

УДК 621.396.4

DOI: [10.26102/2310-6018/2020.30.3.032](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2020.30.3.032)

## Методика создания быстро развертываемой сети связи на основе радиорелейных линий

**В.О. Ключников**

*Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С.М. Буденного,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация*

**Резюме:** Радиорелейная связь занимает важное место в создании цифровой инфраструктуры. Современные цифровые радиорелейные линии позволяют организовать высокоскоростные каналы связи, поддерживающие передачу всех видов трафика, включая голосовые сообщения, пакетную передачу данных, видеосигналы в реальном режиме времени. В статье рассмотрены методики расчета цифровых радиорелейных линий связи, а также указаны общие рекомендации по их организации. Проектирование радиорелейных линий выполняется таким образом, чтобы они располагали высокой пропускной способностью и высокой надежностью с учетом физических (энергетических) и канально-сетевых возможностей системы. Методика расчета требует определения энергетических параметров, вывода формы уравнения качества, расчета критериев качества работы и способов расчета затухания радиоволн на интервалах радиорелейной линии. Положительно оценена возможность применения в радиорелейной связи MPLS-технологии. Система маршрутизации РР сети выстроена на мультиплексировании потоков с механизмом защиты на уровне канала и сети. Режим непрерывной адаптивной модуляции позволяет гибко изменять кратность QAM, что дает возможность непрерывного трафика. Рассмотрено резервирование по схеме «1+1» и «2+0». Такая схема вдвое повышает пропускную способность системы и выделяет приоритетный трафик. Методика позволяет выстроить цифровую радиорелейную сеть с гибким изменением как физических, так и сетевых параметров.

**Ключевые слова:** радиорелейная сеть, радиорелейные линии, методы расчета, показатели качества, распространение радиоволн, маршрут доставки пакетов.

**Для цитирования:** Ключников В.О. Методика создания быстро развертываемой сети связи на основе радиорелейных линий. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2020;8(3). Доступно по: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/Klyuchnikov\\_3\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/Klyuchnikov_3_20_1.pdf)  
DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.032.

## Technique for a quickly deployed communication network creation based on radio relay lines

**V.O. Klyuchnikov**

*Military Academy of Communications named after Marshal of the Soviet Union S.M.  
Budenny St. Petersburg, Russian Federation*

**Abstract:** Radio relay communication plays an important role in the creation of digital infrastructure. Modern digital radio relay lines allow organizing high-speed communication channels supporting the transmission of all types of traffic, including voice messages, packet data transmission, and video signals in real time. The article discusses methods for calculating digital radio relay communication lines, and also provides general recommendations for organizing digital radio relay communication lines. The design of radio relay lines is carried out in such a way that they have high bandwidth and high reliability,

taking into account the physical (energy) and channel-network capabilities of the system. The calculation method requires determining the energy parameters, deriving the form of the quality equation, calculating the performance criteria and methods for calculating the attenuation of radio waves at radio relay intervals. The possibility of using MPLS-technology in the radio relay communication was positively assessed. The radio relay network routing system is based on multiplexing streams with a protection mechanism at the channel and network levels. Continuous adaptive modulation mode allows flexible QAM rate change, allowing continuous traffic. The redundancy according to the «1+1» and «2+0» schemes is considered. This scheme doubles the system throughput and prioritizes traffic. The technique allows you to build a digital radio relay network with flexible changes in both physical and network parameters.

**Key words:** radio relay network, radio relay lines, calculation methods, quality indicators, radio wave propagation, packet delivery route.

**For citation:** Klyuchnikov V.O. Technique for a quickly deployed communication network creation based on radio relay lines. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2020;8(3). Available from: [https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/Klyuchnikov\\_3\\_20\\_1.pdf](https://moit.vivt.ru/wp-content/uploads/2020/08/Klyuchnikov_3_20_1.pdf) DOI: 10.26102/2310-6018/2020.30.3.032 (In Russ).

## Введение

Непрерывный рост объема передаваемой информации требует постоянного совершенствования сетей электросвязи всех категорий. Основу этих сетей составляют не только проводные, но и радиорелейные, тропосферные и космические линии связи. Применение современных цифровых радиорелейных линий (ЦРРЛ) рентабельно, прежде всего, в труднодоступных участках местности и в районах со сложным рельефом. Применение ЦРРЛ необходимо при обеспечении связи государственного и военного назначения, когда за короткий промежуток времени необходимо организовать высокоскоростные, надежные каналы. Преимуществом ЦРРЛ является быстрота их возведения и возможность построения на их основе многосвязной сети без применения кабеля.

Необходимость развертывания ЦРРЛ специального назначения возникает с целью обеспечения бесперебойной связи пунктов управления, для их привязки к единой сети электросвязи, а также в случаях развертывания резервных систем связи или при выходе из строя действующих. Развертывание ЦРРЛ осуществляется на основе документов, разработанных в ходе ее планирования [1], [2]. В общем случае необходимо: осуществить выбор местности для размещения радиорелейных станций, произвести расчет радиорелейной линии, разработать документацию.

Выбор намечаемых районов размещения радиорелейных станций производится с учетом назначения радиорелейной станции, характера местности, маскировки и защиты от вероятных ударов противника. Радиорелейные станции необходимо размещать на господствующих высотах с учетом экранирующих свойств местности в направлении к противнику или к источнику помех. Пункт размещения станции должен иметь пути подъезда, обеспечивающие возможность организации обороны, инженерного оборудования и маскировки [3].

Цель расчета ЦРРЛ состоит в том, чтобы определить пригодность выбранного варианта размещения на трассе для обеспечения связи с заданным качеством. Качество связи в каналах ЦРРЛ связано со степенью искажений сигнала на ее интервалах. Поэтому современный подход сводится к расчету ее отдельных интервалов, для которых требования к качеству связи пересчитываются по определенному правилу из требований к качеству связи на всей ЦРРЛ в целом.

### Методика и порядок расчета радиорелейной линии

Пригодность интервала ЦРПЛ определяется двумя уравнениями. Первое связывает мощность на входе приемника РРС –  $P_{np}(t)$  с энергетическими параметрами ее передатчика  $P_{\Delta}$  и затуханием радиоволн на интервале  $W(t)$  (уравнение передачи или количества) [4]:

$$P_{np}(t) = P_{\Delta} - W(t) \quad (1)$$

где  $P_{\Delta} = P_{пер} - W_{ф,пер} + G_{А пер} - W_{ф,пр} + G_{А пр} - W_{пр}$  – эквивалентная мощность сигнала дБ;  
 $P_{пер}$  – мощность передатчика;  
 $W_{ф}$  – затухание в фидере;  
 $G_{А}$  – коэффициенты усиления антенн.

Второе уравнение, называемое уравнением качества, связывает требуемую мощность на входе приемника РР станции с показателями качества связи в канале РР линии:

$$P_{np}^* = f(Q^*) \quad (2)$$

Подход расчета РРЛ требует [5], [6]:

- определения энергетических параметров развертываемой РР станции;
- расчета критериев качества работы РР линии;
- вывода формы уравнения качества;
- способов расчета затухания радиоволн на интервалах РР линии.

Требование к планируемой РР линии состоит в нормировке показателей качества по полной протяженности  $L$ . По топографической карте определяются места развертывания станций, и рассчитывается затухание радиоволн на каждом интервале. Определяется надежность связи на каждом интервале и формируется вывод о пригодности рассчитанного варианта трассы.

Процесс затухания, вносимого рельефом местности, определяется исходя из геометрических интервалов РР линии, которые рассчитываются по чертежу профиля местности. В выбранном масштабе изображается линия кривизны земли (ЛКЗ, Рисунок 1), координаты которой определяются уравнением:

$$\Delta y, м = \frac{r^2, км}{z} \quad (3)$$

где  $r$  – расстояние от середины прямой АВ;

$z$  – коэффициент, определяемый градиентом диэлектрической проницаемости атмосферы  $g$  для данного географического района:

$$z = 2 \cdot 10^3 \frac{R_3}{1 + \frac{R_3}{2} g} \quad (4)$$

От ЛКЗ также в масштабе откладываются высоты местности и местных предметов, лежащих на направлении связи и взятые с топографической карты. Полученные точки соединяются плавной линией (Рисунок 1,б). На этот чертеж профиля местности наносятся высоты антенных мачт, и электрические центры антенн соединяются линией прямой видимости (ЛПВ).

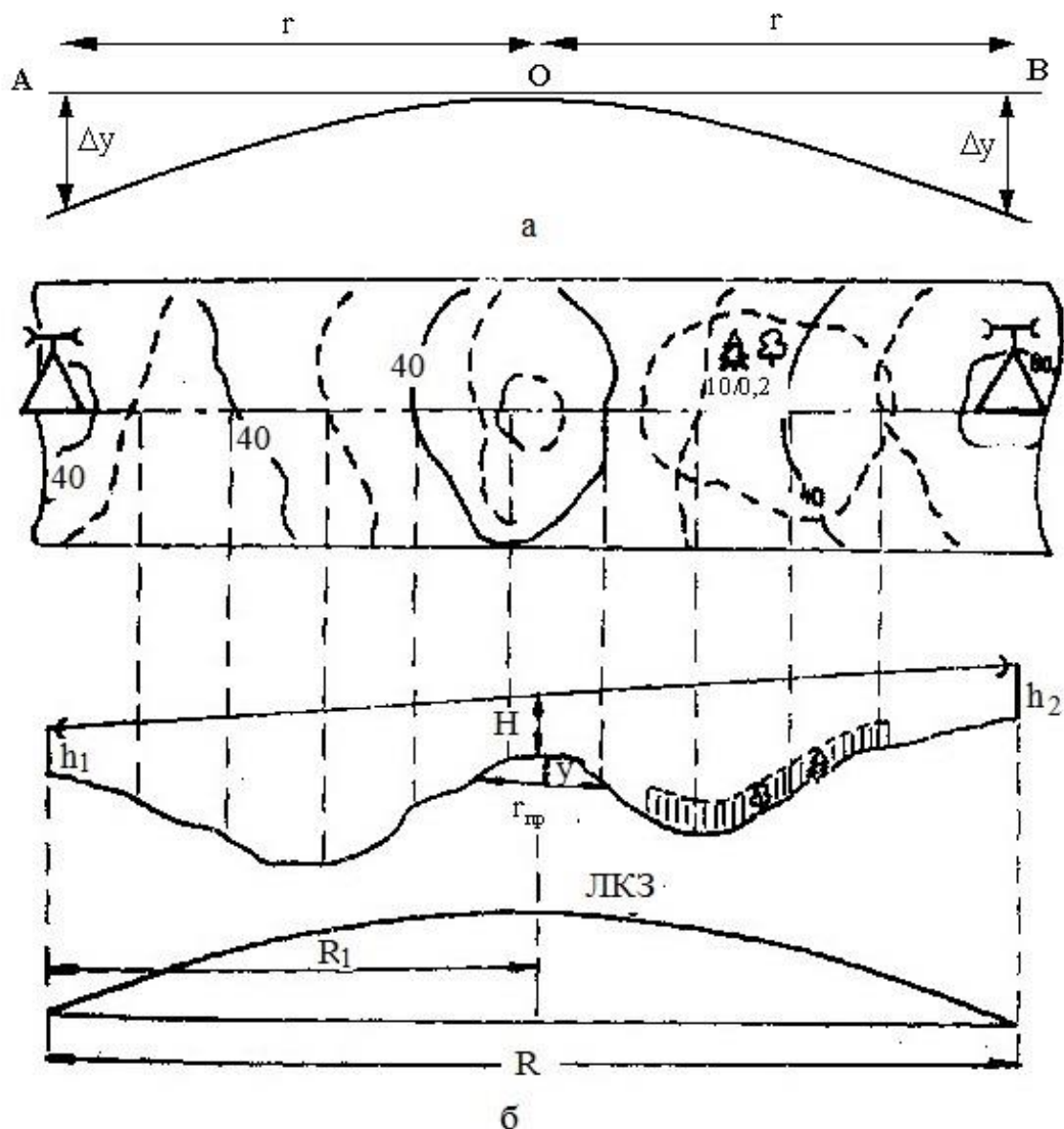


Рисунок 1 – Построение линии кривизны земли (а) и чертежа профиля местности (б)  
 Figure 1 – Construction of the line of curvature of the earth (a) and drawing of the terrain profile (b)

При этом основными геометрическими параметрами интервалов РРЛ являются [3]:

- $R$  – величина интервала (расстояние связи на интервале);
- $R_1$  – расстояние до препятствия, существенно влияющего на затухание радиоволн;
- $R_z = 6370$  км – геометрический радиус Земли.
- $R_{пр}$  – радиус этого препятствия, аппроксимированного сферой;
- $H$  – величина просвета между вершиной препятствия и ЛПВ.

Так же при планировании и проектировании ЦРРЛ целесообразно применение существующих программ моделирования для учета рельефа и энергетических характеристик конкретных станций. Такими программами являются, - RadioWorks, Xirio, Radio Planner, AWE ProMan, ProfEdit, Балтика РРЛ, ПИАР.

## Целесообразность применения технологии MPLS в радиорелейных линиях связи

Одной из перспективных и эффективных технологий, которые могут быть использованы с целью создания радиорелейной сети (РРС), является технология MPLS (Multiprotocol Label Switching – многопротокольная коммутация по меткам) [7]. Эта масштабируемая технология первоначально была разработана фирмой Cisco для передачи данных от одного узла сети к другому с помощью меток, без использования традиционных методов адресации. Такая технология автоматически формирует таблицы маршрутизации, в процессе которых участвуют маршрутизаторы, установленные в сети. При этом применяются внутренние протоколы маршрутизации, такие как OSPF или IS-IS [8]. В предыдущих поколениях VPN-сетей время на обработку пакета было значительно меньше, чем на его передачу, однако с появлением гигабитных каналов временные затраты сравнялись. Таким образом, оптимальные варианты достройки РРС требуют внимательного изучения сопоставимости временных характеристик передачи и обработки информации (Рисунок 2).

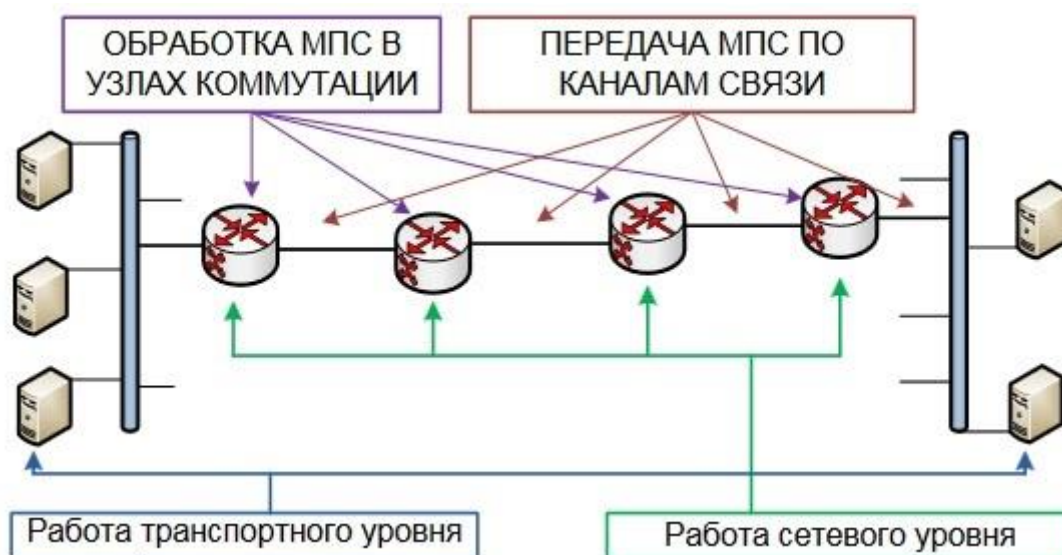


Рисунок 2 – Процессы передачи и обработки в IP-туннеле MPLS-сети в LSR-маршрутизаторах  
 Figure 2 – Transmission and processing processes in the IP tunnel of the MPLS network in LSR routers

Моделирование вероятностно-временных характеристик (ВВХ) скорости передачи данных с требуемыми вероятностями доведения пакета (0,95; 0,99; 0,995) методом марковских цепей [9] показывает, что, во-первых, оперативность доставки в VPN MPLS возрастает. Во-вторых, это позволяет определить оптимальные каналы для передачи данных с применением MPLS-технологии (Рисунок 3). Данная методика позволяет эффективно определять оптимальные каналы передачи данных с требуемой скоростью (временными затратами) и, таким образом, оптимизировать развертывание РРС с учетом выбора оптимального пути.



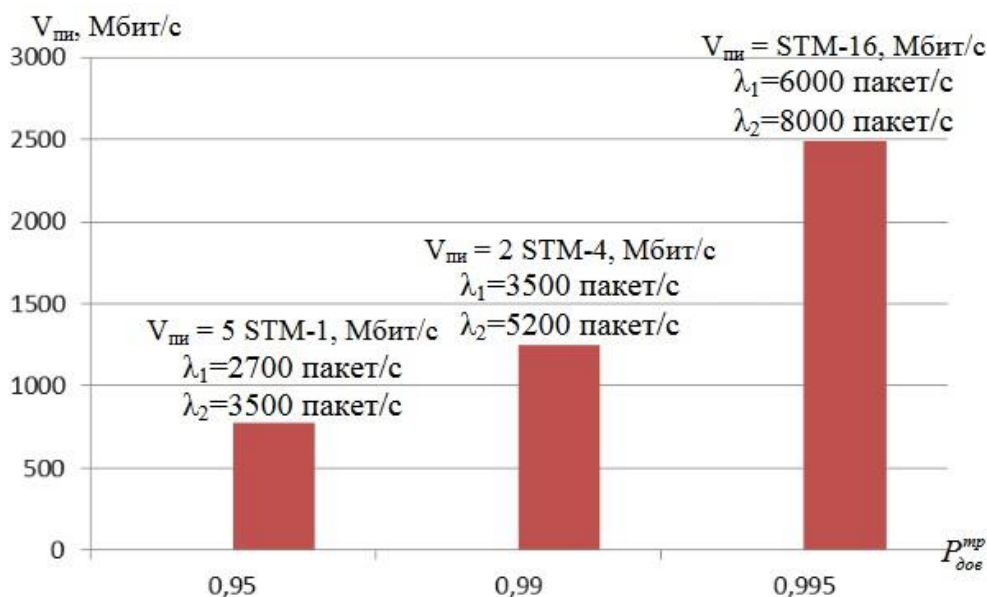


Рисунок 3 – Диаграмма зависимости минимально достаточной скорости передачи информации в каналах IP-туннеля VPN MPLS-сети от требуемой вероятности доведения

Figure 3 – Diagram of the dependence of the minimum sufficient information transfer rate in the channels of the IP-tunnel VPN MPLS-network on the required probability of delivery

### Маршрутизация радиорелейной сети

Реализуемая схема обеспечивает интегрированную маршрутизацию больших объемов трафика, а также реализует механизмы защиты на уровне канала и сети. Настраиваемая программная маршрутизация трафика сводит к минимуму использование кабелей, повышает качество сети и упрощает удаленное управление [10].

Антенны в зависимости от частоты могут быть разного диаметра: 0.2, 0.3, 0.6, 0.9, 1.2, 1.8, 2.4, 3.0, 3.7 метров. Для всех частот и размеров доступен вариант антенн с двойной поляризацией. Антенны диаметром до 1,8 метра включительно допускают интегрированную установку радиомодуля (как однополяризационные, так и двухполяризационные антенны). Полоса пропускания может распределяться между TDM и Ethernet трафиком.

Перспективные и существующие цифровые радиорелейные станции, такие как CN500, PPC-10G (DOKcompany), Ubiquiti AirFiber и другие, должны поддерживать режимы адаптивной модуляции типа m-QAM и уровни различных приоритетов в заголовках Ethernet, IP и MPLS. Производители радиорелейных станций используют различную компоновку оборудования. Станция может представлять собой один внешний навесной блок или состоять из нескольких отдельных устройств, таких как приемопередатчик, модем, маршрутизатор. При построении интервалов, соединив между собой два аналогичных блока, можно сконфигурировать пролет по схеме 1+1 или 2+0.

Рассмотрим особенности работы радиорелейного оборудования Ericsson MINI-LINK серии CN500. Плата центрального процессора NPU оснащена 2 (или 4, в зависимости от версии) портами GE, и 4 (или 8, в зависимости от версии) портами E1. Он также выполняет все функции управления трафиком, контроля работы системы, хранения конфигурации на энергонезависимой карточке памяти. Имеет контакты для подключения внешней сигнализации и USB-разъем для подключения локального крафт-терминала. Процессор оснащен IP-маршрутизатором и SNMP-агентом для обработки

трафика управления (DCN). Кроме того, каналы DCN могут использоваться для передачи информации сторонних систем управления.

Адаптивная модуляция делает возможным автоматическое переключение между разными режимами модуляции в зависимости от условий в канале. Бесперывная адаптивная модуляция позволяет увеличить доступную пропускную способность одного и того же частотного канала в периоды с нормальными условиями распространения радиоволн.

Адаптивная модуляция характеризуется такими параметрами, как:

- Отсутствие битовых ошибок для PDH, Ethernet и ATM при смене режима модуляции, что позволяет избежать перерыва трафика.
- Постоянное значение задержки. Одной из проблем для распространения синхронизации по пакетным сетям, которая может привести к полной потере синхронизации, является джиттер (колебания значения задержки). При применении режима адаптивной модуляции в оборудовании обеспечивается минимальное постоянное значение задержки, что ведет к качественному и бесппроблемному распространению синхронизации в пакетной сети.
- Стабильность значения задержки при переключении схемы модуляции является крайне важным параметром при оценке качества работы адаптивной модуляции.
- Реакция не только на повышенное затухание, вызванное осадками (Rain fading), но и на т.н. Selective/Multipath fading.

Адаптивная модуляция в пределах до 512-QAM поддерживается всеми видами радиомодулей RAU2 X, модемами MMU2 H и CN500 (Рисунок 4).

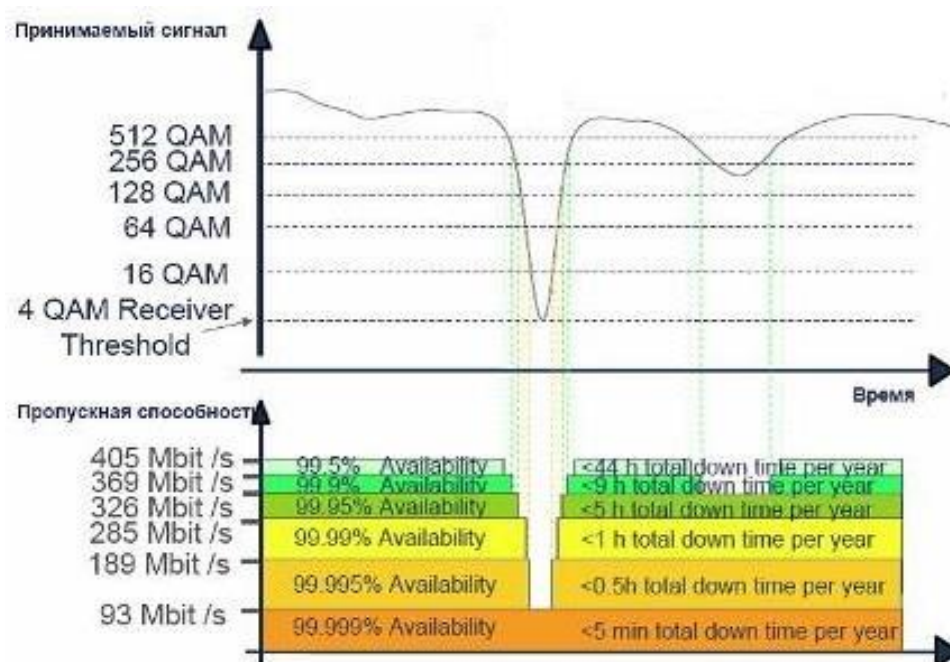


Рисунок 4 – Использование режима адаптивной модуляции  
 Figure 4 – Using adaptive modulation mode

При резервировании по схеме 1+1 используются два радиотерминала (2 радиомодуля плюс 2 модема) с каждой стороны пролета. В режиме горячего резерва один передатчик излучает, другой готов к передаче в случае неполадок с первым. Оба радиомодуля принимают сигнал. Радиомодули подключаются к антенне через делитель мощности.

При схеме 2+0 используется двухполяризованная антенна и функция XRIS. Два радиомодуля подключаются к антенне при помощи специального комплекта для инсталляции на двухполяризованную антенну и работают на разных поляризациях одной частоты. Затухание на этом комплекте составляет порядка 0,1 дБ, в отличие от 1,5-7,5 дБ на делителе мощности, при этом работают одновременно оба терминала (Рисунок 5). Таким образом, суммарная пропускная способность составляет 200% от пропускной способности пролета 1+1.

Эта суммарная пропускная емкость делится между высокоприоритетным, например, голосовым трафиком E1 и низкоприоритетным трафиком Ethernet Best Effort. Трафик E1 резервируется по схеме SNCP – т.е. он одновременно передается по двум поляризациям. В случае выхода из строя одного терминала, время переключения составляет 20 мс. Остальная емкость на обоих каналах отдается под Best Effort трафик. Этот трафик с него не теряется, а передается по рабочему терминалу в соответствии с установленным QoS.

Например, при резервировании пролета емкостью 155 Мбит/с по схеме 2+0 под высокоприоритетный голосовой трафик отводится 16 потоков E1. Они прописываются по обеим поляризациям и занимают по 32 Мбит/с. Остальные 123 Мбит/с на каждой поляризации отводятся под Ethernet. На выходе получаем суммарную емкость пролета в рабочем состоянии равную 16E1 + 246 Мбит/с, что на 80% больше емкости пролета 1+1.

В случае неисправности одной станции, высокоприоритетный трафик не испытывает никакого влияния. Скорость передачи Ethernet трафика снижается в 2 раза, но сам трафик при этом не теряется.

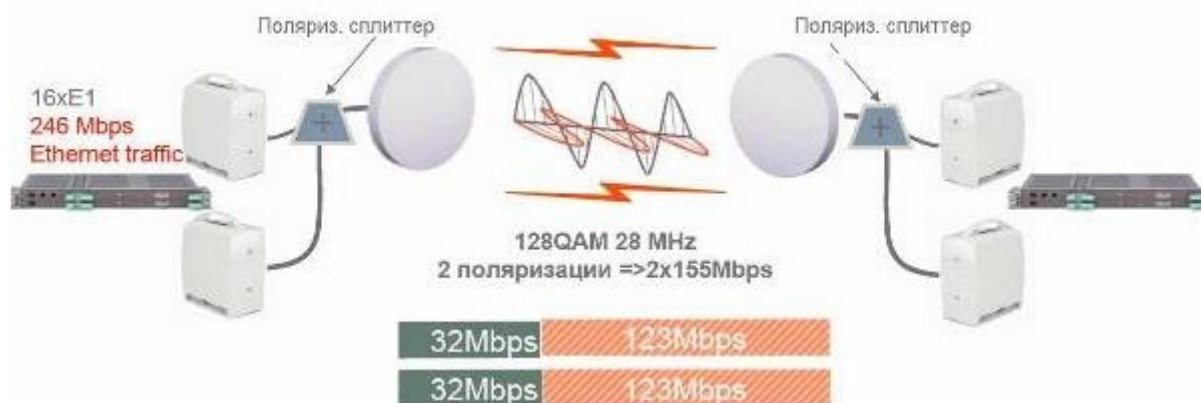


Рисунок 5 – Резервирование при схеме 2+0  
 Figure 5 – Redundancy for 2+0 scheme

Дальнейшим развитием схемы 2+0 является функция «L1 Radio Link Bonding», которая позволяет объединить до четырех радиопролетов в один полноценный канал GE. В этом случае, также как и в примере 2+0, выход из строя одного приемопередатчика не влечет за собой потерю трафика. Скорость всего соединения снижается на 25%, но сам трафик не пропадает.

В отличие от функциональности LAG, которая распределяет входящий трафик по двум каналам, объединенным в агрегационную группу, L1 Radio Link Bonding объединяет до четырех каналов в один.

Всё это позволяет построить достаточно гибкую методику проектирования РР сети, в которой на физическом уровне осуществляется изменение мощности, диапазона и сигнально-кодовой конструкции. На канальном и сетевом уровне – изменение маршрута доставки пакетов с учетом выбора оптимального пути.



## Заключение

Представлена методика создания радиорелейной линии. Порядок расчета основан на определении энергетических параметров развращиваемой станции и определении параметров качества. Геометрические интервалы радиорелейной линии рассчитываются по чертежу профиля местности. Показана целесообразность применения VPN MPLS технологии. Предлагаемая схема вдвое повышает пропускную способность системы и выделяет приоритетный трафик. Таким образом, при деструктивном воздействии на сеть радиорелейной связи, ответные меры по поддержанию ее работоспособности принимаются на каждом уровне взаимодействия системы поддержки РР связи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 53363-2009 *Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета* - М.: Стандартиформ, 2010.
2. *Общие технические требования на радиорелейное оборудование цифровых магистральных радиорелейных линий ВСС России.*
3. *Военные системы радиорелейной и тропосферной связи.*, Под ред. Волкова Е.А. -Л.: ВАС им. С.М. Буденного, 1984.
4. Быховский М.А., Кирик Ю.М., Носов Д.И. и др. *Основы проектирования цифровых радиорелейных линий связи.* -М.: Горячая линия-Телеком, 2014.
5. Рубцов Е.А., Мешалов Р.О., Опарин А.И. Методика определения рабочей области систем авиационной цифровой радиосвязи, *Транспорт России: проблемы и перспективы. Материалы Международной научно-практической конференции. ИПТ РАН.* Санкт-Петербург. 2017:204-208.
6. Кульчицкий В.К., Мешалов Р.О., Копейкин А.А. Методики расчета цифровых радиорелейных линий связи, *Транспорт России: проблемы и перспективы – 2019. Материалы Международной научно-практической конференции. ИПТ РАН.* Санкт-Петербург. 2017:227-231.
7. Palmieri F. VPN scalability over High Performance Backbones Evaluating MPLS VPN Against Traditional Approaches. *Eighth IEEE International Symposium on Computers and Communication (ISCC'03).* 2003.
8. Гольдштейн, А.Б., Гольдштейн, Б.С. *MPLS технология и протоколы.* – СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2005.
9. Якимова И.А., Тоискин В.Е., Цимбал В.А., Рябцев С.В., Исаева Т.А. Математическая модель обработки IP пакетов в маршрутизаторе VPNMPLS сети, *Междун. конф. «Радиоэлектронные устройства и системы для инфокоммуникационных технологий» (RES-2014)*
10. Горнак А. Передача гибридного трафика в пакетных радиорелейных системах, *Технологии и средства связи: журнал*, ред. В. Р. Анпилогов Москва, 2010. №3. URL: <http://www.tsonline.ru/articles2/fixop/peredacha-gibridnogo-trafka-v-paketnyh-radioreleynyh-sistemah> (дата обращения 29.08.20)

## REFERENCES

1. GOST R 53363-2009 *Digital radio relay linep. Quality indicatorp. Calculation methods* - М.: Standartinform, 2010.
2. *General technical requirements for radio relay equipment of digital main radio relay lines of the Russian Armed Forcep.*

3. *Military systems of radio relay and tropospheric communication.*, Ed. Volkova E.A. -L .: YOU them. CM. Budyonny, 1984.
4. Bykhovsky M.A., Kirik Y.M., Nosov D.I. *and other Basics of designing digital radio relay communication linep.* - M .: Hotline-Telecom, 2014.
5. Rubtsov E.A., Meshalov R.O., Oparin A.I. Methods for determining the working area of aviation digital radio communication systems, *Transport of Russia: problems and prospects - 2017. Materials of the International Scientific and Practical Conference.* IPT RAP. St. Petersburg. 2017. P. 204-208.
6. Kulchitsky V.K., Meshalov R.O., Kopeikin A.A. Methods for calculating digital radio-relay communication lines, *Transport of Russia: problems and prospects - 2019. Materials of the International Scientific and Practical Conference.* IPT RAP. St. Petersburg. 2017: 227-231.
7. Palmieri F. VPN scalability over High Performance Backbones Evaluating MPLS VPN Against Traditional Approaches. *Eighth IEEE International Symposium on Computers and Communication (ISCC'03).* 2003.
8. Goldstein, A.B., Goldstein, B.P. *MPLS technology and protocols.* – SPb .: BHV-Saint Petersburg, 2005.
9. Yakimova IA A mathematical model of processing IP packets in a VPNMPLS network router, IA Yakimova, VE Toiskin, VA Tsimbal, SV Ryabtsev, TA Isaeva, Mezhdun. conf. "Radioelectronic devices and systems for infocommunication technologies" (RES-2014)
10. Gornak A. Transmission of hybrid traffic in packet radio relay systems [Electronic resource], *TechNologies and communication facilities: journal*, ed. V.R. Anpilogov Moscow, 2010. №. 3. URL: <http://www.tsonline.ru/articles2/fixop/per-edacha-gibridnogo-trafka-v-paketnyh-radioreleynyh-sistemah> (date of access 29.08.20)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Ключников Виктор Олегович**, адъюнкт,  
Военная академия связи имени Маршала  
Советского Союза С.М.Буденного, Санкт-  
Петербург, Российская Федерация.  
e-mail: [klyuchnikovvo@yandex.ru](mailto:klyuchnikovvo@yandex.ru)

**Viktor O. Klyuchnikov**, Postgraduate Student,  
Military Academy of Communications named  
after Marshal of the Soviet Union S.M. Budenny,  
St. Petersburg, Russian Federation.