

# FSO НА "ПОСЛЕДНЕЙ (И НЕ ТОЛЬКО) МИЛЕ"

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

**Б**еспроводные атмосферные оптические линии связи (АОЛС, FSO – Free Space Optics) уже хорошо известны и распространены как средство доставки трафика на "последней миле". АОЛС применяют также в качестве резервной, аварийной, временной и оперативной связи.

АОЛС применяются как операторами связи и провайдерами, так и корпоративными клиентами. Обусловлено это такими известными преимуществами, как высокая скорость передачи информации, быстрота развертывания, скрытность передачи, отсутствие лицензирования оптического диапазона, высокая помехозащищенность, широкий диапазон рабочих температур и др. Основной недостаток АОЛС – зависимость доступности канала связи от погодных условий. Главные "враги" атмосферной оптической связи – это туман, смог, снег и другие факторы, снижающие видимость на трассе связи и определяющие статистику доступности беспроводного оптического канала связи. Например, в условиях средней полосы России доступность беспроводного соединения по критерию 99,7% для FSO-оборудования Artolink M1 FE-2A (Fast Ethernet) обеспечивается на расстояниях до 1,3 км [1].

Вместе с тем, постоянно возникает потребность в использовании оптических каналов связи и на большие расстояния. АОЛС зачастую устанавливают на расстояниях в несколько километров (более 20% оборудования Artolink эксплуатируется на дистанциях более 2,5 км). Максимальное расстояние использования оборудования – 6,5 км [2], однако доступность канала в таких условиях снижается. Для поддержания высокой надежности соединения в [1, 3] предлагалось использовать резервный радиоканал на базе систем широкополосного доступа. Но некоторые проблемы мешают реализации такого решения. Это, во-первых, довольно ощутимое различие скоростей передачи информации по оптическому и радиоканалу. Во-вторых, возникает необходимость решить проблемы по скорости переключе-

ния между каналами и наличию "мертвого" времени (когда оптический канал уже не работает, а радиоканал еще не включился). Как показала практика, решение этих задач не тривиально. Во всяком случае, попытки использования представленного на рынке Wi-Fi-оборудования не привели к положительным результатам [3]. Только использование технического решения на базе специально откалиброванного оборудования "Рапира" позволило получить приемлемые на практике результаты. В настоящей статье приведены предварительные результаты шести месяцев испытаний в реальных условиях гибридного радиооптического оборудования Artolink M1 FE-2A-R, поставки которого начались уже в начале 2008 года.

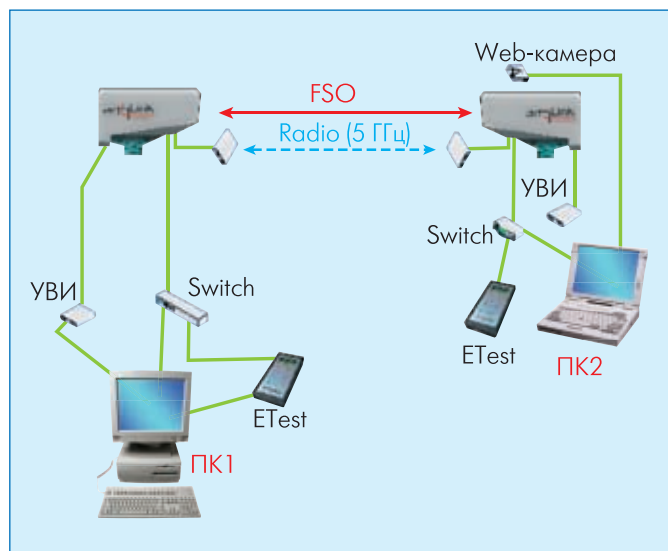


Рис. 1 Схема измерений гибридного канала связи

## СХЕМА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Опытная линия связи была развернута на пролете длиной 4,5 км. Трасса выбрана не случайно – на пути следования луча расположены заливные луга с двумя водоемами, из-за которых в межсезонье случались частые туманы, а летом – восходящие тепловые потоки. В состав оборудования Artolink M1 FE-2A-R входили два серийных приемопередающих модуля (ППМ) с интерфейсом 100BASE-TX и поддержкой технологии "двойного канала" и откалиброванное для работы в качестве резервного канала оборудование greWiMax, выполненное на основе продукции НПО "Рапира". Один ППМ был закреплен на стационарной опоре на крыше 6-этажного промышленного здания, другой – на алюминиевой треноге на балконе четвертого этажа жилого дома по временной схеме. Питание осуществлялось по штатной схеме от устройства внешнего интерфейса (УВИ) с использованием кабеля длиной 50 м. Схема включения измеряемого и тестового оборудования приведена на рис.1.

Образующие оптический канал связи ППМ через свои первые порты были подключены к коммутаторам Fast Ethernet. Ко вторым портам ППМ подключались модули радиоканала "Рапира", образующие резервный канал на частоте 5,8 ГГц. С обеих сторон канала к коммутаторам были подключены тестеры Ethernet ETest [4, 5] и два компьютера. Компьютер ПК1 управлял процессом тестирования и мониторингом канала, а к ПК2 была подключена WEB-камера для наблюдения за трассой и хранения изображений.

В процессе непрерывной работы оборудования снимались следующие данные:

- параметры состояния обоих ППМ FSO-оборудования (вид рабочего в данный момент канала, температура внутри ППМ, параметры системы целеуказания и наведения);
- изображения трассы, полученные от Web-камеры;
- значения потерь пакетов, классификация секундных интервалов и значение эквивалентной битовой ошибки BER, поступающие от тестеров канала Ethernet [5].

Из полученных данных формировалась база первичных значений параметров. Периодичность записи в базу состав-

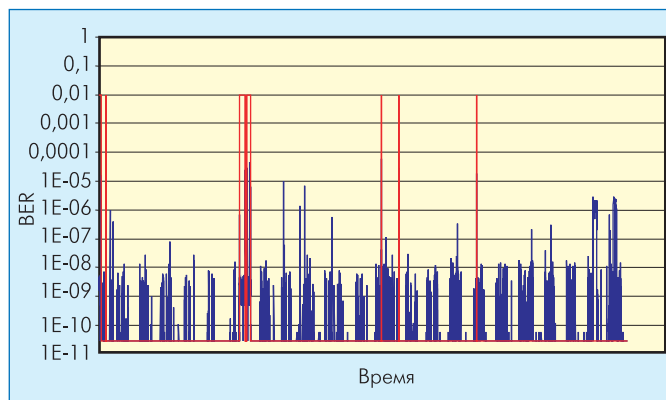


Рис.2 Уровень BER и динамика переключений на резервный канал (октябрь, 2008 г.)

ляла 3 мин. Общее время записи шесть месяцев – с мая по октябрь 2008 года. В течение этого времени с помощью двух тестеров Ethernet ETest проводились генерация тестового трафика и анализ его прохождения по каналу связи. Тестовый трафик представлял собой трехминутные сеансы непрерывного следования пакетов Ethernet с длиной 1518 байт и минимальным межпакетным интервалом согласно стандарту IEEE 802.3u.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

В качестве примера первичных данных на рис.2 приведена зависимость эквивалентного BER\* в канале от времени, построенного с трехминутным шагом за октябрь 2008 года. Значения эквивалентного BER (синие линии) измерены по методике, приведенной в [5]. Вертикальными красными линиями отмечены моменты перехода на резервный канал и обратно, т.е. время работы на резервном канале.

На основе таких данных за весь период наблюдения был произведен расчет усредненных характеристик канала (см. таблицу). Из таблицы видно, что реальные результаты по доступности только оптического канала связи оказались лучше расчетных значений, приведенных в [1]: 98,67% вместо ожидаемых 95,5%. Возможно, это связано с тем, что в период на-

\*BER (Bit Error Ratio) – битовая ошибка – отношение количества утерянных бит к общему количеству переданных бит.

Расчет усредненных характеристик канала связи за весь период наблюдения (в %)

Месяц	Доля времени работы линии по резервному каналу	Доступность канала связи без учета резерва	Доступность канала связи с учетом резерва	Расчетная доступность канала связи с "холодным" резервом
Май	0,676	99,324	99,9925	99,850
Июнь	1,421	98,579	99,9842	99,684
Июль	0,652	99,348	99,9928	99,855
Август	0,062	99,938	99,9993	99,986
Сентябрь	2,375	97,625	99,9736	99,472
Октябрь	2,290	97,710	99,9746	99,491
Средние значения за 6 месяцев	1,327	98,673	99,9853	99,705

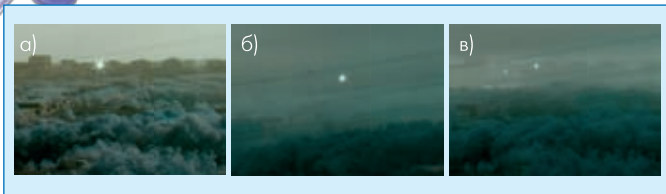


Рис.3 Вид трассы в ясную погоду (а), в сильный ливень (б) и в туман (в)

блюдений не попали зимние месяцы. Использование резервного канала на основе откалиброванных решений позволяет существенно поднять доступность канала – практически до 99,99%. Это оказалось возможным благодаря тому, что время переключения составляло не более 2 с. Критерием переключения на резерв являлось значение ошибки более  $10^{-4}$ , а критерием возврата на оптический канал – 10 с безошибочной работы оптического канала.

В таблице для сравнения приведены также расчетные (пересчитанные) значения в предположении, что оборудование резервного канала будет находиться в холодном резерве (без подачи питания). В этом случае время переключения возрастает до 40 с и результирующая доступность канала составляет только 99,7%.

Следует отметить, что полученные значения доступности гибридного канала связи зависят от качества оптического канала, поскольку интегральная доступность гибридного канала по существу определяется потерями времени на переключение. Использование в качестве основного оптического канала FSO-оборудования Artolink позволило получить такие высокие значения на столь длинном пролете, причем без принятия специальных мер по закреплению оборудования. Этот результат обусловлен следующими, реализованными в оборудовании техническими решениями:

- применена система наведения, которая автоматически наводит ППМ друг на друга с максимальной точностью (0,08 мрад) независимо от подвижности опоры, на которой закреплено FSO-оборудование;

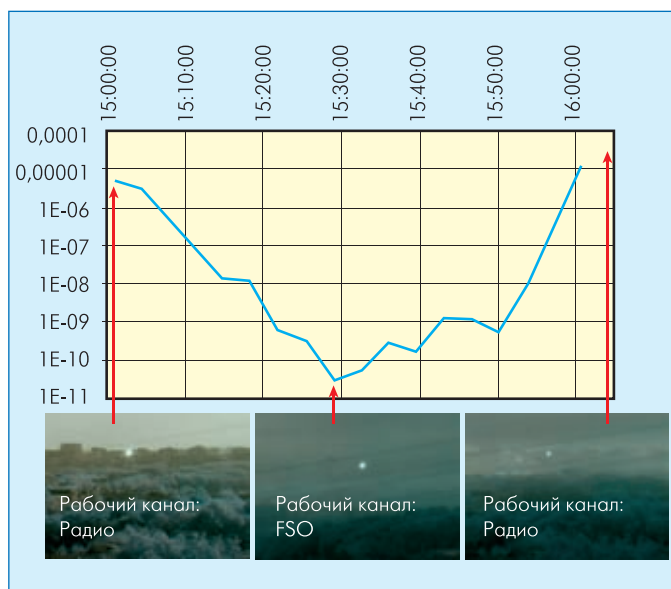


Рис.4 Динамика ошибок в тумане

- использованы три синфазных передатчика с узкой диаграммой направленности излучения (0,55 мрад), что позволило бороться с турбулентностью атмосферы при работе на дистанциях более 1 км;
- встроена защита от солнечной засветки;
- производится мощная селекция оптических помех в канале приема;
- использован оптический приемник с малым углом поля зрения (3 мрад);
- применена технология последовательного кодирования с многократным дублированием символов на основе HQN-турбокодов, специально адаптированная под передачу данных через атмосферу в период ухудшения видимости (туман, снег);
- в приемопередающем тракте оборудования реализована новая собственная технология асинхронной передачи данных, исключая паразитное воздействие фазового шума, свойственное системам с классической PLL\*;
- встроены механизмы контроля ошибок в оптическом канале с алгоритмом переключения между каналами на основе программно-аппаратных средств.

Все эти меры позволили минимизировать количество переключений и время работы на резервном канале и получить более приемлемую цифру доступности канала.

Интересны результаты сопоставления уровня ошибок с видимостью на трассе, зафиксированной камерой видеонаблюдения. На рис.3 приведен вид трассы в ясную погоду (а), в сильный ливень (б) и в туман (в). При сильном ливне и тумане BER в оптическом канале составляла  $(2-6) \cdot 10^{-6}$ . Видимость на трассе в дождь существенно ниже, чем в туман, при одинаковом уровне BER. Это подтверждает значительно меньшее влияние дождя на оптические каналы по сравнению с туманом.

Проведенные измерения позволили выявить ряд интересных динамических эффектов, связанных с прозрачностью оптического канала. Например, на рис.4 показана ситуация (08.10.2008), когда наблюдалось временное "просветление" оптического канала связи при сильном тумане. График иллюстрирует переход с резервного на оптический канал и обратно по мере ухудшения видимости. С соответствующими значениями ошибок сопоставлены виды трассы, зафиксированные видеокамерой.

График динамики ошибок показывает, что характерное время существенного роста уровня ошибок (с  $10^{-9}$  до  $10^{-6}$ ) составляет около 10 мин. В данной ситуации (как показали исследования, довольно типичной) снижение частоты в оптическом канале и переход на меньшую скорость передачи (к примеру, на 10 Мбит/с) практически бесполезны. Это дает выигрыш работы FSO-оборудования не более чем на 10 мин, после чего связь все равно прервется. И это без учета реакции коммутационного оборудования, транспортных протоко-

\*PLL (Phase-Locked Loop) – фазовой автоподстройкой частоты.

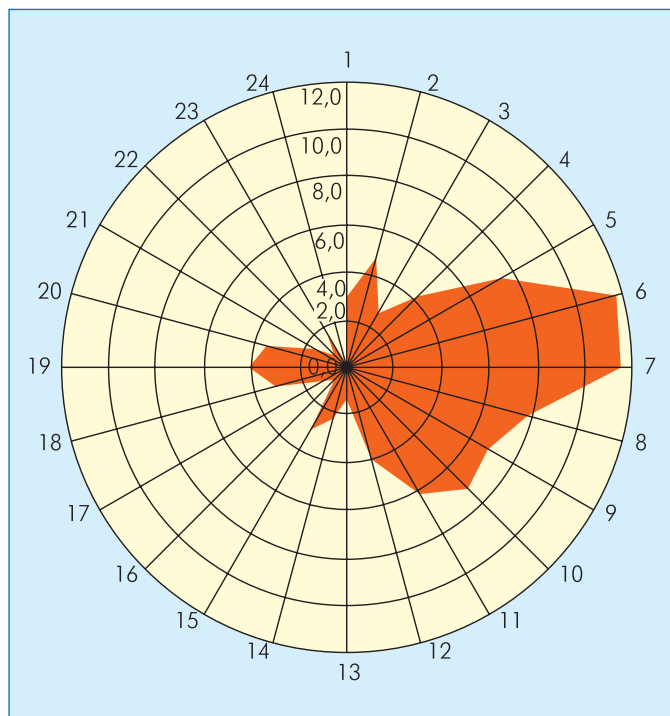


Рис.5 Распределение переключений на резервный канал по времени суток за 6 месяцев

лов и реакции прикладного программного обеспечения на снижение скорости.

В заключение приведем анализ распределения переключений на резервный канал по времени суток. Результаты обработки данных, полученных за шесть месяцев, приведены на рис.5. Из распределения видно, что основная масса прерываний оптического канала приходится на время суток с 2 часов ночи до 8 утра, что важно учитывать при планировании канала связи и необходимости его резервирования. Необходимость и способы резервирования канала связи определяются его применением. Например, при использовании в корпоративных сетях перерывы связи в нерабочее время могут быть вообще незаметны.

Статистические результаты работы совмещенного беспроводного канала связи (оптического и радиоканала) на трассе 4,5 км убедительно подтверждают высказанную ранее гипотезу [1] о высокой надежности такого решения. Практически, FSO-оборудование любого производителя не позволяет на столь длинных пролетах получить приемлемую надежность канала связи.

Введение в его состав относительно доступного радиоканала позволяет поднять надежность соединения практически до уровня операторской надежности. При этом в течение более 96% времени обеспечивается канал с пропускной способностью, равной волоконно-оптическим соединениям. И только небольшой процент времени оптический канал работает на скоростях, характерных для радиосвязи (т.е. порядка 10 Мбит/с).

Наиболее критическим моментом использования резервного канала с пониженной скоростью передачи является

ситуация, когда объем трафика, передаваемого по линии связи в момент переключения, превосходит возможности передачи данных в этом канале. Очевидно, что реакция на резкое уменьшение пропускной способности соединения зависит от поведения работающих в данный момент приложений. Этот вопрос, безусловно, требует дополнительного изучения. Однако полученные результаты показывают, что время работы резервного канала – это часы наименьшей нагрузки (ночное и утреннее время). Это позволяет применять такие каналы связи даже в ответственных приложениях, так как переход на пониженную скорость передачи пользователь может не ощутить.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вишневский В., Кузнецов С., Лаконцев Д., Поляков С. Гибридное оборудование на базе радио- и лазерной технологий. – Первая миля, 2007, № 1.
2. www.mostkom.ru.
3. Поляков С.Ю., Кузнецов С.Н. Беспроводная связь – вопросы выбора. – Системы абонентского доступа, ТСС, 2007, специальный выпуск.
4. Есенин А.С., Кузнецов С.Н., Огнев И.В., Паршин А.А., Поляков С.Ю. Комплексный анализ качества каналов Ethernet. – Технологии и средства связи, 2006, № 2.
5. Кузнецов С.Н., Поляков С.Ю. Методика тестирования каналов связи Ethernet. – Технологии и средства связи, 2005, № 4.