

А. С. Калинин, Е. А. Рубцов

## МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ СРЕДСТВ АВИАЦИОННОЙ ЦИФРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

A. S. Kalintsev, E. A. Rubtsov

### THE METHOD OF CALCULATING THE WORKSPACE AERONAUTICAL DIGITAL RADIO METER RANGE

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* На сегодняшний день в соответствии с глобальным авионавигационным планом ИКАО на 2016–2030 гг. продолжается внедрение обслуживания по линии передачи данных, и на данном этапе предполагается использование линии передачи данных VDL-2 как основной. Инфраструктура линии передачи данных VDL-2 определяется как основа для внедрения сервисов, в том числе и CPDLC. При расширении зоны обслуживания линии передачи данных следует выполнить анализ основных эксплуатационно-технических характеристик радиотехнических систем связи режима VDL-2. Задача анализа эксплуатационно-технических характеристик приобретает особую актуальность при проектировании новых объектов гражданской авиации в условиях ужесточения требований к безопасности полетов, а также при расширении спектра предоставляемых сервисов и услуг. Целью статьи является разработка методики расчета рабочей области средств авиационной цифровой радиосвязи ОБЧ диапазона. *Результаты и выводы.* Разработана методика расчета рабочей области радиотехнических средств связи, учитывающая параметры зоны действия средств радиосвязи VDL-2 при обеспечении полетов в нижнем воздушном пространстве. Сделан вывод о необходимости применения данной методики для анализа существующих средств авиационной радиосвязи, а также при определении позиций размещения автоматических радиоретрансляторов.

**Ключевые слова:** безопасность полетов, VDL-2, линия передачи данных, зона действия, рабочая область, нижнее воздушное пространство.

**Abstract.** *Relevance and objectives.* At the moment in accordance with the global air navigation plan ICAO for 2016-2030 y., continues implementation of services for data link, and at this stage, the VDL-2 data link is expected to be used as the primary data link. Infrastructure the VDL-2 data link is defined as the basis for the implementation of services, including CPDLC. When expanding the service area of data link, it is necessary to perform the analysis of the main operational and technical characteristics of radio communication systems mode VDL-2. The object of analysis of operational and technical characteristics becomes particularly relevant in the design of new civil aviation facilities, in the context of stiffening safety requirements flight, as well as the expansion of the range of services provided. The purpose of the article is to develop a methodology for calculating the working area of aviation digital radio VHF range. Results and conclusions. The method of calculation of the working area of radio communication means is developed, taking into account the parameters of service area of radio communication VDL-2 when providing flights in the lower airspace. The conclusion is made about the need to use this method for the analysis of existing means of aviation radio, as well as in determining the position of the placement of automatic radio repeaters.

**Keywords:** flight safety, VDL-2, data link, ground station VDL-2, effective area, work area, lower airspace.

### Введение

Использование цифровой радиосвязи позволяет снизить нагрузку на диспетчерский состав повышением степени автоматизации процесса управления воздушным движением (УВД), увеличить ситуационную осведомленность и разгрузить радиоэфир за счет передачи информации в виде стандартных текстовых сообщений CPDLC (controller-pilot data link communications). Эти факторы в конечном итоге положительно сказываются на качестве процесса УВД и уровне безопасности полетов [1].

К достоинствам цифровой радиосвязи, помимо повышения уровня автоматизации процесса УВД, можно отнести возможность применения помехоустойчивого кодирования, рациональное ис-

пользование частотного спектра и возможность использования передатчиков меньшей по сравнению с аналоговыми системами мощности. Одним из видов цифровой радиосвязи в ГА является линия передачи данных (ЛПД) VDL-2 (Very High Frequency Data Link – Mode 2).

### Методика расчета рабочей области для линии передачи данных VDL-2

Рабочей областью для цифровой линии передачи данных будем называть объем пространства, в пределах которого обеспечивается требуемое качество связи линии передачи данных. Показателем качества является вероятность приема ошибочного сообщения.

Для передачи информации в ОБЧ диапазоне по линии передачи данных VDL mode 2 используется дифференциальная 8-позиционная фазовая манипуляция D8PSK (Differential 8 Phase Shift Keying) с применением приподнято-косинусоидального формирующего фильтра с  $\alpha = 0,6$  [2].

Согласно существующим требованиям, при использовании линии передачи данных VDL-2 вероятность неполучения сообщения не должна превышать  $10^{-6}$  [3]. Таким образом, примем, что сообщение, полученное с ошибкой, которую не удалось исправить, будем считать непринятым. Тогда будем считать, что вероятность приема неправильного сообщения не должна превышать  $10^{-6}$ . Максимальный размер кадра режима VDL-2 (по умолчанию) составляет 8312 бит [2].

Вероятность ошибочного приема сообщения при передаче без использования избыточного кодирования определяется по формуле

$$P_{\Pi} = 1 - \prod_{i=1}^S (1 - P_{Ci}), \quad (1)$$

где  $P_{\Pi}$  – вероятность ошибочного приема сообщения;  $P_{Ci}$  – вероятность ошибочного приема  $i$ -го бита;  $S$  – длина пакета.

В работе [3] указано, что в ЛПД VDL-2 при передаче данных используется помехоустойчивое кодирование. Кодирование информации обеспечивается использованием систематического (255, 249)  $2^8$ -кода Рида – Соломона ( $RS$ ) фиксированной длины. Применяемый  $RS(n, k)$  код позволяет исправлять  $t$  символьных ошибок. Корректирующая характеристика  $RS$  кода  $(n, k) = (2^m - 1, 2^m - 1 - 2t)$ , где  $m$  – количество бит на символ определяется в соответствии с формулой минимального расстояния Хэмминга

$$t = \text{int} \left[ \frac{d_{\min} - 1}{2} \right] = \text{int} \left[ \frac{n - k}{2} \right]. \quad (2)$$

Таким образом, для кода  $RS(255, 249)$  корректирующая характеристика  $t = 3$  символьных ошибки (24 бита). Следует принять во внимание, что код  $RS$  применяется для кодирования и восстановления символов, поэтому кодовое слово (КС), имеющее четыре символьные ошибки, не будет восстановлено, т.е. будет принято как ошибочное.

Вероятность приема КС с ошибкой (вероятность ошибочного сообщения ( $P_{\text{ОП}}$ )) и сообщений без ошибки составляет 1, тогда вероятность приема сообщения с ошибкой может быть найдена

$$P_{\text{ОП}} = 1 - P_{\text{ПП}}. \quad (3)$$

Сообщения, принятые без ошибок и с ошибками, количество которых не превышает  $t$ , – правильно принятые сообщения, тогда вероятность приема правильного сообщения можно вычислить по формуле Бернулли. Вероятность ошибочного сообщения найдем по формуле, представленной в работе [4]:

$$P_{\text{ОП}} = 1 - \sum_{i=0}^t \left[ \binom{i}{n} P_{SE}^i (1 - P_{SE})^{n-i} \right], \quad (4)$$

где  $t$  – корректирующая характеристика кода  $RS$ ;  $\binom{i}{n} = \frac{n!}{i!(n-i)}$  – биномиальный коэффициент;  $P_{SE}$  – вероятность символьной ошибки.

Вероятность символьной ошибки кода для независимого появления ошибок рассчитывается по формуле

$$P_{SE} = 1 - (1 - P_b)^m, \tag{5}$$

где  $P_b$  – BER (*bit error ratio*) вероятность ошибок на бит;  $m$  – количество бит на символ.

При больших значениях  $n$  и малых значениях вероятности  $P_b$  формула Бернулли является неудобной и для вычислений используют формулу Пуассона. Формула применима для  $p \leq 0,1$  и  $n \cdot p \leq 10$ . Тогда

$$P_{OII} = 1 - \sum_{i=0}^t \frac{a^i}{i!} e^{-a}, \tag{6}$$

где  $t$  – корректирующая характеристика кода RS;  $m$  – заданное количество ошибок в сообщении;  $a = NP_{SE}$  – среднее количество ошибочных символов в КС ( $N$  – длина сообщения,  $P_{SE}$  – вероятность символьной ошибки (5)).

Учитывая, что коэффициент ошибок на бит (*BER – bit error rate*) – число ошибок на бит выборки, деленное на общее число битов в ней, обычно усредненное по многим таким выборкам [2], вероятность приема ошибочного сообщения определяется, в первую очередь, величиной BER.

В соответствии с [2], BER для ЛПД VDL режима 2 представляет собой максимальную корректируемую частоту ошибок в битах, равную  $1 \cdot 10^{-4}$ . Величина BER зависит от отношения сигнал/шум и типа используемой модуляции.

Вероятность символьной ошибки на бит при использовании DMPSK находится по формуле [5]

$$P_s \approx 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_s}{N_0}} \sin \frac{\pi}{\sqrt{2M}}\right), \tag{7}$$

где  $E_s = E_b \log_2 M$  – энергия, приходящаяся на символ;  $M = 2^k$  – количество равновероятных символов;  $Q(x)$  – гауссов интеграл ошибок.

Гауссов интеграл ошибок может быть определен несколькими способами, его нельзя вычислить в аналитическом виде. Один из видов аппроксимации [5]:

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right), \tag{8}$$

$E_b/N_0$  – энергетическое отношение сигнал/шум. Отношение является стандартной качественной мерой производительности систем цифровой связи. Отношение  $E_b/N_0$  представляет собой нормированное на ширину полосы и скорость передачи битов отношение S/N [6]:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{ST_b}{N/W} = \frac{S/R}{N/W} = \frac{S}{N} \left(\frac{W}{R}\right), \tag{9}$$

где  $T_b$  – время передачи бита;  $N$  – мощность шума;  $R$  – скорость передачи битов;  $W$  – ширина полосы.

Значения скорости передачи битов и ширины полосы ЛПД режима VDL-2 составляют 31 500 бит/с и 25 кГц соответственно.

Приведенные выше формулы верны для канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). Для реальных каналов вероятность будет меньше.

График зависимости BER является одной из важнейших характеристик качества систем цифровой связи. Отношение  $E_b/N_0$  является мерой производительности цифровых систем связи и его можно использовать как метрику, с помощью которой можно сравнить качество цифровых систем [6].

На рис. 1 представлены графики зависимости BER от  $E_b/N_0$  для различных видов манипуляций, рассчитанные в программе MATLAB.

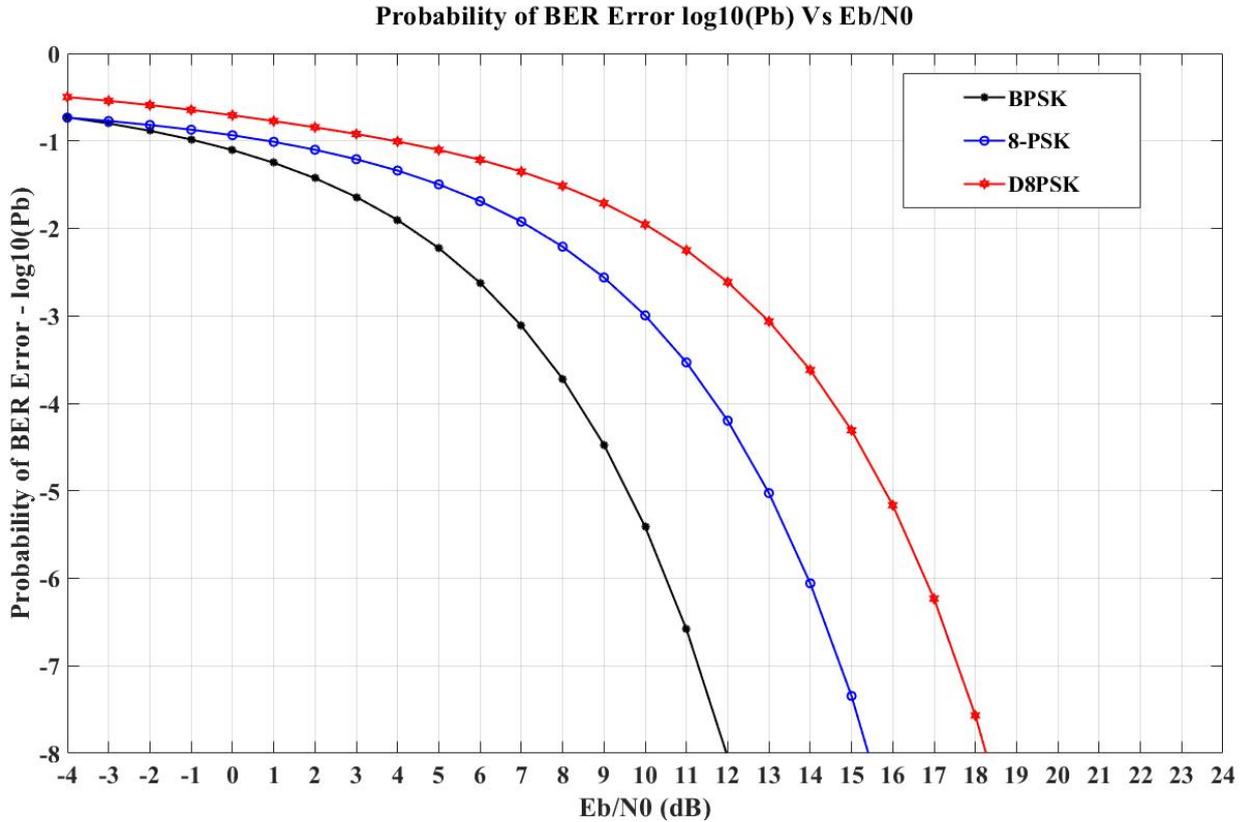


Рис. 1. График зависимости вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/шум для разных видов применяемой манипуляции

На рис. 2 приведена схема Simulink-модели D8PSK манипуляции для канала АБГШ для сравнения данных, полученных по аналитическим формулам, с результатами моделирования методом Монте-Карло, выполненная в программе Simulink.

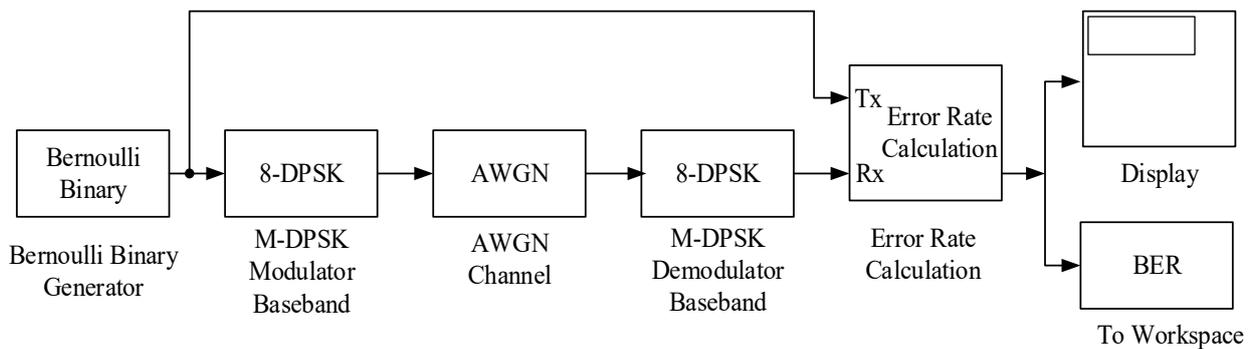


Рис. 2. Схема Simulink-модели D8PSK манипуляции для канала АБГШ

Метод симуляции заключается в переборе заданных отношений С/Ш и фиксации числа битовых ошибок для каждой из манипуляций. Результаты для манипуляций D8PSK представлены на рис. 3, где красная кривая получена при выполнении статистической симуляции, зеленая – с помощью аналитического метода расчета.

Графики, полученные по результатам моделирования и вычислений, демонстрируют достоверность аналитических методов расчета. Для манипуляции D8PSK аналитические значения  $E_b/N_0$  при  $BER = const$  практически совпадают со значениями, полученными с помощью статистической симуляции методом Монте-Карло и лежат в пределах 90 % уровня доверия (confidence level = 90 %). Для интересующих нас значений  $BER = 10^{-4}$  графики полностью совпадают [7].

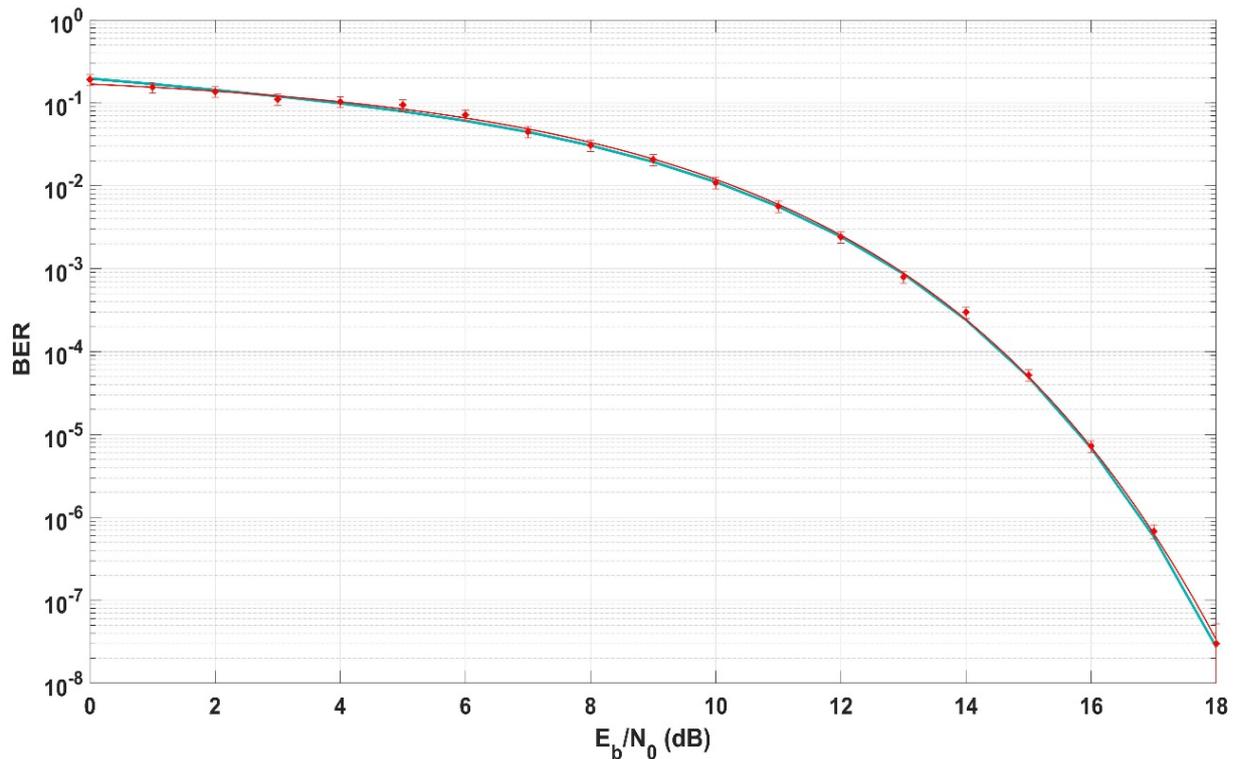


Рис. 3. Графики зависимости BER от отношения  $E_b/N_0$  для D8PSK манипуляции

При передаче информации большого объема сообщения разбивают на пакеты размером 249 байт (255 – длина блока кода RS). Максимальное количество пакетов в одном кадре режима VDL-2 составляет 1039 [2]. Тогда вероятность ошибочного приема сообщения равна

$$P_{OC} = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{Пi}), \tag{9}$$

где  $P_{Пi}$  – вероятность неправильного приема одного пакета;  $N$  – количество пакетов в одном сообщении.

Расчет рабочей области ЛПД VDL-2 выполняется по следующей методике:

- 1) рассчитать отношение сигнал/шум для максимального и минимального уровня помехи на различных удалениях;
- 2) вычислить вероятность ошибки BER;
- 3) определить вероятность ошибки символа  $P_{es}$ ;
- 4) с учетом помехоустойчивого кодирования, вычислить вероятность неправильного приема сообщения;
- 5) дальность, для которой эта вероятность составляет  $10^{-6}$ , является границей РО.

### Методика расчета рабочей области систем аналоговой радиосвязи

Качественной характеристикой речевой информации является отношение сигнал/шум, полученное на входе приемника. Для определения качества речевой информации выполняют сравнение отношения сигнал/шум на входе приемника со значением, определенным требованиями ИКАО:

$$\gamma_U = \frac{U_C}{U_{Ш}}. \tag{10}$$

Напряжение сигнала равно произведению напряженности поля в точке приема на действующую длину антенны:

$$U_C = El_d, \tag{11}$$

В расчетах будем использовать среднюю действующую длину бортовых антенн, равную 0,3 м. Один из способов расчета напряженности поля в точке приема приведен в пункте 3.2 данной работы.

В соответствии с рекомендацией МСЭ-Т Р-372-13 [8] необходимо учитывать внешние и внутренне шумы. Таким образом, напряжение шума складывается из собственных шумов приемника и внешних (атмосферных, промышленных и т.д.) шумов.

Значения собственного шума приемника находят по формуле [9]

$$T_{\text{шпр}} = (K_{\text{шпр}} - 1)T_0, \quad (12)$$

где  $K_{\text{шпр}}$  – коэффициент шума приемника;  $T_0 = 293$  К.

Для определения мощности шума приемника необходимо учесть шумовую температуру антенны ( $T_A$ ).

Мощность шума приемника найдем по формуле

$$P_{\text{шпрм}} = k(T_{\text{шпр}} + T_A)\Delta F, \quad (13)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана;  $\Delta F$  – ширина полосы пропускания приемника.

На значения мощности атмосферных шумов оказывают влияние такие составляющие, как: регион выполнения полетов, грозовая активность, а также другие факторы. Учесть все переменные составляющие – задача трудоемкая и зачастую невыполнимая. Поэтому при выполнении расчетов следует использовать значения шумов, характерных для зоны выполнения полетов (региона) и частоты.

РО ввиду временной изменчивости многих факторов, а также случайного характера таких изменений, в конечном итоге оказывающих влияние на параметры качества линии передачи информации, не имеет четкой границы. Вместо строгой границы наблюдается некоторый объем пространства, в пределах которого происходит постепенное ухудшение, при движении ВС от РТС связи, параметра качества и его улучшении при движении ВС в сторону РТС связи. Таким образом, для расчета границ РО (максимальной и минимальной РО) будем использовать максимальные и минимальные значения атмосферных и производственных шумов применительно к используемой частоте и региону обслуживания. Значения шумов приведены в рекомендации МСЭ-Т Р.372-13 [8].

Таким образом, напряжение помехи можно найти по формуле

$$U_{\text{п}} = \sqrt{P_{\Sigma \text{ш}} R}, \quad (14)$$

где  $P_{\Sigma \text{ш}} = P_{\text{шпрм}} + P_{\text{шатм}}$  – общий уровень шума, состоящий из собственных шумов приемника, атмосферных и промышленных шумов.

По рассчитанному напряжению помехи и по кривой потерь на распространение определяют значения отношения сигнал/шум для различных расстояний.

### Расчет напряженности поля и напряжения в точке приема

На данном этапе задача сводится к необходимости определить напряжение сигнала на входе приемника. Для этого следует найти значения напряженности поля в точке приема. Из теории распространения радиоволн известно соотношение мощности и напряженности поля для свободного пространства в точке приема [10]:

$$E_{\text{св}} = \frac{\sqrt{30P_{\text{пер}} G_1}}{r}, \quad (15)$$

где  $P$  – мощность передатчика в Вт;  $G_1$  – усиление антенны по мощности в раз в заданном направлении, берется из диаграммы направленности антенны;  $D$  – расстояние от антенны в метрах.

Единицы измерения величин, применяемых в формуле (14), являются не очень удобными при выполнении расчетов. Преобразованная для практического применения формула имеет вид [10]

$$E_{\text{св}} = \frac{173\sqrt{P_{[\text{кВт}]} G_1}}{r_{[\text{км}]}}. \quad (16)$$

В реальных условиях распространения радиоволн поверхность и среда распространения радиоволн оказывают значительное влияние на уровень сигнала в точке приема. Учет влияния различных факторов осуществляется с помощью множителя ослабления ( $V$ ), который показывает, во сколько напряженность поля сигнала в реальных условиях меньше напряженности поля при распространении сигнала в свободном пространстве

$$E = E_{cb} V. \tag{17}$$

Основные потери передачи находятся по формуле

$$L_R = L_0 - V, \tag{18}$$

где  $L_0$  – потери распространения в свободном пространстве;  $V$  – множитель ослабления, дБ.

Тогда

$$V = L_0 - L_R. \tag{19}$$

В рекомендации МСЭ-R P.528-3 [12] представлены кривые основных потерь для различных удалений. Значения ослабления мощности сигнала в реальных условиях и для свободного пространства можно определить из табличных значений, приведенных в рекомендации. Подставив значения в формулу (17), найдем множитель ослабления.

Для всех удалений по формуле (14) выполним расчет значения напряженности поля сигнала при распространении в свободном пространстве. Значение напряженности в точке приема равно произведению напряженности поля в точке приема при распространении в свободном пространстве и множителя ослабления.

Значения напряжения сигнала в точке приема находят как произведение действующей длины антенны ВС и напряженности поля сигнала в точке приема.

### Расчет рабочей области наземной станции VDL mode 2

При выполнении расчета границ РО для высоты полета 1000 м примем, что первая граница РО определена для условий действия в районе максимальных по уровню промышленных и атмосферных помех, вторая граница РО определена для условий действия минимальных по уровню помех, характерных для района расположения наземной станции. В соответствии с рекомендацией МСЭ-T P.372-13 [8] были определены максимальное и минимальное значения коэффициента шума, которые составили 53 и 14 дБ соответственно. Для интересующих нас удалений по формуле (14) выполнен расчет напряженности поля в точке приема для свободного пространства, а также найдено значение множителя ослабления с использованием табличных данных рекомендации МСЭ-T P.528-3 [11]. Расчет отношения сигнал/шум и энергетического отношения сигнал/шум (5) выполнен для ширины полосы 25 кГц и на интересующих нас удалениях. С использованием программы MATLAB определены значения BER и рассчитан радиус рабочей области линии передачи данных VDL-2. Результаты расчета для максимальной и минимальной помехи сведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Результаты расчета РО при максимальных значениях помехи

Удаление, км	$E_b/N_0$ , дБ	BER	$P_{SE}$	$P_{оп}$	$P_{оп.кадра}$
78	15,62	$1,52 \cdot 10^{-5}$	$1,22 \cdot 10^{-4}$	$3,79 \cdot 10^{-8}$	$3,94 \cdot 10^{-5}$
80	15,50	$1,94 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-4}$	$9,81 \cdot 10^{-8}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$
83	14,98	$5,10 \cdot 10^{-5}$	$4,08 \cdot 10^{-4}$	$4,48 \cdot 10^{-6}$	$4,64 \cdot 10^{-3}$
85	14,58	$1,00 \cdot 10^{-4}$	$7,99 \cdot 10^{-4}$	$6,12 \cdot 10^{-5}$	$6,16 \cdot 10^{-2}$
88	13,47	$4,91 \cdot 10^{-4}$	$3,92 \cdot 10^{-3}$	0,019	1,0
90	12,78	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$8,77 \cdot 10^{-3}$	0,188	1,0
93	11,50	$3,80 \cdot 10^{-3}$	0,030	0,946	1,0

Таблица 2

Результаты расчета РО при минимальных значениях помехи

Удаление, км	$E_b/N_0$ , дБ	$BER$	$P_{SE}$	$P_{оп}$	$P_{оп.кадра}$
165	16,40	$2,73 \cdot 10^{-6}$	$2,18 \cdot 10^{-5}$	$3,96 \cdot 10^{-11}$	$4,12 \cdot 10^{-8}$
166	15,55	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$1,40 \cdot 10^{-4}$	$6,62 \cdot 10^{-8}$	$6,88 \cdot 10^{-5}$
167	15,01	$4,83 \cdot 10^{-5}$	$3,87 \cdot 10^{-4}$	$3,64 \cdot 10^{-6}$	$3,77 \cdot 10^{-3}$
170	13,35	$5,70 \cdot 10^{-4}$	$4,55 \cdot 10^{-3}$	0,030	1,0
173	11,60	$4,50 \cdot 10^{-3}$	0,035	0,979	1,0
175	10,30	$9,20 \cdot 10^{-3}$	0,071	1,000	1,0

Радиус рабочей области для блока информации размером 249 байт при воздействии максимальной помехи составил 83 км. Для минимальных значений помехи при передаче блока информации размером 249 байт радиус рабочей области составил 167 км.

По результатам расчетов границы РО наземной станции VDL-2 представлены на рис. 5 кривые А и С. Расчет зоны действия РТС ОВЧ диапазона с учетом углов закрытия выполнен в работе [12]. Границы зоны действия нанесены на карту нижнего воздушного пространства зоны Мезень КДП МВЛ – рис. 4, кривая В.

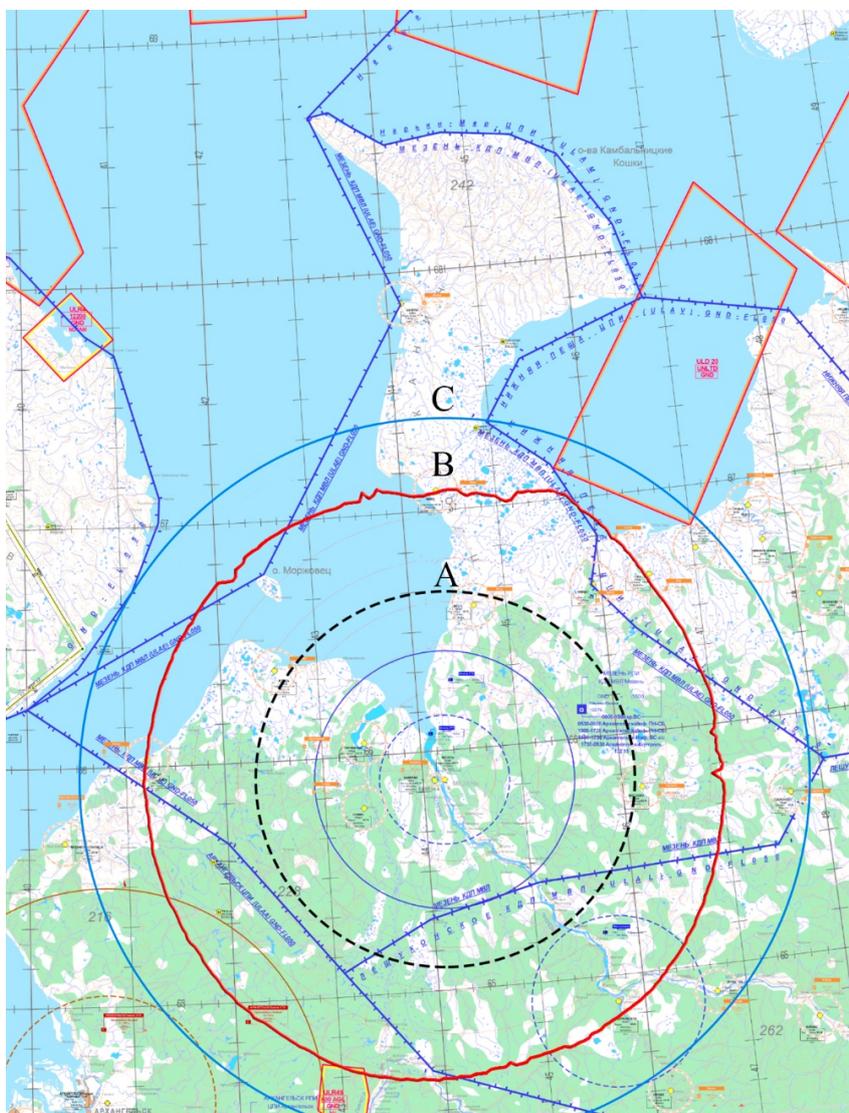


Рис. 4. Границы рабочей области и зона действия наземной станции VDL-2: А – граница РО при воздействии максимальной помехи; С – граница РО при воздействии минимальной помехи; В – зона действия наземной станции VDL-2 с учетом углов закрытия

Для высоты полета 1000 м граница рабочей области находится в пределах окружностей  $A$  и  $C$ , представленных на рис. 4. В области, ограниченной окружностью  $A$ , при воздействии максимальной помехи требования ИКАО к линиям передачи данных выполняются. Таким образом, качество передачи данных в этой области можно считать гарантированно высоким.

Рабочая область наземной станции ограничена зоной действия, таким образом, границами РО являются кривая  $B$  и окружность  $A$ . При движении  $BC$  от центра рабочей области возможно снижение качества передачи данных в пределах допустимого, в зоне от окружности  $A$  до границы зоны действия (кривая  $B$ ).

### Библиографический список

1. Глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг. Doc. 9750-AN/963. – Монреаль, 2018. – 151с.
2. Руководство по ОВЧ-линии цифровой связи (VDL) режима 2. Doc 9776-AN/970. – Монреаль, 2015. – 174 с.
3. Руководство по применению линий передачи данных в целях обслуживания воздушного движения. Doc 9694-AN/995. – Монреаль, 1999. – 217 с.
4. ANA Products Group (ANA) of Comtech Telecommunications Corporation ANA. Application Note Primer: Reed-Solomon Error Correction Codes (ECC). ANRS01\_0404. – URL: <https://www.eeweb.com/app-notes/download/2394>
5. Прокис, Дж. Цифровая связь : пер. с англ. / Дж. Прокис. – Москва : Радио и связь, 2000. – 800 с.
6. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – Москва : Вильямс, 2003. – 1104 с.
7. Harjotkaur, A. V. BER performance analysis of M-ary DPSK techniques using simulation modelling / A. V. Harjotkaur // International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER). – 2013. – Vol. 3, iss. 2. – P. 93–100.
8. Рекомендация МСЭ-R P.372-13. Радишум. – ITU, Женева, 2017. – 79 с.
9. Рубцов, Е. А. Разработка и реализация методов расчета эксплуатационных характеристик средств радиотехнического обеспечения полетов : дис. ... канд. техн. наук / Рубцов Е. А. – Санкт-Петербург, 2015. – 167 с.
10. Долуханов, М. П. Распространение радиоволн / М. П. Долуханов. – Москва : Связь, 1972. – 336 с.
11. Рекомендация МСЭ-R P.528-3. Кривые распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ. – ITU, Женева, 2013. – 51 с.
12. Калининцев, А. С. Анализ зоны действия средств авиационной радиосвязи ОВЧ-диапазона аэродрома Мезень / А. С. Калининцев // Гражданская авиация: XXI век : сб. материалов X Междунар. науч. конф. (5–6 апреля 2018 г.). – Ульяновск : УИ ГА, 2018. – С. 52–54.

### References

1. *Global'nyy aeronavigatsionnyy plan na 2016–2030 gg. Doc. 9750-AN/963* [Global air navigation plan for 2016–2030 Doc. 9750-AN/963]. Montreal, 2018, 151p. [In Russian]
2. *Rukovodstvo po OVCh-linii tsifrovoy svyazi (VDL) rezhima 2. Doc 9776-AN/970* [VHF digital link guide (VDL) mode 2. Doc 9776 AN/970]. Montreal, 2015, 174 p. [In Russian]
3. *Rukovodstvo po primeneniyu liniy peredachi dannykh v tselyakh obsluzhivaniya vozdušnogo dvizheniya. Doc 9694-AN/995* [Guidance on the use of data lines for air traffic services. Doc 9694-AN/995]. Montreal, 1999, 217 p. [In Russian]
4. *ANA Products Group (ANA) of Comtech Telecommunications Corporation ANA. Application Note Primer: Reed-Solomon Error Correction Codes (ECC). ANRS01\_0404*. Available at: <https://www.eeweb.com/app-notes/download/2394>
5. Prokis Dzh. *Tsifrovaya svyaz': per. s angl.* [Digital communication : translation from english]. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 800 p. [In Russian]
6. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital communication. Theoretical basis and practical application]. Moscow: Vil'yams, 2003, 1104 p. [In Russian]
7. Harjotkaur A. V. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER)*. 2013, vol. 3, iss. 2, pp. 93–100.
8. *Rekomendatsiya MSE-R P.372-13. Radioshum* [Recommendation ITU-R P. 372-13. Radionoise]. ITU, Zheneva, 2017, 79 p. [In Russian]
9. Rubtsov E. A. *Razrabotka i realizatsiya metodov rascheta ekspluatatsionnykh kharakteristik sredstv radio-tekhnicheskogo obespecheniya poletov: dis. kand. tekhn. nauk* [Development and implementation of methods for calculating the performance of means of radio support of flights : dis. ... cand. techn. sciences]. Saint-Petersburg, 2015, 167 p. [In Russian]
10. Dolukhanov M. P. *Rasprostranenie radiovoln* [Propagation]. Moscow: Svyaz', 1972, 336 p. [In Russian]

11. *Rekomendatsiya MSE-R P.528-3. Krivye rasprostraneniya radiovoln dlya vozduшной podvizhnoy i radio-navigatsionnoy sluzhby, rabotayushchikh v diapazonakh OVCh, UVCh i SVCh* [Recommendation ITU-R P. 528-3. Radio wave propagation curves for air mobile and radio navigation services operating in the VHF, UHF and microwave bands]. ITU, Zheneva, 2013, 51 p. [In Russian]
12. Kalintsev A. S. *Grazhdanskaya aviatsiya: XXI vek: sb. materialov X Mezhdunar. nauch. konf. (5–6 aprelya 2018 g.)* [Civil aviation: XXI century : sat. materials X international. science. Conf. (5-6 April 2018)]. Ulyanovsk: UI GA, 2018, pp. 52–54. [In Russian]

**Калинцев Андрей Сергеевич**

техник по радиолокации, радионавигации и связи (объекта КДП) службы ЭРТОС, аэродром «Васьково» подразделение на п/п «Мезень» Архангельский Центр ОВД Филиал «Аэронавигации Северо-запада» ФГУП госкорпорация ОрВД (163045, г. Архангельск, ул. Ломоносова, 86/ Выучейского, 23); ОТЭНС-1716, магистрант Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации (196210, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38) E-mail: Kas4job@gmail.com

**Рубцов Евгений Андреевич**

кандидат технических наук, доцент, кафедра радиоэлектронных систем, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации (196210, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38) E-mail: Rubtsov.spb.guga@rambler.ru

**Kalintsev Andrey Sergeevich**

radar, radio navigation and communication technician (KDP object) of the ERTOS service of the Vaskovo airfield, subdivision at the Mezen station (163045, 86 Lomonosov street / 23 Vyucheyskogo street, Arkhangelsk, Russia) OTENS-1716, master degree student, St. Petersburg State University of Civil Aviation (196210, 38 Pilotov street, St. Petersburg, Russia)

**Rubtsov Evgeniy Andreevich**

candidate of technical sciences, associate professor, sub-department of electronic systems, St. Petersburg State University of Civil Aviation (196210, 38 Pilotov street, St. Petersburg, Russia)

**УДК 621.31**

**Калинцев, А. С.**

**Методика расчета рабочей области средств авиационной цифровой радиосвязи ОВЧ диапазона / А. С. Калинцев, Е. А. Рубцов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 96–105. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-11.**