

С.Ф. БОЕВ, А.С. ЗАХАРОВ, А.Ю. ПЕРЛОВ, А.В. ТИМОШЕНКО
**МОДЕЛЬ КЛАССИФИКАЦИИ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ
ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ПОРТРЕТОВ
КРУПНОАПЕРТУРНЫХ РЛС L-ДИАПАЗОНА С УЧЕТОМ
СТОХАСТИЧЕСКИХ НЕГАТИВНЫХ ФАКТОРОВ
РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ**

Боев С.Ф., Захаров А.С., Перлов А.Ю., Тимошенко А.В. Модель классификации подвижных объектов по данным радиолокационных портретов крупноапертурных РЛС L-диапазона с учетом стохастических негативных факторов различной природы.

Аннотация. Приведены результаты исследований по совершенствованию моделей и методов оперативной классификации космических аппаратов на основе построения радиолокационных портретов. Предложена гипотеза о том, что минимально необходимое для правильной классификации число радиолокационных портретов является функционалом оригинального показателя интегрального риска, учитывающего стохастический характер негативных факторов, снижающих точностные характеристики радиолокационной станции. Предложена модель классификации подвижных объектов по данным радиолокационных портретов крупноапертурных РЛС L-диапазона с учетом стохастических негативных факторов различной природы. Приведена оригинальная формализация процесса информационного обеспечения классификации космических аппаратов по радиолокационным портретам с использованием двумерного неоднородного дифференциального уравнения для оценки функции плотности вероятности воздействия негативных факторов различной природы на точностные характеристики РЛС. Новизна модели заключается в комплексном учете разнородных факторов на процесс классификации КА, интеграции с риск-анализом и иерархической многоуровневой структуре модели в интересах оперативной классификации. Показано, что представление модели классификации космических аппаратов на основе усовершенствованного риск-анализа обеспечивает получение аналитической зависимости числа радиолокационных портретов с учетом воздействия факторов различной природы, которые формализованы в виде усовершенствованных уравнений Фоккера-Планка (для формализации внутренних факторов) и уравнения Фейнмана-Каца (для внешних факторов, включая динамику реального космического фона). Показано, что совершенствование теории риск-анализа научной школы академика Ю.И. Шокина с учетом результатов решения системы уравнений позволяет существенно улучшить информационное обеспечение задач классификации. Приведены результаты вычислительного эксперимента по обработке радиолокационных портретов, показывающие потенциальную возможность повышения оперативности и точности классификации.

Ключевые слова: радиолокационная станция, подвижный объект, космический аппарат, радиолокационное портретирование, классификация, стохастические факторы.

1. Введение. Неуклонный рост числа выводимых в околоземное пространство подвижных объектов ведет к повышению сложности решения актуальной задачи классификации космических аппаратов (КА), а оснащение нового поколения низкоорбитальных аппаратов

двигателями малой тяги, позволяющими оперативно изменять параметры орбиты, приводит к еще большему возрастанию требований к системе информационного обеспечения решения задач классификации в интересах поддержания каталога КА [1].

В настоящее время классификация КА в основном проводится с использованием оптоэлектронных средств (ОЭС), возможности которых в ряде случаев существенно ограничены из-за снижения оптической видимости при ухудшении погодных условий [2 – 5].

В этой связи актуальной задачей является совершенствование методов классификации по данным радиолокационных станций мониторинга космического пространства (РЛС МКП), работающих с широкополосными сигналами для построения радиолокационных портретов (РЛП) КА, являющихся источником информации о типе и форме объекта для классификации КА, а также о характере движения КА, в том числе о маневрировании.

Современные РЛС L-диапазона, использующие широкополосные линейно-частотно модулированные (ЛЧМ) сигналы большой длительности, обладают потенциальными возможностями для решения задачи построения радиолокационных портретов (РЛП) в интересах классификации КА [6 – 9].

В настоящей работе под классификацией понимается распознавание типа объекта с заданной достоверностью. В качестве основного информативного признака для классификации используется дальностный радиолокационный портрет, полученный в ходе сжатия ЛЧМ сигналов. Обработка пачек широкополосных ЛЧМ сигналов при сопровождении КА позволяет определить геометрическую форму и размер объекта для его распознавания путем сравнения с эталонным портретом из каталога КА.

Теоретические исследования процессов учета и компенсации искажений и нестабильности параметров устройств формирования и усиления широкополосных сигналов достаточно подробно представлены в работах [7, 10], где показано, что воздействие стохастических негативных факторов различной природы приводит к снижению точности измерения координат КА и соответственно к ухудшению РЛП и оперативности классификации КА.

Известные методы калибровки и юстировки РЛС различного типа в определенной степени обеспечивают решение задачи компенсации по каждому фактору в отдельности для построения РЛП целей с одной стороны [7, 8]. Однако, отсутствие методов комплексной оценки и оперативной компенсации негативного влияния на точностные характеристики всех факторов не позволяет обеспечить

требуемую оперативность классификации КА. Данное обстоятельство обуславливает необходимость разработки модели информационного обеспечения классификации КА, позволяющей представить процесс классификации с учетом разнородного влияния стохастических факторов на требуемое количество РЛП для совершенствования методов оперативной классификации КА.

Существующие методы калибровки и юстировки в РЛС направлены на компенсацию систематических составляющих ошибок и слабо применимы для оперативной компенсации быстрых случайных воздействий, имеющих стохастический характер. В этой связи актуальной является разработка динамической модели, которая позволила бы определить аналитическую зависимость влияния негативных факторов на информационную достаточность последовательности РЛП для решения задачи классификации.

В наибольшей степени [11 – 36] на точностные характеристики влияют факторы, связанные с аппаратурой, такие как неравномерность АЧХ, стохастические изменения спектральной плотности мощности фазовых шумов (СПМФШ), потери коэффициента усиления, вызванные тепловыми процессами и случайными отказами. Кроме этого, текущие изменения условий функционирования и среды распространения в ряде случаев также приводят к критическому снижению точности измерения координат КА.

Анализ функционирования РЛС [11 – 18] при построении РЛП КА показал, что необходимо также учитывать скорость и степень влияния факторов на число РЛП. Зависимость числа РЛП от доверительного уровня представлена на рисунке 1.

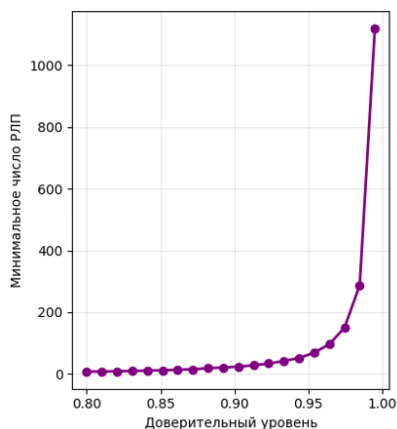


Рис. 1. Зависимость числа РЛП от доверительного уровня

Нелинейная зависимость минимального необходимого числа РЛП от требуемого доверительного уровня демонстрирует экспоненциальный рост объемов данных при стремлении вероятности охвата к единице. Точка перегиба при уровне доверия 0.92 соответствует переходу от экономичного к надежному режиму работы системы. Асимптотическое поведение при $P \rightarrow 1$ подтверждает фундаментальное ограничение на гарантированное исключение сколь угодно редких событий при конечных объемах выборки.

Оперативное решение задачи классификации КА в значительной степени определяется влиянием на РЛС МКП следующих факторов [7, 13, 14]:

- ухудшением параметров технического и функционального состояния РЛС, в том числе текущей неидентичности амплитудно-фазового распределения (АФР), нестабильности температурных параметров приемо-передающих модулей, неравномерности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) трактов, что в совокупности с параметрами зондирующих сигналов (ширина спектра, тип модуляции, длительность, скважность) формирует стохастические изменения параметров внутри РЛС;

- динамическими и стохастическими изменениями параметров среды (ионосферные и тропосферные изменения);

- неопределенностью параметров движения КА (локальные неоднородности, флуктуации фазового центра, вращение, маневрирование).

Для проверки гипотезы о возможности применения метода риск-анализа при оценке влияния факторов на время классификации КА сгруппируем представленные выше негативные факторы на две группы (внешние факторы и внутренние факторы), рисунок 2.

Из приведенной схемы следует, что модель классификации в данном случае должна включать в свой состав частные модели всех указанных составляющих процесса классификации (внешние факторы, внутренние факторы, характеристики РЛП), что должно обеспечить выполнение целевой задачи в режиме построения РЛП – задачи оперативной классификации КА при воздействии негативных факторов на точностные характеристики РЛС.

Объектом исследования выступает крупноапертурная РЛС L-диапазона нового поколения, что требует теоретического описания процессов в условиях фактического отсутствия информации о функционировании аналогов. Данное обстоятельство также ограничивает возможность разработки цифрового двойника РЛС и его компонентов, что определяет актуальность разработки

математической модели на основе формализованного процесса классификации от влияния ключевых факторов на качество РЛП.

Целью работы является разработка теоретической модели классификации подвижных объектов по данным радиолокационных портретов крупноапертурных РЛС L-диапазона с учетом стохастических негативных факторов различной природы.

В качестве теоретической основы для описания внутренних факторов в работе используется уравнение Фоккера-Планка. Применение данного уравнения обосновано тем, что такие параметры, как температурное распределение по полотну АФАР или деградация коэффициента усиления приемо-передающих модулей (ППМ), изменяют свои значения во времени под действием детерминированного тренда (сноса) и стохастических флуктуаций (диффузии) вследствие высокого уровня мощности сигналов и неидентичностей в приемо-передающих трактах.

Для формализации внешних факторов, связанных с возмущениями среды распространения и изменением параметров движения цели, предлагается совершенствование уравнения Фейнмана-Каца.



Рис. 2. Представление деструктивных факторов в виде двух групп – внешних и внутренних

2. Формализованная постановка задачи. Будем полагать, что процесс классификации по данным РЛП с требуемым уровнем точности измерения координат КА при заданных параметрах зондирующих сигналов и характеристик приемо-передающих каналов РЛС можно представить как процесс влияния факторов на достоверность полученной информации, определяющейся числом

РЛП. Формализованная постановка задачи определения необходимого объема выборки представлена в следующем виде:

$$T = \operatorname{argmin} N [P > 0,95; S; A; T; K; R], \quad (1)$$

где P – вероятность правильной классификации; N – необходимое число портретов РЛП для правильной классификации КА; T – вектор характеристик (сигнал/шум, разрешающая способность по дальности и углам) в режиме радиопортретирования; S – вектор параметров зондирующих сигналов РЛС; K – вектор параметров приемо-передающего тракта РЛС; A – вектор параметров условий функционирования (ошибки юстировки и возмущения среды); R – риск изменения точности измерения координат.

В такой постановке целевой функцией является число РЛП, которое изменяется в зависимости от условий функционирования РЛС. Время классификации определяется как:

$$T_{class} = \min t \quad \text{при} \quad P(\hat{y}(t)) \geq \theta, \quad (2)$$

где $\hat{y}(t)$ – спрогнозированный класс КА; P – вероятность правильной классификации; θ – заданный порог доверия; t – время выполнения операций классификации, измерения и накопления полезного сигнала. Вероятность классификации зависит от последовательности качественных РЛП с минимальным уровнем ошибок измерения координат.

С целью определения минимально необходимого числа РЛП предложено применение математического аппарата риск-анализа для комплексной оценки влияния разнородных и стохастических негативных факторов на снижение точностных характеристик при сопровождении КА.

Проведенный анализ влияния деструктивных факторов на процесс информационного обеспечения решения задач классификации КА показал, что для разработки модели классификации КА предлагается провести:

- формализованное описание влияния внутренних факторов на основе совершенствования уравнения Фоккера-Планка;
- формализованное описание влияния внешних факторов с использованием модифицированного уравнения Фейнмана-Каца;
- на основе совместного решения уравнений определить функцию распределения суммарной ошибки измерения координат;

– установить аналитическую зависимость минимально необходимого числа РЛП от интегрального риска и требуемой вероятности правильной классификации КА.

Общая схема работы модели при решении задачи оперативной классификации представлена на рисунке 3.

Основой предлагаемой модели является применение двух дифференциальных уравнений (Фоккера-Планка и Фейнмана-Каца) для описания стохастических процессов с последующим использованием аппарата риск-анализа для получения аналитической зависимости вероятность правильной классификации от числа РЛП.

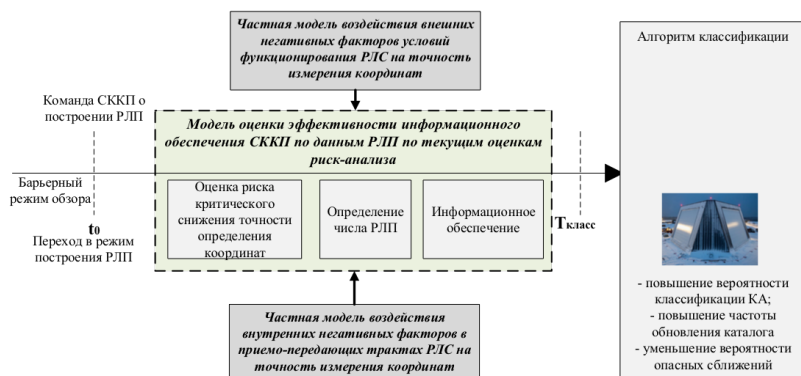


Рис.3. Общая схема работы модели при решении задачи оперативной классификации

3. Математическая модель риск-анализа для оценки числа РЛП для эффективной классификации. Риск-анализ представляет собой систематический процесс использования информации для идентификации опасностей, оценки потенциального вреда и разработки мер по управлению [37]. Согласно концепции Ю.И. Шокина [38] риск является не статической, а динамической величиной, которая существенно зависит от объема и качества доступных знаний I . В указанных работах обоснована необходимость рассмотрения риска как функции $R=\{A, C, Q; I\}$, где A – сценарии, C – последствия, Q – мера неопределенности, а I – совокупность информации.

Любая задача оптимизации, связанная с оценкой потерь при вычислении точности в зависимости от принятого решения, должна учитывать не только ожидаемые потери, но и риски, обусловленные самим решением [39, 40]. При решении задачи оперативной классификации КА под риском будем понимать число,

характеризующее уровень воздействия деструктивных факторов на аппаратуру РЛС.

Исследования показали [40, 41], что риск-анализ позволяет решать задачи оценивания потенциальных изменений точностных характеристик РЛС. Поэтому исходя из теории риск-анализа [39], процесс построения РЛП может быть представлен как риск критического снижения точностных характеристик, который определяется, как функция изменения точности измерения координат $\Delta(r, \theta, \phi)$ и плотности вероятности изменения w для быстрой и медленной составляющей воздействий:

$$R_{\Delta(r, \theta, \phi)} = \sum \Delta_i(r, \theta, \phi) \prod_{f,s} w_j, \quad (3)$$

где Δ_i – изменения точностных характеристик по координатам.

Риск в данном случае является не вероятностной характеристикой, а его размерность определяется той характеристикой, изменение которой надо найти. В данной работе будем использовать подход, в котором размерный риск является функцией потерь, среднее значение которой определяется для оценки воздействия деструктивных факторов.

Детализируя вектор функциональных и технических характеристик на примере крупноапертурной РЛС L-диапазона, состоящий из разрешающей способности по угловым координатам и отношения сигнал/шум (по мощности или по амплитуде), а также внутренних и внешних факторов, процесс классификации КА по данным РЛП может быть также представлен следующим образом:

$$P_{\text{класс}} = \operatorname{argmin}_\tau (N_{\text{РЛП}}(R_{\Delta(r, \theta, \phi)})), \quad (4)$$

$$R_{\Delta(r, \theta, \phi)} = R_{\Delta(r, \theta, \phi)}(\delta r, \delta \theta, \delta \phi), \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \delta r &= \delta r(B(K(\partial H))); \delta \theta = \delta \theta(I_{\text{АФАР}}, H_{\text{тракта}}); \\ \delta \phi &= \delta \phi(I_{\text{АФАР}}, H_{\text{тракта}}), \end{aligned} \quad (6)$$

где $P_{\text{класс}}$ – вероятность правильной классификации КА, $N_{\text{РЛП}}$ – число РЛП КА необходимых для точной классификации; τ – время классификации КА; δ_r – разрешающая способность по дальности; B – ширина спектра сигнала; ∂H – неравномерность АЧХ приемопередающего тракта; δ_θ , δ_ϕ – разрешающая способность

по азимуту и углу места; $I_{\text{АФАР}}$ – изменения амплитудно-фазового распределения на полотне АФАР; $H_{\text{тракта}}$ – искаженное АЧХ тракта.

Функция аргумента минимизации в данном случае выбрана по причине необходимости минимизации времени классификации при сопровождении КА в зоне обзора РЛС. Время классификации зависит от числа портретов неинвариантно, поскольку каждый портрет имеет разное качество, а значит при наличии серьезных искажений необходимо провести дополнительный цикл зондирования и выбора оптимальных сигналов РЛС. Подобная оптимизация может быть достигнута на основе градиентного спуска.

Для учета влияния негативных факторов на процесс классификации КА введем обобщенный функционал риска:

$$R_{\text{общ}} = \alpha R_{\text{внут}} + \beta R_{\text{внеш}} + \gamma R_{\text{взаим}}, \quad (7)$$

где α , β , γ – весовые коэффициенты, учитывающие значимость факторов, определяемые эмпирически и изменяющиеся от 0 до 1 с условием $\alpha + \beta + \gamma = 1$. Данное представление дает основу для представления всех факторов в иерархию, где коэффициенты определяют уровень значимости.

Представленный процесс определения необходимого числа РЛП космических аппаратов обуславливает необходимость описания стохастических факторов различной природы для применения метода риск-анализа с целью оценки изменения ошибок измерения координат.

4. Иерархический процесс свертки параметров модели классификации КА. Описание процесса классификации необходимо провести с учетом временных ограничений на проводку КА и юстировку, то есть разделить их на внутренние и внешние, а также по скорости взаимодействия.

В соответствии с анализом влияния деструктивных факторов на аппаратуру РЛС процесс информационного обеспечения представим как многоуровневый (Рис. 4).

В рамках предложенного представления построена структурированная система оценки, в которой риск агрегируется по принципу «снизу-вверх»: от оценок частных рисков на уровне отдельных факторов (на основе решений базовых уравнений) к комплексному интегральному риску через линейную комбинацию:

$$R_{\text{интегр}} = \sum_i w_i R_i, \quad (8)$$

где w_i – коэффициенты, аналогичные α , β , γ ; R_i – риск изменения точностных характеристик на каждом уровне.

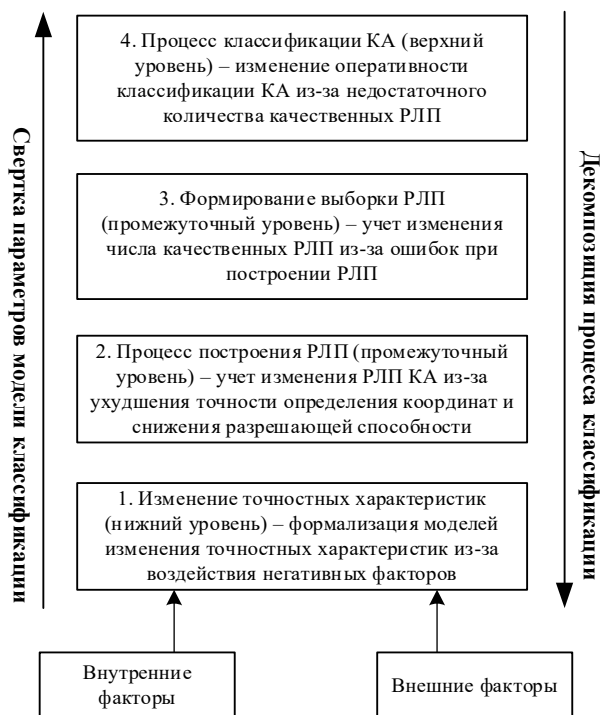


Рис. 4. Многоуровневая модель классификации КА с учетом негативных факторов, влияющих на качество РЛП

Оценка определения необходимого для правильной классификации КА числа портретов является итеративной процедурой с оценкой риска неполучения РЛП на каждой итерации:

$$N_{РЛП} \rightarrow N_{РЛП} + 1: \frac{R\delta r}{\Delta r_i} + \frac{R\delta \theta}{\Delta \theta_i} + \frac{R\delta \phi}{\Delta \phi_i} > 3, \quad (9)$$

где Δr_i , $\Delta \theta_i$, $\Delta \phi_i$ – разница между блестящими точками. Такое представление справедливо из-за того, что в случае повышения риска увеличения разрешающей способности возможно размытие блестящих точек, что приведет к неверной классификации. При этом вероятна такая ситуация, при которой по одной из координат возможно

значительное превышение, что также приводит к необходимости коррекции. Значение критерия, при котором сумма трех составляющих в общем больше 3 выбрана из-за того, что по каждой из координат строится РЛП с последующей классификацией, поэтому даже при наличии одного портрета с размытием вклад в вероятность классификации все равно будет положителен. Если же по каждой координате риск изменения будет больше разрешающей способности, то блестящие точки будут сливаться на каждом портрете, поэтому данный критерий достаточен для увеличения числа РЛП.

Разработанная иерархическая структура модели обеспечивает декомпозицию сложной задачи классификации КА по данным РЛП на частные модели негативных факторов, позволяя последовательно анализировать влияние стохастических воздействий различной природы (от аппаратных нестабильностей до ионосферных возмущений) на итоговое качество распознавания.

При этом в разработке модели необходимо учесть временную динамику негативных факторов на качество построения РЛП при работе с широкополосными сигналами в сложных условиях функционирования (например, длительное отсутствие юстировочного аппарата в зоне обзора РЛС, а также при возмущении ионосферы).

С целью описания процесса построения РЛП во времени декомпозируем ошибку формирования РЛП на медленную (S) и быструю (F) составляющие. При работе РЛС в режиме РЛП негативные факторы можно охарактеризовать как быстрые процессы, соответствующие внешним факторам, а также медленные процессы, которые соответствуют внутренним факторам, влияющим на точность измерения координат. Данное представление основано на оценке скорости процессов при зондировании КА, что характеризуется изменениями ракурса цели за 1 цикл излучения и приема пачки широкополосных сигналов. Быстрая составляющая $F(r,t)$ описывает оперативные ошибки измерения координат, меняющиеся в течение одного цикла зондирования КА: пассивные помехи в области возмущения ионосферы, ошибки в измерениях координат из-за отсутствия юстировочных КА.

Медленные процессы соответствуют изменениям при работе РЛС с широкополосными сигналами за несколько циклов зондирования и характеризуется незначительными изменениями характеристик за цикл зондирования. При этом медленные процессы имеют свойства накопления. Медленная составляющая $S(r,t)$ описывает инерционные изменения в аппаратуре РЛС: изменение амплитудно-фазового

распределения (АФР) в АФАР из-за температурных изменений, а также изменения характеристик приемо-передающих модулей (ППМ).

Такое представление модели классификации с учетом ошибок на одной временной оси с декомпозицией по скорости изменения позволяет применить метод риск-анализа, доказавший свою эффективность при описании функционирования сложных информационных систем [34] в качестве показателя для оценки влияния внешних и внутренних негативных факторов на качество классификации по данным РЛП.

5. Частная модель оценки воздействия медленных составляющих деструктивных факторов внутренней природы на основе уравнений Фоккера-Планка. В рамках задачи оперативной классификации КА по данным РЛП, формируемых крупноапертурными РЛС L-диапазона, воздействие внутренних негативных факторов (таких как тепловые процессы в каналах усиления, старение компонентов, неидентичность характеристик приемо-передающих модулей – ППМ) носит активный, негативный и диффузионный характер. Эти процессы, в отличие от быстрых внешних возмущений, обладают значительной временной постоянной (от нескольких минут до часов и суток) и накапливаются в течение многих циклов зондирования, систематически искажая амплитудно-фазовое распределение (АФР) и амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) трактов.

Для формализации подобных стохастических, но инерционных воздействий возможным математическим аппаратом является уравнение Фоккера-Планка. Его фундаментальное преимущество в данном контексте заключается в способности описывать эволюцию во времени плотности вероятности $w_S(\vec{x}, t)$ ключевых параметров состояния системы $\vec{x} = \{x_1, \dots, x_N\}$, где под x понимается многомерный вектор, включающий:

- фазовые сдвиги в каналах АФАР, вызванные градиентами температуры;
- коэффициенты усиления ППМ;
- параметры нелинейности и неравномерности АЧХ;
- уровни собственных шумов аппаратуры.

Уравнение Фоккера-Планка является кинетическим уравнением для марковских диффузионных процессов, что соответствует физике медленных деградационных изменений в РЛС: будущее состояние системы зависит только от текущего, а ее эволюция складывается из детерминированного тренда («сноса») и случайных блужданий («диффузии») [41 – 43]. Марковскими процессами в аппаратуре РЛС

являются процессы восстановления, старения и каскадных повреждений от единичного деструктивного воздействия. Их использование позволяет перейти от качественного описания к количественному прогнозированию надежности и готовности сложнейших радиолокационных комплексов. Марковское свойство предполагается выполненным в силу того, что временные константы рассматриваемых процессов значительно превышают характерные времена корреляции внешних возмущений.

Формализуем влияние медленных составляющих на точностные характеристики на основе уравнения Фоккера-Планка, поскольку для нашего случая уравнение описывает изменения во времени плотности вероятности характеристик для таких диффузионных процессов, как изменение точности измерения координат, влияющее на число РЛП для правильной классификации КА.

Под коэффициентом сноса в статье понимаются значения смещения вероятности отказа аппаратуры из-за неидентичностей характеристик в приеме-передающих трактах, а коэффициент диффузии показывает, как деструктивные факторы распространяются по выделенному объему аппаратуры. Коэффициенты сноса и диффузии могут быть оценены на основе экспериментальных данных с использованием методов статистического анализа временных рядов, например, метода максимального правдоподобия для стохастических дифференциальных уравнений.

Применение уравнения Фоккера-Планка позволит анализировать и прогнозировать, как будет изменяться распределение ключевых параметров системы (температуры, коэффициентов усиления, фазовых сдвигов) в течение многих циклов зондирования. Данная формула применима, поскольку в РЛС МКП имеется множество однотипных блоков, то есть имеется возможность описать ансамбль объектов.

Эти процессы по своей природе являются марковскими диффузионными, где состояние системы (например, параметры ППМ) плавно изменяется во времени под влиянием детерминированного тренда (например, нагрева) и стохастических флуктуаций (например, шумов). Уравнение Фоккера-Планка для описания внутренних факторов представим в следующем виде [42 – 44]:

$$\frac{\partial w_S}{\partial t} = - \sum_{i=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_i w_S) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (D_{i,j} w_S), \quad (10)$$

где σ – коэффициент сноса, который характеризует изменение среднего значения плотности вероятности воздействия деструктивных факторов; D_{ij} – коэффициент диффузии, который характеризует изменение плотности вероятности воздействия деструктивных факторов в пространстве аппаратуры РЛС. Усовершенствование уравнений Фоккера-Планка состоит в учете импульсного режима работы РЛС, характеризуемого сменой режима работы с учетом планировщика тактового расписания. С точки зрения уравнений Фоккера-Планка смену режима работы можно описать как переход из состояния x' в x . Если имеется определенная периодичность смены режимов, то можно построить интенсивность перехода λ . Тогда:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_S}{\partial t} = & - \sum_{i=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_i w_S) + \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (D_{i,j} w_S) + \\ & + \int \left[(\lambda(x', t) w_S(x', t)) - (\lambda(x, t) w_S(x, t)) \right] dx' \end{aligned} \quad (11)$$

Будучи фундаментальным уравнением необратимой термодинамики, уравнение Фоккера-Планка подходит для моделирования температурных дрейфов в каналах усиления РЛС. Динамику температуры приемо-передающих модулей (ППМ) можно описать как:

$$\frac{\partial P(T, t)}{\partial t} = \frac{-\partial}{\partial T} \left[\frac{\kappa(T_{env} - T) P \omega}{W_{пол}} \right] + \frac{\partial^2}{\partial T^2} [D_T P], \quad (12)$$

где κ – коэффициент теплопередачи ППМ, T_{env} – температура окружающей среды, D_T (10^{-3} - 10^{-2} K²/с) – коэффициент тепловой диффузии, $W_{пол}$ – полная мощность излучения, ω – круговая частота. Физически это соответствует закону Фурье с учётом стохастических флуктуаций, что точно отражает реальный тепловой режим аппаратуры.

Процессы деградации компонентов РЛС, такие как старение транзисторов или деградация амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), обладают марковским свойством. Уравнение Фоккера-Планка для плотности вероятности $w(x, t)$ формализует это:

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{-\partial(Aw)}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2(Bw)}{\partial x^2}, \quad (13)$$

где A – вектор сноса, описывающий систематическую деградацию, а B – тензор диффузии, характеризующий случайные изменения. Деградация активных фазированных антенных решеток (АФАР)

следует такому марковскому процессу с коэффициентом сноса порядка 0.001-0.01 дБ/час.

Для моделирования сложных систем, таких как крупноапертурные активные фазированные антенные решетки (АФАР), уравнение обобщается с учётом пространственных координат:

$$\frac{\partial w(\phi, r, t)}{\partial t} = \frac{-\partial}{\partial \phi} (v_{\phi} w) - \frac{\partial}{\partial r} (v_r w) + D_{\phi} \frac{\partial^2 w}{\partial \phi^2} + D_r \frac{\partial^2 w}{\partial r^2}, \quad (14)$$

где ϕ – фазовый сдвиг, а r – амплитуда в точке решетки. Это позволяет учесть пространственную корреляцию между элементами.

В стационарном режиме ($\partial w / \partial t = 0$) для линейных задач уравнение часто допускает аналитическое решение. Например, для системы с линейным дрейфом стационарное распределение является гауссовским:

$$w_{st}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (15)$$

где параметры μ и σ^2 определяются коэффициентами уравнения. Это подтверждается практикой: распределение температуры ППМ в установившемся режиме близко к гауссовскому со стандартным отклонением $\sigma = 2-5$ К.

Таким образом, уравнение Фоккера-Планка предоставляет универсальный, физически обоснованный и математически строгий инструмент для комплексного моделирования, прогнозирования и оптимизации работы радиолокационных систем на всех этапах их жизненного цикла.

6. Частная параболическая модель быстрых составляющих деструктивных факторов. С целью формализации быстрых составляющих деструктивных факторов запишем выражение для изменения зондирующего сигнала:

$$\delta I = \operatorname{argmin}(u), u \rightarrow \text{const}, \quad (16)$$

где δI – изменение интенсивности сигнала, u – плотность вероятности изменения ионосферы и реального космического фона.

Допустим, в зоне обзора РЛС имеется ионосферная помеха, являющаяся неоднородностью в пространстве. В момент времени t_0 вся плотность вероятности сосредоточена в области помехи, тогда $w = F(r, t)$, где r объединяет значения x, y, z . Изменение коэффициента

преломления волн соответствует эффективному потенциалу для ионосферных неоднородностей, что позволяет в дальнейших уравнениях включить произведение V^*w . При критических значениях потенциала V происходит фазовый переход, соответствующий образованию каналов распространения в ионосфере. Данные о распространении КВ радиоволн подтверждают существование критических условий для образования ионосферных каналов. Со временем ионосферные помехи изменяются с помощью диффузионного течения, поскольку корреляционная длина ионосферных неоднородностей составляет 10-100 км, тогда введя коэффициенты сноса и диффузии, отвечающие за скорость распространения, финальное уравнение определяется выражением:

$$\begin{aligned} \frac{\partial w_F}{\partial t} + \sum_{i=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_i} (\sigma_i w_F) + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} (D_{i,j} w_F) - \\ - V(x_1 \dots x_n, t) w_F + F(x_1 \dots x_n, t) = 0 \end{aligned} \quad (17)$$

Полученное уравнение является адаптацией уравнения Фейнмана-Каца, которое отражает связь между дифференциальными уравнениями в частных производных и случайными процессами. Усовершенствование уравнений Фейнмана-Каца состоит в оценке диффузионных течений на основе оценки корреляционной длины ионосферных неоднородностей, при этом учитывая средний размер неоднородностей [44]. В части адекватности модели примем гипотезу, что значения потенциала V не достигают больших значений.

Уравнение Фейнмана-Каца устанавливает связь между стохастическими дифференциальными уравнениями (описывающими динамику состояния, например, динамику реального космического фона) и детерминированными уравнениями в частных производных параболического типа. Достоинством уравнения Фейнмана-Каца является то, что оно позволяет вычислять математические ожидания ключевых функционалов от траектории системы (например, средний квадрат ошибки положения КА) как решения соответствующего дифференциального уравнения. Данное уравнение позволяет проводить оценки мгновенного и краткосрочного вероятностного воздействия быстрых помех, создаваемых реальным космическим фоном, на точность измерений РЛС в реальном времени.

Сочетание усовершенствованных уравнений Фоккера-Планка для описания внутренних факторов в приемо-передающих трактах РЛС и модифицированного уравнения Фейнмана-Каца для описания внешних факторов реального-космического фона в рамках

предложенного иерархического описания процесса классификации с использованием метода риск-анализа позволит создать эффективную систему компенсации стохастического влияния негативных факторов на качество РЛП.

В соответствии с предложенным описанием выше, необходимо оценить эффективность представленной модели классификации на демонстрационном примере.

7. Демонстрационный эксперимент по построению дальностных портретов типовых объектов наблюдения. С целью подтверждения эффективности предложенной модели классификации использовался следующий сценарий моделирования для построения РЛП заданного объекта наблюдения: в зоне обзора РЛС находится аппарат Starlink размером 4 метра (по продольной дальности). В момент начала построения РЛП на аппаратуру РЛС МКП воздействуют деструктивные факторы и изменился реальный космический фон, которые изменяют точностные характеристики РЛС.

Решение уравнений (5) и (6) позволяет определить распределение плотности вероятности воздействия w_F , w_S в пространстве и времени. После перемножения плотности распределения на изменение разрешающей способности по дальности рассчитывается риск снижения точности определения координат:

$$\Delta(\delta r) = (\delta r_1 + \delta r_2)w_F w_S, \quad (18)$$

где $\delta r_1, \delta r_2$ – разрешающая способность по дальности для быстрых и медленных воздействий. При расчетах негативные факторы разделялись на внутренние и внешние, из-за чего $\gamma=0$. В таблице 1 представлены рассчитанные средние значения изменений разрешающей способности по дальности.

Таблица 1. Значение изменений разрешающей способности по дальности

Медленные составляющие, отн.ед	0,85
Быстрые составляющие, отн.ед	0,8
Весовой коэффициент влияния внутренних факторов α , отн.ед	0,51
Весовой коэффициент влияния внешних факторов β , отн.ед	0,49
Значение риска изменения разрешающей способности по дальности, м	0,75
Изменение разрешающей способности по дальности, м	до 1.5

Полученные значения применяются для расчета РЛП, где шаг расчета по дальности будет изменяться в зависимости от риск-анализа. Полученный идеальный РЛП моделируемого КА в момент отсутствия воздействия внутренних и внешних негативных факторов представлен на рисунке 5.

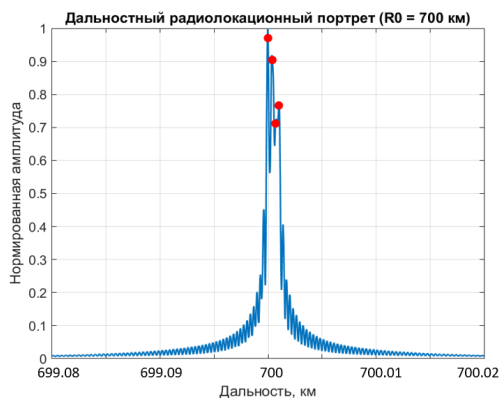


Рис. 5. Идеальный дальностный РЛП Starlink при наклонной дальности 700 км

Приведенный дальностный портрет соответствует минимальному уровню влияния внутренних и внешних негативных факторов на качество РЛП.

По этому распределению по формуле (3) по результатам применения метода риск-анализа проводилась оценка изменения точностных характеристик по дальности для дальнейшего построения РЛП с учетом воздействия негативных факторов, представленная на рисунке 6.

Изменение точности классификации на основе корреляционного анализа, представлено на рисунке 7. Точность классификации оценивалась через оценку коэффициента корреляции между полученным РЛП и эталонным.

Как видно из рисунка, точность классификации представляет собой стохастическое изменение коэффициента корреляции между искаженным и идеальным РЛП, что является следствием воздействия деструктивных факторов. Полученная зависимость характеризует временные интервалы, при которых значения коэффициента корреляции ниже 0,7, что требует ввода корректирующих поправок к аппаратуре или зондирующим сигналам. Классификация при этом происходит в непрерывном режиме с дискретом формирования РЛП.

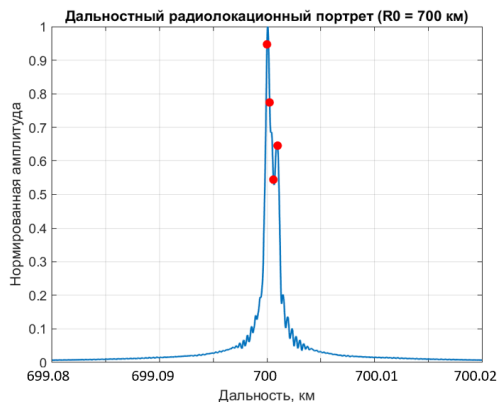


Рис. 6. Дальностный РЛП с искажениями



Рисунок 7. Изменение точности классификации

Ожидается, что для низкоорбитальных КА подобной формы результаты классификации будут иметь сходимость, поскольку РЛС L-диапазона частот позволяет провести косвенную оценку типа цели по дополнительным сигнальным признакам (дальностный портрет) путем оценки расстояний между блестящими точками после сжатия ЛЧМ-сигнала, отраженного от цели.

Проведем сравнение с известной моделью классификации, основанной на корреляционном анализе без учета деструктивных факторов. Сравнительный анализ представлен на рисунке 8.

Представленная модель позволяет повысить оперативность и точность классификации в диапазоне до 40% при построении дальностных портретов за счет учета влияния негативных факторов. Представленные результаты показывают важность учета деструктивных факторов, влияющих на РЛС МКП при построении РЛП.

Усовершенствованное описание уравнений Фоккера-Планка в сочетании с модифицированным уравнением Фейнмана-Каца для описания негативных факторов различной природы позволяет адаптировать параметры РЛС к различным стохастическим воздействиям на точностные характеристики при построении РЛП.

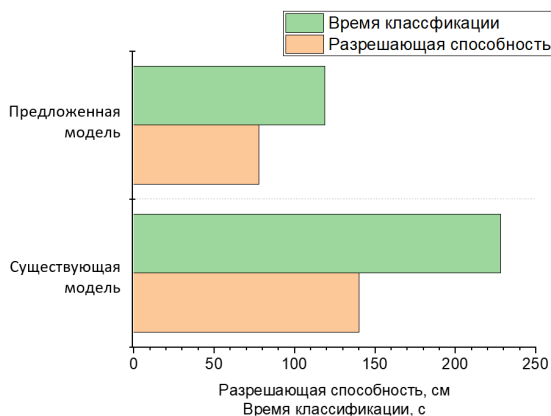


Рис. 8. Сравнительный анализ результатов учета воздействия деструктивных факторов

Связь между подходами выстроена иерархически, на уровне общей структуры. Например, диффузионные процессы хорошо отражают медленные, низкочастотные дрейфы характеристик аппаратуры. Уравнения с потенциалом, наоборот, подходят для моделирования быстрых, высокочастотных помех извне. Риск-анализ интегрирует их влияние в единую количественную меру, определяющую конечное требование к объему данных (числу РЛП).

8. Выводы. Предложенное в статье описание процесса классификации КА по результатам построения РЛП отражает наиболее существенные особенности функционирования крупноапертурных РЛС, а соответствующее математическое описание внешних и внутренних негативных факторов характеризуется стохастическими дифференциальными уравнениями с учетом скорости воздействия факторов на точностные характеристики.

Разработана и экспериментально проверена модель классификации подвижных объектов по данным радиолокационных портретов крупноапертурных РЛС L-диапазона, показывающая возможность повышения оперативности и точности классификации

в диапазоне до 40% по сравнению с моделью классификации без учета деструктивных факторов.

Разработанная модель позволяет определить достаточное число РЛП при классификации подвижных объектов с использованием разнородных математических аппаратов: стохастического дифференциального исчисления (через уравнение Фоккера-Планка), методов математической физики (через уравнение Фейнмана-Каца) и теории принятия решений в условиях неопределенности (через риск-анализ).

Приведена оригинальная формализация процесса информационного обеспечения классификации космических аппаратов по радиолокационным портретам РЛС L-диапазона с использованием двумерного неоднородного дифференциального уравнения для оценки функции плотности вероятности воздействия негативных факторов различной природы на точностные характеристики РЛС.

Формализована модель классификации космических аппаратов с учетом стохастических негативных факторов различной природы на основе уравнений Фоккера-Планка и Фейнмана-Каца, отличающаяся от известных тем, что с целью оценки влияния деструктивных факторов приведено разделение их по типам воздействия (быстрые и медленные) с дальнейшим описанием уравнений оценки. Полученные распределения являются основой для расчета риска обработки дополнительного РЛП, который потом пересчитывается в число необходимых РЛП и времени классификации.

Проведенные исследования по разработке стохастической модели влияния негативных факторов на эффективность классификации КА создают основы для совершенствования метода риск-анализа научной школы Ю.И. Шокина для решения задачи оптимизации процесса классификации подвижных объектов по РЛП в условиях неопределённости деструктивных воздействий.

Дальнейшие исследования связаны с численным решением предложенной модели для оценки вычислительной сложности предложенных уравнений при временных ограничениях на сопровождении КА.

Литература

1. Порсев В.И., Гелесев А.И., Красько А.Г. Угловое сверхразрешение сигналов с использованием «виртуальных» антенных решеток // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2019. №4(31). С. 24–34. DOI: 10.38013/2542-0542-2019-4-24-34.
2. Власов С.А., Кочиев С.Г. Расчет орбитальной структуры систем космических аппаратов периодического обзора поверхности Земли в разных постановках // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2025. №697. С. 227–242.

3. Смотохин А.С., Хуторовский З.Н. Определение прогнозного положения ИСЗ при ограниченных ошибках измерений // Космические исследования. 2011. Т. 49. №6. С. 526–537.
4. Перлов А.Ю., Захаров А.С., Тимошенко А.В., Булатов М.Ф. Модель тепловых искажений амплитудно-частотной характеристики приемной системы радиолокационной станции в режиме сверхразрешения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2024. Т. 16. №5. С. 26–34. DOI: 10.36724/2409-5419-2024-16-5-26-34.
5. Потапов А.А., Кузнецов В.А., Гончаров С.А. Имитационная модель формирования портретов сложных радиолокационных объектов со сниженной радиолокационной заметностью // Радиотехника и электроника. 2025. Т. 70. №6. С. 564–582. DOI: 10.7868/s3034590125060047.
6. Потапов А.А. Зарождение и становление фрактальной радиофизики и фрактальной радиоэлектроники в ИРЭ РАН // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2025. Т. 33. №5. С. 748–776. DOI: 10.18500/0869-6632-003183.
7. Григорян Д.С. Определение области сверхразрешения источников излучения по пространству при собственных шумах и неидентичностях приемных трактов // Радиотехника. 2007. №8. С. 43–48.
8. Филонович А.В., Ворначева И.В., Степанова В.В., Войнаш С.А., Соколова В.А., Загидуллин Р.Р., Сабитов Л.С. Методы получения двумерных и трехмерных радиолокационных портретов объектов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №4. С. 228–233. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-228-234.
9. Sharma A.K., Suraj N., Rokade M.V., et al. Study of variations in the absorption of cosmic radio noise using Riometer at Casey station // Library & Information Science Research. 2012. vol. 3. no. 2. pp. 149–155.
10. Загуменов А.В., Кузьмин В.А. Оценка ошибок определения ракурса подвижных протяженных надводных объектов на основе цифровой обработки радиолокационного дальностно-азимутального портрета // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. 2023. №6. С. 139.
11. Захарченко В.Д., Коваленко И.Г., Акимов П.А., Денисов З.А. О возможности оценки геометрических характеристик астероида по радиолокационному портрету // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2023. Т. 26. №4. С. 69–82. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2023.4.6.
12. Дурнаков А.А., Боков А.С., Кутькин А.Е. Оценка требований к разрядности преобразователей сигналов в задаче имитации радиолокационных портретов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2024. №6. С. 230–231.
13. Манукян А.А. Построение двумерных радиоизображений объектов по неэквидистантным кодированным частотно-временным последовательностям импульсов // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. №3. С. 282. DOI: 10.7868/S0033849414120134.
14. Филонович А.В., Ворначева И.В., Степанова В.В., Артюхова В.И. К вопросу о получении двумерных портретов целей в многопозиционных радиолокационных системах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. №7. С. 553–558. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-533-534.
15. Пафиков Е.А., Тимошенко А.В., Тычков А.Ю., Савчук А.М., Захаров А.С. Пространственно-временные характеристики сигналов радиолокационных станций с синтезированной апертурой с учетом отражения от целей и местных предметов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2025. №1. С. 175–184.

16. Alqahtani A.M. Numerical simulation to study the pattern formation of reaction – diffusion Brusselator model arising in triple collision and enzymatic // *Journal of Mathematical Chemistry*. 2018. vol. 56. pp. 1543–1566. DOI: 10.1007/s10910-018-0859-8.
17. Bashkirtseva I., Pavletsov M., Perevalova T., Ryashko L. Analysis of Noise-Induced Transitions in a Thermo-Kinetic Model of the Autocatalytic Trigger // *Mathematics*. 2023. vol. 11. no. 20. 4302 p. DOI: 10.3390/math11204302.
18. Timoshenko A.V., Perlov A.Y., Zakharov A.S., Sazonov V.V. Model for Calculating Changes in the Radiation Pattern and Amplitude-Phase Distribution in the Subarray of a Large-Aperture APPA Based on a Modified Thermal Conductivity Equation // *Proceedings of the Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2024. pp. 1–4. DOI: 10.1109/ieeeeconf60226.2024.10496770.
19. Wang Y., Wang C., Lian P., et al. Effect of Temperature on Electromagnetic Performance of Active Phased Array Antenna // *Electronics*. 2020. no. 9(8). 1211 p. DOI: 10.3390/electronics9081211.
20. Xueming J., Manqing W. Jianmei T. Experimental study on a digital T/R module for phased array radar // *Proceedings of the CIE International Conference on Radar Proceedings*. 2001. pp. 898–902. DOI: 10.1109/ICR.2001.984856.
21. Mou C., Chen J., Peng H. Electromagnetic–Thermal Co-Simulation of Planar Monopole Antenna Based on HIE-FDTD Method // *Electronics*. 2022. no. 11(24). 4167 p. DOI: 10.3390/electronics11244167.
22. Liu H., Wang W., Tang D., et al. Thermal Deformation Modeling for Phased Array Antenna Compensation Control // *Sensors*. 2022. no. 22(6). 2325 p. DOI: 10.3390/s22062325.
23. Bozhko A.N., Livantsov V.E. Optimization of geometric analysis strategy in CAD-systems // *Computer Research and Modeling*. 2024. vol. 16. no. 4. pp. 825–840. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-4-825-840.
24. Kim C., Choi H.-H., Lee K. Interference Coordination for Multi-UAV-Enabled Communications Under Probabilistic LoS Channels // *IEEE Internet of Things Journal*. 2025. vol. 12. no. 19. pp. 40484–40498. DOI: 10.1109/JIOT.2025.3589565.
25. Lee K., Park G., Chae, S.H. Joint Trajectory and Resource Optimization for Interference Management in Space-Air-Ground Integrated Networks Under Probabilistic LoS Channels // *IEEE Transactions on Communications*. 2026. vol. 74. pp. 5504–5518. DOI: 10.1109/TCOMM.2026.3664437.
26. Heo K., Lee W., Lee K. UAV-Assisted Wireless-Powered Secure Communications: Integration of Optimization and Deep Learning // *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2024. vol. 23. no. 9. pp. 10530–10545. DOI: 10.1109/TWC.2024.3372997.
27. Kim C., Choi H.-H., Lee K. Joint Optimization of Trajectory and Resource Allocation for Multi-UAV-Enabled Wireless-Powered Communication Networks // *IEEE Transactions on Communications*. 2024. vol. 72. no. 9. pp. 5752–5764. DOI: 10.1109/TCOMM.2024.3383113.
28. Zhu Q., Bai F., Pang M., et al. Geometry-Based Stochastic Line-of-Sight Probability Model for A2G Channels Under Urban Scenarios // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2022. vol. 70. no. 7. pp. 5784–5794. DOI: 10.1109/TAP.2022.3161277.
29. Pan Y., Da X., Hu H., et al. Joint Optimization of Trajectory and Resource Allocation for Time-Constrained UAV-Enabled Cognitive Radio Networks // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2022. vol. 71. no. 5. pp. 5576–5580. DOI: 10.1109/TVT.2022.3151671.
30. Луковский М.А., Матвеев А.М. Двухэтапный метод калибровки АФАР // *Журнал радиоэлектроники*. 2022. №7. С. 1–23. DOI: 10.30898/1684-1719.2022.7.4
31. Луковский М.А., Матвеев А.М. Сравнительный анализ методов калибровки каналов сигналов антенн моноимпульсной радиолокации. *Журнал радиоэлектроники*. 2022. №6. С. 1–31. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.6.5.

32. Коротин А.А., Кулешов Ю.В., Новиков А.В. Имитационное моделирование прямо-передающего канала коротковолновой радиолокационной станции на основе модели ионосферного канала Уоттерсона // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2025. №697. С. 114–128.
33. Разиньков С.Н., Перлов А.Ю., Захаров А.С., Темник Я.А. Оперативная калибровка активных фазированных антенных решеток наземных радиолокационных станций // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2024. №29. С. 94–102.
34. Timoshenko A.V., Perlov A.Y., Chirov D.S., Zakharov A.S. Algorithm for assessing the readiness of a wideband radar for constructing radar portraits of space objects // T-Comm. 2025. vol. 19. no. 8. pp. 64–71.
35. Babkin Y.V., Zverev G.P., Timoshenko A.V., et al. Management of space surveillance radar temporal resource on fuzzy theory // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2024. vol. 24. no. 3. pp. 513–519. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-513-519.
36. Korpusov M.O., Perlov A.Y., Timoshenko A.V., Shafir R.S. On the Blow-Up of the Solution of a Nonlinear System of Equations of a Thermal-Electrical Model // Mathematical Notes. 2024. vol. 114. pp. 850–861. DOI: 10.1134/S0001434623110202.
37. ГОСТ Р 51901-2002. Менеджмент Риска. Анализ риска технологических систем // М.: Госстандарт России. 2002.
38. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Шокин Ю.И., Юрченко А.В. Концепция риск-анализа технических систем с использованием цифровых двойников // Вычислительные технологии. 2020. Т. 25. №4. С. 99–113. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.4.009.
39. Rockafellar R.T., Uryasev S. Conditional value-at-risk for general loss distributions // Journal of banking & finance. 2002. vol. 26. no. 7. pp. 1443–1471. DOI: 10.1016/S0378-4266(02)00271-6.
40. Иванюк В.А., Андропов К.Н., Егорова Н.Е. Классические и современные подходы к оценке и прогнозированию рисков активов // Фундаментальные исследования. 2016. №3-2. С. 380–384.
41. Курушина С.Е., Федорова Е.А., Гуровская Ю.А. Методика анализа шумоиндуцированных явлений в двухкомпонентных стохастических системах реакционно-диффузионного типа со степенной нелинейностью // Компьютерные исследования и моделирование. 2025. Т. 17. №2. С. 277–291. DOI: 10.20537/2076-7633-2025-17-2-277-291.
42. Орлов Ю.Н., Федоров С.Л. Генерация нестационарных траекторий временного ряда на основе уравнения Фоккера-Планка // Труды Московского физико-технического института. 2016. Т. 8. №2(30). С. 126–133.
43. Орлов Ю.Н., Босов А.Д. Кинетико-гидродинамический подход к прогнозированию нестационарных временных рядов на основе уравнения Фоккера-Планка // Труды Московского физико-технического института. 2012. Т. 4. №4(16). С. 134–140.
44. Захаров С.М., Митрохин М.А., Климов А.Е. Анализ возможности использования методов прогнозирования временных рядов для адаптации решающих правил средств обнаружения систем безопасности объектов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2015. №2(34). С. 36–44.

Боев Сергей Федотович — д-р техн. наук, д-р эконом. наук, профессор, советник председателя, Публичное акционерное общество «Акционерная финансовая корпорация “Система”». Область научных интересов: создание и оценка эффективности сложных технических систем, риск-анализ, радиолокация. Число научных публикаций — 128. ris@tstu.tver.ru; ул. Моховая, 13, 125009, Москва, Россия; р.т.: +7(482)278-5261; факс: +7(482)278-5261.

Захаров Александр Сергеевич — канд. техн. наук, старший преподаватель, кафедра математики и анализа данных; младший научный сотрудник, институт цифровых технологий факультета информационных технологий и анализа больших данных, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» (Финуниверситет). Область научных интересов: математическое моделирование, радиотехника, термодинамика, теория вероятности. Число научных публикаций — 29. zakharov.as17@physics.msu.ru; 4-й Вешняковский проезд, 4, 109456, Москва, Россия; р.т.: +7(910)467-0087.

Перлов Анатолий Юрьевич — канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник, институт цифровых технологий факультета информационных технологий и анализа больших данных, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» (Финуниверситет). Область научных интересов: радиолокация, прогнозирование временных рядов, цифровые двойники, применение методов машинного обучения, имитационное моделирование. Число научных публикаций — 99. laperlov@yandex.ru; ул. 8 марта, 10, 199178, Москва, Россия; р.т.: +7(915)335-1914.

Тимошенко Александр Васильевич — д-р техн. наук, профессор, кафедра информационной безопасности факультета информационных технологий и анализа больших данных, Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение высшего образования «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации» (Финуниверситет). Область научных интересов: онтологическое моделирование, риск-анализ, радиотехника, имитационное моделирование, проектирование крупномасштабных систем. Число научных публикаций — 179. u567ku78@gmail.com; 4-й Вешняковский проезд, 4, 109456, Москва, Россия; р.т.: +7(903)209-7116.

Поддержка исследований. Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных за счет бюджетных средств по государственному заданию Финуниверситета.

S. BOEV, A. ZAKHAROV, A. PERLOV, A. TYMOSHENKO
**A CLASSIFICATION MODEL FOR MOVING OBJECTS BASED
ON RADAR PROFILE DATA FROM LARGE-APERTURE L-BAND
RADARS, ACCOUNTING FOR STOCHASTIC NEGATIVE
FACTORS OF VARIOUS NATURES**

Boev S., Zakharov A., Perlov A., Tymoshenko A. **A Classification Model for Moving Objects Based on Radar Profile Data from Large-Aperture L-Band Radars, Accounting for Stochastic Negative Factors of Various Natures.**

Abstract. The results of research on improving models and methods for rapid classification of spacecraft based on radar cross-section profile reconstruction are presented. A hypothesis is proposed that the minimum number of radar profiles required for correct classification is a functional of the original integral risk indicator, which accounts for the stochastic nature of adverse factors degrading the accuracy characteristics of the radar station. A classification model for moving objects based on radar profile data from large-aperture L-band radars is proposed, taking into account stochastic adverse factors of various natures. An original formalization of the information support process for spacecraft classification using radar profiles is presented, employing a two-dimensional inhomogeneous differential equation to estimate the probability density function of the impact of adverse factors of various natures on radar accuracy characteristics. The novelty of the model lies in the comprehensive consideration of heterogeneous factors affecting the spacecraft classification process, integration with risk analysis, and the hierarchical multi-level structure of the model for rapid classification purposes. It is shown that representing the spacecraft classification model based on refined risk analysis provides an analytical relationship for the number of radar profiles required, accounting for the impact of factors of various natures, which are formalized using refined Fokker–Planck equations (for internal factors) and the Feynman–Kac equation (for external factors, including real-space background dynamics). It is demonstrated that refining the risk analysis theory of the scientific school of Academician Yu.I. Shokin, informed by the solution of the system of equations, can significantly improve the information support for classification tasks. The results of a computational experiment on radar profile processing are presented, demonstrating the potential for enhancing the speed and accuracy of classification.

Keywords: radar station, mobile object, spacecraft, radar portraiture, classification, stochastic factors.

References

1. Porsev V.I., Gelesev A.I., Krasko A.G. [Angular Super-Resolution of Signals using "virtual" Antenna Arrays]. *Vestnik Koncerna VKO «Almaz – Antej» – Bulletin of the Almaz – Antey EKR Concern*. 2019. no. 4(31). pp. 24–34. DOI: 10.38013/2542-0542-2019-4-24-34. (In Russ.).
2. Vlasov S.A., Kochiev S.G. [Calculation of the Orbital Structure of Spacecraft Systems for Periodic Survey of the Earth's Surface in Different Settings]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo – Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*. 2025. no. 697. pp. 227–242. (In Russ.).
3. Samotokhin A.S., Khutorovsky Z.N. [Determination of the Projected Position of the Satellite with Limited Measurement Errors]. *Kosmicheskie issledovaniya – Cosmic Research*. 2011. vol. 49. no. 6. pp. 526–537. (In Russ.).

4. Perlov A.Y., Zakharov A.S., Timoshenko A.V., Bulatov M.F. [A Model of Thermal Distortion of the Amplitude-Frequency Response of the Radar Receiving System in the Super-Resolution Mode]. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskix issledovaniyax Zemli – High Technologies in Earth Space Research*. 2024. vol. 16. no. 5. pp. 26–34. DOI: 10.36724/2409-5419-2024-16-5-26-34. (In Russ.).
5. Potapov A.A., Kuznetsov V.A., Goncharov S.A. [Simulation Model of Forming Portraits of Complex Radar Objects with Reduced Radar Visibility]. *Radiotekhnika I elektronika – Journal of Communications Technology and Electronics*. 2025. vol. 70. no. 6. pp. 564–582. DOI: 10.7868/s3034590125060047. (In Russ.).
6. Potapov A.A. [The Origin and Formation of Fractal Radiophysics and Fractal Radio Electronics at the IRE RAS]. *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Prikladnaya nelinejnaya dinamika – News of Higher Educational Institutions. Applied Nonlinear Dynamics*. 2025. vol. 33. no. 5. pp. 748–776. DOI: 10.18500/0869-6632-003183. (In Russ.).
7. Grigoryan D.S. [Determination of the Area of Super-Resolution of Radiation Sources in Space with Intrinsic Noise and Non-Identity of the Receiving Paths]. *Radiotekhnika – Radio Engineering*. 2007. no. 8. pp. 43–48. (In Russ.).
8. Filonovich A.V., Vornacheva I.V., Stepanova V.V., Voynash S.A., Sokolova V.A., Zagidullin R.R., Sabitov L.S. [Methods for Obtaining Two-Dimensional and Three-Dimensional Radar Portraits of Objects]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2023. no. 4. pp. 228–233. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-4-228-234. (In Russ.).
9. Sharma A.K., Suraj N., Rokade M.V., et al. Study of variations in the absorption of cosmic radio noise using Riometer at Casey station. *Library & Information Science Research*. 2012. vol. 3. no. 2. pp. 149–155.
10. Zagumenov A.V., Kuzmin V.A. [Estimation of Errors in Determining the Angle of Mobile Extended Surface Objects Based on Digital Processing of a Radar Range-Azimuth Portrait]. *Sovremennyye problemy radioelektroniki i telekommunikacij – Modern Problems of Radio Electronics and Telecommunications*. 2023. no. 6. 139 p. (In Russ.).
11. Zakharchenko V.D., Kovalenko I.G., Akimov P.A., Denisov Z.A. [On the Possibility of Estimating the Geometric Characteristics of an Asteroid from a Radar Portrait]. *Matematicheskaya fizika i komp'yuternoe modelirovanie – Mathematical Physics and Computer Simulation*. 2023. vol. 26. no. 4. pp. 69–82. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2023.4.6. (In Russ.).
12. Durnakov A.A., Bokov A.S., Kutkin A.E. [Assessment of the Requirements for the Bit Depth of Signal Converters in the Task of Simulating Radar Portraits]. *SVCh-tehnika i telekommunikacionnyye tekhnologii – Microwave and Telecommunication Technology*. 2024. no. 6. pp. 230–231. (In Russ.).
13. Manukyan A.A. [Construction of Two-Dimensional Radio Images of Objects Based on Nonequidistant Encoded Time-Frequency Pulse Sequences]. *Radiotekhnika I elektronika – Journal of Communications Technology and Electronics*. 2015. vol. 60. no. 3. 282 p. DOI: 10.7868/S0033849414120134. (In Russ.).
14. Filonovich A.V., Vornacheva I.V., Stepanova V.V., Artyukhova V.I. [On the Issue of Obtaining Two-Dimensional Portraits of Targets in Multi-Position Radar Systems]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – Proceedings of Tula State University. Technical sciences*. 2023. no. 7. pp. 553–558. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-533-534. (In Russ.).
15. Papikov E.A., Timoshenko A.V., Tychkov A.Y., Savchuk A.M., Zakharov A.S. [Spatial and Temporal Characteristics of Signals from Synthesized Aperture Radar Stations Taking into Account Reflection from Targets and Local Objects]. *Izvestiya*

- vy'sshix uchebny'x zavedenij. Aviacionnaya texnika – News of Higher Educational Institutions. Aviation Equipment. 2025. no. 1. pp. 175–184. (In Russ.).
16. Alqahtani A.M. Numerical simulation to study the pattern formation of reaction – diffusion Brusselator model arising in triple collision and enzymatic. *Journal of Mathematical Chemistry*. 2018. vol. 56. pp. 1543–1566. DOI: 10.1007/s10910-018-0859-8.
17. Bashkirtseva I., Pavletsov M., Perevalova T., Ryashko L. Analysis of Noise-Induced Transitions in a Thermo-Kinetic Model of the Autocatalytic Trigger. *Mathematics*. 2023. vol. 11. no. 20. 4302 p. DOI: 10.3390/math11204302.
18. Timoshenko A.V., Perlov A.Y., Zakharov A.S., Sazonov V.V. Model for Calculating Changes in the Radiation Pattern and Amplitude-Phase Distribution in the Subarray of a Large-Aperture APPA Based on a Modified Thermal Conductivity Equation. *Proceedings of the Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. 2024. pp. 1–4. DOI: 10.1109/ieeconf60226.2024.10496770.
19. Wang Y., Wang C., Lian P., et al. Effect of Temperature on Electromagnetic Performance of Active Phased Array Antenna. *Electronics*. 2020. no. 9(8). 1211 p. DOI: 10.3390/electronics9081211.
20. Xueming J., Manqing W. Jianmei T. Experimental study on a digital T/R module for phased array radar. *Proceedings of the CIE International Conference on Radar Proceedings*. 2001. pp. 898–902. DOI: 10.1109/ICR.2001.984856.
21. Mou C., Chen J., Peng H. Electromagnetic-Thermal Co-Simulation of Planar Monopole Antenna Based on HIE-FDTD Method. *Electronics*. 2022. no. 11(24). 4167 p. DOI: 10.3390/electronics11244167.
22. Liu H., Wang W., Tang D., et al. Thermal Deformation Modeling for Phased Array Antenna Compensation Control. *Sensors*. 2022. no. 22(6). 2325 p. DOI: 10.3390/s22062325.
23. Bozhko A.N., Livantsov V.E. Optimization of geometric analysis strategy in CAD-systems. *Computer Research and Modeling*. 2024. vol. 16. no. 4. pp. 825–840. DOI: 10.20537/2076-7633-2024-16-4-825-840.
24. Kim C., Choi H.-H., Lee K. Interference Coordination for Multi-UAV-Enabled Communications Under Probabilistic LoS Channels. *IEEE Internet of Things Journal*. 2025. vol. 12. no. 19. pp. 40484–40498. DOI: 10.1109/IJOT.2025.3589565.
25. Lee K., Park G., Chae, S.H. Joint Trajectory and Resource Optimization for Interference Management in Space-Air-Ground Integrated Networks Under Probabilistic LoS Channels. *IEEE Transactions on Communications*. 2026. vol. 74. pp. 5504–5518. DOI: 10.1109/TCOMM.2026.3664437.
26. Heo K., Lee W., Lee K. UAV-Assisted Wireless-Powered Secure Communications: Integration of Optimization and Deep Learning. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2024. vol. 23. no. 9. pp. 10530–10545. DOI: 10.1109/TWC.2024.3372997.
27. Kim C., Choi H.-H., Lee K. Joint Optimization of Trajectory and Resource Allocation for Multi-UAV-Enabled Wireless-Powered Communication Networks. *IEEE Transactions on Communications*. 2024. vol. 72. no. 9. pp. 5752–5764. DOI: 10.1109/TCOMM.2024.3383113.
28. Zhu Q., Bai F., Pang M., et al. Geometry-Based Stochastic Line-of-Sight Probability Model for A2G Channels Under Urban Scenarios. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2022. vol. 70. no. 7. pp. 5784–5794. DOI: 10.1109/TAP.2022.3161277.
29. Pan Y., Da X., Hu H., et al. Joint Optimization of Trajectory and Resource Allocation for Time-Constrained UAV-Enabled Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2022. vol. 71. no. 5. pp. 5576–5580. DOI: 10.1109/TVT.2022.3151671.
30. Lukovsky M.A., Matveev A.M. [Two-Stage AFAR Calibration Method]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*. 2022. no. 7. pp. 1–23. DOI: 10.30898/1684-1719.2022.7.4. (In Russ.).

31. Lukovsky M.A., Matveev A.M. [Comparative Analysis of Methods for Calibrating Signal Channels of Monopulse Radar Antennas]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radio Electronics*. 2022. no. 6. pp. 1–31. DOI: 10.30898/1684-1719.2020.6.5. (In Russ.).
32. Korystin A.A., Kuleshov Y.V., Novikov A.V. [Simulation of the Receiving and Transmitting Channel of a Shortwave Radar Station Based on the Watterson Ionospheric Channel Model]. *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A.F. Mozhajskogo – Proceedings of the Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky*. 2025. no. 697. pp. 114–128. (In Russ.).
33. Razinkov S.N., Perlov A.Y., Zakharov A.S., Temnik Y.A. [Operational Calibration of Active Phased Antenna Arrays of Ground-Based Radar Stations]. *Vozdushno-kosmicheskie sily. Teoriya i praktika – Aerospace Forces. Theory and Practice*. 2024. no. 29. pp. 94–102. (In Russ.).
34. Timoshenko A.V., Perlov A.Y., Chirov D.S., Zakharov A.S. Algorithm for assessing the readiness of a wideband radar for constructing radar portraits of space objects. *T-Comm*. 2025. vol. 19. no. 8. pp. 64–71.
35. Babkin Y.V., Zverev G.P., Timoshenko A.V., et al. Management of space surveillance radar temporal resource on fuzzy theory. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2024. vol. 24. no. 3. pp. 513–519. DOI: 10.17586/2226-1494-2024-24-3-513-519.
36. Korpusov M.O., Perlov A.Y., Timoshenko A.V., Shafir R.S. On the Blow-Up of the Solution of a Nonlinear System of Equations of a Thermal-Electrical Model. *Mathematical Notes*. 2024. vol. 114. pp. 850–861. DOI: 10.1134/S0001434623110202.
37. GOST R 51901-2002. [Risk Management. Risk Analysis of Technological Systems]. M.: Gosstandart Rossii. 2002. (In Russ.).
38. Lepikhin A.M., Makhutov N.A., Shokin Y.I., Yurchenko A.V. [The Concept of Risk Analysis of Technical Systems using Digital Twins]. *Vychislitel'nye tekhnologii – Computational Technologies*. 2020. vol. 25. no. 4. pp. 99–113. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.4.009. (In Russ.).
39. Rockafellar R.T., Uryasev S. Conditional value-at-risk for general loss distributions. *Journal of banking & finance*. 2002. vol. 26. no. 7. pp. 1443–1471. DOI: 10.1016/S0378-4266(02)00271-6.
40. Ivanyuk V.A., Andropov K.N., Egorova N.E. [Classical and Modern Approaches to Asset Risk Assessment and Forecasting]. *Fundamental'ny'e issledovaniya – Fundamental Research*. 2016. no. 3-2. pp. 380–384. (In Russ.).
41. Kurushina S.E., Fedorova E.A., Gurovskaya Y.A. [A Method for Analyzing Noise-Induced Phenomena in Two-Component Stochastic Systems of the Reaction-Diffusion Type with Power-Law Nonlinearity]. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie – Computer Research and Modeling*. 2025. vol. 17. no. 2. pp. 277–291. DOI: 10.20537/2076-7633-2025-17-2-277-291. (In Russ.).
42. Orlov Y.N., Fedorov S.L. [Generation of Non-Stationary Time Series Trajectories Based on the Fokker-Planck Equation]. *Trudy Moskovskogo fiziko-texnicheskogo instituta – Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*. 2016. vol. 8. no. 2(30). pp. 126–133. (In Russ.).
43. Orlov Y.N., Bosov A.D. [Kinetic-Hydrodynamic Approach to Forecasting Nonstationary Time Series Based on the Fokker-Planck Equation]. *Trudy Moskovskogo fiziko-texnicheskogo instituta – Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology*. 2012. vol. 4. no. 4(16). pp. 134–140. (In Russ.).
44. Zakharov S.M., Mitrokhin M.A., Klimov A.E. [Analysis of the Possibility of using Time Series Forecasting Methods to Adapt Crucial Rules for Detecting Facility Security Systems]. *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Texnicheskie nauki – University Proceedings. Volga Region. Technical Sciences*. 2015. no. 2(34). pp. 36–44. (In Russ.).

Boev Sergei — Ph.D., Professor, Advisor to the Chairman, Public Joint Stock Financial Corporation “Sistema“. Research interests: creation and evaluation of the effectiveness of complex technical systems, risk analysis, radar. The number of publications — 128. ris@tsu.tver.ru; 13, Mokhovaya St., 125009, Moscow, Russia; office phone: +7(482)278-5261; fax: +7(482)278-5261.

Zakharov Alexander — Ph.D., Senior Lecturer, Department of Mathematics and Data Analysis; Junior Research Assistant, Institute of Digital Technologies, Faculty of Information Technologies and Big Data Analysis, Federal State Educational Budgetary Institution of Higher Education "Financial University under the Government of the Russian Federation" (Financial University). Research interests: mathematical modeling, radio engineering, thermodynamics, probability theory. The number of publications — 29. zakharov.as17@physics.msu.ru; 4, 4th Veshnyakovsky passage, 109456, Moscow, Russia; office phone: +7(910)467-0087.

Perlov Anatoliy — Ph.D., Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Digital Technologies, Faculty of Information Technologies and Big Data Analysis, Federal State Educational Budgetary Institution of Higher Education "Financial University under the Government of the Russian Federation" (Financial University). Research interests: radar, time series forecasting, digital twins, application of machine learning methods, simulation modeling. The number of publications — 99. laperlov@yandex.ru; 10, 8 Marta st., 199178, Moscow, Russia; office phone: +7(915)335-1914.

Tymoshenko Alexander — Ph.D., Professor, Department of Information Security of the Faculty of Information Technology and Big Data Analysis, Federal State Educational Budgetary Institution of Higher Education "Financial University under the Government of the Russian Federation" (Financial University). Research interests: ontological modeling, risk analysis, radio engineering, simulation modeling, design of large-scale systems. The number of publications — 179. u567ku78@gmail.com; 4, 4th Veshnyakovsky passage, 109456, Moscow, Russia; office phone: +7(903)209-7116.

Acknowledgements. The article was prepared based on the results of research carried out using budgetary funds under the state assignment of the Financial University.