

---

---

**Космические системы. Избежание  
соударений с космическими  
объектами**

*Space systems – Avoiding collisions with orbiting objects*

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO/TR 16158:2013

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d45090b0-9c07-40d1-b519-e5ddd0ad67f1/iso-tr-16158-2013>

Ответственность за подготовку русской версии несёт GOST R  
(Российская Федерация) в соответствии со статьёй 18.1 Устава ISO



Ссылочный номер  
ISO/TR 16158:2013(R)

iTeh STANDARD PREVIEW  
(standards.iteh.ai)

ISO/TR 16158:2013

<https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/d45090b0-9c07-40d1-b519-e5ddd0ad67f1/iso-tr-16158-2013>



**ДОКУМЕНТ ЗАЩИЩЕН АВТОРСКИМ ПРАВОМ**

© ISO 2013

Все права сохраняются. Если не указано иное, никакую часть настоящей публикации нельзя копировать или использовать в какой-либо форме или каким-либо электронным или механическим способом, включая фотокопии и микрофильмы, без предварительного письменного согласия ISO по адресу ниже или членом ISO в стране регистрации пребывания.

ISO copyright office  
Case postale 56 • CH-1211 Geneva 20  
Tel. + 41 22 749 01 11  
Fax + 41 22 749 09 47  
E-mail [copyright@iso.org](mailto:copyright@iso.org)  
Web [www.iso.org](http://www.iso.org)

Опубликовано в Швейцарии

## Содержание

Предисловие .....	iv
Введение .....	v
<b>1 Область применения .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Нормативные ссылки .....</b>	<b>1</b>
<b>3 Термины и определения .....</b>	<b>1</b>
<b>4 Действия по предотвращению столкновения .....</b>	<b>2</b>
<b>5 Восприятие близких сближений .....</b>	<b>3</b>
5.1 Данные об орбите .....	3
5.2 Начальная фильтрация .....	4
5.3 Устранение невероятных пересечений .....	4
<b>6 Определение возможных соударений для предупреждения и дальнейших действий (анализ близких сближений) .....</b>	<b>5</b>
6.1 Симметричная зона обзора .....	5
6.2 Зона обзора с граничным объемом .....	6
6.3 Вероятностные технологии .....	6
6.4 Максимальная вероятность .....	7
6.5 Связывающий объем на базе вероятности .....	8
6.6 Сравнение техник .....	9
<b>7 Вероятность выживания .....</b>	<b>10</b>
7.1 Анализ тенденций .....	10
7.2 Кумулятивная вероятность .....	11
7.3 Байесовская оценка .....	12
<b>8 Дополнительная информация для направления дальнейших действий .....</b>	<b>13</b>
8.1 Возможность маневра .....	13
8.2 Характеристики космического корабля .....	13
8.3 Качество определяющих данных орбиты .....	13
<b>9 Оценка последствий .....</b>	<b>13</b>
9.1 Руководство для риска населенности .....	13
9.2 Воздействия траффика .....	14
<b>10 Требования для предупреждения и информация для избежания столкновения .....</b>	<b>15</b>
10.1 Данные орбиты .....	15
10.2 Минимальный набор данных для предупреждения или избежания столкновения .....	15
10.3 Дополнительные элементы информации .....	16
<b>11 Оценка сближения и соударений, поток работы и концепция функционирования .....</b>	<b>16</b>
<b>Библиография .....</b>	<b>19</b>

## Предисловие

Международная организация по стандартизации (ISO) является всемирной федерацией национальных организаций по стандартизации (комитетов-членов ISO). Разработка международных стандартов обычно осуществляется техническими комитетами ISO. Каждый комитет-член, заинтересованный в деятельности, для которой был создан технический комитет, имеет право быть представленным в этом комитете. Международные правительственные и неправительственные организации, имеющие связи с ISO, также принимают участие в работах. ISO работает в тесном сотрудничестве с Международной электротехнической комиссией (IEC) по всем вопросам стандартизации в области электротехники.

Процедуры разработки документа и дальнейшего ведения его установлены в Директивах ISO/IEC, Часть 1. В частности, следует отметить необходимость других критериев одобрения для различных типов документов ISO. Данный документ разработан в соответствии с правилами, установленными в Директивах ISO/IEC, Часть 2. [www.iso.org/directives](http://www.iso.org/directives).

Следует иметь в виду, что некоторые элементы данного документа могут быть объектом патентных прав. Организация ISO не должна нести ответственность за идентификацию какого-либо одного или всех патентных прав. Детали объекта патентных прав размещаются в разделе Введение и/или на сайте ISO в разделе Патентных прав. [www.iso.org/patents](http://www.iso.org/patents)

Любое торговое имя используемое в этом документе является информацией предоставляемой для удобства пользователей и не является передаточной надписью.

За разъяснениями о значении специфических терминов и выражений ISO, относящихся к оценке соответствия, а также информации о следовании ISO принципам ВТО о технических барьерах в торговле (TBT – Technical Barriers to Trade) см. по следующему URL: Предисловие - Дополнительная информация [Foreword - Supplementary information](#)

Данный документ разработан Техническим комитетом ISO/TC 20 *Авиационные и космические аппараты*, Подкомитетом SC 14, *Космические системы и их эксплуатация*

## Введение

Данный технический отчет описывает работу потока для восприятия и избегая столкновений среди орбитальных объектов, требования к данным для выполнения этих задач, методов, которые могут использоваться, чтобы оценить вероятность столкновения и руководящие указания для выполнения избегающих маневров.

Процесс начинается с наилучшей траектории данных, предоставляемых спутниковыми операторами или сенсорными системами, разработанными для этой цели. Орбиты спутников должны сравниваться друг с другом, чтобы понять, какие из них могут привести к столкновениям. Все выявленные траектории должны быть тщательно изучены, чтобы можно было оценить вероятность столкновения. После определения вероятности столкновения в рамках критериев, установленных у каждого спутникового оператора, должен быть рассмотрен весь спектр возможных маневров.

Существует несколько различных подходов к оценке столкновений. У всех есть свои достоинства и недостатки. Большинство из них сосредоточено на том, как тесно спутники приближаются друг к другу. Такой подход достаточно неопределен, поскольку орбиты спутников, как правило, быстрее изменяются под воздействием неконсервативных сил, чем информацию о них дают наблюдения спутников на орбите. Операторы космического корабля требуют полноты информации, чтобы судить о достоверности и качестве информации возможности столкновения. Эта информация включает в себя момент времени последней оценки орбиты, вектор состояния или значения элементов орбиты в данный момент времени, описание системы координат, которая дает информацию об орбитальных данных, описание модели, которое было использовано для орбитального построения графиков, и информацию об оценке ошибок параметров орбиты. Основные элементы информации для этой цели указаны в ISO 26900.

Существуют также различные подходы к оценке вероятности того, что сближение может действительно вылиться в столкновение. Этот статистический процесс очень похож на прогнозирование погоды. Метеорологи не делают однозначных прогнозов. Они предоставляют только вероятность того – будет дождь или не будет его. Все подходы к оценке развития событий в той или иной степени основаны на вероятностях. Вероятность столкновения также является весьма желательным элементом данных. Она должна сопровождаться метаданными, что позволяет

Как близко два спутника могут быть друг к другу? Какова вероятность того, что они могут конфликтовать – это всего два параметра в оценке потенциально катастрофических событий. Поскольку цель оценки состоит в том, что спутник выживает несмотря на близкое сближение, кумулятивная вероятность выживания тоже важная информация. Реакция на близкое сближение спутников может лишь отсрочить гибель спутника или даже спровоцировать в будущем более серьезные события. Информация об эволюции орбит в направлении следующих сближений и кумулятивная вероятность того, что спутник может выжить в течение определенного периода времени также являются очень важными.

Наконец, состояние каждого из партнеров возможного контакта, их умение маневрировать или иным образом избегать контакта, и результаты прошлых событий могут помочь в определении стратегии действий в настоящий момент.



# Космические системы. Избежание столкновений с космическими объектами

## 1 Область применения

Данный технический отчет является ориентиром для организации совместных предприятий для поддержания функционирования космических аппаратов. Это требует кропотливой совместной работы между всеми, кто эксплуатирует спутники.

Данный технический отчет описывает некоторые широко используемые методы для восприятия близких сближений, оценки вероятности столкновения, оценки кумулятивной вероятности выживания, и маневрирование, чтобы избежать столкновения.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Спутниковые операторы согласны с тем, что все варианты сближений и методы оценки столкновений являются статистическими. Все страдают от ложных срабатываний и/или пропущенного обнаружения. Степень неопределенности в прогнозируемых исходах не является равномерной на всех спутниковых орбитах или на всех интервалах оценки. Никакого сравнения в пределах достижимого количества тестов, которое приемлемо для всех, достичь невозможно.

## 2 Нормативные ссылки

Следующие документы, полностью или частично, являются нормативно упомянутыми в настоящем документе, и являются необходимыми для его применения. Для датированных ссылок цитируется только указанное. Для недатированных ссылок применяется только последнее издание ссылочного документа (включая любые поправки).

ISO/TR 11233, *Системы космические. Определение и оценка орбиты. Способ описания методов*

ISO 26900, *Система передачи космических данных и информации. Сообщения с орбиты*

ANSI/AIAA S-131-2010, *Best Practices in Astronautics: Propagation*

AIAA G-043-1992, *Guide to Developing Operational Concepts*

## 3 Термины и определения

При написании этого документа используются следующие термины и определения.

### 3.1 соединение conjunction

момент случайного прохождения одного или больше тел в непосредственной близости друг к другу в пространстве

### 3.2 столкновение collision

акт соударения, когда один объект ударяет другой

### 3.3

**ковариантность**  
**covariance**

измерение того, как много переменных изменяются совместно

Замечание 1 к статье: Для нескольких зависимых переменных, квадратной, симметричной, положительно определенной матрицы размерности N на N, где N-число переменных.

### 3.4

**плоскость столкновения**  
**encounter plane**

плоскость, перпендикулярная к относительной скорости в момент ближайшего столкновения

### 3.5

**ложная тревога**  
**false alarm**

статистическая ошибка типа I, когда статистический тест не может отвергнуть ложные нулевые гипотезы

### 3.6

**документы интерфейсов**  
**ICD**  
**Interface Control Document**

формальные средства описания входов и выходов системы, интерфейсов между системами, или протоколов среди физических или электронных элементов

### 3.7

**операционная концепция**  
**operational concept**

роли, связи и потоки информации между задачами и заинтересованными сторонами и то, каким образом системы и процессы будут использоваться

## 4 Действия по предотвращению столкновения

Процесс избежания столкновения начинается с данных орбиты, содержание которых указано в стандарте ISO 26900. Эти данные могут предоставляться посредством сотрудничества со спутниковыми операторами и от наблюдателей, которые способны просматривать данные со спутников. Характер каждого объекта должны быть известны, если это возможно. Эта информация включает в себя размеры, массы, геометрию и рабочее состояние (например, будь это активные или неактивные объекты). Наконец, вероятность столкновения должны быть оценена на основе неизбежных неточностей, связанных с определением орбиты и других гипотез и измерений. Рисунок 1 изображает этот верхний уровень потока данных о работе.



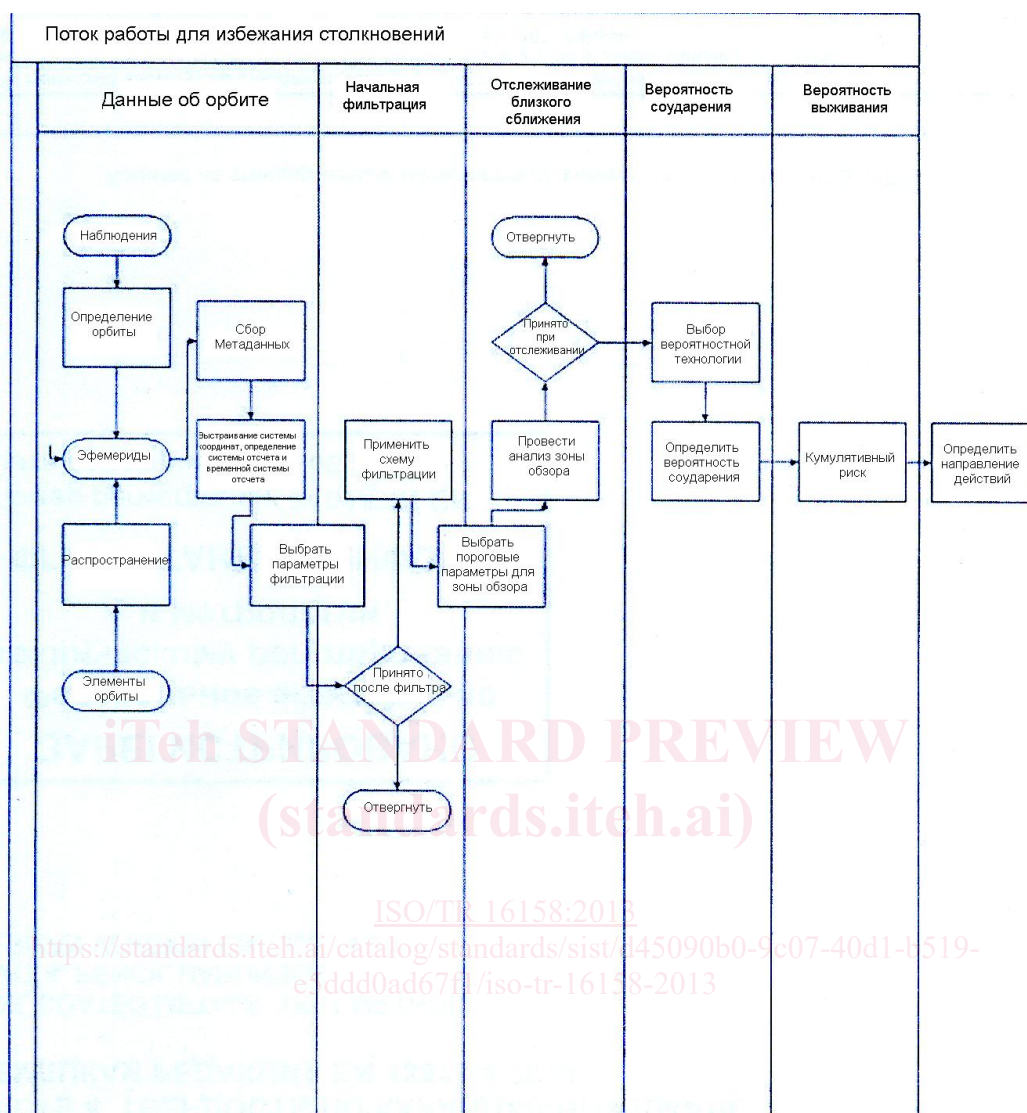


Рисунок 1 — Документооборот высокого уровня при избежании столкновения

## 5 Восприятие близких сближений

### 5.1 Данные об орбите

#### 5.1.1 Входная информация

Информацией для оценки столкновения, в основном, являются данные, указывающие траектории объектов, представляющих интерес. Это один из трех типов информации: элементы орбит, эфемериды, или наблюдения спутников. Элементы орбит в этом контексте, включают в себя параметры, описывающие эволюцию траектории, которые могут быть использованы для оценки траектории в будущем. Они являются производными от прошлых наблюдений спутников. Эфемериды – это упорядоченные по времени данные о положении объекта и скорости, с помощью которых можно определить положение и скорость объекта в промежуточные моменты. Эфемериды должны распространяться на будущее время, а уравнение движения объекта предоставляет провайдер. Измерения положения и скорости спутников определяются на основе одного или нескольких хорошо изученных и зарегистрированных документов. Получатель должен использовать эти наблюдения для

оценки эволюции траектории, либо путем прямого численного интегрирования определяющих уравнений или расчета элементов орбиты для последующего ее продолжения. ISO:11233 описывает, каким образом провайдер должен кодировать свою схему описания орбиты. Существуют нормативные форматы для элементов орбиты и эфемерид (см. ISO 26900). Нет нормативных форматов для передачи данных наблюдений.

Крайне важно осознавать, что траектория оценки получены на основе измерений, которые не могут быть точными, такими как aspheres. Вот почему они называются “оценками.” Входная информация о них всегда должна содержать характерную неопределенность. Неопределенность в любой из независимых переменных или параметрах вносит неточность во все зависимые переменные, описывающие развитие событий. Соответствующие выражения неопределенности, таким образом, представляют собой квадратную матрицу, размерность которой равна числу элементов состояния, так называемого вектора состояния. Если неопределенности не предусмотрены или не точны, нельзя правильно определить вероятность того, что два объекта могут столкнуться.

### 5.1.2 Распространение всех орбит на нужный интервал

Все рассматриваемые орбиты должны быть прогнозируемы в рамках модели, в которой они были созданы. Поскольку определение орбиты и ее распространение являются неопределенными, схема распространения должна быть хорошо разработана для этого интервала. Стандарт ANSI/AIAA-S131-2010 - это нормативный справочник по распространению орбит. Неточности соприкасающихся орбит растут с течением времени, особенно если интервалы превышают время базовых наблюдений. Эта неточность является достаточным, чтобы сделать оценку вероятности столкновения ошибочной. Таким образом, оценка вероятности столкновения на низкой околоземной орбите ненадежна на основе современных данных на срок около одной недели после определения параметров орбиты. Некоторые особо устойчивые орбиты могут быть надежно оценены и на более длительные сроки. Вероятность столкновения можно оценить в течение длительного периода с использованием последовательного статистического описания спутниковых орбит и эволюции среды космического мусора. Эти методы оценивают будет происходить столкновение или нет, но не может определить, какие конкретно объекты могут быть вовлечены.

## 5.2 Начальная фильтрация

### 5.2.1 Все против всех

Наиболее правильным было бы рассматривать каждый объект на орбите на фоне всех остальных за обозначенный временной отрезок. Большинство методов устранения дублирования A-B состоит в том, что определяется затенение объекта B объектом A и наоборот. Таким образом, количество затенений не является факториалом всех спутников.

Невозможно знать, сколько объектов находится на орбите Земли. Многие из них просто не видны. Лучшее, что может сделать спутниковый оператор, это учитывать все те, которые были обнаружены. Нельзя учесть те неизвестные объекты, которые могут присутствовать.

### 5.3 Устранение невероятных пересечений

Значительная часть объектов на орбите физически не могут столкнуться со множеством других спутников за интересующий период времени. Например, даже неконтролируемые геостационарные спутники на расстоянии 180 градусов друг от друга по долготе не являются угрозой друг другу.

#### 5.3.1 Фильтр

Техники фильтрации используют прямые геометрические и кинематические процессы, чтобы сузить спектр возможных пересечений на основе минимального расстояния между орбитами. Они основаны различным образом на геометрии орбит, числовых функциях относительного расстояния и реального распространения орбиты. Суть концепции – в изучении близости одного спутника к другому

последовательно в пространстве параметров, начиная с параметра, который наиболее эффективно дискриминирует расстояние между ними. Для учета приближений при анализе орбиту, буферное расстояние (площадка) может быть добавлено в фильтр порогового расстояния. Например, если расстояние между орбитами, скорее всего, будет лучшим показателем разделения, спутники, которые находятся далеко друг от друга не должны быть экранированы при дальнейшем анализе пересечений. Они различаются по вычислительной эффективности и степени восприятия сближений. Нет нормативного подхода, поскольку разные методы являются удовлетворительными для разных спутников и суждений операторов.

### 5.3.2 Тороидальное устранение

Тороидальное устранение исключает объекты, определяя, какая средняя орбита может коснуться тороидального объема, который определяется орбитой интересующего нас спутника и площадью поперечного сечения зоны обзора.

### 5.3.3 Фильтры апогея-перигелия

Такой подход исключает спутники, чей апогей ниже, чем перигелий интересующего спутника или перигелий выше, чем апогей интересующего нас спутника. Критерий достаточности опирается либо на опыт оператора, либо на доступный риск. Риск может быть количественно оценен с помощью методики обнаружения сигнала и эксплуатационных характеристик приемника, которые будут обсуждаться впоследствии. Объемная фильтрация имеет ту же природу, исключая спутники, чьи орбиты находятся за пределами объема пространства, который описывает интересующий нас спутник.

### 5.3.4 Статистические ошибки

Поскольку каждый из этих методов опирается на информацию о траектории, которая является неточной, эти фильтры будут страдать проблемами типа I, в связи с невозможностью установить реальную угрозу и ошибками второго рода (в том числе спутников, которые не представляют угроз). Выбор параметров фильтра должен быть основан на терпимости пользователя к обоим типам ошибок. Каждая схема фильтрация будет включать в себя события, которые должны быть отброшены и отбрасывать события, которые должны быть включены.

## 6 Определение возможных соударений для предупреждения и дальнейших действий (анализ близких сближений)

Начальная фильтрация предоставляет мало информации для смягчения столкновений. Следующая задача состоит в том – является ли движение участвующих спутников достаточно угрожающим. Первый шаг заключается в определении того, насколько близко спутники сближаются. Это решение каждого спутникового оператора. Оно может быть основано на размерах спутников, последствиях столкновения, уверенности в оценке орбиты и движения спутника и других субъективных факторах. Как и с начальной фильтрацией, даже этого более утонченного уровня дискриминации будет не хватать для определения некоторых угроз. Возможность ложных тревог и пропущенных срабатываний только увеличивается при экстраполяции в будущее.

### 6.1 Симметричная зона обзора

Самая простая зона обзора имеет симметричный объем. Его проще всего реализовать, но он может охватывать значительно больший объем, чем действительно уязвимую геометрию спутника. Это могут быть шары, кубы или любые другие трехмерные объемы, размеры которых определяет оператора. Интересующий нас спутник может быть заключен в симметричный, а соответствующие орбиты других спутников должны быть испытаны на проникновение в этот объем. Кроме того, ограничивающие объемы обоих спутников могут быть проверены на пересечение. Это вообще самый консервативный подход, который при определении потенциальных соударений требует совпадение многих событий, которые крайне маловероятны.