

**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
"Южный федеральный университет"**

На правах рукописи

Чепель Евгений Николаевич

**МОДЕЛИ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛЬЮ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ, АКТИВНОСТИ АГЕНТОВ
И ИХ ПРОТИВОБОРСТВА**

Специальность 2.3.4 - управление в организационных системах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону
2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор
Угольницкий Геннадий Анатольевич

Официальные оппоненты:

Защита состоится «___» _____ 2024 года в __:__ на заседании диссертационного совета ЮФУ 801.02.01 на базе Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича Южного федерального университета по адресу: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8А, а. 211.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. Ю.А. Жданова Южного федерального университета по адресу: 344090, г.Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж, и на сайте www.sfedu.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 202__ года.

Учёный секретарь
диссертационного совета, д.т.н.

Горбанёва
Ольга Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Перспективным направлением повышения помехозащищённости и конфликтной устойчивости задачи местоопределения источника радиоизлучения (ИРИ) является создание многопозиционных систем пассивной локации. Одним из популярных методов получения оценки местоположения ИРИ на базе угловых измерений (пеленгов) является триангуляционный метод. Популярность этого метода обусловлена его эффективностью в технико-экономическом плане и простотой практической реализации. Современные триангуляционные измерительные системы (ТИС) представляют собой сложные организационно-технические системы (ОТС) реального масштаба времени, включающие активных агентов-операторов. Функционирование ТИС в условиях сложной радиоэлектронной обстановки при наличии преднамеренных воздействий деструктивного характера является характерным условием для ряда областей применения. Возникающая априорная неопределённость повышает роль оператора в процессе обработки информации и формировании управляющих воздействий. Объединение технических средств, систем поддержки принятия решений (СППР), экипажей измерительных пунктов и лиц, принимающих решения (ЛПР) направлено на формирование и реализацию управляющих воздействий с целью повышения помехозащищённости ТИС и устойчивости к конфликтным взаимодействиям.

Исследования по проблемам управления ОТС в условиях конфликта отражены в публикациях по теории активных систем и близким направлениям. В работах Ю.С. Сербулова, Л.Е. Мистрова, Г.И. Алгазина, В.В. Дружинина, Д.С. Конторова, С.И. Макаренко, Е.М. Воронова рассматриваются конфликты в сложных иерархических организационно-технических системах. Работы Д.А. Новикова, Д.А. Губанова, А.Г. Чхартишвили изучают математические модели управления и противоборства применительно к социальным сетям. Модели управления жизненными циклами предприятий промышленности и IT-сферы рассмотрены в работах Д.А. Новикова и М.В. Белова. Ряд работ Ю.С. Сербулова, Л.Е. Мистрова посвящены проблеме распределения ресурсов и управлению экологическими конфликтами. Исследования функционирования систем радиосвязи в условиях информационного конфликта проводятся в работах В.И. Владимирова и С.И. Макаренко.

Проведённый анализ работ указанных авторов показал, что существующие модели конфликтного взаимодействия не в полной мере описывают особенности взаимодействия ОТС на базе ТИС и систем радиоэлектронного противодействия.

Оценка потенциальных возможностей достижения успеха участниками конфликта является одной из задач, возникающей в процессе исследования. Основным условием достижения успеха какой-либо из сторон является наличие информационного обеспечения, необходимого для оценки текущей ситуации и эффективного управления. Участие ТИС в информационном конфликте оказывает существенное влияние на подходы к созданию и управлению системой, а также на выбор методов и алгоритмов обработки информации в условиях появления недостоверных измерительных каналов как по азимуту, так и по углу места.

Используя дополнительную информацию, эвристические методы и рекомендации СППР, оператор может определить факт выхода из строя измерительных каналов или отдельных пунктов. На базе указанной информации выбираются те или иные методы обработки информации с целью повышения точности итоговой оценки или принимаются другие решения, призванные снизить влияние преднамеренных воздействий противоборствующей стороны. Иначе говоря, уровень квалификации оператора оказывает непосредственное влияние на результат работы ТИС. Для систем с подвижными позициями возникает необходимость в перемещении позиций в соответствии с поставленной задачей, оперативность которого также зависит от квалификации экипажа. Таким образом, наряду с процедурами обработки измерительной информации необходимо учитывать влияние персонала на эффективность функционирования ТИС.

Из сказанного следует, что выбранное направление исследований актуально и определяет необходимость разработки моделей управления и взаимодействия элементов ТИС и методов информационного обеспечения оператора.

Целью исследования является разработка научно-обоснованных рекомендаций и предложений по формированию состава, структуры и организации управления многопозиционной ТИС, функционирующей в условиях неопределённости, активности агентов ТИС и их противоборства.

Задачами исследования являются:

- Разработка кластерно-вариационного метода (КВМ) пассивной локации для многопозиционной ТИС и анализ его возможностей.
- Разработка и исследование модели конфликтного взаимодействия в процессе наблюдения за ИРИ, построенной с использованием разработанного КВМ.
- Разработка и исследование теоретико-игровой модели кооперативного поиска позиций размещения измерительных пунктов ТИС, позволяющей учитывать окружающую обстановку и возможности перемещения каждого пункта.

- Разработка алгоритма комбинированного применения теории фильтрации Калмана и КВМ для оценивания параметров движения ИРИ.
- Разработка оптимизационных процедур для КВМ, позволяющих сократить требования к вычислительным ресурсам и учитывать экспертные оценки оператора.

Решение сформулированных задач должно сопровождаться экспериментальным исследованием полученных результатов и выработкой практических рекомендаций по применению моделей и методов.

Области исследования диссертации соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 2.3.4: п.3 Разработка методов и алгоритмов решения задач управления в организационных системах; п.5 Разработка методов получения данных и идентификации моделей, прогнозирования и управления организационными системами на основе ретроспективной, текущей и экспертной информации; п.9 Разработка методов и алгоритмов интеллектуальной поддержки принятия управленческих решений в организационных системах.

Объектом исследования являются ОТС специального назначения, предназначенные для оценивания местоположения и параметров движения ИРИ.

Предмет исследования - модели управления многопозиционными ТИС в условиях информационного конфликта и методы оптимизации информационного обеспечения ЛПР, направленные на формирование управленческих решений и повышение устойчивости к преднамеренным воздействиям противника на основе принципов мультиструктурности, кластеризации и теории фильтрации, вопросы устойчивости системы к конфликтным взаимодействиям, а также кластерно-вариационный метод (КВМ), являющийся составной частью СППР, обеспечивающей ЛПР информацией, необходимой для принятия управленческих решений в условиях априорной неопределенности при наличии недостоверных измерительных каналов и «деградации» структуры ТИС.

Методы исследования. В ходе работы над диссертацией применялись: теория активных систем; теория игр; методы кластерного анализа; теория фильтрации Калмана; теория вероятностей и математической статистики; методы теории оптимального оценивания и принятия решений; методы многопозиционной радиолокации; метод имитационного моделирования; нейронные сети.

Научная новизна полученных в диссертации результатов:

- Разработан новый метод оценивания местоположения ИРИ на базе многопозиционной ТИС, использующий принципы мультиструктурности и кластеризации, позволяющий повысить качество оценивания

параметров ИРИ и осуществлять обнаружение недостоверных измерительных каналов в условиях информационного конфликта.

- На базе предложенного метода разработана и исследована модель конфликтного взаимодействия, позволяющая оценить время работы и вероятность победы противоборствующих сторон или указать на недостаточность средств для осуществления противодействия.
- Предложена и исследована модель кооперативного поиска размещения измерительных пунктов ТИС, которая при помощи теоретико-игрового подхода позволяет находить оптимальное (в смысле указанных критериев) размещение пунктов ТИС.
- Обоснована возможность комбинированного применения фильтрации Калмана и КВМ для оценивания параметров движения ИРИ, обеспечивающая возможность работы в условиях наличия недостоверных измерительных каналов с учетом действий оператора.
- Разработаны оптимизационные процедуры для КВМ, включающие в себя:
 - а. Двухэтапный алгоритм КВМ, позволяющий снизить требования к вычислительным ресурсам и сопоставимый по точности с базовым методом;
 - б. Алгоритм автоматического выбора количества кластеров в разбиении;
 - с. Возможность участия опытного оператора на этапе настройки режимов работы метода.

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований теоретико-игровых моделей, разработанного базового метода КВМ и его модификаций подтверждают возможность их применения для повышения эффективности функционирования ТИС и формирования управленческих решений, призванных снизить влияние преднамеренных воздействий противоборствующей стороны.

Теоретическая значимость исследования состоит в разработке и анализе нового метода информационного обеспечения и моделей формирования управленческих решений для многопозиционной ТИС с учётом активности агентов в условиях конфликтного взаимодействия.

Практическая значимость исследований определяется тем, что полученные результаты обеспечивают:

- Алгоритмическое обеспечение развитых методов, которые несложно внедрить в вычислительные модули существующих и перспективных средств радиомониторинга.

- Информационное обеспечение работы опытного оператора в оценке реальной радиотехнической обстановки и режима работы ТИС с целью формирования эффективных управляющих воздействий.
- Возможность оценки влияния квалификации и работоспособности экипажей составных элементов ТИС на оперативность и качество итогового результата работы.
- Возможность формулировки научно-обоснованных тактико-технических требований к существующим и перспективным средствам радиомониторинга.

Достоверность и обоснованность подтверждаются полнотой и корректностью исходных посылок, использованием строгого математического аппарата при теоретическом обосновании предложенных методов, совпадением выявленных закономерностей с известными результатами, положительными отзывами специалистов в ходе апробации результатов исследований, а также данными проведенных численных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту:

- Разработанный КВМ позволяет работать в условиях неопределённости и деградации структуры ТИС, характерных для функционирования системы в условиях конфликта. Метод обеспечивает информационную поддержку принятия решений оператором путём обнаружения возникающих в процессе эксплуатации недостоверных каналов. Обнаружение недостоверных измерительных каналов основано на использовании всевозможных наблюдаемых измерительных систем и учёте топологических особенностей полученных оценок.
- Предложенная модель противоборства наблюдателя и противника на основе информации о состоянии составных элементов ТИС и характеристиках экипажей позволяет эффективно использовать имеющиеся ресурсы для решения задачи в условиях конфликта с учётом активности агентов, а также получить оценку потенциальных возможностей достижения успеха каждой из сторон конфликта или указать на недостаточность средств для решения поставленных задач.
- Теоретико-игровая модель кооперативного поиска позиций размещения измерительных пунктов ТИС позволяет получить множество размещений пунктов ТИС, являющихся оптимальными (в смысле рассмотренных критериев наблюдаемости ИРИ). При этом модель позволяет агентам действовать в соответствии с особенностями окружающей обстановки и учитывает их возможности по перемещению.
- Предложенный вариант модификации базового КВМ с разбиением процесса обнаружения недостоверных каналов на плоскостной и простран-

ственный этапы позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам и проводить вычисления в масштабе реального времени с использованием более простых вычислителей при точности, сопоставимой с базовым методом.

Внедрение результатов работы. Результаты диссертации успешно реализованы при разработке программного обеспечения в рамках ОКР «Москва-1». Внедренные подходы позволили повысить помехоустойчивость и точность оценивания местоположения ИРИ. Имеется справка о внедрении в АО ВНИИ "Градиент". Получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2003612430 от 31.10.2003.

Публикации и апробация результатов исследований. По теме диссертации опубликованы 12 научных работ [1-12], в том числе 9 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК: «Успехи современной радиоэлектроники» [7,8], «Известия РАН. Теория и системы управления» [1,2,4], «Автометрия» [5], «Автоматика и телемеханика» [3], «Журнал радиоэлектроники» [9], «Радиотехника» [6]. Статьи [1-4] входят в Перечень для диссертационного совета ЮФУ. Кроме того, материалы диссертации докладывались и нашли отражение в сборниках трудов XX международной научно-технической конференции «Радиолокация. Навигация. Связь» (RLCN-2014) Воронеж, 15-17 апреля 2014 г., 26-й и 28-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо 2016, 2018), X Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», Москва 21-23 ноября 2016 г., II Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-измерительное обеспечение натурных испытаний и эксплуатации сложных технических комплексов» Великий Новгород 29 июня - 1 июля 2016 г. [12-16], а также в докладе на III научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения», Воронеж, 25 – 26 ноября 2015 г.

В работах, выполненных в соавторстве [1-12], автору принадлежат основные идеи и реализация методов и алгоритмов расчёта, участие в постановке задачи исследования, разработка математических моделей, проведение экспериментальных исследований, интерпретация полученных результатов, формулировка основных выводов и положений работы. В указанных публикациях, которые выполнены в соавторстве, отражён следующий **личный вклад автора**: в работах [1,7] – 15%, [2,3,6] – 35%, [5,8,9] – 50%, [4,10,11,12] – 65%.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов и заключения. Она содержит 141 страницу машинописного текста, 57 рисунков, 9 таблиц и список использованных источников, включающий 103 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы основные цели и задачи диссертационной работы, приведено краткое содержание диссертации, обозначены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе приведены результаты анализа существующего научно-методического аппарата вторичной обработки информации для ТИС. Дан сравнительный анализ известных методов определения местоположения ИРИ на базе ТИС. На основе данного анализа обосновывается необходимость создания метода, способного надёжно функционировать в сложной радиолокационной обстановке, в том числе и в условиях информационного конфликта. Представлен краткий обзор основных моделей и методов теории управления организационными системами. ТИС рассмотрена как ОТС специального назначения, определены основные особенности указанного класса систем. На базе рассмотренных моделей и методов в разделе 3 предложены модели конфликтного взаимодействия систем: противоборство наблюдателя и противника и кооперативный поиск позиций размещения измерительных пунктов ТИС.

Проведённый анализ показал следующее:

- Приведённые оптимальные и квазиоптимальные методы принципиально пригодны для оценки местоположения ИРИ при нормальных условиях функционирования ТИС, однако, оказываются малопригодными для условий структурно-параметрической неопределённости.
- Рассмотренные методы могут быть использованы в задачах оценивания параметров движения ИРИ с применением теории фильтрации и в алгоритмах триангуляционной обработки измерительной информации, содержащей аномальные ошибки пеленгования.
- Приведённые модели и механизмы дают общее представление о методах управления в организационных системах. Рассмотрение ТИС как организационно-технической системы позволяет применить аппарат теории активных систем к решению задач управления ТИС. Сформулированы особые условия функционирования ТИС как организационно-технической системы и особенности взаимодействия с системами радиопротиводействия.

Во втором разделе развивается кластерно-вариационный метод триангуляционного оценивания местоположения цели, позволяющий осуществлять обнаружение недостоверных измерительных каналов. Представлены два режима работы КВМ с ручным и автоматическим выбором количества кластеров в разбиении, рассматривается алгоритм автоматического режима. С целью снижения потребления вычислительных и временных ресурсов приведена оптимизацион-

ная модификация КВМ, основанная на разбиении базового метода на два этапа: плоский и пространственный. Рассмотрено участие оператора на некоторых этапах обработки информации при аномальных условиях функционирования системы. Обосновывается возможность комбинирования КВМ и фильтрации Калмана для оценивания параметров движения ИРИ с учётом возможного наличия недостоверных измерительных каналов и «деградации» структуры ТИС.

С каждым пеленгатором можно связать две поверхности положения цели: плоскость для азимутального канала и конус для угломестного. Для ТИС с числом пеленгаторов три и более проявляется так называемый геометрический фактор – образуется избыточное число поверхностей положения, на базе которых можно строить альтернативные измерительные структуры (ИС) и применять принцип «размножения» первичных отметок, соответствующих этим ИС. Для выделения из множества альтернативных ИС только наблюдаемых ИС зададимся парой чисел $(\gamma_\alpha, \gamma_\beta)$, где γ_α и γ_β соответствуют минимально необходимому числу $\gamma_{\alpha\beta} = \gamma_\alpha + \gamma_\beta$ азимутальных и угломестных каналов, достаточных для наблюдаемости задачи оценивания. Также полагаем, что число измерительных каналов, не содержащих АОИ, должно быть не менее $D^{\alpha\beta} = D_s^\alpha + D_s^\beta$, $s = \overline{1, S}$, $D_s^\alpha, D_s^\beta \in \{1, M\}$, где D_s^α, D_s^β – составляющие числа $D^{\alpha\beta}$ для s -го варианта представления, обеспечивающего наблюдаемость задачи (S – общее число таких вариантов, M – общее количество измерительных каналов). Для наблюдаемости задачи необходимо, чтобы $D_s^\alpha \geq \gamma_\alpha$ и $D_s^\beta \geq \gamma_\beta$. Для всех наблюдаемых структур задача определения местоположения цели (без учёта ошибок измерений) имеет единственное решение. Для каждой наблюдаемой ИС формируется первичная оценка местоположения цели. Для анализа топологических особенностей полученного множества первичных отметок и построения результирующей отметки используется иерархический агломеративный алгоритм кластеризации.

До начала операции кластеризации необходимо определить количество кластеров Q в финальном разбиении. Выбор значения Q зависит от геометрии ТИС, условий наблюдения цели с учётом имеющейся статистики эксплуатации, данной ТИС и опыта оператора. Выбор производится как в ручном, так и в автоматическом режимах. Автоматический выбор значения Q осуществляется в зависимости от условий наблюдения цели и использует ряд параметров, задаваемых оператором. Также нужно отметить, что в автоматическом режиме выбор Q происходит для каждого набора измерений ТИС, тогда как в ручном режиме значение Q определяется один раз в начале сеанса работы ТИС. Автоматический выбор позволяет, с одной стороны, адаптироваться к конкретным услови-

ям наблюдения цели, с другой стороны, требует дополнительных вычислительных и временных ресурсов. Суть метода состоит в построении последовательных разбиений множества оценок на $Q^c \in \overline{Q^{\min}, Q^{\max}}$ кластеров и вычислении некоторой метрики, позволяющей оценить качество разбиения. Анализ полученных метрик позволяет выбрать параметр $Q^* \in \overline{Q^{\min}, Q^{\max}}$, соответствующий наилучшему разбиению в рамках выбранной метрики, здесь Q^{\min} , Q^{\max} - верхняя и нижняя граница количества кластеров в разбиении.

Обнаружение недостоверных каналов осуществляется путём анализа «вторичных» пеленгов полученных кластеров. Выбор приоритетного кластера определяет набор достоверных каналов. Таким образом, результатом реализации КВМ является формирование вектора скорректированных измерений (в него включаются только первичные пеленги достоверных каналов) и соответствующей ему результирующей оценки местоположения цели.

Реализация КВМ на базе пространственных отметок сопряжена со значительными вычислительными затратами, поэтому была предложена двухэтапная модификация базового метода. На первом этапе осуществляется построение множества наблюдаемых ИС только на базе азимутальных измерительных каналов. Определяется набор достоверных азимутальных измерительных каналов и на втором этапе построение множества наблюдаемых пространственных ИС осуществляется с использованием угломестных и только достоверных азимутальных каналов. Такой подход существенно снижает требования к вычислительным ресурсам, так при пяти пеленгаторах и $\gamma_\alpha = 2$, $\gamma_\beta = 1$ и $D^\alpha = 3$ для двухэтапного варианта получаем 26 наблюдаемых ИС на первом этапе и 31 наблюдаемую ИС на втором вместо 806 наблюдаемых ИС для одноэтапного варианта.

Функционирование ТИС в условиях конфликта приводит к тому, что ограничение на максимальное количество каналов с АОИ может не выполняться. В такой ситуации КВМ не способен обеспечить достоверного обнаружения каналов с АОИ. Однако, КВМ можно рассматривать и использовать как модуль СППР. Метод осуществляет обработку поступающей информации, но не выбирает результирующий кластер (который определяет номера каналов с АОИ), а предоставляет оператору ряд кластеров с набором вычисленных параметров, необходимых для принятия решения. Оператор анализирует представленные параметры и на их основе с привлечением дополнительной информации (эвристический анализ, сведения от других систем и т.д.) осуществляет выбор результирующего кластера. Приведённый режим не позволяет получать оценки параметров ИРИ в режиме реального времени, однако вполне пригоден для принятия решения об изменении топологии ТИС или других мерах, позволяющих снизить количество каналов с АОИ.

В третьем разделе рассмотрены модели конфликтного взаимодействия в процессе наблюдения за ИРИ. Модель противоборства наблюдателя и противника позволяет оценить необходимый состав и параметры средств противоборствующих сторон до начала конфликта, а также получить оценку времени функционирования систем каждой из сторон.

Пусть $\{P_n\}_{n=1}^N = \{[x_n^p, y_n^p]\}_{n=1}^N$ - измерительные пункты ТИС, $\{S_m\}_{m=1}^M = \{[x_m^s, y_m^s]\}_{m=1}^M$ - пункты системы постановки помех (СПП), α_m - угол поворота сектора помех m -го пункта. Задачу наблюдателя можно записать следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} J(u_p, u_s) = |N - \mathbf{K}| \rightarrow \max_{u_p} \\ |\mathbf{K}| < \lfloor N/2 \rfloor + 1 \\ \forall i, j \in \overline{1, N}: \|P_i - P_j\| > B_{\min} \\ \forall i, j, k \in \overline{1, N}: \frac{y_k^p - y_i^p}{y_j^p - y_i^p} \neq \frac{x_k^p - x_i^p}{x_j^p - x_i^p} \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $|\mathbf{K}|$ - количество измерительных пунктов, находящихся в зоне помех, $u_p = [P_1 \dots P_N]$, $u_s = [\alpha_1, S_1 \dots \alpha_M, S_M]$, $\lfloor \bullet \rfloor$ - округление до целого в меньшую сторону, $\|\bullet\|$ - евклидова норма. Здесь выполнение условия $|\mathbf{K}| < \lfloor N/2 \rfloor + 1$ обеспечивает необходимое для функционирования ТИС количество рабочих измерительных пунктов (более половины общего количества). Оставшиеся два ограничения — это требования к топологии ТИС:

- B_{\min} - минимально допустимое расстояние между пунктами ТИС;
- никакие три измерительных пункта ТИС не должны лежать на одной прямой.

Значение целевой функции $J(u_p, u_s)$ представляет собой количество рабочих измерительных пунктов. Наблюдатель максимизирует это количество с учётом указанных ограничений. Задача противника состоит в её минимизации:

$$\left\{ \begin{array}{l} J(u_p, u_s) = |N - \mathbf{K}| \rightarrow \min_{u_s} \\ |\mathbf{K}| \geq \lfloor N/2 \rfloor + 1 \end{array} \right. . \quad (2)$$

Параметров, по которым проводится минимизация, у противника больше (позиция помехового пункта и угол поворота антенны), при этом всего одно ограничение. Условие $|\mathbf{K}| \geq \lfloor N/2 \rfloor + 1$ требует, чтобы для значения, обеспечивающего минимум целевой функции, количество измерительных пунктов ТИС, которым поставлена помеха, превышало половину от общего их числа (только в этом случае ТИС становится неработоспособной).

Предложенная теоретико-игровая модель кооперативного поиска позволяет находить позиции размещения пунктов ТИС с целью получения наилучших (в смысле рассмотренных критериев) условий наблюдения ИРИ в конкретной рабочей области.

Пусть $\{P_n\}_{n=1}^N = \{[x_n^p, y_n^p]\}_{n=1}^N$ - измерительные пункты ТИС, $P_n \in \mathbf{P}$, где $\mathbf{P} = \{[x, y]: 0 \leq x \leq 1, -1 \leq y \leq 0\}$ - область размещения пунктов ТИС. Рабочая область $\mathbf{S} = \{[x, y]: 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$ - это регион, в котором ожидается появление целей. Задача состоит в поиске размещения пунктов ТИС, при котором будет обеспечено корректное наблюдение целей, расположенных в рабочей области. Для решения задачи используется многопользовательская потенциальная игра с ограниченным набором действий. Поиск расположения пунктов ТИС основан на двух критериях: максимизация расстояния между пунктами и максимизация косинуса угла между пеленгами для каждой пары пунктов ТИС.

С учётом указанных критериев максимизации расстояния и учёта углов визирования функция глобальной полезности будет выглядеть следующим образом:

$$\Phi(a) = \Phi(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N) = \min_{i, j \in \{1, \dots, N\}} (\|\mu_i - \mu_j\|) \sum_{i, j \in \{1, \dots, N\}, g \in \mathbf{S}_k} [1 - f(\mu_i, \mu_j, g)], \quad (3)$$

где $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N \in \mathbf{P}_m$ - позиции, в которые перемещаются пункты ТИС в результате действий a_1, a_2, \dots, a_N , \mathbf{P}_m - узлы сетки на \mathbf{P} , \mathbf{S}_k - узлы сетки на \mathbf{S} ,

$$f(\mu_i, \mu_j, g) = \left| \frac{\|g - \mu_i\|^2 + \|g - \mu_j\|^2 - \|\mu_i - \mu_j\|^2}{2\|g - \mu_i\|\|g - \mu_j\|} \right| - \text{модуль косинуса угла между пеленгами}$$

цели g из позиций μ_i и μ_j . Набор действий $C_{a_i(t-1)}$ (позиций для перемещения), доступных i -му агенту в момент времени t , зависит от его текущей позиции и выбирается из некоторой её окрестности. Каждый агент для позиций $\hat{a}_i \in C_{a_i(t-1)}$ проводит расчёт вероятностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(a_i(t) = a_i(t-1)) = \frac{e^{\frac{1}{\tau}U_i(a(t-1))}}{e^{\frac{1}{\tau}U_i(a(t-1))} + e^{\frac{1}{\tau}U_i(\hat{a}_i, a_{-i}(t-1))}} \\ P(a_i(t) = \hat{a}_i) = \frac{e^{\frac{1}{\tau}U_i(\hat{a}_i, a_{-i}(t-1))}}{e^{\frac{1}{\tau}U_i(a(t-1))} + e^{\frac{1}{\tau}U_i(\hat{a}_i, a_{-i}(t-1))}} \end{array} \right. , \quad (4)$$

где τ характеризует вероятность выбора неправильного действия агентом. Отметим, что при расчёте вероятностей i -м агентом полагаем, что остальные агенты не осуществляют смену позиции. В соответствии со значениями полученных вероятностей агент перемещается или остаётся на месте.

В четвёртом разделе приводятся результаты моделирования существующих методов оценивания и их сравнения по качеству оценивания местоположения ИРИ и времени обработки. Дан сравнительный анализ КВМ и классических методов оценивания (ММП и РММП). Проведён анализ эффективности комбинированного применения фильтрации Калмана и КВМ, выполнен сравнительный анализ результатов фильтрации классическим методом и методом с использованием КВМ. Проведено сравнение результатов работы КВМ и нейросетевого подхода, отмечены сильные и слабые стороны рассмотренных методов. Также для оптимизационных модификаций КВМ проведено сравнение базового КВМ (с ручным и автоматическим режимом выбором количества кластеров в разбиении), двухэтапного КВМ и эвристического метода в условиях наличия недостоверных каналов, приведены характеристики качества оценивания и быстродействия методов. Проведено имитационное моделирование работы ТИС в условиях конфликта, предложен алгоритм расчёта времени успешного функционирования противоборствующих систем. Проведён анализ результатов кооперативного поиска размещений измерительных пунктов триангуляционной системы на базе теоретико-игрового подхода при использовании различных функций глобальной полезности.

Рассматривалась ТИС, состоящая из пяти позиций. Для сравнения качества оценки, получаемой при помощи разработанного КВМ, местоположение цели оценивалось ещё двумя методами: ММП и РММП (неизвестные АОИ включались в вектор оцениваемых параметров). При этом для РММП полагалось, что номера каналов с АОИ известны, а неизвестны лишь значения соответствующих АОИ, а для ММП были исключены из рассмотрения пеленгаторы, у которых хотя бы один измерительный канал (азимута или угла места) аномальный (в рассмотренном примере это Π_3 и Π_5). Сравнение проводилось для различных положений цели (использовано круговое размещение цели) в полярных координатах: $\varphi_{ц} \in \{3 \times i, i = \overline{1, 120}\}$, $\rho_{ц} \in \{50, 100, 150, 200, 250, 300, 350\} \times 10^3$ и $z_{ц} = 3 \times 10^3$.

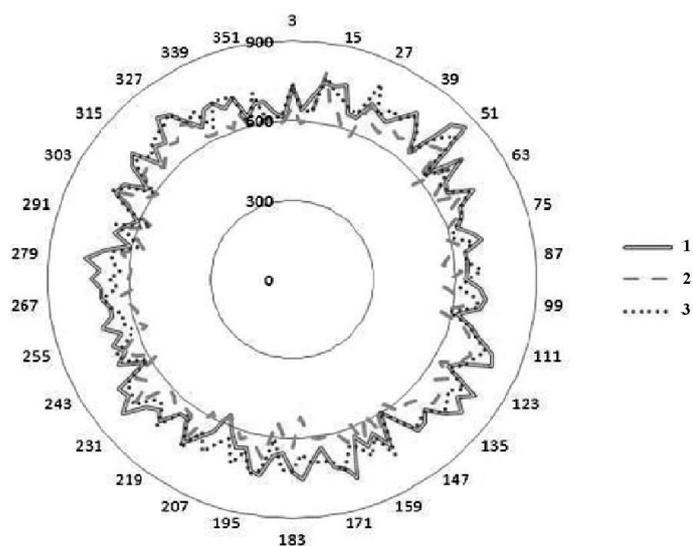


Рис. 1а. Усреднённая ошибка методов при отсутствии АОИ

Усреднение оценок производилось по 100 измерениям текущего положения цели с независимой шумовой составляющей. При этом флуктуационные составляющие ошибок азимутального и угломестного каналов считались распределёнными по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением 0.5° и 1° соответственно. Зависимость усреднённой ошибки оценивания (в метрах) местоположения цели от параметра $\varphi_{ц}$ для трёх методов КВМ, ММП и РММП при $\rho_{ц} = 50 \times 10^3$ и отсутствии АОИ приведена на рис. 1а (КВМ – 1, ММП – 2 и РММП – 3). Видно, что в нормальных условиях функционирования ТИС рассматриваемые методы сравнимы по точности.

Ситуация кардинально меняется, если ТИС функционирует в некорректных условиях (см. рис. 1б и 1в: для $\rho_{ц} = 50 \times 10^3$ и $\rho_{ц} = 200 \times 10^3$ соответственно, где на рис. 1б ошибка приведена в метрах, а на рис. 1в – в километрах). Видно, что только КВМ обеспечивает построение надёжной оценки для всех направлений визирования.

тирующей комбинацией будет та, невязка которой минимальна. Пеленги, не входящие в эту комбинацию, считаем аномальными.

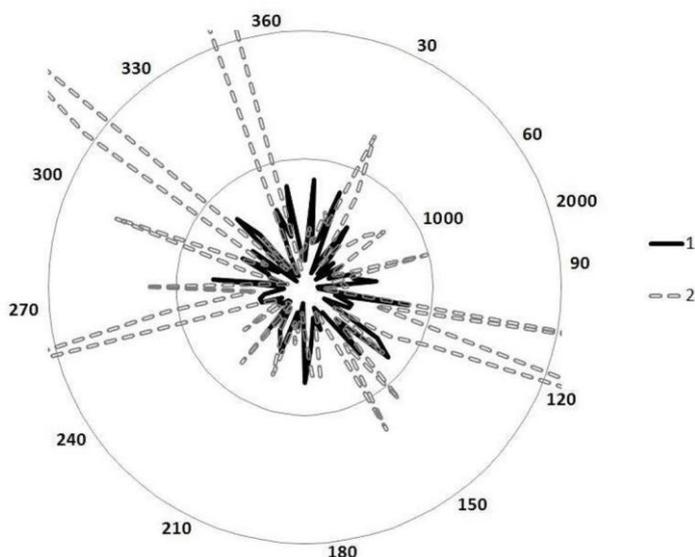


Рис. 2. Сравнение КВМ и ЭМ

Для общего случая зависимость усреднённой (по 30 измерениям) ошибки оценивания (в метрах) местоположения цели от параметра $\varphi_{ц} \in \{5 \times i, i = \overline{1, 72}\}$ для двух методов (КВМ и эмпирического метода (ЭМ)) при $\rho_{ц} = 50 \times 10^3$ приведена на рис. 2 (КВМ – 1, ЭМ – 2).

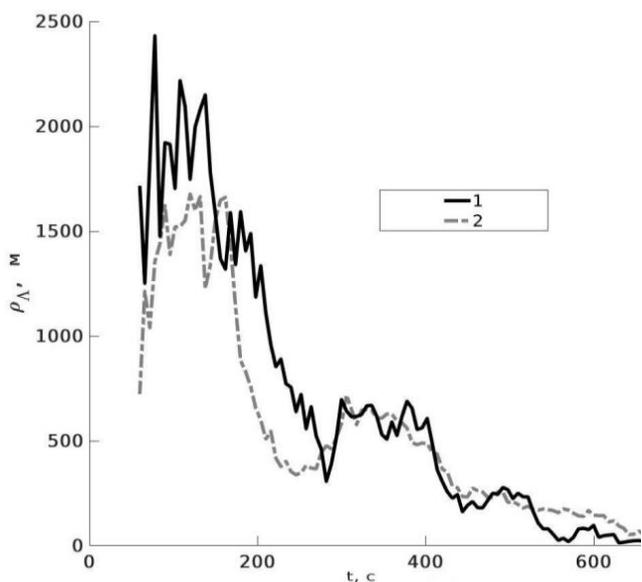


Рис. 3а. Оценка местоположения ИРИ

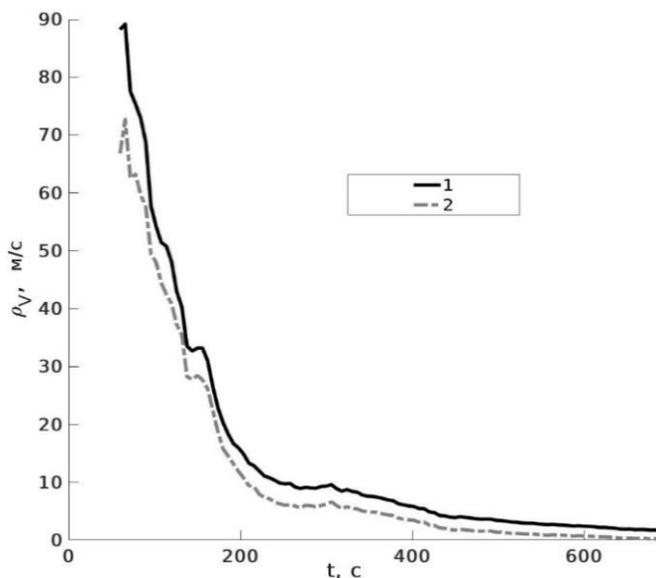


Рис. 3б. Оценка скорости ИРИ

На рис. 3а и 3б показаны результирующие погрешности оценивания (в евклидовой метрике) местоположения и скорости цели (на рисунках цифра 1 со-

ответствует КВМ при наличии АОИ, цифра 2 соответствует классическому методу при отсутствии АОИ). Из рис. 3а и 3б следует, что фильтр, построенный на базе КВМ, дает несмещённые оценки (при вхождении фильтра в стационарный режим оценивания) и незначительно проигрывает в точности классическому методу даже в аномальных условиях функционирования ТИС.

Была также проверена возможность реализации классического метода в аномальных условиях с использованием расширения пространства состояний (возможные АОИ всех десяти каналов включались в число фильтруемых координат вектора).

Результаты усреднённой фильтрации (по ста экспериментам) представлены на рис. 4а и 4б, где, по аналогии с рис. 3а и 3б, приводятся графики зависимости погрешности оценивания местоположения и скорости цели от времени. Сравнение рис. 3а, 3б и 4а, 4б показывает, что процедура расширения не обеспечивает хорошей устойчивости вычислительного процесса, при этом точность оценивания на базе КВМ существенно выше.

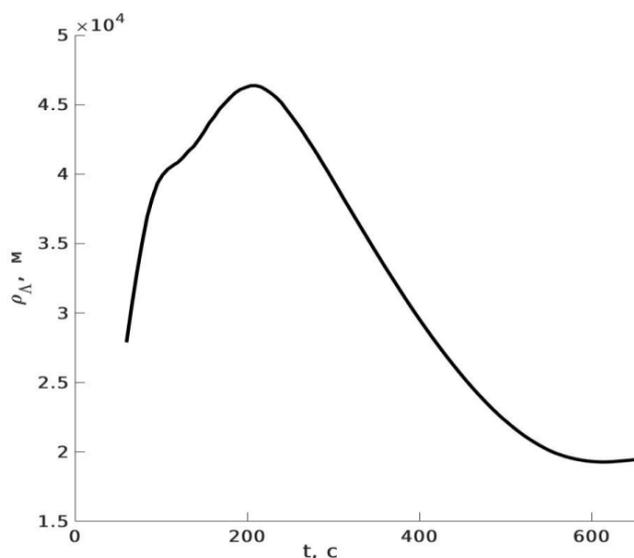


Рис. 4а. Оценка местоположения ИРИ с АОИ

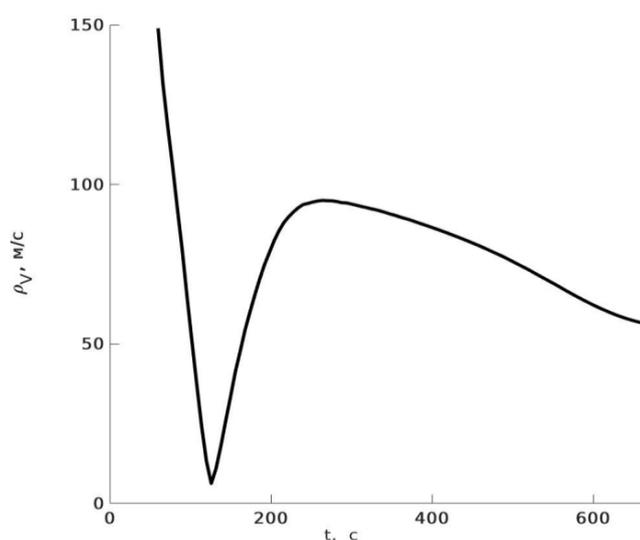


Рис. 4б. Оценка скорости ИРИ с АОИ

Для сравнительного анализа кластерных методов триангуляционного оценивания для ряда каналов вместо флуктуационных ошибок в угловые измерения вносились АОИ, которые формировались следующей процедурой.

1. Случайным образом выбиралось количество сбойных каналов от 0 до не более чем половины всех каналов;
2. Случайным образом определялись номера сбойных каналов;
3. Для сбойных каналов вместо флуктуационной ошибки формировалась ошибка из интервала от 3σ до $\frac{\pi}{6}$.

Указанная процедура выполнялась для каждого цикла формирования угловых измерений как по азимуту, так и по углу места. Нужно отметить, что все случайные величины в процедуре формирования АОИ имели равномерный закон распределения на соответствующих интервалах. Процедура оценивания проводилась 100 раз для каждого положения цели, затем полученные частные оценки усреднялись с целью получения результирующей оценки.

Результаты моделирования показали, что процедура автоматического выбора количества кластеров в разбиении составляет менее 10% от общего времени выполнения метода, при этом точность метода повысилась более чем на 20%. Двухэтапный вариант реализации КВМ позволил ускорить вычисления более чем в 7 раз, при этом наблюдалось падение точности до 20%.

Сравнение КВМ с многослойным персептроном показало, что КВМ позволяет получить более высокие показатели точности, однако сильно проигрывает по времени расчётов. Однако, нужно отметить, что время обучения нейросети не включалось в оценку времени работы нейросетевого метода. При изменении топологии ТИС необходимо создание новой обучающей выборки и проведения процедуры обучения на полученной выборке, тогда как КВМ не требует никакой адаптации при изменении топологии ТИС, что имеет существенное значение в случае передвижных пунктов.

Задача кооперативного поиска решалась при помощи механизма потенциальных игр. Проведённое моделирование показало, что предложенный теоретико-игровой подход позволяет находить оптимальное (в смысле указанных критериев) размещение пунктов ТИС при отсутствии препятствий. Метод позволяет агентам действовать в соответствии с особенностями окружающей обстановки и учитывает их возможности по перемещению. При этом информационное взаимодействие агентов обеспечивает желаемое состояние всей группы. Проводилось тестирование двух критериев оптимальности размещения, учитывающих как углы наблюдения цели, так и расстояния между измерительными пунктами. Траектории движения пунктов представлены на рис. 5.

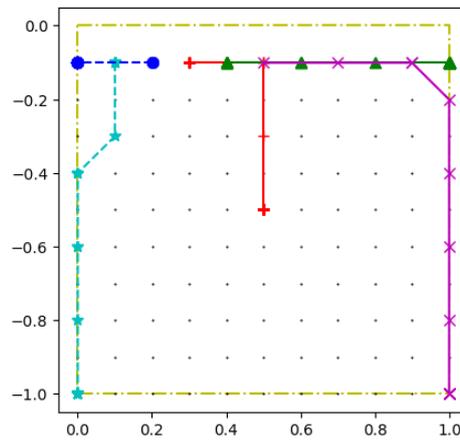


Рис.5. Движение пунктов в процессе
поиска размещения

Проведено имитационное моделирование функционирования ТИС в условиях конфликта. В рассмотренной модели противоборства наблюдателя и противника ТИС выступает в качестве наблюдателя и взаимодействует с СПП. Анализ полученных результатов показывает, что предложенный подход позволяет оценить время работы и вероятность победы ТИС/СПП или указать на недостаточность средств для осуществления противодействия. Указанная оценка доступна и в случае различных технических характеристиках пунктов и/или уровней подготовки экипажей. Алгоритм функционирования в условиях конфликта представлен на рис. 6.

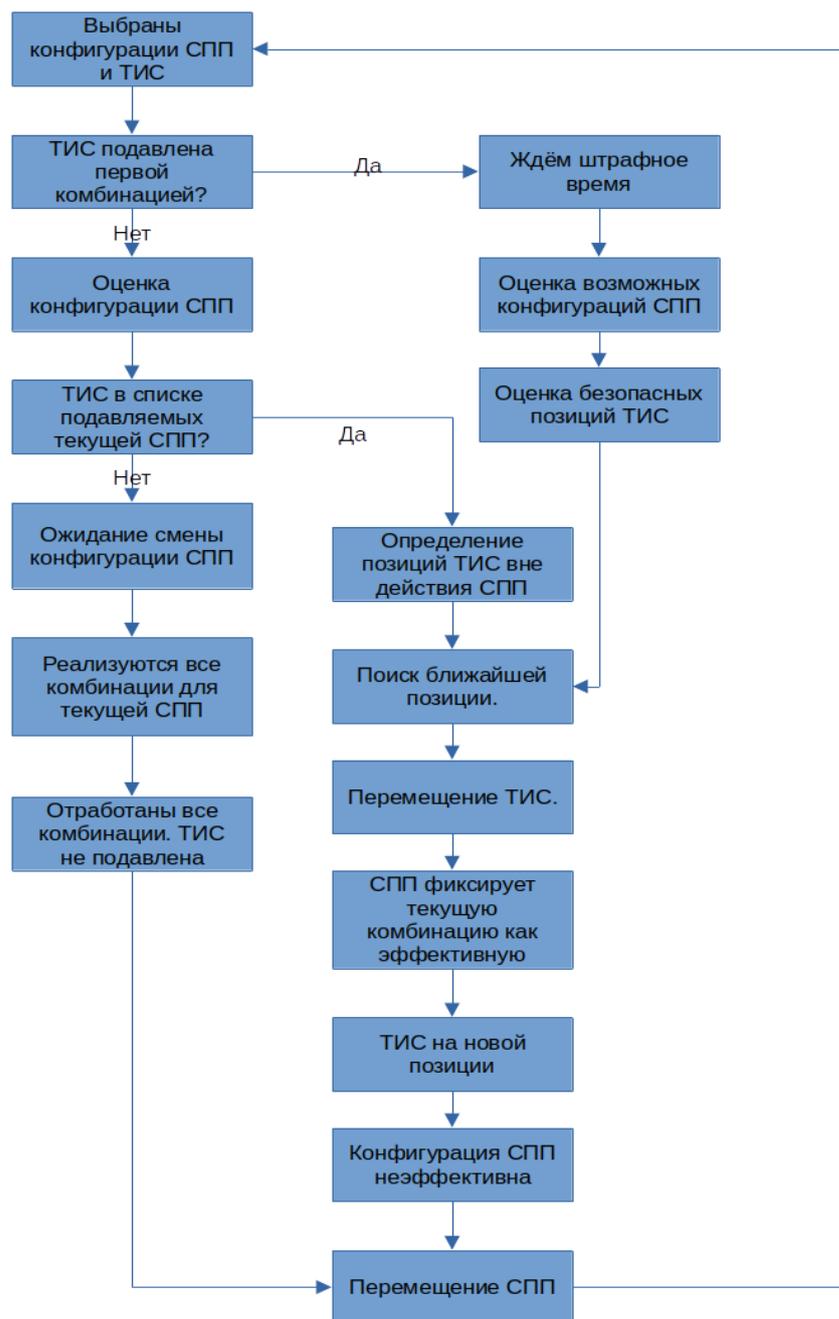


Рис. 6. Алгоритм противоборства ТИС/СПП

В заключении кратко формулируются основные научные, технические результаты и выводы, полученные в работе.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах из перечня изданий совета ЮФУ801.02.01, баз RSCI, Scopus и Web of Science

1. Substantiation of methods for optimal estimation of target motion parameters in triangulation location systems / Bulychev V. Y., Bulychev Y. G., Ivakina S. S., Nasenkov I. G., Nikolas P. I., Chepel E. N. // Journal of Computer and Systems

- Sciences International. – 2015. – Vol. 54, No. 4. – P. 593-608. – DOI 10.1134/S1064230715010049 (Scopus, RSCI)
2. Bulychev, Y. G. Cluster Variational-Selective Method of Passive Location for Triangulation Measuring Systems / Y. G. Bulychev, I. G. Nasenkov, E. N. Chepel // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2018. – Vol. 57, No. 2. – P. 179-196. – DOI 10.1134/S1064230717060041 (Scopus, RSCI)
 3. Bulychev, Y. G. Optimization of the Cluster-Variant Method of Constructing a Multi-Position Direction Finding System for Conditions of a Priori Uncertainty / Bulychev Y. G., Chepel E. N. // Automation and Remote Control. – 2023. – Vol. 84, No 4. – P. 412-423. - DOI: 10.1134/S0005117923040045 (Scopus, RSCI)
 4. Bulychev, Y. G. Multistructural Method of the Triangulation Estimation of the Motion Parameters of a Radiating Target under A Priori Indefiniteness Assumptions / Y. G. Bulychev, E. N. Chepel // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2019. – Vol. 58, No. 6. – P. 852-868. – DOI 10.1134/S106423071904004X (Scopus, RSCI)
 5. Bulychev, Y. G. Quasioptimal Method for Solving the Triangulation Problem in Prior Uncertainty / Bulychev Y. G., Chepel E. N. // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2017. – Vol. 53, No 6. – P. 604-611. – DOI: 10.3103/S8756699017060103. (Scopus)

Другие публикации

6. Булычев, Ю. Г. Методы решения задачи триангуляции и их сравнительный анализ / Ю. Г. Булычев, Е. Н. Чепель, А. В. Ячменев // Радиотехника. – 2019. – Т. 83, №10(16). – С. 17-21. – DOI 10.18127/j00338486-201910(16)-04
7. Булычев, Ю. Г. Интеллектуально-аналитический метод триангуляционного оценивания параметров движения излучающей цели при наличии недостоверных измерительных каналов / Ю. Г. Булычев, Е. Н. Чепель // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – №7. – С. 66-80
8. Теоретические и прикладные аспекты построения амплитудно-гиперболических систем пассивной локации излучающих целей / Ю. Г. Булычев, И. Г. Насенков, Е. Н. Чепель, А. В. Ячменев // Успехи современной радиоэлектроники. – 2018. – №7. – С. 42-53.
9. Булычев, Ю. Г. Модифицированный кластерно-вариационный метод триангуляционного оценивания в условиях неопределенности / Ю. Г. Булычев, В. Ю. Булычев, Е. Н. Чепель // Журнал радиоэлектроники. – 2021. – № 4. – DOI 10.30898/1684-1719.2021.4.8
10. Сравнительный анализ кластерно-вариационного и нейросетевого подходов в задаче триангуляционного оценивания при построении системы

мониторинга охранных зон газопроводов / Е. Н. Чепель, Ю. Г. Булычев, К. Н. Жучков, А. П. Завьялов // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2022. – № 4(585). – С. 6-11. – DOI 10.33285/2782-604X-2022-4(585)-6-11

11. Инновационное решение для мониторинга охранных зон газопроводов на основе численной реализации альтернативных методов триангуляции с учетом "овражности" целевых функций / Е. Н. Чепель, Ю. Г. Булычев, К. Н. Жучков, А. П. Завьялов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021. – № 8(577). – С. 36-53. – DOI 10.33285/0132-2222-2021-8(577)-36-53.
12. Использование функций с финитным носителем при оценке вибропараметрии узлов газоперекачивающего агрегата / Е. Н. Чепель, К. Н. Жучков, А. П. Завьялов, Ю. А. Гнездилова // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2023. – № 2(134). – С. 86-91. – DOI 10.33285/1999-6934-2023-2(134)-86-91

В сборниках трудов конференций

13. Булычев, Ю. Г. Метод пассивной локации на основе принципов "размножения" и кластеризации / Ю. Г. Булычев, В. Б. Тертышников, Е. Н. Чепель // СВЧ-техника и теплокоммуникационные технологии : [КрыМиКо 2016] : 26-я Международная Крымская конференция, 4-10 сентября 2016 г., Севастополь, Крым, Россия : материалы конференции : [в 13 т.]. Т. 1: Заказные и обзорные доклады, материалы 1-й Крымской школы для молодых ученых "Фундаментальные проблемы современной радиоэлектроники", секция компании "Таркус". – Москва [и др.], 2016. – С. 122-137.
14. Неклассический метод оценивания параметров движения излучающей цели на базе триангуляционной системы в условиях априорной неопределенности / Ю. Г. Булычев, И. А. Марченко, И. Г. Насенков, Е. Н. Чепель, А. В. Ячменев, Д. М. Шукало // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии : [КрыМиКо 2018] : 28-я Международная Крымская конференция, 9-15 сентября 2018 г., Севастополь, Крым, Россия : материалы конференции : Т. 7. Секция 9/1 : Радиоастрономия и дистанционное зондирование; Секция 9/2 : Распространение радиоволн, обработка информации; Секция 9/3 : Обработка сигналов в системах дистанционного зондирования. – Москва [и др.], 2018. – С. 1687- 1696.
15. Анализ альтернативных методов триангуляционного оценивания параметров движения цели / Ю. Г. Булычев, В. Ю. Булычев, С. С. Ивакина, П. И. Николас, Е. Н. Чепель // Радиолокация, навигация и связь : XX Международная научно-техническая конференция, 15-17 апреля 2014 г., Воронеж, Россия : [сборник докладов конференции "RLNC 2014"] : Т. 2.

Секции 4, 5, 6, 7, 20. Секции 11, 12. Секции 16, 17. – Воронеж : САКВОЕЕ, 2014. – С. 1184-1196.

Чепель Евгений Николаевич

Модели наблюдения за движущейся целью в условиях неопределённости,
активности агентов и их противоборства

Автореф. дисс. на соискание учёной степени канд. техн. наук

Подписано в печать _____ Заказ № _____

Формат 60×84/32. Усл. печ. л. 0.7. Тираж _____ экз.

Типография _____