

Труды МАИ. 2025. № 141
Trudy MAI. 2025. No. 141. (In Russ.)

Научная статья
УДК 004.72: 519.816
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184511>
EDN: <https://www.elibrary.ru/UKSNBB>

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПРИЗНАКОВ ПОТЕРЬ ПРИ РИСКАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В ВОЗДУШНЫХ СЕТЯХ СВЯЗИ

Александр Владиславович Ананьев^{1✉}, Валентин Алексеевич Печкарев²

¹Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова,
Воронеж, Российская Федерация

^{1,2}Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная
академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж,
Российская Федерация

¹Ananyev-Alexandr@yandex.ru✉

²Val_pechkarev@mail.ru

Аннотация. В статье предложена новая метрика: «коэффициент признака потерь», характеризующая прогноз потерь в случае несанкционированного доступа к узлам воздушной сети связи. При формализации метрики предложено понятие «инвертированного риска». Суть инверсии риска заключается использовании знака «минус» и делении детерминированной величины на вероятность наступления негативного события, в отличие от известного представления риска в виде произведения неотрицательных величин.

Представлена классификация моделей, описывающая подходы к анализу, представлению и разработке воздушных сетей связи. Показана графовая модель воздушной сети связи (ВСС), в которой ребра характеризуются рисками, рассчитанными на основе предложенного коэффициента признака потерь. В классификации показано место новой метрики. Разработан алгоритм расчета рисков при передаче информации в воздушных сетях связи, отличающийся от известных, использованием новой метрики: «коэффициент признака потерь», позволяющей представить «неклассический» риск на основе радиодоступности узлов ВСС в точке приема средства, создающего угрозу передачи информации.

Ключевые слова: воздушная сеть связи, коэффициент признака потерь, риск при передаче информации

Для цитирования: Ананьев А.В., Печкарев В.А. Алгоритм оценки коэффициентов признаков потерь при рисках передачи информации в воздушных сетях связи // Труды МАИ. 2025. № 141. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=184511>

Original article

ALGORITHM FOR ESTIMATION OF LOSS SIGN COEFFICIENTS AT RISKS OF INFORMATION TRANSMISSION IN OVERHEAD COMMUNICATION NETWORKS

Alexander V. Ananjev^{1✉}, Valentin A. Pechkarev²

¹Plekhanov Russian University of Economics,
Voronezh, Russian Federation

^{1,2}Air force academy named after professor N.E. Zhukovskii and Y.A. Gagarin,
Voronezh, Russian Federation

¹Ananyev-Alexandr@yandex.ru✉

²Val_pechkarev@mail.ru

Abstract. In the paper proposes a new metric: "loss sign coefficient", which characterizes the prediction of losses in case of unauthorized access to the nodes of the overhead communication network. When formalizing the metric, the concept of "inverted risk" is proposed. The essence of risk inversion is the use of the "minus" sign and division of the deterministic value by the probability of occurrence of a negative event, in contrast to the known representation of risk in the form of a product of non-negative values. Based on these shortcomings, a new metric characterizing the forecast of losses in information transmission between nodes of the airborne communication network is proposed. This metric allows levelling the mentioned disadvantages of the existing approaches to risk assessment in information transmission due to radio accessibility calculated by total attenuation according to the Longley-Rice model and signal strength. Restrictions for the calculation of the loss sign coefficient are introduced, consisting in the location of the nodes of the aerial communication network at the same distance from each other and the same radiating power of signals. An example of calculation of risks in the transmission of information in the aerial communication network based on the radio accessibility of nodes relative to the means of radio-technical reconnaissance is considered. The graph model of the air communication network is created, differing from the known ones by representation of edges in the form of risks, including the coefficient of the sign of losses, accompanying the information transmission between the nodes of the network. The classification of models describing approaches to the analysis, representation, development of overhead communication networks is presented. An algorithm for calculating risks in the transmission of information in airborne communication networks has been developed, which differs from the known ones by a new metric 'loss sign coefficient', which allows to represent the non-classical risk based on the radio accessibility of the nodes of the airborne communication network for a means that creates a threat of information transmission.

Keywords: Airborne communication network, feature loss coefficient, risk, optimal route selection

For citation: Ananjev A.V., Pechkarev V.A. Algorithm for estimation of loss sign coefficients at risks of information transmission in overhead communication networks. *Trudy MAI*. 2025. No. 141. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=184511>

Введение

Стремительное развитие авиационных технологий обуславливает перспективность использования воздушных сетей связи (ВСС), необходимых для предоставления услуг наземным абонентам и обеспечения эффективного взаимодействия комплексов с беспилотными летательными аппаратами (КБПЛА) и пилотируемыми авиационными комплексами (АК) при их совместном и автономном применении. В процессе своего функционирования ВСС подвержены негативному воздействию непреднамеренных и преднамеренных дестабилизирующих факторов (ДФ) [1] соответственно от естественных и искусственных источников угроз, что обуславливает необходимость обеспечения устойчивости связи между узлами сети. Одним из подходов к повышению устойчивости ВСС является учет рисков при передаче информации между узлами.

Анализ работ [2–8] показал разнообразие методов оценки рисков в сетях связи, включающих классический риск [8], рассматриваемый как вероятность возникновения определенных негативных событий, основанных на статистическом анализе; байесовский риск [4], применение теоремы Байеса для обновления вероятностей событий по мере поступления новой информации; экспертный риск [5], отражающий экспертные оценки, которые могут варьироваться в зависимости от опыта и знаний каждого эксперта.

Каждый из методов оценки риска применительно для ВСС имеет свои недостатки. Классический метод не учитывает новые типы угроз для сети связи или изменении характеристик ДФ. Байесовский метод сложен в реализации из-за необходимости знания априорных распределений. Экспертный анализ риска

является субъективным, что может привести к предвзятости и вариативности оценок, снижая объективность принятия решений. Эти факторы затрудняют применение указанных методов оценки рисков для ВСС, функционирующих в динамичном изменении электромагнитной обстановки.

В работе [2] был предложен подход к оценке рисков «неклассическим» методом, заключающимся в произведении вероятности угрозы (уязвимости узлов) на потери при передаче информации в ВСС. Такое представление риска делает доступным исследование такого качества или свойства явлений как «масштаб события», позволяя учесть не только вероятностный компонент, но стоимость (ущерб) происходящего.

Одним из системных показателей, который может быть использован при прогнозировании риска [2], является радиодоступность узлов ВСС, что в известных работах не рассматривалось и является целью данной статьи.

1. Моделирование воздушных сетей связи

Моделирование ВСС является необходимым этапом для прогноза устойчивости сети к воздействию ДФ [9, 11, 12]. В данной предметной области используется широкий спектр моделей, каждая из которых имеет свои преимущества и ограничения. На рисунке 1 представлена обобщенная классификация моделей, используемых при оценке воздушных сетей связи.

Для моделирования ВСС наиболее простым в разработке, анализе, масштабировании и применимости является графовый подход, позволяющий определить, в том числе, оптимальный маршрут передачи информации между узлами сети [8, 10].



Рисунок 1. Классификация моделей ВСС

В работах [3, 13–15] ребра графа ВСС характеризуются как позитивными (вероятность связности, вероятность передачи информации [15], пропускная способность канала, стоимостные коэффициенты), так и негативными (время задержки [13], загруженность узла, вероятность потери пакетов [2], дальность между узлами [14]) показателями. Учет этих показателей критически важен для повышения устойчивости работы ВСС. Среди представленных показателей наиболее применяемым для оценки свойств ВСС является вероятность передачи информации, учитывающая качество и надежность канала связи. Указанный показатель изменяется в условиях воздействия ДФ, однако не позволяет оценить

ее индивидуальное воздействие на конкретные узлы ВСС и их информационные направления, в том числе с учетом «масштаба событий».

Для преодоления указанного ограничения и более точного определения влияния ДФ на узлы ВСС, предлагается использовать коэффициент признака потерь $C_{i,j}$, характеризующий прогнозируемые потери передаваемой информации, и позволяющий оценить масштаб негативного воздействия на ВСС.

Используя предложенный коэффициент признака потерь в сочетании с вероятностью передачи информации между узлами ВСС выражение риска примет вид [2]

$$R_{i,j} = p_{i,j} C_{i,j}, \quad (1)$$

где $p_{i,j}$ – вероятности передачи информации (связи) от i -го узла к j -му.

С учетом метрики (1) условная модель ВСС в виде ориентированного графа сети примет вид, представленный на рисунке 2.

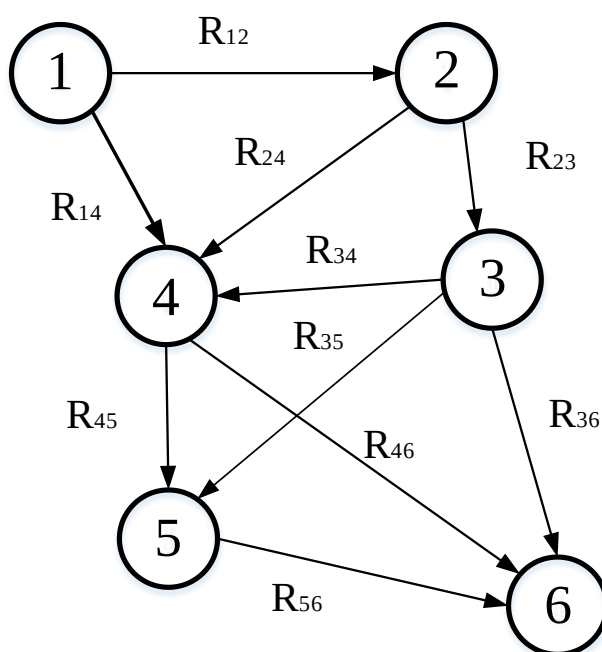


Рисунок 2. Графовая модель ВСС с учетом рисков при передаче информации

2. Методика расчета рисков при передаче информации в воздушных сетях связи

Определим физическую сущность и порядок расчета коэффициентов признака потерь $C_{i,j}$ и в целом рисков $R_{i,j}$. Одним из ключевых факторов реализации угроз ВСС является обнаружение их работы в радиоэфире.

С учетом указанных ограничений можно определить, что коэффициент признаков потерь, сопутствующих передаче информации равен уровню ослабления сигнала $E_{i,j}$ [-дБм] по отношению к излучаемой мощности передатчиком воздушных узлов связи в точке приема средства несанкционированного доступа

$$C_{i,j} = E_{i,j}, \quad (2)$$

где $E_{i,j}$ – параметр радиосигнала, характеризующий общее ослабление распространения радиоволн, уровни сигнала узлов ВСС. Фактически коэффициент $C_{i,j}$ представляет собой радиодоступность i -го узла при передаче информации в j -ый узел для средства несанкционированного доступа.

Для примера рассмотрим ВСС на базе БпЛА, функционирующую в диапазоне частот 3300-3800 МГц. Пусть после вывода в зону выполнения миссии (предоставления услуг связи) обнаружено наземное средство радиотехнической разведки (РТР) типа «Кольчуга-М» с дальностью ведения разведки до 600 км и чувствительностью приемника в диапазоне 90-110 дБ/Вт, предопределяющее риск при передаче информации между узлами сети связи в случае их вскрытия (рисунок 3).

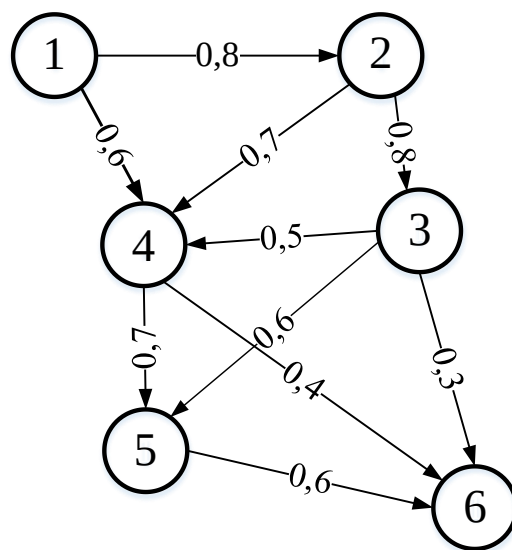


Рисунок 3. Условная воздушная сеть связи, изображенная в виде ориентированного графа в вероятностном представлении

На рисунке 3 представлена условная ВСС в виде ориентированного графа, где указаны вероятности передачи информации по каждому из ребер (маршрутов). Проведем расчеты рисков при передаче информации и коэффициентов признаков потерь для каждого узла ВСС на основе радиодоступности, рассчитанной по общему ослаблению распространения радиоволн в точке приема сигнала средством РТР. Расчеты выполняются для следующих условий:

- круговая диаграмма направленности бортовых антенн БпЛА ВСС;
- узлы ВСС работают с равной минимальной мощностью излучения;
- поляризации антенн узлов ВСС и средства несанкционированного доступа согласованы;
- узлы ВСС и средство РТР – фиксированные точки в пространстве.

Изложенные условия являются естественными для группового полета БпЛА, АК и организации аналога сотовых сетей связи воздушного базирования.

Принимая во внимание функциональные характеристики узлов ВСС и средства РТР, учитывая высоты антенных систем и рельеф местности,

целесообразно применение модели распространения радиоволн Лонгли-Райса [16] для проведения вычислительных процедур. Недостатки представленной модели можно нивелировать путем использования матрицы высот для района выполнения задачи. Модель Лонгли-Райса для i -го узла ВСС позволяет получить результаты значений общих потерь сигнала по формуле [17]:

$$L_{0i} = 20\log_{10}(d_i) + 20\log_{10}(f) + 20\log_{10}\left(\frac{\lambda}{2 \cdot \sqrt{\frac{d1_i + d1_i}{d1_i \cdot d2}}}\right) + 20\log_{10}(kR^\alpha) + 20\log_{10}(|\cos\theta|), \quad (3)$$

где d – расстояние i -го узла ВСС до средства РТР (м), f – несущая частота передачи информации (МГц), θ – это угол между векторами поляризации передающей и приемной антенн (град), k, α – коэффициенты, зависящие от частоты сигнала, полученные из ITU-R P.838 (для частоты для частоты 3,675 ГГц: $k = 0.0055$, $\alpha = 1.19$),

R – интенсивность дождя (для представленного примера принят равным 10 мм/ч), $d1$ – расстояние между i -м узлом ВСС и препятствием (м), $d2$ – расстояние между препятствием и средством РТР (м), λ – длина волны (м).

В формуле 3 отсутствует ослабление, вызванное поглощением радиоволн атмосферными газами, которые необходимо учитывать в высокочастотном диапазоне от 24,25 ГГц до 52,6 ГГц, что не относится к диапазону рабочих частот узлов ВСС. Расчет ослабления радиоволны дифракции зависит от угла закрытия радиогоризонта, показателя зоны Френеля.

В таблице 1 представлены исходные данные для проведения расчетов общих ослаблений сигнала от узлов ВСС в точке приема средства РТР по модели Лонгли-Райса.

Входные параметры воздушной сети связи

Таблица 1

Параметр	Характеристики всенаправленной антенны ВСС на базе БПЛА	
	Узел 1-Узел 6	«Кольчуга-М»
Минимальная мощность передатчика, дБм/мВт	16/42	-
Коэффициент усиления антенны (на прием/ на передачу), дБ	7,7/9,8	-
Высота подъема антенны, м	650, 550, 250, 300, 350, 450	5
Потери мощности на фидере, дБ	1	1
Координаты в системе координат WGS84, град.	B1=52.0545798 L1=38.2394973 B2=50.8203022 L2=40.2143942 B3=51.2038894 L3=38.6646239 B4=52.0629929 L4=40.7401838 B5=52.0629929 L5=40.7401838 B6=51.9925084 L6=39.7755655	B=51.6021136 L=35.7412787
Минимально отображаемый уровень напряженности поля, дБм	-97,447	
Поляризация	вертикальная	
ДНА в азимутальной плоскости	всенаправленная	
Диапазон рабочих частот, МГц	3300-3800	135-470, 750-18000

Выполним расчеты общих потерь сигнала на приемной стороне (средство РТР) от каждого узла ВСС для частоты 3675 МГц в умеренном климате сельской местности. Используем входные данные матрицы высот Воронежской области формата «.hgt» и рассчитаем зоны радиовидимости с проведением верификации в программе RadioPlanner 3.0 [20]. Коэффициент атмосферной рефракции установлен на уровне 301, относительная диэлектрическая проницаемость почвы составляет 15, а электрическая проводимость – 0,05 см/м. Для построения зоны радиодоступности узлов ВСС для средства РТР задан уровень сигнала -97,447 дБм. Результаты расчетов общих ослаблений уровня сигнала согласно модели Лонгли-Райса, а также верификация полученных расчетов в программе RadioPlanner 3.0, представлены в таблице 2.

Результаты расчетов общих ослаблений для узлов №1-6 средством РТР.

Таблица 2

Рабочие частоты f , МГц	Рассчитанные общие потери $L_{0i,j} = C_{i,j}$, дБм	Общие потери в Radioplanner 3.0, дБм
Узел 1 на дальности 161 км до средства РТР		
3675	-78,577	-79,300
Узел 2 на дальности 208 км до средства РТР		
3675	-85,649	-86,352
Узел 3 на дальности 187 км до средства РТР		
3675	-78,241	-79,352
Узел 4 на дальности 147 км до средства РТР		
3675	-79,685	-80,652
Узел 5 на дальности 152 км до средства РТР		
3675	-76,292	-77,652
Узел 6 на дальности 204 км до средства РТР		
3675	-96,601	-97,652

На рисунке 4 представлены результаты верификации расчетов общих ослаблений в программе RadioPlanner 3.0 для узла 4.

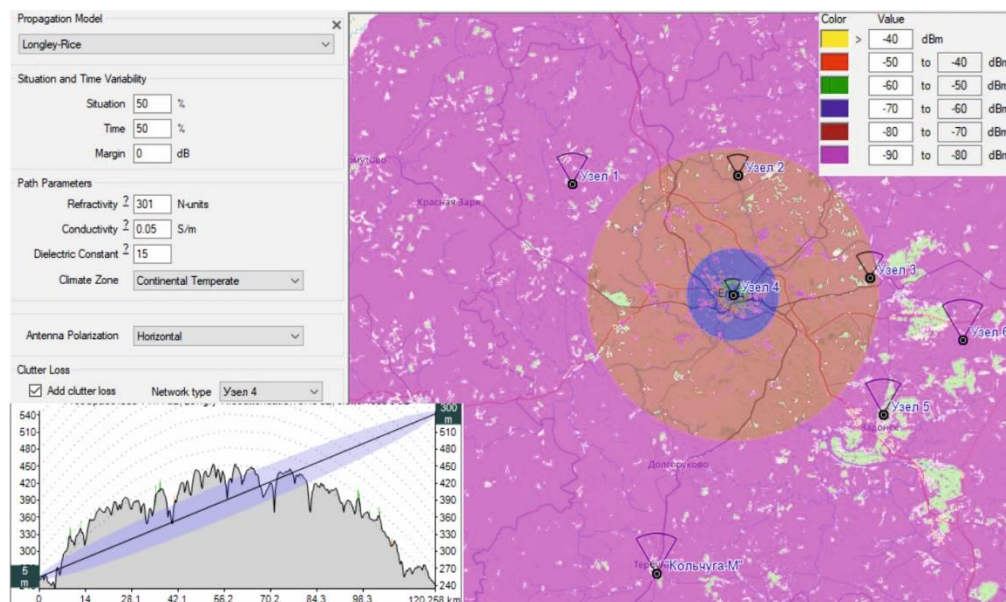


Рисунок 4. Результаты расчетов общих ослаблений по модели Лонгли-Райса для узла 4 в программе RadioPlanner 3.0

Сущность коэффициентов рисков $R_{i,j}$ следующая. При использовании радиодоступности L_0 , в качестве физической величины, характеризующей признаки потерь $C_{i,j}$ в процессе вычисления рисков $R_{i,j}$ необходимо учесть знак «минус» перед dBm. Для этого, принимая во внимание, что $p_{i,j}$ – вероятности передачи информации (связи) от i -го узла к j -му для минимизации риска передачи информации с учетом логики рассуждений получим выражение **инвертированного риска**, подлежащего минимизации

$$R_{i,j} = \frac{C_{i,j}}{1 - p_{i,j}}, \quad (4)$$

где $C_{i,j}$ – коэффициент признака потерь, характеризующий уровень затухания сигнала (ослабления) в точке нелегального съема информации поступающей от воздушного узла связи и имеющий размерность -дБм. С учетом того, что

вероятность непередачи информации между i -м и j -м узлом $(1-p_{i,j})$ является безразмерной величиной, сам риск $R_{i,j}$ также имеет размерность -дБм и в формате (4) подлежит минимизации в алгоритмах поиска путей передачи информации в ВСС. Математическая интерпретация инверсии риска заключается в использовании знака «минус» в выражении (4).

Для получения *неинвертированного риска* выражение (4) может быть преобразовано в величину, подлежащую максимизации при выборе путей передачи данных в ВСС, имеющую размерность дБм и определяемую выражением

$$R_{i,j} = p_{i,j} \cdot |C_{i,j}|. \quad (5)$$

Результаты выбора маршрута передачи данных в ВСС по минимальным значениям рисков (ребрам ориентированного графа), полученных по формуле (4) и максимальным значениям рисков, полученным по формуле (5), будут эквивалентны друг другу.

Приведенные в работе модель ВСС, метрики рисков и методика их расчета для использования на практике объединены алгоритмом, представленным на рисунке 5.

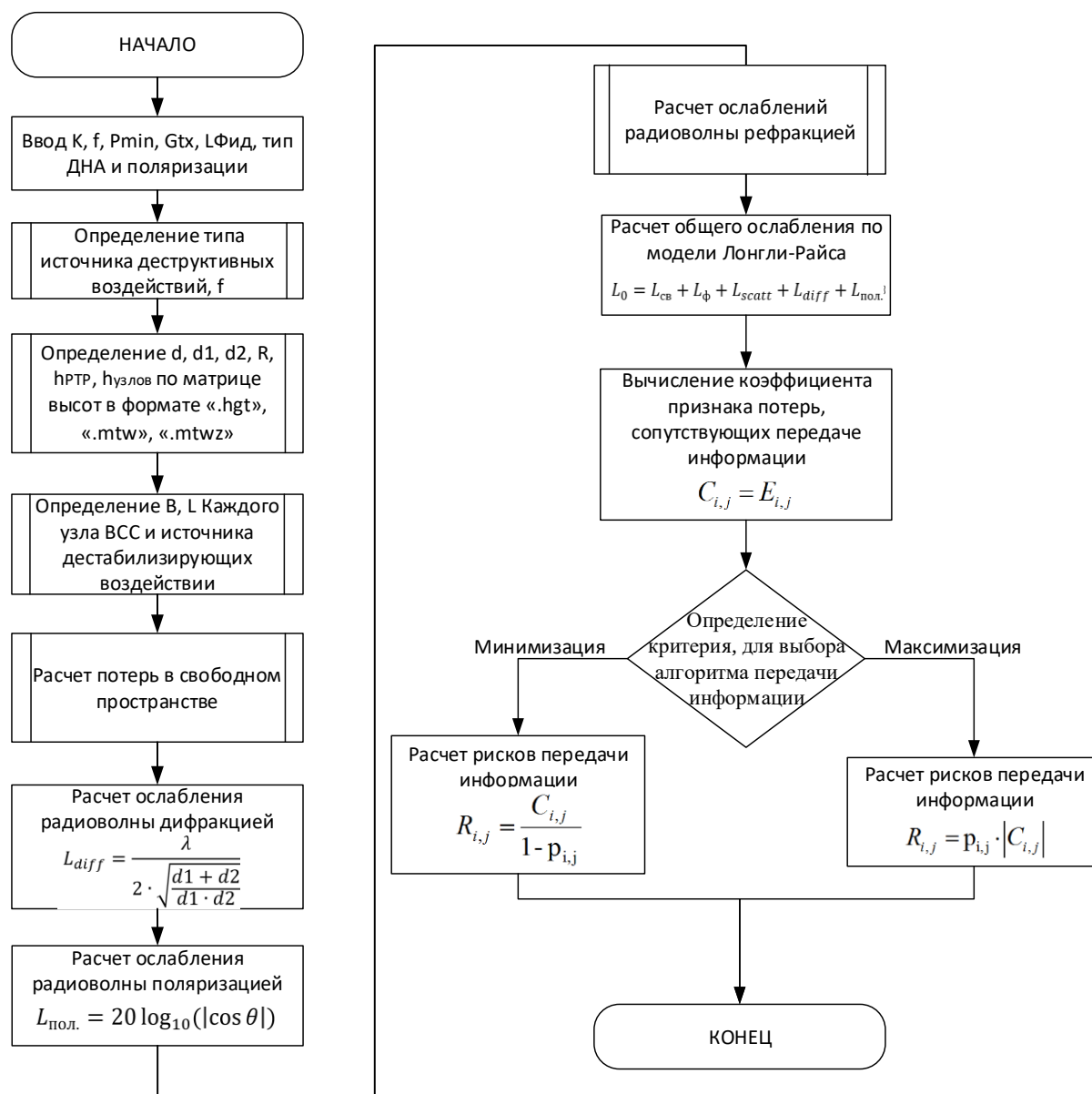


Рисунок 5. Алгоритм расчета коэффициентов признаков потерь при рисках передачи информации в воздушных сетях связи

В результате использования алгоритма (см. рисунок 5) получаются расчетные значения рисков, которые могут сводиться с матрицы или таблицы (см. таблицу 3).

Результаты оценки рисков передачи информации между узлами ВСС с учетом
коэффициента признаков потерь

Таблица 3

Номер узла	1	2	3	4	5	6
1	1	62,8616	1	39,289	1	1
2	1	1	68,519	34,26	1	1
3	1	1	1	23,472	46,944	23,472
4	1	1	1	1	55,78	15,937
5	1	1	1	1	1	38,146
6	1	1	1	1	1	1

Выводы. В работе использован нетрадиционный подход к расчету рисков для оценки эффективности маршрутов передачи данных в ВСС. Разработанный алгоритм коэффициентов признаков потерь при рисках передачи информации в воздушных сетях связи позволяет учесть индивидуальное влияние ДФ на узлы ВСС, а также оценить «неклассический» риск по радиодоступности узлов ВСС от средств несанкционированного доступа. Результирующие матрицы рисков позволят осуществлять маршрутизацию с учетом уязвимостей узлов ВСС.

Список источников

1. Макаренко С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки: монография. - СПб: Изд-во Научно-технические технологии, 2020. - 340 с.
2. Жеребин А.М., Кропова В.В., Русак М.А. Методологический инструментарий оценки рисков реализации программ и планов создания авиационной техники // Труды МАИ. 2012. № 55. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=30109>
3. Ананьев А.В., Змий Б.Ф., Кащенко Г.А. Оценка риска влияния физических и информационных разрушающих воздействий на аэромобильную сеть связи //

Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Авионика. Актуальные вопросы состояния, эксплуатации, и развития комплексов бортового РЭО воздушных судов, проблемы подготовки специалистов» (Воронеж, 17–18 марта 2016): сборник трудов. – Воронеж: Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина, 2016. С. 22-26.

4. Спирина У.А., Козлов С.В. Метод маршрутизации, обеспечивающий повышение пропускной способности IP сетей в условиях внутрисистемных помех // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 12. С. 1-10.

5. Ananev A.V., Ivannikov K.S. Risk-model for communication networks operation stability assessment // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 1902, P. 012028. DOI: [10.1088/1742-6596/1902/1/012028](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012028)

6. Ермаков С.А. Аппарат нечетких множеств и нечеткой логики как средство риск-анализа беспроводных систем связи // Информационная безопасность. 2010. № 4. С. 607-610.

7. Салухов В.И., Шевченко О.И. Моделирование и управление рисками при проектировании и строительстве сетей связи // Проблемы анализа риска. 2014. № 3. С. 48-67.

8. Мартынюк И.В. Выбор оптимальных маршрутов перевозок опасных грузов по результатам оценки рисков возникновения нарушений безопасности движения и ущербов от них // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2006. № 3. С. 103-106.

9. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ алгоритмов маршрутизации в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 87. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=69735>

10. Настасин К.С., Родионов В.В. Особенности маршрутизации в совмещенной сети сотовой связи и беспроводного широкополосного доступа // Труды МАИ. 2011. № 49. URL: https://trudymai.ru/published.php?ID=28108&PAGEN_2=2

11. Волков А.С. Муратчаев С.С., Кульпина Ю.А. Разработка имитационной модели двухранговой сети MANET // Труды МАИ. 2019. № 109. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=111387>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-13](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-13)
12. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Имитация модель для исследования адаптивных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=93398>
13. Волков А.С., Баскаков А.Е. Разработка процедуры двунаправленного поиска для решения задачи маршрутизации в транспортных программно-конфигурируемых сетях // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158240>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-07](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-07)
14. Калюжный А.В., Терехов В.Г., Зыков С.С. Алгоритм поиска кратчайшего пути между подвижными объектами транспортной сети // Intellectual Technologies on Transport. 2020. № 3. С. 1-6.
15. Цветков К.Ю., Макаренко С.И., Михайлов Р.Л. Формирование резервных путей на основе алгоритма Дейкстры в целях повышения устойчивости информационно-телекоммуникационных сетей // Информационные каналы и среды. 2014. № 2. С. 71-78.
16. Kasampalis S., Lazaridis P.I., Zaharis Z.D., Bizopoulos A., Zettas S., Cosmas J. Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata-Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction // Conference: 9th IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB 2014). Beijing, China. 2014. DOI: [10.1109/BMSB.2014.6873518](https://doi.org/10.1109/BMSB.2014.6873518)
17. Ломакин А.Ф., Школьный С.И. Моделирование поля DVB-T в условиях городской застройки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6. С. 53-58.
18. Егоров Д.М., Закальский Д.В., Совкова О.И. Ликвидация зоны тени телевизионного вещания в районе снеговой пади г. Владивостока // Вестник молодежной науки России. 2019. № 4. С. 27.

19. Ананьев А.В. Катруша А.Н. Моделирование применения ДКМВ канала в системах информационного обмена с беспилотными летательными аппаратами. 2018. URL: <https://russiandrone.ru/publications/modelirovanie-primeneniya-dkmv-kanala-v-sistemakh-informatsionnogo-obmena-s-bespilotnymi-letatelnyimi-aerogeo/>
20. Abdelraheem A.M., Abdalla M.A. Prediction of WiMAX radio wave propagation over outdoor irregular terrains and spacing // 31st National Radio Science Conference (NRSC), Cairo, Egypt, 2014. P. 167-174. DOI: [10.1109/NRSC.2014.6835073](https://doi.org/10.1109/NRSC.2014.6835073)
21. Вовк М.Ю., Кулалаев В.В. Критерии нормальности при обработке экспериментальных исследований параметров газотурбинных двигателей на базе методов прикладной математической статистики // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=96932>

References

1. Makarenko S.I. *Modeli sistemy svyazi v usloviyakh prednamerennykh destabiliziruyushchikh vozdviizhii i vedeniya razvedki: monografiya*. (Models of the communication system in the conditions of deliberate destabilising influences and reconnaissance: a monograph). Saint Petersburg: Izd-vo Naukoemkie tekhnologii Publ., 2020. 340 p.
2. Zherebin A.M., Kropova V.V., Rusak M.A. Methodological tools for risk assessments of programs and plans realization for aerotechnics development. *Trudy MAI*. 2012. No. 55. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=30109>
3. Anan'ev A.V., Zmii B.F., Kashchenko G.A. Risk assessment of the impact of physical and information destructive effects on the aeromobile communication network. *Materialy I Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Avionika. Aktual'nye voprosy sostoyaniya, ekspluatatsii, i razvitiya kompleksov bortovogo REO vozdukhnykh sudov, problemy podgotovki spetsialistov»*: sbornik trudov. Voronezh: Voenno-vozdukhnyaya akademiya imeni professora N.E.Zhukovskogo i Yu.A.Gagarina Publ., 2016. P. 22-26.

4. Spirina U.A., Kozlov S.V. Routing method providing the IP networks throughput increase under the intrasystem interference conditions. *Zhurnal radioelektroniki*. 2015. No. 12. P. 1-10. (In Russ.)
5. Anan'ev A.V., Ivannikov K.S. Risk-model for communication networks operation stability assessment. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. V. 1902, P. 012028. DOI: [10.1088/1742-6596/1902/1/012028](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012028)
6. Ermakov S.A. Apparatus of fuzzy sets and fuzzy logic as a means of risk-analysis of wireless communication systems. *Informatsionnaya bezopasnost'*. 2010. No. 4. P. 607-610. (In Russ.)
7. Salukhov V.I., Shevchenko O.I. Modelling and risk management in design and construction of communication networks. *Problemy analiza riska*. 2014. No. 3. P. 48-67. (In Russ.)
8. Martynyuk I.V. Selection of optimal routes for dangerous goods transportations based on the results of the assessment of risks of traffic safety violations and damages from them. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya*. 2006. No. 3. P. 103-106. (In Russ.)
9. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. 9. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. The analysis of algorithms of routing in a communication network groups of unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*. 2016. No. 87. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69735>
10. Nastasin K.S., Rodionov V.V. Routing features in combined cellular/wireless broadband access network. *Trudy MAI*. 2011. No. 49. (In Russ.). URL: https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=28108&PAGEN_2=2
11. Volkov A.S. Muratchaev S.S., Kul'pina Yu.A. Developing simulation model of two-rank MANET Network. *Trudy MAI*. 2019. No. 109. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=111387>. DOI: [10.34759/trd-2019-109-13](https://doi.org/10.34759/trd-2019-109-13)
12. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. Simulation model for adaptive sensor networks studies. *Trudy MAI*. 2018. No. 100. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93398>

13. Volkov A.S., Baskakov A.E. Bidirectional search procedure development for solving the the transport software-defined network routing problem. *Trudy MAI*. 2021. No. 118. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158240>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-07](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-07)
14. Kalyuzhnyi A.V., Terekhov V.G., Zykov S.S. Algorithm of the shortest path search between the moving objects of the transport network. *Intellectual Technologies on Transport*. 2020. No. 3. P. 1-6. (In Russ.)
15. Tsvetkov K.Yu., Makarenko S.I., Mikhailov R.L. Formation of the reserve paths on the basis of the Dijkstra's algorithm in order to increase the stability of the information-telecommunication networks. *Informatsionnye kanaly i sredy*. 2014. No. 2. P. 71-78. (In Russ.)
16. Kasampalis S., Lazaridis P.I., Zaharis Z.D., Bizopoulos A., Zettas S., Cosmas J. Comparison of Longley-Rice, ITU-R P.1546 and Hata-Davidson propagation models for DVB-T coverage prediction. *Conference: 9th IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB 2014)*. Beijing, China. 2014. DOI: [10.1109/BMSB.2014.6873518](https://doi.org/10.1109/BMSB.2014.6873518)
17. Lomakin A.F., Shkol'nyi S.I. Modelling of DVB-T field in the conditions of urban development. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*. 2012. No. 6. P. 53-58. (In Russ.)
18. Egorov D.M., Zakal'skii D.V., Sovkova O.I. Elimination of the TV broadcasting shadow zone in the area of the snow fall of Vladivostok. *Vestnik molodezhnoi nauki Rossii*. 2019. No. 4. P. 27. (In Russ.)
19. Anan'ev A.V. Katrusha A.N. Modelling of the DCMV channel application in the systems of information exchange with unmanned aerial vehicles. 2018. (In Russ.). URL: <https://russiandrone.ru/publications/modelirovanie-primeneniya-dkmv-kanala-v-sistemakh-informatsionnogo-obmena-s-bespilotnymi-letatelnyimi-aerogeo/>
20. Abdelraheem A.M., Abdalla M.A. Prediction of WiMAX radio wave propagation over outdoor irregular terrains and spacing. *31st National Radio Science Conference (NRSC)*, Cairo, Egypt, 2014. P. 167-174. DOI: [10.1109/NRSC.2014.6835073](https://doi.org/10.1109/NRSC.2014.6835073)

21. Vovk M.Yu., Kulalaev V.V. Normality Criteria While Processing Experimental Studies of Gas Turbine Engines Parameters Based on Applied Mathematical Statistics' Methods. *Trudy MAI*. 2018. No. 101. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=96932>

Статья поступила в редакцию 13.03.2025

Одобрена после рецензирования 20.03.2025

Принята к публикации 25.04.2025

The article was submitted on 13.03.2025; approved after reviewing on 20.03.2025; accepted for publication on 25.04.2025