

3. Bagautdinova N.G. Quality management in higher schools // Standarty i kachestvo. 2003 № 1. S. 86-88.
УДК 630*31

Районирование лесных участков на сезонные зоны лесопромышленного производства на основе теории нечетких множеств

А.В. Андрейчук¹

¹Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: andreichik07@mail.ru
Статья поступила 07.02.2012, принята 13.09.2012

Природно-производственные условия отличаются исключительным разнообразием даже в пределах отдельной арендуемой сырьевой базы лесозаготовительного предприятия. Поэтому возникает необходимость классификации всего диапазона природно-производственных условий, как отдельных сырьевых баз, так и обширных лесорастительных районов по общим признакам на группы при условии, что изменчивость данных признаков внутри одного типа местности будет невелика. Такая классификация имеет практическое значение, так как является основой для принятия оптимальных технических и технологических решений на стадии проектирования рациональных сезонных зон лесопромышленного производства. Для решения поставленной задачи предлагается использовать теорию нечетких множеств и алгоритм нечеткого логического вывода. В статье рассмотрен математический аппарат системы нечеткого вывода Мамдани, который считается универсальным аппроксиматором, т. к. не требует поиска линейных зависимостей между входом и выходом, поэтому широко применим в недетерминированных задачах управления. Процесс нечеткого вывода представляет собой последовательность получения нечетких заключений на основе нечетких условий. Разработка и применение систем нечеткого вывода включает в себя ряд этапов, реализация которых выполняется с помощью основных положений нечеткой логики. Предложена реализация нечеткой модели в специализированной компьютерной программе для нечеткого моделирования fuzzyTECH. С построенной математической моделью был проведен ряд компьютерных экспериментов, показавших ее гибкость, универсальность и адекватность. Результаты, полученные в исследовании, могут служить основой для принятия решений инженерами, отвечающими за плановый набор лесосечного фонда в рубку. При этом дорожно-строительная служба может опираться на результаты нечеткого моделирования при долгосрочном планировании лесотранспортной сети.

Ключевые слова: транспортное освоение, сезонное зонирование, лесопользование, теория нечетких множеств, система нечеткого вывода.

Seasonal timber industry zoning of the forest blocks using the fuzzy set theory

A.V. Andreichuk¹

¹St. Petersburg State Forestry Engineering University, Институтский пер. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: andreichik07@mail.ru
The article received 07.02.2012, accepted 13.09.2012

Geographical and technological conditions vary considerably even within the separate area of the raw materials base at the logging camp. Therefore it is necessary to classify all range of geographical and technological conditions, both within the separate raw materials bases and the vast forest areas, provided that the variability of characteristics within each land type is small. Such classification acquires practical importance as far as it is the foundation for making optimal technical and technological decisions at the stage of rational zoning designing. In order to solve this problem it is requested to use the fuzzy set theory and fuzzy inference method. The article deals with Mamdani inference method that is considered to be the multipurpose approximator so far as we do not need to find the linear dependence between the input and output data. Therefore it is commonly used in fuzzy control systems. The fuzzy inference is the succession of fuzzy conclusions on the basis of the fuzzy conditions. Development of the fuzzy inference systems consists of the number of stages that implement using the fuzzy set theory fundamentals. The fuzzy set model has been implemented in the special computer program for the fuzzy modeling – fuzzyTECH. Obtained mathematical model has been used for a number of computer experiments which proved its flexibility, versatility and adequacy. The results of this research can be the basis for the right decision making for engineers who are responsible for the cutting areas assignment. Likewise, road construction divisions can make use of the fuzzy modeling results for the long-term scheduling.

Keywords: transport development, seasonal zoning, forest, fuzzy sets theory, fuzzy inference system.

Лесосечно-транспортные работы осуществляются под открытым небом, при непосредственном влиянии всех климатообразующих факторов. Погодно-климатические условия существенно различаются в течение года. При этом при планировании производства необходимо максимально учитывать и использовать

климатический ресурс региона, позволяющий в более холодное время года обеспечивать доступ к лесосекам с переувлажненными грунтами, и прокладывать зимние дороги на более удаленные расстояния, тем самым значительно экономя средства на дорожном строительстве.

В лесозаготовительном производстве эффективность использования ресурсов во многом определяется влиянием природно-производственных условий лесозаготовок. Особенно велико их влияние на лесосечных работах и на лесотранспорте. Поэтому любая практическая или теоретическая задача в области проектирования лесозаготовок может быть успешно решена только при полном учете этого влияния. К числу таких задач относятся: установление сезона освоения лесосек, выбор схем транспортного освоения, обоснование конструкции усов и трелевочных волоков, определение производительности машин и т. д. [1].

Развитие теории нечетких множеств возникло из необходимости работать с нечеткостью информации и из способности программного обеспечения поддерживать операции с такими данными. Одна из ключевых проблем применения нечетких множеств – определение классов принадлежности к множеству.

Существенный рост эффективности оперирования исходными данными привел к бурному развитию экспертных систем, сравнительных математических методов и распределенных баз данных. В настоящее время все шире используются методы искусственного интеллекта, основанные на нечеткой математике и логике нечетких множеств, позволяющие автоматизировать экспертную обработку информации и разрабатывать новые методы интерпретации геофизических данных [2].

Нечеткое множество (fuzzy set) – совокупность элементов произвольной природы, относительно которых нельзя с полной определенностью утверждать, принадлежит тот или иной элемент данной совокупности или нет.

Нечеткая переменная – это кортеж вида $\langle \alpha, X, A \rangle$, где α – имя нечеткой переменной, X – ее область определения, A – нечеткое множество на универсуме X .

Например, нечеткая переменная «Расстояние вывозки большое», $\{x | 0 \text{ км} < x < 200 \text{ км}\}$, $B = \{x, \mu(x)\}$ характеризует расстояние вывозки древесины от верхнего склада до лесного терминала. Будем считать его большим, если расстояние > 105 км (рис. 1).

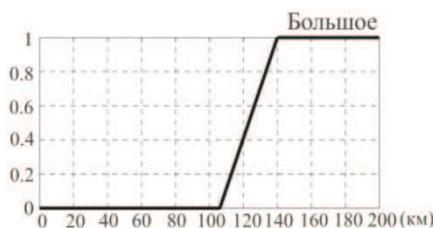


Рис. 1. График функции принадлежности $\mu(x)$ для нечеткого множества B .

Лингвистическая переменная есть кортеж $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$, где β – имя лингвистической переменной, T – множество ее значений (термов), X – универсум нечетких переменных, G – синтаксическая процедура образования новых термов, M – семантическая процедура,

формирующая нечеткие множества для каждого терма данной лингвистической переменной.

Допустим, мы имеем субъективную оценку расстояния вывозки древесины. Она, например, может быть получена от инженеров службы лесообеспечения на лесозаготовительном предприятии (выступающих в роли экспертов), которые непосредственно занимаются вопросами годового распределения лесосечного фонда. Формализовать эту оценку можно с помощью следующей лингвистической переменной $\langle \beta, T, X, G, M \rangle$ (рис. 2), где β – расстояние вывозки, $T = \{\text{«Малое»}, \text{«Среднее»}, \text{«Большое»}\}$, $X = [0; 200]$, G – процедура образования новых термов при помощи логических связей и модификаторов, M – процедура задания на универсуме $X = [0; 200]$ значений лингвистической переменной, т. е. термов из множества T .

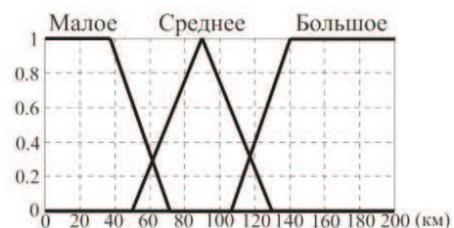


Рис. 2. Графики функций принадлежности значений лингвистической переменной «Расстояние вывозки».

Нечетким высказыванием будем называть высказывание вида « β есть α », где β – лингвистическая переменная, α – один из термов этой переменной.

Например: «Расстояние вывозки есть малое». Здесь «Расстояние вывозки» – это лингвистическая переменная, а «малое» – ее значение.

Упрощенно говоря, правилом нечетких продукций (далее просто правилом) будем называть классическое правило вида «ЕСЛИ... ТО...», где в качестве условий и заключений будут использоваться нечеткие высказывания. Записываются такие правила в следующем виде: ЕСЛИ (β_1 ЕСТЬ α_1) И (β_2 ЕСТЬ α_2), ТОГДА (β_3 ЕСТЬ α_3).

Кроме «И», также используется логическая связка «ИЛИ». Но такую запись обычно стараются избегать, разделяя такие правила на несколько более простых. Также каждое из нечетких высказываний в условии любого правила будем называть подусловием. Аналогично, каждое из высказываний в заключении называется подзаключением.

Следующие примеры помогают зафиксировать определение:

- 1) ЕСЛИ (Расстояние вывозки большое) И (Грунты мокрые), ТО (Сезон зима);
- 2) ЕСЛИ (Расстояние вывозки малое) И (Грунты сухие), ТО (Сезон лето).

При классификации земель лесного фонда на сезонные зоны лесопромышленного производства использован математический аппарат системы нечеткого вывода Мамдани. Алгоритм примечателен тем, что он работает по принципу «черного ящика». На вход поступают количественные значения, на выходе они же. На промежуточных этапах используются аппарат нечеткой логики и теория нечетких множеств. В этом и состоит

эlegantность использования нечетких систем. Можно манипулировать привычными числовыми данными, но при этом использовать гибкие возможности, которые предоставляют системы нечеткого вывода.

Алгоритм Мамдани включает в себя все этапы нечеткого вывода и использует базу правил в качестве входных данных. Также алгоритм предполагает использование «активизированных» нечетких множеств и их объединений. При этом каждый последующий этап получает на вход значения, полученные на предыдущем шаге [3]. Таким образом, основными этапами нечеткого вывода являются:

1. формирование базы правил систем нечеткого вывода;
2. фаззификация входных переменных;
3. агрегирование подусловий;
4. активизация подзаклучений;
5. аккумуляирование заключений;
6. дефаззификация выходных переменных.

Этапы нечеткого вывода выполняются последовательно, и все значения, полученные на предыдущем этапе, могут использоваться на следующем.

1. Формирование базы правил системы нечеткого вывода.

База правил – это множество правил, где каждому подзаклучению сопоставлен определенный весовой коэффициент.

База правил может иметь следующий вид:

- ПРАВИЛО 1: ЕСЛИ «УСЛОВИЕ 1», ТО «ЗАКЛЮЧЕНИЕ 1» (F_1);
- ПРАВИЛО 2: ЕСЛИ «УСЛОВИЕ 1» И «УСЛОВИЕ 2», ТО «ЗАКЛЮЧЕНИЕ 2» (F_2);
- ПРАВИЛО n : ЕСЛИ «УСЛОВИЕ k » И «УСЛОВИЕ ($k+1$)», ТО «ЗАКЛЮЧЕНИЕ q » (F_q),

где F_i – весовые коэффициенты, означающие степень уверенности в истинности получаемого подзаклучения ($i = 1..q$) (лингвистические переменные, присутствующие в условиях, называются входными, а в заключениях – выходными), n – число правил нечетких продукций, m – количество входных переменных, s – количество выходных переменных, k – общее число подусловий в базе правил, q – общее число подзаклучений в базе правил.

2. Фаззификация входных переменных.

Этот этап часто называют приведением к нечеткости. На вход поступают сформированная база правил и массив входных данных $A = \{a_1, \dots, a_m\}$. В этом массиве содержатся значения всех входных переменных. Целью этого этапа является получение значений истинности для всех подусловий из базы правил. Это происходит так: для каждого из подусловий находится значение $b_i = \mu(a_i)$. Таким образом, получается множество значений b_i ($i = 1..k$).

3. Агрегирование подусловий.

Как уже упоминалось выше, условие правила может быть составным, т. е. включать подусловия, связанные между собой при помощи логической операции «И». Целью этого этапа является определение степени истинности условий для каждого правила системы нечет-

кого вывода. Упрощенно говоря, для каждого условия находим минимальное значение истинности всех его подусловий. Формально это выглядит так:

$$c_j = \min\{b_i\}, \quad (2)$$

где $j = 1..n$, i – число из множества номеров подусловий, в которых участвует j -ая входная переменная.

4. Активизация подзаклучений.

На этом этапе происходит переход от условий к подзаклучениям. Для каждого подзаклучения находится степень истинности:

$$d_i = c_i * F_i, \quad (3)$$

где $i = 1..q$.

Затем для каждого i -го подзаклучения сопоставляется множество D_i с новой функцией принадлежности. Ее значение определяется как минимум из d_i и значения функции принадлежности термина из подзаклучения. Этот метод называется *min*-активизацией и формально записывается следующим образом:

$$\mu'_i(x) = \min\{d_i, \mu_i(x)\}, \quad (4)$$

где $\mu'_i(x)$ – «активизированная» функция принадлежности, $\mu_i(x)$ – функция принадлежности термина, d_i – степень истинности i -го подзаклучения.

Цель активизации – получение совокупности «активизированных» нечетких множеств D_i для каждого из подзаклучений в базе правил ($i = 1..q$).

5. Аккумуляция заключений.

Целью этого этапа является получение нечеткого множества (или их объединения) для каждой из выходных переменных. Выполняется он следующим образом: i -ой выходной переменной сопоставляется объединение множеств $E_i = \cup D_j$, где j – номера подзаклучений, в которых участвует i -ая выходная переменная ($i = 1..s$).

Объединением двух нечетких множеств является третье нечеткое множество со следующей функцией принадлежности:

$$\mu'_i(x) = \max\{\mu_1(x), \mu_2(x)\}, \quad (5)$$

где $\mu_1(x)$, $\mu_2(x)$ – функции принадлежности объединяемых множеств.

6. Дефаззификация выходных переменных.

Цель дефаззификации – получить количественное (четкое) значение для каждой из выходных лингвистических переменных. Формально, это происходит следующим образом. Рассматриваются i -ая выходная переменная и относящееся к ней множество E_i ($i = 1..s$). Затем при помощи метода дефаззификации находится итоговое количественное значение выходной переменной. В данной реализации алгоритма используется метод центра тяжести, в котором значение i -ой выходной переменной рассчитывается по формуле:

$$y_i = \frac{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} x \cdot \mu_i(x) dx}{\int_{\text{Min}}^{\text{Max}} \mu_i(x) dx}, \quad (6)$$

где $\mu_i(x)$ – функция принадлежности соответствующего нечеткого множества E_i , Min и Max – границы универсума нечетких переменных, y_i – результат дефаззификации.

Содержательная интерпретация нечеткой модели предполагает выбор и спецификацию входных и выходных переменных соответствующей системы нечеткого вывода [2]. При этом в нечеткой модели сезонного зонирования лесозаготовительного производства предполагаются 6 входных и 1 выходная лингвистическая переменная (индекс сезонности).

В качестве первой входной лингвистической переменной используется состояние грунтов, определяемое по типу леса и типу лесорастительных условий в соответствии со схемой классификации природных условий земель лесного фонда [1]. Несущая способность грунтов относится к характеристике почвенного покрова, влияющей на выполнение всех транспортно-технологических операций на лесозаготовках. Очевидно, что чем выше показатель влажности почв (гидротоп), тем больше вероятность отнесения данного лесного участка к зимним условиям лесозаготовки, и наоборот, чем ниже этот показатель, тем большая вероятность отнесения к летнему сезону и межсезонью.

В качестве второй входной лингвистической переменной используется запас ликвидной древесины на гектаре эксплуатационной площади. Ликвидный запас на гектаре служит синтезированным показателем древостоя, характеризующим его полноту, средний диаметр и высоту насаждения. На основании исследований [4, 5], для достижения ритмичности производства принимаем, что чем меньше ликвидный запас на гектаре, тем выше вероятность отнесения участка к зимнему сезону освоения.

В качестве третьей входной лингвистической переменной используется средний объем хлыста. Данная переменная вносит дополнительный элемент в оценку природно-производственных условий лесозаготовок. Аналогично, с переменной «ликвидный запас на гектаре эксплуатационной площади» принимаем, что чем меньше средний объем хлыста, тем выше вероятность отнесения участка к зимнему сезону освоения.

В качестве четвертой входной лингвистической переменной используется расстояние вывозки от верхнего склада до лесного терминала. Как подтвердили исследования [6], на фазе вывозки леса автомобилями зимний период характеризуется минимальными удельными трудозатратами. В остальные периоды года удельные трудозатраты резко повышаются. Поэтому для достижения сбалансированности и ритмичности производства принимаем, что при увеличении расстояния вывозки увеличивается вероятность отнесения лесного участка к зимнему сезону освоения.

В качестве пятой входной лингвистической переменной используется удаленность лесного участка от существующей транспортной сети. Эта переменная характеризует затраты на дорожное строительство и

так же, как расстояние вывозки, определяет транспортную доступность лесного участка.

В качестве шестой входной лингвистической переменной используется количество жизнеспособного подростка. Если требуется сохранить большое количество подростка и молодняка, то лесосеки лучше осваивать зимой, так как при промерзании земли происходит меньшее повреждение корневой системы молодых деревьев [7]. Поскольку в зимнее время при сплошных рубках сохранность подростка увеличивается, то при увеличении количества жизнеспособного подростка на выделе увеличивается вероятность его отнесения к зимнему сезону освоения.

В качестве выходной лингвистической переменной используется индекс сезонности, представленный в виде числового значения месяца проведения лесозаготовок.

Для анализа состояния лесного фонда и определения индекса сезонности закономерны следующие эвристические правила, легшие в основу нечеткой базы правил разработанной системы нечеткого вывода.

1. ЕСЛИ (грунты сухие) И (запас ликвидной древесины на гектаре высокий) И (объем хлыста большой) И (расстояние вывозки малое) И (удаленность от транспортной сети малая), ТО (сезон весна).

2. ЕСЛИ (грунты сухие) И (запас ликвидной древесины на гектаре средний) И (объем хлыста средний) И (расстояние вывозки среднее) И (удаленность от транспортной сети средняя), ТО (сезон осень).

3. ЕСЛИ (грунты сырые) И (запас ликвидной древесины на гектаре высокий) И (объем хлыста большой) И (расстояние вывозки малое) И (удаленность от транспортной сети малая) И (количество жизнеспособного подростка малое), ТО (сезон лето).

4. ЕСЛИ (грунты сырые) И (запас ликвидной древесины на гектаре средний) И (объем хлыста средний) И (расстояние вывозки среднее) И (удаленность от транспортной сети средняя) И (количество жизнеспособного подростка среднее), ТО (сезон лето).

5. ЕСЛИ (грунты сырые) И (запас ликвидной древесины на гектаре низкий) И (объем хлыста малый) И (расстояние вывозки большое) И (удаленность от транспортной сети большая) И (количество жизнеспособного подростка большое), ТО (сезон зима).

6. ЕСЛИ (грунты мокрые) И (запас ликвидной древесины на гектаре средний) И (объем хлыста средний) И (расстояние вывозки среднее) И (удаленность от транспортной сети средняя) И (количество жизнеспособного подростка среднее), ТО (сезон зима).

7. ЕСЛИ (грунты мокрые) И (запас ликвидной древесины на гектаре низкий) И (объем хлыста малый) И (расстояние вывозки большое) И (удаленность от транспортной сети большая) И (количество жизнеспособного подростка большое), ТО (сезон зима).

После рассмотрения содержательной постановки задачи можно приступить к построению ее нечеткой модели в форме соответствующей системы нечеткого вывода.

Пример фаззификации входной лингвистической переменной «Расстояние вывозки» представлен на рис. 2. В качестве схемы нечеткого вывода в работе использован метод Мамдани, поэтому применен метод

MIN-активации, который рассчитывается по формуле (4). Поскольку во всех правилах 1 – 7 в качестве логической связки для подусловий применяется только нечеткая конъюнкция (операция И), то в качестве метода агрегирования использован метод min-конъюнкции, рассчитанный по формуле (2). Для аккумуляции заключений правил нечетких продукций применен метод max-дизъюнкции (см. (5)). В качестве метода дефаззификации использован метод центра тяжести (см. (6)).

Выполнение этапов нечеткого вывода сопряжено с некоторыми трудностями и в целом громоздко. Для облегчения разработки системы нечеткого вывода в работе применен пакет инструментов программы fuzzyTECH, являющийся специализированным средст-

вом, позволяющим разрабатывать и исследовать разнообразные нечеткие модели в графическом режиме, а также преобразовывать их в программный код на одном из языков программирования. Программа fuzzyTECH обладает возможностью динамического обмена данными и позволяет совместно использовать разработанные нечеткие модели с другими программными инструментами, такими, как MS Access, MS Excel, MATLAB.

На рис. 3 изображено графическое представление проекта системы нечеткого вывода сезонного зонирования лесозаготовительного производства в программе fuzzyTECH



Рис. 3. Графическое представление проекта системы нечеткого вывода в программе fuzzyTECH

Для общего анализа построенной нечеткой модели можно воспользоваться графическими средствами просмотра трехмерной поверхности нечеткого вывода, представленной на рис. 4.

Данная поверхность нечеткого вывода позволяет установить зависимость значений выходной переменной от значений отдельных входных переменных нечеткой модели. Анализ этих зависимостей может служить основанием для изменения функций принадлежности входных переменных или нечетких правил с целью повышения адекватности системы нечеткого вывода для конкретных условий лесозаготовительного производства.

Анализ построенной нечеткой модели в среде fuzzyTECH показывает ее адекватность, поскольку

графики поверхностей нечеткого вывода соответствующих лингвистических переменных хорошо согласуются между собой. Отсутствие разрывов на поверхности нечеткого вывода свидетельствует об устойчивом характере модели.

Результаты, полученные с помощью системы нечеткого вывода, реализованной в программе fuzzyTECH, использовали для районирования лесных участков на сезонные зоны лесопромышленного производства в Лисинском участковом лесничестве Ленинградской области. Модель показала достаточную адекватность и универсальность, что позволило с успехом решить поставленную задачу.

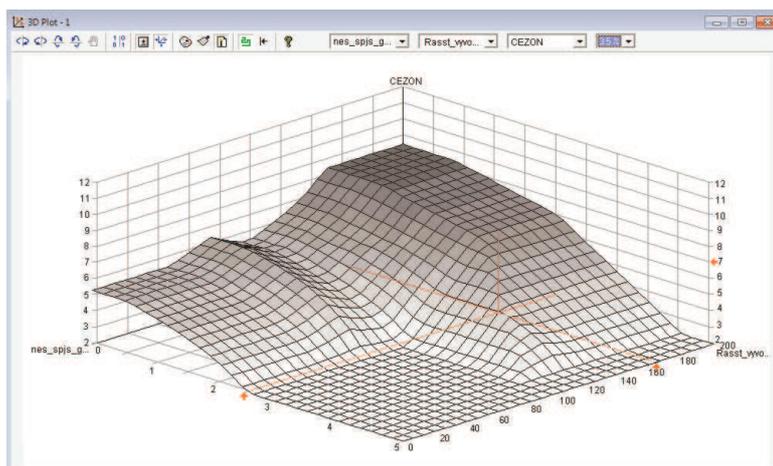


Рис. 4. Графическое окно просмотра трехмерной поверхности нечеткого вывода в программе fuzzyTECH.

Литература

References

1. Гордеев С.М. Классификация и учет влияния почвенно-грунтовых условий при проектировании лесозаготовок // Механизация лесоразработок и транспорт леса: межвуз. сб. научн. тр. Л.: ЛТА, 1987. Вып.12. С.14-17.
2. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 736 с.
3. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком. М., 2007. 288 с.

1. Gordeev S.M. Classification and soil conditions effect feedback while lumbering projection // Mehanizatsiya lesorazrobotok i transport lesa. Mezhevuz. sb. nauchn. tr. L.: LTA, Vyp.12. S.14-17.
2. Leonenkov A. Fuzzy modeling in Matlab and fuzzyTECH environment. SPb.: BHV-Peterburg, 2005. 736 s.
3. Shtovba S.D. Fuzzy systems designing by means of MATLAB. M: Goryachaya liniya – Telekom. M., 2007. 288 s.

УДК 519.8

Численно-аналитический алгоритм моделирования флуктуаций траекторных характеристик информационного сигнала в канале связи

Е.Т. Агеева¹, Н.Т. Афанасьев², А.В. Багинов¹, Д.Б. Ким¹, Н.И. Михайлов¹

¹Братский государственный университет, Макаренко 40, Братск, Россия. E-mail: Sphalerite@yandex.ru

²Иркутский государственный университет, Ленина 3, Иркутск, Россия

Статья поступила 27.04.2012, принята 12.09.2012

Для оценки характеристик информационного сигнала в канале связи с флуктуирующими параметрами предложен оперативный численно-аналитический алгоритм моделирования. Характеристики информационного сигнала описываются в лучевом приближении и рассчитываются как решения стохастической системы обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка. Для решения стохастической системы с краевыми условиями Коши и Дирихле используется метод малого параметра. Получены интегральные выражения для статистических траекторных характеристик информационного сигнала. Показано, что интегральные выражения могут быть преобразованы и вычислены путем решения соответствующей системы дифференциальных уравнений с заданными начальными условиями. Получена полная система дифференциальных уравнений для одновременного расчета средних и флуктуационных характеристик информационного сигнала в канале связи. Полная система уравнений положена в основу разработанного численно-аналитического алгоритма моделирования статистических характеристик информационного сигнала в канале связи.

Ключевые слова: информационный сигнал, канал связи, дисперсия направления распространения, диэлектрическая проницаемость, корреляционная функция, численные алгоритмы.

Numerical and analytical algorithm of modeling the fluctuations trajectory characteristics of information signal in a communication channel