

**НИКУЛИН В. В., ПИЩИН О. Н., ЧУЛКОВ И. О.**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ДАЛЬНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ СВЯЗИ  
НА РАДИОРЕЛЕЙНОМ ИНТЕРВАЛЕ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ  
БАЗЫ ДАННЫХ ДОПРОЕКТНОГО ВЫБОРА ОБОРУДОВАНИЯ  
С УЧЁТОМ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА**

**Аннотация.** В статье проводится анализ применения радиорелейных систем на территории Астраханской области. Во многих случаях применение радиорелейных линий остается единственным способом, обеспечивающим организацию высокоскоростных каналов связи в тех местах, где прокладка кабеля невозможна или нецелесообразна по различным причинам. Однако системы проектирования с использованием цифровых карт местности имеют ограниченную доступность для предприятий связи. Авторы статьи проводят работу по созданию справочного ресурса для допроектного выбора оборудования с целью оперативного принятия решения в каждом конкретном случае.

**Ключевые слова:** радиорелейный интервал, радиорелейная линия, радиорелейная станция, частотный диапазон, максимальная дальность, Астраханская область, база данных, ONEGA, справочный ресурс, проект радиорелейной линии, предпроектный выбор оборудования, допроектный выбор оборудования.

**NIKULIN V. V., PISHCHIN O. N., CHULKOV I. O.**

**RESEARCH OF THE MAXIMUM RANGE OF COMMUNICATION ORGANIZATION  
ON THE RADIO RELAY INTERVAL FOR CREATING AN INFORMATION DATABASE  
OF PRE-PROJECT SELECTION OF EQUIPMENT TAKING  
INTO ACCOUNT THE FREQUENCY RANGE**

**Abstract.** The article analyzes the use of radio relay systems in the Astrakhan region. In many cases, the use of radio relay lines remains the only way to organize high-speed communication channels in places where cable laying is impossible or impractical for various reasons. However, design systems using digital terrain maps have limited availability for communications companies. The authors of the article are working to create a reference resource for pre-project selection of equipment for the purpose of prompt decision-making in each specific case.

**Keywords:** radio relay interval, radio relay line, radio relay station, frequency range, maximum range, Astrakhan region, database, ONEGA, reference resource, radio relay line project, pre-design equipment selection, pre-design equipment selection.

В настоящее время радиорелейные станции (РРС) часто заменяются волоконно-оптическими линиями связи. Однако в ряде случаев применение РРС остается единственным

способом, обеспечивающим организацию высокоскоростных транспортных каналов связи в тех местах, где прокладка кабеля невозможна или нецелесообразна по экономическим соображениям или по причине отсутствия достаточного временного промежутка для организации связи [1; 2]. В пригородных и сельских районах с недостаточной степенью проникновения современной телекоммуникационной инфраструктуры применение радиорелейных станций решает эту проблему за счет оперативности развертывания, относительно быстрой окупаемости и высокой пропускной способности. В городской застройке с высоким уровнем урбанизации радиорелейные линии часто также становятся единственным приемлемым вариантом организации каналов передачи больших объёмов информации между узлами связи, ввиду отсутствия свободных ресурсов для организации дополнительных каналов связи в существующих коммуникациях.

Небольшие организации, нуждающиеся в использовании радиорелейных каналов, как правило, не имеют собственных систем предварительного проектирования РРЛ, более того, часто подрядные организации реализующие радиорелейное оборудование также не имеют в своём распоряжении подобного рода систем и специалистов экспертного уровня для принятия решения о выборе адекватного оборудования для реализации проекта или принятия решения о возможности и целесообразности такового. Продажи оборудования могут происходить без экспертной оценки возможности и необходимости организации каналов связи, а также гарантий качества создаваемых систем.

С целью сокращения времени принятия решения о возможности организации радиорелейных каналов необходим справочный ресурс, отражающий максимальные возможности телекоммуникационного оборудования, являющегося основным при строительстве радиорелейных интервалов (РРИ). Справочный ресурс или информационная база данных допроектного выбора оборудования упростит правильный выбор частотного диапазона радиорелейных средств, в котором будет возможность организовать информационный канал с заданной дальностью на территории Астраханской области [5].

Для создания справочного ресурса допроектного выбора оборудования целесообразно использовать методики расчёта, основанные на ГОСТ Р 53363-2009.

Для определения максимальной дальности организации радиорелейной связи, например, в диапазоне 13 ГГц при мощности передатчика РРС 30 дБм производится расчёт зависимости потерь при распространении в свободном пространстве от расстояния [3-4]. Для этого используется формула:

$$L_0(R) = 92.45 + 20\log(f) + 20\log(R), \quad (1)$$

где:  $f = 13$  ГГц – частота;

$R$  – протяженность интервала [км].

Для расчета зависимости ослабления [дБ] радиосигнала в атмосферных газах от расстояния [км] рассчитывается удельное ослабление сигнала в кислороде воздуха и удельное ослабление сигнала в водяном паре.

Здесь формула удельного ослабления сигнала в кислороде воздуха имеет вид (2):

$$\gamma_o = \left( \frac{7.2r_t^{2.8}}{f^2 + 0.34r_p^2 r_t^{1.6}} + \frac{0.62\xi_3}{(54-f)^{1.16\xi_1} + 0.83\xi_2} \right) f^2 r_p^2 \cdot 10^{-3} = 7.613 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/км}, \quad (2)$$

где:  $t = 29^\circ\text{C}$  – макс. среднемесячная температура воздуха в астраханской области (АО);

$p = 1021$  мбар – макс. среднемесячное атмосферное давление в АО;

$$r_t = \frac{288}{273+t} = 0,954;$$

$$r_p = \frac{p}{1013} = 1,008;$$

$$\xi_1 = r_p^{0,717} r_t^{-1,8132} \exp[0,0156(1-r_p) - 1,6515(1-r_t)] = 1,015;$$

$$\xi_2 = r_p^{0,5146} r_t^{-4,6368} \exp[0,1921(1-r_p) - 5,7416(1-r_t)] = 0,957;$$

$$\xi_3 = r_p^{0,3414} r_t^{-6,585} \exp[0,2130(1-r_p) - 8,5854(1-r_t)] = 0,919.$$

Удельное ослабление сигнала в водяном паре составляет (3):

$$\begin{aligned} \gamma_{H_2O} = & \left[ \frac{3,98\eta_1 \exp[2,23(1-r_t)]}{(f-22,235)^2 + 9,42\eta_1^2} g(f,22) + \frac{11,96\eta_1 \exp[0,7(1-r_t)]}{(f-183,31)^2 + 11,13\eta_1^2} + \right. \\ & + \frac{0,081\eta_1 \exp[6,44(1-r_t)]}{(f-321,226)^2 + 6,29\eta_1^2} + \frac{3,66\eta_1 \exp[1,6(1-r_t)]}{(f-325,153)^2 + 9,22\eta_1^2} + \\ & + \frac{25,37\eta_1 \exp[1,09(1-r_t)]}{(f-380)^2} + \frac{17,4\eta_1 \exp[1,46(1-r_t)]}{(f-448)^2} + \\ & + \frac{844,6\eta_1 \exp[0,17(1-r_t)]}{(f-557)^2} g(f,557) + \frac{290\eta_1 \exp[0,41(1-r_t)]}{(f-752)^2} g(f,752) + \\ & \left. + \frac{83328\eta_2 \exp[0,99(1-r_t)]}{(f-1780)^2} g(f,1780) \right] (f^2 \rho r_t^{2.5} \cdot 10^{-4}) = 0,039 \text{ дБ/км}, \quad (3) \end{aligned}$$

где:  $\rho = 20 \text{ г/см}^3$  – абсолютная влажность, рассчитанная для средней относительной влажности и максимальных среднемесячных температуры и влажности;

$$\eta_1 = 0,955r_p r_t^{0,68} + 0,006\rho = 1,052;$$

$$\eta_2 = 0,735r_p r_t^{0,5} + 0,0353r_t^4 \rho = 1,307;$$

$$g(f, f_i) = 1 + \left( \frac{f - f_i}{f + f_i} \right)^2.$$

Расчёт зависимости (4) ослабления [дБ] радиосигнала в атмосферных газах от расстояния происходит по формуле [км]:

$$A_a(R) = (\gamma_o + \gamma_{H_2O})R. \quad (4)$$

Расчёт зависимости (5) мощности сигнала на входе приёмника [дБм] от расстояния [км] имеет вид:

$$P_{ПРМ}(R) = P_{ПРД} + G_1 + G_2 - L_0(R) - L_{\phi_1} - L_{\phi_2} - A_a(R), \quad (5)$$

где:  $P_{ПРД} = 30$  дБм – мощность передатчика;

$G_1 = G_2 = 44,8$  дБи – коэффициенты усиления антенн;

$L_{\phi_1} = L_{\phi_2} = 0,5$  дБ – потери в фидерах.

Рассчитаем зависимость (6) запаса на замирания [дБ] от расстояния [км]:

$$F(R) = P_{ПРМ}(R) - P_{ПРМ.порог}, \quad (6)$$

где:  $P_{ПРМ.порог} = -75$  дБм – пороговый уровень сигнала на входе приёмника.

Рассчитаем зависимость (7) коэффициента [%] сильнопоражённых ошибками секунд (*Severely Errored Second Ratio, SESR*), обусловленного влиянием дождей, от расстояния [км]:

$$SESR_{\delta}(R) = P_{\delta}(R) \cdot Q(R), \quad (7)$$

где:  $P_{\delta}(R)$  – вероятность отказа, вызванная дождём, %;

$Q(R)$  – коэффициент для расчета, зависящий от  $P_{\delta}(R)$ .

При расчете  $P_{\delta}(R)$  используются следующие параметры:

$I = 16$  мм/ч – средняя интенсивность дождей в АО;

$h_1 = h_2 = 30$  м – высоты подвеса антенн;

$k_z = 0,03041$ ,  $k_g = 0,03266$ ,  $\alpha_z = 1,1586$ ,  $\alpha_g = 1,0901$  – коэффициенты, зависящие от частоты передачи (см. рекомендацию МСЭ-R P.838-3);

$\tau = 0^\circ$  – угол наклона оси поляризации по отношению к горизонтали.  $0^\circ$  если поляризация линейная,  $45^\circ$  если круговая.

$$Q(R) = \min(12, 0.1227 \cdot 27 \cdot [P_{\delta}(R)]^{-0.1227}).$$

Рассчитаем зависимость (8) коэффициента [%] сильнопоражённых ошибками секунд, обусловленного интерференционными замираниями, от расстояния [км]:

$$SESR_{инт}(R) = T_{инт}(R) \cdot 10^{-0,1F(R)}, \quad (8)$$

где:  $T_{инт}(R) = Q_{инт} \cdot T_{\Delta\epsilon}(R)$  – процент времени, в течение которого в системе будут интерференционные замирания [%];

$Q_{\text{ум}} = 1$  – фактор влияния условий земной поверхности, учитывающий наличие отраженных волн от поверхности Земли. Принимается равным 1, если отсутствуют значительные неровности рельефа;

$T_{\Delta\epsilon}(R) = KcR^d f^b$  – вероятность появления гладких интерференционных замираний [%];

$K = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $c = 0,5$ ,  $d = 2$ ,  $b = 1,5$  – коэффициенты, учитывающие климатические особенности района;

$F(R)$  – запас на замирания [дБ].

Рассчитаем зависимость (9) общего коэффициента [%] сильнопоражённых ошибками секунд от расстояния [км]:

$$SESR(R) = SESR_{\text{д}}(R) + SESR_{\text{инт}}(R). \quad (9)$$

На рисунке 1 представлены результаты расчетов зависимости коэффициентов сильнопоражённых ошибками секунд. Пунктиром обозначен уровень допустимого значения этого коэффициента – 0,006%.

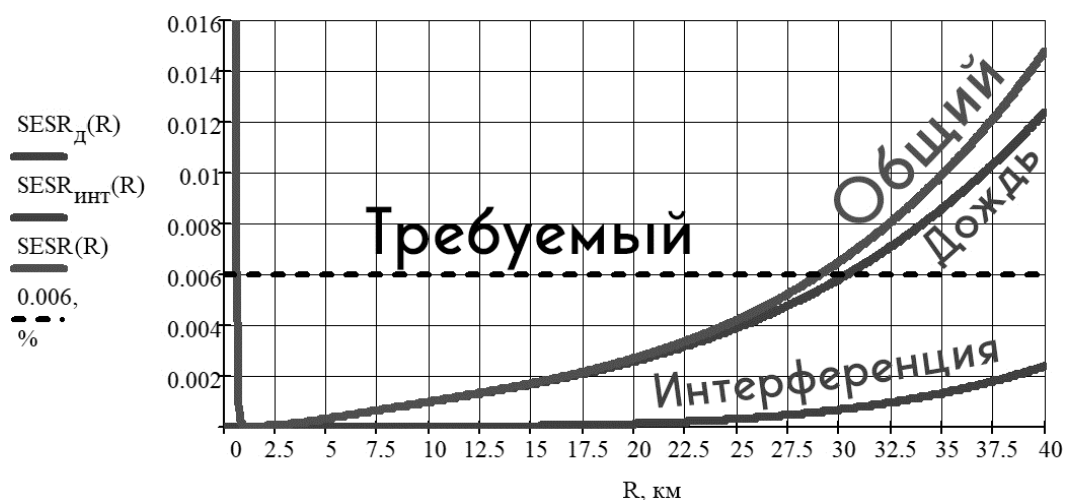


Рис. 1. Графическое представление зависимости коэффициентов сильнопоражённых ошибками секунд от расстояния с учётом уровня допустимого значения общего коэффициента – 0,006%.

На рисунке 2 построена зависимость пригодности трассы от расстояния по которой определяется максимальная дальность связи [км]. Учитывая, что норма по коэффициенту сильнопоражённых ошибками секунд – 0,006% [6], получаем, что дальность связи для частоты 13 ГГц и мощности передатчика 30 дБм – 29,1 км:

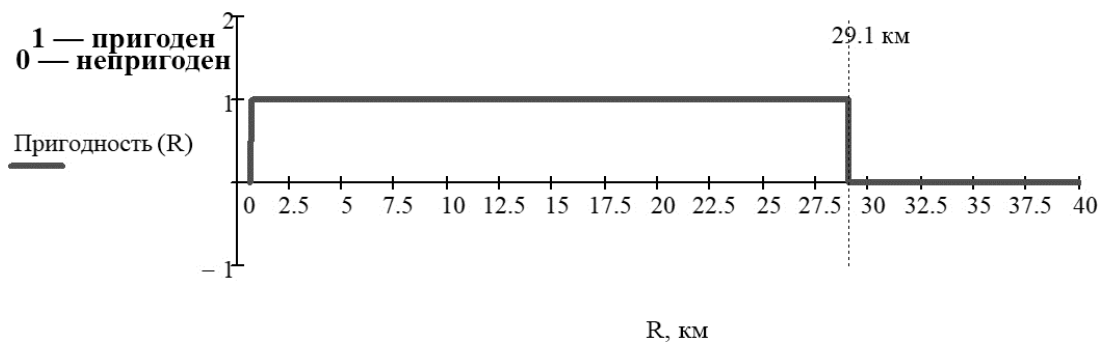


Рис. 2. Зависимость пригодности трассы от расстояния с отметкой максимальной дальности связи.

Рассмотренный пример промоделирован в автоматизированном расчётном комплексе RPLS ONEGA. Построен радиорелейный интервал в ONEPLAN RPLS-DB Link (см. рис. 3) с рассчитанной длиной 29,1 км, частотой передачи 13 ГГц, мощностью передатчика 30 дБм, а также остальными параметрами, указанными в расчетах. Расположение интервала выбрали на юге астраханской области вне пересечений водных преград. Такие условия являются более благоприятными и это является частью основного исследования для условий Астраханской области.



Рис. 3. Моделируемый в ONEPLAN RPLS-DB Link радиорелейный интервал.

Проведён расчет пригодности (см. рис. 4) этого интервала и подтверждена правильность проделанных расчетов.

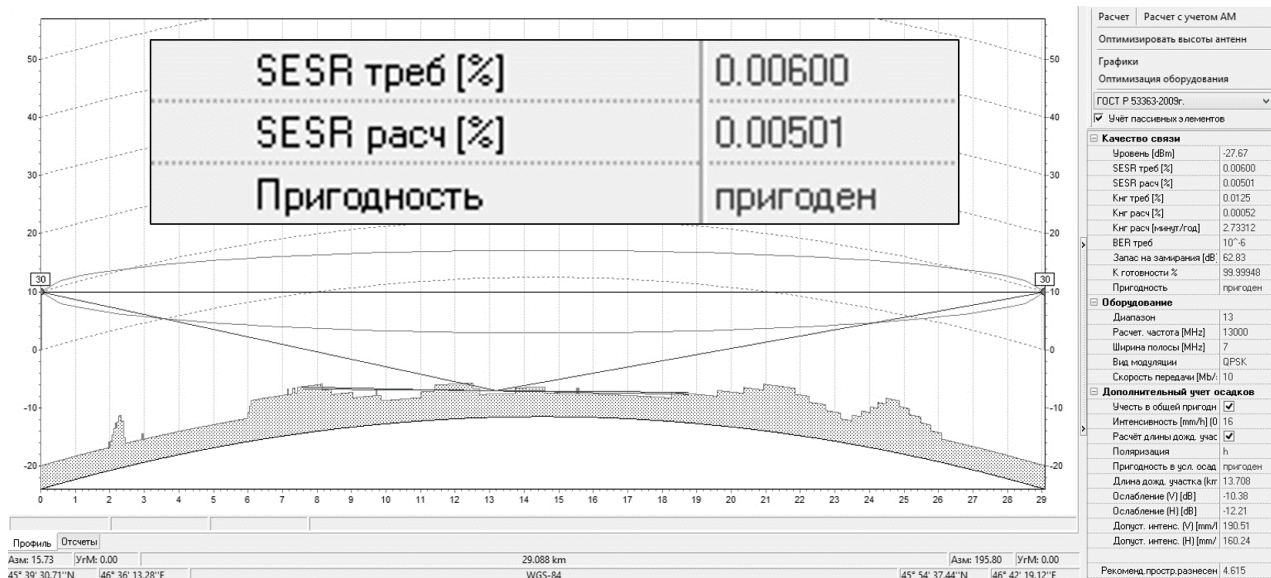


Рис. 4. Расчет пригодности радиорелейного интервала в ONEPLAN RPLS-DB Link.

Как видно из рисунка 4, проведенные расчеты соответствуют расчетным результатам, полученным на программном комплексе ONEPLAN RPLS-DB Link. Проведены аналогичные расчеты дальности связи для каждой частоты (7–38 ГГц) и с учетом мощности передатчика (16–30 дБм).

Итоговые результаты расчетов приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Итоговая справочная таблица возможной дальности связи  
в зависимости от частотного диапазона и мощности передатчика**

Дальность связи в зависимости от частоты передачи и мощности передатчика, км								
Частота	Мощность передатчика							
	16 дБм	18 дБм	20 дБм	22 дБм	24 дБм	26 дБм	28 дБм	30 дБм
7 ГГц	17,4	21,6	25,3	27,9	29,8	31,6	33,2	35,5
8 ГГц	16,9	20,9	24,5	27,1	28,8	30,6	32,2	34,4
11 ГГц	15,2	18,9	22,1	24,4	26,0	27,6	29,0	31,0
13 ГГц	14,3	17,7	20,7	22,9	24,4	25,9	27,2	29,1
15 ГГц	13,0	16,1	18,8	20,8	22,1	23,5	24,7	26,4
18 ГГц	11,3	14,0	16,4	18,1	19,3	20,5	21,5	23,0
23 ГГц	8,5	10,5	12,3	13,6	14,5	15,4	16,2	17,3
38 ГГц	0,472	0,584	0,683	0,755	0,805	0,854	0,897	0,960

Таким образом, полученные результаты являются материалом, рассчитанным для условий Астраханской области, степной местности, без водных преград и практически в отсутствии лесной растительности. Такие условия можно считать идеальными с учетом местного климата. Результаты расчетов проверены в автоматизированном расчетном комплексе RPLS ONEGA модуль Link (для радиорелейных систем). Полученные данные могут

использоваться в качестве допроектного планирования развития или оптимизации той части сети оператора, которая базируется на радиорелейных линиях. Использование подготовленной таблицы поможет сориентироваться на максимально возможные дистанции для радиорелейных систем определённой мощности для принятия решения о возможности или необходимости строительства радиорелейной линии в качестве соединительной линии между узлами связи или привязки узлов связи к центрам коммутации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pishchin O. N., Puzamkov D. S., Perova K. V., Chulkov I. O. Groups of mobile cellular service stations for operational radio communication tasks in remote areas // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing Ltd, 2021. – P. 012031.
2. Дмитриев А. В., Никулин В. В., Скобеев И. К. Разработка лабораторных работ по курсу «Сети и системы радиосвязи» // *LI Огарёвские чтения: материалы Всероссийской с международным участием научной конференции: в 3 ч.* – Саранск, 2023. – Ч. 1. – С. 252–260.
3. Дмитриев В. Н., Пищин О. Н. Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства в системах подвижной радиосвязи: учебное пособие. – 2-е изд., перераб. – Астрахань: Изд-во АГТУ, 2022. – 156 с.
4. Милютин Е. Р., Василенко Г. О., Сиверс М. А., Волков А. Н., Певцов Н. В. Методы расчёта поля в системах связи дециметрового диапазона. – СПб.: Триада, 2003. – 159 с.
5. Чулков И. О., Пищин О. Н. Исследование радиочастотных диапазонов, используемых для организации РРС на территории Астраханской области // *VII Международная конференция «Информационные технологии и технические средства управления» (ICST-2023)*. – Астрахань, 2023. – С. 323–324.