

**ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
КОСМИЧЕСКИМ СРЕДСТВОМ НАБЛЮДЕНИЯ  
ЗА МОРСКОЙ ОБСТАНОВКОЙ НА БАЗЕ НАНОСПУТНИКА**

**AN APPROACH TO THE IMPLEMENTATION OF THE OPERATIONAL  
CONTROL SYSTEM OF A SPACE SURVEILLANCE VEHICLE  
FOR THE MARINE ENVIRONMENT BASED ON A NANOSATELLITE**

*Ф.А. Воронюк, И.В. Коликов, канд. техн. наук В.В. Уткин*

*F.A. Voronyuk, I.V. Kolikov, Ph.D. V.V. Utkin*

*Военный университет радиоэлектроники*

Космические средства наблюдения за морской обстановкой имеют статус глобальных средств мониторинга морской обстановки и идентификации источников радиоизлучений. Существенными недостатками имеющихся космических средств наблюдения за морской обстановкой являются относительно высокие затраты на создание космических аппаратов данного класса и низкая оперативность управления.

Разработан подход к созданию системы управления на базе наноспутника, который позволит в условиях ограниченного времени на принятие решения и неопределенности данных об исходных параметрах обеспечить оперативное управление наноспутниками, в котором основные параметры управления выражены с помощью нечетного логического вывода — метода Мамдани.

По результатам испытания определено, что использование метода Мамдани позволило повысить оперативность управления в 2 раза по сравнению с аналитическими методами, при этом не критически снизив точность результатов измерения.

**Ключевые слова:** наноспутник, наблюдение за морской обстановкой, нечеткая логика, метод Мамдани.

Space-based means of observing the marine situation have the status of global means of monitoring the marine situation and identifying sources of radio emissions. The significant drawbacks of the available space-based means of observing the marine situation are the relatively high costs of creating spacecraft of this class and low operational control.

To develop an approach to the creation of an operational control system for a space surveillance vehicle for the marine situation.

Results. An approach has been developed to create a control system based on a nanosatellite, which will allow, in conditions of limited time for decision-making and uncertainty of data on initial parameters, to provide operational control of nanosatellites, in which the main control parameters are expressed using an odd logical conclusion — the Mamdani method. According to the test results, it was determined that the use of the Mamdani method allowed to increase the efficiency of management by 2 times, compared with analytical methods, while uncritically reducing the accuracy of measurement results.

**Keywords:** nanosatellite, observation of the marine environment, fuzzy logic, Mamdani method.

## Введение

Современная морская обстановка обладает характерными особенностями, которые обуславливают повышение оперативности контроля морской обстановки с целью обеспечения безопасности на море, контроля за функционированием жизненно важных морских коммуникаций, простоты получения необходимой информации о морской обстановке в целом.

К характерным особенностям современной морской обстановки можно отнести:

- насыщенность; в настоящее время в Мировом океане используется более 300 тыс. морских судов различного назначения;
- масштабное освоение ресурсов Мирового океана всеми государствами;
- создание глобальных морских коммуникаций;
- повышение роли морского освоения Северного Ледовитого океана.

Существующие средства космического наблюдения за морской обстановкой имеют статус глобальных средств мониторинга морской обстановки и идентификации источников радиолучений.

Космическое наблюдение за морской обстановкой предназначено для добывания данных о государственной принадлежности, местоположении, режимах работы и параметрах сигналов морских судов в глобальном масштабе. Основными источниками радиолучений являются радиолокационные станции *X*-диапазона, радионавигационные станции, системы радиолокационного опознавания, система автоматической идентификации судов.

Существенными недостатками существующих космических средств наблюдения за морской обстановкой являются относительно высокие затраты на создание космических аппаратов данного класса и низкая оперативность управления. Высокие затраты на создание данных космических средств обуславливаются высокими массогабаритными показателями спутников, громоздкими антенными системами и элементной базой. Одним из перспективных направлений устранения данных недостатков является использование малогабаритных космических аппаратов на базе наноспутников [1, 2].

Наноспутники — это класс малогабаритных космических аппаратов, предназначенных для работы по целевому назначению в составе баллистических связанных групп. Данные спутники обычно выводятся на орбиту в качестве вторичной полезной нагрузки на ракетоноситель и запускаются на низкую околоземную орбиту, на высоту от 300 км до 2000 км [3].

Преимуществами использования наноспутников являются (относительно спутников стандартных размеров):

- мобильность, малые массогабаритные параметры и универсальность;
- значительное снижение стоимости создания (в результате миниатюризации космического аппарата, при сохранении тактико-технических характеристик спутника);
- короткие сроки на разработку, создание группировки данных космических аппаратов и вывод их на орбиту, что делает такие спутники гораздо более экономичными и практичными в использовании;

– преимущество в электромагнитной доступности до источников радиолучений в результате размещения на околоземных орбитах.

Исходя из малых массогабаритных параметров наноспутников, имеющих массу не более 10 килограммов и линейные размеры которых не превышают 100 сантиметров, повышается требование к миниатюризации бортовой аппаратуры спутника данного класса [4]. В результате возникает необходимость создания оперативной системы управления, которая позволит значительно уменьшить бортовую аппаратуру управления спутника. Данная система оперативного управления предполагает использование средств наблюдения за морской обстановкой всеми заинтересованными службами и пользователями напрямую, что позволит эффективно взаимодействовать с космическими средствами данного класса потребителям в Мировом океане, а также оперативно использовать их для оценки обстановки на море. Создание системы управления напрямую зависит от метода управления объектом.

Для технической системы наиболее применимы следующие методы управления:

- классические (аналитические) методы;
- нечеткие логические методы.

Аналитические методы управления требуют, чтобы информация об объекте управления

была практически полностью детерминированной и сложность объекта управления была малой. В противном случае вырастает время, затраченное на вычисления параметров и учет различных факторов, для получения необходимой точности измерений. Из чего можно сделать вывод, что данные методы не подходят для оперативного управления сложными малогабаритными космическими аппаратами, требующему учета множества различных параметров.

Один из путей решения задачи, повышения оперативности управления и миниатюризации бортовой аппаратуры управления, является использование метода нечеткого логического вывода, который используется в условиях неполноты информации о параметрах, выступающих в качестве исходных [5].

Цель работы — разработать подход к созданию оперативной системы управления космическим средством наблюдения за морской обстановкой на базе наноспутника.

#### Метод нечеткого логического вывода

В условиях морской обстановки и ограниченного времени на принятие решения, ввиду малого времени видимости наноспутника (в среднем составляет 15 минут), а также факта, что для управления малогабаритными космическими аппаратами используется информация, значительная часть которой содержит неопределенность, целесообразно совершенствовать подходы и методы системы управления данными космическими аппаратами в направлении методов нечеткого логического вывода. Методы нечеткого логического вывода основаны на том,

что исследуемые системы описываются в ограниченном естественном языке в терминах лингвистических переменных [6, 7].

В качестве метода нечеткого логического вывода будем использовать алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани, который состоит из шести последовательных этапов (рис. 1).

Рассмотрим алгоритм нечеткого логического вывода Мамдани на конкретном примере. Рассмотрим управление антенной решеткой космического средства наблюдения за морской обстановкой на базе наноспутника.

В качестве входных лингвистических переменных будут использоваться значения:

$\beta_1$  — «Частота сигнала ИРИ»;

$\beta_2$  — «Зона мониторинга».

В качестве выходной лингвистической переменной будет выступать  $\beta_3$  — «Угол поворота антенной решетки».

Терм — множества лингвистических переменных:

$T_1 = \{\text{«Низкая», «Средняя», «Высокая»}\};$

$T_2 = \{\text{«Сверхмалая», «Малая», «Средняя», «Больше_среднего», «Большая»}\};$

$T_3 = \{\text{«Малый», «Оптимальный», «Средний», «Большой»}\}.$

В нашем случае система нечеткого вывода будет содержать правила следующего вида:

Правило\_1: ЕСЛИ «частота сигнала ИРИ низкая» И «зона мониторинга сверхмалая», ТО «угол поворота антенны малый»;

Правило\_2: ЕСЛИ «частота сигнала ИРИ низкая» И «зона мониторинга малая», ТО «угол поворота антенны оптимальный», и так далее.

После формирования базы правил приведем к нечеткости (этап фазификации) входные пе-



Рис. 1. Схема процесса нечеткого логического вывода по алгоритму Мамдани

ременные и построим графики функций принадлежности для термов лингвистических переменных (рис. 2–4).

Определим значение угла поворота антенны при конкретных значениях:

- частота сигнала 7 ГГц;
- зона мониторинга 750 км.

После нахождения значений «частоты сигнала ИРИ» и «зоны мониторинга» на функциях принадлежности произведем активацию данных подзаключений и объединим результаты применения всех правил, т.е. произведем операцию аккумуляции подзаключений. В результате аккумуляции подзаключений получается площадь всех

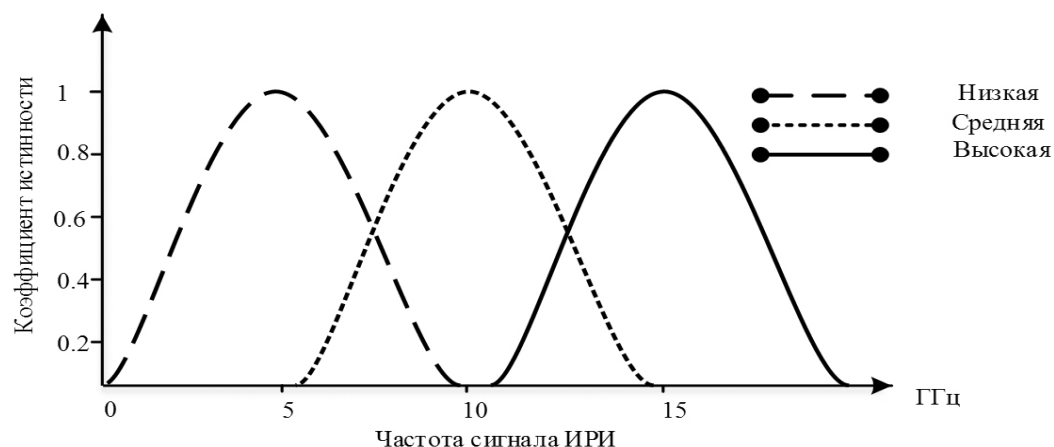


Рис. 2. График функций принадлежности для входной лингвистической переменной «Частота сигнала ИРИ»

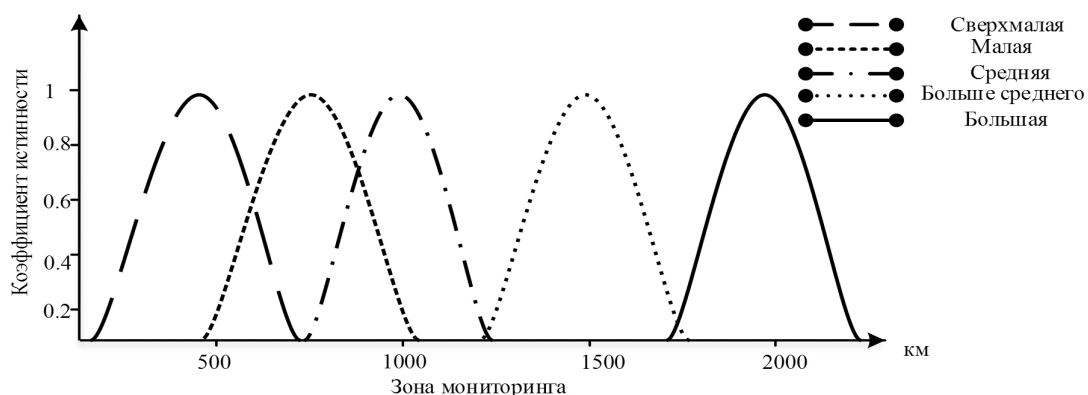


Рис. 3. График функций принадлежности для входной лингвистической переменной «Зона мониторинга»

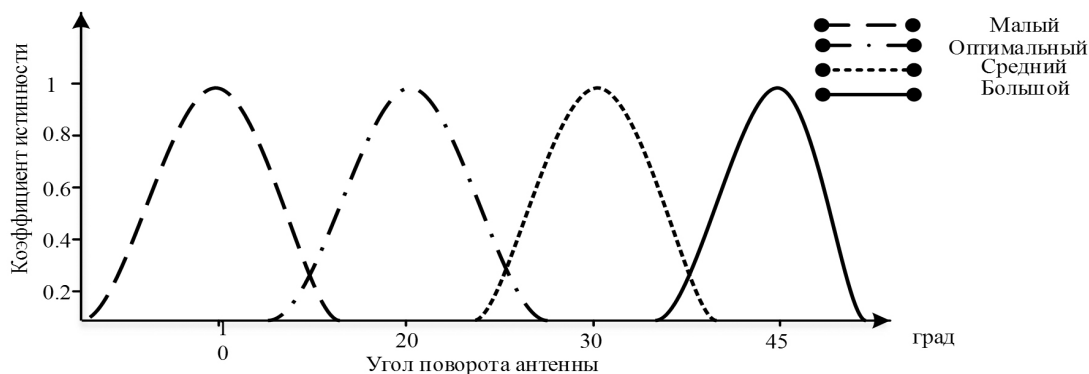


Рис. 4. График функций принадлежности для выходной лингвистической переменной «Угол поворота антенны»

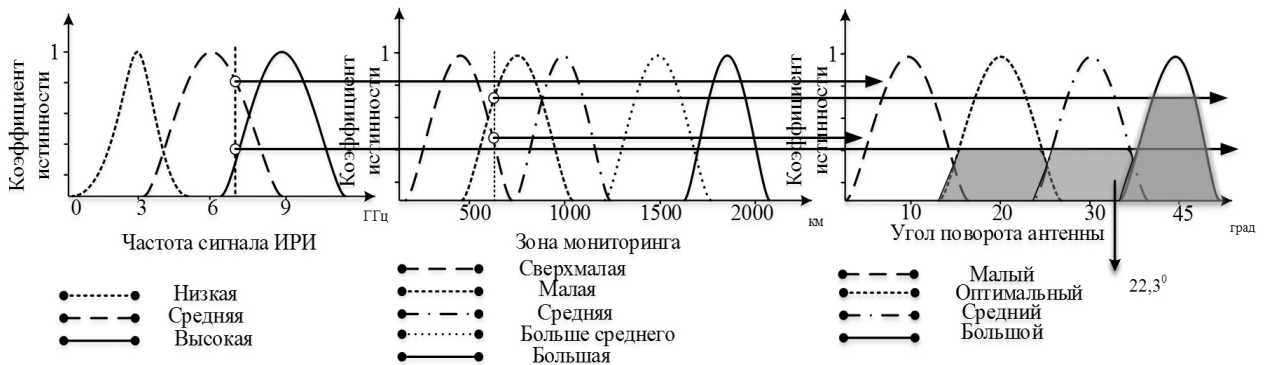


Рис. 5. Определение выходной переменной по методу Мамдани

задействованных правил, которую необходимо перевести в четкое числовое значение. Для получения четкого значения выходной переменной необходимо произвести операцию дефазификации выходных переменных, основным методом, используемый при данной операции, — метод центра тяжести (рис. 5).

Произведенным расчетом угол поворота антенной решетки составил  $22,3^\circ$ .

Таким образом, применение метода нечеткого логического вывода Мамдани в космических средствах наблюдения за морской обстановкой позволяет получить такие преимущества, как:

- эргономичность системы управления космическими средствами;
- высокую оперативность в оценке параметров, необходимых для управления;
- снижение ресурсоемкости системы.

#### Результаты исследования качественных показателей метода нечеткого логического вывода на базе модели наноспутника

Качественную оценку работоспособности метода Мамдани в системе управления наноспутника провели на примере антенной решетки. Для этого была разработана и обоснована антенная система наноспутника, проведено имитационное моделирование антенной системы, размещенной на базе наноспутника, в программной среде «ANSYS HFSS» с получением основных параметров антенной системы.

Для достижения требований по массогабаритным параметрам антенной системы и целевого назначения наноспутника (наблюдение за морской обстановкой) становится целесообразным применение антенной решетки, составлен-

ной из 3 логопериодических излучателей и рупорных антенн.

Логопериодические антенны могут обеспечивать равномерность электрических характеристик (коэффициент направленного действия, входное сопротивление) в широкой полосе частот, при этом возможно создание антенн с коэффициентом перекрытия по диапазону частот, достигающим 10 и более. Интерес также представляют дуговые антенные решетки, составленные из логопериодических антенн, что позволит обеспечивать требуемые радиотехнические показатели (направление, форму и ширину луча ДНА, КНД, КУА и уровень боковых лепестков) [8, 9].

Моделирование избранных антенн осуществлялось с учетом рассчитанных размеров и параметров для изготовления антенн.

В качестве материалов для изготовления дуговой антенной решетки был использован стеклотекстолит FR-4, а для рупорных антенн — алюминий.

В результате проведенной работы были получены такие характеристики, как коэффициент усиления, коэффициент направленного действия, ширина главного лепестка ДНА, коэффициент стоячей волны и др.

Также в программной среде была создана модель космического средства наблюдения за морской обстановкой на базе наноспутника, с размещенной антенной системой (рис. 6).

После проверки работоспособности антенной системы в программной среде «ANSYS HFSS», была реализована модель наноспутника с размещенной антенной системой. А также была написана программа по дистанционному нечеткому управлению антенной решеткой



(рис. 7), с помощью микроконтроллера на базе «Arduino UNO», соединенного с антенной решеткой шаговыми двигателями (рис. 8).

По результатам испытания нечеткого управления определено, что использование метода Мамдани позволило повысить оперативность управления в 2 раза по сравнению с аналитическими методами, но при этом не критически снизилась точность вычисления параметров (рис. 9).

### Концепция реализации системы оперативного управления космическими средствами наблюдения за морской обстановкой

В настоящее время использование космических средств наблюдения за морской обстановкой затруднено в результате строгой вертикали системы управления, заинтересованным пользователям и службам необходимо осуществлять запрос в центр управления данными космическими аппаратами. Данное требование во многом снижает оперативность управления, что в конечном итоге может привести к потере судна,

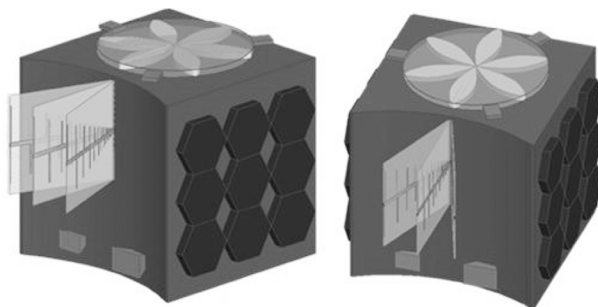


Рис. 6. Имитационная модель средства наблюдения за морской обстановкой на базе наноспутников

терпящего бедствие или находящегося в неблагоприятных ситуациях, службами обеспечения безопасности на море, неактуальной информации о функционировании важных морских коммуникаций и т.д. [10].

Данные факторы обуславливают необходимость создания системы оперативного управления, предполагающей использование космических средств наблюдения за морской обстановкой всеми заинтересованными службами и пользователями напрямую, что позволит эф-

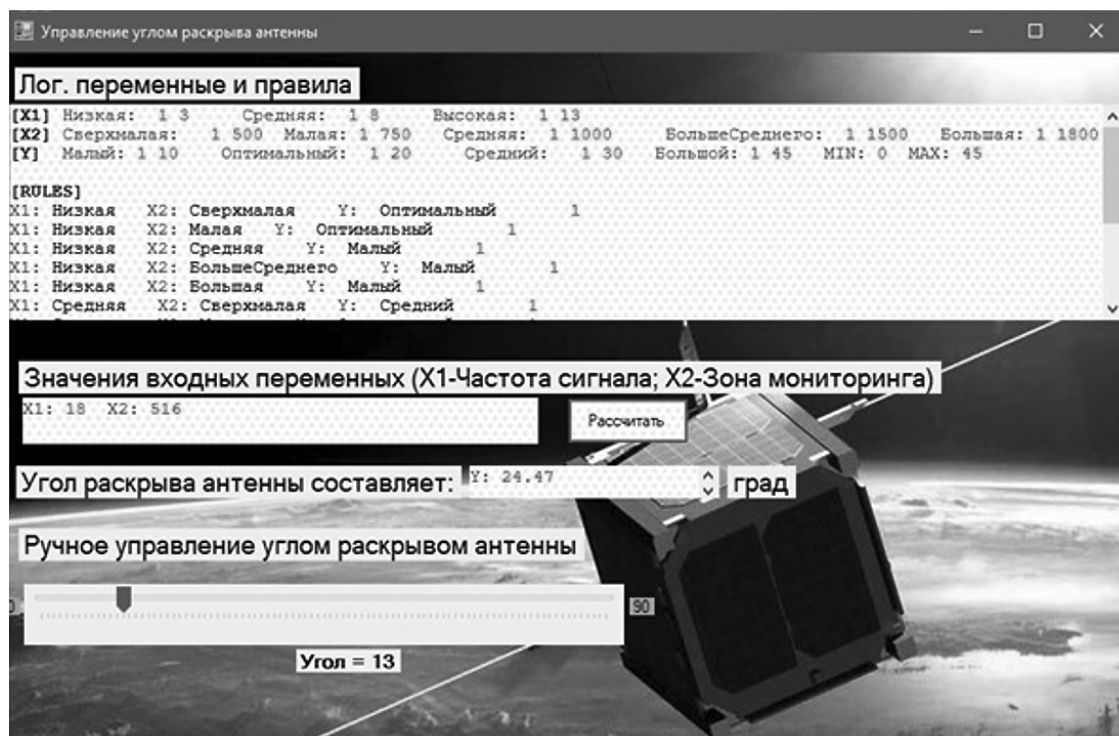


Рис. 7. Программа управления антенной решеткой наноспутника методом нечеткого логического вывода с возможностью управления вручную

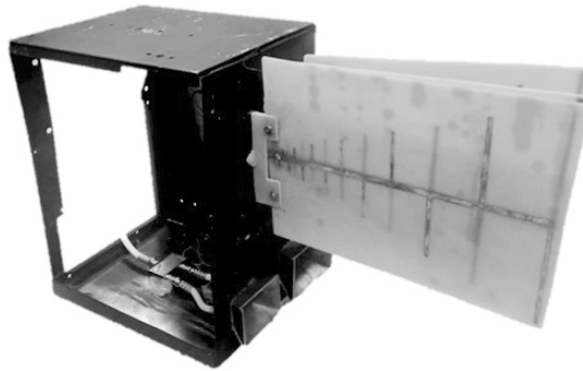


Рис. 8. Модель космического средства наблюдения за морской обстановкой

эффективно взаимодействовать с космическими средствами данного класса потребителям в Мировом океане, а также оперативно использовать для оценки обстановки на море. Для достижения данной задачи предложена концепция реализации системы управления и взаимодействия с космическими средствами наблюдения за морской обстановкой на основе нечеткой логики.

Суть данной концепции заключается в следующем.

1. Управление космическими средствами будет осуществляться по трехконтурной системе:

Первый контур включает наземный комплекс управления (НКУ), состоящий из центра управления полетом (ЦУП), наземной станции командно-измерительной системы (НС КИС). Данный контур реализует траекторное управление и контроль состояния систем наноспутника;

Второй контур включает корабельный малогабаритный комплекс управления (КМКУ), состоящий из ПЭВМ управления элементами наноспутника, которые необходимы для выполнения поставленной задачи. Второй контур реализует только целеуказание на мониторинг заданного района, управление элементами наноспутника, необходимыми для достижения поставленной задачи (управление антенной системой, трехосное наведение наноспутника, передача полученной информации на КМКУ), и анализ принятой информации с наноспутника, при этом исключая функции, которые могут привести к потере наноспутника (управление траекторией полета, сбой бортовой шкалы времени и пр.);

Третий контур представлен бортовым комплексом управления, который осуществляет управление всеми бортовыми системами и элементами.

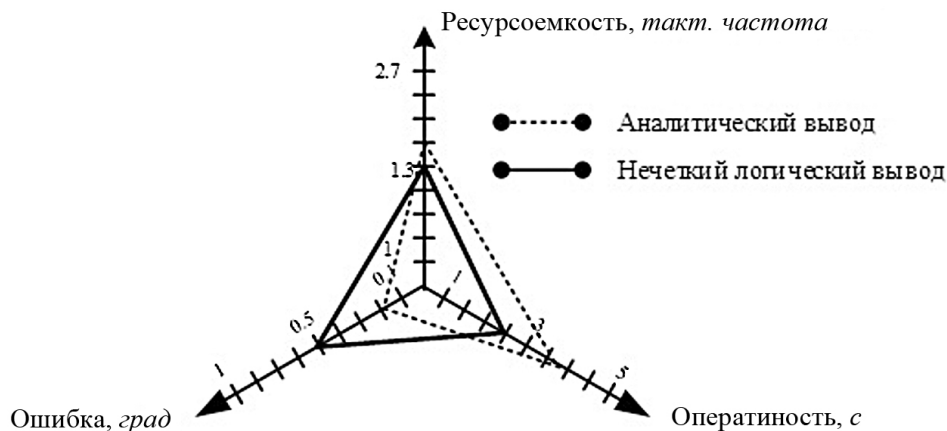


Рис. 9. Лепестковая диаграмма результатов испытания

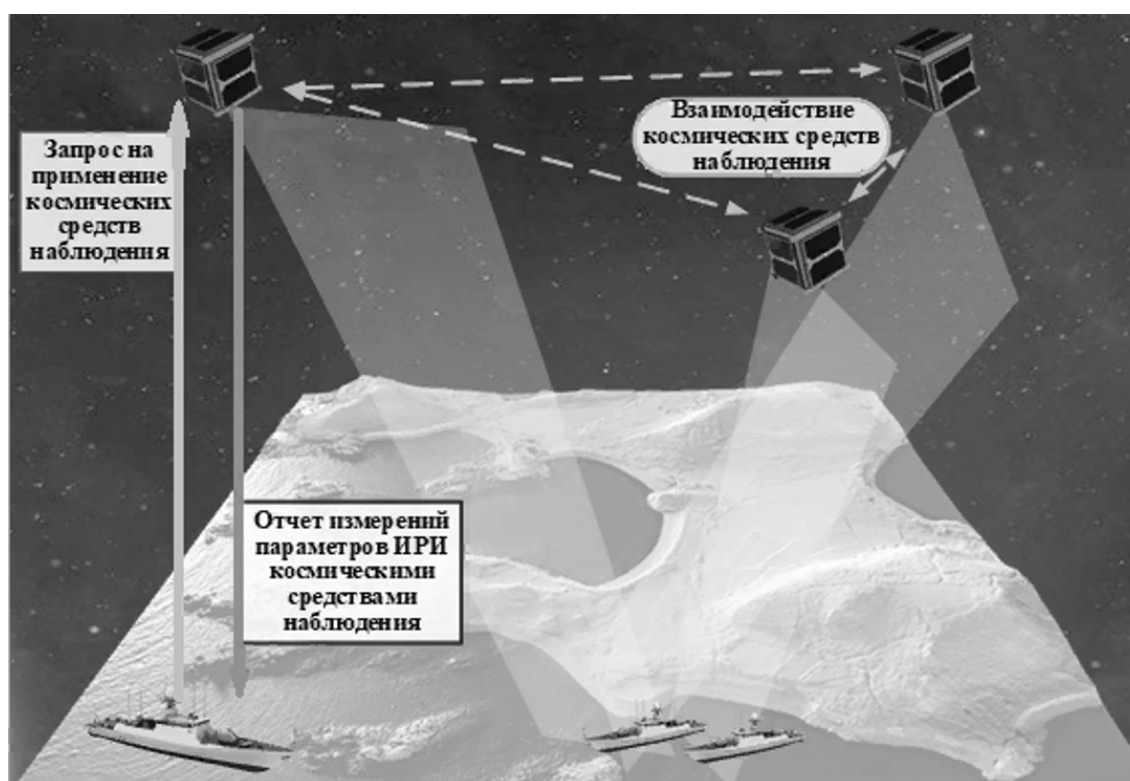


Рис. 10. Концепция применения космического средства наблюдения за морской обстановкой напрямую

2. Управление элементами наноспутника с КМКУ осуществляется на основе методов нечеткого логического вывода.

3. По структуре формирования управляющего воздействия (УВ) основным методом выбран командно-программный в силу своих преимуществ.

4. Использование ПМКУ космических средств наблюдения за морской обстановкой на базе наноспутников напрямую.

5. Управление группировкой наноспутников в составе БСГ ведется с ведущего наноспутника, далее ведущий формирует и передает УВ на ведомые наноспутники из состава БСГ.

При невыполнении поставленной задачи БСГ, ведущий наноспутник формирует УВ и передает их следующей БСГ (рис. 10).

### Заключение

Применение предложенного подхода к реализации системы оперативного управления космическими средствами наблюдения за морской обстановкой на базе наноспутника предположительно позволяет осуществлять оперативное управление данными средствами для оценки

морской обстановки в условиях ограниченного времени на принятия решения всеми заинтересованными службами и пользователями.

Предоставлена возможность оперативно-го управления малогабаритными космическими аппаратами с помощью метода нечеткого логического вывода Мамдани в условиях неопределенности данных необходимых для управления.

### Литература

1. Клименко Н.Н., Занин К.А. Новое поколение космических аппаратов для наблюдения за морской обстановкой // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 3 (100). С. 82–93.

2. Клименко Н.Н., Занин К.А. Современные низкоорбитальные космические аппараты для геолокации и идентификации источников радиоизлучения // Воздушно-космическая сфера. 2018. № 2 (95). С. 48–57.

3. Каширин А.В., Глебанова И.И. Анализ современного состояния рынка наноспутников как прорывной инновации и возможностей его развития в России // Молодой ученый. 2016. № 7 (111). С. 855–867.



4. Шариткин Ю.Н. Анализ и концепция развития космических аппаратов нанокласса за рубежом и в России // Лесной вестник. 2015. № 3. С. 95–100.

5. Гриняев С.В. Нечеткая логика в системе управления // Компьютерра. 2004. № 10. С. 1–11.

6. Ефимов А.С., Морёнов О.А. Основы нечеткой логики, логико-лингвистические модели. — Н. Новгород: НГУ, 2004. 31 с.

7. Коликов И.В., Гудков А.А., Уткин В.В. Система поддержки принятия решения на применение сил и средств радиоэлектронного контроля на основе применения нечетких множеств. ВАС, ВУРЭ. Статья в сборнике трудов научной конференции «Применение искусственного интеллекта в информационно-технических системах». 2021. С. 126–131.

8. Саломанов Ю.П., Панько В.С., Сугак М.И. Сверхширокополосные дуговые антенные решетки КВ-диапазона на основе логопериодических излучателей // Электросвязь. 2011. № 8. С. 38–43.

9. Гавеля Н.П., Муравьев Ю.К., Серов В.П. Антенны. Часть 2. — Л.: ВАС, 1963.

10. Коликов И.В., Уткин В.В., Босый А.С. Проектирование динамической комплексной модели радиоэлектронной обстановки при разработке сценариев применения средств радиоэлектронного контроля // Военный инженер. 2021. № 1 (19). С. 31–41.

### References

1. Klimenko N.N., Zanin K.A. A new generation of spacecraft for monitoring the marine environment // Aerospace sphere. 2019. № 3 (100). Pp. 82–93.

2. Klimenko N.N., Zanin K.A. Modern low-orbit spacecraft for geolocation and identification of radio emission sources // Aerospace sphere. 2018. № 2 (95). Pp. 48–57.

3. Kashirin A.V., Glebanova I.I. Analysis of the current state of the nanosatellite market as a breakthrough innovation and opportunities for its development in Russia // Young Scientist. № 7 (111). Pp. 855–867.

4. Sharitkin Yu.N. Analysis and concept of development of nanoclass spacecraft abroad and in Russia // Lesnoy Vestnik. 2015. № 3. Pp. 95–100.

5. Grinyaev S.V. Fuzzy logic in the control system // Computerra. 2004. № 10. Pp. 1–11.

6. Efimov A.S., Morenov O.A. Fundamentals of fuzzy logic, logical-linguistic models. — Nizhny Novgorod: NSU. 2004. 31 p.

7. Kolikov I.V., Gudkov A.A., Utkin V.V. Decision support system for the use of forces and means of electronic control based on the use of fuzzy sets. VAS, VURE. An article in the proceedings of the scientific conference «The use of artificial intelligence in information technology systems». 2021. Pp. 126–131.

8. Salomanov Yu.P., Panko V.S., Sugak M.I. Ultra-wide-band arc antenna arrays of the HF band based on logoperiodic emitters // Telecommunication. 2011. № 8. Pp. 38–43.

9. Havel N.P., Muravyev Yu.K., Serov V.P. Antennas. Part 2. — L: VAS. 1963

10. Kolikov I.V., Utkin V.V., Bosy A.S. Designing a dynamic complex model of the radio-electronic environment in the development of scenarios for the use of electronic control tools // Military Engineer. 2021. № 1 (19). Pp. 31–41.