Сколько стоят 10-гигабитные радиорелейные линии?

Радиомосты с индексами 10G или 10GE из экзотики становятся серийной продукцией - на начало 2020 года на глобальном рынке их предлагали где-то десятка полтора производителей (и это число постоянно растет). Примерно треть или даже половина из числа этих вендоров представлены в России.

На фото испытания 10-гигабитных РРЛ на трассе 1.5 км. Источник: Deutsche Telekom

Учитывая, что в бюджете любого операторского проекта стоимость линии связи - важная составляющая капитальных затрат, то вполне естественно, что цена - ключевой параметр, влиявший на решение о покупке. "Каковы сегодня цены на магистральный радиомосты 10Гбит/с? И как цена соотносится с реальной пропускной способностью и дальностью связи?". Эти вопросы интересует многих провайдеров.

Спойлер для тех, кто торопится узнать ответ: по оценкам автора, базовые цены (так называемые, "street price") на 10-гигабитные РРС - от 10 до 20 тыс. долларов в рублевом эквиваленте. Да, такие цены, конечно, вызывают неприятие у многих покупателей, но это оборудование магистрального класса. Названные цифры могут быть оспорены теми участниками рынка, кто в определенной ситуации купил или продал дешевле (или дороже), но когда дело доходит до запроса цен у поставщиков, то стандартные цены по прайсу оказываются близки к указанному диапазону.

Почему такой разброс? Давайте разберемся: радиорелейные линии (РРЛ) - это рыночный товар, и цена зависит от многих факторов, хотя их можно свести к трем самым важным:

1. Реальной пропускной способности РРЛ;
2. Дальности радиосвязи 10 Гбит/с с доступностью канала 99.9% и выше;
3. Комплектности поставки с учетом ценовой политики продавцов.

Пропускная способность должна быть 10 Гбит/с Full Duplex

Хотя многие радиорелейные линии (РРЛ) позиционируются как 10G или РРЛ с интерфейсом 10GE (10 Gigabit Etehrnet), далеко не у всех моделей реальная пропускная способность достигает величины 10 Гбит/с в режиме полного дуплекса даже при идеальных условиях. Довольно много радиомостов с индексом 10G/10GE изначально спроектированы под максимальную пропускную способность 2,5-7 Гбит/с, и об этом может быть сказано в спецификации (надо читать мелкий шрифт и дотошно расспрашивать поставщика).

Известный американский производитель LightPointe специально акцентирует у себя на сайте, что у конкурентов существуют маркетинговые уловки, в которых РРЛ представляется как 10G, но при этом реальная пропускная способность ниже в два раза - просто в рекламе она удваивается ввиду того, что "это же дуплекс". Другие вендоры, как пишет LightPointe, включают в общую пропускную способность все стандартные издержки протокола Ethernet, включая накладные расходы на исправление ошибок - в рекламе такая РРЛ выглядит солидно, но на сети скорость передачи будет скромнее. Соответственно, такие РРЛ стоят дешевле моделей с реальной пропускной способностью 10 Гбит/с Full Duplex.

На фото 10-гигабитные РРЛ компании ДОК (Санкт-Петербург). Источник: ДОК

Идем дальше. Если нужен канал именно на 10 Гбит/с Full Duplex, стоит рассматривать РРЛ только двух частотных диапазонов - 60 ГГц (V-band) и 70-80 ГГц (E-band). В иных диапазонах ширина частотного спектра, выделенного госорганами (регуляторами) для гражданских радиорелейных систем, не позволяет реализовать пропускную способность 10 Гбит/с при современном уровне технологий (речь идет о серийно выпускаемом оборудовании).

В России диапазон "60 ГГц" выделен в границах 57-66 ГГц, а "70-80 ГГц" - в границах 71-76/81-86 ГГц. Роскомнадзор для этих диапазонов разрешает использование радиорелейных станций (РРС) без получения частотных присвоений. Причем для РРЛ диапазона 60 ГГц вообще не нужна регистрация (если у оборудования EIRP-мощность менее 40 дБм), а для диапазона 70-80 ГГц требуется только простая уведомительная регистрация. Поэтому РРЛ этих двух диапазонов прежде всего рассматриваются операторами как вариант построения радиоканала или бэкап для оптики.

Второй фактор цены - дальность радиорелейной линии

Если речь идет о дальности РРЛ более 1 километра, диапазон 60 ГГц (V-band) - отбрасываем сразу (по крайней мере, в России в 2020 году). Ввиду сильного ослабления сигнала в атмосферном кислороде 18 дБ/км (70 раз), радиорелейные линии в диапазоне V-band относятся к РРЛ малого радиуса действия.

Следует отдельно сказать о законодательных ограничениях, наложенных в диапазоне 57-66 Гц на эквивалентную изотропно-излучаемую мощность передатчика с антенной (ЭИИМ, англ. EIRP - Equivalent Isotropically Radiated Power). Впервые этот параметр был нормирован FCC в США в 2001 году и затем скопирован регуляторами других стран в свое локальное законодательство. В России сейчас действует калька первоначальной редакции ограничений EIRP, действовавших в США с 2001 по 2013 год - это 40дБм на передатчик. Впоследствии в США разрешенный уровень EIRP подняли до 82 дБм (в 10 тыс. раз больше 40дБм), а в Европе (регулятор ETSI) - до 55 дБм. Американский регулятор FCC, поставив предел EIRP в 82 дБм, по сути сказал своим производителям РРЛ:

> "Вот вам карт-бланш, делайте такую мощность, какую сможете".

ГКРЧ России пока не отреагировал на нововведения FCC и ETSI в части увеличения мощности по параметру EIRP. При соблюдении действующих в РФ ограничений EIRP, дальность РРЛ диапазона 60 ГГц будет совсем невелика - сотня-другая метров с учетом фактора дождевых осадков. Параметр EIRP считается по формуле:

$$\mathrm{EIRP}_{\mathrm{dBm}} = G_{\mathrm{dBi}}^{\mathrm{Tx}} + P_{\mathrm{dBm}}^{\mathrm{Tx}}$$

Где:

$G_{\mathrm{dBi}}^{\mathrm{Tx}}$ - усиление передающей антенны, $P_{\mathrm{dBm}}^{\mathrm{Tx}}$ - мощность передатчика.

Для примера расчетов зададимся мощностью передатчика 17 dBm и условиями "без дождя", тогда максимальная разрешенная дистанция для частоты 66 ГГц в зависимости от регуляторных

ограничений EIRP будет выглядеть вот так (затухание в кислороде 1.2 дБ на км при 66 ГГц):

	Россия	Европа, UK	США
EIRP (дБм)	40	55	82
Усиление антенны (дБ)	23	38	65
Расстояние (м)	113	2550	29800

Для частоты 62 ГГц затухание в кислороде 6 дБ на км, и максимальная разрешенная дистанция для частоты 62 ГГц в зависимости от EIRP будет следующей:

	Россия	Европа, UK	США
EIRP (дБм)	40	55	82
Усиление антенны (дБ)	23	38	65
Расстояние (м)	107	1394	7875

Если посмотреть на таблицы, то видно, что с увеличением частоты увеличивается и дальность ввиду большей отстройки от точки наивысшего затухания в кислороде (около 60 ГГц). Поэтому в 2016 году FCC сделала дальнейший шаг - расширила нелицензируемый диапазон V-band до 57-71 ГГц, вплотную приблизив его к диапазону E-band 71-76/81-86 ГГц. Это можно назвать регуляторным прорывом, который дает американским производителям и операторам-эксплуатантам РРЛ в США простор для развития нелицензируемой беспроводной связи.

На фото экспериментальная РРЛ 10 Гбит/с из лаборатории Facebook. Источник: Facebook

Пока же РРЛ диапазона 60 ГГц конкурируют на рынке с системами атмосферной оптики (FSO, Free Space Optics), в сравнении с которыми имеют некоторые эксплуатационные преимущества в виде стабильной работы в туман, снегопад, при сильном запылении или задымлении атмосферы (хотя в дождь FSO работает стабильнее на аналогичных дистанциях). Кроме того, радиолинии дешевеют быстрее атмосферной оптики при сравнимых скоростях передачи данных, поэтому FSO-системы понемногу уступают свою долю рынка.

Теперь внимательнее посмотрим на РРЛ диапазона 70-80 ГГц (E-band). Здесь расстояние между двумя РРС, т.е. "длина пролета" или это еще называют "длиной трассы", - в климатических условиях России находится в широких пределах: от типичных 3-4 км до рекордных 15 км (РРЛ "ДОК" для НОВАТЭК-ТАРКОСАЛЕНЕФТЕГАЗ) для разных моделей от разных производителей. Для сравнения, максимальная дальность для экспериментальной РРЛ диапазона 70-80 ГГц в проекте Facebook Aquila достигала 13 км. Соответственно, цена "дальнобойных" радиомостов разнится от тех моделей, которые рассчитаны на короткие пролеты.

Для многих трасс, особенно загородных, дальность РРЛ является критически важным фактором, если требуется одним пролетом преодолеть дистанцию с ограничениями по установке ретранслятора (вода, лес, и т.п.). Кроме того, сравнивать цены одной дальнобойной релейки и набора из нескольких РРЛ малого радиуса действия, неверно. Каждый ретранслятор – это вышка (или крепление к зданию,

сооружению) плюс электропитание. Правильнее поставить одну дальнобойную РРС, чем цепь из РРС малой дальности (в цепочке нарастает задержка). Также важна сохранность оборудования - в лесу или посреди болота электричества нет, но найдутся вандалы и воры.

Отдельно надо отметить, что спецификации производителей на оборудование РРЛ редко содержат графу "Дальность действия", а если она есть, то представлена для случая ясной погоды. Дождь, в зависимости от своей интенсивности, значительно ослабляет радиосигнал, т.к. размер капель сопоставим с длиной волны (около 4 мм для диапазона частот 70-80 ГГц).

Чтобы точнее определить, какой практической дальностью действия обладает конкретная модель радиорелейных станций (рассчитать % доступности радиоканала), следует использовать понятие "потенциала радиолинии" или иначе это называют "энергетическим запасом радиолинии" (link budget). У ряда производителей РРЛ на вебсайты вынесены специальные калькуляторы, позволяющие выбрать модель радиомоста, задать точки своей трассы и получить расчет энергетического запаса. В качестве примеров можно назвать калькулятор компании ДОК и калькулятор Siklu. Значит ли, что по этим расчетам можно сделать вывод, какой радиомост лучше? Ответ - увы, НЕТ, и вот почему...

Как пишет в своей "белой книге" Lightpointe, напрямую сравнивать энергетические бюджеты радиомостов разных брендов только по цифрам из калькуляторов - значит сравнивать уровень честности различных допущений, сделанных в формулах калькуляторов. Например, пишет Lightpointe, теоретический предел усиления 60-см антенны на 80 ГГц равен 51 дБ, а с учетом того, что эта же антенна работает в нижнем поддиапазоне 70 ГГц того же самого радиомоста, практический предел усиления будет 43-49 дБ. Любые цифры выше 49 дБ – это лукавство. Также лукавством будет указание мощности непосредственно на выходе усилителя передатчика вместо мощности на входе в антенну, т.к. волновод, фильтр, диплексер и другие компоненты вносят свои потери, которые лежат в пределах 3-5 дБ. Желающие подробнее познакомиться с примерами уловок - смотрите здесь.

How to read and compare MMW vendor's link budget calculations

When comparing the total radio link budget of different MMW radios it is important to understand the underlying assumptions made by the radio vendor. While some radio vendor's budget models are more biased toward using theoretically calculated parameter values, other radio vendors prefer to use parameter values derived from field measurements. Both methods are valid but in nearly all cases the theoretical calculations will result in a higher radio link budget figure. An example is shown in Fig. 5, using parameters specified by different MMW vendors. The total link budget of the system from vendor B shows a 15.1 dB higher link budget when compared to a system offered by vendor A. Although this looks impressive at first glance, this paper will explain why there is such a difference in link budget performance.

Power @antenna port vs. Power @amplifier output

Parameters	Vendor A	Vendor B
Po[dBm]	17	22
Frequency[GHz]	74.9	83.5
Antenna	26	26
Tx Antenna Gain[dBi]	49	51
Rx Antenna Gain[dBi]	49	51
S/N	15	13.4
Noise figure[dB]	9.16	7
Temperature[Deg]	25	25
BW[MHz]	2200	1400
Noise Threshold[dBm]	-71.9	-76.4
Minimum Detactable Level[dBm]	-56.9	-53.8
Total Link Budget[dB]	171.9	187.0
Difference [dB]	0.0	15.1

Measured antenna gain vs. Theoretical antenna gain limit

На скриншоте - пример допущений в калькуляторах разных вендоров. Источник: Lightpointe

Еще один из нюансов - какой уровень ошибок (BER, bit error ratio) производитель заложил в калькулятор потенциала радиолинии. Некоторые производители считают потенциал при BER 10-6 или даже BER 10-3 (практически нет связи). Правильно - это сравнивать радиолинк по потенциалу, сосчитанному для уровня ошибок 10-9.

Величина потенциала радиолинии, а также затухание сигнала на трассе указывается в дБм (dBm) - децибелах к милливатту, т.е. на сколько децибел данная мощность больше, чем 1 мВт. Затухание на трассе включает 3 компонента - затухание в вакууме, в воздухе и в дожде. Первые два компонента - чистая физика, от которой никуда не деться, и они одинаковы для любого региона. А вот дождь в разных регионах идет по-разному - в некоторых его почти не бывает весь год, а в других в определенные месяцы льет стеной. Поэтому важно рассчитать энергетический баланс радиорелейной линии при различном уровне осадков, характерных именно для той местности, где установлен радиомост.

Чтобы уменьшить влияние дождя, практически все современные РРЛ магистрального класса имеют

функцию адаптивной модуляции, которая меняет тип модуляции со сложных типов (256 QAM, 128 QAM, 64 QAM) к более простым (QPSK, BPSK) для улучшения энергетического запаса РРЛ в зависимости от интенсивности дождевых осадков. Цель адаптивной модуляции - не допустить разрыва соединения ценой снижения скорости передачи. После завершения дождя, РРЛ автоматически восстанавливает максимальную пропускную способность.

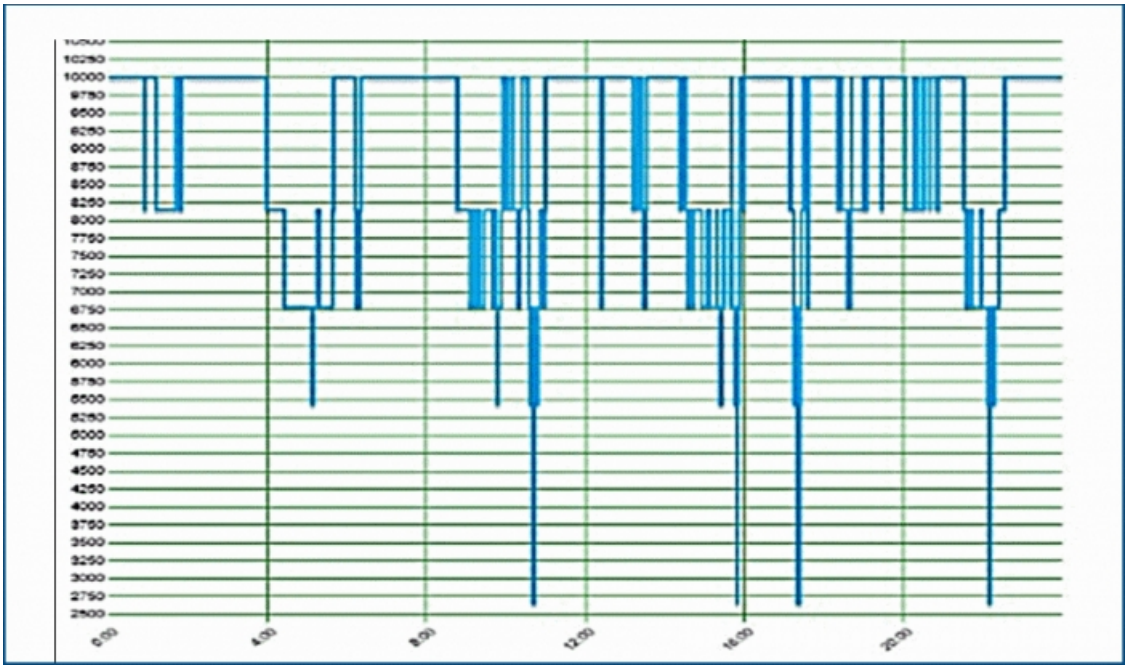

График пропускной способности 10-гигабитной РРЛ в дожде. Источник: Флекс

Для иллюстрации работы адаптивной модуляции на рисунке представлена суточная статистика пропускной способности радиомоста PPC-10G-E-60 70-80 ГГц (производитель ООО "ДОК") в дождь 05 октября 2017 года на трассе длиной 5,13 км в Ногинском р-не Московской обл.

Данные предоставлены оператором "Флекс" для радиомоста PPC-10G-E-60 в базовой комплектации с антеннами 60 см. Видно, как автоматика отрабатывает интенсивность осадков, меняя тип модуляции и понижая скорость передачи, но не разрывая соединение:

- QAM 128 10 Гбит/с @2000МГц.
- QAM 64 8150 Мбит/с @2000МГц.
- QAM 32 6700 Мбит/с @2000МГц.
- QAM 16 5400 Мбит/с @2000МГц.
- QPSK 2700 Мбит/с @2000МГц.

Отдельно тема, которая часто поднимается при обсуждении потенциала радиолинии - о влиянии размера антенн. Да, больший размер антенны позволяет увеличить общий потенциал радиолинии, но не бесконечно - довольно скоро вступает в действие ограничивающий фактор в виде "дрожания пятна засветки". Чем больше антенна и выше частота диапазона, тем более узкая диаграмма направленности. А опоры антенн закреплены отнюдь не намертво. Антенны большого размера сами по себе подвержены влиянию ветровой нагрузки, плюс колебания телекоммуникационных вышек как от ветра, так и от нагрева на солнце. Получается, что наведение больших антенн ввиду колебаний опоры и зеркала антенны может сбиваться (в т.ч. кратковременно), что будет приводить к падениям скорости передачи или даже разрыву связи.

Например, для антенны 90 см с диаграммой 0.2 град (диапазон 70-80 ГГц) уже не хватает стабильности опоры (стандартные допуски на перемещения верхней части вышки порядка 0.4 град.). Существуют решения с моторизованным приводом антенн, отслеживающим точность наведения антенн друг на друга, но цена на такую автоматику исчисляется десятками тысяч долларов, что совершенно не вписывается в экономику большинства операторских проектов. Вот почему самые большие антенны для РРЛ диапазона 70-80 ГГц, которые идут в комплекте с серийными РРЛ - диаметром 60 см. Это оптимум по размеру/цене.

Комплектность поставки, ценовая политика продавцов

На рынке радиорелейных систем 10G практически не встречается прайс-листов в открытом доступе. Каждый продавец в обмен на свой прайс-лист запросит контакты потенциального покупателя. Более того, у ряда дилеров структура прайс-листов сложна, содержит цены "россыпью" на отдельные компоненты систем (отдельно на приемопередатчики, антенны, блоки управления и т.п.), поэтому

для определения окончательной цены "за комплект" требуется консультация представителя продавца. Ну и как же без лукавства - некоторые поставщики, торгующие зарубежными РРЛ, дают цену FOB "за бугром", что при поставке в РФ выльется в значительное увеличение стоимости (пошлина, НДС, транспортировка).

Чтобы собрать список из ценовых предложений для своего проекта РРЛ, покупателю понадобится опросить многих поставщиков, которые предлагают потенциально подходящие системы. Скорее всего, вопрос лучше всего сформулировать так: "Требуется радиомост на скорость 10 Гбит/с Full Duplex в нелицензируемом диапазоне, длина трассы X км, дайте цену на полный комплект". В этом случае можно получить близкие к реальности цены для сопоставления, хотя вполне вероятны еще какие-то небольшие расходы, учитывающие специфику конкретного места установки РРС (дополнительные детали для крепления, коммутационные компоненты и т.д.).

Следует принимать к сведению и фактор разной ценовой политики продавцов оборудования. Поэтому цены на одинаковые комплекты могут слегка различаться, включая разный курс конвертации, продажи "по акции" и иные методы стимулирования спроса.

Если говорить о брендах, то на российском рынке можно выделить двух характерных представителей РРЛ 10 Гбит/с. Это российский производитель "ДОК", покрывающий спрос в категории наиболее дальнобойных РРС, где типичная дальность пролета от 5-6 до 10-15 км и израильский бренд Siklu, который доминирует по предложению РРС в категориях "до 3 км" и "до 5 км". Среди других брендов 10-гигабитных моделей РРС диапазона 70-80 ГГц, присутствующих на российском рынке, можно отметить Ericsson MINI-LINK 6352, NEC iPASOLINK EX Advanced, Huawei RTN 380H, Ceragon FibeAir IP-50. При этом, по отзывам участников рынка, NEC поставляется партиями для крупных операторов, а в розницу на единичный пролет такое оборудование могут и не продать.

Теперь о сравнении РРЛ разных брендов - раз калькуляторы энергетического запаса не дают полной картины. Тут простой совет - провайдеры перед покупкой могут попросить дать образцы на тестирование и бренды часто идут навстречу. Возьмите и проведите сравнительные испытания РРЛ 10 Гбит/с от разных производителей собственными силами.

На фото РРЛ РРС-10G-E 10 Гбит/с на испытания в МТС, 2017 год. Источник: сайт ДОК

А какие результаты тестирования доступны публично? До сих пор наиболее известными считаются испытания РРЛ 10 Гбит/с под эгидой МТС, проводившиеся на трассе 8.3 км в Ленинградской области в 2017 году. Официальные пресс-релизы на CNews по согласованию с МТС были опубликованы компаниями "ДОК" и "НЭК Нева Коммуникационные Системы". В пресс-релизе "ДОК" говорится о достигнутой скорости 10 Гбит/с при доступности 98,31%, а пресс-релизе "НЭК Нева Коммуникационные Системы" - о максимальной скорости 8,5 Гбит/с без уточнения уровня доступности канала. По слухам, в тех испытаниях принимал участие еще радиомост из страны Суоми, но публичных подтверждений этого факта в интернете не найдено.

Разумеется, за прошедшие три года технические характеристики РРС заметно улучшились. Компания "ДОК" в 2018 году выпустила базовую модель с передатчиком мощностью 17 дБм при QAM 128 (против модели с Tx = 10 дБм/QAM 128 в испытаниях 2017 года), а также добавила в линейку РРЛ мощную модель с индексом "High Power" с Tx = 19 дБм при QAM 128. У производителя "НЭК Нева Коммуникационные Системы" на смену РРЛ iPASOLINK EX пришла новая 10-гигабитная модель iPASOLINK EX Advanced.

Все приведенные в статье сведения взяты из открытых источников, а выводы являются личным мнением автора о ситуации на рынке. Все упомянутые торговые марки принадлежат их владельцам. Если у вас есть свой опыт выбора и эксплуатации РРЛ на 10 Гбит/с, пожалуйста, поделитесь им в комментариях к этой статье.