

ОЦЕНКА ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ СЕТИ СВЯЗИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ, ПОСТРОЕННОЙ НА ОСНОВЕ РАДИОРЕЛЕЙНЫХ СТАНЦИЙ С АДАПТИВНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ И КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

EVALUATION OF INTERFERENCE IMMUNITY OF A SPECIAL PURPOSE COMMUNICATION NETWORK BUILT ON THE BASIS OF RADIO RELAY STATIONS WITH ADAPTIVE MODULATION AND PACKET SWITCHING

Д-р техн. наук С.М. Одоевский, В.О. Ключников

D.Sc. S.M. Odoyevskiy, V.O. Klyuchnikov

Военная академия связи им. С.М. Буденного

Статья посвящена рассмотрению вопросов помехоустойчивости сетей связи специального назначения, построенных на основе радиорелейных станций с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов. Основное внимание уделяется оценке влияния средств радиоэлектронного подавления на скорость передачи в радиорелейных интервалах. Представлены результаты расчета параметров наихудшей помехи с ограниченной средней мощностью, воздействующей на радиорелейный интервал с типовыми алгоритмами адаптивной модуляции. Показано, как на основе методов теории игр можно повысить помехоустойчивость радиорелейных интервалов путем соответствующей оптимизации алгоритмов адаптивной модуляции с учетом контролируемых значений текущей и средней мощности помех, а также соотношения инерционностей контуров управления и подавления.

Ключевые слова: помехоустойчивость, адаптивная модуляция, радиорелейная связь, радиоэлектронная борьба.

The article considers the issues of interference immunity of special-purpose communication networks, built on the basis of radio relay stations with adaptive modulation and packet switching. The main attention is paid to assessing the effect of electronic suppression equipment on the transmission rate in radio relay intervals. The article presents the results of calculating the parameters of the worst interference with a limited average power affecting the radio-relay interval with typical adaptive modulation algorithms. It is shown how based on game theory methods we can increase the noise immunity of radio relay intervals by appropriate optimization of adaptive modulation algorithms, taking into account the controlled values of the current and average noise power, as well as the ratio of inertia of control and suppression circuits.

Keywords: interference immunity, adaptive modulation, radio relay communication, electronic warfare.

Радиорелейная связь считается надежным высокоскоростным видом беспроводной связи. Радиорелейные линии (РРЛ) часто используются в сетях доступа и в транспортных сетях как

самостоятельно, так и для резервирования оптоволоконных линий. Широко распространены РРЛ в полевом сегменте наземного эшелона сетей связи специального назначения (СССН).

Однако устойчивость радиорелейной связи ограничена влиянием среды распространения радиоволн (РРВ) на радиорелейных интервалах (РРИ) и внешних помех на входе приемников радиорелейных станций (РРС) (рис. 1).

В обычных условиях при правильном планировании и эксплуатации РРЛ влияние внешних помех удастся практически исключить за счет использования направленных антенн и частотно-территориального разнеса РРС с возможными источниками внешних помех. Остаточные неустранимые внутренние помехи (от близких передатчиков соседних РРС) проявляются в виде деградации чувствительности, для снижения (компенсации) которой используются специальные методы обработки сигналов, учитываемые при расчете РРЛ с целью прогноза их устойчивости, прежде всего, по отношению к замираниям радиоволн [1].

В целом расчет устойчивости сетей связи, построенных на основе РРС, в соответствии с [2], сводится к расчету устойчивости отдельных направлений связи, образуемых одной или несколькими (резервирующими друг друга) РРЛ, состоящими из множества отдельных РРИ. При этом основную сложность расчетов составляют расчеты устойчивости РРИ, которые обычно выполняются в соответствии с апробированными отечественными [1, 3] и международными [4] рекомендациями (методиками).

В известных методиках расчета устойчивости РРЛ [1, 3, 4] предполагается, что РРС на всех РРИ работают с постоянной скоростью передачи, определяемой выбранным режимом работы модема. При этом в качестве показателя неустойчивости P_n используется вероятность того, что вероятность ошибки превысит некото-

рую допустимую величину $P_{\text{ош.тр}}$. Данный показатель на практике (в ходе эксплуатации РРИ и РРЛ) соответствует доли времени, когда нарушаются требования к вероятности ошибки. Принято различать (по-разному рассчитывать) и по-разному называть показатели, характеризующие неустойчивость из-за ухудшения качества связи ниже допустимой величины на коротких и продолжительных отрезках времени. Так, замирания на отрезках времени менее 10 секунд принято оценивать показателем качества по ошибкам (или коэффициентом сильно пораженных секунд SESR — Severely Errored Second Ratio), а больше 10 секунд — коэффициентом неготовности [1].

Согласно используемым методикам при расчете показателя неустойчивости P_n величина $P_{\text{ош.тр}}$ непосредственно не используется, а задается соответствующая величина требуемого отношения сигнал/шум $h^2_{\text{тр}}$, при которой используемый в РРС модем на установленной (требуемой) скорости передачи $C_{\text{тр}}$ обеспечивает вероятность ошибки $P_{\text{ош}}(C_{\text{тр}})$ не более допустимой величины $P_{\text{ош.тр}}$. При известной мощности шума $P_{\text{ш}}$, которая при отсутствии внешних помех соответствует собственному шуму приемника в полосе пропускания, соответствующей режиму работы модема, требуемое отношение сигнал/шум $h^2_{\text{тр}}$ пересчитывается в величину чувствительности $P_{\text{с.тр}} = P_{\text{ш}} \cdot h^2_{\text{тр}}$, равную минимально необходимой мощности сигнала на входе приемника, при которой обеспечивается допустимая вероятность ошибки $P_{\text{ош.тр}}$. Далее на основании рассчитанной по модели РРВ для конкретного РРИ медианной мощности сигнала P_c вычисляется запас на замирания $V = P_c / P_{\text{с.тр}}$, который затем по известным статистическим зависимостям (аналитическим или графическим)

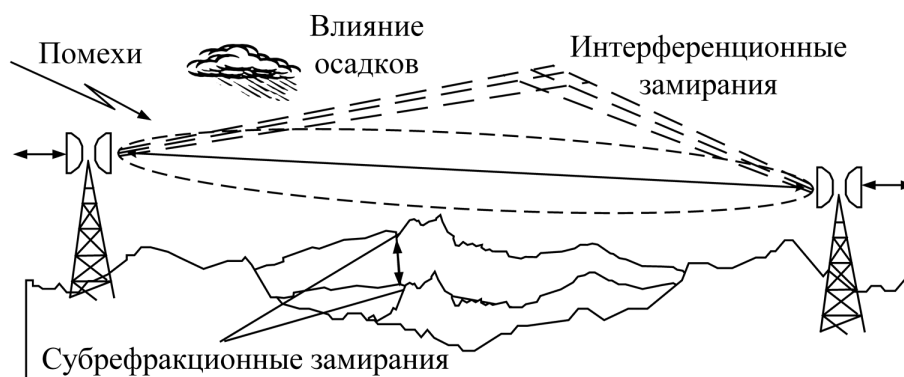


Рис. 1. Дестабилизирующие факторы, влияющие на устойчивость радиорелейной связи

пересчитывается в искомый показатель неустойчивости $P_n(V)$.

Традиционные методики расчета позволяют оценивать устойчивость РРИ $P_n(C_{тр}) = P_n(V(C_{тр}))$ только после расчета запаса на замирания $V(C_{тр})$ при заданной постоянной скорости передачи $C_{тр}$. Однако современные РРС поддерживают режимы работы с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов (АМКП), которые предполагают адаптивное изменение скорости передачи при текущем изменении уровня сигнала и/или помех. Общепринятых методик расчета устойчивости таких РРИ в настоящее время не существует. В то же время известны частные методики [5–7], в которых расчет устойчивости таких РРИ сводится к расчету устойчивости на всех поддерживаемых градациях скорости передачи (по указанным методикам), а затем к определению максимальной (из поддерживаемых модемом) постоянной скорости C_{max} (используемой для передачи мультимедийного трафика типа real time с допустимой минимальной задержкой), при которой обеспечивается заданная (допустимая) величина показателя неустойчивости $P_n(C_{max}) \leq P_{n,тр}$, и/или к расчету максимальной (усредненной по всем адаптивно переключаемым скоростям) средней скорости передачи C_{cp} (используемой для передачи пакетного трафика типа not real time с допустимой большой задержкой).

Для сетей связи специального назначения, построенных на основе РРС с АМКП, актуальными являются расчеты устойчивости РРИ по отношению не только к замираниям уровня сигнала, но и к воздействию внешних помех, что принято называть помехоустойчивостью, а по отношению к преднамеренным помехам — помехозащищенностью. В настоящей статье для большей общности используется понятие помехоустойчивости, которое включает помехозащищенность как частный случай.

Большая значимость оценки помехоустойчивости обусловлена тем, что в течение последних лет в США развернуты широкомасштабные работы, связанные с созданием новых и модернизацией существующих средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ). В частности, активно проводится разработка и испытания комплексов подвесных контейнеров РЭБ следующего поколения для оснащения самолетов и беспилотных летательных аппаратов в соответствии с про-

граммой NGJ (Next Generation Jammer — система радиоэлектронной борьбы нового поколения), в которых используются новые технологии полупроводниковой радиоэлектроники [8].

Разрабатываемый комплекс получил обозначение AN/ALQ-249 NGJ. Он имеет широкий частотный диапазон и высокие энергетические возможности, благодаря использованию активных фазированных решеток на основе нитрида галлия (GaN) и турбогенераторов мощностью более 100 кВт. Максимальная эффективная излучаемая мощность комплекса составляет 1 МВт. Данный комплекс может быть использован как для защиты боевых групп авиации путем нарушения работы радиолокационных станций противовоздушной обороны, так и для радиоэлектронного подавления систем связи противника [9].

Радиорелейные линии имеют существенно более высокую по сравнению с тропосферными и спутниковыми радиопередачами помехоустойчивость от всех видов помех, особенно, со стороны боковых и обратных лепестков диаграмм направленности антенн. До недавнего времени считалось, что РРЛ являются энергетически недоступными как для прицельных, так и для заградительных помех с самолетов РЭБ на дальностях воздействия помех более 100–200 км [10]. Но использование перспективных систем РЭБ с оптимизированными помехами позволяет подавлять и их [10]. Этому способствуют особенности организации самой радиорелейной связи. Поскольку протяженности отдельных интервалов при развертывании РРЛ обычно не превышают 30–40 км, то в зоне досягаемости самолета РЭБ с радиусом $R_n \approx 200$ –400 км может оказаться одновременно до 5–10 участков многоинтервальных линий. При этом в сторону постановщика помех может быть одновременно развернуто до 5–10 приемных антенн РРС. При ширине главных лепестков диаграмм направленности антенн $\alpha \approx 4^\circ$ –15° периметры их зон на расстояниях 200–400 км от РРС составят 25–100 км. Это означает, что при барражировании постановщика помех в недоступной зоне для огневых средств поражения противостоящей стороны он постоянно будет находиться в пределах одного или нескольких главных или боковых лепестков диаграммы направленности подавляемых РРИ.

В связи с этим РРИ могут подавляться по основному лепестку диаграммы направленности

антенны, а также по боковым — в зависимости от мощности, типа помехи и дальности до источника помех.

Как уже отмечалось ранее, воздействие постоянных помех с известной (рассчитанной) суммарной мощностью P_n на входе приемника РРС, работающего с постоянной скоростью передачи, можно учесть в виде деградации чувствительности, т.е. повышения минимально необходимой мощности сигнала $P_{с.тр} = (P_{ш} + P_n) \cdot h_{тр}^2$ для сохранения требуемого отношения сигнал/(шум+помеха) $h_{тр}^2$. Далее вычисляется запас на замирания $V = P_c / P_{с.тр}$ и искомое значение показателя неустойчивости $P_n(V)$, которое в данном случае будет характеризовать общую неустойчивость с учетом замираний и помех.

Если уровень помех будет изменяться случайным образом, но с известной функцией распределения вероятностей, то потребуются видоизменить функциональную зависимость $P_n(V)$, но в целом порядок расчета РРИ с постоянной скоростью передачи останется прежним. Прежним останется и расчет РРИ с адаптивно изменяемой скоростью передачи по отмеченным частным методикам при условии, что изменение текущего уровня помех $P_n(t)$ будет происходить медленнее, чем эти изменения успевает отследить система управления текущей скоростью передачи, выбирающая такую максимально возможную градацию скорости $C_i(t)$, при которой выполняется требуемое (для заданной вероятности ошибки $P_{ош.тр}$) отношение сигнал/(шум+помеха) $h_{тр}^2 (C_i(t)) \leq P_c / (P_{ш} + P_n(t))$.

Если же мощность помех будет изменяться во времени неизвестным заранее образом (с неизвестной функцией распределения вероятностей), что характерно для источников преднамеренных помех, способных оптимизировать свое воздействие на объекты радиоподавления с учетом их алгоритмов адаптации к помехам, то однозначно предсказать помехоустойчивость РРИ отмеченными методами не представляется возможным.

Одним из способов предсказания возможных последствий воздействия оптимизированных преднамеренных помех является привлечение теоретико-игровых [11] и/или адаптивно-игровых [12] методов оценки гарантируемых показателей качества связи и/или устойчивости при наихудшем воздействии преднамеренных помех с достоверно контролируруемыми долгосрочными ограничениями.

Наиболее слабым, но невырожденным ограничением возможностей средств радиоподавления является их ограниченный энергетический ресурс в пересчете (с учетом дальности, диаграмм направленности и количества объектов подавления) к величине ограниченной средней мощности помех на входе приемников РРС при допустимом произвольном перераспределении текущей мощности помех во времени и в пространстве.

Дополнительным объективным ограничением средств радиоподавления являются их ограниченные динамические возможности отслеживать текущие параметры режимов работы РРС и изменять параметры излучаемых помех. На рис. 2 представлена обобщенная модель взаимодействия контура управления РРИ с адаптивной модуляцией (АМ) и контура подавления РРИ источником помех (ИП) с обозначенными параметрами времени реакции системы принятия решения на управление (СПРУ) в виде времени задержки в канале наблюдения (КН) τ_H и в канале управления (КУ) τ_U , с одной стороны, и времени реакции системы принятия решения на подавление (СПРП) в виде времени задержки в канале разведки (КР) τ_R и в канале подавления (КП) τ_V , с другой стороны, от соотношения которых существенно зависит результат радиоподавления РРИ.

Покажем, как при различном соотношении временных параметров (инерционности) контуров управления и подавления РРИ можно оценить гарантируемую помехоустойчивость РРИ при известных градациях адаптивно изменяемой

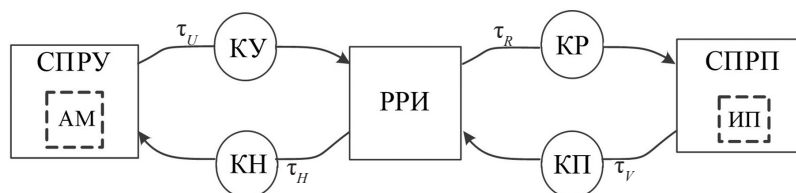


Рис. 2. Обобщенная модель взаимодействия контуров управления и подавления РРИ

скорости $C_p, i = \overline{1, n}$, и соответствующих значениях требуемого отношения сигнал/(шум+помеха) $h_{\text{тр},i}^2, i = \overline{1, n}$, с одной стороны, и относительной средней мощности помех $\delta = P_{\text{п.ср}}/P_c$, с другой стороны, в случае использования различных алгоритмов адаптивной модуляции.

Пересчитаем требуемые отношения сигнал/(шум+помеха) $h_{\text{тр},i}^2, i = \overline{1, n}$, при различных значениях скорости передачи C_p , в пороги помехозащиты, соответствующие значениям максимальной относительной мощности помех, при которых еще выполняются требования к вероятности ошибки на данных скоростях:

$$\sigma_i(t) = \frac{1}{h_{\text{тр},i}^2} - \frac{P_{\text{ш}}}{P_c} \approx \frac{1}{h_{\text{тр},i}^2}. \quad (1)$$

Приближенное равенство (1) практически всегда справедливо, так как обычно на РРИ по условиям обеспечения необходимой устойчивости по замираниям выполняется неравенство $P_{\text{ш}} \ll P_c$, т.е. $P_{\text{ш}}/P_c \approx 0$.

В зависимости от текущей относительной мощности помех $\delta(t)$ и текущего порога помехозащиты $\sigma_i(t)$ при установленной текущей скорости $C_i(t)$ на очередном цикле адаптации реальная скорость передачи $C(t)$ определяется следующим образом:

$$C(t) = \begin{cases} C_i(t), & \sigma_i(t) \geq \delta(t) \\ 0, & \sigma_i(t) < \delta(t) \end{cases}$$

При этом, если существуют градации порогов помехозащиты σ_i , превышающие относительную среднюю мощность помех δ , то источник помех не сможет их постоянно превышать, а, следовательно, на длительном отрезке времени функционирования РРИ $T \rightarrow \infty$ существует возможность обеспечения средней скорости передачи $C_{\text{ср}} > 0$:

$$C_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T C(t) \cdot dt.$$

При любой постоянной скорости передачи C_i с порогом помехозащиты $\sigma_i > \delta$ источник помех (при любом соотношении инерционностей контуров управления и подавления), сохраняя среднюю мощность не выше заданной величины δ , сможет периодически подавлять РРИ с импульсной мощностью $\delta_i = \sigma_i + \varepsilon$, где ε — беско-

нечно малая величина (на практике зависит от дополнительных случайных факторов, в частности, от замираний, которыми при оценке помехоустойчивости на наихудший случай пренебрегаем), с вероятностью (соответствующей фактически показателю неустойчивости) $P_{\text{н}} = \delta/\delta_i > 0$. При этом будет обеспечиваться средняя скорость передачи $C_{\text{ср}} = C_i \cdot (1 - P_{\text{н}}) = C_i \cdot (1 - \delta/\delta_i) > 0$.

Если будет использоваться режим работы РРИ с постоянной скоростью C_i с порогом помехозащиты $\sigma_i < \delta$, то ИП сможет полностью подавить РРИ, излучая постоянную мощность помехи $\delta > \sigma_i$ и обеспечить $P_{\text{н}} = 1$ и $C_{\text{ср}} = 0$.

В случае использования в РРИ адаптивной модуляции с типовым алгоритмом (известным источнику помех при любом соотношении инерционностей контуров управления и подавления) выбора очередного порога помехозащиты, превышающего текущую относительную мощность помех, структуру оптимальной (наихудшей) помехи с ограниченной средней мощностью можно определить методом усреднения ступенчатых помех с различными градациями средней мощности на конечных отрезках времени. Продемонстрируем расчет параметров таких ступенчатых помех на конкретном примере, представленном в табл. и графиками на рис. 3 для РРС с АМКП с типовыми градациями скоростей передачи и порогов помехозащиты.

Основная идея ступенчатых помех заключается в увеличении их мощности на очередном цикле адаптации синхронно с увеличением очередного статического порога помехозащиты до определенной суммарной величины, соответствующей, так называемому, динамическому порогу помехозащиты, зависящему от количества циклов возрастания мощности помехи до цикла с нулевой мощностью. При этом номера порогов 1–5 в первой строке табл. соответствуют количеству циклов с возрастающей ненулевой мощностью ступенчатой помехи (рис. 3). Нулевой порог соответствует нулевой мощности помех, а 6-й порог соответствует максимальной мощности помех, равной максимальному статическому порогу, в течение длительного времени, определяемого условиями сохранения относительной средней мощности помех δ .

Значения статических порогов σ_{si} во второй строке табл. соответствуют реальным порогам σ_i при градациях скоростей передачи $C_{si} = C_i + 1$

Пример рассчитанных параметров ступенчатых помех, наилучших для РРИ с типовым алгоритмом адаптивной модуляции

Номер динамического порога i	0	1	2	3	4	5	6
Величина статического порога σ_{si}	0	1	1,29	1,99	12,88	25,12	25,12
Скорость передачи, соответствующая статическому порогу C_{si}	26,4	23,1	19,8	13,2	6,6	6,6	0
Величина динамического порога σ_{di}	0	0,5	0,76	0,82	3,43	7,05	25,12
Средняя скорость передачи, соответствующая динамическому порогу C_{di}	26,4	11,55	6,6	3,3	1,32	1,1	0
Средняя скорость передачи при выборе постоянной минимальной скорости с максимальным статическим порогом	6,6	6,59	6,40	6,38	5,70	4,76	0

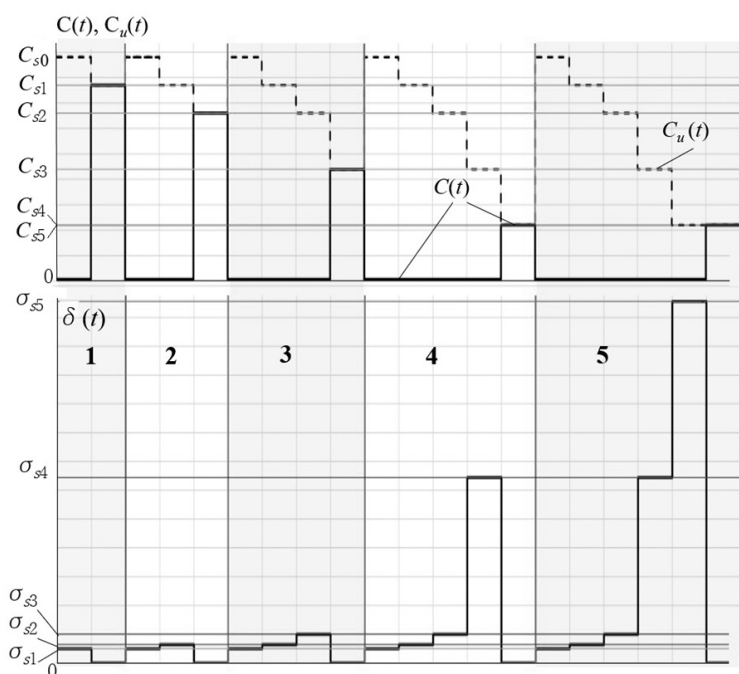


Рис. 3. Графики изменения во времени текущей установленной $C_u(t)$ и реальной $C(t)$ скорости передачи, а также текущей мощности ступенчатой помехи $\delta(t)$

(для удобства нумерации со смещенными индексами), приведенных в третьей строке таблицы в Мбит/с для рассматриваемой типовой РРС, увеличенным (для удобства манипулирования числами больше 1) в $K=229$ раз, т.е. $\sigma_{si} = \sigma_i \cdot K$. Такой же коэффициент K подразумевался и при расчете динамических порогов σ_{di} .

На рис. 3 приведены графики изменения во времени текущей установленной (пунктирные линии) $C_u(t)$ и реальной (сплошные линии) $C(t)$ скоростей передачи, а также текущей мощности ступенчатой помехи $\delta(t)$ (с грациями ступенек,

равными статическим порогам σ_{si}) при различных значениях средней мощности δ_{di} , соответствующей разным динамическим порогам σ_{di} с номерами 1–5 (соответствующие области обозначены на рисунке жирными цифрами). Значения динамических порогов $\sigma_{di}, i=1,5$, соответствуют средней мощности за $i+1$ цикл и рассчитывались по формуле:

$$\sigma_{di} = \frac{1}{i+1} \cdot \sum_{j=0}^i \sigma_{sj}$$

Значения средних скоростей передачи C_{di} , соответствующих динамическим порогам σ_{di}

$i = \overline{1,5}$, рассчитывались путем усреднения (за $i+1$ циклов действия ступенчатой помехи) реальной ненулевой скорости $C(t) = C_{si}$ только на последнем активном цикле $i+1$ (при нулевой мощности помех), равной установленной скорости по наблюдению за максимальной мощностью помехи $\delta(t) = \sigma_{si}$ на предыдущем цикле i :

$$C_{di} = \frac{C_{si}}{i+1}.$$

В последней строке табл. для сравнения приведены значения средней скорости передачи при выборе минимальной постоянной скорости передачи с максимальным статическим порогом помехозащиты без использования адаптивной модуляции. Как видно из сравнения с предпоследней строкой, при значениях относительной средней мощности оптимизированных помех в интервале $\sigma_{s3} \leq \delta \leq \sigma_{s5}$ гарантируемая средняя скорость передачи при использовании типового алгоритма адаптации оказалась заметно ниже, чем при использовании постоянной минимальной скорости, что свидетельствует о низкой помехоустойчивости РРС с таким алгоритмом АМ.

В то же время, помехоустойчивость РРИ с АМ можно существенно повысить, если отслеживать не только текущую, но и среднюю мощность помех, а также учитывать соотношение инерционностей контуров управления и подавления, которое не может быстро изменяться. При этом оптимальный алгоритм управления текущей скоростью передачи в условиях оптимизированных помех с ограниченной средней мощностью может быть найден путем решения соответству-

ющей антагонистической игры с дополнительными ограничениями, в общем случае, в смешанных стратегиях. В данной статье приведем только результаты оценки помехоустойчивости в виде зависимостей гарантируемой средней скорости передачи от относительной средней мощности оптимизированных помех (рис. 4) при использовании рассчитанных оптимальных стратегий адаптивной модуляции в РРИ с грациями скоростей передачи и статических порогов помехозащиты, приведенных в табл.

График 0 на рис. 4 отображает ступенчатую зависимость адаптивно выбираемой скорости передачи $C(t)$, равной средней скорости передачи C_{cp} , от наблюдаемой относительной постоянной мощности $\delta(t)$ помех, равной средней мощности δ , и соответствует варианту, когда суммарная длительность наблюдения за уровнем помех τ_H и длительность установления нового состояния РРИ τ_U намного меньше суммарной длительности разведки состояния РРИ τ_R и длительности установления нового состояния ИП τ_I , т.е. когда $\tau_H + \tau_U \ll \tau_R + \tau_I$, $\delta(t) = \delta$.

График 1 на рис. 4 отображает зависимость гарантируемой средней скорости передачи C_{cp} от относительной средней мощности помех δ при адаптивном выборе текущей скорости передачи с минимальным порогом $\sigma_i(t)$, превышающим текущую относительную мощность помех $\delta(t)$, выбираемую ИП случайным образом из двух наихудших статических порогов с вероятностями, соответствующими условию ограниченной средней мощности. Данный график также соответствует варианту, когда суммарная длительность наблюдения τ_H и управления τ_U намного

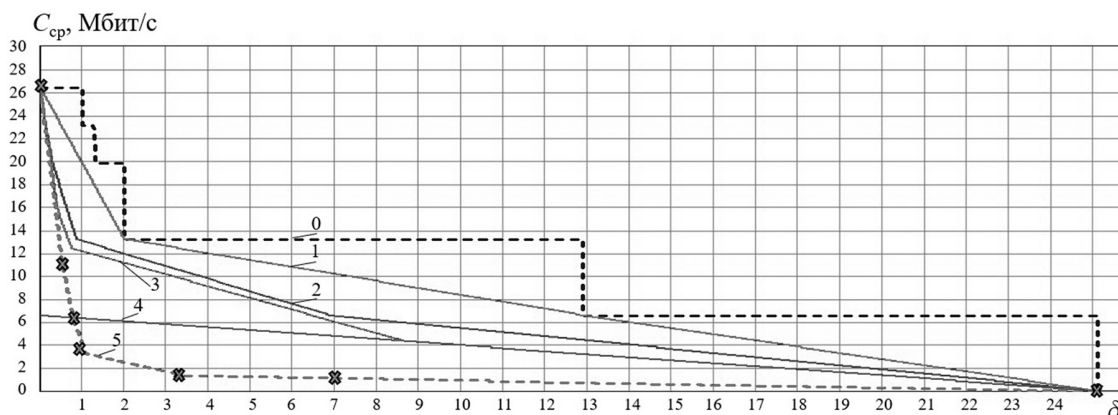


Рис. 4. Зависимости гарантируемой средней скорости передачи C_{cp} от относительной средней мощности оптимизированных помех δ при использовании в РРИ различных алгоритмов адаптивной модуляции

меньше суммарной длительности разведки τ_R и подавления τ_V , но при возможном отличии текущей мощности помех от средней мощности, т.е. когда $\tau_H + \tau_U \ll \tau_R + \tau_V$, $\delta(t) \neq \delta$.

График 2 на рис. 4 отображает зависимость гарантируемой средней скорости передачи C_{cp} от относительной средней мощности помех δ при оптимальном случайном выборе текущих порогов помехозащиты $\sigma_i(t)$ и текущих уровней помех $\delta(t)$ с учетом ограниченной относительной средней мощности δ . Данный график соответствует варианту, когда длительность наблюдения τ_H намного больше длительности управления τ_U и длительность разведки τ_R намного больше длительности подавления τ_V , т.е. когда $\tau_H \gg \tau_U$, $\tau_R \gg \tau_V$, $\delta(t) \neq \delta$.

График 3 на рис. 4 отображает зависимость гарантируемой средней скорости передачи C_{cp} от относительной средней мощности помех δ при выборе наилучшего порога помехозащиты $\sigma_i^*(t)$, соответствующего наблюдаемой средней мощности помех δ . Данный график соответствует варианту, когда суммарная длительность наблюдения τ_H и управления τ_U намного больше суммарной длительности разведки τ_R и подавления τ_V , т.е. когда $\tau_H + \tau_U \gg \tau_R + \tau_V$, $\delta(t) \neq \delta$.

График 4 на рис. 4 отображает зависимость гарантируемой средней скорости передачи C_{cp} от относительной средней мощности помех δ при использовании неоптимального типового алгоритма выбора максимального порога помехозащиты, независимо от наблюдаемых значений мощности помех при любом соотношении инерционностей контуров управления и подавления. При значениях относительной средней мощности, равной динамическим порогам в табл., данный график проходит через точки, соответствующие числам в последней строке в табл.

График 5 на рис. 4 отображает зависимость гарантируемой средней скорости передачи C_{cp} от относительной средней мощности помех δ при использовании адаптивного выбора текущей скорости передачи с минимальным порогом $\sigma_i(t)$, превышающим наблюдаемую относительную текущую мощность помех $\delta(t)$, выбираемую ИП случайным образом в составе из двух ступенчатых помех с наихудшими динамическими порогамми с вероятностями, соответствующими условию ограниченной средней мощности, при любом соотношении инерционностей контуров управле-

ния и подавления. Точки, отмеченные на данном графике крестиками, соответствуют динамическим порогам и средней скорости передачи, приведенным в табл. в четвертой и пятой строках.

Из сравнения графиков на рис. 4 видно, что использование в РРС с АМКП алгоритмов адаптивной модуляции, оптимизированных с учетом контролируемых долговременных энергетических и инерционных ограничений источников помех (линии 0–3), позволяет получить заметный выигрыш в помехоустойчивости РРИ по сравнению с типовыми алгоритмами адаптации (линии 4–5).

Заключение

Используемые в настоящее время методики расчета РРЛ не позволяют оценивать помехоустойчивость сетей связи специального назначения, построенных на основе радиорелейных станций с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов. В статье предложен способ оценки помехоустойчивости таких сетей путем использования известных методик расчета устойчивости направлений связи и радиорелейных линий на основе предварительного расчета устойчивости радиорелейных интервалов с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов, дополненного новым подходом к расчету помехоустойчивости в условиях оптимизированных помех с использованием методов теории игр. Представлены результаты расчета параметров наихудших помех с ограниченной средней мощностью, воздействующей на радиорелейный интервал с типовыми алгоритмами адаптивной модуляции. Показано, как на основе методов теории игр можно повысить помехоустойчивость радиорелейных интервалов путем соответствующей оптимизации алгоритмов адаптивной модуляции с учетом контролируемых значений текущей и средней мощности помех, а также соотношения инерционностей контуров управления и подавления.

Литература

1. Методика расчета трасс цифровых РРЛ прямой видимости в диапазоне частот 2–20 ГГц. — М.: Инженерный центр. 1998. 245 с.
2. ГОСТ Р 53111-2008 Устойчивость функционирования сети связи общего пользования.

Требования и методы проверки. — М.: Стандартинформ. 2009. 16 с.

3. ГОСТ Р 53363-2009 Цифровые радиорелейные линии. Показатели качества. Методы расчета. — М.: Стандартинформ. 2009. 68 с.

4. Рекомендация МСЭ-R P.530. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, требующиеся для проектирования наземных систем прямой видимости. Сектор радиосвязи МСЭ. 2017. 57 с.

5. Одоевский С., Степанец В. Проектирование РРЛ: программный комплекс ONEPLAN RPLS / Первая миля. 2016. № 8. С. 18–23.

6. Ключников В.О., Одоевский С.М. Расчет устойчивости функционирования радиорелейной сети с адаптивной модуляцией и коммутацией пакетов // Свидетельство о регистрации ПЭВМ ФИПС России № 2021616904 / 28.06.2021.

7. Ключников В.О., Степанец И.В. и др. Расчет радиорелейных интервалов адаптивной модуляцией // Свидетельство о регистрации ПЭВМ ФИПС России № 2021618923 / 15.06.2021.

8. Карпенко А.В. Контейнер радиоэлектронной борьбы NGJ-MB (США) / ВТС «НЕВСКИЙ БАСТИОН» / URL: <http://nevskii-bastion.ru/ngj-mb-reb-usa/> (дата обращения 22.06.2021).

9. Gian V. Raytheon AN/ALQ-249 NGJ (Next Generation Jammer) // URL: <http://www.loneflyer.com/2018/11/15/raytheon-an-alq-249-ngj-next-generation-jammer/> (дата обращения 22.06.2021).

10. Макаренко С.И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века. — Санкт-Петербург: Издательство «Научное издание технологий». 2017. 546 с. ISBN 9785990941212.

11. Чуднов А.М. Помехоустойчивость линий и сетей связи в условиях оптимизированных помех // Под ред. А.П. Родимова. — Л.: ВАС. 1986. 84 с.

12. Одоевский С.М., Калюка В.И. Адаптивно-игровое моделирование военных сетей беспроводного абонентского доступа. — СПб: Изд-во Политехн. ун-та. 2017. 240 с.

References

1. Methodology for calculating line-of-sight digital radio relay lines in the frequency range

2–20 GHz. — М.: Engineering Center. 1998. 245 p.

2. GOST R 53111-2008 The stability of the functioning of the public communication network. Requirements and verification methods. — М.: Standartinform. 2009. 16 p.

3. GOST R 53363-2009 Digital radio relay lines. Quality indicators. Calculation methods. — М.: Standartinform. 2009. 68 p.

4. Recommendation ITU-R P.530. Propagation data and prediction methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems. ITU Radiocommunication Sector. 2017. 57 p.

5. Odoevskiy S., Stepanets V. Designing RRL: software package ONEPLAN RPLS / First mile. 2016. № 8. P. 18–23.

6. Klyuchnikov V.O., Odoevskiy S.M. Calculation of the stability of the functioning of a radio relay network with adaptive modulation and packet switching // Certificate of registration of a PC FIPS of Russia № 2021616904 / 28.06.2021.

7. Klyuchnikov V.O., Stepanets I.V. and others. Calculation of radio-relay intervals with adaptive modulation // Certificate of registration of a PC FIPS of Russia № 2021618923 / 15.06.2021.

8. Karpenko A.V. Electronic warfare container NGJ-MB (USA) / VTS «NEVSKY BASTION» / URL: <http://nevskii-bastion.ru/ngj-mb-reb-usa/> (date of treatment 06/22/2021).

9. Gian V. Raytheon AN / ALQ-249 NGJ (Next Generation Jammer) // URL: <http://www.loneflyer.com/2018/11/15/raytheon-an-alq-249-ngj-next-generation-jammer/> (date of access 06/22/2021).

10. Makarenko S.I. Information confrontation and electronic warfare in network-centric wars at the beginning of the XXI century. — St. Petersburg: Science-Intensive Technologies Publishing House. 2017. 546 p. ISBN 9785990941212.

11. Chudnov A.M. Noise immunity of communication lines and networks in conditions of optimized interference // Ed. A.P. Rodimova. — L.: VAS. 1986. 84 p.

12. Odoevskiy S.M., Kalyuka V.I. Game-adaptive modeling of military wireless subscriber access networks. — SPb: Publishing house of Polytechnic. University. 2017. 240 p.