

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»**

Институт ИРЭ РТФ
Кафедра РТС
Специальность Радиоэлектронные системы

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Расчетно-пояснительная записка

Тема: Исследование методов автономного контроля целостности НАП

Дипломник	ЭР-15-07 <i>группа</i>	<i>Куликов</i> <i>подпись</i>	Куликов И.С. <i>фамилия, и., о.,</i>
Руководитель проекта	<i>должность</i>	<i>звание</i>	<i>подпись</i>
			Нагин И.А. <i>фамилия, и., о.,</i>
Руководитель проекта от предприятия	<i>должность</i>	<i>звание</i>	<i>подпись</i>
			<i>фамилия, и., о.,</i>
Консультант по экономической части	<i>должность</i>	<i>звание</i>	<i>подпись</i>
			<i>фамилия, и., о.,</i>
Консультант по разделу "Охрана труда"	<i>доц.</i> <i>должность</i>	<i>звание</i>	<i>подпись</i>
			<i>Королев И.В.</i> <i>фамилия, и., о.,</i>
Консультант	<i>должность</i>	<i>звание</i>	<i>подпись</i>
			<i>фамилия, и., о.,</i>
Рецензент	<i>должность</i>	<i>звание</i>	<i>подпись</i>
			<i>фамилия, и., о.,</i>
 "Проект допущен к защите"			
Зав. кафедрой	проф. д.т.н. <i>звание</i>	<i>подпись</i>	Перов А.И. <i>фамилия, и., о.,</i>
Дата			20 ____ г

Отзыв

на дипломную работу

студента группы ЭР-15-07 Куликова И.С.

на тему: «Исследование методов автономного контроля целостности НАП»

Дипломная работа Куликова И.С. посвящена исследованию методов автономного контроля целостности (АКЦ) НАП. Методы АКЦ являются важной составляющей приемника СРНС, позволяющей обеспечивать требуемые характеристики системы, такие как достоверность и целостность.

Куликовым И.С. был проведен обзор литературы на данную тематику, в том числе и зарубежной. Для исследования были выбраны два метода АКЦ – метод Дэниша и метод М-оценки. Эти методы базируются на известном алгоритме решения навигационной задачи – методе наименьших квадратов (МНК).

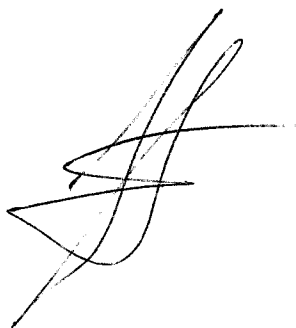
В работе Куликова И.С. описаны методы Дэниша, М-оценки и МНК. Куликовым И.С. разработана модель в среде Matlab, и написаны функции, реализующие эти методы. Было проведено моделирование работы этих методов. Исходными данными для моделирования являлась выборка реальных измерений псевдодальностей. Для моделирования отказов спутников в псевдодальности вносились преднамеренные ошибки. Моделирование работы методов проводилось для разного количества спутников в наблюдаемом созвездии. Получены результаты моделирования и проведено сравнение результатов работы методов по характеристикам:

- 1) вероятность правильного обнаружения отказавшего спутника;
- 2) вероятность ложной тревоги;
- 3) точность определения координат потребителя.

В результате проведенной работы Куликовым И.С. установлено, что метод Дэниша в ряде условий не хуже, а в прочих условиях превосходит методы М-оценки и МНК.

Куликов И.С. показал себя исполнительным, способным самостоятельно решать поставленные перед ним задачи студентом. Объем проведенного исследования соответствует предъявляемым к дипломным работам требованиям. Считаю, что Куликов И.С. справился с выполнением дипломной работы успешно.

Руководитель



Нагин И.А.

РЕЦЕНЗИЯ

на дипломную работу по направлению подготовки

специалистов "Радиотехника"

студента группы ЭР-15-07 Куликова И. С., выполненной на тему:

"Исследование методов автономного контроля целостности НАП"

Дипломная работа студента Куликов И. С. посвящена исследованию ряда возможных методов повышения целостности навигационного решения в навигационной аппаратуре спутниковой навигации. В представленной работе решены следующие задачи:

- проведён обзор известных вариантов построения алгоритмов автономного контроля целостности; в качестве объекта исследования выбраны два алгоритма — метод Дэниша и метод М-оценки;
- изучен принцип действия рассматриваемых алгоритмов;
- созданы имитационные модели метода Дэниша, метода М-оценки и стандартного алгоритма решения навигационной задачи с использованием метода наименьших квадратов; разработан метод тестирования, использующий модель с 13 входными наблюдениями от различных спутников, в часть которых вносится искажение;
- проведено сравнительное моделирование рассматриваемых методов автономного контроля целостности; в результате моделирования проанализированы ошибки определения местоположения при наличии аномалий в измерениях для каждого из методов;
- в результате моделирования показано, что стандартный алгоритм решения навигационной задачи на основе метода наименьших квадратов всегда даёт увеличение ошибки при появлении аномальных измерений; при относительно малом количестве наблюдений лучшие результаты даёт М-оценка, а при большом количестве наблюдений наименьшую ошибку демонстрирует алгоритм Дэниша.

В работе решены поставленные задачи, а именно сравнительное моделирование двух выбранных алгоритмов контроля целостности. Вместе с тем следует отметить ряд недостатков работы:

- в описании алгоритма Дэниша введена весовая матрица, однако не показано, как она используется в алгоритме;
- нет описания модели аномального измерения;
- отсутствует сравнение характеристик алгоритмов с идеальным возможным результатом — решением по методу наименьших квадратов с исключёнными аномальными измерениями в предположении, что известно, какие измерения являются аномальными.

Отмеченные недостатки является незначительными, а объём проведённого исследования соответствует предъявляемым требованиям. Считаю, что студент Куликов И. С. успешно справился с написанием дипломной работы по направлению "Радиотехника".

Доцент каф. РТС, к.т.н.



Болденков Е.Н.

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
«МЭИ»**

Институт ИРЭ РТФ Кафедра РТС

ЗАДАНИЕ

НА ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ (работу)

Направление 210300 Радиотехника
(номер и название)
Специальность 210304 Радиоэлектронные системы
(номер и название)
Специализация Радионавигационные системы и комплексы
(номер и название)

Тема проекта (работы): Исследование методов автономного контроля целостности НАП

Время выполнения проекта (работы) с _____ по _____ 2012 г.

Студент Куликов И.С. ЭР-15-07 *Куликов*
фамилия, и., о., группа, подпись,
Руководитель проекта *Ильинер* Нагин И. А. *[Подпись]*
должность, звание, фамилия, и., о., подпись

Руководитель от предприятия _____

Консультант _____
должность, звание, фамилия, и., о., подпись
доц. *доц.* *Лебедев И.Я.* *[Подпись]*

Консультант _____
должность, звание, фамилия, и., о., подпись
доц. *Королев И.В.* *[Подпись]*

Консультант _____
должность, звание, фамилия, и., о., подпись

Зав. кафедрой Перов А.И. *[Подпись]*
подпись, дата

Место выполнения проекта _____

1. Содержание задания и исходные данные к проекту (работе)

1. Изучить существующие методы автономного контроля целостности (АКЦ) приёмной аппаратуры СРНС.
2. Систематизировать известные методы АКЦ по принципам функционирования.
3. Разработать модели выбранных методов АКЦ.
4. Провести моделирование работы выбранных методов АКЦ и сравнить их по известным показателям качества.

Подпись руководителя проекта (работы) _____ Дата _____

2. Задание по разделу экологичность и безопасность проекта
(специализированная часть проекта)

Подпись консультанта *М.В.В.* _____ Дата _____
(специализированная часть проекта)

3. Задание по _____
(специализированная часть проекта)

Подпись консультанта _____ Дата _____
(специализированная часть проекта)

4. Задание по _____
(специализированная часть проекта)

Подпись консультанта _____ Дата _____

6. Перечень графического материала

- Таблицы сравнения выбранных методов АКЦ по показателям качества.

7. Рекомендуемая литература

1. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/
Под ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина. – 2-е изд.
исправ. – М. : ИПРЖР, 1999.
2. Knight N. L., Wang J. A Comparison of Outlier Detection Procedures
and Robust Estimation Methods in GPS Positioning. The University of
New South Wales, 2009.

Краткие сведения о дипломнике:

Домашний адрес

Телефон служебный домашний

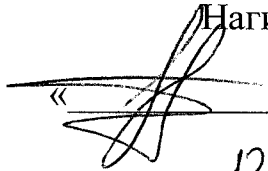
Примечание: Задание брошюруется вместе с пояснительной запиской и с отзывами руководителя и рецензента.

Служебная записка

Дипломная работа студента гр. ЭР-15-07 Куликова Ильи Сергеевича посвящена теоретическому исследованию алгоритмов автономного контроля целостности аппаратуры потребителя СРНС и не содержит никаких разработок схемотехнического или конструктивно-технологического характера, а также прикладного программного обеспечения.

В связи с этим прошу Вашего разрешения освободить студента гр. ЭР-15-07 Куликова Илью Сергеевича от выполнения экономической части дипломной работы.

Руководитель дипломной работы

Нагин И.А.
«» 2012 г.
12.11.2012

Заключение


Дипломная работа студента гр. ЭР-15-07 Куликова Ильи Сергеевича носит исключительно теоретический характер и не содержит данных, позволяющих выполнить экономическую часть на требуемом для дипломного проекта уровне.

В связи с этим студент гр. ЭР-15-07 Куликов Илья Сергеевич может быть освобожден от выполнения экономической части дипломной работы.

Руководитель экономической части

дипломных проектов на РТФ,

доцент кафедры ЭКО

 Лебедев И.П.
«12 ноября 2012 г.» 2012 г.

Содержание

1. Введение	10
2. Обзор литературы	12
3. Описания методов	15
3.1 Метод наименьших квадратов.....	15
3.2 Метод Дэниша.....	17
3.3 Метод М-оценки.....	18
4. Моделирование	19
4.1 Отсутствие аномальных ошибок в измерениях ПД.....	20
4.2 Аномальные ошибки содержатся в измерениях ПД с начала наблюдения	21
4.3 Аномальные ошибки появляются в измерениях ПД в течение работы приёмника	24
4.4 Аномальные ошибки появляются в измерениях ПД в течение работы приёмника на некоторое время.....	26
Заключение	29
Список литературы	30
Приложение 1. Зависимости, полученные в результате моделирования	31
Приложение 2. Текст программы моделирования.....	93
Приложение 3. Охрана труда.....	101

1. Введение.

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) глубоко проникли в повседневную жизнь. Количество разнообразных применений спутниковой навигации огромно. Поэтому к СРНС предъявляются высокие требования по достоверности измерений. К примеру, безопасность полётов летательных аппаратов (ЛА) во многом зависит от достоверности и целостности навигационных измерений. Под достоверностью навигационной информации понимается способность навигационной системы поддерживать с заданной вероятностью в определённый промежуток времени в каком-либо районе в требуемом пределе свои характеристики.

Целостность навигационной системы является составной и главной частью достоверности навигационных измерений. Под целостностью понимается способность системы своевременно предупредить о том, что её не следует применять для целей навигации.

В последнее время вопросам целостности навигационных систем и навигационного контура уделяется большое внимание, что делает эту характеристику навигационных систем сопоставимой по своему значению с точностными характеристиками систем и комплексов. Тем самым целостность становится одной из основных характеристик.

Из-за невозможности осуществления непрерывного контроля функционирования навигационного спутника (НС), контроль целостности целесообразно проводить всеми доступными средствами: наземным контрольным сегментом, геостационарными спутниками, аппаратурой контрольных станций, собственно в аппаратуре потребителя (АП). Под отказом спутника понимается такое его состояние, при котором использование радионавигационных параметров, определяемых по сигналу этого НС, ухудшает точность определения координат и времени потребителем до значения, превышающего заданный порог.

Основные характеристики контроля целостности – способность обнаружить недопустимое ухудшение в работе системы (для СРНС это отказавший спутник) с заданной вероятностью и время запаздывания с оповещением (от момента начала неправильного функционирования до момента его обнаружения). Российский радионавигационный план к численным характеристикам целостности радионавигационных систем относит вероятность оповещения потребителей при нарушении работы системы в пределах допустимого интервала времени, причём для воздушных потребителей целостность радионавигационной системы на различных этапах полёта должна быть не хуже 0,999. На различных этапах полёта порог обнаружения нецелостности СРНС и время оповещения об этом потребителей будут существенно различаться, так как они связаны с требованием к безопасности полётов.

В данной работе будет проведено описание нескольких известных методов решения навигационной задачи в навигационной аппаратуре потребителя. Также приведенные методы будут реализованы в среде

MATLAB, промоделированы с использованием реальной выборки данных и сравнены по средней ошибке в определении координат. Часть методов позволяет отбраковывать измерения некоторых спутников, поэтому мы можем считать их методами контроля целостности, и сравнивать по таким характеристикам, как вероятность правильного обнаружения отказавшего спутника и вероятность ложной тревоги. Под правильным обнаружением будет пониматься ситуация, когда из полученных измерений исключены измерения, относящиеся к спутникам, содержащим ошибку в измерении. Под ложной тревогой будет пониматься ситуация, когда вместе с или вместо измерений, относящихся к спутникам, содержащим ошибку в измерении, исключаются измерения, относящиеся к работоспособным спутникам.

2. Обзор литературы.

Алгоритмы контроля разделяются на [1]:

1. Методы оценок – методы, предполагающие сбор и соответствующую обработку всей необходимой информации в некоторый момент времени.
 - метод максимального отличия решения [2]. При наличии сигналов от N спутников ($N > 4$) рассматриваются координаты, полученные по всем комбинациям из $N-1$ сигналов от НС. Максимальное расстояние в горизонтальной плоскости между любыми двумя из этих N решений используется в качестве тестовой статистики.
 - метод сравнения дальности [3]. При наличии сигналов по всем комбинациям из $N-1$ НС вычисляют координаты потребителя, каждое значение которых учитывается при прогнозе дальности до НС, сигнал которого не используется в данном решении задачи навигационно-временных определений (НВО). В качестве тестовой статистики используются разности между спрогнозированными дальностями и измеренными псевдодальностями (ПД) до НС.
 - метод сравнения местонахождения [3]. В нём вычисляются координаты по всем комбинациям из $N-1$ НС, а также по всем НС. В качестве тестовой статистики применяют разности между полученными таким образом координатами.
 - метод невязки по методу наименьших квадратов [4]. По ПД до всех видимых НС по методу наименьших квадратов вычисляют координаты, а по ним – прогнозируемые дальности до всех НС. Разность между прогнозируемыми и измеренными дальностями нужна для формирования тестовой статистики.
 2. Фильтрационные методы – методы, основывающиеся на представлении отказов НС как того или иного изменения шумовых составляющих наблюдения.
 - метод, описанный в [6], предполагает, что отказы НС проявляются в виде линейного нарастания во времени погрешностей измерения ПД. Для оценки таких погрешностей применяют банк калмановских фильтров, каждый из которых настроен на определённый вид нарастания погрешностей. Получаемые при работе фильтра невязки используют для формирования тестовой статистики. Данный метод требует значительных вычислений и обнаруживает отказы НС приблизительно через 5 ... 10 с.
 - метод, описанный в [7], основан на предположении, что у отказавшего НС увеличиваются шумы наблюдения. Он не предполагает использование банка фильтров Калмана, поэтому с точки зрения вычислительных затрат эффективнее метода, описанного в [6], а по характеристикам почти аналогичен ему.
- Рассматривая автономный контроль целостности (АКЦ) как задачу детектирования и идентификации выброса (аномального(-ых) измерения(-

ий) псевдодальности) в исходной выборке, можно привести метод, описанный в [5], где идёт речь об использовании критерия Уилкоксона для этих целей. Тестовая статистика при этом представляет собой невязку измеренных и расчётных дальностей.

В [8] проводится сравнение методов АКЦ, причём методы разделяются на:

- отбраковка аномальных измерений, причём измерение с максимальной тестовой статистикой большей, чем порог, считается аномальным измерением.
- робастные методы, среди которых:
 - метод Дэниша – метод основан на использовании метода наименьших квадратов (МНК) с учётом весовой матрицы, которая итеративно изменяется. Выбросы имеют нулевой вес. Оцениваемые параметры либо оставляются без изменений, либо отбраковываются как выбросы.
 - метод наименьших модулей – заключается в минимизации суммы модулей невязок. Из-за отсутствия возведения в квадрат, акцент на выбросах меньший, чем в случае с МНК.
 - метод наименьших квадратов медиан – минимизируется медиана квадрата невязок.
 - метод наименьших обработанных квадратов – отличается от МНК тем, что из минимизируемой суммы исключаются наибольшие квадраты невязок.
 - М-оценка – метод основан на минимизации функции невязок, которая является симметричной функцией и имеет единственный минимум в нуле. Далее эта функция дифференцируется, и её производная заменяется весовой функцией, которая увеличивается, если увеличивается когда увеличивается размер невязок.

Все возможные исходы разбиты на группы:

- a) не исключён ни один из выбросов
- b) некоторые выбросы исключены
- c) исключены некоторые выбросы и некоторые нормальные измерения
- d) исключены все выбросы и некоторые нормальные измерения
- e) исключены все выбросы и не исключено ни одного нормального измерения

Таблица 2.1. Результаты моделирования при одном аномальном измерении согласно [8]

	3 σ ...6 σ						6 σ ...9 σ					
	a	b	c	d	e	d+e	a	b	c	d	e	d+e
1	74%	0%	1%	1%	24%	24%	30%	0%	4%	3%	63%	66%
2	36%	0%	11%	4%	48%	53%	7%	0%	11%	13%	69%	82%
3	36%	0%	16%	9%	39%	48%	6%	0%	14%	27%	53%	80%
4	36%	0%	19%	9%	36%	45%	6%	0%	19%	27%	48%	75%
5	43%	0%	15%	4%	39%	43%	9%	0%	15%	13%	63%	76%
6	43%	0%	10%	0%	47%	48%	7%	0%	8%	1%	84%	85%

Таблица 2.2. Результаты моделирования при двух аномальных измерениях согласно [8]

	3 σ ...6 σ						6 σ ...9 σ					
	a	b	c	d	e	d+e	a	b	c	d	e	d+e
1	50%	28%	8%	0%	14%	14%	13%	14%	25%	2%	46%	49%
2	18%	28%	25%	2%	26%	28%	3%	7%	32%	9%	48%	58%
3	17%	19%	33%	5%	26%	31%	4%	3%	37%	15%	41%	56%
4	17%	20%	34%	5%	25%	29%	3%	3%	38%	17%	39%	56%
5	24%	27%	31%	2%	17%	19%	4%	8%	38%	16%	34%	50%
6	23%	37%	22%	0%	18%	18%	4%	13%	32%	1%	51%	52%

Соответствие метода и обозначения:

- 1 – метод Дэниша;
- 2 – метод наименьших модулей;
- 3 – метод наименьших квадратов медиан;
- 4 – метод наименьших обработанных квадратов;
- 5 – метод М-оценки;
- 6 – отбраковка аномальных измерений.

На основе проведённого моделирования утверждается, что даже при одном аномальном измерении ни один из указанных методов не даёт гарантию обнаружения и идентификации выбросов во всех ситуациях. В случае нескольких аномальных измерений робастные методы демонстрируют лучшие результаты, однако, требуют больших вычислительных затрат.

3. Описания методов

3.1 Метод наименьших квадратов

Решение навигационной задачи методом наименьших квадратов представляет собой задачу минимизации функции

$$\sum_{i=1}^N \{\hat{\rho}_i(x, y, z, \tau) - \rho_i\}^2$$

по параметрам x, y, z, τ , где

$$\hat{\rho}_i(x, y, z, \tau) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + \tau \dots \dots \dots (3.1)$$

расчётная ПД до i -го спутника, x_i, y_i, z_i - координаты i -го спутника, ρ_i - измеренная ПД до i -го спутника, N - число используемых спутников, а параметры x, y, z, τ обычно объединяют в вектор параметров \vec{x} . Входными данными являются измеренные ПД и координаты спутников.

Для того чтобы найти минимум функции необходимо найти экстремум, т.е. найти производную и приравнять нулю. Это подразумевает решение системы с N уравнений и 4-мя неизвестными. В общем случае такие системы не имеют решения, поэтому используются численные методы, которые получают приближённое решение с выбранной точностью. Для решения задачи навигации используется метода Ньютона.

Согласно методу Ньютона для получения следующего приближения решения задачи

$$f(x) = 0$$

нужно использовать следующее выражение

$$x^k = x^{k-1} + \frac{f(x^k)}{f'(x^k)} \dots \dots \dots (3.2)$$

В нашем случае функция $f(x)$ является вектором размерностью N и аргумент её тоже является вектором, а значения её представляют собой значения невязок

$$f_i(\vec{x}) = \Delta \rho_i = \hat{\rho}_i(\vec{x}) - \rho_i \dots \dots \dots (3.3)$$

Дифференцируя эту функцию по составляющим вектора \vec{x} , получаем матрицу вида

$$\frac{d\vec{f}(\vec{x})}{d\vec{x}} = \begin{matrix} \frac{\partial f_1(\vec{x})}{\partial x} = \frac{x-x_1}{\hat{\rho}_1(\vec{x})} & \frac{\partial f_1(\vec{x})}{\partial y} = \frac{y-y_1}{\hat{\rho}_1(\vec{x})} & \frac{\partial f_1(\vec{x})}{\partial z} = \frac{z-z_1}{\hat{\rho}_1(\vec{x})} & \frac{\partial f_1(\vec{x})}{\partial \tau} = 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_N(\vec{x})}{\partial x} = \frac{x-x_N}{\hat{\rho}_N(\vec{x})} & \frac{\partial f_N(\vec{x})}{\partial y} = \frac{y-y_N}{\hat{\rho}_N(\vec{x})} & \frac{\partial f_N(\vec{x})}{\partial z} = \frac{z-z_N}{\hat{\rho}_N(\vec{x})} & \frac{\partial f_N(\vec{x})}{\partial \tau} = 1 \end{matrix} \quad (3.4)$$

Выражение (3.1) можно представить в виде

$$f'(x^k)(x^k - x^{k-1}) = f(x^k),$$

либо, учитывая, что в нашем случае функция и аргумент вектора,

$$\vec{f}'(\vec{x}^k)(\vec{x}^k - \vec{x}^{k-1}) = \vec{f}(\vec{x}^k).$$

Тогда получается, что следующее приближение искомого вектора \vec{x} определяется как

$$\vec{x}^k = \vec{x}^{k-1} + (H^T \cdot H)^{-1} H^T \cdot \Delta \vec{\rho}^{k-1}, \dots \dots \dots (3.5)$$

где H – матрица, равная матрице $f'(x)$ или матрица направляющих косинусов, а вектор $\Delta \vec{\rho}$ - другое обозначение вектора $f(x)$ - вектор ошибок оценок ПД. Продолжается процесс до тех пор, пока разница в решениях, полученных на текущей итерации и предыдущей, не будет меньше требуемой величины.

$$\sqrt{(x^k - x^{k-1})^2 + (y^k - y^{k-1})^2 + (z^k - z^{k-1})^2} > \varepsilon, \dots \dots \dots (3.6)$$

где ε – необходимая точность.

Алгоритм расчёта координат выглядит следующим образом:

1. Определение начального приближения (обычно на этом шаге все составляющие искомого вектора \vec{x} принимаются равными 0);
2. Расчёт оценок ПД на основе текущего решения согласно (3.1) и ошибок оценок ПД согласно (3.3);
3. Расчёт матрицы направляющих косинусов согласно (3.4);
4. Изменение текущего решения согласно (3.5);
5. Согласно (3.6) если разница между полученными решениями меньше заданного порога, то завершение вычислений, иначе возврат к пункту 2 с новым решением.

3.2 Метод Дэниша

Данный метод основывается на МНК.

На первом этапе происходит решение задачи методом МНК. После получения решения происходит сравнение элементов вектора невязки $\Delta \vec{\rho}$ с некоторой величиной $c\sigma_0\sqrt{Q_{ii}}$ и изменение исходной весовой матрицы P , которая представляет собой матрицу $N \times N$ с единицами по главной диагонали и нулевыми элементами вне её, по следующему методу.

$$(P_{ii})_{k+1} = \begin{cases} (P_{ii})_k & \text{при } |(\Delta \rho_i)_k| \leq c\sigma_0\sqrt{Q_{ii}} \\ (P_{ii})_k e^{-\frac{|(\Delta \rho_i)_k|}{c\sigma_0\sqrt{Q_{ii}}}} & \text{при } |(\Delta \rho_i)_k| > c\sigma_0\sqrt{Q_{ii}} \end{cases}, \dots \dots (3.7)$$

где k – номер итерации, c – константа, обычно устанавливаемая между 2 и 3, i – номер измерения, матрица Q – матрица, обратная весовой, σ_0 – СКО.

После этого измерения, которым соответствуют веса, меньшие единицы, исключаются из используемых наблюдений и навигационная задача снова решается МНК. Процесс продолжается до тех пор, пока различие в полученных решениях не станет меньше требуемого значения.

Алгоритм выглядит следующим образом:

1. Решение задачи МНК;
2. Изменение весовой матрицы согласно (3.6);
3. Исключение из наблюдения элементов, которым соответствуют элементы матрицы весов на главной диагонали меньше единицы;
4. Решение задачи МНК;
5. Сравнение решений полученных на предыдущем пункте и в пункте 1 согласно (3.6). Если разница больше требуемой величины, то возврат к пункту 2, иначе завершение вычислений.

3.3 Метод М-оценки

Данный метод так же, как и метод Дэниша в основе своей имеет МНК. Отличие от метода Дэниша заключается в используемом методе сравнения. Так, в методе М-оценки используется такой алгоритм изменения весовой матрицы

$$(P_{ii})_{k+1} = \begin{cases} 1 & \text{при } \frac{|(\Delta\rho_i)_k|}{\mathfrak{E}_0} \leq 1.345 \\ \frac{1.345}{|(\Delta\rho_i)_k/\mathfrak{E}_0|} & \text{при } \frac{|(\Delta\rho_i)_k|}{\mathfrak{E}_0} > 1.345 \end{cases}, \dots\dots\dots(3.7)$$

где \mathfrak{E}_0 – апостериорный фактор пересчёта, получаемый из грубой оценки

$$\mathfrak{E}_0 = \frac{1}{0.6745} \text{Median}(|\Delta\rho_i - \text{Median}(\Delta\rho_i)|) \dots\dots\dots(3.8)$$

После этого измерения, которым соответствуют веса, меньшие единицы, исключаются из используемых наблюдений и навигационная задача снова решается МНК. Процесс продолжается до тех пор, пока различие в полученных решениях не станет меньше требуемого значения.

Алгоритм выглядит следующим образом:

1. Решение задачи МНК;
2. Расчёт фактора пересчёта, используя (3.8)
3. Изменение весовой матрицы согласно (3.7);
4. Исключение из наблюдения элементов, которым соответствуют элементы матрицы весов на главной диагонали меньше единицы;
5. Решение задачи МНК;
6. Сравнение решений полученных на предыдущем пункте и в пункте 1 согласно (3.6). Если разница больше требуемой величины, то возврат к пункту 2, иначе завершение вычислений.

4. Моделирование

При проведении моделирования использовались реальные псевдодальности, измеренные до 13-ти спутников. Ошибка определялась, как «случайное» изменение измеренной псевдодальности на 1000 метров, которая проявлялась одним из следующих способов: ошибка присутствует в измерении с начала наблюдения и до его конца, либо ошибка появляется в середине наблюдения и присутствует до конца, либо ошибка появляется в середине наблюдения на некоторое время.

Результаты моделирования

На графиках, приведённых в приложении 2, представлены распределения полученных решений относительно матожидания, а также сферические ошибки для разных алгоритмов решения навигационной задачи при разных проявлениях ошибки и при разном количестве спутников в рабочем созвездии.

и. Здесь же приведены сведённые в таблицы значения средних ошибок для разных методов при разных условиях и вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги.

Определим вероятность правильного обнаружения как отношение числа исключённых измерений, содержащих аномальную ошибку, к общему числу измерений, содержащих аномальную ошибку.

$$P_D = \frac{H_{1искл}}{H_1},$$

где P_D - вероятность правильного обнаружения, $H_{1искл}$ - число исключённых измерений, содержащих аномальную ошибку, H_1 - общее число измерений, содержащих аномальную ошибку.

Вероятность ложной тревоги определим как отношение исключённых измерений, не содержащих аномальную ошибку к общему числу измерений, не содержащих аномальную ошибку.

$$P_F = \frac{H_{2искл}}{H_2},$$

где P_F - вероятность ложной тревоги, $H_{2искл}$ - число исключённых измерений, не содержащих аномальную ошибку, H_2 - общее число измерений, не содержащих аномальную ошибку.

4.1 Отсутствие аномальных ошибок в измерениях ПД

Таблица 4.1. Средняя сферическая ошибка в метрах при отсутствии аномальных ошибок в измерениях.

Количество спутников в рабочем созвездии	5	9	13
Метод Дэниша	5.1	1.6	0.3
МНК	5.1	1.6	0.3
М-оценка	4.1	1.2	1

При отсутствии аномальных ошибок в измерениях ПД все метод М-оценки демонстрирует незначительно меньшую среднюю ошибку при рабочих созвездиях, состоящих из 5-ти и 9-ти спутников, и большую среднюю ошибку при рабочем созвездии, состоящем из 13-ти спутников. МНК и метод Дэниша демонстрируют одинаковые средние сферические ошибки.

Таблица 4.2. Вероятность ложной тревоги при отсутствии аномальных ошибок в измерениях

	5 спутников		9 спутников		13 спутников	
	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога
Метод Дэниша		0%		0%		0%
М-оценка		20%		31%		24%

При отсутствии аномальных измерений метод М-оценки демонстрирует гораздо более высокую вероятность ложной тревоги по сравнению с методом Дэниша.

4.2 Аномальные ошибки содержатся в измерениях ПД с начала наблюдения

Таблица 4.3. Средняя сферическая ошибка в метрах при наличии аномальных ошибок в измерениях с самого начала наблюдения.

	Ошибка для одного спутника			Ошибка для двух спутников			Ошибка для трёх спутников		
	5	9	13	5	9	13	5	9	13
Количество спутников в рабочем созвездии									
Метод Дэниша	768	2.2	0.3	1085	5.8	0.9	1559	491	1.5
МНК	768	466	278	1085	419	306	2038	491	380
М-оценка	763	2.2	5.8	763	3.6	0.9	1559	491	0.7

При аномальной ошибке в измерениях ПД для одного спутника МНК демонстрирует среднюю сферическую ошибку, порядка сотен метров, при увеличении рабочего созвездия сферическая ошибка убывает. Метод М-оценки демонстрирует наименьшую сферическую ошибку в случае, когда рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников. Метод Дэниша показывает лучшие результаты по сравнению с двумя другими методами. В случае наличия аномальной ошибки в двух измерениях ПД решение, полученное по МНК, получается со средней сферической ошибкой порядка сотен метров, ошибка уменьшается с ростом рабочего созвездия. Метод М-оценки при рабочем созвездии из 9-ти спутников демонстрирует среднюю сферическую ошибку меньшую, чем метод Дэниша, а при рабочем созвездии из 13-ти спутников такую же ошибку. При трёх аномальных ошибках в измерениях ПД с решением задачи справились метод Дэниша и метод М-оценки только при рабочем созвездии из 13-ти спутников, при этом метод М-оценки демонстрирует ошибку меньшую, чем метод Дэниша.

Таблица 4.4. Вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги в случае одной аномальной ошибки.

	5 спутников		9 спутников		13 спутников	
	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога
Метод Дэниша	0%	0%	100%	0%	100%	0%
М-оценка	0%	25%	100%	0%	100%	42%

В случае одной аномальной ошибки в измерениях ПД метод Дэниша верно демонстрирует 100%-ую вероятность правильного определения неисправных спутников при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников, при этом вероятность ложной тревоги равна 0. Метод М-оценки также демонстрирует 100%-ую вероятность правильного определения неисправных спутников при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников, но, если рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников, демонстрирует вероятность ложной тревоги 25%, а при рабочем созвездии из 13-ти спутников – 42%.

Таблица 4.5. Вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги в случае двух аномальных ошибок.

	5 спутников		9 спутников		13 спутников	
	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога
Метод Дэниша	50%	33.2%	100%	14%	100%	0%
М-оценка	50%	0%	100%	0%	100%	0%

Метод Дэниша полностью определяет неисправные спутники при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников, и определяет 50% неисправных спутников при рабочем созвездии из 5-ти спутников. При этом вероятность ложной тревоги равна 0 только при рабочем созвездии из 13-ти спутников. Вероятность правильного обнаружения у метода М-оценки такая же, однако, вероятность ложной тревоги равна нулю при всех рассматриваемых размерах рабочего созвездия.

Таблица 4.6. Вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги в случае трёх аномальных ошибок.

	5 спутников		9 спутников		13 спутников	
	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога
Метод Дэниша	33.3%	0%	100%	50%	100%	20%
М-оценка	33.3%	0%	0%	0%	100%	0%

При рабочем созвездии из 5-ти спутников для обоих методов вероятность правильного обнаружения одинакова, вероятность ложной тревоги равна 0. При рабочем созвездии из 9-ти спутников метод М-оценки не исключает ни

одного измерения, а метод Дэниша имеет 100%-ую вероятность правильного обнаружения и 50%-ую вероятность ложной тревоги. Если рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников, оба метода правильно исключают все измерения, содержащие аномальные ошибки, при этом вероятность ложной тревоги ненулевая только у метода Дэниша.

4.3 Аномальные ошибки появляются в измерениях ПД в течение работы приёмника

Таблица 4.7. Средняя ошибка в метрах при появлении аномальных ошибок в измерениях в течение работы приёмника.

	Ошибка для одного спутника			Ошибка для двух спутников			Ошибка для трёх спутников		
	5	9	13	5	9	13	5	9	13
Количество спутников в рабочем созвездии									
Метод Дэниша	387	2.1	0.3	545	3.9	0.6	782	246	0.8
МНК	387	234	139	545	210	153	1022	246	190
М-оценка	384	1.9	3.3	384	2.6	0.9	781	246	0.8

МНК демонстрирует наибольшую ошибку, порядка сотен метров, которая убывает с ростом рабочего созвездия. При одной и двух ошибках метод Дэниша и метод М-оценки решают задачу со средней сферической ошибкой порядка метров при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников. При трёх ошибках и рабочем созвездии из 13-ти спутников оба эти метода решают задачу со средней сферической ошибкой 0.8м.

Таблица 4.8. Вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги в случае одной аномальной ошибки.

	5 спутников		9 спутников		13 спутников	
	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога
Метод Дэниша	0%	0%	100%	0%	100%	0%
М-оценка	0%	22%	100%	19%	100%	33.5%

В случае одной аномальной ошибки в измерениях ПД метод Дэниша верно демонстрирует 100%-ую вероятность правильного определения неисправных спутников при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников, при этом вероятность ложной тревоги равна 0. Метод М-оценки также демонстрирует 100%-ую вероятность правильного определения неисправных спутников при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников, но вероятность ложной тревоги не является нулевой ни в одной из рассмотренных ситуаций.

Таблица 4.9. Вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги в случае двух аномальных ошибок.

	5 спутников		9 спутников		13 спутников	
	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога
Метод Дэниша	50%	14%	100%	7%	100%	0%
М-оценка	50%	15%	100%	22%	100%	15%

Метод Дэниша полностью определяет неисправные спутники при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников, и определяет 50% неисправных спутников при рабочем созвездии из 5-ти спутников. При этом вероятность ложной тревоги равна 0 только при рабочем созвездии из 13-ти спутников. Вероятность правильного обнаружения у метода М-оценки такая же, а вероятность ложной тревоги равна нулю при всех рассматриваемых размерах рабочего созвездия.

Таблица 4.10. Вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги в случае трёх аномальных ошибок.

	5 спутников		9 спутников		13 спутников	
	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога
Метод Дэниша	33.3%	0%	100%	23%	100%	9.5%
М-оценка	33.3%	20%	0%	25%	100%	16%

При рабочем созвездии из 5-ти спутников для обоих методов вероятность правильного обнаружения одинакова, вероятность ложной тревоги равна 0 для метода Дэниша не нулевая для метода М-оценки. При рабочем созвездии из 9-ти спутников метод М-оценки не исключает ни одного аномального измерения, но исключает 25% верных измерений, а метод Дэниша имеет 100%-ую вероятность правильного обнаружения и 23%-ую вероятность ложной тревоги. Если рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников, оба метода правильно исключают все измерения, содержащие аномальные ошибки, при этом вероятность ложной тревоги ненулевая.

4.4 Аномальные ошибки появляются в измерениях ПД в течение работы приёмника на некоторое время.

Таблица 4.11. Средняя ошибка в метрах при появлении аномальных ошибок в измерениях в течение работы приёмника на некоторое время.

	Ошибка для одного спутника			Ошибка для двух спутников			Ошибка для трёх спутников		
	5	9	13	5	9	13	5	9	13
Количество спутников в рабочем созвездии									
Метод Дэниша	259	1.8	0.3	365	3.1	0.4	523	165	0.7
МНК	259	157	92.9	365	141	102	683	165	127
М-оценка	257	1.5	2.7	257	2	0.9	523	165	0.9

МНК демонстрирует наибольшую ошибку, порядка сотен метров, которая убывает с ростом рабочего созвездия. При одной и двух ошибках метод Дэниша и метод М-оценки решают задачу со средней сферической ошибкой порядка метров при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников. При трёх ошибках и рабочем созвездии из 13-ти спутников оба эти метода решают задачу со средней сферической ошибкой меньше метра.

Таблица 4.12. Вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги в случае одной аномальной ошибки.

	5 спутников		9 спутников		13 спутников	
	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога
Метод Дэниша	0%	0%	100%	0%	100%	0%
М-оценка	0%	21%	100%	21%	100%	30%

В случае одной аномальной ошибки в измерениях ПД метод Дэниша верно демонстрирует 100%-ую вероятность правильного определения неисправных спутников при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников, при этом вероятность ложной тревоги равна 0. Метод М-оценки также демонстрирует 100%-ую вероятность правильного определения неисправных спутников при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников, но вероятность ложной тревоги не является нулевой ни в одной из рассмотренных ситуаций.

Таблица 4.13. Вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги в случае двух аномальных ошибок.

	5 спутников		9 спутников		13 спутников	
	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога
Метод Дэниша	25%	23%	50%	15%	50%	6%
М-оценка	50%	18%	75%	28%	75%	19%

Метод Дэниша определяет половину неисправных спутников при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников, и определяет 25% неисправных спутников при рабочем созвездии из 5-ти спутников. При этом вероятность ложной тревоги не равна 0 ни в одном из рассмотренных случаев. Вероятность правильного обнаружения у метода М-оценки на 25% выше в каждом рассмотренном случае, вероятность ложной тревоги больше, чем у метода Дэниша при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников.

Таблица 4.14. Вероятность правильного обнаружения и ложной тревоги в случае трёх аномальных ошибок.

	5 спутников		9 спутников		13 спутников	
	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога	Правильное обнаружение	Ложная тревога
Метод Дэниша	33%	0%	100%	15%	100%	6%
М-оценка	33%	25%	0%	27%	100%	19%

При рабочем созвездии из 5-ти спутников для обоих методов вероятность правильного обнаружения одинакова, вероятность ложной тревоги равна 0 для метода Дэниша и не нулевая для метода М-оценки. При рабочем созвездии из 9-ти спутников метод М-оценки не исключает ни одного аномального измерения, но исключает 27% верных измерений, а метод Дэниша имеет 100%-ую вероятность правильного обнаружения и 15%-ую вероятность ложной тревоги. Если рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников, оба метода правильно исключают все измерения, содержащие аномальные ошибки, при этом вероятность ложной тревоги ненулевая.

По полученным результатам можно сделать следующие выводы:

- при возникновении аномальных измерений ПД во время работы приёмника МНК демонстрирует существенную ошибку в определении координат потребителя;
- во всех рассмотренных случаях за исключением одного метод Дэниша демонстрирует 100%-ую вероятность правильного обнаружения при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников;
- при относительно большом числе видимых спутников возможно решение навигационной задачи с относительно небольшими средними сферическими ошибками даже при 3-х аномальных измерениях;
- в случае трёх аномальных сигналов и рабочем созвездии из 9-ти спутников метод М-оценки не исключает ни одного аномального измерения, в остальных случаях при рабочем созвездии из 9-ти и 13-ти спутников полностью исключаются аномальные ошибки;
- при небольшом числе видимых спутников метод М-оценки демонстрирует лучшие результаты по сравнению с методом Дэниша, однако, при увеличении рабочего созвездия метод Дэниша становится более результативным;
- при рабочем созвездии больше 9-ти спутников наблюдаются одинаковые вероятности правильного обнаружения, однако метод Дэниша в большинстве случаев демонстрирует меньшую вероятность ложной тревоги;
- несоответствие результатов, полученных в ходе данной работы, с результатами, опубликованными в [8], объясняется различием условий моделирования, например, абсолютной величиной вносимой ошибки и способ внесения ошибки.

5. Заключение.

1. В данной работе были приведены и рассмотрены некоторые известные алгоритмы восстановления целостности в аппаратуре потребителя.
2. Разработана математическая модель для проверки пригодности приведённых алгоритмов для решения навигационных задач при наличии аномальных ошибок в измерениях ПД.
3. Получены зависимости средней сферической ошибки при определении координат потребителя для разных комбинаций количества спутников в рабочем созвездии, количества аномальных измерений и проявлений ошибок.
4. Получены оценки способности рассматриваемых методов самостоятельно исключать измерения, содержащие аномальные ошибки, при разных комбинациях количества спутников в рабочем созвездии, количества аномальных измерений и проявлений ошибок.
5. По полученным результатам можно сделать вывод о целесообразности применения метода Дэниша вместо МНК в условиях, моделируемых в работе, потому что в случаях отсутствия аномальных ошибок данный метод позволяет получить результаты, по крайней мере, не хуже, чем МНК, а при наличии аномальных ошибок позволяет получить существенно более точные оценки местоположения потребителя.
6. Увеличение числа спутников существенно уменьшает влияние ошибок на оценку местоположения потребителя в случаях с несколькими аномальными ошибками в измерениях ПД.
7. Все полученные результаты имеют место только в рассмотренных условиях и не могут быть гарантированы при изменении параметров моделирования, например, размера аномальной ошибки и способа формирования аномальной ошибки. Для проведения полноценных исследований работоспособности рассмотренных алгоритмов в реальных условиях необходимо провести существенно большую работу.

Список литературы:

1. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС/ Под ред. В. Н. Харисова, А. И. Перова, В. А. Болдина. – 2-е изд. исправ. – М. : ИПРЖР, 1999.
2. Brown R. G., McBurney P. W. Self-contained GPS Integrity Check Using Maximum Solution Separations// Navigation, Summer 1988, vol. 35, no. 2.
3. Young C. Lee. Analysis of Range and Position Comparison Methods as Means to Provide GPS Integrity in the User Receiver// The MITRE Corporation, McLean, Virginia, 1986.
4. Parkinson B. W., Axelrad P. Autonomous GPS Integrity Monitoring Using the Pseudorange Residual// Navigation, Summer 1988, vol. 35, no. 2.
5. Hewitson S., Wang J. GNSS Receiver Autonomous Integrity Monitoring for Multiple Outliers// School of Surveying and Spatial Information Systems, The University of New South Wales, 2005.
6. Brown R. G., Patrik T. C. GPS Failure Detection by Autonomous Means Within the Cockpit, Electrical Engineering, Iowa State University Ames, Iowa 50011.
7. Brown R. G. Self-contained GPS Integrity: Trade off Between Selective Availability and Radial Error to be Protected Against// RTCA Paper no. 408-87/SC159-119.
8. Knight N. L., Wang J. A Comparison of Outlier Detection Procedures and Robust Estimation Methods in GPS Positioning. The University of New South Wales, 2009.
9. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. – М.: Радио и связь, 1991.
10. <http://bgd.alpud.ru>

Приложение 1. Зависимости, полученные в результате моделирования.

Аномальные измерения отсутствуют.

Рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников.

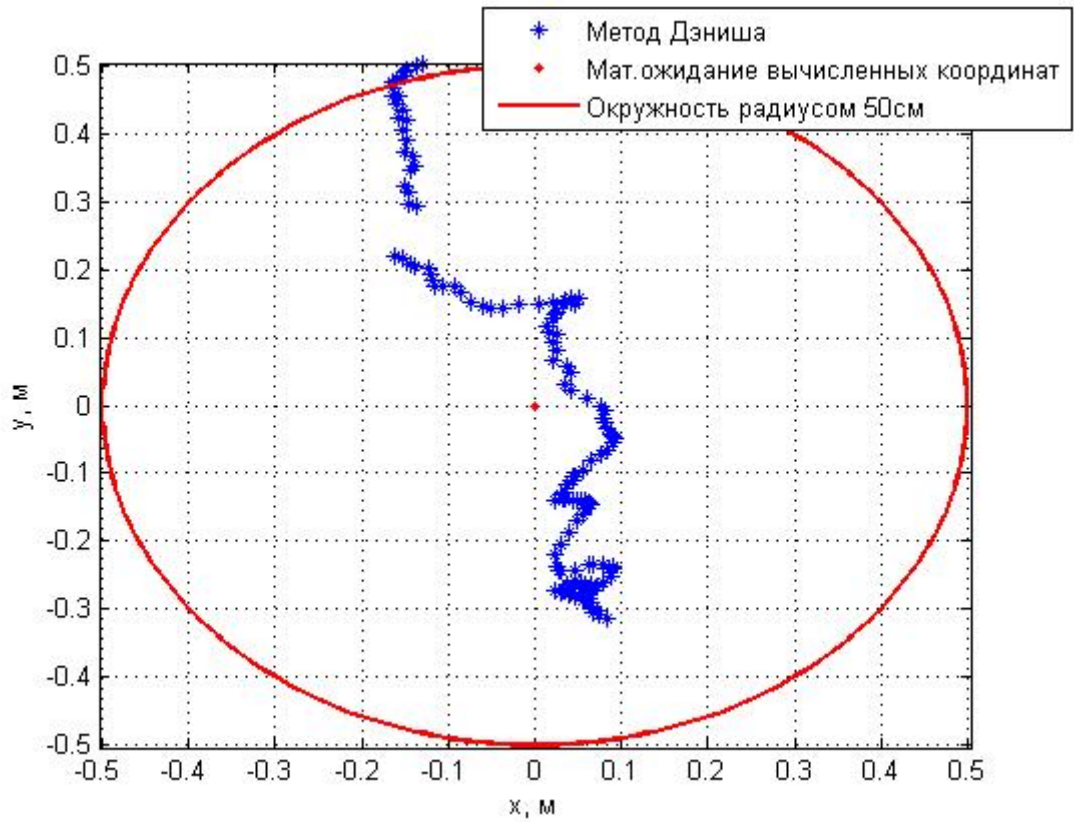


Рис. 1. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

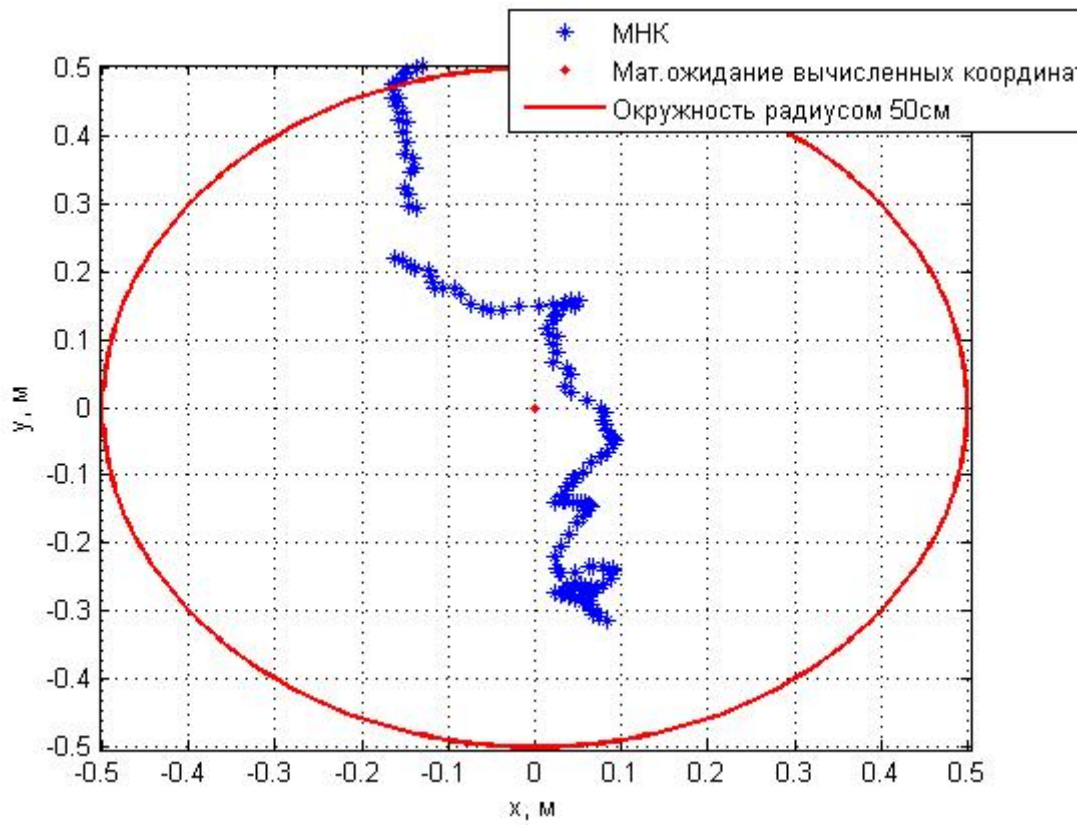


Рис. 2. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

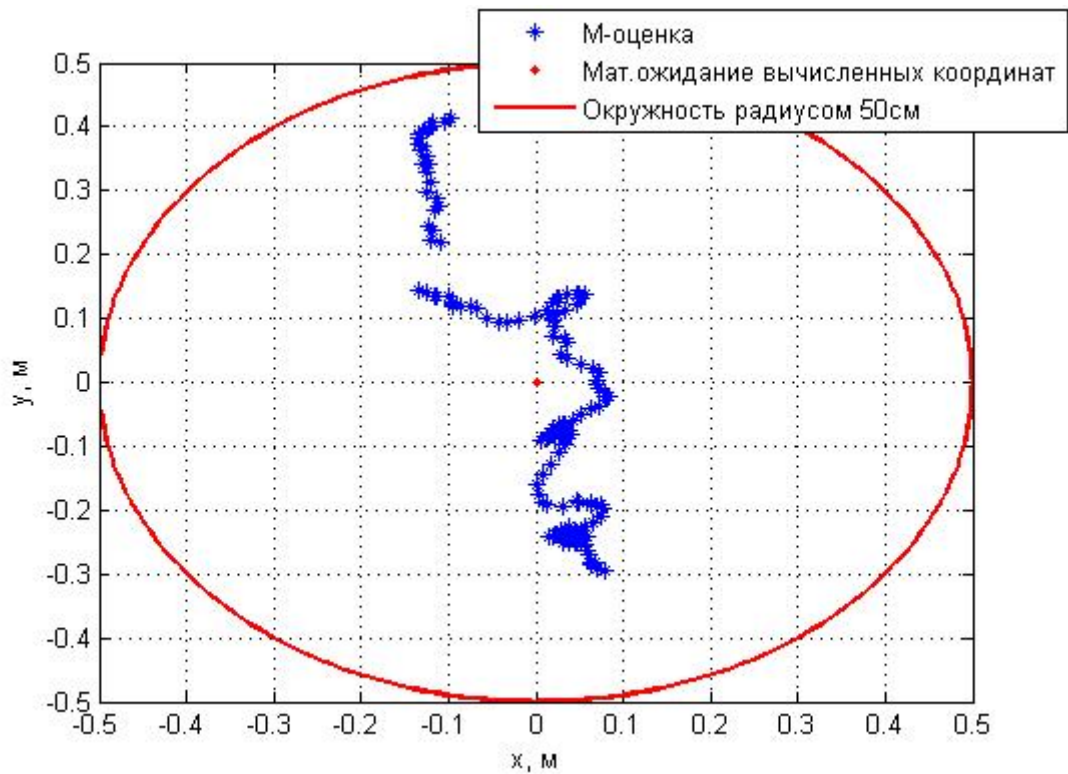


Рис. 3. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

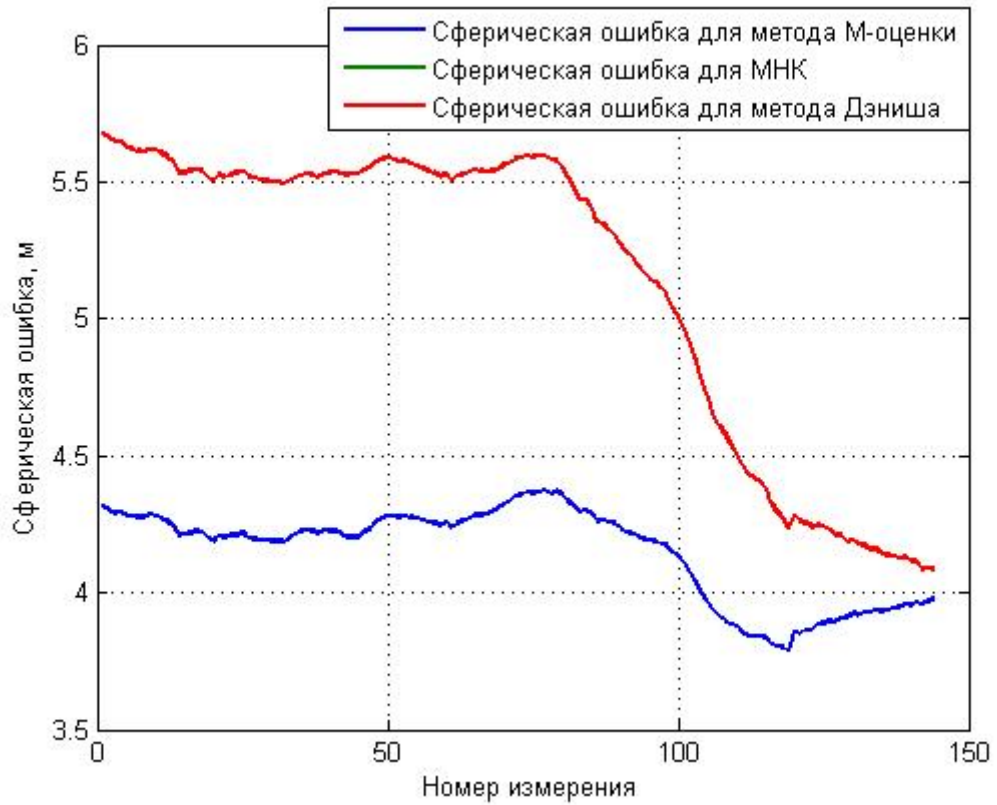


Рис. 4. Сферические ошибки для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников.

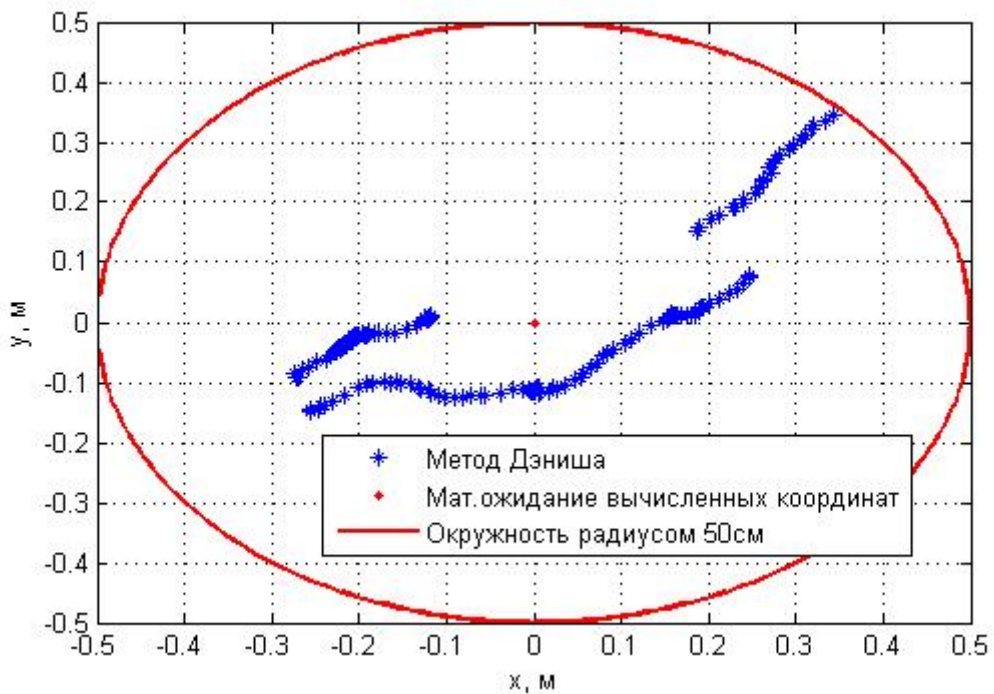


Рис. 5. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

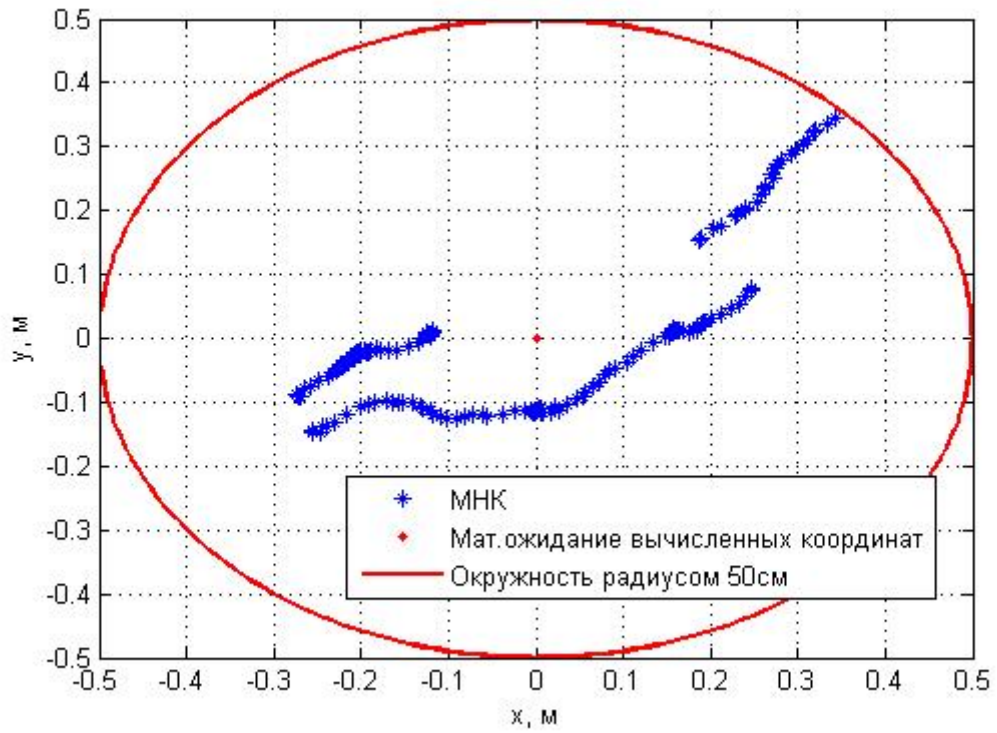


Рис. 6. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

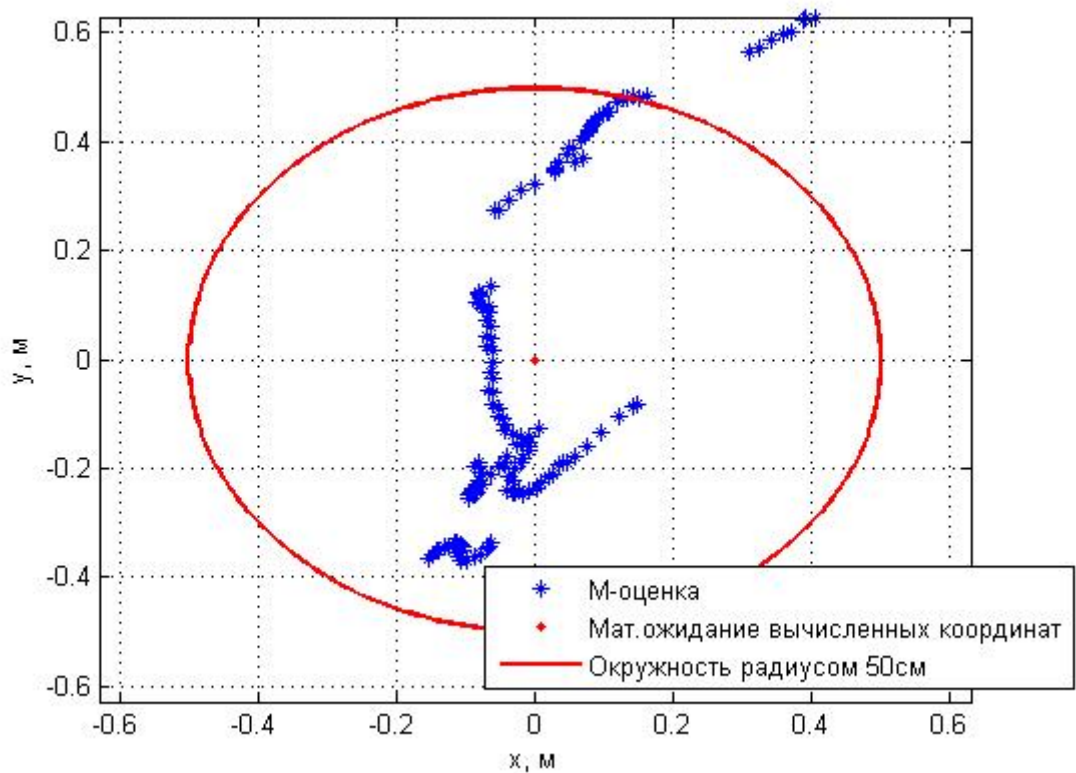


Рис. 7. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

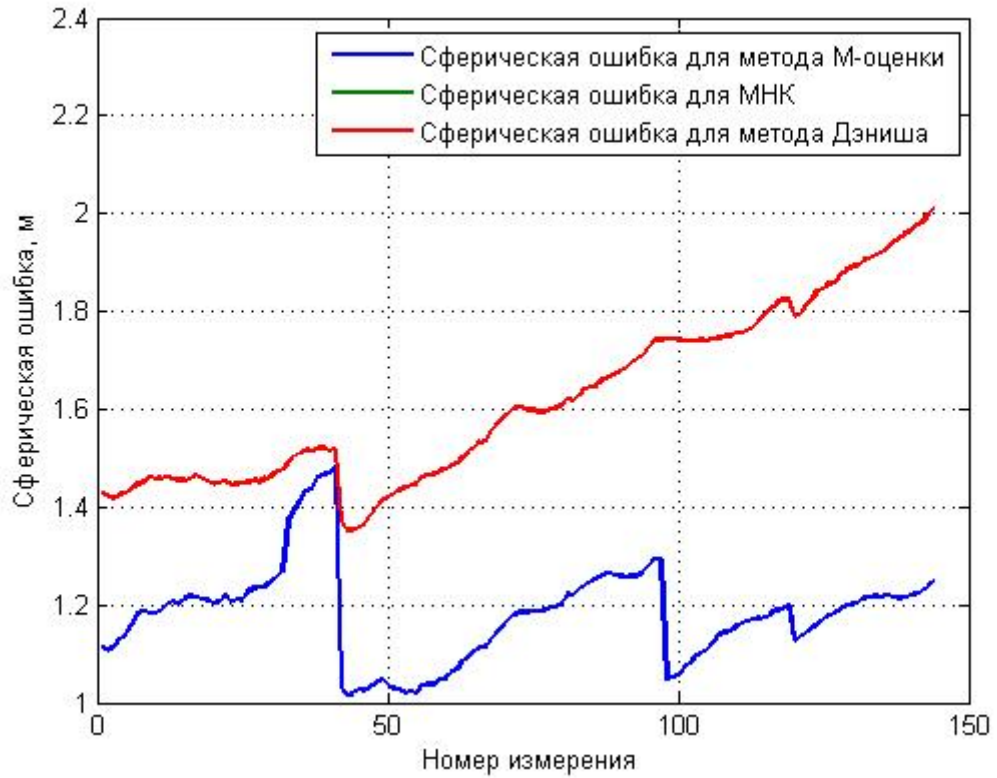


Рис. 8. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки
Рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников.

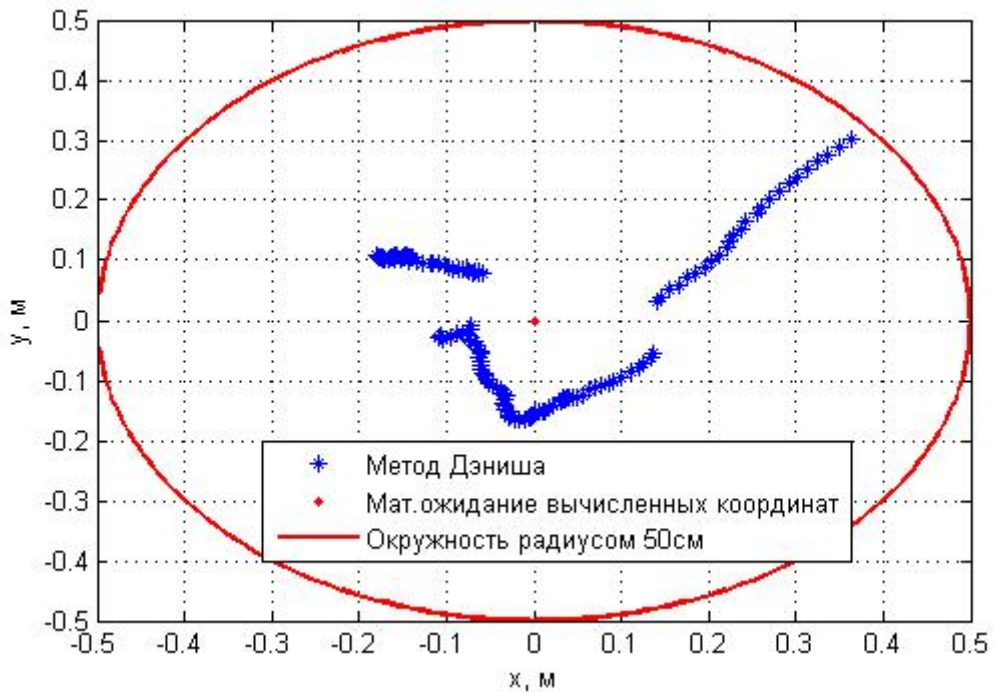


Рис. 9. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

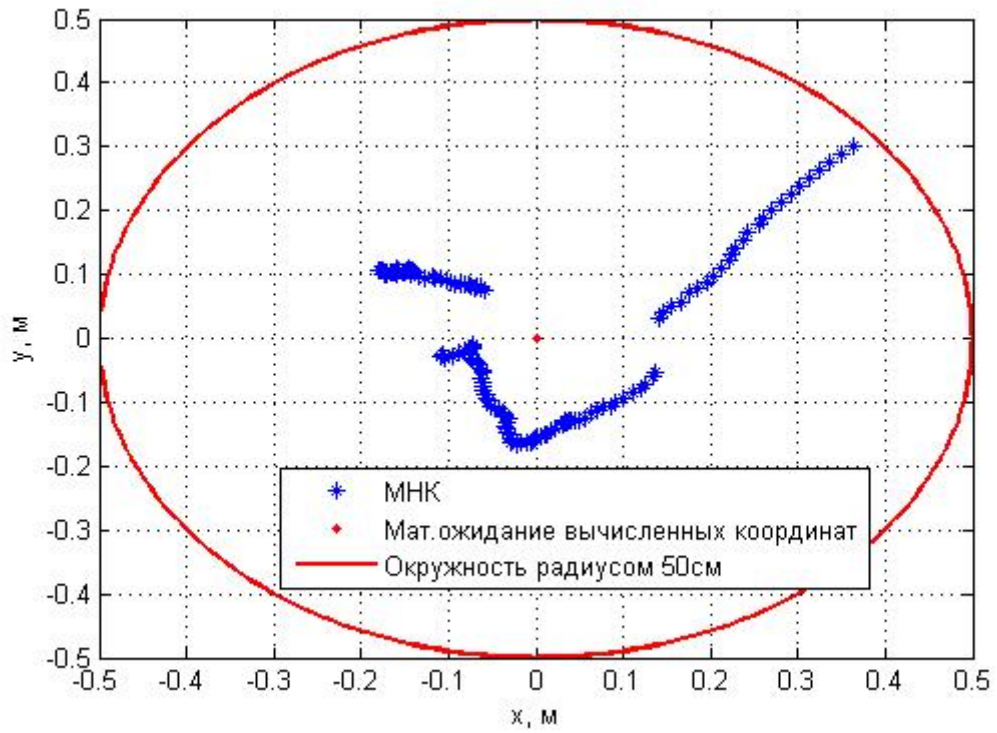


Рис. 10. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

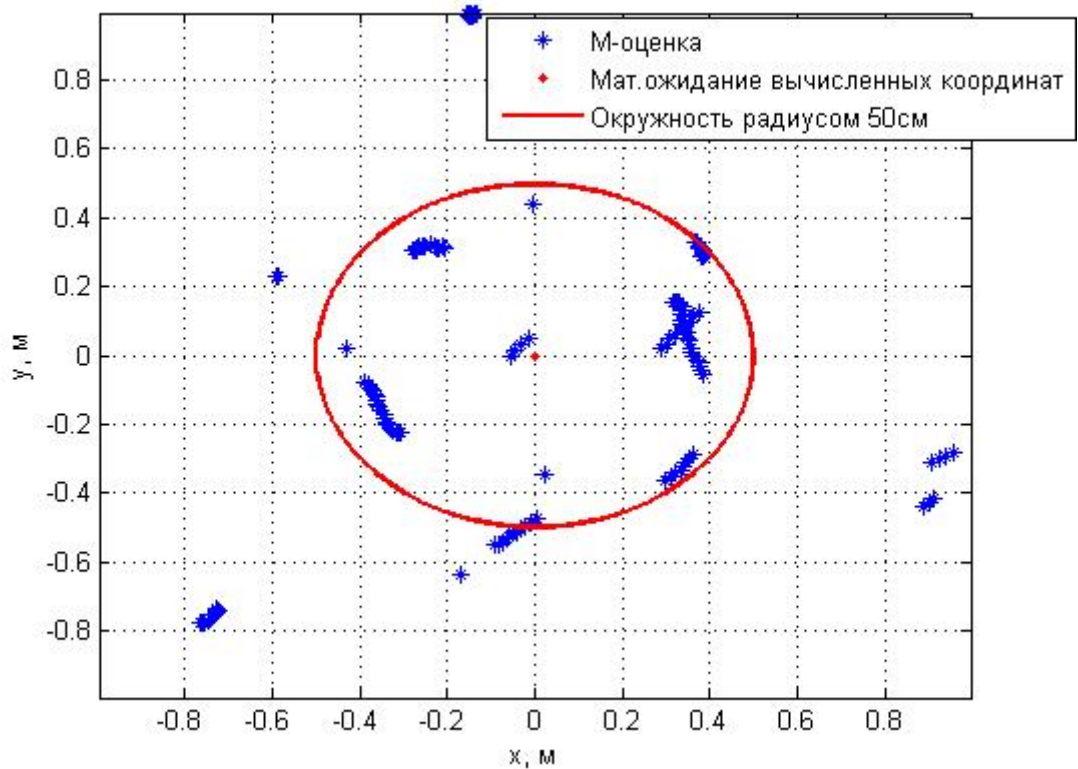


Рис. 11. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

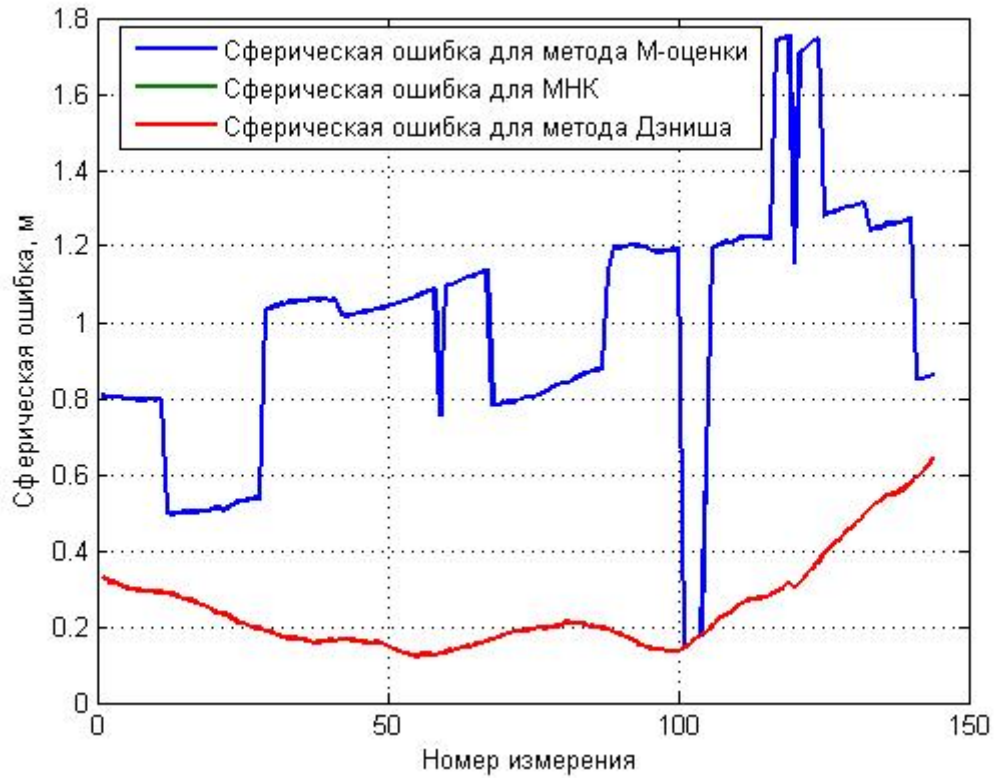


Рис. 12. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

В измерениях с начала наблюдения содержится одна ошибка.
Рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников.

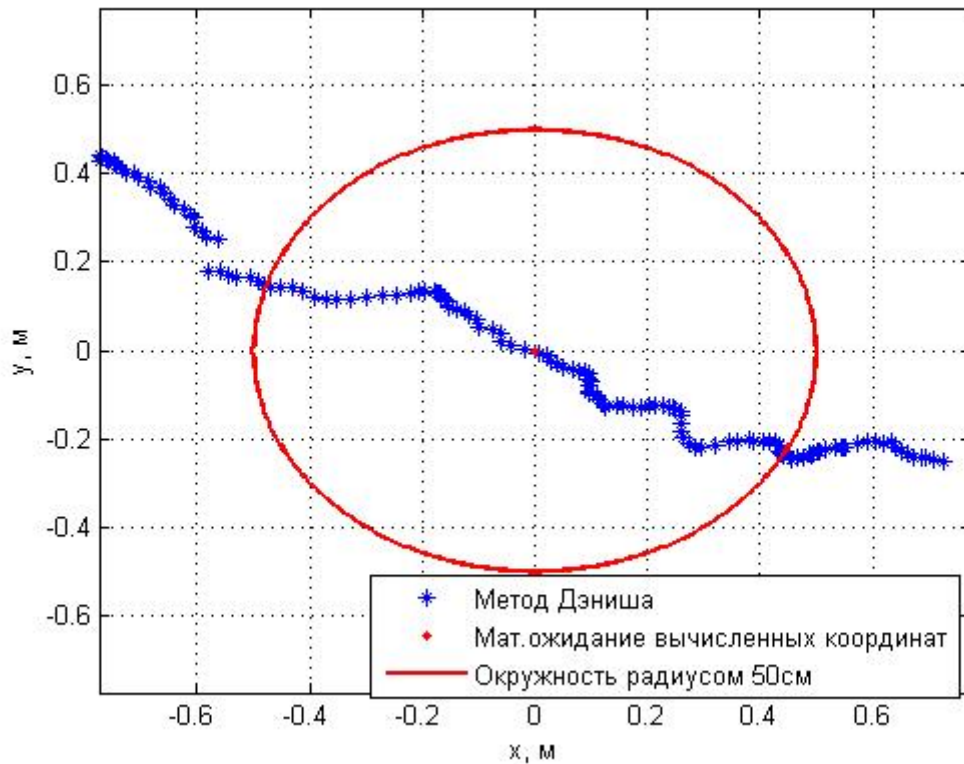


Рис. 13. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

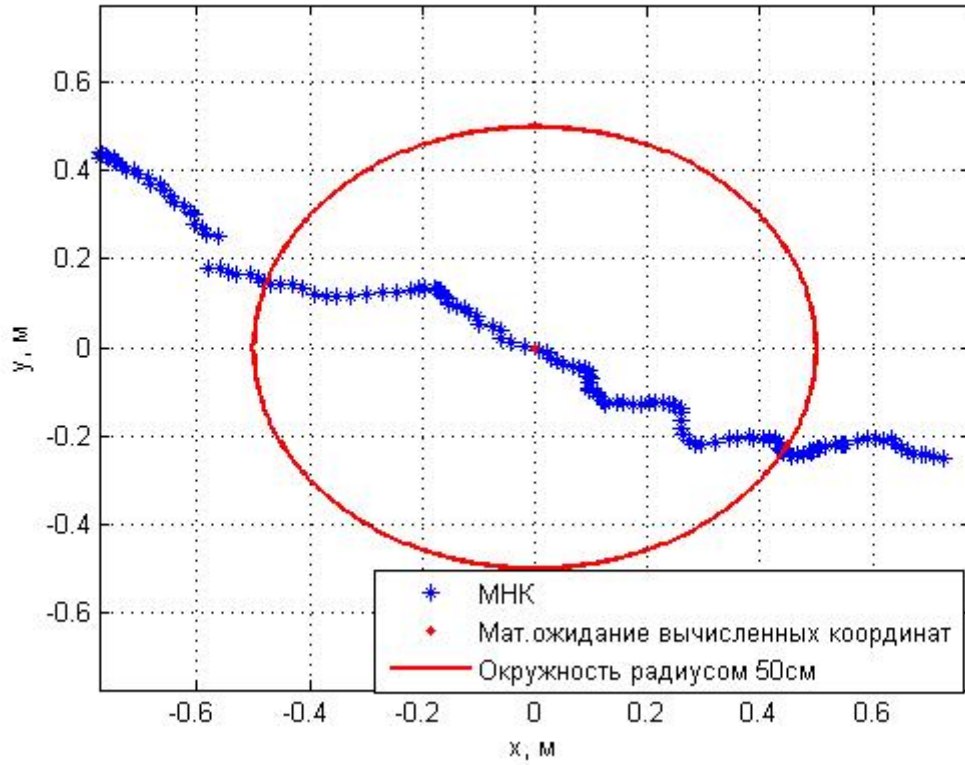


Рис 14. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для MNK

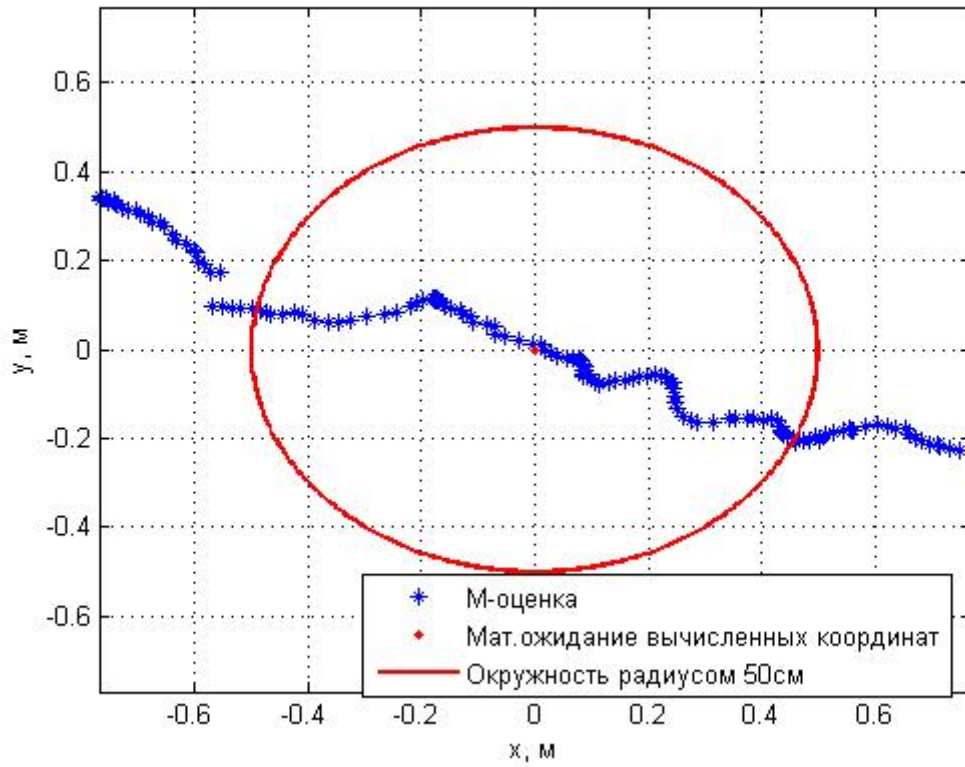


Рис. 15. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода M-оценки

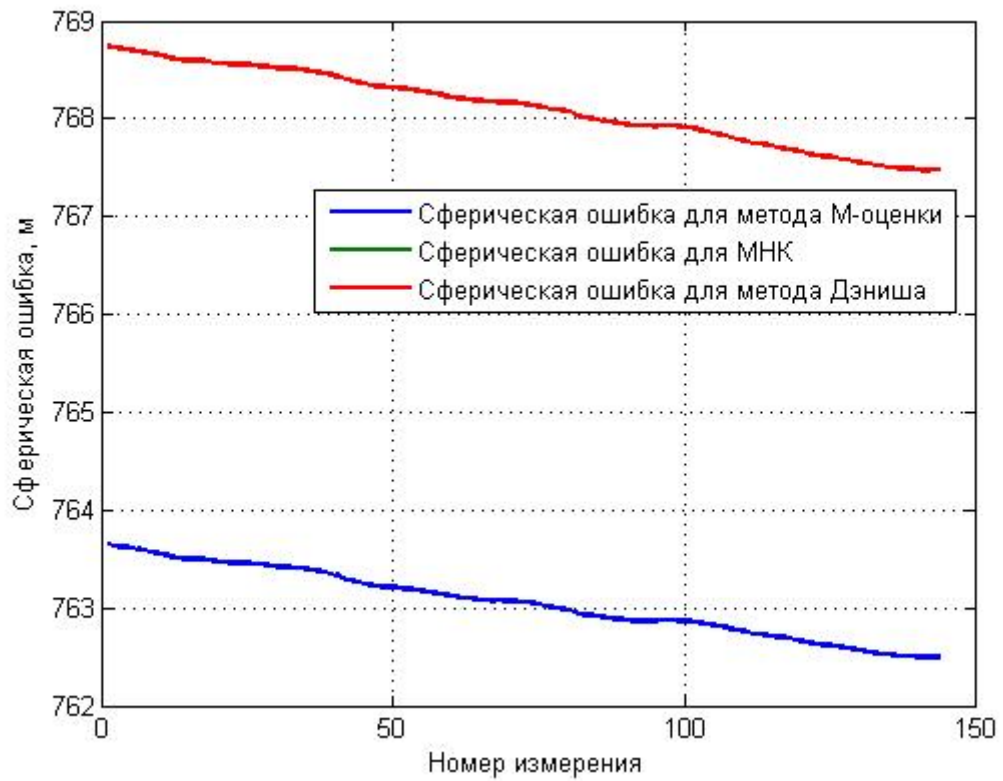


Рис. 16. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников.

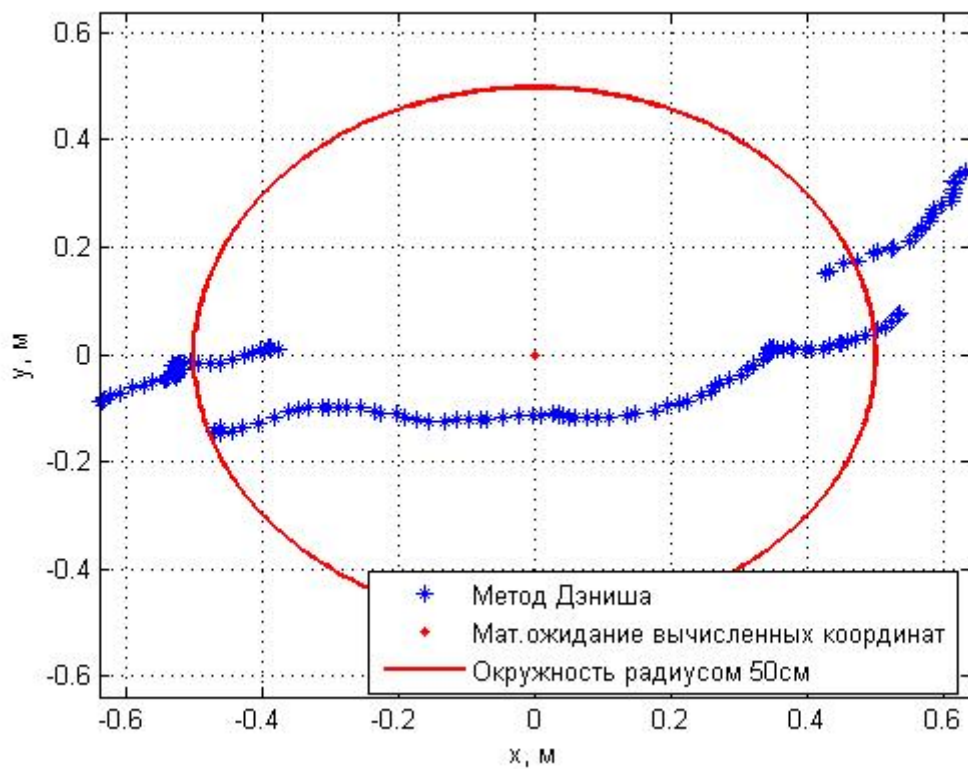


Рис. 17. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

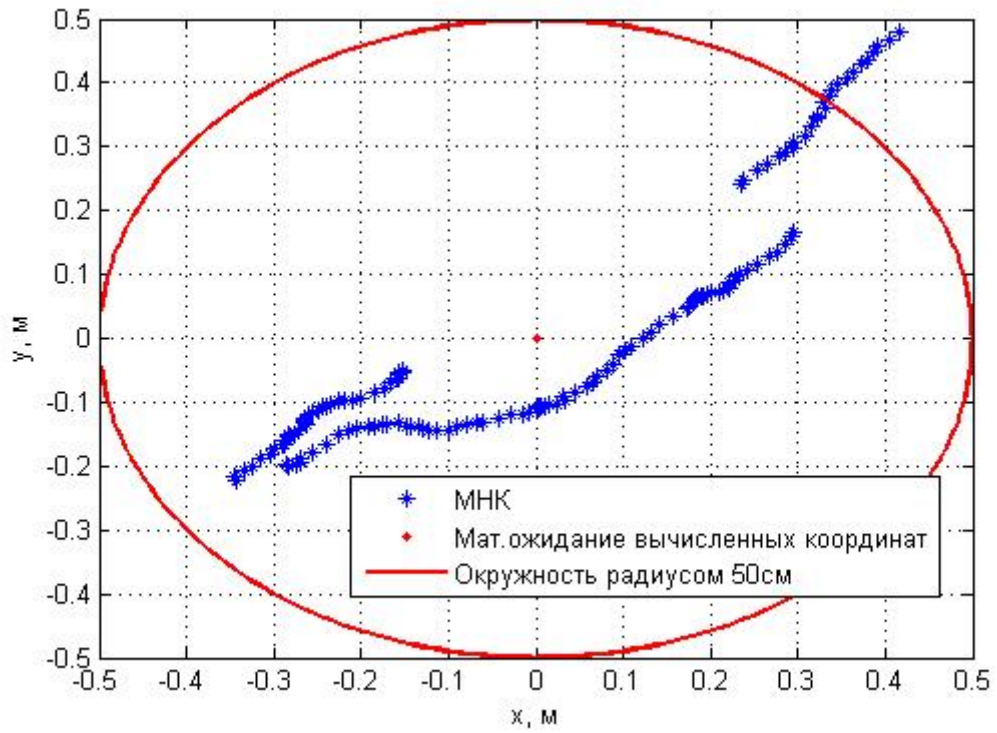


Рис. 18. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для MNK

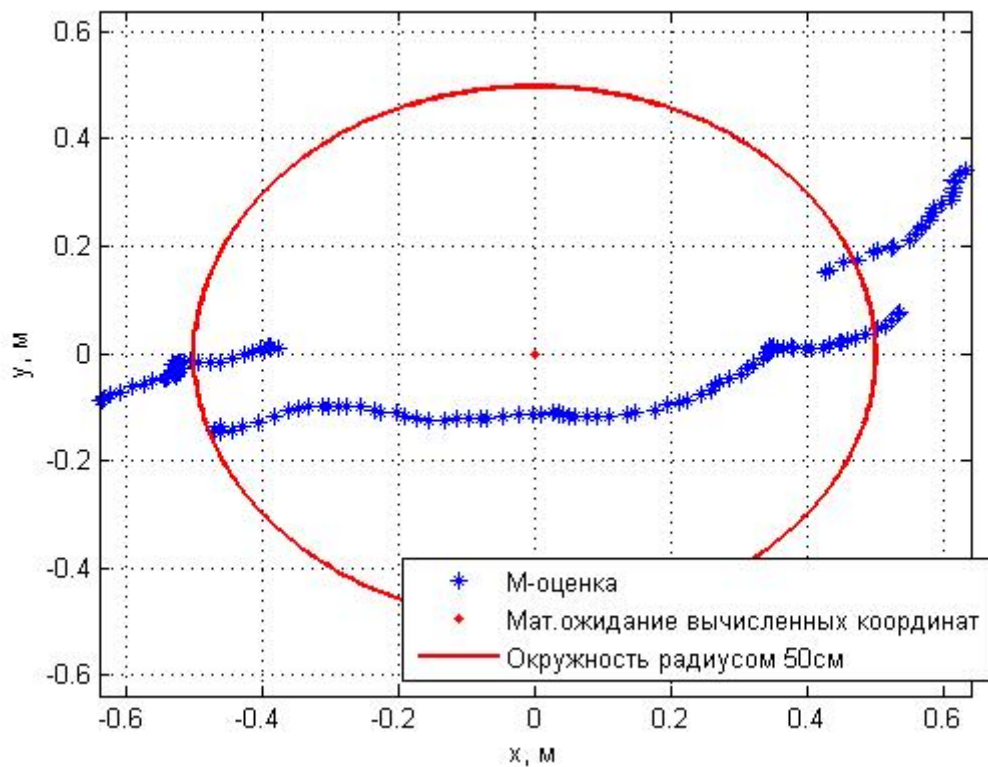


Рис. 19. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

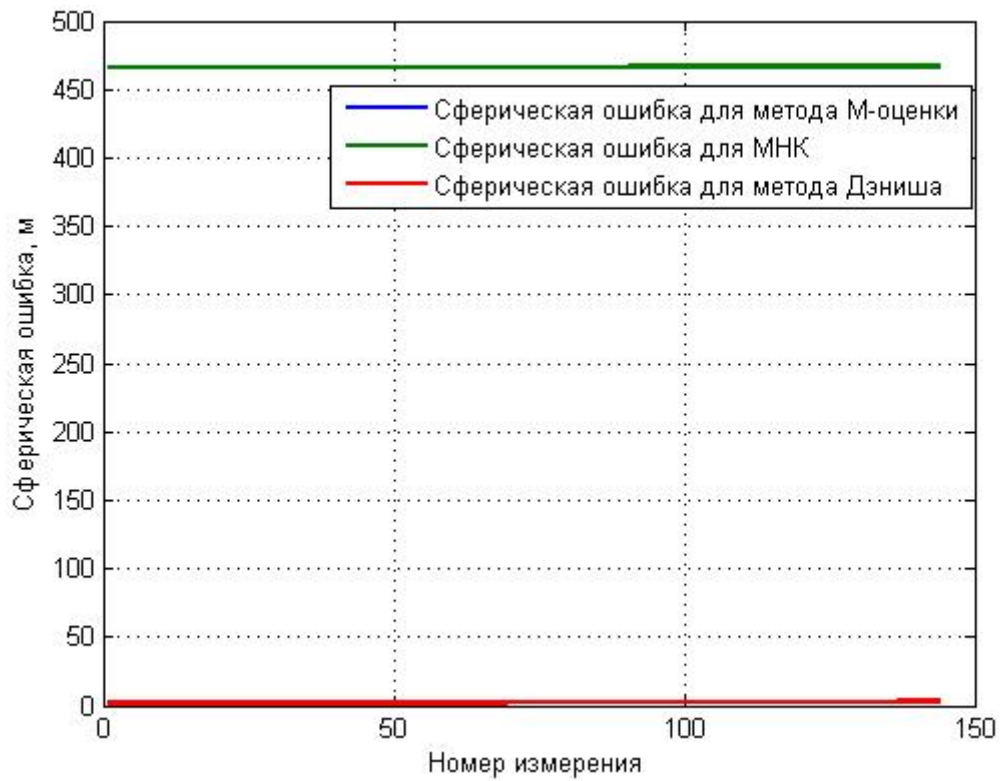


Рис. 20. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников.

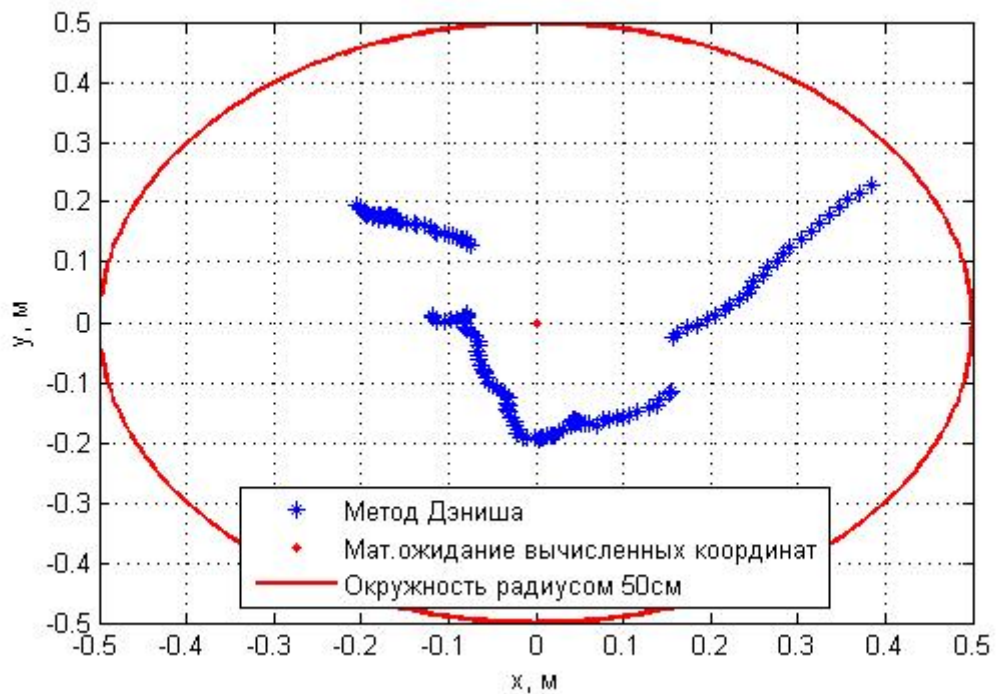


Рис. 21. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

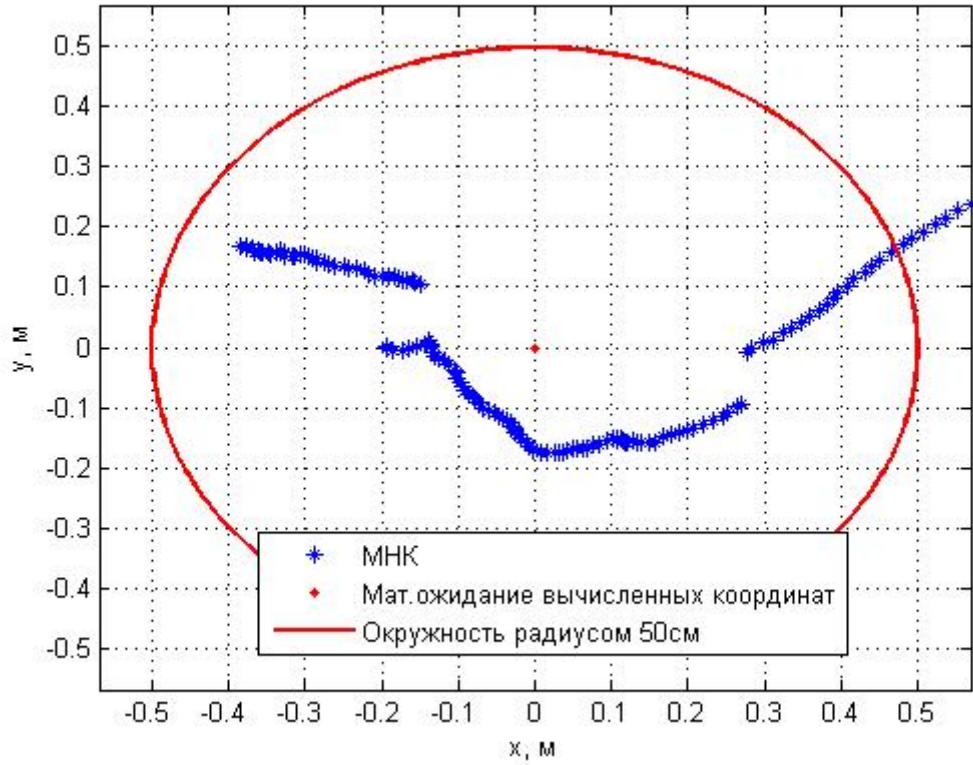


Рис. 22. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

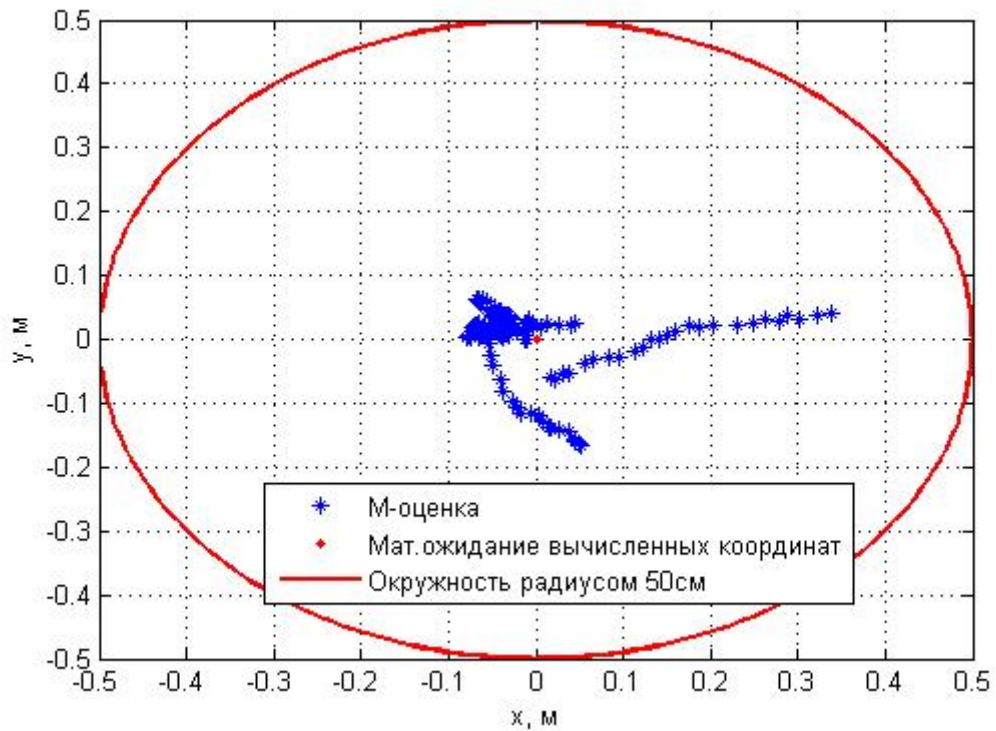


Рис. 23. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

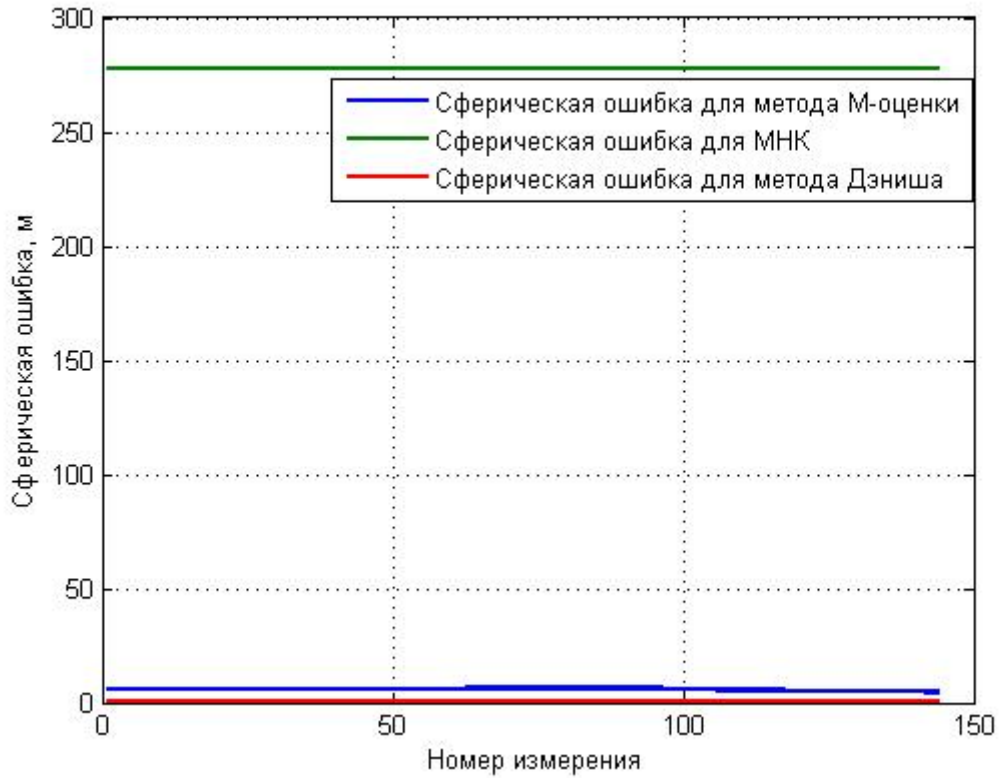


Рис. 24. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

В измерениях с самого начала присутствуют две ошибки.
Рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников.

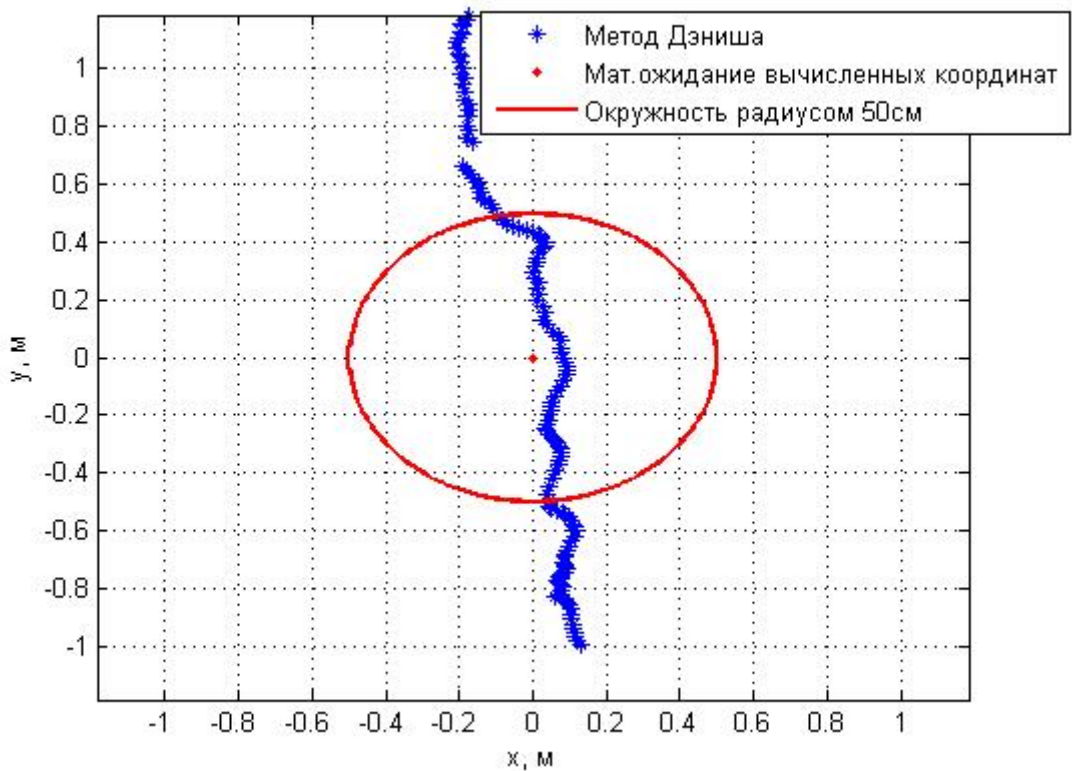


Рис. 25. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

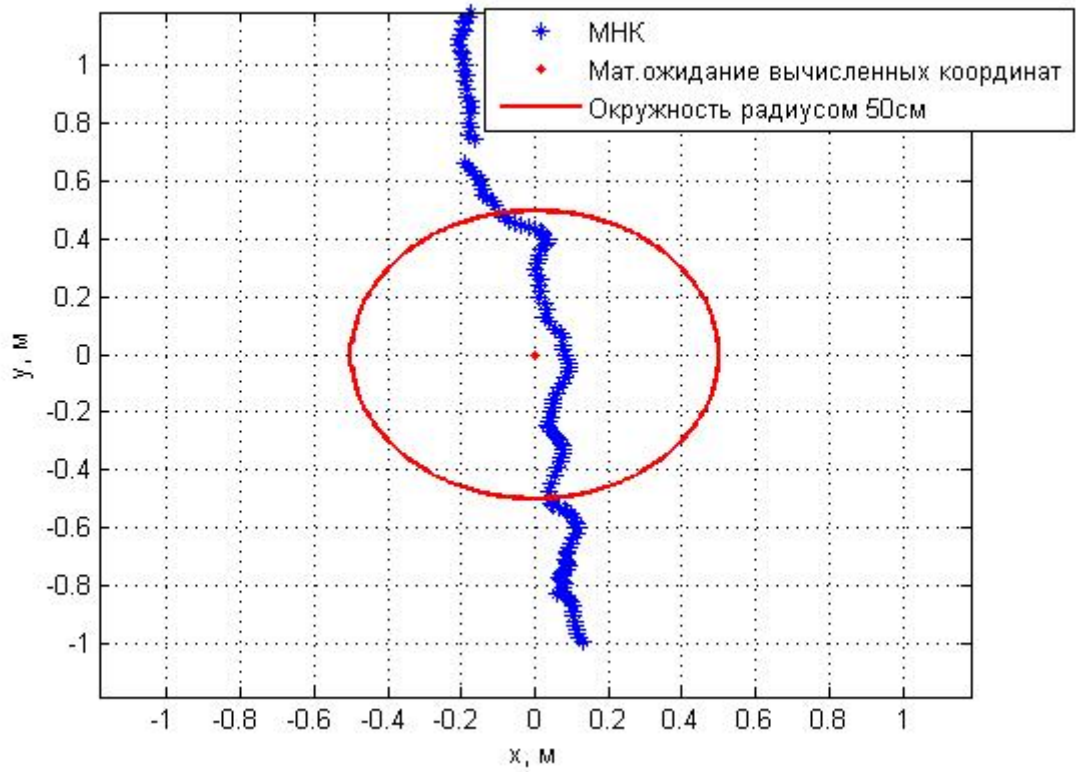


Рис. 26. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

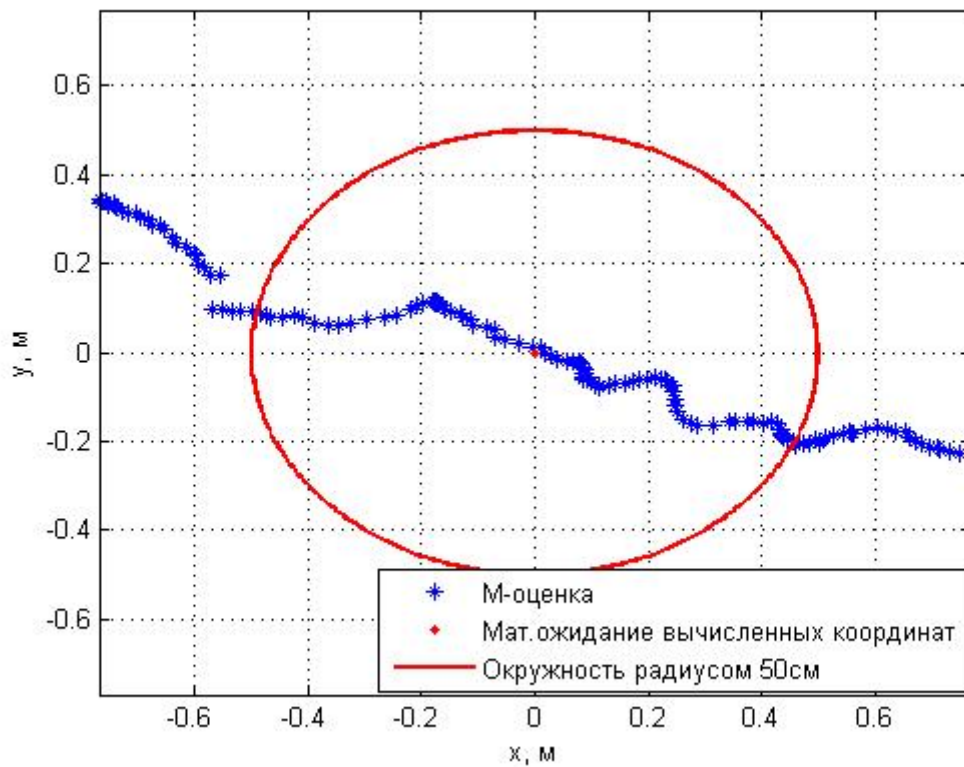


Рис. 27. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

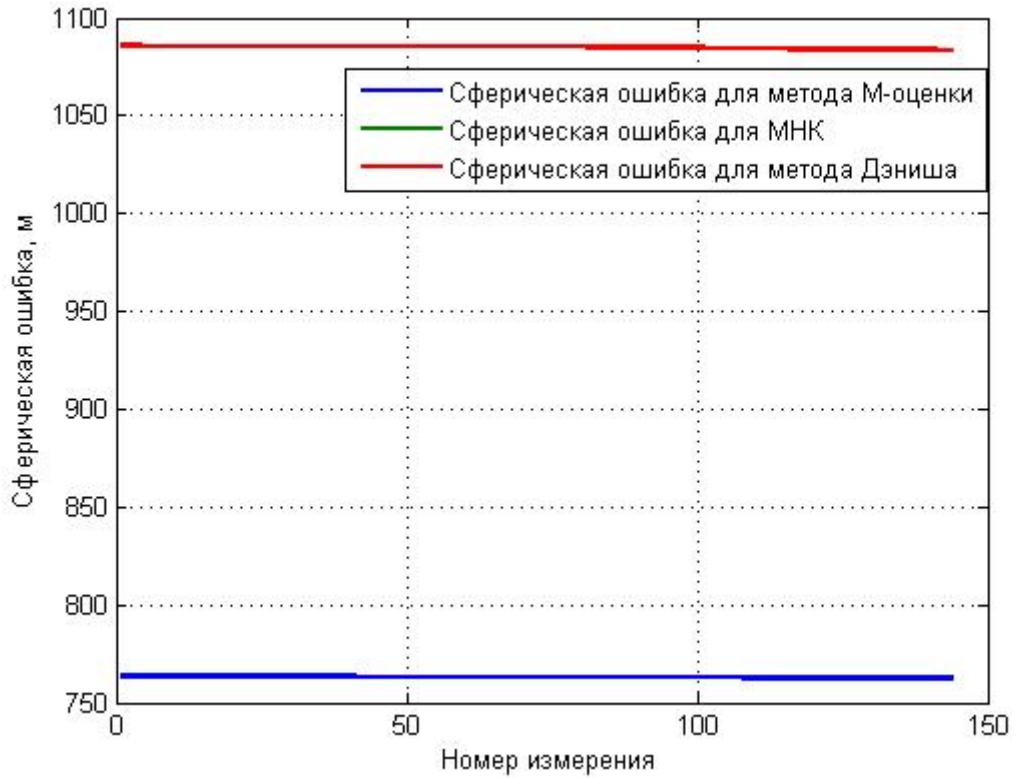


Рис. 28. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников.

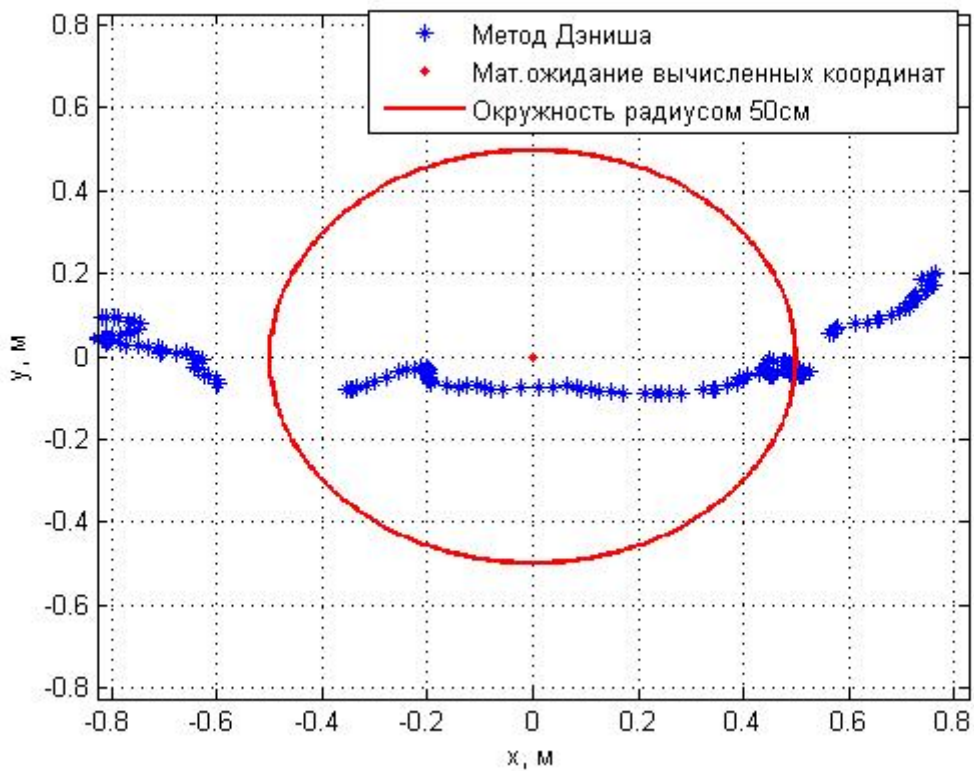


Рис. 29. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

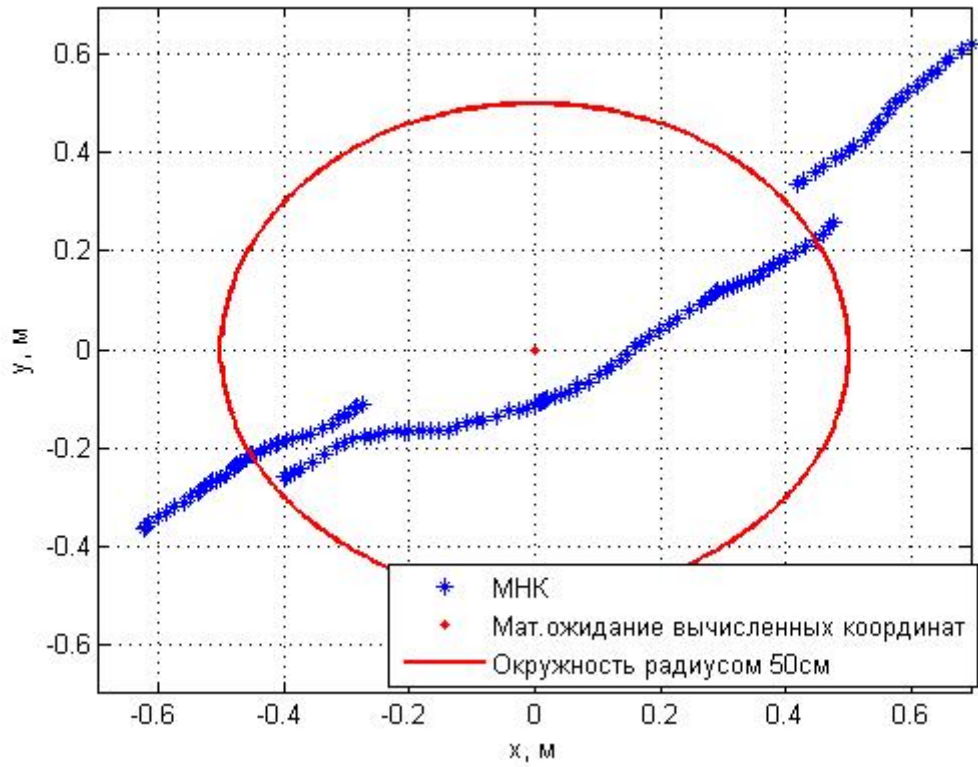


Рис. 30. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

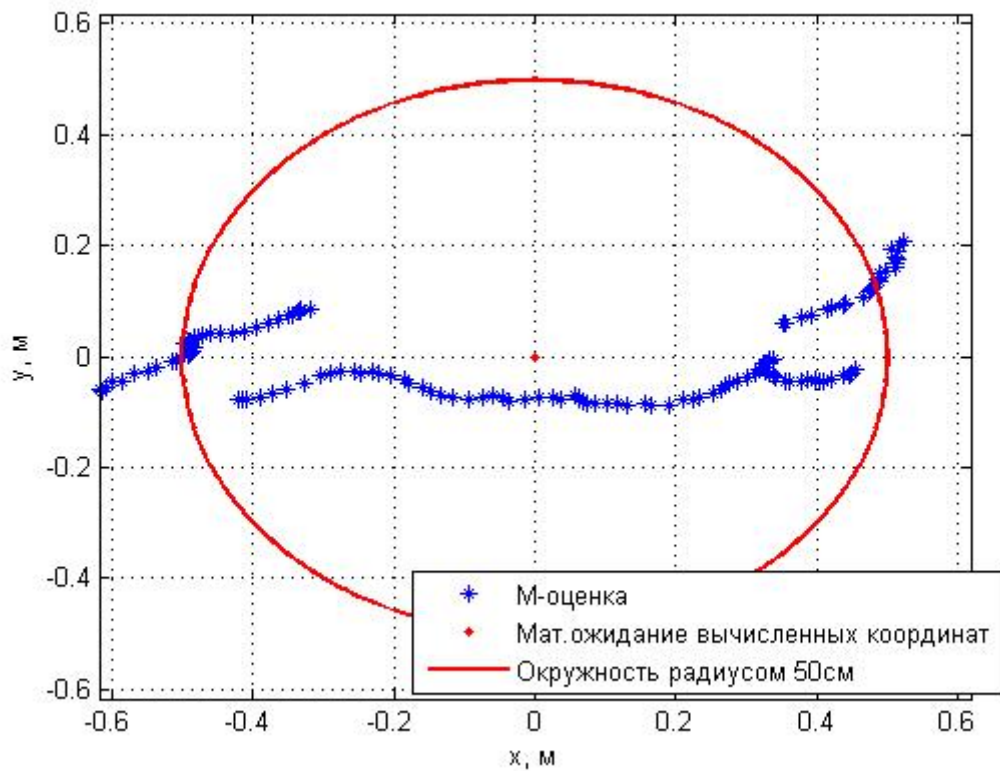


Рис. 31. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

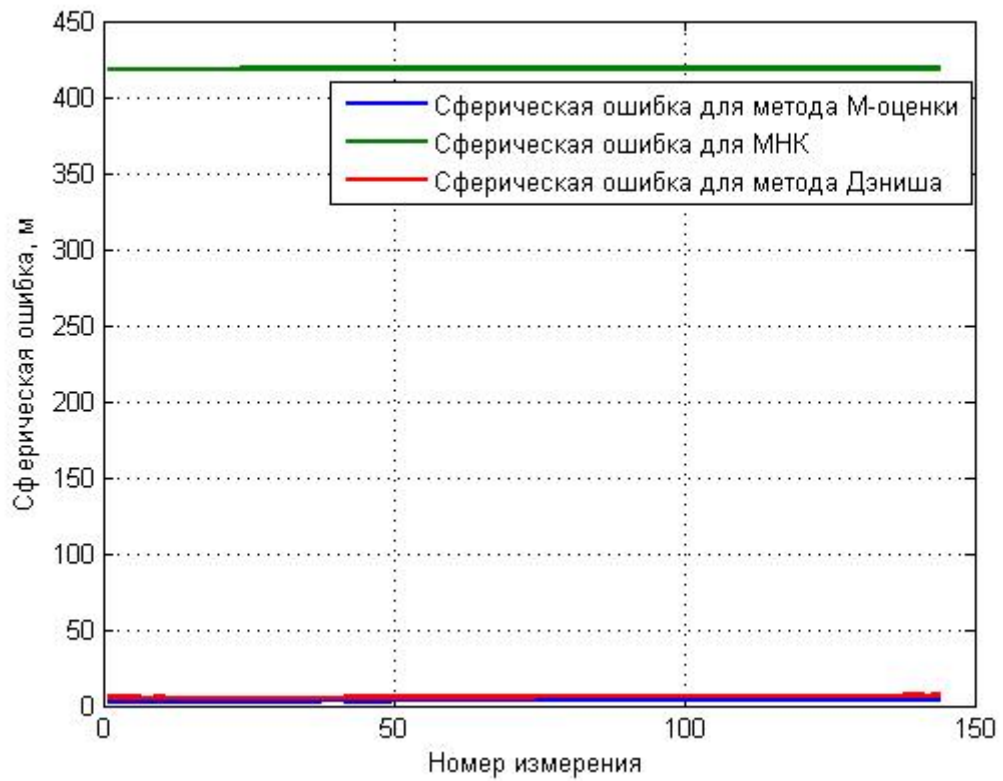


Рис. 32. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников.

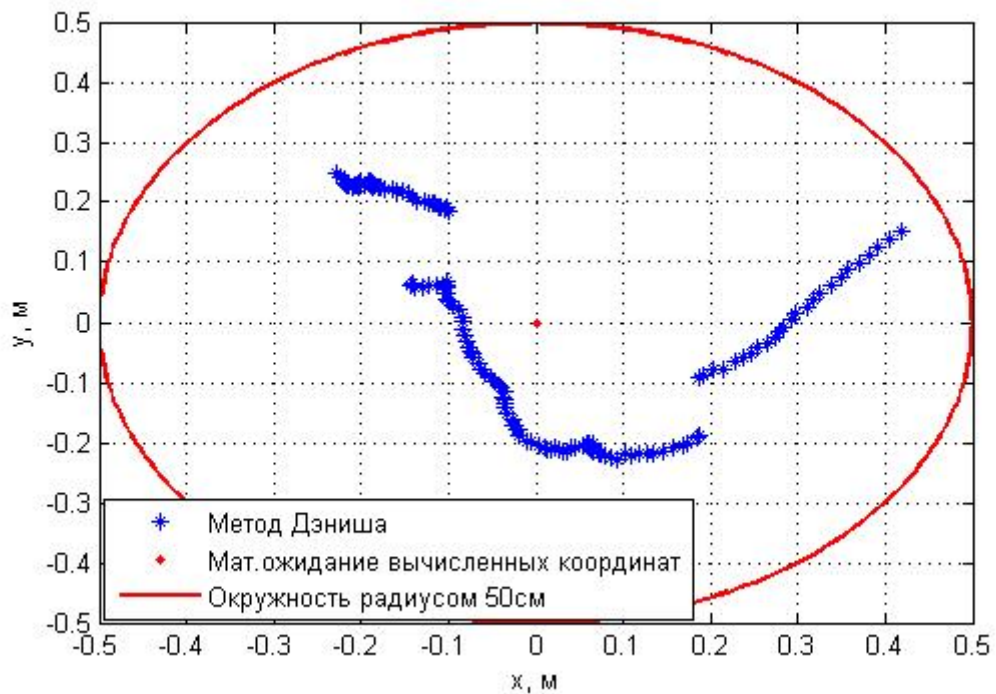


Рис. 33. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

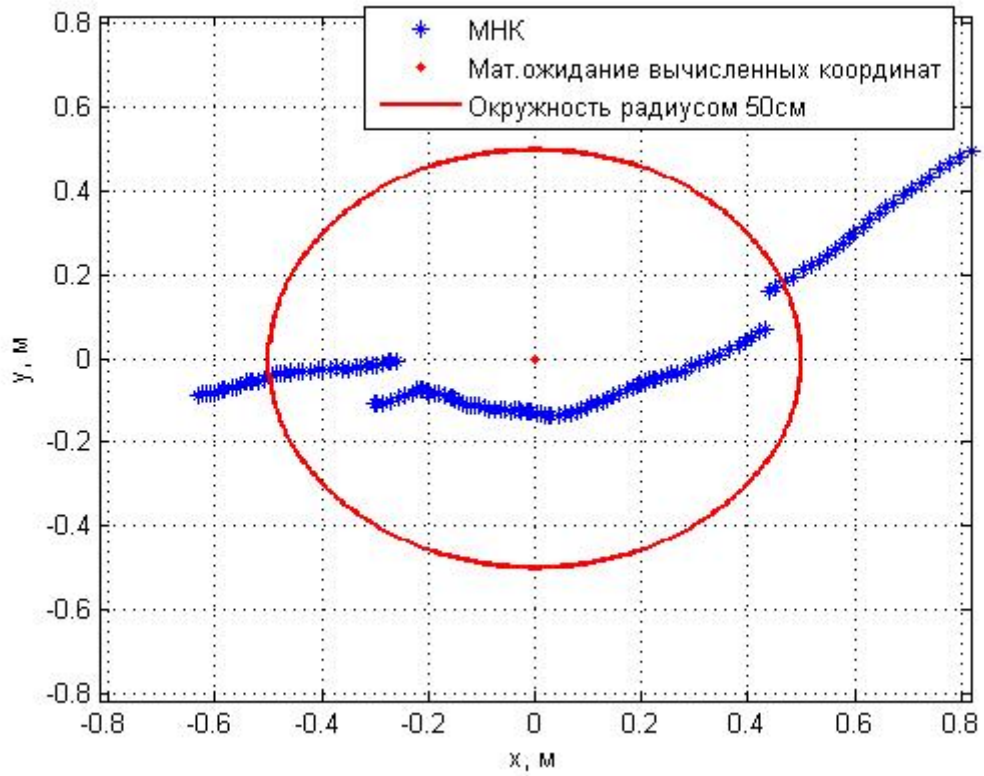


Рис. 34. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

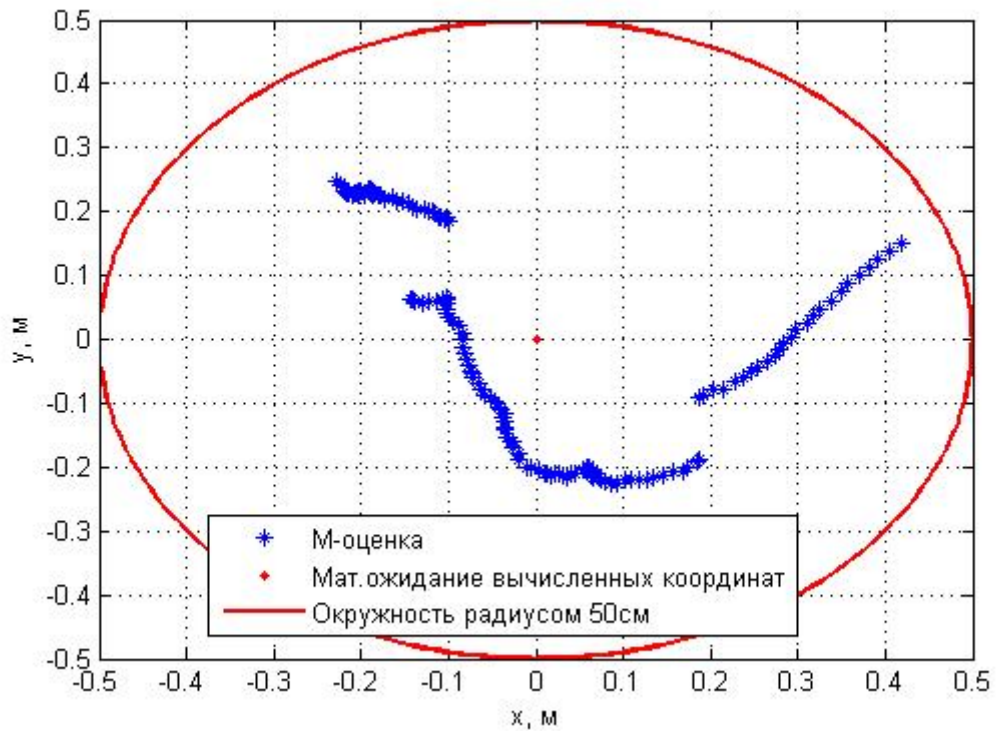


Рис. 35. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

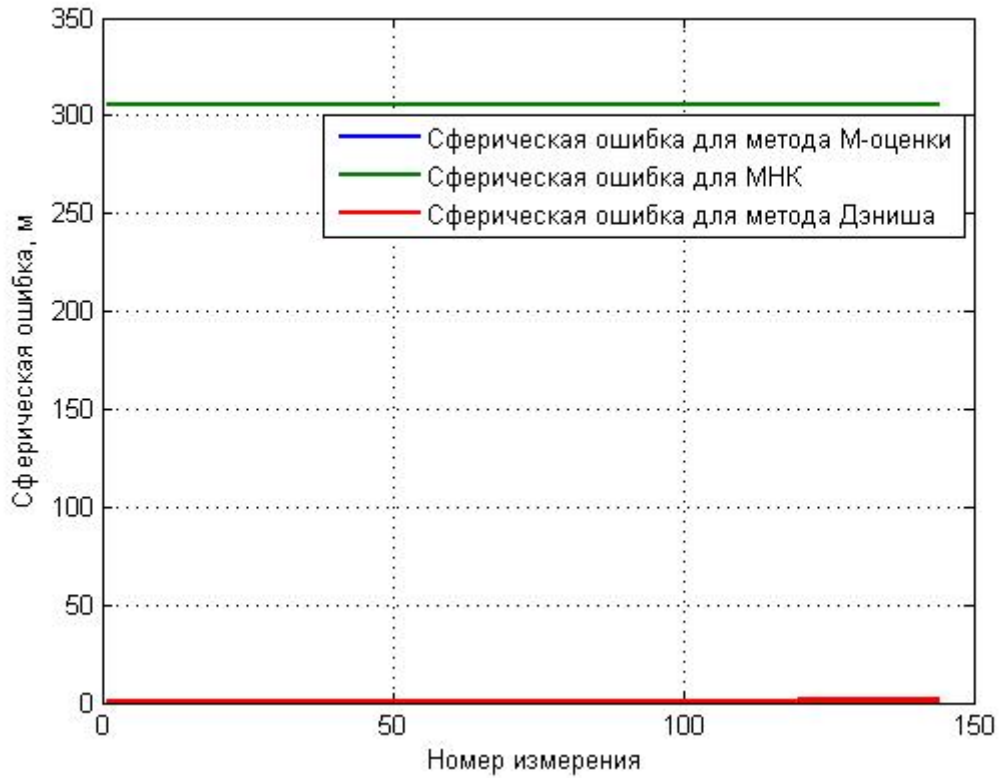


Рис. 36. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

В измерениях с самого начала присутствуют три ошибки.
Рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников.

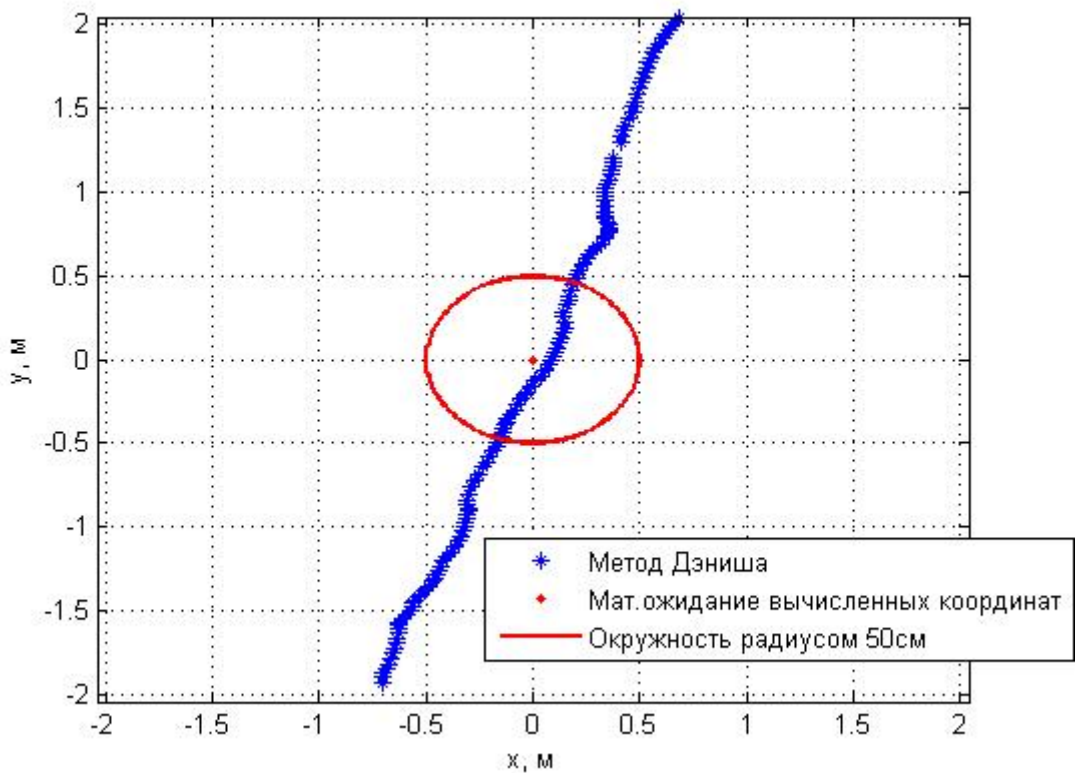


Рис. 37. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

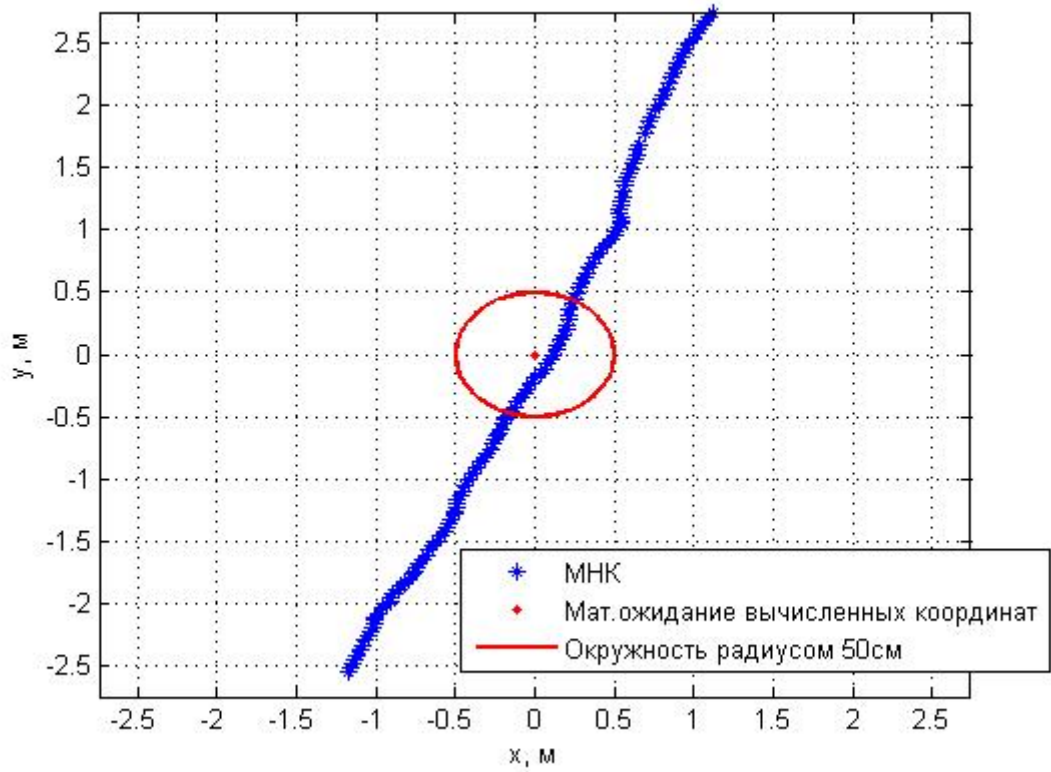


Рис. 38. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

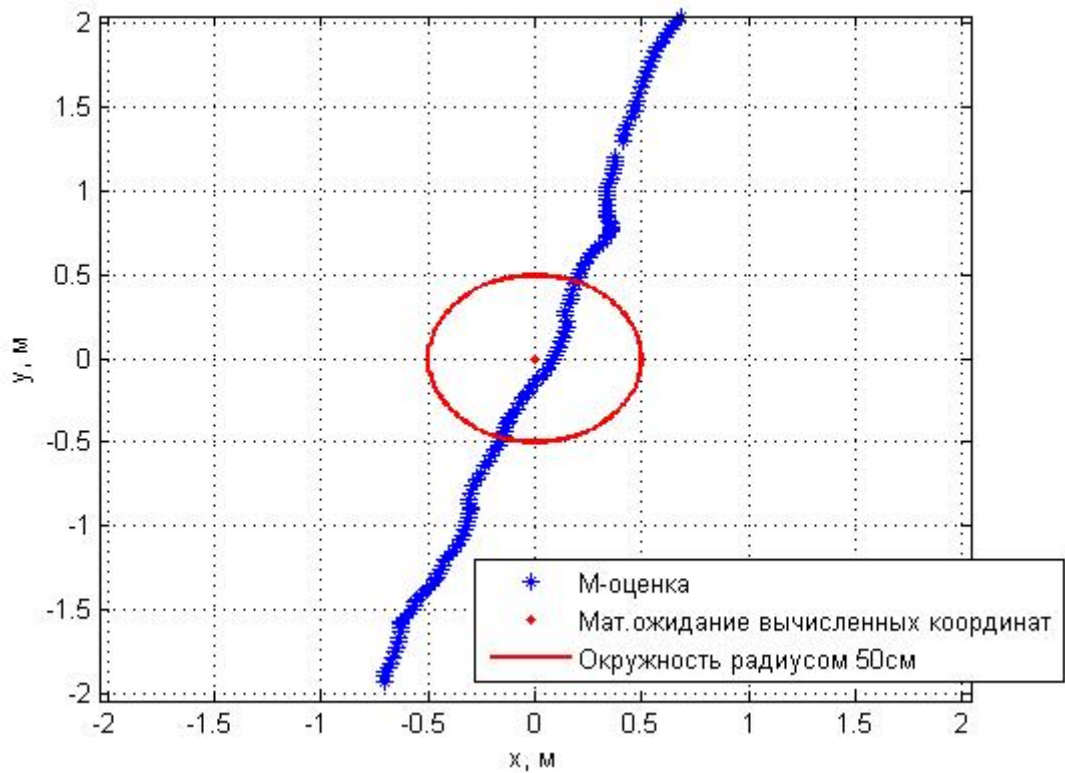


Рис. 39. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

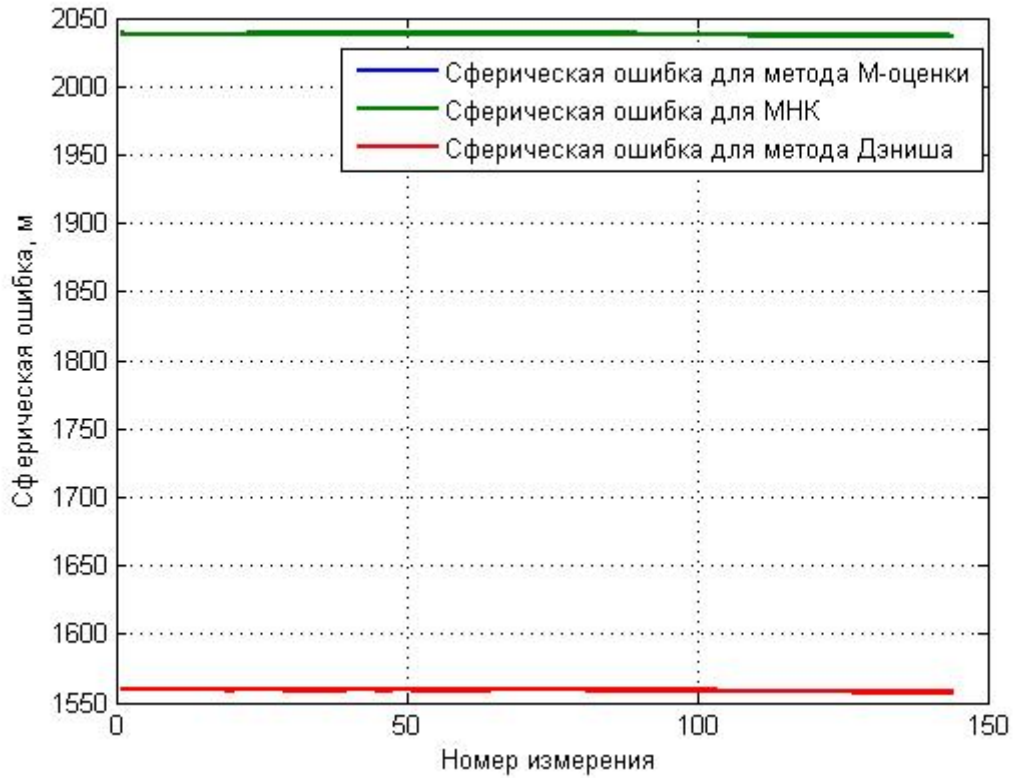


Рис. 40. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников.

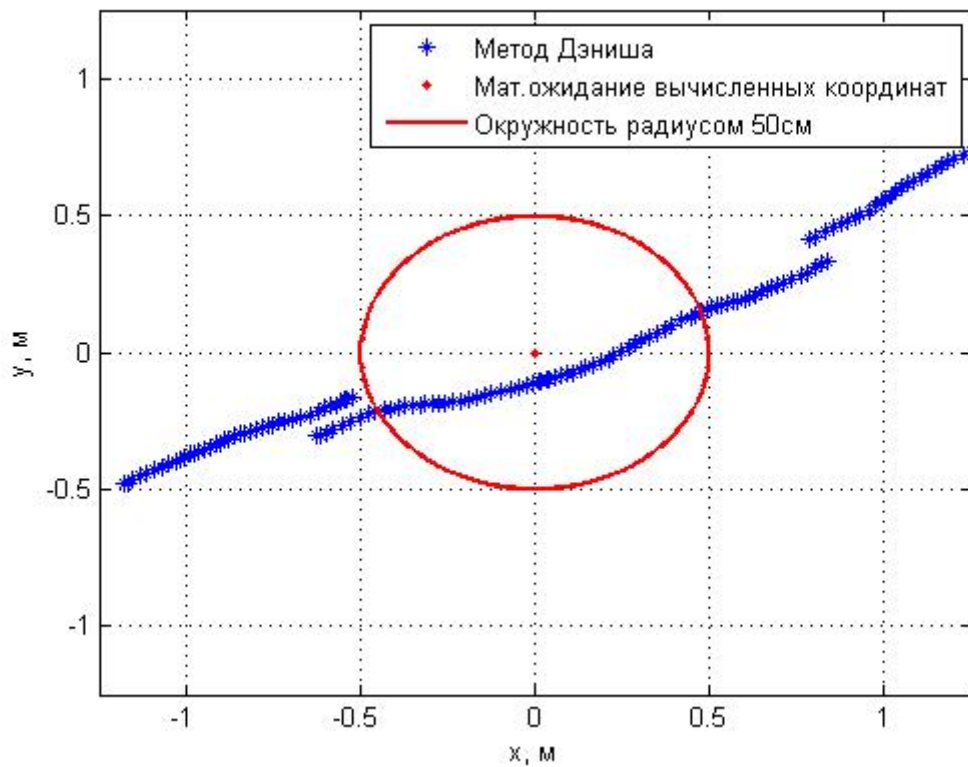


Рис. 41. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

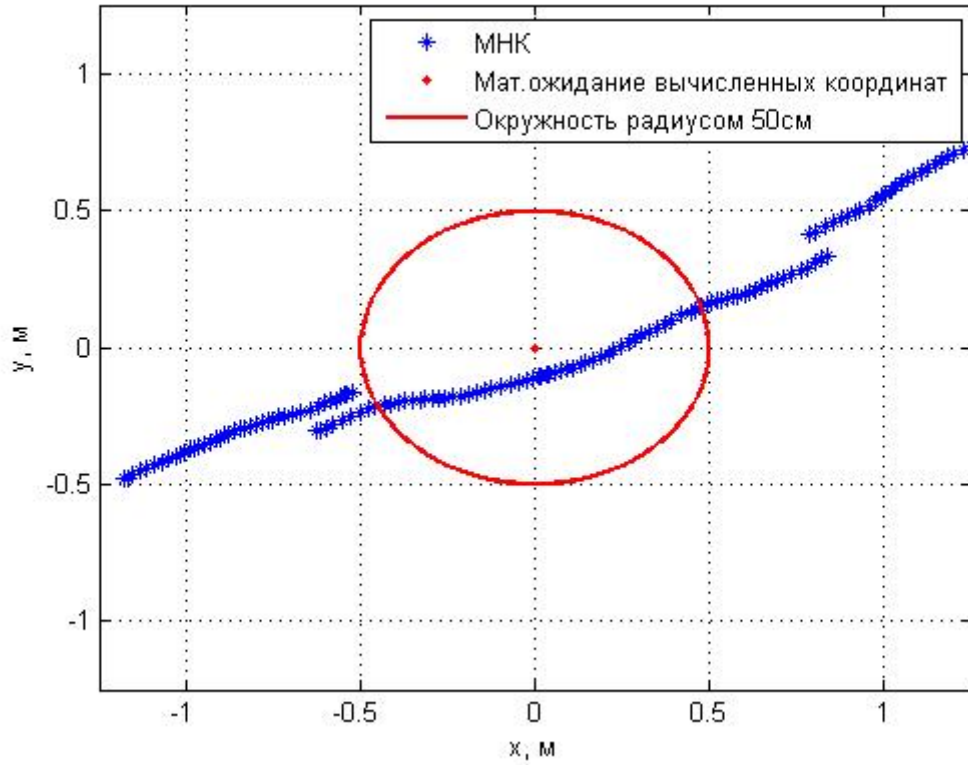


Рис. 42. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

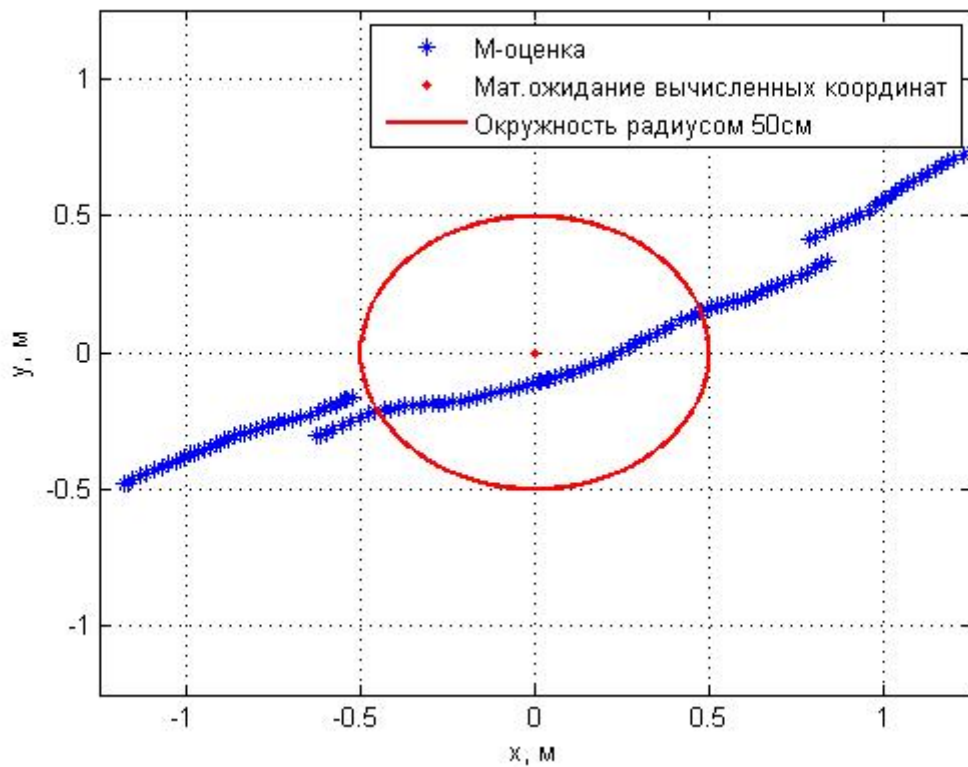


Рис. 43. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

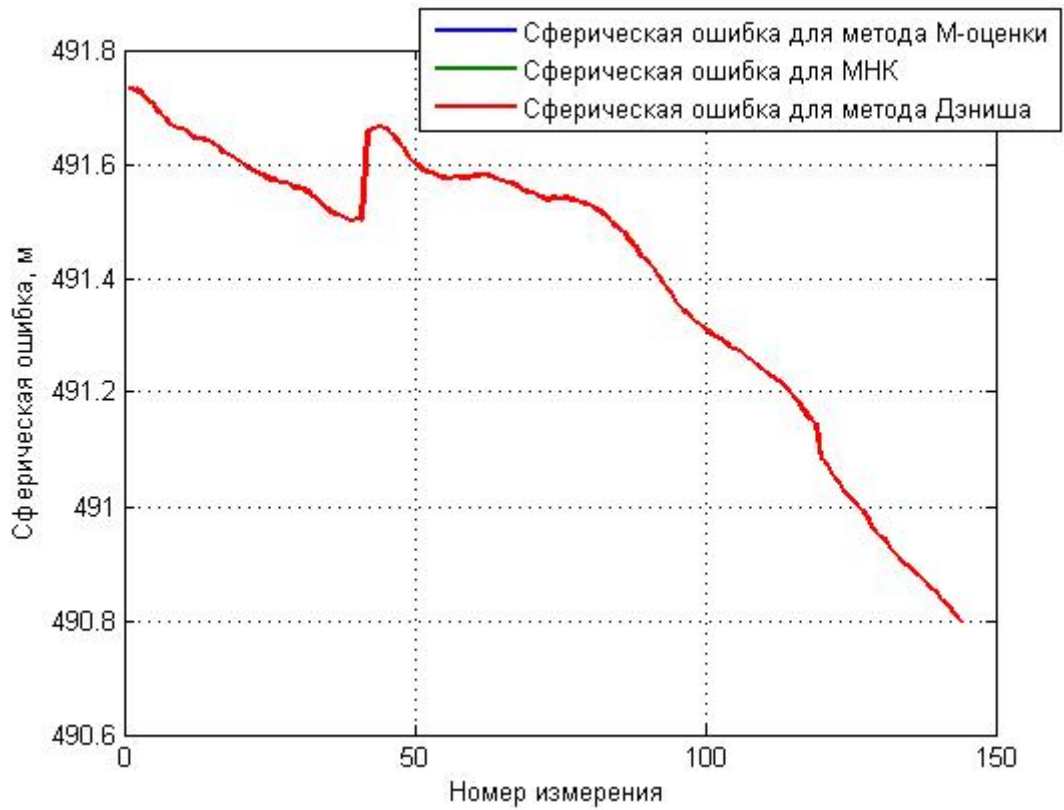


Рис. 44. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников.

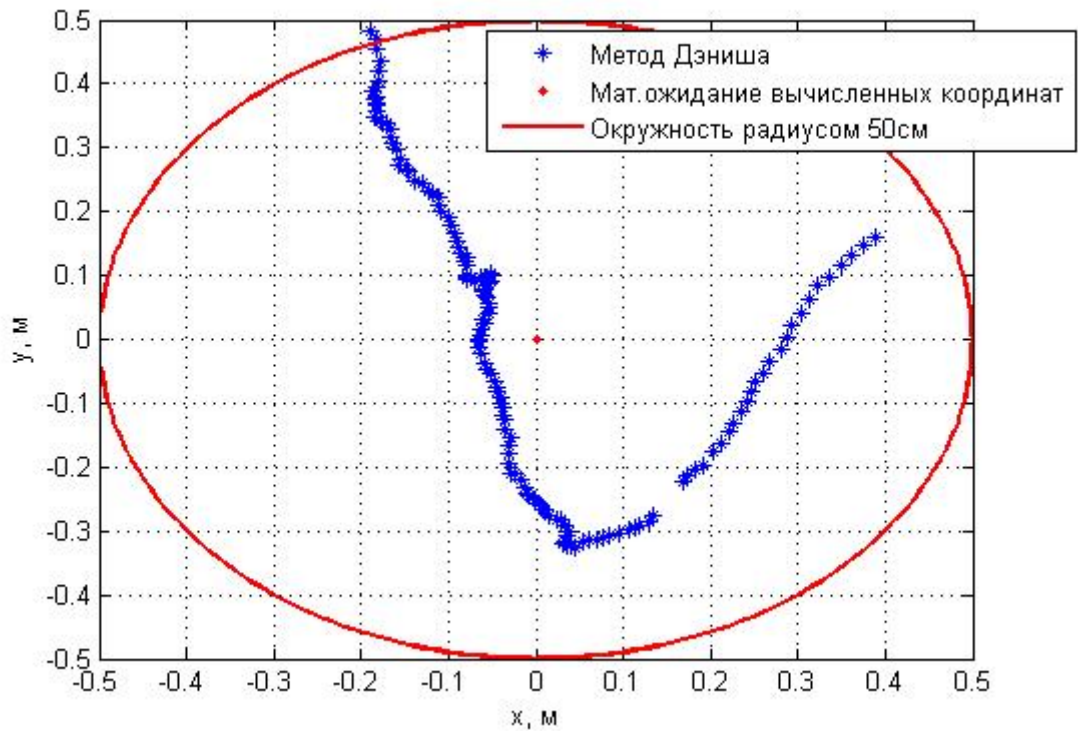


Рис. 45. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

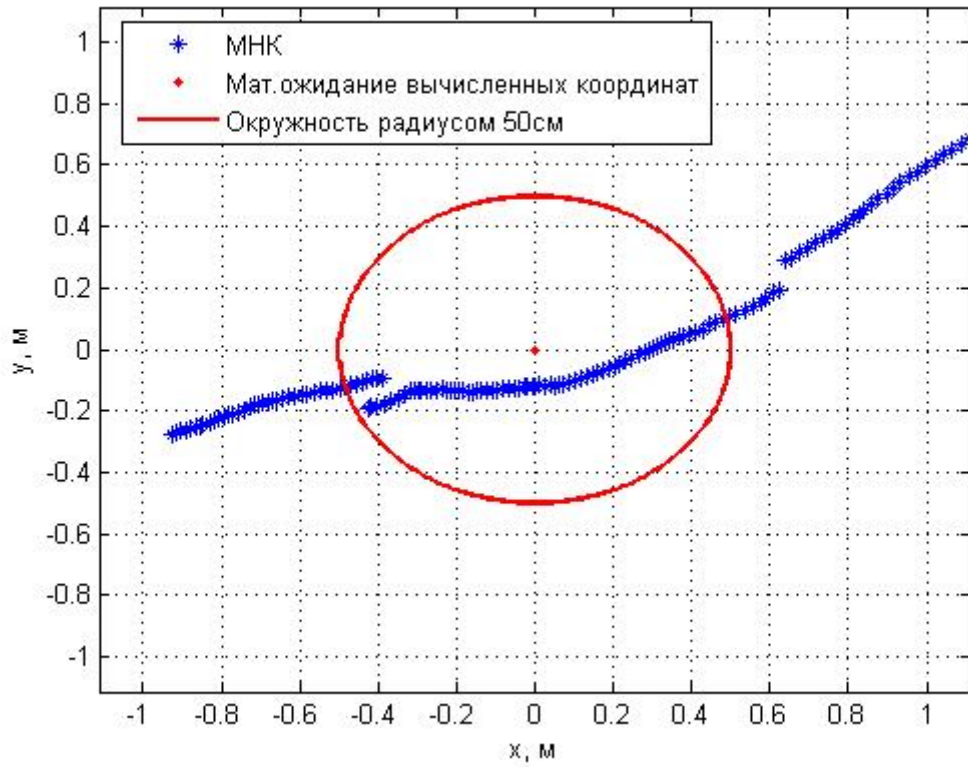


Рис. 46. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

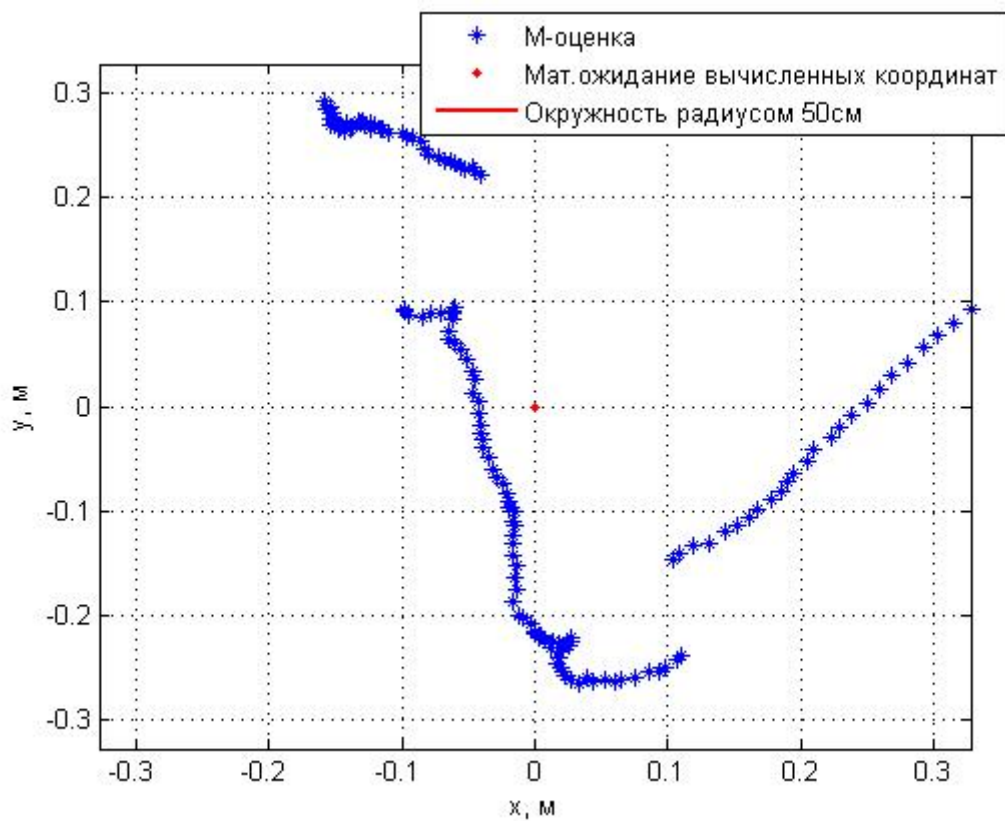


Рис. 47. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

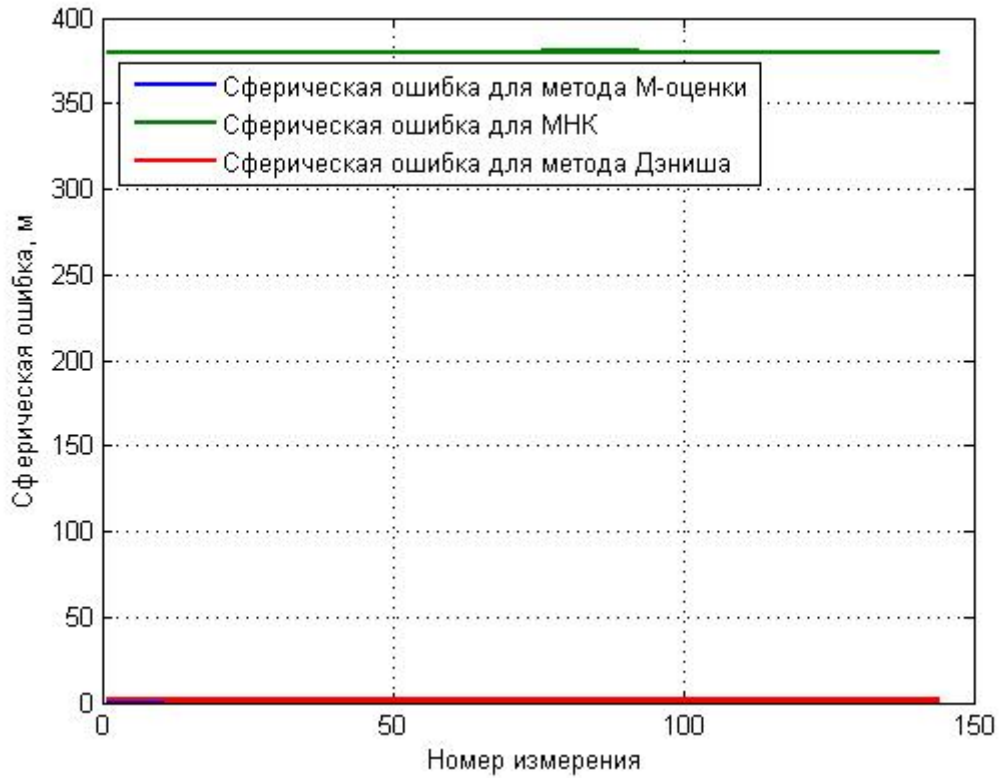


Рис. 48. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

В процессе наблюдения в измерениях появляется одна ошибка.
Рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников.

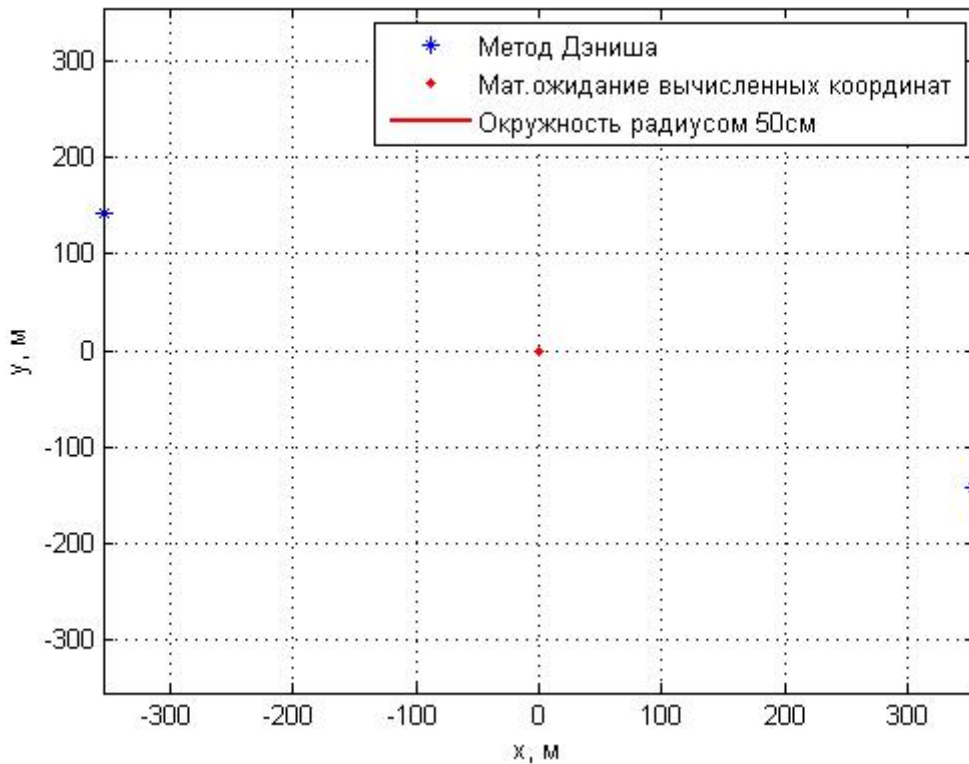


Рис. 49. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

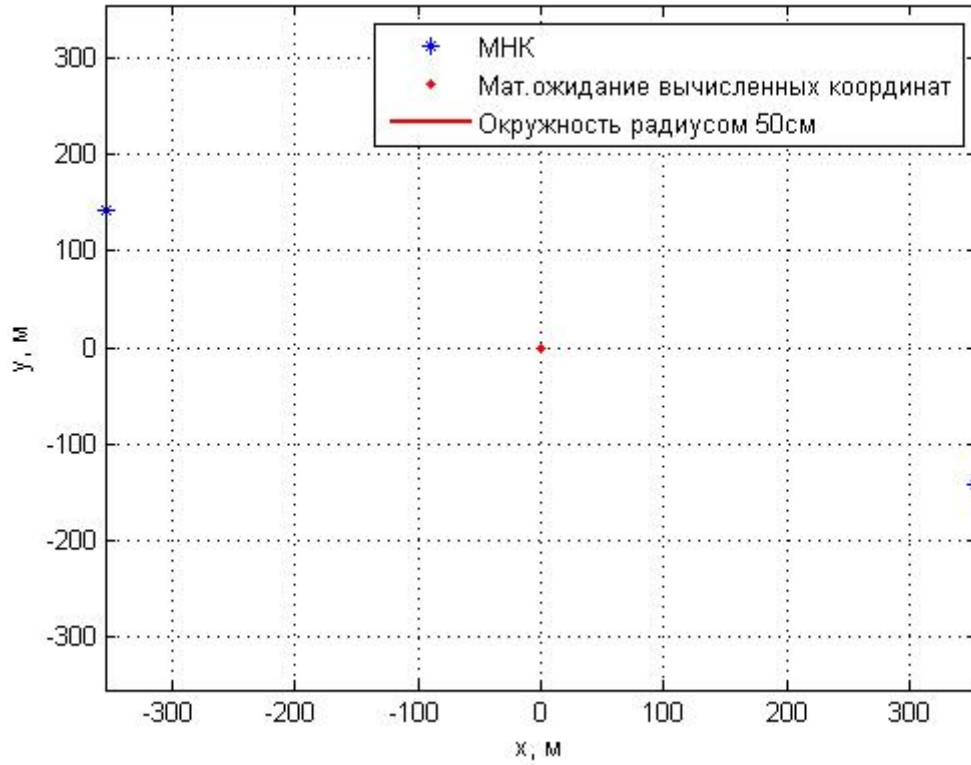


Рис. 50. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

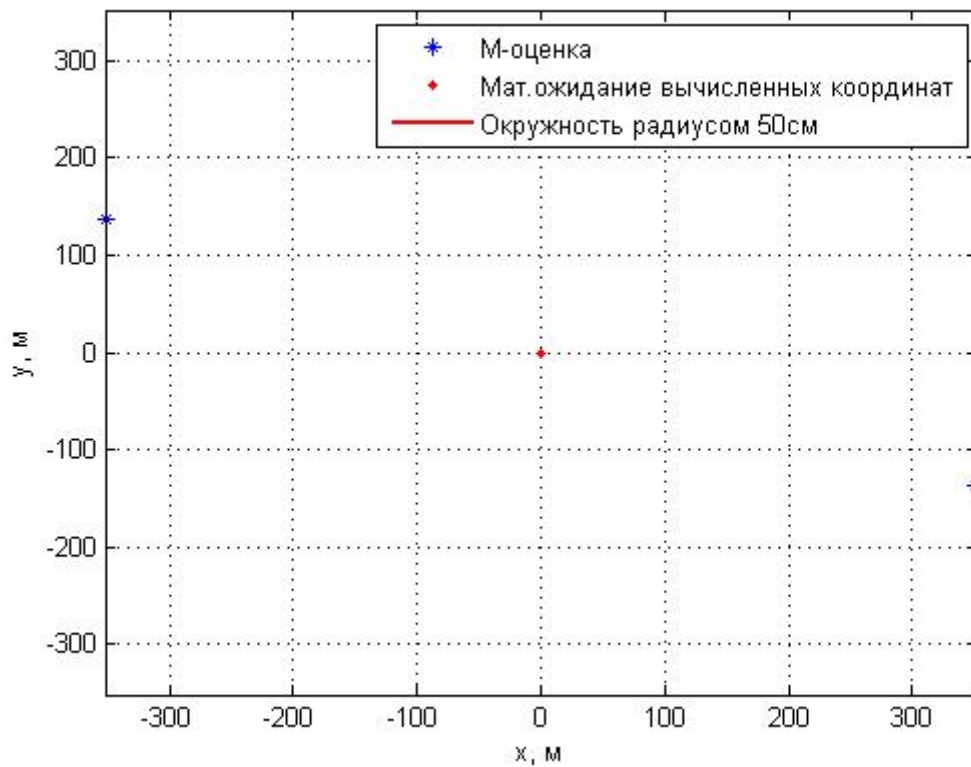


Рис. 51. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

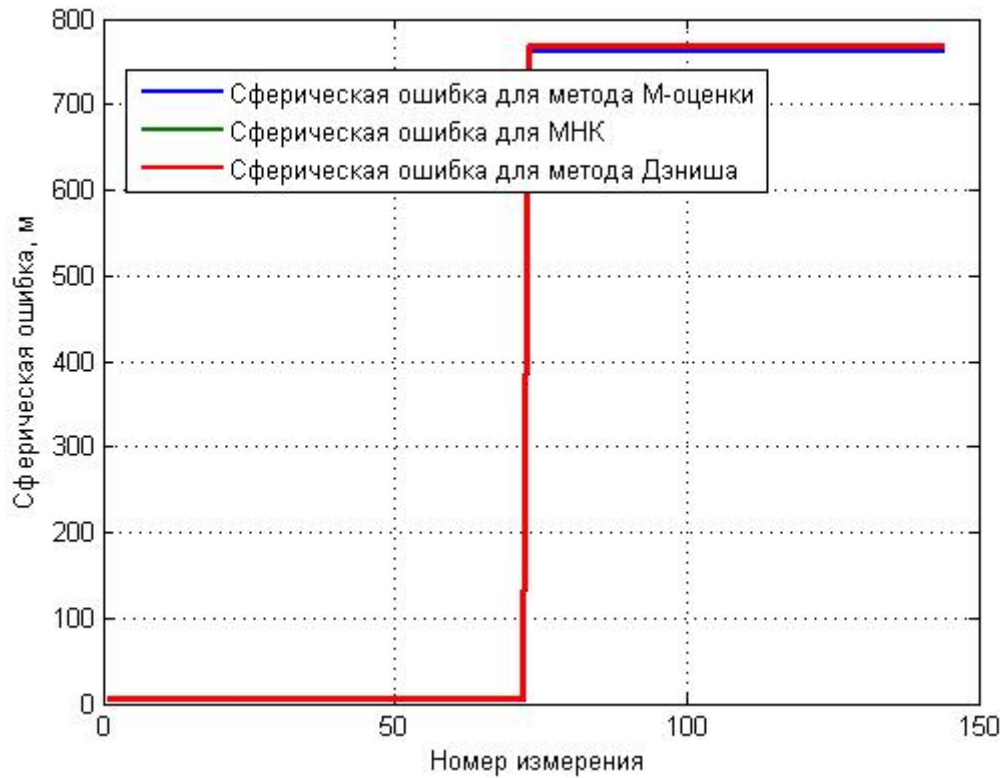


Рис. 52. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников.

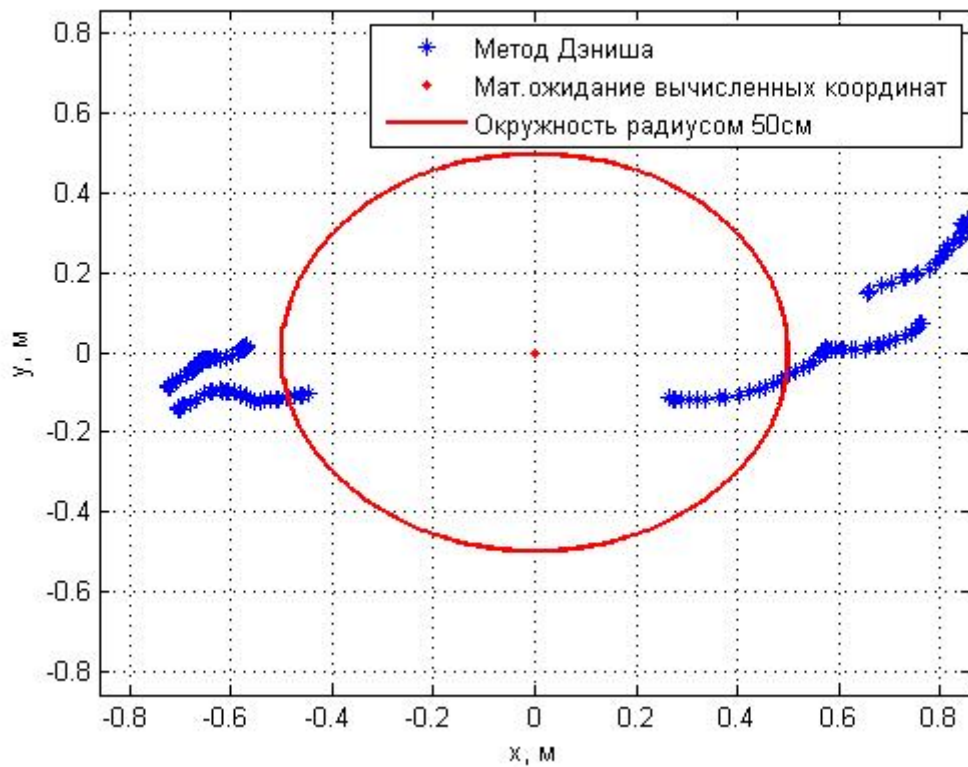


Рис. 53. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

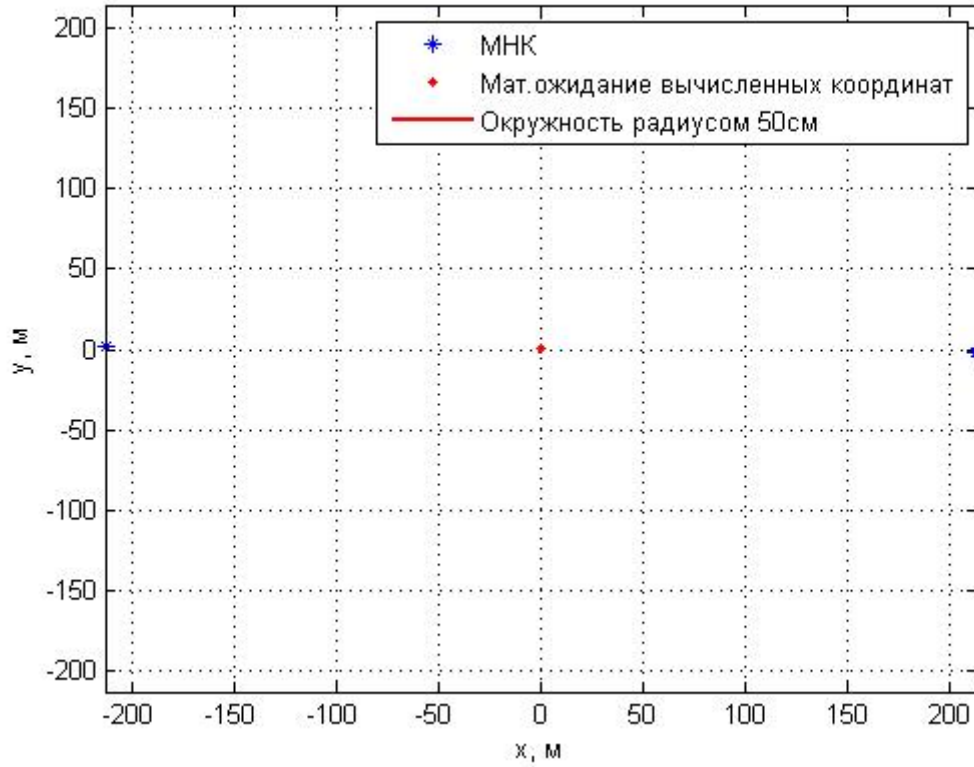


Рис. 54. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

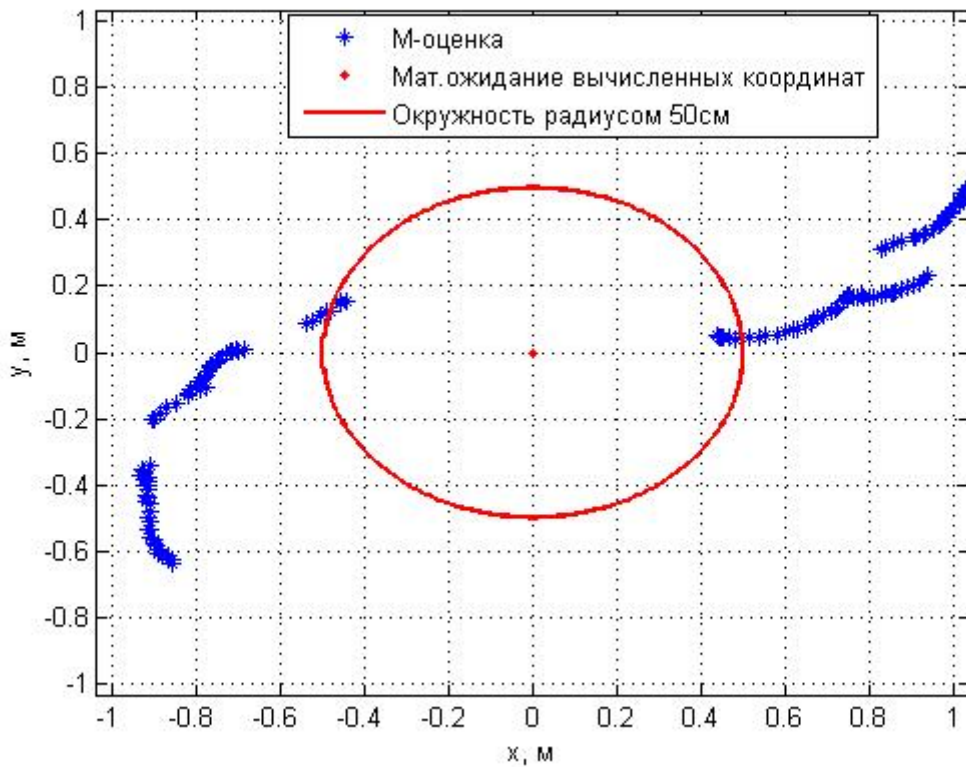


Рис. 55. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

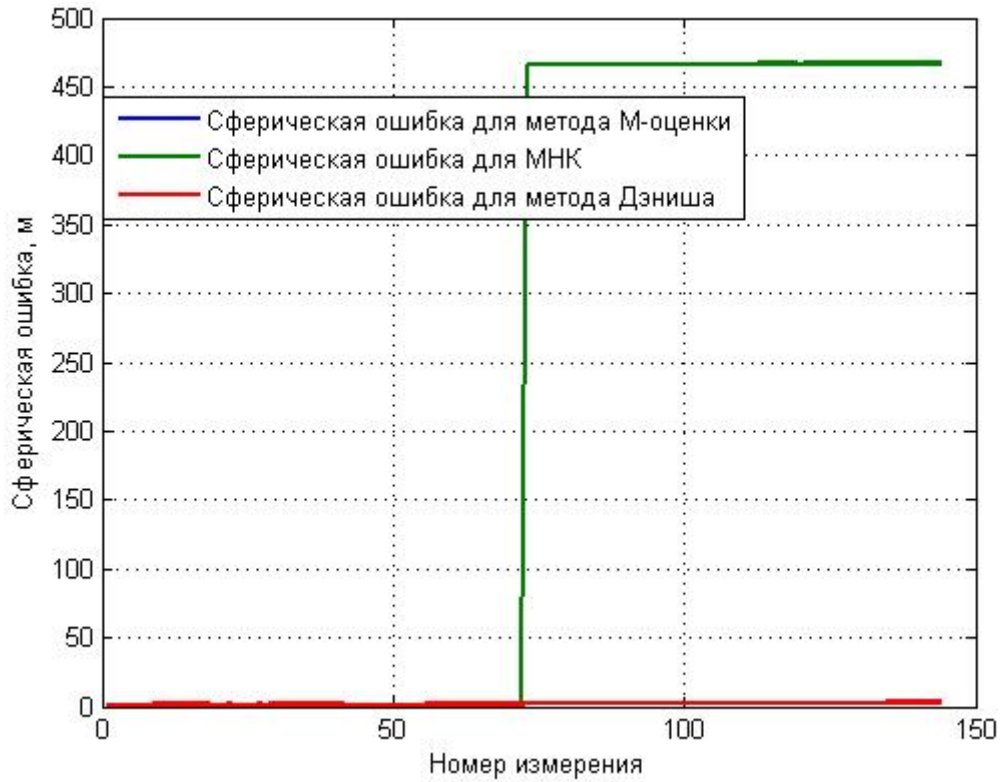


Рис. 56. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников.

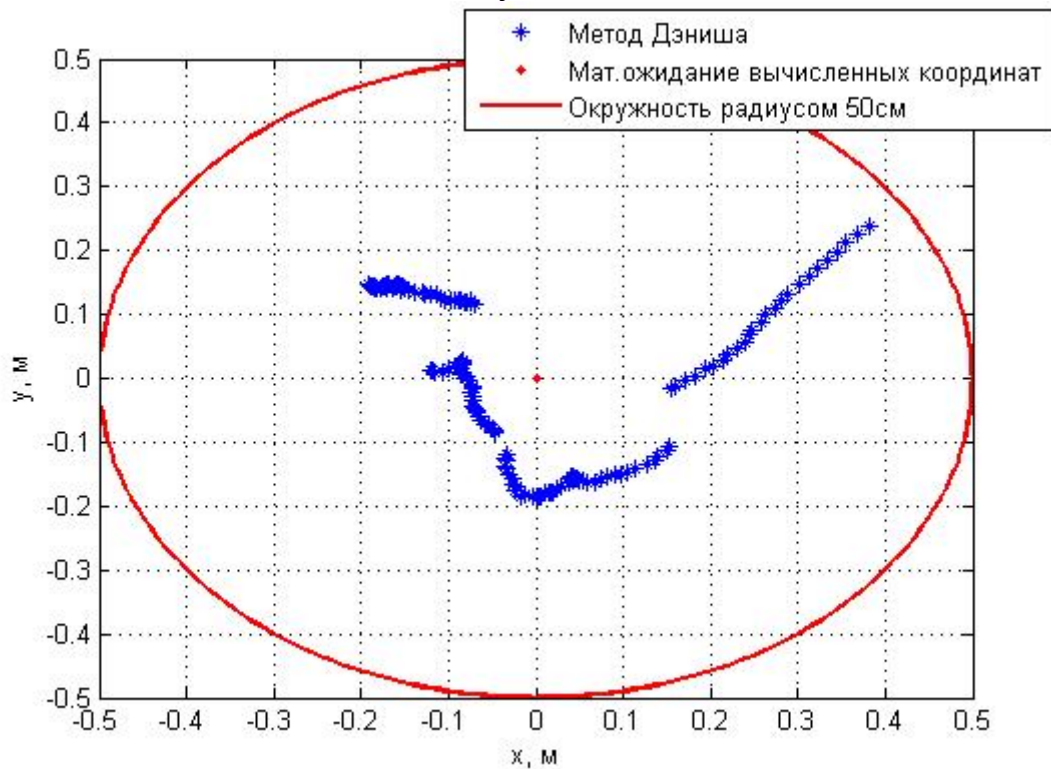


Рис. 57. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

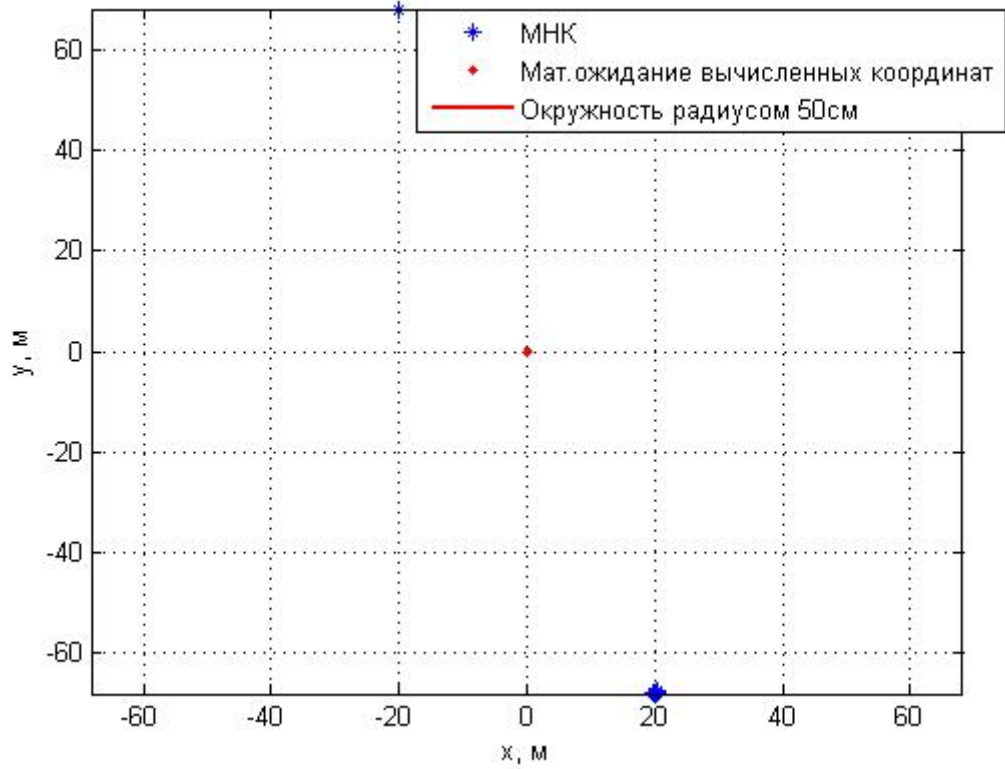


Рис. 58. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

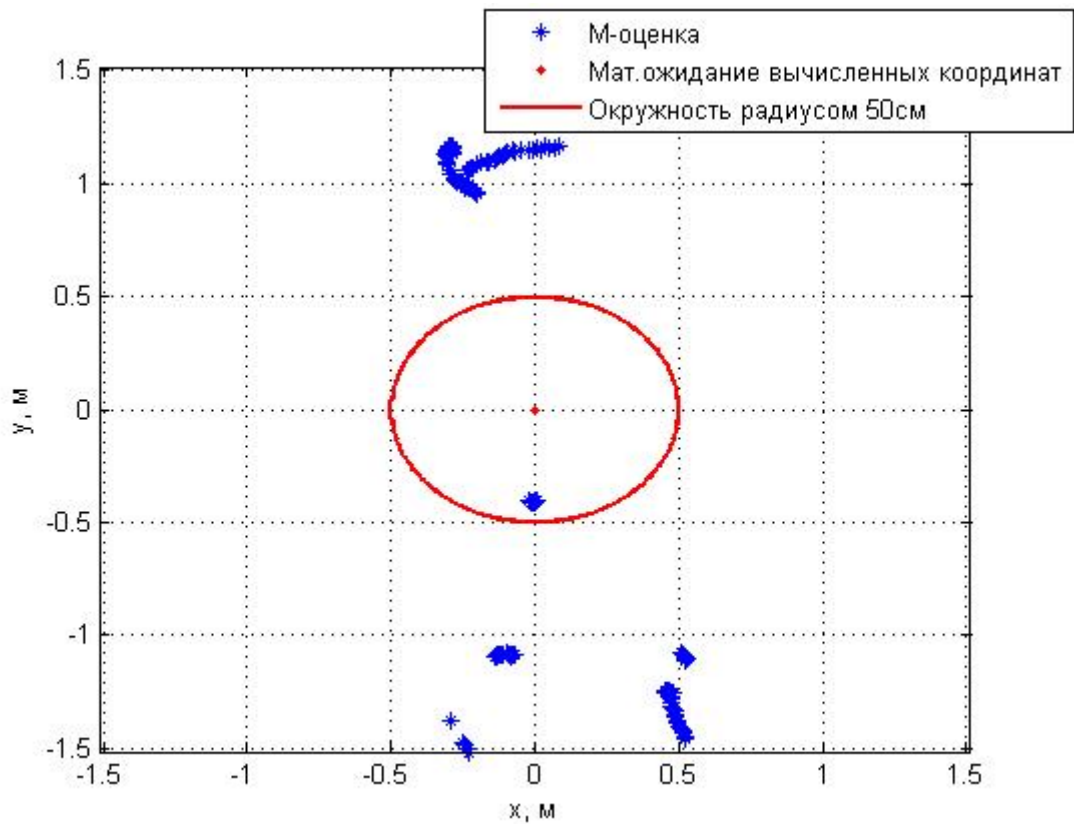


Рис. 59. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

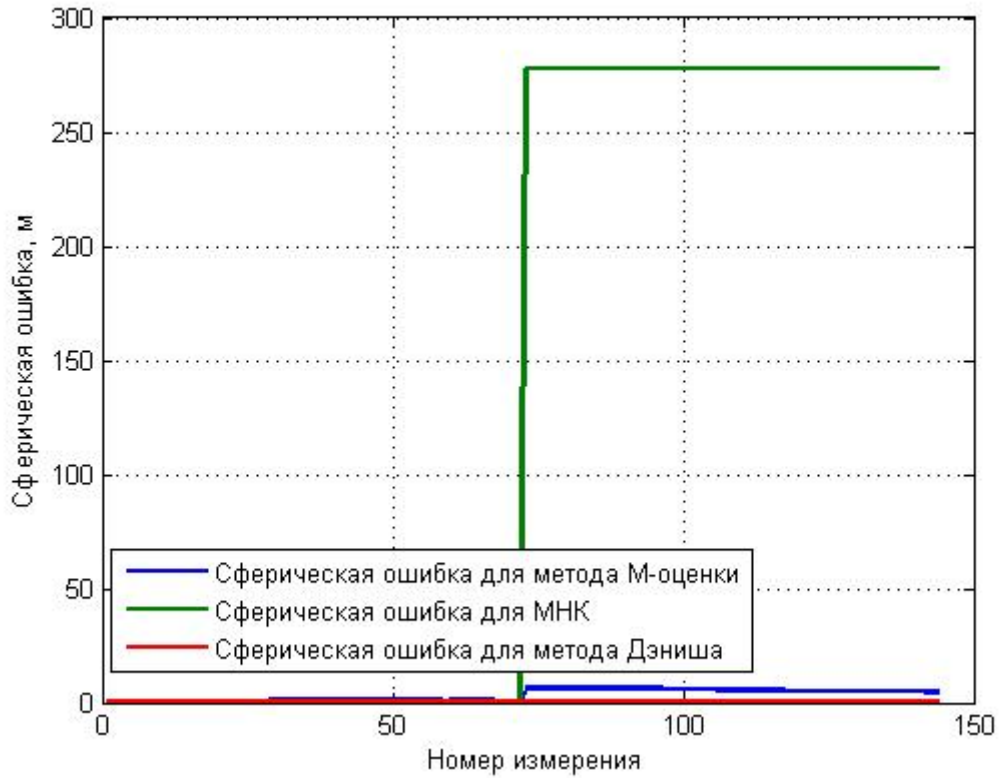


Рис. 60. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

В процессе наблюдения в измерениях появляются две ошибки.
Рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников.

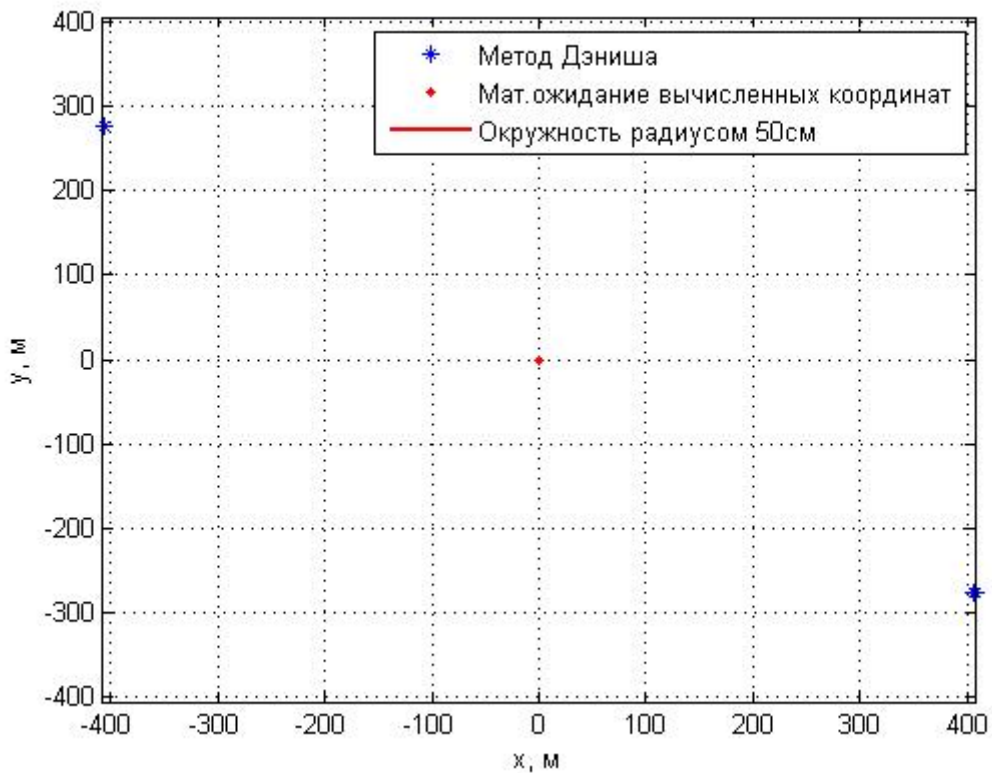


Рис. 61. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

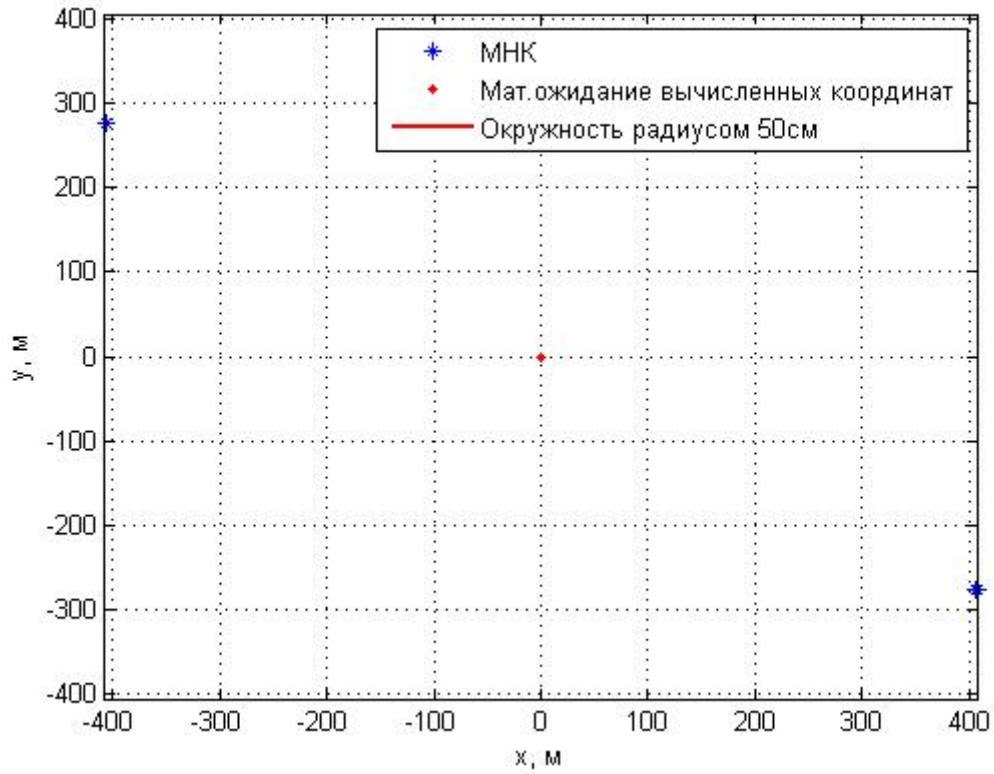


Рис. 62. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

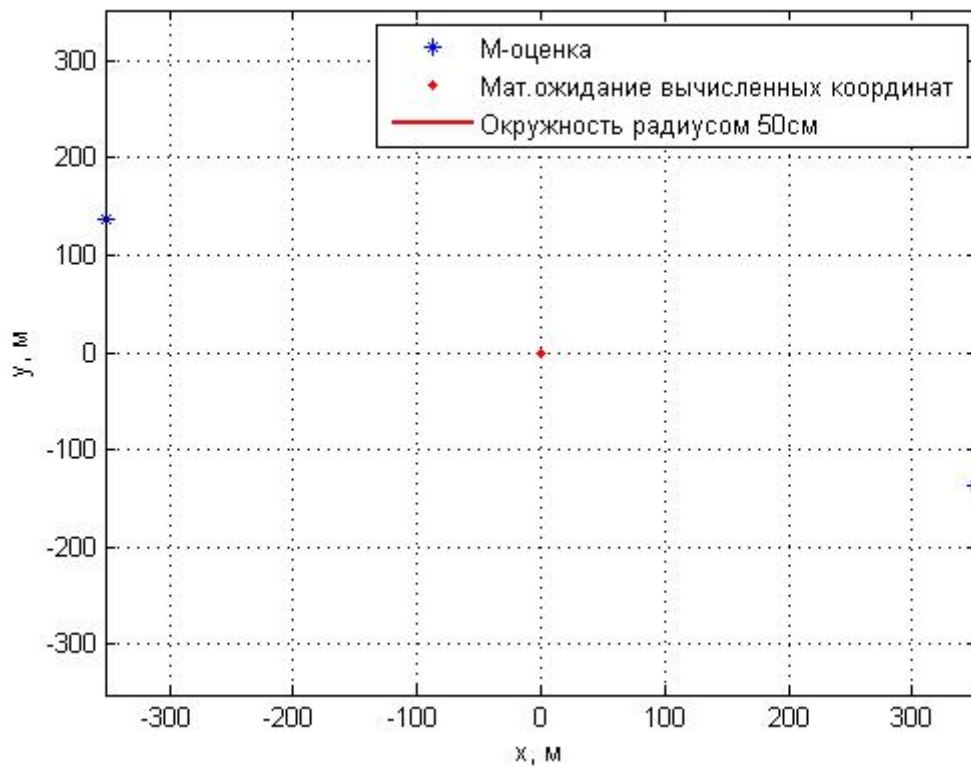


Рис. 63. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

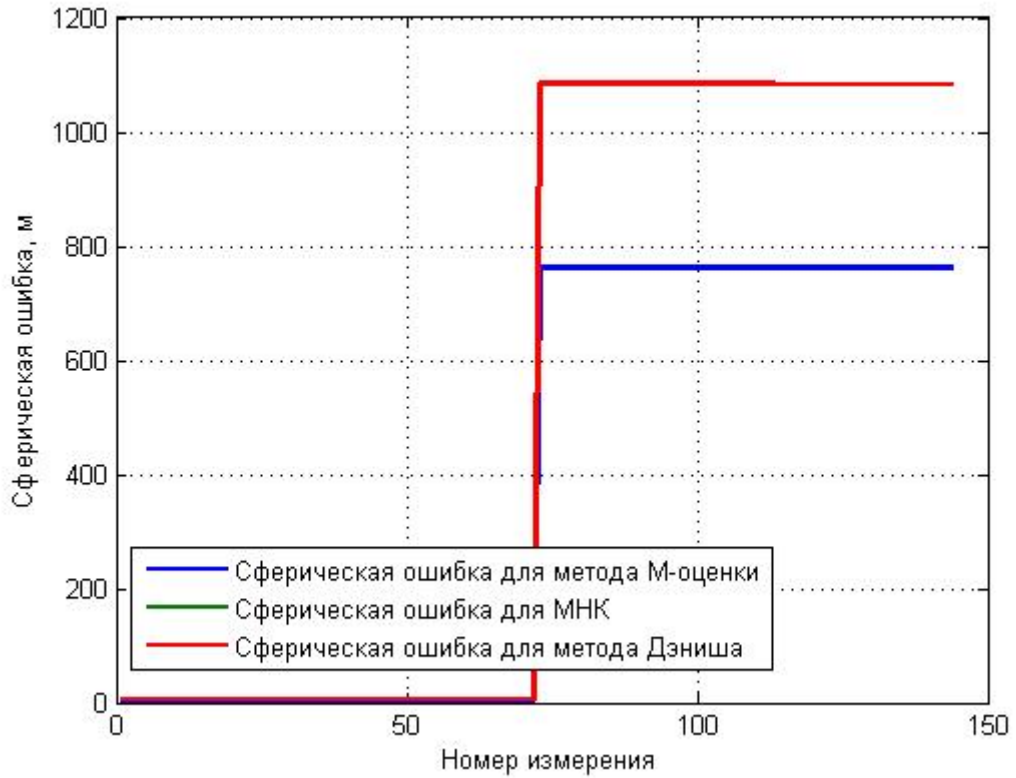


Рис. 64. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников.

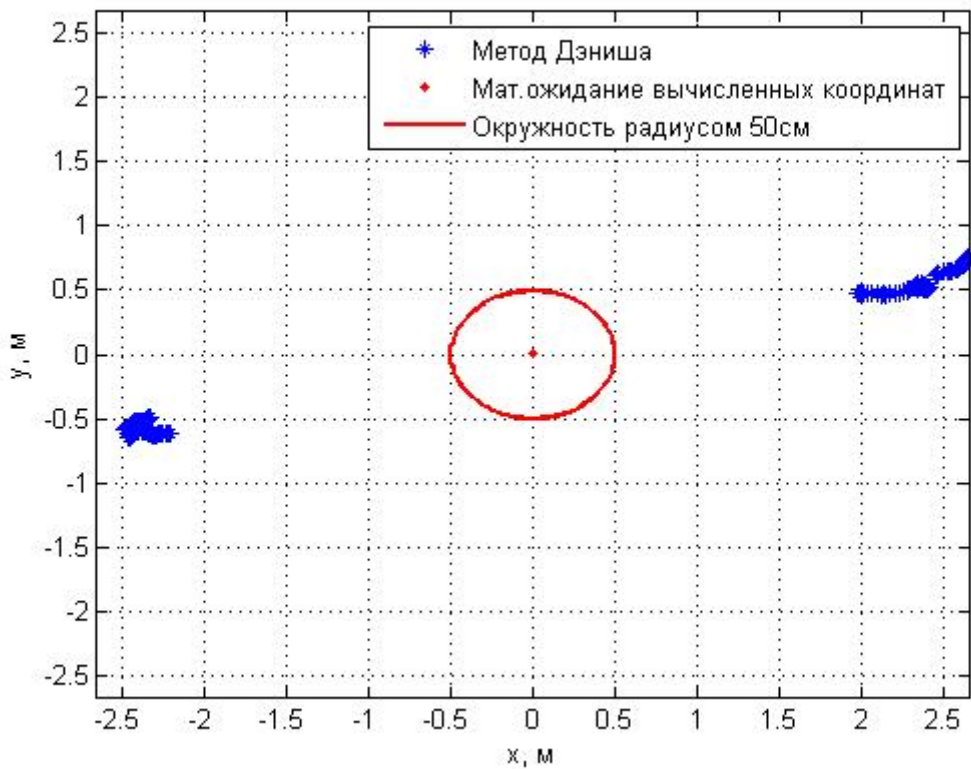


Рис. 65. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

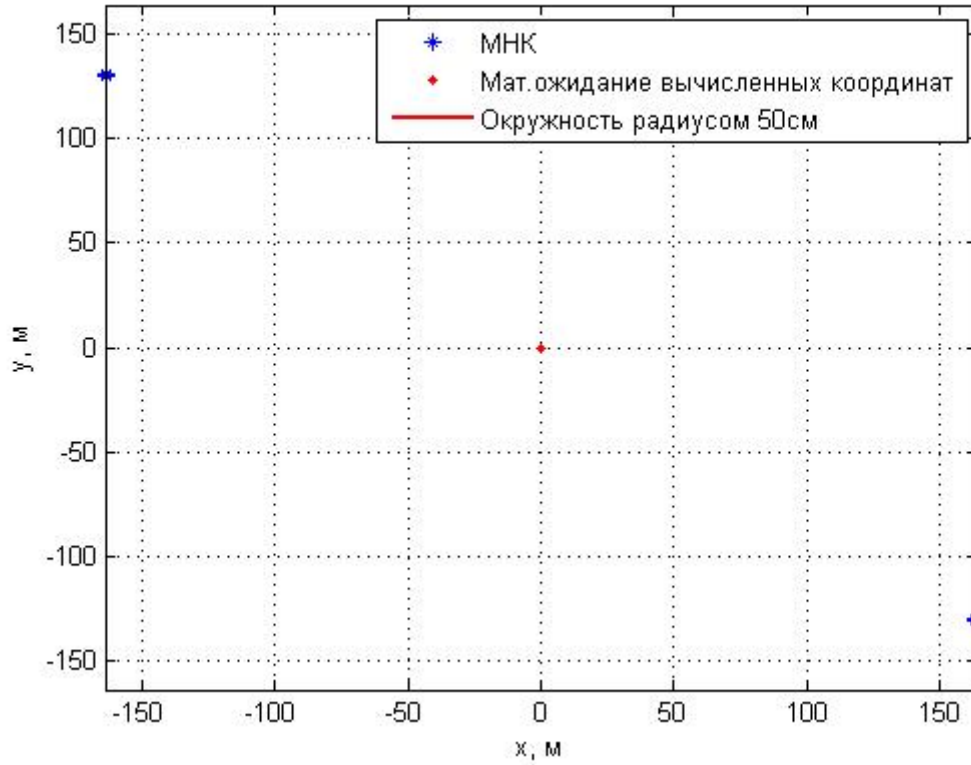


Рис. 66. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

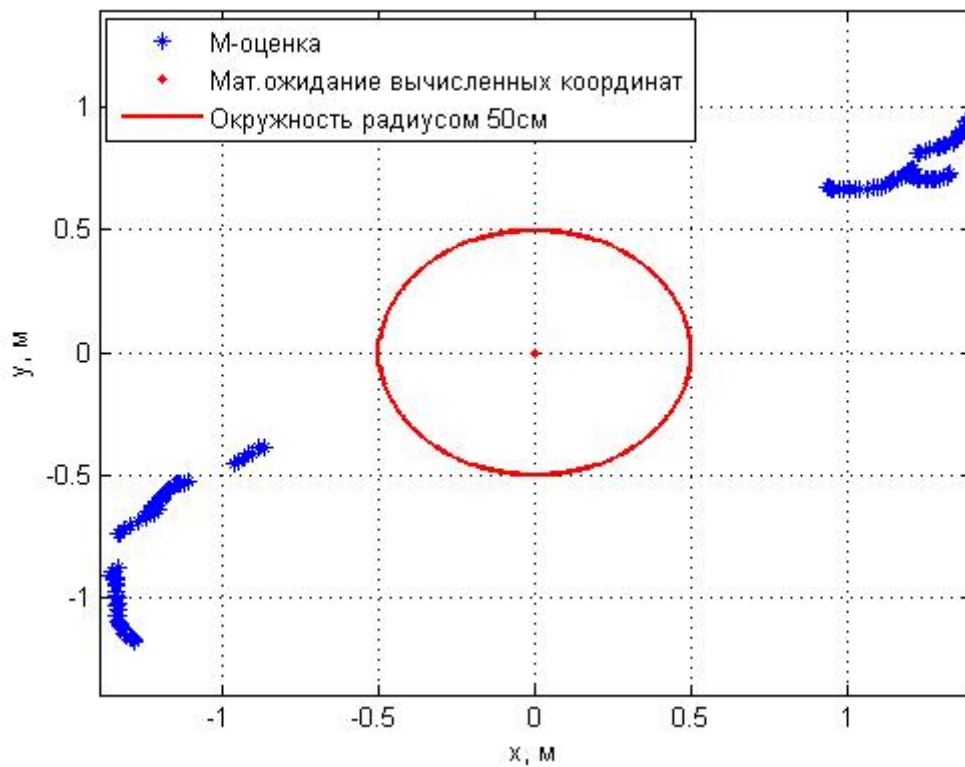


Рис. 67. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

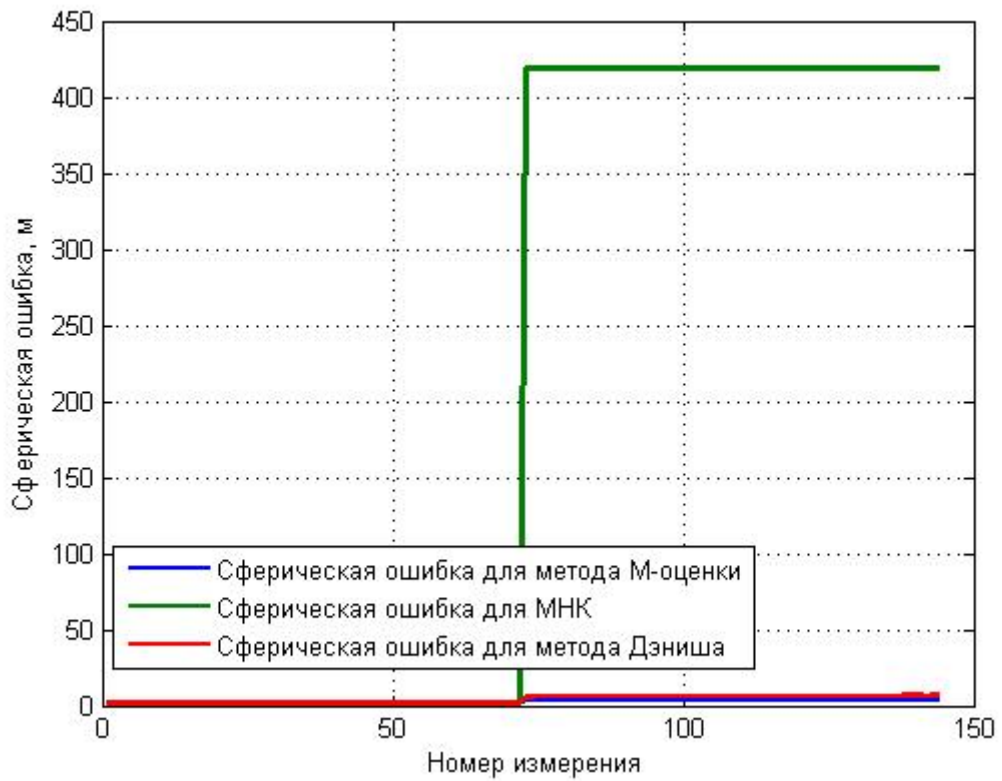


Рис. 68. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников.

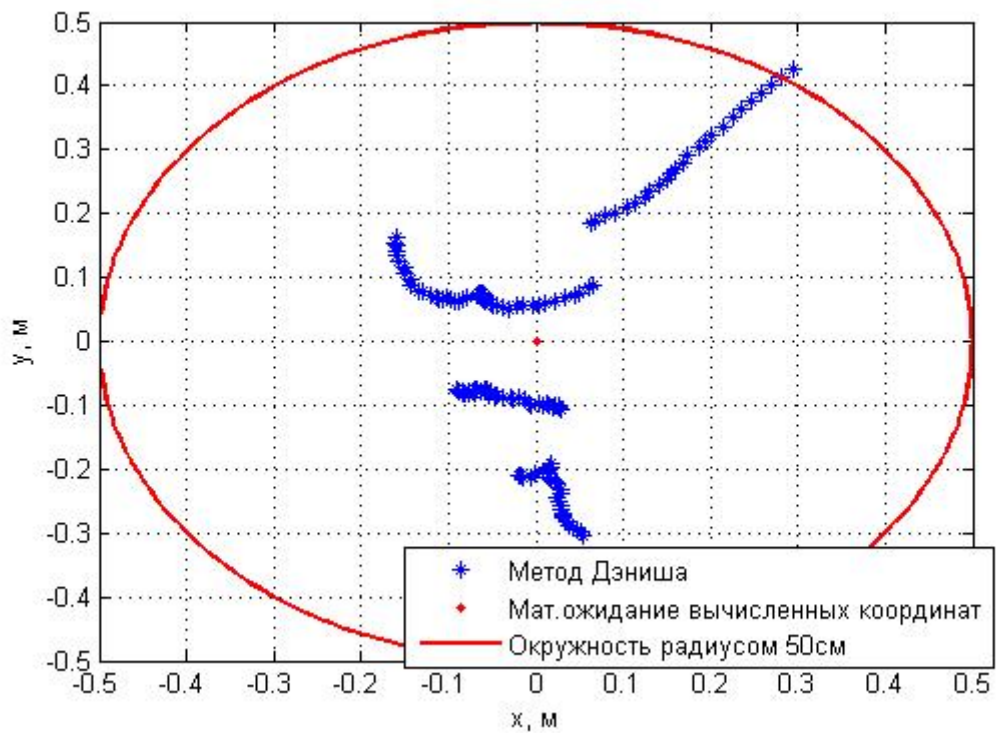


Рис. 69. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

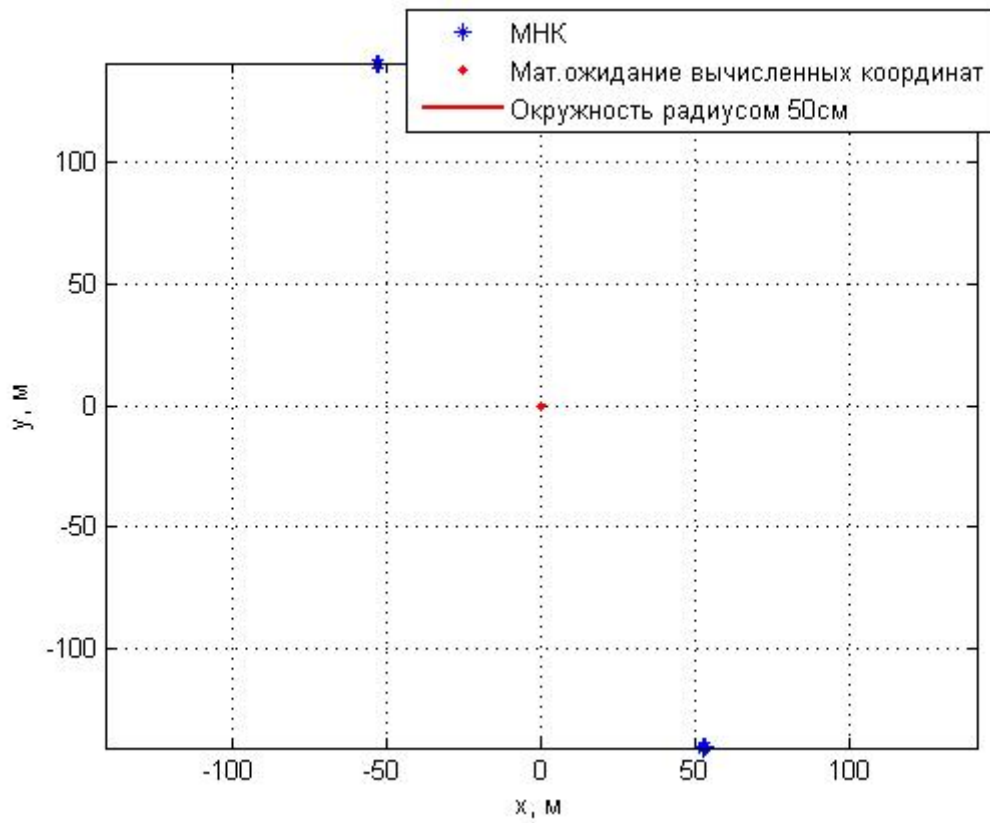


Рис. 70. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

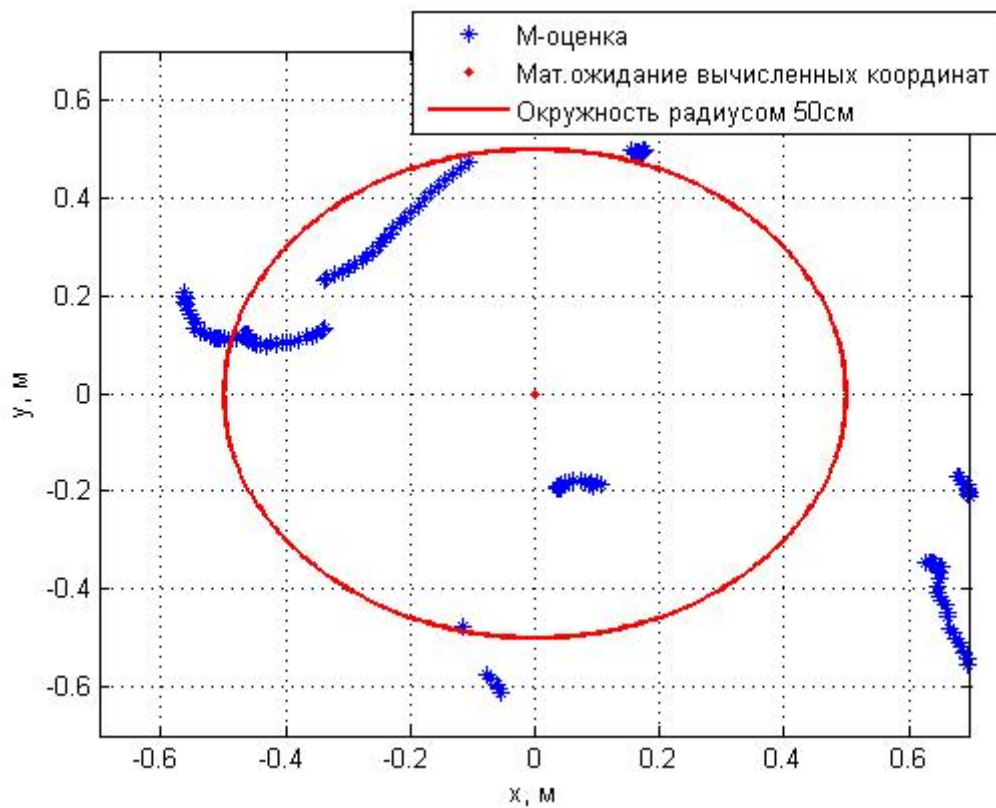


Рис. 71. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

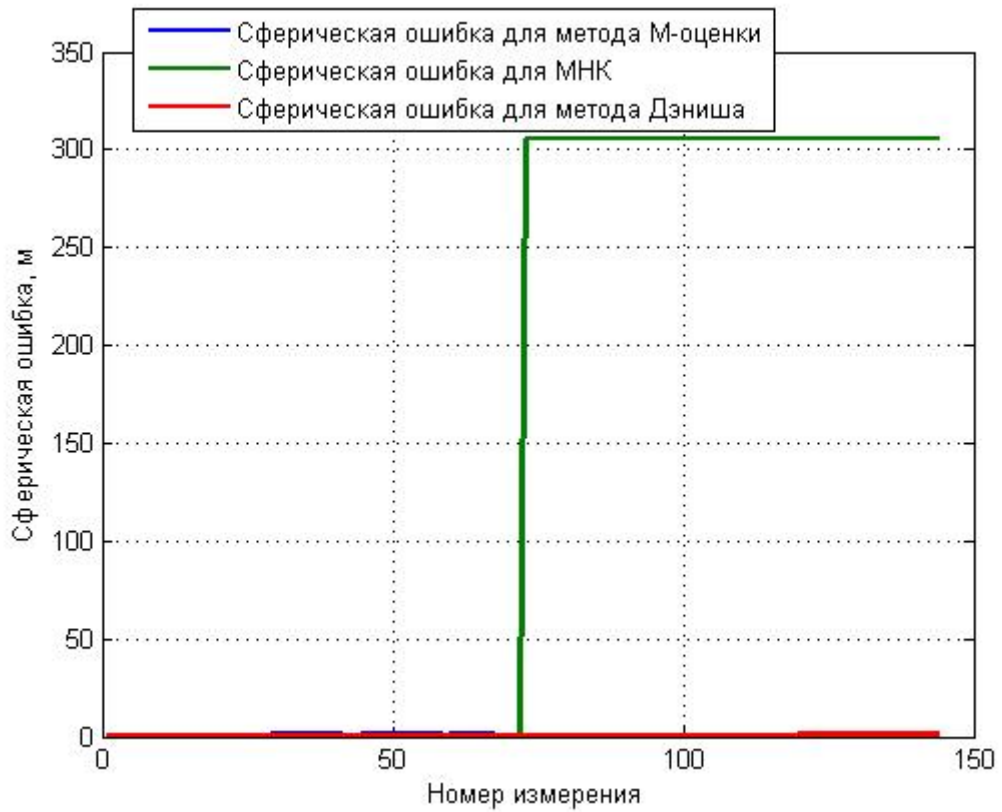


Рис. 72. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

В процессе наблюдения в измерениях появляются три ошибки.
Рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников.

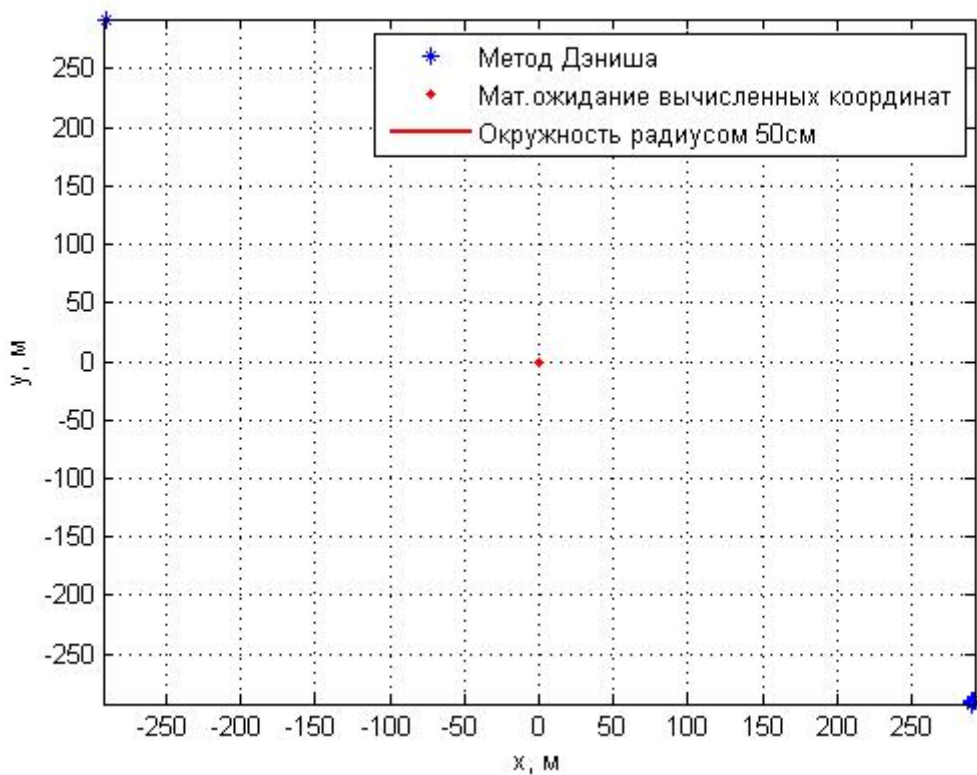


Рис. 73. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

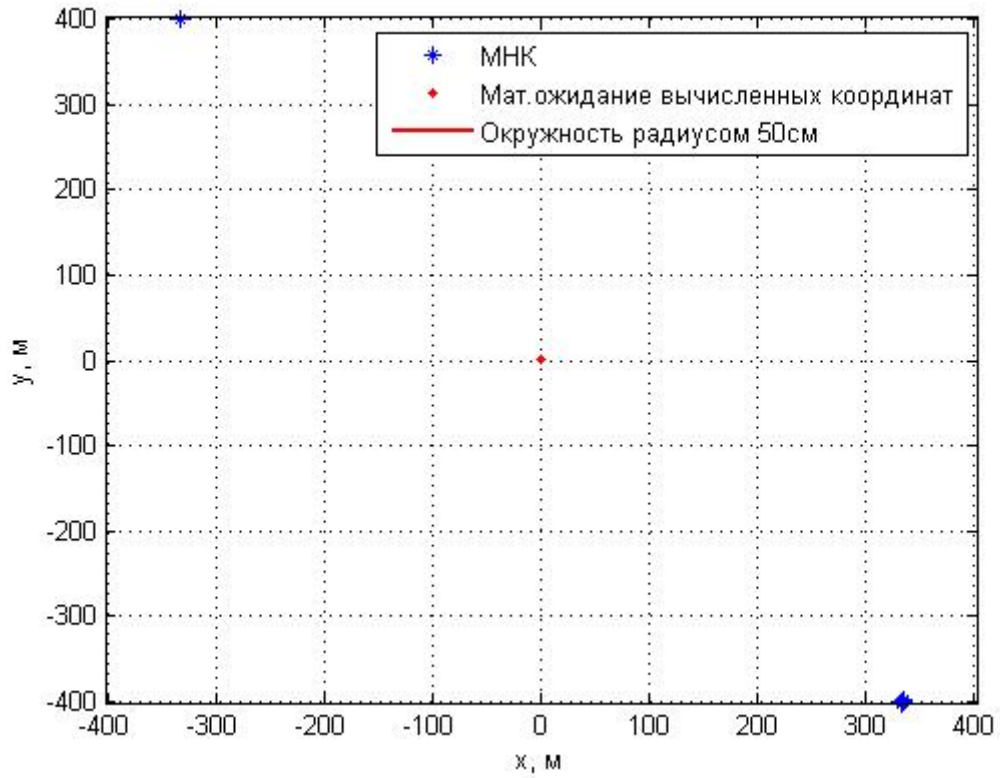


Рис. 74. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

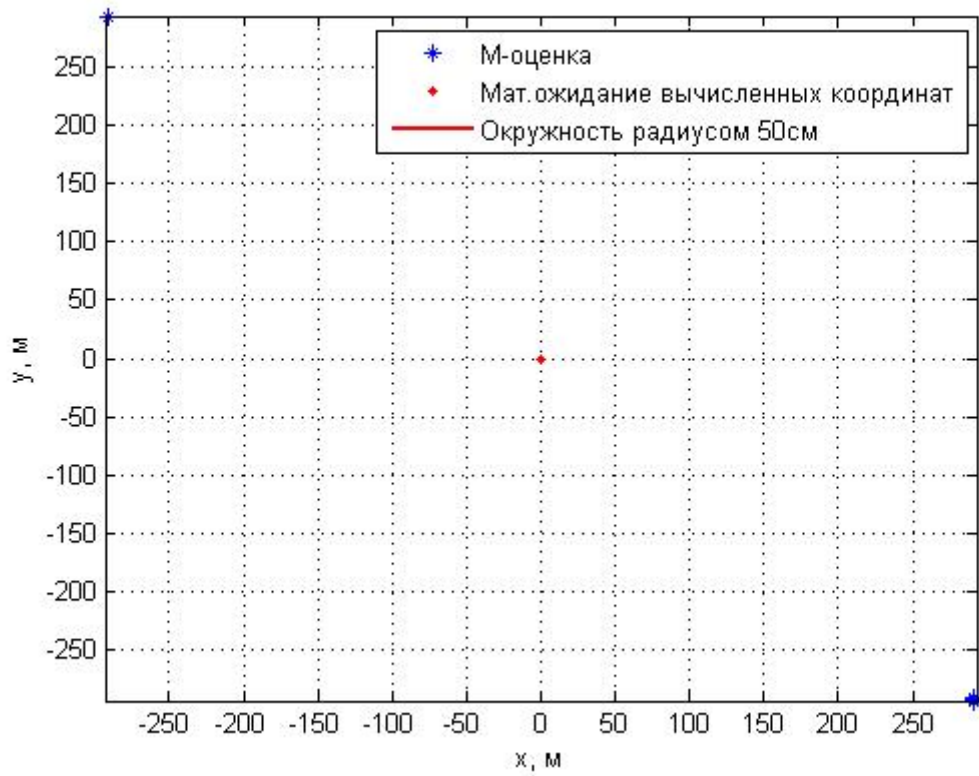


Рис. 75. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

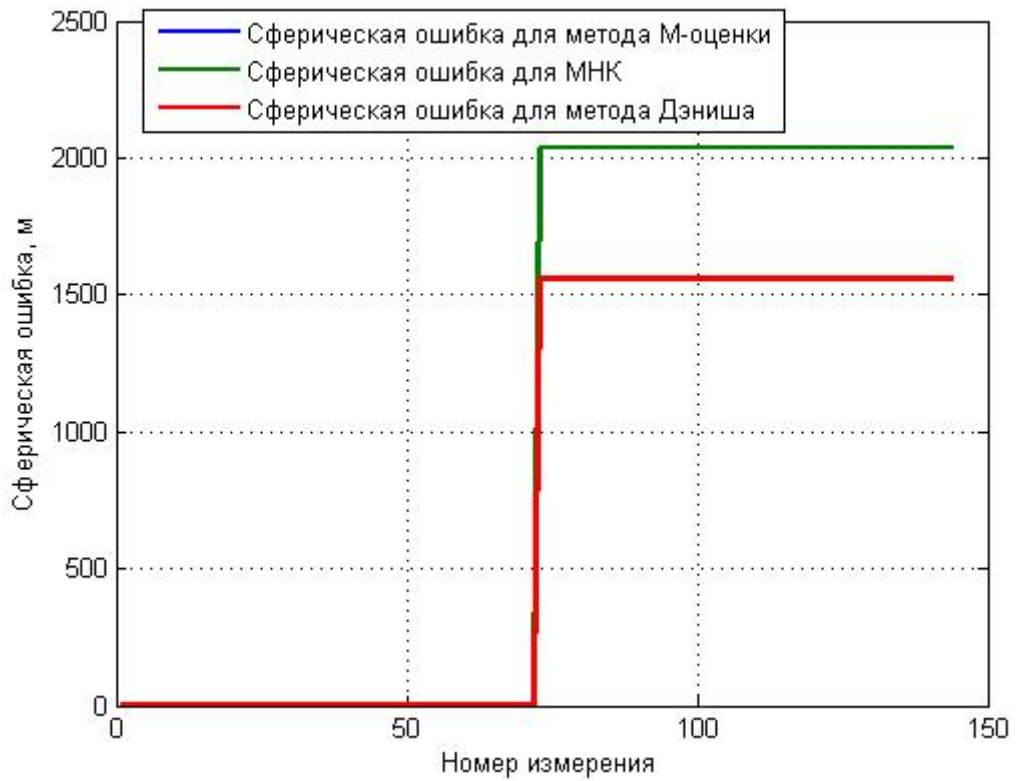


Рис. 76. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников.

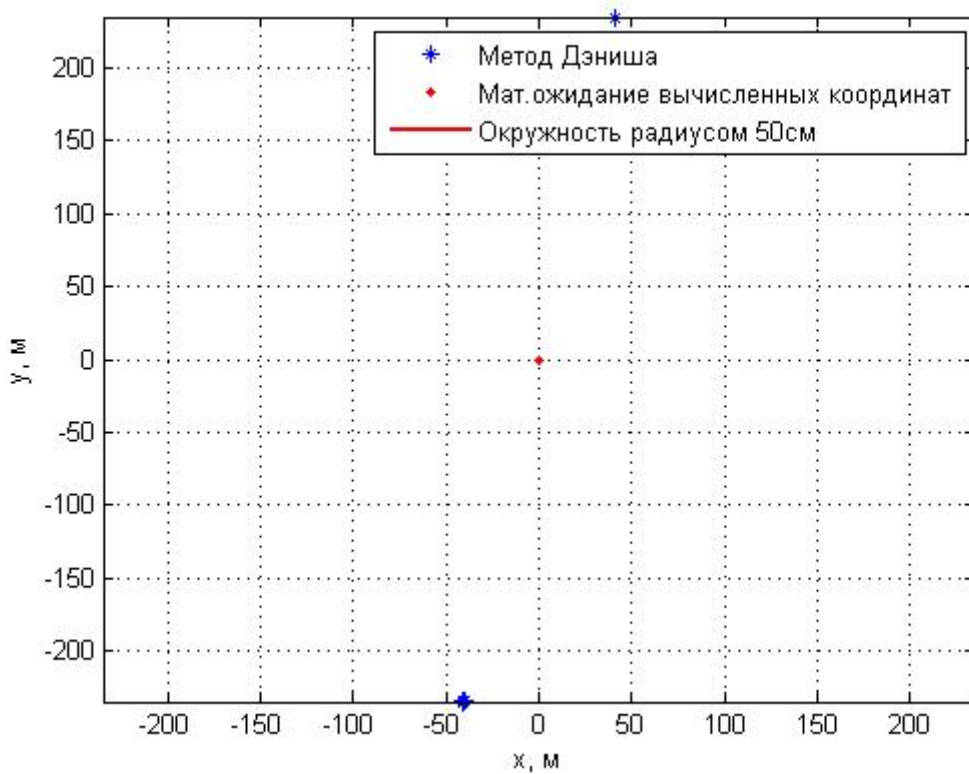


Рис. 77. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

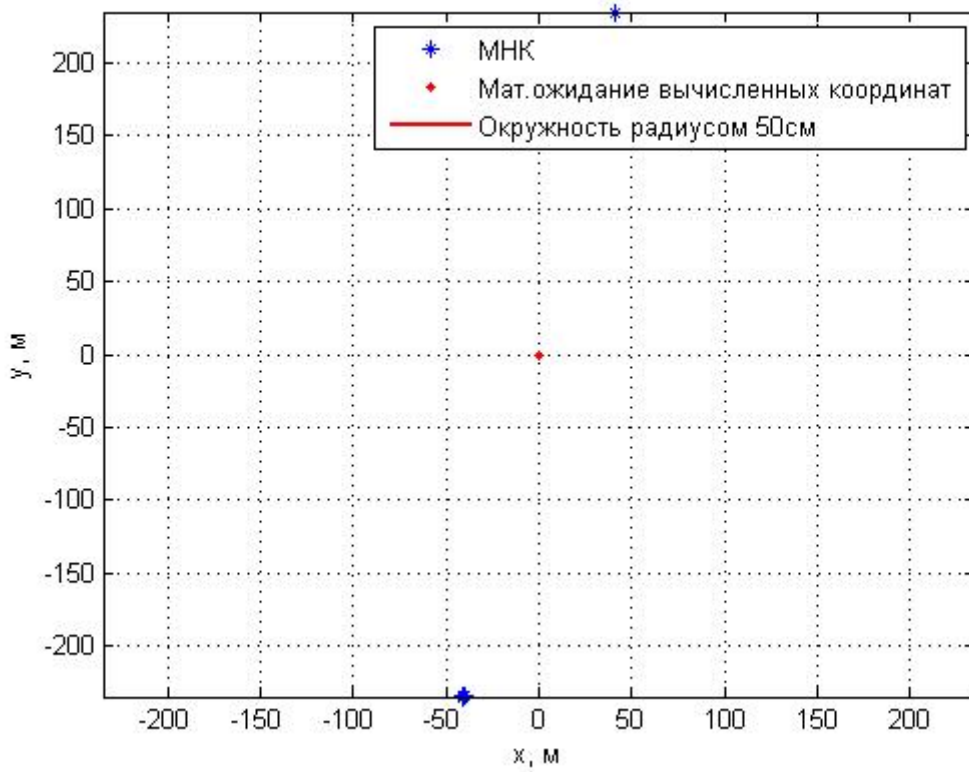


Рис. 78. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

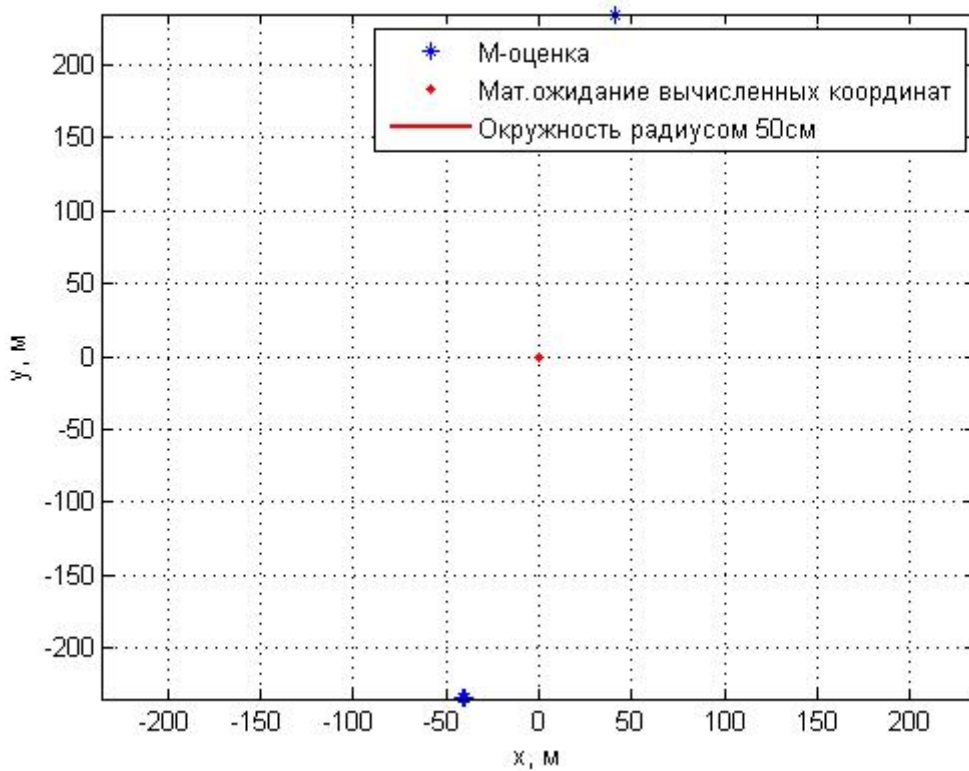


Рис. 79. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

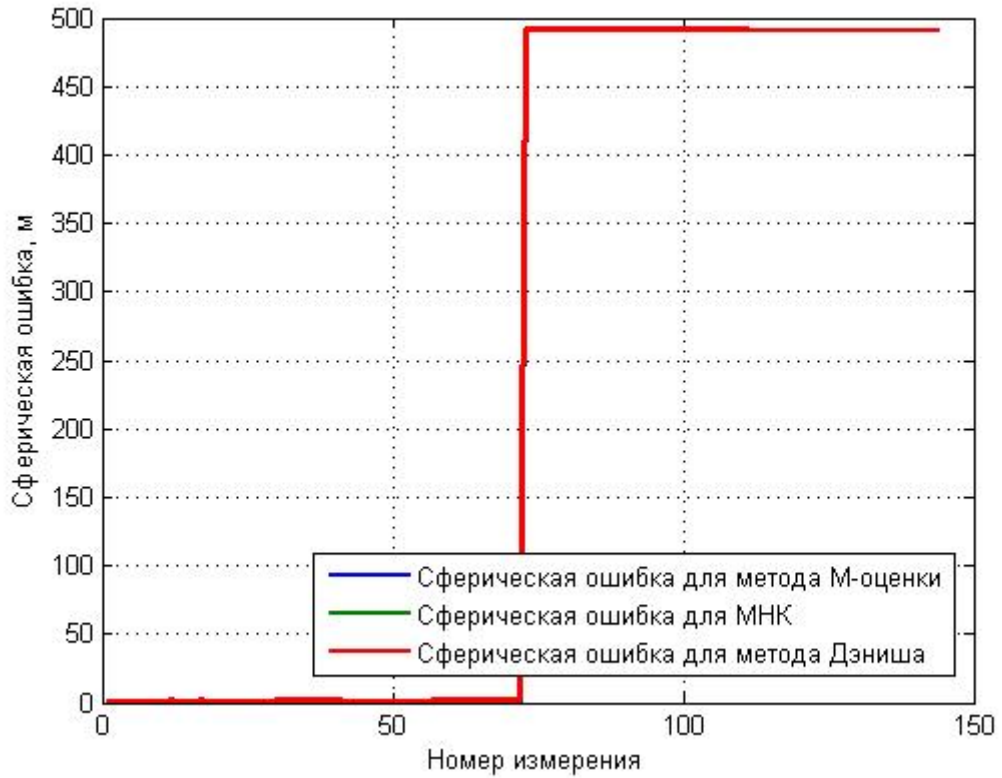


Рис. 80. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников.

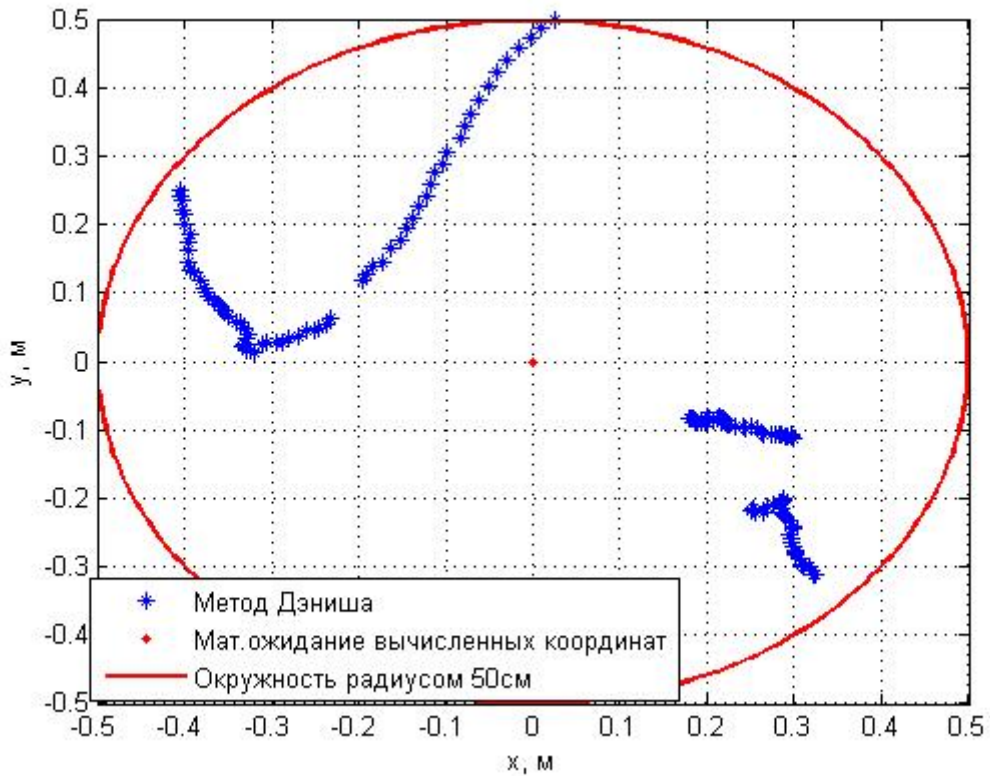


Рис. 81. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

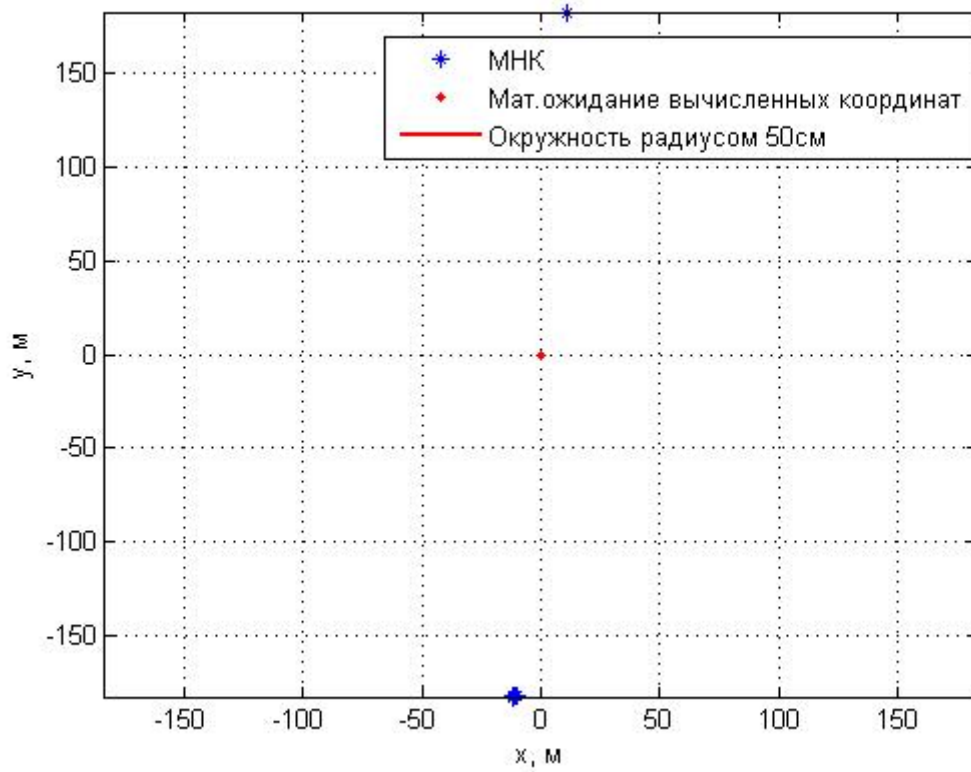


Рис. 82. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

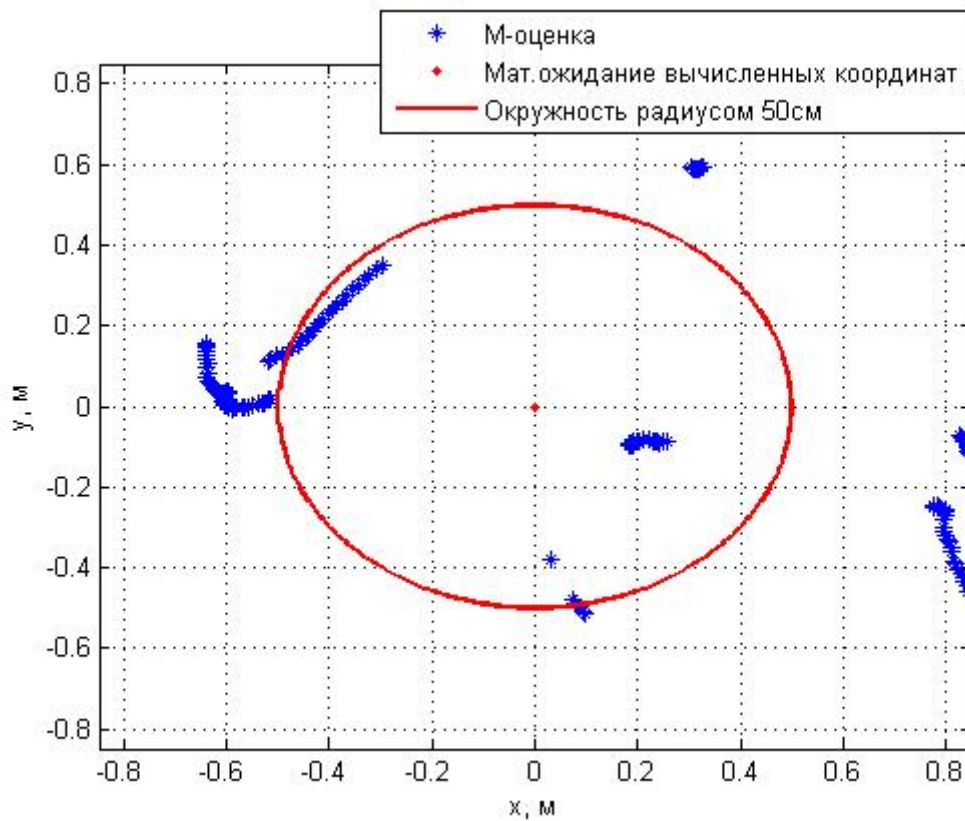


Рис. 83. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

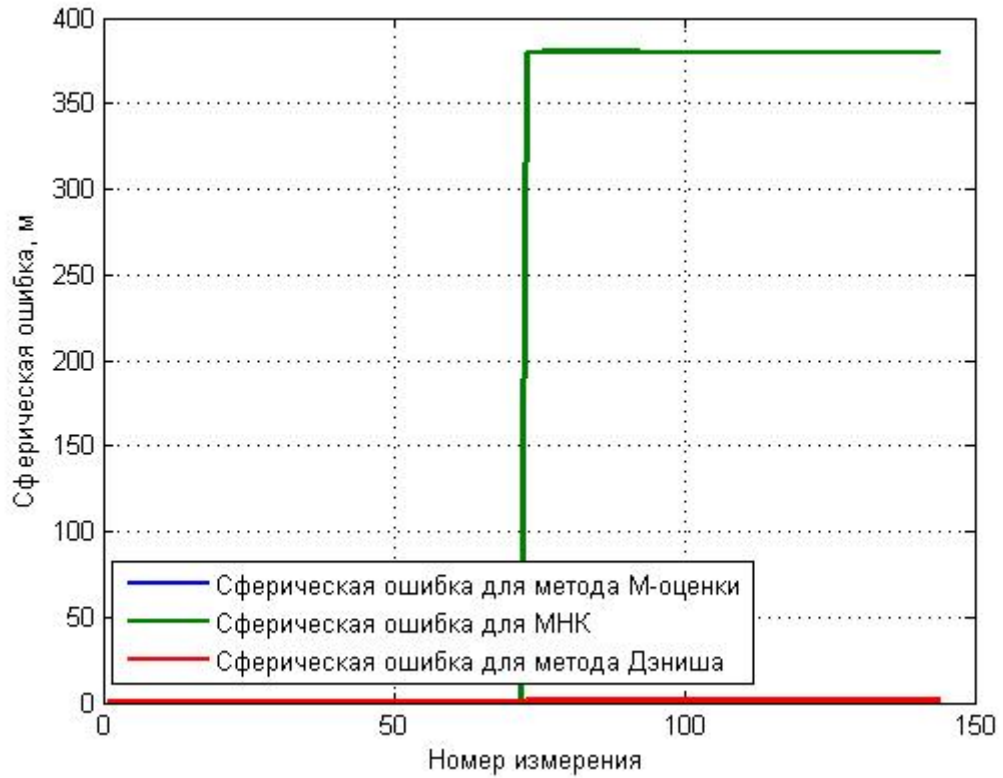


Рис. 84. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

В процессе наблюдения на некоторое время в измерениях появляется одна ошибка.

Рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников.

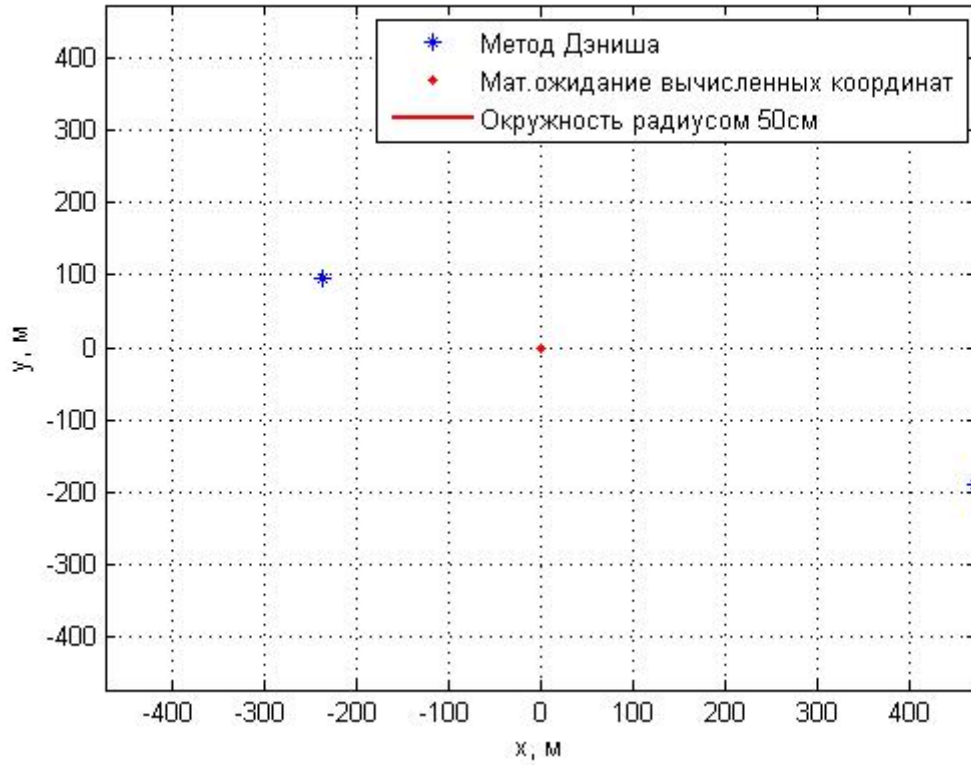


Рис. 85. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

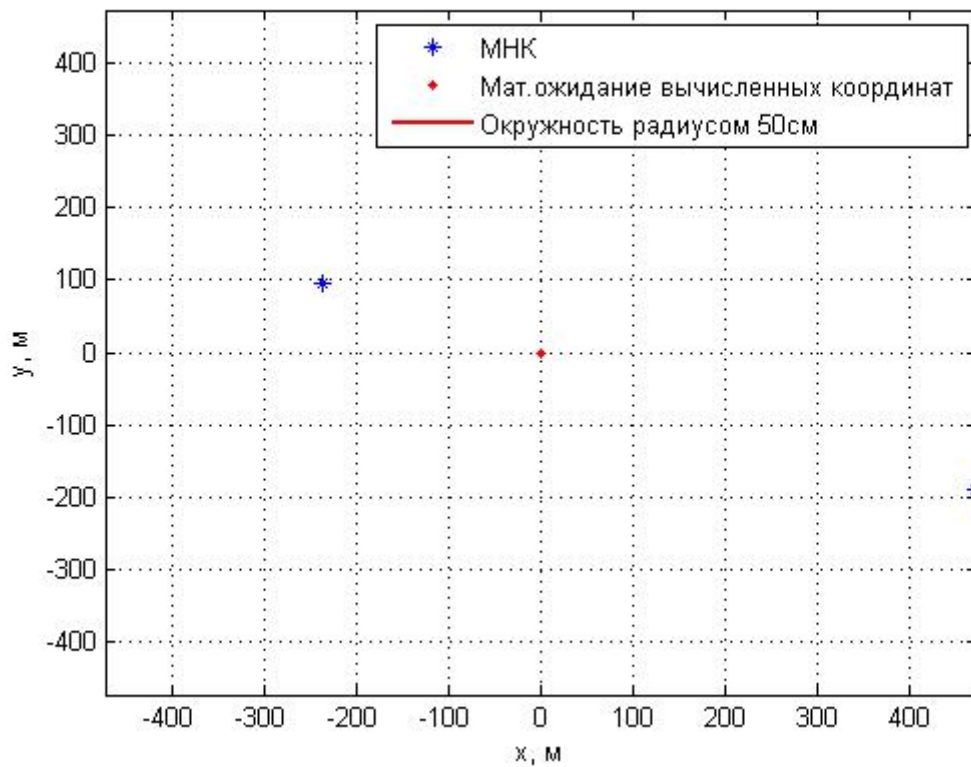


Рис. 86. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

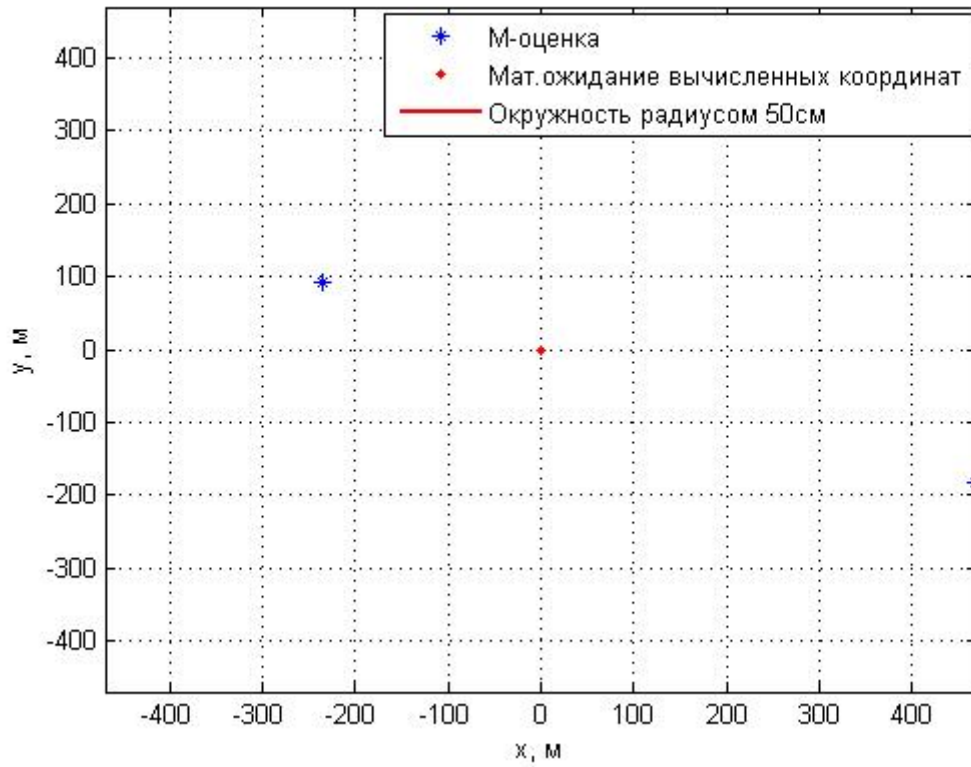


Рис. 87. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

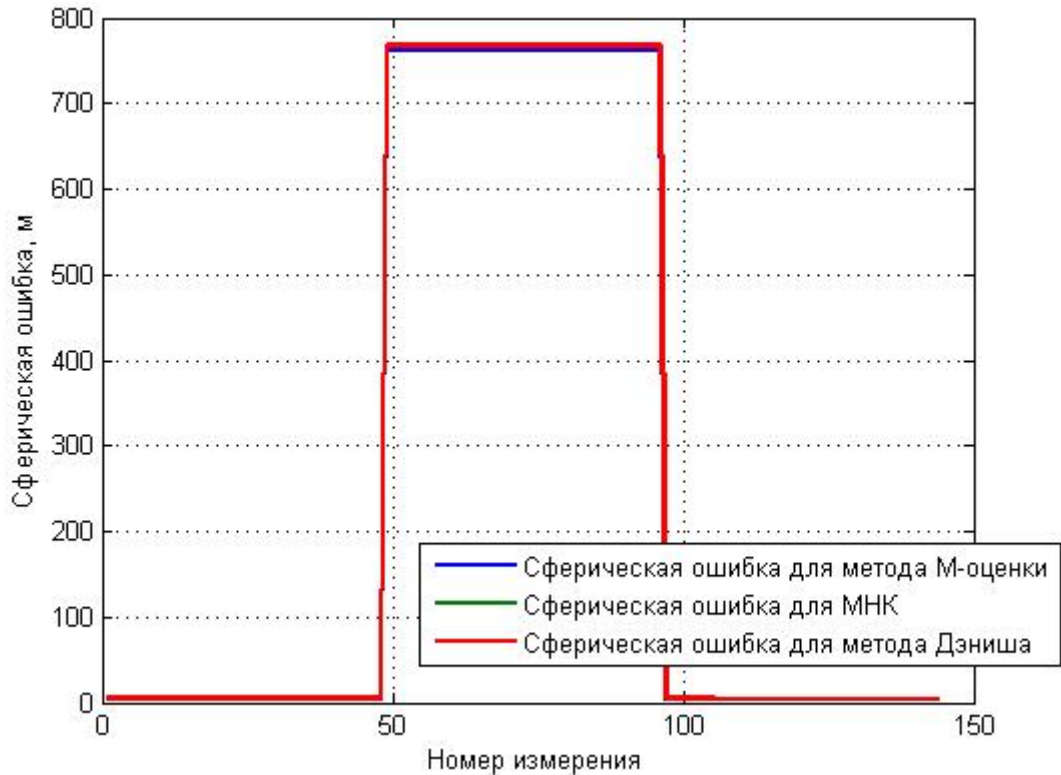


Рис. 88. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников.

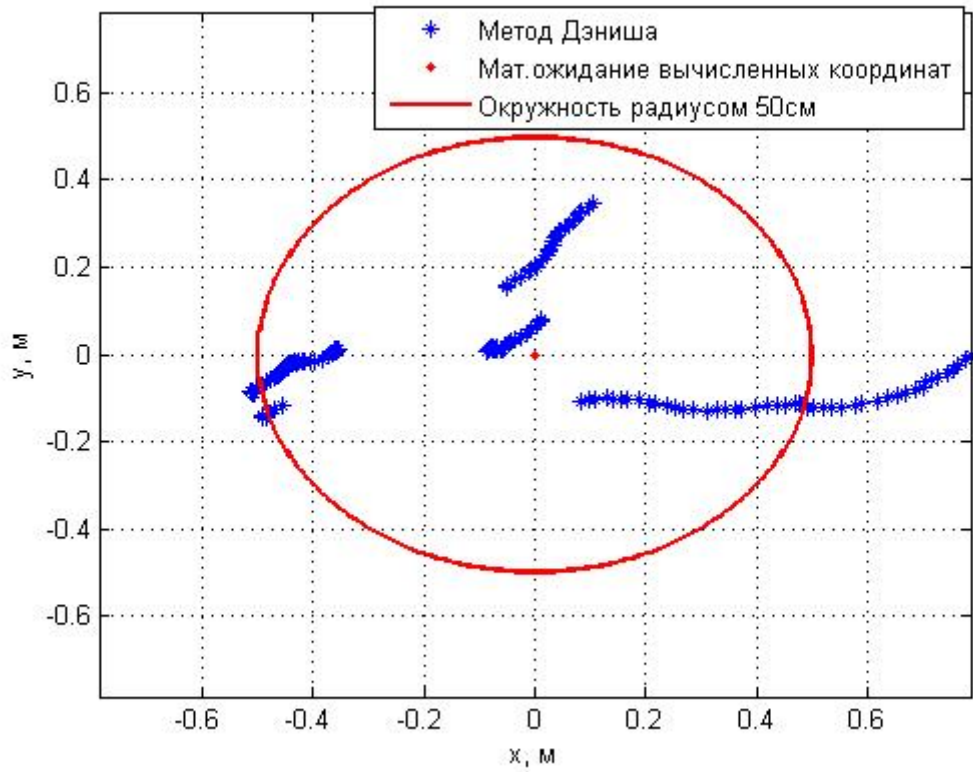


Рис. 89. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

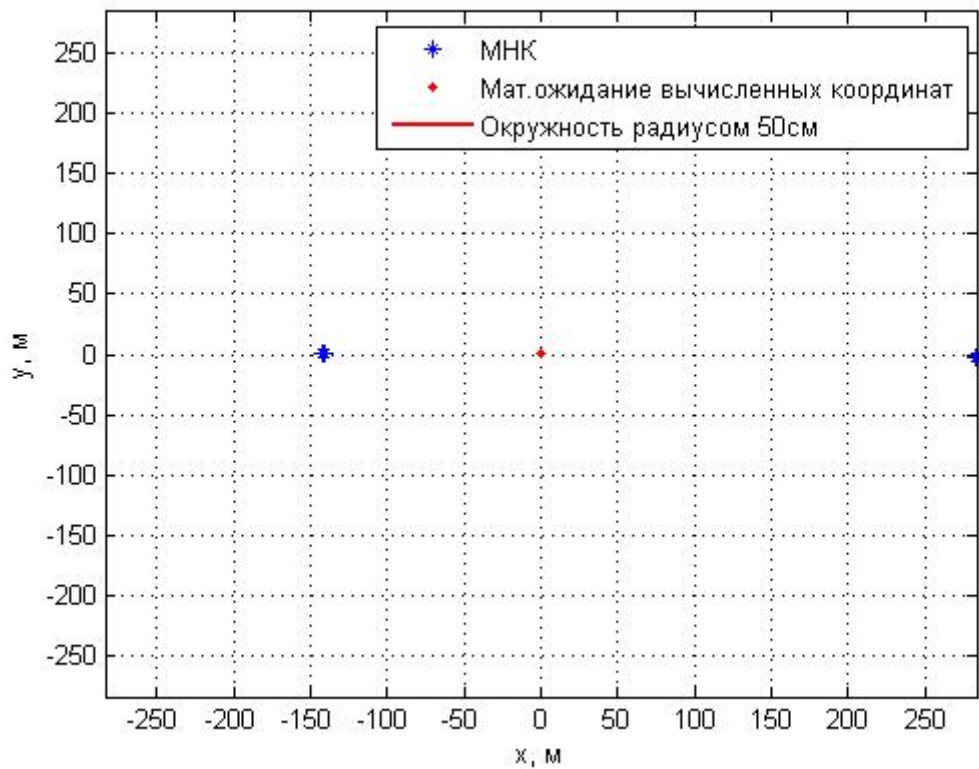


Рис. 90. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для MNK

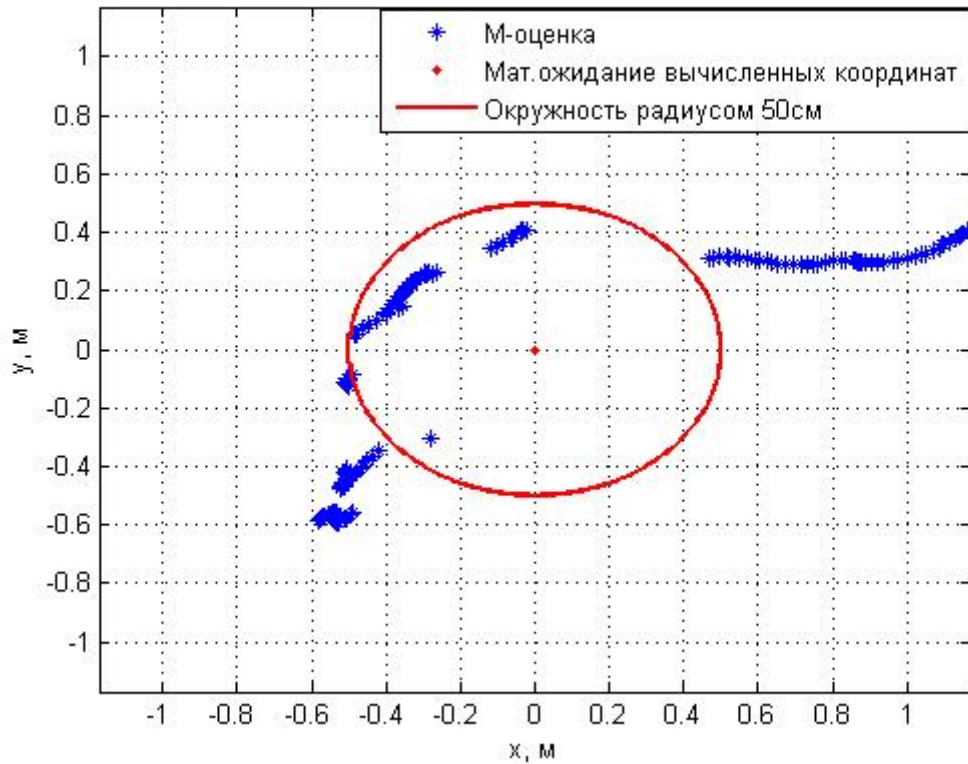


Рис. 91. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

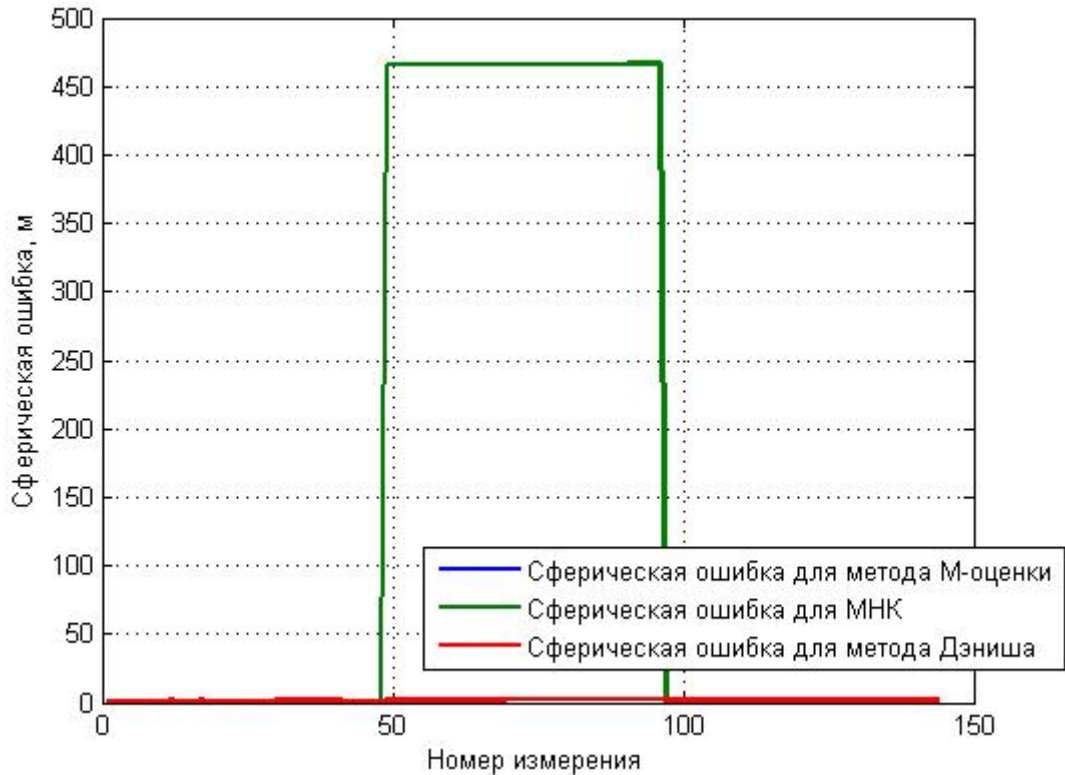


Рис. 92. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников.

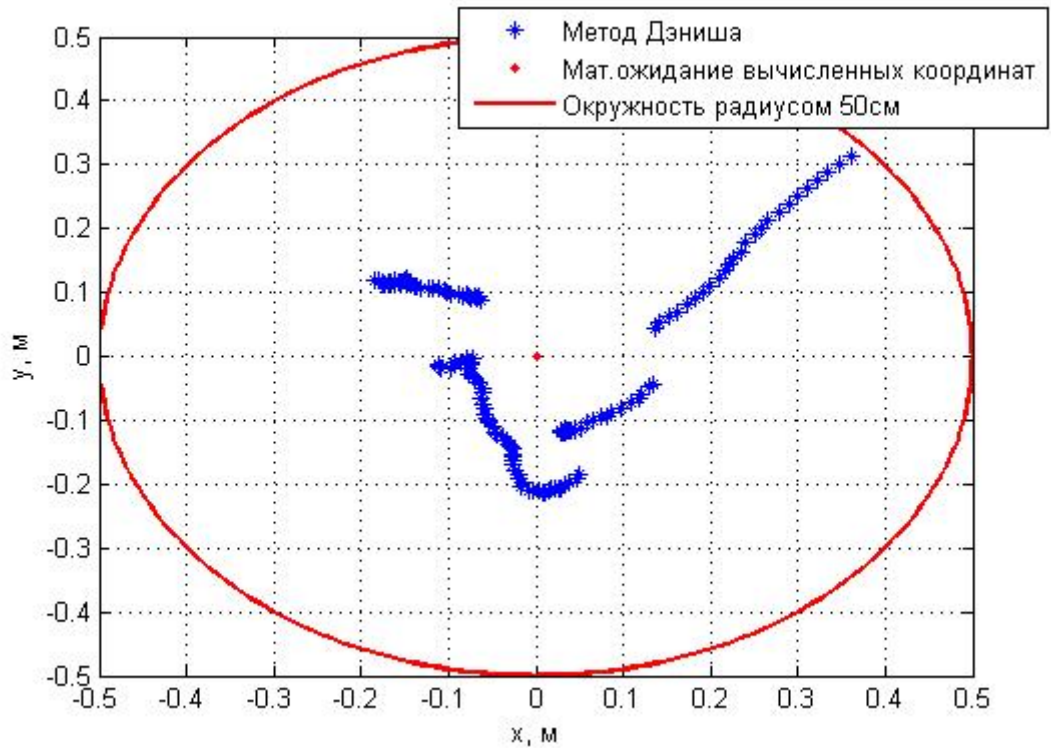


Рис. 93. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дžниша

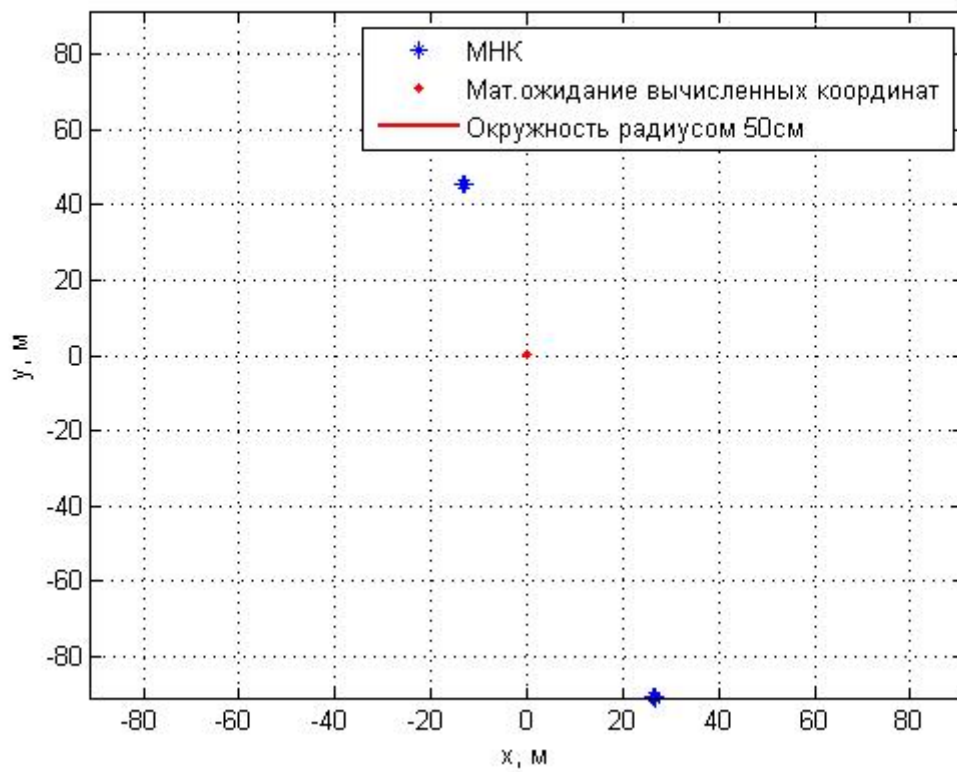


Рис. 94. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

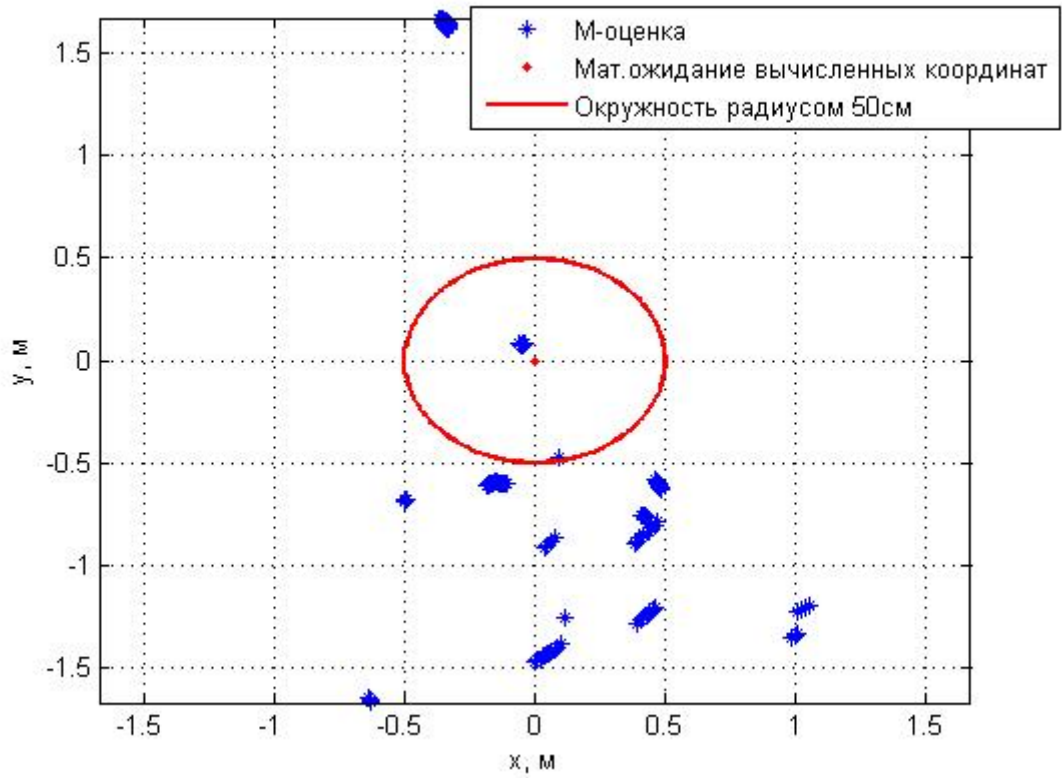


Рис. 95. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

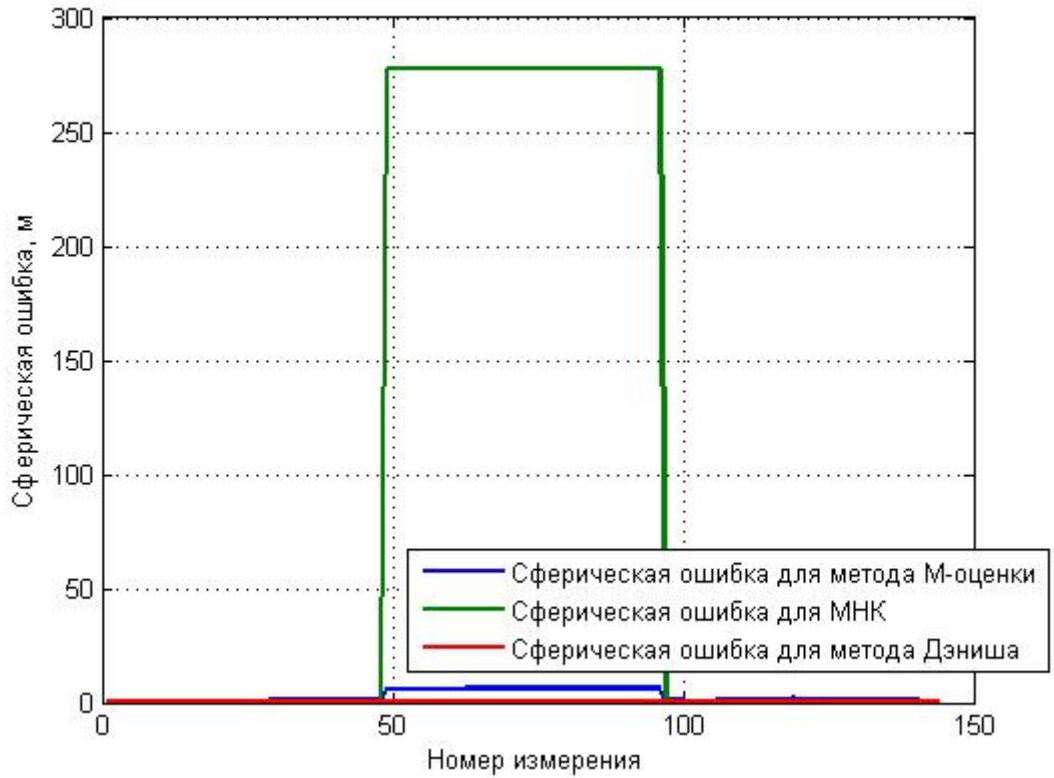


Рис. 96. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

В процессе наблюдения на некоторое время в измерениях появляются две ошибки.

Рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников.

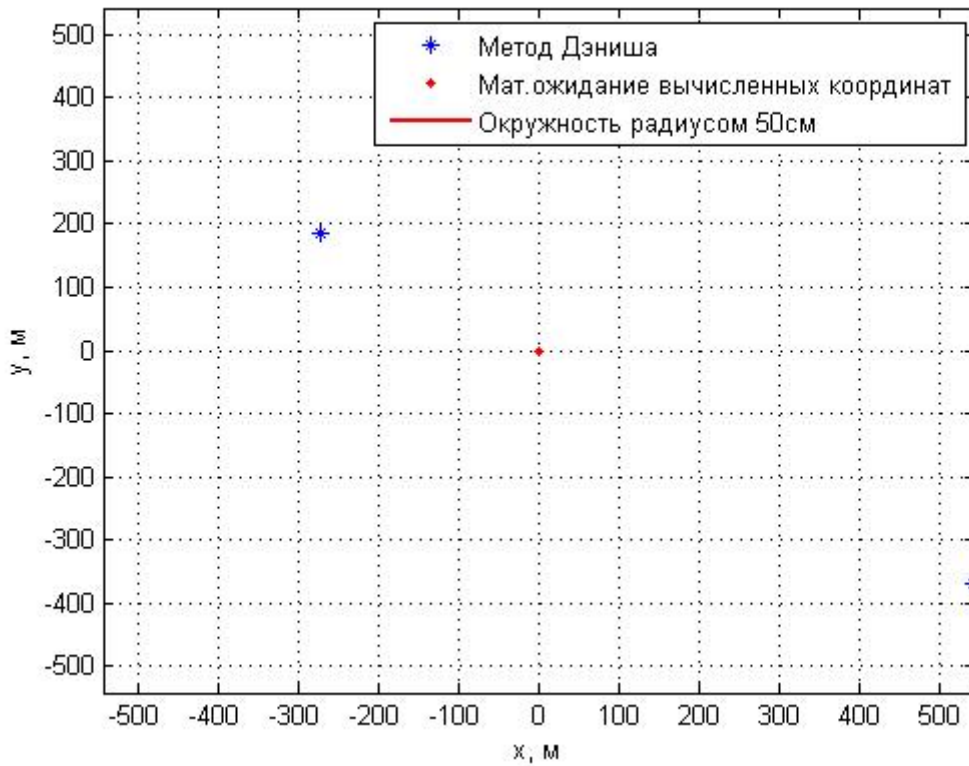


Рис. 97. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

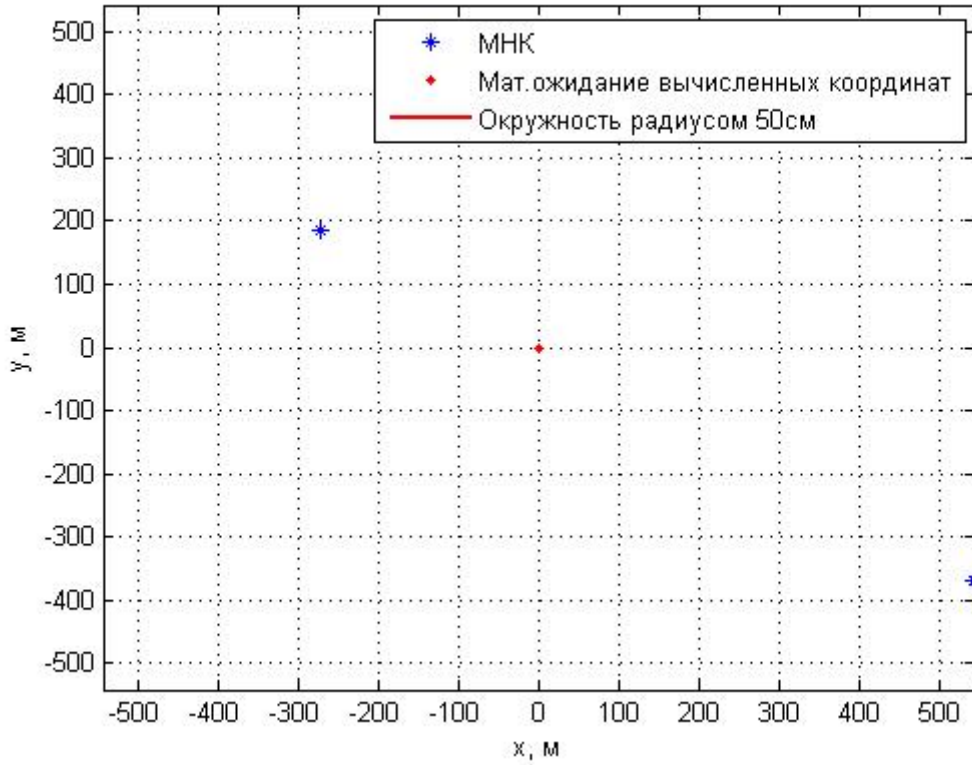


Рис. 98. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

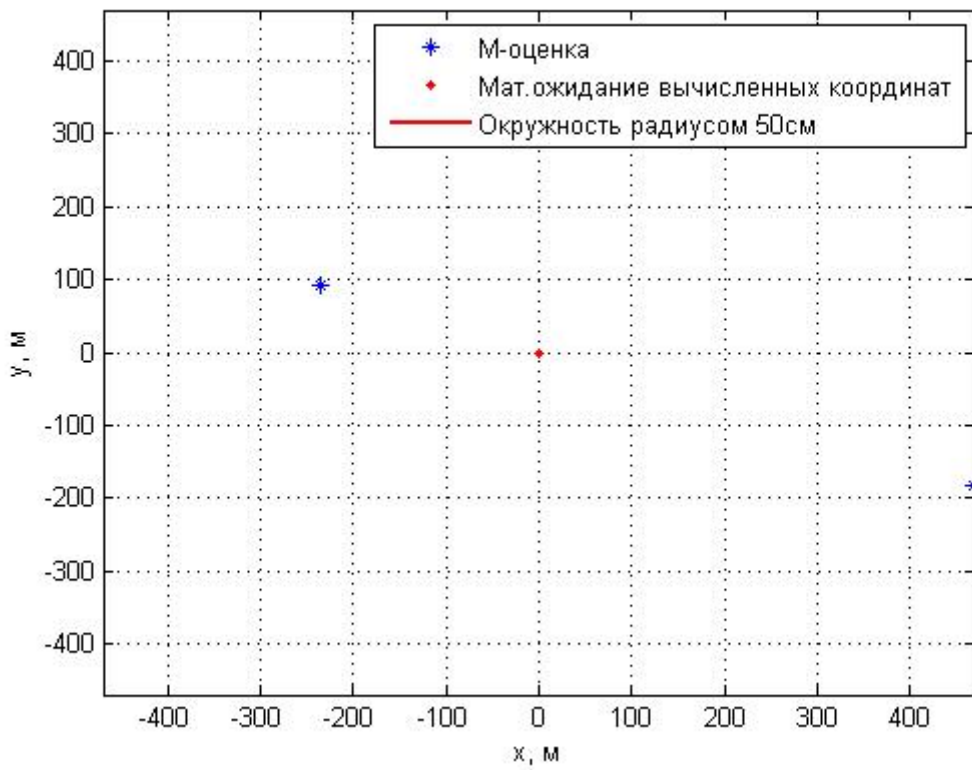


Рис. 99. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

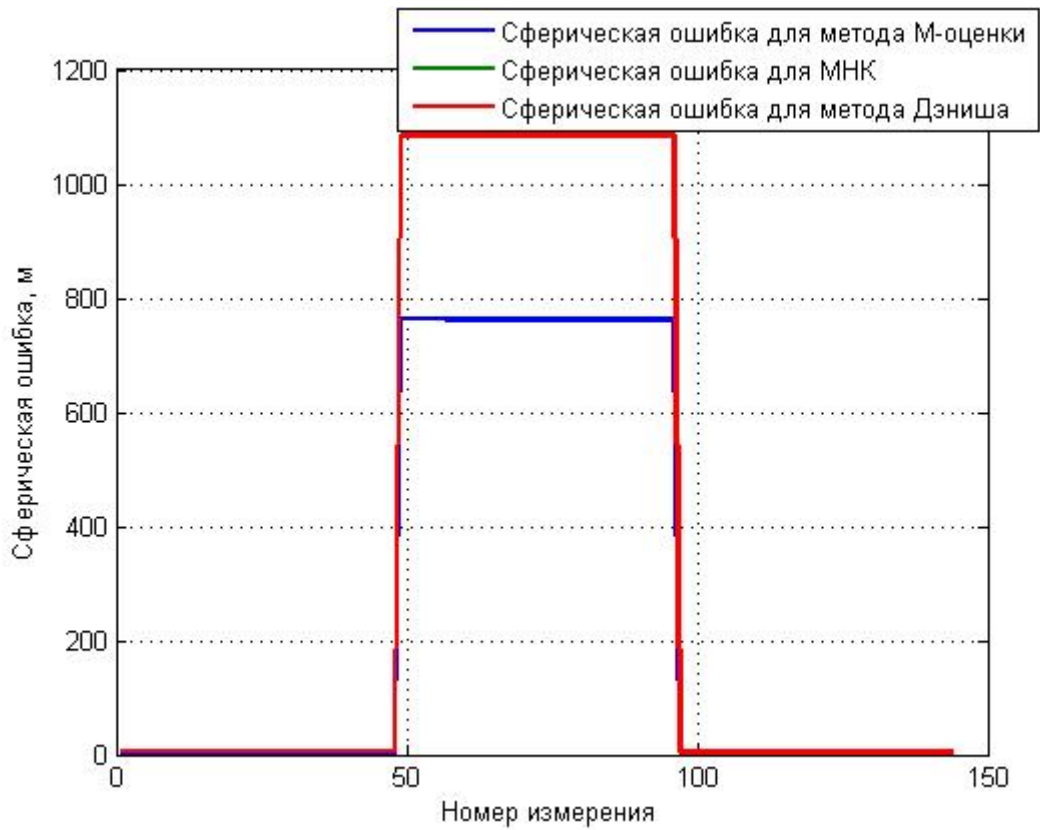


Рис. 100. Сферическая Ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников.

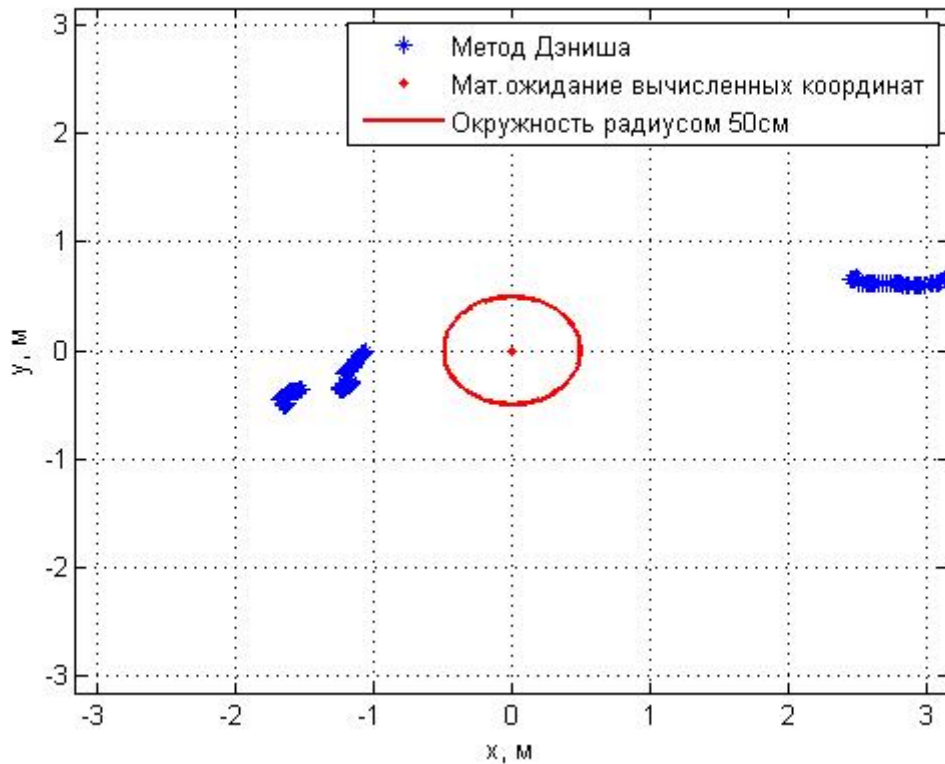


Рис. 101. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

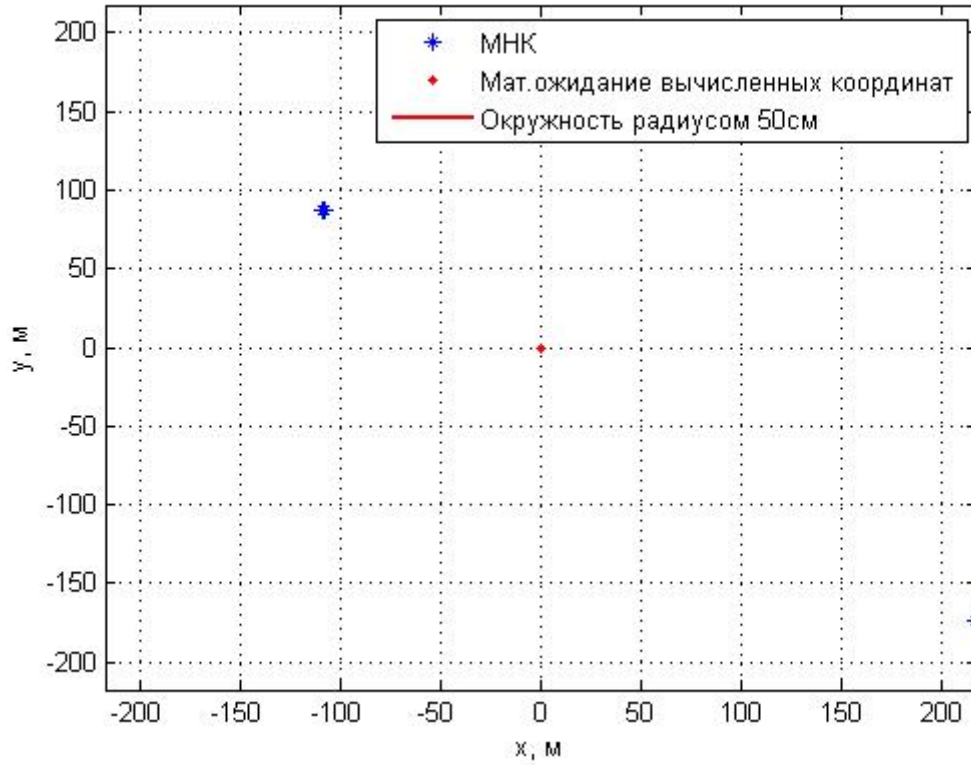


Рис. 102. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

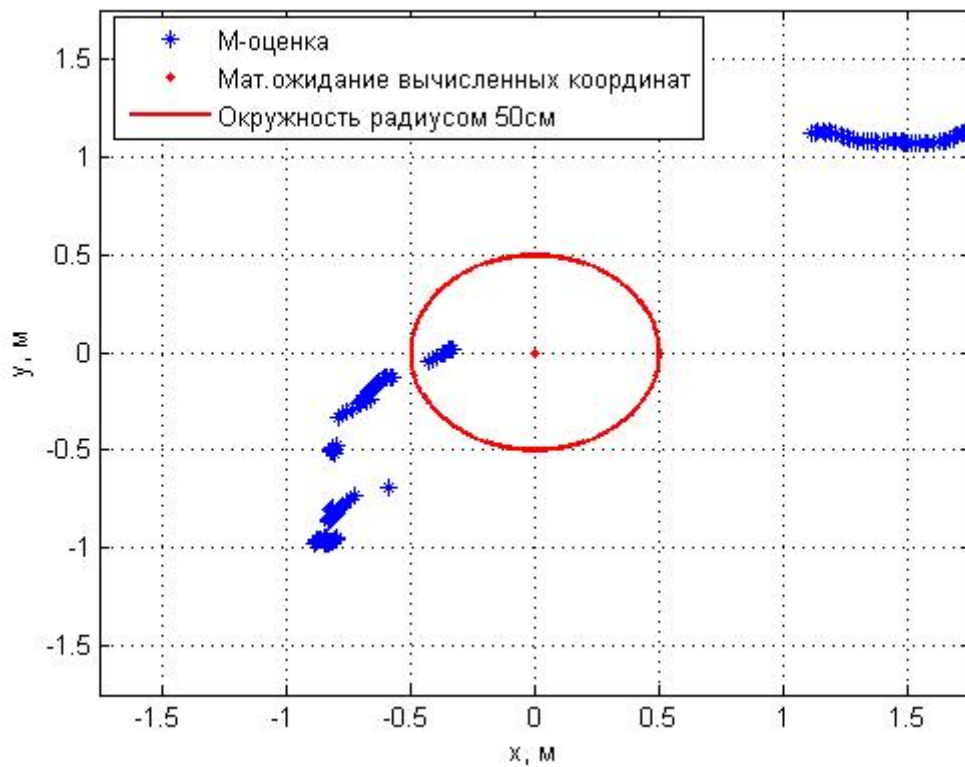


Рис. 103. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

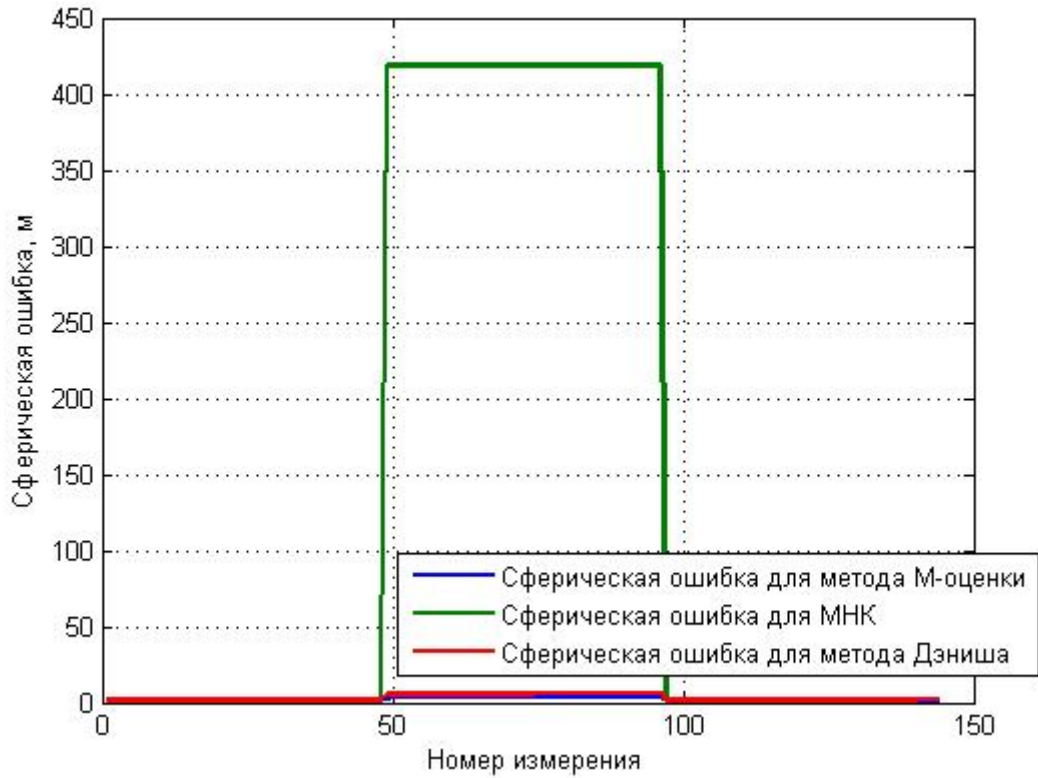


Рис. 104. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников.

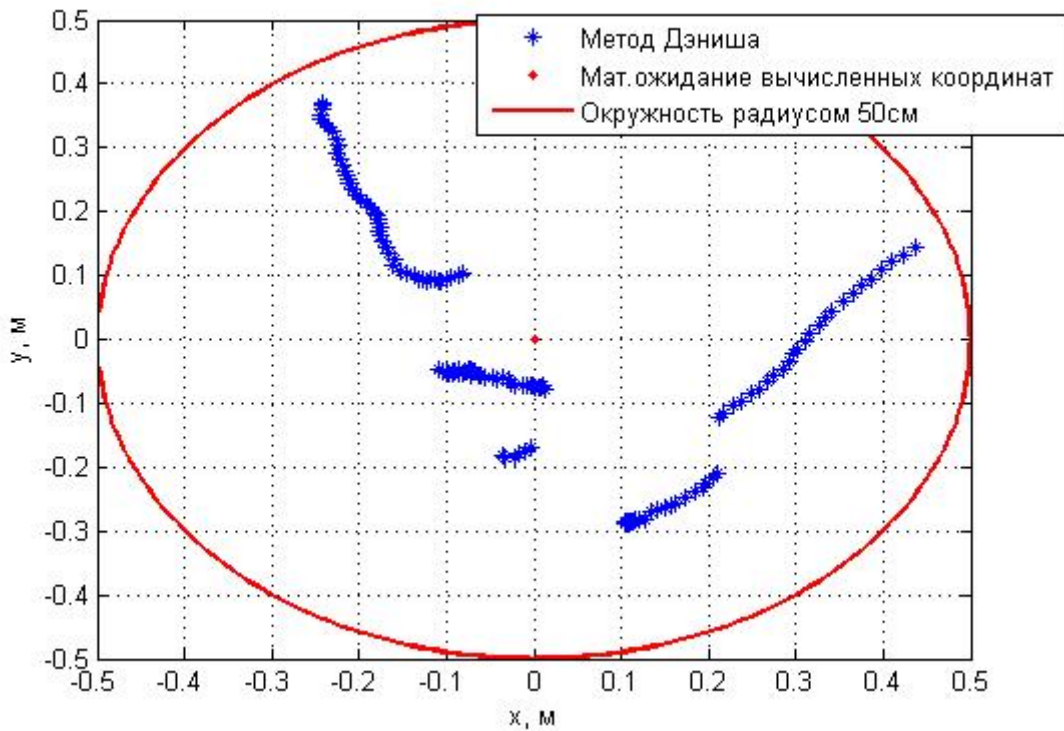


Рис. 105. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

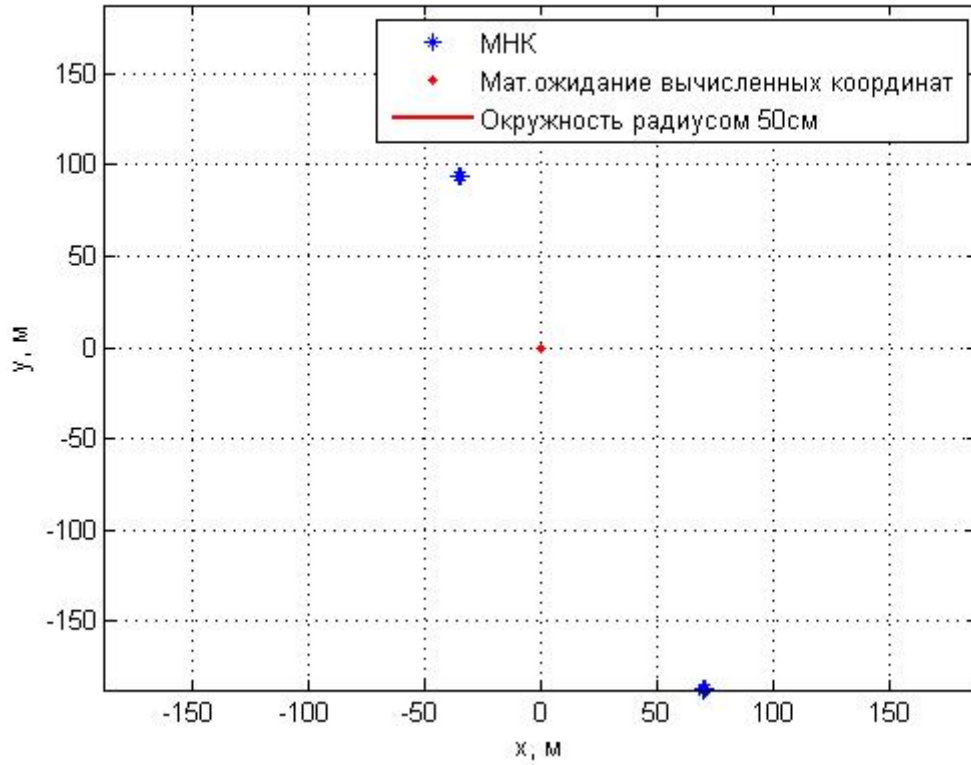


Рис. 106. Распределение полученных решений относительно мат. ожидания для МНК

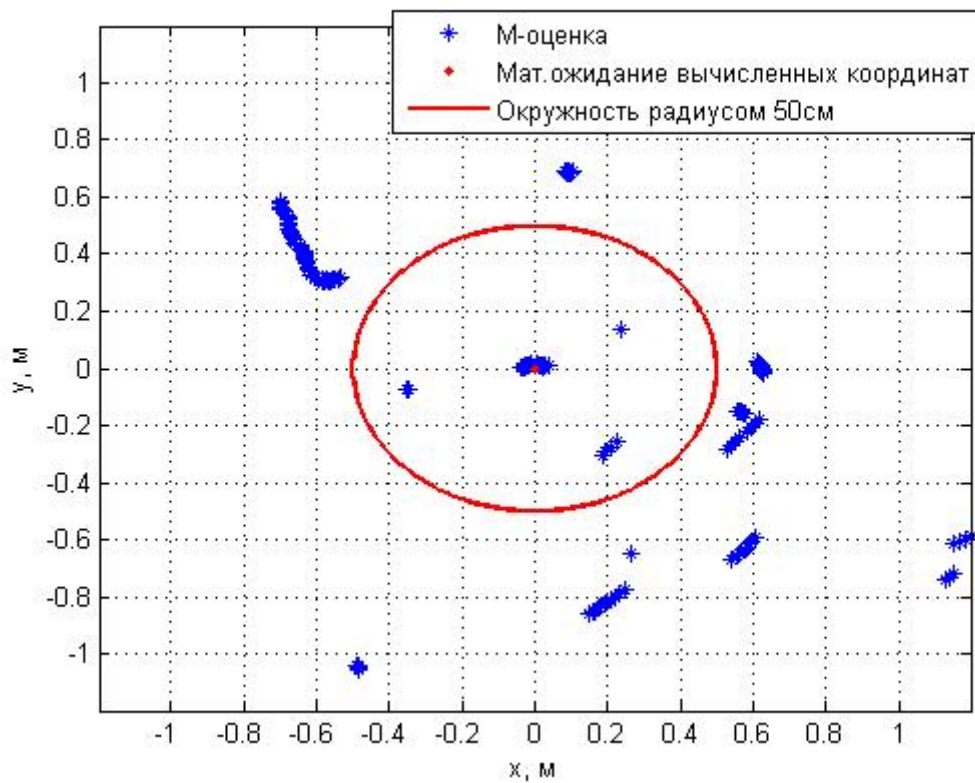


Рис. 107. Распределение полученных решений относительно мат. ожидания для метода М-оценки

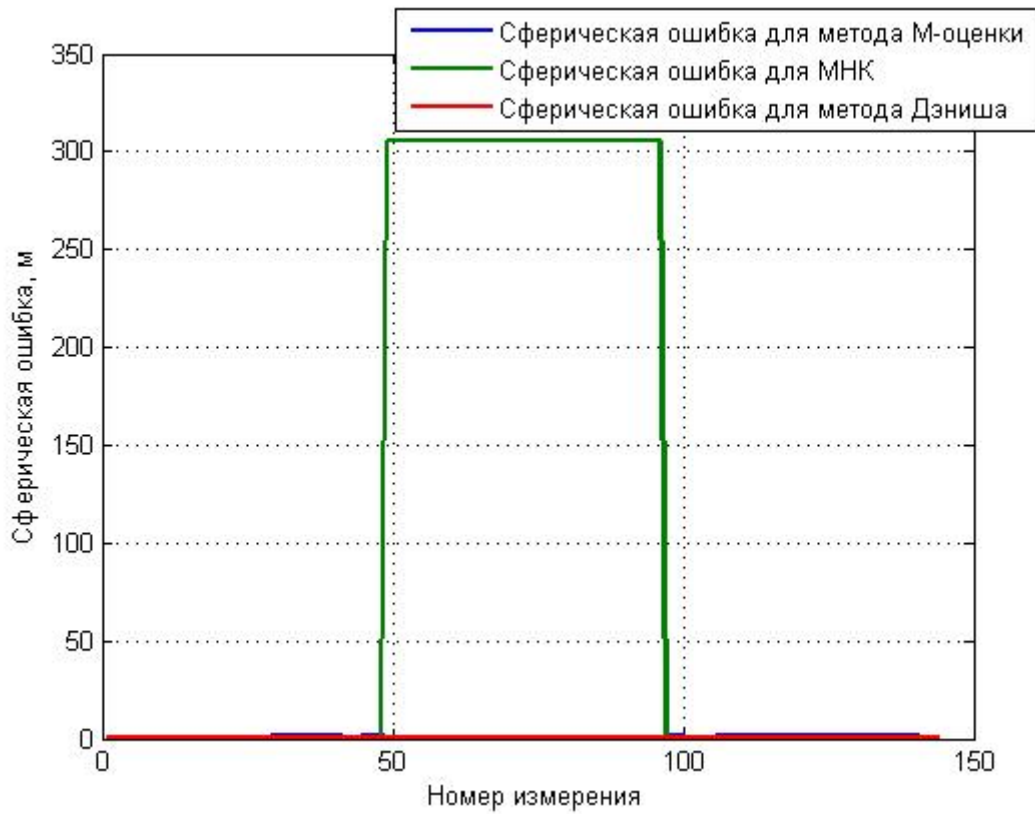


Рис. 108. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки
 В процессе наблюдения на некоторое время в измерениях появляются три ошибки.
 Рабочее созвездие состоит из 5-ти спутников.

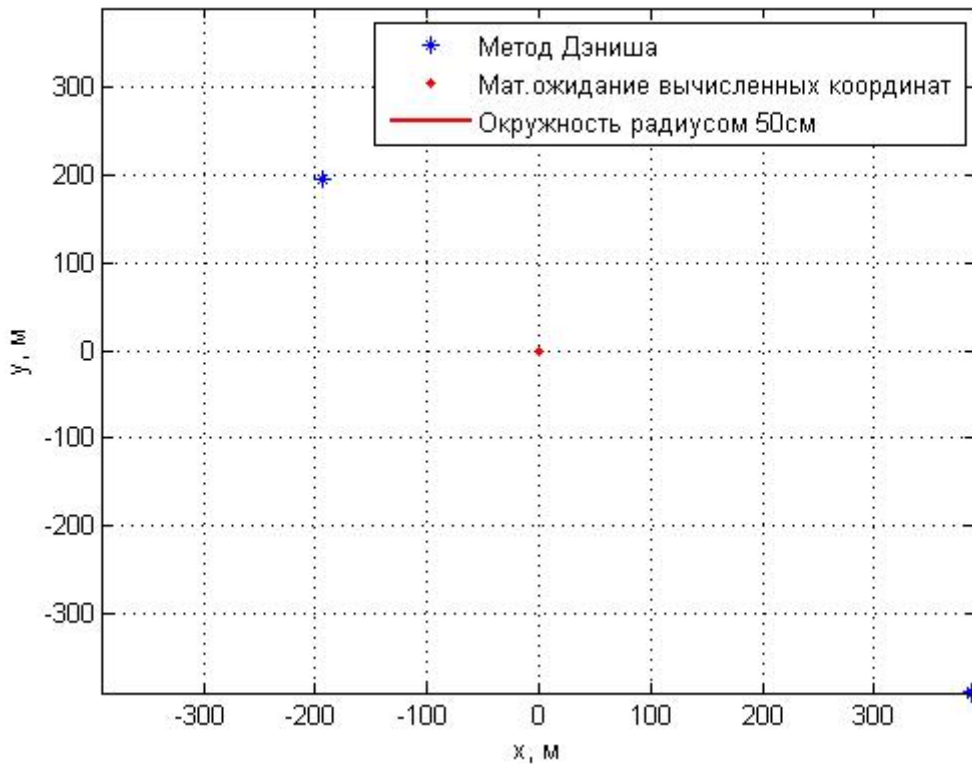


Рис. 109. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания
 для метода Дэниша

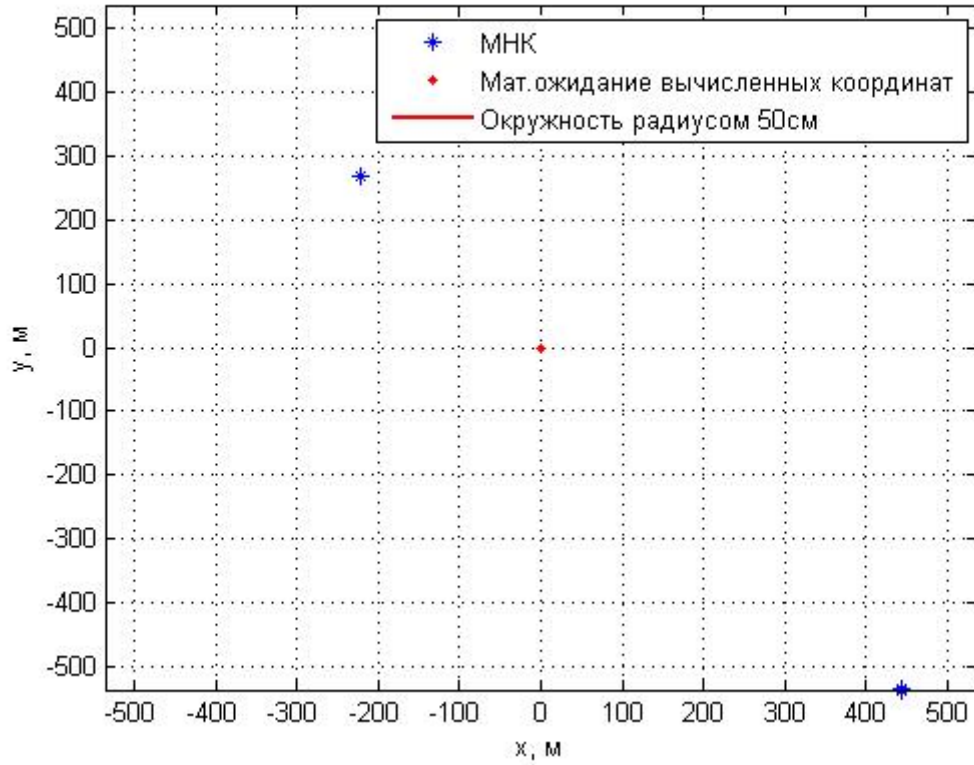


Рис. 110. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

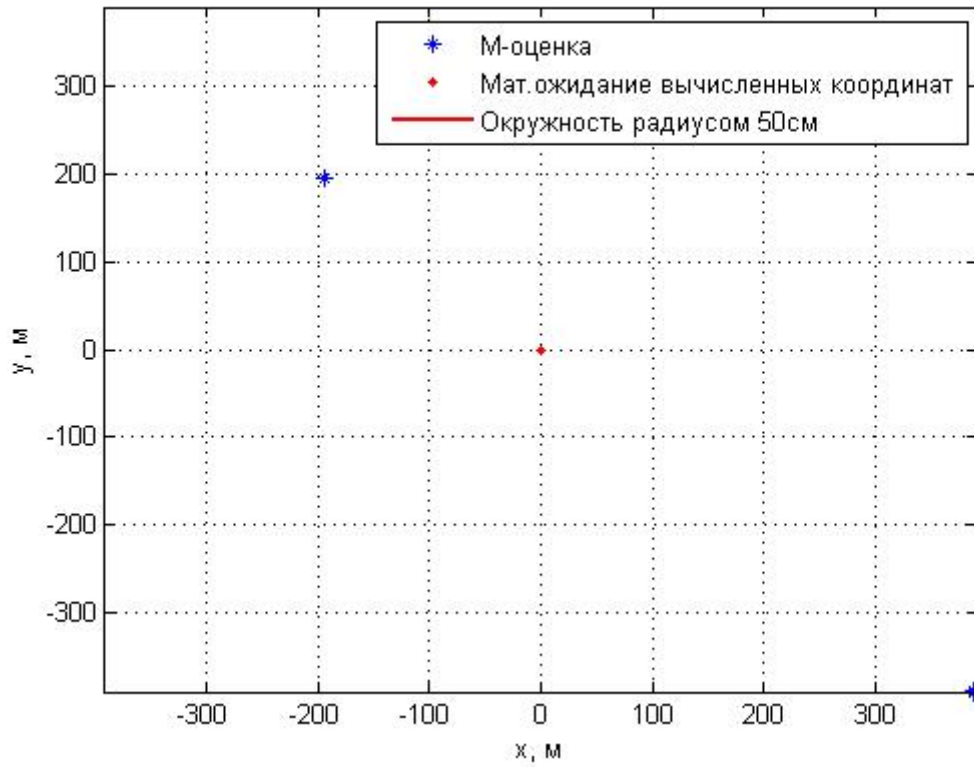


Рис. 111. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки



Рис. 112. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 9-ти спутников.

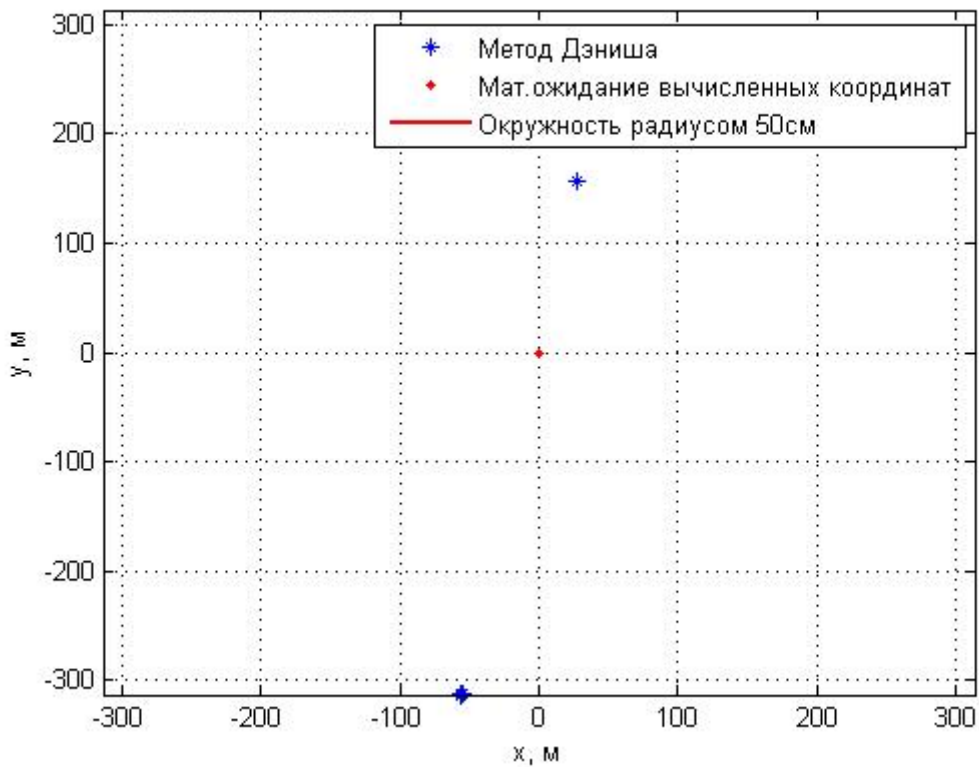


Рис. 113. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

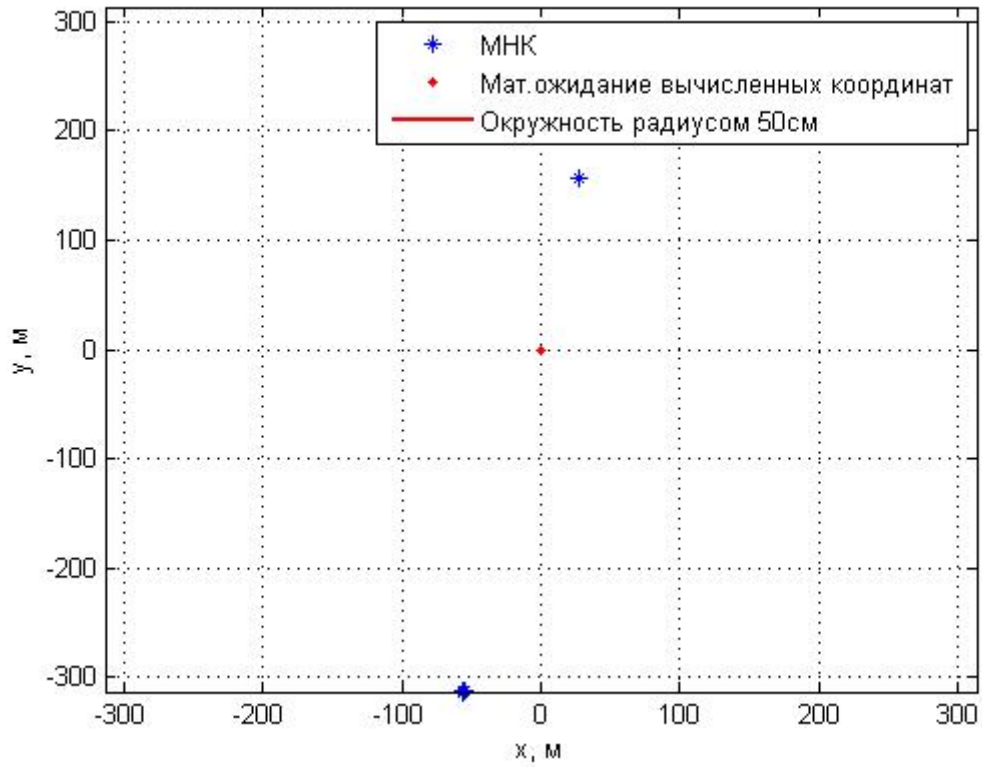


Рис. 114. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для МНК

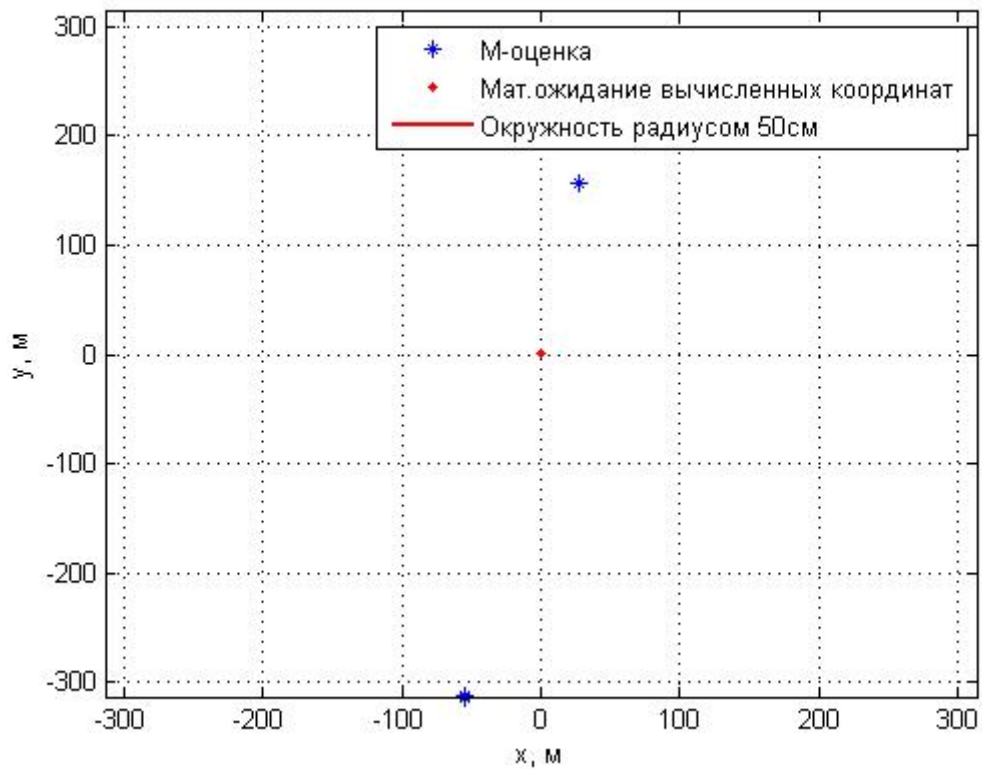


Рис. 115. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

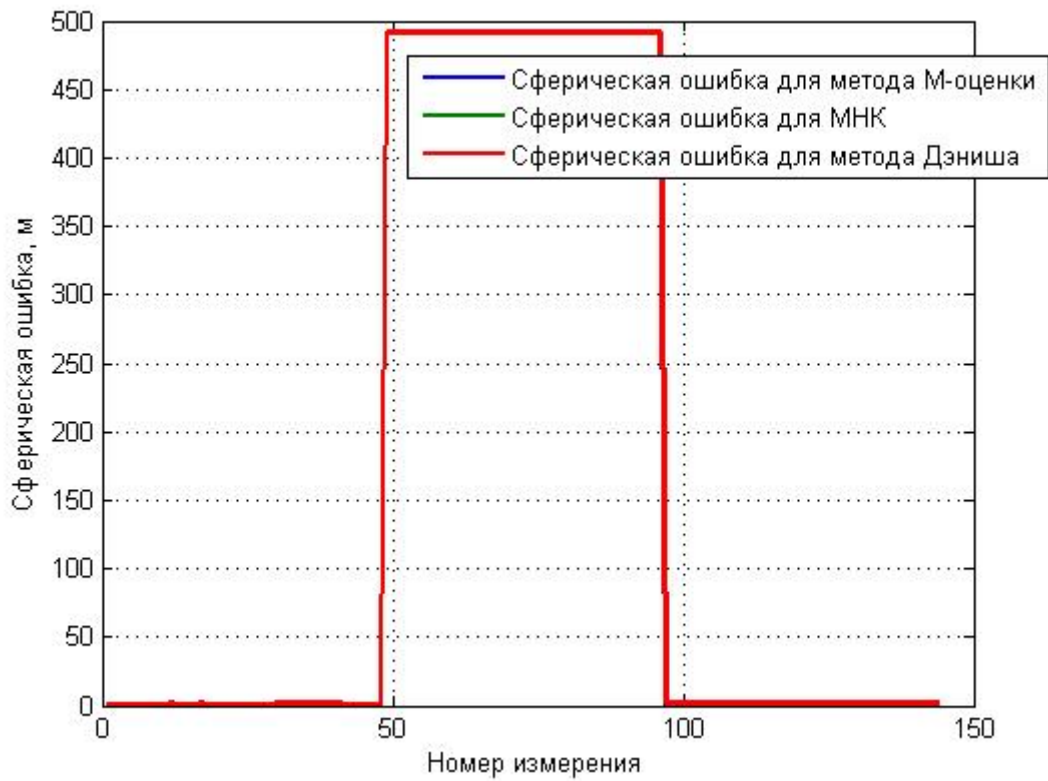


Рис. 116. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Рабочее созвездие состоит из 13-ти спутников.

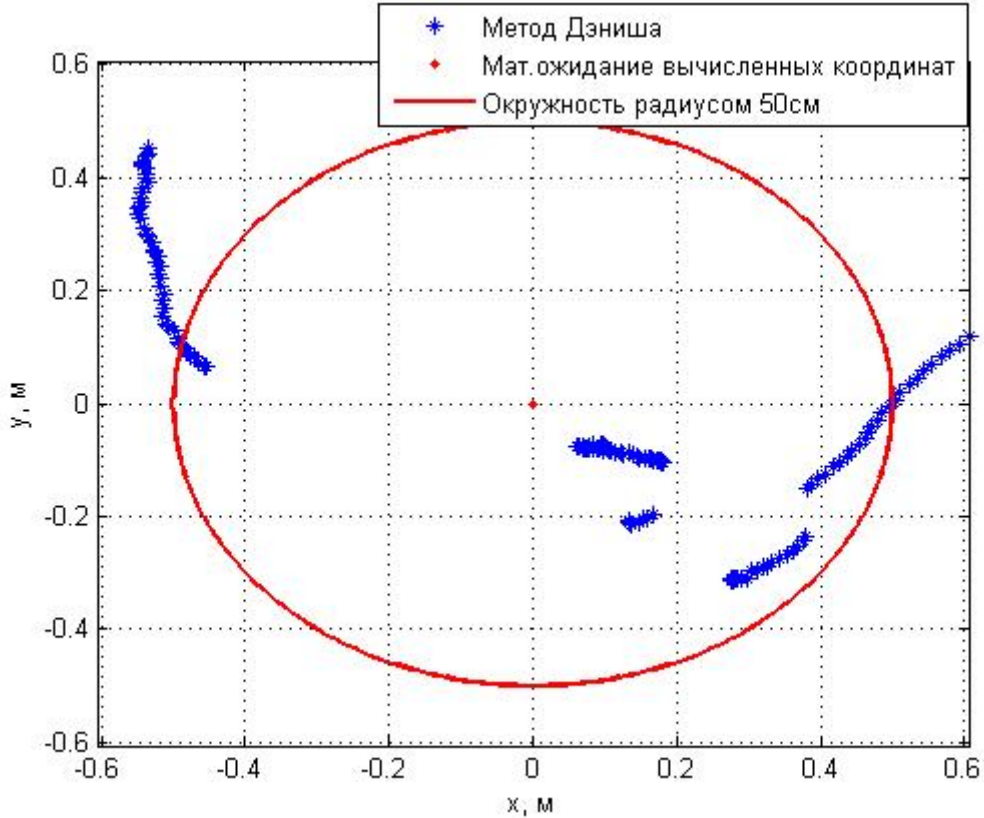


Рис. 117. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода Дэниша

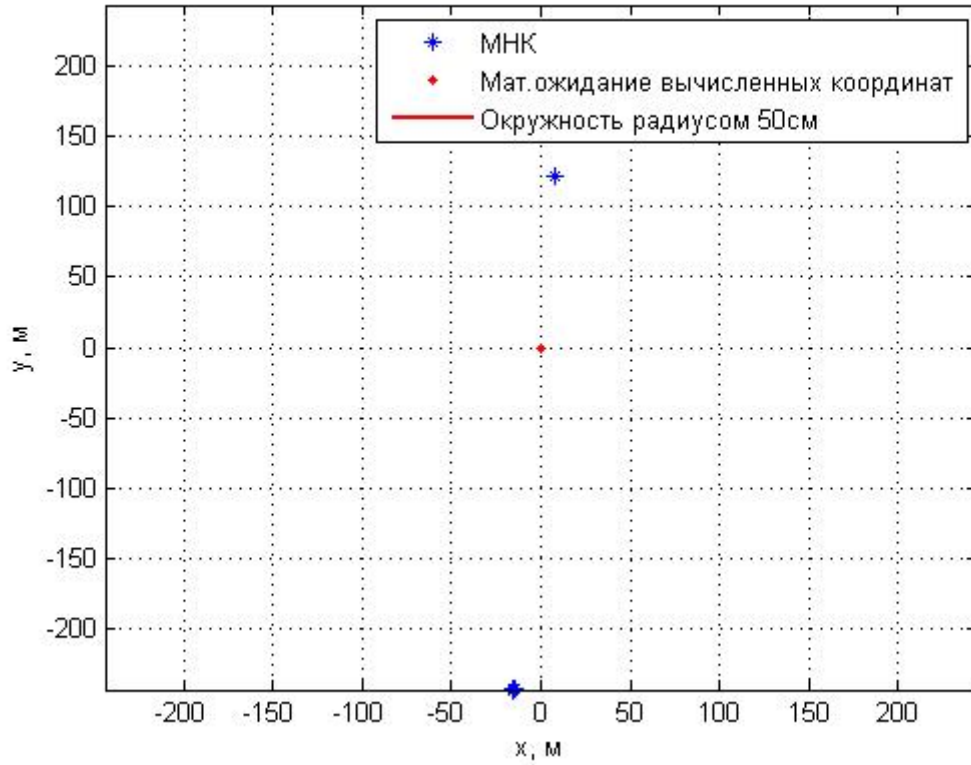


Рис. 118. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода МНК

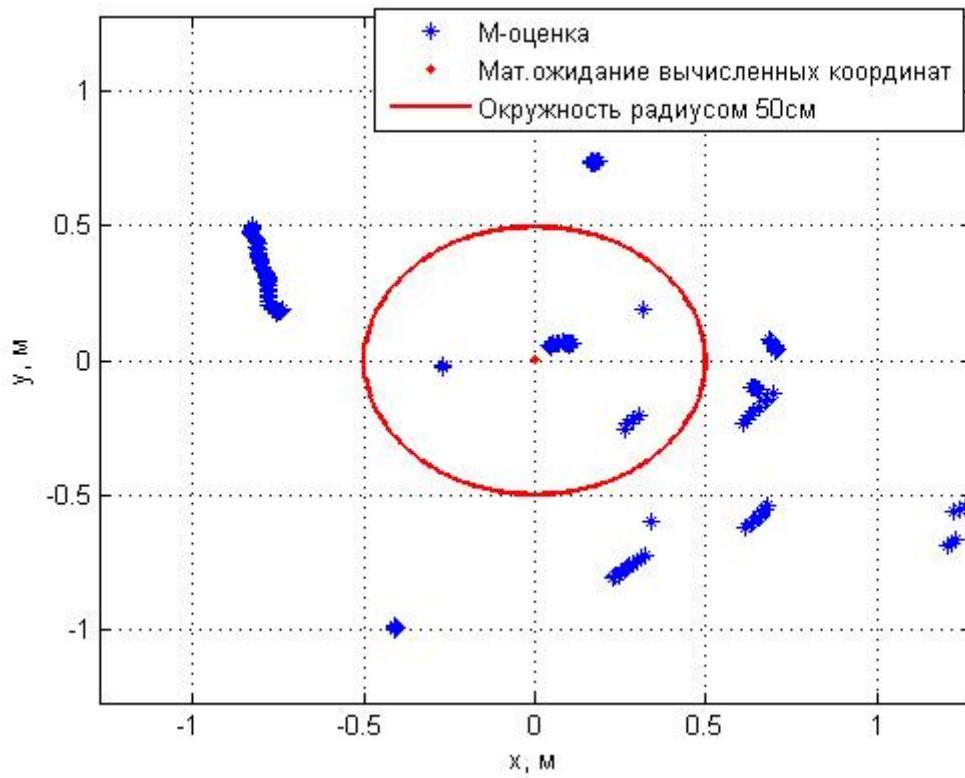


Рис. 119. Распределение полученных решений относительно мат.ожидания для метода М-оценки

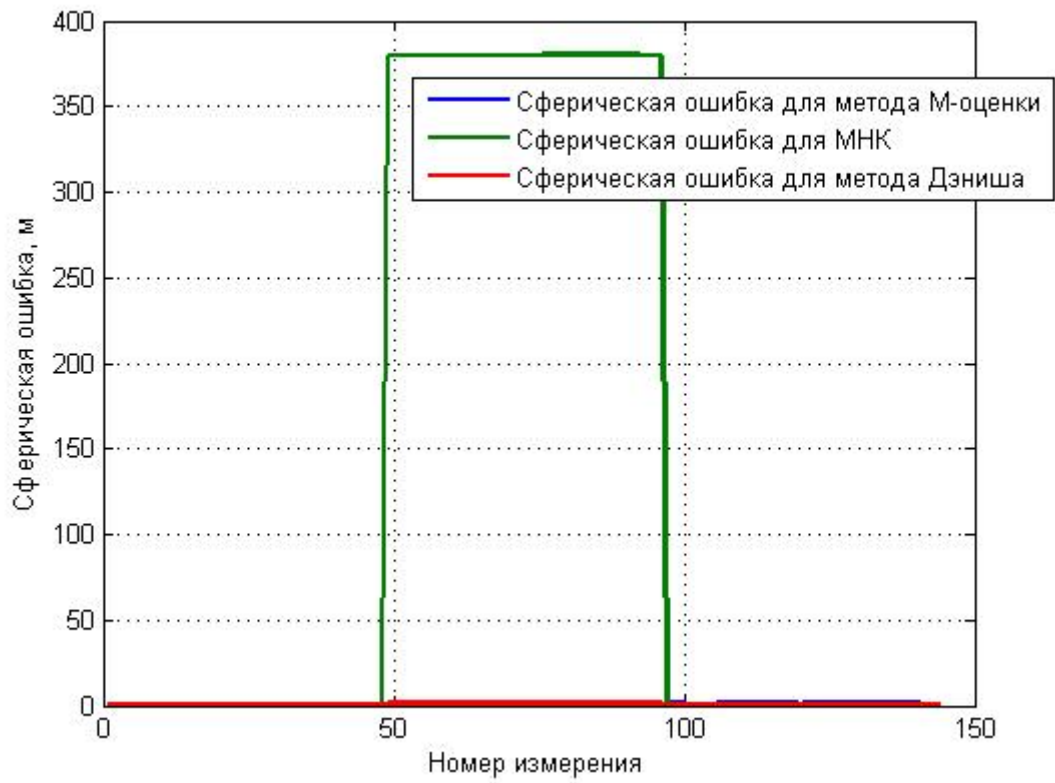


Рис. 120. Сферическая ошибка для метода Дэниша, МНК и метода М-оценки

Приложение 2. Текст программы моделирования.

```

clear all
close all
clc
load('data.mat')

%Инициализация
satellites = [ 43  41  42  45  38  34  46  41  37  40  39  38  42];
N = 13; %число спутников
error = 3; %количество ошибок
K = 144; %число реализаций
kmax = K;
sputniki = zeros(N,3);
r = zeros(N,1); %Измерения
x_v_0 = zeros(4,1);
mean_x = 2.841922288878588e+006;
mean_y = 2.183975697686305e+006;
mean_z = 5.258390047095086e+006;
matr_iskl_Danish = zeros(144,N);
matr_iskl_m = zeros(144,N);
Danish_1 = 0;
Danish_2 = 0;
Danish_3 = 0;
true_Danish = 0;
faulse_Danish = 0;
true_m = 0;
faulse_m = 0;
a_m = 0;
b_m = 0;
c_m = 0;
d_m = 0;
e_m = 0;

for q = 1:K
close all

%По реальным данным
for i = 1:N
    sputniki(i,1) = X_GPS_by_ID(q,i);
    sputniki(i,2) = Y_GPS_by_ID(q,i);
    sputniki(i,3) = Z_GPS_by_ID(q,i);
end

%Измерения

```

```

for i = 1:N
    r(i) = pr_GPS_by_ID(q,i);
end

if (q>0)
    r(1) = r(1) + 1000;
    r(2) = r(2) - 1000;
    r(3) = r(3) + 1000;
end

[x_v_Danish_2(1:4,q),iskl_Danish] = Danish_f2(x_v_0,r,sputniki,N);
[x_v_mnk2(1:4,q),delta_mnk2] = mnk_f2(x_v_0,r,sputniki,N);
[x_v_m2(1:4,q), iskl_m] = m_f2(x_v_0,r,sputniki,N);

for i = 1:N
    if iskl_Danish(i) == 1
        matr_iskl_Danish(q,i) = satellites(i);
    end
    if iskl_m(i) == 1
        matr_iskl_m(q,i) = satellites(i);
    end
end

end

for i = 1:K
    for j = 1:error
        if matr_iskl_Danish(i,j) ~=0
            true_Danish = true_Danish + 1;
        end
        if matr_iskl_m(i,j) ~=0
            true_m = true_m + 1;
        end
    end
end
% end
% for i = 1:K
for q = error+1:N
    if matr_iskl_Danish(i,q)~=0
        faulse_Danish = faulse_Danish + 1;
    end
    if matr_iskl_m(i,q)~=0
        faulse_m = faulse_m + 1;
    end
end
end
end

```

```

%   for q = 1:N
%       if matr_iskl_Danish(i,q)~=0
%           faulse_Danish = faulse_Danish + 1;
%       end
%       if matr_iskl_m(i,q)~=0
%           faulse_m = faulse_m + 1;
%       end
%   end
end
true_Danish = true_Danish/(error*144);
faulse_Danish = faulse_Danish/((N-3)*144);
true_m = true_m/(error*144);
faulse_m = faulse_m/((N-3)*144);
t=[0:pi/180:2*pi];

for i = 1:kmax
    max_x(i) = max(abs(mean(x_v_m2(1,1:kmax))-x_v_m2(1,i)));
    max_y(i) = max(abs(mean(x_v_m2(2,1:kmax))-x_v_m2(2,i)));
end
max_x = max(max_x);
max_y = max(max_y);
if (max_x>max_y)
    max_m2 = max_x;
else max_m2 = max_y;
end

figure(1)
plot(x_v_m2(1,1:kmax)-abs(mean(x_v_m2(1,1:kmax))),x_v_m2(2,1:kmax)-
abs(mean(x_v_m2(2,1:kmax))), '*');
grid on
xlabel('x, M');
ylabel('y, M');
xlim([-max_m2 max_m2]);
ylim([-max_m2 max_m2]);
hold on
plot(mean(x_v_m2(1,1:kmax))-
abs(mean(x_v_m2(1,1:kmax))),mean(x_v_m2(2,1:kmax))-
abs(mean(x_v_m2(2,1:kmax))), 'r', 'MarkerSize', 10);
hold on
%Dля построения окружности на графиках M-оценки
x=0.5*cos(t);
y=0.5*sin(t);
plot(x,y, 'LineWidth', 2, 'Color', 'red');
legend('M-оценка', 'Мат.ожидание вычисленных координат', 'Окружность
радиусом 50см');

```



```
hold off
```

```
for i = 1:kmax
    max_x(i) = max(abs(mean(x_v_mnk2(1,1:kmax))-x_v_mnk2(1,i)));
    max_y(i) = max(abs(mean(x_v_mnk2(2,1:kmax))-x_v_mnk2(2,i)));
end
max_x = max(max_x);
max_y = max(max_y);
if (max_x>max_y)
    max_mnk2 = max_x;
else max_mnk2 = max_y;
end
```

```
figure(3)
plot(x_v_mnk2(1,1:kmax)-
abs(mean(x_v_mnk2(1,1:kmax))),x_v_mnk2(2,1:kmax)-
abs(mean(x_v_mnk2(2,1:kmax))),'*');
xlabel('x, M');
ylabel('y, M');
xlim([-max_mnk2 max_mnk2]);
ylim([-max_mnk2 max_mnk2]);
grid on
hold on
plot(mean(x_v_mnk2(1,1:kmax))-
abs(mean(x_v_mnk2(1,1:kmax))),mean(x_v_mnk2(2,1:kmax))-
abs(mean(x_v_mnk2(2,1:kmax))),'r','MarkerSize',10);
hold on
% Для построения окружности на графиках МНК
x=0.5*cos(t);
y=0.5*sin(t);
plot(x,y,'LineWidth',2,'Color','red');
legend('МНК','Мат.ожидание вычисленных координат','Окружность радиусом
50см');
hold off
```

```
for i = 1:kmax
    max_x(i) = max(abs(mean(x_v_Danish_2(1,1:kmax))-x_v_Danish_2(1,i)));
    max_y(i) = max(abs(mean(x_v_Danish_2(2,1:kmax))-x_v_Danish_2(2,i)));
end
max_x = max(max_x);
max_y = max(max_y);
if (max_x>max_y)
    max_Danish_2 = max_x;
else max_Danish_2 = max_y;
end
```

```

figure(4)
plot(x_v_Danish_2(1,1:kmax)-
abs(mean(x_v_Danish_2(1,1:kmax))),x_v_Danish_2(2,1:kmax)-
abs(mean(x_v_Danish_2(2,1:kmax))), '*');
xlabel('x, м');
ylabel('y, м');
xlim([-max_Danish_2 max_Danish_2]);
ylim([-max_Danish_2 max_Danish_2]);
grid on
hold on
plot(mean(x_v_Danish_2(1,1:kmax))-
abs(mean(x_v_Danish_2(1,1:kmax))),mean(x_v_Danish_2(2,1:kmax))-
abs(mean(x_v_Danish_2(2,1:kmax))), 'r','MarkerSize',10);
hold on
%Dля построения окружности на графиках Дэниша
x=0.5*cos(t);
y=0.5*sin(t);
plot(x,y,'LineWidth',2,'Color','red');
legend('Метод Дэниша','Мат.ожидание вычисленных координат','Окружность
радиусом 50см');
hold off

for k=1:kmax
sphere_error_m2(k) = norm( [mean_x-x_v_m2(1,k),mean_y-
x_v_m2(2,k),mean_z-x_v_m2(3,k)]);
sphere_error_mnk2(k) = norm( [mean_x-x_v_mnk2(1,k),mean_y-
x_v_mnk2(2,k),mean_z-x_v_mnk2(3,k)]);
sphere_error_Danish_2(k) = norm( [mean_x-x_v_Danish_2(1,k),mean_y-
x_v_Danish_2(2,k),mean_z-x_v_Danish_2(3,k)]);
end

figure(5)
plot(1:kmax,sphere_error_m2(1,1:kmax),1:kmax,sphere_error_mnk2(1,1:kmax),1:
kmax,sphere_error_Danish_2(1,1:kmax),'LineWidth',2);
legend('Сферическая ошибка для метода М-оценки','Сферическая ошибка для
МНК','Сферическая ошибка для метода Дэниша');
xlabel('Номер измерения');
ylabel('Сферическая ошибка, м');
grid on

function [ x_v_Danish_2, iskl_Danish ] = Danish_f2( x_v,r,sputniki,N )

```

```

s = 2;
k = 1;
r_new = 0;
P = zeros(N);
iskl_Danish = zeros(N,1);
c_Danish = 3;
t = 1;
satellites = [ 43  41  42  45  38  34  46  41  37  40  39  38  42];
for i = 1:N
    P(i,i) = 1;
end
Q = P^-1;

[x_v,delta_r] = mnk_f2(x_v,r,sputniki,N);

%Изменение весовой матрицы
for i = 1:N
    if (abs(delta_r(i))<=c_Danish*s*sqrt(Q(i,i)))
        P(i,i) = P(i,i);
    else P(i,i) = P(i,i)*exp(-(abs(delta_r(i)))/(c_Danish*s*sqrt(Q(i,i))));
    end
end

for i = 1:N
    if iskl_Danish(i)==0
        r_new(k) = r(i);
        sputniki_new(k,1:3) = sputniki(i,1:3);
        k = k+1;
    end
end

if ((N-sum(iskl_Danish))>3)
N_new = length(r_new);
A = zeros(N_new,4);
P = zeros(N_new);
delta_r = zeros(1,N_new);
x_v = zeros(4,1);

[x_v,delta_r] = mnk_f2(x_v,r_new,sputniki_new,N_new);
end

x_v_Danish_2 = x_v;
end

```

```

function [ x_v_m2, iskl_m ] = m_f2( x_v,r,sputniki,N )
s = 2;
k = 1;
t = 1;
P = zeros(N);
satellites = [ 43  41  42  45  38  34  46  41  37  40  39  38  42];
for i = 1:N
    P(i,i) = 1;
end
iskl_m = zeros(N,1);

[x_v,delta_r] = mnk_f2(x_v,r,sputniki,N);

for i = 1:N
    const(i) = delta_r(i) - median(delta_r);
end
s_0 = (1/0.6745)*median(abs(const));
%Изменение весовой матрицы
for i = 1:N
    if ((abs(delta_r(i))/s_0)<=1.345)
        P(i,i) = 1;
    else P(i,i) = 1.345/(abs(delta_r(i)/s_0));
    end
end

for i = 1:N
    if P(i,i)<1
        iskl_m(i) = 1;
    end
end

for i = 1:N
    if iskl_m(i)==0
        r_new(k) = r(i);
        sputniki_new(k,1:3) = sputniki(i,1:3);
        k = k+1;
    end
end

if ((N-sum(iskl_m))>3)
    N_new = length(r_new);
    A = zeros(N_new,4);
    P = zeros(N_new);
    delta_r = zeros(1,N_new);

```

```

x_v = zeros(4,1);

[x_v,delta_r] = mnk_f2(x_v,r_new,sputniki_new,N_new);

end
x_v_m2 = x_v;
end

function [ x_v_mnk2,delta_r] = mnk_f2( x_v,r,sputniki,N )
%Решение

for iter = 1:10
    for i = 1:N
        r_oc(i) = sqrt((x_v(1,1)-sputniki(i,1))^2+(x_v(2,1)-
sputniki(i,2))^2+(x_v(3,1)-sputniki(i,3))^2)+x_v(4,1);
        delta_r(i) = r(i) - r_oc(i);
    end

    for i = 1:N
        for j = 1:3
            H(i,j) = (x_v(j) - sputniki(i,j))/r_oc(i);
        end
    end
    H(1:N,4) = 1;

    x_v = x_v + ((H'*H)^-1)*H'*delta_r';
end

x_v_mnk2 = x_v;

```

Приложение 3

Охрана труда

Общие положения

Антропогенные факторы, возникающие в процессе жизнедеятельности воздействуют как на окружающую среду так и на самого человека. При этом в условиях производства воздействие этих факторов усиливается. В этой связи имеет смысл говорить об антропогенных производственных факторах.

Антропогенный производственный фактор (АПФ) - фактор, способный вызвать негативные изменения здоровья человека, непосредственно занятого в производственном процессе, и антропогенные изменения окружающей среды, подверженной воздействию данного производственного процесса.

Еще раз подчеркнем, что речь идет о факторах, которые обусловлены трудовой, производственной деятельностью.

Рассматривая воздействие АПФ на производственную окружающую среду и человека можно сформулировать следующие требования:

- АПФ при их комплексном воздействии на человека не должны оказывать отрицательного влияния на здоровье человека при его профессиональной деятельности в течение длительного времени;
- АПФ не должны вызывать снижения надежности и качества деятельности человека (оператора) при действии их в течение дня.

При учете и нормировании АПФ различают следующие уровни их воздействия на человека:

- комфортная производственная окружающая среда обеспечивает оптимальную динамику работоспособности человека (оператора), хорошее самочувствие и сохранение его здоровья;
- относительно дискомфортная производственная окружающая среда обеспечивает при воздействии в течение определенного интервала времени заданную работоспособность и сохранение здоровья, но вызывает у человека субъективные ощущения и функциональные изменения, не выходящие за пределы нормы;
- экстремальная производственная окружающая среда приводит к снижению работоспособности человека и вызывает функциональные изменения, выходящие за пределы нормы, но не ведущие к патологическим нарушениям;
- сверхэкстремальная производственная окружающая среда приводит к возникновению в организме человека патологических изменений и (или) к невозможности выполнения работы.

АПФ можно классифицировать по разным признакам.

По своей природе АПФ могут быть: физическими, химическими, биологическими, психофизиологическими.

С другой стороны, *по своему действию* АПФ могут различаться на:

- вредные - АПФ, воздействия которых на работающих в определенных условиях приводят к заболеванию или снижению работоспособности. К вредным АПФ можно отнести: шум, вибрацию, электромагнитные поля и др.
- опасные - АПФ, воздействия которых на работающих в определенных условиях приводят к травме или другому резкому ухудшению здоровья. К опасным АПФ относятся - электрический ток, газообразный хлор в определенных концентрациях и др.
- особоопасные - АПФ, которые при определенных условиях приводят к промышленной аварии, т.е. разрушительному высвобождению собственного энергозапаса промышленного предприятия, при котором сырье, промежуточные продукты, продукция предприятия, отходы производства, установленное на промышленной площадке технологическое оборудование, вовлекаясь в аварийный процесс, создают факторы для населения, персонала, окружающей среды и самого промышленного предприятия, приводящие к катастрофическим последствиям (ионизирующие излучения, пожар, взрыв, выброс большого количества газообразного хлора и др).

Следует отметить, что вредные антропогенные производственные факторы носят, как правило, детерминированный характер, а опасные и особоопасные - стохастический характер. В количественную оценку стохастических АПФ входит вероятность возникновения данного фактора.

В этой работе будут рассмотрены 2 фактора, влияющих на работу человека: зашумлённость рабочего места, а также микроклимат рабочего места.

Защита от шума на рабочем месте

Шум— это совокупность звуков, неблагоприятно воздействующих на организм человека и мешающих его работе и отдыху. Источниками звука являются упругие колебания материальных частиц и тел, передаваемых жидкой, твердой и газообразной средой. Скорость звука в воздухе при нормальной температуре составляет приблизительно 340 м/с, в воде — 1 430 м/с, в алмазе — 18 000 м/с. Звук с частотой от 16 Гц до 20 кГц называется слышимый, с частотой менее 16 Гц — инфразвук и более 20 кГц — ультразвук. Область пространства, в котором распространяются звуковые волны, называется звуковым полем, которое характеризуется интенсивностью звука, скоростью его распространения и звуковым давлением.

Интенсивность звука — это количество звуковой энергии, передаваемой звуковой волной за 1 с через площадку 1 м^2 , перпендикулярную направлению распространения звука, Вт/м².

Звуковое давление — им называется разность между мгновенным значением полного давления, создаваемого звуковой волной и средним давлением, которое наблюдается в невозмущенной среде. Единица измерения — Па. Порог слуха молодого человека в диапазоне частот от 1 000 до 4 000 Гц соответствует давлению 2×10^{-5} Па. Наибольшее значение звукового давления, вызывающего болезненные ощущения, называется порогом болевого ощущения и составляет 2×10^2 Па. Между этими значениями лежит область слухового восприятия. Интенсивность воздействия шума на человека оценивается уровнем звукового давления (L), который определяется как логарифм отношения эффективного значения звукового давления к пороговому. Единица измерения — децибел, дБ. пороге слышимости при среднегеометрической частоте 1 000 Гц уровень звукового давления равен нулю, а на пороге болевого ощущения — 120–130 дБ.

Окружающие человека шумы имеют разную интенсивность: шепот — 10–20 дБА, разговорная речь — 50–60 дБА, шум от двигателя легкового автомобиля — 80 дБА, а от грузового — 90 дБА, шум от оркестра — 110–120 дБА, шум при взлете реактивного самолета на расстоянии 25 м — 140 дБА, выстрел из винтовки — 160 дБА, а из тяжелого орудия — 170 дБА.

Шум, возникающий при работе производственного оборудования и превышающий нормативные значения, воздействует на центральную и вегетативную нервную систему человека, органы слуха. Шум воспринимается весьма субъективно. При этом имеет значение конкретная ситуация, состояние здоровья, настроение, окружающая обстановка.

Основное физиологическое воздействие шума заключается в том, что повреждается внутреннее ухо, возможны изменения электрической проводимости кожи, биоэлектрической активности головного мозга, сердца и скорости дыхания, общей двигательной активности, а также изменения

размера некоторых желез эндокринной системы, кровяного давления, сужение кровеносных сосудов, расширение зрачков глаз.

Работающий в условиях длительного шумового воздействия испытывает раздражительность, головную боль, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, нарушение сна. В шумном фоне ухудшается общение людей, в результате чего иногда возникает чувство одиночества и неудовлетворенности, что может привести к несчастным случаям.

Длительное воздействие шума, уровень которого превышает допустимые значения, может привести к заболеванию человека шумовой болезнью — нейросенсорная тугоухость. На основании всего выше сказанного шум следует считать причиной потери слуха, некоторых нервных заболеваний, снижения продуктивности в работе и некоторых случаях потери жизни.

Основная цель нормирования шума на рабочих местах — это установление предельно допустимого уровня шума (ПДУ), который при ежедневной (кроме выходных дней) работе, но не более 40 часов в неделю в течение всего рабочего стажа, не должен вызывать заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами исследований в процессе работы или отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений. Соблюдение ПДУ шума не исключает нарушения здоровья у сверхчувствительных лиц.

Шум имеет свойство вызывать акустические раздражения, которые, постепенно накапливаясь в организме, всё сильнее угнетают его. Не удивительно, что люди, постоянно работающие за компьютером, страдают от повышения усталости, головных болей, головокружения. Также наблюдается функциональное расстройство нервной системы, человек, подвергающийся систематическому шумовому воздействию, быстро утомляется, становится раздражительным, забывчивым, подвержен стрессам и депрессиям. Объяснить это можно не только прямым воздействием шума на барабанную перепонку, а далее на стволовые и корковые структуры мозга, но также тем, что при передаче нервных импульсов, они взаимодействуют с другими областями мозга, в которых располагаются центры дыхательной, сердечнососудистой и других важных систем организма. В результате происходит повышение тонуса сосудов, вследствие чего повышается артериальное давление и приводит к появлению дисфункций, итог — развитие гипертонической болезни.

Негативные последствия, которые может вызвать воздействие шума компьютера, заставляют всерьёз задуматься над этой проблемой. Источниками шума в системном блоке являются вентиляторы системы охлаждения блока питания, процессора и графической платы, а так же приводы жёстких и оптических дисков. Корпус системного блока к тому же играет роль резонатора, приводя к низкочастотным составляющим в общую

картину шума. При длительной работе за компьютером необходимо, чтобы техника отвечала требованиям санитарных норм и правил, и уровень шума не превышал установленных значений. К тому же в работе необходимо делать перерывы во избежание непрерывного воздействия негативных факторов.

Допустимый уровень шума — это уровень, который не вызывает у человека значительного беспокойства и существенных изменений показателей функционального состояния систем и анализаторов, чувствительных к шуму.

Предельно допустимые уровни шума на рабочих местах регламентированы СН 2.2.4/2.8.562-96 “Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки”, СНиП 23-03-03 “Защита от шума”.

Защита от шума достигается разработкой шумобезопасной техники, применением средств и методов коллективной защиты, а также средств индивидуальной защиты.

Разработка шумобезопасной техники — уменьшение шума в источнике — достигается улучшением конструкции машин, применением малошумных материалов в этих конструкциях. Средства и методы коллективной защиты подразделяются на акустические, архитектурно-планировочные, организационно-технические.

Защита от шума акустическими средствами предполагает звукоизоляцию (устройство звукоизолирующих кабин, кожухов, ограждений, установку акустических экранов); звукопоглощение (применение звукопоглощающих облицовок, штучных поглотителей); глушители шума (абсорбционные, реактивные, комбинированные).

Архитектурно-планировочные методы — рациональная акустическая планировка зданий; размещение в зданиях технологического оборудования, машин и механизмов; рациональное размещение рабочих мест; планирование зон движения транспорта; создание шумозащищенных зон в местах нахождения человека.

Организационно-технические мероприятия — изменение технологических процессов; устройство дистанционного управления и автоматического контроля; своевременный планово-предупредительный ремонт оборудования; рациональный режим труда и отдыха.

Если невозможно уменьшить шум, действующий на работников, до допустимых уровней, то необходимо использовать средства индивидуальной защиты (СИЗ) — противозумные вкладыши из ультратонкого волокна “Беруши” одноразового использования, а также противозумные вкладыши многократного использования (эбонитовые, резиновые, из пенопласта) в форме конуса, грибка, лепестка. Они эффективны для снижения шума на средних и высоких частотах на 10–15 дБА. Наушники снижают уровень звукового давления на 7–38 дБ в диапазоне частот 125–8 000 Гц. Для предохранения от воздействия шума с общим уровнем 120 дБ и выше

рекомендуется применять шлемофоны, оголовья, каски, которые снижают уровень звукового давления на 30–40 дБ в диапазоне частот 125–8 000 Гц.

5.3 Микроклимат производственных помещений

Условия микроклимата в производственных помещениях зависят от ряда факторов:

- климатического пояса и сезона года;
- характера технологического процесса и вида используемого оборудования;
- условий воздухообмена;
- размеров помещения;
- числа работающих людей и т.п.

Микроклимат в производственном помещении может меняться на протяжении всего рабочего дня, быть различным на отдельных участках одного и того же цеха.

В производственных условиях характерно суммарное (сочетанное) действие параметров микроклимата: температуры, влажности, скорости движения воздуха.

В соответствии с СанПиН 2.2.4.548 – 96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» параметрами, характеризующими микроклимат являются:

- температура воздуха;
- температура поверхностей (учитывается температура поверхностей ограждающих конструкций (стены, потолок, пол), устройств (экраны и т.п.), а также технологического оборудования или ограждающих его устройств);
- относительная влажность воздуха;
- скорость движения воздуха;
- интенсивность теплового облучения.

Температура воздуха, измеряемая в С, является одним из основных параметров, характеризующих тепловое состояние микроклимата. Температура поверхностей и интенсивность теплового облучения учитываются только при наличии соответствующих источников тепловыделений.

Влажность воздуха - содержание в воздухе водяного пара. Различают абсолютную, максимальную и относительную влажность.

Абсолютная влажность (A) - упругость водяных паров, находящихся в момент исследования в воздухе, выраженная в мм ртутного столба, или

массовое количество водяных паров, находящихся в 1 м^3 воздуха, выражаемое в граммах.

Максимальная влажность (F) - упругость или масса водяных паров, которые могут насытить 1 м^3 воздуха при данной температуре.

Относительная влажность (R) - это отношение абсолютной влажности к максимальной, выраженное в процентах.

Скорость движения воздуха измеряется в м/с.

Измерение параметров микроклимата.

В обычных условиях для измерения температуры воздуха используются термометры (ртутные или спиртовые), термографы (регистрирующие изменение температуры за определенное время) и сухие термометры психрометров.

Для определения влажности воздуха применяются переносные аспирационные психрометры (Ассмана), реже стационарные психрометры (Августа) и гигрометры. При использовании психрометров дополнительно измеряют атмосферное давление с помощью барометров – анероидов.

Скорость движения воздуха измеряется крыльчатыми и чашечными анемометрами. Влияние параметров микроклимата на самочувствие человека. Параметры микроклимата оказывают непосредственное влияние на тепловое состояние человека.

Например, понижение температуры и повышение скорости движения воздуха, способствует усилению конвективного теплообмена и процесса теплоотдачи при испарении пота, что может привести к переохлаждению организма. При повышении температуры воздуха возникают обратные явления. Переносимость человеком температуры, как и его теплоощущение, в значительной мере зависит от влажности и скорости окружающего воздуха. Чем больше относительная влажность, тем меньше испаряется пота в единицу времени и тем быстрее наступает перегрев тела.

Особенно неблагоприятное воздействие на тепловое самочувствие человека оказывает высокая влажность при температурах окружающего воздуха более 30°C , так как при этом почти вся выделяемая теплота отдается в окружающую среду при испарении пота. При повышении влажности пот не испаряется, а стекает каплями с поверхности кожного покрова. Возникает так называемое проливное течение пота, изнуряющее организм и не обеспечивающее необходимую теплоотдачу.

Недостаточная влажность приводит к интенсивному испарению влаги со слизистых оболочек их пересыхания и растрескивания, а затем и к загрязнению болезнетворными микробами. Поэтому, при длительном

пребывании людей в закрытых помещениях, рекомендуется ограничиваться относительной влажностью 30...70%

При обильном потовыделении масса организма человека уменьшается. Считается допустимым для человека снижение его массы на 2...3% путем испарения влаги – обезвоживания организма.

Вместе с потом организм теряет значительное количество минеральных солей. Для восстановления водного баланса работающих в горячих цехах устанавливают пункты подпитки подсоленной газированной водой. Длительное воздействие высокой температуры особенно с повышенной влажностью может привести к значительному накоплению теплоты в организме и развитию перегревания организма выше допустимого уровня – гипертермии.

Производственные процессы, выполняемые при пониженной температуре, большой подвижности и влажности воздуха, могут быть причиной охлаждения и даже переохлаждения организма – гипотермии. Параметры микроклимата оказывают существенное влияние на производительность труда.

В горячих цехах промышленных предприятий большинство технологических процессов протекают при температурах, значительно превышающих температуру воздуха окружающей среды. Нагретые поверхности излучают в пространство потоки лучистой энергии, которые могут привести к отрицательным последствиям. При температуре до 500°C с нагретой поверхности излучаются тепловые (инфракрасные) лучи, а при более высоких температурах наряду с возрастанием инфракрасного излучения появляются видимые световые и ультрафиолетовые лучи.

Под влиянием теплового облучения в организме происходят биохимические сдвиги, уменьшается кислородная насыщенность крови, понижается венозное давление, замедляется кровоток и как следствие наступает нарушение деятельности сердечно-сосудистой и нервной систем.

По характеру воздействия на организм человека инфракрасные лучи подразделяют на коротковолновые и длинноволновые. Тепловые излучения коротковолнового диапазона глубоко проникают в ткани и разогревают их, вызывая быструю утомляемость, понижение внимания, усиленное потовыделение, а при длительном облучении – тепловой удар. Длинноволновые лучи глубоко в ткани не проникают и поглощаются в основном в эпидермисе кожи. Они могут вызывать ожоги кожи и глаз (катаракта глаза).

Гигиеническое нормирование параметров микроклимата

Нормы производственного микроклимата установлены в СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» и ССБТ ГОСТ 12.1.005-88 «Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны». Они едины для всех производств и всех климатических зон с некоторыми незначительными отступлениями.

В этих нормах отдельно нормируется каждый компонент микроклимата в рабочей зоне производственного помещения: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха в зависимости от способности организма человека к акклиматизации в разное время года, характера одежды, интенсивности производимой работы и характера тепловыделений в рабочем помещении. В рабочей зоне производственного помещения согласно ГОСТ 12.1.005-88 могут быть установлены оптимальные и допустимые микроклиматические условия.

Оптимальные условия микроклимата

Оптимальные микроклиматические условия установлены по критериям оптимального теплового и функционального состояния человека. Они обеспечивают общее и локальное ощущение теплового комфорта в течение 8-часовой рабочей смены при минимальном напряжении механизмов терморегуляции, не вызывают отклонений в состоянии здоровья, создают предпосылки для высокого уровня работоспособности и являются предпочтительными на рабочих местах.

Оптимальные величины показателей микроклимата необходимо соблюдать на рабочих местах производственных помещений, на которых выполняются работы операторского типа, связанные с нервно - эмоциональным напряжением (в кабинах, на пультах и постах управления технологическими процессами, в залах вычислительной техники и др.). Оптимальные параметры микроклимата на рабочих местах должны соответствовать величинам, приведенным в табл. 5.1, применительно к выполнению работ различных категорий в холодный и теплый периоды года.

Перепады температуры воздуха по высоте и по горизонтали, а также изменения температуры воздуха в течение смены при обеспечении оптимальных величин микроклимата на рабочих местах не должны превышать 2° С и выходить за пределы величин, указанных в табл. 7. для отдельных категорий работ.

Таблица 1. Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	Ia (до 139)	22 - 24	21 - 25	60 - 40	0,1
	Iб (140 - 174)	21 - 23	20 - 24	60 - 40	0,1
	IIa (175 - 232)	19 - 21	18 - 22	60 - 40	0,2
	IIб (233 - 290)	17 - 19	16 - 20	60 - 40	0,2
	III (более 290)	16 - 18	15 - 19	60 - 40	0,3
Теплый	Ia (до 139)	23 - 25	22 - 26	60 - 40	0,1
	Iб (140 - 174)	22 - 24	21 - 25	60 - 40	0,1
	IIa (175 - 232)	20 - 22	19 - 23	60 - 40	0,2
	IIб (233 - 290)	19 - 21	18 - 22	60 - 40	0,2
	III (более 290)	18 - 20	17 - 21	60 - 40	0,3

Допустимые условия микроклимата

Допустимые микроклиматические условия установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Они не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности. Допустимые величины показателей микроклимата устанавливаются в случаях, когда по технологическим требованиям, техническим и экономически обоснованным причинам не могут быть обеспечены оптимальные величины. Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 5.2. применительно к выполнению работ различных категорий в холодный и теплый периоды года.

При обеспечении допустимых величин микроклимата на рабочих местах:

- перепад температуры воздуха по высоте должен быть не более 3° С;

- перепад температуры воздуха по горизонтали, а также ее изменения в течение смены не должны превышать:
 - при категориях работ Ia и Ib – 4° С;
 - при категориях работ IIa и IIб – 5° С;
 - при категории работ III – 6° С.

При этом абсолютные значения температуры воздуха не должны выходить за пределы величин, указанных в табл. 8. для отдельных категорий работ.

Таблица 2. Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		диапазон ниже оптимальных величин	диапазон выше оптимальных величин			для диапазона температур воздуха ниже оптимальных величин, не более	для диапазона температур воздуха выше оптимальных величин, не более **
Холодный	Ia (до 139)	20,0 - 21,9	24,1 - 25,0	19,0- 26,0	15 - 75 *	0,1	0,1
	Iб (140 - 174)	19,0 - 20,9	23,1 - 24,0	18,0- 25,0	15 - 75	0,1	0,2
	IIa (175 - 232)	17,0 - 18,9	21,1 - 23,0	16,0- 24,0	15 - 75	0,1	0,3
	IIб (233 - 290)	15,0 - 16,9	19,1 - 22,0	14,0- 23,0	15 - 75	0,2	0,4
	III (более 290)	13,0 - 15,9	18,1 - 21,0	12,0- 22,0	15 - 75	0,2	0,4
Теплый	Ia (до 139)	21,0 - 22,9	25,1 - 28,0	20,0- 29,0	15 - 75 *	0,1	0,2
	Iб (140 - 174)	20,0 - 21,9	24,1 - 28,0	19,0- 29,0	15 - 75 *	0,1	0,3
	IIa (175 - 232)	18,0 - 19,9	22,1 - 27,0	17,0- 28,0	15 - 75 *	0,1	0,4
	IIб (233 - 290)	16,0 - 18,9	21,1 - 27,0	15,0- 28,0	15 - 75 *	0,2	0,5
	III (более 290)	15,0 - 17,9	20,1 - 26,0	14,0- 27,0	15 - 75 *	0,2	0,5

* При температурах воздуха 25° С и выше максимальные величины относительной влажности воздуха должны приниматься в соответствии со специальными требованиями.

** При температурах воздуха 26 - 28° С скорость движения воздуха в теплый период года должна приниматься в соответствии со специальными требованиями

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.) должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 9.

Таблица 3. Допустимые величины интенсивности теплового облучения поверхности тела работающих от производственных источников

Облучаемая поверхность тела, %	Интенсивность теплового облучения, Вт/кв. м, не более
50 и более	35
25 - 50	70
не более 25	100

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих от источников излучения, нагретых до белого и красного свечения (раскаленный или расплавленный металл, стекло, пламя и др.) не должны превышать 140 Вт/кв. м. При этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз.

При наличии теплового облучения работающих температура воздуха на рабочих местах не должна превышать в зависимости от категории работ следующих величин:

25° С – при категории работ Ia;

24° С – при категории работ Ib;

22° С – при категории работ IIa;

21° С – при категории работ IIб;

20° С – при категории работ III.

Вывод: при организации рабочего места необходимо учитывать влияние шума и микроклимат, т.к. эти параметры влияют непосредственно на здоровье работника, а, следовательно, на его производительность.