

Interplanetary MFD
(IMFD)
Версия 4.2
для Orbiter
Space Flight Simulator 2005

все права на данный документ принадлежат
Ярмо Никканену

4 июля 2005

Права и гарантии

Данное программное обеспечение является свободным для распространения. Это программное обеспечение должно распространяться в полной комплектации. Данный программный продукт является собственностью Ярмо Никканена. Данный продукт является Windows-приложением лишенным всяких гарантий. Не гарантируется отсутствие каких-либо повреждений системы и вычислительных ошибок при использовании данного продукта. Вы используете это программное обеспечение на свой страх и риск. Этот продукт разработан для симулятора космического полета Orbiter 2005 Мартина Швайгера.

Интернет

Последние версии IMFD и руководства находятся на <http://koti.mbnet.fi/jarmonik/Orbiter.html>

Примечания

1. Некоторые скриншоты взяты из более старых версий IMFD и выглядят не так, как аналогичные им в текущей версии.
2. Может понадобиться нажатие кнопки [MOD] для отображения данных запуска с поверхности.

Требования

Необходимо установить патч к Orbiter 050126.

Установка

Распакуйте архив в каталог, где установлен Orbiter. Если вы сделали это, инсталляция завершена. Папка ../Config содержит файл IMFD.cfg, содержащий настройки.

Отдельное спасибо

Роберту Б. Денни, за замечательные дополнительные функции, разработанные и включенные им в IMFD, чтобы сделать его более легким в использовании. Также спасибо за отличные руководства.

Общая информация

Установка значений с клавиатуры.

Вы можете вводить значения многих переменных с клавиатуры, нажав кнопку [Set]. Допускается экспоненциальная форма записи чисел (на пример 12.4e3, или 11.45e-2). Экспоненту можно заменить буквенным обозначением, например 12.4k, 33.2M, 22.2G. Буквой “k” обозначается e3, буквой “M” e6 и так далее. “d” обозначает сутки и введенное значение времени на 86400. “h” эквивалентно одному часу и “a” одной астрономической единице (примечание автора перевода: 1 а.е. = $1,496 \cdot 10^8$ км – большая полуось земной орбиты). Допустимо вводить модифицированную юлианскую дату (MJD) в форме 02-Jun-2005 или в форме 02.06.2005 (дата. месяц . год). Используются имена месяцев Jan, Feb, Mar, Apr, May, Jun, Jul, Aug, Sep, Oct, Nov и Dec (обозначения не чувствительны к регистру).

Цветовая конфигурация

IMFD позволяет настраивать цвета отображения, путем редактирования конфигурационного файла. Этот файл называется IMFD.cfg и расположен в папке ../Config. Тот же самый файл будет использоваться, по крайней мере, и в BaseSyncMFD.

Выбор клавиши запуска

Вы можете определить клавишу, нажатием которой будет открываться IMFD. Необходимо изменить значение переменной **IMFDKey** в файле IMFD.cfg. Список кодов клавиш есть в заголовочном файле orbitersdk.h, значение по умолчанию – “I”.

Зажигание, перекрестие и автозажигание

Функция автозажигания разработана Робертом Б. Денни

Большинство программ способно генерировать данные для зажигания (здесь и далее вероятно имеется в виду запуск двигателя – прим. автора перевода). Эти данные отображаются в левом нижнем углу экрана и содержат: время до зажигания (TtB) и время работы двигателя (BT). После BT могут отображаться флаги (PG) или (RG). Они

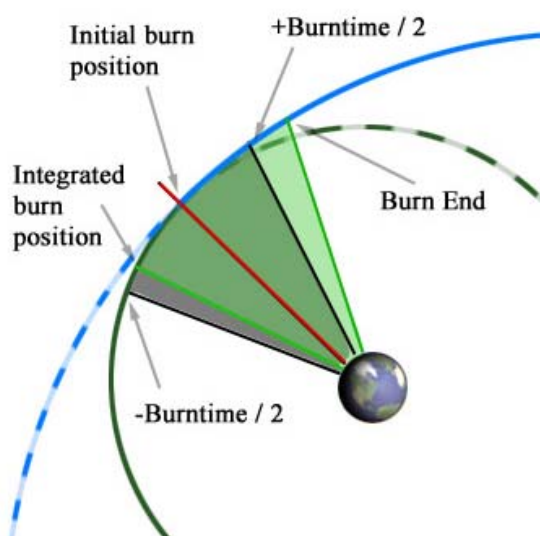
показывают, что двигатель вызывает приращение скорости (PG – pro-grade) или уменьшение скорости (RG – retro-grade). Если флаг отсутствует, то зажигание использует вектор зажигания, и вы должны использовать инструмент-перекрестие для ориентации космического корабля. Перекрестие отображается при нажатии кнопки [BV]. Автозажигание позволяет выполнять запуск двигателя полностью автоматически, без игр с перекрестием. Автозапуск двигателя активируется кнопкой [AB]. Если используется медленно вращающийся космический аппарат, вы можете уменьшить скорость вращения в файле IMFD.cfg, отредактировав переменную AP_MAX_ANG_VEL – максимальная угловая скорость корабля при ориентации.

Примечание автора перевода:

1. Режим автозажигания нормально работает, если корабль оснащен двигателями ориентации по всем трем осям (тангаж, крен, рыскание) и двигателями смещения по всем трем осям. В противном случае программа может «вылетать» (например, в NASSP не рекомендую использовать autoburn при старте к Луне, т.к. ступень S-IVB по тангажу и рысканию управляется отклонением вектора тяги двигателя. После отделения ступени этот режим отлично работает).

2. В режиме орбитальных функций (пункт Orbital в главном меню) режим автозажигания включается и выключается комбинацией клавиш Shift-M.

Интегрирование при зажигании



На рисунке: Burntime – время работы двигателя; Integrated burn position – положение корабля при запуске двигателя, рассчитанное интегрированием; Initial burn position – расчетное положение корабля, соответствующее расчетной скорости (параметры задуманного маневра); Burn End – момент выключения двигателя.

В IMFD интегрирование при зажигании используется, чтобы улучшить точность маневра. Обычно при вычислениях принимают, что приращение скорости происходит мгновенно, без учета времени работы двигателя. При этом точка, где включается двигатель, совпадает с точкой, где должно быть получено рассчитанное приращение скорости (initial burn position). Однако, в реальности время работы двигателя должно быть учтено. Наиболее простой способ учесть это – отнять половину времени работы двигателя из времени до подхода к initial burn position. Так получится фактическое положение корабля, в котором должен быть включен двигатель. В конце маневра корабль будет двигаться в почти правильном, но не совсем точном направлении. Серый сектор на рисунке показывает погрешность этого метода.

Интегрирование подразумевает численный расчет положения корабля, при котором включается двигатель, так что корабль выходит на расчетную траекторию с максимальной возможной точностью. Эта техника применима как к разгонным, так и тормозным маневрам (pro-grade и retro-grade burns). Зеленый сектор на рисунке иллюстрирует ход выполнения такого маневра.

Тайминг зажигания

По некоторым причинам интегрирование может быть неудачным, в этом случае позиция запуска будет отличаться от требуемой. Это происходит из-за того, что метод носит экспериментальный характер, его использованием можно управлять из меню IMFD нажатием кнопки [PRJ]. Приближенный режим (Approximate mode) использует “вычитание половины”, а точный режим (Precise mode) – метод численного интегрирования.

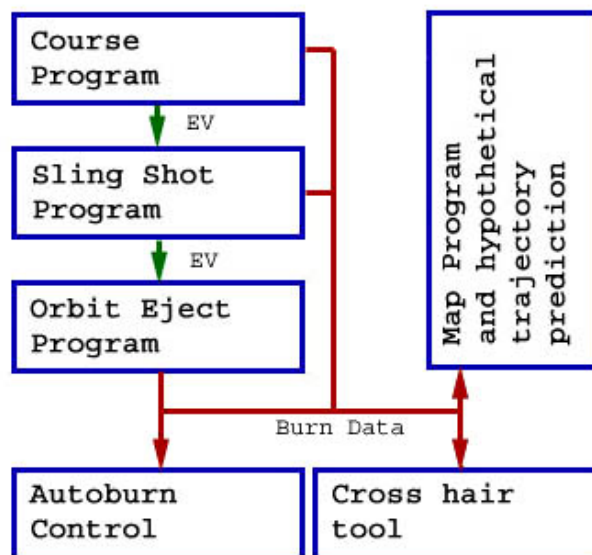
Примечание автора перевода: Клавиша выбора режима интегрирования находится в главном меню IMFD (главное меню можно вызвать, нажав Shift-F).

Информационные потоки

IMFD содержит несколько программ для расчета перелетов: гравитационных маневров (sling-shot); уход с орбиты (orbit-eject); прокладка курса (trajectory plotting); управление двигателем (burn control). Некоторая информация передается из одной программы в другую, начиная с программ расчета перелетов, заканчивая программами прокладки курса и зажигания. В этой версии IMFD не все программы обновляются автоматически, а только те программы, которые являются видимыми. Так, вы должны

разрабатывать план полета в правильном порядке и план полета должен быть разработан перед запуском, чтобы информация была современной (т.е. правильно отражать необходимые для полета параметры).

Примечание автора перевода: программа не обновляется и в том случае, если экран MFD погашен. В случае длительного простоя в таком состоянии (например, при покидании сферы действия планеты) возможен сбой.



Информационные потоки внутри IMFD

...План полета от Луны к Марсу

В начале программа расчета курса (course program) сгенерирует вектор скорости (escape vector) для осуществления перелета от Земли к Марсу. Используется Земля как объект-источник (source object). Потом программа расчета гравитационных маневров (sling-shot program) переводит рассчитанный выше escape vector в escape vector для гравитационного маневра Луна-Земля-Марс с Луной в качестве source object. После этого программа покидания орбиты (orbit-eject program) читает escape vector и генерирует параметры зажигания (с возможностью автозажигания) и программу карты (map program) для прокладки курса. Гипотетическая орбита будет показана в режиме планирования полета (Flight Planning mode). Смотрите раздел *программа карты*.

Тела-источники, тела-цели и основные тела

Для корректного выполнения расчетов необходимо правильно определить тело-источник (source), тело-цель (target) и основное тело (reference). Основное тело и источник

устанавливаются автоматически при установке цели. **Разработка плана полета начинается, в первую очередь, с выбора цели.** При необходимости, основное тело и источник могут быть заменены вручную. В случае некорректного указания этих тел будет отображено сообщение об ошибке. Чтобы был сгенерирован escape vector необходимо, чтобы источник находился на орбите планеты. Установив в качестве источника “х” вы выберете в качестве источника текущий корабль. В IMFD всегда должна быть определена цель (target), иначе в качестве цели автоматически будет установлена эклиптика (эклиптика – плоскость орбиты Земли относительно Солнца – прим. автора перевода). Есть несколько доступных целей, список которых можно посмотреть в программе карте (Map program).

Космические станции могут быть целями, иногда могут выступать в качестве основных тел, но никогда не могут являться источниками. Кнопки выбора цели [TGT] и основного тела [REF] расположены на левой стороне экрана MFD, а кнопка выбора источника [Src] – на правой стороне экрана MFD на второй странице кнопок. Сменить страницу можно нажатием кнопки [PG].

Примечание автора перевода: Существует ограничение на число кораблей действующих в настоящее время, из которых можно выбрать reference объект – не более 16. В это число входят и корабли, недоступные к визуальному просмотру по нажатию F3. Если их больше и осуществляется переывбор функции, отображается ошибка.

Орбиты, цвета, линии узлов

Цвета отображения элементов имеют специальное значение. Зеленым обозначается текущая орбита исходного объекта. Оранжевым цветом изображается орбита цели. Орбита цели не отображается, когда в качестве цели выбрана эклиптика или локальный экватор. Синим цветом изображается гипотетическая (запланированная) орбита. Белой линией обозначается точка пересечения/промежуточная точка и в программе покидания орбиты (orbit-eject program) - направление вектора скорости покидания. Оранжевая штриховая линия показывает положение цели в момент встречи. Иногда синяя штриховая линия показывает положение корабля в момент встречи. Зеленая пунктирная линия показывает позицию зажигания. Наконец, пунктирная линия с двумя квадратами на концах обозначает линию узлов. Она обозначает линию пересечения орбитальных плоскостей. Наиболее часто это линия пересечения орбиты цели и гипотетической орбиты. Обычно она имеет синий цвет. Иногда линия узлов обозначает пересечение

орбиты корабля и гипотетической орбиты перелета (НТО). Обычно она имеет зеленый цвет. Маневр смены плоскости должен произойти в точках узлов (углы обозначены квадратиками).

Маневр изменения плоскости

Этот маневр требуется часто. IMFD обеспечивает выдачу информации, необходимой для проведения маневра смены плоскости орбиты. Время подхода к узлу (T_n) показывает сколько времени необходимо для достижения следующего узла орбиты. Параметр (PIC) показывает время работы двигателя, необходимое для выравнивания плоскостей; флаги (+) и (-) показывают требуемую ориентацию корабля при выполнении маневра ((+) – направление по нормали к плоскости текущей орбиты, (-) – направление по анти-нормали к плоскости текущей орбиты – прим. автора перевода).

Режим операций MFD (MFD Operation Mode)

Режим операций MFD может быть выбран в главном меню нажатием кнопки [PG]. Режимы Shared и Unshared указывают способ совместного использования информации разными экранами MFD. Если сменить режим, существующий план полета разрушается, но программы сохраняют настройки. Если используется режим Unshared, все экраны MFD будут содержать индивидуальный план полета и данные. В режиме Shared один план полета используется совместно экранами MFD, и программы могут использоваться в одном экране MFD одновременно. Так, вы не можете запускать программу Orbit-Eject одновременно в двух экранах.

***Примечание:** IMFD может работать только на двух экранах MFD и только на левом и/или правом. Попытка отобразить на дополнительных экранах приводит к отображению ошибки, отображение ошибки сбрасывается через 60 секунд.*

Калькулятор прохода (Swing-By Calculator)

Это последнее добавление в IMFD. В настоящее время эта функция поддерживается лишь частично. Даты пролета планет важны, но не поддерживаются. В некоторых программах имеется кнопка для ввода дополнительного вектора, открывающая диалоговое окно для ввода параметров. Их четыре. Сначала вводится V-departure в

порядке появления и в конце C3-departure с пробелами между значениями. Например:
13.234 12.002 -2.123 23.223

Это задает выходной вектор для отлета или пролета. Эти параметры могут быть использованы программе покидания орбиты (Orbit-Eject program) и программе гравитационного маневра (Sling-Shot program). Эти программы не обеспечивают требуемую точность при многократных пролетах. В этих случаях вы можете использовать Off-plane intercept program, чтобы сохранить план миссии. Она использует в качестве входного параметра время пролета. При этом ваш корабль может лечь на курс, приводящий к столкновению с планетой, это нехорошо, но будет исправлено в следующих версиях. А пока вы можете воспользоваться программой подхода к планете (Planet Approach program), чтобы поднять/увеличить высоту перицентра, для предотвращения столкновения (перицентр – точка орбиты, расположенная ближе всего к центру притяжения: для Земли – перигей, для Солнца – перигелий, для Луны – периселений и т.д. Вообще для отличных от Земли тел перицентр называют периапсидой – прим. автора перевода). Этот маневр необходимо выполнить сразу после пересечения сферы действия планеты или незадолго до этого. Off-plane intercept program должна использоваться, когда вы вышли из сферы действия.

Известные проблемы

Если вы сталкиваетесь с проблемами при загрузке старых сценариев, использующих IMFD, попробуйте удалить секцию BEGIN_MFD...END_MFD из файла сценария.

Программа карты (Map Program)

Дисплей карты используется для просмотра курса корабля и предсказания момента достижения целевых планет. Он позволяет просматривать как всю Солнечную систему, так и единственную цель. Карта позволяет планировать перелеты с планеты на планету с использованием гравитационного маневра. Траектории не ограничиваются более эллипсами и гиперболами, они могут отображаться вокруг нескольких гравитационных источников независимо от расстояний до них и радиуса их гравитационных сфер влияния. Пользователь имеет возможность управлять скоростью и точностью траекторного движка. Модификация выполняется на странице настроек.



На рисунке: типичный внешний вид карты (изображена система спутников Юпитера)

Даже самые быстрые методы расчета позволяют очень точно выполнять межпланетные перелеты. Скорость обновления выше чем десять шагов в секунду достигается без существенной загрузки системы на среднем домашнем компьютере (имеется ввиду скорость обновления MFD, устанавливаемая в настройках Orbiter).

Ядро

Ядро использует методы Энке-Фельберга, позволяющие быстро предсказывать траектории. В этой версии траекторного движка качество отображения траектории и численное интегрирование связаны непосредственно. Так, при увеличении шага интегрирования уменьшается качество отображения траектории. Для вычисления траекторий можно использовать методы интегрирования высокого порядка с

длительными шагами интегрирования и субинтегрирование (то это такое? – прим. автора перевода) для улучшения отображения графики. Это будет сложнее, но не будет замедлять вычисления. Так, методы малого порядка с малым шагом интегрирования используются по умолчанию. Однако, пользователь может выбрать метод третьего порядка RK3 (Рунге-Кутта 3-го порядка – прим. автора перевода), RK4-Gill (метод 4-го порядка Рунге-Кутта-Гилла – прим. автора перевода), или методы Symplectic 4th Order и RK-Fehlberg. Применение метода Адамса-Мултона (Adams-Multton) сейчас рассматривается. Конечно, можно попытаться создать еще более быстрые методы прогнозирования траекторий, но стоит ли это лишних усилий. Использование таких методов оправдано, если не нужна графическая визуализация результатов расчета.

Настройка ядра

Некоторые функции ядра можно настроить редактированием файла IMFD.cfg. Параметр `LegSize` определяет размер шага интегрирования. Большое значение уменьшает число участков траектории подлежащих вычислению. `LegsPerFrame` определяет число шагов интегрирования приходящихся на вывод одного кадра. Если при скорости 80 FPS, 20 шагов рассчитываются на каждом кадре, то в секунду выполняется 1600 шагов интегрирования. `Integrator` определяет метод интегрирования, используемый для расчета.

Центрирование дисплея

Вы можете центрировать дисплей относительно указанной позиции нажатием кнопки [Cnt]. Нажав ее, вы можете ввести имя объекта, который должен находиться в центре. Дисплей переместит этот объект в центр. Если вы пожелаете поместить центр в будущее положение, это может быть сделано только для моментов прохождения периапсиды. В качестве позиции можно выбрать центр планеты или периапсиду орбиты относительно этой планеты. Для этого достаточно при вводе указать соответствующий флаг “r-” (центр планеты) или “p-” (периапсида), например команда “r- Mars” центрирует дисплей относительно центра Марса. Перед использованием этой команды нужно выбрать корректную периапсиду нажатием кнопки [Sel].

О периапсиде

Траектория может иметь несколько периапсид. Число доступных периапсид и номер текущей периапсиды отображаются в верхнем левом углу, например “Pe 1 of 2” (первая периапсида из двух доступных). “Ref Moon” означает, что основным телом является Луна, и периапсида указывается относительно нее. На дисплее отображается только выбранная периапсида. Так же существует два различных типа периапсид – “сильная” и “слабая” (strong и weak). Сильная периапсида расположена внутри сферы действия источника тяготения (Sphere of influence – SOI). Слабая периапсида расположена вне SOI и, скорее всего, в этой точке нет стабильной орбиты.

В таблице: параметры периапсиды, отображаемые на экране.

PeT	Относительное наклонение орбиты в периапсиде
PeD	Время подхода к периапсиде
PeV	Скорость в периапсиде
PeA	Высота над поверхностью планеты в периапсиде
Ecc	Эксцентриситет в периапсиде
Cir	Время работы двигателя чтобы сделать орбиту круговой (циркуляризовать орбиту)
	Относительное наклонение орбиты в узле
RIn	Время подхода к следующему узлу
Tn	Время зажигания и ориентация для выравнивания орбиты
PIC	
Lon	Долгота периапсиды на поверхности орбиты
Lat	Широта периапсиды на поверхности планеты
EqI	Наклонение орбиты к экватору в периапсиде
GeR	Радиус геостационарной орбиты

Эта точка характеризует максимальное расстояние до планеты, на котором возможен ее пролет. Сильная и слабая периапсиды отображаются только для основных (reference) и целевых (target) планет. Если траектория «накручивает» несколько витков вокруг основной планеты, то может отображаться до шести периапсид. Но это происходит если опция “One Pe/Ref” на странице установлена на “disabled”.

Экран дисплея

Проекция траектории корабля (на выбранную плоскость) по умолчанию отображается зеленым цветом, а в режиме планирования полета (flight planning mode) может иметь синий цвет. Режим планирования полета генерирует гипотетическую траекторию по данным, предоставляемым другими программами. Белое пятно – это сам

космический корабль. Зеленое или синее пятно на траектории изображает периапсиду. Оранжевая окружность – орбита цели. Иногда цель не видна на экране. Квадратиками обозначаются узлы орбиты. Линия узлов расположена между узлами и пересекает основную планету. Это точки, где пересекаются плоскости орбиты корабля и орбиты цели. В узлах также возможен маневр для изменения плоскости орбиты. Численное интегрирование и возмущения могут приводить к несколько противоестественному поведению узлов орбиты. Обычно же, они расположены на противоположенных сторонах планеты.

Информация на дисплее отображается для периапсиды, а не для текущего положения корабля. Однако есть одно исключение, когда доступна не единственная периапсида, используется текущее положение корабля.

Включение изменения плоскости

Карта автоматически включает изменение плоскости в первом же узле, если активирован режим (IPC) (Include Plane Change).

Предупреждение: иногда, по результатам расчета, изменение плоскости действительно необходимо, но может испортить траекторию, если применяется не в том месте, где нужно.

Что включено в карту (допущения при расчетах – прим. автора)

Учитывается влияние всех планет, удовлетворяющие следующим условиям: масса свыше $1 \cdot 10^{20}$ килограмм (*зависит от конфигурации*), вращается вокруг той же планеты, на орбите которой, расположен корабль (т.е. вокруг reference planet) или на орбите вокруг Солнца. Кроме того, планеты, корабли и станции, выбранные как основные или целевые, также учитываются при расчетах. Луны, находящиеся на орбите тела, не являющегося reference для корабля не учитываются.

Траекторные ограничения

Траектория рассчитывается численно. Естественно, ее генерирование имеет ограничения, т.к. реальная траектория бесконечна. Существует два ограничения накладываемые автоматически: периодические и гиперболические. Ограничение обрежет траекторию, иначе множество траекторий хаотически загромодит экран. Вы можете

регулировать ограничения на странице настройки. Периодическое ограничение лимитирует длину траектории, ограничиваясь одним периодом обращения по орбите основной планеты. Гиперболическое ограничение обрезает орбиту на длину, вмещающую только одну периапсиду относительно основной планеты. Ограничения могут быть переопределены вручную, путем указания времени расчета в секундах. [Если траектория выглядит несколько странно или излишне коротка, то проверьте величину ограничения.](#)

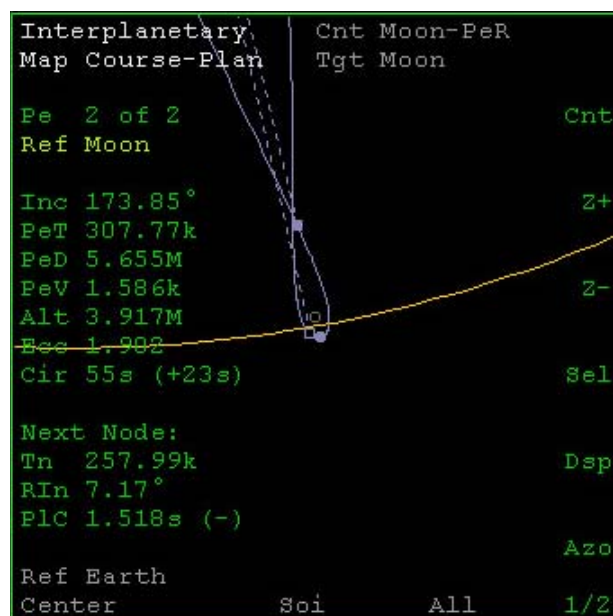
Специальные орбиты

В качестве цели можно указать одну из специальных орбит – эклиптическую, экваториальную, геостационарную орбиту (GEO). Плоскость орбиты основной планеты также может быть целью. Это особенно полезно для перелетов между планетами и возврата с Луны. Специальные орбиты можно использовать во всех программах. Для установки подобной цели необходимо ввести соответствующую букву (см. таблицу справа).

Режим планирования полета (Flight Planning mode)

В ранних версиях Interplanetary MFD этот режим назывался “external mode”

Этот режим позволяет использовать численное решение задачи нескольких тел (задача нескольких тел – задача о движении n-тел под действием сил взаимного притяжения – прим. автора перевода) для расчета траектории полета на основе информации от других программ.



На рисунке: траектория свободного возвращения в режиме планирования полета

e	Плоскость эклиптики (не видна)
g	Геостационарная орбита
l	Экваториальная орбита (не видна)
r	Орбита reference (не видна)

Если активирован этот режим, то в заголовке экрана появляется слово “Plan” и название программы, генерирующей план. Траектория отображается синей линией (конечно в конфигурации по умолчанию). Если присутствуют какие-либо данные для зажигания, то будет сгенерирована гипотетическая траектория.

Этот режим особенно удобен для просчета траекторий свободного возвращения и возвращения с Луны.

Примечание: Этот режим очень удобен для проверки планируемых коррекций траектории. Дело в том, что аналитические инструменты IMFD для расчета маневров не всегда гарантируют точность результата. Результаты всех маневров, а также их ход желательно контролировать с помощью карты.

Проекции

Можно выбрать плоскость проекции нажатием кнопки [Prj]. Космос трехмерен, а дисплей имеет всего два измерения и это может затруднять восприятие схемы на карте.

Ecliptic	Плоскость эклиптики
Target	Плоскость орбиты цели
Self	Плоскость текущей орбиты корабля
Center	Плоскость орбиты центрального тела
Periapis	Плоскость орбиты корабля, повернутая относительно периапсиды

Поэтому существует целый набор проекций (см. таблицу).

В таблице представлены обозначения проекций на экране IMFD

Несферическое гравитационное поле

Карта способно учитывать при расчетах несферические гравитационные поля. Пока учитываются только коэффициенты J2 и они учитываются только когда корабль находится внутри гравитационной сферы действия (SOI). Эта «фишка» добавляется автоматически по мере надобности. Однако можно вручную установить эту возможность, отредактировав в файле IMFD.cfg переменную NonSpherical. Если выставить значение

0, то несферические поля вообще не будут учитываться, а при значении 2 будут учитываться всегда.

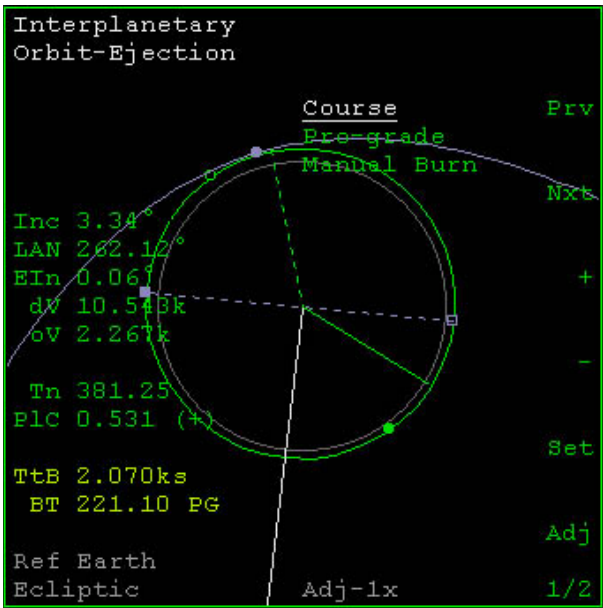
Страница настроек (Configuration page)

Некоторые основные настройки, требуемые для расчета траекторий с учетом многих источников гравитации, можно выполнить на странице настроек. В верхней части экрана выводится число шагов интегрирования, выполняемых при расчете. Так же выводится количество планет, влияние которых учтено при вычислениях. Например надпись “3+5 of 62” говорит о том, что три объекта из 62 учитываются полностью, а действие пяти остальных учитывается путем аналитической модификации решения.

Содержимое конфигурационной страницы

Legs/Frame	Количество шагов интегрирования выполняемых за один кадр
Leg Size	Множитель шага интегрирования. Large value = Longer Step
MassLimit	Минимальная масса учитываемого тела
Period	Ограничить траекторию одним периодом (для эллипсов – прим. автора перевода)
Hyperbolic	Ограничить траекторию одной периапсидой (для гипербол – прим. автора перевода)
TimeLimit	Промежуток времени, соответствующий отображаемой траектории
One Pe/Ref	Показывать только одну периапсиду относительно основной планеты
Rectific.	Корректирующая константа траекторного движка
Integration	Активный метод интегрирования

Программа ухода с орбиты (Orbit Eject)



На рисунке: программа ухода с орбиты

Наверное, это самая простая программа. Она служит, чтобы покинуть текущую основную планету. Это требуется для путешествий между планетами или их спутниками. Однако она не нужна для путешествия с Земли на Луну, т.к. при этом совершенно не нужно покидать гравитационную сферу действия Земли. В программе имеется пять задаваемых пользователем параметров. Outward delta velocity – «внешняя» скорость (v), т.е. скорость тела при выходе из SOI, которая добавляется к орбитальной скорости планеты (разумеется, речь идет о векторном сложении; эта скорость называется скоростью «на бесконечности» - прим. автора перевода); время, оставшееся до покидания орбиты (TEj); истинная аномалия точки, где происходит уход с орбиты (Tra). Эти параметры отражают одно и то же в разных формах. “Escape mode” – режим ухода в правом верхнем углу экрана позволяет выбирать источник информации для формирования маневра ухода. И, наконец, “Burn mode”, следующий сразу за ним, указывает режим зажигания – вдоль вектора текущей скорости (Pro-grade) или в режиме «реального времени» (realtime).

Pro-grade - такой выбор точки виртуального разгона (мгновенный разгон до требуемой скорости) когда необходимая ориентация корабля совпадает с вектором скорости. Соответственно выбором режима расчета определяется точка включения двигателя, которая отстоит от данной точки на половину времени разгона или на вычисленное численным методом величину. Особенно хорошо это видно если паркинговая орбита сильно вытянутый эллипс.

Предупреждение: синяя траектория может пройти через планету, по орбите которой вы движетесь. Это может случиться, если вы задействуете двигатели в какой попало момент времени.

Дождитесь, пока ваше положение совпадет с зеленой пунктирной линией, обозначающей момент включения двигателя. При использовании автозажигания в режиме realtime, необходимо выставить таймер зажигания (TEj) или параметр (Trl) так, чтобы позиция ухода (синяя линия) совпала с зеленой пунктирной линией.

Зеленая пунктирная линия – это позиция зажигания, рекомендованная полетным компьютером. Время до зажигания (TtB) показывает, сколько осталось ожидать до достижения позиции включения двигателя.

Режим ухода (Escape mode)

Правый верхний параметр задает источник данных для формирования маневра ухода. Если источник выбран некорректно, то на экране не отобразится информация,

касающаяся будущего маневра, и будет выдано соответствующее сообщение. Есть ограниченный набор программ, способных генерировать исходные данные для Orbit-Eject. Режимы Lower/Higher orbit генерируются программой ухода самостоятельно.

Допустимые источники данных для расчета маневра ухода

Lower-Orbit	Переход на более низкую орбиту
Higher-Orbit	Переход на более высокую орбиту
Course	Вектор скорости ухода генерируется по данным программ расчета курса (Course programs)
BaseAppr	Вектор скорости ухода генерируется по данным программы расчета подхода к базе (BaseApproach)
Sling-Shot	Вектор скорости генерируется программой расчета гравитационных маневров (Sling-Shot program)
SBCalc	Использовать вспомогательный вектор генерируемый программой SBCalculator

Параметры, отображаемые на экране программы Orbit-Eject

oV	Установка скорости выхода из сферы действия для режимов Lower/Higher orbit
Lnc	Установка предстартового отчета (опционально)
Trl	Установка истинной долготы точки ухода с орбиты (опционально)
Inc	Наклонение текущей орбиты к эклиптике
LAN	Долгота восходящего узла (относительно эклиптики)
EIn	Наклонение орбиты ухода
dV	Приращение скорости, необходимое для ухода по заданной траектории
oV	Скорости выхода и сферы действия планеты
TtB	Время, оставшееся до запуска двигателя
BT	Время работы двигателя
Tn	Время до подхода к узлу орбиты
PIC	Параметры для маневра смены плоскости орбиты

Режим Lower-Orbit может использоваться для наиболее простого возврата на Землю с Луны. Достаточно установить oV равным 700 м/с.

Примечание автора перевода: В контексте последней фразы, могу высказать свои предположения по поводу режимов Lower/Higher orbit. Сама программа конечно служит для ухода из сферы действия reference-ной планеты. Но режим Lower/Higher orbit видимо указывает на то, по какой орбите будет двигаться корабль вокруг того тела, в сфере действия которого он окажется после покидания исходной планеты. При старте, например с околоземной орбиты, при выборе Lower-Orbit после выхода из земной SOI корабль пойдет по эллиптической орбите относительно Солнца в сторону внутренних планет (Венеры и Меркурия), а эксцентриситет будет определяться величиной oV. Аналогично если выставить Higher-Orbit, то корабль полетит к внешним планетам. Предположение автором перевода пока не проверялось, но оно логично вытекает из всего вышеописанного.

Режим зажигания

Доступно два режима: Pro-grade и Realtime. Режим Realtime удобен для ухода с планет, обладающих слабой гравитацией. Это режим использует вектор зажигания (burn vector) для задания правильного направления запуска. Однако этот способ неэффективен при большой длительности работы двигателя. Режим Pro-grade используется при длительных разгонных импульсах во направлении текущей скорости (т.е. ориентация корабля поддерживается такой, что вектор тяги двигателя направлен по вектору скорости). Необходимо использовать режим PG (pro-grade) стандартного автопилота, либо использовать автозажигание, при котором ориентация выполняется автоматически. Режим Pro-grade недоступен, если параметр (EIn) – угол между плоскостью траектории ухода и плоскостью текущей орбиты больше 1 градуса. Не один из режимов недоступен во время старта. Для высоких эллиптических орбит точность расчета момента зажигания достигает нескольких секунд. Вы выйдете на нужное направление запуска с высокой точностью. Последние несколько секунд можно использовать режим Realtime для коррекции возможных ошибок, но обычно это не требуется. Параметры (Tra) и (TEj) недоступны в режиме Pro-grade.

Примечание: Pro-grade не корректирует положение вектора тяги по направлению относительно плоскости а Real-time да. Т.е. Pro-grade считает что Вы правильно летите в плоскости разгона. Однако отличие наклона орбиты от заданной на углы менее градуса может существенно сказаться на результатах. Отсюда и рекомендация о переходе к Real-time в конце разгона. Можно указать и еще один способ. Более эффективно малые отклонения наклона устраниать в начале разгона - когда скорость меньше. Для этого в режиме разгона надо сориентировать кораблю днищем к планете - тогда отклонение влево вправо будет изменять наклонение (и долготу восходящего узла) траектории - контролировать можно по скорости изменения PIC.

Когда возможно, используйте режим Pro-grade

Старт с поверхности

Программа Orbit-Eject может использоваться для старта с поверхности планеты. Для активации этого режима нажмите кнопку [MOD]. Направление запуска (Hed) показывает курс корабля в текущем положении в текущий момент времени. Это информация полезна для выведения корабля на околоземную орбиту. Цель - вывод в точку с заданной долготой

Interplanetary
Orbit-Eject

oV 1.234k	Higher Orbit	Prv
TEj 0.000	Realtime	
Tra 180.00°		
Surface Inc:		Nxt
Hed 60.30°		
Ecc 0.997		+
PeA -6.363M		-
EIn 29.60°		
Optimal Conditions:		
OLat 23.27°		
OHed 90.00°		Set
Time 17.147ks		
Ref Earth	Manual Burn	Adj
Ecliptic	Bad plane	1/2
	Adj-1x	

Параметр (EIn) – это отклонение от необходимого положения. Он должен быть как можно более близок к нулю, но в первые секунды старта должен иметь значение отличное от “090”. Вы должны управлять кораблем так, чтобы в момент выхода на орбиту (EIn) был равен нулю. Вы можете скорректировать его значение изменением курса вправо-влево на 1-5 градусов. Параметр (Time) под значениями оптимальных условий старта (Optimal Conditions) показывает время в секундах, которое отводится для достижения требуемого положения. В течении 24 часов (суток) имеются две наиболее оптимальные возможности для запуска. Вы можете стартовать в любое время в направлении (Hed). Запуск будет более трудным из-за влияния вращения планеты и, естественно, менее экономичным по топливу. Наилучшее направление старта “090”, т.к. в этом случае к скорость корабля относительно поверхности направлена в ту же сторону, что и скорость вращения поверхности планеты (на широте космодрома, разумеется – прим. автора перевода). Т.е. вращение планеты будет использовано наилучшим образом.

Однако запуск в наилучшем направлении невозможен, наклонение траектории ухода от планеты (escape angle) больше широты места старта. Космодром желательно расположить как можно ближе к экватору. (OLat) представляет собой наиболее выгодную широту запуска, но вы не всегда имеете возможность стартовать с нее. (ONed) является рекомендуемым направлением старта с текущей позиции. Это направление должно быть достигнуто, когда параметр (Time) обратится в ноль.

Во время подъема вы должны следить за тем, чтобы ваш курс совпадал со значением (Hed). При этом нужно помнить, что корабль летит не туда, куда направлен его нос!

Примечание автора перевода: Курс корабля – это направление вектора скорости корабля по отношению к северу.

Плоскость орбиты ухода

Отрегулировать плоскость орбиты ухода от планеты можно, выполнив маневр смены плоскости в узле орбиты, обозначенном квадратиками на зеленой пунктирной линии. Время до узла (Tn) показывает, сколько времени осталось до достижения узла орбиты. (PIC) отображает ориентацию корабля при маневре – по нормали (+) или анти-нормали (-) к плоскости орбиты, а также время работы двигателя, необходимое для выравнивания плоскостей. На низких орбитах выравнивание плоскостей потребляет много топлива. Как рекомендовано выше, лучше выйти в нужную плоскость сразу, в процессе выведения на орбиту.

Программы расчета курса (Course Programs)

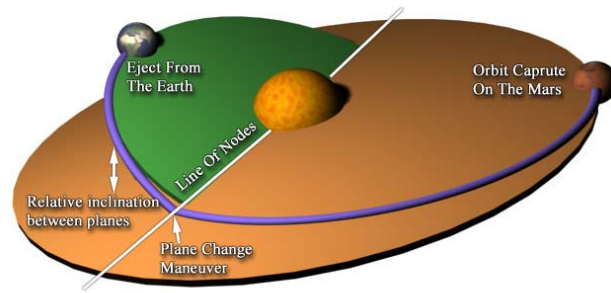
Это совершенно новые программы для IMFD. Они позволяют рассчитывать орбиты перелета между планетами, корректировать курс и выполнять подход к планетам.

Плоская орбита перелета

Плоская орбита перелета лежит в плоскостях исходной и целевой планеты. У узле орбиты должен быть выполнен маневр изменения плоскости орбиты.

Этот узел располагается на линии пересечения плоскости орбиты исходной и целевой планеты.

Требуемое количество топлива зависит от относительного наклона орбиты и расстояния от основного центра притяжения (Солнца, например, при межпланетном перелете) до точки выполнения маневра.



На рисунке: движение по плоской орбите перелета. Обозначено: Eject From The Earth – старт с Земли; Relative inclination between planes – относительное наклонение орбит; Line of Nodes – линия узлов; Plane Change Maneuver – маневр изменения плоскости; Orbit Capture on the Mars – орбита подлета к Марсу.

Лучше если узел будет находиться как можно дальше от основного тела, в идеале перехват цели лучше выполнить в узле. Изменение скорости, необходимое для маневра смены плоскости рассчитывается по формуле:

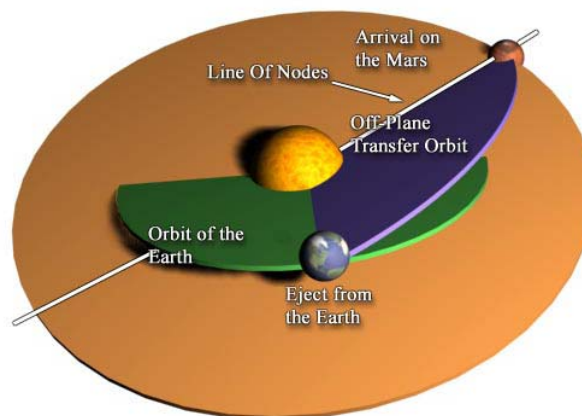
$$\Delta v = \frac{2h \cdot \sin \frac{i}{2}}{r}, \quad h = |\vec{r} \times \vec{v}|.$$

«Не плоская» орбита перелета (Off-Plane Transfer Orbit)

Такая орбита позволяет непосредственно перелететь между планетами. Маневр смены плоскости при этом не нужен. Он включен в маневры, выполняемые при запуске и перехвате цели. Если цель располагается напротив исходной планеты, то наклонение орбиты перелета может быть очень большим. Это приведет к перерасходу горючего. В таком случае рекомендуется использовать плоские орбиты перелета. Плоскость орбиты перелета при неплоском перелете определяется векторным произведением радиус-векторов исходной и целевой планеты. Например, при перелете с Земли на Марс

$$\vec{r}_{earth} \times \vec{r}_{mars}$$

Примечание автора перевода: результат этого вычисления – вектор, перпендикулярный плоскости орбиты перелета.



На рисунке: перелет по неплоской орбите. Обозначения: Orbit of the Earth – орбита Земли; Eject from the Earth – запуск с Земли; Off-Plane Transfer Orbit - орбита перелета, не лежащая в плоскости, ни исходной, ни целевой орбиты; Line of Nodes – линия узлов орбиты перелета; Arrival on the Mars – попадание на Марс.

Меню программ

Выбор программы осуществляется нажатием кнопок [Prv] и [Nxt] на правой стороне экрана IMFD (горячие клавиши Shift-1 и Shift-2 соответственно). Активировать выбранную программу можно нажатием кнопки [Set] (или нажав Shift-5 – прим. автора перевода). Нажатие этой кнопки на заголовке программы сбрасывает программу в состояние по умолчанию. Важно: нажатие кнопок [+] или [-] на заголовке позволит вернуться обратно в меню выбора программ. Однако конфигурация программы будет потеряна. Эта проблема будет устранена в будущих версиях. Однако, вы можете вернуться в главное меню по нажатию кнопки [MNU] (или Shift-F – прим. автора перевода), без потери конфигурации.

```
Interplanetary
Course

Select navigation program:

Tangential Transfer
Delta Velocity
Off-Plane Intercept
Co-Planar Intercept
Planet Approach
Co-Planar Orbit Approach
Off-Plane Orbit Approach
Orbit Insert

Adj-1x
```

На рисунке: меню навигационных программ

Примечание автора перевода: видимо этот скриншот из предыдущих версий IMFD, как и предупреждал Никканен. Во всяком случае, аналогичный экран из IMFD в комплект поставки которого входит оригинал этого руководства, выглядит как на рисунке ниже.

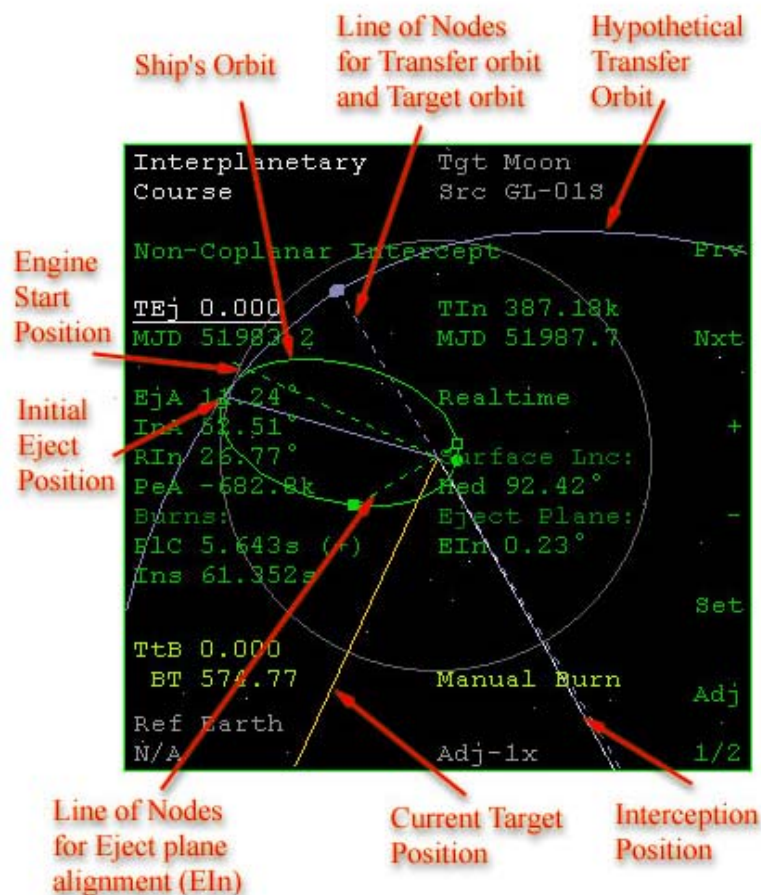


На рисунке: экран выбора навигационной программы в IMFD версии 4.2

Программа перехвата цели (Target Intercept – Program)

С технической точки зрения эта программа решает задачу Ламберта, в некоторых источниках известную как задача Гаусса

Это главная навигационная программа, имеющая две версии: программа плоского перехвата (Planar Intercept) и программа «не плоского» перехвата (Off-Plane Intercept). Эта программа позволяет спланировать курс корабля для перехвата цели по истечения времени или даты, которую вы определите. Эта программа позволяет рассчитать вектор ухода для межпланетных перелетов. Эта программа может использоваться для коррекций траектории «на полпути» и более позднего маневра перехвата планеты. Если вы используете программу плоского перелета (plane transfer program), то после выполнения маневра смены плоскости необходимо использовать программу «не плоского» перехвата, чтобы выполнять маневры по окончательному подходу к планете.



На рисунке: отлет с Земли. Обозначения: Ship's orbit – текущая орбита корабля; Line of Nodes for Transfer orbit and Target orbit – линия узлов орбиты перелета относительно орбиты цели; Hypothetical Transfer Orbit – гипотетическая орбита перелета; Engine Start Position – точка запуска двигателя; Initial Eject Position – точка отлета к цели; Line of Nodes for Eject plane alignment (EIn) – линия узлов для выравнивания плоскости орбиты ухода; Current Target Position – текущая позиция цели; Interception Position – точка перехвата цели.

В некоторых случаях программа генерирует неэффективные орбиты перелета. Чтобы оптимизировать орбиту, нужно скорректировать время до перехвата (TIn), таким образом, чтобы время работы двигателя было бы наименьшим. Целью может быть планета, луна или орбитальная станция. Экваториальная плоскость или эклиптика не могут быть целью. Указав, их вы получите сообщение “Invalid Target” – некорректная цель.

Импульсы, генерируемые программой, обычно не являются, ни pro-, ни retro-grade. Однако, в некоторых случаях pro-grade может использоваться, например при перелете с низкой околоземной орбиты до Луны. Импульсы Pro- и Retro-grade более эффективны в этом случае.

Важно: Когда выполняется настройка, должен быть установлен режим Realtime, т.к. режим Pro-grade добавляет свои настройки.

На приведенном выше скриншоте изображен старт с околоземной орбиты. Синяя/белая пунктирная линия обозначает точку перехвата цели. Ее положение может

быть легко выбрано, заданием интервала времени до момента перехвата (Intercept Timing). Но при этом не нужно забывать об эффективности орбиты перелета. Линия узлов (синяя пунктирная линия) – это линия пересечения орбиты перелета и орбиты цели. Направляющий вектор этой прямой получается как векторной произведение нормали к гипотетической орбите перелета $\vec{n}_h$ и нормали к орбите цели $\vec{n}_t$, т.е. $\vec{I} = \vec{n}_h \times \vec{n}_t$. Параметр (RIn) – угол между этими плоскостями.

В таблице: параметры, отображаемые на экране расчета орбиты перелета

EjA	Угол между наклона скорости в точке ухода
InA	Угол наклона скорости в точке перехвата
RIn	Угол между плоскостью гипотетической орбиты перелета и цели
PeA	Высота периапсиды траектории перелета
PIC	Данные для маневра изменения плоскости
Ins	Время зажигания для выхода на орбиту

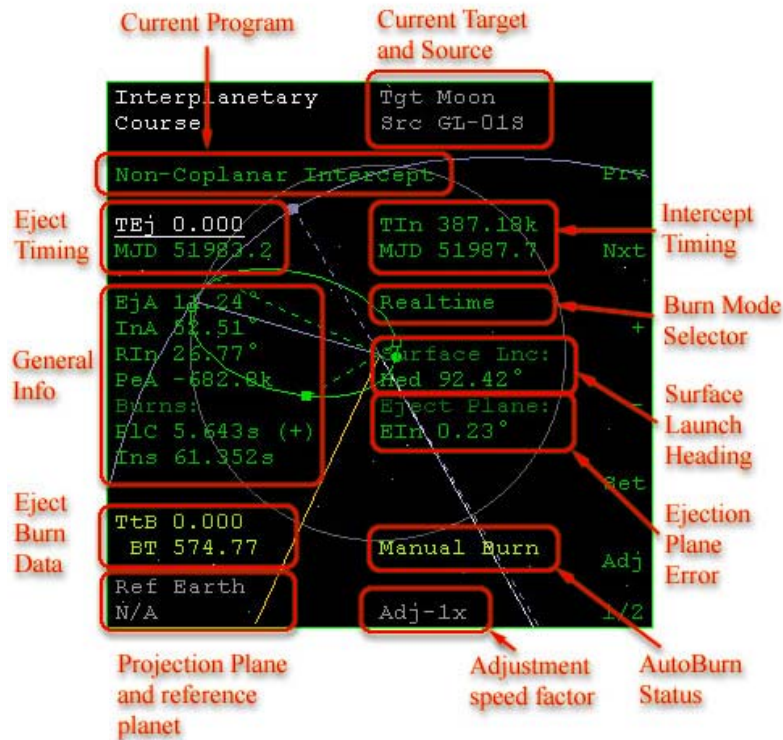
Если используется версия программы для «не плоского» перелета, то параметры (EjA) – Ejection Angle и (InA) – Intercept Angle отражают ошибку в наклонении орбиты. Скорости outward/inward (outward – скорость выхода из сферы действия исходной планеты, inward – скорость входа в сферу действия целевой планеты) определяются соотношением

$$\Delta v = \sqrt{v_s^2 + v_t^2 - 2v_s v_t \cdot \cos \varphi} = |\vec{v}_t - \vec{v}_s|,$$

где $\vec{v}_t$ - скорость цели; $\vec{v}_s$ - скорость корабля; φ - угол (EjA) или (InA). Очевидно, что чем меньше угол, тем более экономичной будет орбита перелета.

Выравнивание плоскостей (*только для плоских перелетов*)

Если используется плоская орбита перелета и исходным телом является сам корабль, то отображаются данные для выравнивания плоскостей и линия узлов (зеленой пунктирной линией). Наклонение орбиты ухода Ejection Inclination (EIn) – наклонение орбиты, приведенное к узлу. Технически это то же самое что и наклонение орбиты ухода, но вы не собираетесь выполнять маневр ухода в данном случае. Когда (EIn) равно нулю, тогда цель находится в плоскости орбиты корабля в момент перехвата. В этом случае узел орбиты перелета совпадает с точкой перехвата. Этот случай напоминает перелет по «не плоской» орбите. Но он имеет одно преимущество – отсутствует проблема переносного вращения когда корабль находится на противоположной стороне от точки перехвата.



На рисунке: Current Program – текущая программа; Current Target and Source – текущая цель и исходный объект; Intercept Timing – промежуток времени до перехвата цели; Burn Mode Selector – параметр для выбора режима зажигания; Ejection Plane Error - ошибка плоскости орбиты ухода; AutoBurn Status – состояние режима автозажигания (в данном случае зажигание будет выполнено вручную); Adjustment speed factor – шаг изменения параметров при их ручной установке кнопками [+] / [-]; Projection Plane and reference planet – плоскость проекции и основная планета; Eject Burn Data – данные на зажигание; General Info - общая информация; Eject Timing – тайминги ухода с исходной планеты (TEj – время до ухода; MJD – модифицированная юлианская дата ухода).

Примечание автора перевода: не ясно, что это за проблема такая. Видимо имеется в виду, что при разгоне у исходной планеты не нужно поворачивать плоскость орбиты перелета, как это делается при перелете по «не плоской» орбите. Но если это так, то при чем тут переносное вращение (*suffer the rotation*)? В любом случае, плоская орбита, узел которой совпадает с точкой перехвата, выгодна энергетически.

Ошибка наклона (EIn) может быть устранена маневром выравнивания плоскостей в узле орбиты перелета, где такой маневр наиболее эффективен (линия узлов – зеленая пунктирная линия с двумя квадратами на концах). Однако программа не сообщит вам, что лучше если узел будет как можно дальше от основной планеты.

Направляющий вектор линии узлов

$$\vec{p} = \vec{n}_s \times \vec{r}_t,$$

где $\vec{n}_s$ - нормаль к плоскости орбиты корабля; $\vec{r}_t$ - радиус вектор цели в момент перехвата. Ошибка наклонения (EIn) равна $\varphi = \frac{\pi}{2} - (\vec{n}_s; \vec{r}_t)$.

Режим зажигания (*только для плоских орбит*)

Режим зажигания по умолчанию – Realtime. Это название не является лучшим для этого режима, но оно останется таким. Режим Realtime позволяет пользователю определять время работы двигателя вручную. Наиболее часто импульс ухода выдается в текущем положении корабля. Это будет причиной того, что импульс не будет направлен по вектору текущей скорости (не pro-grade) и естественно не так эффективен. Поэтому режим Pro-grade создан специально, чтобы повысить эффективность выдаваемого импульса, что особенно важно для импульсов большой длительности. В этом режиме точка схода с орбиты располагается так, чтобы параметр (EjA) был равен нулю. В этом случае точка, где нужно включить двигатель вычисляется путем численного интегрирования. Эта точка обозначается зеленой пунктирной линией, и параметр (TtB) обозначает, сколько времени осталось до достижения этого положения. Разумеется (TtB) отображает правильную информацию и в режиме Realtime.

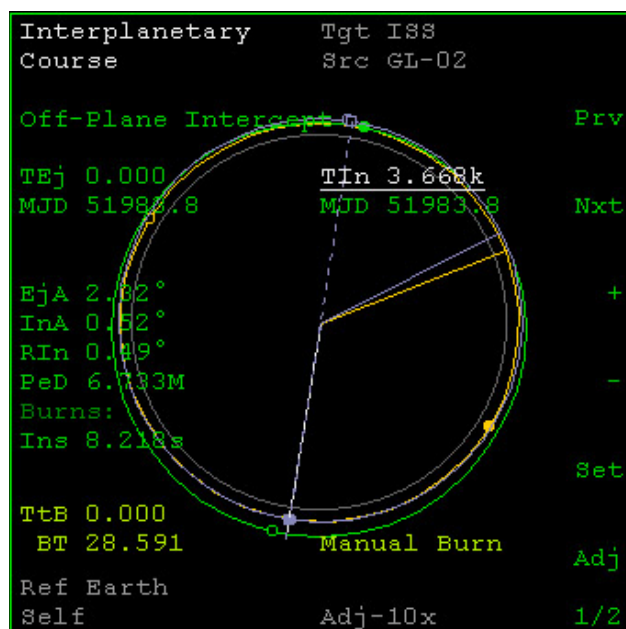
Старт с поверхности (*только для плоских орбит*)

При использовании программы плоского перехвата (Planar Intercept program) цели можно стартовать прямо с поверхности планеты, например, с Земли на Луну. Запуск с азимутом “090” является наиболее эффективным, но вы можете стартовать, когда захотите по направлению, указанному параметром (Hed). Для начала вы должны выйти на орбиту. При подъеме периапсиды над поверхностью планеты режим старта с поверхности выключается. Важно, чтобы перед запуском вы определили время перехвата. **Обратите внимание, что вы не сможете изменить время перехвата после выхода на орбиту.** Это сделает невозможным выравнивание плоскости опорной орбиты (изменение EIn). (TEj) должно быть установлено в ноль, не имеет смысла устанавливать его в какое-нибудь другое значение.

Во время старта с поверхности вы не должны беспокоиться не о чем, кроме курса (Hed) и наклонения траектории ухода (EIn). (EIn) необходимо свести к нулю. Выведение на орбиту делайте любым удобным для вас способом. После этого стоит подумать о том,

как продолжить вашу миссию. **Подробнее читайте об этом в разделе «Уход с орбиты» (Orbit-Eject).**

Перехват орбитальной станции (только для «не плоского» перехвата)



На рисунке: перехват орбитальных станций с помощью программы Off-Plane Intercept

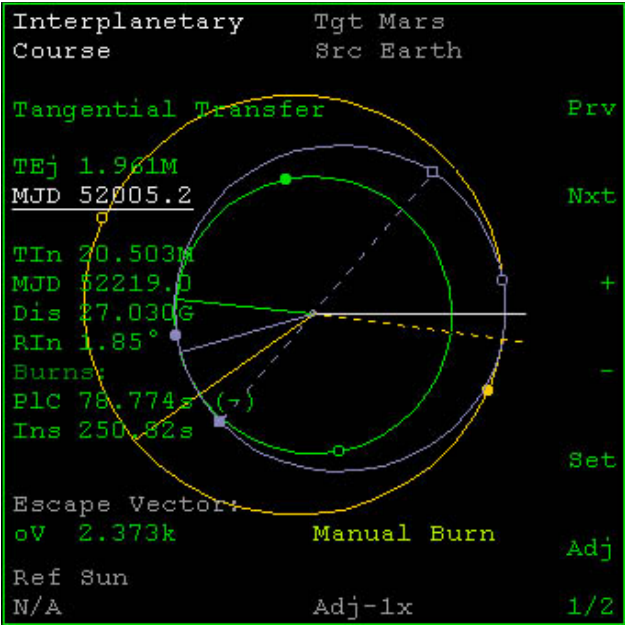
Программу «не плоских» перехватов можно использовать позволяет перехватывать космические станции на орбите. Графически этот процесс отображается не корректно, но числовые данные вполне объективны. Рекомендуются перехватывать станции в периапсиде или апоапсиде гипотетической орбиты перелета. Сближение со станцией происходит с точностью до нескольких метров. Возможности по перехвату станций ограничены небольшими возможностями по маневрированию на орбите. Чтобы перехватить станцию вы должны, прежде всего, выровнять плоскости орбит.

Кроме того, разница между положениями вашего корабля и станции не должна превышать 10-15 градусов (имеется в виду разность истинных долгот этих объектов – прим. автора перевода). Установите (TEj) в ноль и подберите промежуток времени до перехвата (TIn) таким образом, чтобы точка встречи со станцией находилась либо на стороне противоположенной кораблю, либо в периапсиде, обозначенной закрашенными синим кружком. Также время (TIn) должно быть меньше периода обращения по орбите. Следите за высотой периапсиды над поверхностью (PeA), чтобы не зацепиться за атмосферу.

Программа расчета касательных орбит перелета (Tangential transfer program)

Эта программа имеет только один параметр, который пользователь может вводить в двух формах: время до отлета (TEj) или модифицированная юлианская дата (MJD) отлета. Эта программа генерирует орбиту перелета, которая касается исходной орбиты и орбиты цели. Орбита перелета лежит в плоскости исходной планеты и требует маневра смены плоскости при прохождении через узел. Зажигание для отлета может иметь направление как pro- так и retro-grade.

Белая линия обозначает точку пересечения, а оранжевая пунктирная линия – положение цели в момент пересечения. Если эти две линии совпадают, то вы перехватите



цель в точке пересечения. Исходная орбита может быть гиперболической, а орбита цели только круговой или эллиптической.

Когда целью является экваториальная или эклиптическая орбита, то необходимо задать ее радиус. На этой орбите нет никаких тел, поэтому положение цели не задается.

В таблице: параметры, отображаемые на дисплее программы Tangential transfer

TEj	Время до отлета
MJD	Модифицированная юлианская дата отлета
Rad	Радиус целевой орбиты
TIn	Время до пересечения целевой орбиты
MJD	Модифицированная юлианская дата пересечения целевой орбиты
Dis	Расстояние между положениями корабля и цели
RIn	Угол между плоскостями исходной и целевой орбит
PIC	Данные для выравнивания плоскостей
Ins	Время зажигания для выхода на орбиту

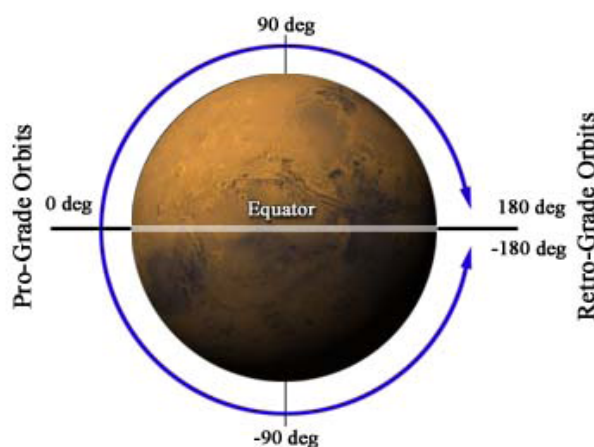
Программа выведения на орбиту (Orbit Insert program)

Эта программа не требует больших объяснений. Она используется для выведения корабля с гиперболической орбиты пролета мимо планеты на низкую круговую орбиту. Вы можете определить эксцентриситет или расстояние апоапсиды целевой орбиты. Режим работы двигателя будет рассчитан методом численного интегрирования. Орбита получается очень точно с минимальными энергетическими затратами.

Программа расчета выдачи импульсов (Delta Velocity program)

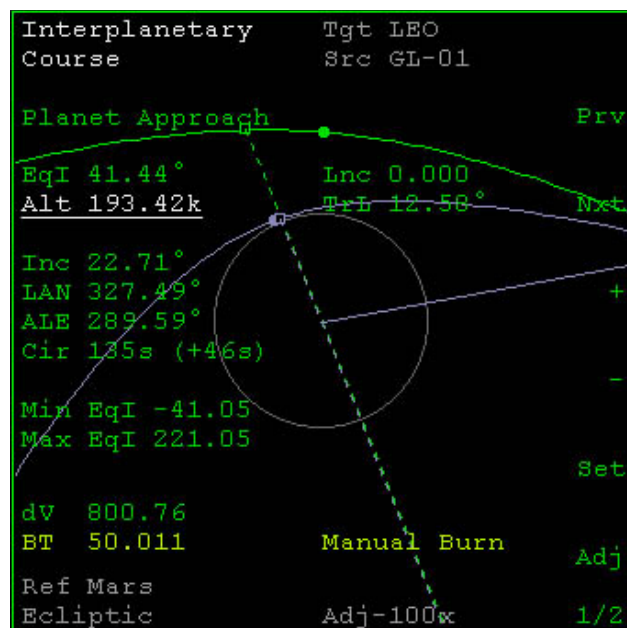
Это старая программа для расчета орбит перелета, использующая для расчетов дату отлета и приращение скорости, необходимое для отлета. Можно также задавать истинную долготу позиции отлета. Программа показывает точку пересечения с орбитой цели. Точки пересечения могут быть выбраны параметром пересечения -1, -2.

Программа расчета подхода к планете (Planet Approach program)



На рисунке: наклонения прямых (pro-grade) и обратных (retro-grade) орбит

Вы можете легко изменить высоту орбиты с помощью программы расчета подхода к планете. Предположим вы находитесь на подлете к планете (внутри сферы действия и движетесь по гиперболической орбите). В этом случае можно отрегулировать наклон вашей орбиты к экватору. Это особенно эффективно при желании достичь высоких углов наклона к экватору. Однако вы не можете сделать наклон меньше, чем ваш текущий наклон. Для достижения меньших наклонов необходимо выполнить маневр смены плоскости в узле орбиты. “Min EqI” и “Max EqI” – минимальное и максимальное значение наклона, которое может быть достигнуто.



На рисунке: экран программы Planet Approach

Наклоны выше -90° и ниже 90° градусов соответствуют орбите с прямым вращением (pro-grade orbit) (т.е. направление движения корабля совпадает с вращением планеты), наклоны выше 90° и ниже -90° градусов – орбиты с обратным вращением (retro-grade orbit) (корабль и планета вращаются в противоположные стороны). При отрицательном наклоне вы подходите к планете со стороны южного полюса, при положительных – со стороны северного. Импульс коррекции, выполняемый этой программой, должен быть выполнен как можно дальше от планеты. Иногда возможно выполнить эту коррекцию на расстоянии трех радиусов сферы влияния. Это минимизирует расход горючего. Небольшая коррекция, если потребуется, может быть выполнена позже.

В таблице: параметры, отображаемые на экране программы Planet Approach

PeA	Высота периапсиды над поверхностью планеты
EqI	Наклон орбиты к экватору
TEj	Время до выполнения коррекции
Trl	Истинная долгота точки коррекции
Inc	Наклон орбиты к эклиптике
LAN	Долгота восходящего узла относительно эклиптики
ALE	Долгота восходящего узла относительно экватора планеты
Cir	Время работы двигателя, необходимое для того, чтобы сделать орбиту круговой

Гравитационный маневр (Sling-Shot)



На рисунке: экран программы гравитационного маневра Sling-Shot.

Технически эта программа очень похожа на программу ухода с орбиты (Orbit-Eject). У нее подобный пользовательский интерфейс и математически эта программа эквивалентна Orbit-Eject. Она используется, чтобы изменить курс корабля воспользовавшись пролетом в гравитационном поле другой планеты, с включением и без включения двигателя.

Программа создаст данные для включения двигателя, проверив, что вектор скорости, который при этом получится, соответствует вектору скорости рассчитанному программой перелета на следующей стадии вашего путешествия. Источник навигационных данных можно выбрать в правом верхнем углу. Доступные для программы источники доступны в главе, описывающей программу Orbit-Eject. Параметры на левой стороне экрана позволяют определить точку начала маневра, но обычно этого не требуется – маневр нужно выполнить как можно раньше.

Программа не оптимизирует гравитационный маневр, поэтому вы можете получить совершенно любые данные для его выполнения.

Программа может рассчитать вектор для отлета с «младшего» тела, т.е. в случае если вы выбрали в качестве исходного тела малый спутник планеты. Например, можно рассчитать отлет к Марсу с Луны. Наиболее удобный момент для запуска, когда Луна движется в направлении отлета.

Параметры, используемые программой гравитационного маневра

EIn	Наклон между орбитой корабля и вектором отлета
Inc	Наклон к эклиптике
LAN	Долгота восходящего узла относительно эклиптики
PeA	Высота периапсиды над поверхностью планеты
C3	Полная энергия орбиты
oV	Скорость выхода из сферы действия планеты
Lnc	Время подхода к позиции зажигания
Trl	Истинная долгота точки зажигания

Вы можете запускать корабль как по направлению движения основной планеты, используемой при маневре, так и против ее движения. Тщательно планируйте маневр, чтобы не врезаться в планету. Следите за величиной (PeA).

Математические соотношения

Основные аналитические соотношения, используемые в IMFD. Угол ρ - угол между текущим радиус-вектором корабля и вектором скорости ухода. Расстояние r – текущее расстояние от корабля до центра притяжения (планеты, используемой для маневра); a – большая полуось, зависящая от скорости выхода из сферы действия.

$$\rho = (\vec{r}; \vec{e}), \quad \rho \in [0, 2\pi] \quad (1)$$

$$a = -\frac{\mu}{v_o^2} \quad (2)$$

$$x = r^2 \cdot \sin^2 \rho \quad (3)$$

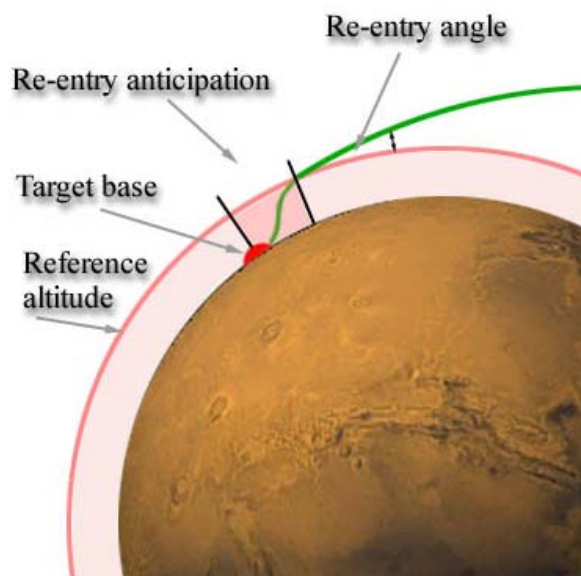
$$y = 2a \cdot r \cdot (\cos \rho - 1) \quad (4)$$

$$e = \sqrt{\frac{x - r \sin \rho \cdot \sqrt{x + 2y} + y}{2a^2}} + 1 \quad (5)$$

Подход к базе (BaseApproach)

Эта программа – улучшенная версия старой программы (TEI). Она имеет схожие функциональные возможности. Программа позволяет спланировать полет так, чтобы совершить посадку непосредственно с подлетной траектории, без выхода промежуточную на орбиту. Эта программа должна использоваться далеко от планеты, на краю сферы ее влияния, чтобы лучше синхронизироваться с положением базы.

Существуют несколько траекторий, позволяющих достичь нужной базы. Чтобы найти подходящую вам траекторию нужно отрегулировать параметр (Hint) – предполагаемое подлетное время. Если компьютер не может найти решение, то на экране отображается надпись «Нет решения» (No Solution). Если решение найдено, то на экране появятся полетные данные. Вы можете продолжить увеличивать (Hint), чтобы найти другое решение. Перед этим вы должны указать целевую базу кнопкой [TGT] и установить параметры входа в атмосферу.

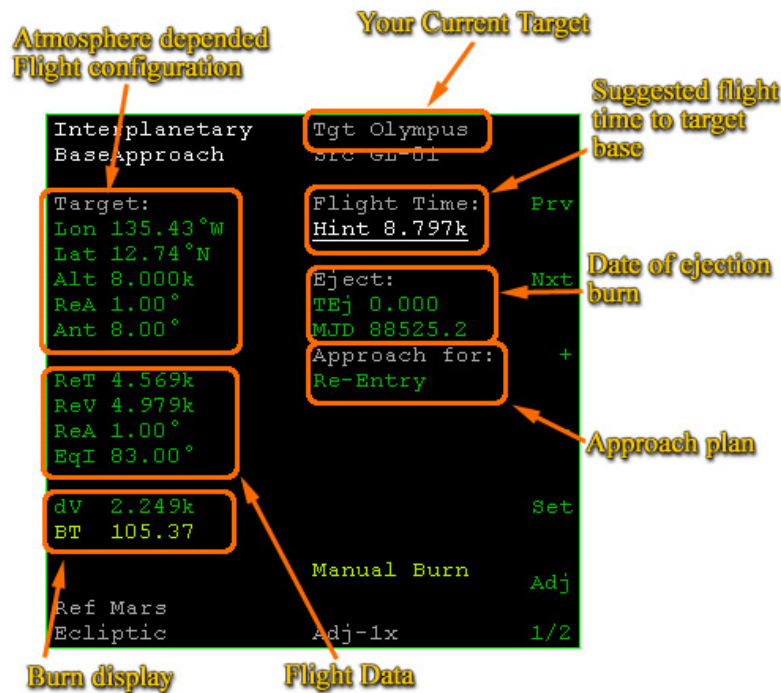


На рисунке: примерно так происходит вход в атмосферу и посадка. Обозначения: Re-entry angle – угол входа; Re-entry anticipation – упреждение; Target base - целевая база; Reference altitude – высота точки входа;

Вы можете задать угол входа в атмосферу (re-entry angle), высоту (reference altitude), где начинается вход в атмосферу, и упреждение (anticipation), т.е. угловое расстояние от точки входа в атмосферу до базы, которое даст вам пространство для проведения заключительных маневров перед посадкой (смотрите рисунок для более наглядного представления, о чем идет речь).

Высота точки входа в атмосферу должна быть указана правильно, это уровень на котором отсчитывается угол входа в атмосферу и начинается финальная стадия посадки.

Хорошим значением будет 80 км для Земли и 8 км для Марса. Упреждение измеряется в градусах дуги по поверхности планеты. На планетах с разреженной атмосферой этот упреждение должно быть достаточно большим, т.к. торможение займет много времени.



На рисунке: экран программы BaseApproach.

Обозначения: Atmosphere dependent Flight configuration – параметры посадки, зависящие от свойств атмосферы; Flight Data – полетные данные; Burn display – параметры включения двигателя; Your current Target – текущая целевая база; Suggested flight time to target base – предполагаемое подлетное время; Eject – данные на выдачу корректирующего импульса; Approach plan – режим подхода к базе.

Параметры, используемые программой BaseApproach

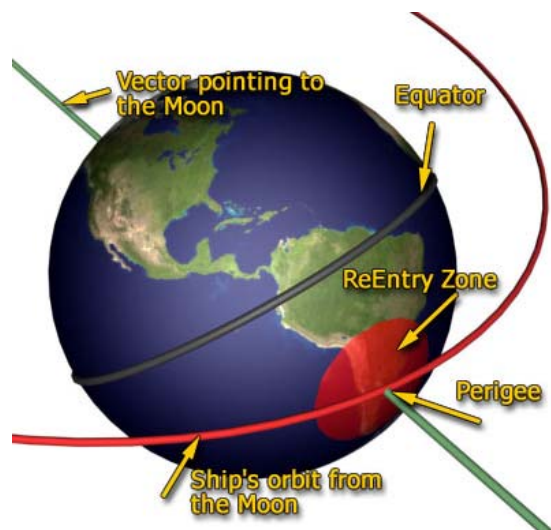
Lon	Долгота базы
Lat	Широта базы
Alt	Высота точки входа в атмосферу
ReA	Угол входа в атмосферу
Ant	Упреждение
ReT	Время до входа в атмосферу
ReV	Скорость входа в атмосферу
EqI	Наклон траектории полета к экватору
Sol	Выбор первого или второго решения
Num	Число витков, необходимое для ожидания на орбите

Возвращение с Луны на Землю

При посадке на с Луны на Землю, как это делали корабли «Аполлон», зона посадки располагается на стороне Земли, противоположной текущему положению Луны (см. рисунок с эллиптической орбитой подхода). Т.к. угол входа в атмосферу от 5,5 до 7, 5

градусов, то зона посадки расположена очень близко к перигею. Широта перигея зависит от положения Луны, а размер зоны посадки от угла входа.

Наклон лунной орбиты к Земному экватору примерно 23 градуса (изменяется в пределах от 18 до 28 градусов – примечание автора перевода). Поэтому область возможных посадок может лежать между 23 градусами северной широты и 23 градусами южной широты, но только небольшая часть этой области может быть доступна в конкретный момент времени. Если место посадки находится выше 23 и ниже -23 будет очень трудно совершить посадку, двигаясь по эллиптической орбите.

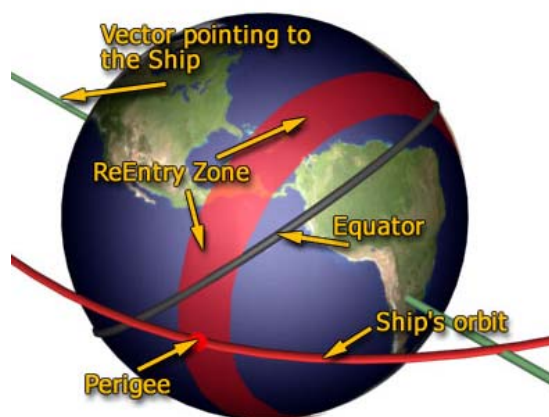


На рисунке: полет к Земле по эллиптической орбите возвращения. Обозначения: Vector pointing to the Moon – вектор направленный к Луне; Equator – экватор; ReEntry Zone – зона посадки; Perigee – перигей орбиты подлета; Ship's orbit from the Moon – орбита возврата с Луны.

При вращении планеты, зона посадки покрывает все возможные долготы в области возможных посадок.

Подход по гиперболе

При подлете к планете, скажем к Марсу, орбита будет гиперболической. Можно вращать периапсиду вокруг планеты. Таким образом, зона посадки будет выглядеть как кольцо (см. рисунок с гиперболической орбитой). И это кольцо может покрыть большую часть планеты. В этой связи, сесть на Марс не так уж и трудно. Диаметр кольца зависит от эксцентриситета орбиты. Когда эксцентриситет близок к единице, зона посадки будет больше походить на эллиптическую, а при больших значениях диаметр кольца так же будет расти.



На рисунке: полет к планете по гиперболе.

Обозначения: Vector pointing to the Ship – вектор, направленный к кораблю; ReEntry Zone – зона посадки; Equator – экватор; Perigee – перигей орбиты полета; Ship's orbit – орбита полета к планете.

Необходимо выполнять первую ориентацию и синхронизацию траектории как можно дальше от планеты. Приблизительно за 500000 секунд до подхода к планете. Это может оказаться далеко за пределами сферы действия. Конечно, результат коррекции, даже не продолжительной, будет не слишком точным, но это уменьшит затраты топлива на проведение более поздних, уточняющих коррекций. Еще две коррекции нужно будет провести где-то за 100000 и 15000 секунд до полета.

Выход на орбиту

Режим выхода на орбиту используется, если вы желаете вывести корабль на орбиту, проходящую над базой. Параметр (Alt) задает высоту периапсиды. Орбита должна быть циркуляризирована (сделана круговой) в перигелии. Если орбита не круговая, то синхронизация с базой будет выполнена так же хорошо, как и при круговой орбите. При синхронизации учитывается поворот планеты за время полета к ней. Параметр (Num) показывает число полных витков по орбите, которые нужно сделать по орбите перед посадкой. Ноль означает, что приземление должно произойти уже на этом витке, что не дает времени на выполнения маневра схода с орбиты, но подходит для лунных посадок. Существуют две орбиты, проходящие над базой – с прямым и обратным вращениями.

При выходе на опорную орбиту проблема выбора зоны посадки и времени посадки отсутствует. Поэтому этот способ посадки самый легкий из всех. Его можно использовать и при возврате с Луны на Землю.

Рекомендации

Клавиатурные команды

Команды располагаются на двух страницах, переход между которыми осуществляется нажатием комбинации Shift-I. Interplanetary IMFD открывается нажатием клавиш Shift-I.

Клавиатурные команды для всех программ кроме, карты

Кнопки на левой стороне экрана	Клавиатурные комбинации	Кнопки на правой стороне (страница 1)	Кнопки на правой стороне (страница 2)	Клавиатурные комбинации
MNU	Shift-F	Prv	BV	Shift-1
PG	Shift-I	Nxt	Z+	Shift-2
REF	Shift-R	+	Z-	Shift-3
TGT	Shift-T	-	Src	Shift-4
MOD	Shift-M	Set	Cnt/Aux	Shift-5
PRJ	Shift-P	Adj	AB	Shift-6

Клавиатурные команды для карты

Кнопки на левой стороне экрана	Клавиатурные комбинации	Кнопки на правой стороне (страница 1)	Кнопки на правой стороне (страница 2)	Клавиатурные комбинации
MNU	Shift-F	Cnt	Slf	Shift-1
PG	Shift-I	Z+	SOI	Shift-2
REF	Shift-R	Z-	IPC	Shift-3
TGT	Shift-T	Sel		Shift-4
MOD	Shift-M	Dsp	Plan	Shift-5
PRJ	Shift-P	Azo	Find	Shift-6

Значения команд для всех программ, кроме карты

Prv	Shift-1	Переход к предыдущей переменной
Nxt	Shift-2	Переход к следующей переменной
+, -	Shift-3,4	Увеличить/уменьшить переменную
Set	Shift-5	Ввести значение переменной с клавиатуры
Adj	Shift-6	Регулировать шаг изменения переменной
Z+, -	Shift-2,3	Увеличить, уменьшить масштаб отображения чертежа
Src	Shift-4	Задать исходный объект
Cnt	Shift-5	Установить объект, находящийся в центре экрана
AB	Shift-6	Включение/выключение автозажигания
BV	Shift-1	Показать вектор зажигания
Aux	Shift-5	Ввод дополнительного вектора для SB Calculator

Кнопки на левой стороне экрана

MNU	Shift-F	Вывод на экран главного меню
PG	Shift-I	Сменить страницу кнопок (меняются кнопки на правой стороне экрана)
REF	Shift-R	Установить основную планету
TGT	Shift-T	Установить цель
MOD	Shift-M	Сменить режим графика/текст/текст и графика
PRJ	Shift-P	Сменить плоскость проекции

Значения команд для карты

Sel	Shift-4	Выбрать периапсиду
Dsp	Shift-5	Отобразить дополнительные графические элементы на карте
Azo	Shift-6	Включит/выключит автомасштабирование картинки
Slf	Shift-1	Отобразить/скрыть траекторию корабля
Soi	Shift-2	Отобразить сферу влияния
IPC	Shift-3	Включить расчет изменения плоскости
Plan	Shift-5	Переключиться в режим планирования полета
Find	Shift-6	Найти цель из основных тел (не ясно, что имеется в виду – прим. автора перевода)

Параметры, отображаемые на экране

PeT – время подлета к периапсиде

PeD – расстояние от периапсиды до центра основной планеты

PeV – скорость в периапсиде относительно основной планеты

PeA – высота периапсиды над поверхностью основной планеты

ReT – время до входа в атмосферу, время до посадки

ReV – скорость входа в атмосферу

ReA – угол входа в атмосферу

Inc – наклонение текущей орбиты к эклиптике

RIn – относительное наклонение к орбите цели $\angle(\vec{n}_s; \vec{n}_t)$

EqI – наклон орбиты к экватору

EIn – Наклон вектора покидания/ухода. Угол между вектором скорости ухода и орбитой корабля, определяющийся как $\frac{\pi}{2} - \angle(\vec{n}_s; \vec{E})$. В программах расчета перелетов это также угол между плоскостями орбит корабля и цели в точке перехвата.

Tn – время подхода к следующему узлу. Отрицательно, если узел уже пройден.

TEj – время до отлета. Время ниже этого параметра (MJD) – модифицированная юлианская дата отлета.

TIn – время до перехвата цели. Время ниже этого параметра (MJD) – модифицированная юлианская дата перехвата.

TtB – время до зажигания. Время до запуска основного двигателя.

EjA – Угол между скоростями корабля и касательной к орбите перелета в момент ухода с орбиты.

InA – Угол между вектором скорости орбиты корабля и касательной к орбите перелета в точке перехвата цели.

BT – время работы двигателя.

Cir – время работы двигателя, потребное для того, чтобы сделать орбиту круговой.

PIC – время работы двигателя и ориентация корабля для выполнения выравнивания плоскости орбиты.

Ins – время работы двигателя для выхода на целевую орбиту.

Lon – долгота на поверхности планеты. Для карты показывает положение периапсиды, для BaseApproach – положение базы на поверхности.

Lat – широта на поверхности планеты

Ecc – эксцентриситет орбиты

LAN – долгота восходящего узла относительно эклиптики

GeR – радиус геостационарной орбиты

Rad – радиус орбиты, если в качестве цели выбрана орбита

Dis – угловое расстояние между двумя положениями

Trl – истинная долгота точки отлета

ALE – долгота восходящего узла относительно экватора

C3 – потенциальная энергия, приобретаемая кораблем на асимптоте орбиты ухода.

$$C3 = o_v^2 / 1000$$

dV – приращение скорости в результате зажигания

oV – скорость выхода из сферы действия планеты.

Обучающие программы и примеры

Старт с Земли на Луну

1. Загрузите сценарий, где корабль находится на поверхности Земли
2. Откройте программу Planar Intercept из коллекции программ для расчета курса
3. Программа попросит вас указать цель. Нажмите кнопку [TGT] (Shift-T) и укажите “Moon” в качестве цели.
4. Для полета с Земли на Луну требуется примерно три дня. Выберите пункт (TIn) клавишами [Prv], [Nxt] и нажав [Set] введите значение “3d”. Это означает три дня.
5. Тем же путем установите (TEj) в ноль.
6. Посмотрите на параметр (Hed) и дождитесь, пока он станет равным 90 градусов. На это могут потребоваться сутки.
7. Включите двигатели, поднимите корабль в воздух и поверните его не нужный курс, около 90 градусов.
8. Выведите корабль на круговую околоземную орбиту. В процессе старта следите за величиной (EIn). Он показывает, на сколько точно ваш корабль следует плану полета. Вы можете управлять им, смещая корабль по курсу влево и вправо не более чем на 2-8 градусов. Цель состоит в том, чтобы получить (EIn) как можно более близким к нулю.
9. После достижения орбиты, если необходимо, проведите дополнительное выравнивание плоскости. Выберите режим зажигания и смените его значение с Realtime на Pro-grade.
10. Нажмите [PG] для смены страницы кнопок и нажмите кнопку [AB], чтобы активировать режим автозажигания. Вы можете изменять масштаб изображения на экране нажатием кнопок [Z+] и [Z-].
11. Если вы хорошо выровняли плоскости, то перехватите Луну. Однако, если выравнивание было выполнено не так хорошо, то необходимо сделать коррекцию курса, с помощью программы Off-Plane Intercept.

Коррекция курса

1. Откройте программу Off-Plane Intercept из коллекции программ для расчета курса.
2. Установите цель, нажав [TGT].

3. Проверьте, что космический корабль выбран в качестве исходного объекта. Его название должно быть написано в правом верхнем углу после слова (Src). Если это не так, нажмите [PG] и [Src] и введите символ “x” в появившемся окне. Если вы собираетесь корректировать траекторию межпланетного перелета слишком рано, до выхода из сферы действия планеты, с которой стартовали, программа покажет вам это. Дождитесь, пока корабль покинет сферу действия.
4. Установите (TEj) в ноль, нажав кнопку [Set] и введя значение 0.
5. Теперь выберите пункт (TIn) и скорректируйте его кнопками [+)/[-]. Шаг изменения параметра при этом можно регулировать клавишей [Adj]. Текущий множитель шага отображается в правом нижнем углу экрана. Цель изменения (TIn) – сделать время работы двигателя (BT) как можно меньше.
6. Включите автозажигание кнопкой [AB].

Подход к планете

1. Откройте программу Planet Approach из коллекции программ расчета курса.
2. Выберите основную планету нажатием кнопки [REF]. Автоматически она может быть выбрана некорректно.
3. Подождите, пока с экрана исчезнет надпись “Low Influence” (это означает, что корабль еще не вошел в сферу влияния планеты – прим. автора перевода).
4. Установите высоту периапсиды заданием параметра (Alt). Нажмите [Set] и введите желаемое значение.
5. Выберите требуемое наклонение орбиты (EqI). Нажмите [Set] и введите нужное значение, помня при этом, что таким путем вы не сможете получить наклонение орбиты меньше чем текущее наклонение. Чтобы добиться этого, придется выполнить маневр смены плоскости в узле орбиты.
6. Установите (TEj) в ноль.
7. Включите режим автозажигания кнопкой [AB]. Однако импульс коррекции, выданный далеко от планеты не будет достаточно точным, поэтому вероятно, его придется повторить, когда вы подлетите поближе.

С МКС до Луны

Разумеется, эти рекомендации могут быть использованы для старта к Луне с любой другой околоземной орбиты. Это руководство использует прием, при котором вы будете иметь два стартовых окна в течении каждого месяца.

1. Откройте IMFD и программу Planar Intercept из коллекции программ для расчета курса.
2. Сначала программа попросит вас установить цель. Нажмите кнопку [TGT] и наберите “Moon” в диалоговом окне. Исходный и основной объекты выберутся автоматически.
3. Теперь установите время достижения Луны. Выберите пункт время перехвата (TIn) кнопками [Prv] и [Nxt]. Увеличивайте этот параметр, пока значение (EIn) не станет равным нулю. Нулевое значение показывает, что Луна будет находиться в плоскости орбиты корабля и МКС в момент перехвата (*если вы используете сценарий “Docked At ISS” хорошим значением даты перехвата будет MJD 51992.2*).
4. Теперь вы знаете, когда прибудете на Луну, но не знаете даты отлета к Луне. Полет с Земли на Луну длится примерно два дня. Отнимем четыре дня от времени перехвата. Таким образом, дата отлета MJD 51988.2. Установите его для параметра (TEj).
5. Вы можете увеличить или уменьшить изображения на экране нажатием кнопок [Z+] и [Z-] на правой стороне экрана. Если они не видны, нажмите [PG], чтобы переключить страницу. Если вы будете видеть орбиту Луны, то сможете подобрать (TEj) так, чтобы получить желаемую орбиту.
6. Теперь выберите пункт Realtime и смените его на Pro-grade. Программа найдет точку запуска двигателя.
7. Теперь вам нужно подождать стартового окна. Это можно сделать легче выписав MJD старта и выйти из Orbiter’a. Откройте файл сценария и замените MJD так, чтобы до старта оставалось несколько часов.
8. Через некоторое время, пока вы будете ждать, из-за несферического гравитационного поля Земли и других возмущений (EIn) может несколько измениться. Это не страшно, эту ошибку можно компенсировать небольшим изменением времени перехвата цели (TIn).
9. Активируйте заново режим Pro-grade, переключением параметра Realtime/Pro-grade. Время запуска двигателя будет пересчитано.
10. Включите автозажигание нажатием кнопки [AB].

Документ переведен на русский язык Притыкиным Д. Е. (astronavt). Отдельное спасибо Bloodest за полезные комментарии!