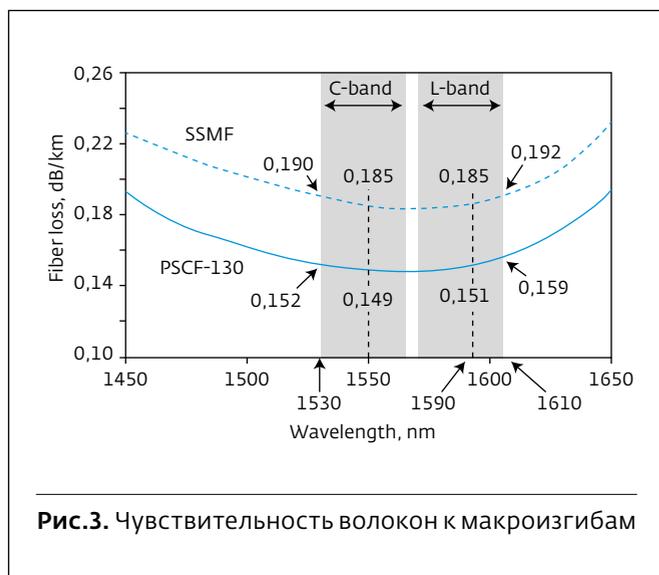


Рис.3. Чувствительность волокон к макроизгибам

Использование таких волокон создает также проблемы, связанные с избыточным затуханием на микро- и макроизгибах. Эти вопросы рассматривались в докладе Alcatel-Lucent Submarine Networks (TU1A.2)*. Компания провела исследования четырех типов волокна G.654 с площадью поля моды 110 (A), 110 (B), 130 (C) и 150 мкм² (D) (рис.3), и, благодаря оптимизации при выборе покрытия волокна, конструировании кабелей и соединительных коробок, удалось преодолеть проблемы высокой чувствительности волокон к изгибам.

Работы по созданию новых типов волокон для дальней подводной связи проводят многие компании. В докладе компании Sumitomo** были приведены результаты разработки ОВ с $A_{\text{eff}}=1330$ мкм² на длине волны 1550 мкм, которое отличают малые потери на изгибах и чрезвычайно низкие потери в диапазонах С и L. Спектральная зависимость потерь приведена на рис.4.

Большой объем исследований в том же направлении выполнен компанией OFS Fitel Denmark***. Новое поколение волокон TeraWave ULA с эффективной площадью от 129 до 153 мкм² на длине волны 1550 нм

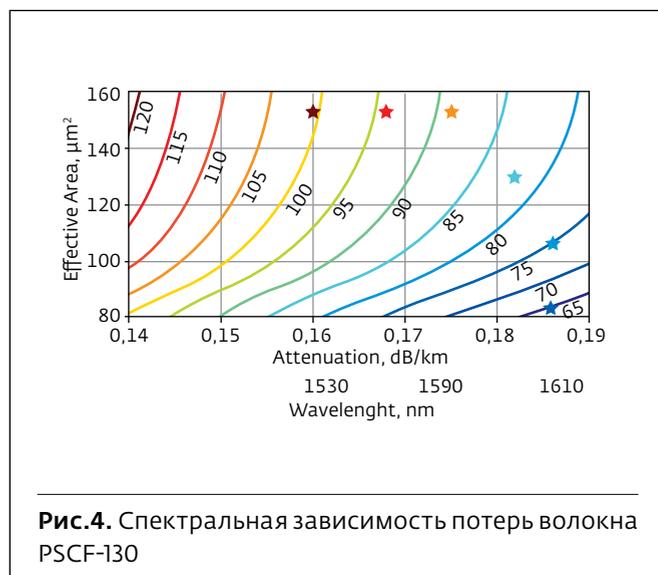


Рис.4. Спектральная зависимость потерь волокна PSCF-130

было разработано именно для когерентных систем. Увеличение площади моды стандартного волокна G.652 достигается увеличением диаметра сердцевины и уменьшением ее показателя преломления, но такой упрощенный подход приводит при изгибе волокна к очень плохим характеристикам вследствие слабых направляющих свойств этой структуры. В новых разработках в волокне имеется область низкого показателя преломления в оболочке, обладающая показателем преломления более низким, чем показатель преломления и сердцевины, и оболочки. В докладе описаны методы сравнения различных типов волокон по их чувствительности к изгибу и величине потерь, а также по потерям на сращивание.

Выбор оптимальной длины пролета между подводными усилителями. Одной из важнейших характеристик подводной линии является расстояние между усилителями. Компания OFS в докладе TU2A5**** отметила, что пролет между усилителями для подводных систем значительно короче (обычно около 50 км) по сравнению с наземными системами (порядка 100 км). В работе***** представлены графики (рис.5) (рассчитанные для линии длиной 6000 км, со скоростью передачи 32 Гбод, параметром $Q=10,5$, числом каналов 100,

* TU1A.2 Ultra-large effective area fibre performances in high fibre count cables and joints, a new technical challenge Florence Palacios, Romuald Lemaitre, Philippa Debeusscher, Chakib Bibelrhach (Alcatel-Lucent Submarine Networks).

** TU1A.3 Ultra low loss pure silica-core fiber for capacity expansion Takemi Hasegawa, Masaaki Hirano, Yoshiyuki Tamura, Yuki Kawaguchi, and Yoshinori Yamamoto, Sumitomo Electric Industries, Ltd.

*** TU1A.5 Cable and Splice Performance of 153 μm² Ultra Large Area Fiber for Coherent Submarine Links Ole Levring, David Peckham, Peter Borel, Kenneth Carlson, Alan Klein, Alan McCurdy, Kasyapa Balemarthy, Bill Hatton, Christian Larsen, Andrew Oliviero, and Robert Lingle, Jr. OFS Fitel Denmark.

**** TU2A5 Enabling fibre and amplifier technologies for submarine transmission systems Benyuan Zhu, David W. Peckham, Alan H. McCurdy, Robert L. Lingle Jr., Peter I. Borel, Tommy Geisler, Rasmus Jensen, Bera Palsdottir, Durgesh S. Vaidya, Man F. Yan, Patrick W. Wisk, and David J. DiGiovanni (OFS).

***** TU1A.5 Cable and Splice Performance of 153 μm² Ultra Large Area Fiber for Coherent Submarine Links Ole Levring, David Peckham, Peter Borel, Kenneth Carlson, Alan Klein, Alan McCurdy, Kasyapa Balemarthy, Bill Hatton, Christian Larsen, Andrew Oliviero, and Robert Lingle, Jr. OFS Fitel Denmark.

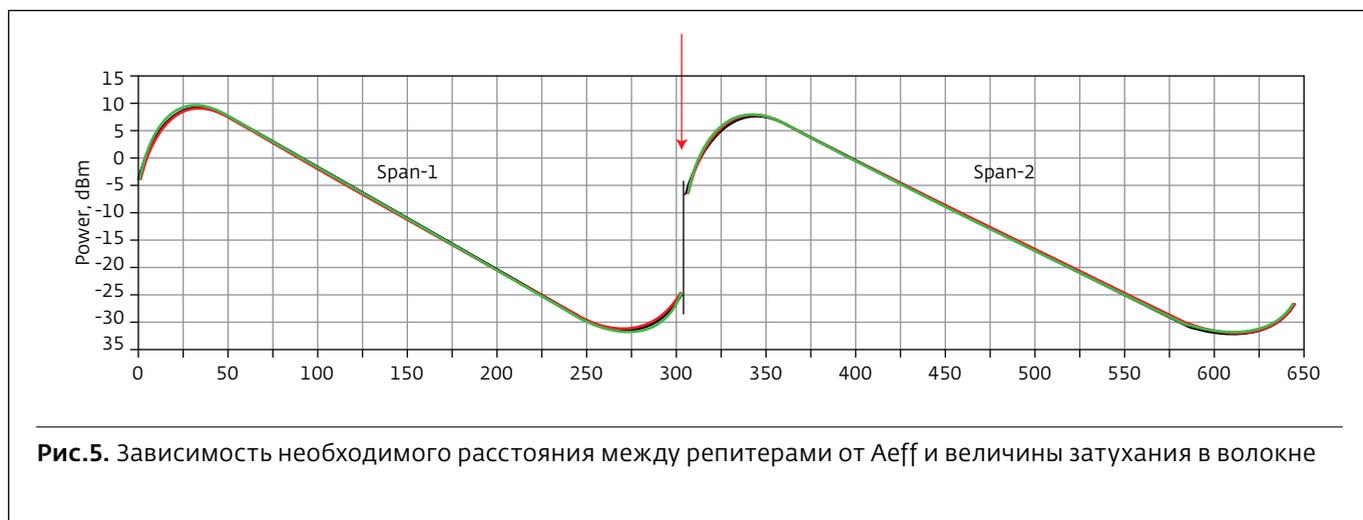


Рис.5. Зависимость необходимого расстояния между репитерами от A_{eff} и величины затухания в волокне

Таблица 2. Характеристики оптической системы

Параметр	Значение	Единица измерения
Затухание в ОВ	0,16	дБ/км
EDFA выходная мощность	18	дБм
Потери в пролете	10,2	дБ
Полное число каналов	228	–
OSNR на выходе	16	дБ

с коэффициентом шума усилителя 4,5 дБ, расстоянием между каналами 37,5 ГГц), показывающие зависимость необходимого расстояния между репитерами при различных значениях эффективной площади поля моды и различной величине. Из графиков можно заметить, что при затухании в волокне 0,19 дБ/км и эффективной площади моды менее 80 мкм² расстояние между репитерами по этим расчетам должно быть менее 60 км.

В заключение следует отметить, что волокно TeraWave ULA уже установлено на региональных и трансокеанских маршрутах в объеме более 250 000 км.

Об усилителе с полосой C+L сообщалось в совместном докладе Padtec S/A и Fondazione Cife (TU3A.3)*.

* TU3A.3 Highly efficient submarine C+L EDFA with serial architecture Douglas O. M. de Aguiar, Reginaldo Silva (Padtec S/A) Giorgio Grasso, Aldo Righetti, Fausto Meli (Fondazione Cife).

Технические характеристики линии приведены в табл.2.

Сравнивая значения потерь в волокне и потери в пролете, получаем, что длина пролета в этой оптической системе была принята равной 64 км. Выбор оптимального значения длины пролета требует учета большого числа факторов (в других статьях мы подробнее остановимся на этом вопросе).

Применение сложных гибридных схем усиления сигналов. Группа ученых из Extera и Fraunhofer Institute** предложила сравнить стандартную реализацию линии с усилителями EDFA с преимуществами гибридного рамановского усилителя.

В докладе были приведены относительно простые соотношения для оценки выгоды, приносимой гибридным усилителем, состоящим из усилителя Рамана и EDFA, по сравнению с линией, использующей только EDFA, и приходят к выводу, что гибридные системы могут давать значительное преимущество в длине пролета и емкости системы. Необходимо только тщательно оценивать эти преимущества для каждой конкретной реализации.

Относительно простые аналитические формулы, приведенные в докладе, позволяют вычислить искажения, вызванные шумом усилителя и нелинейностями Керра. Допустимая длина пролета может быть увеличена от 17 до 42%.

** TU 3A.5 Application and Benefits of Raman-Enhanced Amplification Schemes in Tomorrow's Optical Submarine Systems Markus Nölle, Colja Schubert, Lutz Mölle, Ronald Freund (Fraunhofer Institute for Telecommunications, Heinrich-Hertz-Institut), Andrew Robinson, Steve Desbruslais, Joerg Schwartz (Xtera Communications) Telecommunications, Heinrich-Hertz-Institut), Andrew Robinson, Steve Desbruslais, Joerg Schwartz (Xtera Communications).

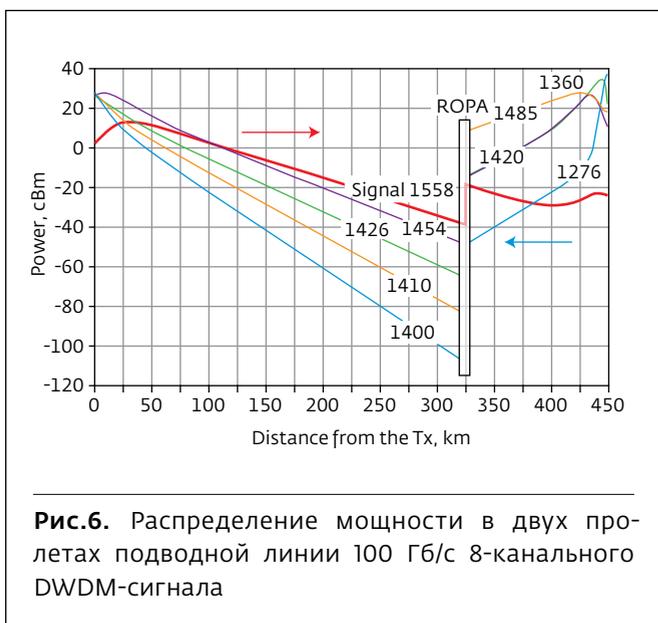


Рис.6. Распределение мощности в двух пролетах подводной линии 100 Гб/с 8-канального DWDM-сигнала

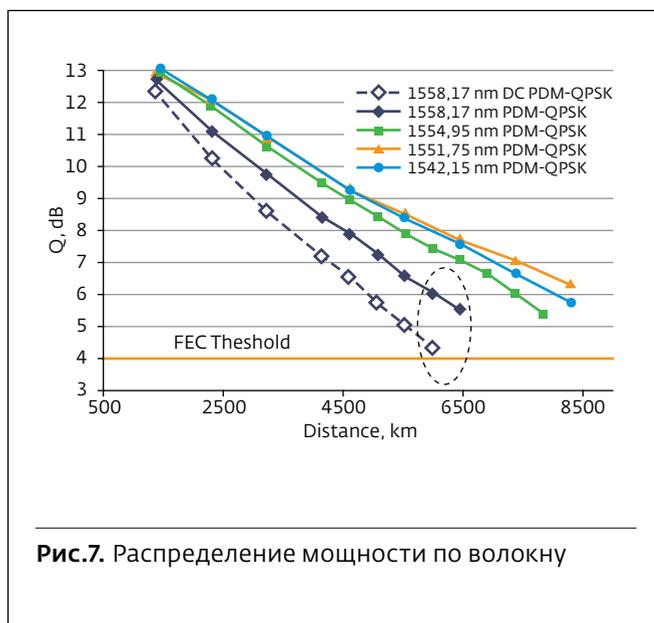


Рис.7. Распределение мощности по волокну

Однопролетные линии. При решении некоторых задач передачи сигнала без повторителей между пунктами, где установка активных элементов нежелательна или невозможна, требуется максимально увеличить длину пролета, идя даже на ухудшение качества линии. В некоторых докладах, посвященных проектированию однопролетных линий, приводились достижения по решению этой задачи путем комбинации усилителей EDFA и рамановских, в том числе с удаленной накачкой (ROPA).

Так, в докладе* Xtera Communications и C&W Networks на основе опыта развития сети последней рассматриваются новые тенденции в развитии подводных сетей. Один из этих путей – обновление оборудования на проложенных коммуникациях. В качестве опыта развития системы путем замены старого оборудования на репитеры рассматривается система ARCOS-1, самый длинный участок которой в 647 км пересекает Мексиканский залив и состоит из двух пролетов.

Распределение мощности в двух пролетах подводной линии, где подводное терминальное оборудование было заменено на линейные усилители EDFA в комбинации с попутными и встречными рамановскими усилителями, приведено на рис.6. Один пролет составляет 305 км волокна G.652D (59,7 дБ), а второй – 342 км волокна G.654C (60,8 дБ).

Специалисты компании Infinera в своем докладе** сообщили об опыте передачи сигнала 6 × 50 ГГц без повторителей через волокно с затуханием 85 дБ, с использованием сонаправленного усиления Рамана и ROPA и улучшенной матричной модуляции BPSK (Matrix Enhanced BPSK). Использовалось волокно TeraWave Large Area Core 130 мкм² с затуханием 0,184 дБ/км. Накачка создавалась при помощи четырех лазеров на длинах волн 1400, 1410, 1426, 1454 нм. Карта распределения профиля мощности по волокну приведена на рис.7.

Рисунок дает представление о том, что подобная технология требует очень тщательного проектирования, выбора длин волн накачки и их мощностей. Полученный результат – до 461 км без повторителя.

В докладах TU2A3*** и TU2A4**** приводятся результаты исследований, позволяющих увеличить длину пролета за счет использования технологий распределенного рамановского усиления и тщательного проектирования местоположения ROPA в линии в комбинации с EDFA. Компания

* TU2A.1 Evolution of repeatless systems architectures Philippe A. Perrier (Xtera Communications, Inc.), Jack T. Lyons (C&W Networks).

** TU2.A2 Transmission over unrepeated 85 dB fiber link using advanced modulation format Xiaohui Yang, Lei Zong, Pierre Mertz, Abdullah Karar, Emily Abbess, Han Sun, Kuang-Tsan Wu, Michael Guess, Serguei Papernyi (MPB Communications Inc.) Infinera Corporation.

*** More than 30 dB Budget Improvement in Unrepeated 100 GHz Links Serguei Papernyi, Wallace Clements, Bernard Shum-Tim, MPB Communications Inc.

**** Amplification technologies supporting upcoming modulation formats in unrepeated links Nelson Costa (Coriant Portugal), Lutz Rapp (Coriant R&D GmbH).

Xtera достигла однопролетной передачи одного канала 100 Гбит/с через 626,8 км в лабораторных условиях. Общие потери в линии 100,8 дБ, включая потери на сварках и коннекторах. В этом эксперименте достигнут потолок однопролетной дальности передачи 100 Гбит/с.

Форматы модуляции. Исследования привели к разработке новых форматов модуляции и алгоритмов FEC для оптимизации спектральной эффективности линейных плат и общей емкости волокна. Эти технологии сейчас внедряются в следующее поколение DSP-чипов, позволяя увеличить емкость существующих систем и новых кабелей.

Общая емкость волоконных пар может быть оптимизирована при использовании функции изменяемой спектральной эффективности (VSE - variable spectral efficiency) каждой линейной карты с учетом возможности передающей линии. Эта технология может быть применена там, где свойства каналов значительно меняются в зависимости от частоты - при приеме сигналов в полосе C+L или в случае поступления на OADM сигналов с различных расстояний. Ведущие производители выпускают оборудование, поддерживающее форматы, включающие в себя BPSK, QPSK, 8-QAM, 16-QAM, чтобы иметь возможность изменять скорость в канале в диапазоне от 50 до 200 Гбит/с с шагом 50 Гбит/с. Возможно, что при использовании кодовой или гибридной модуляции размер шага может быть уменьшен с 50 до 25 Гбит/с.

Планы мирового сообщества по устранению дефицита емкости

По мнению участников SubOptic 2016, уже сейчас доступны такие пути решения проблемы дефицита емкости, как использование гибких узлов, поддерживающих разные форматы модуляции для обеспечения наивысшей доступной спектральной эффективности; применение эффективных форматов модуляции, расстояния между каналами, использование возможностей управления огибающей спектра сигнала; задействование общего аппаратного и программного обеспечения для изменения форматов модуляции; компенсация нелинейности первого поколения.

В ближайшее время будут доступны: уменьшение штрафа реализации для более высоких форматов модуляции; более эффективное использование пространства и плотности мощности; тщательно проработанные форматы модуляции и кодированные схемы модуляции; улучшенная нелинейная компенсация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На SubOptic 2016 обсуждалось и много других вопросов, охватывающих весь спектр деятельности, связанной с подводными коммуникациями. Подводя ее итоги, необходимо отметить, что мы находимся накануне важного этапа развития отрасли - глобального дефицита кабельной емкости. К этому этапу мировая отрасль подводной оптической связи подошла с большим запасом решений для преодоления возможного кризиса, что относится и к разработке новых ОВ, и к освоению новых диапазонов, и к достижению максимальных расстояний в однопролетных системах, и к исследованию новых форматов модуляции и новых возможностей по корректированию ошибок, оптимизации структуры многопролетных линий, к исследованиям в области надежности и строительства кабельных сетей и т.д. Следует отметить, что очень сильную позицию в теории и в экспериментальных результатах в иностранных компаниях занимают выходцы из России. На конференции безусловными лидерами были В.Камалов вместе с А.Пилипецким, а по результатам работы конференции последний был признан лучшим докладчиком. Также над этой тематикой работают Д.Фурса, В.Синкин и др.

Проложенные ранее системы модернизируются, большое внимание уделяется технологии производства работ на "мокрых сетях" - под водой. Можно ожидать, что в ближайшем будущем произойдет существенное усложнение структуры сетей, из структуры линий "точка-точка" они превратятся в действительно разветвленную глобальную коммуникационную сеть.

На фоне этих процессов состояние российского сегмента мировой сети выглядит плачевно. На развитие проекта "Поларнет" за 17 лет (!) потрачено, по материалам печати, около 55 млн. долл., что по сравнению с масштабами зарубежных инвестиций ничтожно мало. При этом инвестирование, проектирование и строительство были ориентированы на зарубежные источники. Такой подход не отвечает сегодняшним экономическим и политическим реалиям.

Необходимо сделать кардинальный поворот в сторону разработки и производства собственного оборудования, технологии и материалов. Для этого есть и опыт прошлых лет, и новые разработки. Требуется государственный подход и стратегическое мышление. ■