

Manuale di Volo nello Spazio Profondo

Autore: Duncan Sharpe novembre 2003. Questo manuale è donato al pubblico dominio.

Un complemento al simulatore di volo spaziale Orbiter.

Questo manuale è dedicato alla pianificazione di un volo spaziale a lungo raggio. Verranno trattati i principi fondamentali, e vedremo anche come metterli insieme per trasformarli nelle tipiche manovre da eseguire per raggiungere la meta. Quando lo avrete finito di leggere, saprete tutto quello che serve per visitare i pianeti nel modo più efficiente possibile per quanto riguarda il consumo di carburante.

Indice dei contenuti

1 Orbite di base	2
2 Una descrizione condensata del sistema Solare	2
3 I principi del volo efficiente	3
3.1 Tre esperimenti di orbita ellittica.....	3
Esperimento 1 - modificare l'inclinazione	3
Esperimento 2 - orbita di fuga	3
Esperimento 3 - la lunga e la corta.....	3
4 Il trasferimento alla Hohmann.....	4
4.1 Alcune complicazioni al trasferimento alla Hohmann.....	4
I pianeti non sempre sono allineati.....	4
Le orbite non sono circolari	4
Le orbite non sono coplanari	4
5 Lasciare un pianeta	5
6 Mettere tutto insieme – TransX piano di volo 1	5
Come iniziare.....	5
6.1 Comunicare a TransX il piano in generale	6
Dalla Terra a Marte.....	6
Dalla Terra alla Luna	6
Dalla Terra a Titano.....	6
Voyager	6
6.2 Creare un trasferimento alla Hohmann	6
Lo schema a colori di TransX.....	7
7 Partire dalla Terra	7
8 Correzioni di rotta con TransX.....	8
Quando dovrei correggere la rotta?	8
Esiste un modo più semplice per correggere la rotta?.....	8
Correggere la rotta	8
9 L'orbita a fionda gravitazionale standard (stile Pioneer)	9
9.1 Rfinire la manovra tramite accensione al Periasse	9
9.2 Fionda gravitazionale con TransX.....	9
10 L'ellisse di arrivo al pianeta gigante.....	10
Invertire il processo?	11
11 Incontri risonanti	11
11.1 Gli incontri risonanti semplici.....	11
11.2 La variante con accensione all'Apoasse	11
12 Feedback	11

1 Orbite di base

Queste sono alcune delle cose che do per scontato voi già conosciate. Probabilmente già sapete tutto, se avete pilotato una nave fino alla ISS.

- **Periasse:** È il punto più basso di un'orbita, ed è il punto in cui la vostra velocità (relativa al corpo centrale) raggiunge il massimo.
- **Apoasse:** È il punto più alto di un'orbita, ed è il punto in cui la vostra velocità (relativa al corpo centrale) raggiunge il minimo.
- **Prograde:** Direttamente davanti, lungo la tua orbita.
- **Retrograde:** Direttamente dietro, lungo la tua orbita.
- **Tutte le orbite semplici sono sezioni di cono:** Un'orbita o è ellittica, o è iperbolica.
- **Tutte le orbite semplici giacciono su un piano (una superficie piatta):** La superficie piatta passa sempre per il centro del corpo orbitato. Due corpi in orbita sono tipicamente su due diversi piani orbitali. I piani si intersecano lungo una linea.
- **Le ellissi hanno un'eccentricità da 0 ad 1:** Se l'eccentricità è vicina allo 0, l'orbita è virtualmente circolare. Più si avvicina ad 1, e più l'orbita si allunga rispetto alla sua larghezza. Le orbite ellittiche sono periodiche – ogni orbita ha un'esatta durata temporale.
- **Le orbite iperboliche hanno un'eccentricità maggiore di 1:** Tutte le orbite iperboliche sono aperte – avvicinano un pianeta da una certa distanza, gli girano intorno, e si allontanano a grandi distanze. Orbite iperboliche con bassa eccentricità fanno percorrere alla nave un ampio angolo attorno al pianeta. Orbite iperboliche con alta eccentricità sono virtualmente delle linee rette.
- **Ogni orbita ha un'energia fissa, ed un momento angolare fisso:** Parlerò di questo più avanti. L'energia è anche direttamente proporzionale alla distanza tra Periasse ed Apoasse.

2 Una descrizione condensata del sistema Solare

Il sistema Solare è formato dal Sole, e da una relativamente piccola quantità di detriti, che noi chiamiamo Pianeti. Il Sole pesa più di mille volte il peso di tutti i pianeti messi insieme. Quello che farà da sfondo ai tuoi viaggi in Orbiter sarà quindi l'immenso *pozzo gravitazionale* del Sole. Esattamente dove sei seduto in questo momento, la velocità di fuga della Terra è di circa 11,3 km/sec. Ma per sfuggire dal Sole a questa distanza è richiesta sedici volte questa energia – cioè una velocità di 44 km/sec.

A loro volta, anche i pianeti sono stati descritti come formati da Giove ed altri detriti. È quasi vero – Anche Saturno è molto grande. La Terra pesa trecento volte meno di Giove, ma è comunque il più grande pianeta con una superficie solida su cui poter atterrare.

I pianeti si muovono velocemente – La Terra viaggia intorno al Sole a 29 chilometri al secondo – una velocità che richiederebbe qualcosa come un razzo ad 8 stadi per poter essere raggiunta! L'unica ragione per cui i viaggi interplanetari sono possibili con la nostra tecnologia, è che il sistema Solare ha la forma di una pizza. Tutti i pianeti giacciono più o meno sullo stesso piano orbitale, e viaggiano nel sistema Solare nella stessa direzione. Ciò rende la velocità della Terra un vantaggio piuttosto che un ostacolo.

Il sistema Solare può essere sommariamente suddiviso in due parti – i pianeti interni ed i pianeti esterni. I pianeti interni sono Mercurio, Venere, Terra e Marte. Quelli esterni sono Giove, Saturno, Urano e Nettuno (Plutone, come al solito, non conta). I pianeti interni sono piccoli e vanno veloci. Nella loro zona, la gravità del Sole domina qualsiasi cosa. In questa regione è importante usare delle precise orbite di trasferimento per evitare incontri a velocità elevatissime.

I pianeti esterni, trovandosi più lontani dal Sole, si muovono più lentamente. Sono anche **molto** più pesanti. Questi due fatti rendono molto più semplice usare traiettorie a gravità assistita (fionda gravitazionale). Comunque, sono anche molto lontani – aspettatevi che ogni viaggio duri anni di tempo simulato, e ore al computer! Come vedrete, il loro peso vi aiuterà a fermarvi quando li raggiungerete, quindi (per fortuna!) non sono essenziali accurati trasferimenti alla Hohmann.

Giove è quasi in una categoria a parte – le sue dimensioni lo rendono il waypoint ideale di un bel numero di viaggi. Una spinta (slingshot) ricevuta da parte di Giove vale più di un paio di stadi pieni di carburante.

3 I principi del volo efficiente

3.1 Tre esperimenti di orbita ellittica

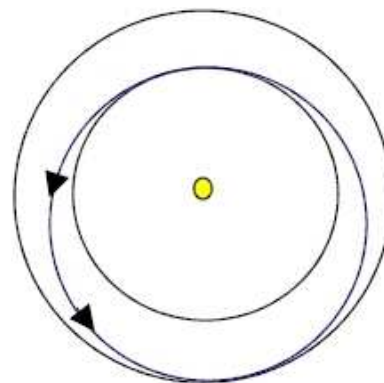
Probabilmente hai già diversi scenari sul tuo computer in cui c'è un Deltaglider in orbita terrestre bassa (LEO – Low Earth Orbit) – magari attraccato alla ISS. Supponi di prendere uno di questi Deltaglider e di tenere accesi a lungo i motori in Prograde. La tua orbita diverrebbe gradualmente sempre più ellittica. Supponiamo di tener accesi i motori finché il tuo Orbit MFD non ti indichi che per completare un giro di quest'orbita ellittica ti servono dai 100.000 ai 150.000 secondi. Se vuoi fare questi “esperimenti” per davvero, imposta un'ellisse simile, e salva lo scenario.

Esperimento 1 - modificare l'inclinazione

Arriva fino all'Apoasse, usando con cura l'accelerazione temporale. Poi (sempre attentamente!) cambia la tua inclinazione relativa alla ISS di 20°. Devi fare attenzione perché non ci vorrà molto tempo. Quindi torna di nuovo al tuo Periasse, e una volta raggiunto, riporta nuovamente l'inclinazione relativa a 0°. Ciò richiederà un'accensione molto, molto più lunga – probabilmente 30 volte più lunga della precedente.

Risultato: Il carburante richiesto per cambiare l'inclinazione è direttamente proporzionale alla tua velocità angolare intorno ad un pianeta. Può essere molto più conveniente cambiarla all'Apoasse, piuttosto che al Periasse.

1° principio del volo spaziale: è meglio cambiare l'inclinazione quando si è lenti – il carburante richiesto è proporzionale alla componente di velocità intorno al pianeta.



Esperimento 2 - orbita di fuga

Ora arriva all'Apoasse e salva lo scenario. Accendi i motori in Prograde e cronometra quanto tempo ti serve per raggiungere la velocità di fuga (la tua orbita diventa ellittica). Usando lo stesso scenario salvato, prova a fare la stessa cosa sulla stessa orbita, ma stavolta al Periasse, e cronometra quanto ti ci vuole da lì.

Risultato: Questa volta è l'accensione al Periasse ad essere la più breve, ed anche di molto. Il carburante richiesto per incrementare l'energia orbitale è inversamente proporzionale alla tua velocità.

2° principio del volo spaziale: Cambia l'energia della tua orbita quando ti stai muovendo velocemente. L'incremento di energia è proporzionale alla tua velocità.

Esperimento 3 - la lunga e la corta

C'è un altro risultato di cui ti voglio parlare. Supponi di creare due scenari, uno con un'orbita ellittica che si estende dalla LEO a 50.000 km, ed un altro in cui l'orbita va dalla LEO a 100.000 km. Supponi di raggiungere l'Apoasse su entrambe le orbite. Quale orbita ti permette di aumentare l'altezza del Periasse con l'accensione più breve?

La risposta in questo caso è che l'orbita più lunga è efficiente il doppio rispetto all'orbita più corta. Quello che stai facendo è cambiare momento angolare, e l'efficienza di tale processo è direttamente proporzionale alla tua distanza.

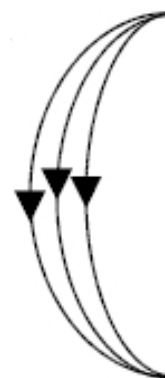
3° principio del volo spaziale: È meglio modificare l'altezza del tuo Periasse (o la sua posizione) quando sei lontano – il costo è inversamente proporzionale alla tua distanza.

Questi tre principi ti dicono praticamente tutto quello che devi sapere per pianificare voli efficienti. C'è solo un ultimo principio di cui ti voglio parlare.

4° principio del volo spaziale: Solo l'accelerazione in Prograde cambia la tua energia.

Cambiare l'energia/dimensione della tua orbita richiede un'accensione dei motori lungo l'asse di movimento. Dare motore ad angolo retto rispetto a quest'asse cambia la tua direzione ma non cambia la tua velocità, quindi, neanche la tua energia.

Mettiamo insieme tutti questi principi, ed immaginiamoci alcune manovre di base.



4 Il trasferimento alla Hohmann

L'inventore del *trasferimento alla Hohmann* era un matematico – Dr. Walther Hohmann, che si rese conto della sua efficacia già nel 1925, ben prima che qualcuno fosse realmente in grado di utilizzare una cosa del genere. Forse si sorprenderebbe ad apprendere che il suo trasferimento è ora la più conosciuta tra tutte le manovre dei veicoli spaziali.

Nella sua forma più basilica, il trasferimento alla Hohmann è una semplice ellisse che connette due orbite. Per viaggiare dal pianeta interno a quello esterno tutto quello che devi fare è aumentare un po' la velocità. La nave devierà naturalmente verso l'esterno, e, se la manovra è fatta bene, incontrerà l'orbita dell'altro pianeta mezza orbita più avanti. Resterà quindi da far combaciare le velocità della nave e del pianeta, ed è fatta.

Se fosse davvero così semplice, la scienza spaziale non sarebbe la scienza spaziale, tuttavia è un buon inizio. Vediamo come possiamo interfacciarla con i nostri principi di navigazione.

Per prima cosa, tutte e due le manovre che la nave deve fare sono puramente in Prograde. Ciò le rende molto efficienti (in base al 4° principio) nell'incrementare l'energia dell'orbita della nave, e quindi la sua dimensione. La prima manovra innalza l'Apoasse fino ad incontrare l'orbita del pianeta obiettivo, e la seconda manovra (al nuovo Apoasse) innalza il Periasse. Quindi, già sappiamo che la manovra è molto efficiente in quello che vuole ottenere.

Inoltre, la manovra fa un eccellente uso dell'esistente moto di entrambi i pianeti. Tutti e due i pianeti si muovono già nella stessa direzione in cui vuoi andare, ed in tutti e due i casi il cambio di direzione e di velocità è di lieve entità. Questo è ciò che rende il trasferimento alla Hohmann una buona manovra.

4.1 Alcune complicazioni al trasferimento alla Hohmann

I pianeti non sempre sono allineati

Puoi partire dalla Terra in qualsiasi momento per raggiungere l'orbita di Marte. Ma l'orbita di Marte è lunga circa 805 milioni di chilometri. Raggiungere l'orbita di Marte non sarà molto utile se Marte stesso si trova all'altra estremità dell'orbita, a diverse centinaia di milioni di chilometri di distanza.

Un oculato trasferimento alla Hohmann sarà quindi sincronizzato in maniera tale da far incontrare la nave con Marte, all'arrivo sulla sua orbita, e non sarà semplicemente una linea matematica tracciata nello Spazio. Questo richiede il calcolo di una finestra di lancio. Se inizi un trasferimento alla Hohmann nel momento esatto, ti incontrerai con Marte quando arriverai sulla sua orbita. Il momento giusto per il lancio è di norma quando Marte è appena davanti alla Terra sulla sua orbita, ed è giusto sul punto di essere superato da essa. Queste finestre di lancio si vengono più o meno ad aprire (nel caso di Marte) circa ogni 20 mesi.

Le orbite non sono circolari

Le orbite dei pianeti non sono circolari. Ciò potrebbe sembrare un grosso ostacolo, ma solitamente non si rivela troppo problematico in pratica. Almeno, non paragonato al prossimo problema.

Le orbite non sono coplanari

Questo causa problemi. La ragione la si può vedere osservando il trasferimento alla Hohmann da un angolo diverso. Se parti da un certo pianeta ad un certo momento, tutte le orbite di una data dimensione che partono da là, convergono sullo stesso punto a 180° dal punto di partenza. Il risultato è abbastanza simile a quello illustrato qui a destra (N.d.T.: manca l'immagine nel pdf originale).

In pratica, ciò significa che un trasferimento alla Hohmann puro, ad un certo punto durante il viaggio, deve includere anche una manovra di allineamento dei piani orbitali. A volte questo viene fatto, ma molto spesso una soluzione migliore è quella di non fare un trasferimento alla Hohmann perfetto. Se si fa una manovra leggermente imperfetta, l'obiettivo non verrà più intercettato a 180° di differenza rispetto al lancio, ed una manovra di allineamento dei piani può essere fatta dall'inizio. Veniamo in questo aiutati anche dal fatto che le orbite dei pianeti non sono completamente circolari.

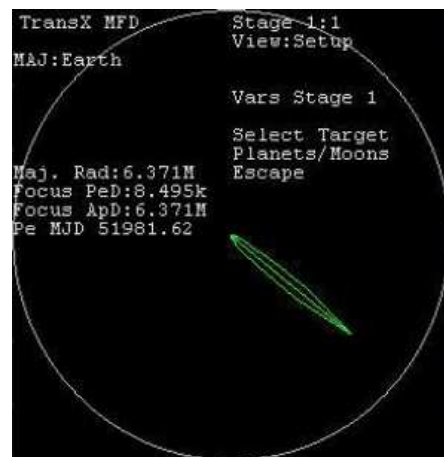
Un'altra cosa che aiuta veramente è che le orbite dei pianeti sono già effettivamente quasi coplanari, e di solito si riesce facilmente ad effettuare un modesto cambiamento di piano orbitale.

Tenendo queste informazioni a mente, non è troppo difficile pianificare un trasferimento alla Hohmann (o *quasi* alla Hohmann) di successo, ma prima c'è da imparare un'altra manovra essenziale.

5 Lasciare un pianeta

Esattamente come per un viaggio interplanetario, c'è un modo giusto ed uno sbagliato anche per lasciare un pianeta. Il modo giusto è di usare il 2° principio del volo spaziale, e regolare l'energia mentre ci si muove veloci. Di conseguenza vogliamo fare questo quando disponiamo di quanta più energia possibile in forma di velocità, e quanto meno possibile, nei limiti, in forma di altitudine. In poche parole, il metodo migliore è accendere i motori direttamente dalla LEO. Qualsiasi altro metodo, anche se a volte può funzionare, non è assolutamente altrettanto efficiente.

Facendo così saremo ricompensati dalla cosa più simile che c'è ad un pranzo gratis, in termini di viaggio spaziale. Questo è ciò che ottieni quando parti da un'altitudine dove la Velocità di Fuga è 11,2 km/sec.



Velocità di fuga	+45 m/sec	+180 m/sec	+405 m/sec	+2,56 km/sec
Velocità all'infinito	1 km/sec	2 km/sec	3 km/sec	8 km/sec

La ricompensa è grande, specie all'inizio. Appena un po' più di velocità extra quando siamo bassi vicino alla Terra, si trasforma in una enorme velocità quando siamo molto lontani. Questo è il motivo per cui la NASA effettua la maggior parte dei suoi lanci interplanetari in LEO, e così dovresti fare anche tu.

Più grande e pesante è il pianeta a te vicino, maggiore è quest'effetto.

Raggiungere un pianeta è semplicemente il contrario di lasciarlo, e dovremmo quindi rallentare nello stesso punto - vicino alla superficie. Ciò naturalmente è vero se intendi usare il freno aerodinamico (Aerobrake) al tuo arrivo, ma avrebbe senso anche se volessi usare i retrorazzi – quanto più osi avvicinarti alla superficie, tanto più è efficiente a quel punto accendere i motori per rallentare.

C'è solo un problema pratico a questa modalità di effettuare le partenze – devi calcolare la corretta iperbole per partire nella direzione voluta. Ciò è abbastanza noioso da fare a mano, ma gli MFD come il TransX automatizzano questi calcoli, e rendono molto semplice questo tipo di pianificazione.

6 Mettere tutto insieme – TransX piano di volo 1

A questo punto sappiamo tutto quello che c'è da fare per creare un piano di volo dalla Terra ad un altro pianeta.

1. Calcolare un possibile trasferimento alla Hohmann, includendo ogni modifica necessaria ad allineare i piani orbitali. E trovare poi un'appropriata finestra di lancio.
2. Una volta fatto questo, dovremo lasciare la Terra in una data direzione, ad una data velocità, in un dato momento. Quindi dobbiamo pianificare un'orbita iperbolica che ci permetta tutto questo.
3. Quando arriviamo al pianeta prescelto, vogliamo passare rasente alla superficie, per tre motivi:
 - Dal punto di vista del consumo di carburante è efficiente accendere i retrorazzi quando sei basso, e la velocità è alta (per il 2° principio)
 - Potresti fare l'Aerobraking
 - È figo essere così precisi.

Come iniziare

TransX suddivide ogni volo in diverse fasi o stadi (stages) – stadi in cui dominano differenti corpi celesti. Quando TransX viene lanciato la prima volta, visualizzerà la tua attuale traiettoria intorno al corpo celeste che al momento è dominante rispetto alla tua nave.

Il momento migliore per pianificare un volo è prima del decollo. Molto spesso c'è bisogno di trovare una finestra di lancio durante le fasi iniziali.

6.1 Comunicare a TransX il piano in generale

Per impostare uno schema molto basico di volo, devi dare a TransX una semplice sequenza di obiettivi (Target) da puntare. Per farlo devi quindi selezionare la variabile "Select Target".

Questa variabile "Select Target" normalmente è la prima di ogni stadio. Se non la dovessi trovare, è nella vista "Setup", e può essere selezionata con i pulsanti VAR e -VR ("SHIFT-V" e "B").

Esaminiamo qualche esempio.

Dalla Terra a Marte

Il primo stadio sarà centrato sulla Terra. Come target scegli "Escape" e premi FWD (SHIFT-F). Verrà creato un nuovo stadio, centrato sul Sole.

Il secondo stadio è centrato sul Sole, ed ora hai una lista da cui scegliere i pianeti! Scegli Marte (Mars). Per ora non devi fare altro, ma se vuoi puoi ancora premere FWD. Questo creerà un nuovo stadio, centrato questa volta su Marte.

Nel terzo stadio, non scegliere nessun target.

Dalla Terra alla Luna

Il primo stadio è centrato sulla Terra. Scegli "Moon".

Il secondo stadio è centrato sulla Luna. Non scegliere nessun target.

Dalla Terra a Titano

Il primo stadio sarà centrato sulla Terra. Scegli "Escape".

Il secondo stadio è centrato sul Sole. Scegli "Saturn".

Il terzo stadio è centrato su Saturno. Scegli "Titan".

Puoi creare un quarto stadio, centrato su Titano.

Voyager

Un viaggio complesso come il grand tour del Voyager, che fa uso di multiple fionde gravitazionali, potrebbe finire per avere una lunga serie di stadi e di target.

Earth->Escape, Sun->Jupiter, Jupiter->Escape, Sun->Saturn, Saturn->Escape, Sun->Uranus, Uranus->Escape, Sun->Neptune, Neptune->?

In questa maniera puoi impostare uno schema di massima per qualunque volo. In molti casi non c'è bisogno di creare tutti gli stadi all'inizio – potrai sempre aggiungerli più avanti.

In questo caso, stiamo solo facendo un trasferimento alla Hohmann standard, quindi all'inizio ci servono solo due stadi. Il primo centrato sulla Terra con target "Escape", e l'altro centrato sul Sole, con target "Mars". Vai avanti e crealo!

6.2 Creare un trasferimento alla Hohmann

Il trasferimento alla Hohmann vero e proprio deve essere creato nello stadio centrato sul Sole. Questo è il processo che uso.

- Vai allo stadio centrato sul Sole. SHIFT-F. Select View – Plan Eject
- Scegli la variabile "Prograde Vel", ed aumentane il valore. Vedrai una linea gialla che indica l'orbita ipotetica.

Lo schema a colori di TransX

La tua orbita (o qualsiasi altra orbita che “passa” allo stadio seguente) è rappresentata in verde.

Le orbite dei pianeti sono in blu (una recente modifica). Le orbite ipotetiche sono linee tratteggiate gialle. Le linee di intersezione tra due piani orbitali sono grigie, così come è grigio il cerchio che indica la superficie di un pianeta.

Aumenta la dimensione dell'orbita gialla fino a che questa non tocca l'orbita blu del pianeta target. Ne aumenti la dimensione aumentando il valore della variabile “Prograde Vel”.

Quando lo avrai fatto, vedrai due linee tratteggiate gialle, e su una riga dell'MFD ci sarà scritto “Cl. App. (rough)”, che sta per “Closest Approach”, cioè “avvicinamento più prossimo, più vicino”. Questo valore è espresso in metri: k=chilometri, m=megametri (1.000 km), G=Gigametri (1 milione di km), T=Terametri (1 miliardo di km). Questa linea fornisce una stima approssimata di quanto passerai vicino al pianeta target. Il tuo reale passaggio sarà normalmente più vicino di quanto indicato, perché questo valore non considera la gravità del pianeta.



Tipicamente le due linee gialle tratteggiate saranno ad una certa distanza l'una dall'altra. Questo perché TransX assume che la tua partenza sarà immediata. Devi trovare un'appropriata finestra di lancio. Seleziona la variabile “Eject Date” e modificala. Vedrai ruotare l'orbita gialla e cambiare la distanza di avvicinamento più vicino (Cl. App.). Muovila fino a che non raggiungi un valore che ti sembra il minimo possibile. Questa è la tua finestra di lancio! L'immagine qui sopra del TransX ti mostra come appare lo strumento quando indica la finestra di lancio.

A questo punto potresti volerla smettere di pianificare, uscire da Orbiter, ed editare manualmente uno scenario, impostandolo su pochi giorni prima della tua finestra di lancio selezionata. Questo renderebbe la tua attesa molto più breve.

Come puoi vedere, TransX ancora pensa che mancherai Marte di circa 7 milioni di chilometri. Questo succede perché finora non ci siamo curati affatto delle diverse inclinazioni relative tra Terra e Marte. Possiamo curarcene adesso.

Scegli “Ch. Plane Velocity”. Aggiungi un po' di velocità. Vedrai cambiare un po' la linea grigia dell'inclinazione. Allineala con le due linee gialle. Vedrai scendere significativamente il valore di avvicinamento più vicino.

Potrai regolare finemente il tuo avvicinamento giocando un po' con le variabili. Non c'è bisogno di arrivare a valori perfetti in questo stadio – in ogni caso dovrai fare una correzione di metà percorso più avanti (mid course correction).

La variabile finale “Outward velocity” è utile quando vuoi partire un po' prima o un po' dopo del momento ottimale della tua finestra di lancio. Valori positivi ti permettono di partire più tardi, valori negativi ti permettono di partire prima.

Quando sei soddisfatto del tuo setup, hai pianificato con successo la parte del tuo viaggio che riguarda il trasferimento alla Hohmann. Ora dobbiamo pianificare la partenza dalla Terra.

7 Partire dalla Terra

Mentre pianificavi il tuo trasferimento alla Hohmann, hai effettivamente preso delle decisioni su data, direzione e velocità della tua partenza dalla Terra. Oltre a queste informazioni, mancano solo altri due dati perché TransX possa pianificare un'appropriata orbita di partenza:

1. La distanza dal Pe (Periasse) al nucleo del pianeta. Per il 2° principio (più veloce è meglio), il punto giusto è appena sopra l'atmosfera. A circa 6.445M.
2. La seconda cosa da pianificare è la direzione della tua iperbole di fuga. L'iperbole può essere ruotata intorno al vettore di fuga usando questa variabile. La maggior parte dei valori dovrebbe andar bene.

La rotta visualizzata dà un'indicazione della direzione in cui partire, ma è accurata solo quand'è arrivata l'ora di effettuare il lancio.

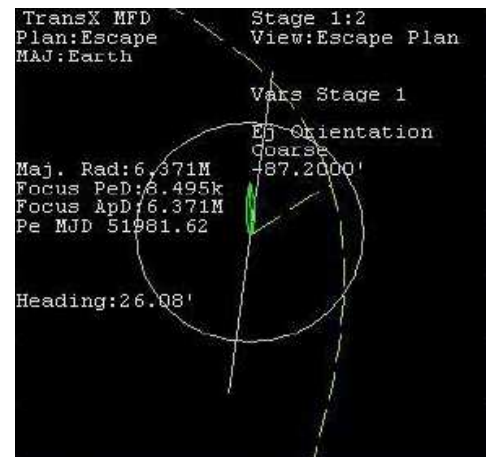
Il momento giusto per partire è quando la tua posizione è appena un po' ad Ovest del piano orbitale in cui vuoi trovarti. TransX è dotato di una proiezione equatoriale per aiutarti a valutare questo momento. L'immagine seguente è una proiezione equatoriale (Polo Nord in alto, Equatore che attraversa il centro) e mostra che tra poco la tua posizione attuale intersecherà (a causa della rotazione terrestre) il piano dell'orbita che vuoi raggiungere. È un buon momento per decollare.

A questo punto la direzione per il decollo sarà di 26°. Questo valore non tiene conto della rotazione terrestre, quindi qualche grado più ad Ovest, magari 21°, dovrebbe andare ben e.

Una volta decollato, il valore di Heading verrà rimpiazzato da quello di inclinazione relativa tra la tua orbita ed il target. Ciò ti permette di regolare la direzione durante il decollo per allinearti perfettamente con la tua orbita target.

Se tutto va bene, dovresti arrivare in un'orbita terrestre bassa quasi coplanare alla tua orbita ipotetica pianificata. Puoi perfezionare la tua inclinazione facendo le appropriate accensioni dei motori quando attraversi la linea grigia dell'inclinazione – proprio come faresti con l'Align Orbit MFD.

Come ti avvicini al Periasse dell'orbita pianificata, puoi procedere all'accensione in Prograde per inserirti precisamente in traiettoria. Sei in viaggio!



8 Correzioni di rotta con TransX

Una volta che sarai arrivato su una rotta vicina a quella pianificata, è meglio allontanarti dalla Terra. Anche se gli angoli saranno leggermente sbagliati, sarà più conveniente riaggiustarli quando la tua velocità sarà un po' diminuita (la maggior parte degli errori non di energia dovrebbero essere aggiustati quando si va piano!). Come ti allontani, TransX sentirà quando non sarai più sotto l'influenza della Terra, ed eliminerà il primo stadio (stage) di volo. Il primo stadio diventerà quello centrato sul Sole. Allontanati ancora per un po', finché non sarai sicuro di aver lasciato definitivamente gli ultimi residui di influenza terrestre dietro di te. Ora è il momento di fare una correzione di rotta.

Quando dovrei correggere la rotta?

Fino ad un certo livello, lo decidi tu. Comunque, quanto più a lungo lasci sviluppare le conseguenze di un errore, tanto maggiore sarà poi la correzione da fare. Una buona regola empirica è quella di correggere la traiettoria ogni volta che la distanza rimanente tra te ed il tuo target si dimezza, fino a che non sei sicuro della tua direzione. Questo è tutto quello che ti serve, più un po' di pratica.

Esiste un modo più semplice per correggere la rotta?

Forse. Se la correzione di rotta che devi fare è molto esigua, puoi anche lasciar perdere la sua pianificazione, ed usare semplicemente gli RCS in modalità lineare in varie direzioni finché non sei soddisfatto della nuova rotta.

Correggere la rotta

Clicca sul pulsante "VW" del TransX e cambia la vista su "Manoeuvre". Usa la variabile "Manoeuvre mode" per attivare la modalità omonima. Potrai sempre resettare la modalità di manovra deselectando e riselectando questa variabile.

In seguito, potrai creare una manovra usando quattro variabili. Puoi impostare la data, e le velocità di Prograde, di Outward e di cambio piano, proprio come si fa nell'Eject Plan. Puoi aggiustare la manovra osservando la variabile "Closest Approach" finché non ti soddisfa.

Se apri un altro TransX sul secondo MFD, puoi vedere al volo gli effetti delle tue modifiche allo stage corrente ripercuotersi sugli stage successivi.

Quando sarai soddisfatto dell'accuratezza della manovra, clicca ancora su "VW" e passa alla visuale "Target". Modifica l'orientamento della tua nave, facendo collimare l'indicatore a "x" col centro dell'MFD, ed effettua l'accensione, tenendo d'occhio il valore rimanente di Delta-V. Quando sarà vicino allo zero, avrai terminato la tua correzione di rotta pianificata! Spegni il "Manoeuvre mode" per vedere la tua rotta attuale aggiornata.

Questa modalità è inoltre utile per pianificare altri tipi di accensioni più prolungate. Ogni volta che vorrai usare TransX per pianificare una modifica ad un'orbita esistente, la vista "Manoeuvre" è possibilmente la giusta via da seguire.

9 L'orbita a fionda gravitazionale standard (stile Pioneer)

La tradizionale manovra di fionda gravitazionale, altrimenti detta "a gravità assistita", ricorda molto da vicino ciò che intercorre tra una mazza ed una palla da baseball. Dal punto di vista della mazza, la palla semplicemente rimbalza via, ed in effetti parte dell'energia viene dispersa in quanto la palla non è perfettamente elastica. Ma la palla comunque guadagna una gran quantità di energia. Perché? Perché la mazza si muove.

Una tipica fionda gravitazionale è la stessa cosa. Un pianeta fa la parte della mazza, e la nave è la palla. Invece di un rimbalzo, c'è un'orbita iperbolica. Ma l'effetto è lo stesso. Dal punto di vista del pianeta, la nave arriva da una direzione e se ne va in un'altra alla stessa velocità – il "rimbalzo" nella fionda gravitazionale è virtualmente perfettamente elastico. E dato che il pianeta è in movimento, la nave durante questo processo guadagna molta energia.

Ci sono due criteri che fanno sì che un pianeta sia indicato per le fionde gravitazionali. Uno è che sia abbastanza pesante e denso da curvare il percorso della nave in un angolo misurabile. Il secondo è che il pianeta stesso si muova ad una buona velocità. L'esame di questi due criteri combinati insieme significa che è di gran lunga Giove il miglior pianeta da sfruttare per queste manovre – è veramente grande e pesante, e si muove parecchio velocemente. Saturno viene al secondo posto, essendo ancora abbastanza pesante, sebbene inizi a non essere più così veloce. Il candidato più plausibile per il terzo posto è proprio la Terra. Per la fionda gravitazionale in sé è un po' piccolo, anche se è il più grande tra i pianeti terrestri, la sua densità molto elevata quasi controbilancia il suo basso peso, ed ha il vantaggio di muoversi velocemente. Anche Venere ha i suoi usi. Marte è troppo piccolo per qualsiasi cosa ed anche Mercurio è piuttosto piccolo, e dato che quest'ultimo si trova lungo una rotta che non porta da nessuna parte, ci si fa ricorso proprio quando non se ne può fare a meno. Urano e Nettuno sono lenti, ma pesanti, quindi una fionda da quelle parti altera molto bene la direzione, ma ha meno impatto sull'energia. Plutone, come potrai già aver indovinato, è del tutto inutile.

Questo tipo di manovre a gravità assistita hanno bisogno di molta accuratezza. Quello che vuoi ottenere è un unico percorso che ti porti a sfiorare un pianeta, che a sua volta ti rilancia lungo una precisa rotta – per raggiungere la tua prossima destinazione. C'è sempre una sola traiettoria che ti farà fare questo. Traiettorie vicine, raggiungeranno tutte dei risultati diversamente spettacolari e molto probabilmente inutili.

Le incredibili caratteristiche di Giove significano che una fionda intorno a Giove sarà una componente comune a molti piani di volo. Se per esempio vorrai mai andare verso il Sole, la rotta più efficiente che ti farà risparmiare più carburante è quella che passa prima da Giove.

9.1 Rifinire la manovra tramite accensione al Periasse

Nel momento in cui passi intorno al pianeta selezionato per la fionda, la tua velocità al Periasse può aumentare considerevolmente, arrivando anche a punte di 50 km al secondo nel caso di Giove. Queste alte velocità fanno sì che il Periasse del passaggio sia il punto più indicato per aggiungere (o sottrarre) energia orbitale mediante l'uso dei motori.

9.2 Fionda gravitazionale con TransX

Se selezioni un obiettivo di fuga da un pianeta, e questo pianeta non è il punto iniziale di partenza, TransX selezionerà il "Plan:Slingshot" per lo stage corrente, ed imposterà una manovra di *sling* direttamente per lo stage successivo.

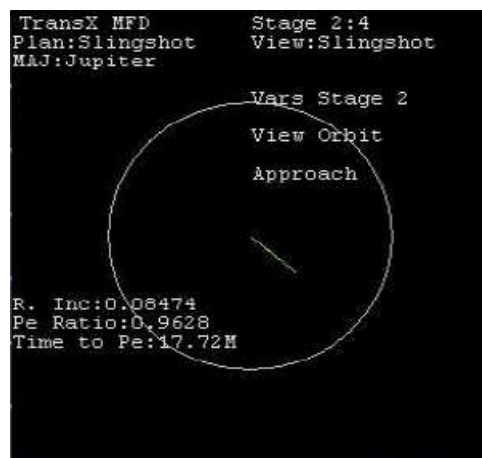
Lo Sling Direct Plan è abbastanza simile all'Eject Plan, tranne per il fatto che usa variabili diverse. Ti viene proposto di dirigere il percorso della tua nave usando angoli, piuttosto che impostare tre diverse velocità. Il tuo percorso viene scelto in questo modo per riflettere la probabile assenza di lunghe accensioni dei motori quando passerai vicino al pianeta. Usare gli angoli aiuta a renderti conto di cosa puoi fare con la velocità che hai.

Dopo aver selezionato i tuoi angoli, devi anche controllare che la tua traiettoria riesca a farti passare il pianeta in modo sicuro e senza rischi. Puoi far questo nello stage "Sling Direct", guardando l'omonima vista. Questa vista include il rapporto intercorrente tra il tuo Periasse sul pianeta ed il raggio del pianeta stesso (*Pe Ratio*). Valori maggiori di 1 significano che riuscirai a passarlo in modo sicuro. Valori minori di 1 significano il

contrario! Potresti dover lasciare anche un po' di spazio per l'atmosfera, quindi non esagerare a tenerlo troppo basso.

Nella vista View:Slingshot dello stesso Plan:Slingshot c'è un potente strumento per misurare l'approccio. Il cerchio grigio rappresenta il disco del pianeta, e le due linee nel diagramma sono il Periasse della tua orbita attuale (o di quella raggiungibile con una manovra), e quello dell'orbita desiderata. Per ricevere la spinta ottimale dal pianeta sulla tua rotta pianificata, devi mantenere allineate queste linee. Per allinearle perfettamente, il valore di "Pe Ratio" (il rapporto delle distanze dal nucleo del pianeta) deve essere 1, e l'inclinazione relativa dovrebbe essere 0.

Per pianeti grandi come Giove, questo processo di allineamento dovrebbe già iniziare quando si è ancora ad una grande distanza. Questo screenshot è tratto dallo scenario GT6 del TransX, incluso nell'installazione standard di Orbiter (N.d.T.: il riferimento è al TransX del 2003). In questo momento mi trovo ancora a circa 6 mesi di distanza da Giove. Conviene allinearsi in anticipo nel caso di Giove.



Se le linee sono perfettamente allineate, passerai precisamente nel punto previsto per la fionda gravitazionale con un'accuratezza dell'ordine di semplici decine di chilometri, o anche meno. L'accuratezza delle manovre a gravità assistita è altrettanto importante di quella richiesta da un lancio regolare.

10 L'ellisse di arrivo al pianeta gigante

Ecco un'altra delle manovre fatte dalla NASA che può essere emulata – questa ti permette di atterrare sulle Lune dei pianeti giganti. Facciamo un esempio assumendo di essere in viaggio verso Giove.

Il trucco sta nella prima manovra. Ti allinei per un passaggio a bassa quota, vicino alla superficie di Giove. Dal momento che la massa di Giove equivale a 300 volte la massa terrestre, andremo molto veloci – circa 60 km/sec. nel punto di approccio più vicino. Questa velocità significa che il Periasse di Giove è un buon punto per regolare la nostra energia orbitale. Se stiamo raggiungendo Giove con una velocità di 7 km/sec., ci basterà un'accensione di soli 400 m/sec. per perderla completamente e venire catturati in un'orbita Gioviniana. È l'applicazione del 2° principio del volo spaziale – Cambia l'energia (la velocità) della tua orbita quando ti stai muovendo velocemente. Grazie a questo principio, non c'è nulla di male ad incontrare Giove ad alte velocità – una volta arrivati, regolare la propria orbita è molto efficiente dal punto di vista dei consumi.

Ma c'è ancora dell'altro a proposito di questa manovra. Quando sei ancora ad una certa distanza da Giove, puoi scegliere da quale lato del pianeta fare il tuo passaggio. **Fà in modo che il tuo Periasse sia anche il punto in cui attraversi il piano orbitale della tua luna target.** Se ci riesci, quando farai la retroaccensione, creerai una lunga orbita ellittica. E all'altro lato, all'Apoasse, ci sarà l'altro punto in cui incrocerai il piano orbitale della tua luna target!

Quindi la seconda parte della manovra sarà di continuare lungo questa ellisse verso l'Apoasse. Una volta lì, dovrai fare due manovre.

1. Allinea l'inclinazione con la tua orbita target. Al top di questa lunga ellisse, avrai una bassa velocità, e l'accensione sarà economica.
2. Alza il tuo Periasse fino a farlo combaciare con la luna target. Anche quest'accensione sarà relativamente economica.

Un giorno o l'altro forse ci sarà una modalità di questo MFD che permetterà di combinare queste due manovre in una singola accensione.

La terza parte di questa manovra consiste nel continuare lungo l'orbita, ed una volta arrivato al nuovo Periasse, accendere i motori in Retro per ridurne la lunghezza. Puoi usare sia il Sync Orbit MFD di default che il TransX per allinearti all'incontro vero e proprio con la luna nell'orbita successiva.

Per vedere le manovre richieste nel TransX, tutto quello che devi fare è impostare la luna come prossimo target. A questo punto verrà visualizzata la linea dell'inclinazione.

Invertire il processo?

Questa manovra potrebbe essere ripetuta al contrario per pianificare un viaggio di ritorno verso la Terra. Comunque, al momento è molto difficile pianificarla al contrario – questo potrebbe facilmente essere il soggetto di un futuro aggiornamento a TransX.

11 Incontri risonanti

Non c'è al momento nessun piano di supportare queste manovre in TransX, anche se la NASA le fa, e sono manovre decisamente astute.

11.1 Gli incontri risonanti semplici

Se un unico passaggio intorno ad un pianeta non ti fornisce sufficiente spinta per una fionda gravitazionale, puoi provare con più passaggi. Il trucco sta nell'inserirsi in un'orbita che sia *risonante* con quella del pianeta da incontrare. Se, per esempio, dopo un passaggio intorno alla Terra entri in un'orbita il cui periodo è di 2 anni, la Terra compirebbe due orbite intere per ogni orbita fatta dalla tua nave. Ciò significa che quando sarai nuovamente nello stesso punto in cui incontrasti la Terra la prima volta, ci troverai ancora la Terra stessa. Quindi potrai sfruttare di nuovo un passaggio intorno ad essa, e magari muoverti verso una *risonanza* differente, forse 3:2 o 3:1, che permetterebbe un altro incontro nello stesso punto in un momento successivo. Saltando da una risonanza all'altra, puoi ripetutamente incontrare un pianeta nello stesso punto e cambiare progressivamente la tua orbita in qualcosa di molto diverso. La NASA ha ripetutamente usato questa tecnica con le lune di Giove durante il *grand tour* del Galileo.

11.2 La variante con accensione all'Apoasse

Se sei in un'orbita coplanare col tuo target, ed anche quasi risonante con esso, c'è ancora un altro trucchetto da sfruttare.

1. Incontra il pianeta, e lascialo in una direzione più o meno Prograde.
2. Al tuo Apoasse, abbassa di poco il Periasse. Pianifica di farlo in modo tale da reincontrare lo stesso pianeta, ma in un punto diverso, e ad un agolo più accentuato.
3. Quindi incontri di nuovo il pianeta, ma ad una velocità molto maggiore, dato il cambiamento di angolo. Riportandoti in Prograde, aumenti in maniera significativa l'energia della tua orbita. O puoi usare questa energia extra per altri scopi.

Questo processo può servire per far crescere le dimensioni dell'orbita (con accensioni Retro all'Apoasse) o farle diminuire usando il procedimento inverso.

È previsto che un giorno TransX supporterà entrambe queste manovre risonanti...

12 Feedback

Qualsiasi commento va inviato a duncan.sharpe@pixel-21.co.uk

Duncan Sharpe novembre 2003

Nota del traduttore: La versione originale di questo tutorial è stata scritta a novembre 2003.

Nel frattempo lo sviluppo di TransX è continuato, ed alcune funzionalità qui trattate (o loro descrizioni) potrebbero non trovare riscontro nella sua ultima versione, inclusa di default nell'attuale release ufficiale di Orbiter (2010 P1 – Ver. 100830), cioè TransX 3.14.

Ripley, febbraio 2011

www.tuttovola.org – <http://orbiteritalia.forumotion.com/forum.htm>

Per approfondire – da Wikipedia

http://it.wikipedia.org/wiki/Fionda_gravitazionale

http://it.wikipedia.org/wiki/Pozzo_gravitazionale

http://it.wikipedia.org/wiki/Trasferimento_alla_Hohmann

http://it.wikipedia.org/wiki/Pianeti_terrestri

<http://it.wikipedia.org/wiki/Delta-v>