

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

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук, профессор
Угольницкий Г.А.

Ростов-на-Дону

2024

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 МОДЕЛИ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ЦЕЛЬЮ С УЧЁТОМ АКТИВНОСТИ АГЕНТОВ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	16
1.1. Анализ существующих методов оценивания местоположения излучающей цели для триангуляционных измерительных систем	16
1.1.1 Постановка задачи.....	16
1.1.2 Основные используемые геометрические соотношения	20
1.1.3 Анализ нелинейных методов максимального правдоподобия.....	23
1.1.4 Анализ линейных методов максимального правдоподобия.....	26
1.1.5 Анализ линейных квазиоптимальных методов	30
1.1.6 Анализ нейросетевого метода	34
1.1.7 Сравнительный анализ оптимальных и квазиоптимальных методов оценивания положения ИЦ для ТИС	37
1.1.8 Проблемы применения методов оценивания в аномальных условиях функционирования ТИС	40
1.2 Модели управления активными организационными системами специального назначения	41
1.2.1 Основные понятия.....	42
1.2.2 Базовые модели.....	44
1.2.3 Задача управления.....	47
1.2.4 Механизмы управления	48
1.2.5 Организационные системы специального назначения	51
Выводы.....	54
2 КЛАСТЕРНО-ВАРИАЦИОННЫЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЦЕЛИ ДЛЯ ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ	55
2.1 Модели, ограничения, понятия	57
2.2 Формирование рабочих измерительных структур и соответствующих им оценок	59
2.3 Кластеризация и вычисление параметров кластеров.....	61
2.4 Обнаружение недостоверных каналов, коррекция аномальных измерений, формирование результирующей оценки.....	65
2.5 Алгоритм определения оптимального количества кластеров в разбиении	66
2.6 Оценивание параметров движения излучающей цели КВМ.....	67
2.7 Двухэтапная реализация КВМ	71
2.8 Роль оператора в алгоритмах обработки информации ТИС	73
Выводы.....	74
3 МОДЕЛИ КОНФЛИКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛЬЮ	76

3.1	Задача противоборства наблюдателя и противника.....	76
3.1.1	Обобщённый алгоритм функционирования	77
3.1.2	Формализация задачи.....	80
3.1.3	Алгоритм противодействия.....	83
3.2	Задача кооперативного поиска позиций размещения измерительных пунктов ТИС.....	90
3.2.1	Постановка задачи.....	90
3.2.2	Теоретико-игровая модель	92
3.2.3	Алгоритмы управления.....	94
	Выводы.....	95
4	РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	96
4.1	Оценивание местоположения ИРИ.....	96
4.2	Оценивание параметров движения ИРИ.....	104
4.3	Сравнительный анализ одно- и двухэтапного вариантов КВМ.....	107
4.4	Сравнение КВМ и нейросетевого подхода	110
4.5	Имитационное моделирование противоборства наблюдателя и противника	113
4.6	Кооперативный поиск позиций размещения измерительных пунктов ТИС	119
	Выводы.....	128
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	130
	СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	131
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Анализ показывает, что интерес к теории и практике построения однопозиционных, двухпозиционных и многопозиционных систем пассивной локации не ослабевает и по настоящее время [1-33]. Рассматриваются системы как со стационарными, так и с подвижными позициями. Триангуляционный метод пассивной локации эффективен с технико-экономической точки зрения и прост при практической реализации. Обработка данных в триангуляционной измерительной системе (ТИС) осуществляется при помощи оптимальных и квазиоптимальных процедур оценивания, основанных на использовании как прямых, так и косвенных измерений. Существующие подходы к решению задачи оценивания местоположения и параметров движения источника радиоизлучения (ИРИ) в триангуляционной измерительной системе широко представлены в известных работах по пассивной локации и радиопеленгации [1-7,80]. Основу таких процедур оценивания составляют классические методы: метод максимального правдоподобия (ММП), метод наименьших квадратов (МНК) и методы минимума различных геометрических и кинематических невязок. На практике, в связи с существенной нелинейностью задачи, применяются квазиоптимальные реализации оптимальных алгоритмов с использованием различного рода итерационных процедур.

Современные ТИС представляют собой сложные организационно-технические системы (ОТС) реального масштаба времени, состоящие из оборудования приема, обработки и передачи информации, средств автоматизации и управления как отдельных измерительных позиций, так и системы в целом. Интенсивное развитие телекоммуникационных технологий, в частности, систем радиосвязи, приводит к ситуации дефицита радиочастотного ресурса. Нередки случаи, когда различные службы радиосвязи вынуждены работать в одной полосе частот, в связи с чем возникает проблема электромагнитной совместимости. Множество разнородных источников радиосигналов порождает сложную радиоэлектронную обстановку, которая оказывает воздействие на антенные системы пози-

ций ТИС, формируя смешанный поток сигналов различных источников и помех естественного и искусственного происхождения. Это, в свою очередь, приводит к неоднозначному характеру обработки сигналов на всех этапах и сопровождается существенным уровнем аномальных измерений. Указанная ситуация характеризуется существенным уровнем априорной неопределенности [21,25]: отсутствие достоверных знаний о законах распределения случайных ошибок измерений, искажение и пропадание пеленгов (отсутствие прямой видимости цели и возникновение явлений интерференции), сбои и отказы аппаратуры, «деградация» структуры системы (выход из строя отдельных позиций ТИС), появление помех естественного и искусственного происхождения (например, в условиях конфликта [10, 19, 20]) и др. Кроме того, конфликтное взаимодействие является характерным условием функционирования ТИС для некоторых областей применения. Соответственно, 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. Оценка потенциальных возможностей достижения успеха участниками конфликта является одной из задач, возникающей в процессе исследования. Существенным условием достижения успеха какой-либо из сторон является наличие информационного обеспечения, необходимого для оценки текущей ситуации и эффективного управления.

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 помехозащищенности ТИС и устойчивости к конфликтным взаимодействиям. Функционирование ТИС в условиях конфликта повышает роль оператора в процессе обработки информации и формировании управляющих воздействий. 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 итогово-

вой оценки или принимаются другие решения, призванные снизить влияние преднамеренных воздействий противоборствующей стороны. Иначе говоря, уровень квалификации оператора имеет 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.

Задачей ТИС является обеспечение смежных систем информацией о средствах противника. Для успешного решения поставленной задачи требуется учесть следующие моменты:

1. Способность ТИС функционировать в условиях структурной неопределенности с возможностью выявления неисправных измерительных каналов;
2. Участие в процедуре оценивания опытного оператора;
3. Учёт технических особенностей измерительных пунктов и квалификации экипажей в процессе формирования управляющих воздействий;
4. Способность ТИС формировать помехоустойчивые конфигурации имеющимися средствами с учётом особенностей окружающей обстановки.

Решению ряда вопросов, а именно: разработке интеллектуально-аналитического метода информационного обеспечения оператора ТИС в условиях конфликтного взаимодействия, исследованию моделей формирования управляющих воздействий с целью повышения помехоустойчивости, учёту влияния квалификации и работоспособности экипажей пунктов ТИС на эффективность работы ОТС специального назначения и посвящена настоящая диссертация.

В диссертации содержатся результаты исследований по оптимизации методов информационного обеспечения, связанные с вопросами оценивания местоположения и параметров движения ИРИ на базе многопозиционной ТИС с использованием прямых и косвенных измерений, основанные на максимально возмож-

ном «размножении» промежуточных оценок, позволяющие проводить обнаружение недостоверных измерительных каналов при работе ТИС в условиях информационного конфликта с учётом требований к вычислительным ресурсам и оперативности вычислений. Полагая предложенный интеллектуально-аналитический метод информационного обеспечения составной частью СППР, предложена модель противоборства двух участников информационного конфликта, которая на основе предоставляемых СППР рекомендаций позволяет получить оценку потенциальных возможностей достижения успеха участниками конфликта с учётом уровня подготовки экипажей и особенностей взаимодействия с техническими средствами в процессе выполнения поставленных задач. Также предложена теоретико-игровая модель кооперативного поиска размещения пунктов, которая позволяет экипажам осуществлять поиск рабочей позиции в соответствии с особенностями окружающей обстановки и возможностями по перемещению с целью повышения помехоустойчивости системы в целом.

Из сказанного следует, что выбранное направление исследований является актуальным и определяет необходимость решения важной для теории и практики **научной задачи**, заключающейся в разработке моделей управления ОТС специального назначения, применение которых в совокупности с предложенным интеллектуально-аналитическим методом информационного обеспечения позволяет получить оценку потенциальных возможностей достижения успеха и сформировать управленческие решения, необходимые для надёжного функционирования многопозиционной ТИС в условиях информационного конфликта.

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.

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

Задачи исследования в диссертации:

1. Разработка кластерно-вариационного метода пассивной локации для многопозиционной ТИС и анализ его возможностей.
2. Разработка и исследование модели конфликтного взаимодействия в процессе наблюдения за ИРИ, построенной с использованием разработанного КВМ.
3. Разработка и исследование теоретико-игровой модели кооперативного поиска позиций размещения измерительных пунктов ТИС, позволяющей учитывать окружающую обстановку и возможности перемещения каждого пункта.
4. Разработка алгоритма комбинированного применения теории фильтрации Калмана и КВМ для оценивания параметров движения ИРИ.

5. 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.

Методы исследований

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.

1. 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.
2. 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.
3. Предложена и исследована модель кооперативного поиска размещения измерительных пунктов ТИС, которая при помощи теоретико-игрового под-

хода позволяет находить оптимальное (в смысле указанных критериев) размещение пунктов ТИС.

4. 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.
5. 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:

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

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

Результаты диссертации успешно реализованы при разработке программного обеспечения в рамках ОКР «Москва-1». Внедренные подходы позволили повысить помехоустойчивость и точность оценивания местоположения ИРИ.

Достоверность полученных результатов подтверждается 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.

Сведения о публикации и апробации результатов исследований

По теме диссертации опубликованы 11 научных работ [21,43,85,87-94], в том числе 9 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК: «Успехи современной радиоэлектроники» [90,91], «Известия РАН. Теория и системы управления» [21,43,88], «Автометрия» [92], «Автоматика и телемеханика» [87], «Журнал радиоэлектроники» [85], «Радиотехника» [89]. 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 натуральных испытаний и эксплуатации сложных технических комплексов», Великий Новгород, 29 июня - 1 июля 2016г.[95-99], а также в докладе на III научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения», Воронеж, 25 – 26 ноября 2015 г.

В работах, выполненных в соавторстве [21,43,85,87-94], автору принадлежат основные идеи 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 авторский вклад**: в работах [21,90] – 15%, [43, 85,89] – 35%, [88,91,92] – 50%, [87,93,94] – 65%.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанный КВМ позволяет работать в условиях неопределенности 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.
2. 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.
3. Теоретико-игровая модель кооперативного поиска позиций размещения измерительных пунктов ТИС позволяет получить множество размещений пунктов ТИС, являющихся оптимальными (в смысле рассмотренных крите-

риев наблюдаемости ИРИ). При этом модель позволяет агентам действовать в соответствии с особенностями окружающей обстановки и учитывает их возможности по перемещению.

4. Предложенный вариант модификации базового КВМ с разбиением процесса обнаружения недостоверных каналов на плоскостной и пространственный 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.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов и заключения. Она содержит 141 страницу машинописного текста, 62 рисунка, 9 таблиц и список использованных источников, включающий 102 наименования.

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 надежно 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. Результаты исследований опубликованы в [21,89,90].

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 потребле-

ния вычислительных и временных ресурсов приведена оптимизационная 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. Результаты исследований опубликованы в [43,85,87,92].

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. 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. Результаты исследований опубликованы в [...].

В четвертом 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). Проведен анализ эффективности комбинированного применения фильтрации Калмана и КВМ, проведен 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 выбора 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, на ос-

нове результатов работы КВМ предложен алгоритм расчёта времени успешного функционирования противоборствующих систем с учётом технического состояния составных частей ТИС и квалификации экипажей измерительных пунктов. Проведен анализ результатов кооперативного поиска размещений измерительных пунктов триангуляционной системы на базе теоретико-игрового подхода при использовании различных функций глобальной полезности.

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

1 МОДЕЛИ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ИЗЛУЧАЮЩЕЙ ЦЕЛЬЮ С УЧЁТОМ АКТИВНОСТИ АГЕНТОВ И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ существующих методов оценивания местоположения излучающей цели для триангуляционных измерительных систем

В работах [3-5,7,21,34,38,40-42] рассмотрен набор оптимальных и квази-оптимальных методов оценивания местоположения ИРИ на основе триангуляционных измерений. В зависимости от топологии ТИС, условий наблюдения цели и алгоритма численной оптимизации решение задачи приведенными методами может приводить к некорректным оценкам местоположения ИРИ [21,40]. Целевые функции, возникающие при решении задач триангуляции, как правило, являются функциями «овражного» типа, где кроме глобального экстремума имеют место и локальные экстремумы. Примером «овражной» функции считается функция Розенброка [44], для которой поиск точки глобального минимума является нетривиальной задачей. Для подобных функций направление поиска скачкообразно меняется при переходе от одного края «оврага» к другому и слабо приближается к точке глобального экстремума. Грубая оценка при выборе начального условия для таких целевых функций может привести к аномальным ошибкам оценивания или значительно увеличить время поиска решения. Указанные особенности целевой функции характерны для случаев попадания ИРИ в триангуляционно-некорректные области [40]. В таких случаях даже незначительные ошибки пеленгования могут привести к аномальным ошибкам местоопределения или существенно снизить скорость поиска решения. Снижение оперативности оценивания необходимо учитывать в ТИС, предназначенных для работы в реальном времени.

1.1.1 Постановка задачи

Будем использовать общую правую декартовую прямоугольную систему координат $Oxyz$, в которой местоположение пеленгаторов $\{\Pi_m\}_{m=1}^M$, задается векторами $\{\rho_m\}_{m=1}^M$, где $\rho_m = [\rho_m^x, \rho_m^y, \rho_m^z]^T$, а положение ИРИ – вектором $\mathbf{r}_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$. Начало системы координат $Oxyz$ может совпадать с геометрическим центром одного из пеленгаторов, входящих в состав ТИС, а её оси направлены так: ось Ox –

на север, ось Oy – на восток, ось Oz – дополняет оси Ox и Oy до правой системы координат. Наряду с ИРИ будем рассматривать произвольную точку P , которая далее ассоциируется с некоторой оценкой местоположения ИРИ. Положение данной точки в общей системе координат $Oxyz$ задается вектором $\mathbf{r} = [x, y, z]^T$, в местной $O_m x_m y_m z_m$ (которая связана с Π_m) – вектором $\mathbf{r}_m = [x_m, y_m, z_m]^T$ и в радиотехнической $O_m R_m \alpha_m \beta_m$ (также связана с Π_m) – вектором $\Lambda_m = [R_m, \alpha_m, \beta_m]^T$, где R_m – наклонная дальность до точки P , α_m – ее азимут, β_m – ее угол места. В зависимости от того, в какой системе координат рассматривается точка P (как и любые другие точки, вводимые далее), помимо P также будем использовать обозначения $P(\mathbf{r}) \sim P(x, y, z)$, $P(\mathbf{r}_m) \sim P(x_m, y_m, z_m)$ и $P(\Lambda_m) \sim P(R_m, \alpha_m, \beta_m)$. Применительно к Π_m азимут $\alpha_m \in [0, 2\pi]$ отсчитывается в плоскости $x_m O_m y_m$ от положительного направления оси $O_m x_m$ против часовой стрелки, а угол места $\beta_m \in [-\pi, \pi]$ отсчитывается от плоскости $x_m O_m y_m$, при этом $\beta_m \geq 0$ для любой точки P , находящейся не ниже плоскости $x_m O_m y_m$, в противном случае $\beta_m < 0$. Считаем, что одноименные оси систем координат $Oxyz$ и $O_m x_m y_m z_m$ совпадают. В системе координат $Oxyz$ на положения ИРИ могут накладываться ограничения типа

$$\mathbf{r} \in \mathfrak{M} = \{\mathfrak{M}_x, \mathfrak{M}_y, \mathfrak{M}_z\}, \quad (1.1.1)$$

где $\mathfrak{M}_x = [X_{\min}, X_{\max}]$, $\mathfrak{M}_y = [Y_{\min}, Y_{\max}]$ и $\mathfrak{M}_z = [Z_{\min}, Z_{\max}]$ – диапазоны возможного изменения величин x , y и z , задающие некоторое множество допустимости координат ИРИ. Для связи двух местных систем координат $O_m x_m y_m z_m$ и $O_m R_m \alpha_m \beta_m$ будем использовать известные формулы

$$\begin{cases} \alpha_m = \arccos \left\{ (x - \rho_m^x) \bar{R}_m^{-1} \right\}, \\ \beta_m = \arcsin \left\{ (z - \rho_m^z) R_m^{-1} \right\}, \\ \bar{R}_m = \left[(x - \rho_m^x)^2 + (y - \rho_m^y)^2 \right]^{1/2}, \\ R_m = \left[(x - \rho_m^x)^2 + (y - \rho_m^y)^2 + (z - \rho_m^z)^2 \right]^{1/2} \end{cases}, \quad (1.1.2)$$

где \bar{R}_m – горизонтальная дальность. С учетом того, что пеленгаторы не могут самостоятельно определять дальности \bar{R}_m и R_m , вектор измерений ТИС традиционно представляется в виде $\tilde{\boldsymbol{\eta}}_0 = [\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{m0}^T, m = \overline{1, M}]^T$, где $\tilde{\boldsymbol{\eta}}_{m0} = [\tilde{\alpha}_{m0}, \tilde{\beta}_{m0}]^T$, $\tilde{\alpha}_{m0}$ и $\tilde{\beta}_{m0}$ – соответственно измерения азимута $\alpha_{m0} = \alpha_m(\mathbf{r}_0)$ и угла места $\beta_{m0} = \beta_m(\mathbf{r}_0)$ ИРИ относительно Π_m (стационарного или мобильного). Для рассматриваемой ТИС воспользуемся широко используемой на практике моделью наблюдений:

$$\tilde{\boldsymbol{\eta}}_0 = \boldsymbol{\eta}_0 + \boldsymbol{\xi}_0, \quad (1.1.3)$$

где $\boldsymbol{\eta}_0 = [(\alpha_{m0}, \beta_{m0}), m = \overline{1, M}]^T$ – вектор истинных угловых координат ИРИ относительно всех пеленгаторов, $\boldsymbol{\xi}_0 = [\boldsymbol{\xi}_{m0}^T]^T = [(\xi_{\alpha m0}, \xi_{\beta m0}), m = \overline{1, M}]^T$ – вектор реальных ошибок измерений всех пеленгаторов, $\boldsymbol{\xi}_{m0} = [\xi_{\alpha m0}, \xi_{\beta m0}]^T$. Если возможную ошибку измерений рассматривать как случайную величину (принимая значения ξ из заданного множества допустимости), характеризуемую плотностью вероятности $f(\xi)$, то с учетом независимости угломерных ошибок пеленгаторов (разнесенных в пространстве) можно принять

$$f(\boldsymbol{\xi}) = \prod_{m=1}^M f_m(\boldsymbol{\xi}_m), \quad (1.1.4)$$

где $f_m(\boldsymbol{\xi}_m)$ – закон распределения ошибок измерений в Π_m , $\boldsymbol{\xi}_m = [\xi_{\alpha m}, \xi_{\beta m}]^T$.

Наилучшая (в статистическом смысле) оценка \mathbf{r}^* местоположения ИРИ соответствует нелинейному методу максимума апостериорной плотности вероятности:

$$\mathbf{r}^* = \arg \max_r f(\mathbf{r} | \tilde{\boldsymbol{\eta}}_0), \quad (1.1.5)$$

где $f(\mathbf{r} | \tilde{\boldsymbol{\eta}}_0)$ – апостериорная плотность вероятности случайных координат точки P при фиксированном наблюдении $\tilde{\boldsymbol{\eta}}_0$. Как правило, выражение (1.1.5) не используется в реальных задачах триангуляционного оценивания, а применяется лишь для выявления потенциальных возможностей. Это же относится и к оценке максимального правдоподобия:

$$\mathbf{r}^* = \arg \max_{\mathbf{r}} p(\tilde{\mathbf{q}}|\mathbf{r}), \quad (1.1.6)$$

где $p(\tilde{\mathbf{q}}|\mathbf{r})$ – функция правдоподобия (плотность вероятности, характеризующая веса всех возможных выборок случайного вектора наблюдений из соответствующего множества допустимости при условии, что истинное положение ИРИ соответствует точке P).

В отличие от (1.1.5) в выражении (1.1.6) не привлекается статистической информации об априорной плотности вероятности $f(r)$ возможного положения ИРИ. На практике в выражении (1.1.4), как правило, полагают $f_m(\xi_m) = f(\xi_m)$ и, кроме того, ограничиваются гауссовской плотностью вероятности

$$f(\xi) = (2\pi)^{-M} \sqrt{\prod_{m=1}^M |C_m|} \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M \xi_m^T C_m \xi_m\right\}, \quad (1.1.7)$$

где $|C_m|$ – определитель квадратной матрицы C_m второго порядка, обратной по отношению к корреляционной матрице $\mathbf{K}_{\xi_m} = M\{\xi_m \xi_m^T\}$ ошибок измерений пеленгатора Π_m , характеризуемых математическим ожиданием $M\{\xi_m\} = 0$. В дальнейшем будем использовать наиболее распространенную запись закона распределения ошибок измерений в ТИС с диагональной матрицей $\mathbf{K}_{\xi_m} = \text{diag}[\sigma_{\alpha m}^2, \sigma_{\beta m}^2]$:

$$f(\xi) = V_0 \exp\left\{-\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M (\sigma_{\alpha m}^{-2} \xi_{\alpha m}^2 + \sigma_{\beta m}^{-2} \xi_{\beta m}^2)\right\}, \quad (1.1.8)$$

где $V_0 = (2\pi)^{-M} \sqrt{\prod_{m=1}^M \sigma_{\alpha m}^{-2} \sigma_{\beta m}^{-2}}$. Выражения (1.1.1) – (1.1.8) используются при разработке известных оптимальных и квазиоптимальных методов триангуляционного оценивания, о которых речь пойдет в дальнейшем.

Далее мы ограничимся случаем (1.1.8), как наиболее распространенным на практике [1], а сделанные на его основе выводы во многом соответствуют и другим законам распределения ошибок пеленгования применительно к общим случаям (1.1.5), (1.1.6) и (1.1.7).

1.1.2 Основные используемые геометрические соотношения

С каждым Π_m и измерениями $\tilde{\alpha}_{m0}$, $\tilde{\beta}_{m0}$ можно связать две поверхности положения, описываемые уравнениями

$$\begin{cases} (x - \rho_m^x) \sin \tilde{\alpha}_{m0} + (y - \rho_m^y) \cos \tilde{\alpha}_{m0} = 0, \\ (x - \rho_m^x)^2 (\cos \tilde{\beta}_{m0})^{-2} + (y - \rho_m^y)^2 (\cos \tilde{\beta}_{m0})^{-2} - (z - \rho_m^z)^2 (\sin \tilde{\beta}_{m0})^{-2} = 0. \end{cases} \quad (1.1.9)$$

В (1.1.2.1) первое уравнение, соответствующее $\tilde{\alpha}_{m0}$, описывает азимутальную плоскость, а второе уравнение, соответствующее $\tilde{\beta}_{m0}$ – круговой конус.

Каждому вектору $\tilde{\mathbf{n}}_{m0} = [\tilde{\alpha}_{m0}, \tilde{\beta}_{m0}]^T$ первичных измерений Π_m поставим в соответствие единичный направляющий вектор $\tilde{\mathbf{e}}_{m0} = [\tilde{e}_m^x, \tilde{e}_m^y, \tilde{e}_m^z]^T$ линии визирования (ЛВ_m), а также вектор $\tilde{\mathbf{e}}_{m0}^{xy}$, являющийся проекцией $\tilde{\mathbf{e}}_{m0}$ на плоскость $O_m x_m y_m$. Очевидно, что

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{e}}_{m0} = [\cos \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}, \sin \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}, \sin \tilde{\beta}_{m0}]^T, & \|\tilde{\mathbf{e}}_{m0}\| = 1, \\ \tilde{\mathbf{e}}_{m0}^{xy} = [\cos \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}, \sin \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}, 0]^T. \end{cases} \quad (1.1.10)$$

ЛВ_m в общей системе координат $Oxyz$ можно характеризовать двумя ортогональными касательными (к поверхностям положения) плоскостями. Первая из них является касательной плоскостью к круговому конусу, соответствующему углу места $\tilde{\beta}_{m0}$, а вторая совпадает с азимутальной плоскостью и соответствует азимуту $\tilde{\alpha}_{m0}$.

В местной системе координат уравнение первой плоскости описывается уравнением

$$\left(\frac{\cos \tilde{\alpha}_{m0}}{\cos \tilde{\beta}_{m0}} \right) x_m + \left(\frac{\sin \tilde{\alpha}_{m0}}{\cos \tilde{\beta}_{m0}} \right) y_m - \left(\frac{1}{\sin \tilde{\beta}_{m0}} \right) z_m = 0. \quad (1.1.11)$$

Перейдем от (1.1.11) к нормальному уравнению касательной плоскости в общей системе координат

$$l_{\beta m}^1 x + l_{\beta m}^2 y + l_{\beta m}^3 z = p_{\beta m}, \quad (1.1.12)$$

где $(l_{\beta m}^1, l_{\beta m}^2, l_{\beta m}^3)$ – единичный вектор нормали к плоскости,

$$p_{\beta m} = l_{\beta m}^1 \rho_m^x + l_{\beta m}^2 \rho_m^y + l_{\beta m}^3 \rho_m^z, \quad (1.1.13)$$

$$\begin{cases} l_{\beta m}^1 = \pm \cos \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} \\ l_{\beta m}^2 = \pm \sin \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} \\ l_{\beta m}^3 = \mp \cos \tilde{\beta}_{m0} \end{cases} \quad (1.1.14)$$

Знаки + и – в (1.1.14) выбираются так, чтобы выполнялось условие $p_{\beta m} \geq 0$, в этом случае параметр $p_{\beta m}$ имеет смысл расстояния от начала общей системы координат $Oxyz$ до плоскости (1.1.12).

Нормальное уравнение второй плоскости задается в виде

$$l_{\alpha m}^1 x + l_{\alpha m}^2 y + l_{\alpha m}^3 \rho_m^z = p_{\alpha m}, \quad (1.1.15)$$

где $(l_{\alpha m}^1, l_{\alpha m}^2, l_{\alpha m}^3)$ – единичный вектор нормали к плоскости,

$$p_{\alpha m} = l_{\alpha m}^1 \rho_m^x + l_{\alpha m}^2 \rho_m^y, \quad (1.1.16)$$

$$\begin{cases} l_{\alpha m}^1 = \pm \sin \tilde{\alpha}_{m0} \\ l_{\alpha m}^2 = \mp \cos \tilde{\alpha}_{m0} \\ l_{\alpha m}^3 = 0 \end{cases} \quad (1.1.17)$$

Выбор знаков также соответствует условию $p_{\alpha m} \geq 0$.

Рассмотрим рис. 1.1.1, на котором применительно к Π_m представлена местная система координат $O_m x_m y_m z_m$ и интересующие нас геометрические объекты (с целью наглядности индекс m везде опущен). Здесь вводятся следующие объекты: \overrightarrow{OE} – направляющий вектор ЛВ _{m} (соответствует $\hat{e}_{m0} = [\hat{e}_m^x, \hat{e}_m^y, \hat{e}_m^z]^T$), $\overrightarrow{OE_{xy}}$ – вектор, являющийся проекцией \overrightarrow{OE} на горизонтальную плоскость (соответствует \hat{e}_{m0}^{xy}), $OKLD$ – плоскость, в которой находятся векторы \overrightarrow{OE} и $\overrightarrow{OE_{xy}}$, \overrightarrow{OP} – вектор, соответствующий точке $P(x_m, y_m, z_m)$, $\overrightarrow{OP'}$ – вектор, соответствующий проекции этой точки на плоскость $OKLD$, $\overrightarrow{OP''}$ – вектор, соответствующий проекции точки P' на ЛВ _{m} .

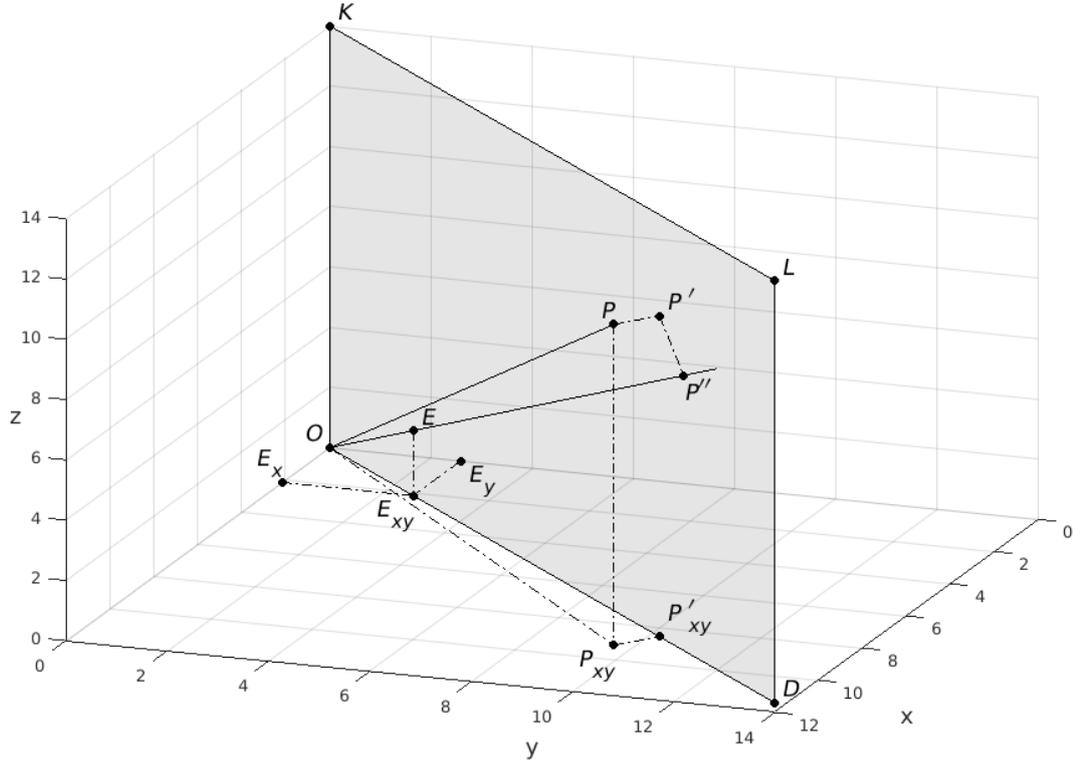


Рис. 1.1.1. Геометрия задачи

В местной системе координат $Oxyz$ точки P' и P'' характеризуются координатами $P'(x'_m, y'_m, z'_m)$ и $P''(x''_m, y''_m, z''_m)$, где

$$\begin{cases} x'_m = x_m \cos^2 \tilde{\alpha}_{m0} + y_m \cos \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\alpha}_{m0} \\ y'_m = x_m \cos \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\alpha}_{m0} + y_m \sin^2 \tilde{\alpha}_{m0} \\ z'_m = z_m \end{cases}, \quad (1.1.18)$$

$$\begin{cases} x''_m = x_m \cos^2 \tilde{\alpha}_{m0} \cos^2 \tilde{\beta}_{m0} + y_m \cos \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\alpha}_{m0} \cos^2 \tilde{\beta}_{m0} + z_m \cos \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} \\ y''_m = x_m \cos \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\alpha}_{m0} \cos^2 \tilde{\beta}_{m0} + y_m \sin^2 \tilde{\alpha}_{m0} \cos^2 \tilde{\beta}_{m0} + z_m \sin \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} \\ z''_m = x_m \cos \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} + y_m \sin \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} + z_m \sin^2 \tilde{\beta}_{m0} \end{cases}. \quad (1.1.19)$$

Принято следующее соответствие между измерениями $\tilde{\alpha}_{m0}$, $\tilde{\beta}_{m0}$, ошибками измерений $\xi_{\alpha m0}$, $\xi_{\beta m0}$ и углами, изображенными на фиг. 1: $\angle EOE_{xy}$ – угол места $\tilde{\beta}_{m0}$, $\angle E_x OE_{xy}$ – азимут $\tilde{\alpha}_{m0}$, $\angle P_{xy} OP'_{xy}$ и $\angle P' OP''$ – углы, характеризующие соответственно азимутальную $\xi_{\alpha m0}$ и угломестную $\xi_{\beta m0}$ ошибки для случая, когда точка P совпадает с ИРИ.

Далее нам потребуются два вектора единичной длины $\mathbf{n}_{am} = [\sin \tilde{\alpha}_{m0}, \cos \tilde{\alpha}_{m0}, 0]^T$ и $\mathbf{n}_{\alpha\beta m} = [\cos \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0}, \sin \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0}, -\cos \tilde{\beta}_{m0}]^T$. Вектор \mathbf{n}_{am} является единичной нормалью к плоскости $OKLD$, а вектор $\mathbf{n}_{\alpha\beta m}$ – единичной нормалью к $ЛВ_m$, при этом как нормаль $\mathbf{n}_{\alpha\beta m}$, так и $ЛВ_m$ лежат в плоскости $OKLD$.

Проецируя $ЛВ_m$ на нормали \mathbf{n}_{am} и $\mathbf{n}_{\alpha\beta m}$ соответственно, можно найти два расстояния d_{am} и $d_{\alpha\beta m}$, при этом d_{am} характеризует расстояние между точками P_{xy} и P'_{xy} , а $d_{\alpha\beta m}$ – расстояние между точками P' и P'' . Для квадратов этих расстояний справедливы следующие формулы

$$d_{am}^2 = (x_m \sin \tilde{\alpha}_{m0} - y_m \cos \tilde{\alpha}_{m0})^2, \quad (1.1.20)$$

$$d_{\alpha\beta m}^2 = (x_m \cos \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} + y_m \sin \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0})^2 + z_m^2 \cos^2 \tilde{\beta}_{m0} - 2z_m \sin \tilde{\beta}_{m0} (x_m \cos^2 \tilde{\alpha}_{m0} - y_m \sin \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}). \quad (1.1.21)$$

Формулы (1.1.9) – (1.1.21) были получены на основе математического аппарата аналитической геометрии. Далее они будут использованы при описании различных методов триангуляции.

1.1.3 Анализ нелинейных методов максимального правдоподобия

Для гауссовского закона распределения (1.1.8) правило (1.1.6) принимает вид (метод I – для случая неравноточных измерений):

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1^* &= \arg \max_{\mathbf{r}} \left[V_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M (\sigma_{am}^{-2} \xi_{am}^2(\mathbf{r}) + \sigma_{\beta m}^{-2} \xi_{\beta m}^2(\mathbf{r})) \right\} \right], \\ &= \arg \min_{\mathbf{r}} \mu_1 \sum_{m=1}^M (\sigma_{am}^{-2} \xi_{am}^2(\mathbf{r}) + \sigma_{\beta m}^{-2} \xi_{\beta m}^2(\mathbf{r})) \end{aligned} \quad (1.1.1)$$

где

$$\begin{cases} \xi_{am}^2(\mathbf{r}) = [\tilde{\alpha}_{m0} - \alpha_m(\mathbf{r})]^2 \\ \xi_{\beta m}^2(\mathbf{r}) = [\tilde{\beta}_{m0} - \beta_m(\mathbf{r})]^2 \end{cases} \quad (1.1.2)$$

– невязки измерений между реальными наблюдениями $\tilde{\alpha}_{m0}$, $\tilde{\beta}_{m0}$ (соответствующими \mathbf{r}_0) и модельными значениями $\alpha_m(\mathbf{r})$, $\beta_m(\mathbf{r})$ (зависящими от выбора точки

$P(\mathbf{r}) = P(x, y, z)$) и μ_1 – некоторый масштабный множитель, который не зависит от \mathbf{r} и, как показано далее, существенно влияющий на точность оценивания местоположения ИРИ.

Модельные значения $\alpha_m(\mathbf{r})$ и $\beta_m(\mathbf{r})$ рассчитываются по формулам:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_m(\mathbf{r}) = \begin{cases} \arccos\left(\frac{x - \rho_m^x}{\bar{R}_m}\right), 0 \leq \alpha_m(\mathbf{r}) < \pi \\ 2\pi - \arccos\left(\frac{x - \rho_m^x}{\bar{R}_m}\right), \pi \leq \alpha_m(\mathbf{r}) < 2\pi. \end{cases} \\ \beta_m(\mathbf{r}) = \arccos\left(\frac{\bar{R}_m}{R_m}\right), 0 \leq \beta_m(\mathbf{r}) < \pi/2 \end{array} \right. \quad (1.1.3)$$

Метод 1 нелинейный, применяется на практике в тех случаях, когда имеются достоверные априорные данные о статистических характеристиках ошибок измерений всех пеленгаторов ТИС и можно назначить соответствующие веса ($\sigma_{\alpha m}^{-2}$ и $\sigma_{\beta m}^{-2}$) невязкам измерений. Он приводит к рекуррентной процедуре оценивания и предполагает, как правило, выбор хорошего начального условия для вектора \mathbf{r} . В силу «овражности» целевой функции

$$J_1(\mathbf{r}) = \mu_1 \sum_{m=1}^M (\sigma_{\alpha m}^{-2} \xi_{\alpha m}^2(\mathbf{r}) + \sigma_{\beta m}^{-2} \xi_{\beta m}^2(\mathbf{r})) \quad (1.1.4)$$

метод 1 требует большого числа итераций и редко применяется в ТИС, требующих решения своих целевых задач в реальном времени.

Для некоторых условий функционирования ТИС, характеризующихся априорной неопределенностью, не представляется возможным заранее сформировать указанные выше веса измерений. В этом случае для всех пеленгаторов ТИС принимается гипотеза равноточных измерений ($\sigma_{\alpha m}^2 = \sigma_\alpha^2$, $\sigma_{\beta m}^2 = \sigma_\beta^2$ и $\sigma_\alpha^2 = \sigma_\beta^2 = \sigma^2$) с неизвестной величиной σ^2 , при этом вместо (1.1.1) получаем следующее правило триангуляционного оценивания:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_2^* &= \arg \max_{\mathbf{r}} \left[V_0 \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{m=1}^M (\sigma^{-2} \xi_{\alpha m}^2(\mathbf{r}) + \sigma^{-2} \xi_{\beta m}^2(\mathbf{r})) \right\} \right] = \\ &= \arg \min_{\mathbf{r}} \mu_2 \sum_{m=1}^M (\xi_{\alpha m}^2(\mathbf{r}) + \xi_{\beta m}^2(\mathbf{r})) \end{aligned} \quad (1.1.5)$$

μ_2 – масштабный множитель [44].

Правило (1.1.5) соответствует нелинейному *методу 2* (для случая равноточных измерений), также связанному с формированием соответствующей итерационной процедуры и выбором начального условия, а также использованием овражной целевой функции

$$J_2(\mathbf{r}) = \mu_2 \sum_{m=1}^M (\xi_{\alpha m}^2(\mathbf{r}) + \xi_{\beta m}^2(\mathbf{r})). \quad (1.1.6)$$

Численную реализацию *метода i* (где $i \in \{1, 2\}$) можно осуществлять на основе двух алгоритмов. Первый алгоритм предполагает непосредственную минимизацию невязки $J_i(\mathbf{r})$, т.е.

$$\mathbf{r}_{i1}^* = \arg \min_{\mathbf{r}} J_i(\mathbf{r}), i \in \{1, 2\}. \quad (1.1.7)$$

Второй алгоритм учитывает дифференцируемость невязки $J_i(\mathbf{r})$ по \mathbf{r} и возможность нахождения требуемых частных производных в аналитическом виде. Поскольку в точке экстремума $\text{grad} J_i(\mathbf{r}) = 0$, то алгоритм A_{i2} сводится к следующему:

$$\mathbf{r}_{i2}^* = \arg \min_{\mathbf{r}} \left[(\partial J_i(\mathbf{r}) / \partial x)^2 + (\partial J_i(\mathbf{r}) / \partial y)^2 + (\partial J_i(\mathbf{r}) / \partial z)^2 \right], i \in \{1, 2\}, \quad (1.1.8)$$

где

$$\begin{cases} \partial J_1(\mathbf{r}) / \partial x = \mu_1 \sum_{m=1}^M \left[\frac{2\xi_{\alpha m}}{\sigma_{\alpha m}^2} \left(-\frac{\partial \alpha_m(\mathbf{r})}{\partial x} \right) + \frac{2\xi_{\beta m}}{\sigma_{\beta m}^2} \left(-\frac{\partial \beta_m(\mathbf{r})}{\partial x} \right) \right] \\ \partial J_1(\mathbf{r}) / \partial y = \mu_1 \sum_{m=1}^M \left[\frac{2\xi_{\alpha m}}{\sigma_{\alpha m}^2} \left(-\frac{\partial \alpha_m(\mathbf{r})}{\partial y} \right) + \frac{2\xi_{\beta m}}{\sigma_{\beta m}^2} \left(-\frac{\partial \beta_m(\mathbf{r})}{\partial y} \right) \right], \\ \partial J_1(\mathbf{r}) / \partial z = \mu_1 \sum_{m=1}^M \left[\frac{2\xi_{\beta m}}{\sigma_{\beta m}^2} \left(-\frac{\partial \beta_m(\mathbf{r})}{\partial z} \right) \right] \end{cases} \quad (1.1.9)$$

$$\begin{cases} \partial J_2(\mathbf{r}) / \partial x = \mu_2 \sum_{m=1}^M \left[2\xi_{\alpha m} \left(-\frac{\partial \alpha_m(\mathbf{r})}{\partial x} \right) + 2\xi_{\beta m} \left(-\frac{\partial \beta_m(\mathbf{r})}{\partial x} \right) \right] \\ \partial J_2(\mathbf{r}) / \partial y = \mu_2 \sum_{m=1}^M \left[2\xi_{\alpha m} \left(-\frac{\partial \alpha_m(\mathbf{r})}{\partial y} \right) + 2\xi_{\beta m} \left(-\frac{\partial \beta_m(\mathbf{r})}{\partial y} \right) \right]. \\ \partial J_2(\mathbf{r}) / \partial z = \mu_2 \sum_{m=1}^M \left[2\xi_{\beta m} \left(-\frac{\partial \beta_m(\mathbf{r})}{\partial z} \right) \right] \end{cases} \quad (1.1.10)$$

Для фигурирующих в (1.1.9) и (1.1.10) производных справедливы выражения

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial\alpha_m(\mathbf{r})/\partial x = \begin{cases} \frac{-|y-\rho_m^y|}{\bar{R}_m^2}, 0 \leq \alpha_m(\mathbf{r}) < \pi \\ \frac{|y-\rho_m^y|}{\bar{R}_m^2}, \pi \leq \alpha_m(\mathbf{r}) < 2\pi \end{cases} \\ \partial\alpha_m(\mathbf{r})/\partial y = \begin{cases} \frac{(x-\rho_m^x)}{\bar{R}_m^2}, 0 \leq \alpha_m(\mathbf{r}) < \pi \\ \frac{-(x-\rho_m^x)}{\bar{R}_m^2}, \pi \leq \alpha_m(\mathbf{r}) < 2\pi \end{cases} \end{array} \right. , \quad (1.1.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \partial\beta_m(\mathbf{r})/\partial x = \frac{-(x-\rho_m^x)|z-\rho_m^z|}{\bar{R}_m R_m^2}, 0 \leq \beta_m(\mathbf{r}) < \pi/2 \\ \partial\beta_m(\mathbf{r})/\partial y = \frac{-(y-\rho_m^y)|z-\rho_m^z|}{\bar{R}_m R_m^2}, 0 \leq \beta_m(\mathbf{r}) < \pi/2 \\ \partial\beta_m(\mathbf{r})/\partial z = \frac{\bar{R}_m}{R_m^2}, 0 \leq \beta_m(\mathbf{r}) < \pi/2 \end{array} \right. \quad (1.1.11)$$

Соотношения (1.1.1) – (1.1.11) будут использованы в дальнейшем для сравнительного анализа альтернативных численных алгоритмов, реализующих рассматриваемые методы триангуляции.

1.1.4 Анализ линейных методов максимального правдоподобия

Для устранения недостатков нелинейных методов триангуляционного оценивания можно использовать ряд линейных методов, которые сводятся к необходимости решения соответствующей системы линейных алгебраических уравнений. Одним из них является метод максимального правдоподобия на основе аппроксимирующих касательных плоскостей (1.1.12) и (1.1.14) (*метод 3*). Выбор оптимального положения точки $P(x, y, z)$ происходит с учетом расстояний от точки $P(x, y, z)$ до касательных плоскостей (1.1.12), (1.1.14) всех пеленгаторов ТИС. Данные расстояния можно рассматривать в качестве косвенных (вторичных) измерений данных пеленгаторов, что требует соответствующего пересчета дисперсий ошибок первичных измерений в дисперсии ошибок вторичных измерений [41].

Максимально правдоподобная оценка $\mathbf{r}_3^* = [x_3^*, y_3^*, z_3^*]^T$ декартовых координат

ИРИ для *метода 3* имеет вид

$$\begin{cases} x_3^* = \omega^{-1} \left[\eta_{p1} (\eta_{22} \eta_{33} - \eta_{23}^2) + \eta_{12} (\eta_{13} \eta_{p3} - \eta_{p2} \eta_{33}) + \eta_{13} (\eta_{p2} \eta_{23} - \eta_{22} \eta_{p3}) \right] \\ y_3^* = \omega^{-1} \left[\eta_{11} (\eta_{p2} \eta_{33} - \eta_{23} \eta_{p3}) + \eta_{p1} (\eta_{23} \eta_{13} - \eta_{12} \eta_{33}) + \eta_{13} (\eta_{p3} \eta_{12} - \eta_{p2} \eta_{13}) \right], \\ z_3^* = \omega^{-1} \left[\eta_{11} (\eta_2 \eta_{p3} - \eta_{p2} \eta_{23}) + \eta_{13} (\eta_{12} \eta_{p2} - \eta_{p1} \eta_{22}) + \eta_{12} (\eta_{p1} \eta_{23} - \eta_{p3} \eta_{12}) \right] \end{cases} \quad (1.1.22)$$

где

$$\omega = \eta_{11} \eta_{22} \eta_{33} + 2\eta_{12} \eta_{23} \eta_{13} - \eta_{12}^2 \eta_{33} - \eta_{13}^2 \eta_{22} - \eta_{23}^2 \eta_{11}, \quad (1.1.23)$$

$$\eta_{ij} = \sum_{m=1}^M \left[\sigma_{pam}^{-2} l_{am}^i l_{am}^j + \sigma_{p\beta m}^{-2} l_{\beta m}^i l_{\beta m}^j \right], \quad i, j = \overline{1, 3}. \quad (1.1.24)$$

В формуле (1.1.24) под σ_{pam}^2 и $\sigma_{p\beta m}^2$ понимаются дисперсии ошибок косвенных измерений случайных величин P_{am} и $P_{\beta m}$, которые с учетом некоррелированности первичных измерений находятся (с учетом выражений (1.1.12) и (1.1.14)) по формулам

$$\sigma_{pam}^2 = \left[\left(\frac{\partial p_{am}}{\partial \alpha_m} \right)^2 \sigma_{\alpha_m}^2 + \left(\frac{\partial p_{am}}{\partial \beta_m} \right)^2 \sigma_{\beta_m}^2 \right], \quad (1.1.25)$$

при этом частные производные рассчитываются в точке $(\tilde{\alpha}_{m0}, \tilde{\beta}_{m0})$.

Можно воспользоваться другим линейным методом решения задачи триангуляции, не требующим перехода к косвенным измерениям (*метод 4*). Данный метод основан на линеаризации модельных наблюдений (1.1.5) и (1.1.6), путем их разложения в ряд Тейлора в окрестности опорной точки $\tilde{\mathbf{r}}_0 = [\tilde{R}_{m0} \cos \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}, \tilde{R}_{m0} \sin \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}, \tilde{R}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0}]^T$ и отбрасыванием всех нелинейных членов ряда. Здесь \tilde{R}_{m0} – некоторая ориентировочная оценка дальности.

С учетом линеаризации в формуле (1.1.8) допустимы представления (здесь частные производные находятся в опорной точке $\tilde{\mathbf{r}}_0$)

$$\left\{ \begin{aligned} \xi_{\alpha m}^2(\tilde{\mathbf{r}}_0) &= \left[\frac{\partial \alpha_m(\mathbf{r})}{\partial x} (x - \rho_m^x - \tilde{x}_0) + \frac{\partial \alpha_m(\mathbf{r})}{\partial y} (y - \rho_m^y - \tilde{y}_0) \right]^2 \\ \xi_{\beta m}^2(\tilde{\mathbf{r}}_0) &= \left[\frac{\partial \beta_m(\mathbf{r})}{\partial x} (x - \rho_m^x - \tilde{x}_0) + \frac{\partial \beta_m(\mathbf{r})}{\partial y} (y - \rho_m^y - \tilde{y}_0) + \frac{\partial \beta_m(\mathbf{r})}{\partial z} (z - \rho_m^z - \tilde{z}_0) \right]^2 \end{aligned} \right. \quad (1.1.26)$$

Раскрывая с учетом (1.1.26) правило

$$\mathbf{r}_4^* = \arg \min_{\mathbf{r}} \sum_{m=1}^M (\sigma_{\alpha m}^{-2} \xi_{\alpha m}^2(\mathbf{r}) + \sigma_{\beta m}^{-2} \xi_{\beta m}^2(\mathbf{r})), \quad (1.1.27)$$

получаем СЛАУ третьего порядка $\mathbf{A}_4 \mathbf{r}_4 = \mathbf{b}_4$ (полагая \mathbf{A}_4 невырожденной матрицей)

для вычисления декартовых координат ИРИ по методу 4, где

$$\mathbf{A}_4 = 2 \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\left(\frac{k_{\alpha m}^x}{\sigma_{\alpha m}} \right)^2 + \left(\frac{k_{\beta m}^x}{\sigma_{\beta m}} \right)^2 \right] & \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\frac{k_{\alpha m}^x k_{\alpha m}^y}{\sigma_{\alpha m}^2} + \frac{k_{\beta m}^x k_{\beta m}^y}{\sigma_{\beta m}^2} \right] & \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\frac{k_{\beta m}^x k_{\beta m}^z}{\sigma_{\beta m}^2} \right] \\ \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\frac{k_{\alpha m}^x k_{\alpha m}^y}{\sigma_{\alpha m}^2} + \frac{k_{\beta m}^x k_{\beta m}^y}{\sigma_{\beta m}^2} \right] & \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\left(\frac{k_{\alpha m}^y}{\sigma_{\alpha m}} \right)^2 + \left(\frac{k_{\beta m}^y}{\sigma_{\beta m}} \right)^2 \right] & \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\frac{k_{\beta m}^y k_{\beta m}^z}{\sigma_{\beta m}^2} \right] \\ \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\frac{k_{\beta m}^x k_{\beta m}^z}{\sigma_{\beta m}^2} \right] & \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\frac{k_{\beta m}^y k_{\beta m}^z}{\sigma_{\beta m}^2} \right] & \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\frac{k_{\beta m}^z}{\sigma_{\beta m}} \right]^2 \end{bmatrix}, \quad (1.1.28)$$

$$\mathbf{b}_4 = 2 \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\left[\left(\frac{k_{\alpha m}^x}{\sigma_{\alpha m}} \right)^2 + \left(\frac{k_{\beta m}^x}{\sigma_{\beta m}} \right)^2 \right] \rho_m^x + \left[\frac{k_{\alpha m}^x k_{\alpha m}^y}{\sigma_{\alpha m}^2} + \frac{k_{\beta m}^x k_{\beta m}^y}{\sigma_{\beta m}^2} \right] \rho_m^y + \left[\frac{k_{\beta m}^x k_{\beta m}^z}{\sigma_{\beta m}^2} \right] \rho_m^z \right] \\ \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\left[\frac{k_{\alpha m}^x k_{\alpha m}^y}{\sigma_{\alpha m}^2} + \frac{k_{\beta m}^x k_{\beta m}^y}{\sigma_{\beta m}^2} \right] \rho_m^x + \left[\left(\frac{k_{\alpha m}^y}{\sigma_{\alpha m}} \right)^2 + \left(\frac{k_{\beta m}^y}{\sigma_{\beta m}} \right)^2 \right] \rho_m^y + \left[\frac{k_{\beta m}^y k_{\beta m}^z}{\sigma_{\beta m}^2} \right] \rho_m^z \right] \\ \sum_{m=1}^M \tilde{R}_m^{-2} \left[\left[\frac{k_{\beta m}^x k_{\beta m}^z}{\sigma_{\beta m}^2} \right] \rho_m^x + \left[\frac{k_{\beta m}^y k_{\beta m}^z}{\sigma_{\beta m}^2} \right] \rho_m^y + \left[\frac{k_{\beta m}^z}{\sigma_{\beta m}} \right]^2 \rho_m^z \right] \end{bmatrix}, \quad (1.1.29)$$

где

$$\begin{cases}
k_{\alpha m}^x = \begin{cases} -\frac{\sin \tilde{\alpha}_{m0}}{\cos \tilde{\beta}_{m0}}, 0 \leq \tilde{\alpha}_{m0} < \pi \\ \frac{\sin \tilde{\alpha}_{m0}}{\cos \tilde{\beta}_{m0}}, \pi \leq \tilde{\alpha}_{m0} < 2\pi \end{cases} \\
k_{\alpha m}^y = \begin{cases} \frac{\cos \tilde{\alpha}_{m0}}{\cos \tilde{\beta}_{m0}}, 0 \leq \tilde{\alpha}_{m0} < \pi \\ -\frac{\cos \tilde{\alpha}_{m0}}{\cos \tilde{\beta}_{m0}}, \pi \leq \tilde{\alpha}_{m0} < 2\pi \end{cases} \\
k_{\beta m}^x = -\cos \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0}, k_{\beta m}^y = -\sin \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} \\
k_{\beta m}^z = \cos \tilde{\beta}_{m0}
\end{cases} . \quad (1.1.30)$$

Решая данную СЛАУ, найдем оценку местоположения ИРИ $\mathbf{r}_4^* = \mathbf{A}_4^{-1} \mathbf{b}_4$.

Другой линейный метод триангуляционного оценивания (*метод 5*) основан на использовании расстояний (1.1.18) и (1.1.19). С учетом малости ошибок пеленгования допустимы следующие приближения (см. рис. 1.1.1)

$$\begin{cases}
\sin \xi_{\alpha m} \approx \xi_{\alpha m} \approx \frac{d_{\alpha m}}{\tilde{R}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}} \\
\sin \xi_{\beta m} \approx \xi_{\beta m} \approx \frac{d_{\alpha \beta m}}{\tilde{R}_{m0}}
\end{cases} . \quad (1.1.31)$$

Раскрывая с учетом (1.1.18) и (1.1.19) правило

$$\mathbf{r}_5^* = \arg \min_{\mathbf{r}} \sum_{m=1}^M \left[\sigma_{\alpha m}^{-2} \left(\frac{d_{\alpha m}}{\tilde{R}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}} \right)^2 + \sigma_{\beta m}^{-2} \left(\frac{d_{\alpha \beta m}}{\tilde{R}_{m0}} \right)^2 \right], \quad (1.1.32)$$

приходим к оптимизационной задаче, которая сводится к решению соответствующей СЛАУ $\mathbf{A}_5 \mathbf{r}_5 = \mathbf{b}_5$ (по аналогии с [3], с. 501–506, где рассмотрен только плоский случай), при этом, как и в *методе 4*, также используются ориентировочные дальности до ИРИ от пеленгаторов ТИС. Для элементов матрицы $\mathbf{A}_5 = [a_{5ij}, i, j = \overline{1,3}]$ и столбца $\mathbf{b}_5 = [b_{5i}, i = \overline{1,3}]$ справедливы выражения:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{511} = \sum_{m=1}^M (\varphi_{\alpha m0} \sin^2 \tilde{\alpha}_{m0} + \varphi_{\beta m0} \cos^2 \tilde{\alpha}_{m0} \sin^2 \tilde{\beta}_{m0}) \\ a_{512} = a_{521} = \sum_{m=1}^M [\sin \tilde{\alpha}_{m0} \cos \tilde{\alpha}_{m0} (\varphi_{\beta m0} \sin^2 \tilde{\beta}_{m0} - \varphi_{\alpha m0})] \\ a_{513} = a_{531} = \sum_{m=1}^M (-\varphi_{\beta m0} \cos \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}) \\ a_{522} = \sum_{m=1}^M (\varphi_{\alpha m0} \cos^2 \tilde{\alpha}_{m0} + \varphi_{\beta m0} \sin^2 \tilde{\alpha}_{m0} \sin^2 \tilde{\beta}_{m0}) \\ a_{523} = a_{532} = \sum_{m=1}^M (-\varphi_{\beta m0} \sin \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0}) \\ a_{533} = \sum_{m=1}^M (\varphi_{\beta m0} \cos^2 \tilde{\beta}_{m0}) \end{array} \right. , \quad (1.1.33)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} b_{51} = \sum_{m=1}^M [\varphi_{\alpha m0} \theta_{\alpha m0} \sin \tilde{\alpha}_{m0} + \varphi_{\beta m0} \cos \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} (\chi_{m0} - \rho_m^z \cos \tilde{\beta}_{m0})] \\ b_{52} = \sum_{m=1}^M [\varphi_{\alpha m0} \theta_{\alpha m0} \cos \tilde{\alpha}_{m0} + \varphi_{\beta m0} \sin \tilde{\alpha}_{m0} \sin \tilde{\beta}_{m0} (\chi_{m0} - \rho_m^z \cos \tilde{\beta}_{m0})] \\ b_{53} = \sum_{m=1}^M \{ \varphi_{\beta m0} \cos \tilde{\beta}_{m0} [-\chi_{m0} - \rho_m^z \cos \tilde{\beta}_{m0}] \} \end{array} \right. , \quad (1.1.34)$$

где $\chi_{m0} = \sin \tilde{\beta}_{m0} (\rho_m^x \cos \tilde{\alpha}_{m0} + \rho_m^y \sin \tilde{\alpha}_{m0})$, $\theta_{\alpha m0} = (\rho_m^x \sin \tilde{\alpha}_{m0} - \rho_m^y \cos \tilde{\alpha}_{m0})$, $\varphi_{\alpha m0} = \sigma_{\alpha m}^{-2} (\tilde{R}_{m0} \cos \tilde{\beta}_{m0})^{-2}$,
 $\varphi_{\beta m0} = \sigma_{\beta m}^{-2} (\tilde{R}_{m0})^{-2}$.

Необходимость учета ориентировочных дальностей несколько ограничивает сферу применения *метода 4* и *метода 5*. Соотношения (1.1.28) – (1.1.30), (1.1.33), (1.1.34) будут использованы при проведении вычислительного эксперимента.

1.1.5 Анализ линейных квазиоптимальных методов

В некоторых случаях, как правило, связанных с априорной неопределенностью, применяются квазиоптимальные методы, не требующие знания статистических характеристик ошибок пеленгования и привлечения априорных дальностей. Один из таких методов (*метод 6*) основан на минимизации суммы квадратов взвешенных пространственных невязок с учетом или без учета некоторых эмпирических весов. Для этого вводится расстояние d_m от точки $P(\mathbf{r})$ до ЛВ $_m$, заданной направляющим вектором $\tilde{\mathbf{e}}_{m0} = [\tilde{e}_m^x, \tilde{e}_m^y, \tilde{e}_m^z]^T$. При этом квадрат этого расстояния d_m^2 определяется по формуле

$$d_m^2 = (d_m^{xy})^2 + (d_m^{yz})^2 + (d_m^{xz})^2, m \in \overline{1, M}, \quad (1.1.35)$$

где

$$\begin{cases} d_m^{xy} = (x - \rho_m^x) \tilde{e}_m^y - (y - \rho_m^y) \tilde{e}_m^x \\ d_m^{yz} = (y - \rho_m^y) \tilde{e}_m^z - (z - \rho_m^z) \tilde{e}_m^y \\ d_m^{xz} = (z - \rho_m^z) \tilde{e}_m^x - (x - \rho_m^x) \tilde{e}_m^z \end{cases} \quad (1.1.36)$$

Принимая d_m^2 за частную невязку (для Π_m), на базе (1.1.35) и (1.1.36) строим общую взвешенную невязку (для ТИС)

$$d^2 = \sum_{m=1}^M w_m d_m^2, \quad (1.1.37)$$

где w_m – эмпирические веса, $w_m \geq 0$, $\sum_{m=1}^M w_m = 1$.

Поскольку $d^2 = d^2(\mathbf{r})$, то минимуму данной величины соответствует условие

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} d^2(\mathbf{r}) = 0, \quad (1.1.38)$$

а само правило формирования оценки (для метода б) имеет вид

$$\mathbf{r}_6^* = \arg \min_{\mathbf{r}} d^2(\mathbf{r}). \quad (1.1.39)$$

Раскрывая (1.1.39), получаем СЛАУ $\mathbf{A}_6 \mathbf{r}_6 = \mathbf{b}_6$, где

$$\mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M [(\tilde{e}_m^y)^2 + (\tilde{e}_m^z)^2] & \sum_{m=1}^M (-\tilde{e}_m^x \tilde{e}_m^y) & \sum_{m=1}^M (-\tilde{e}_m^x \tilde{e}_m^z) \\ \sum_{m=1}^M (-\tilde{e}_m^x \tilde{e}_m^y) & \sum_{m=1}^M [(\tilde{e}_m^x)^2 + (\tilde{e}_m^z)^2] & \sum_{m=1}^M (-\tilde{e}_m^y \tilde{e}_m^z) \\ \sum_{m=1}^M (-\tilde{e}_m^x \tilde{e}_m^z) & \sum_{m=1}^M (-\tilde{e}_m^y \tilde{e}_m^z) & \sum_{m=1}^M [(\tilde{e}_m^x)^2 + (\tilde{e}_m^y)^2] \end{bmatrix}, \quad (1.1.40)$$

$$\mathbf{b}_6 = \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^M w_m \left\{ \rho_m^x [(\tilde{e}_m^y)^2 + (\tilde{e}_m^z)^2] + \rho_m^y (-\tilde{e}_m^x \tilde{e}_m^y) + \rho_m^z (-\tilde{e}_m^x \tilde{e}_m^z) \right\} \\ \sum_{m=1}^M w_m \left\{ \rho_m^x (-\tilde{e}_m^x \tilde{e}_m^y) + \rho_m^y [(\tilde{e}_m^x)^2 + (\tilde{e}_m^z)^2] + \rho_m^z (-\tilde{e}_m^y \tilde{e}_m^z) \right\} \\ \sum_{m=1}^M w_m \left\{ \rho_m^x (-\tilde{e}_m^x \tilde{e}_m^z) + \rho_m^y (-\tilde{e}_m^y \tilde{e}_m^z) + \rho_m^z [(\tilde{e}_m^x)^2 + (\tilde{e}_m^y)^2] \right\} \end{bmatrix}. \quad (1.1.41)$$

Решая эту СЛАУ, находим оптимальную линейную оценку $\mathbf{r}_6^* = \mathbf{A}_6^{-1} \mathbf{b}_6$, принимая $\det \mathbf{A}_6 \neq 0$. Если положить $w_m = 1$ для всех $m = \overline{1, M}$, то получим оценку по критерию минимума суммы квадратов расстояний. Достоинством такой оценки является возможность ее построения в реальном времени. В *методе 6* отсутствуют операции линеаризации и другие ограничения, в том числе и на диапазоны изменения ошибок пеленгования. Кроме того, не требуется априорная информация об ориентировочных дальностях до ИРИ.

Однако следует помнить, что в выражениях (1.1.35) – (1.1.41) не учитывается реальный закон распределения ошибок пеленгования, а используются лишь эмпирические веса. Задание таких весов также вызывает затруднения на практике, поэтому в случае использования однотипных равноточных пеленгаторов можно ограничиться единичными весами.

Еще один линейный квазиоптимальный метод (*метод 7*) основан на минимизации плоскостных невязок [21]. Он вытекает из очевидных соотношений

$$\begin{cases} \frac{x_0 - \rho_m^x}{y_0 - \rho_m^y} = \operatorname{ctg} \alpha_{m0} \\ \frac{x_0 - \rho_m^x}{z_0 - \rho_m^z} = \cos \alpha_{m0} \operatorname{ctg} \beta_{m0} \\ \frac{y_0 - \rho_m^y}{z_0 - \rho_m^z} = \sin \alpha_{m0} \operatorname{ctg} \beta_{m0} \end{cases} \quad (1.1.42)$$

Из формулы (1.1.42) следует, что на точных данных (без учета ошибок пленгования) должно выполняться соотношение

$$L_{m0}(\mathbf{r}_0 - \boldsymbol{\rho}_m) = 0, \quad (1.1.43)$$

где

$$L_{m0} = \begin{bmatrix} 0 & \sin \beta_{m0} & -\cos \beta_{m0} \sin \alpha_{m0} \\ \sin \beta_{m0} & 0 & -\cos \beta_{m0} \cos \alpha_{m0} \\ \cos \beta_{m0} & -\cos \beta_{m0} \cos \alpha_{m0} & 0 \end{bmatrix} \quad (1.1.44)$$

– вырожденная матрица, поскольку не зависит от наклонной дальности \tilde{R}_{m0} .

Если используются реальные измерения $\tilde{\alpha}_{m0}$, $\tilde{\beta}_{m0}$, то вместо L_{m0} получаем приближенную матрицу \tilde{L}_{m0} и при этом

$$\tilde{L}_{m0}(\mathbf{r} - \boldsymbol{\rho}_m) \neq 0, m = \overline{1, M}. \quad (1.1.45)$$

В работе [21] показано, что модули от координат вектора $\tilde{L}_{m0}(\mathbf{r} - \boldsymbol{\rho}_m)$ являются расстояниями (невязками) между точкой $P(\mathbf{r})$ и ЛВ $_m$ в соответствующих координатных плоскостях (поэтому такие невязки называют плоскостными). При этом минимизация квадратичной формы от этих невязок приводит к следующей оценке местоположения ИРИ (для случая равноточных измерений)

$$\mathbf{r}_7^* = \left(\sum_{m=1}^M \tilde{L}_{m0}^T \tilde{L}_{m0} \right)^{-1} \left(\sum_{m=1}^M \tilde{L}_{m0}^T \tilde{L}_{m0} \boldsymbol{\rho}_m \right), \quad (1.1.46)$$

где

$$\tilde{L}_{m0} = \begin{bmatrix} 0 & \sin\tilde{\beta}_{m0} & -\cos\tilde{\beta}_{m0}\sin\tilde{\alpha}_{m0} \\ \sin\tilde{\beta}_{m0} & 0 & -\cos\tilde{\beta}_{m0}\cos\tilde{\alpha}_{m0} \\ \cos\tilde{\beta}_{m0} & -\cos\tilde{\beta}_{m0}\cos\tilde{\alpha}_{m0} & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.1.47)$$

Наличие трех соотношений (1.1.42) позволяет вместо \tilde{L}_{m0} использовать однострочные и двухстрочные матрицы, получающиеся из исходной матрицы \tilde{L}_{m0} путем вычеркивания одной или двух строк. Это дает возможность использовать для каждого Π_m не все частные плоскостные невязки, а только некоторые из них. Такой подход приводит к декомпозиции задачи и возможности формирования целого семейства единичных оценок местоположения ИЦ, которые можно использовать при построении надежной результирующей оценки. При сложных законах распределения ошибок пеленгования и наличии большого числа не учитываемых факторов наличие такого семейства позволяет эффективно применять методы интеллектуально-аналитического оценивания [22,43]. Как будет показано далее, *метод 7* является наименее точным по отношению к ранее рассмотренным методам, но самым простым в вычислительном плане и ориентированным на оперативные ТИС, способные функционировать в условия априорной неопределенности. Соотношения (1.1.35) – (1.1.47) будут использованы при проведении вычислительного эксперимента.

1.1.6 Анализ нейросетевого метода

Альтернативу статистическим методам оценивания составляет нейросетевой подход. В рамках нейросетевого метода осуществляется построение функциональной модели любого процесса, при заданных значениях входа и выхода, преобразующей входную информацию в выходную в соответствии с требуемым законом функционирования. Данный подход не рассматривает структуру объекта, внимание уделяется внешним проявлениям. Формируется некоторая достаточно универсальная вычислительная среда, которая обучается выдаче нужных выходных реакций при поступлении соответствующих воздействий на вход [46, 47]. Построение нейросетевого алгоритма состоит в выборе архитектуры, формиро-

вании обучающего множества и обучении. Будем использовать модель многослойного персептрона. Многослойный персептрон, кроме входного и выходного слоя, содержит ещё и скрытые слои, которые расположены между входным и вы-

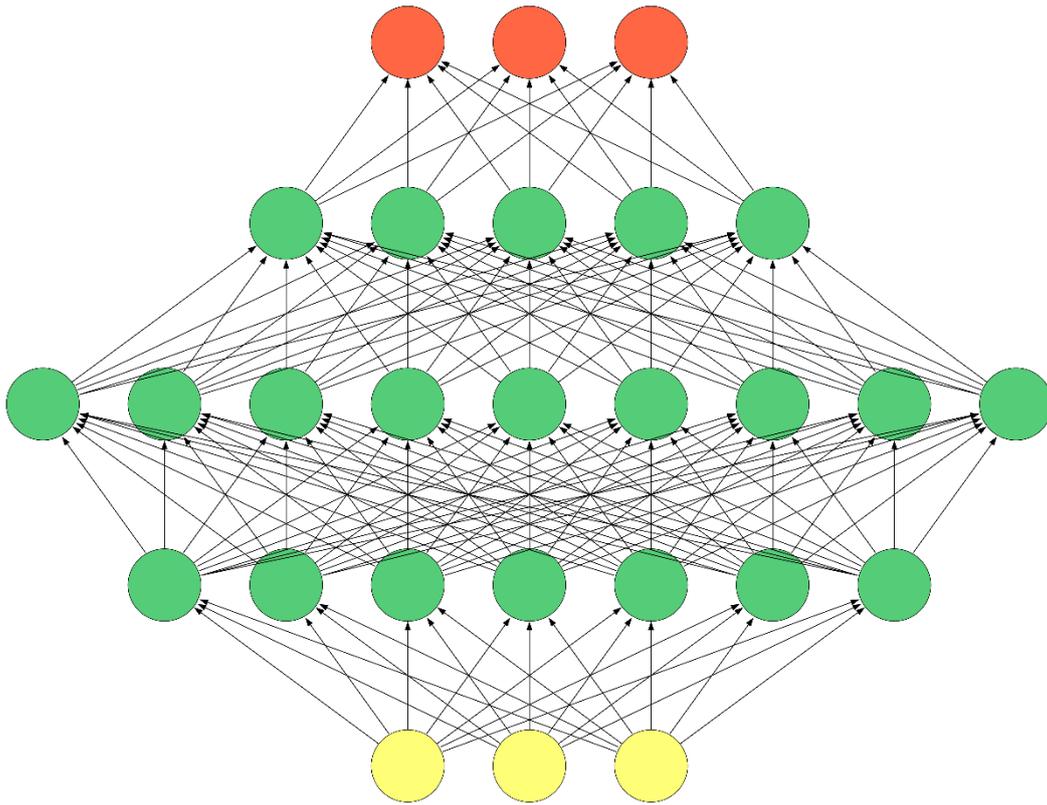


Рис.1.1.3. Схема многослойного персептрона

ходным слоем. На рис. 1.1.3 представлена схема многослойного персептрона прямого распространения с тремя входами (желтые круги) и тремя выходами (красные круги). Персептрон содержит три скрытых слоя с 7, 9 и 5 нейронами соответственно. На вход персептрона поступает вектор входных данных (на рисунке три значения, соответствующие желтым кругам). Схема работы нейронов, содержащихся в скрытых и выходном слое, представлена на рис.1.1.4.

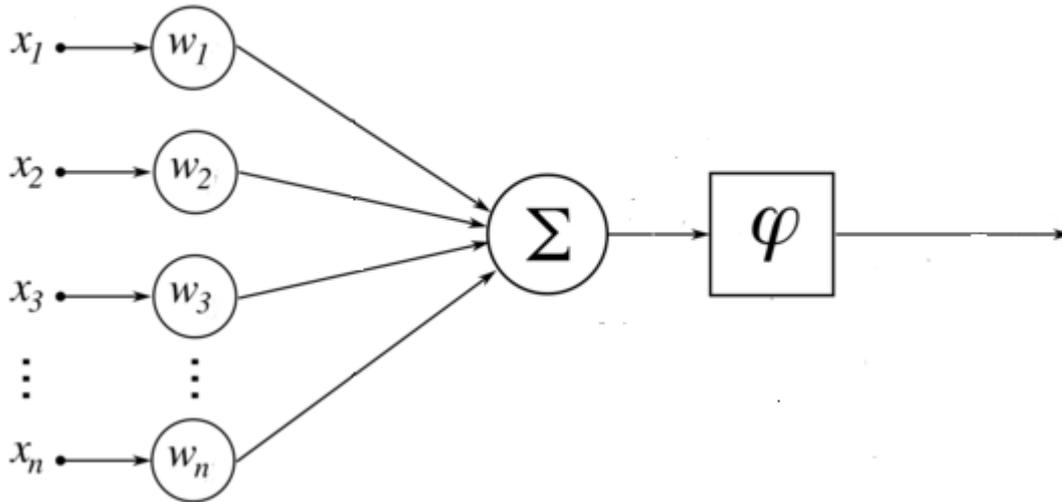


Рис.1.1.4. Схема работы нейрона

Каждому входному сигналу x_i ставится в соответствие вес w_i , затем значения входов умножаются на соответствующие им веса и суммируются, полученная взвешенная сумма поступает на функцию активации. Значение функции активации и есть сигнал на выходе нейрона $\varphi\left(\sum_i x_i w_i\right)$. Значения сигналов, полученных с нейронов выходного слоя, образуют вектор предсказанных параметров. Для использования описанной модели многослойного персептрона её необходимо обучить. Для обучения нейросети используется обучающая выборка, это набор входных сигналов и соответствующие им правильные выходные сигналы. Обучение — это поиск такого набора весовых коэффициентов нейросети, при котором ошибка предсказания на обучающей выборке минимальна. Поиск весовых коэффициентов нейросети, обеспечивающих минимум ошибки — это оптимизационная задача, которая решается для каждого экземпляра обучающей выборки. Для контроля качества обучения необходимо проводить расчёт ошибки предсказания на тестовой выборке. Тестовая выборка — это такая выборка, данные которой не использовались при обучении нейросети. Обученная нейросеть используется для предсказания выходного сигнала по входному, в том числе для входных данных, не входящих в обучающую выборку.

1.1.7 Сравнительный анализ оптимальных и квазиоптимальных методов оценивания положения ИЦ для ТИС

В данном разделе дадим сравнительную характеристику *методов 1–7* с учетом их практической реализации в вычислительной среде. Для сравнительного анализа методов триангуляционного оценивания будем использовать следующую модель ТИС (в дальнейшем местоположение ИРИ и Π_m будем задавать в метрах, азимут, угол места и характеристики точности (среднеквадратичные отклонения (СКО) в радианах): $M = 5$, $\Pi_m = 10^4 \left[\cos\left(\frac{2\pi}{M} m\right), \sin\left(\frac{2\pi}{M} m\right), 0 \right]$, $m = \overline{1,5}$. Моделирование проводилось для ряда положений ИРИ: $\mathbf{r}_0(n) = 10^4 \left[5 \cos\left(\frac{2\pi}{N} n\right), 5 \sin\left(\frac{2\pi}{N} n\right), z_0 \right]^T$, $n = \overline{1,180}$, $z_0 = \text{const}$. Принималось, что ошибки угловых измерений распределены по нормальному закону с корреляционной матрицей $\mathbf{K}_{\xi_m} = \text{diag}[\sigma_{\alpha_m}^2, \sigma_{\beta_m}^2]$, где $\sigma_{\alpha_m} = \sigma_{\alpha} = \pi/360$ и $\sigma_{\beta_m} = \sigma_{\beta} = \pi/180$. Процедура оценивания проводилась 100 раз для каждого положения ИРИ, затем полученные частные оценки $\{\mathbf{r}^*(n)\}_{n=1}^{100}$ усредняются с целью получения результирующей оценки \mathbf{r}^* . Для каждой частной оценки $\mathbf{r}^*(n)$ вычислялась ошибка

$$\Delta_m = \|\mathbf{r}^*(n) - \mathbf{r}_0\|_2, \quad n = \overline{1,100}, \quad (1.1.48)$$

где $\|\cdot\|_2$ – евклидова норма. Набору значений Δ_m , вычисленных для углов $\frac{2\pi}{N} n$, $n = \overline{1,100}$, ставится в соответствие интегральная характеристика

$$S = \sum_{n=1}^N s_n = \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{N} \Delta_m, \quad (1.1.49)$$

где s_n – частная характеристика метода.

Для каждого из сравниваемых методов фиксируется относительное время δT (в процентах от времени самого «медленного» метода), необходимое для формирования результирующей оценки. При моделировании нелинейных методов для выбора начального приближения использовалась оценка *метода 7*. Для реализа-

ции нелинейных *методов 1 и 2* в вычислительной среде используются рассмотренные ранее варианты оценок \mathbf{r}_{i1} и \mathbf{r}_{i2} , где индекс $i \in \{1,2\}$ соответствует номеру метода. Высоту ИРИ (координата $z_0 = 7 \cdot 10^3$) полагаем неизменной.

Область возможных начальных условий по x и y представляет собой прямоугольный гиперпараллелепипед $\mathfrak{M} = \{x_0 - \Delta x_0 \leq x \leq x_0 + \Delta x_0, y_0 - \Delta y_0 \leq y \leq y_0 + \Delta y_0, z_0\}$, их выбор производился случайным образом по равномерному закону. Для истинного положения ИРИ принято $\mathbf{r}_0 = [-49513, 6958, 7000]^T$, и, кроме того, $\Delta x_0 = 5 \cdot 10^3$, $\Delta y_0 = 3 \cdot 10^3$. Область начальных условий покрывается равномерной сеткой, состоящей из $200 \times 200 = 4 \cdot 10^4$ узлов.

В целях исследования характера целевой функции $J_1(\mathbf{r})$ найдем в области \mathfrak{M} ее минимальное и максимальное значения: $J_1^{min} = 12.1613$ и $J_1^{max} = 390.124$. На рис.1.1.5 представлены графики десяти линий уровня, которым соответствуют значения целевой функции $J_1(\mathbf{r})$, не превосходящие числа $J_1^{min} + 10^{-1}(J_1^{max} - J_1^{min})$.

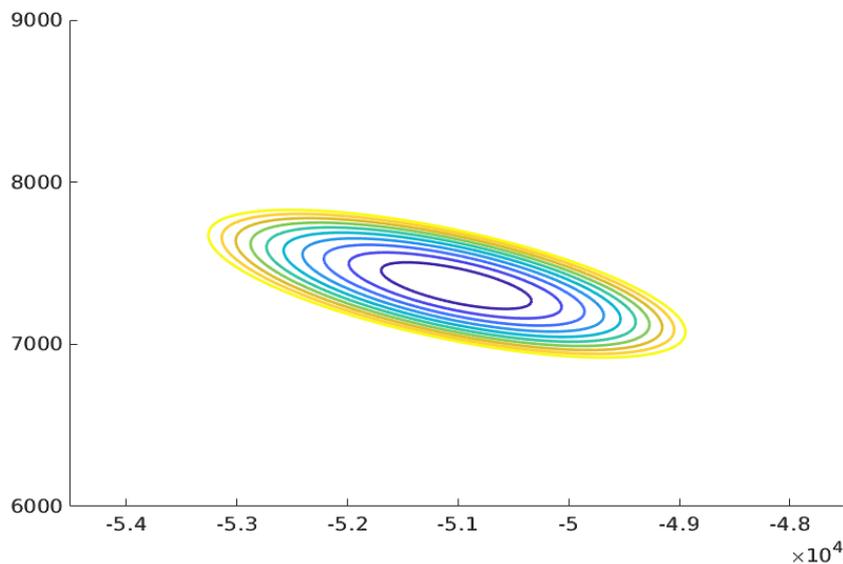


Рис.1.1.5. Линии уровня в окрестности глобального минимума

Линии уровня распределены равномерно в диапазоне $[J_1^{min}, J_1^{min} + 10^{-1}(J_1^{max} - J_1^{min})]$. Значения $J_1(\mathbf{r})$, соответствующие линиям уровня желтого цвета, расположены ближе к правому краю диапазона, а соответствующие линиям уровня синего цвета – ближе к левому краю диапазона. Из рис.1.1.5 вид-

но, что $J_1(\mathbf{r})$ есть функция «овражного» типа, поскольку линии уровня представляют собой вытянутые эллипсы. Большая ось эллипса, соответствующего правому краю диапазона (жёлтый цвет), составляет $2 \times 10^3 \dots 3 \times 10^3$, малая ось $3 \times 10^2 \dots 5 \times 10^2$.

В данном случае целевая функция имеет один глобальный минимум в выбранной окрестности ИРИ и его поиск осложняется только «овражностью». Однако, нередки случаи, когда наряду с глобальным минимумом целевая функция имеет и локальный минимум в окрестности ИРИ (см. рис.1.1.6).

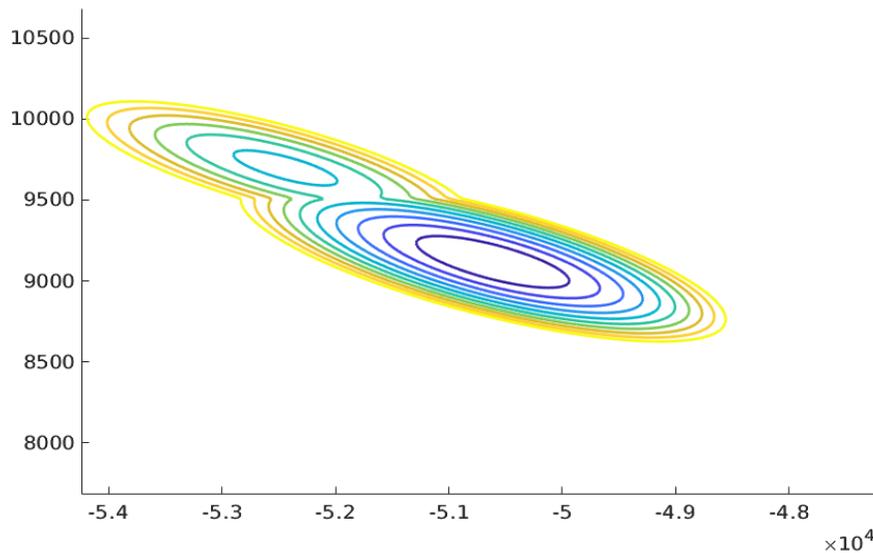


Рис.1.1.6. Линии уровня в окрестности глобального и локального минимумов

На рис.1.1.6 представлены десять линий уровня для ИРИ с $\mathbf{r}_0 = [-49240, 8682, 7000]^T$, когда $J_1^{min} = 12.3813$ и $J_1^{max} = 526.435$. В данном случае зависимость результатов работы алгоритма минимизации целевой функции от начального условия выражена сильнее. Отметим также, что в силу наличия ошибок в реальных наблюдениях глобальный минимум целевой функции не совпадает с истинным положением ИРИ. В рассмотренных выше двух случаях ($\mathbf{r}_0 = [-49513, 6958, 7000]^T$ и $\mathbf{r}_0 = [-49240, 8682, 7000]^T$), расстояние между точкой, обеспечивающей глобальный минимум целевой функции и истинным положением ИРИ, составляет более 10^3 метров.

Алгоритм получения оценки \mathbf{r}_{11}^* самый «медленный» из рассматриваемых (т.е., можно принять относительное время $\delta T_{11} = 100\%$) и именно по отношению к

нему будем оценивать оперативность других методов и алгоритмов. Полученные характеристики рассматриваемых методов представлены в таблице.

Метод	r_{11}^* , $\mu_1 = 1$	r_{12}^* , $\mu_1 = 1$	r_{21}^* , $\mu_2 = 10^{-4}$	r_{22}^* , $\mu_2 = 10^{-4}$	r_3^*	r_4^*	r_5^*	r_6^*	r_7^*
S	734	735	749	778	987	1379	1379	2462	4288
δT	100%	1.9%	99%	1.4%	0.08%	0.23%	0.23%	0.14%	0.07%

Из таблицы видно, что в плане точности лидируют нелинейные методы, однако они требуют выбора хорошего начального условия, знания закона распределения ошибок и требовательны к вычислительным ресурсам.

Оптимальным методом по соотношению точность – время выполнения является *метод 5*, но нужно знать закон распределения ошибок.

Метод 6 и *метод 7* не требуют знания закона распределения ошибок и начальных условий, однако уступают остальным алгоритмам в точности. При самой низкой точности *метод 7* самый быстрый из рассмотренных.

1.1.8 Проблемы применения методов оценивания в аномальных условиях функционирования ГИС

Существующие подходы пассивной локации, например [3-6], не позволяют обеспечить ЛПР необходимой информацией о состоянии измерительных каналов, что затрудняет принятие управленческих решений, направленных на повышение помехоустойчивости и качества оценивания. Попытка компенсировать потери первичной обработки в рамках классических [34-37] и неклассических [15,38] методов оценивания приводит к снижению точности оценивания при расширении пространства состояний, неустойчивости вычислительных процедур, необходимости указания номеров недостоверных каналов, проблеме выбора достаточно хорошего начального условия для итерационных процедур. Приведенные проблемы особенно выражены именно для задач триангуляции, учитывая нелинейность связей и плохую наблюдаемость при попадании цели в триангуляционно-некорректную область [16]. Множество эмпирических методов борьбы с аномальными ошибками измерения (АОИ) основаны на построении нескольких вариантов

объединения линий визирования, отбраковке недостоверных измерений с использованием некоторого порога и построении результирующей оценки на основе различных критериев: минимума расстояния между этими линиями и минимума дисперсии их разброса [39], минимума объема параллелепипеда [13], минимума невязки между значениями инвариантов [21,38,40]. Недостатками приведенных методов является сложность выбора оптимального порога и отсутствие учёта топологических особенностей расположения отметок в пространстве при различных ракурсах и дальностях наблюдения цели.

1.2 Модели управления активными организационными системами специального назначения

ТИС является распределенной системой, состоящей из измерительных пунктов (ИП), пункта управления (возможно, совмещенного с одним из ИП), алгоритмов и методов обработки информации. Как правило, программное обеспечение, функционирующее на пунктах ТИС и реализующее соответствующие методы и алгоритмы, автоматизирует значительную часть этапов обработки информации. В ряде случаев работа ТИС возможна полностью в автоматическом режиме. Однако, функционирование ТИС при наличии АОИ, особенно в условиях конфликта, предполагает участие оператора на некоторых этапах обработки информации. Наличие практического опыта, способность учёта различных плохо формализуемых параметров, влияющих на работу системы, делает оператора субъектом принятия решений. Выбор алгоритма обработки или установка значений параметров, отвечающих текущей обстановке, указание приоритетов целей — это некоторые из задач, в которых оператор принимает непосредственное участие. Наряду с методами оценивания и алгоритмами численной оптимизации на качество получаемой оценки параметров цели оказывают влияние условия наблюдения и топология ТИС. Одним из вариантов адаптации к конкретным условиям наблюдения является изменение топологии ТИС. Изменение топологии предполагает перемещение пунктов ТИС, которое включает в себя приведение пункта в транспортное положение, движение из текущего положения в требуемое и приведение пункта в

рабочее положение. Указанные действия осуществляет обслуживающий персонал пункта (экипаж). Таким образом, при построении ТИС человек является неотъемлемой частью наряду с техническими средствами, алгоритмами и методами обработки информации. Включение человека в процесс построения приводит к рассмотрению ТИС как *организационной или организационно-технической системы* [48,49]. Опыт оператора ИП влияет на выбор методов решения задачи, а высокий уровень подготовки экипажа позволяет осуществить быстрое перемещение ИП, что в конечном итоге сказывается на результатах работы ТИС. Следовательно, управление работой ТИС можно рассматривать как задачу управления организационной системой, где центр — это пункт управления, а агенты - ИП. Рассмотрим подробнее основные понятия, модели и механизмы управления в организационных системах.

1.2.1 Основные понятия

Согласно [48], *организационная система* - объединение людей, совместно реализующих некоторую программу или цель и действующих на основе определенных процедур, и правил, а *механизм функционирования* – это совокупность правил, законов и процедур, регламентирующих взаимодействие участников организационной системы. Понятие *механизма управления* является более узким и определяет совокупность процедур принятия управленческих решений в организациях.

Пусть состояние системы описывается переменной $y \in A$, A - множество допустимых действий. Состояние системы зависит от управляющих воздействий $u \in U$, где U - множество допустимых управлений. Пусть $K(u, y): U \times A \rightarrow \mathbf{R}$ известный критерий эффективности функционирования системы. Критерий определяет эффективность с точки зрения управляющего органа и зависит от текущего состояния системы и управляющих воздействий. Предполагается известной реакция управляемого субъекта на управляющие воздействия. Функциональная зависимость состояния субъекта от управления $y = G(u)$, где $G(\bullet)$ – модель управляе-

мого субъекта, является простейшим способом описания реакции субъекта на управляющее воздействие, при этом величина $\Phi(u) = K(u, G(u))$ называется *эффективностью* управления $u \in U$. Задача управляющего органа состоит в выборе допустимого управления, обладающего максимальной эффективностью: $\Phi(u) \rightarrow \max_{u \in U}$ [48].

В случае пассивной системы функциональная зависимость $y = G(u)$ является моделью системы управляемого объекта. Характерной чертой технических систем является отсутствие у управляемого объекта возможности выбора цели, осуществления прогноза управляющих воздействий. Управляемый объект в технической системе не обладает свободой выбора своего состояния и методов достижения поставленной цели. При наличии хотя бы одного активного управляемого субъекта в системе такая система называется активной. Учёт субъектом собственных интересов и предпочтений в процессе целеполагания и выбора состояния являются свойствами активности. В этом случае свойства активности управляемого субъекта должны учитываться моделью $G(\bullet)$. Построение такой модели осуществляется в предположении выбора управляемым субъектом стратегии поведения, которая максимально согласована с его предпочтениями с учётом текущих или предполагаемых управляющих воздействий. Управляющие воздействия, в свою очередь, зависят от выбранной субъектом стратегии. Модель активной системы позволяет свести задачу управления к задаче максимизации эффективности: $u^* \in \arg \max_{u \in U} \Phi(u) = \{u \in U \mid \forall v \in U : \Phi(u) \geq \Phi(v)\}$

Системный подход к исследованию сложных систем предполагает рассмотрение следующих компонент: состав, структура, функции. Соответственно, модель организационной системы можно представить совокупностью параметров:

- Участники (субъекты и объекты);
- Отношения и роли участников в системе;
- Набор стратегий с учётом рассматриваемых ограничений;
- Порядок информирования и выбора стратегий;
- Интересы и предпочтения активных участников;

- Информация, доступная участникам при принятии решения.

Управляющие воздействия могут применяться к любому из перечисленных параметров с целью достижения требуемого поведения участников организационной системы. Существует классификация управляющих воздействий относительно параметров, используемых в целях управления:

- подбор участников (управление составом);
- назначение ролей и механизмов взаимодействия (управление структурой);
- ограничения на выбор допустимых стратегий (институциональное управление);
- механизмы наказания/поощрения (мотивационное управление);
- информационное обеспечение (информационное управление).

По форме выделяют следующие виды управления: иерархическое, распределенное, сетевое, индивидуальное, коллективное. В рамках функционального подхода выделяют четыре основных вида функций управления: планирование (прогнозирование), организация, мотивация и контроль. Управленческая деятельность есть непрерывный процесс реализации указанных функций управления.

1.2.2 Базовые модели

Организационную систему, состоящую из управляющего органа (центра) и одного управляемого субъекта (агента), будем называть базовой. В соответствии с [50] опишем понятие предпочтения участников организационной системы. Пусть A - допустимое множество стратегий агента, A_0 - множество возможных результатов деятельности. Результат деятельности $z \in A_0$ определяется условиями окружающей обстановки и выбранной агентом стратегией $y \in A$. Влияние окружающей обстановки, как правило, имеет стохастическую природу, и это необходимо учитывать при отыскании зависимости полученного результата от выбранной стратегии. Кроме того, в случае нескольких агентов, на результат деятельности могут оказывать влияние действия других агентов. Наличие предпочтений агента – это возможность сравнивать различные элементы множества A_0 . Пусть R_{A_0} -

предпочтения агента, а \mathfrak{R}_{A_0} - множество возможных предпочтений. Выбор стратегии агентом осуществляется с учётом предпочтений и закона $W_I(\bullet)$, определяющего влияние выбранной стратегии и окружающей обстановки на результат. Здесь индекс I соответствует окружающей обстановке. Также будем считать, что в процессе принятия решений агент выбирает стратегию, которая максимизирует ценность результата деятельности (гипотеза рационального поведения) и устраняет информационную неопределенность до принятия решения (гипотеза детерминизма). Существуют различные виды задания предпочтений: функция полезности, целевая функция, бинарные и нечеткие отношения. Стохастическая природа окружающей обстановки вынуждает агента прогнозировать результаты реализации тех или иных стратегий, поскольку однозначной связи стратегии и результата, как правило, не существует. Имея информацию относительно обстановки, агент может осуществить переход, основанный на знании закона $W_I(\bullet)$, от предпочтений R_{A_0} на множестве A_0 к индуцированным предпочтениям R_A на множестве A . Такой переход называется устранением неопределенности. Индуцированные предпочтения описываются целевой функцией $f(\bullet)$, которая каждому действию агента ставит в соответствие некоторое действительное число (выигрыш).

Пусть предпочтения агентов задаются функцией полезности $v(\bullet)$, а результат деятельности $z \in A_0$ зависит от стратегии $y \in A$ и обстановки $\theta \in \Theta$ известным образом: $z = w(y, \theta)$, где функция $w(\bullet)$ определяет закон $W_I(\bullet)$. Неопределенность относительно параметров окружающей обстановки бывает следующих типов: интервальная, вероятностная, нечёткая. Интервальная неопределенность задаётся в виде множества $\Theta' \subseteq \Theta$, вероятностная представлена в виде распределения вероятностей $p(\theta)$ на множестве $\Theta' \subseteq \Theta$, а нечёткая определяется функцией принадлежности $\mu_{\Theta'}(\theta)$ нечёткого множества $\Theta' \subseteq \Theta$. При устранении интервальной неопределенности используют принцип максимального гарантированного результата: $f(y) = \min_{\theta \in \Theta'} v(w(y, \theta))$, гипотезу благожелательности: $f(y) = \max_{\theta \in \Theta'} v(w(y, \theta))$ или их комбинации. Для устранения вероятностной неопределенности используется ма-

тематическое ожидание $f(y) = \int_{\theta \in \Theta'} v(w(y, \theta)) p(\theta) d\theta$, а также дисперсия и моменты более высоких порядков. Нечёткая неопределенность устраняется выделением множества максимально недоминируемых действий. В результате устранения всех типов неопределенности критерий принятия решений более не зависит от обстановки, то есть $z = w(y) \in A_0$ и $f(y) = v(w(y))$. При этом агент руководствуется правилом индивидуального рационального выбора, то есть выбирает стратегии, доставляющие максимум его целевой функции: $P^{W_i}(\mathfrak{R}_{A_0}, A) = \arg \max_{y \in A} f(y)$. Применение правила позволяет сформировать множество наиболее предпочтительных стратегий $P^{W_i} : \mathfrak{R}_{A_0} \times 2^A \rightarrow 2^A$. Таким образом, в соответствии с гипотезой детерминизма агент устраняет неопределенность до момента принятия решения, а в соответствии с гипотезой рационального поведения осуществляет выбор стратегий, максимизирующих его целевую функцию.

Для случая нескольких агентов необходимо учитывать их взаимное влияние, то есть модель многоэлементной системы (центр и n агентов) должна описывать их совместные действия. Моделирование и исследование взаимодействия участников многоэлементной системы может осуществляться при помощи аппарата теории игр, марковских процессов, стохастических сетей, теории графов и т.д. В задачах принятия решений в условиях конфликта нескольких агентов, где результат сторон существенно зависит от действий противника, как правило, используется теоретико-игровой подход. В терминах теории игр набор рациональных стратегий агентов называется равновесием игры.

Пусть $G_0 = \{N, \{X_i\}_{i \in N}, \{f_i(\bullet)\}_{i \in N}\}$ - игра в нормальной форме. Здесь $f_i = f_i(\theta, x)$ - выигрыш агента, где $x = (x_i, x_{-i}) = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in X' = \prod_{j \in N} X_j$ - вектор стратегий всех агентов, $x_{-i} = (x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \in X_{-i} = \prod_{j \in N \setminus \{i\}} X_j$, - вектор действий оппонентов $N \setminus \{i\}$, $\theta \in \Theta$ - состояние окружающей обстановки, $N = \{\overline{1, n}\}$ - множество агентов. Агент $i \in N$ выбирает стратегию x_i из множества допустимых стратегий X_i . Выбор осуществляется однократно, одновременно и независимо. При этом выбор агентом

стратегии определяется как: $F(\theta, x_{-i}) = \arg \max_{x_i \in X_i} f_i(\theta, x_i, x_{-i})$, $i \in N$. Существует несколько концепций равновесия игры: равновесие в доминантных стратегиях, гарантирующее равновесие, равновесие Нэша, равновесие Байеса-Нэша. Независимый выбор агентом стратегии означает использование некооперативной теоретико-игровой модели, которая не учитывает взаимодействия между агентами при принятии решений.

Кооперативная модель допускает объединение агентов в коалиции с целью совместного выбора стратегий. В кооперативной модели наряду со множеством игроков N используется характеристическая функция $v: 2^N \rightarrow R$. Функция $v(\bullet)$ определяет выигрыш коалиции игроков $S \subseteq N$. Дележом игры $G(N, v)$ называется вектор $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, для которого $\sum_{i \in N} x_i = v(N)$ и $x_i \geq v(\{i\})$, где $i \in N$.

В рассмотренных некооперативной и кооперативной моделях предполагалось, что участники осуществляют свои действия одновременно и однократно, что не в полной мере описывает процесс управления организационными системами. Устранить этот недостаток позволяет использование концепции иерархической игры, в которой сначала стратегию выбирает центр, а затем агенты.

1.2.3 Задача управления

Модель принятия решений центром описывается как $\Psi_0 = \{U_A, U_v, U_I, A_0, \Theta, w(\bullet), v_0(\bullet), I_0\}$, здесь действиями центра являются управления: $u_A \in U_A$ - институциональное, $u_v \in U_v$ - мотивационное, $u_I \in U_I$ - информационное, $w(\bullet)$ - функциональная зависимость результата от выбранной стратегии и окружающей обстановки, Θ - множество обстановок. Управление центра можно представить в виде $u = (u_A, u_v, u_I) \in U = U_A \times U_v \times U_I$, путём воздействия на параметры модели центр стремится добиться от агентов выбора нужных ему стратегий. Выбирая управление $u \in U$, центр формирует множество рациональных стратегий агента $P(u) = P^{w_i}(\mathfrak{R}_{A_0(u_A)}(u_v), A(u_A), I(u_I)) \subseteq A$. Если множество $P(u)$ содержит несколько таких стратегий, то центру необходимо устранить возникшую неопределенность.

Для этого центром используются следующие подходы: $K(u) = \max_{y \in P(u)} f_0(u, y)$ - гипотеза благожелательности и $K(u) = \min_{y \in P(u)} f_0(u, y)$ - гарантированная эффективность. Здесь $K(u)$ - эффективность управления. Решение задачи $K(u) = \max_{u \in U}$ называется оптимальным управлением и обеспечивает максимальную эффективность. Формально задачу управления можно сформулировать следующим образом: $K(u) = \max_{u \in U}$, решение указанной задачи называется оптимальным управлением и имеет максимальную эффективность. Рассмотрим последовательность обобщенных этапов, выполняемых при решении задачи.

1. Описание системы и построение модели;
2. Анализ модели;
3. Задача синтеза управлений;
4. Исследование устойчивости решений;
5. Идентификация организационной системы;
6. Имитационное моделирование;
7. Внедрение.

Этапы 1-4 являются теоретическим исследованием реальной организационной системы, 5,6 – этапы настройки полученной модели и этап 7 – внедрение. В процессе реализации 7-го этапа проводится оценка эффективности практического использования механизмов управления, возможно, с последующей коррекцией модели по результатам внедрения. Задачи этапа 3 являются основными при решении задачи управления $\max_{y \in P(u)} f_0(u, y) \rightarrow \max_{u \in U}$. Рассмотрим основные механизмы управления, используемые при решении задачи управления.

1.2.4 Механизмы управления

Механизм стимулирования назначает вознаграждение агенту при выборе им определенной стратегии поведения. Вознаграждение определяется значением функции стимулирования $\sigma: A \rightarrow R$, то есть центр каждой стратегии агента ставит в соответствие некоторое неотрицательное число. $\Phi(y) = H(y) - \sigma(y)$,

$f(y) = \sigma(y) - c(y)$ - целевые функции центра и агента соответственно. Здесь $c(y)$ - затраты агента, а $H(y)$ - доход центра при выборе агентом стратегии $y \in A$. В задаче стимулирования центр выбирает функцию $\sigma(\bullet)$ и сообщает агенту результат своего выбора. С учётом информации, полученной от центра, агент выбирает стратегию поведения. Идея стимулирования заключается в поиске такой функции, использование которой центром обеспечит выбор агентом нужных центру стратегий. Множество решений игры $P(\sigma) = \arg \max_{y \in A} \{\sigma(y) - c(y)\}$ — это множество действий агента, доставляющих максимум его целевой функции. При использовании центром гипотезы благожелательности эффективность системы стимулирования определяется как $K(\sigma) = \max_{y \in P(\sigma)} \Phi(y)$, для гарантированной эффективности как $K(\sigma) = \min_{y \in P(\sigma)} \Phi(y)$. Задача центра состоит в поиске оптимальной функции стимулирования: $K(\sigma) \rightarrow \max_{\sigma \in M}$, где M - допустимое множество вознаграждений.

Устранение неопределенности центром может проводиться исходя из принципа гарантированной эффективности $K(u) = \min_{y \in P(u)} f_0(u, y)$. Идея планирования состоит в том, что центр для устранения неопределенности не пользуется принципом гарантированной эффективности, а запрашивает информацию у агентов и затем принимает решение. Активность агентов предполагает наличие у них своих предпочтений, следовательно, различные решения центра могут обладать различной ценностью для агента. Проблема манипулирования информацией состоит в том, что агент может сообщать недостоверные данные с целью получить требуемое ему решение центра. Пусть $s_i \in \Omega_i$, $i \in N$ - информация, которую агент сообщает центру, тогда $x_i = \pi_i(s) \in X_i \subseteq R$ - планы, сообщаемые центром, где $\pi_i : \Omega \rightarrow X_i$ - механизм планирования, $s = (s_1, s_2, \dots, s_n) \in \Omega = \prod_{i \in N} \Omega_i$ - информация от агентов. Интересы агента задаются функцией предпочтения $\varphi_i(x_i, r_i) : R^2 \rightarrow R$, где x_i - назначенный агенту план, а r_i - тип агента (позиция максимума функции предпочтения). Агентам известна процедура планирования, её сообщает им центр. Затем агенты сообщают центру информацию относительно своих параметров и получают от

центра план, сформированный в соответствии с процедурой планирования. Необходимо найти такие методы принятия решений, при использовании которых агентам будет выгодно сообщать достоверную информацию. Будем считать, что агенты принимают решения независимо друг от друга выбирая доминантные или равновесные по Нэшу стратегии. Планы, максимизирующие целевые функции агентов при условии достоверности сообщаемой агентами информации, удовлетворяют условию совершенного согласования $\varphi_i(\pi_i(s), s_i) = \max_{x_i \in X_i(s_{-i})} \varphi_i(x_i, s_i)$, $i \in N$, $s \in \Omega$, где $X_i(s_{-i})$ - множество планов, $s_{-i} = (s_1, \dots, s_{i-1}, s_{i+1}, \dots, s_n)$ - обстановка для i -го агента. Решение задачи $\Phi(\pi, s)$ на множестве планов, удовлетворяющих условию совершенного согласования, называется законом открытого управления [50]. Принцип открытого управления является важным результатом теории активных систем. Использование центром данного принципа позволяет обеспечить получение достоверной информации от агентов [48,50,51].

Механизмы организации по большей части используются для финансового управления и включают в себя: смешанное финансирование, страхование, принцип самокупаемости, противозатратный механизм и т.д. [51].

Выработка эффективных решений напрямую зависит от информированности о поведении управляемых объектов. В сложных системах ввиду большого объема информации и ограниченных возможностей управляющего органа целесообразно агрегирование информации о результатах деятельности участников системы. При решении задачи агрегирования используется дерево целей, которое позволяет структурировать большой объём информации, поступающий от агентов. В виду ограниченности возможностей центра в ряде случаев целесообразно использовать мнения экспертов. При формировании итогового результата необходимо учитывать возможность недостоверности оценок некоторых экспертов, а также существование несопадающих мнений относительно одной и той же проблемы. В целях автоматизации обработки информации используются СППР, которые формируют перечень возможных решений и оценок их эффективности. Информация обрабатывается независимо несколькими каналами принятия реше-

ния и затем полученные результаты формируют итоговые рекомендации для ЛПП [52]. Приведенные выше подходы обработки информации имеют общее название – механизмы планирования.

Механизмы управления составом и структурой включают в себя задачи определения количества участников системы и распределения функциональных обязанностей.

1.2.5 Организационные системы специального назначения

В современных условиях функционирование любых сложных систем характеризуется наличием различного рода конфликтных взаимодействий. Значительная часть описанных выше моделей и методов активно используется в управлении социально-экономическими и финансовыми системами, для которых выделяют два устойчивых режима взаимодействия участников – сотрудничества и конкуренции. Понятие конфликта в таких системах часто является синонимом режима конкуренции, то есть борьбы участников за доступ к различным ресурсам. Отличие конфликта от конкуренции состоит в осознанности противоречий и направленность действий его участников друг против друга. Соперничество на рынке товаров и услуг, получение контракта на выполнение проекта или конкурс на вакантную должность могут иметь место без осознания несовместимости их целей. В связи с бурным развитием информационных технологий информация и структуры для её хранения и обработки являются не меньшей ценностью, чем материальные ресурсы. Сети сотовой связи, сети камер видеонаблюдения, дистанционное банковское обслуживание, социальные сети и т.д. формируют сетевые базы и банки данных, которые представляют значительную ценность. Распределенный подход к хранению данных, облачные технологии наряду с удобством повышают и риски доступа к ним посторонних лиц. Несанкционированный доступ к информации, циркулирующей в таких системах, может произойти в результате действий нарушителей, недобросовестных или неквалифицированных пользователей, то есть конфликтного взаимодействия систем с объектами внешней среды. Исследование возникающих конфликтных взаимодействий, поиск эффективных методов

защиты и противодействия позволяет совершенствовать системы, обеспечивающие безопасность информации. Таким образом, исследование конфликта информационных систем является важным и актуальным научно-техническим направлением. Учитывая тот факт, что наряду с техническими средствами человек принимает непосредственное участие в функционировании информационных систем, применение моделей и методов, рассмотренных в данном разделе для их исследования, представляется перспективным подходом. Например, моделирование конфликта в социальных сетях в работе [53] рассматривается на основе аппарата активных систем. В работе [54] исследование вопросов безопасности информационных систем в процессе конфликтного взаимодействия с внешней средой проводится при помощи формализма гибридных автоматов, который позволяет учитывать активность агентов системы.

Радиоэлектронные системы представляют собой подмножество множества информационных систем и по своему назначению делятся на следующие основные классы: системы передачи информации; системы извлечения информации; системы разрушения информации (радиоэлектронного противодействия); системы радиоуправления [19]. Радиолокационные (в частности, системы пассивной локации) и радионавигационные системы, системы траекторных измерений, радиотелескопы, системы дистанционного зондирования являются примерами радиоэлектронных средств извлечения информации. В [19,100] конфликт радиоэлектронных систем рассматривается как процесс взаимодействия сторон (систем), имеющих явно противоположные цели и стремящихся достигнуть несовместимых состояний. Конфликтный характер взаимодействия сторон возникает в ситуации, когда стороны (одна или несколько) проводят комплекс мер по скрытию или искажению информации с целью затруднить работу других участников. Такие ситуации характерны для функционирования систем извлечения (радиомониторинг) и разрушения информации (системы постановки помех).

В настоящее время радиоэлектронное противоборство представляет собой конфликтное взаимодействие нескольких иерархических объединений систем, решающих согласованный набор задач в интересах достижения поставленных

целей [100-102]. Каждая система объединения выполняет свою функцию: получение сведений о противнике, передача данных, обработка и обобщение информации, организация противодействия противнику, радиоэлектронная маскировка, постановка помех. В этом случае противоборство можно рассматривать как сложный коалиционный конфликт, где каждая из сторон стремится к упреждающему решению задач, в том числе и путём прямого вмешательства в процесс функционирования систем противостоящей стороны. Выбор средств и методов противодействия основывается на полученных сведениях о противнике, и нарушение работы измерительных систем или системы связи приводит к нарушению работы системы противодействия и, следовательно, ухудшению положения коалиции в целом. Одним из вариантов анализа сложного конфликта является декомпозиция. Конфликт разбивается на составные части, разрабатывается модель и проводится математическое моделирование для каждой части отдельно [100].

Рассматривая взаимодействие радиоэлектронных систем в условиях конфликта с точки зрения управления организационно-техническими системами, можно выделить ряд особенностей:

- взаимодействие систем происходит в условиях существенной априорной неопределенности;
- стороны имеют противоположные цели и стремятся достигнуть несовместимых состояний;
- технические особенности функционирования радиоэлектронных систем накладывают ограничения на активность участников системы.

Указанные особенности изменяют содержательную часть таких понятий, как бездействие агента, выгода и т.д. в соответствии со спецификой рассматриваемых систем. Таким образом, типы решаемых задач, условия функционирования и технические особенности позволяют классифицировать рассмотренные системы как организационно-технические системы специального назначения.

Выводы

- 1 Приведенные оптимальные и квазиоптимальные методы принципиально пригодны для оценки местоположения ИРИ при нормальных условиях функционирования ТИС, тем не менее, оказываются малопригодными для условий структурно-параметрической неопределенности.
- 2 Рассмотренные методы могут быть использованы в задачах оценивания параметров движения ИРИ с применением теории фильтрации [55-60] и в алгоритмах триангуляционной обработки измерительной информации, содержащей аномальные ошибки пеленгования [61,62].
- 3 Приведенные 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.

2 КЛАСТЕРНО-ВАРИАЦИОННЫЙ МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ЦЕЛИ ДЛЯ ТРИАНГУЛЯЦИОННОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Некорректные условия наблюдения приводят к ситуации, когда измерения отдельных пеленгаторов из состава ТИС наряду со случайными погрешностями могут содержать неизвестные АОИ. Для обнаружения измерительных каналов с АОИ и оценки их значений используется обширный математический инструментарий: робастное оценивание, расширение пространства состояний, стохастическое программирование, факторный анализ и др. (см. например, [36,63-70]). Многообразие используемых методов соответствует такой неопределенности, которую можно описать для всех измерительных каналов ТИС и в итоге получить единственное решение задачи оценивания параметров местоположения и движения цели без участия оператора. Данную неопределенность назовем корректной, для ее описания можно воспользоваться известными подходами для описания компактных множеств допустимости (например, эллипсоидального [66]).

Функционирование ТИС при некорректных условиях наблюдения или в условиях информационного конфликта ввиду отсутствия необходимых исходных данных не позволяет получить аналитическое описание возможной неопределенности. Факторами неопределенности могут быть: отсутствие прямой видимости цели; явления рефракции, интерференции и многолучевости; влияние естественных и искусственных помех; преднамеренные воздействия на составные части ТИС и др. [18,38,40].

Попытка устранения неопределенности в рамках триангуляционного оценивания, основанная на идее построения всевозможных вариантов объединения азимутальных и угломестных измерительных каналов, была предложена в работах [18,22,23]. Каждому варианту объединения измерительных каналов ТИС соответствует своя измерительная структура (ИС). При этом ИС такова, что если предположить, что она сформирована только достоверными измерительными каналами, то она способна дать точную оценку параметров ИРИ. Семейство таких ИС порождает множество промежуточных оценок, при этом некоторое подмножество

этих оценок получено с использованием только достоверных измерительных каналов, то есть каналов, не содержащих АОИ. В [18,22,23] получение семейства промежуточных оценок осуществляется в линейном варианте на основе косвенных измерений. Преобразование первичных измерений в косвенные существенно изменяет исходный закон распределения ошибок пеленгования, при этом аналитическое представление закона распределения косвенных измерений является сложной задачей. Кроме того, в указанных работах вопрос построения результирующей оценки параметров движения цели не получил должного обоснования. Также, при построении результирующей оценки на базе промежуточных, не принимаются во внимание топологические особенности распределения оценок в пространстве оцениваемых параметров. Фактически, результирующая оценка является результатом весового объединения промежуточных оценок. Поскольку часть промежуточных оценок получена с использованием только достоверных каналов, часть на основе как достоверных, так и недостоверных, а часть с использованием только недостоверных каналов, то оценки распределены в пространстве по сложному топологическому закону, который не поддается аналитическому описанию. Выбор адекватных весов в алгоритме построения результирующей оценки существенно затруднен. Использование недостоверных измерений при формировании результирующей оценки, пусть и с малыми весами, снижает точность оценивания. Математический аппарат кластерного анализа [71-73] позволяет группировать оценки в пространстве оцениваемых параметров. Анализ таких группировок (разбиений на кластеры) позволяет выявить и учесть существующие топологические особенности множества оценок.

В настоящем разделе развивается альтернативный кластерно-вариационный метод построения оценок местоположения цели на базе ТИС, функционирующей в условиях априорной неопределенности, обусловленной как случайными, так и преднамеренными воздействиями на составные части системы. Метод позволяет использовать прямые и косвенные измерения (псевдоизмерения [24,25,78,79]) и основан на максимально возможном “размножении” промежуточных оценок. Анализ топологических особенностей полученного множества промежуточных

оценок позволяет проводить обнаружение недостоверных измерительных каналов как по азимуту, так и по углу места. Введение ограничения на максимальное количество каналов с АОИ позволяет методу функционировать в автоматическом режиме. В случае нарушения указанного ограничения метод позволяет осуществлять информационное обеспечение оператора в процессе принятия решений.

2.1 Модели, ограничения, понятия

Рассмотрим ТИС, состоящую из M пеленгаторов $\{\Pi_m\}_{m=1}^M$ в декартовой системе координат $Oxuz$. Пусть $\mathbf{X} = [\mathbf{\Lambda}^T, \mathbf{P}^T]^T$ - вектор состояния, где $\mathbf{\Lambda} = [R, \alpha, \beta]^T$ - вектор местоположения, \mathbf{P} - вектор вспомогательных параметров, используемых для расширения пространства состояний. Для нормальных условий функционирования ТИС вектор наблюдений зададим в виде

$$\mathbf{H} = \mathbf{Y} + \mathbf{\Psi}, \quad (2.1.1)$$

где $\mathbf{H} = [(h_m^\alpha, h_m^\beta), m = \overline{1, M}]^T$, $\mathbf{Y} = \mathbf{Y}(\mathbf{X}) = [(\alpha_m, \beta_m), m = \overline{1, M}]^T$, M - число пеленгаторов, α_m и β_m - азимут и угол места цели относительно пеленгатора Π_m , $\mathbf{\Psi} = [(\psi_m^\alpha, \psi_m^\beta), m = \overline{1, M}]^T$ - вектор шумов наблюдений, для которого $M\{\mathbf{\Psi}\} = \mathbf{0}$, $M\{\mathbf{\Psi}\mathbf{\Psi}^T\} = \mathbf{K}^\Psi$, где $M\{\cdot\}$ - символ математического ожидания. Рабочая область ТИС задаётся ограничениями вида

$$\mathbf{\Lambda} \in \mathfrak{M} = \mathfrak{M}_R \times \mathfrak{M}_\alpha \times \mathfrak{M}_\beta, \quad (2.1.2)$$

где $\mathfrak{M}_R = [R_{\min}, R_{\max}]$, $\mathfrak{M}_\alpha = [\alpha_{\min}, \alpha_{\max}]$ и $\mathfrak{M}_\beta = [\beta_{\min}, \beta_{\max}]$ - диапазоны возможного изменения величин R , α и β . Для нормальных условий функционирования ТИС, используя значения элементов матрицы \mathbf{K}^Ψ , можно сформировать неравенства $|\psi_m^\alpha| < \varepsilon^\alpha$ и $|\psi_m^\beta| < \varepsilon^\beta$, которые будут выполняться с заданной вероятностью, где ε^α и ε^β - статистически обоснованные пороговые значения, рассчитанные по известным правилам. В частных случаях можно принять $\varepsilon^\alpha = \varepsilon^\beta = \varepsilon$. При возникновении АОИ в измерительных каналах указанные неравенства не выполняются для соответствующих координат вектора $\mathbf{\Psi}$. Отметим, что нам неизвестны номера этих

координат и значения АОИ. Поскольку в общем случае АОИ не являются случайными, то для их описания не применимы традиционные характеристики, используемые в теории вероятностей и в теории случайных процессов. Аналитическое описание моделей АОИ нам не доступно.

Каждому пеленгатору Π_m ставится в соответствие два измерительных канала: K_m^α – азимутальный и K_m^β – угломестный. Канал, не содержащий АОИ, будем называть достоверным, и недостоверным в противном случае. Будем рассматривать множество измерительных каналов пеленгаторов из состава ТИС $\mathbf{K} = \mathbf{K}^\alpha \cup \mathbf{K}^\beta$, где $\mathbf{K}^\alpha = \{K_m^\alpha, m = \overline{1, M}\}$ и $\mathbf{K}^\beta = \{K_m^\beta, m = \overline{1, M}\}$. С каждым Π_m можно связать две «возмущенные» поверхности положения цели, описываемые уравнениями

$$\begin{cases} (x - \rho_m^x) \sin h_m^\alpha + (y - \rho_m^y) \cos h_m^\alpha = 0 \\ (x - \rho_m^x)^2 (\cos h_m^\beta)^{-2} + (y - \rho_m^y)^2 (\cos h_m^\beta)^{-2} - (z - \rho_m^z)^2 (\sin h_m^\beta)^{-2} = 0 \end{cases} \quad (2.1.3)$$

Первое уравнение в (2.1.3) описывает «возмущенную» плоскость, соответствующую измерению h_m^α , а второе уравнение – «возмущенный» круговой конус, соответствующий измерению h_m^β . Для случая, когда $\psi_m^\alpha = 0$ и $\psi_m^\beta = 0$ получаем «невозмущенные» поверхности положения цели.

Функционирование ТИС в условиях сложной радиоэлектронной обстановки при наличии как преднамеренных, так и непреднамеренных воздействий на пеленгаторы приводит к тому, что вектор $\mathbf{H} = \mathbf{Y} + \mathbf{\Psi}$ может содержать координаты с АОИ, относительно которых отсутствует какая-либо априорная информация. Пусть $D^{\alpha\beta}$ – количество измерительных каналов, не содержащих АОИ, тогда будем предполагать, что

$$M + 1 \leq D^{\alpha\beta} \leq 2M. \quad (2.1.4)$$

Такое ограничение вполне естественно и позволяет методу обнаруживать недостоверные каналы и осуществлять построение надежной оценки параметров движения целей в автоматическом режиме, основываясь на мажоритарном принципе. В [21-23,43] было показано, что попытка реализации известных алгоритмов триангуляционного оценивания на измерениях с АОИ приводит, как правило, к неудовлетворительному результату. Указанные методы предполагают расширение век-

тора оцениваемых параметров и указания номеров недостоверных каналов из множества $\mathbf{K} = \mathbf{K}^\alpha \cup \mathbf{K}^\beta$ для построения оценки местоположения и параметров движения ИРИ. К тому же использование расширенного вектора оцениваемых параметров снижает точность оценивания. Отметим, что для ТИС, функционирующих в условиях информационного конфликта, указание номеров измерительных каналов с АОИ, как правило, не представляется возможным. Для обнаружения измерительных каналов с АОИ предлагается использовать так называемый геометрический фактор, когда для ТИС с числом пеленгаторов более трех образуется избыточное число поверхностей положения, на базе которых можно строить альтернативные ИС, указанные в [18,22,23]. На множестве промежуточных оценок проводится кластеризация и формируется результирующая оценка.

2.2 Формирование рабочих измерительных структур и соответствующих им оценок

Формируем, по аналогии с [43], семейство $\{\overline{\text{ИС}}_1, \overline{\text{ИС}}_2, \dots, \overline{\text{ИС}}_{\overline{N}}\}$, где $\overline{\text{ИС}}_n$, $n \in \{1, \overline{N}\}$ - произвольный набор измерительных каналов из $\mathbf{K} = \mathbf{K}^\alpha \cup \mathbf{K}^\beta$. Отметим, что $\overline{\text{ИС}}_n$ и $\overline{\text{ИС}}_m$ не совпадают для всех $n, m \in \{1, \overline{N}\}$, $n \neq m$. Полученное семейство содержит как наблюдаемые, так и ненаблюдаемые ИС. Зададим пару 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 для данной ТИС. Пара $(\gamma_\alpha, \gamma_\beta)$ будет использована для отсеивания ненаблюдаемых ИС в $\{\overline{\text{ИС}}_1, \overline{\text{ИС}}_2, \dots, \overline{\text{ИС}}_{\overline{N}}\}$. Будем полагать, что число измерительных каналов, не содержащих АОИ, должно быть не менее $D^{\alpha\beta} = D_s^\alpha + D_s^\beta$, $s = \overline{1, S}$, $D_s^\alpha, D_s^\beta \in \{\overline{1, M}\}$, 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). Понятно, что для наблюдаемости задачи необходимо, чтобы $D_s^\alpha \geq \gamma_\alpha$ и $D_s^\beta \geq \gamma_\beta$.

Замечание 1. Общее количество наблюдаемых ИС для пары $(\gamma_\alpha, \gamma_\beta)$ равно

$$N = \left(\sum_{n=\gamma_\alpha}^M C_M^n \right) \left(\sum_{n=\gamma_\beta}^M C_M^n \right), \quad (2.2.1)$$

количество наблюдаемых ИС, образованных каналами без АОИ

$$N^{(D_s^\alpha, D_s^\beta)} = \left(\sum_{n=\gamma_\alpha}^{D_s^\alpha} C_{D_s^\alpha}^n \right) \left(\sum_{n=\gamma_\beta}^{D_s^\beta} C_{D_s^\beta}^n \right), \quad (2.2.2)$$

а минимальное их количество

$$N^{(D^{\alpha\beta})} = \min_s N^{(D_s^\alpha, D_s^\beta)}. \quad (2.2.3)$$

Например, пусть $2M = 10$, $\gamma_\alpha = 2$, $\gamma_\beta = 1$ и $D^{\alpha\beta} = 6$ (т.е. шесть каналов из 10 не содержат АОИ). Тогда, с учетом (2.2.1)-(2.2.3) возможны следующие варианты (D_s^α, D_s^β) : (2,4), (3,3), (4,2) и (5,1). При этом $N = 806$, $N^{(2,4)} = 15$, $N^{(3,3)} = 28$, $N^{(4,2)} = 33$, $N^{(5,1)} = 26$, а $N^{(6)} = N^{(2,4)} = 15$.

Используя значения $(\gamma_\alpha, \gamma_\beta)$, выделим из $\{\overline{ИС}_1, \overline{ИС}_2, \dots, \overline{ИС}_{\overline{N}}\}$ множество наблюдаемых структур $\{ИС_1, ИС_2, \dots, ИС_N\}$, где $N < \overline{N}$. Для наблюдаемых структур задача определения местоположения цели, при идеальных измерениях, имеет единственное решение. На основе вектора первичных измерений $\mathbf{H}_n = [h_{np}^\alpha, p=1, \overline{M}_n^\alpha; h_{np}^\beta, p=1, \overline{M}_n^\beta]^\top$, где $L_n = M_n^\alpha + M_n^\beta$ – общее число измерений, $h_{np}^\alpha \in \{h_1^\alpha, h_2^\alpha, \dots, h_M^\alpha\}$ и $h_{np}^\beta \in \{h_1^\beta, h_2^\beta, \dots, h_M^\beta\}$, сформируем первичную отметку местоположения цели $\Lambda_n^* = [x_n^*, y_n^*, z_n^*]^\top$ для $ИС_n$. Указанная оценка может быть получена с использованием одного из квазиоптимальных методов, рассмотренных в работе [21]. В соответствии с (2.1.2) зададим рабочую область ТИС, предполагаем, что $\Lambda_n^* = [R_n^*, \alpha_n^*, \beta_n^*]^\top \in \mathfrak{M} = \mathfrak{M}_R \times \mathfrak{M}_\alpha \times \mathfrak{M}_\beta$. Для полученной отметки Λ_n^* по отношению ко всем $\Pi_m (m = \overline{1, M})$ вычисляем «вторичные» пеленги α_{mn}^* и β_{mn}^* . Под «вторичными» пеленгами понимаются линии визирования отметки Λ_n^* пеленгаторами $\Pi_m (m = \overline{1, M})$. Общее количество таких пеленгов $2M$, M – азимутальных и столько же угломестных. Отдельно для α_{mn}^* и β_{mn}^* проверяем выполнение условий

$$|\alpha_{mn}^* - h_n^\alpha| < \varepsilon^\alpha, |\beta_{mn}^* - h_n^\alpha| < \varepsilon^\beta, m = \overline{1, M}. \quad (2.2.4)$$

ИС_n отсеивается, если общее количество выполненных условий (2.2.4) по азимуту и углу места меньше M . Будем называть оставшиеся ИС рабочими измерительными структурами: РИС_[n_i], где $i = \overline{1, N_1}$, $N_1 \leq N$, $n_i \in \{\overline{1, N}\}$. Пусть $\Lambda_{n_i}^* = [x_{n_i}^*, y_{n_i}^*, z_{n_i}^*]^T$ - первичная отметка, соответствующая РИС_[n_i]. Отметим, что задача обнаружения недостоверных каналов ещё не решена и в формировании первичной отметки $\Lambda_{n_i}^*$ могли участвовать как нормальные, так и аномальные измерения, соответствующие измерительным каналам РИС_[n_i]. Результатом работы данного этапа является РИС_{n_i} и соответствующие им первичные отметки, которые прошли этап предварительной селекции.

2.3 Кластеризация и вычисление параметров кластеров

Анализ топологических особенностей множества $\Lambda_{n_i}^* = [x_{n_i}^*, y_{n_i}^*, z_{n_i}^*]^T$ с целью построения результирующей оценки будем проводить при помощи иерархического агломеративного алгоритма кластеризации с евклидовой нормой ($\|\cdot\|_2$) [71-73]. Процесс агломеративной кластеризации состоит в том, что на первом этапе все отметки рассматриваются как одноэлементные кластера. Затем осуществляется последовательное объединение двух ближайших кластеров, в смысле выбранной метрики, в один и так далее, пока не останется один кластер. Результатом работы алгоритма является последовательность объединения кластеров для различных уровней иерархии. Поскольку отметки $\Lambda_{n_i}^* = [x_{n_i}^*, y_{n_i}^*, z_{n_i}^*]^T$ получены путём обработки угловых измерений, то они имеют свойство образовывать «цепочечные» структуры в пространстве. С целью корректной обработки таких структур была выбрана метрика "ближайшего соседа", согласно которой расстояние между двумя кластерами определяется расстоянием между двумя наиболее близкими отметками («ближайшими соседями») из этих кластеров.

До начала операции кластеризации необходимо определить предполагаемое количество кластеров Q в финальном разбиении. Количество кластеров в разбиении множества первичных отметок определяется условиями наблюдения цели, значением D^{ab} - требуемым количеством каналов без АОИ. Выбор Q существенно зависит от опыта оператора. Несоответствие значения Q текущей обстановке может привести к разбиению отметок, относящихся к одной цели, на два различных кластера, и напротив, объединению отметок, соответствующих истинному и ложному местоположению цели. Такие несоответствия могут приводить к снижению точности результирующей оценки. Выбор значения Q может производиться как в ручном, так и в автоматическом режимах. Автоматический выбор Q осуществляется на основе параметров, задаваемых оператором. Отметим, что в автоматическом режиме определение значения Q происходит для каждого набора измерений ТИС. В ручном режиме оператор непосредственно задаёт значение Q один раз в начале сеанса работы ТИС. Использование автоматического выбора позволяет адаптироваться к ситуации, которая сложилась в текущий момент времени, но реализация такой адаптации требует дополнительных вычислительных и временных ресурсов. Алгоритм автоматического выбора Q и параметры, задаваемые оператором, будут рассмотрены ниже.

Таким образом, после определения значения Q тем или иным образом, множество первичных отметок $\Lambda_{n_i}^*$ ($i = \overline{1, N_1}$) в процессе кластеризации разбивается на Q кластеров. Кластеризация устанавливает отображение $f : \{n_1, n_2, \dots, n_{N_1}\} \rightarrow \{\overline{1, Q}\}$, которое номерам n_i , отметок полученных на базе РИС $_{[n_i]}$, ставит в соответствие номер кластера $q \in \{\overline{1, Q}\}$. В результате множество номеров первичных отметок $\{n_1, n_2, \dots, n_{N_1}\}$ разбивается на Q непересекающихся множеств-кластеров $\{\mathbb{K}_1, \mathbb{K}_2, \dots, \mathbb{K}_Q\}$, где $\mathbb{K}_q = \{n_{1q}, n_{2q}, \dots, n_{L_q q}\}$, $n_{dq} \in \{n_1, n_2, \dots, n_{N_1}\}$, $d = \overline{1, L_q}$, где L_q – количество элементов в кластере \mathbb{K}_q и $\mathbb{K}_q \neq \emptyset \quad \forall q = \overline{1, Q}$. При этом $\{n_1, n_2, \dots, n_{N_1}\} = \mathbb{K}_1 \cup \mathbb{K}_2 \cup \dots \cup \mathbb{K}_Q$, где $\mathbb{K}_l \cap \mathbb{K}_r = \emptyset \quad \forall l, r \in \{\overline{1, Q}\}, l \neq r$. Результаты кластеризации можно представить в

виде дендрограммы [71-73], которая в графическом виде представляет расстояние между отдельными кластерами с указанием последовательности их объединения для различных уровней иерархии. Каждый узел в дендрограмме соответствует одному шагу процесса объединения кластеров.

Как было сказано выше, для измерения расстояния между первичными метками $\Lambda_{n_i}^*$ и $\Lambda_{n_j}^*$ используется евклидова метрика

$$\rho(\Lambda_{n_i}^*, \Lambda_{n_j}^*) = \|\Lambda_{n_i}^* - \Lambda_{n_j}^*\|_2, i, j \in \{1, N_1\}, \quad (2.3.1)$$

а для двух кластеров \mathbb{K}_l и \mathbb{K}_r расстояние «ближнего соседа»

$$\rho(\mathbb{K}_l, \mathbb{K}_r) = \min_{s_l, s_r} \|\Lambda_{s_l}^* - \Lambda_{s_r}^*\|_2, s_l \in \overline{1, L_l}, s_r \in \overline{1, L_r}. \quad (2.3.2)$$

Первичные метки $\Lambda_{n_1}^*, \Lambda_{n_2}^*, \dots, \Lambda_{n_{N_1}}^*$ последовательно объединяются в кластера: сначала самые близкие, а затем всё более отдалённые друг от друга (в смысле метрик (2.3.1) и (2.3.2)). На каждом шаге алгоритма объединяются два самых близких кластера \mathbb{K}_l и \mathbb{K}_r , образуя новый кластер $\mathbb{K}_p = \mathbb{K}_l \cup \mathbb{K}_r$, при этом общее количество кластеров уменьшается на единицу. Процесс кластеризации завершается, когда количество кластеров станет равным Q .

Получив разбиение множества первичных меток для каждого кластера разбиения \mathbb{K}_q , $q \in \{1, 2, \dots, Q\}$, на основе меток, попавших в кластер, вычислим следующие параметры: L_q – мощность кластера, $\Upsilon_q = \left[\sum_d x_{n_{dq}}^* L_q^{-1}, \sum_d y_{n_{dq}}^* L_q^{-1}, \sum_d z_{n_{dq}}^* L_q^{-1} \right]^T$ – центр кластера.

При ручном режиме выбора значения Q не в полной мере учитываются конкретные условия наблюдения цели, Q выбирается как некоторое значение, которое подходит для большинства ситуаций. Следствием несоответствия значения Q текущей ситуации может являться объединение двух близких кластеров в один, или разбиение одного неоднородного кластера на несколько кластеров. С целью учёта таких случаев для каждого кластера \mathbb{K}_q сформируем множество $\Omega_q = \{n_{\Omega, q, i}, i = \overline{1, L_{\Omega, q}}\}$ (где $n_{\Omega, q, i} \in \{n_1, n_2, \dots, n_{N_1}\}$), которое объединяет в себе все метки,

соответствующие тем элементам из множества $\{\Lambda_{n_1}^*, \Lambda_{n_2}^*, \dots, \Lambda_{n_{N_1}}^*\}$, которые наиболее близки к центру Υ_q кластера \mathbb{K}_q . Критерием включения метки в рассматриваемое множество являются следующие неравенства:

$$|\alpha_{mn_{\Omega,q,i}}^* - \alpha_m^{\Upsilon_q}| < \varepsilon^\alpha, \quad |\beta_{mn_{\Omega,q,i}}^* - \beta_m^{\Upsilon_q}| < \varepsilon^\beta, \quad m = \overline{1, M}, \quad (2.3.3)$$

где $\alpha_m^{\Upsilon_q}$ и $\beta_m^{\Upsilon_q}$ – «вторичные» пеленги оценки Υ_q по отношению к Π_m , а $\alpha_{mn_{\Omega,q,i}}^*$ и $\beta_{mn_{\Omega,q,i}}^*$ – «вторичные» пеленги оценки $\Lambda_{n_{\Omega,q,i}}^*$, соответствующие РИС $n_{\Omega,q,i}$, по отношению к Π_m . Полученное множество Ω_q назовем ядром кластера \mathbb{K}_q . Его основные характеристики: мощность $L_{\Omega,q} \geq 1$ и центр

$$\mathbf{I}_{\Omega,q} = \left[\sum_i x_{[n_{\Omega,q,i}]}^* (L_{\Omega,q})^{-1}, \sum_i y_{[n_{\Omega,q,i}]}^* (L_{\Omega,q})^{-1}, \sum_i z_{[n_{\Omega,q,i}]}^* (L_{\Omega,q})^{-1} \right]^T, n_{\Omega,q,i} \in \Omega_q. \quad (2.3.4)$$

Таким образом, с учетом (2.) и (2.) в пространстве \mathbf{R}^3 сформирована некоторая окрестность $O_{\Omega,q}$ (с центром в точке $\mathbf{I}_{\Omega,q}$), которую назовем доверительной областью ядра Ω_q , отвечающего кластеру \mathbb{K}_q .

Отметим, что при автоматическом выборе значения Q рассчитываются для каждого набора измерений, следовательно, учитываются особенности текущей ситуации и построения множества Ω_q не требуется. В данном случае построенное множество Ω_q в подавляющем большинстве случаев будет совпадать с кластером \mathbb{K}_q . Далее, с целью упрощения обозначений, будем писать L_q - мощность, а \mathbf{I}_q - центр кластера \mathbb{K}_q или соответствующего ему ядра Ω_q (для фиксированного значения Q). Центру кластера \mathbf{I}_q можно поставить в соответствие множество измерительных

каналов $\mathbf{K}_q = \{\mathbf{K}_q^\alpha, \mathbf{K}_q^\beta\} \subseteq \mathbf{K} = \mathbf{K}^\alpha \cup \mathbf{K}^\beta$, где $\mathbf{K}_q^\alpha = \{\mathbf{K}_i^\alpha, i = \overline{1, M_q^\alpha}\}$ и $\mathbf{K}_q^\beta = \{\mathbf{K}_i^\beta, i = \overline{1, M_q^\beta}\}$, использованных при построении оценки \mathbf{I}_q , при этом $M_q^\alpha + M_q^\beta \leq 2M$.

2.4 Обнаружение недостоверных каналов, коррекция аномальных измерений, формирование результирующей оценки

Для каждого множества измерительных каналов кластера \mathbf{K}_q определяем множество условно достоверных $\mathbf{K}_q^0 = \{\mathbf{K}_q^{0\alpha}, \mathbf{K}_q^{0\beta}\} \subseteq \mathbf{K}$ и условно недостоверных измерительных каналов $\mathbf{K}_q^1 = \{\mathbf{K}_q^{1\alpha}, \mathbf{K}_q^{1\beta}\} \subseteq \mathbf{K}$, где $\mathbf{K}_q^{r\alpha} = \{\mathbf{K}_i^{r\alpha}, i = \overline{1, M_q^{r\alpha}}\}$, $\mathbf{K}_q^{r\beta} = \{\mathbf{K}_i^{r\beta}, i = \overline{1, M_q^{r\beta}}\}$, $r \in \{0, 1\}$, $\mathbf{K}_q^0 \cap \mathbf{K}_q^1 = \emptyset$, $\mathbf{K}_q^0 \cup \mathbf{K}_q^1 = \mathbf{K}$, $\|\mathbf{K}_q^0\| + \|\mathbf{K}_q^1\| = \|\mathbf{K}\| = 2M$, $\|\cdot\|$ – оператор вычисления мощности множества. При этом для элементов множеств $\mathbf{K}_q^{0\alpha}$ и $\mathbf{K}_q^{0\beta}$ справедливы неравенства:

$$|h_m^\alpha - \alpha_m^{1q}| \leq \varepsilon^\alpha, |h_m^\beta - \beta_m^{1q}| \leq \varepsilon^\beta, m = \overline{1, M}, \quad (2.4.1)$$

где α_m^{1q} и β_m^{1q} – «вторичные» пеленги оценки \mathbf{I}_q . Соответственно для элементов множеств $\mathbf{K}_q^{1\alpha}$ и $\mathbf{K}_q^{1\beta}$ неравенства (2.4.1) не выполняются. При анализе множеств условно достоверных и условно недостоверных каналов могут возникнуть следующие варианты.

1. $\|\mathbf{K}_q^1\| \neq 0 \quad \forall q = \overline{1, Q}$, т.е. при расчёте всех \mathbf{I}_q использовались условно недостоверные измерительные каналы.
2. Существует множество оценок $\{\mathbf{I}_i^*, i = \overline{1, Q^*}\}$ (где $\mathbf{I}_i^* \in \{\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_Q\}$, $Q^* \leq Q$), при расчёте которых не использовались недостоверные измерительные каналы.

В случае *варианта 1* результирующей выбираем оценку $\mathbf{I}^* \in \{\mathbf{I}_1, \mathbf{I}_2, \dots, \mathbf{I}_Q\}$, для которой

$$\|\mathbf{K}_{\mathbf{I}^*}^0\| = \max_q \|\mathbf{K}_q^0\|, \quad q = \overline{1, Q}, \quad (2.4.2)$$

поскольку данная оценка согласно (2.4.2) получена с использованием максимального числа достоверных каналов в текущей ситуации. Если кластеров с максимальным количеством достоверных каналов несколько, то проводится ранжирование соответствующих оценок по параметру L_q и предпочтение отдается оценке с наибольшим значением.

В случае *варианта 2* результирующая оценка \mathbf{I}^* теперь выбирается из множества $\{\mathbf{I}_i^*, i = \overline{1, Q^*}\}$ с учетом приведенного выше принципа ранжирования.

Таким образом, КВМ позволяет определить результирующий кластер \mathbf{K}_{q^*} и на его основе сформировать результирующую оценку \mathbf{I}^* . Множества $\mathbf{K}_{q^*}^{0\alpha}, \mathbf{K}_{q^*}^{0\beta}$ и $\mathbf{K}_{q^*}^{1\alpha}, \mathbf{K}_{q^*}^{1\beta}$ определяют достоверные и недостоверные измерительные каналы соответственно.

2.5 Алгоритм определения оптимального количества кластеров в разбиении

С целью адаптации требуемого количества кластеров в разбиении к конкретным условиям наблюдения цели предлагается метод автоматического выбора данного параметра. В отличие от ручного режима, где параметр Q выбирается оператором и фиксируется в начале сеанса работы ТИС, автоматический режим предполагает расчёт параметра Q для каждого набора измерений ТИС. Суть метода состоит в построении последовательных разбиений множества оценок $\{\Lambda_i^*\}_{i=1}^{N_1}$ на $Q^c = \overline{Q^{\min}, Q^{\max}}$ кластеров и вычислении некоторой метрики V_{Q^c} , позволяющей оценить качество разбиения. Анализ полученных метрик позволяет выбрать параметр $Q^* = \overline{Q^{\min}, Q^{\max}}$, соответствующий наилучшему разбиению в рамках выбранной метрики, здесь Q^{\min}, Q^{\max} - верхняя и нижняя граница количества кластеров в разбиении. В качестве метрики могут быть использованы: метрика «Davies-Bouldin», критерий «Calinski and Harabasz» или среднее «Силуэта» кластеров [74-76]. Указанные методы тем или иным образом используют внутри-кластерные и между-кластерные расстояния и ставят в соответствие конкретному разбиению метрику его качества. Параметры Q^{\min}, Q^{\max} выбираются оператором с учётом имеющейся статистики эксплуатации ТИС и условий наблюдаемости цели. Прием в качестве метрики V_{Q^c} среднее «Силуэта» кластеров. Выбранная метрика принимает значения из диапазона $[-1, 1]$, причем значение 1 соответствует наилуч-

шему разбиению, а -1 – наихудшему. График зависимости метрики V_{Q^c} от Q^c приведен на рис. 2.5.1. Здесь исходные данные соответствуют п. 4.1, и $Q^{\min} = 2$, $Q^{\max} = 10$. На графике видно, что максимум метрики V_{Q^c} достигается при $Q^* = 3$.

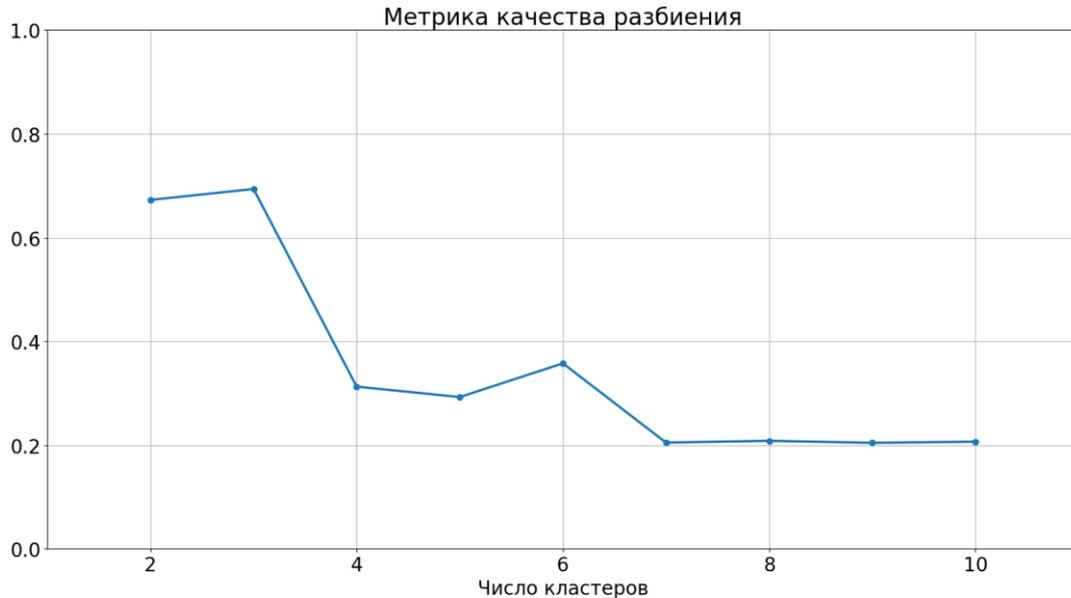


Рис.2.5.1. Метрика качества разбиения

2.6 Использование КВМ в задаче оценивания параметров движения ИРИ

В [18,22,23,43] впервые предложен альтернативный интеллектуально-аналитический метод триангуляционного оценивания параметров движения цели, основанный на принципах мультиструктурности и кластеризации для учета указанных топологических особенностей множества первичных отметок. Метод позволяет получать оценку местоположения цели в условиях априорной неопределенности при наличии АОИ в каналах измерения. Участие опытного оператора позволяет учитывать условия реальной радиоэлектронной обстановки, задача оператора сводится к указанию ряда параметров обработки информации: максимально возможное число недостоверных каналов, количество приоритетных кластеров и т.д. При этом для анализа топологических особенностей распределения отметок в пространстве привлекается математический аппарат кластерного анализа [71-73].

В настоящем разделе рассматривается применение разработанного КВМ в задаче оценивания параметров движения излучающей цели в условиях неопределенности при наличии АОИ в каналах измерения. Решение задачи основано на теории фильтрации Калмана и указанных выше принципах мультиструктурности и кластеризации. В отличие от указанных работ [18,22,23,43], в которых рассматривались либо стационарные цели, либо цели с невозмущенным полиномиальным движением, ниже описывается общий стохастический случай. Принципиально новым является возможность участия опытного оператора в схеме оценивания на основе КВМ. В качестве исходных данных используются допуски на погрешности пеленгования в нормальных условиях и ограничение на максимально возможное число недостоверных каналов в некорректных условиях наблюдения.

Рассмотрим ТИС, состоящую из M пеленгаторов $\{\Pi_m\}_{m=1}^M$. Для описания движения будем использовать общую правую декартовую прямоугольную систему координат $Oxyz$ и дискретное время t_k (где $k = 0, 1, 2, \dots$). Пусть $\mathbf{X}_k = [\mathbf{\Lambda}_k^T, \mathbf{V}_k^T, \mathbf{W}_k^T, \mathbf{P}_k^T]^T$ - вектор состояния ИРИ, где $\mathbf{\Lambda}_k = [x_k, y_k, z_k]^T$ - вектор местоположения цели, $\mathbf{V}_k = [v_k^x, v_k^y, v_k^z]^T$ - вектор её скорости, $\mathbf{W}_k = [w_k^x, w_k^y, w_k^z]^T$ - вектор её ускорения, \mathbf{P}_k - вектор вспомогательных параметров, используемых для расширения пространства состояний. Начало системы координат $Oxyz$ связано с геометрическим центром одного из пеленгаторов, входящих в состав ТИС, а её оси направлены так: ось Ox - на север, ось Oy - на восток, ось Oz - дополняет оси Ox и Oy до правой системы координат.

Также, пусть изменение во времени вектора состояния описывается заданным векторным нелинейным уравнением

$$\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{F}(\mathbf{X}_k, k) + \mathbf{\Xi}_k, \quad (2.6.1)$$

где $\mathbf{F}(\mathbf{X}_k, k)$ - функция, дифференцируемая по аргументу \mathbf{X}_k , $\mathbf{\Xi}_k$ - дискретный формирующий белый шум с $M\{\mathbf{\Xi}_k\} = \mathbf{0}$ и $M\{\mathbf{\Xi}_k \mathbf{\Xi}_i^T\} = \mathbf{K}_k^\Xi \delta_{ki}$, где $M\{\cdot\}$ - символ математического ожидания, δ_{ki} - символ Кронекера, \mathbf{K}_k^Ξ - корреляционная матрица шума $\mathbf{\Xi}_k$ для момента времени t_k . Координаты цели будем рассматривать в системе ко-

ординат (α_m, β_m, R_m) , где α_m – азимут, β_m – угол места, R_m – наклонная дальность до цели. Начало этой системы координат связано с геометрическим центром Π_m , азимут $\alpha_m \in [0, 2\pi]$ отсчитывается в плоскости xOy от положительного направления оси Ox против часовой стрелки, а угол места $\beta_m \in [-\pi, \pi]$ отсчитывается от плоскости xOy , при этом $\beta_m \geq 0$ для любой цели, находящейся не ниже плоскости xOy , и $\beta_m < 0$ в противном случае. Пусть также $\mathbf{H}_k = \left[(h_{mk}^\alpha, h_{mk}^\beta), m = \overline{1, M} \right]^T$ – вектор измерений ТИС для дискретного времени t_k , где h_{mk}^α и h_{mk}^β – соответственно измерения азимута $\alpha_{mk} = \alpha_m(\mathbf{X}_k, t_k)$ и угла места $\beta_{mk} = \beta_m(\mathbf{X}_k, t_k)$ цели, относящиеся к пеленгатору Π_m и моменту времени t_k . Для нормальных условий функционирования ТИС вектор наблюдений зададим в виде

$$\mathbf{H}_k = \mathbf{Y}(\mathbf{X}_k, k) + \Psi_k, \quad (2.6.2)$$

где $\mathbf{Y}_k = \mathbf{Y}(\mathbf{X}_k, k) = \left[(\alpha_{mk}, \beta_{mk}), m = \overline{1, M} \right]^T$ – вектор измеряемых параметров $\alpha_{mk} = \alpha_m(\mathbf{X}_k, t_k)$ и $\beta_{mk} = \beta_m(\mathbf{X}_k, t_k)$, дифференцируемых по \mathbf{X}_k , $\Psi_k = \left[(\psi_{mk}^\alpha, \psi_{mk}^\beta), m = \overline{1, M} \right]^T$ – вектор дискретных белых шумов измерений с $M\{\Psi_k\} = \mathbf{0}$ и $M\{\Psi_k \Psi_i^T\} = \mathbf{K}_k^\Psi \delta_{ki}$, где \mathbf{K}_k^Ψ – корреляционная матрица шума измерений для момента времени t_k . Будем полагать, что процессы Ξ_k и Ψ_k независимы, а для связи двух систем координат использовать известные формулы:

$$\alpha_{mk} = \arccos \left\{ (x_k - \rho_{mk}^x) r_{mk}^{-1} \right\}, \quad \beta_{mk} = \arcsin \left\{ (z_k - \rho_{mk}^z) R_{mk}^{-1} \right\}, \quad \bar{R}_{mk} = \left[(x_k - \rho_{mk}^x)^2 + (y_k - \rho_{mk}^y)^2 \right]^{1/2},$$

$$R_{mk} = \left[(x_k - \rho_{mk}^x)^2 + (y_k - \rho_{mk}^y)^2 + (z_k - \rho_{mk}^z)^2 \right]^{1/2},$$

где \bar{R}_{mk} и R_{mk} – соответственно горизонтальная и наклонная дальности до цели относительно Π_m , $\rho_{mk}^x = \rho_m^x(t_k)$, $\rho_{mk}^y = \rho_m^y(t_k)$, $\rho_{mk}^z = \rho_m^z(t_k)$ – компоненты вектора $\mathbf{p}_{mk} = \mathbf{p}_m(t_k)$, характеризующего местоположение Π_m в момент t_k относительно начала общей системы координат $Oxyz$.

Рабочая область ТИС задаётся ограничениями вида (2.1.2) для каждого момента t_k . Используя информацию о матрице \mathbf{K}_k^Ψ , для нормальных условий функционирования ТИС, с заданной вероятностью можно обеспечить выполнение не-

равенств: $|\psi_{mk}^\alpha| < \varepsilon_k^\alpha$ и $|\psi_{mk}^\beta| < \varepsilon_k^\beta$, где ε_k^α и ε_k^β – рассчитываемые по известным правилам пороговые значения. В частных случаях можно принять $\varepsilon_k^\alpha = \varepsilon^\alpha$ и $\varepsilon_k^\beta = \varepsilon^\beta$ или $\varepsilon_k^\alpha = \varepsilon_k^\beta = \varepsilon$. Если в момент t_k измерительный канал не содержит АОИ, то такой канал будем называть достоверным для данного момента времени и данного пеленгатора, в противном случае – недостоверным. Общее количество каналов, не содержащих АОИ, в каждый момент времени должно быть не менее $D^{\alpha\beta}$, где $D^{\alpha\beta}$ удовлетворяет условию (2.1.4).

С учётом (2.6.1) и (2.6.2) для нормальных условий функционирования ТИС решение задачи оценивания параметров движения излучающей цели можно осуществить на базе обобщенного фильтра Калмана (ОФК) [34,77]:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1/k+1}^* = \mathbf{X}_{k+1/k}^* + \mathbf{G}_{k+1} [\mathbf{H}_{k+1} - \mathbf{Y}(\mathbf{X}_{k+1/k}^*)], \\ \mathbf{X}_{k+1/k}^* = \mathbf{F}(\mathbf{X}_{k/k}^*, k), \\ \mathbf{G}_{k+1} = \mathbf{K}_{k+1/k+1}^{\mathbf{X}} \mathbf{A}_{k+1}^{\mathbf{T}} (\mathbf{K}_{k+1}^{\Psi})^{-1}, \\ \mathbf{K}_{k+1/k+1}^{\mathbf{X}} = \mathbf{K}_{k+1/k}^{\mathbf{X}} - \mathbf{K}_{k+1/k}^{\mathbf{X}} \mathbf{A}_{k+1}^{\mathbf{T}} (\mathbf{A}_{k+1} \mathbf{K}_{k+1/k}^{\mathbf{X}} \mathbf{A}_{k+1}^{\mathbf{T}} + \mathbf{K}_{k+1}^{\Psi})^{-1} \mathbf{A}_{k+1} \mathbf{K}_{k+1/k}^{\mathbf{X}}, \\ \mathbf{K}_{k+1/k}^{\mathbf{X}} = \mathbf{V}_k \mathbf{K}_{k/k}^{\mathbf{X}} \mathbf{V}_k^{\mathbf{T}} + \mathbf{K}_k^{\Xi} \end{cases}, \quad (2.6.3)$$

где $\mathbf{A}_{k+1} = \mathbf{A}(\mathbf{X}_{k+1/k}^*) = \partial \mathbf{Y}(\mathbf{x}, k) / \partial \mathbf{x} |_{\mathbf{x}=\mathbf{X}_{k+1/k}^*}$ – матрица частных производных от $\mathbf{Y}(\mathbf{x}, k)$ по \mathbf{x} , вычисленных в точке $\mathbf{x} = \mathbf{X}_{k+1/k}^*$, а $\mathbf{G}_{k+1} = \mathbf{G}(\mathbf{X}_{k/k+1}^*)$ – коэффициент усиления фильтра.

Для решения задачи оценивания параметров движения цели в аномальных условиях, если известны номера недостоверных каналов из множества $\mathbf{K} = \mathbf{K}^\alpha \cup \mathbf{K}^\beta$ для каждого фиксированного момента времени $t_k, k \in \{0, 1, 2, \dots\}$, можно воспользоваться принципом расширения пространства состояний. Для этого в вектор \mathbf{P}_k вводятся координаты, соответствующие неизвестным АОИ в измерительных каналах.

Разработан метод, который в некорректных условиях функционирования ТИС с учетом (2.6.1) и (2.6.2) обеспечивает построение удовлетворительной по точности оценки параметров движения излучающей цели без расширения пространства состояний и в нормальных условиях приближается по своим характери-

стикам к классическим аналитическим методам. На модельных примерах показана возможность применения метода в задаче фильтрации параметров движения цели по выборке измерений нарастающего объема. На базе КВМ для момента времени t_k можно сформировать оценку местоположения цели $\Lambda_{I,k}^*$ и вектор скорректированных измерений

$$\mathbf{H}_{I^*,k} = \mathbf{Y}_{I^*,k} + \Psi_{I^*,k}, \quad (2.6.4)$$

где $\Psi_{I^*,k}$ – вектор ошибок скорректированных измерений. Корреляционная матрица ошибок измерений $\mathbf{K}_{I^*,k}^\Psi$ получается из исходной матрицы \mathbf{K}_k^Ψ путем отбрасывания тех строк и столбцов, которые соответствуют недостоверным каналам. Получаем следующий алгоритм фильтрации

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{X}_{I^*,k+1/k+1}^* = \mathbf{X}_{I^*,k+1/k}^* + \mathbf{G}_{I^*,k+1} \left[\mathbf{H}_{I^*,k} - \mathbf{Y}(\mathbf{X}_{I^*,k+1/k}^*) \right] \\ \mathbf{X}_{I^*,k+1/k}^* = \mathbf{F}(\mathbf{X}_{I^*,k/k}^*, k) \\ \mathbf{G}_{I^*,k+1} = \mathbf{K}_{I^*,k+1/k+1}^X (\mathbf{A}_{I^*,k+1})^T (\mathbf{K}_{I^*,k+1}^\Psi)^{-1} \\ \mathbf{K}_{I^*,k+1/k+1}^X = \mathbf{K}_{I^*,k+1/k}^X - \\ - \mathbf{K}_{I^*,k+1/k}^X (\mathbf{A}_{I^*,k+1})^T (\mathbf{A}_{I^*,k+1} \mathbf{K}_{I^*,k+1/k}^X (\mathbf{A}_{I^*,k+1})^T + \mathbf{K}_{I^*,k+1}^\Psi)^{-1} \mathbf{A}_{I^*,k+1} \mathbf{K}_{I^*,k+1/k}^X \\ \mathbf{K}_{I^*,k+1/k}^X = \mathbf{B}_{I^*,k} \mathbf{K}_{I^*,k/k}^X \mathbf{B}_{I^*,k}^T + \mathbf{K}_k^\Xi \end{array} \right. \quad (2.6.5)$$

Для его запуска необходимо использовать начальные условия, которые формируются на основе КВМ.

2.7 Двухэтапная реализация КВМ

КВМ, описанный в пп.2.2 - 2.5, сопряжен со значительными вычислительными затратами, поэтому рассмотрим оптимизационную модификацию приведенного метода. Идея модификации заключается в разбиении КВМ на два этапа: решение задачи на плоскости, а затем в пространстве. На первом этапе осуществляется построение множества наблюдаемых ИС только на базе измерительных каналов $\mathbf{K}^\alpha = \{ \mathbf{K}_m^\alpha, m = \overline{1, M} \} : \{ \overline{\text{ИС}}_1, \overline{\text{ИС}}_2, \dots, \overline{\text{ИС}}_{N^\alpha} \}$, где N^α - количество наблюдаемых ИС. По

аналогии с (2.3.1), (2.3.2) $N^\alpha = \sum_{n=\gamma_\alpha}^M C_M^n$, $N^{(D^\alpha)} = \sum_{n=\gamma_\alpha}^{D^\alpha} C_{D^\alpha}^n$, где γ_α - минимальное число азимутальных каналов, достаточных для наблюдаемости задачи, а D^α - число измерительных каналов, не содержащих АОИ, причём $D^\alpha \geq \gamma_\alpha$. Также для D^α имеет место аналог требования (2.1.4): $\left\lfloor \frac{M}{2} \right\rfloor + 1 \leq D^\alpha \leq M$ - для корректной работы метода каналов без АОИ должно быть более половины от общего количества азимутальных каналов, здесь $\lfloor \cdot \rfloor$ - округление до ближайшего целого в меньшую сторону. Далее для каждой \overline{IS}_n сформируем первичную отметку местоположения цели $\Lambda_n^* = [x_n^*, y_n^*]^T$. Для отметок Λ_n^* , полученных на базе IS_n , строим «вторичные» пеленги α_{mn}^* по отношению ко всем $\Pi_m (m = \overline{1, M})$ и проверяем для них выполнение первого условия (2.2.4). ИС отсеивается, если для всех соответствующих структур «вторичных» пеленгов выполняется менее $\left\lfloor \frac{M}{2} \right\rfloor + 1$ условий (2.2.4). К оставшимся после отсеивания отметкам по аналогии с п. 2.4 - 2.5 применим процедуру кластеризации, в результате которой получим оценку Λ_1^{*1} и разбиение множества азимутальных каналов \mathbf{K}^α на достоверные и недостоверные: $\mathbf{K}_1^{0\alpha} \cup \mathbf{K}_1^{1\alpha} = \mathbf{K}^\alpha$. На втором этапе также осуществляется построение множества наблюдаемых ИС, но уже на основе измерительных каналов $\mathbf{K} = \mathbf{K}_1^{0\alpha} \cup \mathbf{K}^\beta : \{\overline{IS}_1, \overline{IS}_2, \dots, \overline{IS}_{N^{\alpha\beta}}\}$, где $N^{\alpha\beta}$ - количество наблюдаемых ИС с учётом параметра $\gamma_{\alpha\beta} = \gamma_\alpha + \gamma_\beta$. Также должно выполняться условие (2.1.4), при этом в данном случае $D^\alpha = \|\mathbf{K}_1^{0\alpha}\|$. Нужно отметить, что при формировании ИС на данном этапе все азимутальные каналы включаются в каждую ИС. Таким образом, количество ИС на втором этапе можно получить по формуле $N^{\alpha\beta} = \sum_{n=\gamma_\alpha}^{D^\alpha} C_{D^\alpha}^n$, так как в данном случае азимутальные каналы на количество ИС влияния не оказывают. Далее, аналогично базовой реализации КВМ (п.2.2 - 2.5), производится формирование отметок, их отсеивание и кластеризация. В

полученной оценке $\Lambda_I^{*,2} = [x_I^*, y_I^*, z_I^*]^T$ интересна только координата z_I^* , поскольку x_I^*, y_I^* уже получены из оценки $\Lambda_I^{*,1} = [x_I^*, y_I^*]^T$.

Очевидно, такой подход снижает требования к вычислительным ресурсам, так при $M=5$, $\gamma_\alpha=2$, и $D^\alpha=3$ для двухэтапного варианта получаем $N^\alpha=26$ и $N^{\alpha\beta}=31$ вместо $N=806$ для одноэтапного. Однако в случае двухэтапного варианта приходится ужесточать требования к минимальному количеству каналов без АОИ. Так, для одноэтапного варианта при $M=5$ и $\gamma_\beta=1$ требование к количеству каналов без АОИ: $D^{\alpha\beta}=6$ (т.е. более половины), при этом для значений (D_s^α, D_s^β) возможны варианты: (2,4), (3,3), (4,2) и (5,1), и для варианта (2,4) азимутальных каналов без АОИ меньше половины от общего их количества, но количество угломестных каналов без АОИ компенсирует их недостаток. При разбиении метода на два этапа уже нельзя обработать вариант (2,4), поскольку на первом этапе угломестные каналы не учитываются, а $D^\alpha=2$ не удовлетворяет условию $\left\lfloor \frac{M}{2} \right\rfloor + 1 \leq D^\alpha \leq M$. При существенном снижении требований к вычислительным ресурсам и как следствие уменьшения времени работы двухэтапный вариант несколько проигрывает в точности одноэтапному. В соответствующем разделе приведены результаты моделирования двухэтапного варианта и дан сравнительный анализ.

2.8 Роль оператора в алгоритмах обработки информации ТИС

В рамках условия (2.1.4) КВМ обеспечивает автоматическое обнаружение каналов с АОИ и формирование результирующей оценки параметров ИРИ на базе достоверных каналов. В этом случае участие оператора предполагается на этапе обнаружения структурно-параметрической неопределенности и принятии решения о переходе от оптимальных (квазиоптимальных) методов оценивания параметров ИРИ к КВМ и, возможно, на этапе выбора количества кластеров в случае нецелесообразности использования автоматического режима определения количества кластеров в разбиении (экономия вычислительных ресурсов). Далее КВМ осуществляет работу в автоматическом режиме.

Функционирование ТИС в условиях конфликта приводит к тому, что (2.1.4) может не выполняться. При нарушении условия (2.1.4) КВМ не способен обеспечить достоверного обнаружения каналов с АОИ, что оказывает непосредственное влияние на точность результирующей оценки параметров ИРИ. В данной ситуации КВМ можно рассматривать и использовать как модуль СППР [52]. 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. Выбор кластера позволяет провести обнаружение недостоверных каналов и далее на базе измерений достоверных каналов сформировать итоговую оценку. Приведенный режим не позволяет получать оценки параметров ИРИ в режиме реального времени, однако вполне пригоден для оценки сложившейся ситуации оператором и принятия решения об изменении топологии ТИС или других мерах, позволяющих добиться выполнения условия (2.1.4).

Выводы

1. Развитый КВМ можно отнести к классу интеллектуально-аналитических методов. Анализ показал, что развитый метод обеспечивает: возможность эффективной обработки измерений при наличии неопределенности относительно закона распределения случайных погрешностей пеленгования и аномальных ошибок измерений; обнаружение недостоверных каналов; существенный выигрыш в точности оценивания по сравнению с классическими подходами при аномальных условиях наблюдения; асимптотическую сходимость оценок КВМ к оценкам ММП и РММП в нормальных условиях функционирования системы.

2. В практической реализации КВМ может быть весьма эффективным участие опытного оператора. В этом случае можно минимизировать вычислительные затраты на получение результирующей оценки местоположения цели. При нарушении условий функционирования КВМ, оператор может использовать агрегиро-

ванную КВМ информацию для обнаружения каналов с АОИ в ручном режиме, что позволит снизить неопределенность при принятии решений об изменении топологии ТИС или иных мер противодействия.

3. Эффект мультиструктурности проявляется в ТИС с большим числом измерительных каналов. Отметим, что многоканальные системы с большим числом приемных позиций широко используются на практике как в гражданских, так и военных областях.

4. При рассмотрении возможности применения КВМ к движущимся целям необходимо учитывать эволюцию кластеров и их параметров в пространстве и времени, при этом, помимо ограничений на аномальные ошибки измерений, необходимо вводить ограничения на динамические характеристики цели. Для применения КВМ в таких условиях целесообразно использовать результаты работы [22], в которой развит метод построения устойчивых промежуточных оценок параметров полиномиальной модели движения цели на базе совокупности измерительных структур, соответствующих триангуляционной системе.

5. Анализ показывает, что развитый метод обеспечивает: возможность эффективной обработки измерений при наличии неопределенности; обнаружение недостоверных каналов ТИС; существенный выигрыш в точности оценивания параметров движения цели на базе ТИС по сравнению с классическими подходами (типа ММП, РММП) при аномальных условиях наблюдения; асимптотическую сходимость оценок к оценкам ММП и РММП и линеаризованного метода фильтрации в нормальных условиях функционирования ТИС.

6. Развитый метод сопряжен со значительными вычислительными затратами, поэтому его целесообразно комплексировать с классическими аналитическими методами оценивания, указанными в п.1.1. Для ТИС с большим числом пеленгаторов с целью снижения потребляемых вычислительных ресурсов можно использовать двухэтапный вариант КВМ.

3 МОДЕЛИ КОНФЛИКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В ПРОЦЕССЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА ДВИЖУЩЕЙСЯ ЦЕЛЬЮ

Функционирование ТИС в условиях конфликта предъявляет повышенные требования к построению конфигураций измерительных пунктов. Изменение топологии ТИС является одним из способов улучшить условия наблюдения целей путём перемещения пунктов из зоны помех. При этом перемещения должны осуществляться таким образом, чтобы новая конфигурация обеспечивала требуемую точность оценивания. Возникает задача сравнения различных конфигураций ТИС при фиксированной области размещения ИП и области допустимого расположения ИРИ. Решив эту задачу, получаем множество наиболее эффективных (в некотором смысле) топологий ТИС. Далее решаем задачу поиска перемещений ИП, между конфигурациями полученного множества, минимизирующих время перемещения. В настоящем разделе рассматриваются модель противоборства наблюдателя и противника, позволяющая оценить время успешной работы наблюдателя/противника, и модель кооперативного поиска позиций размещения ИП.

3.1 Задача противоборства наблюдателя и противника

Все действия происходят в прямоугольной области, которая разделена горизонтальной линией-границей. Средства игроков, за исключением, быть может, движущейся цели, расположены в соответствующих областях.

Состав средств игрока №1 (наблюдателя) (ниже линии-границы):

- ТИС, состоящая из N измерительных пунктов.
- Пункт постановки помех.

Состав средств игрока №2 (противника) (выше линии-границы):

- Система постановки помех (СПП), состоящая из M пунктов постановки помех;
- Движущийся измерительный пункт, осуществляющий радиолокационный мониторинг области расположения наблюдателя (рис.3.1.1).

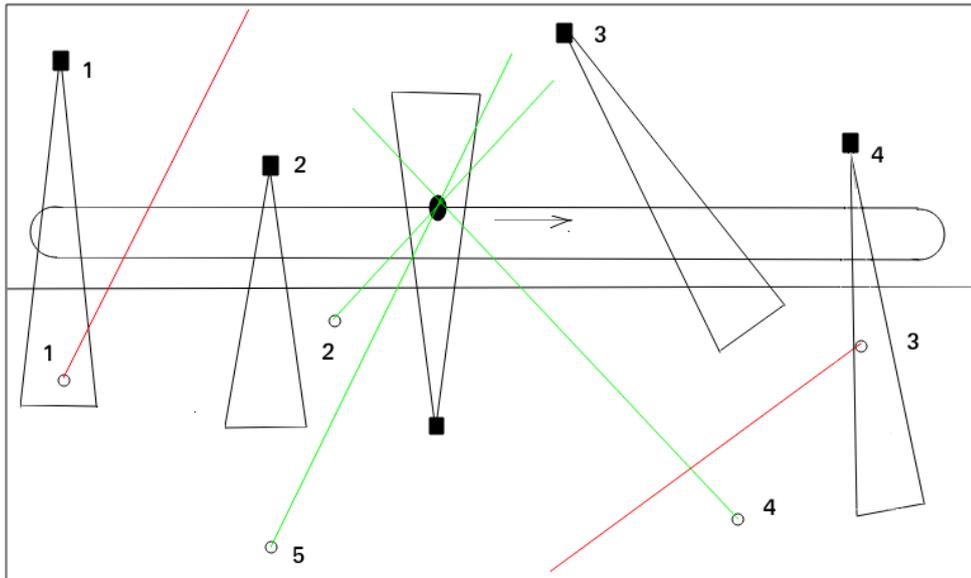


Рис.3.1.1. Пример возможного размещения средств игроков

3.1.1 Обобщённый алгоритм функционирования

Характеристики средств:

- Движущийся измерительный пункт противника осуществляет движение по линейной траектории с постоянной скоростью, например, вдоль линии-границы, и осуществляет радиолокационный мониторинг области расположения наблюдателя. Если это воздушный объект, то траектория его движения может располагаться над областью наблюдателя.
- Характеристиками пункта СПП являются угол и дальность (будем считать, что характеристики всех пунктов одинаковые). Угол характеризует сектор, в котором пункт может обеспечить помеху заданного уровня, а дальность — максимальное удаление от пункта в пределах сектора, для которого также сохраняется заданный уровень излучаемой помехи. Считаем, что область постановки помехи - треугольник, одна из вершин которого совпадает с расположением пункта постановки помех. Также будем считать, что попадание в указанную область измерительного пункта с вероятностью 1 приводит к недостоверным измерениям. Постановка помехи осуществляется из стационарного положения. Сектор постановки помехи изменяется путём поворота излучающей антенны без прерывания процесса постановки

помехи. Пункт может изменять своё местоположение посредством перемещения по линейной траектории с постоянной скоростью. В процессе движения постановка помехи отсутствует.

- Измерительные пункты ТИС осуществляют измерение параметров излучаемых сигналов (направление на источник, время приема, длительность, частота и т.д.) и их классификацию. Полученная информация отправляется в центр управления ТИС. Измерительный пункт может изменять своё местоположение посредством перемещения по линейной траектории с постоянной скоростью. Во время движения измерения не производятся.
- Центр управления ТИС на основе полученных параметров решает задачу местоопределения источников радиоизлучения (ИРИ), при этом осуществляется обнаружение недостоверных измерений (измерения, сделанные измерительным пунктом, находящимся в зоне действия пункта постановки помех).
- Движущийся измерительный пункт противника осуществляет радиолокационный мониторинг области расположения наблюдателя.
- Наблюдатель при помощи ТИС решает задачу местоопределения ИРИ (движущейся измерительный пункт противника) и посредством пункта постановки помех препятствует проведению мониторинга своей области расположения.
- Оператор измерительного пункта противника сообщает о факте постановки помех (невозможность решения задачи радиомониторинга) в управляющий центр.
- Поскольку ТИС является системой пассивной радиолокации, то местоположение пунктов ТИС противнику неизвестно, известен только район расположения и их количество. Управляющий центр противника, получив сообщение о факте постановки помех своему измерительному пункту, принимает решение о постановке помех ТИС наблюдателя.

- О результатах работы СПП противник может узнать косвенно по состоянию движущегося измерительного пункта. Если движущийся измерительный пункт решает задачу, то текущая конфигурация средств подавления нарушила работу ТИС (наблюдатель не может определить местоположение ИРИ или делает это с большой погрешностью, которая не позволяет препятствовать проведению радиомониторинга).
- Если текущая конфигурация средств подавления не позволила противнику возобновить решение задачи радиомониторинга, то необходимо изменить конфигурацию СПП и осуществить постановку помехи в соответствии с новой конфигурацией.
- Наблюдатель, в свою очередь, при оценке местоположения ИРИ осуществляет обнаружение недостоверных измерений и получает информацию о том, какие измерительные пункты ТИС попали в зону действия средств противника. ТИС также позволяет получать оценку местоположения пунктов СПП. ТИС сохраняет свою работоспособность при достоверности измерений для $\left\lfloor \frac{N}{2} \right\rfloor + 1$ пункта, где N - количество пунктов ТИС, а $\lfloor \bullet \rfloor$ - округление до целого в меньшую сторону.

Рассмотрим пример, приведённый на рис. 3.1.1. Здесь ТИС состоит из пяти пунктов, два из них находятся в зоне действия пунктов СПП (их пеленги на ИРИ изображены красным цветом). При этом получение оценки местоположения ИРИ ещё возможно, поскольку пункты № 2,4,5 осуществляют достоверные измерения (зелёные пеленги). Таким образом, при помощи достоверных измерений ТИС оценивает местоположения пунктов СПП. Измерительные пункты № 1, 3 ТИС определены как недостоверные. Зная оценки местоположения средств подавления и их параметры, мы можем оценить расположение зоны помех. Исходя из полученной оценки, наблюдатель принимает решение об изменении конфигурации ТИС.

Окончание игры.

- Если более половины измерительных пунктов находятся в зоне помех и наблюдатель не имеет возможности изменить конфигурацию, либо не существует конфигурации ТИС, при которой в зоне помех находится менее половины пунктов.
- Если менее половины измерительных пунктов находятся в зоне помех и противник либо не имеет возможности изменить конфигурацию, чтобы подавить более половины пунктов, либо такой конфигурации не существует.

Задача.

Располагая информацией:

- о количестве измерительных пунктов ТИС;
- о количестве пунктов постановки помех противника, параметрах зоны помех пункта и области расположения;
- о времени перемещения измерительного/помехового пункта (время подготовки к движению, скорость перемещения, расстояние до новой позиции, время подготовки к работе);
- об алгоритмах формирования конфигурации помеховых средств и алгоритмов вывода измерительных пунктов из зоны помех,

дать ответы на вопросы:

- в течение какого времени наблюдатель сможет избегать конца игры при фиксированных значениях параметров?
- при каких значениях параметров наблюдатель сможет неограниченно долго избегать конца игры?

3.1.2 Формализация задачи

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 постановки помех, ρ - высота треугольника помех,
 γ - половина угла при вершине треугольника помех, α_m - угол поворота сектора помех m -го пункта (угол считается от отрицательного направления оси абсцисс).

Треугольник равнобедренный, одна из вершин совпадает с положением соответствующего пункта, координаты двух оставшихся вершин:

$$\{B_m\}_{m=1}^M = \{[x_m^s - \rho_\gamma \sin(\alpha_m + \gamma), y_m^s - \rho_\gamma \cos(\alpha_m + \gamma)]\}_{m=1}^M, \quad ,$$

$$\{C_m\}_{m=1}^M = \{[x_m^s - \rho_\gamma \sin(\alpha_m - \gamma), y_m^s - \rho_\gamma \cos(\alpha_m - \gamma)]\}_{m=1}^M, \quad \rho_\gamma = \frac{\rho}{\cos(\gamma)} \quad (\text{рис.3.1.2.1}).$$

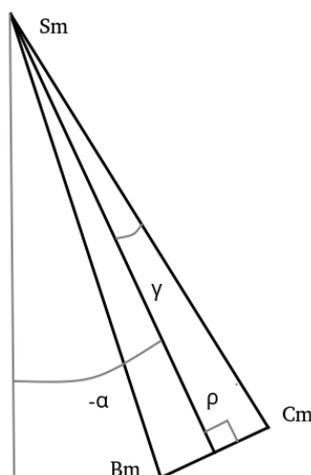


Рис.3.1.2.1. Геометрическое представление помеховой зоны

Пусть $p = [x_p, y_p]$ – точка, $[a, b]$ – отрезок ($a = [x_a, y_a]$ и $b = [x_b, y_b]$), ABC – треугольник ($A = [x_A, y_A]$, $B = [x_B, y_B]$ и $C = [x_C, y_C]$). Тогда

$$d^\square(p, ab) = \begin{cases} \sqrt{(x_a - x_p + (x_b - x_a)t)^2 + (y_a - y_p + (y_b - y_a)t)^2}, & 0 < t < 1 \\ \sqrt{(x_a - x_p)^2 + (y_a - y_p)^2}, & t \leq 0 \\ \sqrt{(x_b - x_p)^2 + (y_b - y_p)^2}, & t \geq 1 \end{cases} \quad - \text{расстояние от}$$

точки p до отрезка $[a, b]$, где $t = \frac{(x_p - x_a)(x_b - x_a) + (y_p - y_a)(y_b - y_a)}{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2}$,

$$d^\Delta(p, ABC) = \begin{cases} \left\| -(d^\square(p, AB), d^\square(p, BC), d^\square(p, CA)) \right\|_\infty, & S_{ABC} \neq S_{ABp} + S_{BCp} + S_{CAp} \\ - \left\| -(d^\square(p, AB), d^\square(p, BC), d^\square(p, CA)) \right\|_\infty, & S_{ABC} = S_{ABp} + S_{BCp} + S_{CAp} \end{cases} -$$

расстояние от точки до треугольника, где $\|\bullet\|_\infty = \max_i |x_i|$, S_{ABC} , S_{ABp} , S_{BCp} , S_{CAp} – площади соответствующих треугольников. Введённое расстояние от точки до треугольника — это минимальное расстояние до точек, лежащих на отрезках, образующих треугольник. Это расстояние положительно для точек, лежащих вне

треугольника, отрицательно для точек, лежащих внутри треугольника, и равно нулю для точек на его границе.

Применительно к данной задаче условие $d^\Delta(P_n, S_m B_m C_m) \leq 0$ означает, что измерительный пункт P_n находится в помеховой зоне пункта помех S_m . Пусть $\mathbf{K} = \{n : \exists m, d^\Delta(P_n, S_m B_m C_m) \leq 0\}$ - множество номеров измерительных пунктов, которые находятся внутри хотя бы одной зоны помех, следовательно, $|\mathbf{K}|$ - количество измерительных пунктов, находящихся в зоне помех, а $N - |\mathbf{K}|$ - количество рабочих измерительных пунктов.

Без потери общности зададим следующие области изменения параметров: $\alpha_m \in [-\pi, \pi]$, $P_n \in \mathbf{P}$, $S_m \in \mathbf{S}$, где $\mathbf{S} = \{[x, y] : 0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1\}$, $\mathbf{P} = \{[x, y] : 0 \leq x \leq 1, -1 \leq y \leq 0\}$, $m \in \overline{1, M}$ и $n \in \overline{1, N}$.

Задачу наблюдателя можно записать следующим образом:

$$\left\{ \begin{array}{l} J(u_p, u_s) = |N - \mathbf{K}| \rightarrow \max_{u_p} \\ |\mathbf{K}| < \lfloor N/2 \rfloor + 1 \\ \forall i, j \in \overline{1, N} : \|P_i - P_j\| > B_{\min} \\ \forall i, j, k \in \overline{1, N} : \frac{y_k^p - y_i^p}{y_j^p - y_i^p} \neq \frac{x_k^p - x_i^p}{x_j^p - x_i^p} \end{array} \right. , \quad (3.1.2.1)$$

где $u_p = [P_1 \dots P_N]$, $u_s = [\alpha_1, S_1 \dots \alpha_M, S_M]$, $\lfloor \bullet \rfloor$ - 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:

$$\begin{cases} J(u_p, u_s) = |N - \mathbf{K}| \rightarrow \min_{u_s} \\ |\mathbf{K}| \geq \lfloor N/2 \rfloor + 1 \end{cases} \quad (3.1.2.2)$$

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).

При решении задачи исходим из следующих предположений.

1. Противник может определить эффективность применяемой помеховой конфигурации только косвенно. В результате подавления более половины пунктов ТИС, решение задачи местоопределения движущейся цели даст ложную цель. Наблюдатель прекратит воздействие на истинную цель, и по прекращению такого воздействия противник может судить об эффективности применяемой конфигурации. Следовательно, на определение эффективности помеховой конфигурации нужно время t_e .
2. При постановке помех более чем половине пунктов ТИС у наблюдателя возникают проблемы с определением недостоверных пунктов. Будем считать, что по истечении некоторого времени t_d (штраф) наблюдатель обнаруживает факт неработоспособности ТИС (информация от внешних систем) без знания о том, какие конкретно каналы неработоспособны.
3. Наблюдателю неизвестно начальное положение пунктов помех.
4. Рассматриваем дискретный вариант задачи, где пункты ТИС и помеховые пункты располагаются в узлах \mathbf{P}_l - сетки на \mathbf{P} и узлах \mathbf{S}_k - сетки на \mathbf{S} соответственно.

3.1.3 Алгоритм противодействия

Пусть N , M , B_{\min} , ρ , γ - фиксированные значения. Решение задачи можно разбить на этапы.

1. С учётом значения B_{\min} формируем множество \mathbf{G} допустимых расположений пунктов ТИС на всевозможных сочетаниях N позиций на сетке P_l .
2. Формируем множество расположений помеховых средств (без учёта угла поворота антенны). На базе полученного множества отбираем эффективные расположения пунктов \mathbf{H} . Критерием эффективности служит множество $\mathbf{G}^h \subset \mathbf{G}, h \in \mathbf{H}$. ТИС принадлежит множеству \mathbf{G}^h в том случае, если его работоспособность может быть нарушена при расположении пунктов помех h путём реализации какой-либо комбинации поворота излучающих антенн. В процессе формирования множества эффективных конфигураций помеховых средств \mathbf{H} происходит исключение таких конфигураций $h \in \mathbf{H}$, для которых $\exists g \in \mathbf{H}: \mathbf{G}^h \subset \mathbf{G}^g$. Отметим, что помеховую конфигурацию h , кроме множества \mathbf{G}^h , характеризует количество комбинаций $|\mathbf{A}|$ поворотов излучающих антенн, посредством реализации которых осуществляется подавление всех ТИС из \mathbf{G}^h , здесь \mathbf{A} - множество эффективных комбинаций углов поворота антенн. Элементы множества \mathbf{H} обладают следующим свойством: $\forall h_1, h_2 \in \mathbf{H}: \mathbf{G}^{h_1} \Delta \mathbf{G}^{h_2} \neq \emptyset$, где Δ - симметрическая разность множеств.
3. Анализ полученных множеств \mathbf{G} и \mathbf{H} . Возможны следующие ситуации:
 - I. Существует, по крайней мере, одно допустимое расположение пунктов ТИС, которое сохраняет работоспособность при любом расположении пунктов помех: $\exists g \in \mathbf{G}: \forall h \in \mathbf{H}, g \notin \mathbf{G}^h$ - конфигурация устойчивая к помехам.
 - II. Существует, по крайней мере, одно расположение пунктов помех, для которого путём реализации какой-либо комбинации поворота излучающих антенн можно вывести из строя любую ТИС: $\exists h \in \mathbf{H}: \forall g \in \mathbf{G}, g \in \mathbf{G}^h$.
 - III. Условия подпунктов А и В не выполняются.
4. Нахождение решения задачи противоборства с учётом результатов анализа множеств \mathbf{G} и \mathbf{H} .
 При условии I у наблюдателя есть беспроеигрышная стратегия. Выбрав такую конфигурацию, наблюдатель:

- при любых помеховых конфигурациях сохраняет её работоспособность, то есть решает задачу местоопределения.
- попадание какого-либо из пунктов ТИС в помеховую зону может несколько снизить точность местоопределения. При этом наблюдатель имеет возможность сменить позицию на более выгодную (при существовании нескольких конфигураций устойчивых к помехам).

В то же время, для противника:

- срыв решения задачи местоопределения предполагает подавление более половины пунктов ТИС. При использовании наблюдателем только устойчивых конфигураций, такая ситуация невозможна;
- недоступны сведения о результативности той или иной помеховой конфигурации, то есть противник не может осознанно влиять даже на точность местоопределения наблюдателем.

В данной ситуации противнику нет смысла начинать игру, поскольку он не сможет, даже временно, помешать решению задачи местоопределения наблюдателем. Решая данную задачу, наблюдатель делает невозможным проведение радиомониторинга противником.

В условиях II противник, используя единственное расположение пунктов помех, может вывести из строя любую конфигурацию ТИС путём выбора комбинации поворота излучающих антенн. Учитывая малое время на реализацию поворота антенн по сравнению с перемещением пунктов, в данной ситуации наблюдателю нет смысла начинать игру, поскольку пункты ТИС большую часть времени будут перемещаться и не смогут обеспечивать противодействие проведению радиомониторинга противником.

Итак, варианты I и II позволяют путём проведения анализа параметров и количества средств противника и наблюдателя до начала игры ответить на вопрос: «Имеет ли смысл начинать игру при текущем составе средств?».

При условии III и противник, и наблюдатель для решения своих задач должны осуществлять перемещение пунктов, поскольку у наблюдателя не существует

устойчивой к помехам конфигурации ТИС, а у противника нет такой конфигурации, которая может вывести из строя любую ТИС.

Противник:

- На основе множества эффективных конфигураций **Н** ищет такие комбинации конфигураций (пары, тройки и т.д.), реализация которых позволяет вывести из строя любую ТИС из **Г**.
- Выбирает комбинацию, которая обеспечивает минимальное время перехода между конфигурациями.
- Применяет конфигурации из выбранной комбинации до нарушения работы ТИС.

Наблюдатель:

- Делает предположения о выбранной противником комбинации и последовательности применения конфигураций. Исходя из этого, выбирает начальную конфигурацию ТИС.
- Перемещает пункты ТИС с целью обеспечения работоспособности.

При выборе ближайшей конфигурации ТИС, кроме расстояния между позициями, следует учитывать следующие параметры.

1. Время на приведение пункта ТИС из рабочего состояния в транспортное, то есть подготовка к перемещению.
2. Скорость перемещения пункта ТИС.
3. Время на приведение пункта ТИС из транспортного состояния в рабочее.
4. Кривые работоспособности обслуживающего персонала пункта ТИС, которые, например, могут выглядеть, как на рис. 3.2.3.1.

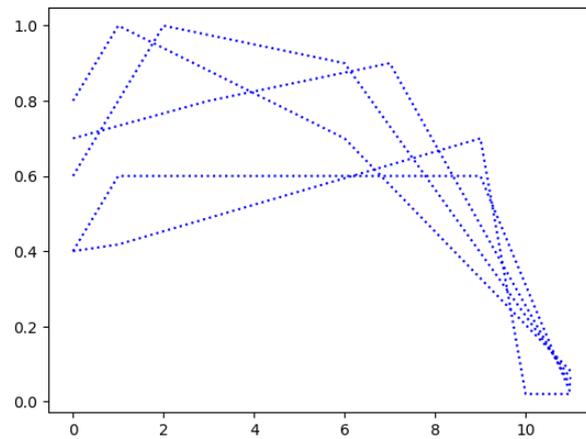


Рис.3.2.3.1. Кривые работоспособности пяти пунктов ТИС

Поскольку в составе одной ТИС могут использоваться различные измерительные пункты, то с учетом их характеристик указанные выше значения могут существенно различаться. Кривая работоспособности учитывает квалификацию экипажа и влияние усталости на эффективность работы в зависимости от времени, затраченного на перемещение пункта. Время на подготовку к перемещению и к работе, указанное в пунктах 1,3, представляет собой нормативное значение. Реальные значения определяются с использованием нормативных значений и кривой работоспособности. На рис. 3.1.3. представлен вариант смены конфигурации ТИС, состоящей из пяти пунктов. Пункт ТИС, в текущей конфигурации имеющий номер 1, не требует перемещения при реализации новой конфигурации. Для этого пункта значение работоспособности после перемещения не изменится. Следовательно, после смены нескольких конфигураций, работоспособность экипажей пунктов ТИС в общем случае будет различной. Пусть пункт №2 к текущему моменту времени уже совершил значительное количество перемещений (имеет низкую работоспособность), тогда перемещение, представленное на рис. 3.1.3.3, может быть осуществлено за меньший интервал времени, чем первый вариант (рис.3.1.3.2). При этом в первом варианте максимальное расстояние (2->1) существенно меньше, чем максимальное расстояние (1->0) во втором.

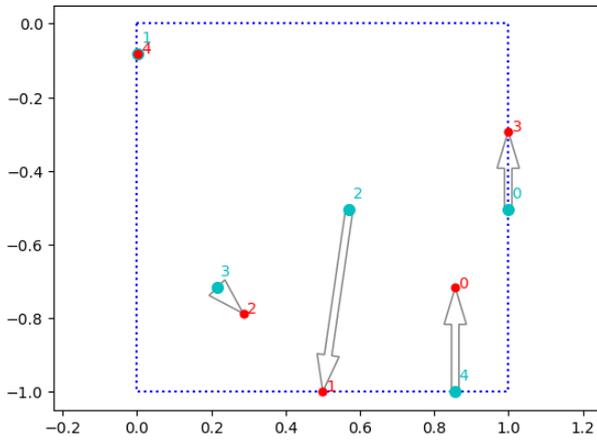


Рис.3.1.3.2. Первый вариант перемещения пунктов ТИС

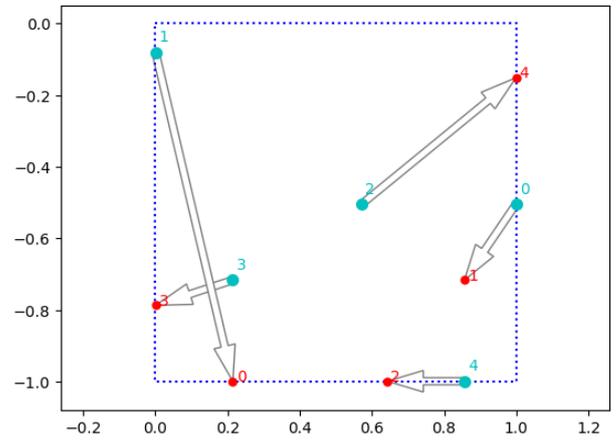


Рис.3.1.3.3. Второй вариант перемещения пунктов ТИС

Для реализации конфигураций выбранной комбинации противник также должен перемещать помеховые пункты, следовательно, аналогичные кривые работоспособности, характеристики пунктов и квалификация экипажа должны учитываться при расчёте времени, требуемого для смены конфигурации.

Время перемещения пункта p с позиции i в позицию j определяется по формуле:

$$t_{p,i,j} = \rho_{i,j} v_p + (t_i + t_j) E_p(c_p),$$

где $\rho_{i,j}$ - расстояние между пунктами, v_p - скорость перемещения пункта, t_i - время подготовки пункта к перемещению, t_j - время подготовки пункта к работе, $E_p(\bullet)$ - функция работоспособности пункта.

Отметим, что наблюдатель решает задачу поиска новой ближайшей позиции ТИС, принадлежащей множеству безопасных конфигураций, с учётом характеристик каждого агента, исходя из критерия минимизации величины $t_{p,i,j}$. Для противника же не стоит задача поиска ближайшей позиции, поскольку он должен реализовать все конфигурации комбинации.

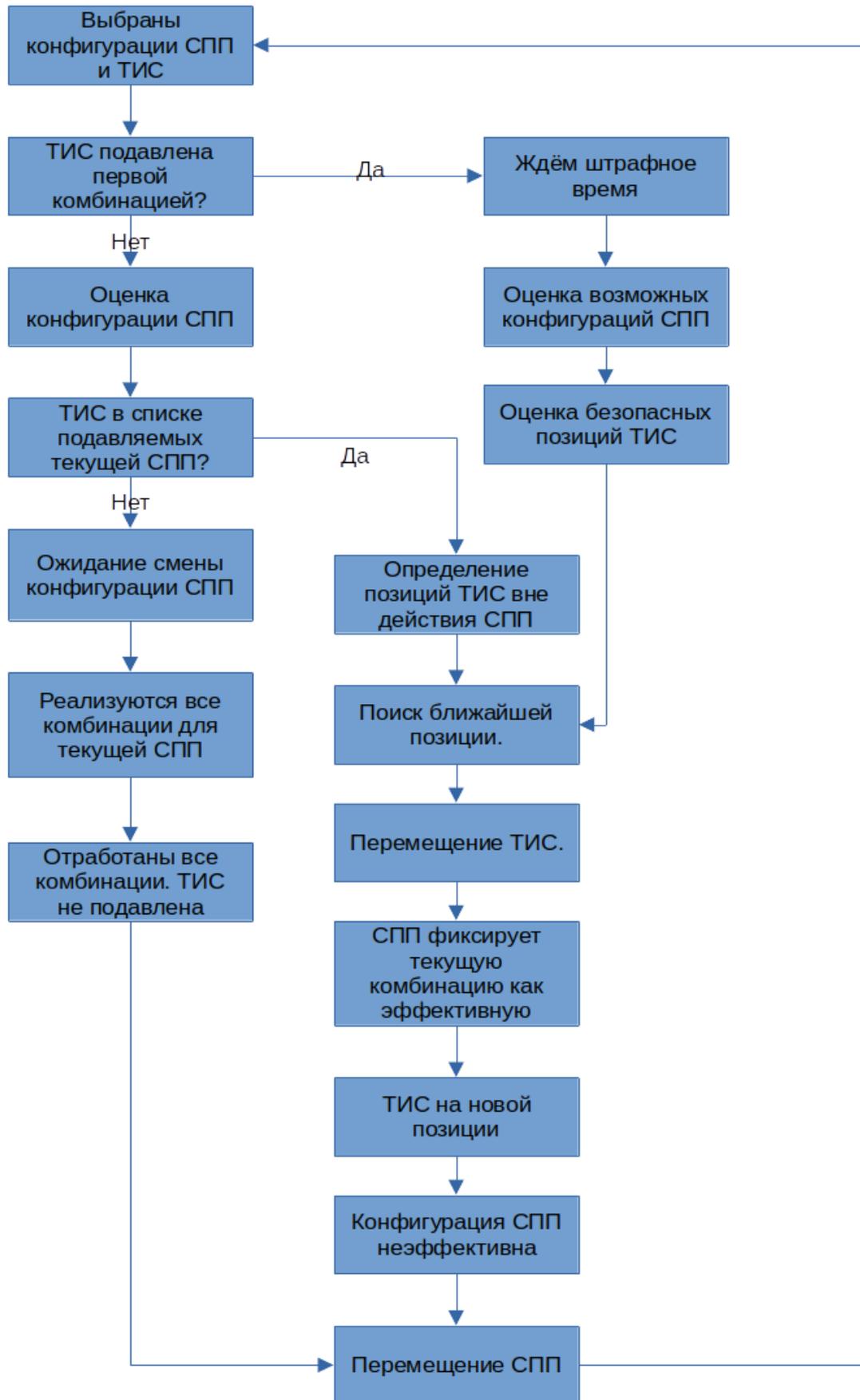


Рис.3.1.3.4. Алгоритм противодействия

Последовательность действий при противоборстве представлена на рис. 3.1.3.4. Системы наблюдателя и противника могут пребывать в двух состояниях: система решает возложенные на неё задачи и работа системы нарушена. Пока противник осуществляет перемещение пунктов и поворот антенн, система наблюдателя успешно противодействует решению задачи радиомониторинга. И наоборот, пока наблюдатель перемещает пункты или ТИС находится в неработоспособном состоянии, противник решает задачу радиомониторинга. Таким образом, при подсчёте времени пребывания системы в каждом из состояний, кроме времени, требуемого на перемещения пунктов, нужно учитывать, что противнику требуется время на поворот антенн и определение эффективности реализованной конфигурации. Считаем, что время, затрачиваемое на реализацию конкретной комбинации углов поворота антенн, учтено во времени t_e , а наблюдатель при потере работоспособности ТИС ожидает штрафное время t_d и только после этого осуществляет перемещение. Определив конкретные значения параметров (кривые работоспособности, скорость, время подготовки к работе/движению и т.д.) можно ответить на вопросы: «в течение какого времени система наблюдателя препятствует проведению радиомониторинга противником?» и «в течение какого времени система наблюдателя не выполняет свои функции?».

3.2 Задача кооперативного поиска позиций размещения измерительных пунктов ТИС

3.2.1 Постановка задачи

Пусть $\{P_n\}_{n=1}^N = \{[x_n^p, y_n^p]\}_{n=1}^N$, $P_n \in \mathbf{P}$, где $\mathbf{P} = \{[x, y]: 0 \leq x \leq 1, -1 \leq y \leq 0\}$ - измерительные пункты 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. Определение критериев корректности основано на зависимости точности решения задачи местоопределения от угла пересечения пеленгов.

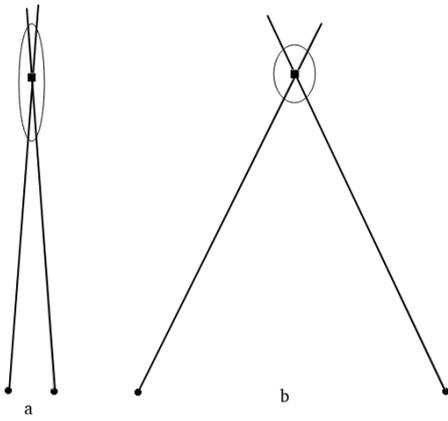


Рис.3.2.1.1. Точность решения задачи, а – короткая база, b – длинная база

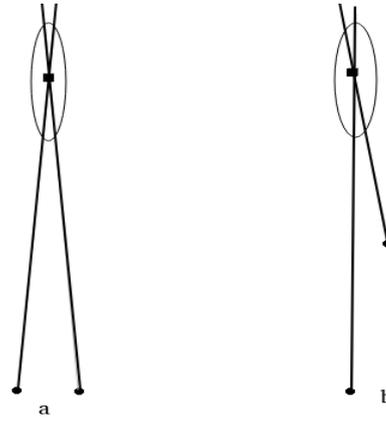


Рис.3.2.1.2. Влияние угла визирования базы на точность оценки, а – короткая база, b – длинная база

На рис. 3.2.1.1 представлены две ситуации, возникающие в процессе решения задачи местоопределения в зависимости от расстояния между пунктами. Точность варианта а ниже точности варианта b, поскольку с учётом ошибок измерения пеленгов область неопределенности для варианта а представляет собой вытянутый эллипс, а область неопределенности варианта b близка к окружности. С другой стороны, угол, под которым пара пунктов «видит» цель, также влияет на точность решения задачи местоопределения. На рис. 3.2.1.2 представлена ситуация, когда вариант с меньшей базой обеспечивает такую же точность оценки, как и вариант с большей базой.

Анализ приведенных ситуаций показывает, что пересечение пеленгов под прямым углом обеспечивает наилучшие условия для решения задачи местоопределения. Понятно, что при ограничениях на область размещения пунктов ТИС получить наилучшие или близкие к ним условия наблюдения для всех целей рабочей области не представляется возможным. Задача заключается в поиске размещения пунктов ТИС, при котором обеспечиваются указанные условия наблюдения для наибольшего количества целей рабочей области. Таким образом, поиск расположения пунктов ТИС основан на двух критериях:

1. Максимизация расстояния между пунктами.

2. Максимизация косинуса угла между пеленгами для каждой пары пунктов ТИС (пересечение пеленгов под прямым углом вносит максимальный вклад).

3.2.2 Теоретико-игровая модель

В [81,82] приведен теоретико-игровой метод решения задачи совместного поиска и наблюдения группой БПЛА в некоторой области. Используется многопользовательская потенциальная игра с ограниченным набором действий. Управление движением осуществляется посредством двоичного логарифмически-линейного обучения, что обеспечивает оптимальное покрытие исследуемого региона [83,84]. По аналогии с указанными работами поиск расположения пунктов ТИС предлагается решать на базе теоретико-игровой модели.

Рассмотрим игру $G(I, A, \{U_i, i \in I\})$, где $I = \{1, 2, \dots, N\}$ - множество игроков (агентов), $A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_N$ - множество совместных действий агентов, причём A_i - множество действий, доступных i -му агенту, $\{U_i, i \in I\}$ - множество функций полезности, где $U_i : A_i \rightarrow \mathbf{R}$ - функция полезности i -го агента. Вектор $a = (a_1, a_2, \dots, a_N)$ - это коллективные действия агентов; будем писать $a = (a_i, a_{-i})$, где a_i - действие i -го пункта, а a_{-i} - действия остальных пунктов, исключая i -й. Задача решается в дискретном варианте, для этого покрываем области размещения пунктов и целей сеткой: \mathbf{P}_m - узлы сетки на \mathbf{P} , \mathbf{S}_k - узлы сетки на \mathbf{S} . 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. Радиус окрестности определяется константой r_c , которая характеризует возможности перемещения агента за один шаг игры. При этом $a_i(t-1) \in C_{a_i(t-1)}$, то есть агент может выбрать действие, в результате которого он останется в текущей позиции. Например, на рис.3.2.2.3 маркером x отмечены доступные позиции для перемещения агента №1 при $r_c = 0.25$.

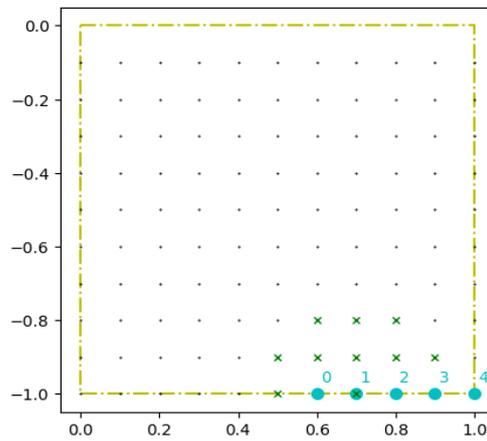


Рис.3.2.2.3. Позиции для перемещения агента №1 на текущем шаге

Агент №1 находится на границе области размещения и ему не доступны перемещения за пределы области, а также на позиции, занятые другими пунктами. Таким образом, измерительные пункты рассматриваются в качестве агентов, при этом агенты взаимодействуют и в зависимости от своих возможностей и окружающей обстановки формируют множество доступных действий. В результате обмена информацией агенты договариваются о действиях, обеспечивающих желаемое состояние всей группы.

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

$$\Phi(a) = \Phi(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N) = \min_{i,j \in \{1, \dots, N\}} (\|\mu_i - \mu_j\|) \sum_{i,j \in \{1, \dots, N\}, g \in S_k} [1 - f(\mu_i, \mu_j, g)], \quad (3.2.2.1)$$

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} , S_k - узлы сетки на \mathbf{S} ,

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

цели g из позиций μ_i и μ_j . При этом функция индивидуальной полезности для i -го пункта принимает вид:

$$U_i(a_i, a_{-i}) = \Phi(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N) - \Phi(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{i-1}, \mu_{i+1}, \dots, \mu_N). \quad (3.2.2.2)$$

Каждый агент для позиций $\hat{a}_i \in C_{a_i(t-1)}$ проводит расчёт вероятностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} P(a_i(t) = a_i(t-1)) = \frac{e^{\frac{1}{\tau} U_i(a(t-1))}}{e^{\frac{1}{\tau} U_i(a(t-1))} + e^{\frac{1}{\tau} U_i(\hat{a}_i, a_{-i}(t-1))}} \\ P(a_i(t) = \hat{a}_i) = \frac{e^{\frac{1}{\tau} U_i(\hat{a}_i, a_{-i}(t-1))}}{e^{\frac{1}{\tau} U_i(a(t-1))} + e^{\frac{1}{\tau} U_i(\hat{a}_i, a_{-i}(t-1))}} \end{array} \right. , \quad (3.2.2.3)$$

где τ - характеризует вероятность выбора неправильного действия агентом. Отметим, что при расчёте вероятностей i -м агентом полагаем, что остальные агенты не осуществляют смену позиции.

3.2.3 Алгоритмы управления

Проводилось тестирование двух алгоритмов управления перемещением:

Алгоритм A_1 : Выбор агента для перемещения осуществляется случайно.

Итоговое действие a_i^* также выбирается случайно из множества доступных $\hat{a}_i \in C_{a_i(t-1)}$, и для него рассчитываются вероятности по формуле (3.2.2.3). Выбор агентов и их действий производится с равной вероятностью. Если $P(a_i(t) = \hat{a}_i) > P(a_i(t) = a_i(t-1))$, то агент совершает выбранное действие, в противном случае остаётся на месте.

Алгоритм A_2 : Каждый агент осуществляет вычисления вероятностей по формуле (3.2.2.3) для каждого доступного действия $\hat{a}_i \in C_{a_i(t-1)}$, путём сравнения вероятностей выбирает наилучшее действие

$a_i^{\max} = \arg \max_{C_{a_i(t-1)}} \left(\left\{ P(a_i(t) = \hat{a}_i) \mid P(a_i(t) = \hat{a}_i) > P(a_i(t) = a_i(t-1)) \right\} \right)$, если таких действий несколько

выбор итогового действия осуществляется случайно. Затем производится ранжирование наилучших действий агентов $\{a_i^{\max}, i \in I\}$.

Перемещение осуществляет тот агент, который предложил наилучшее действие среди всех

агентов $i^* = \arg \max_{i \in I} \left[P(a_i(t) = a_i^{\max}) \right]$.

Выводы

1. Имитационное моделирование решения задачи противоборства наблюдателя и противника показывает, что предложенный подход позволяет оценить время работы и вероятность победы наблюдателя (противника) или указать на недостаточность средств для осуществления противодействия (см. п 4.5).
2. Указанная оценка доступна и в случае различных технических характеристиках пунктов и/или уровней подготовки экипажей, а также учитывает работоспособность экипажей ТИС/СПП.
3. Проведенное моделирование кооперативного поиска размещения показывает, что предложенный теоретико-игровой подход позволяет находить оптимальное (в смысле указанных критериев) размещение пунктов ТИС (см. п 4.6).
4. Предложенный метод поиска 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.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1 Оценивание местоположения ИРИ

Воспользуемся следующими исходными данными: $M=5$, $\Pi_0=[0,0,0]^T$, $\Pi_1=10^4[0,1,0]^T$, $\Pi_2=-10^4[1,0,0]^T$, $\Pi_3=-10^4[0,1,0]^T$, $\Pi_4=10^4[1,0,0]^T$, $\varepsilon^\alpha=0.75$, $\varepsilon^\beta=1.5$, $\gamma_\alpha=2$, $\gamma_\beta=1$, $N=806$, $D^{\alpha\beta}=6$, $S=4$, $(D_1^\alpha, D_1^\beta)=(2,4)$, $(D_2^\alpha, D_2^\beta)=(3,3)$, $(D_3^\alpha, D_3^\beta)=(4,2)$, $(D_4^\alpha, D_4^\beta)=(5,1)$, $N^{(2,4)}=15$, $N^{(3,3)}=28$, $N^{(4,2)}=33$, $N^{(5,1)}=26$, $N^{D^{\alpha\beta}}=N^{(6)}=15$, $Q=7$, $\Lambda=10^3[36.567, 34.099, 3.0]^T$. Положение пеленгаторов и цели указано в метрах, угловые величины в градусах. Флуктуационная ошибка измерений для пяти пеленгаторов ТИС имеет гауссовский закон распределения $\sigma_\alpha=0.25$ и $\sigma_\beta=0.5$ и нулевым математическим ожиданием. Были добавлены АОИ, присутствующие в каналах K_5^α и K_3^β (для K_5^α значение АОИ равно минус 11, а для K_3^β – плюс 9). С учётом этого был сформирован вектор ошибок измерений $\Psi=[(\psi_m^\alpha, \psi_m^\beta), m=\overline{1,5}]^T=[(0.44, -0.60), (0.16, 0.10), (-0.39, 9.56), (-0.90, 0.11), (-10.08, 0.90)]^T$ и вектор наблюдений $\mathbf{H}=[(33.82, 3.31), (36.37, 3.07), (49.94, 12.56), (51.17, 4.08), (32.92, 2.52)]^T$ пятипозиционной ТИС. Таким образом, условия нормального функционирования ТИС $|\psi_m^\alpha| < \varepsilon^\alpha = 0.75$ и $|\psi_m^\beta| < \varepsilon^\beta = 1.5$ не выполнены для каналов K_5^α и K_3^β , следовательно, данные каналы недостоверны. Требуется на базе КВМ и вектора измерений \mathbf{H} определить номера недостоверных каналов и оценить местоположение цели при наличии АОИ, а также дать сравнительный анализ КВМ с указанными ранее традиционными методами триангуляционного оценивания.

Основные этапы КВМ на исходных измерениях (\mathbf{H}) отражены на рис. 4.1.1–4.1.4 и в таблице 4.1.1.

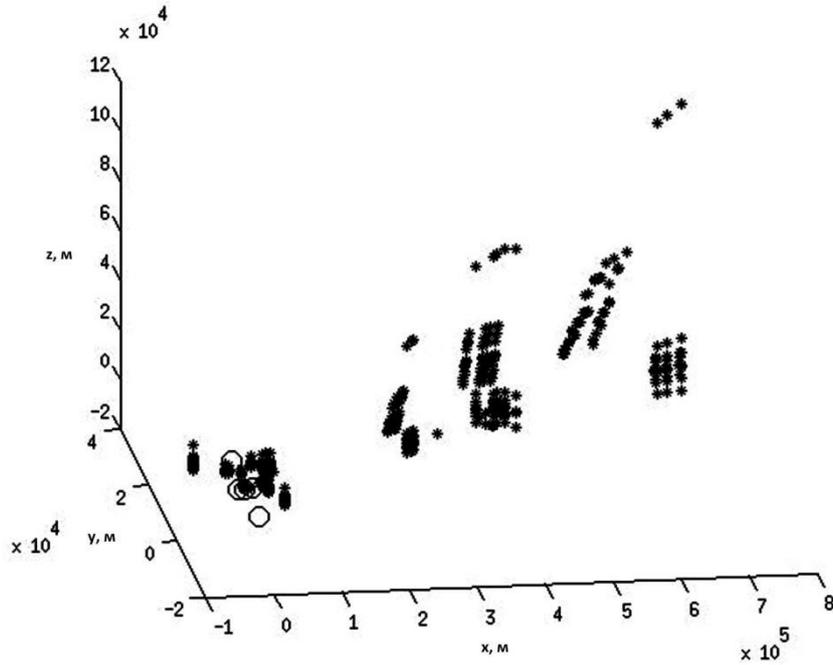


Рис. 4.1.1

Отметки Λ_n^* , соответствующие потенциально наблюдаемым ИС, изображены на рис. 4.1.1, где звездочкой показано положение отметки Λ_n^* (символ *), а большими кружками (символом \circ) положения пеленгаторов Π_m .

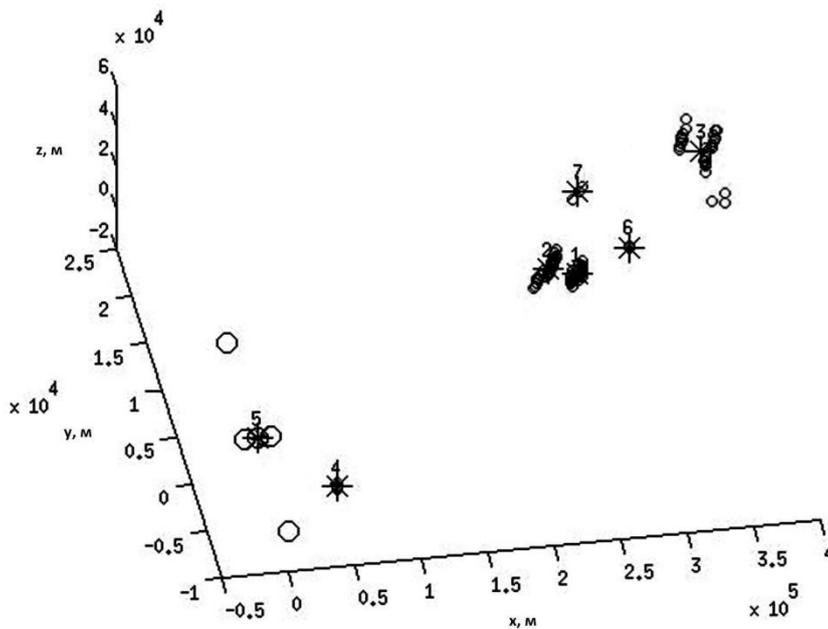


Рис. 4.1.2

На рис. 4.1.2 представлены результаты кластеризации отметок РИС_{*n_i*}, где звездочкой с верхним индексом (символом *^q) обозначен центр Υ_q соответствующего кластера, соответственно маленькими кружками (символом \circ) характеризуются положения отметок РИС_{*n_i*}.

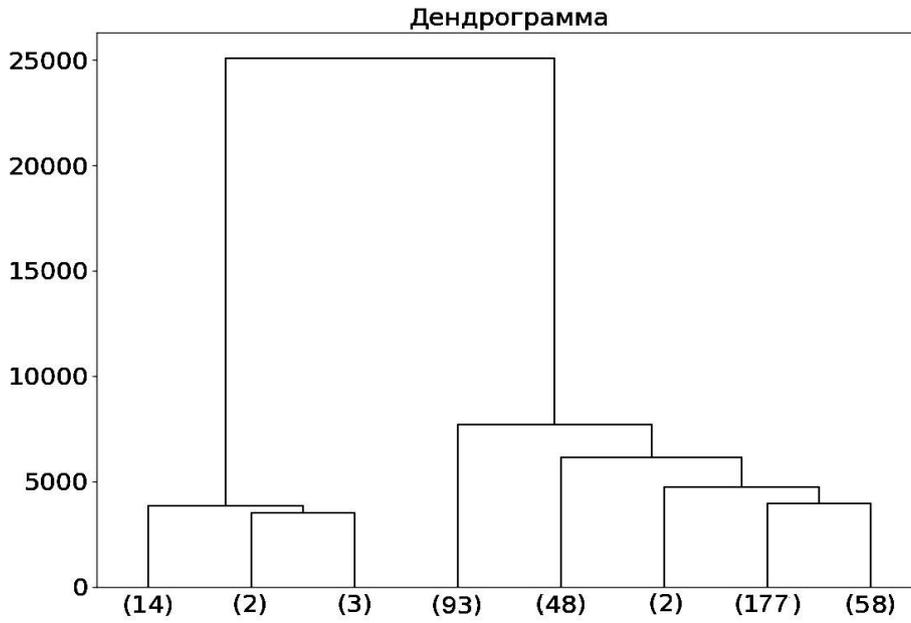


Рис. 4.1.3

На рис. 4.1.3 представлена дендрограмма предпоследнего шага агломеративного алгоритма кластеризации, которая показывает последовательность объединения кластеров. На дендрограмме на оси абсцисс (в круглых скобках) указано количество элементов в кластере ($L_q, q \in \{1, Q+1\}$), а на оси ординат – расстояние между кластерами. На последнем шаге алгоритма происходит объединение двух наиболее близких (в смысле метрики (2.3.2)) кластеров с количеством элементов 2 и 3, образуя кластер из пяти элементов. В результате объединения общее количество кластеров становится равным семи и процесс кластеризации прекращается. Полученному на последнем шаге новому кластеру соответствует номер 4 (см. таблицу 4.1.1), то есть $L_4 = 5$. Кластерам с количеством элементов 14, 93, 48, 2, 177, 58 (см. рис. 4.1.3) соответствуют номера 5, 7, 3, 6, 2, 1 (таблица 4.1.1), т.е. $L_5 = 14, L_7 = 93, L_3 = 48, L_6 = 2, L_2 = 177, L_1 = 58$.

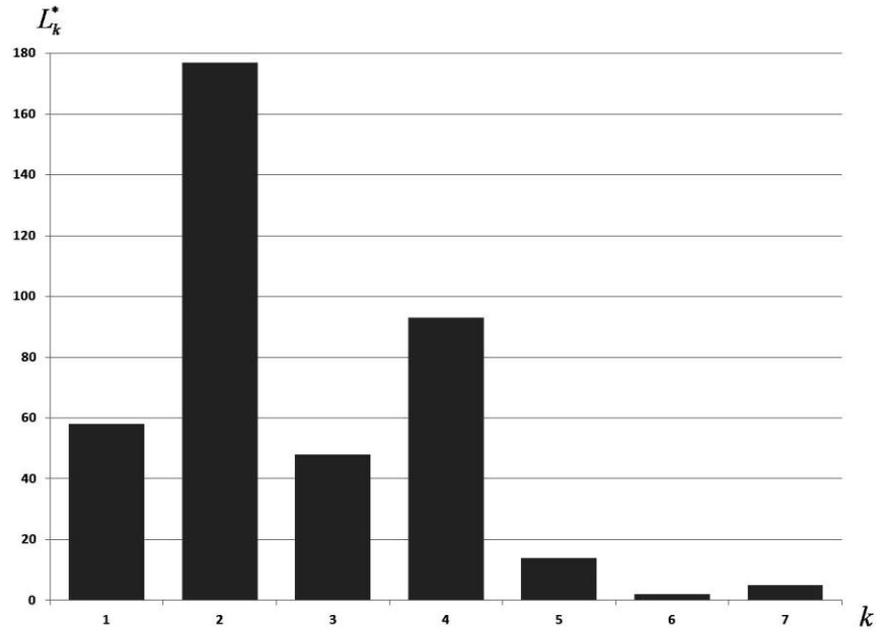


Рис. 4.1.4

Количественное распределение отметок по кластерам показано на рис. 4.1.4, где на оси абсцисс указывается номер соответствующего кластера, а на оси ординат – количество отметок, образующих данный кластер. Сводные результаты КВМ приведены в таблице 4.1.1.

q	L_q	$\rho(\Upsilon_q, \Lambda)$	$\rho(\mathbf{I}_{\Omega,q}, \Lambda)$	$\mathbf{K}_q^{1\alpha}$	$\mathbf{K}_q^{1\beta}$	$\ \mathbf{K}_q^1\ $
1	58	1051	254	{5}	{3}	2
2	177	1844	908	{5}	{3}	2
3	48	4800	4692	{1,2,4}	{3}	4
4	5	23634	23634	{1,2,4,5}	{3}	5
5	14	27862	27835	{1,2,3,4,5}	{ \emptyset }	5
6	2	6044	6044	{1,2,5}	{3}	4
7	93	9697	9271	{1,2,5}	{3}	4

Таблица 4.1.1

Из таблицы видно, что общее количество отметок, участвующих в кластеризации $N_1 = 397$, то есть это те отметки из $N = 806$ потенциально возможных (соот-

ветствующих наблюдаемым ИС), которые прошли отсев (селекцию) с учетом условий (2.2.4). Согласно критерию (2.4.2) из множества $\{I_1, I_2, \dots, I_7\}$ были выбраны приоритетные оценки $I_1^* = I_1$ и $I_2^* = I_2$, а ранжированием (по параметру L_q) осуществлен отбор оптимальной оценки $I^* = I_2$ (см. таблицу 4.1.1, в которой строка, соответствующая оптимальному варианту, затемнена). Далее для оценки I_2 были правильно обнаружены недостоверные измерительные каналы $K_2^{1\alpha} = \{5\}$ и $K_2^{1\beta} = \{3\}$. Для сравнения качества оценки, получаемой при помощи разработанного КВМ, местоположение цели оценивали ещё двумя методами: ММП (см. метод 1 п.1.3) и РММП (неизвестные АОИ включаются 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) являлся аномальным (в нашем примере это Π_3 и Π_5). Сравнение производилось 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 $z_{ц} = 3 \times 10^3$. Усреднение оценок производилось по 100 измерениям текущего положения цели с независимой шумовой составляющей. При этом флуктуационные составляющие ошибок ψ_m^α и ψ_m^β считались распределенными по нормальному закону со среднеквадратическим отклонением 0.5° и 1° соответственно.

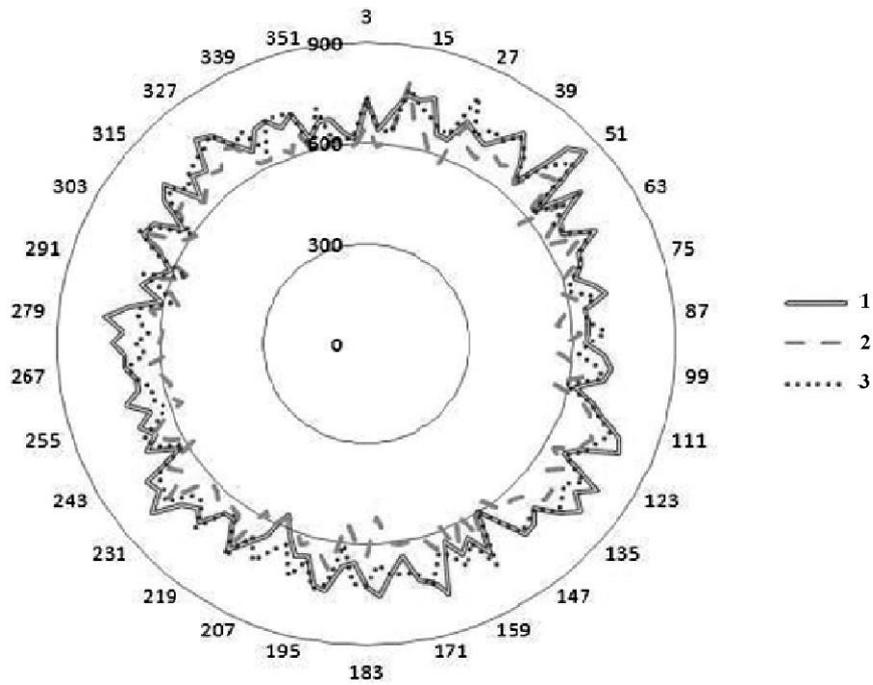


Рис.4.1.5а. Ошибки KBM, MMP, PMMP без АОИ (расстояние до ИРИ 50 км.)

Зависимость усредненной ошибки оценивания (в метрах) местоположения цели от параметра φ_c для трёх методов KBM, MMP и PMMP при $\rho_c = 50 \times 10^3$ и отсутствии АОИ приведена на рис.4.1.5а (KBM – 1, MMP – 2 и PMMP – 3). Видим, что в нормальных условиях функционирования ТИС рассматриваемые методы сравнимы по точности.

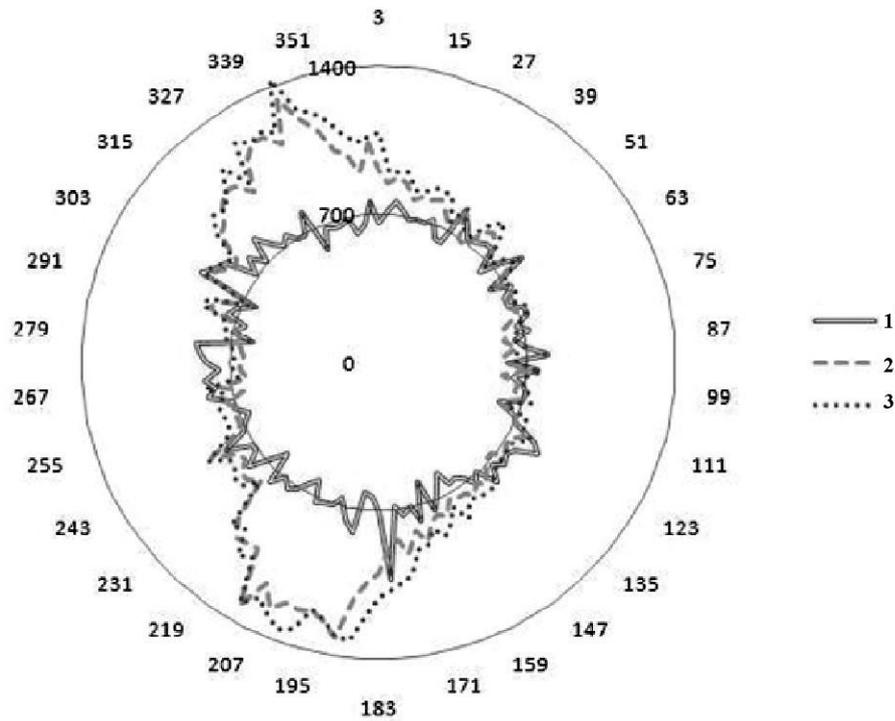


Рис.4.1.5б. Ошибки КВМ, ММП, РММП с АОИ (расстояние до ИРИ 50 км.)

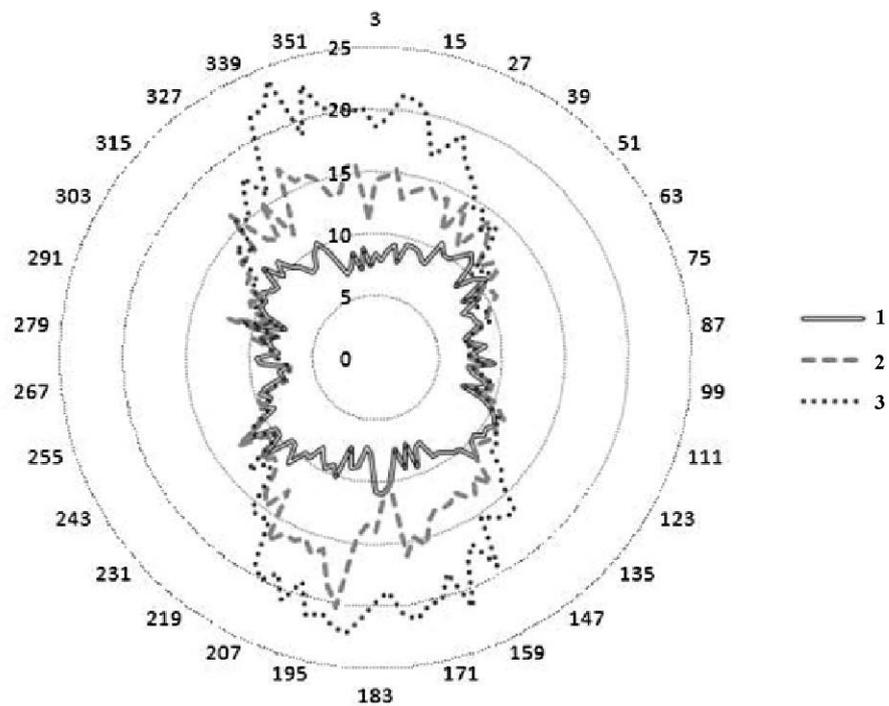


Рис.4.1.5в. Ошибки КВМ, ММП, РММП с АОИ (расстояние до ИРИ 200 км.)

Ситуация кардинально меняется, если ТИС функционирует в некорректных условиях (см. рис.4.1.5б и 4.1.5в: для $\rho_{\text{ц}} = 50 \times 10^3$ и $\rho_{\text{ц}} = 200 \times 10^3$ соответственно, где

на рис.4.1.5б ошибка приведена в м, а на рис.4.1.5в– в км). Видим, что только КВМ обеспечивает построение надежной оценки для всех направлений визирования.

Выше использованы ограничения: при анализе РММП полагались известными номера недоверенных каналов и оценивались только значения АОИ, а для ММП показания пеленгаторов с АОИ (хотя бы в одном из каналов) вовсе исключались из рассмотрения. Теперь осуществим сравнение КВМ с одним из эмпирических методов (ЭМ) для общего случая, не прибегая к этим ограничениям. Суть метода заключается в следующем. Строятся всевозможные комбинации пеленгов, так чтобы в каждой комбинации было более чем $M/2$ пеленгов. Каждой комбинации соответствует свой вектор первичных измерений, для которого строится первичная отметка цели. Далее по аналогии с КВМ находятся вторичные пеленги и формируется усредненная (по количеству пеленгов, входящих в комбинацию) суммарная (по азимутам и углам места) невязка. Результирующей комбинацией будет та, невязка которой минимальна. Пеленги, не входящие в эту комбинацию, считаем аномальными.

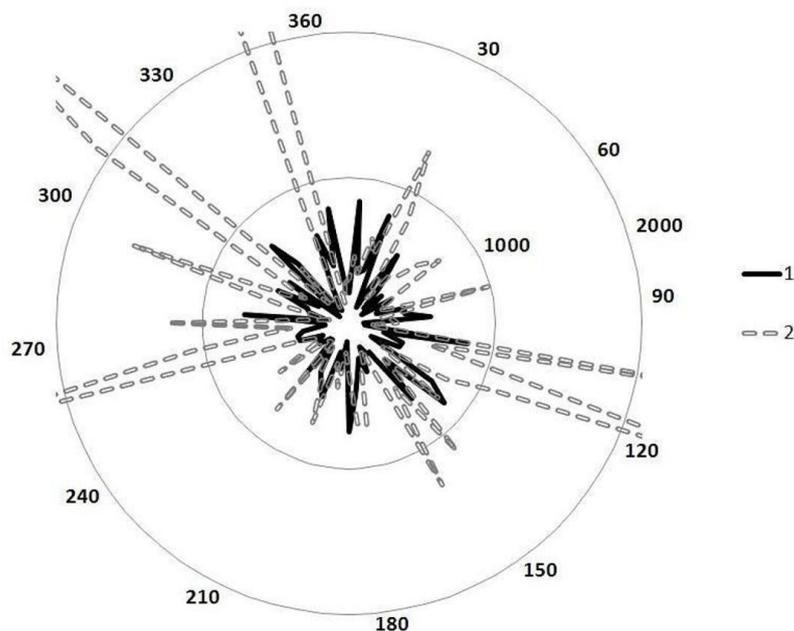


Рис.4.1.6 Ошибки КВМ и ЭМ с АОИ (расстояние до ИРИ 50 км.)

Для общего случая зависимость усредненной (по 30 измерениям) ошибки оценивания (в метрах) местоположения цели от параметра $\varphi_{\text{ц}} \in \{5 \times i, i = \overline{1, 72}\}$ для двух методов (КВМ и ЭМ) при $\rho_{\text{ц}} = 50 \times 10^3$ приведена на рис. 4.1.6 (КВМ – 1, ЭМ – 2). Если принять за 100% интегральную характеристику ЭМ (1.6.2), то интегральная характеристика КВМ снижается на 43% (см. рис. 4.1.6), что наглядно демонстрирует преимущества КВМ.

4.2 Оценивание параметров движения ИРИ

Рассмотрим ТИС с пеленгаторами кругового обзора, обеспечивающими сопровождение излучающей цели. Для описания геометрии задачи воспользуемся данными из п.4.1, кроме того, для всех $k \in \{0, 1, \dots, 199\}$ примем: $\varepsilon^\alpha = 0.75$, $\varepsilon^\beta = 1.5$, $\gamma_\alpha = 2$,

$$\gamma_\beta = 1, \quad Q = 7, \quad \mathbf{X}_k = [\mathbf{\Lambda}_k^T, \mathbf{V}_k^T]^T, \quad \mathbf{X}_{\Omega^*, k/k}^* = [\mathbf{\Lambda}_{\Omega, k}^*, \mathbf{V}_{\Omega, k}^*]^T, \quad t_{k+1} - t_k = \tau = 6,$$

$$\mathbf{\Lambda}_0 = \mathbf{\Lambda}(0) = 10^3 \times [68, 178, 16]^T, \quad \mathbf{V}_0 = \mathbf{V}(0) = [-10, -165, -5]^T, \quad \mathbf{\Xi}_k = \mathbf{0}^T, \quad \mathbf{F}(\mathbf{X}_{k/k}^*, k) = \mathbf{F}\mathbf{X}_{k/k}^*,$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 \\ \mathbf{F}_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \tau & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \tau \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_k = \mathbf{F}, \quad \mathbf{K}_k^\Psi = \mathbf{K}^\Psi = \text{diag} \left[\left((\sigma_m^\alpha)^2, (\sigma_m^\beta)^2 \right), m = \overline{1, 5} \right]$$

, $\sigma_m^\alpha = \sigma^\alpha = 0.25$, $\sigma_m^\beta = \sigma^\beta = 0.5$. Для этих исходных данных с учетом (2.6.1) получаем простейшую модель невозмущенного прямолинейного равномерного движения $\mathbf{X}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{X}_k$. Как и в п.4.1, положения пеленгаторов и цели указаны в м, скорость цели – в м/с, угловые величины – в градусах. Для классического метода в качестве начального условия $\mathbf{\Lambda}_0^*$ принимается оценка местоположения цели, вычисляемая на основе метода минимума суммы пространственных невязок [21] по измерениям пеленгов, выполненных в момент времени $t_0 = 0$. Для КВМ в качестве начального условия принимается $\mathbf{\Lambda}_{1,0}^*$. Соответственно для начального условия \mathbf{V}_0^* (в классическом методе) используется первая конечная разность и оценки $\mathbf{\Lambda}_0^*$ и $\mathbf{\Lambda}_{-1}^* = \mathbf{\Lambda}^*(-\tau)$ для моментов времени $t_0 = 0$ и $t_{-1} = -\tau$ соответственно. Аналогично формируется оценка $\mathbf{V}_{1,0}^*$ для КВМ. Кроме того, примем

$\mathbf{K}_{\Gamma,1/0}^X = \mathbf{K}^X(0) = \text{diag} \left[(0.2x_0)^2, (0.2y_0)^2, (0.2z_0)^2, (0.4v_0^x)^2, (0.4v_0^y)^2, (0.4v_0^z)^2 \right]$, что соответствует оценке (в момент $t_0 = 0$) местоположения цели с точностью 20% и скорости – 40%. Предположим, что в каналах \mathbf{K}_5^α и \mathbf{K}_3^β помимо допустимой флуктуационной ошибки присутствуют и постоянные АОИ (для \mathbf{K}_5^α значение АОИ равно минус 11, а для \mathbf{K}_3^β – плюс 9). Для сравнения метода на базе КВМ (2.6.5) и классического метода фильтрации (2.6.3) проводилось сто независимых экспериментов с последующим усреднением результатов.

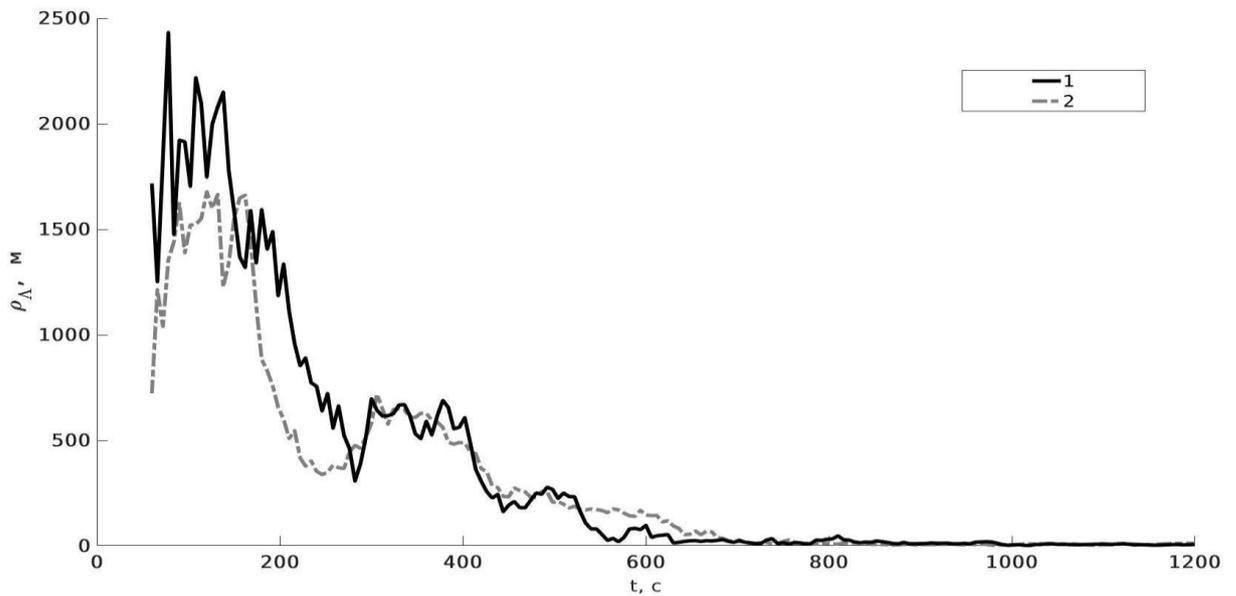


Рис.4.2.1а. Погрешность оценки местоположения ИРИ, КВМ и ОФК

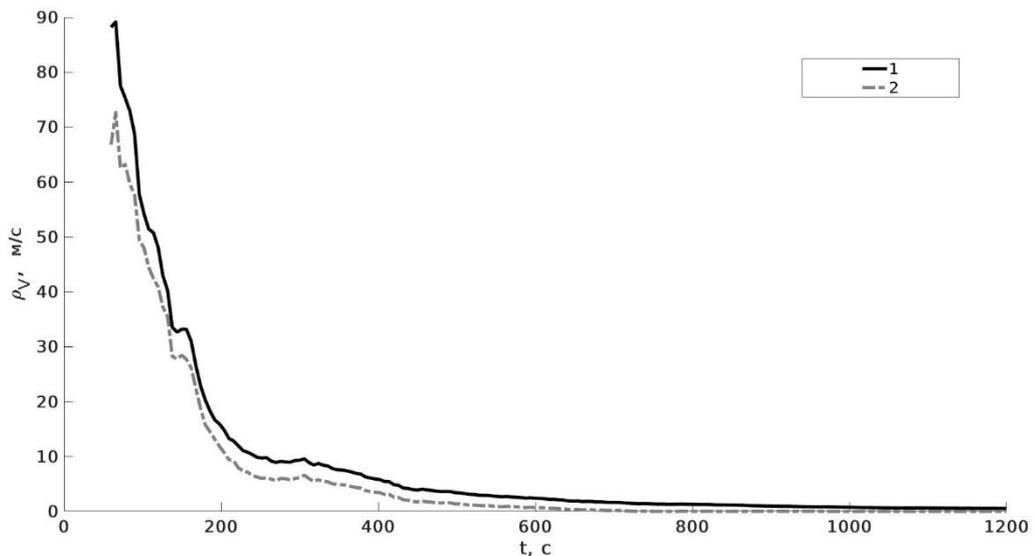


Рис.4.2.1б. Погрешность оценки скорости ИРИ, КВМ и ОФК

На рис.4.2.1а и 4.2.1б показаны результирующие погрешности $\rho_\lambda(k)$ и $\rho_v(k)$ оценивания (в евклидовой метрике) местоположения и скорости цели (на рисунках цифра 1 соответствует КВМ при наличии АОИ, цифра 2 соответствует классическому методу (2.6.3) при отсутствии АОИ), попытка реализации (2.6.3) в аномальных условиях приводит к расходимости фильтра (поэтому результаты эксперимента не приводятся). Из рис. 4.2.1а и 4.2.1б следует, что метод на базе КВМ дает несмещенные 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 (2.6.3) в аномальных условиях с использованием расширения пространства состояний (возможные АОИ всех десяти каналов включались в число фильтруемых координат вектора \mathbf{P}_k). В качестве начальной оценки корреляционной матрицы ошибок оценивания принималась диагональная матрица $\mathbf{K}_{1/0}^x = \mathbf{K}^x(0) = \text{diag}[(0.2x_0)^2, (0.2y_0)^2, (0.2z_0)^2, (0.4v_0^x)^2, (0.4v_0^y)^2, (0.4v_0^z)^2, 2^2, \dots, 2^2]$. В эту матрицу добавлено десять компонент $(2^2, \dots, 2^2)$, являющихся характеристиками точности оценивания АОИ в момент времени $t_0 = 0$. Матрица \mathbf{F} дополнена теперь новыми строками и столбцами (состоящими из нулей и единиц), соответствующими принятой модели АОИ в виде постоянной ошибки. Начальные условия для АОИ принимались нулевыми.

Результаты усредненной фильтрации (по ста экспериментам) представлены на рис.4.2.2а и 4.2.2б, где, по аналогии с рис. 4.2.1а и 4.2.1б, приводятся графики зависимости погрешности оценивания местоположения и скорости цели от времени. Сравнение рис. 4.2.1а, 4.2.1б и 4.2.2а, 4.2.2б показывает, что процедура расширения не обеспечивает хорошей устойчивости вычислительного процесса, при этом точность оценивания на базе КВМ существенно выше.

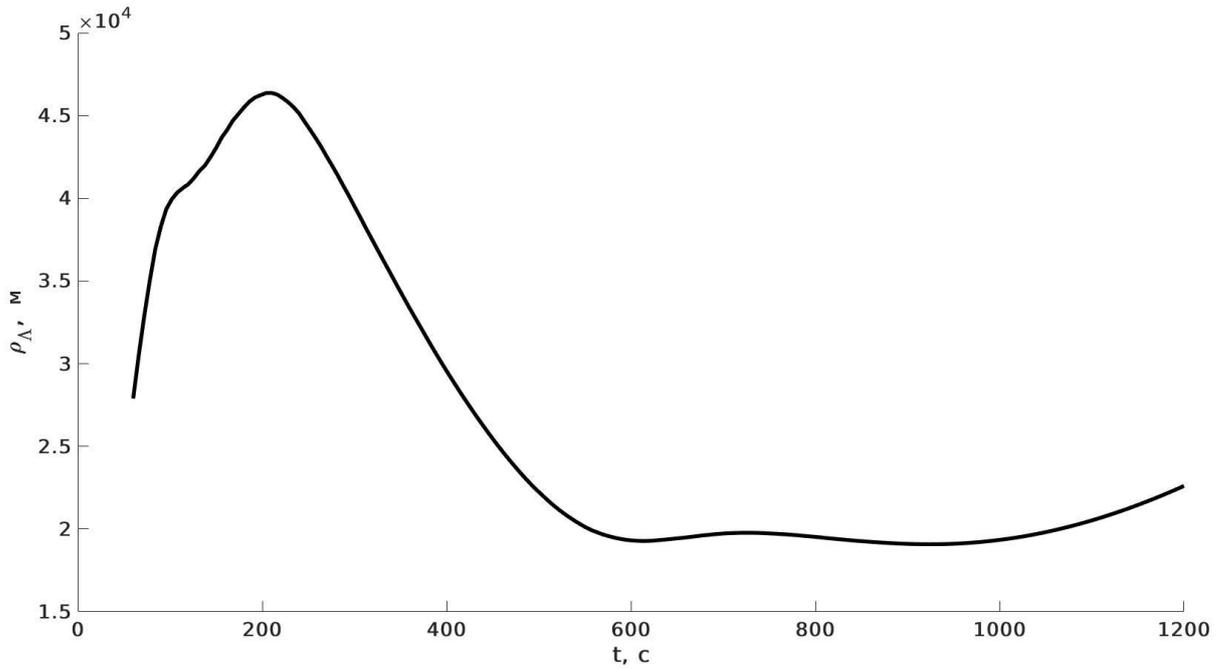


Рис.4.2.2а. Погрешность оценки местоположения ИРИ с расширением пространства состояний, ОФК

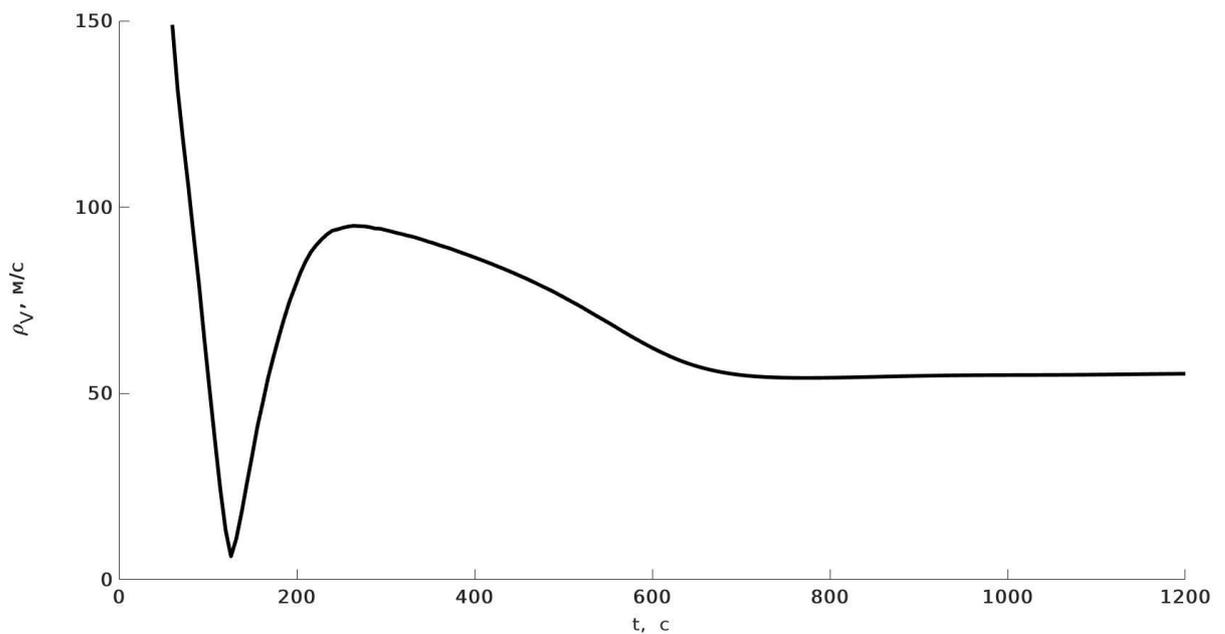


Рис.4.2.2б Погрешность оценки скорости ИРИ с расширением пространства состояний, ОФК

4.3 Сравнительный анализ одно- и двухэтапного вариантов КВМ

Для сравнительного анализа кластерных методов триангуляционного оценивания будем использовать исходные данные п.1.1.7, кроме этого, для ряда каналов

вместо флуктуационных ошибок в угловые измерения вносились АОИ, которые формируются следующей процедурой.

1. Случайным образом выбирается количество сбойных каналов от 0 до не более чем половины всех каналов.
2. Случайным образом определяются номера сбойных каналов.
3. Для сбойных каналов вместо флуктуационной ошибки формируем ошибку из интервала от 3σ до $\frac{\pi}{6}$.

Указанная процедура выполняется для каждого цикла формирования угловых измерений как по азимуту, так и по углу места. Нужно отметить, что все случайные величины в процедуре формирования АОИ имеют равномерный закон распределения на соответствующих интервалах. Конечно, такое правило не покрывает множество всех возможных вариантов. Пусть $\mathbf{K}^1 = \mathbf{K}^{\alpha,1} \cup \mathbf{K}^{\beta,1}$ - набор измерительных каналов с АОИ, где $\mathbf{K}^{\alpha,1}$ - азимутальные каналы, а $\mathbf{K}^{\beta,1}$ - угломестные. При таком подходе $\|\mathbf{K}^{\alpha,1}\| < M/2$, $\|\mathbf{K}^{\beta,1}\| < M/2$ и $\|\mathbf{K}^1\| < M$, то есть сбойных каналов менее половины от общего ($2M$), однако, не учитывается случай когда $\|\mathbf{K}^1\| < M$ и либо $\|\mathbf{K}^{\alpha,1}\| \geq M/2$, либо $\|\mathbf{K}^{\beta,1}\| \geq M/2$. Такое множество АОИ выбрано для того, чтобы обеспечить возможность сравнения одноэтапного и двухэтапного кластерного метода.

Оценки РИС получены методом (1.1.46) – (1.1.47), процедура оценивания проводилась 100 раз для каждого положения ИЦ, затем полученные частные оценки $\{\mathbf{r}^*(n)\}_{n=1}^{100}$ усредняются с целью получения результирующей оценки \mathbf{r}^* . Для каждой частной оценки $\mathbf{r}^*(n)$ считалась ошибка Δ_m (1.1.48) и интегральная характеристика метода (1.1.49). Аналогично п. 1.6 значения Δ_m отображаются на круговой диаграмме в полярных координатах $(\varphi, \rho) = \left(\frac{2\pi}{N} n, \Delta_m \right)$, $n = \overline{1, 100}$. Также для каждого из сравниваемых методов фиксируется относительное время δT (в процентах от времени самого «медленного» метода), необходимое для формирования результирующей оценки.

Итак, сравнивать будем следующие методы.

1. Одноэтапный КВМ с заданием значения Q в ручном режиме, Q полагается равным 7 на всё время проведения процедуры моделирования.
2. Одноэтапный КВМ с автоматическим определением значения Q для каждого положения ИЦ.
3. Двухэтапный КВМ с автоматическим определением значения Q для каждого положения ИЦ на первом и втором этапах.
4. Эмпирический метод (см. п. 4.1)

При прогонке методов на измерениях без АОИ (только шумовая составляющая) получены результаты, представленные в таблице 4.3.1. Время выполнения вычислений методов δT приводится в % от времени выполнения метода 2 (как самого медленного).

Метод	1	2	3	4
S	1552	1971	1193	1328
δT	94%	100%	9%	1.5%

Таблица 4.3.1

При прогонке методов с АОИ данные приведены в таблице 4.3.2.

Метод	1	2	3	4
S	7830	4329	5637	12163
δT	90%	100%	14%	2%

Таблица 4.3.2

При прогонке на измерениях с АОИ результаты ожидаемы. По времени выполнения лидирует метод 4, затем метод 3 (двухэтапный) и сильно отстают методы 1 и 2. Анализ времени выполнения для метода 1 (ручной режим выбора Q) и метода 2 (автоматический) показывает, что временные затраты на автоматический выбор параметра Q меньше 10%. По точности лидирует метод 2, затем идут методы 3, 1, 4. Сравнение точности методов 1 и 2 показывает, что автоматический выбор параметра Q позволяет существенно повысить точность. Как видим, метод 3 оптимален по соотношению точность - время выполнения.

4.4 Сравнение КВМ и нейросетевого подхода

Для сравнительного анализа КВМ и нейросетевого метода будем использовать исходные данные п.4.3. Для ряда каналов вместо флуктуационных ошибок в угловые измерения вносились АОИ, аналогично п.4.3. Оценки РИС получены с использованием критерия минимума квадратичной формы плоскостных невязок (1.1.46) – (1.1.47). Процедура оценивания проводилась 100 раз для каждого положения ИЦ, затем полученные частные оценки $\{r^*(n)\}_{n=1}^{100}$ усредняются с целью получения результирующей оценки r^* . Для каждой частной оценки $r^*(n)$ считалась ошибка $\Delta_{r,n} = \|r^*(n) - r_0\|_2$, $n = \overline{1,100}$, где $\|\cdot\|_2$ – евклидова норма. Значения $\Delta_{r,n}$ будут отображаться на круговой диаграмме ошибок в полярных координатах $(\varphi, \rho) = \left(\frac{2\pi}{N} n, \Delta_m \right)$, $n = \overline{1,100}$. Данной диаграмме оценивания ставится в соответствие интегральная характеристика метода триангуляционного оценивания $S_r = \sum_{n=1}^N s_{r,n} = \sum_{n=1}^N \frac{2\pi}{N} \Delta_{r,n}$, где $s_{r,n}$ – частная характеристика метода. Сравнение проводилось для плоской постановки задачи.

Двухэтапный кластерно-вариационный метод был рассмотрен в [85]. Поскольку в данном сравнении рассматривается плоский случай, будем использовать только первый этап метода. В качестве нейросетевого метода использовалась модель многослойного персептрона MLPRegressor из библиотеки sklearn.neural_network. При моделировании в качестве функции активации была использована выпрямленная линейная функция $\varphi(s) = \max(0, s)$, данная функция выбрана как наименее ресурсоёмкая. При моделировании в качестве метода оптимизации использовался стохастический оптимизатор на основе градиентного спуска [86].

Для случая $M = 5$ пеленгаторов входной слой содержит 5 входов, то есть на вход поступает вектор азимутальных измерений. Выходной слой содержит $M + 2$ выхода, где M выходов соответствуют оценкам значений АОИ каждого пеленга-

тора, и два выхода соответствуют оценке координат x и y . Также используемая сеть содержит три скрытых слоя с 60, 120 и 100 нейронами соответственно. Количество нейронов в слое и количество скрытых слоёв подбирались экспериментально. На первой итерации брали один скрытый слой с количеством нейронов $M+2$ (количество нейронов выходного слоя). Проводили обучение полученной нейросети и оценивали качество предсказания, затем увеличивали количество нейронов в скрытом слое до тех пор, пока качество предсказания прекращало расти. При достижении оптимального количества нейронов в скрытом слое их количество фиксировалось и добавлялся новый скрытый слой с количеством нейронов $M+2$, затем повторялась процедура обучения \rightarrow оценка качества предсказания \rightarrow увеличение нейронов второго скрытого слоя. Как только качество предсказания прекращает расти, фиксируем оптимальное количество нейронов в слое и добавляем новый слой. В итоге получили приведенную выше сеть, для ограничения количества слоёв нейросети использовался временной параметр: время обучения сети. Критерий: минимизация времени обучения и максимизация качества предсказания. В итоге получено качество предсказания 0.972. Возможно, что увеличение обучающей выборки приведёт к увеличению качества предсказания, однако при этом существенно увеличивается время, затрачиваемое на обучение.

Обучающая выборка получена на базе опорных положений цели:

$$\mathbf{r}_{k,n} = \rho_k \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N}n\right), \sin\left(\frac{2\pi}{N}n\right) \right]^T, \quad n = \overline{1, N}, \quad N = 90, \quad \text{где } \rho_k = 3 \cdot 10^4 + k \frac{(1 \cdot 10^5 - 3 \cdot 10^4)}{K}, \quad k = \overline{1, K},$$

$K = 100$. На основе каждого опорного положения цели получаем 100 вариантов путём внесения флуктационных ошибок и АОИ в соответствии с вышеописанной процедурой (исходные данные). В итоге получаем обучающую выборку размером 900000 вариантов. Обучающая выборка разбивается на две части: собственно обучающая выборка и тестовая выборка, которая не участвует в обучении, а используется для оценки качества предсказания. Тестовая выборка составляет 1-10% от первоначального набора, при моделировании использовали обучающую выборку размером 891000 вариантов и тестовую выборку размером 9000 вариантов.

Пусть $x = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5]$ - измерения пеленгаторов, а $y = [E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, x, y]$ - истинные значения внесенных АОИ и истинное положение цели, соответствующие значениям вектора X . Вектор X также содержит флуктационную составляющую истинные значения которой нейросети не сообщаются. Далее, $\tilde{y} = [\tilde{E}_1, \tilde{E}_2, \tilde{E}_3, \tilde{E}_4, \tilde{E}_5, \tilde{x}, \tilde{y}]$ - предсказанный вектор значений АОИ и положения цели, соответствующий вектору x . Качество предсказания рассчитывается по следующей формуле: $1 - \frac{v}{u}$, где $u = \sum (y - \tilde{y})^2$, $v = \sum (y - m_y)^2$, а m_y - среднее значение вектора y по выборке для которой производится расчёт качества предсказания. Максимальное значение качества предсказания равно 1, может быть отрицательным. Обучение нейросети проводится на вариантах из обучающей выборки, оптимизация коэффициентов производится при помощи стохастического градиентного метода. Максимальное количество эпох обучения 200. Значения остальных параметров модели MLPRegressor оставлены по умолчанию. По окончании обучения качество предсказания для обучающей выборки составило 0.97211, для тестовой 0.97210. Это неплохой результат, поскольку сеть видела варианты из тестовой выборки впервые и тем не менее качество предсказания практически не изменилось.

Обученная нейросеть была использована для предсказания на модельных данных. Нужно отметить, что в обучающей выборке отсутствует значение ρ_k , равное значению дальности в модельном наборе: $\mathbf{r}_0 = 10^4 \left[5 \cos\left(\frac{2\pi}{N} n\right), 5 \sin\left(\frac{2\pi}{N} n\right) \right]^T$, $n = \overline{1, N}$, $N = 180$, также в модельном наборе шаг по угловой координате в два раза меньше чем в обучающей выборке, то есть половина значений отсутствует в обучающей выборке.

При прогонке методов на модельных данных получены результаты, представленные в таблице 4.4.1. Время выполнения вычислений методов T_i приводится в % от времени выполнения КВМ (как более медленного), интегральная характеристика S_i также приведена в %.

Метод	КВМ	Нейросетевой
S	~20%	100%
T	100%	Менее 1%

Таблица 4.4.1

КВМ позволяет получить более высокие показатели точности, но сильно проигрывает по времени расчётов. Нужно отметить, что время обучения нейросети не включено 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. Также нейросеть была обучена для значений расстояний от 30 км до 100 км, и если модельные данные лежат вне этого диапазона, то показатели точности нейросетевого метода падают (аналог задачи экстраполяции), то есть если для указанных в таблице значений (полученных для расстояния 50 км) отношение параметров S составит 1/5, в то время как для расстояния 110 км отношение уже 1/6. Если посмотреть шире, то алгоритм кластеризации, лежащий в основе кластерно-вариационного метода, можно трактовать как алгоритм обучения без учителя. Полученные результаты дают возможность оценить преимущества и недостатки каждого из исследованных подходов. При фиксированной топологии ТИС нейросетевой метод может быть хорошим выбором, также возможно гибридное использование обоих методов.

4.5 Имитационное моделирование противоборства наблюдателя и противника

Рассмотрим ситуацию, когда ТИС наблюдателя состоит из пяти измерительных пунктов, а у противника два пункта постановки помех. При этом $\rho = 1.0$, $\gamma = 12$ градусов, $B_{\min} = 0.5$, P_l и S_k - содержат по 90 узлов, равномерно покрывающих область P и S соответственно. Диапазон углов поворота антенн при выбранном расположении областей P и S имеет вид $\left[-\frac{\pi}{2} - \gamma, \frac{\pi}{2} + \gamma\right]$. При моделировании используются значения углов в 20 узлах сетки, равномерно покрывающей указанный диапазон.

Множество G формируется с учётом B_{\min} методом Монте-Карло. Случайным образом (равномерный закон распределения) осуществлялся выбор из всевозможных сочетаний N позиций на сетке P_l (общее количество C_{90}^5) измерительных позиций ТИС. Конфигурации, не удовлетворяющие условию $\forall i, j \in \overline{1, N} \|P_i - P_j\| > B_{\min}$, отсеивались. Для прошедших отсев ТИС вычислялись площади треугольников, образованных всевозможными тройками измерительных позиций: если $\exists i, j, k \in \overline{1, N} : S_{P_i P_j P_k} < S_{\min}$, то ТИС также отсеивается, где $S_{P_i P_j P_k}$ - площадь треугольника, образованного пунктами i, j, k , S_{\min} - площадь равностороннего треугольника со стороной B_{\min} . В результате учёта указанных ограничений на расположение измерительных пунктов ТИС отсев прошли 708 конфигураций. Варианты расположения пунктов ТИС для двух итоговых конфигураций представлены на рис.4.5.1.

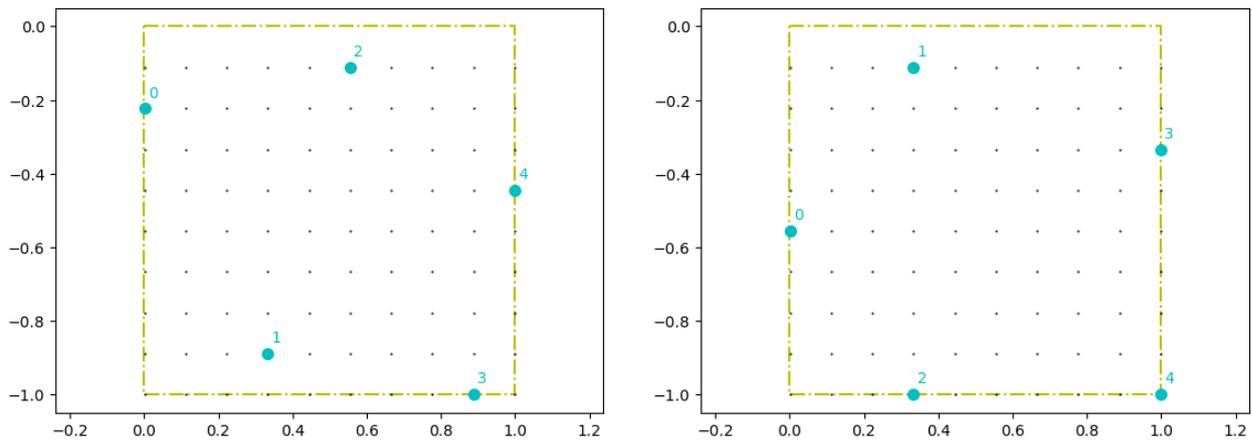


Рис.4.5.1. Допустимые расположения пунктов ТИС

Формирование эффективных конфигураций помеховых средств происходит с учётом полученного множества G . Случайным образом (равномерный закон распределения) осуществляется выбор расположения помеховых средств из всевозможных сочетаний M позиций на сетке S_k (общее количество C_{90}^2). Для двух помеховых пунктов количество всевозможных комбинаций углов при выбранной сетке равно 400. Комбинации обладают различной эффективностью, поэтому множество всевозможных комбинаций углов поворота так же подвергается процедуре фильтрации. Отсеиваются комбинации, реализация

которых не позволяет нарушить работоспособность какой-либо ТИС множества \mathbf{G} , а также дублирующие (в смысле множества подавляемых ТИС). Таким образом, в зависимости от расположения пунктов подавления относительно области \mathbf{P} , количество эффективных комбинаций \mathbf{A} будет различным. Если $\exists g \in \mathbf{H}: \mathbf{G}^h = \mathbf{G}^g$, то из множества \mathbf{H} исключается та конфигурация, для которой величина параметра $|\mathbf{A}|$ больше. На рис.4.5.2 представлены две различные комбинации углов поворота антенн при неизменных координатах пунктов помех (в квадратных скобках указаны номера позиции в диапазоне углов поворота антенн, для первого и второго пункта системы постановки помех соответственно).

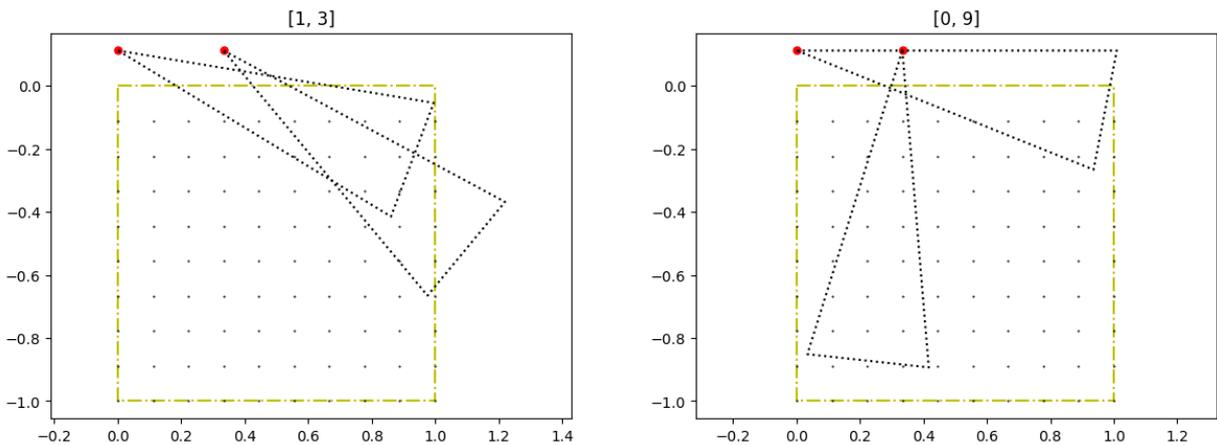


Рис.4.5.2. Комбинации углов поворота антенн

Полученное множество \mathbf{H} состоит из 183 конфигураций таких, что $\forall h_1, h_2 \in \mathbf{H}: \mathbf{G}^{h_1} \Delta \mathbf{G}^{h_2} \neq \emptyset$, где Δ - симметрическая разность множеств, то есть множества подавляемых ТИС каждой конфигурации содержат не менее одной ТИС, которые нельзя подавить, используя другие конфигурации. Отметим, что при выбранных значениях параметров реализована ситуация III из п. 3.1.3, то есть условия $\exists g \in \mathbf{G}: \forall h \in \mathbf{H}, g \notin \mathbf{G}^h$ и $\exists h \in \mathbf{H}: \forall g \in \mathbf{G}, g \in \mathbf{G}^h$ не выполняются. Анализ различных комбинаций применения эффективных конфигураций выявил, что при текущей ситуации для подавления любой ТИС из \mathbf{G} нужно использовать не менее трёх эффективных конфигураций. На основе 183 эффективных конфигураций средств подавления получаем 35 таких троек. Противник, последовательно применяя конфигурации из указанных наборов, может вывести из строя любую ТИС из множества \mathbf{G} . Понятно, что указанные наборы конфигураций СПП

осуществляют подавление конфигураций ТИС последовательно, и смена наблюдателем конфигураций ТИС может помешать этому. Для ответа на вопросы «в течение какого времени система наблюдателя препятствует проведению радиомониторинга противником?» и «в течение какого времени система наблюдателя не выполняет свои функции?» проводилось имитационное моделирование. Характеристики пунктов ТИС и СПП представлены в таблице 4.5.1, а кривые работоспособности идентичны для всех экипажей и представлены на рис. 4.5.3.

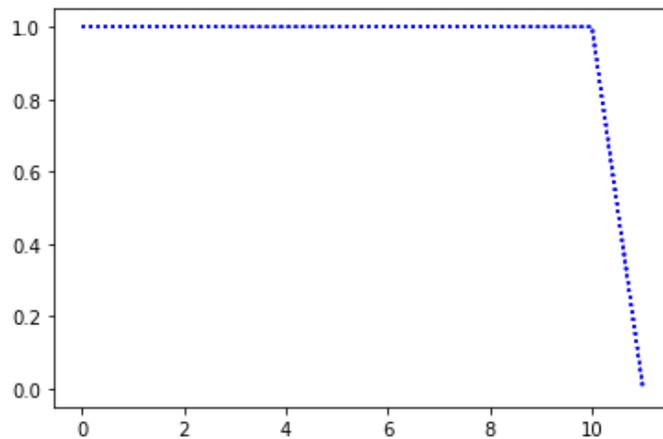


Рис.4.5.3. Кривая работоспособности

Пункты	v_p , ед./ч.	$(t_i + t_j)$, ч.	t_d , ч.	t_e , ч.
ТИС 1-5	1.0	0.5	0.5	-
СПП 1,2	2.5	0.3	-	0.015

Таблица 4.5.1 Характеристики пунктов.

Моделирование проводилось следующим образом.

1. Для выбранного набора эффективных конфигураций случайным образом выбирается текущая конфигурация, для неё случайно выбирается комбинация углов поворота антенн.
2. Из множества допустимых конфигураций ТИС случайным образом выбирается текущая конфигурация.
3. Выполняется шаг алгоритма противодействия (рисунок 3.1.3.) до тех пор, пока у пунктов ТИС и СПП есть возможность перемещаться.

4. В процессе выполнения алгоритма ведётся подсчёт времени успешной работы систем противника и наблюдателя. Если в результате выполнения действий п.3 пункты СПП не могут передвигаться, то фиксируем победу наблюдателя или победу противника в противном случае.

5. Повторяем пп.1 - 4 1000 раз.

Результаты моделирования представлены в таблице 4.5.2.

№ набора конфигураций СПП	Среднее время работы СПП, ч.	Среднее время работы ТИС, ч.	Количество побед противника	Количество побед наблюдателя
6,11,16,20,22,24,27	8.3	16.6	0	1000
3,9,10,12,18,26,34	8.3	16.1	1	999
4,7	8.1	16.2	2	998
5,8	7.8	15.8	3	997
14,15,19,21	8.9	18.6	4	996
13	8.8	15.8	5	995
23,32,33	9.1	19.1	6	994
30	9.6	18.6	8	992
25,28,29,35	9.3	19.0	9	991
17	9.2	19.2	10	990
31	10.0	19.0	21	979
1	9.4	14.7	34	966
2	9.8	14.4	64	936

Таблица 4.5.2 Результаты моделирования для $\gamma = 12$ градусов

Анализ результатов моделирования показывает, что при заданных характеристиках пунктов и экипажей ряд наборов конфигураций СПП позволяет противнику в лучшем случае одерживать победу в 5-6% случаев и в среднем проводить радиомониторинг области размещения наблюдателя около 8-9 часов, но итоговая победа в большинстве случаев остаётся за наблюдателем.

Увеличив угол до $\gamma = 15$ градусов и оставив прочие характеристики без изменений, получим, что на множестве **H** (200 эффективных конфигураций) существует 27 наборов по две конфигурации, позволяющие подавить любую ТИС из множества **G**. Результаты моделирования для данного случая представлены в таблице 4.5.3.

№ набора конфигураций	Среднее время работы СПП,	Среднее время работы ТИС,	Количество побед против-	Количество побед наблю-
-----------------------	---------------------------	---------------------------	--------------------------	-------------------------

СПП	ч.	ч.	ника	дателя
8	15.2	10.8	30	970
6	15.0	10.8	61	939
14	14.9	10.7	121	879
18	16.4	10.6	134	866
7	15.2	10.5	159	841
20	15.2	10.5	164	836
27	14.6	10.3	185	815
13	15.8	10.4	192	808
12	15.4	10.2	231	769
19	16.2	10.3	272	728
25	16.0	10.2	301	699
24	15.2	9.9	348	652
26	14.0	10.0	393	607
2	14.0	9.8	472	528
1	12.2	10.5	502	498
10	12.9	9.7	551	449
16	13.0	9.6	561	439
22	13.4	9.6	567	433
11	12.2	10.0	587	413
4	12.5	9.9	606	394
17	12.3	9.9	613	387
5	12.1	10.0	619	381
23	12.5	10.2	632	368
21	13.1	9.5	664	336
9	12.8	9.4	677	323
3	12.1	9.9	682	318
15	12.8	9.4	699	301

Таблица 4.5.3 Результаты моделирования для $\gamma = 15$ градусов

В данном случае противник может выбрать ряд наборов, использование которых позволяет одерживать победу в 50-70% случаев, при этом даже в случае проигрыша среднее время работы СПП увеличилось с 8-9 до 14-15 часов.

Если наряду с $\gamma = 15$ градусов увеличить дальность действия пунктов СПП до значения $\rho = 1.1$, то попадаем в ситуацию II из п. 3.1.3, где у противника существуют такие эффективные конфигурации, которые способны подавить любую ТИС из множества \mathbf{G} без перемещения пунктов. Одной из таких конфигураций является (9, 37), которая осуществляет подавление, используя 25 угловых комбинаций. С учётом принятого значения $t_e = 0.015$, подавление любой

ТИС произойдёт максимум в течение 22.5 минут. У наблюдателя при этом нет безопасных позиций, куда он мог бы заблаговременно переместить измерительные пункты.

4.6 Кооперативный поиск позиций размещения измерительных пунктов ТИС

Моделирование проводилось при размещении пяти пунктов ТИС, начальное расположение пунктов представлено на рис. 3.2.2.3, $r_c = 0.2$, $\tau = 0.1$. Применение алгоритма A_1 не даёт стабильного решения. В процессе перемещения возникают такие размещения пунктов, на которых функция глобальной полезности (3.2.2.1) имеет локальный минимум и на дальнейших итерациях ни один из пунктов не изменяет своего положения, поскольку любое перемещение уменьшает значение индивидуальной полезности (3.2.2.2). Итак, группа агентов достигает равновесного состояния, но достигнутое равновесие не всегда обеспечивает максимум функции глобальной полезности. Несколько полученных расположений с указанием достигнутого значения глобальной полезности представлены на рис. Рис. 4.6.1 - Рис. 4.6.4. Максимум достигается на размещении, представленном на рис.Рис. 4.6.4.

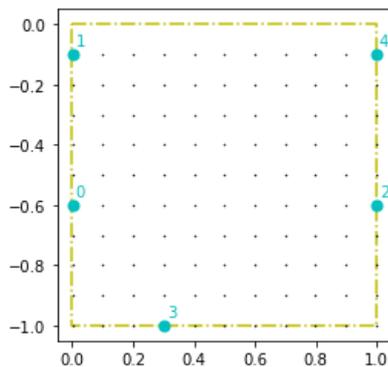


Рис. 4.6.1. Значение функции 14.130

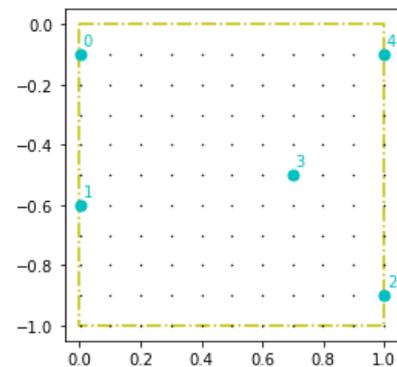


Рис. 4.6.2. Значение функции 13.799

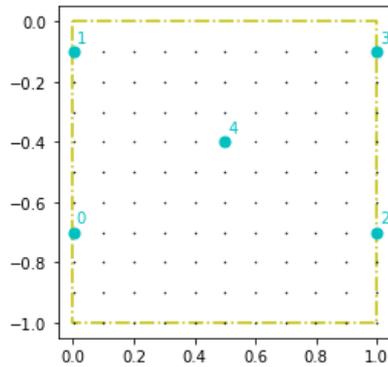


Рис. 4.6.3. Значение функции 15.844

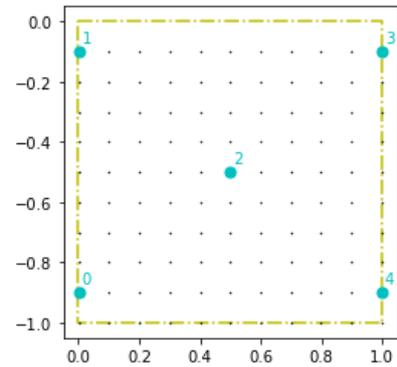
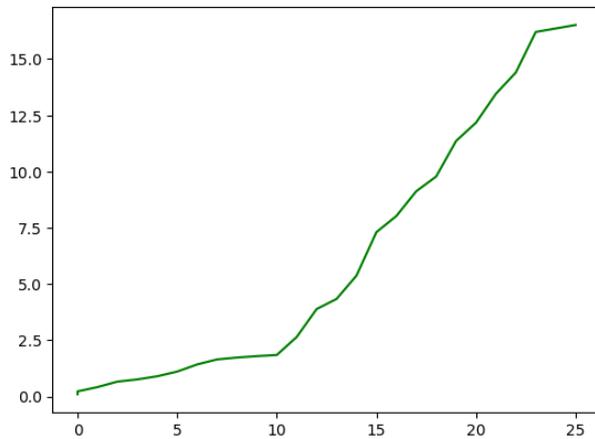
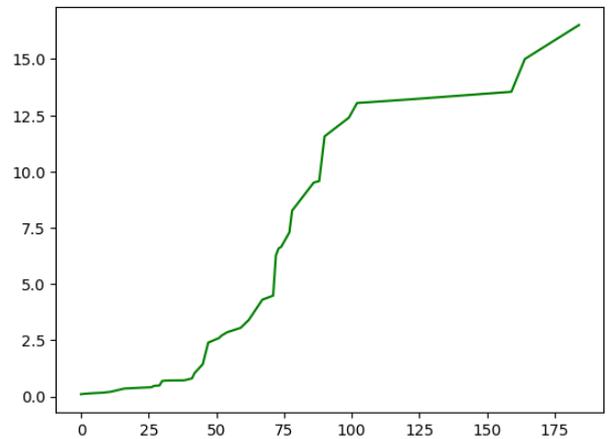


Рис. 4.6.4. Значение функции 16.514

Применение алгоритма A_2 позволяет получить стабильное решение, на котором функция глобальной полезности достигает максимума. На рис.4.6.5 представлены значения глобальной полезности в процессе поиска решения алгоритмом A_2 , на оси абсцисс отмечен номер итерации.

Для сравнения, на рис.4.6.6 представлены значения глобальной полезности при поиске решения с использованием алгоритма A_1 , на полученном решении глобальная полезность достигает максимума.

Рис.4.6.5. Значения глобальной полезности для A_2 Рис.4.6.6. Значения глобальной полезности для A_1

На представленных графиках видно, что при использовании алгоритма A_2 решение было найдено за 25 итераций, при этом алгоритму A_1 понадобилось 184 итерации. Несмотря на то, что алгоритм A_1 не всегда находит решение, обеспечивающее глобальный максимум, и затрачивает большее число

итераций на поиск, скорость его работы значительно выше алгоритма A_2 , и он может быть использован при ограниченных вычислительных ресурсах.

На рис.4.6.7 и 4.6.8 представлены траектории перемещения пунктов ТИС при поиске решения алгоритмами A_2 и A_1 соответственно.

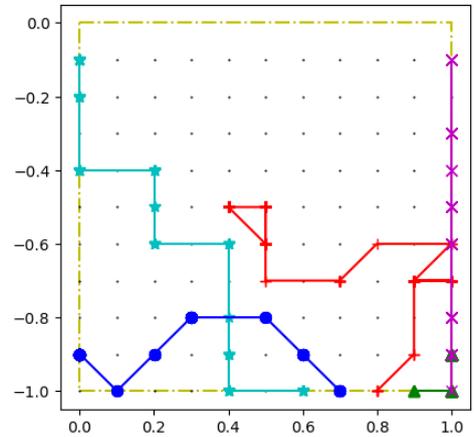
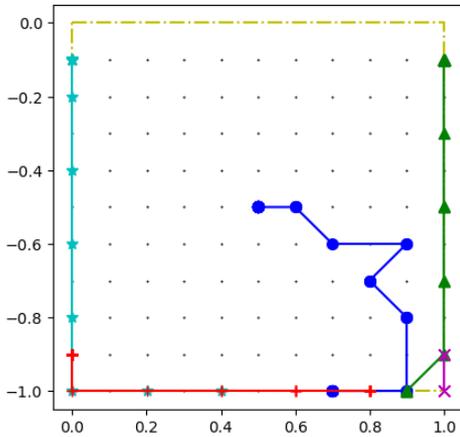


Рис.4.6.7. Траектории движения пунктов ТИС для A_2 Рис.4.6.8. Траектории движения пунктов ТИС для A_1

Рассмотрим небольшую модификацию алгоритма A_1 , Алгоритм A_3 : Выбор агента для перемещения осуществляется случайно. Итоговое действие a_i^* выбирается из доступных действий $\hat{a}_i \in C_{a_i(t-1)}$ путём сравнения вероятностей.

В целях оценки эффективности предложенной модификации будем сравнивать стабильность базового алгоритма и модификации. Под стабильностью будем понимать вероятность того, что в результате применения алгоритма мы получим решение, обеспечивающее глобальный максимум функции глобальной полезности или значение близкое к нему. Для проведения сравнительного анализа стабильности работы алгоритма A_1 и его модификации A_3 проведено 1000 независимых экспериментов по поиску размещения с одинаковым начальным положением пунктов. В процессе проведения экспериментов производился подсчёт итоговых значений функции глобальной полезности и частоты появления соответствующего решения. Результаты работы алгоритма A_1 представлены на рис.4.6.9, а алгоритма A_3 на рис.4.6.10.

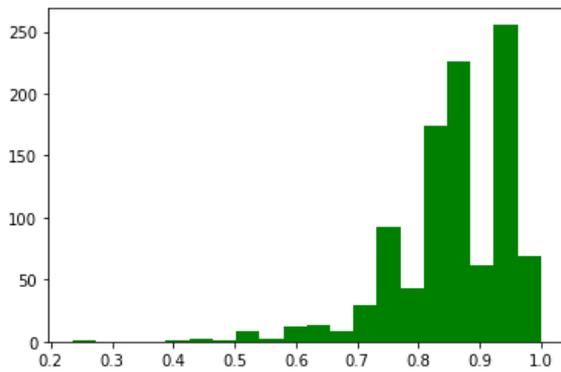


Рис.4.6.9. Гистограмма итогового значения целевой функции (3.2.2.1) для A_1

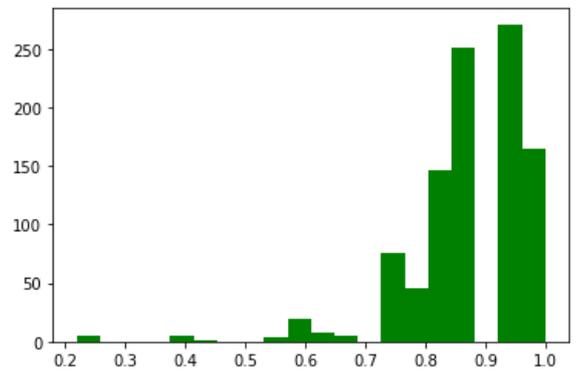


Рис.4.6.10. Гистограмма итогового значения целевой функции (3.2.2.1) для A_3

Здесь по оси абсцисс отображается нормированное значение глобальной полезности, а по оси ординат количество итоговых решений, обеспечивающих данное значение функции. Анализ гистограмм показывает, что применение алгоритма A_3 позволило несколько увеличить количество решений, обеспечивающих максимальное значение глобальной полезности или близких к нему. Отметим, что среднее количество шагов, за которое алгоритмы достигают итогового решения, составляет 192 и 45 для алгоритмов A_1 и A_3 соответственно.

Отметим, что начальное положение пунктов оказывает существенное влияние на итоговое решение, полученное алгоритмами A_1 , A_2 и A_3 . Начальное положение пунктов в верхней части области размещения приводит к решению, соответствующему локальному максимуму. Критерий №2 на позициях, близких к рабочей области (верхняя часть области размещения), принимает значения, близкие к максимальным, а критерий №1 из текущего положения не может компенсировать его влияние. Но и при размещении пунктов в нижней части области размещения на гистограммах итоговых значений функции полезности (3.2.2.1) для алгоритмов A_1 и A_3 присутствуют несколько ярко выраженных пиков. Это вызвано значительным количеством близко расположенных локальных максимумов функции глобальной полезности, что в свою очередь связано с высокой степенью нелинейности используемых критериев. Зависимость результатов работы алгоритмов от начального положения пунктов обусловлена

размером и взаимным расположением рабочей области и области расположения пунктов ТИС. Вариант размещения пунктов ТИС и относительное положение рабочей области, при котором применение алгоритма A_2 не позволяет достичь глобального максимума полезности, приведены на рис. 4.6.11.

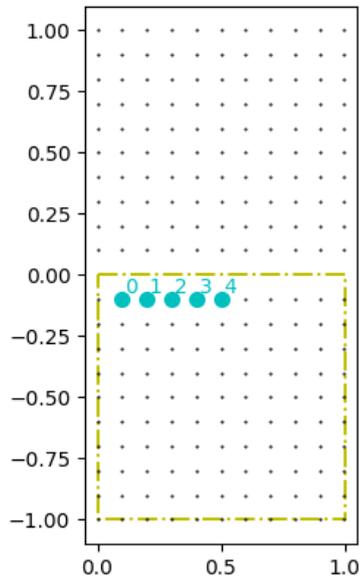


Рис.4.6.11. Несимметричное размещение рабочей области

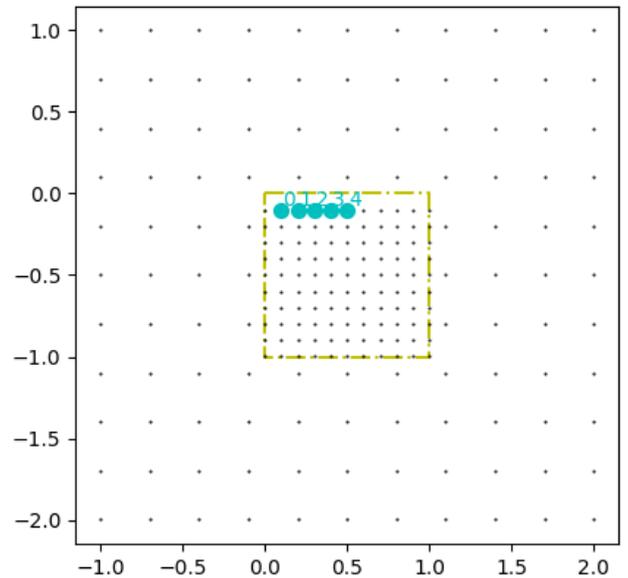


Рис.4.6.12. Симметричное размещение рабочей области

Применение алгоритма A_2 для рабочей области, представленной на рис.4.6.12, не зависит от начального положения пунктов ТИС, при этом итоговое размещение представлено на рис.4.6.13, а движение пунктов на рис.4.6.14.

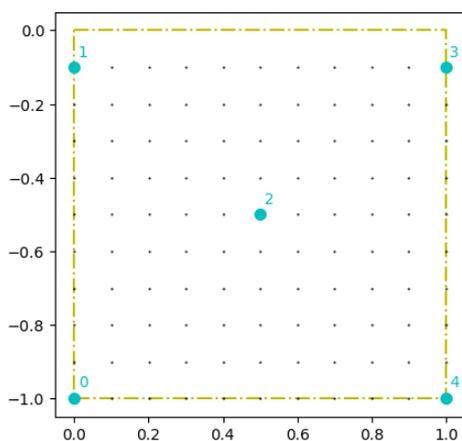


Рис.4.6.13. Итоговое размещение для симметричной рабочей области

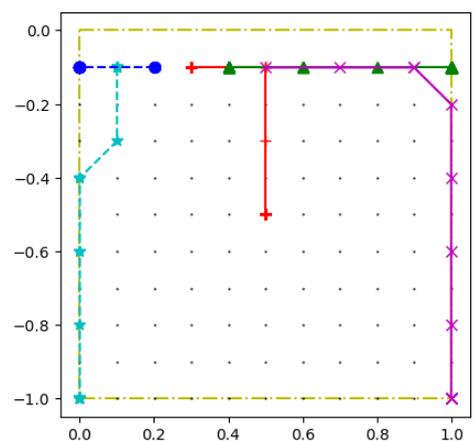


Рис.4.6.14. Движение пунктов в процессе поиска размещения

Отметим, что расположение пунктов в итоговом решении для несимметричной рабочей области (рис.Рис. 4.6.4) близко, а итоговое решение для симметричной рабочей области (рис. 4.6.13) совпадает с вариантом расположения, при котором пункты размещены на максимально возможном расстоянии друг от друга. Учитывая это замечание и высокую нелинейность функции (3.2.2.1) рассмотрим вариант функции глобальной полезности с использованием только первого критерия (максимизация расстояния между пунктами)

$$\Phi(a) = \Phi(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N) = \min_{i, j \in \overline{1, N}} (\|\mu_i - \mu_j\|) \sum_{i, j \in \overline{1, N}} [\|\mu_i - \mu_j\|]. \quad (4.6.1)$$

Применение алгоритма A_2 для случая несимметричного расположения рабочей области (рис.4.6.11) и функции глобальной полезности (4.6.1) обеспечивает решение, на котором функция глобальной полезности достигает глобального максимума (рис.4.6.13) вне зависимости от начального положения пунктов. На рис.4.6.15 отображаются значения глобальной полезности (4.6.1) в процессе поиска решения алгоритмом A_2 , а на рис.4.6.16 траектории движения пунктов ТИС.

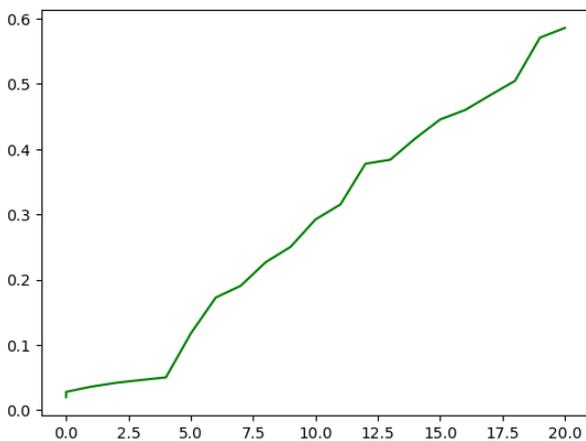


Рис.4.6.15. Значения глобальной полезности (4.6.1) для A_2

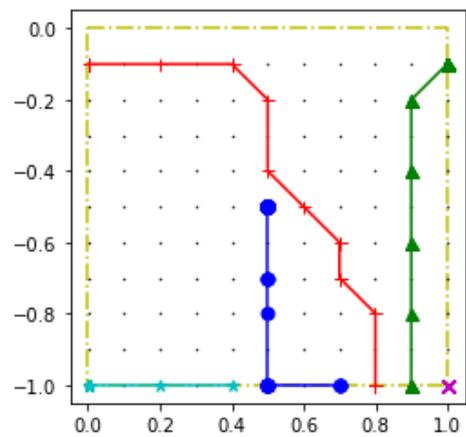


Рис.4.6.16. Траектории движения пунктов ТИС для A_2 , (4.6.1)

Гистограммы, построенные на основе 1000 независимых экспериментов для алгоритмов A_1 и A_3 с использованием функции глобальной полезности (4.6.1) представлены на рис.4.6.17, 4.6.18.

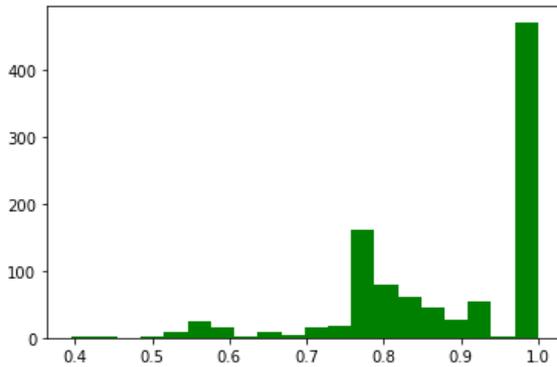


Рис.4.6.17. Гистограмма итогового значения целевой функции (4.6.1) для A_1

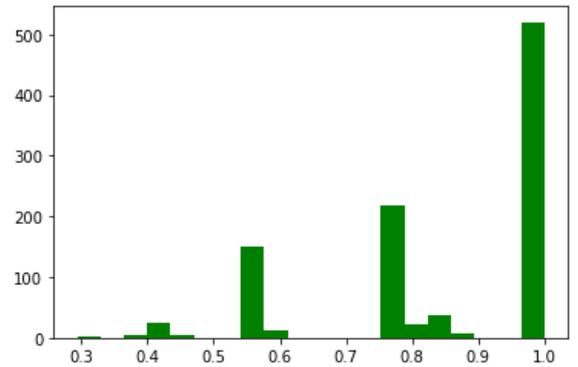


Рис.4.6.18. Гистограмма итогового значения целевой функции (4.6.1) для A_3

Анализ приведенных графиков показывает, что применение алгоритмов A_1 и A_3 с использованием функции глобальной полезности (4.6.1) увеличивает вероятность достижения решения, обеспечивающего глобальный максимум полезности. Для A_1 доля решений, обеспечивающих глобальный максимум (4.6.1), приближается к 50%, а в случае с A_3 превосходит 50%. Также отметим, что применение алгоритма A_3 снижает разброс в окрестности локальных максимумов (окрестности значений 0.4, 0.6 и 0.8).

Сводная информация по результатам работы алгоритмов приведена в таблице 4.6.1, время выполнения приводится в процентах от времени самого медленного варианта [A_2 , (3.2.2.1)].

Алгоритм, функция глобальной полезности	Количество итераций: мин., макс., среднее	Время выполнения
[A_1 , (3.2.2.1)]	-, -, 192	13.6%
[A_2 , (3.2.2.1)]	25, 25, 25	100%
[A_3 , (3.2.2.1)]	22, 93, 45	25.1%
[A_1 , (4.6.1)]	46,348,170	0.5%
[A_2 , (4.6.1)]	20, 20, 20	1.1%
[A_3 , (4.6.1)]	11,95,40	0.35%

Таблица 4.6.1 Вычислительные характеристики алгоритмов

Характеристики, представленные в таблице 4.6.1, показывают, что функция глобальной полезности (4.6.1) позволяет не только избавиться от зависимости задания начального условия для алгоритма A_2 , но и существенно повысить скорость работы алгоритмов.

Проведём тестирование работы алгоритмов поиска размещения пунктов ТИС при наличии препятствий. С учётом траекторий движения пунктов 1,2,3 (синий, красный, зелёный) на рис. 4.6.16 рассмотрим вариант расположения препятствий, представленный на рис.4.6.19.

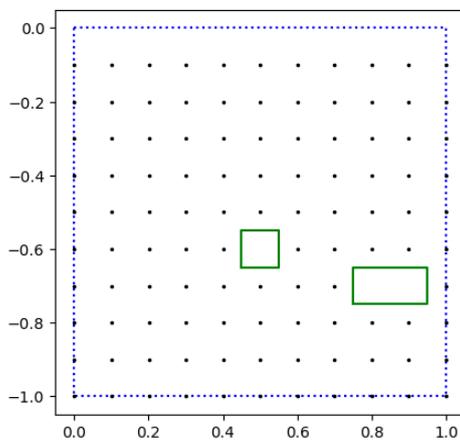


Рис.4.6.19. Препятствие №1

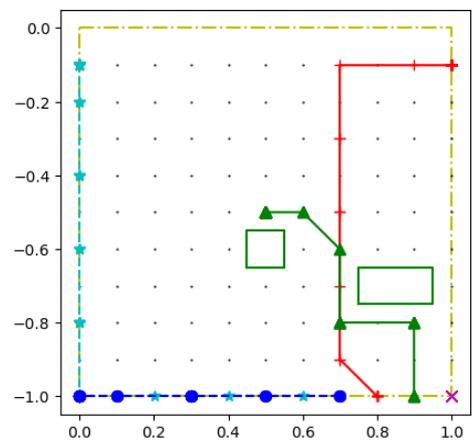


Рис.4.6.20. Траектории движения пунктов с учётом препятствия №1

Перемещение пунктов с учётом указанных препятствий при поиске размещения алгоритмом A_2 представлено на рис.4.6.20. Видно, что произошло изменение маршрутов движения для пунктов 0,1,2,3 по сравнению с рис.4.6.16 с целью обхода препятствий. Рассмотрим ещё один вариант расположения препятствий, представленный на рис. 4.6.21, который учитывает траектории движения пунктов 2,3 на рис.4.6.20.

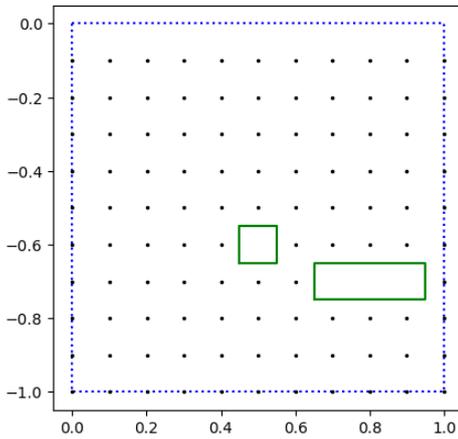


Рис.4.6.21. Препятствие №2

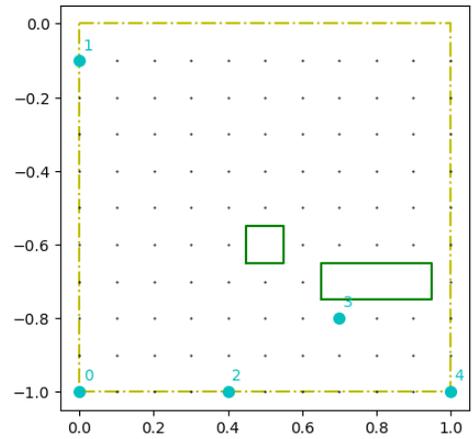


Рис.4.6.22. Результат поиска

размещения с учётом препятствия №2

Итоговое положение пунктов ТИС представлено на рис.4.6.22, а траектории движения на рис. 4.6.23. Очевидно, что глобальный максимум функции полезности достигнут не был. Напомним, что радиус действия агента определяется следующим параметром: $r_c = 0.2$. Увеличение размера препятствия приводит к тому, что агенты при текущем радиусе действия не видят позиций, увеличивающих индивидуальную полезность. Проверим предположение, увеличив радиус действия агентов до значения $r_c = 0.4$, при этом траектории движения пунктов ТИС представлены на рис.4.6.24.

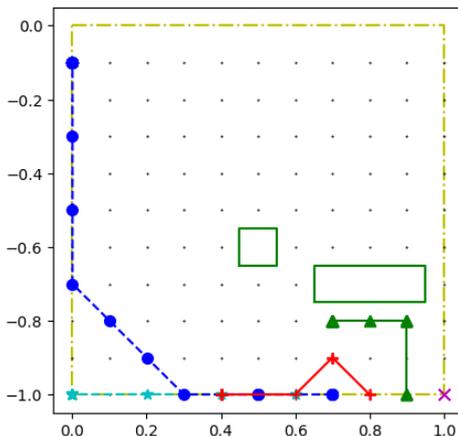
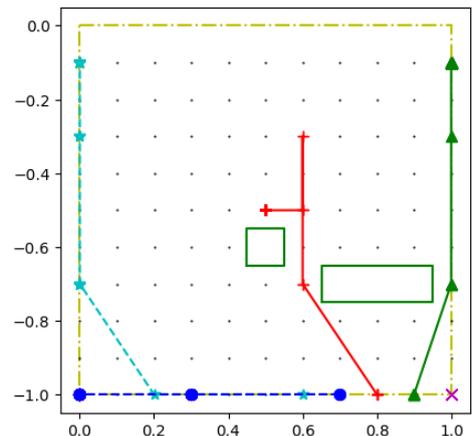


Рис.4.6.23. Траектории движения пунктов с учётом препятствия №2

Рис.4.6.24. Траектории движения пунктов с учётом препятствия №2 при $r_c = 0.4$

Нужно отметить, что в случае с препятствиями выбор начального условия играет существенную роль. На рис.4.6.25 приведены траектории движения

пунктов ТИС при $r_c = 0.2$, при этом в отличие от случая, представленного на рис.4.6.23, начальное положение пунктов соответствует рис.4.6.11.

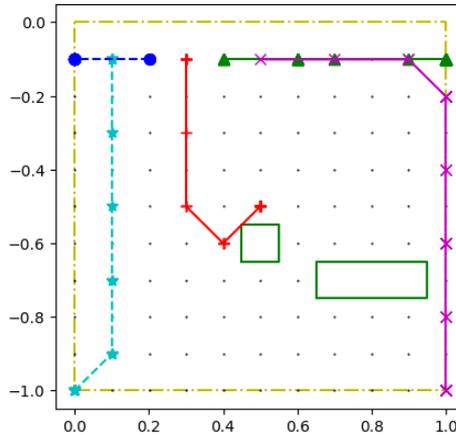


Рис.4.6.25. Траектории движения пунктов с учётом препятствия №2 при другом начальном положении пунктов

Учитывая наличие нескольких локальных максимумов функции глобальной полезности (4.6.1), увеличение радиуса действия агентов для ряда начальных расположений пунктов не приводит к решению, обеспечивающему глобальный максимум полезности. Выбор достаточно большого радиуса действия приводит к тому, что агенты выбирают результирующую позицию за один шаг, при этом если оптимальная позиция для агента закрыта препятствием (агенты перемещаются по прямой), то она не может быть достигнута за один шаг и происходит выбор субоптимальной позиции. Таким образом, использование алгоритмов при наличии препятствий ограничено и обеспечивает оптимальное решение задачи поиска (в смысле указанных критериев) для узкого класса препятствий.

Выводы

1. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о работоспособности развитых моделей, методов и алгоритмов в условиях возможной «деградации» структуры ТИС, а значения полученных погрешностей оценивания параметров движения ИРИ приемлемы для решения поставленных задач.

2. Результаты имитационного эксперимента, а также приведенные практические рекомендации могут быть полезными для построения принципиально новых и совершенствования существующих методов пассивной локации.
3. Проведенное имитационное моделирование задачи противоборства наблюдателя и противника показывает, что предложенный подход позволяет оценить время работы и вероятность победы наблюдателя (противника) или указать на недостаточность средств для осуществления противодействия. Указанная оценка доступна и в случае различных технических характеристиках пунктов и/или уровней подготовки экипажей.
4. Проведенное моделирование кооперативного поиска позиций размещения показывает, что предложенный теоретико-игровой метод 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. Использование функции глобальной полезности (4.6.1) требует существенно меньше ресурсов, чем функция (3.2.2.1), при этом полученные в процессе поиска расположения пунктов близки друг к другу. Следовательно, полученное решение для (4.6.1) может быть использовано в качестве начальной позиции для поиска решения (3.2.2.1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе диссертационного исследования:

1. Проведен анализ отечественного и зарубежного научно-технического задела по оцениванию местоположения и параметров движения ИРИ с использованием современных способов, методов и алгоритмов на базе принципов и теории многопозиционной пассивной радиолокации. Проанализированы методы обнаружения недостоверных каналов с последующей их компенсацией в рамках классических и неклассических методов оценивания.
2. С учётом проведенного анализа разработан кластерно-вариационный метод триангуляционного оценивания, способный эффективно функционировать в условиях наличия недостоверных каналов и «деградации» структуры ТИС. Разработанный метод обеспечивает информационную поддержку принятия решений оператором путём обнаружения возникающих в процессе эксплуатации недостоверных каналов.
3. ТИС рассмотрена как организационно-техническая система специального назначения. Проведен обзор существующих методов и моделей управления в организационных системах. Предложены две теоретико-игровые модели, позволяющие осуществлять кооперативный поиск конфигураций пунктов ТИС и осуществлять противодействие в условиях конфликта с учётом активности агентов (ИП).
4. Проведено имитационное математическое моделирование предложенных методов и моделей, дан анализ полученных результатов.

СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ИРИ – источник радиоизлучения

ИС – измерительная структура

ЭМ – эмпирический метод

КВМ – кластерно-вариационный метод

МНК – метод наименьших квадратов

ММП – метод максимального правдоподобия

РММП – расширенный метод максимального правдоподобия

РЛС – радиолокационная станция

ТИС – триангуляционная измерительная система

РИС – рабочая измерительная структура

АОИ – аномальные ошибки измерений

ИП – измерительный пункт

ОФК – обобщенный фильтр Калмана

ЛПР – лицо принимающее решение

СППР – система поддержки принятия решений

СПП – система постановки помех

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Сайбель А.Г. Основы теории точности радиотехнических методов местоопределения. М.: Оборонгиз, 1958.
- 2 Кукес И.С., Старик М.Е. Основы радиопеленгации. М.: Сов. радио, 1964.
- 3 Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Ширмана. М.: Сов.радио, 1970.
- 4 Кондратьев В.С., Котов А.Ф., Марков Л.Н. Многопозиционные радиотехнические системы. М.: Радио и связь, 1986.
- 5 Черняк В.С. Многопозиционная радиолокация. М.: Радио и связь, 1993.
- 6 Ботов В.А., Журавлев В.Е., Кренин А.Н. Сравнительный анализ методов определения координат источников радиоизлучений // Радиотехника. 2006. № 2. С.28–32.
- 7 Болотин Ю.В. Обобщенный метод наименьших квадратов в задаче оценивания по угловым измерениям // АиТ. 1997. № 2. С. 65-74.
- 8 Кирсанов Э.А., Фомин А.Н. Алгоритмы оценивания координат источника радиоизлучения в угломерных и разностно-дальномерных радиосистемах с минимальным числом подвижных носителей с учетом ошибок определения местоположения приемных пунктов // Радиотехника. 2013. № 7. С. 47–51.
- 9 Широков Л.Е. Комплексное гипотезное сопровождение движущихся объектов // Изв. РАН. ТиСУ. 2000. № 6. С. 144–163.
- 10 Мельников Ю.П., Попов С.В. Радиотехническая разведка. Методы оценки эффективности местоопределения источников излучения. М.: Радиотехника, 2008.
- 11 Уфаев В.А., Афанасьев В.И., Разиньков С.Н. Оценка координат источника радиоизлучения на основе измерений амплитуды электромагнитного поля // Радиотехника. 2003. № 10. С. 71–73.
- 12 Сытенский В.Д. Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 1. С. 69–75.

- 13 Колесса А.Е. Оценивание координат совокупности объектов, наблюдаемых многопозиционной системой пеленгаторов // Радиоэлектроника. 1987. Т. 32. №12. С. 2534–2540.
- 14 Булычев В.Ю., Булычев Ю.Г., Ивакина С.С., Насенков И.Г. Угломерно-энергетический метод нестационарной пассивной локации на базе однопозиционной системы // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 5. С. 122–136.
- 15 Булычев В.Ю., Булычев Ю.Г., Ивакина С.С., Насенков И.Г. Классификация вариантов пассивной локации и их применение // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 6. С. 133–143.
- 16 Булычев Ю.Г., Насенков И.Г., Ивакина С.С. Обоснование возможности комбинированного применения угломерного и угломерно-мощностного методов пассивной локации // Радиотехника. 2015. № 3. С. 128–136.
- 17 Булычев Ю.Г., Насенков И.Г., Ивакина С.С. Метод пассивно-энергетической локации и навигации в стационарной и нестационарной постановках // Радиотехника. 2015. № 6. С. 107–115.
- 18 Булычев Ю.Г., Бурлай И.В. Пеленгация в условиях априорной неопределенности // Изв. РАН. ТиСУ. 2002. № 5. С. 46–51.
- 19 Радзиевский А.Г., Сирота А.А. Информационное обеспечение радиоэлектронных систем в условиях конфликта. М.: ИПРЖР, 2001.
- 20 Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. М.: Воениздат, 2001.
- 21 Булычев Ю.Г., Булычев В.Ю., Ивакина С.С. и др. Обоснование методов оптимального оценивания параметров движения цели в триангуляционной измерительной системе // Изв. РАН. ТиСУ. 2015. № 4. С. 94–110.
- 22 Булычев Ю.Г., Головской В.А. Обработка измерений угломерных систем в условиях априорной неопределенности в регуляризированной постановке // РЭ. 2010. Т. 55. № 1. С. 71–77.
- 23 Булычев Ю.Г., Бурлай И.В., Манин А.П., Крицкий Я.В. Вариационно-селективный метод оценивания координат местоположения объекта в угломерной системе // Изв. РАН. ТиСУ. 2001. № 4. С. 161–167.

- 24 *Lin X., Kirubarajan T., Bar-Shalom Y., Maskell S.* Comparison of EKF, Pseudo-measurement and Particle Filters for a Bearing-only Target Tracking Problem // Proc. SPIE-Int. Soc. Optic. Eng. 2002. V. 4728. P. 240–250.
- 25 *Miller B.M., Stepanyan K.V., Miller A.B., Andreev K.V., Khoroshenkikh S.N.* Optimal Filter Selection for UAV Trajectory Control Problems // Proc. 37-th Conf. on Information Technology and Systems. Conference for Young Scientists and Engineers. IITP RAS. Kaliningrad, Russia, 2013. P. 327–333.
- 26 *Aidala V.J., Nardone S.C.* Biased Estimation Properties of the Pseudolinear Tracking Filter // IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. 1982. V. 18. № 4. P. 432–441.
- 27 *Amelin K.S., Miller A.B.* An Algorithm for Refinement of the Position of a Light UAV on the Basis of Kalman Filtering of Bearing Measurements // J. Communications Technology and Electronics. 2014. V. 59. № 6. P. 622–631.
- 28 *Miller A.B.* Development of the Motion Control on the Basis of Kalman Filtering of Bearing-only Measurements // Automation and Remote Control. 2015. V. 76. № 6. P. 1018–1035.
- 29 *Miller A., Miller B.* Stochastic Control of Light UAV at Landing with the aid of Bearing-only Observations // Proc. SPIE. Eight Intern. Conf. on Machine Vision (ICMV 2015). Barcelona, 2015. V. 9875, 987529. P. 1–10.
- 30 *Karpenko S., Konovalenko I., Miller A., Miller B., Nikolaev D.* UAV Control on the Basis of 3D Landmark Bearing-Only Observations // Sensors. 2015 [Special Issue], V. 15. № 12. P. 29802–29820.
- 31 *Karpenko S., Konovalenko I., Miller A., Miller B., Nikolaev D.* Visual Navigation of the UAVs on the Basis of 3D Natural Landmarks // Proc. SPIE. Eight Intern. Conf. on Machine Vision (ICMV 2015). Barcelona, 2015. V. 9875. P. 1–10.
- 32 *Miller A., Miller B.* UAV Control on the Basis of the Bearing-only Observations // Proc. 2014 Australian Control Conf. Canberra, 2014. P. 31–36.
- 33 *Miller A., Miller B.* Tracking of the UAV Trajectory on the Basis of Bearing-only Observations // Proc. 53-rd IEEE CDC. Los-Angeles, 2014.

- 34 *Жданюк Б.Ф.* Основы статистической обработки траекторных измерений. М.: Сов.радио, 1978.
- 35 *Гильбо Е.Н., Челтанов И.Б.* Обработка сигналов на основе упорядоченного выбора. М.: Сов. радио, 1975.
- 36 *Мудров В.И., Кушко В.П.* Методы обработки измерений: квазиправдоподобные оценки. М.: Радиосвязь, 1983.
- 37 *Лоусон Ч., Хенсон Р.* Численное решение задач метода наименьших квадратов. М.: Наука, 1986.
- 38 *Булычев Ю.Г., Манин А.П.* Математические аспекты определения движения летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 2000.
- 39 *Охрименко А.Г.* Варианты решения задачи отождествления пеленгов в пассивных многопозиционных угломерных системах // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2002. № 6. С. 12–19.
- 40 *Булычев Ю.Г., Васильев В.В., Джуган Р.В. и др.* Информационно-измерительное обеспечение натуральных испытаний сложных технических комплексов / Под ред. А.П. Манина, В.В. Васильева. М.: Машиностроение-Полет, 2016. № 6. С. 107-115.
- 41 *Черняк В.С., Заславский Л.П., Осипов Л.В.* Обзор. Многопозиционные радиолокационные станции и системы // Зарубежная радиоэлектроника. 1987. №1, С.9– 69.
- 42 *Булычев Ю.Г., Головской В.А.* Обработка измерений угломерных систем в условиях априорной неопределенности в регуляризированной постановке // РЭ. 2010. Т. 55. №1. С. 71-77.
- 43 *Булычев Ю.Г., Насенков И.Г., Чепель Е.Н.* Кластерный вариационно-селективный метод пассивной локации для триангуляционных измерительных систем // Изв. РАН. ТиСУ. 2018. № 2. С. 11-27.
- 44 *Гилл Ф., Мюррей У. Райт М.* Практическая оптимизация. М.: Мир, 1985.
- 45 *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986.

- 46 Кирсанов Э.А., Сирота А.А. Обработка информации в пространственно-распределенных системах радиомониторинга: статистический и нейросетевой подходы. – М., Физматлит, 2012. – 344 с.
- 47 Kotu V., Deshpande B. Data Science Process, Elsevier, 2019. –pp. 124-135.
- 48 Бурков В.Н., Коргин Н.А., Новиков Д.А. Введение в теорию управления организационными системами / Под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. – М.: Либроком, 2009. – 264 с.
- 49 Белов М.В., Новиков Д.А. Управление жизненными циклами организационно-технических систем. – М.: ЛЕНАНД, 2020. – 384 с.
- 50 Новиков Д.А., Петраков С.Н. Курс теории активных систем. М.: СИНТЕГ, 1999. – 104 с.
- 51 Новиков Д.А. Теория управления организационными системами. М.: МПСИ, 2005. – 584 с.
- 52 Губко М.В., Константинова Н.В. Многоканальные организационные структуры и внедрение информационных систем управления, Системы управления и информационные технологии, №1(47), 2012. – С. 50-55.
- 53 Губанов Д.А. Новиков Д.А. Чхартишвили А.Г. Социальные сети: модели информационного влияния, управления и противоборства. / Под ред. чл.-корр. РАН Д.А. Новикова. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2010. – 228 с.
- 54 Сирота А.А., Гончаров Н.И. Модели информационных процессов несимметричного конфликтного взаимодействия систем и их применение в задачах исследования безопасности использования облачных технологий. Вестник ВГУ, Системный анализ и информационные технологии, 2018, №3. – С.103-118.
- 55 *Singhal S.C., Stansel L.E.* A Statistical Model for Optical Instrument Location // *Optical Engineering*. – 1980. – Vol. 19, No 3. – DOI: 10.1117/12.7972522.
- 56 *Wax M.* Position location from sensors with position uncertainty // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 1983. – Vol. AES-19, Issue 5. – P. 658–662. – DOI:10.1109/TAES.1983.309367.

- 57 *Aidala V.J., Nardone S.C. Biased Estimation Properties of the Pseudolinear Tracking Filter // IEEE Transactions on Aerospace Electronic Systems. – 1982. – Vol. AES-18, Issue 4. –P. 432–441. – DOI: 10.1109/TAES.1982.309250.*
- 58 *Amelin K.S., Miller A.B. An Algorithm for Refinement of the Position of a Light UAV on the Basis of Kalman Filtering of Bearing Measurements // J. of Communications Technology and Electronics. – 2014. – Vol. 59, No 6. – P. 622–631. – DOI: 10.1134/S1064226914060047.*
- 59 *Miller A.B. Developing algorithms of object motion control on the basis of Kalman filtering of bearing-only measurements // Automation and Remote Control. – 2015. – Vol. 76, No 6. – P. 1018–1035.*
- 60 *Miller A., Miller B. Stochastic control of light UAV at landing with the aid of bearing-only observations. // Proceedings SPIE. Eight International Conference on Machine Vision (ICMV 2015), 2015, V. 9875, 987529, pp. 1-10.*
- 61 *Булычев Ю.Г., Елисеев А.В. Вычислительная схема инвариантно-несмещенного оценивания значений линейных операторов заданного класса // Ж. вычисл. матем. и мат. физ. 2008. Т. 48. №4. С. 580–592.*
- 62 *Булычев Ю.Г., Мельников А.В. Численно-аналитический метод исследования поведения динамической системы по результатам некорректных наблюдений без расширения пространства состояний // Ж. вычисл. матем. и матем. физ. 2019. Т. 59. №6. С. 937–950.*
- 63 *Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений. Л.: Наука, 1967.*
- 64 *Фомин А.Ф., Новоселов О.Н., Плющев А.В. Отбраковка аномальных результатов измерений. М.: Энергоатомиздат, 1985.*
- 65 *Тихонов А.Н., Уфимцев М.В. Статистическая обработка результатов экспериментов. М.: Изд-во Московского унив-та, 1988.*
- 66 *Черноузько Ф.Л. Оценивание фазового состояния динамических систем. Метод эллипсоидов. М.: Наука, 1988.*
- 67 *Хампель Ф., Рончетти Э., Рауссеу П., Штаэль В. Робастность в статистике. М.: Мир, 1989.*

- 68 *Богуславский И.А.* Прикладные задачи фильтрации и управления. М.: Наука, 1983.
- 69 *Кан Ю.С., Кибзун А.И.* Задачи стохастического программирования с вероятностными критериями. М.: Физматлит, 2009.
- 70 Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление / Под ред. *В.В. Малышева.* М.: Изд-во МАИ, 2000.
- 71 *Мандель И. Д.* Кластерный анализ. М.: Финансы и Статистика, 1988.
- 72 *Уиллиамс У. Т., Ланс Д. Н.* Методы иерархической классификации // Статистические методы для ЭВМ / Под ред. *М. Б. Малютова.* М.: Наука, 1986.
- 73 Lance, G. N., Lance G. N., Williams W. T. A general theory of classificatory sorting strategies. 1. Hierarchical systems. *Computer J.* 9:373-80, 1967.” (2004).
- 74 Davies, David L.; Bouldin, Donald W. (1979). “A Cluster Separation Measure”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.* PAMI-1 (2): 224-227.
- 75 T. Calinski and J. Harabasz, 1974. “A dendrite method for cluster analysis”. *Communications in Statistics.*
- 76 Peter J. Rousseeuw (1987). “Silhouettes: a Graphical Aid to the Interpretation and Validation of Cluster Analysis”. *Computational and Applied Mathematics* 20: 53-65.
- 77 *Синицын И.Н.* Фильтры Калмана и Пугачева. М.: Логос, 2007.
- 78 *Karpenko S., Konovalenko I., Miller A., Miller B., Nikolaev D.* UAV Control on the Basis of 3D Landmark Bearing-Only Observations. // *Sensors* 2015 [Special Issue], 15(12), pp. 29802-29820.
- 79 *Karpenko S., Konovalenko I., Miller A., Miller B., Nikolaev D.* Visual navigation of the UAVs on the basis of 3D natural landmarks. // *Proc. SPIE. Eight International Conference on Machine Vision (ICMV 2015),* 2015, V. 9875, 98751I, pp. 1-10.
- 80 Справочник по радиолокации / Под ред. *М.Сколника.* М.: Сов. Радио. 1978.
- 81 Pei Li, Haibin Duan, A potential game approach to multiple UAV cooperative search and surveillance. *Aerospace Science and Technology,* Volume 68, September 2017.
- 82 G. Arslan, J.R. Marden, J.S. Shamma, Autonomous vehicle–target assignment: a game-theoretical formulation, *J. Dyn. Syst. Meas. Control* 129 (2007) 584–596.

- 83 J. R. Marden and J. S. Shamma, "Revisiting log-linear learning: Asynchrony, completeness and payoff-based implementation," 2010 48th Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton), Monticello, IL, USA, 2010, pp. 1171-1172.
- 84 L. Blume. The statistical mechanics of strategic interaction. *Games and Economic Behavior*, 5: 387–424, 1993.
- 85 Ю. Г. Булычев, В. Ю. Булычев, Е. Н. Чепель. Модифицированный кластерно-вариационный метод триангуляционного оценивания в условиях неопределенности // *Журнал радиоэлектроники*. – 2021. – № 4
- 86 D. P. Kingma, J. Ba. Adam: A Method for Stochastic Optimization/ Electronic resource <https://arxiv.org/abs/1412.6980> (Submitted on 22 Dec 2014 (v1), last revised 30 Jan 2017 (this version, v9))
- 87 Ю.Г. Булычев, Е. Н. Чепель Оптимизация кластерно-вариационного метода построения многопозиционной пеленгационной системы для условий априорной неопределенности // *Автоматика и телемеханика*. – 2023. – № 4. – С.96-114.
- 88 Ю. Г. Булычев, Е. Н. Чепель Мультиструктурный метод триангуляционного оценивания параметров движения излучающей цели в условиях априорной неопределенности // *Известия Российской академии наук. Теория и системы управления*. – 2019. – № 6.
- 89 Ю. Г. Булычев, Е. Н. Чепель, А. В. Ячменев Методы решения задачи триангуляции и их сравнительный анализ // *Радиотехника*. – 2019. – Т. 83, № 10(16). – С. 17-21.
- 90 Ю.Г. Булычев, И.Г. Насенков, Е.Н. Чепель, А.В. Ячменёв Теоретические и прикладные аспекты построения амплитудно-гиперболических систем пассивной локации излучающих целей // *Успехи современной радиоэлектроники*. – 2018. – №7. – С.42 – 53.
- 91 Ю.Г. Булычев, Е.Н. Чепель Интеллектуально-аналитический метод триангуляционного оценивания параметров движения излучающей цели при

- наличии недостоверных измерительных каналов // Успехи современной радиоэлектроники. – 2017. – №7. – С.86 – 99.
- 92 Ю.Г. Булычев, Е.Н. Чепель Квазиоптимальный метод решения задачи триангуляции в условиях априорной неопределённости // Автометрия. – 2017. – Т.53. – № 6 – С. 83 – 91.
- 93 Е. Н. Чепель, Ю. Г. Булычев, К. Н. Жучков, А. П. Завьялов Сравнительный анализ кластерно-вариационного и нейросетевого подходов в задаче триангуляционного оценивания при построении системы мониторинга охранных зон газопроводов // Автоматизация и информатизация ТЭК. – 2022. – № 4(585). – С. 6-11.
- 94 Е. Н. Чепель, Ю. Г. Булычев, К. Н. Жучков, А. П. Завьялов Инновационное решение для мониторинга охранных зон газопроводов на основе численной реализации альтернативных методов триангуляции с учетом "овражности" целевых функций // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. – 2021. – № 8(577). – С. 36-53.
- 95 Чепель Е.Н. Метод пассивной локации на основе принципов «размножения» и кластеризации / Е.Н. Чепель, Ю.Г. Булычев, В.Б. Тертышников // 26-я Международная Крымская конференция: [КрыМиКо 2016]: материалы конференции, 4 - 10 сентября 2016 г., Севастополь, Крым, Россия. – Москва [и др.], 2016. – Т.1. – С.122 – 137.
- 96 Чепель Е.Н. Неклассический метод оценивания параметров движения излучающей цели на базе триангуляционной системы в условиях априорной неопределенности / Е.Н. Чепель, Ю.Г. Булычев, И.А. Марченко, И.Г. Насенков, А.В. Ячменев, Д.М. Шукало // 28-я Международная Крымская конференция: [КрыМиКо 2018]: материалы конференции, 9 - 15 сентября 2018 г., Севастополь, Крым, Россия. – Москва [и др.], 2018 – Т.7. – С.1687 – 1696.
- 97 Чепель Е.Н. Анализ альтернативных методов триангуляционного оценивания параметров движения цели / Е.Н. Чепель, Ю.Г. Булычев, В.Ю. Булычев, С.С. Ивакина, И.Г. Насенков, П.И. Николас // XX Международная научно-техническая конференция «Радиолокация. Навигация. Связь» [RLCN-2014]:

- материалы конференции, 15-17 апреля 2014 г., Воронеж, Россия. – Воронеж. – 2014. – С.1184 – 1196.
- 98 Чепель Е.Н. Триангуляционная фильтрация параметров движения цели на базе кластерно-вариационного метода / Е.Н. Чепель, Ю.Г. Булычев, И.Г. Насенков // 10-я Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь»: сборник трудов, 21-23 ноября 2016 г. , Москва. 2016. – С.45 – 49.
- 99 Чепель Е.Н. Применение принципов «размножения» и кластеризации единичных оценок в задаче пассивной локации / Е.Н. Чепель, Ю.Г. Булычев, И.Г. Насенков // 2-я Всероссийская научно-техническая конференция «Информационно-измерительное обеспечение натурных испытаний и эксплуатации сложных технических комплексов»: сборник докладов и сообщений, 29 июня – 1 июля 2016г., Великий Новгород. – Великий Новгород. – 2017. – С.137 – 154.
- 100 Владимиров В.И., Лихачев В.П., Шляхин В.М. Антагонистический конфликт радиоэлектронных систем. Методы и математические модели / Под ред. В.М. Шляхина. – М.: Радиотехника. 2004. – 384 с.
- 101 Макаренко С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки. Монография. – СПб.: Научное издание, 2020. – 337 с.
- 102 Михайлов Р.Л., Ларичев А.В., Смыслова А.Л., Леонов П.Г. Модель распределения ресурсов в информационном конфликте организационно-технических систем. Вестник Череповецкого государственного университета 2016, №6.