

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
«Южно-Уральский государственный университет»
Высшая школа электроники и компьютерных наук
Кафедра «Инфокоммуникационные технологии»

Рецензент

Допустить к защите

Руководитель направления

« ____ » _____ 2020 г.

С.Н. Даровских
« ____ » _____ 2020 г.

**Разработка алгоритма определения местоположения БПЛА
на основе инфраструктуры сотовых сетей**

*Направление 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
магистерская программа «Системы мобильной связи»
ЮУрГУ – М 11.04.02.2020.580.00 ПЗ ВКР*

Научный руководитель

Спицын В.С. _____

“ ____ ” _____ 2020 г.

Магистрант

студент группы КЭ-223

Макаров В.А. _____

“ ____ ” _____ 2020 г.

Нормоконтролер

Спицына В.Д. _____

“ ____ ” _____ 2020 г.

Челябинск

2020

РЕФЕРАТ

Макаров В.А. Разработка алгоритма определения местоположения БПЛА на основе инфраструктуры сотовых сетей – Челябинск: ЮУрГУ, КЭ-223, 2020. – 80 с., 42 ил., 4 табл., библиогр. список – 6 наим., 6 л. плакатов ф. А1.

Перечень ключевых слов: ДАЛЬНОМЕРНЫЙ МЕТОД, РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫЙ МЕТОД, АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ, КОМБИНАТОРНЫЙ АЛГОРИТМ, ПРЕДЛАГАЕМЫЙ АЛГОРИТМ, МОДЕЛЬ, MATLAB.

Объект исследования – алгоритмы ОМП, реализуемые в инфраструктуре сотовых сетей связи.

Цель работы – разработка алгоритма определения местоположения БПЛА на основе инфраструктуры сотовых сетей.

Метод проведения работы – моделирование в программном комплексе математического моделирования MATLAB.

Результаты работы – разработан алгоритм ОМП, обладающий более высокой точностью.

Для внедрения разработанного алгоритма в месте расчета необходимо получать дополнительные данные о антенне (секторе), принявшей сигнал от МС.

Область применения алгоритма – инфраструктура сотовой сети связи.

Реализация алгоритма не требует никаких дополнительных мер по переоснащению оборудования БС.

					ЮУрГУ-М.11.04.02.2020.580.00 ПЗ ВКР			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Макаров В.А.			Разработка алгоритма определения местоположения БПЛА на основе инфраструктуры сотовых сетей	Лит.	Лист	Листов
Проверил		Спицын В.С.				М	3	80
Н. Контр.		Спицына В.Л.				ЮУрГУ Кафедра ИКТ		
Утв.		Даровских С.Н.						

СОДЕРЖАНИЕ

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	10
ВВЕДЕНИЕ	11
1 Обзор существующих алгоритмов определения местоположения абонентов в сотовых сетях	14
1.1 Метод принадлежности к соте	14
1.2 Угломерно-дальномерный метод.....	14
1.3 Угломерный метод	15
1.4 Дальномерный метод.....	17
1.5 Разностно-дальномерный метод	19
1.6 Вывод по разделу.....	20
2 Способы измерений расстояний.....	21
2.1 Метод измерений расстояния по «запросно-ответной» системе.....	21
2.2 Метод измерений расстояния по энергетическим характеристикам.....	21
2.3 Метод измерений расстояния по разности набега фаз.....	22
2.4 Вывод по разделу.....	22
3 Современное оборудование БС.....	23
3.1 Антенны базовых станций	24
3.2 Приемно-передатчики базовых станций	25
4 Описание математических алгоритмов в библиотеке функций.....	26
4.1 Алгоритм расчета дистанции по «запросно-ответной» системе	26
4.2 Алгоритм расчета дистанции по энергетическим характеристикам	27
4.3 Алгоритм расчета углов между точками в пространстве	29
4.4 Алгоритм определения сектора	29
4.5 Алгоритм обработки данных	30
4.6 Алгоритм ОМП дальномерным методом	31
4.7 Алгоритм ОМП разностно-дальномерным методов	33

4.8	Алгоритм ОМП комбинаторным методом	34
4.9	Алгоритм ОМП предлагаемым дальномерным методом.....	35
4.10	Алгоритм ОМП предлагаемым разностно-дальномерным методом.....	36
4.11	Вывод по разделу.....	36
5	Описание программного обеспечения модели	37
5.1	Алгоритм расчета дистанции по «запросно-ответной» системе	37
5.2	Алгоритм расчета дистанции по энергетическим характеристикам	38
5.3	Алгоритм расчета углов между точками в пространстве	40
5.4	Алгоритм определения сектора	42
5.5	Алгоритм обработки данных	43
5.6	Алгоритм ОМП дальномерным методом	44
5.7	Алгоритм ОМП разностно-дальномерным методом	45
5.8	Алгоритм ОМП комбинаторным методом	47
5.9	Алгоритмы ОМП предлагаемыми методами.....	50
5.10	Выводы по разделу.....	53
6	Моделирование составляющих частей	54
6.1	Сравнение результатом ОМП МС стандартных и комбинаторных методов	54
6.2	Сравнение результатов ОМП МС без отсеивания и с отсеиванием грубых погрешностей.....	56
6.3	Сравнение результатов ОМП МС стандартного и предлагаемого метода при различных МП МС	58
7	Комплексное сравнение алгоритмов ОМП.....	62
7.1	Описание полученных результатов	64
7.2	Описание полученных результатов по семейству дальномерных методов	70
7.3	Описание полученных результатов по семейству разностно-дальномерных методов.....	71
7.4	Выводы по разделу.....	72
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	73

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	75
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	76
Приложение А. Блок-схема разработанной модели.....	76
Приложение Б. Сравнение результатов определений МП МС стандартных и комбинаторных методов.....	76
Приложение В. Сравнение результатов определений МП МС без отсеивания и с отсеиванием грубых погрешностей.....	76
Приложение Г. Сравнение результатов определений МП МС стандартного и предлагаемого метода при различных МП МС.....	76
Приложение Д. Комплексное сравнение результатов определений МП МС при 4 БС	76
Приложение Е. Комплексное сравнение результатов определений МП МС при 5 БС	76
Приложение Ж. Комплексное сравнение результатов определений МП МС при 6 БС	80

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

БПЛА – беспилотный летательный аппарат;

БС – базовая станция;

МНК – метод наименьших квадратов;

МП – местоположение;

МС – мобильная станция;

ОМП – определение местоположения;

СКО – среднеквадратическое отклонение;

ВВЕДЕНИЕ

Выбранная тема выпускной работы является актуальной и востребованной, поскольку в современном мире быстрыми темпами растет количество летательных аппаратов и людям по многим причинам необходимо с большой точностью знать их МП в пространстве.

Объект исследования – алгоритмы ОМП, реализуемые в инфраструктуре сотовых сетей связи.

Предмет исследования – использование возможностей инфраструктуры сотовых сетей связи в алгоритмах ОМП.

Цель исследования – разработка алгоритма ОМП БПЛА, использующего возможности инфраструктуры сотовых сетей и обладающего более высокой точностью по сравнению со стандартными алгоритмами.

Задачи исследования – составление обзора стандартных методов ОМП, разработка и теоретическое исследование алгоритма ОМП, разработка модели системы ОМП, исследования точности алгоритма ОМП на спроектированной модели.

Гипотеза – использование секторных антенн, установленных на БС, в качестве дополнительной логики может помочь в разработке алгоритма ОМП, обладающего более высокой точностью по сравнению со стандартными алгоритмами.

Рассмотренная литература [1-3], использовалась в качестве формирования основ работы алгоритмов ОМП, которые описаны в настоящей работе. Источники [4-6] использовались при формировании математического аппарата моделируемых алгоритмов.

Теоретическая значимость настоящей работы заключается в наглядном сравнении результатов реализованных в рамках модели алгоритмов ОМП и выявлении «сильных» и «слабых» сторон каждого алгоритма.

Практическая значимость определяется повышенной точностью ОМПМС в пространстве в случае использования разработанного алгоритма.

Структура работы представляет собой:

- а) введение в тему;
- б) обзор существующих алгоритмов ОМП абонентов в сотовых сетях связи;
- в) обзор способов измерений расстояний;

- д) обзор современного оборудования базовых станций;
- е) описание математических алгоритмов в созданной библиотеке функций;
- ж) описание программного обеспечения модели;
- й) моделирование составляющих частей;
- к) комплексное сравнение алгоритмов определения местоположения;
- л) заключение.

БПЛА – беспилотный летательный аппарат (дрон) представляет собой воздушное судно без пилота, которое выполняет полет без командира воздушного судна на борту и управляется полностью дистанционно, либо запрограммированно и полностью (либо частично) автономно.

В качестве примера БПЛА рассмотрим гражданский мультикоптер – дрон, у которого более одного винта. Одна из разнообразного ряда моделей показана на рисунке 1.



Рисунок 1 – Квадрокоптер

Дроны подобного типа относятся к макро- и мини- БПЛА ближнего радиуса действия, обладая при этом взлётной массой до 5 кг, дальностью действия до 25-40 км, а максимальная высота полета может достигать 5 км.

Популярность и сфера применения гражданских дронов растет с каждым днем. Компактные и маневренные аппараты применяются различными службами для:

- а) транспортировки различных предметов, включая медикаменты и предметы первой необходимости;
- б) оказания помощи поисково-спасательным командам;
- в) охраны национальных границ;
- д) борьбы с преступностью – обеспечение мониторинга в зонах с высоким криминогенным риском;
- е) инспекции различных инфраструктур.

Поскольку мультикоптер является важным инструментом, который активно используется в различных сферах жизнедеятельности людей, появляется необходимость точно отслеживать его МП.

В ходе выполнения работы ставится задача разработки алгоритма ОМП, обладающего более высокой точностью по сравнению со стандартными алгоритмами, на основе возможностей инфраструктуры сотовых сетей.

Инфраструктура сотовой сети представляет собой радиотелефонную сеть общего пользования с известной зоной обслуживания. Под зоной обслуживания будем понимать часть поверхности Земли, на которой обеспечивается радиосвязь с заданным качеством. Ключевая особенность сотовой сети заключается в том, что общая зона покрытия делится на ячейки (соты), определяющиеся зонами покрытия отдельных многоканальных базовых станций, которые находятся в центре соты и устанавливают связь с абонентом, находящимся в зоне ее действия. Соты частично перекрываются и вместе образуют единую сеть.

Анализ и обработка информационных данных, передаваемых по радиоканалу между базовыми станциями и абонентом сотовой сети, позволяет определить текущее МП БПЛА в пространстве. Точность определения местоположения в большей степени зависит от точности измерения дистанции между БС и БПЛА.

Для определения МП БПЛА в пространстве он должен быть оснащен GSMмодулем, как у мобильных телефонов.

Поскольку БПЛА можно рассмотреть в качестве мобильного телефона, находящегося на определенной высоте, то его следует называть общепринятым в радиосообществе понятием – мобильной станцией (далее – МС).

1 Обзор существующих алгоритмов определения местоположения абонентов в сотовых сетях

В общем случае для определения положения радиопередающего устройства могут быть использованы три основных параметра радиосигналов:

- а) энергетические характеристики пришедшего сигнала;
- б) направление прихода сигнала;
- в) время задержки сигнала при распространении.

Основополагающие методы решения задачи определения местоположения мобильной станции:

- а) принадлежности к соте;
- б) угломерно-дальномерный;
- в) угломерный;
- д) дальномерный;
- е) разностно-дальномерный.

В настоящей главе будут рассмотрены перечисленные методы ОМП МС и сделаны выводы относительно их применения в рамках инфраструктуры сотовых сетей.

1.1 Метод принадлежности к соте

В самом простом случае, решение задачи ОППМС с точностью до соты, может быть решено применением данного метода, точность которого позволяет определить, к какой БС ближе всего находится МС.

Так как зоны приема БС на местности известны, то существует возможность определить, какие из них могут принять сигнал от МС. На основе полученных данных определяется территория, в пределах которой находится МС: в лучшем случае до 150 метров (пикосоты), в худшем – до 30 километров в пригородах и за городской чертой.

Этой точности вполне может быть достаточно для определенных типов приложений, но решение задач навигации требует большей точности.

1.2 Угломерно-дальномерный метод

В угломерно-дальномерном методе измеряемыми параметрами являются дальность r , азимут α и угол места β , полученные с одной-единственной БС (рисунок 2).

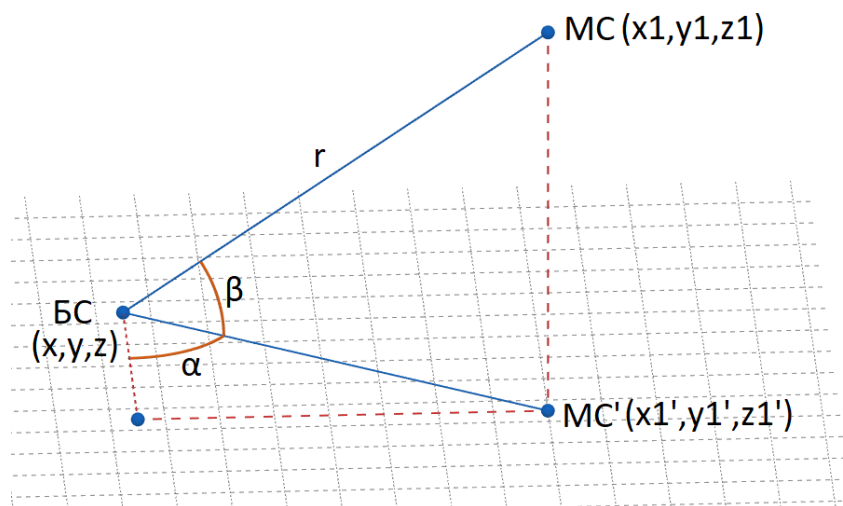


Рисунок 2 – Угломерно-дальномерный метод

Достоинством угломерно-дальномерного метода является простота и быстродействие расчетов для определения МП искомой МС.

Количество БС равно одной.

С точки зрения инфраструктуры сотовой связи антенны, установленные на БС не способны определять азимут и угол места. Следовательно, данный метод не подходит для решения задач ОМП МС.

1.3 Угломерный метод

В угломерном методе измеряемыми параметрами являются углы направления прихода сигнала с МС на две (или более) БС.

Для определения направления прихода сигналов от МС используются фазированные антенные решетки, устанавливаемые на БС и подключаемые к существующему оборудованию системы связи.

При решении задачи на плоскости, изображенной на рисунке 3, решается задача нахождения точки пересечения линий, исходящих из известных координат БС под азимутальными углами α . Найденная точка является координатами искомой МС.

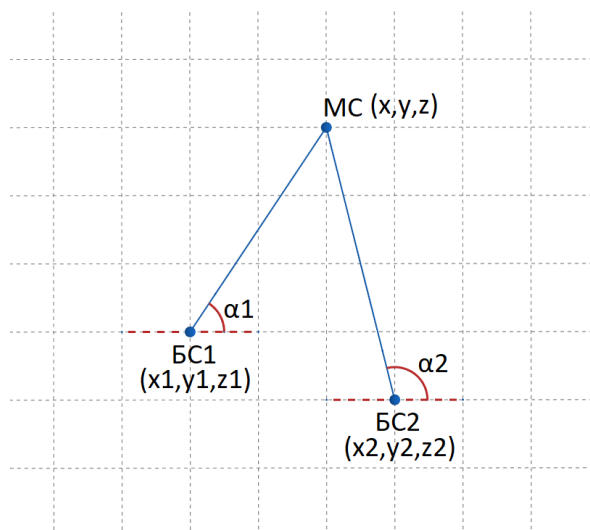


Рисунок 3 – Угломерный метод на плоскости

При решении задачи в пространстве, изображенной на рисунке 4, решается задача нахождения точки пересечения линий, исходящих из известных координат БС под азимутальными углами α и углами места β .

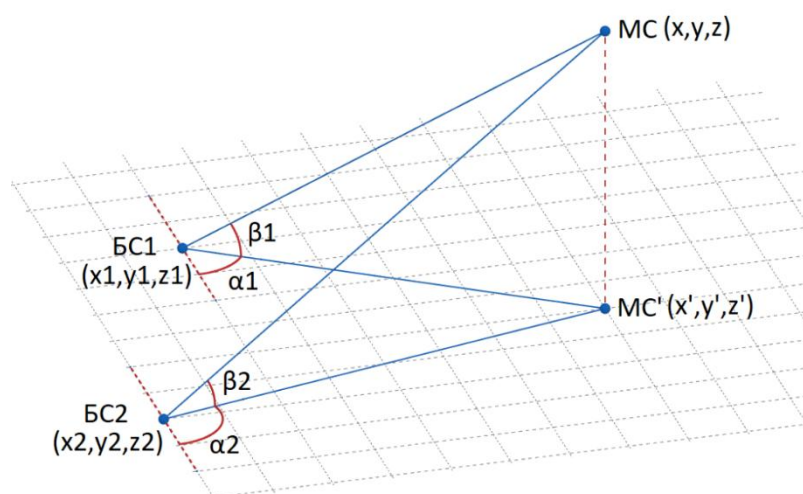


Рисунок 4 – Угломерный метод в пространстве

Сложностью реализации угломерного метода является измерение углов с весьма малой погрешностью, поскольку на большом расстоянии даже незначительная ошибка в измерении угла может привести к большому отклонению рассчитываемой координаты МС от реального МП.

Достоинством угломерного метода является независимость работы каждой БС с точки зрения синхронизации по времени.

Минимальное количество БС равно двум.

С точки зрения инфраструктуры сотовой связи угломерный метод, также, как и угломерно-дальномерный, требует от антенн БС способность определять азимут и угол места, что является невозможным на данный момент. Следовательно, угломерный метод не подходит для решения задач ОМП МС.

1.4 Дальномерный метод

В дальномерном методе измеряется расстояние от трех (или более) БС до МС – r_1, r_2, r_3 , поскольку меньшее количество БС не сможет определить координаты МС однозначно.

При решении задачи на плоскости, изображенной на рисунке 5, решается задача нахождения точки пересечения окружностей с центрами в известных координатах БС и радиусами, равными измеренному ими расстоянию до МС. Найденная точка является координатами искомой МС.

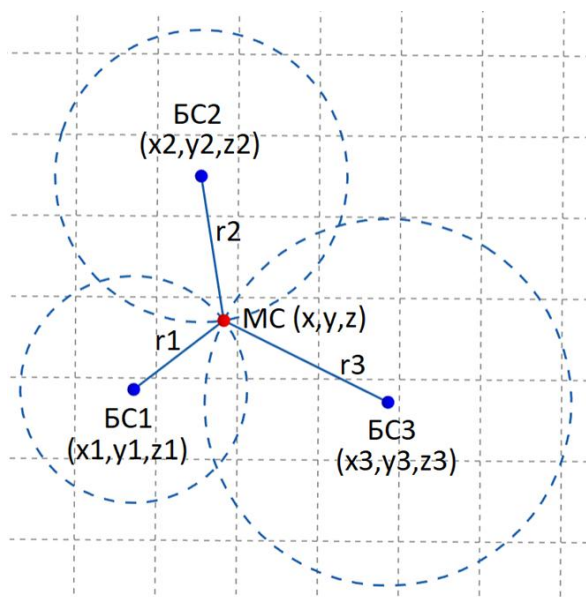


Рисунок 5 – Дальномерный метод на плоскости

При решении задачи в пространстве, изображенной на рисунке 6, решается задача нахождения точки пересечения сфер с центрами в известных координатах БС и радиусами, равными измеренному ими расстоянию до МС.

Пересечение двух сфер есть окружность, которая показана пунктиром. Третья сфера при пересечении с этой окружностью дает две точки в пространстве – одна из которых находится под плоскостью МП БС, а вторая является координатой искомой МС.

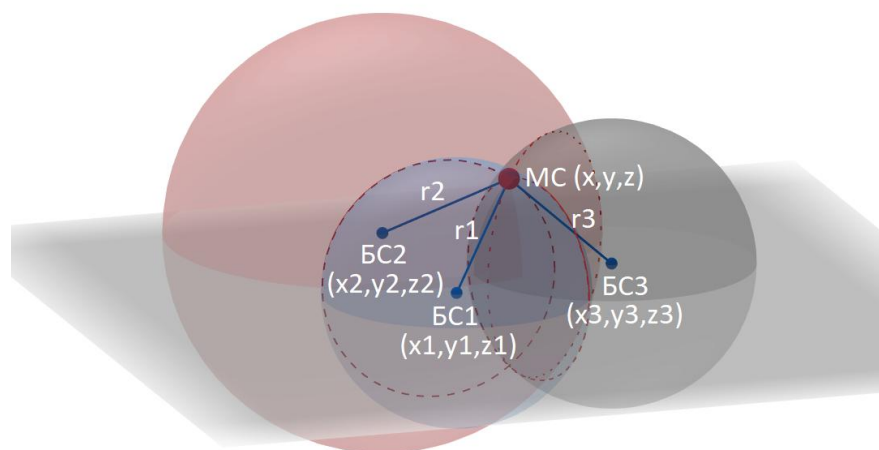


Рисунок 6 – Дальномерный метод в пространстве

Сложностью реализации дальномерного метода является необходимость синхронизации всех БС по времени. Это обусловлено важностью одновременного измерения расстояния всеми БС, поскольку незначительные отклонения одной или нескольких БС от запланированного времени могут привести к большому отклонению рассчитываемой координаты МС от реального МП.

Достоинством дальномерного метода является то, что геометрические фигуры метода – окружность или сфера, являются замкнутыми. Это гарантирует, что решение системы уравнений будет всегда находится в разумных пределах отклонения от реального МП МС.

Минимальное количество БС равно трем.

С точки зрения инфраструктуры сотовой связи дальномерный метод, при возможности синхронизации БС по времени и наличию БС в количестве не меньше трех, является точным и подходящим решением определения МП, поскольку не требует от БС определений азимута или угла места, как в угломерных методах.

1.5 Разностно-дальномерный метод

В разностно-дальномерном методе измеряются расстояния от четырех (или более) БС до МС - r_1, r_2, r_3, r_4 , поскольку меньшее количество БС не сможет определить координаты МС однозначно.

Одна из БС определяется как узловая, далее между всеми остальными БС и узловой по разности измеренных ими расстояний до МС образуются гиперболы, где БС находятся в их фокусах, а координата искомой МС на поверхности гиперболы.

При решении задачи на плоскости, изображенной на рисунке 7, решается задача нахождения точки пересечения ветвей гипербол, образованных между БС1, как узловой, и всеми остальными.

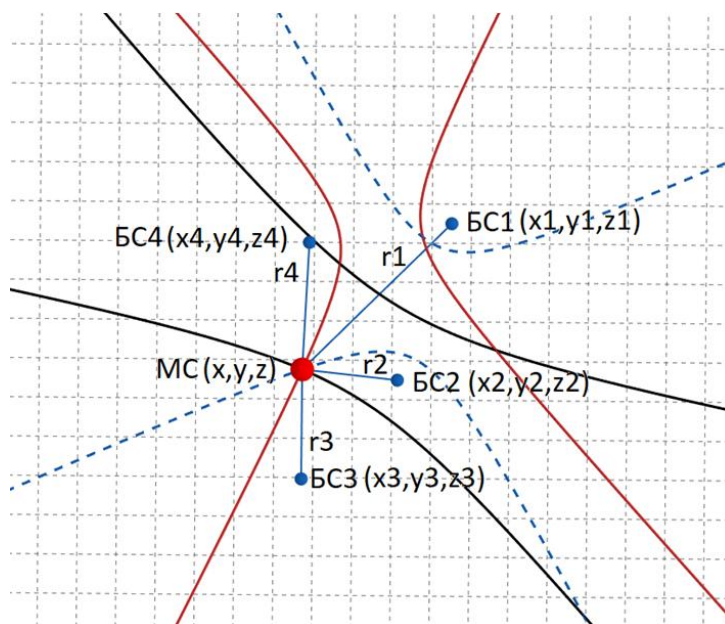


Рисунок 7 – Разностно-дальномерный метод на плоскости

При решении задачи в пространстве, решается задача нахождения точки пересечения двуполостных гиперболоидов вращения.

Недостатком разностно-дальномерного метода является то, что геометрические фигуры метода – гипербола и двуполостный гиперболоид не являются замкнутыми, в отличие от фигур дальномерного метода. Поскольку на большом расстоянии разностно-дальномерный метод схож с принципом действия угломерного метода, а именно – ветви гипербол будут пересекаться под малыми углами и представлять собой практически прямые линии, то решение

системы уравнений даже при незначительных ошибках в измерении расстояний от БС до МС могут привести к большому отклонению рассчитываемой координаты МС от реального МП.

Достоинством разностно-дальномерного метода является необязательность синхронизации БС по времени в связи с тем, что рассчитываемыми параметрами являются не измеренное расстояние, а разность измеренных расстояний между узловой и остальными БС.

Минимальное количество БС равно четырем.

С точки зрения инфраструктуры сотовой связи разностно-дальномерный метод, при невозможности синхронизации БС по времени и наличию БС в количестве не меньше четырех является подходящим решением определения МП, которое, как и дальномерный метод не требует от БС определения азимута и угла места, как в угломерных методах.

1.6 Вывод по разделу

Оптимальными для решения задач определения МП МС являются дальномерный и разностно-дальномерный методы, поскольку они не требуют от БС возможностей определения азимута и угла места, а значит могут быть рассчитаны на стандартном оборудовании БС.

2 Способы измерений расстояний

В этой главе будут рассмотрены известные способы измерений расстояний между объектами сотовой сети связи.

2.1 Метод измерений расстояния по «запросно-ответной» системе

Метод основан на измерении времени, которое сигнал тратит на распространение от БС до МС или наоборот.

Модель имеет название «Запросно-ответная» система, и может быть реализована следующим образом:

- а) БС отправляет запрос МС в известное время;
- б) имеются данные о времени, которое тратит МС для обработки и ответа на запрос БС. Для стабильной работы используется интервал обработки, который заранее больше, чем время, которое тратит МС. После обработки информации и небольшого предусмотренного простоя МС отправляет ответ на запрос БС;
- в) БС получает ответ на запрос в известное время;
- д) по известным временным отрезкам вычисляется расстояние между БС и МС.

2.2 Метод измерений расстояния по энергетическим характеристикам

Метод основан на измерении энергетических характеристик пришедшего сигнала в МС, который передает БС или, наоборот.

Модель может быть реализована следующим образом:

- а) МС отправляет сигнал БС. Имеются данные о мощности сигнала на выходе антенны МС и ее коэффициенте усиления;
- б) БС принимает ослабленный за время распространения сигнал. Имеются данные коэффициента усиления антенны БС;
- в) по известным энергетическим характеристикам вычисляется расстояние между БС и МС.

2.3 Метод измерений расстояния по разности набега фаз

Метод основан на измерении разности набега фаз за время распространения сигнала на двух различных частотах. Такая система используется зарубежной системой с приемопередатчиками 2,4 ГГц, имеющими измерительные блоки фаз.

Данное оборудование не распространено на БС Российской Федерации и работает на частотах, отличных от используемых в РФ. Следовательно, метод измерения расстояния по фазе не подходит для решения задач определения расстояний между БС и МС.

2.4 Вывод по разделу

Оптимальными для измерения расстояния между БС и МС являются методы измерения расстояния по времени распространения сигнала и по энергетическим характеристикам прошедшего сигнала. Отличительной особенностью данных методов является то, что они не требуют дополнительного оборудования на БС и МС.

3 Современное оборудование БС

Базовые станции являются важным звеном системы сотовой связи GSM, которая состоит из трёх основных подсистем:

- а) подсистема базовых станций (BSS — Base Station Subsystem);
- б) подсистема коммутации (NSS — Network Switching Subsystem);
- в) центр технического обслуживания (OMC — Operation and Maintenance Centre).

В рамках разработки алгоритма ОМП МС наибольший интерес представляет подсистема базовых станций.

Рассмотрим некоторые из компонентов, входящие в состав подсистемы базовых станций:

- а) базовые станции (BTS — Base Transceiver Station);
- б) контроллеры базовых станций (BSC — Base Station Controller).

БС обеспечивает приём и передачу сигнала между МС и контроллером БС, является автономной и строится по модульному принципу.

Направленные антенны базовых станций могут располагаться на вышках, крышах зданий и т.д. Контроллер БС контролирует соединения между БС и подсистемой коммутации. В его полномочия также входит:

- а) управление очередностью соединений;
- б) управление скоростью передачи данных;
- в) распределение радиоканалов;
- д) сбор статистики;
- е) контроль различных радиоизмерений;
- ж) назначение и управление процедурой Handover.

Сама БС станция — это комплекс, состоящий из антенны (антенн), приемо-передатчика и блока питания. Антенны принимают и передают информационный сигнал, приемо-передатчик обрабатывает и усиливает сигнал, а блок питания снабжает базу электроэнергией.

Отдельного рассмотрения требует система антенн и приемо-передатчик базовой станции.

3.1 Антенны базовых станций

Большое количество БС, установленных на территории Челябинской области оснащены антеннами серии MB4B/MF/MF-65-16/18/18DE-IN-43 или аналогами.

Антенны указанной модели являются секторными, с горизонтальной диаграммой направленности в $(65 \pm 3,5)$ градусов. Для охвата всего кругового сектора вокруг БС устанавливается шесть антенн.

Антенна работает на диапазонах GSM-900 и GSM-1800, внешний вид антенны изображен на рисунке 8.



Рисунок 8–Внешний вид антенны серии MB4B/MF/MF-65-16/18/18DE-IN-43

Использование секторных антенн позволяет применить дополнительную логику к решениям задач ОМП МС, а именно - получить информацию о секторе, из которого был получен сигнал от МС. Эти данные позволят отбросить результаты ОМП МС, имеющие большие ошибки или неоднозначные решения.

3.2 Приемно-передатчики базовых станций

На территории Челябинской области популярной моделью приемно-передатчика является ErrisonRRUSb3



Рисунок 9 – Внешний вид приемно-передатчика ErrisonRRUSb3

Приемно-передатчик является технически сложным устройством, состоящим из целого ряда отдельных подсистем. Работу систем и синхронизацию с контроллером БС обеспечивают внутренние часы. Для точной временной синхронизации БС по времени обычно используют спутниковую систему GPS.

Временная синхронизация играет важную роль в определении МП МС, поскольку даже незначительная разница может ввести значительную ошибку при определении времени запаздывания сигнала. Синхронизация также необходима для реализации дальномерного метода, как уже говорилось ранее.

Таким образом, в рамках моделирования мы будем руководствоваться двумя параметрами системы:

- а) количеством направленных антенн на БС;
- б) величиной погрешности определения времени запаздывания сигнала на участке пути от БС до МС и наоборот.

4 Описание математических алгоритмов в библиотеке функций

В этой главе будут рассмотрены основные математические алгоритмы, которые были реализованы при создании библиотеки функций модели.

4.1 Алгоритм расчета дистанции по «запросно-ответной» системе

Назначение алгоритма заключается в расчете расстояние между двумя точками с учётом погрешностей в запросно-ответной системе. Модель «запросно-ответной» системы представлена на рисунке 10.

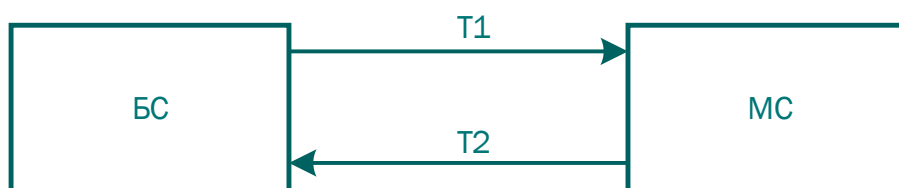


Рисунок 10– Модель запросно-ответной системы

На рисунке 10

$T1$ – время принятия сигнала МС с учётом возможных погрешностей, $T2$ – время принятия сигнала БС с учётом возможные погрешностей.

$T1$ рассчитывается по формуле (1):

$$T1 = T1_{true} \left(1 + \frac{\Delta_{МС}}{100} \right), \quad (1)$$

где: $T1_{true}$ – истинное время прохождения сигнала от БС до МС, с;

$\Delta_{МС}$ – погрешность приема сигнала МС, с.

$T1_{true}$ рассчитывается по формуле (2):

$$T1_{true} = \frac{distance_{true}}{c}, \quad (2)$$

где: $distance_{true}$ – истинное расстояние между БС и МС, м;

c – скорость распространения волны в пространстве, м/с.

$T2$ рассчитывается по формуле(3):

$$T2 = T2_{true} \left(1 + \frac{\Delta_{BC}}{100} \right), \quad (3)$$

где: $T2_{true}$ – истинное время прохождения сигнала от МС до БС, с;

Δ_{BC} – погрешность приема сигнала БС, с.

Итоговое расстояние в запросно-ответной системе рассчитывается по формуле (4):

$$d = \frac{c(T1 + T2)}{2}. \quad (4)$$

4.2 Алгоритм расчета дистанции по энергетическим характеристикам

Назначение алгоритма заключается в расчете расстояние между двумя точками с учётом погрешностей по затуханию передаваемого сигнала. Модель системы представлена на рисунке 11.

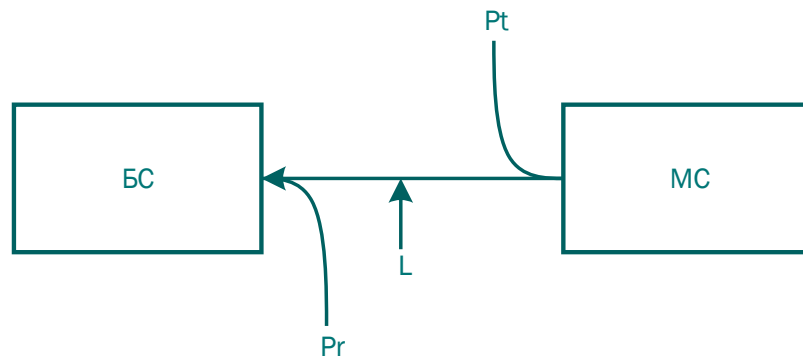


Рисунок 11– Модель системы по затуханию сигнала

На рисунке 11

Pt – мощность сигнала на выходе передающей антенны с учетом погрешностей, L – затухание сигнала в свободном пространстве с учетом погрешностей, Pr – мощность сигнала на выходе приемной антенны с учетом погрешностей.

Pt рассчитывается по формуле (5):

$$Pt = Pt_{true} \left(1 + \frac{\Delta_{Pt}}{100}\right), \quad (5)$$

где: Pt_{true} – мощность передающего устройства, Вт;

Δ_{Pt} – погрешность передающего устройства.

L рассчитывается по формуле (6):

$$L = L_{true} \left(1 + \frac{\Delta_L}{100}\right), \quad (6)$$

где: L_{true} – затухание сигнала в свободном пространстве без погрешностей, Дб;

Δ_L – погрешность затухания в свободном пространстве, Дб.

Затухание сигнала в свободном пространстве без погрешностей, рассчитывается по формуле (7):

$$L_{true} = -10\log_{10}(Gt) - 10\log_{10}(Gr) - \\ -20\log_{10}(\lambda) + 20\log_{10}(4\pi) + 20\log_{10}(d_{true}), \quad (7)$$

где: Gt – коэффициент усиления передающей антенны, дБ;

Gr – коэффициент усиления приемной антенны, дБ;

λ – длина волны передаваемого сигнала, м;

d_{true} – истинное расстояние между БС и МС, м.

Итоговое расстояние между БС и МС рассчитывается по формуле (8):

$$d = \sqrt{\frac{PtGr\lambda^2}{Pr(4\pi)^2}}. \quad (8)$$

4.3 Алгоритм расчета углов между точками в пространстве

Назначение алгоритма заключается в определении угла между двумя точками в пространстве. Расчет угла ведется между проекцией точки МС на плоскость ВС относительно ОХ. Визуализация метода представлена на рисунке 12.

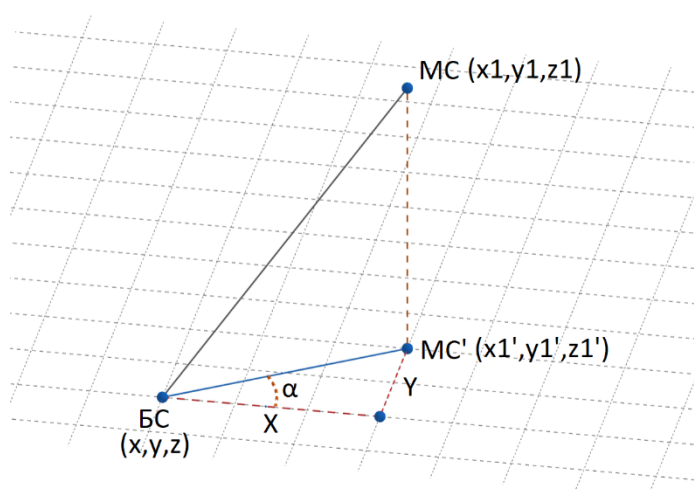


Рисунок 12–Визуализация алгоритма расчета углов

Угол вычисляется через арктангенс, поэтому первым этапом вычисляются X и Y , где X - разница абсциссы МС и ВС, а Y – разница ординаты МС и ВС.

Поскольку арктангенс отношения противолежащего катета к прилежащему есть угол в диапазоне от минус 90° до плюс 90° , следует преобразовать значение в диапазон от 0 до 360° в зависимости от координатной четверти, в которой находится МС по отношению к ВС.

Итоговый угол между ВС и МС вычисляется согласно условиям в формуле (9):

$$\text{Если } X < 0, \text{ то } \alpha = 180^\circ + \operatorname{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right).$$

$$\text{Если } X \geq 0 \text{ и } Y < 0, \text{ то } \alpha = 360^\circ + \operatorname{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right). \quad (9)$$

$$\text{Во всех других случаях } \alpha = \operatorname{arctg}\left(\frac{Y}{X}\right).$$

4.4 Алгоритм определения сектора

Назначение алгоритма заключается в определении сектора, в котором находится угол между двумя точками в пространстве.

Все пространство вокруг БС делится на определенное количество секторов, сектор представляет из себя два угла – минимальный β_1 и максимальный β_2 . Визуализация метода представлена на рисунке 13.

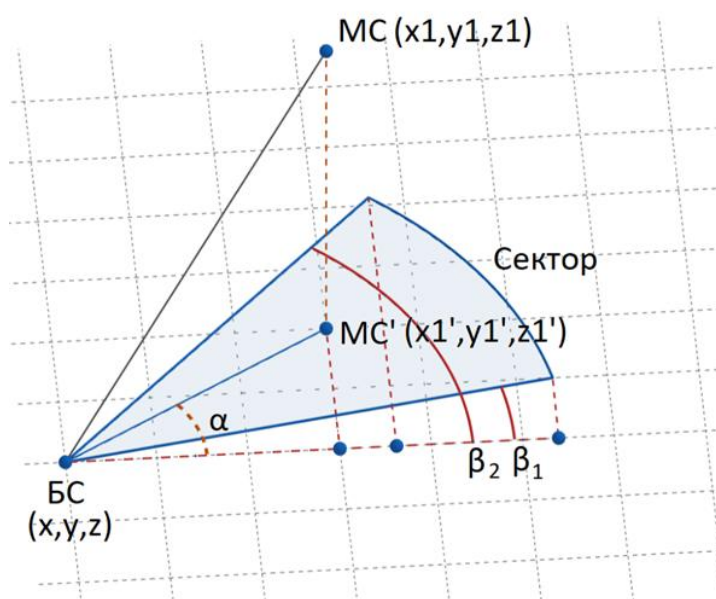


Рисунок 13–Визуализация алгоритма определения сектора

Нахождение искомого сектора сводится к перебору всех возможных секторов и проверку угла α на условие, представленное в формуле (10):

$$\beta_1 \leq \alpha \leq \beta_2. \quad (10)$$

Если условие выполняется, то сектор найден, иначе продолжается перебор остальных секторов.

4.5 Алгоритм обработки данных

Назначение алгоритма заключается в обработке данных, например, точности вычисления координаты МС каким-либо методом определения местоположения, или разброса результатов измерения расстояния.

Функция вычисляет по формуле (11) среднеарифметическое значение полученных данных \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (11)$$

где: n – общее количество данных.

Затем по формуле (12) находится среднеквадратическое отклонение σ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}. \quad (12)$$

Предельная ошибка выборки Δ вычисляется по формуле (13):

$$\Delta = \sigma t, \quad (13)$$

где: t – коэффициент Стьюдента.

При нормальном распределении наблюдений истинное значение измеряемой величины с доверительной вероятностью (при которой взят коэффициент Стьюдента) находится внутри *доверительного интервала*, показанного в формуле (14):

$$[\bar{x} - \Delta; \bar{x} + \Delta]. \quad (14)$$

4.6 Алгоритм ОМП дальномерным методом

Назначение алгоритма заключается в ОМП МС, путем решения системы линеаризованных уравнений через МНК. Система уравнений составляется на основе дальномерного метода.

Уравнение каждой БС представлено в формуле (15) и представляет собой сферу, находящуюся в точке МПБС и с радиусом r – измеренным расстоянием от БС до МС.

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2, \quad (15)$$

где: $i = 1 \dots$ количество БС

Для линеаризации уравнения обе части возводятся в квадрат и производится замена, показанная в формуле(16) [4, 6]:

$$r_i^2 = R^2 - 2xx_i - 2yy_i - 2zz_i + x_i^2 + y_i^2 + z_i^2, \quad (16)$$

где: $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$.

После преобразования уравнение принимает вид, представленный в формуле (17):

$$x_i x + y_i y + z_i z - 0.5R^2 = \frac{1}{2}(x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - r_i^2). \quad (17)$$

Таким образом решение системы уравнений сводится к решению матричной формы, в виде: $At = b$, где A, t, b представлены в формулах (18, 19, 20) соответственно [4, 6]:

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -0.5 \\ x_2 & y_2 & z_2 & -0.5 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_i & y_i & z_i & -0.5 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

$$t = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ R^2 \end{bmatrix}. \quad (19)$$

$$b = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - r_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - r_2^2 \\ \vdots \\ x_i^2 + y_i^2 + z_i^2 - r_i^2 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Итоговое МП МС является решением системы уравнений МНК, приведенной в формуле (21)[4, 6]:

$$t = (A^T A)^{-1} A^T b. \quad (21)$$

4.7 Алгоритм ОМП разностно-дальномерным методов

Назначение алгоритма заключается в ОМП МС, путем решения системы линеаризованных уравнений через МНК. Система уравнений составляется на основе разностно-дальномерного метода.

Уравнение каждой БС представлено в формуле (22) и представляет собой гиперboloид, где узловая БС и текущая БС находятся в фокусах, а точка измеренное расстояние от БС до МС находится на поверхности гиперboloида [6].

$$\begin{aligned} r_{tdoa,i} + \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} = \\ = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}, \end{aligned} \quad (22)$$

где: $r_{tdoa,i} = r_i - r_1$, $i = 2 \dots n$, где n – количество БС.

Для линеаризации уравнения вводится временная переменная R_1 , приведенная в формуле(23) и возводятся обе части уравнения в квадрат (формула 24) [6]:

$$R_1 = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}. \quad (23)$$

$$\begin{aligned} 2(x_1 - x_i)(x - x_1) + 2(y_1 - y_i)(y - y_1) + 2(z_1 - z_i)(z - z_1) - 2r_{tdoa,i}R_1 = \\ = r_{tdoa,i}^2 - (x_1 - x_i)^2 - (y_1 - y_i)^2 - (z_1 - z_i)^2. \end{aligned} \quad (24)$$

Таким образом решение системы уравнений сводится к решению матричной формы, в виде: $At = b$, где A, t, b представлены в формулах (25, 26, 27) соответственно [6]:

$$A = 2 \begin{bmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 & -(r_2 - r_1) \\ x_1 - x_3 & y_1 - y_3 & z_1 - z_3 & -(r_3 - r_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_1 - x_i & y_1 - y_i & z_1 - z_i & -(r_i - r_1) \end{bmatrix}. \quad (25)$$

$$t = \begin{bmatrix} x - x_1 \\ y - y_1 \\ z - z_1 \\ R_1 \end{bmatrix}. \quad (26)$$

$$b = \begin{bmatrix} (r_2 - r_1)^2 - (x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2 - (z_1 - z_2)^2 \\ (r_3 - r_1)^2 - (x_1 - x_3)^2 - (y_1 - y_3)^2 - (z_1 - z_3)^2 \\ \vdots \\ (r_i - r_1)^2 - (x_1 - x_i)^2 - (y_1 - y_i)^2 - (z_1 - z_i)^2 \end{bmatrix}. \quad (27)$$

Итоговое МП МС является решением системы уравнений МНК, приведенной в формуле(21).

4.8 Алгоритм ОМП комбинаторным методом

Назначение алгоритма заключается в нахождении действительного решения результата работы алгоритма ОМП дальномерным или разностно-дальномерным методом при условии наличия избыточного количества БС.

Например, если алгоритм дальномерного метода решает систему уравнений из четырех БС, где одна из них провела измерение расстояния до МС с большой ошибкой, что привело к невозможности решения, то задачей функции является комбинаторно вычитать все возможные комбинации БС из имеющихся до тех пор, пока не будет найдено действительное решение.

Алгоритм комбинаторного метода:

- а) пусть имеются четыре базовые станции: БС1, БС2, БС3, БС4 и измеренное ими расстояние до МС, где БС3 измерила расстояние с большой ошибкой;
- б) алгоритм ОМП дальномерным методом не может определить МП МС, поскольку система линейных уравнений не имеет действительного решения;
- в) из ряда имеющихся БС вычитаются комбинаторные варианты БС по одной;
- д) комбинаторный метод посредством алгоритма ОМП дальномерным методом пытается найти следующие решения:
 - 1) БС2, БС3, БС4 – не имеет решения;
 - 2) БС1, БС3, БС4 – не имеет решения;
 - 3) БС1, БС2, БС4 – есть решение.
- е) на третьем шаге, когда из имеющихся БС была вычтена БС3, система уравнений имеет действительное решение.

Путем исключения из системы уравнений БС, измерившую расстояние до МС с большой ошибкой, удалось определить МП МС. Результативность работы комбинаторного метода повышается при увеличении количества избыточных БС, по сравнению с минимально необходимым для работы алгоритма ОМП.

4.9 Алгоритм ОМП предлагаемым дальномерным методом

Назначение алгоритма заключается в ОМП МС, путем решения всех возможных систем линеаризованных уравнений по три БС с отбором предполагаемой координаты МС. Отбор производится по условию вхождения угла проекции точки МС на плоскость нахождения БС в известный сектор, в котором находится МС.

Результатом работы алгоритма является координата МС, полученная арифметическим средним всех прошедших отбор X и Y , и всех имеющихся Z .

Система уравнений составляется на основе дальномерного метода.

Алгоритм работы метода:

- а) пусть имеются четыре базовые станции: БС1, БС2, БС3, БС4 и измеренное ими расстояние до МС;
- б) вычисляются все возможные комбинаторные вариации БС по три:
 - БС1 БС2 БС3;
 - БС1 БС2 БС4;
 - БС1 БС3 БС4;
 - БС2 БС3 БС4.
- в) для каждой комбинации составляются матрицы A , t и b , представленные в формулах (18, 19, 20) соответственно;
- д) решение матричной формы представлено в формуле (28):

$$t = A^{-1}b, \tag{28}$$

где A^{-1} – обратная матрица к матрице A .

- е) к предполагаемой координате МС находится три угла α и проверяется на вхождение в известные сектора $\beta_1\beta_2$ – рисунок 13;
- ж) если точка принадлежит одновременно трем секторам от трех БС, то рассчитанные координаты X и Y прибавляются к среднеарифметической сумме;
- й) после перебора всех комбинаторных вариаций находится среднеарифметическое X и Y отобранных в б пункте и среднеарифметическое всех предполагаемых координат МС.

4.10 Алгоритм ОМП предлагаемым разностно-дальномерным методом

Назначение алгоритма полностью аналогично алгоритму ОМП предлагаемым дальномерным методом, за исключением следующих особенностей:

- а) система уравнений составляется на основе разностно-дальномерного метода;
- б) комбинаторные вариации составляются по четыре БС;
- в) для каждой комбинации составляются матрицы A , t и b , представленные в формулах (25, 26, 27) соответственно.

4.11 Вывод по разделу

В рамках раздела были рассмотрены основные используемые в модели алгоритмы ОМП МС: стандартные, комбинаторные и предлагаемые. Работа предлагаемых алгоритмов заключается в использовании секторных антенн, установленных на БС, и разделением имеющихся уравнений БС на комбинаторное подмножество.

Преимущество данного подхода заключается в нахождении решения систем уравнений, если одна или несколько БС измеряют дистанцию до МС с большой ошибкой.

В итоге было предложено два новых подхода к усовершенствованию стандартных алгоритмов ОМП:

- а) комбинаторные методы – позволяют определять большее количество МП МС, чем стандартные методы;
- б) предлагаемые методы – используют секторные антенны на БС, в качестве дополнительной логики для фильтрации полученных результатов.

5 Описание программного обеспечения модели

В этой главе будут описаны программные алгоритмы, реализованные в разрабатываемой модели. В целях краткости некоторые проверки и выводы графиков будут опущены.

5.1 Алгоритм расчета дистанции по «запросно-ответной» системе

Алгоритм реализован в программной среде MATLAB функцией «Function_distance_TimeMethod».

Функция принимает параметры:

- а) координаты БС;
- б) координаты МС;
- в) настройки погрешностей метода.

Функция возвращает массив расстояний между всеми БС и МС с учетом введенных в систему погрешностей.

Блок-схема работы функции приведена на рисунках 14 и 15.

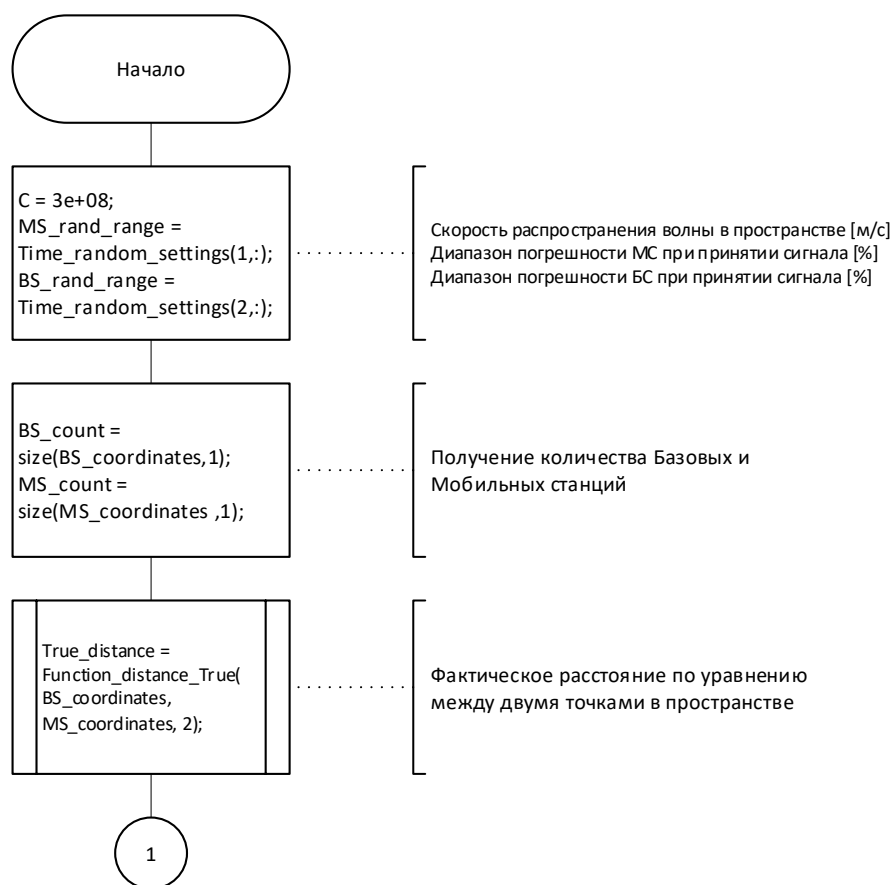


Рисунок 14–Первая часть блок-схемы

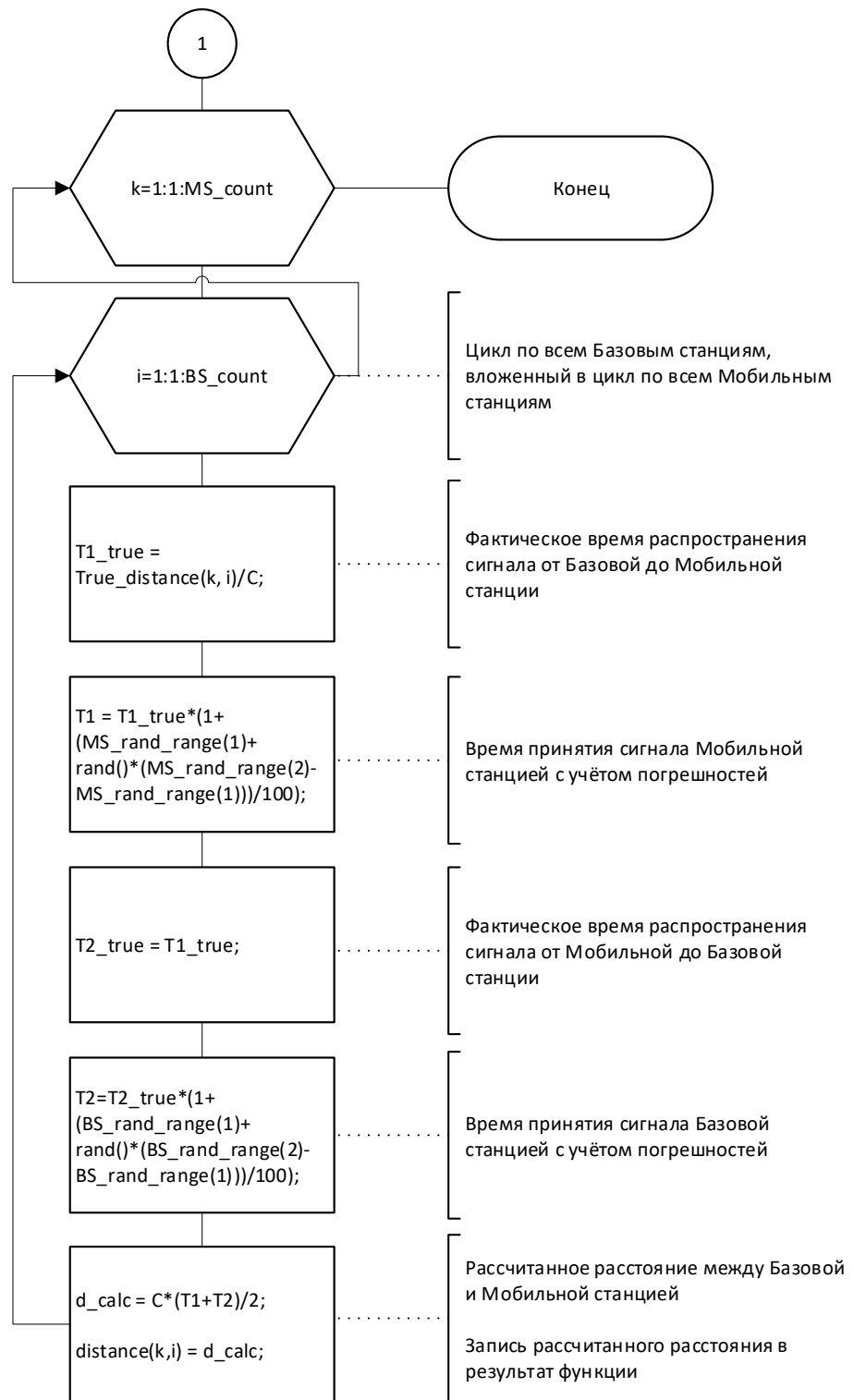


Рисунок 15 –Вторая часть блок-схемы

5.2 Алгоритм расчета дистанции по энергетическим характеристикам

Алгоритм реализован в программной среде MATLAB функцией «Function_distance_PowerMethod».

Функция принимает параметры:

- а) координаты БС;
- б) координаты МС;
- в) настройки погрешностей метода.

Функция возвращает массив расстояний между всеми БС и МС с учетом введенных в систему погрешностей.

Блок-схема работы функции приведена на рисунках 16 и 17.

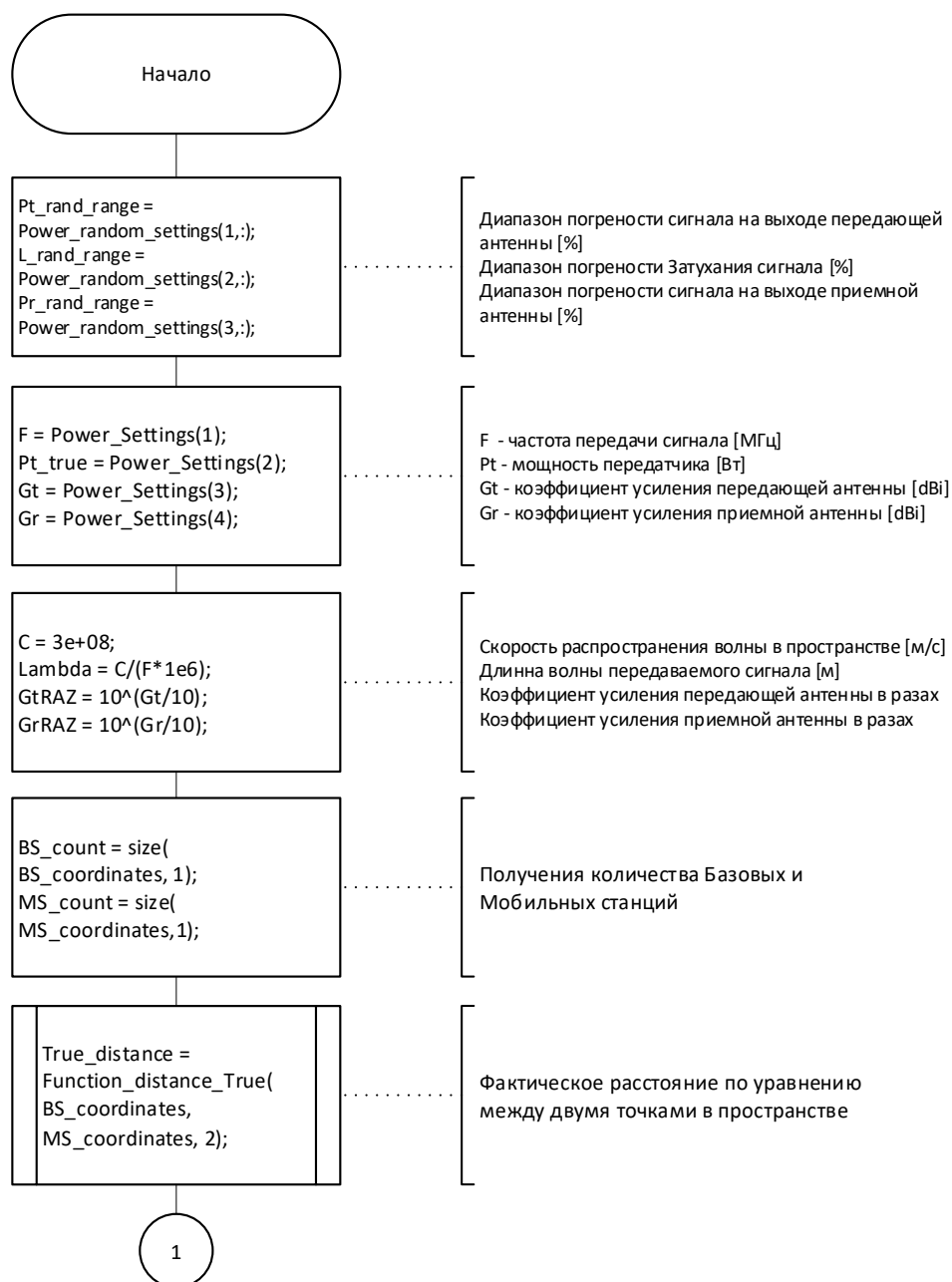


Рисунок 16–Первая часть блок-схемы

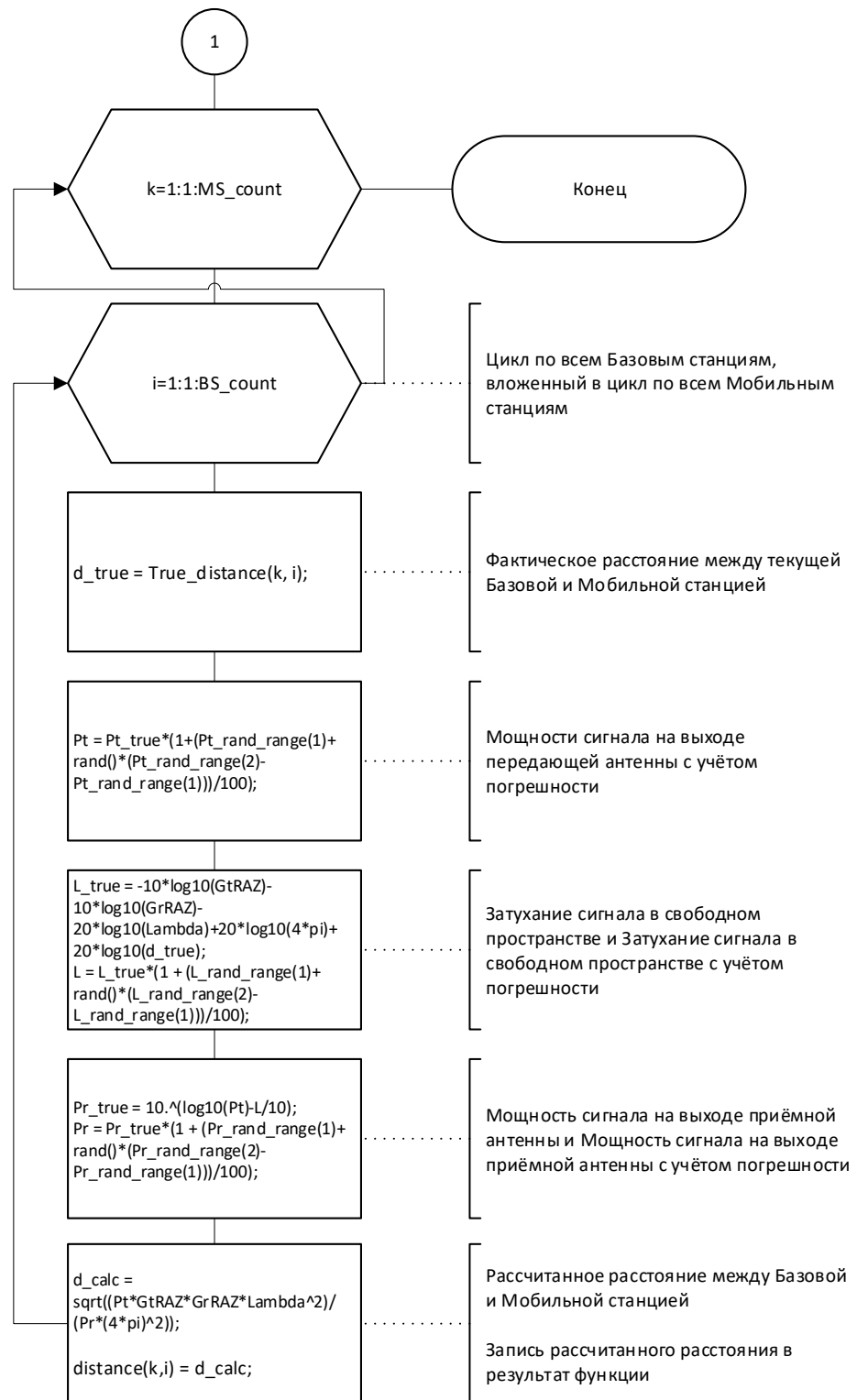


Рисунок 17–Вторая часть блок-схемы

5.3 Алгоритм расчета углов между точками в пространстве

Алгоритм реализован в программной среде MATLAB функцией «Function_calc_angle».

Функция принимает параметры:

- а) координаты БС;
- б) координаты МС.

Функция возвращает массив углов между всеми БС и единственной МС.

Блок-схема работы функции приведена на рисунке 18.

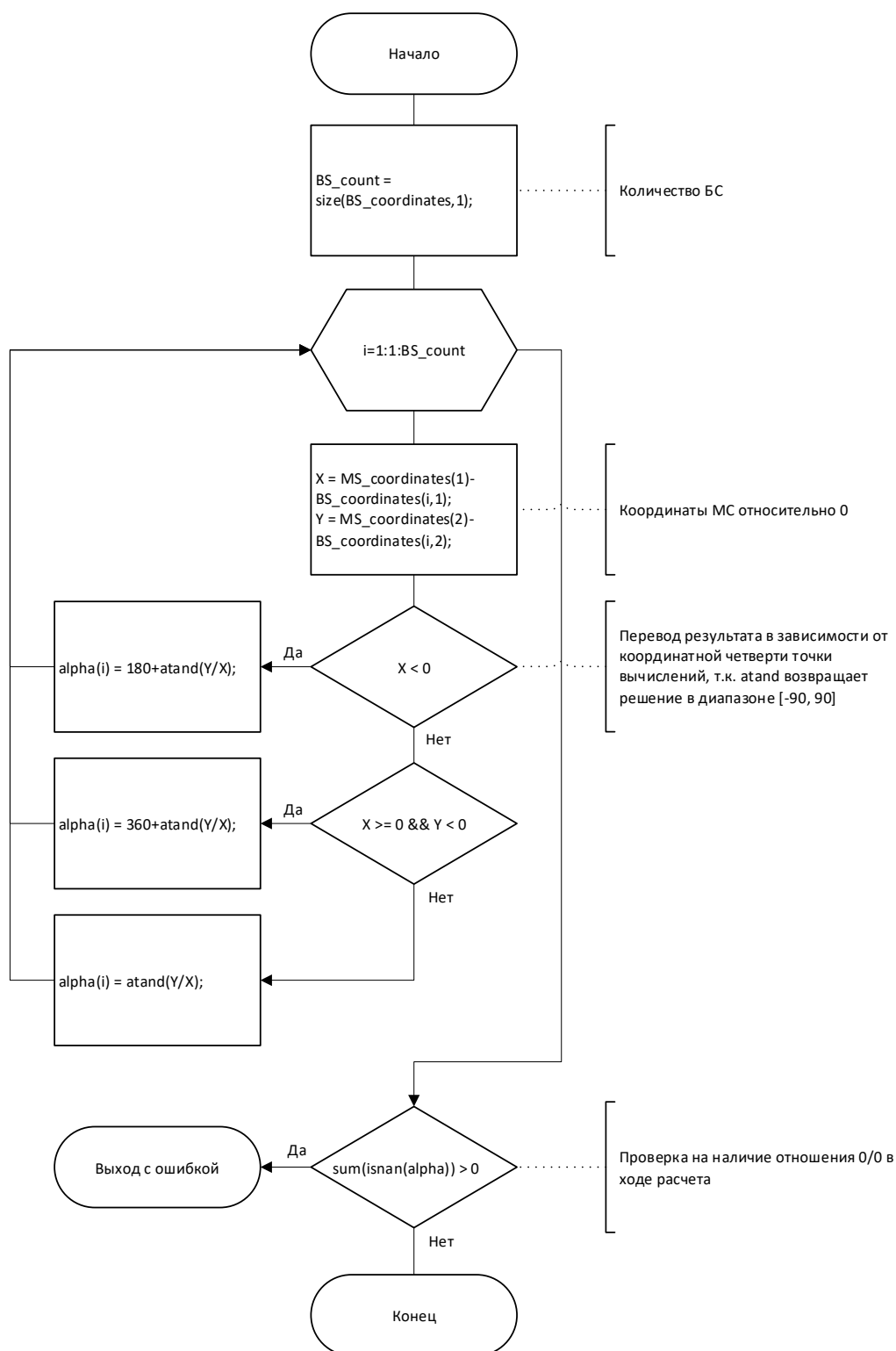


Рисунок 18–Блок-схема

5.4 Алгоритм определения сектора

Алгоритм реализован в программной среде MATLAB функцией «Function_calc_sector».

Функция принимает параметры:

- а) массив углов между всеми БС и МС;
- б) количество сектор у БС.

Функция возвращает сектор для каждой БС, в котором находится истинное МП МС.

Блок-схема работы функции приведена на рисунке 19.

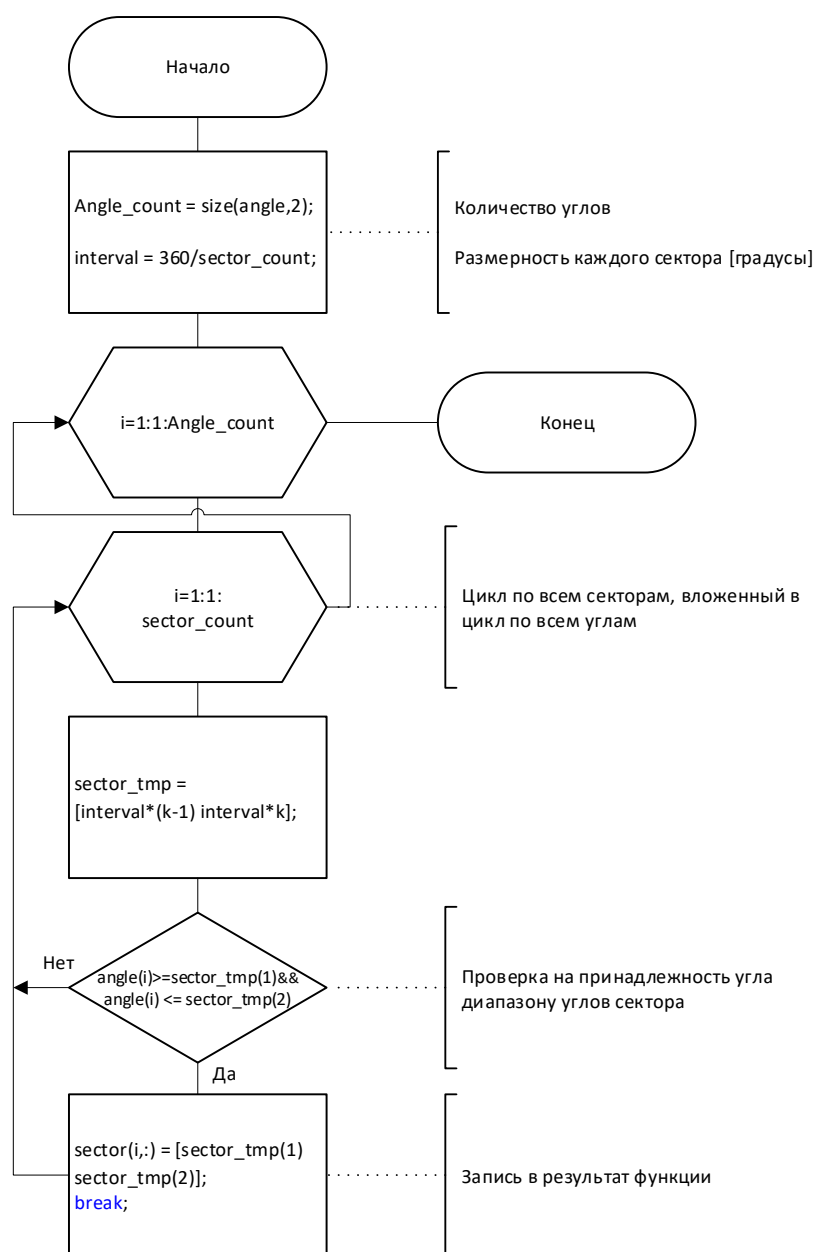


Рисунок 19–Блок-схема

5.5 Алгоритм обработки данных

Алгоритм реализован в программной среде MATLAB функцией «Function_data_processing».

Функция принимает параметры:

- а) перечисление имеющихся данных;
- б) коэффициент Стьюдента;
- в) истинное значение данных.

Функция возвращает массив среднеарифметическим значением полученных данных, СКО и рассчитанную предельную ошибку.

Блок-схема работы функции приведена на рисунке 20.

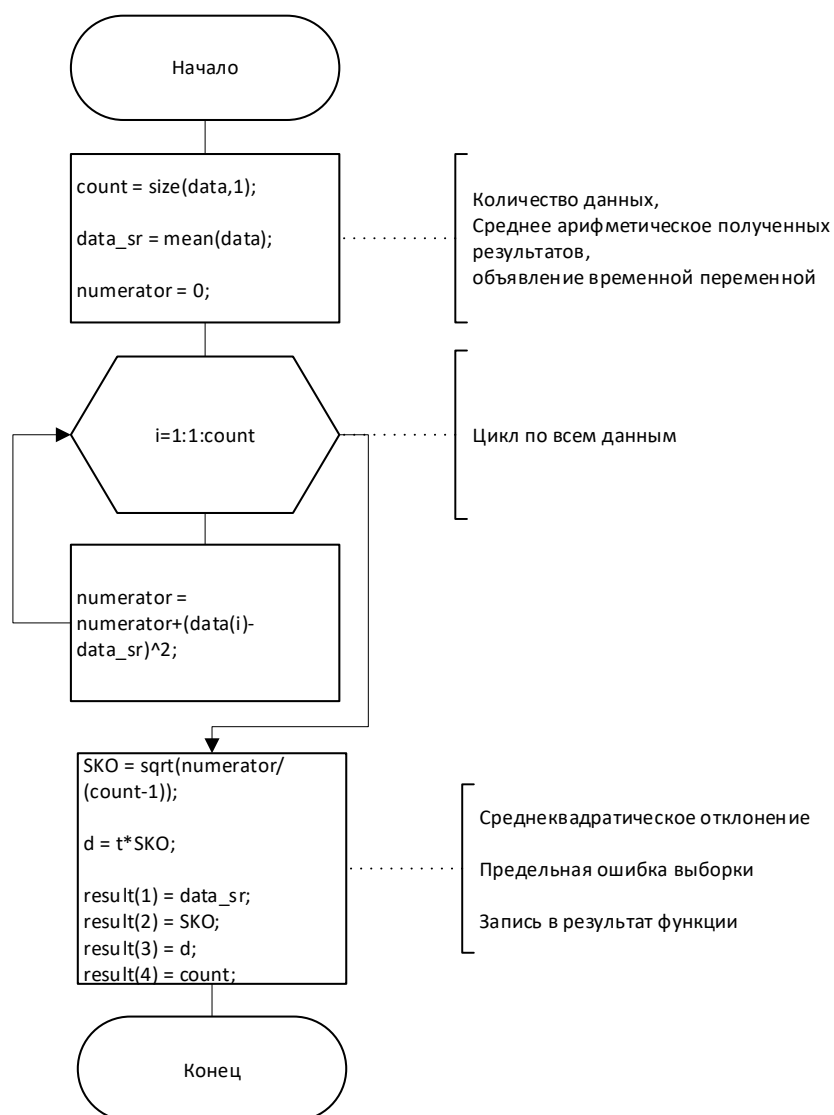


Рисунок 20—Блок-схема

5.6 Алгоритм ОМП дальномерным методом

Алгоритм реализован в программной среде MATLAB функцией «Function_Range_LocationMethod».

Функция принимает параметры:

- а) координаты БС;
- б) расстояния между всеми БС и единственной МС.

Функция возвращает определенное МП МС, полученное дальномерным методом.

Блок-схема работы функции приведена на рисунках 21 и 22.

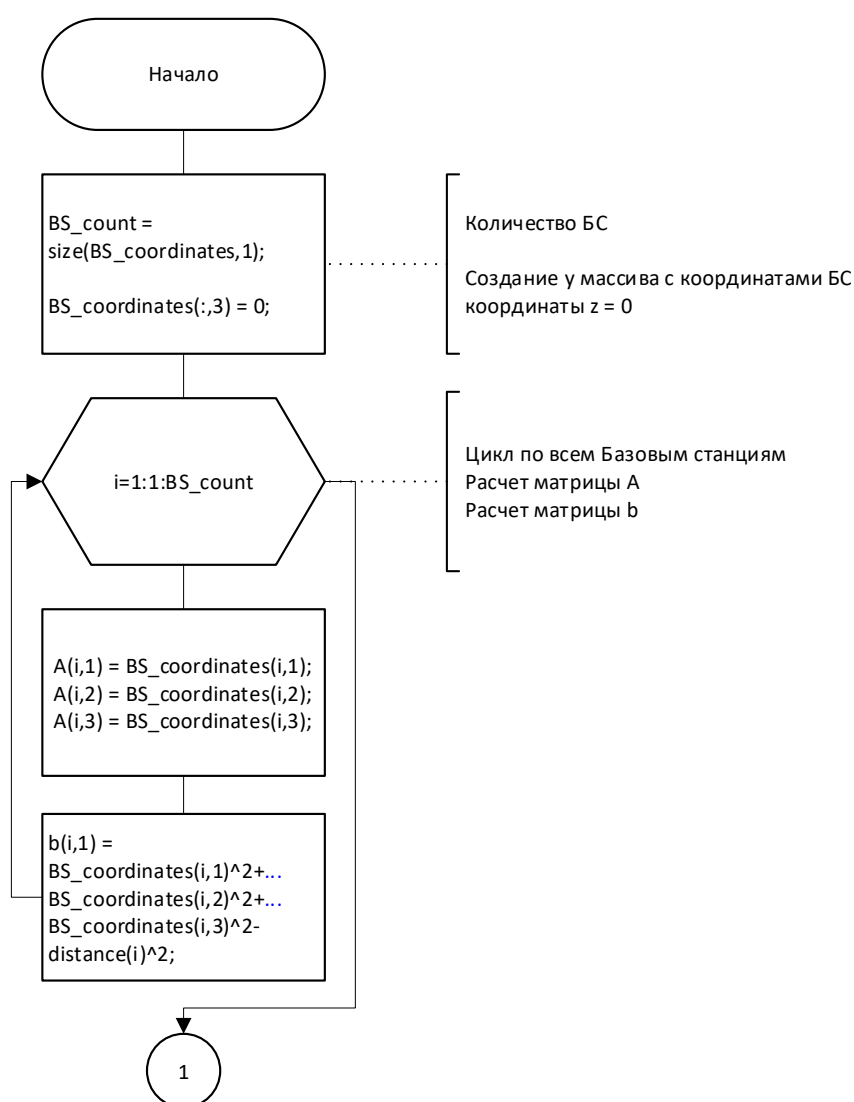


Рисунок 21–Первая часть блок-схемы

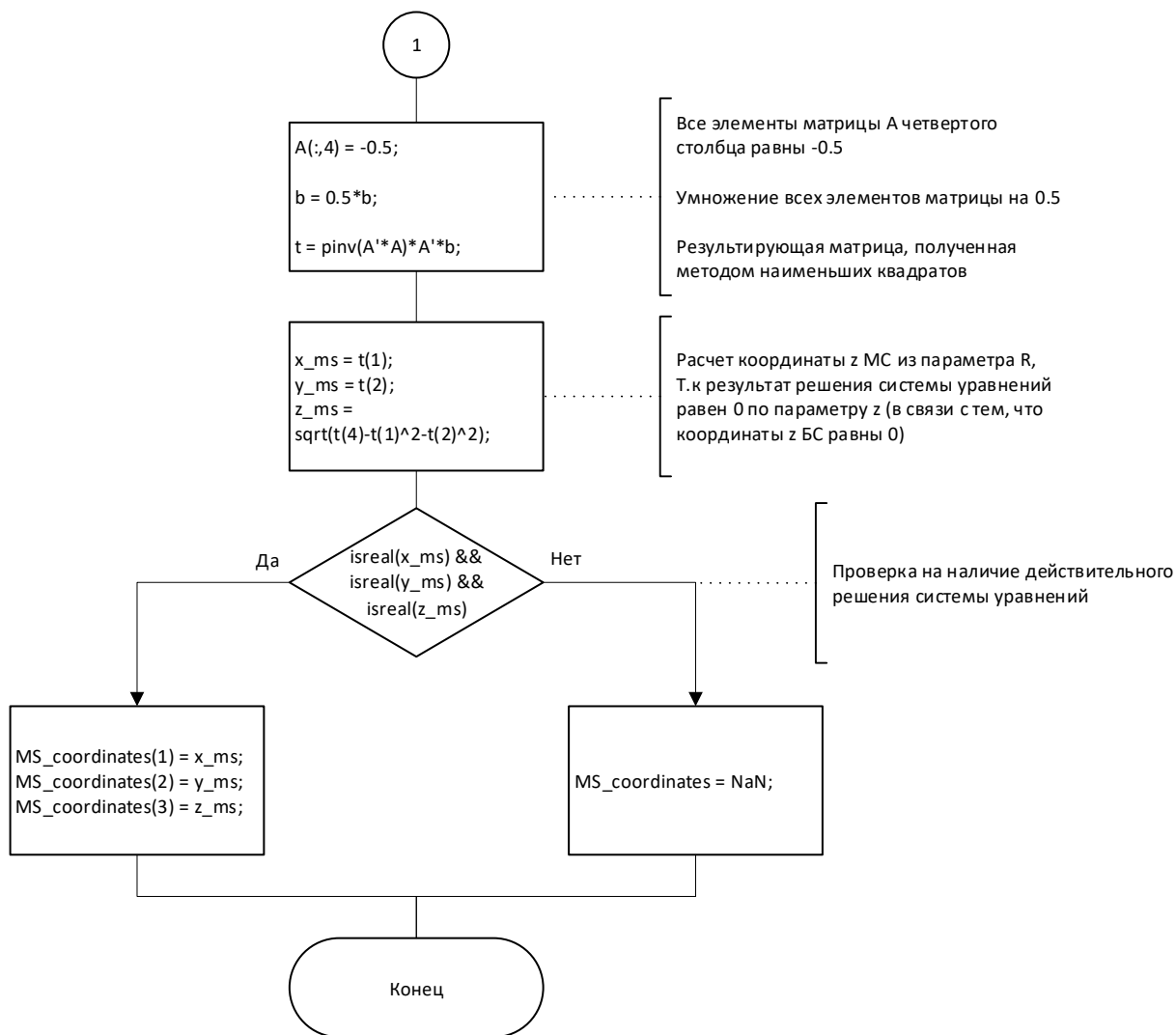


Рисунок 22–Вторая часть блок-схемы

5.7 Алгоритм ОМП разностно-дальномерным методом

Алгоритм реализован в программной среде MATLAB функцией «Function_Difference_Range_LocationMethod».

Функция принимает параметры:

- а) координаты БС;
- б) расстояния между всеми БС и единственной МС.

Функция возвращает определенное МП МС, полученное разностно-дальномерным методом.

Блок-схема работы функции приведена на рисунках 23 и 24.

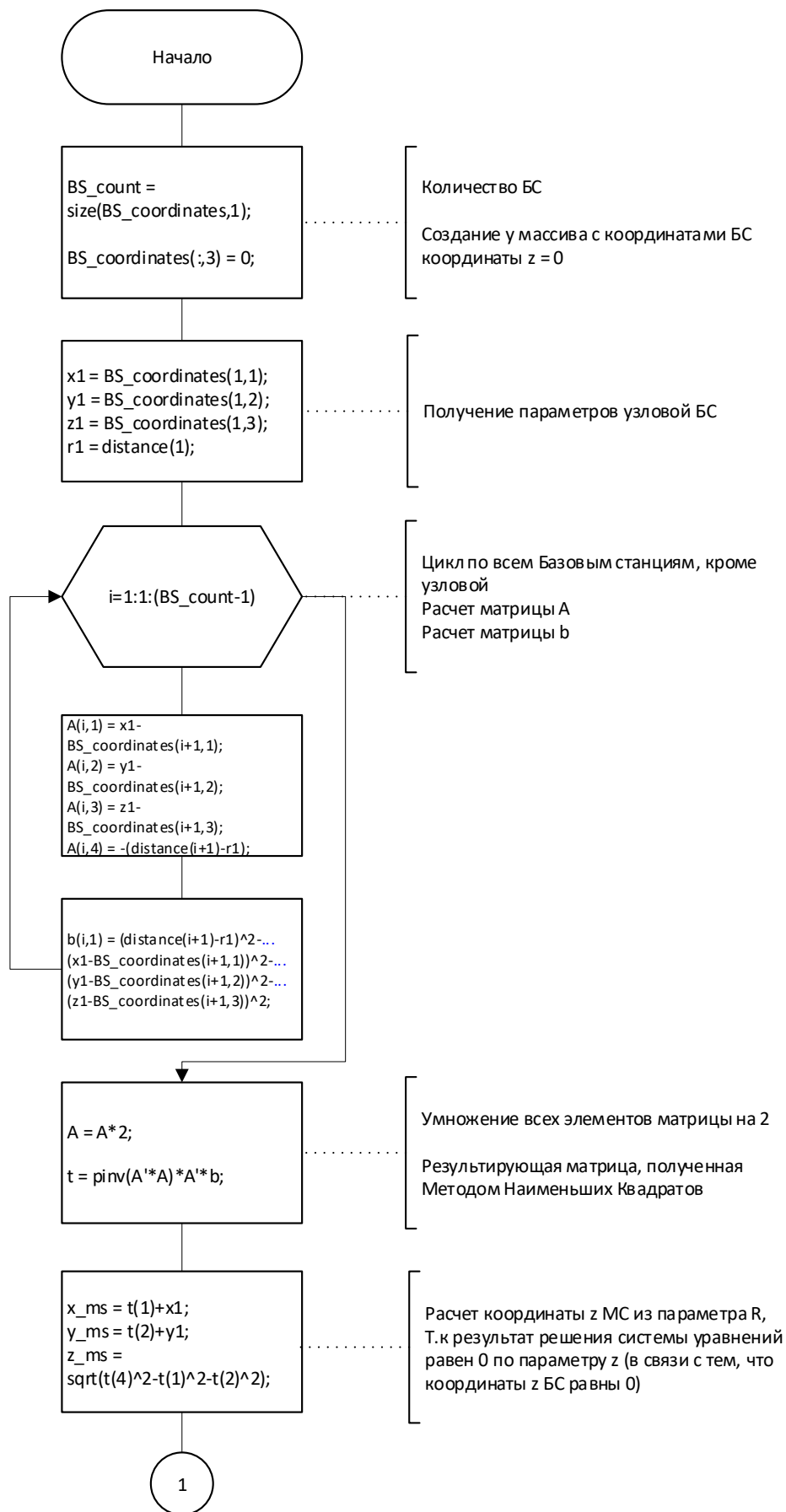


Рисунок 23–Первая часть блок-схемы

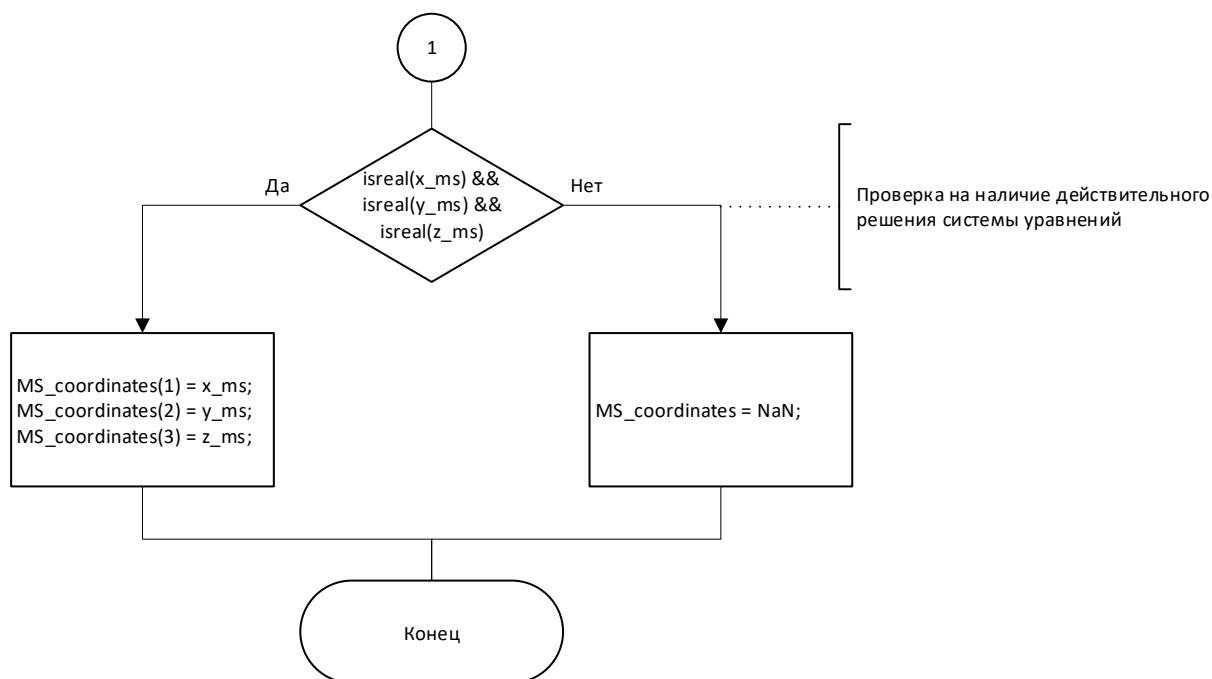


Рисунок 24–Вторая часть блок-схемы

5.8 Алгоритм ОМП комбинаторным методом

Алгоритм реализован в программной среде MATLAB функцией «Function_Distance_LocationMethod_CS».

Функция принимает параметры:

- а) координаты БС;
- б) расстояния между всеми БС и единственной МС;
- в) тип используемого алгоритма для ОМП МС (дальномерный или разностно-дальномерный).

Функция возвращает определенное МП МС, полученное требуемым методом.

Блок-схема работы функции приведена на рисунках 25 и 26.

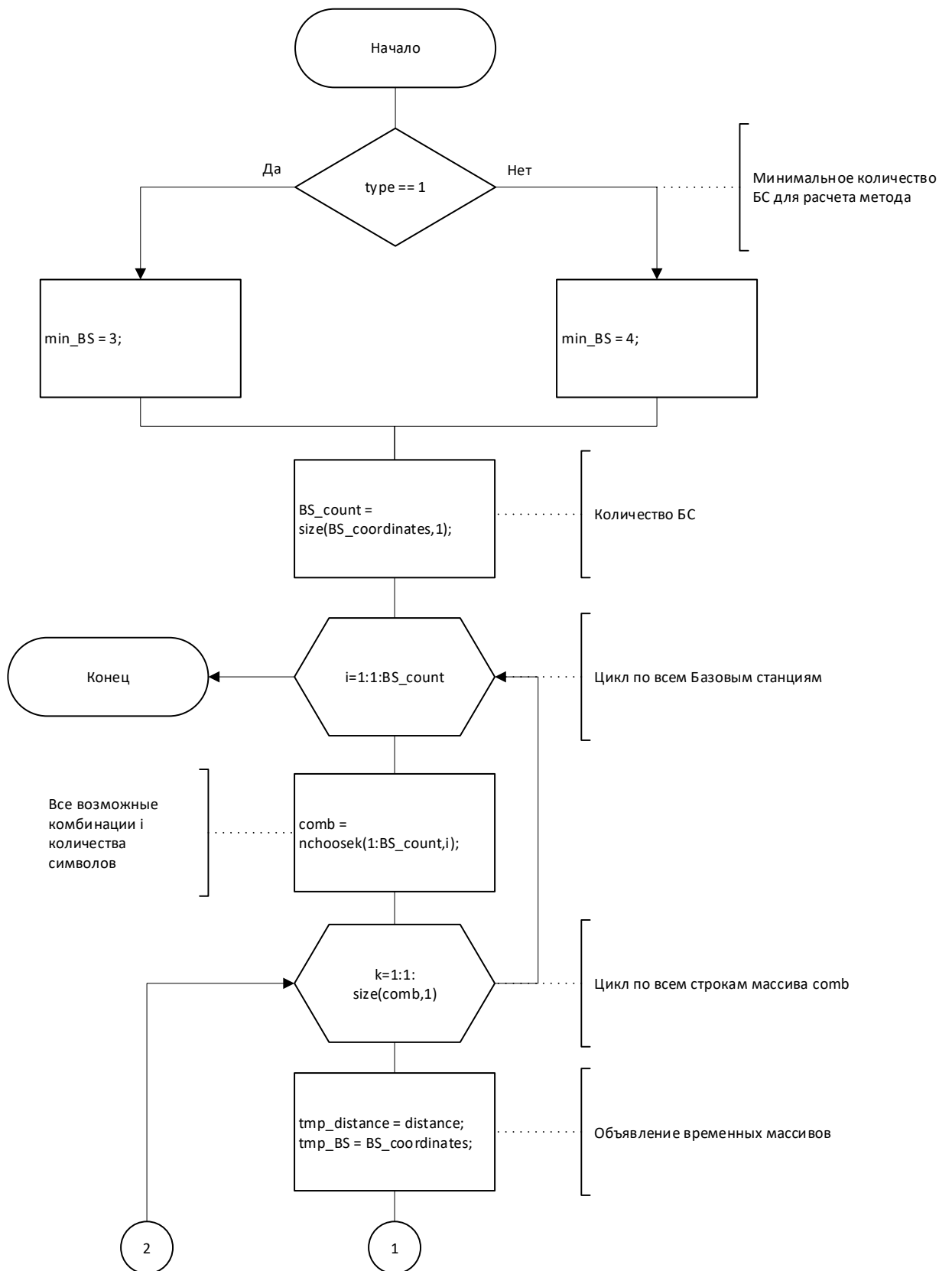


Рисунок 25–Первая часть блок-схемы

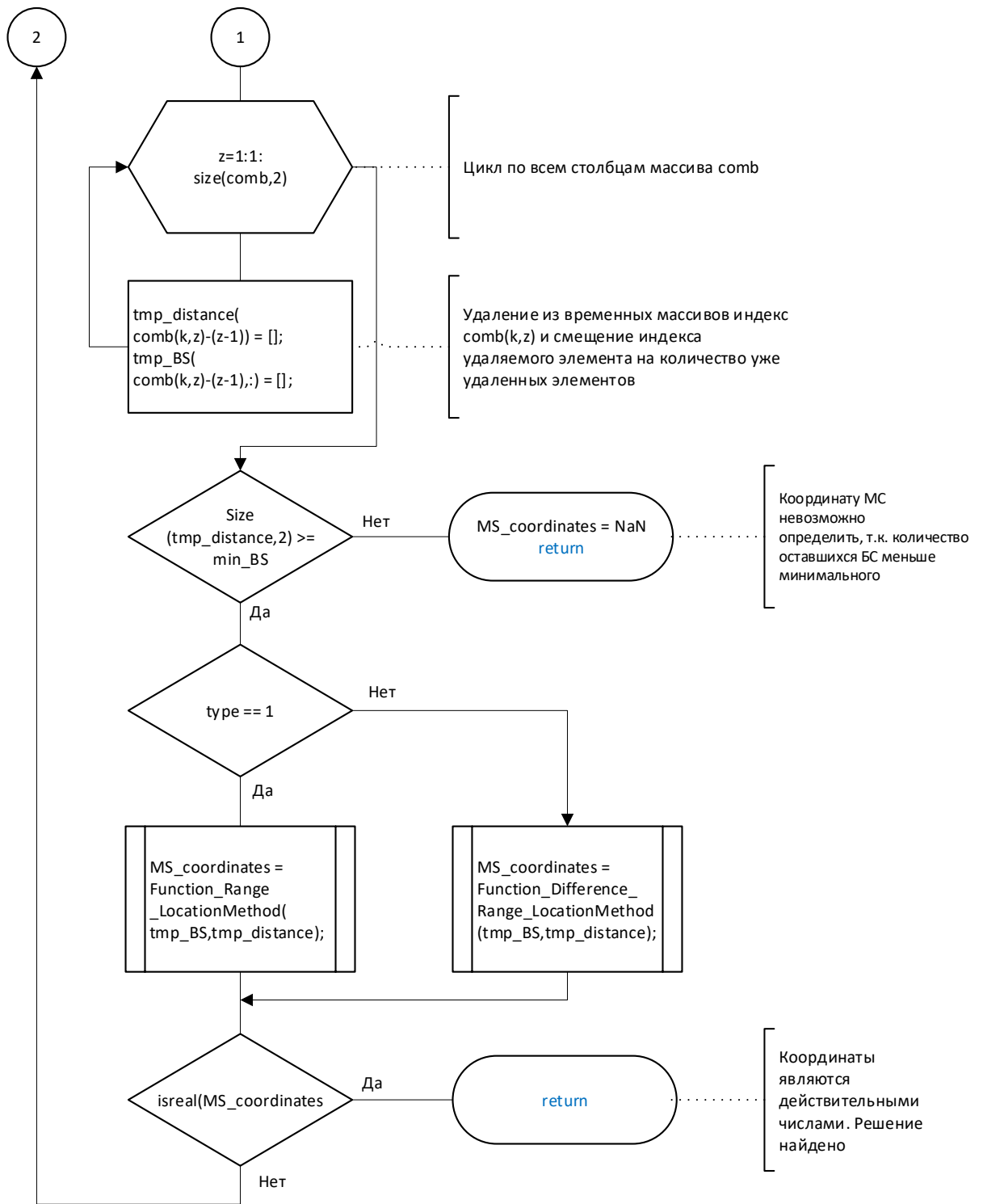


Рисунок 26–Вторая часть блок-схемы

5.9 Алгоритмы ОМП предлагаемыми методами

Два предлагаемых в рамках настоящей работы алгоритма – дальномерный и разностно-дальномерный метод реализованы в программной среде MATLAB функциями «Function_my_Range» и «Function_my_Difference_Range» соответственно.

Алгоритмы имеют идентичную архитектуру и отличаются только расчетом требуемых матриц, поэтому будет продемонстрирована работа только предлагаемого дальномерного метода.

Функция принимает параметры:

- а) координаты БС;
- б) расстояния между всеми БС и единственной МС;
- в) массив секторов для каждой БС, в которых находятся истинные МП МС.

Функция возвращает определенное МП МС, полученное предлагаемым дальномерным методом.

Блок-схема работы функции приведена на рисунках 27, 28 и 29.

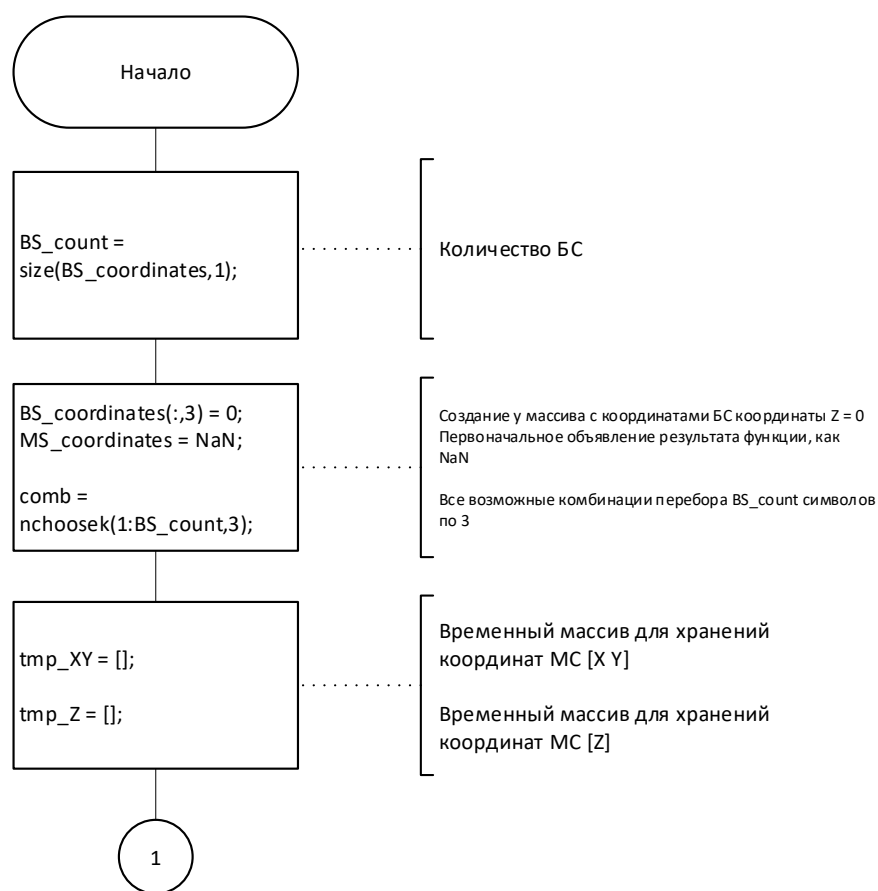


Рисунок 27–Первая часть блок-схемы

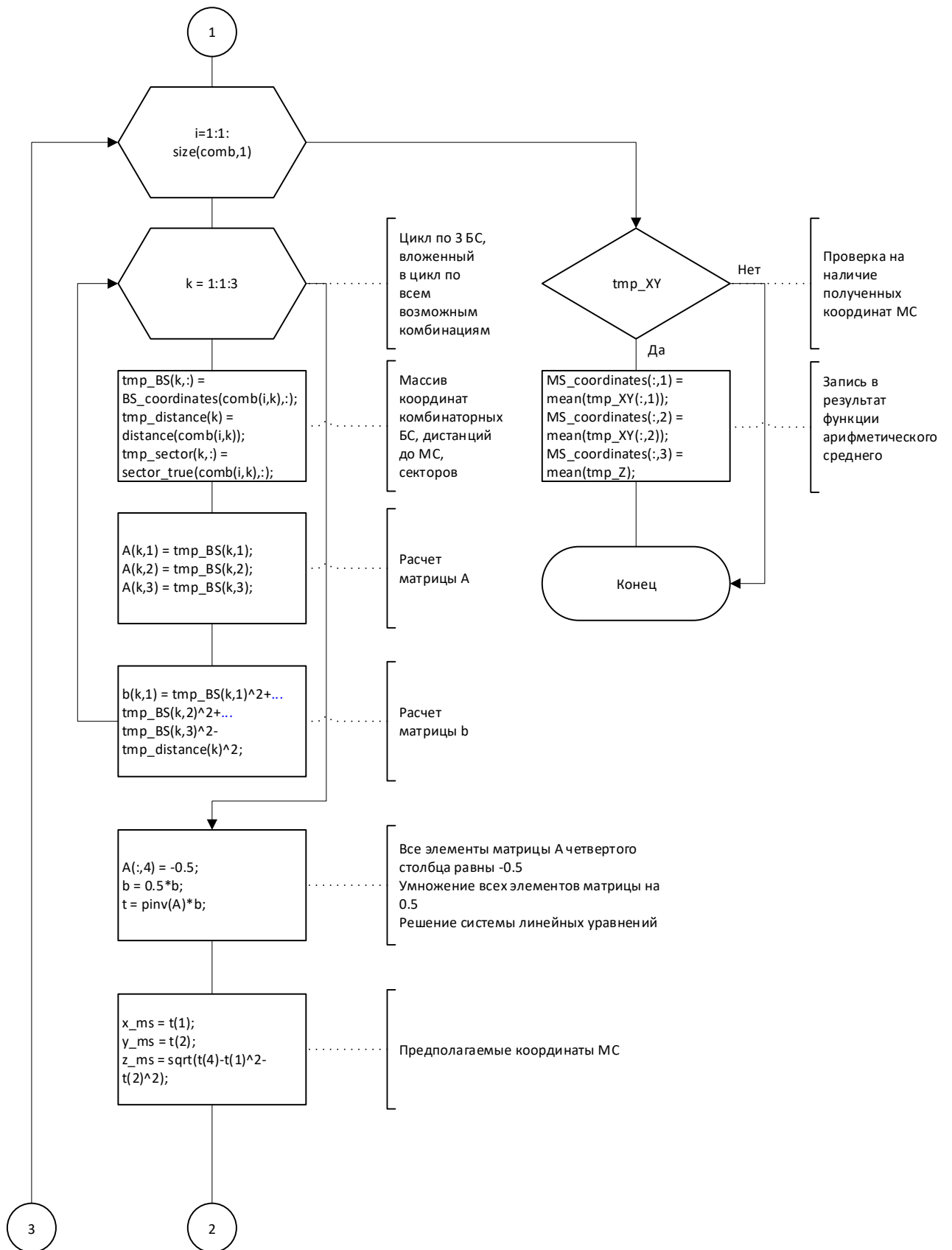


Рисунок 28–Вторая часть блок-схемы

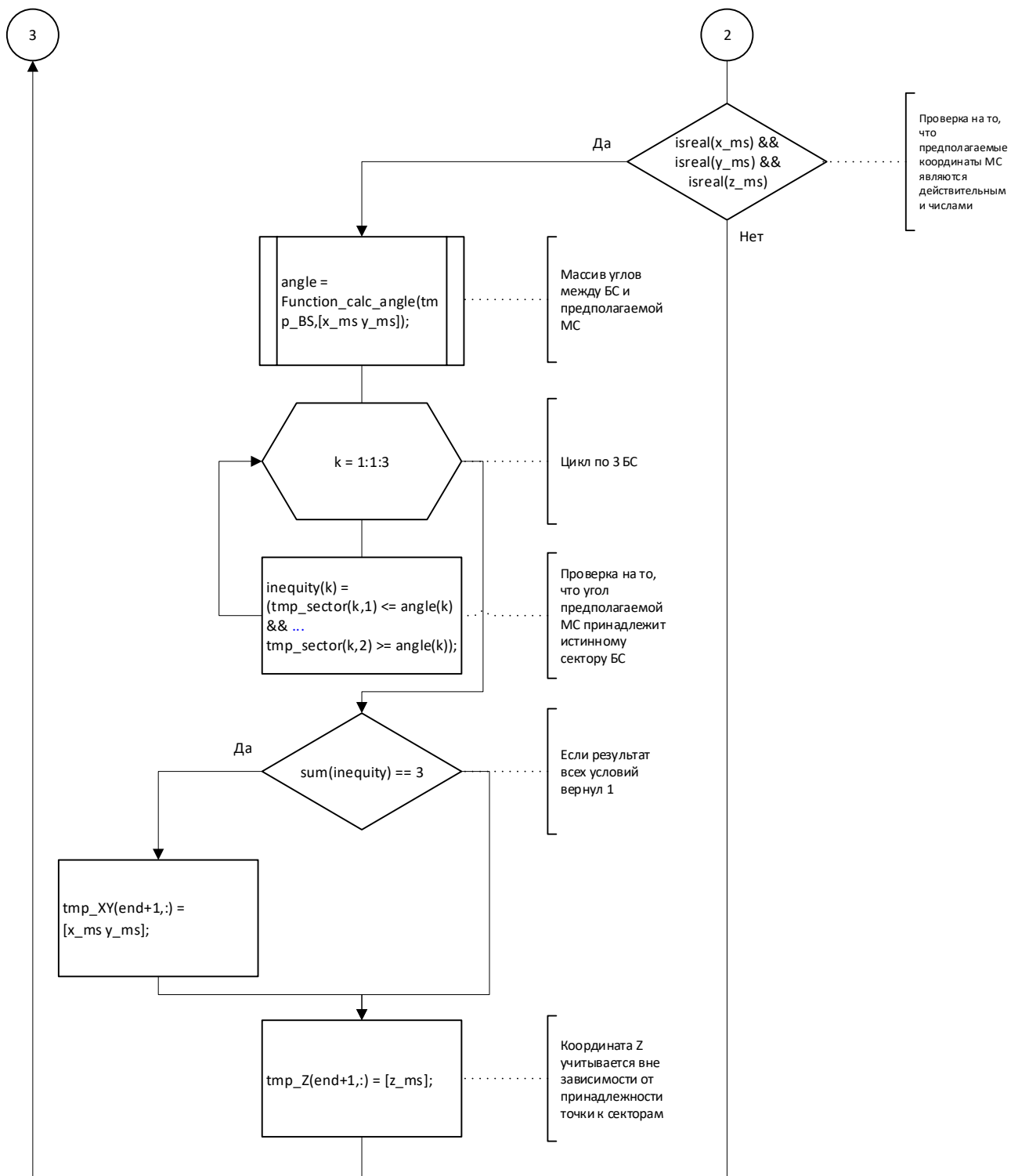


Рисунок 29–Третья часть блок-схемы

5.10 Выводы по разделу

В разделе была рассмотрена большая часть используемого программного обеспечения, на основе которого будет выполнено дальнейшее моделирование.

На основе имеющихся алгоритмов и схем составлена схема всей модели, которая представлена в приложении А. В схеме отражен весь поток данных, который проходит через созданную модель.

В жизненный цикл модели входят:

- а) расстановка БС на местности и генерация МП МС;
- б) возможность отображения получившейся территориальной ситуации;
- в) выбор модели, по которой будет произведен расчет расстояния между БС и МС с учетом требуемых погрешностей;
- д) выбор алгоритма ОМП МС, в который поступают данные о положения БС и МС, а также измеренной дистанции. В случае использования предлагаемых алгоритмов необходим дополнительный расчет сектора, в котором находится МС по отношению к БС.
- е) при выборе дальномерного или разностно-дальномерного алгоритма ОМП есть возможность дополнительно воспользоваться алгоритмом комбинаторного перебора для попытки нахождения действительного решения системы уравнений;
- ж) полученные результаты предполагаемых МП МС проходят через отсеивание погрешностей, что позволяет избавиться от резко-выпадающих данных;
- й) итоговые данные о полученном МП МС поступают на обработку результатов, где и выводится информация о точности определенного МП.

6 Моделирование составляющих частей

В этой главе будет проведено моделирование отдельных частей, которые будут в основе комплексного моделирования имеющихся алгоритмов ОМП МС. Целью текущей главы является демонстрация и обоснование отдельных решений, примененных в комплексном моделировании.

Далее по тексту *под СКО будет подразумеваться СКО дальности МП МС относительно начала координат.*

6.1 Сравнение результатом ОМП МС стандартных и комбинаторных методов

Одним из решений работы является настройка над стандартными алгоритмами ОМП МС – комбинаторное решение дальномерного и разностно-дальномерного метода.

Достоинством данных алгоритмов является дополнительная возможность получить действительное решение системы уравнений в тех случаях, когда стандартные методы этих решений не имеют. Таким образом, количество данных для дальнейшей обработки и анализа может существенно возрасти.

В качестве демонстрации результатов ОМП МС комбинаторных методов была смоделирована следующая обстановка:

- а) количество МС: 5;
- б) количество БС: 5;
- в) количество измерений от каждой БС до МС: 500;
- д) способ измерения дистанции между БС и МС: «запросно-ответная» система;
- е) вводимые погрешности в систему измерения дистанции:
 - 1) погрешность определения времени запаздывания сигнала на участке пути от БС до МС: от минус 35 до плюс 35%;
 - 2) погрешность определения времени запаздывания сигнала на участке пути от МС до БС: от минус 35 до плюс 35%.
- ж) результаты проходят отсеивание 6% максимальных и минимальных определенных МП МС.

Целью моделирования является сравнение полученных результатов ОМП МС между стандартными и комбинаторными методами в разрезе количества определенных МП.

Результаты моделирования представлены в приложении Б.

Территориальное расположение БС и МС представлено на рисунке 30.

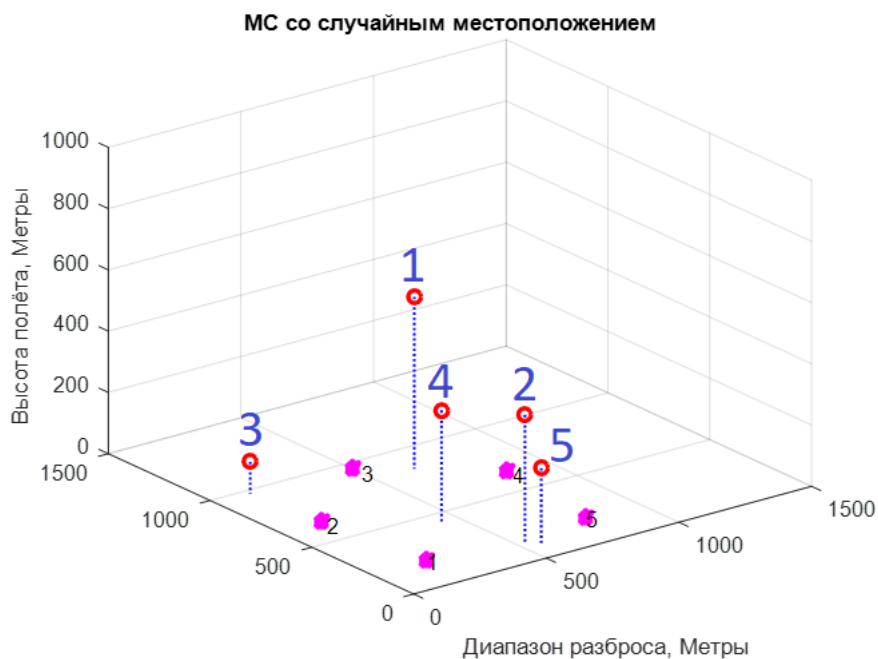


Рисунок 30 –Территориальное расположение БС и МС

Описание полученных результатов

Как видно из представленных результатов, даже при большой погрешности измерения дистанции, комбинаторные вариации стандартных методов определяют значительно большее количество предполагаемых МП МС, по сравнению со стандартными методами.

Среднеарифметическое количество определенных МП МС:

- а) стандартный дальномерный метод – 367 МП;
- б) комбинаторный дальномерный метод – 436 МП;
- в) стандартный разностно-дальномерный – 33 МП;
- д) комбинаторный разностно-дальномерный – 300 МП.

Таким образом, использование комбинаторных алгоритмов в случае дальномерного метода дало 69 решений, а в случае разностно-дальномерного метода – 267 решение.

Вывод по полученным результатам

Исходя из полученных данных можно сделать однозначный вывод – предложенный алгоритм комбинаторного перебора действительно дает дополнительные решения. Особенно большой прирост ОМП МС имеет комбинаторный разностно-дальномерный метод.

Вторым аспектом комбинаторных решений является точность ОМП МС, который будет рассмотрен в следующих разделах настоящей работы. Стоит лишь сказать, что в составе комбинаторных решений могут быть также и неточные ОМП МС, которые, в свою очередь, ведут к увеличению СКО и смещению средних значений определений координат относительно истинного МП МС.

6.2 Сравнение результатов ОМП МС без отсеивания и с отсеиванием грубых погрешностей

Одним из решений работы является отсеивание грубых погрешностей из полученного массива определенных МП МС. Таким образом, отсеивание может помочь получить более точно определенное МП МС.

Алгоритм отсеивания заключается в отбрасывании 6% самых больших и самых меньших значений из всех полученных результатов перед получением результатов измерения.

В качестве демонстрации результатов определений МП МС с отсеиванием была смоделирована следующая обстановка:

- а) количество МС: 5;
- б) количество БС: 5;
- в) количество измерений от каждой БС до МС: 1000;
- д) способ измерения дистанции между БС и МС: «запросно-ответная» система;
- е) вводимые погрешности «запросно-ответной» системы:
 - 1) погрешность определения времени запаздывания сигнала на участке пути от БС до МС: от минус 35 до плюс 35%;
 - 2) погрешность определения времени запаздывания сигнала на участке пути от БС до МС: от минус 35 до плюс 35%.

Целью моделирования является сравнение полученных результатов определений МП МС с использованием отсеивания грубых погрешностей и без.

Результаты моделирования представлены в приложении В.

Территориальное расположение БС и МС представлено на рисунке 31.

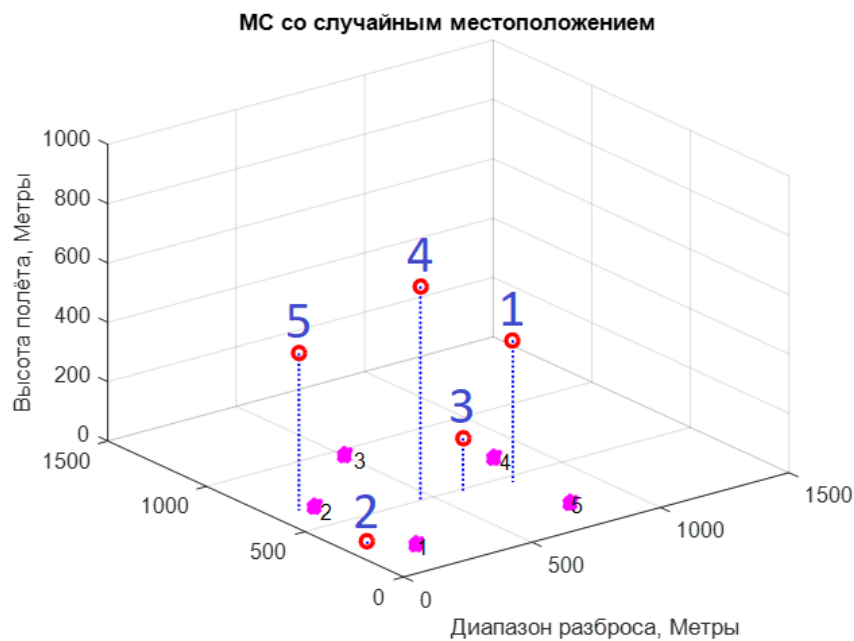


Рисунок 31 – Территориальное расположение БС и МС

Описание полученных результатов

Как видно из представленных результатов, отсеивание грубых погрешностей способствует уменьшению СКО.

Среднеарифметическое СКО по всем МС:

- а) дальномерный без отсеивания – 94,5 м;
- б) дальномерный с отсеиванием – 73,6 м;
- в) разностно-дальномерный без отсеивания – 1499,3 м;
- д) разностно-дальномерный с отсеиванием – 338,9 м.

Таким образом, отсеивание грубых погрешностей в случае дальномерного метода уменьшило СКО на 20,9 м, а в случае разностно-дальномерного метода на 1160,4 м.

Вывод по полученным результатам

Исходя из полученных данных можно сделать вывод – отсеивание грубых погрешностей дает существенную прибавку к точности проведенных испытаний. Особенно это сказывается на разностно-дальномерном методе, где СКО уменьшилось более чем в четыре раза.

Особая актуальность отсеивания грубых погрешностей в разностно-дальномерном методе обусловлено геометрией гипербол, которые не являются замкнутыми фигурами, по

сравнению со сферой, в связи с чем возможно получение результатом ОМП МС отличающихся на порядки, по сравнению с истинными МП МС.

6.3 Сравнение результатов ОМП МС стандартного и предлагаемого метода при различных МП МС

Главным решением работы является предлагаемый дальномерный и разностно-дальномерный метод ОМП МС, использующий алгоритм комбинаторного отсеивания возможных МП МС в зависимости от принадлежности к пересечению секторам БС.

В качестве демонстрации особенной работы предлагаемых методов была смоделирована следующая обстановка:

- а) количество МС: 2;
- б) количество БС: 4;
- в) количество секторов у БС: 8;
- д) количество измерений от каждой БС до МС: 500;
- е) способ измерения дистанции между БС и МС: «запросно-ответная» система;
- ж) вводимые погрешности «запросно-ответной» системы:
 - 1) погрешность определения времени запаздывания сигнала на участке пути от БС до МС: от минус 60 до плюс 60%;
 - 2) погрешность определения времени запаздывания сигнала на участке пути от БС до МС: от минус 60 до плюс 60%.

Целью моделирования является наглядное представление работы предлагаемого метода и сравнение полученных результатов ОМП со стандартным методов.

Результаты моделирования представлены в приложении Г.

Территориальны расположения базовых станций и имеющихся МС представлены на рисунках 32 и 33.

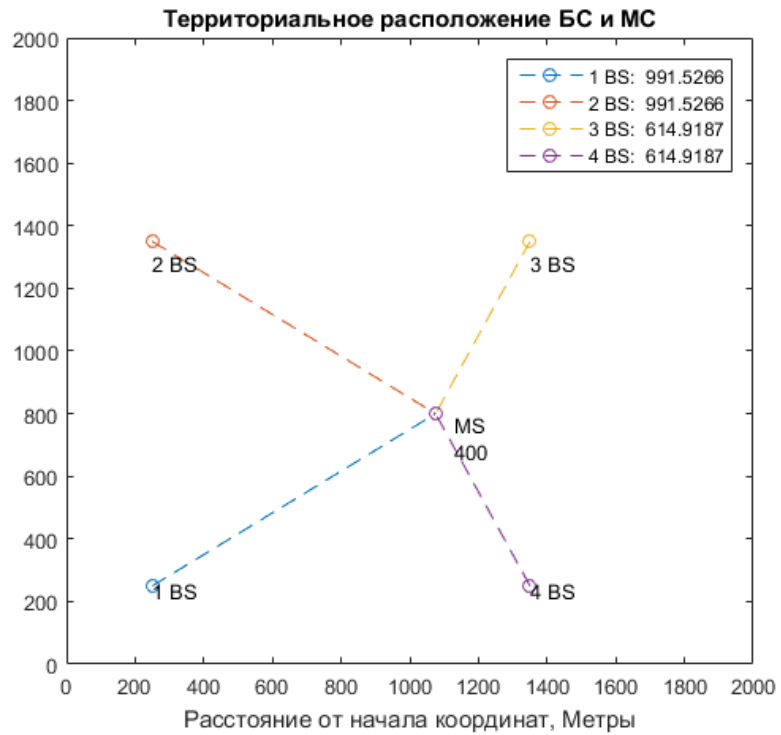


Рисунок 32 – Территориальное расположение БС и первой МС

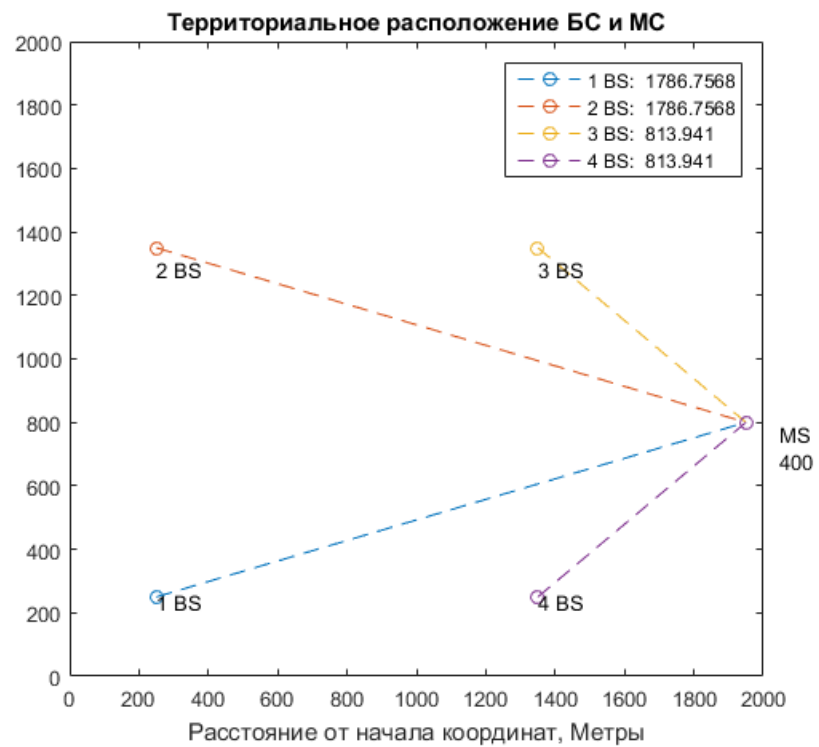


Рисунок 33 – Территориальное расположение БС и второй МС

Пересечение секторов БС в предлагаемом методе для первой и второй МС представлено на рисунках 34 и 35.

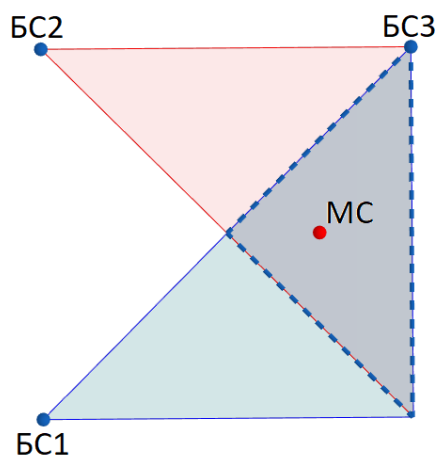


Рисунок 34 – Пересечение секторов БС при ОМП первой МС

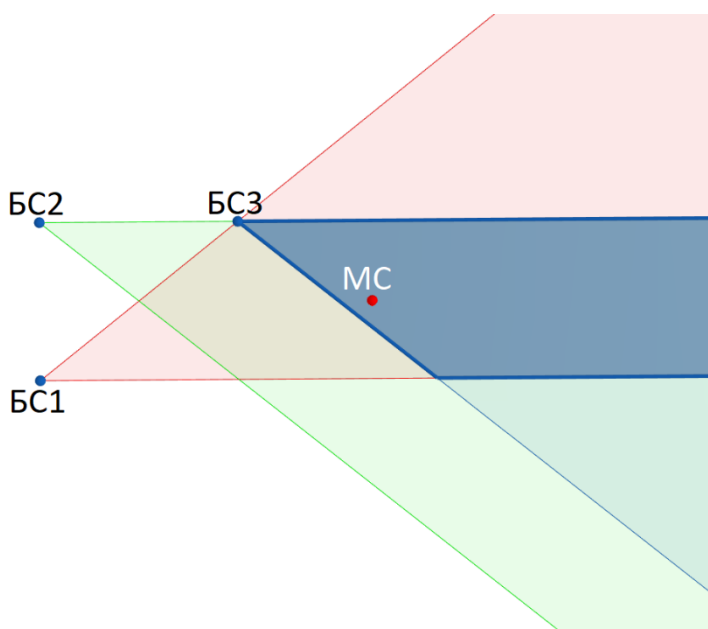


Рисунок 35 – Пересечение секторов БС при ОМП второй МС

Описание полученных результатов

Как видно из представленных результатов, пересечение секторов БС оказывает большое влияние на результат предлагаемого метода.

Рассчитанное СКО для имеющихся МС:

- а) дальномерный для первой МС – 197,4 м;
- б) предлагаемый дальномерный для первой МС – 131,6 м;

в) дальномерный для второй МС – 275,7 м;

д) предлагаемый дальномерный для второй МС – 234,9 м.

В случае для первой МС использование предлагаемого метода позволило уменьшить СКО на 33,31%, а в случае второй МС на 14,78%.

Вывод по полученным результатам

Для первой МС пересечение секторов БС представляет собой замкнутую фигуру, в отличие от пересечений секторов для второй МС.

Можно сказать, что меньшее СКО для первой МС обусловлено именно замкнутой фигурой, в то время как для второй МС фигура, по своей сути, имеет бесконечную площадь. Более того, в случае для второй МС предлагаемый метод отсеивает предполагаемые МП МС, находящиеся чуть западнее, чем истинное МП МС.

Таким образом, для достижения максимальной эффективности предлагаемого метода необходимо, чтобы фигура пересечения секторов БС являлась замкнутой. Это достигается таким МП МС, при котором сектора БС будут направлены друг навстречу другу, что и образует замкнутую фигуру. Если МС находится в одном направлении от всех БС, то велика вероятность получения незамкнутой фигуры, схожей с представленной на рисунке 35.

7 Комплексное сравнение алгоритмов ОМП

Комплексное сравнение представляет собой моделирование с разным количеством БС и разной величиной разброса при измерении дистанции, в которых сравниваются результаты ОМП МС всех имеющихся методов модели.

Моделирование будет проведено в виде трех отдельных таблиц, для каждой из которых будет свое количество БС. В рамках каждой из таблиц будут представлены различные интервалы величины разброса при измерении дистанции от БС до МС. Во всех имеющихся таблицах будут одинаковые случайно сгенерированные МС.

Таким образом, предлагаемая методика моделирования позволит показать результаты ОМП для каждого метода в динамике при:

- а) увеличении количества БС;
- б) увеличении величины разброса.

Для сравнения методов была смоделирована следующая обстановка:

- а) количество МС: 5;
- б) количество БС для разных таблиц:
 - 1) для первой: 4;
 - 2) для второй: 5;
 - 3) для третьей: 6
- в) количество секторов у БС: 12;
- д) количество измерений от каждой БС до МС: 1000;
- е) способ измерения дистанции между БС и МС: «запросно-ответная» система;
- ж) вводимые погрешности «запросно-ответной» системы:
 - 1) погрешность определения времени запаздывания сигнала на участке пути от БС до МС для разных диапазонов:
 - а) для первого от минус 5 до плюс 5%;
 - б) для второго от минус 20 до плюс 20%;
 - с) для третьего от минус 35 до плюс 35%.
 - 2) погрешность определения времени запаздывания сигнала на участке пути от МС до БС для разных диапазонов:
 - а) для первого от минус 5 до плюс 5%;
 - б) для второго от минус 20 до плюс 20%;

с) для третьего от минус 35 до плюс 35%.

Целью моделирования является комплексное сравнение результатов ОМП МС всех методов модели при различных параметрах.

Результаты моделирования представлены в приложениях Д, Е, Ж.

Территориальные расположения БС и МС для первой, второй и третьей комплексной таблицы представлены на рисунках 36, 37 и 38 соответственно.

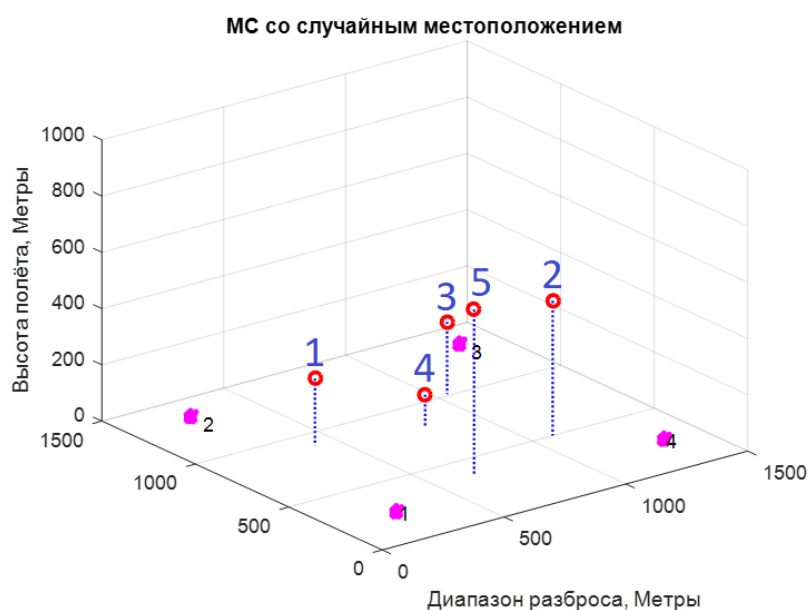


Рисунок 36 – Территориальное расположение БС и МС в первой комплексной таблице

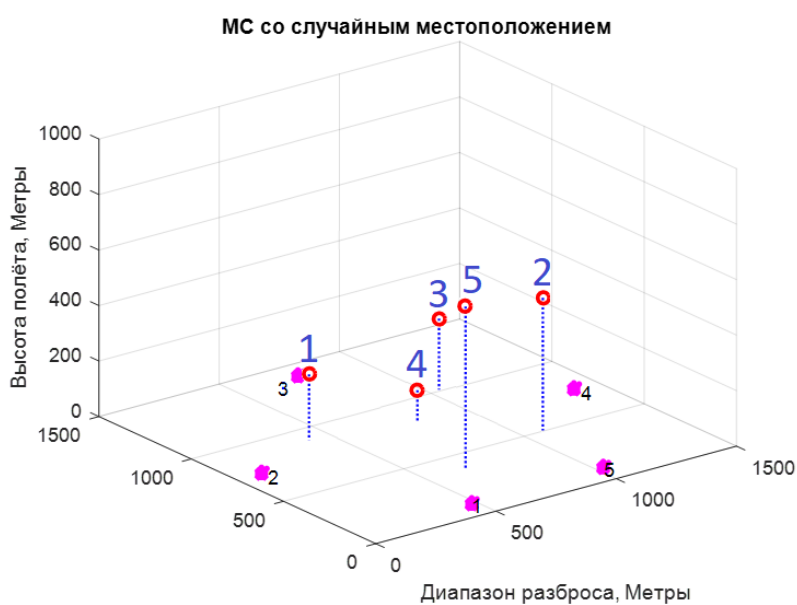


Рисунок 37 – Территориальное расположение БС и МС во второй комплексной таблице

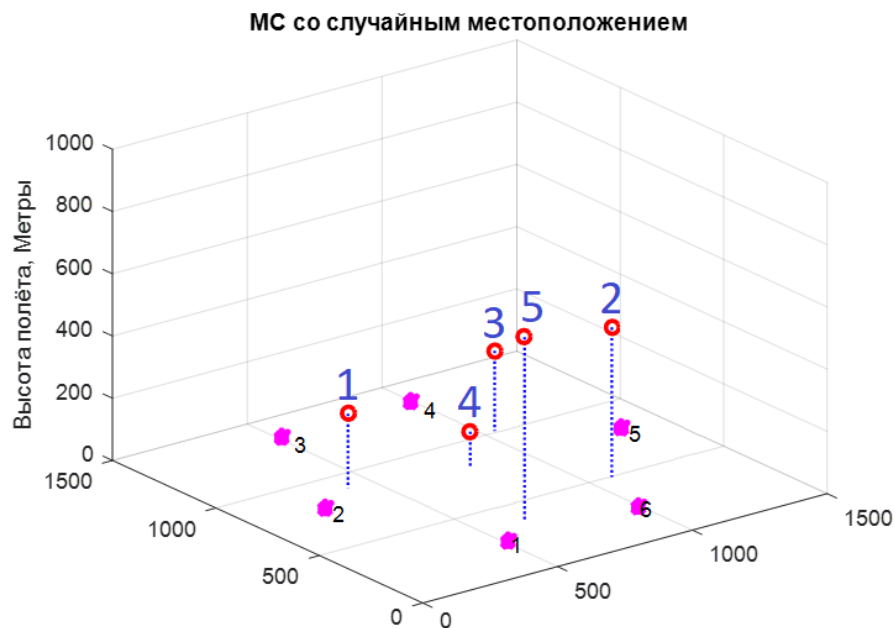


Рисунок 38 – Территориальное расположение БС и МС в третьей комплексной таблице

7.1 Описание полученных результатов

Полученные результаты моделирования можно рассматривать в двух плоскостях.

Первая плоскость – это изменение результатов ОМП при увеличении количества БС. Данные этой плоскости позволяют анализировать, как меняются результаты ОМП различных методов при меньших и больших количествах БС.

Вторая плоскость – это изменение погрешности определения времени запаздывания сигнала. Эти данные показывают, как меняются результаты ОМП различных методов при увеличении погрешности, т.е. насколько методы «устойчивы» к ошибкам.

На основе плоскости увеличения количества БС были составлены данные о результатах СКО и количестве определенных МП МС. Данные приведены в таблице 1 и таблице 2 соответственно.

Таблица 1 – Зависимость СКО от количества БС

Метод	Количество БС		
	4 БС	5 БС	6 БС
Дальномерный	53,9	43,1	39,2
Комбинаторный дальномерный	57,0	45,7	40,6
Предлагаемый дальномерный	40,4	33,7	29,3
Разностно-дальномерный	1856,9	618,2	240,2
Комбинаторный разностно-дальномерный	-	1423,9	639,4
Предлагаемый разностно-дальномерный	161,9	1589,2	1526,9

Таблица 2 – Зависимость определенных МП МС от количества БС

Метод	Количество БС		
	4 БС	5 БС	6 БС
Дальномерный	384	396	410
Комбинаторный дальномерный	421	438	440
Предлагаемый дальномерный	371	382	412
Разностно-дальномерный	156	83	96
Комбинаторный разностно-дальномерный	-	347	428
Предлагаемый разностно-дальномерный	59	114	211

В полученных таблицах отображается динамика результатов ОМП МС при увеличении количества БС от четырех до шести. Результирующие данные были получены арифметическим средним по всем диапазонам погрешностей в рамках каждой из таблиц.

Под результатами считаем два параметра:

- а) σ – среднеквадратическое отклонение полученной дальности от начала координат до определенного МП МС, м;
- б) n – количество определенных МП МС, т.е. другими словами – количество данных в выборке.

Комбинаторный разностно-дальномерный метод не имеет результатов при 4 БС, поскольку минимальное количество БС для работы метода составляет 5 БС.

На основе имеющихся таблиц были составлены графические зависимости, показанные на рисунках 39 и 40 соответственно. Изображения были разделены на два семейства методов – дальномерные и разностно-дальномерные для лучшего восприятия.

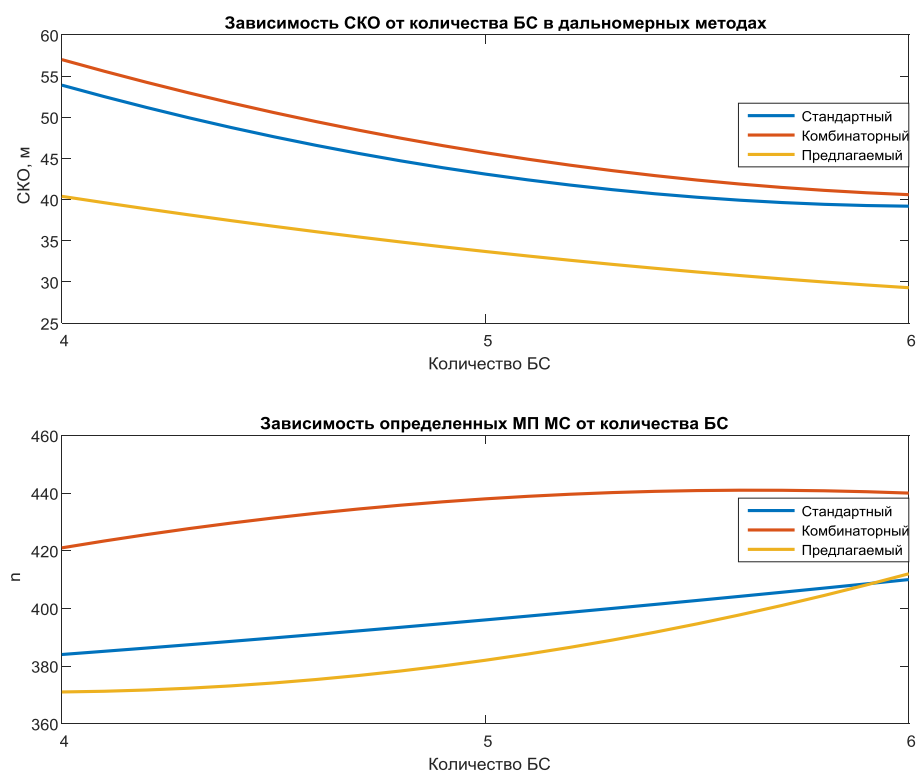


Рисунок 39 – Зависимость результатов от количества БС в дальномерных методах

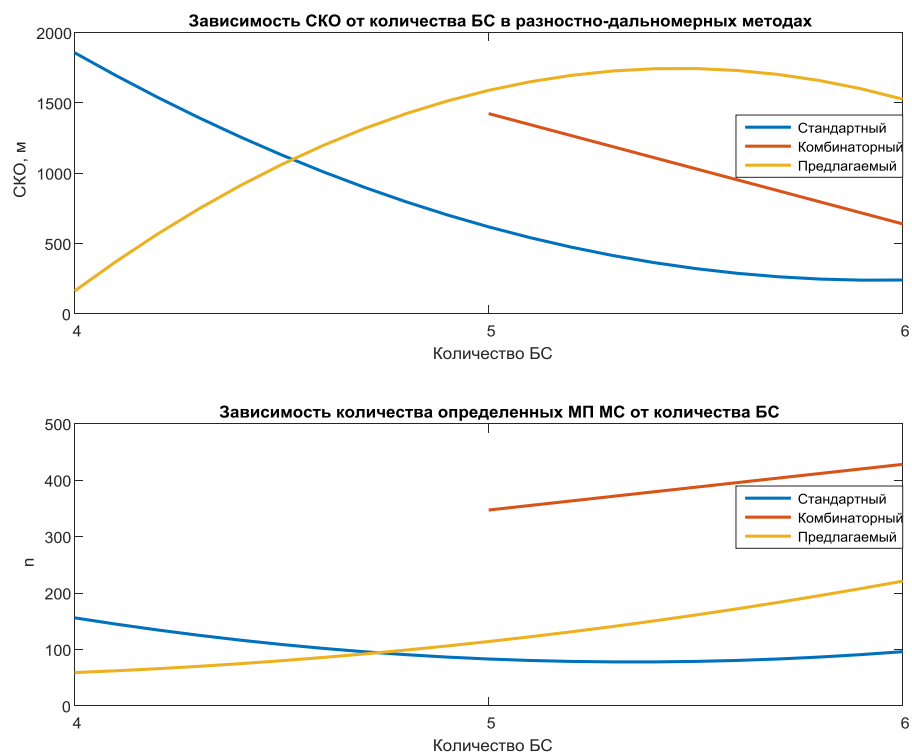


Рисунок 40 – Зависимость результатов от количества БС в разностно-дальномерных методах

На основе плоскости увеличения погрешности определения времени запаздывания сигнала были составлены данные о результатах СКО и количестве определенных МП МС. Данные приведены в таблице 3 и таблице 4 соответственно.

Таблица 3 – Зависимость СКО от погрешности определения времени запаздывания сигнала

Метод	Погрешность определения времени запаздывания сигнала		
	5%	20%	35%
Дальномерный	11,6	45,7	78,9
Комбинаторный дальномерный	11,7	47,0	84,5
Предлагаемый дальномерный	11,3	37,2	55,1
Разностно-дальномерный	569,0	844,9	1301,5
Комбинаторный разностно-дальномерный	487,8	1268,0	1339,0
Предлагаемый разностно-дальномерный	605,7	892,7	1809,2

Таблица 4 – Зависимость определенных МП МС от погрешности определения времени запаздывания сигнала

Метод	Погрешность определения времени запаздывания сигнала		
	5%	20%	35%
Дальномерный	435	397	358
Комбинаторный дальномерный	438	432	428
Предлагаемый дальномерный	438	406	321
Разностно-дальномерный	202	82	50
Комбинаторный разностно-дальномерный	422	383	357
Предлагаемый разностно-дальномерный	268	88	41

В полученных таблицах отображается динамика результатов ОМП МС при увеличении погрешности определения времени запаздывания сигнала от 5% до 35%. Результирующие данные были получены арифметическим средним по всем таблицам с разным количеством БС в рамках каждого из диапазонов погрешностей.

На основе имеющихся таблиц были составлены графические зависимости, показанные на рисунках 41 и 42 соответственно. Изображения были разделены на два семейства методов – дальномерные и разностно-дальномерные для лучшего восприятия.

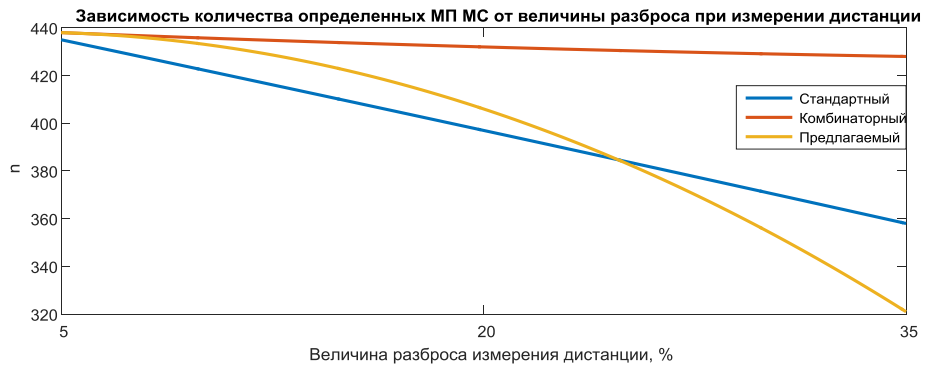
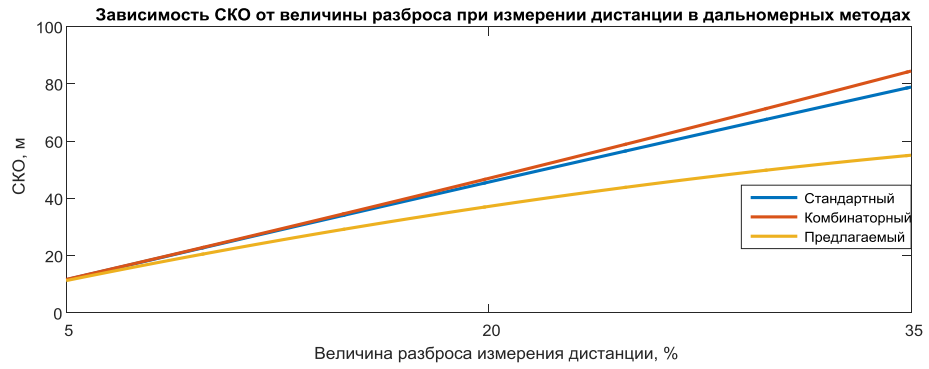


Рисунок 41 – Зависимость результатов от величины разброса в дальномерных методах

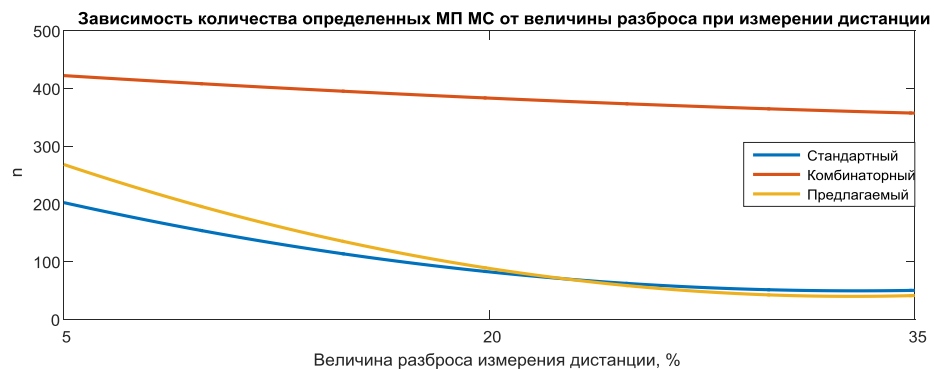
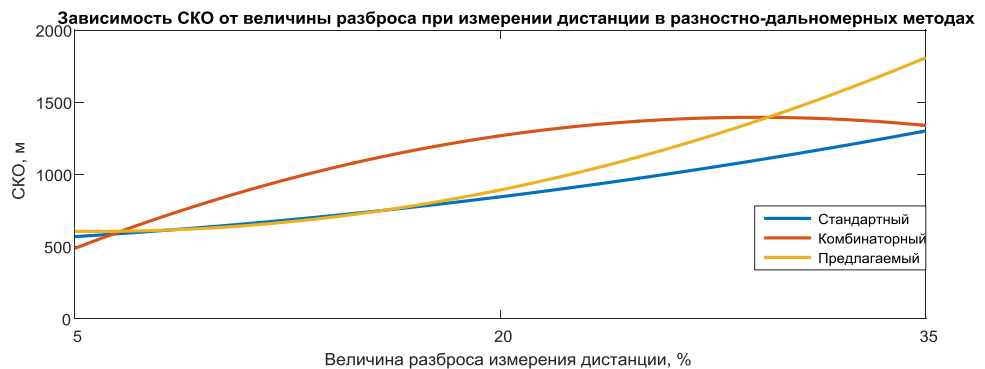


Рисунок 42– Зависимость результатов от величины разброса в разностно-дальномерных методах

7.2 Описание полученных результатов по семейству дальномерных методов

Зависимость СКО и количества определенных МП МС от количества БС представлены на рисунке 38.

Как видно из результирующего графика, у комбинаторного и стандартного метода при увеличении количества БС плавно уменьшается СКО, но при этом количество определенных МП МС у комбинаторного метода уже при 5 БС достигает максимума – 440 определений. Оба метода имеют предсказуемо схожие зависимости, поскольку комбинаторный метод включает в себя стандартный.

Предлагаемый метод имеет видимо меньшее СКО, по сравнению с остальными методами. При этом работа алгоритма полностью раскрывается при 6 БС, когда предлагаемый метод начинает превосходить стандартный по количеству решений. Большой прирост количества решений при увеличении количества БС связан с увеличением комбинаторного ряда, позволяющего находить больше предполагаемых МП МС в составе каждого определения.

Краткий вывод: при 6 БС предлагаемый метод имеет СКО меньше на 9,9 м, и при этом большее количество решений. Предлагаемый комбинаторный метод быстро достигает максимума возможных ОМП и при этом при 6 БС имеет СКО больше всего на 1,1 м.

Зависимость СКО и количества определенных МП МС от величины погрешности определения времени запаздывания сигнала представлены на рисунке 40.

Как видно из результирующего графика, все дальномерные начинают примерно с одного значения СКО – около 11,5 м при величине погрешности 5%. Далее комбинаторный и стандартный метод имеют видимо более резкую характеристику увеличения СКО, в отличие от предлагаемого метода.

По зависимости количества определенных МП МС видно, что комбинаторный метод лишь незначительно «потерял» в количествах решений, в отличие от остальных методов. Отсюда и вытекает видимая зависимость комбинаторного метода – большее количество решений, и, соответственно, большее СКО, по сравнению со стандартным методом.

Предлагаемый метод при увеличении величины погрешности «теряет» больше решений, чем остальные методы – это один из основных принцип алгоритма, а именно – фильтрация предполагаемых МП МС, не входящих в область пересечения секторов БС. Другими словами, та часть «потерянных» решений – это именно тот пласт данных, который и увеличил СКО стандартного и дальномерного метода, по сравнению с предлагаемым.

Краткий вывод: в случае предлагаемого метода меньшее количество решений означает не «потерянные», а «отброшенные» алгоритмом решения, что и позволяет предлагаемому методу иметь меньшую тенденцию к увеличению СКО, при увеличении разброса измерения дистанции.

7.3 Описание полученных результатов по семейству разностно-дальномерных методов

Зависимость СКО и количества определенных МП МС от количества БС представлены на рисунке 39.

Как видно из результирующего графика, у комбинаторного и стандартного метода при увеличении количества БС резко снижается СКО, но при этом количество определенных МП МС у комбинаторного метода стремится к возможному максимуму. Стоит заметить, что начальные отсчеты СКО у стандартного и комбинаторного метода слишком велики - 1857 и 1424 метра соответственно. Количество определенных МП МС у стандартного метода находится на низком уровне – в среднем 112 МП. Это объясняется тем, что при большем количестве БС с одной стороны увеличивается число пересечений гипербол, что должно давать большее количество решений, а с другой стороны – увеличивается вероятность того, что ветви одной или нескольких из гипербол не будут пересекаться с остальными.

Предлагаемый метод имеет резкий прирост СКО при переходе от 4 к 5 БС. Это объясняется тем, что на 4 БС предлагаемый разностно-дальномерный метод вовсе не имеет комбинаторного ряда. Таким образом, при 4 БС предлагаемый метод имеет принцип работы схожий, со стандартным методом, но при это обладает фильтрацией по пересечению секторов БС. Именно поэтому количество определенных МП МС при 4 БС у предлагаемого метода меньше, также, как и СКО.

Работа предлагаемого комбинаторного метода раскрывается на 5 БС, когда у метода появляется комбинаторный ряд, соответственно вместе с этим увеличиваются количество определенных МП МС. Вполне очевидным является тот факт, что площадь, образуемая пересечением секторов антенн БС, далеко не всегда является замкнутой фигурой (такой случай изображен на рисунке 35). Дальномерный метод способен сам себя ограничить тем, что сфера является замкнутой фигурой, в отличии от гиперболоида. Таким образом, предлагаемый разностно-дальномерный метод находит множество предполагаемых МП МС, которые находятся крайне далеко от истинного МП МС, но при этом находятся в стороне распространения бесконечной площади пересечения секторов и, следовательно, алгоритм не

способен отфильтровать такие результаты. Итогом работы предлагаемого метода является СКО выше 1500 м, что совершенно недопустимо при решении задач определения местоположения.

Краткий вывод: предлагаемый алгоритм при использовании разностно-дальномерного метода не способен корректным образом отфильтровывать результаты предполагаемых МП МС.

Зависимость СКО и количества определенных МП МС от величины погрешности определения времени запаздывания сигнала представлены на рисунке 41.

Как видно из результирующего графика, все разностно-дальномерные методы начинают примерно с одного значения СКО – около 500 м при величине погрешности 5%. Далее все из имеющихся методов имеют резкую характеристику увеличения СКО, при одновременном уменьшении количества определенных МП МС, кроме комбинаторного метода.

Таким образом получается, что при больших величинах разброса стандартный и предлагаемый метод имеют малое количество определенных МП МС – около 45, и при этом большое СКО, что свидетельствует о больших неточностях при определении МП. Комбинаторный метод имеет малый спад количества определенных МП, но при этом в их составе много результатов с большим отклонением, что не позволяет выгодно выделить этот метод.

Краткий вывод: семейство разностно-дальномерных методов мало устойчиво к ошибкам определения времени запаздывания сигнала.

7.4 Выводы по разделу

По результатам проведенного комплексного моделирования можно сделать вывод, что предложенный алгоритм комбинаторного перебора решений и их отбора по признаку принадлежности к пересечению секторам антенн БС дает видимую прибавку к точности ОМП МС в дальномерном методе. Применение алгоритма в рамках разностно-дальномерного метода не дает никаких прибавок к точности ОМП, в связи с вероятной незамкнутой фигурой пересечения секторов.

Предложенный алгоритм комбинаторных вычитаний БС с целью определения большего количества МП МС хорошо показал себя, как надстройка над дальномерным или разностно-дальномерным методом.

Данные, полученные в отношении стандартных алгоритмов, показывают, что разностно-дальномерный метод намного менее устойчив к погрешностям, в отличии от дальномерного метода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При выполнении выпускной квалификационной работы было разработано два алгоритма определения местоположения МС.

Принцип работы первого алгоритма заключается в разделении уравнений БС на комбинаторные ряды и в фильтрации предполагаемых МС по признаку принадлежности к фигуре, образованной путем пересечения секторов антенн БС. Разработанный алгоритм может быть реализован на базе дальномерного метода, что позволит получить видимую прибавку к точности определения местоположения МС.

Результаты комплексного моделирования показали, что при 4 БС разработанный алгоритм имеет СКО дальности местоположения МС относительно начала координат 40,4 метра, в то время как стандартный дальномерный метод 53,9 метра. При 6 БС СКО разработанного алгоритма 29,3 метра, а стандартного дальномерного – 39,2 метра. Таким образом, разработанный алгоритм имеет меньшее СКО при 4 БС на 13,5 метров, а при 6 БС – на 9,6 метров. При этом *среднее расстояние от начала координат до истинного местоположения МС* составляет 1177 метра.

Что касается количества определенных местоположений МС, разработанный алгоритм определил 371 местоположение при 4 БС и 412 при 6 БС. Стандартный дальномерный определил 384 местоположений МС при 4 БС и 410 при 6 БС. Эти цифры демонстрируют работу алгоритма – *при большем количестве определенных местоположений МС удалось получить меньшее СКО.*

Рассмотрение результатов моделирования в плоскости увеличения погрешности определения времени запаздывания сигнала показало, что и разработанный и стандартный алгоритм при погрешности в 5% имеют практически одинаковое СКО – 11 метров. Но при 35% погрешности СКО разработанного алгоритма 55,1 метра, а СКО стандартного алгоритма – 78,9 метра. Это говорит о том, что *разработанный метод более «устойчив» к увеличению погрешности*, в связи с применяемой фильтрацией предполагаемых местоположений МС.

По результатам моделирования было выявлено, что использование разработанного алгоритма на базе разностно-дальномерного метода не имеет смысла, в связи с не замкнутостью гиперблоида. Геометрически это объясняется тем, что разработанный алгоритм в рамках комбинаторного перебора находит те решения, которые располагаются далеко в пределах

бесконечной зоны пересечения секторов БС. Результаты этих местоположений МС отрицательно влияют на общей точности работы алгоритма.

Второй алгоритм использует комбинаторное вычитание уравнений БС для нахождения дополнительных решений, когда стандартные алгоритмы определения местоположения их не имеют. Данный комбинаторный алгоритм может быть использован на базе и дальномерного и разностно-дальномерного метода. Моделирование показало, что алгоритм может получать дополнительные решения, при этом не значительно теряя в своей точности. Например, при погрешности определения времени запаздывания сигнала в 35% комбинаторный дальномерный алгоритм имеет 428 определенных МП МС, в то время как стандартный – 358. Но в то же время, СКО дальности местоположения МС относительно начала координат у комбинаторного алгоритма 84,5 метра, а у стандартного – 78,9 метра. Таким образом, имея на 70 определенных местоположений МС больше, СКО при этом увеличилось незначительно – на 5,6 метра.

Из проведенного исследования можно сделать вывод, что оба предлагаемых алгоритма могут быть реализованы в инфраструктуре сотовой сети связи. При этом разработанные алгоритмы не требуют никаких дополнительных мер по переоснащению существующего оборудования БС.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринкевич, А.В. Радионавигация: учеб.-метод. пособие / А.В. Гринкевич. – Минск: БГУИР, 2019. – 213 с.
2. Монаков, А.А. Теоретические основы радионавигации: учеб. пособие / А.А. Монаков. – СПб: СПбГУАП, 2002. – 70 с.
3. Радионавигационные системы: учеб. пособие / А.В. Баженов, Г.И. Захаренко, А.Н. Бережнов, К.Ю. Савченко. – Ставрополь: СВВАИУ(ВИ), 2007. – 202 с.
4. Reza Zekavat, R. Michael Buehrer, Handbook of Position Location: Theory, Practice and Advances, IEEE Press Series On Digital and Mobile, P. 89, 2012.
5. Guowei Shen, Rudolf Zetik, Reiner S. Thomä, Performance comparison of TOA and TDOA based location estimation algorithms in LOS environment, IEEE Xplore, PP. 71-78, April 2008.
6. K. W. Cheung, H. C. So, W.-K. Ma, Y. T. Chan, Least Squares Algorithms for Time-of-Arrival-Based Mobile Location, IEEE Transactions on Signal Processing, IEEE Xplore, P. 1121-1128, May 2004.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Блок-схема разработанной модели

Приложение Б. Сравнение результатов определений МП МС стандартных и комбинаторных методов

Приложение В. Сравнение результатов определений МП МС без отсеивания и с отсеиванием грубых погрешностей

Приложение Г. Сравнение результатов определений МП МС стандартного и предлагаемого метода при различных МП МС

Приложение Д. Комплексное сравнение результатов определений МП МС при 4 БС

Приложение Е. Комплексное сравнение результатов определений МП МС при 5 БС

Приложение Ж. Комплексное сравнение результатов определений МП МС при 6 БС

(эта страница для формирования оглавления, в ПЗ она не будет)