

УДК: 621.396.9

**ВЫБОР АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ ПО РАБОЧЕЙ ЧАСТОТЕ
В ОДНОПОЛОСНОЙ РАДИОЛИНИИ ТРОПОСФЕРНОЙ СВЯЗИ**

**THE CHOICE OF THE ADAPTATION ALGORITHM FOR THE OPERATING
FREQUENCY IN A SINGLE-SIDEBAND RADIO LINK
OF TROPOSPHERIC COMMUNICATION**

Н.Н. Плотников, А.В. Войнов, д-р техн. наук А.Н. Путилин

N.N. Plotnikov, A.V. Voynov, D.Sc. A.N. Putilin

ВАС им. С.М. Буденного

Управление режимами работы радиосредств является одним из важных способов повышения эффективности функционирования систем связи, взаимодействующих с нестационарной средой. Для повышения пропускной способности радиолиний исследуются, разрабатываются и используются алгоритмы управления параметрами устройств обработки сигналов и данных, как на физическом, так и канальном уровнях систем передачи данных. Вместе с тем вопросы управления алгоритмами формирования и приема сигналов в линиях тропосферной связи изучены недостаточно. В статье рассмотрены условия выбора алгоритма адаптации по рабочей частоте, основанные на оценке потери скорости информационного обмена для алгоритма «слепой» адаптации и для алгоритма адаптации с последовательной оценкой рабочих частот.

Ключевые слова: тропосферная связь, станции тропосферной связи, алгоритм слепой адаптации, алгоритм адаптации с последовательной оценкой.

Control of operating modes of radio facilities is one of the important ways to increase the efficiency of the functioning of communication systems interacting with a non-stationary environment. To increase the throughput of radio lines, algorithms for controlling the parameters of signal and data processing devices are investigated, developed and used both at the physical and channel levels of data transmission systems. At the same time, the issues of controlling the algorithms for the formation and reception of signals in tropospheric communication lines have been insufficiently studied. The article discusses the conditions for choosing the adaptation algorithm for the operating frequency, based on the estimate of the loss of the information exchange rate for the «blind» adaptation algorithm and for the adaptation algorithm with a sequential estimate of the operating frequencies.

Keywords: tropospheric communication, tropospheric communication stations, blind adaptation algorithm, sequential evaluation adaptation algorithm.

Введение

Одним из эффективных способов обеспечения надёжной помехоустойчивой тропосферной связи (ТРС) является способ, при котором

осуществляется маневрирование частотным ресурсом на тропосферной линии. Алгоритмы реализации данного способа могут быть различными: последовательный перебор (анализ) всего диапазона частот, входящих в цикл передачи,

с последующим выбором оптимальной частоты; переход на запасные частоты; псевдослучайная перестройка рабочей частоты; случайный «слепой» выбор рабочей частоты и т.д. [1, 2, 3].

Современные малогабаритные станции тропосферной связи используют различные алгоритмы адаптации по частоте. Например, в малогабаритной станции тропосферной связи «Ладья», (производства МНИИРС, г. Москва) [4] используется алгоритм последовательного перебора с выбором оптимальной частоты, однако это не исключает возможности использования других стратегий адаптации для выбора рабочей частоты реализованных в одном программно-аппаратном комплексе.

Задача выбора алгоритма адаптации по рабочей частоте

Задача выбора алгоритма адаптации по рабочей частоте состоит в определении лучшего из двух алгоритмов адаптации, обеспечивающего максимум скорости передачи при работе, с возможностью выбора наилучшей частоты, и связана с особенностями распространения сигнала в тропосферном канале связи, для которого характерно такое явление, как замирания. Исходя из данных, полученных по результатам натурных испытаний малогабаритной станции тропосферной связи «Ладья», в 15–20 % случаев во время сеанса возникали замирания в канале связи [4]. Зная данный факт, предположим, что любая группа частот, используемых для организации одного направления связи составляет 20 частот, 20 % из которых будут являться запасными, на случай возникновения замираний. Следовательно, получим 16 рабочих и 4 (20 % от 20) запасных частоты.

Рассматриваются алгоритм «слепой» адаптации и алгоритм адаптации с последовательной оценкой всех частот.

Следует отметить, что приёмники стоят во всех используемых частотах: основных и резервных, поэтому при замене рабочих частот не нужно предупреждать об этом корреспондента. Однако тестирование качества передачи при смене одной из частот или смене единственной частоты занимает некоторый интервал времени. При любом алгоритме адаптации частоты упо-

рядочиваются по номерам, порядок следования номеров — циклический.

Алгоритм слепой адаптации предписывает следующие действия при установлении соединения. Вызывающий абонент передает пакет на первой рабочей частоте. При получении ответа об успехе с указанием рекомендованного режима, он передает следующий пакет на этой же частоте (частотах) в указанном режиме, при отсутствии ответа — повторная передача пакета на следующей частоте. Для вызова используется 8-мь первых по номерам частот. Отвечающий абонент: при отсутствии приёма — ожидание, при наличии приёма — формирование ответного пакета на этой же частоте с указанием оптимального режима передачи. Для поддержания соединения любой абонент (вызывающий и отвечающий) при падении качества приёма на частоте ниже порога 1 Мб/с посылает корреспонденту команду на замену данной частоты на следующую по порядку свободную из 20 частот. Одновременно происходит замена только одной частоты. Если частота была единственной — действия как при установлении соединения. При поддержании соединения тестовые последовательности не передаются. Коррекция потока передаваемых IP пакетов происходит в протоколе TCP-IP.

Алгоритм адаптации с последовательной оценкой при вхождении в связь производит предварительное последовательное тестирование всех 8-ми вызывных частот. По результатам тестирования выбирается оптимальный рабочий режим. В режиме поддержания соединения, при необходимости замены рабочей частоты, производится тестирование 4-х свободных частот и переход на лучшую по качеству. Возможна одновременная замена нескольких (не более 4-х) частот.

Оценка потери скорости информационного обмена для алгоритма слепой адаптации

Следует произвести оценку потери скорости информационного обмена в радиолинии $V_{инф}$ из-за использования принятого алгоритма адаптации. Под эффективной скоростью информационного обмена (производительностью) $V_{пр}$ будем понимать максимальную скорость, с которой абонент может вести инфор-

мационный обмен в канале с заданными характеристиками.

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{инф}} \cdot \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{раб}} + T_{\text{пер}}} = V_{\text{инф}} \cdot (1 - K_{\text{пот}}),$$

где $T_{\text{раб}}$ — среднее время работы на частоте, принимает значения от 40 до 200 мс;

$T_{\text{пер}}$ — среднее время перестройки на другую частоту;

$K_{\text{пот}}$ — коэффициент потерь скорости из-за адаптации по частоте.

$$K_{\text{пот}} = \frac{T_{\text{пер}}}{(T_{\text{раб}} + T_{\text{пер}})} = \frac{1}{\left(1 + \frac{T_{\text{раб}}}{T_{\text{пер}}}\right)}.$$

Обозначим P — коэффициент надёжности канала: вероятность при занятии в случайное время застать его в пригодном для передачи состоянии. Вероятность установления соединения на попытке с номером n определяется функцией вероятности геометрического распределения [6, 7]

$$P(n) = (1 - P)^{n-1} \cdot P.$$

Вероятность установления соединения за n попыток определяется функцией геометрического распределения

$$F(n) = 1 - (1 - P)^n.$$

Отсюда следует, что обычные требования по вероятности установления соединения на 8-ми частотах более 0,95 подразумевают значение коэффициента надёжности канала не ниже:

$$P = 1 - (1 - F(n))^{\frac{1}{n}} \geq 1 - (1 - 0,95)^{\frac{1}{8}} = 0,312.$$

Математическое ожидание и дисперсия геометрического распределения, соответственно, равны [8]

$$E = \frac{1}{P}, \quad D = \frac{1 - P}{P^2}.$$

Вероятность установления соединения за время $t_{\text{доп}}$ оценивается по модифицированной границе Чебышева [9]

$$P_{\text{тр}}(m \leq t_{\text{доп}}) \geq 1 - \frac{D^2}{(E - t_{\text{доп}})^2}.$$

Отсюда

$$t_{\text{доп}} \geq E - \frac{D}{\sqrt{1 - P_{\text{тр}}}} = \frac{1}{P} - \frac{1 - P}{P^2 \cdot \sqrt{1 - P_{\text{тр}}}}.$$

Если определить требуемую вероятность установления соединения 0,99, то допустимое время будет определено как

$$t_{\text{доп}} \geq \frac{1}{P} - \frac{1 - P}{10 \cdot P^2}.$$

Это и есть оценка времени перестройки на другую частоту.

На рис. 1 приведена зависимость времени установления соединения с вероятностью 0,99 от коэффициента надёжности канала в циклах передачи.

Коэффициент потерь из-за адаптации теперь можно оценить как

$$K_{\text{пот}} = \frac{1}{1 + \frac{T_{\text{раб}}}{t_{\text{доп}}}} \leq 1 + \left(1 + \frac{T_{\text{раб}}}{\left(\frac{1}{P} + \frac{1 - P}{10 \cdot P^2}\right)}\right)^{-1}.$$

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента потерь от коэффициента надёжности канала при различных значениях математического ожидания времени работы на занятой частоте: 5, 10, 50, 100 и 200 циклов передачи. Из рис. 1 следует, что при наихудшем значении коэффициента надёжности 0,312, время гарантированного

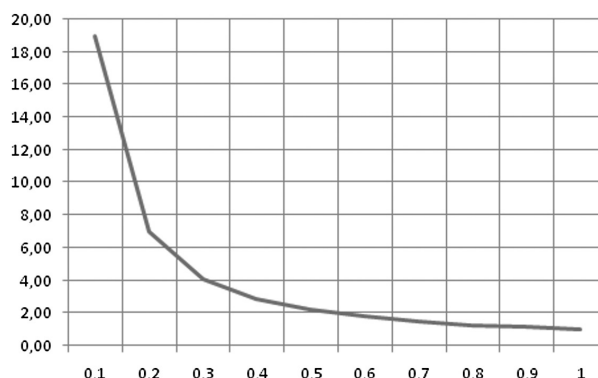


Рис. 1. Зависимость времени установления соединения (в циклах передачи) с вероятностью 0,99 от коэффициента надёжности канала

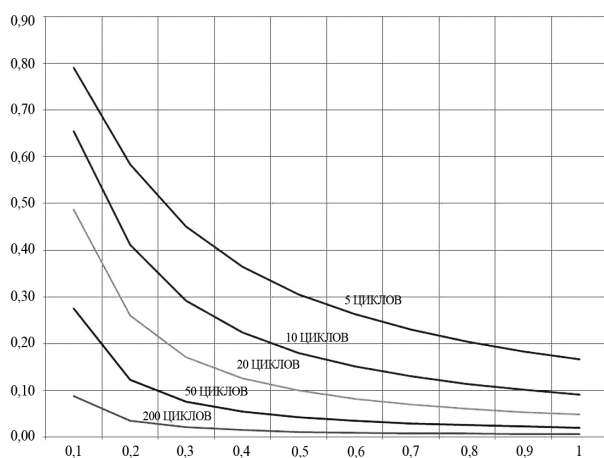


Рис. 2. Зависимость коэффициента потерь от коэффициента надёжности канала при различном значении среднего времени работы на занятой субполосе

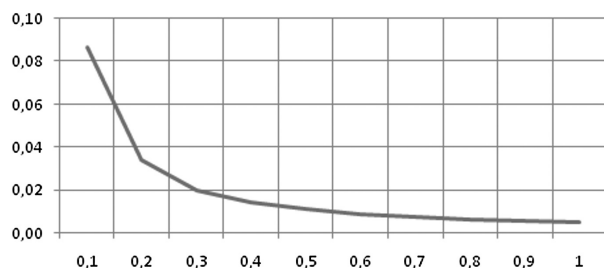


Рис. 3. Зависимость коэффициента потерь от коэффициента надёжности канала при максимальном значении времени работы на занятой частоте (200 циклов передачи)

поиска рабочей частоты составит 4,11 циклов передачи. При этом потери в скорости передачи составят 51 % (рис. 3).

Оценка потери скорости информационного обмена для алгоритма адаптации с последовательной оценкой

Аналогично произведем оценку потери скорости информационного обмена в радиолинии $V_{инф}$ при использовании алгоритма адаптации с последовательной оценкой.

Время перестройки для данного алгоритма не зависит от коэффициента надёжности канала.

Оно всегда равно 8-ми циклам передачи. Вероятность успешного выбора приемлемой субполосы даже при самой низкой надёжности канала 0,7, равна $P_{ув} = 1 - (1 - 0,7)^8 = 0,99993$.

Коэффициент потерь для данного алгоритма

$$K_{пот} = \frac{t_{пер}}{t_{пер} + T_{раб}}$$

Как и время перестройки, он не зависит от коэффициента надёжности канала в интересующей нас области значений этого коэффициента. Однако он зависит от среднего времени работы в субполосе. Эта зависимость представлена в таблице.

Алгоритм адаптации с последовательной оценкой качества прохождения сигнала в пакете субполос, при времени стабильной работы в субполосе много большей чем число тестируемых субполос, то есть от 80 циклов передачи и выше, обеспечивает меньшие потери, чем алгоритм слепой адаптации. Выигрыш при коэффициенте надёжности канала больше 0,7 составляет не более 2 %. В каналах с малым временем стабильной работы (менее 50 циклов передачи) преимущество имеет алгоритм «слепой» адаптации. Для каналов с низким коэффициентом надёжности и большим временем стабильной работы в субполосе алгоритм адаптации с последовательной оценкой обеспечивает существенное преимущество перед алгоритмом «слепой» адаптации, однако для рассматриваемых каналов такая ситуация не типична.

Анализ функционирования широкополосной радиолинии ТРС в условиях РЭП

Задача анализа функционирования радиолинии ТРС в условиях радиоэлектронного подавления (РЭП) состоит в расчёте P_j^b мощности передатчика РЭП на входе приёмника, при которой наступает блокирование многополосного радиоканала $\vec{a}_1, \dots, \vec{a}_{16}$, при выборе модемом наиболее помехоустойчивого режима работы

Таблица

Зависимость коэффициента потерь для алгоритма адаптации с последовательной оценкой от времени работы на частоте

$T_{раб}$, циклов передачи по 10 мс	5	10	20	50	200
$K_{пот}$	0,615	0,444	0,286	0,138	0,038

$$\overline{\beta(\mathbf{t})} = (k_i(t), R_i(t), N_q(t)),$$

где $k_i(t)$ — текущая кратность модуляции на i -той частоте;

$R_i(t)$ — текущая скорость помехоустойчивого кодирования;

$N_q(t)$ — количество рабочих частот, для описанной модели взаимодействия станции РЭП и радиолинии ТРС с мощностью сигнала на входе приёмника P_s в классе помех с ограниченной средней мощностью:

$$P_j^{blk} = \text{argp}_e(P_s, P_j, B) \geq p_d.$$

В режиме защиты от РЭП с принятого потока снимается шифрующая гамма. Кодер и декодер для данного режима не используются. При демодуляции происходит синфазное наложение посылок, кодирующих суббиты одного информационного бита. В соответствии с [6] вероятность ошибки на бит в условиях преднамеренных помех с ограниченной средней мощностью будет определяться соотношением:

$$P_{\text{ош}} = \begin{cases} 0,164 \frac{P_n}{BP_c}, & \text{при } \frac{P_n}{BP_c} \leq 0,707; \\ 1 - F\left(\frac{P_n}{BP_c}\right), & \text{при } \frac{P_n}{BP_c} > 0,707. \end{cases} \quad (1)$$

Поскольку для рассматриваемой системы связи $B=32$, условие принимает вид $P_n \leq 22,624 \cdot P_c$. Расчет открытой тропосферной трассы на предельной требуемой дистанции 150 км в типичных условиях показывает, что мощность сигнала на входе приёмника будет не менее 150 МВт. При максимальной энергетике постановщика помех по пиковой мощности в 10 Вт и отсутствии у него направленных антенн расчет релейной трассы от постановщика помех к приёмнику показывает предельную мощность помехи на входе приёмника 250 МВт. Условие (1) представляется выполнимым всегда. Возможно снижение B базы сигнала в 2–4 раза для увеличения скорости передачи [10, 11].

Заключение

Установлено, что алгоритм «слепой» адаптации имеет следующие преимущества:

- не требует тестирования всех частот на каждой посылке;
- обеспечивает быструю замену рабочих частот при снижении качества прохождения на них;
- не требует формирования специальных тестирующих посылок;
- позволяет работать с частотным планом любой емкости без изменения алгоритма адаптации;
- позволяет адаптироваться к преднамеренным и системным помехам;
- исключать из работы пораженные участки спектра.

Алгоритм последовательной адаптации имеет следующие преимущества:

- обеспечивает устойчивую работу при низком коэффициенте надёжности канала;
- позволяет адаптироваться к преднамеренным и системным помехам;
- исключать из работы пораженные участки спектра.

Однако он требует формирования специальных тестирующих посылок и канала с продолжительным временем работы на одной частоте.

Алгоритм адаптации с последовательной оценкой качества целесообразно использовать при длительном времени работы в субполосе (более 80 циклов передачи) и низкой надёжности (ниже 0,7). В каналах с малым временем стабильной работы (менее 50 циклов передачи) и надёжностью выше 0,7 преимущество имеет алгоритм «слепой» адаптации.

Литература

1. Орловский Ю.Е. Дискретное управление ансамблем сигналов в адаптивных радиосистемах с сосредоточенными помехами // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. 1983. Т. 26. № 11. С. 82–84.
2. Mobile system of radiotelefon connection S-900 with optimal frequency using. IEEE Transactions on Vehicular. 1984. VVT-33. № 3. P. 205–213.
3. Маркой В.А., Маслов О.В. Принципы обратной связи и частотной адаптации как основа развития декаметрового диапазона на морском флоте // Труды VII Всесоюзной школы по радиоэлек-

тронике. Московский институт радиотехники, электроники и автоматики. — М.: 1987. С. 76–79.

4. Муха Р.Н., Серов В.В., Тараканова Т.Г., Шевырев А.В. Малогабаритная помехозащищённая станция загоризонтной связи // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 2. С. 11–16.

5. Фомин А.Н., Копылов В.А., Филонov А.А., Андронов А.В. Общая теория радиолокации и радионавигации. Распространение радиоволн: учебник. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т. 2017. 318 с.

6. Иванов Б.Н. Теория вероятностей и математическая статистика : учебное пособие / Б.Н. Иванов. 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург: Лань. 2019. 224 с.

7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учебник для прикладного бакалавриата / В.Е. Гмурман. 12-е изд. — Москва: Издательство Юрайт. 2015. 479 с.

8. Мыльников А.Л. Теория случайных процессов : учеб. пособие / А.Л. Мыльников, А.А. Городов, А. А.Кузнецов; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. — Красноярск. 2014. 72 с.

9. Фарафонов В.Г., Устимов В.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Ч. 1. — СПб. 2009. 71 с.

10. Путилин А.Н., Чуднов А.М. Оптимизация приемника фазоманипулированных псевдослучайных сигналов при наихудшей помехе с ограниченной средней мощностью // Известия ВУЗов. Радиотехника и электроника. Т. 35. № 8. 1990.

11. Колосов С.В. Методики расчета радиорелейных и тропосферных линий: учебное пособие / С.В. Колосов, С.М. Тверитин. М-во образования и науки Российской Федерации. — М. 2018. 168 с.

References

1. Orlovski U.E. Discrete control of an ensemble of signals in adaptive radio systems with concentrated interference. Proceedings of

universities, Radio Electronics. 1983. Vol. 26. № 11. P. 82–84.

2. Mobile system of radiotelefon connection S-900 with optimal frequency using. IEEE Transaction on Vehicular. 1984. VVT-33. № 3. P. 205–213.

3. Markoy V.A., Maslov O.V. Principles of feedback and frequency adaptation as a basis for the development of decameter communication in the marine fleet. Proceedings of the VII All-Union School of Radio Electronics. Moscow Institute of Radio Engineering, Electronics and Automation. — М.: 1987. P. 76–79.

4. Mukha R.N., Serov V.V., Tarakanova T.G., Shevirev A.V. Small-sized interference-proof station for over-the-horizon communication // Advances in modern radio electronics. 2014. № 2. P. 11–16.

5. Fomin A.N., Kopylov V.A., Filonov A.A., Andronov A.V. General theory of radar and radio navigation. Radio wave propagation. — Krasnoyarsk: Siberian Federal University. 2017. 318 p.

6. Ivanov B.N. Probability theory and mathematical statistics: textbook. 2nd ed. Rev. and add. — St. Petersburg: Lan. 2019. 224 p.

7. Gmurman V.E. Probability theory and mathematical statistics: a textbook for applied bachelor's degree. 12th ed. — Moscow: Yurayt Publishing House. 2015. 479 p.

8. Mylnikov A.L. Theory of random processes: textbook allowance. Sib. state aerospace un-t. — Krasnoyarsk. 2014. 72 p.

9. Farafonov V.G., Ustimov V.I. Probability theory and mathematical statistics. Part 1. — SPb. 2009. 71 p.

10. Putilin A.N., Chudnov A.M. Optimizing a pseudo-random pseudo-random receiver for worst interference with limited average power // Radio engineering and electronics. Proceedings of universities. Vol. 35. № 8. 1990.

11. Kolosov S.V. Methods for calculating radio relay and tropospheric lines: a tutorial. Ministry of Education and Science of the Russian Federation. — Moscow. 2018. 168 p.