

МЕТОДИКА АНАЛИЗА УСТОЙЧИВОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СЕТИ РАДИОСВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Киселев В. Н.¹, Козориз Д. А.², Триполин А. М.³, Селезнев Н. В.⁴

DOI:10.21681/3034-4050-2025-4-59-67

Ключевые слова: помехозащищенность, радиоэлектронная борьба, сеть связи, система радиосвязи, разведзащищенность, вероятность связности, информационное направление, отношение сигнал/шум.

Аннотация

Цель статьи в обобщении и доработке отдельных этапов оценки показателей структурной устойчивости системы радиосвязи, функционирующей в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Результат: в статье обосновывается применение показателя устойчивости для оценки качества сетей радиосвязи, выполняющих свои функции в условиях воздействия дестабилизирующих факторов и для анализа влияния частотно-энергетических характеристик радиолиний, образующих сеть радиосвязи, на ее устойчивость.

В качестве показателя устойчивости рассмотрена связность сети радиосвязи. Разработанная методика базируется на частных методиках анализа показателей помехозащищенности, разведзащищенности, коэффициентов устойчивости информационных цепей и направлений.

Рассмотрен пример использования разработанной методики в задачах оценки вероятности связности и обоснования высоты подъема антенн в сети радиосвязи, построенной на радиосредствах шестого поколения.

Практическая полезность: результаты статьи могут и должны быть учтены при проектировании новых образцов техники связи.

Введение

Система военной связи (СВС) представляет собой достаточно сложное объединение сил и средств связи, создаваемое с целью реализации функций управления войсками в различных условиях обстановки. На аппаратном уровне СВС представляет собой гетерогенную сеть связи, интегрирующую сети, отличающиеся по физической среде передачи, технологии разделения доступа к среде передачи, способам организации мультисервисного обмена информацией и др. Особое место в СВС занимают сети радиосвязи (СРС). Задачи анализа качества функционирования СРС не потеряли актуальности и в настоящее время, что обусловлено, в частности, постановкой на снабжение войск радиосредств шестого поколения и получением

определенного опыта боевого применения этих средств в рамках проведения СВО.

Оценка качества функционирования СРС осуществляется по степени соответствия значений частных показателей качества системы нормативным требованиям. Современными нормативными документами предусмотрены следующие характеристики качества функционирования системы радиосвязи: боевая готовность, устойчивость, мобильность, пропускная способность, разведзащищенность, доступность, управляемость.

Оценка качества функционирования СРС по совокупности более чем двух показателей всегда является нетривиальной задачей. Поэтому перед исследователем стоит выбор между двумя путями решения задачи: попытаться свернуть частные показатели

1 Киселев Владимир Николаевич, кандидат технических наук, профессор, ведущий разработчик «АО НПО «Ангстрем», г. Москва, Зеленоград, Россия. E-mail: vkiselev@yandex.ru

2 Козориз Денис Александрович, кандидат технических наук, начальник научно-технического центра «АО НПО «Ангстрем», г. Москва, Зеленоград, Россия. E-mail: kozorizda@npo-angstrom.ru

3 Триполин Александр Михайлович, кандидат технических наук, ведущий специалист «АО НПО «Ангстрем», г. Москва, Зеленоград, Россия. E-mail: tripolin@yandex.ru

4 Селезнев Николай Витальевич, кандидат технических наук, главный научный сотрудник ФГБУ «16 ЦНИИИ» Минобороны России. E-mail: nik-seleznev@yandex.ru

5 ГОСТ 5311–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования.

качества функционирования системы радиосвязи в единый обобщенный показатель или, с учетом условий решаемой задачи, выбрать один или два основных показателя, а другие задать в виде ограничений на основе опыта и нормативных документов.

В задачах анализа эффективности функционирования СРС в условиях воздействия дестабилизирующих факторов наиболее часто в качестве основного показателя рассматривается устойчивость системы связи. Согласно ГОСТ 5311-2008⁵, устойчивость характеризует способность сети электросвязи выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в результате воздействия дестабилизирующих факторов. Источником дестабилизирующего фактора является физический или технологический процесс внутреннего или внешнего по отношению к сети электросвязи характера, приводящий к выходу из строя элементов сети. Актуальность вопросов анализа устойчивости определяется высокими требованиями к СРС в установленные сроки и в различных условиях обстановки обеспечить управления войсками и оружием.

Свойство устойчивости системы радиосвязи является интегральным, объединяя такие показатели как [1]:

- живучесть – способность системы военной связи обеспечивать управление войсками в условиях воздействия оружия;
- помехоустойчивость – способность системы военной связи обеспечивать управление войсками (силами) и оружием в условиях помех различных видов;
- помехозащищенность – способность системы военной связи обеспечивать управление войсками (силами) и оружием в условиях воздействия преднамеренных помех противника;
- надежность – способность системы военной связи обеспечивать связь, сохраняя во времени значение эксплуатационных показателей в период применения, технического обслуживания, восстановления и ремонта.

С другой стороны, приведенная трактовка термина устойчивость не учитывает в прямой постановке такие свойства системы радиосвязи как пропускная способность, разведзащищенность, доступность, а также частотно-энергетические характеристики радиолиний,

образующих систему радиосвязи: энергетический бюджет или энергетический запас радиолинии, затухание радиосигналов в радиолинии, диапазон и полосу рабочих частот, протяженность интервалов ретрансляции и другие. Это в известной степени ограничивает аппарат анализа влияния на устойчивость системы технических решений, принятых при разработке радиосредств или, наоборот, влияние требуемой устойчивости СРС на выбор технических решений. Необходимо отметить, что в работах, посвященных анализу систем связи, функционирующих в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, некоторые авторы используют понятия структурной, функциональной или информационной устойчивости [2, 3].

В связи с определенной подвижностью границ понятия устойчивости СРС [2], различными исследователями рассматриваются собственные подходы к анализу устойчивости системы радиосвязи, которые проявляются в разработке методик, использующих оригинальные методы оценки частных показателей или оригинальное сочетание известных методов.

Цель настоящей статьи – обобщение и доработка отдельных этапов оценки показателей структурной устойчивости системы радиосвязи, функционирующей в условиях воздействия дестабилизирующих факторов, для анализа влияния частотно-энергетических характеристик радиолиний, образующих систему радиосвязи, на устойчивость СРС.

Устойчивость информационного направления

Информационный обмен в сети радиосвязи осуществляется посредством информационного направления, образованного между узлами сети в виде совокупности одного и более путей (маршрутов или информационных цепей) [1]. Следовательно, устойчивость СРС характеризуется коэффициентом устойчивости информационного направления, который определяется готовностью технических средств связи и образованных ими линий связи к передаче сообщений на направлении связи в произвольный момент времени с использованием всех возможных маршрутов доставки сообщения. Расчет устойчивости информационного направления связи следует проводить на основе графа сети связи, где вершинами являются сетевые узлы, а ребрами – линии связи их соединяющие.

Показателем устойчивости системы связи является значение вероятности связности информационного направления⁶, которая характеризует вероятность того, что на заданном направлении существует хотя бы один путь (информационная цепь) из M возможных, обеспечивающий передачу информации с требуемым качеством [1]

$$K_{y\text{ин}} = P(L \geq 1/M) = \sum_{l=L}^M C_M^l \prod_{m=1}^l (K_{y\text{иц}m}) \prod_{m=1}^{M-l} (1 - K_{y\text{иц}m}), \quad (1)$$

где: L – число работоспособных информационных цепей в заданном направлении; $K_{y\text{иц}m}$ – коэффициент, характеризующий устойчивость m -й информационной цепи; M – число информационных цепей для передачи информации в заданном направлении, предоставляемых протоколом маршрутизации; C_M^l – число сочетаний из M по L .

Коэффициент устойчивости учитывает влияние на узлы и линии связи дестабилизирующих факторов, основным из которых будет воздействие противника (РЭБ, физическое разрушение). Минимальная вероятность связности информационного направления сохраняется при $L = 1$ и равна

$$K_{y\text{ин}} = P(L = 1/M) = 1 - \prod_{m=1}^M (1 - K_{y\text{иц}m}). \quad (2)$$

Число возможных информационных цепей M в информационном направлении определяется топологическими особенностями сетей системы радиосвязи. Каждая информационная цепь может быть однозвенной (непосредственная связь узлов) или многозвенной (связь с ретрансляцией). Коэффициент устойчивости последовательной многозвенной информационной цепи определяется произведением парциальных коэффициентов устойчивости в виде

$$K_{y\text{иц}m} = \prod_{n=1}^N (K_{y\text{иц}n}), \quad (3)$$

где N – число интервалов ретрансляции в информационной цепи.

При рассмотрении информационных направлений в пределах фрагментов сети радиосвязи, ограниченных незначительными размерами, например, радиосеть тактического звена управления (ТЗУ), можно допустить равенство парциальных коэффициентов устойчивости

так, что $K_{y\text{иц}n} = K_{y\text{иц}1}$. Тогда, с учетом топологии сети радиосвязи, можно определить функциональную зависимость вероятности связности (коэффициента устойчивости информационного направления) от коэффициента устойчивости однозвенной информационной цепи

$$K_{y\text{ин}} = \Phi[M; N; K_{y\text{иц}1}(K_{y\text{иц}1})]. \quad (4)$$

В боевых порядках ТЗУ посредством сети радиосвязи организуются информационные направления «батальон – рота – взвод». В качестве архитектурных решений построения сети радиосвязи могут быть использованы сети прямых связей (СПС) с непосредственной связью и последовательно-параллельной ретрансляцией, а также распределенные сети радиосвязи (СР). Вероятность связности в СПС определяется посредством формул (1) ÷ (3) перебором параметров (L , M , N). Например, для радиолиний с двойным резервированием, когда $L = 1$, $M = 2$ и $N = 1$, коэффициент устойчивости информационного направления будет равен

$$K_{y\text{ин}} = 1 - \prod_{m=1}^2 (1 - K_{y\text{иц}m}) = 1 - (1 - K_{y\text{иц}1})^2. \quad (5)$$

При организации информационных направлений в рамках распределенной сети радиосвязи с автоматической маршрутизацией и самовосстановлением высокая связность на сетевом уровне обеспечивается применением информационных цепей как с непосредственной связью, так и с ретрансляцией. Максимальное число возможных ретрансляций ограничивается протоколами СР с учетом обеспечения требуемого качества обслуживания. В этом случае вероятность того, что на заданном направлении существует хотя бы один путь (информационная цепь) можно оценить выражением

$$K_{y\text{ин}} = 1 - \prod_{n=1}^{N_{\text{max}}} (1 - K_{y\text{иц}n})^{C_{S-2}^{n-1}}, \quad (6)$$

где: N_{max} – максимальное число возможных интервалов ретрансляции в информационной цепи; S – число узлов в распределенной сети радиосвязи; C_{S-2}^{n-1} – число информационных цепей с n интервалами ретрансляции в направлении связи.

В задачах анализа устойчивости сетей радиосвязи, когда неприменимо допущение о равнозначности информационных направлений, в ряде работ [1,2] в качестве показателя

⁶ ГОСТ 5311 – 2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования

устойчивости предлагается использовать средневзвешенную устойчивость, полученную сверткой устойчивостей информационных направлений с учетом их нормированных значимостей (весовых коэффициентов) в виде

$$K_y = \sum_{r=L}^R \alpha_r K_{y, \text{ин}r}; \sum_{r=L}^R \alpha_r = 1, \quad (7)$$

где: α_r – коэффициент значимости r -го направления связи, определяемый на основе экспертных оценок или анализа свойств графа сети и распределения циркулирующего в сети трафика; R – число организуемых на сети направлений связи.

Таким образом, устойчивость функционирования сети радиосвязи оценивается связностью сети и определяется ее топологией (наличием резервных информационных цепей) и устойчивостью однозвенных информационных цепей, образующих информационные направления.

Устойчивость однозвенной информационной цепи

В рамках поставленной ранее цели, устойчивость однозвенной информационной цепи определим при условии, что на интервале времени информационного обмена узлы сети исправны и готовы к использованию. Деструктивным фактором является воздействие помех в процессе РЭБ. Тогда устойчивость функционирования однозвенной радиолинии определяется выражением вида [2, 5, 6]

$$K_{y, \text{ин}1} = 1 - (1 - K_{\text{э.ПЗ}})(1 - K_{\text{в.ПЗ}})(1 - K_{\text{РЗ}}) P_{\text{ПП}}, \quad (8)$$

где: $K_{\text{РЗ}}$ – комплексный показатель разведзащитности радиолинии; $P_{\text{ПП}}$ – вероятность постановки помех; $K_{\text{в.ПЗ}}$ – коэффициент временной помехозащитности; $K_{\text{э.ПЗ}}$ – коэффициент энергетической помехозащитности.

В качестве оценки комплексного показателя разведзащитности может быть принята вероятность вскрытия радиолинии противником ($P_{\text{вскр}}$) [2, 5, 6] так, что

$$K_{\text{РЗ}} = (1 - P_{\text{вскр}}). \quad (9)$$

Величина вероятности вскрытия радиолинии в задачах анализа качества функционирования СРС задается в виде требований. При необходимости оптимизации СРС с учетом параметров средств РЭБ вероятность вскрытия радиолинии определяется на основе принятых методик анализа вероятностно-временных характеристик случайных процессов,

составляющих цикл разведки: обнаружение РЭС; определение местоположения РЭС; перехват сообщений за определенное время.

Коэффициент временной помехозащитности соответствует вероятности сохранения работоспособности радиолинии в динамике ведения радиосвязи в условиях РЭП и выражается в форме отношения среднего времени реакции системы РЭП $\overline{\tau_{\text{РЭП}}}$ и среднего времени ухода от помехи системой радиосвязи $\overline{t_{\text{пер}}}$ [2]

$$K_{\text{в.ПЗ}} = \frac{\overline{\tau_{\text{РЭП}}}}{\overline{t_{\text{пер}}} + \overline{\tau_{\text{РЭП}}}}. \quad (10)$$

Энергетическая помехозащитность количественно оценивается отношением максимально допустимой мощности преднамеренной помехи к мощности сигнала на входе приемника, при котором обеспечивается требуемое качество приема сообщений, т.е. не превышает допустимое значение средней вероятностью ошибки на бит [2, 5]. Коэффициент энергетической помехозащитности определим как вероятность не превышения текущим значением отношения мощностей помеха/сигнал на входе приемника радиолинии допустимой величины при условии, что средняя вероятность ошибки приема элемента сигнала не превышает допустимое значение, т.е.

$$K_{\text{э.ПЗ}} = P \left\{ \left(\frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{с}}} \right)_{\text{вх.}} \leq \left(\frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{с}}} \right)_{\text{вх. доп}} ; p_{\text{ош}} \leq p_{\text{ош. доп}} \right\}, \quad (11)$$

где $P_{\text{п}}$ – мощность помехи на входе приемника радиолинии; $P_{\text{с}}$ – мощность полезного сигнала на входе приемника радиолинии; $p_{\text{ош}}$ – средняя вероятность ошибки приема элемента (бита) сигнала; $p_{\text{ош. доп}}$ – допустимая средняя вероятность ошибки приема элемента сигнала.

Средняя вероятность битовой ошибки в формуле (11) зависит от энергетического отношения сигнал/шум (h^2). Для видов модуляции, применяемых в радиосредствах шестого поколения, функциональные зависимости $p_{\text{ош}}(h^2)$ в случае аддитивного белого гауссовского шума приведены в таблице 1 [8], где:

$$h^2 = \frac{E_{\text{б}}}{N_{\text{ш}}} = \frac{P_{\text{с}}}{W_{\text{с}} N_{\text{ш}}}; \quad (12)$$

где $E_{\text{б}}$ – энергия бита; $W_{\text{с}}$ – ширина спектра радиосигнала; $N_{\text{ш}}$ – спектральная плотность мощности шума приемного тракта; $\text{erfc}(\cdot)$ – дополнительная функция ошибок.

Таблица 1.
Средняя вероятность ошибки приема элемента сигнала

№ п/п	Вид модуляции	Средняя вероятность ошибки
1	BPSK	$p_{\text{ош}} = 0,5 \cdot \text{erfc}(\sqrt{h^2})$
2	BFSK	$p_{\text{ош}} = 0,5 \cdot \text{erfc}(\sqrt{h^2 / 2})$
3	QPSK, QAM 4	$p_{\text{ош}} = 0,5 \cdot \text{erfc}(\sqrt{h^2})$
4	QAM 16	$p_{\text{ош}} = 0,375 \cdot \text{erfc}(\sqrt{0,4 \cdot h^2})$
5	QAM 64	$p_{\text{ош}} = (\frac{7}{24}) \cdot \text{erfc}(\sqrt{h^2 / 7})$

Существенное влияние на коэффициент энергетической помехозащищенности оказывает характер распространения сигналов в радиоканалах СРС. В частности, радиоканалы наземных УКВ радиолоний характеризуются наличием медленных замираний, что приводит к мультипликативным искажениям огибающей передаваемого радиосигнала. Распространенным видом замираний являются рэлеевские, для которых случайный множитель r , характеризующий глубину замираний огибающей радиосигнала подчинен закону распределения Релея. Тогда отношение сигнал/шум h_r^2 , с учетом (12), имеет распределение хи-квадрат с двумя степенями свободы [6, 7]

$$h_r^2 = r^2 h^2 = r^2 \frac{E_{\text{с}}}{N_{\text{ш}}}; w(h_r^2) = \frac{1}{2 \cdot (h^2)} e^{-\frac{h_r^2}{2 \cdot (h^2)}}. \quad (13)$$

В условиях замираний радиолония будет работоспособна, если отношение сигнал/шум превысит некоторое минимально допустимое значение $h_r^2 \geq h_{\text{доп}}^2$, при котором обеспечивается выполнение условия $p_{\text{ош}} \leq p_{\text{ош, доп}}$ в выражении (11). Допустимое энергетическое отношение сигнал/шум определяется как значение обратной функции средней вероятности ошибки бита (таблица 1) при максимально допустимой вероятности ошибки, т.е.

$$h_{\text{доп}}^2 = p_{\text{ош}}^{-1}(p_{\text{ош, доп}}). \quad (14)$$

Таким образом, коэффициент энергетической помехозащищенности радиолонии без преднамеренных помех с учетом формул (11)–(14) равен

$$K_{\text{э, ПЗ}} = P\{h_r^2 \geq h_{\text{доп}}^2\} = \int_{h_{\text{доп}}^2}^{\infty} w(h_r^2) dh_r^2 = \exp\left[-\frac{p_{\text{ош}}^{-1}(p_{\text{ош, доп}})}{2 \cdot \frac{E_{\text{с}}}{N_{\text{ш}}}}\right]. \quad (15)$$

В случае применения заградительной помехи в пределах диапазона работы радиолонии (в том числе радиолонии с ППРЧ) или сканирующей по частоте помехи в части диапазона спектральная плотность мощности помех определяется выражением [9]

$$N_{\text{шп}}(\gamma) = \frac{P_{\text{п}} \gamma}{\Delta F_{\text{пом}}} + N_{\text{ш}}, \quad (16)$$

где: $\gamma = \frac{\Delta F_{\text{пом}}}{\Delta F_{\text{ППРЧ}}}$ – вероятность частотно-временного совпадения помехи и сигнала; $\Delta F_{\text{пом}}$ – ширина полосы частот помехи; $\Delta F_{\text{ППРЧ}}$ – ширина полосы частот радиолонии с ППРЧ.

Коэффициент энергетической помехозащищенности радиолонии с ППРЧ по отношению к шумовой преднамеренной помехе с учетом формул (12), (15) и (16) будет равен

$$K_{\text{э, ПЗ}} = \exp\left[-\frac{1}{2} h_{\text{доп}}^2 \cdot \left(\left(\frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{с}}}\right)_{\text{вх.}} \gamma + \frac{1}{h^2}\right)\right]. \quad (17)$$

При отсутствии режима ППРЧ заградительная шумовая помеха действует в полосе частот подавляемого радиосигнала. Тогда $\gamma = 1$, а коэффициент энергетической помехозащищенности радиолонии (17) равен

$$K_{\text{э, ПЗ}} = \exp\left[-\frac{1}{2} h_{\text{доп}}^2 \cdot \left(\left(\frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{с}}}\right)_{\text{вх.}} + \frac{1}{h^2}\right)\right]. \quad (18)$$

Таким образом, в процессе анализа структурной устойчивости системы радиосвязи доработаны отдельные этапы оценки связности информационных направлений на сети связи в условиях воздействия дестабилизирующих факторов (особенностей распространения радиоволн, ведения РЭБ). Приведенные соотношения (1)–(18) позволяют оценить связность информационных направлений с учетом влияния частотно-энергетических характеристик радиолоний, образующих систему радиосвязи, а также разведзащищенности и других характеристик системы радиосвязи.

Пример применения методики

Применение методики оценки связности СРС состоит в последовательном выполнении ряда этапов, в процессе которых определяются показатели помехозащищенности радиолоний, образующих сеть радиосвязи, рассчитываются с применением известных методик [1,9] или задаются на основе нормативных документов показатели разведзащищенности, анализируется коэффициент устойчивости однозвенной информационной цепи и определяется вероятность связности (устойчивость) информационного направления.

В качестве примера использования представленной методики проведен анализ устойчивости сети радиосвязи тактического звена управления, построенной на основе радиосредств шестого поколения Р-187-В. Принятые в примере ограничения и значения параметров средств радиосвязи приведены в таблице 2.

На рис. 1 в совмещенных осях координат приведены графики, иллюстрирующие результаты анализа устойчивости сети радиосвязи.

- ❖ Линия 1 – зависимость коэффициента энергетической помехозащищенности $K_{э.ПЗ}$ от высоты подъема антенны передающей станции H_b с коэффициентом усиления антенны – 2 дБ, интервал связи 10 км и отношение мощностей помехи и сигнала равно 1.
- ❖ Линия 2 – зависимость коэффициента энергетической помехозащищенности $K_{э.ПЗ}$ от высоты подъема антенны передающей станции H_b с коэффициентом усиления антенны 6 дБ, интервал связи 10 км и отношение мощностей помехи и сигнала равно 1.
- ❖ Линия 3 – зависимость коэффициента устойчивости однозвенной информационной цепи $K_{у.ИЦ}$ от коэффициента энергетической помехозащищенности $K_{э.ПЗ}$ при вероятности вскрытия радиолинии противником равной 1.

- ❖ Линия 4 – зависимость коэффициента устойчивости однозвенной информационной цепи $K_{у.ИЦ}$ от коэффициента энергетической помехозащищенности $K_{э.ПЗ}$ при вероятности вскрытия радиолинии противником равной 0,6.
- ❖ Линия 5 – зависимость вероятности связности информационного направления $K_{у.ИН}$ от коэффициента устойчивости однозвенной информационной цепи $K_{у.ИЦ}$ при использовании резервных маршрутов.
- ❖ Линия 6 – зависимость вероятности связности информационного направления $K_{у.ИН}$ от коэффициента устойчивости однозвенной информационной цепи $K_{у.ИЦ}$ без резервирования.
- ❖ Линии 7÷14 являются результирующими и представляют зависимости связности информационного направления в сети радиосвязи от высоты подъема антенны передающей станции при различных коэффициентах усиления антенн, вероятностях вскрытия радиолиний и способах организации резервирования радионаправлений. Из анализа этих графиков видно, что в пределах варьируемых параметров при штатной высоте подъема антенн $H_b = 4$ м вероятность связности не превышает 0,6 (линии 13 и 14).

Для обеспечения более высокой вероятности связности, представленная методика позволяет сформировать перечень вариантов системы радиосвязи, реализующих

Таблица 2.

Принятые ограничения и параметры средств радиосвязи

Параметры измерения	Значения	Единицы
Число узлов в сети радиосвязи	32	
Максимальное число интервалов ретрансляции	2	
Число резервных маршрутов	3	
Мощность передающего устройства с учетом коррекции пик-фактора	6	дБВт
Коэффициент усиления антенны	-2 ÷ +6	дБ
КПД антенно-фидерного тракта	0	дБ
Чувствительность приемного устройства	-118	дБВт
Спектральная плотность мощности шума тракта приема	-164	дБм/Гц
Вид модуляции OFDM с QAM16, полоса частот радиосигнала	5	МГц
Диапазон частот	520 ÷ 2500	МГц
Меры помехозащиты: ППРЧ в полосе частот	100	МГц
Допустимая средняя вероятность ошибки бита	0,005	
Протяженность радиолинии	10	км
Отношение мощностей помехи и сигнала в точке приема	1	
Вероятность вскрытия радиолинии противником	0,6 ÷ 1	
Вероятность постановки помех	1	
Методика определения потерь на трассе распространения радиоволн	Окамура – Хата ⁷	

⁷ Рекомендация МСЭ – R 1546-4. Метод прогнозирования для трасс связи «пункта с зоной» для наземных служб в диапазоне частот от 30 МГц до 3000 МГц. – Женева: МСЭ, 2010.

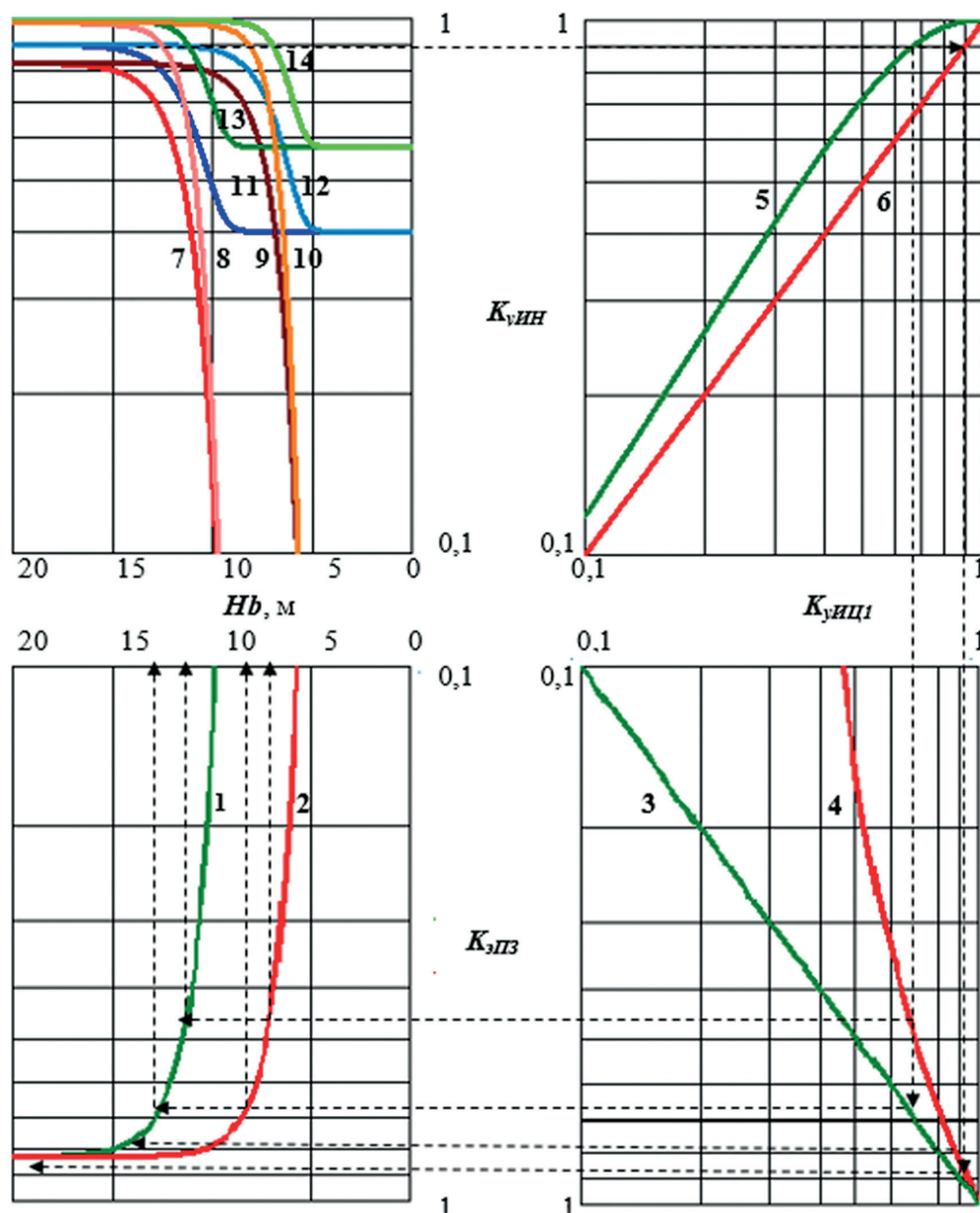


Рис. 1. Результаты анализа устойчивости сети радиосвязи, построенной с использованием радиосредств шестого поколения

нормативные требования. Так, вероятность связности 0,9 (пунктирные линии на рис. 1) в сети связи с резервированием направлений (линия 5) и вероятностью вскрытия радиолинии 0,6 (линия 4) обеспечивается при высоте подъема антенны 7 м (линия 2 – коэффициент усиления антенны 6 дБ) или 12 м (линия 1 – коэффициент усиления антенны – 2 дБ).

Заключение

Разработанная методика оценки устойчивости функционирования системы радиосвязи учитывает особенности построения структуры сети радиосвязи, порядок формирования

резервных маршрутов при организации информационных направлений, устойчивость, разведзащищенность и помехозащищенность однозвенных информационных цепей, образующих информационные направления. Отмеченные показатели качества системы радиосвязи посредством аналитического аппарата теории вероятностей свернуты в обобщенный показатель устойчивости функционирования системы, которым является связность информационного направления. Ряд параметров, используемых в методике, задаются в виде ограничений на основе нормативных документов. Увязка результата оценки

связности направлений связи с помехозащищенностью радиолиний сети связи позволяет расширить пределы методики для решения практических задач анализа и проектирования СРС, функционирующих при воздействии РЭП и в различных условиях распространения

радиоволн, что продемонстрировано примером. Необходимо отметить, что полученная в рамках методики оценка связности информационного направления является основой для анализа таких показателей качества военной связи, как своевременность и достоверность.

Литература

1. Боговик А. В., Игнатов В. В. Эффективность систем военной связи и методы ее оценки. СПб.: ВАС, 2006. 183 с.
2. Михайлов Р. Л., Макаренко С. И. Оценка устойчивости сети связи в условиях воздействия на неё дестабилизирующих факторов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4. С. 69–79.
3. Одолевский С. М., Лебедев П. В. Методика оценки устойчивости функционирования системы технологического управления инфокоммуникационной сетью специального назначения с заданной топологической и функциональной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 152–189. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10107.
4. Беккиев А. Ю. Оценка помехозащищенности каналов радиосвязи в условиях действия помех от средств радиоэлектронной борьбы / А. Ю. Беккиев, В. И. Борисов // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64, № 9. – С. 891–901. – DOI 10.1134/S0033849419080035. – EDN PPLRCH.
5. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход / В. И. Борисов, В. М. Зинчук. – Москва: Научно-техническое издательство «Радио и связь», 1999. – 252 с. – ISBN 5-256-01397-1. – EDN SGNCYB.
6. Прокис Джон Дж. Цифровая связь / Прокис Дж.; Пер. с англ. под ред. Кловского Д. Д. – Москва: Радио и связь, 2000. – 797 с.: ил.; 30 см.; ISBN 5-256-01434-X (рус.)
7. Феер К. Беспроводная цифровая связь. Методы модуляции и расширения спектра: Пер. с англ. / Под ред. В. И. Журавлева. – М.: Радио и связь, 2000. – 520 с.: ил.
8. Борисов В. И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В. И. Борисов, В. М. Зинчук, А. Е. Лимарев. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – Москва: Радио Софт, 2008. – 512 с. – ISBN 978-5-93274-014-9. – EDN SMIHSV.
9. Моисеев А. А. Оценка основных свойств применения мобильных аппаратных связи / А. А. Моисеев, А. А. Киселев // Техника средств связи. – 2021. – № 1(153). – С. 55–66. – EDN GRNORY.

METHODOLOGY FOR ANALYZING THE STABILITY OF THE RADIO COMMUNICATION NETWORK UNDER THE INFLUENCE OF DESTABILIZING FACTORS

Kiselev V. N.⁸, Kozoriz D. A.⁹, Tripolin A. M.¹⁰, Selezenev N. V.¹¹

Keywords: noise immunity, electronic warfare, communication network, radio communication system, intelligence security, probability of connectivity, information direction, signal-to-noise ratio.

Abstract

The purpose of the article is to generalize and refine certain stages of assessing the structural stability of a radio communication system operating under the influence of destabilizing factors

Result: The article substantiates the use of the stability indicator to assess the quality of radio communication networks performing their functions under the influence of destabilizing factors to analyze

8 Vladimir N. Kiselev, Ph.D., Professor, Leading Developer, JSC NPO «Angstrom», Moscow, Zelenograd, Russia. E-mail: vkiselev@yandex.ru

9 Denis A. Kozoriz, Ph.D. in Technical Sciences, Head of the Scientific and Technical Center of JSC NPO «Angstrom», Moscow, Zelenograd, Russia. E-mail: kozorizda@np-angstrom.ru

10 Alexander M. Tripolin, Ph.D., Leading Specialist of JSC NPO «Angstrom», Moscow, Zelenograd, Russia. E-mail: tripolin@yandex.ru

11 Nikolay V. Selezenev, Ph.D., Chief Researcher of the Federal State Budgetary Institution «16 Central Research Institute of the Ministry of Defense of Russia». E-mail: nik-selezenev@yandex.ru

the impact of the frequency and energy characteristics of radio links forming a radio communication network on the stability of the system.

As an indicator of stability, the connectivity of the radio communication network is considered. The developed methodology is based on specific methods for analyzing the indicators of noise immunity, intelligence protection, stability coefficients of information circuits and directions.

An example of using the developed technique in the problems of assessing the probability of connectivity and substantiating the height of antenna elevation in a radio communication network built on the sixth-generation radio facilities is considered.

Practical usefulness: *the results of the article can and should be taken into account when designing new samples of communication equipment.*

References

1. Bogovik A. V., Ignatov V. V. *Jeffektivnost' sistem voennoj svjazi i metody ee ocenki*. SPb.: VAS, 2006. 183 s.
2. Mihajlov R. L., Makarenko S. I. *Ocenka ustojchivosti seti svjazi v uslovijah vozdejstvija na nejo destabilizirujushhih faktorov* // Radiotekhnicheskie i telekommunikacionnye sistemy. 2013. № 4. S. 69–79.
3. Odoevskij S. M., Lebedev P. V. *Metodika ocenki ustojchivosti funkcionirovanija sistemy tehnologicheskogo upravlenija infokommunikacionnoj set'ju special'nogo naznachenija s zadannoj topologicheskoy i funkcional'noj strukturoj* // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti. 2021. № 1. S. 152–189. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10107.
4. Bekkiev A. Ju. *Ocenka pomehozashhishhennosti kanalov radiosvjazi v uslovijah dejstvija pomeh ot sredstv radioelektronnoj bor'by* / A. Ju. Bekkiev, V. I. Borisov // Radiotekhnika i elektronika. – 2019. – T. 64, № 9. – S. 891–901. – DOI 10.1134/S0033849419080035. – EDN PPLRCH.
5. Borisov V. I. *Pomehozashhishhennost' sistem radiosvjazi. Verojatnostno-vremennoj podhod* / V. I. Borisov, V. M. Zinchuk. – Moskva: Nauchno-tehnicheskoe izdatel'stvo «Radio i svjaz'», 1999. – 252 s. – ISBN 5-256-01397-1. – EDN SGNCYB.
6. Prokis Dzhon Dzh. *Cifrovaja svjaz' / Prokis Dzh.; Per. s angl. pod red. Klovskogo D. D.* – Moskva: Radio i svjaz', 2000. – 797 s.: il.; 30 sm.; ISBN 5-256-01434-X (rus.)
7. Feer K. *Besprovodnaja cifrovaja svjaz'. Metody moduljacji i rasshirenija spektra*: Per. s angl. / Pod red. V. I. Zhuravleva. – M.: Radio i svjaz', 2000, 520 s.: il.
8. Borisov V. I. *Pomehozashhishhennost' sistem radiosvjazi s rasshireniem spektra signalov metodom psevdosluchajnoj perestrojki rabochej chastoty* / V. I. Borisov, V. M. Zinchuk, A. E. Limarev. – 2-e izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. – Moskva: RadioSoft, 2008. – 512 s. – ISBN 978-5-93274-014-9. – EDN SMIHSV.
9. Moiseev A. A. *Ocenka osnovnyh svojstv primenenija mobil'nyh apparatnyh svjazi* / A. A. Moiseev, A. A. Kiselev // Tehnika sredstv svjazi. – 2021. – № 1(153). – S. 55–66. – EDN GRNORY.

