



**ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ
АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИИ СТОЛКНОВЕНИЙ
КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОРБИТАХ ИСЗ**

**С.А. Суханов, В.Д. Шилин, А.В. Рыкин, З.Н. Хуторовский
(ОАО «МАК «ВИМПЕЛ»)**

**А.Г. Тучин, А.С. Самотохин, В.А. Степаньянц
(ИПМ им. Келдыша)**



ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ



1. Прогнозирование опасных сближений особо важных космических аппаратов (мишеней) с каталогизированными космическими объектами – **задача СККП.**
2. В настоящее время КП СККП решает эту задачу для не менее чем 500 мишеней. При этом обеспечивается **обнаружение** опасных сближений на трёхсуточном (семисуточном для объектов геостационарной области) интервале в будущем относительно текущего момента времени, а также **оперативное уточнение** параметров любого сближения при каждом уточнении орбиты одного из опасно сближающихся объектов.
3. Алгоритм решения этой задачи основан на так называемом **«ПРЯМОМ» подходе**, впервые в мире разработанном в 1991 году в МАК «Вымпел» и впервые в мире реализованном в 1992 году в КП СККП на реальном каталоге в режиме «каталог на каталог».
4. Результаты исследований прямого подхода по реальной информации были доложены в США в 1992 году на международном космическом конгрессе и в Германии в 1993 году на первой Европейской конференции по космическому мусору и опубликованы в их трудах.



РЕАЛЬНЫЕ СБЛИЖЕНИЯ С ДЕЙСТВУЮЩИМИ КА



1. В США с 2011 года работает система предупреждения, выдающая заинтересованным странам и организациям предупреждения о сближениях с принадлежащими им действующими КА. Информация поступает из Центра Космических операций им. Джонсона (JSpOC). В России в числе организаций-получателей этой информации состоит МАК «Вымпел».
2. С 01.03.2011 по 20.06.2011 «Вымпелом» получено 206 сообщений по 85 сближениям. Из 85 предупреждённых объектов 76 низкоорбитальных (высота в апогее менее 3500 км), и 9 высокоорбитальных (высота в апогее более 3500 км), из числа которых 5 объектов геостационарной области. Таким образом, подавляющее число близких сближений происходит в низкоорбитальной области.
3. Распределение оповещённых низкоорбитальных объектов по высотам:

Высоты, км	0-500	500-600	600-800	800-1050	1050-1400	1400-1550	1550-3500
Число оповещений	0	4	7	44	0	18	0

Распределение имеет два ярко выраженных максимума.

4. Распределение в целом соответствует условному распределению вероятности столкновения по высоте, получаемому при прямом подходе.



ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ АВТОМАТИЧЕСКИХ ПРОГРАММ КП СККП ПО ОБНАРУЖЕНИЮ РЕАЛЬНЫХ СБЛИЖЕНИЙ



1. Все сближения НОКО, фиксируемые в JSpOC, могли бы быть определены в КП СККП, если бы потенциально опасными считались сближения на расстояние менее 7 км. 25% этих сближений являются опасными по критериям КП СККП. В сообщениях о сближениях, приходящих в МАК «Вымпел» из JSpOC, характеристик опасности этих сближений нет.
2. Расчётные значения ошибок e_r , e_n , e_b определения положения сближающихся объектов в момент их сближения на минимальное расстояние по направлениям радиус-вектор r , нормаль к радиус-вектору в плоскости орбиты n , нормаль к плоскости орбиты b составляют в среднем:

		<u>элементы запуска</u>			<u>фрагменты разрушений</u>		
орбиты КП СККП	e_r, e_n, e_b	75м	1200м	180м	200м	1350м	210м
орбиты JSpOC	e_r, e_n, e_b	7м	40м	7м	16м	190м	20м

Расчётные значения ошибок в JSpOC в среднем на порядок меньше, чем в КП СККП. Поэтому для КП СККП данные JSpOC являются эталонными.

3. Реальные ошибки определения прогнозного положения по r , n сближающихся объектов в момент их сближения на минимальное расстояние для орбит КП СККП в среднем составили:

для фрагментов разрушений : 300м и 570м;

для элементов запуска : 110м и 600м.



ВОЗМОЖНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ АВТОНОМНЫХ (ДИАЛОГОВЫХ) ПРОГРАММ КП СККП ПО ОБНАРУЖЕНИЮ РЕАЛЬНЫХ СБЛИЖЕНИЙ



1. В автономных программах можно использовать более точную модель прогноза. Бралась численная модель с учётом гравитационных полей Земли (8x8), Луны и Солнца, давления солнечного излучения и атмосферы (ГОСТ 2004).
2. Расчётные значения e_r , e_n , e_b ошибок определения прогнозируемого положения на момент сближения элементов запусков по параметрам r , n , b в среднем составляют 40м, 180м, 40м, что в 5 раз больше данных JSPOC. Поэтому для орбит СККП данные JSPOC – эталон.
3. Реальные значения Δr , Δn ошибок определения прогнозируемого положения на момент сближения элементов запусков по параметрам r , n в среднем составляют 55м и 170м, что меньше в 2.0 и 3.5 раза аналогичных данных для аналитического прогноза.
4. Фрагменты разрушений встречаются в 75% сближений с НО КА. Использование более точной модели движения для фрагментов разрушений в анализируемых сближениях НО КО не приводит к существенному повышению точности определения их прогнозного положения. Причина в том, что для фрагментов разрушений мы не располагаем достаточным количеством исходной (в частности, измерительной) информации.



При предупреждении столкновений возможны ошибки: пропуск столкновения и ложная тревога.

Эти ошибки при данной измерительной информации зависят от:

- 1. точности используемого метода определения прогнозного положения объекта по измерениям**
- 2. уровня соответствия реальных и расчётных значений ошибок определения прогнозного положения объекта.**

В РАМКАХ УЖЕ ИМЕЮЩЕЙСЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ МОЖНО ЛИ СУЩЕСТВЕННО УМЕНЬШИТЬ ЧАСТОТУ ПРОПУСКА СТОЛКНОВЕНИЯ И ЧАСТОТУ ЛОЖНОЙ ТРЕВОГИ ?



ОСОБЕННОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ АЛГОРИТМОВ



1. Применяется статистический подход.
2. Алгоритмы основаны на методе наименьших квадратов и его рекуррентных модификациях.
3. Алгоритмы обладают свойством глобальной оптимальности для гауссового распределения ошибок измерений и свойством оптимальности в классе линейных алгоритмов при любых распределениях ошибок.
4. В реальных условиях алгоритмы не обеспечивают расчёт ошибок, соответствующих реальным значениям.

ОШИБКИ ПЕРВИЧНЫХ РЕАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НЕ СООТВЕТСТВУЮТ ПРЕДПОЛОЖЕНИЯМ, ПРИ КОТОРЫХ ПОЛУЧЕНЫ ОПТИМАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА МЕТОДА НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ.

1. Ошибки ограничены известными константами
2. Распределения ошибок не соответствуют гауссовой модели - на интервале изменения ошибки радиолокационных измерений ближе к равномерному закону, чем к гауссовому.

ЭТОТ ФАКТ ВСЕГДА ИГНОРИРОВАЛСЯ.



МОЖНО ЛИ СОЗДАТЬ АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГНОЗНОГО ПОЛОЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА ПО ИЗМЕРЕНИЯМ, КОТОРЫЕ:

1. ЛУЧШЕ СООТВЕТСТВУЮТ СВОЙСТВАМ РЕАЛЬНЫХ ОШИБОК
2. ОБЕСПЕЧИВАЮТ МЕНЬШИЕ РЕАЛЬНЫЕ ОШИБКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОГНОЗНОГО ПОЛОЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА, ЧЕМ МЕТОД НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ
3. ОБЕСПЕЧИВАЮТ ПОЛУЧЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ОШИБОК, СООТВЕТСТВУЮЩИХ ИХ РЕАЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЯМ

?????



Нестатистический подход



В 1960-1970 годах в математике была разработана теория оптимальных алгоритмов в нормированных пространствах. Применялась для решения чисто математических задач аппроксимации в теории функций, дифференциальных и интегральных уравнениях и других абстрактных математических дисциплинах.

В 1980-х годах эта теория была приспособлена для решения задач оценивания и предсказания при единственном предположении об ошибках измерений - ограниченность известными константами. Начиная с 1970-1980-х годов этот подход нашел практическое применение в прикладных областях: энергетика, электроника, химия, биология, медицина и др.

В космических информационно-аналитических системах США и России (в частности, в СККП России) данный подход не применялся. Причины: сложность, неуверенность в его эффективности, нежелание коренным образом перестраивать работу уже созданных систем.

Сейчас возможности вычислительных средств многократно возросли и ситуация изменилась. Поэтому в МАК «Вымпел» осуществляется осмысление нестатистического подхода, разработка и исследование основанных на нём новых методов определения орбит.



Первые результаты по нестатистическому подходу



1. Рассмотрена нестатистическая постановка задачи определения будущего положения объекта околоземного космического пространства, находящегося на орбите спутника Земли, при известных ограничениях на ошибки измерений.
2. Сформулированы критерии оптимальности и получены алгоритмы, удовлетворяющие этим критериям. Исследованы наиболее общие свойства этих алгоритмов в сравнении с алгоритмами статистического подхода.
3. Даны вычислительные схемы наиболее интересных для практики центральных и проективных алгоритмов.
4. Методом математического моделирования для типичных ситуаций разной информативности, возникающих при поддержании Каталога космических объектов, определены точностные характеристики этих алгоритмов при различных распределениях ошибок измерений. Показано, что ошибки определения прогнозного положения космического объекта, полученные при нестатистическом подходе, в отличие от метода наименьших квадратов существенно зависят от распределения ошибок измерений. Чем дальше распределение от гауссового и больше вероятность значений ошибок, близких к их максимальным значениям, тем больше выигрыш в точности оценок алгоритмов нестатистического подхода по сравнению с оценками метода наименьших квадратов. Так, при равномерном законе распределения ошибок измерений эти выигрыши могут составлять десятки раз.
5. Исследованы адаптивные свойства алгоритмов по отношению к ошибкам измерений, а также критичность к неточности знания максимального значения ошибки и ошибкам модели движения.

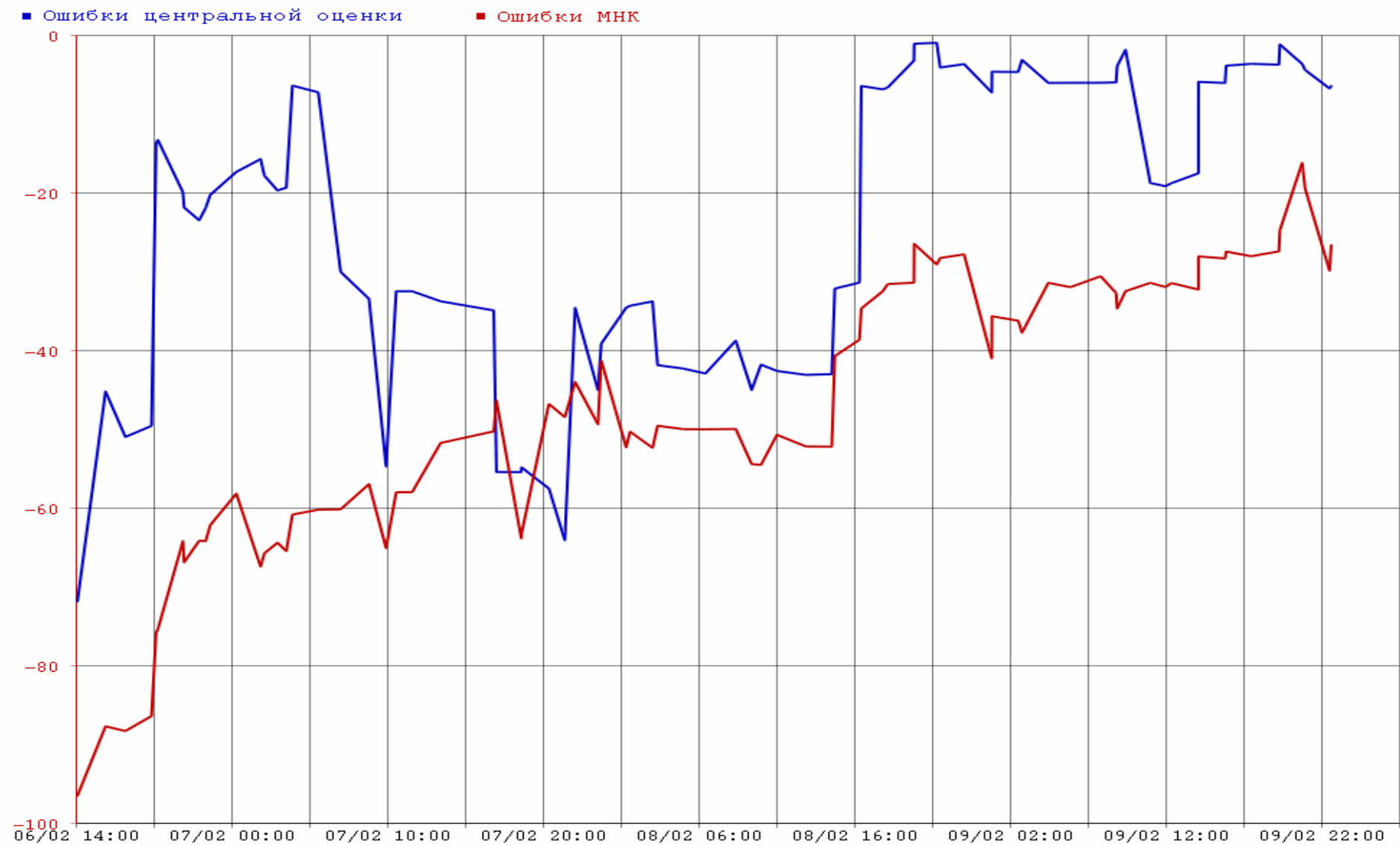


Рис.1 Сравнение ошибок МНК и центральной оценки по радиусу-вектору (столкновение КА Космос-2251 и Иридиум-33)

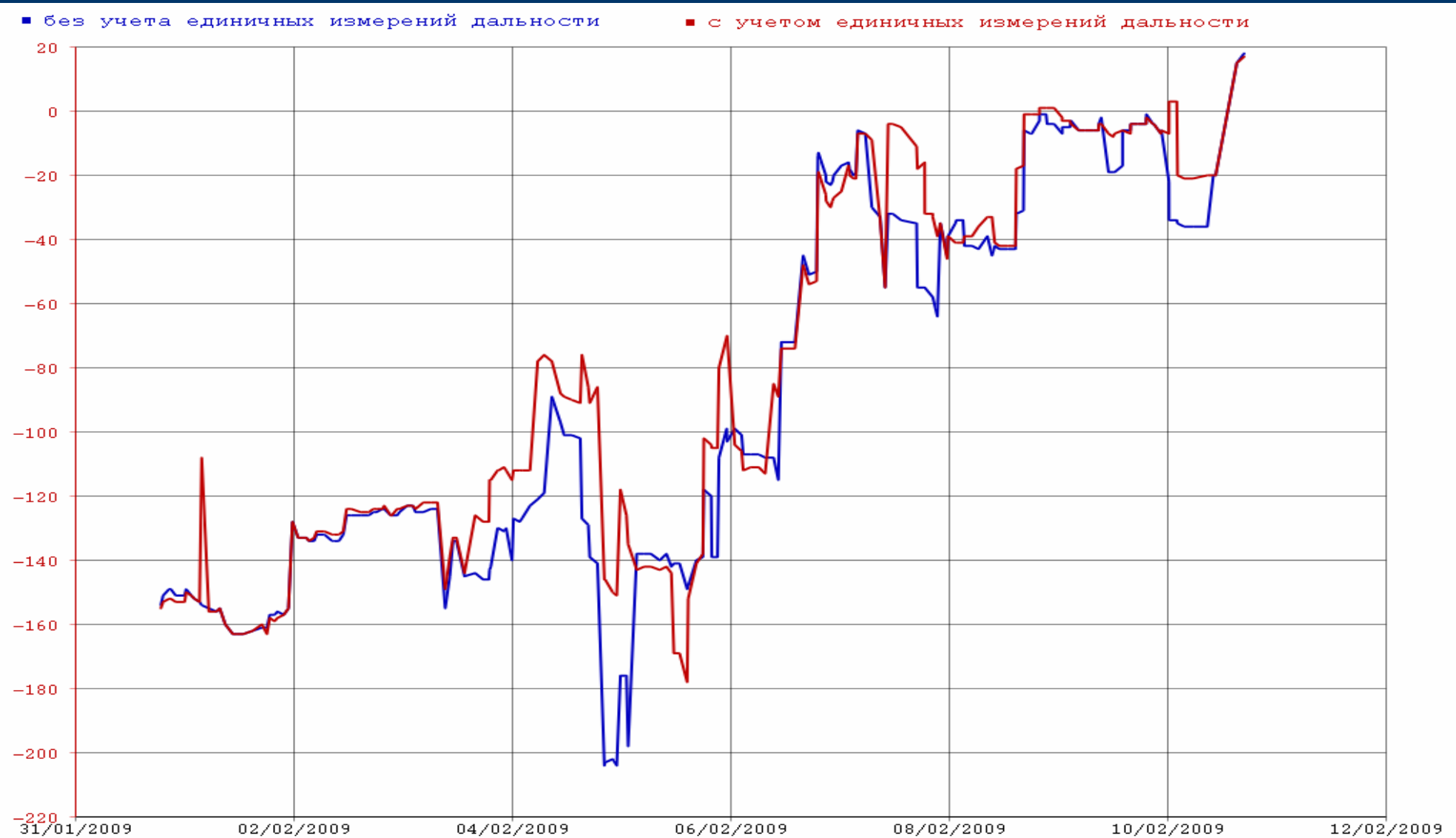


Рис.2 Сравнение ошибок центральной оценки по радиусу-вектору при учете и неучете единичных измерений дальности РЛС "Дунай" (столкновение КА Космос-2251 и Иридиум-33)



ВЫВОДЫ



1. Существующие алгоритмы позволяют решать задачу предупреждения опасных сближений. При этом реальные сближения не пропускаются. Однако достигнутая точность определения прогнозного положения КО в 5 раз хуже, чем в американской системе предупреждения, что приводит при заданной вероятности пропуска к существенно большей, чем в американской системе предупреждения, частоте ложных тревог при выдаче информации оповещения.
2. Новый нестатистический подход при оценке прогнозного положения КО по радиолокационным измерениям позволяет существенно лучше решать задачу предупреждения будущих столкновений по сравнению с традиционно используемым для этой цели методом наименьших квадратов статистического подхода.
3. Использование единичных радиолокационных измерений (опорных точек) при оценке прогнозного положения КО в рамках нестатистического подхода даёт более точное решение задачи предупреждения будущих столкновений. Для метода наименьших квадратов этот эффект также есть, но он заметно меньше.
4. Более полное использование имеющейся измерительной радиолокационной информации и наиболее точные методы её обработки позволяют в принципе выйти на 10м уровень ошибок определения положения КО, сопоставимый с уровнем ошибок в американской системе.
5. Новые алгоритмы, решающие задачу предупреждения опасных сближений, по крайней мере на два порядка более трудоёмки, чем старые. Существующие вычислительные комплексы в ЦККП и МАК «Вымпел» не обеспечивают её решения и требуют модернизации.
6. В КП СККП перечисленные здесь возможности могут быть реализованы только в перспективе, когда выполняемые сейчас (и в будущем) специалистами МАК «Вымпел» операции формализуются и станут рутинными, а вычислительный комплекс КП СККП будет обладать требуемой производительностью. До этого момента комплекс новых программ, связанных с предупреждением возможных столкновений, должен решаться в МАК «Вымпел». Через МАК «Вымпел» должен также происходить обмен различными данными с американцами. Для обеспечения этих мероприятий необходимо принятие соответствующих организационно-технических решений.



Спасибо за внимание!