Нечеткое управление гибридными самоорганизующимися беспроводными сетями связи

Fuzzy control of hybrid self-organizing wireless communication networks

Комашинский / Komashinsky V.
Владимир Ильич
(kama54@rambler.ru)
доктор технических наук, доцент.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
советник генерального директора.
г. Санкт-Петербург

Аванесов / Avanesov M.
Михаил Юрьевич
(avanesov@itain.ru)
кандидат технических наук.
ЗАО «Институт телекоммуникаций»,
научный секретарь.
г. Санкт-Петербург

Татаринов / Tatarinov V.
Владимир Иннокентьевич
(tatar271@mail.ru)
ФГКВОУ ВО «Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного» МО РФ,
адъюнкт НИЦ.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: беспроводная сеть связи – wireless communication networks; самоорганизующиеся сети связи – self-organizing communication networks; сети связи пятого поколения (5G) – fifth generation communication networks; интеллектуальное управление – intelligent control; нечёткое управление – fuzzy control.

В статье рассмотрены особенности построения гибридных беспроводных самоорганизующихся сетей на основе технологий 5G, предложены решения, позволяющие обеспечить расширение зон покрытия, сокращение капитальных и эксплуатационных затрат. Представлен вариант построения интеллектуальной системы управления на основе нечеткой логики, позволяющий обеспечить новые качественные характеристики сетей 5G.

The article discusses the features of the construction of hybrid wireless self-organizing communication networks based on 5G technologies, offers solutions to ensure the expansion of coverage areas, reduction of capital and operational costs. A variant of building an intelligent control system based on fuzzy logic is presented, which allows providing new qualitative characteristics of 5G networks.

Введение

С апреля 2019 года в РФ начался этап перехода на беспроводные сети пятого поколения (5G) [1], которые позволяют повысить качество традиционных и внедрить широкий круг новых услуг связи, повысить эффективность использования радиоспектра, производительность, пропускную способность и другие сетевые характеристики. Кроме улучшения сетевых характеристик, перед сетями 5G ставились задачи [2] по расширению зон покрытия, снижению капитальных (CAPEX) и эксплуатационных (OPEX) затрат.

Современные сотовые сети связи, построенные на технологии 2G, 3G и 4G, охватывают до 45% сухопутной территории Земли и очень низкий процент водного пространства [3] и обеспечивают покрытие преимущественно в городах, деревнях, на крупных транспортных магистралях и дорогах. В первую очередь это связано с тем, что развертывание и эксплуатация наземной сетевой инфраструктуры, является сложным и дорогостоящим процессом, включающим множество операций, таких как планирование, развертывание, тестирование, оптимизация перед запуском, оптимизация после запуска, комплексный мониторинг производительности, устранение сбоев и эксплуатационное обслуживание.

Одним из решений задачи экономически эффективного перехода к сетям 5G может стать построение гибридных (наземно-воздушных) сетевых инфраструктур [4] (рис. 1).

Другим подходом к решению задачи повышения качества и экономически эффективного функционирования сетей 5G является внедрение технологий сетевой самоорганизации [5, 6].

Общие принципы построения самоорганизующихся беспроводных сетей

Применение концепции сетевой самоорганизации в беспроводных сетях связи в последние годы рассматривается как ключевой фактор улучшения качества эксплуатации и технического обслуживания (OAM),

поскольку позволяет снизить стоимость установки и управления за счёт упрощения эксплуатационных задач с помощью автоматизированных механизмов, нацеленных на самонастройку, самооптимизацию и самовосстановление. Для реализации этих механизмов широко применяются различные технологии искусственного интеллекта.

Механизм самонастройки включает в себя несколько различных функций, таких как самообнаружение, автоматическое управление программным обеспечением, самотестирование, самоконфигурация и автоматические взаимодействие с соседними сетевыми устройствами, которые позволяют существенно уменьшить операторские ошибки при подключении, сократить время на установку и подключение оборудования по сравнению с обычными процедурами установки.

Решение задач самооптимизации сводится к поддержанию качества и производительности сети. Функции самооптимизации отслеживают и анализируют данные о производительности и автоматически инициируют действия, позволяющие сохранять сеть оптимизированной в любое время, быть более динамичной и адаптируемой к изменяющимся условиям.

Механизм самовосстановления представляет собой набор функций, которые направлены на автоматическое обнаружение проблем и их решение с целью увеличения устойчивости сети, значительного снижения воздействия на пользователя и затрат на техническое обслуживание [6].

Особенности построения гибридных самоорганизующихся беспроводных сетей 5G

Построение гибридных самоорганизующихся беспроводных сетей связи (ГСБСС) подразумевает конвергенцию наземных и воздушных сетей связи в общую систему, управляемую единой системой управления, что позволит достичь лучших общих характеристик за счет эффективной совместной работы имеющихся ресурсов, более гибкого совместного использования функциональных возможностей и более быстрого переключения каналов физического уровня между наземными и воздушными сетями [4]. ГСБСС находит широкое применение при первичном развертывании сетевой инфраструктуры и определения оптимального размещения наземных базовых станций 5G.

Как правило, для планирования размещения наземных базовых станций (НБС) на местности требуется знание многих факторов, таких как ожидаемая нагрузка (планируемое количество абонентов), расположение объектов, зданий, препятствий на участке, развитость сетевой наземной инфраструктуры и др., также важным фактором является расчёт экономической выгоды (бизнес-план). Но существуют случаи, когда невозможно по различным причинам спрогнозировать технические или экономические возможности по обеспечению связи на неизвестной территории, когда предугадать точки максимально эффективного размещения НБС при проектировании сети весьма затруднительно, вследствие чего ресурсы сети используются неэффективно. В этих условиях предлагается применение воздушной подсистемы ГСБСС.

Первичное развертывание воздушной сетевой подсистемы позволит динамично изучить наполнение территории абонентами сетей 5G, произвести первичное обслуживание малонасыщенных территорий, рассчитать целесообразность и рентабельность развертывания наземной инфраструктуры. При этом оператор на начальном этапе использует воздушные базовые станции для исследо-

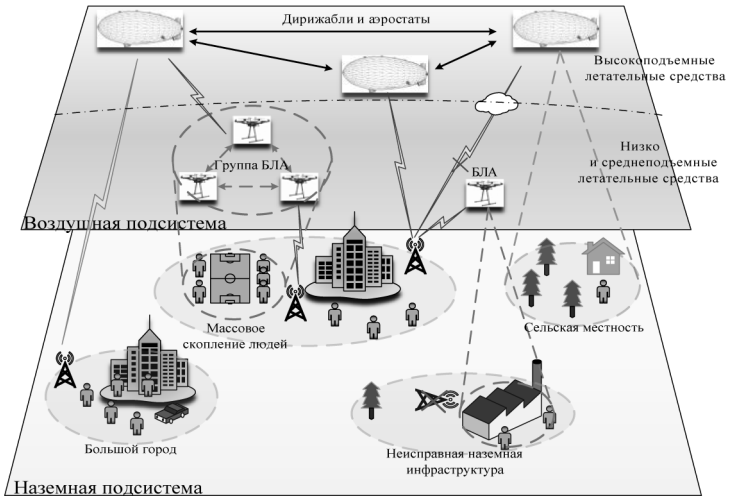

Рис. 1. Гибридная самоорганизующаяся беспроводная сеть связи

вания обслуживаемой области на появление новых мобильных абонентов, собирает и обрабатывает данные о размещении абонентов, их перемещениях, интенсивности трафика на отдельных территориях и др., что позволит планировать последующее рациональное развёртывание наземной сетевой инфраструктуры.

Ещё одним полезным способом применения ГСБСС является быстрое восстановление сети в случае стихийных бедствий для обеспечения связи населению и координации спасательных операций. Часто после крупномасштабных природных чрезвычайных ситуаций (ЧС) непрерывность работы сети нарушается, поэтому крайне важно иметь эффективные методы для преодоления проблем обеспечения связи в условиях ЧС [4].

Кроме того, возможности быстрого развертывания воздушного сегмента позволяет оперативно разгрузить перегруженные фрагменты наземных сетей связи.

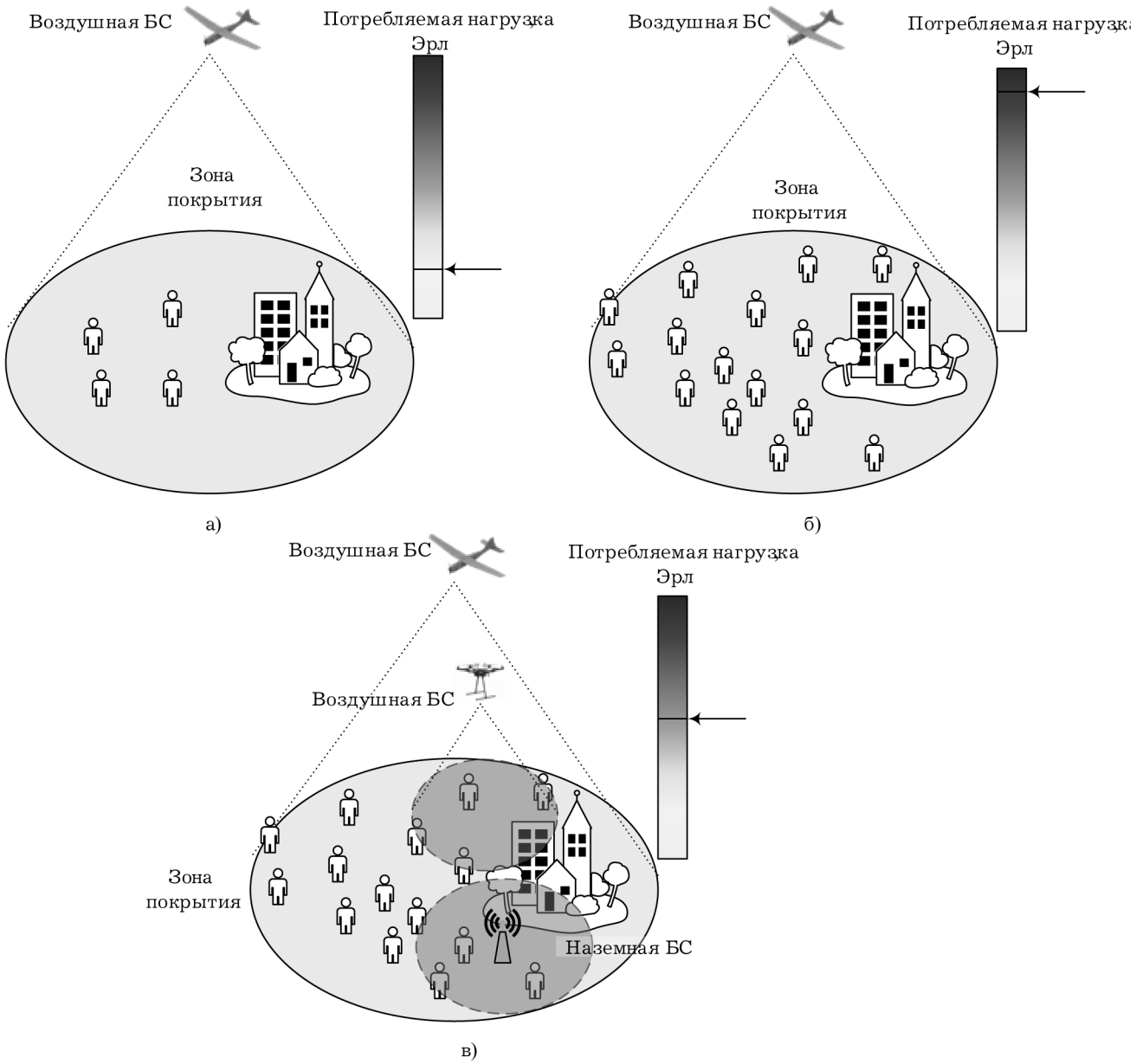

Рис. 2. Обслуживание абонентов базовой станцией:
а) с низким уровнем потребляемой нагрузкой
б) с высоким уровнем потребляемой нагрузки
в) распределение нагрузки между новыми базовыми станциями

При первичном развертывании воздушной сети (рис. 2а) воздушная базовая станция (ВБС) обеспечивает покрытие определенного района и осуществляет обслуживание мобильных пользователей в рамках имеющейся у нее ресурсов пропускной способности. В случае если нагрузка, формируемая абонентами (рис. 2б), начинает превышать возможности воздушной БС, происходит ухудшение качества связи, которое проявляется в увеличении вероятности отказа в обслуживании.

Нечёткое управление гибридными самоорганизующимися беспроводными сетями 5G

Управление на основе нечеткой логики использует лингвистические переменные в форме правил для того, чтобы управлять тем или иным процессом. Регулятор на основе нечеткой логики может иметь неограниченное число входных сигналов и строится на основе ранее приобретенных знаний, а также, в отличие от традиционных систем управления (например, ПИД-регуляторов), может синтезироваться без использования точных знаний об объекте управления, которые как правило являются сложными нелинейными системами, а также системами с нелинейными внешними возмущениями [7]. В настоящее время системы нечёткого управления находят широкое применение [7–10]. Основные этапы нечеткого логического вывода (рис. 3) заключаются в следующем:

– формирование базы правил систем нечеткого логического вывода;

– фаззификация входных переменных;

– агрегирование условий в нечетких правилах продукций;

– активизация (композиция) заключений в нечетких правилах продукций;

– аккумулирование заключений нечетких правил продукций;

– дефаззификация выходных переменных.

Особенностью систем управления на основе нечеткой логики является то, что точность принятия решений формируется на основе ранее полученных знаний и заданной проектировщиком базы правил.

Рассмотрим вариант построения системы нечёткого управления для беспроводной самоорганизующейся сети связи, позволяющего обеспечить качество предоставления услуг связи не ниже требуемого ($D \geq D_{треб}$) за счёт управления процессом развертывания дополнительных базовых станций. Предположим, что качество предоставления услуг связи зависит от пропускной способности сети и количества абонентов, находящихся в зоне покрытия базовой станции. Абоненты распределены на территории по равномерному закону, допускается увеличение или уменьшение количества абонентов. Количество абонентов, обслуживаемых 1 БС, определяется по формуле: $A_{БС} = \frac{Y_{аб}}{Y_{БС}}$, где $Y_{аб}$ – средняя нагрузка одного абонента (0,2 Эрл); $Y_{БС}$ –максимально обслужива-

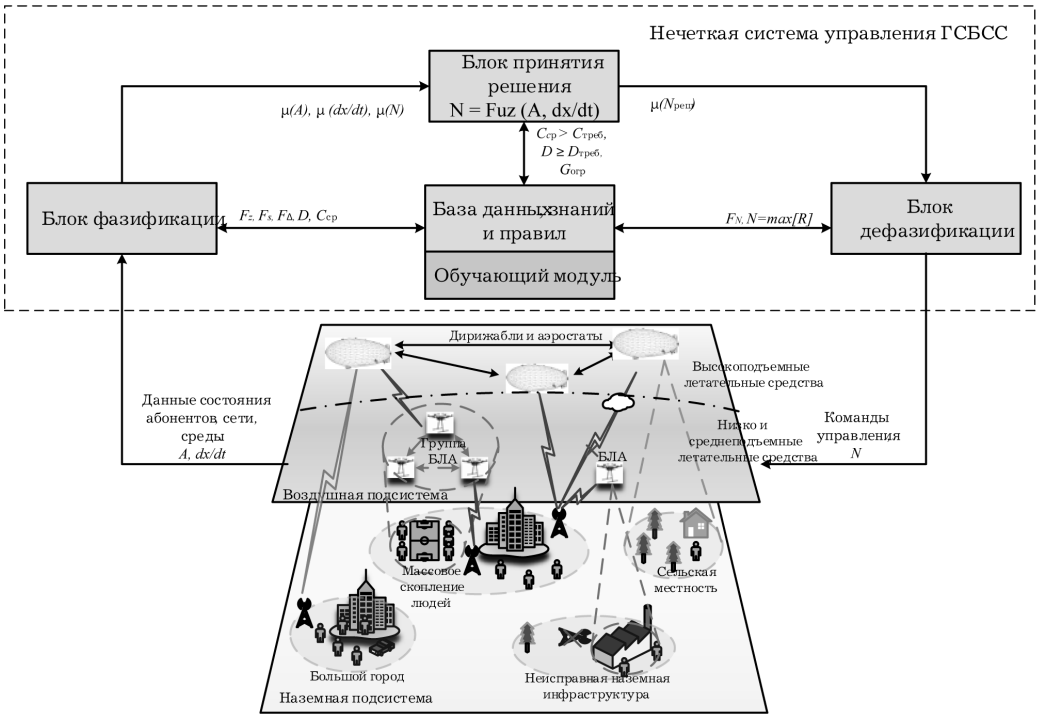

Рис. 3. Структурная схема нечеткого управления ГСБСС

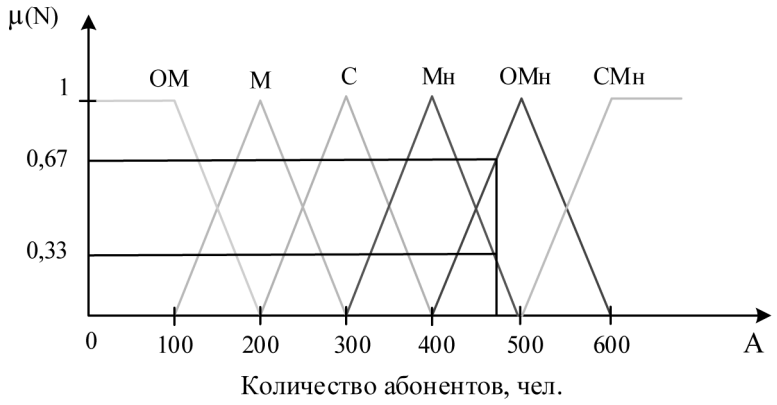

Рис. 4. График функций принадлежности для термов входной лингвистической переменной «количество абонентов»

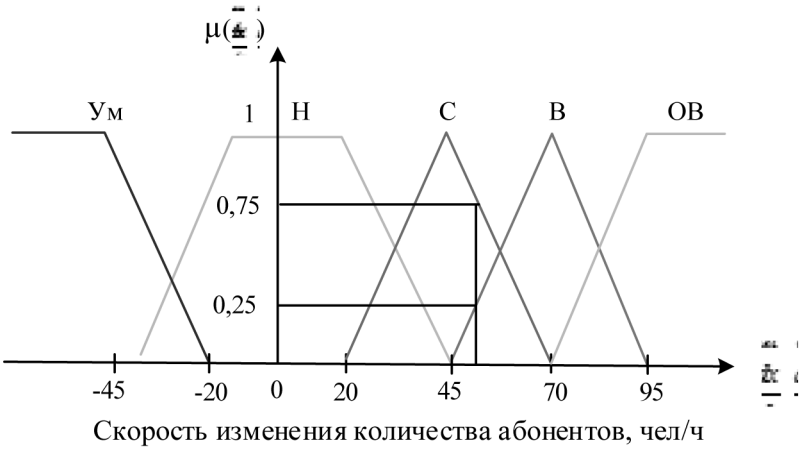

Рис. 5. График функций принадлежности для термов входной лингвистической переменной «скорость изменения количества абонентов»

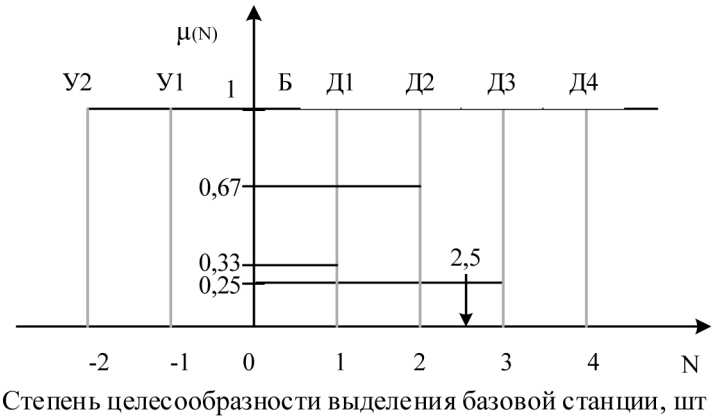

Рис. 6. График функций принадлежности для термов выходной лингвистической переменной «степень целесообразности дополнительной базовой станции»

Таблица 1

База правил нечеткого логического вывода для определения степени выделения базовой станции

№ правила	*Если* Количество абонентов	*И* Скорость изменения количества абонентов	*То* Степень необходимости выделения базовой станции
1	Очень маленькое	Уменьшается	У2
2	Очень маленькое	Низкая	У1
3	Очень маленькое	Средняя	У1
4	Очень маленькое	Высокая	Б
5	Очень маленькое	Очень высокая	Б
6	Маленькое	Уменьшается	У1
7	Маленькое	Низкая	Б
8	Маленькое	Средняя	Б
9	Маленькое	Высокая	Б
10	Маленькое	Очень высокая	Д1
. .	. .	. .	. .
N	Слишком много	Очень высокая	Д4

емая нагрузка базовой станцией (40 Эрл). В случае если нагрузка, формируемая абонентами, превышает предел обслуживаемой нагрузки, происходит ухудшение качества обслуживания. Система управления сетью определяет статистические данные о количестве абонентов A в зоне покрытия по системе GPS через фиксированные промежутки времени τ.

Все этапы функционирования системы управления будут рассмотрены для случаев, при которых в качестве входных лингвистических переменных используется количество абонентов, для которых строятся маленькое» (ОМ), «маленькое» (М), «среднее» (С), «много» (Мн), «очень много» (ОМн) и «слишком много» (СМн), и скорость изменения (первая производная) количества абонентов (*dn/dt*), для которой строится функция принадлежности с пятью термами: «уменьшается»(Ум), «низкая» (Н), «средняя» (Ср), «высокая» (В) и «очень высокая» (ОВ), а в качестве выходной лингвистической переменной – степень целесообразности выделения базовой станции, в лингвистических переменных задается семью термами: «убрать 2 БС» (У2), «убрать 1 БС» (У1), «без изменений» (Б), «добавить 1 БС» (Д1), «добавить 2 БС» (Д2), «добавить 3 БС» (Д3), «добавить 4 БС» (Д4). Определение необходимости введения дополнительных базовых станции определяется из требования сети по обеспечению средней пропускной способности не ниже требуемого ($C_{ср} \geq C_{треб}$). В случае превышения количества абонентов, принимается решение на ввод дополнительной базовой станции, либо наоборот, в случае низкой нагрузки, возможно сокращение количества базовых станций, при условии, что будет обеспечена требуемая зона покрытия.

Для построения функций принадлежности могут использовать различные виды функций:

· Z-образная функция принадлежности описывается следующим образом:

$$f_Z(x;a,b)=\begin{cases}1, & x\le a;\\ \dfrac{b-x}{b-a}, & a<x<b;\\ 0, & x\ge b.\end{cases}$$

· S-образная функция принадлежности описывается следующим образом:

$$f_S(x;a,b)=\begin{cases}1, & x\le a;\\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a<x<b;\\ 0, & x\ge b.\end{cases}$$

· Треугольная функция принадлежности описывается следующим образом:

$$f_\Delta(x;a,b,c)=\begin{cases}0, & x\le a;\\ \dfrac{x-a}{b-a}, & a<x<b;\\ \dfrac{c-x}{c-b}, & b<x<c;\\ 0, & x\ge c.\end{cases}$$

Нечеткий логический вывод будем осуществлять по алгоритму Мамдани [10].

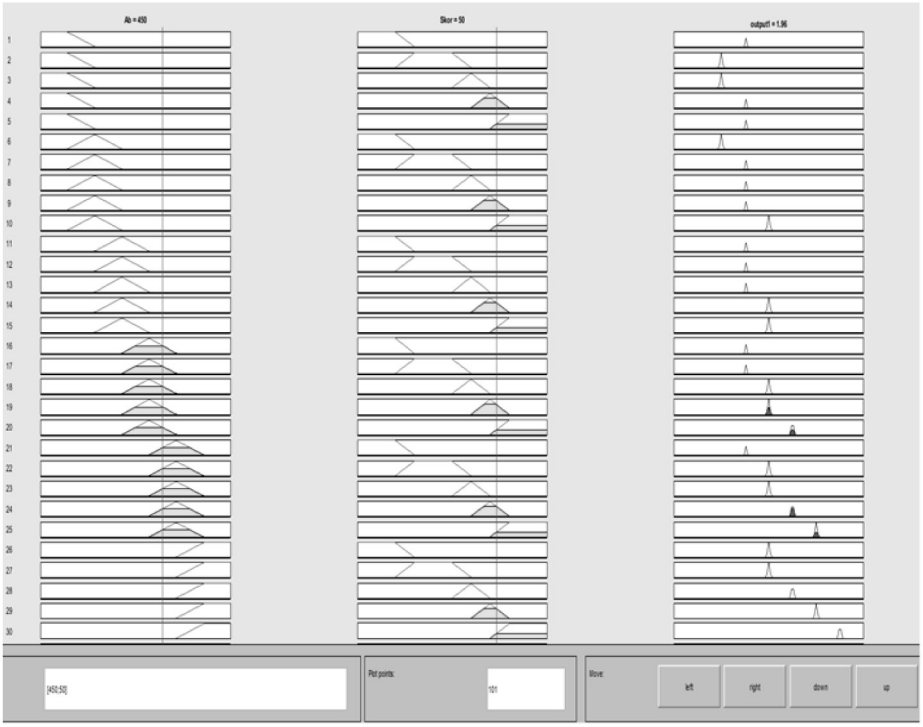

Рис. 7. Поиск общего вида определения количества базовых станций

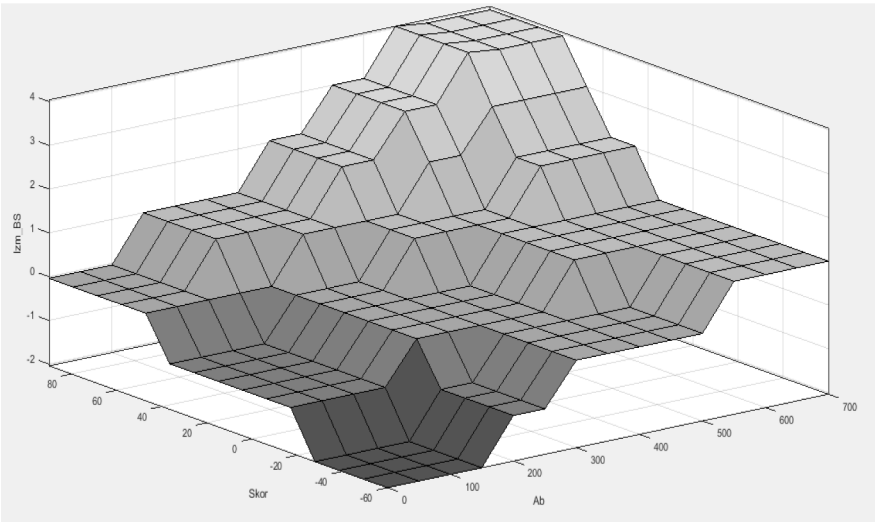

Рис. 8. Зависимость степени необходимости выделения базовой станции от количества абонентов и скорости изменения

На первом этапе генерируется множество правил исходя из всех возможных сочетаний входных и выходных переменных. При этом разработанная база нечётких правил соответствует структуре MISO (Multiple Input – Single Output), в которой двум входным переменным соответствует одна выходная переменная. Совокупность всех правил для функций принадлежности определения степени целесообразности выделения базовой станции представлен в таблице 1.

После синтеза базы правил и синтеза функций принадлежности построим с помощью программы MATLAB [11] механизм синтеза общего вывода (рис. 7) и график зависимости степени необходимости выделения базовой станции от количества абонентов и скорости изменения (рис. 8)

Допустим, имеет место количество оконечных терминалов равное 480 шт., которое изменяется в сторону увеличения со скоростью 50 шт/ч. В этом случае термы Мн и ОМн количества оконечных терминалов имеют степень принадлежности 0,33 и 0,67 соответственно, а термы С и В скорости изменения количества оконечных терминалов равны 0,75 и 0,25. Остальные термы имеют степень принадлежности равную 0. Для принятой формы записи правил степень принадлежности антецедента каждого правила определяется по минимуму всех условий, т.е для вывода имеют значения только правила содержащие условия с ненулевыми степенями принадлежности:

- Если А=Мн и $dx/dt=C$, то N=Д1;
- Если А=Мн и $dx/dt=B$, то N=Д2;
- Если А=ОМн и $dx/dt=C$, то N=Д2;
- Если А=ОМн и $dx/dt=B$, то N=Д3.

Определим степень принадлежности всего антецедента, так как использована логическая операция И, то используем правило по оператору MIN:

- $\mu_{Д1}(N) = \min\{\mu_{Мн}(A); \mu_C(dx/dt)\} = \min\{0{,}33; 0{,}75\} = 0{,}33$;
- $\mu_{Д2}(N) = \min\{\mu_{Мн}(A); \mu_B(dx/dt)\} = \min\{0{,}33; 0{,}25\} = 0{,}25$;
- $\mu_{Д2}(N) = \min\{\mu_{ОМн}(A); \mu_C(dx/dt)\} = \min\{0{,}67; 0{,}75\} = 0{,}67$;
- $\mu_{Д3}(N) = \min\{\mu_{ОМн}(A); \mu_B(dx/dt)\} = \min\{0{,}67; 0{,}25\} = 0{,}25$.

Определим степень принадлежности термов выходной переменной по оператору MAX, которые имеют разные значения степени принадлежности для одного терма – Д2:

$\mu_{Д2}(N) = \max\{\mu_{Мн}(A); \mu C(dx/dt)\} = \max\{0{,}25; 0{,}67\} = 0{,}67$;

Таким образом, при данном состоянии входных сигналов степени принадлежности термов выходной переменной имеют значения:

$\{\mu_{У2}, \mu_{У1}, \mu_Б, \mu_{Д1}, \mu_{Д2}, \mu_{Д3}, \mu_{Д4}\} = \{0;0;0;0{,}33;\ 0{,}67;\ 0{,}25;\ 0\}$.

Для перехода от нечётких выводов к управляющему воздействию используем формулу дефазификации по методу центра тяжести:

$$N = \frac{N_{-2}\mu_{У2} + N_{-1}\mu_{У1} + N_0\mu_Б + N_1\mu_{Д1} + N_2\mu_{Д2} + N_3\mu_{У3} + N_4\mu_{У4}}{0+0+0+0{,}13+0{,}33+0{,}67+0} =$$

$$= \frac{-2\cdot 0 + (-1\cdot 0) + 0\cdot 0 + 1\cdot 0{,}33 + 2\cdot 0{,}67 + 3\cdot 0{,}25 + 4\cdot 0}{0+0+0+0{,}33+0{,}67+0{,}25+0} \approx 1{,}93$$

Приведем полученное значение к целому числу:

$$N = \max[1{,}93] = 2 \text{ шт.}$$

Таким образом, для поддержания заданного качества обслуживания необходимо развертывание новых базовых станций в количестве двух штук.

Заключение

1. Эффективным методом расширением возможностей сотовых сетей 5-го поколения (5G) по увеличению зон покрытия и обеспечению связи в труднодоступных и отдаленных районах, таких как сельская местность, пустыни, океаны и др., является применение гибридной беспроводной самоорганизующейся сети связи 5-го поколения.

2. Для коммерческих сетей сотовой связи, применение ГСБСС позволит сократить CAPEX и OPEX за счёт исследования местности воздушной сетевой подсистемой, позволяющей произвести оценку рентабельности развертывания дорогостоящей наземной инфраструктуры.

3. Функционирование в условиях высокой динамики и неопределенности изменений состояний являются главным фактором для использования в ГСБСС интеллектуальной системы управления на основе нечеткой логики.

4. Нечеткая система управления ГСБСС позволяет определить оптимальное количество базовых станций (наземных или воздушных), позволяющих обеспечить требуемое качество обслуживания абонентов в зоне покрытия.

5. Одной из особенностью нечетких систем управления, как и всех интеллектуальных систем, является способность обучения (дообучения), позволяющих адаптироваться и гибко корректировать закономерности принятий решений в условиях постоянно изменяющихся характеристик и состояний.

Литература

1. Sixth Generation (6G) Wireless Networks: Vision, Research Activities, Challenges and Potential Solutions / M.A. Alsharif, A.H. Kelechi, M.A. Albreem [et al.] // Symmetry. – 2020. – No. 12 (4). – P. 676.

2. TS 32.500: Telecommunication management; Self-Networks (SON); Concepts. – Technical specification. – Release 8.

3. Комашинский, В. И. Системы подвижной радиосвязи с пакетной передачей информации. Основы моделирования / В.И. Комашинский, А.И. Максимов. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2007. – 176 с.

4. Гибридная наземно-воздушная самоорганизующаяся беспроводная сеть связи / В.И. Комашинский, О.А. Михалев, В.И. Татаринов, А.Ю. Иванов // Информация и Космос. – 2022. – № 3. – С. 36–41.

5. Self-organizing networks: state-of-the-art, challenges and perspectives / N. Marchetti, J. Johansson, N.R. Prasad, T. Cai // Proceedings of the 8th International Conference on Communication (Comm 10). – 2010. – P. 503–508.

6. Татаринов, В. И. Введение в самоорганизацию интеллектуально-определяемых сетей / В.И. Татаринов // Информация и Космос. – 2022. – № 2. – С. 119–124.

7. Демидова, Г. Л. Регуляторы на основе нечеткой логики в системах управления техническими объектами / Г.Л. Демидова, Д.В. Лукичев. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО. – 2017. – 81 с.

8. Zadeh, L. A. Fuzzy sets / L.A. Zadeh // Information and Control. – 1965. – Vol. 8, Iss. 3. – P. 338–353.

9. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат. – Москва : Лаборатория знаний. – 2020. – 801 с.

10. Mamdani, E. H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant / E.H. Mamdani // Proceedings IEEE. – 1974. – Vol. 121, Iss. 12. – P. 1585–1588.

11. Штовба, С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – Москва : Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.