Opis

Dokument ten zawiera opisy kolejnych slajdów; informacje które nie zmieściły się na slajdach. Należy go czytać równolegle ze slajdami o tytułach odpowiadających tytułom działów w tym dokumencie.

Dylatacja.sce, to skrypt Scilaba, środowiska obliczeniowego. Skrypt liczy zadanie opisane na ostatnich slajdach, związane z dylatacją czasu. Wystarczy otworzyć plik w Scilab'ie, a następnie, w edytorze Scilaba, odkomentować interesujące nas fragmenty (komentarz to "//") i wybrać opcję Execute → load into Scilab. Wyniki obliczeń pojawią się w głównym oknie Scilaba. Można oczywiście zmieniać dane skryptu, na przykład masę ciała przy dylatacji grawitacyjnej, bądź odległość do pokonania, przy dylatacji związanej z prędkością. Zapis 5.3e3 oznacza $5.3 * 10^3$, czyli 5300.

Czym jest orbita - fizyka orbity

Ciała na orbicie kołowej są w ruchu zwanym *ruchem po okręgu*. Aby ruch po okręgu nastąpił, należy nadać ciału prędkość styczna. Prędkość styczna jest przyczyną powstania siły dośrodkowej. W przypadku yoyo, siłą dośrodkową jest naciąg nici, i to ta siła powoduje odchylenie trajektorii na kształt kola. Podczas ruchu, wytwarza się również pozorna siła odśrodkowa, o tej samej wartości i kierunku, co siła dośrodkowa, lecz o przeciwnym zwrocie. Siła ta daje uczucie nieważkości.
W przypadku yoyo, nieważne jaką prędkość styczną nadamy, zawsze wytworzy się odpowiednia dla niej siła naciągu, która będzie utrzymywała yoyo w ruchu po okręgu.

Niska orbita okołoksiężycowa

Tutaj, za ruch po okręgu odpowiedzialna jest siła grawitacji, która odchyla tor ciała o pewnej prędkości i to ona jest siłą dośrodkową (poprzednio był to naciąg). Siła grawitacji na danej wysokości jest **stała**, bez względu na wytworzoną prędkość, a nie zmienna (samodostosowawcza), tak jak siła naciągu.
Aby ruch na orbicie nastąpił musimy nadać statkowi prędkość styczna, która spowoduje, że nasz ruch będzie stale zakrzywiany przez siłę grawitacji. Jako ze siła grawitacji jest stała, i nie może być modyfikowalna tak jak siła naciągu poprzez zwiększanie prędkości, to aby ruch był kołowy, wartość tej prędkości musi być dostosowana tak, aby siła dośrodkowa przez nią wytworzona była równa stałej sile grawitacji. Inaczej - Nasza siła dośrodkowa musi stać się jedyną działającą na nas siłą - siłą grawitacji.
Jeśli przesadzimy z ilością prędkości, to spowodujemy że grawitacja danego ciała nie będzie w stanie z taką samą siłą zakrzywić naszego toru i nasza orbita stanie się eliptyczna, lub nawet hiperboliczna, i zostaniemy wyrzuceni ze strefy przyciągania ciała.

Pierwsza prędkość kosmiczna

PPK zależy od stałej grawitacji, na którą nie mamy w żaden sposób wpływu; jest proporcjonalna do masy orbitowanego ciała i odwrotnie proporcjonalna do jego promienia. Oznacza to, że poruszamy się szybciej wokół ciała o dużym przyciąganiu grawitacyjnym (przyciąganie jest proporcjonalne do masy), oraz wokół ciała o masie skondensowanej na małej przestrzeni (kondensacja jest proporcjonalna do promienia ciała).

Sens posiadania pierwszej prędkości kosmicznej

Wyobraźmy sobie, że stoimy na górnym krańcu równi pochyłej (np. na stromym zboczu drogi)

zawieszonej w powietrzu i nagle wyskoczymy z pewną niewielką prędkością w kierunku poziomym. Wkrótce wylądujemy na równi. To w jak bardzo oddalonym od początku miejscu równi wylądujemy jest zależne od naszej prędkości początkowej. Istnieje taka prędkość, po nadaniu której wylecimy poza równię. Jesteśmy przyciągani cały czas w dół.

W przypadku kuli mamy podobną sytuację, lecz rozwinąwszy prędkość, która pozwala nam na ominięcie bryły nie spadniemy na powierzchnię, lecz zaczniemy krążyć wokół kuli. W zasadzie spadamy przez cały czas, lecz jesteśmy przyciągani nie w dół, lecz do wewnątrz kuli.

Zasada działania silników - zasada zachowania pędu

Jeśli wyskoczymy z łódki na wodzie w pewna stronę, to nadamy sobie pęd równy iloczynowi naszej masy oraz prędkości. Łódka z kolei odpłynie w przeciwną stronę, posiadłszy ten sam pęd, lecz równy iloczynowi swojej masy i swojej nowej prędkości.

Na podobnej zasadzie działają silniki statku kosmicznego, przy czym elementami, które „odskakują" są cząsteczki spalonego paliwa, wystrzeliwane z silników, na wskutek czego statek zyskuje przyrost prędkości w przeciwnym kierunku. Pęd wystrzelonej cząsteczki paliwa, czyli iloczyn jej małej masy i jej dużej prędkości, jest co do wartości równy przyrostowi pędu statku. Jeśli statek ma uzyskać ten sam pęd posiadając dużo większą masę, to nasz przyrost prędkości będzie dużo mniejszy od prędkości wystrzelonej cząsteczki.

Wejście na orbitę

Aby wejść na orbitę musimy rozwinąć odpowiednią wartość prędkości stycznej. Nie możemy jej rozwinąć na niskiej wysokości, ponieważ opór atmosferyczny jest proporcjonalny do prędkości, tj. im szybciej byśmy się poruszali, tym więcej energii stracilibyśmy na wskutek tarcia o powietrze. Jednakże opór atmosferyczny maleje wraz z wysokością, z powodu coraz większego rozrzedzenia atmosfery, dlatego rozwijamy tą prędkość dopiero w przestrzeni kosmicznej. Należy jednak pamiętać, że prędkość tą musimy rozwinąć jak najszybciej, aby nasza prędkość skontrowała siłę grawitacji. Każdą sekundę spędzoną w powietrzu/ przestrzeni kosmicznej, nie posiadając pierwszej prędkości kosmicznej, musimy okupić odpowiednią ilością paliwa, wyrzuconego w dół, tak, aby bezpośrednio skontrować siłę grawitacji. Trajektorią, która jest kompromisem między tymi dwoma wymaganiami jest parabola.

Jak wytyczyć parabolę?

Lot po paraboli wystąpi wtedy, gdy początkowo ustawiając dziób w kierunku pionowym i odpalając silniki, będziemy stopniowo obniżać pochylenie dziobu. Lot taki przebiega następująco:

1. Startujemy statkiem poprzez pokonanie siły grawitacyjnej siłą naszego ciągu. Rozwijamy pewną prędkość pionową, po rozwinięciu której siła oporu aerodynamicznego (proporcjonalna do prędkości) jest na tyle duża, że równoważy naszą siłę pionową i poruszamy się w pionie ze stałą prędkością (I zas. dyn. Newtona).
2. Zaczynamy pochylać statek w kierunku horyzontalnym, lekko zmniejszając udział siły ciągu w kierunku pionowym, lecz zwiększając w kierunku horyzontalnym. Zaczynamy nabierać prędkości stycznej. Równocześnie wychodzimy z niskich i gęstych partii atmosfery, przez co maleje siła oporu - w pewnym stopniu zaczynamy przyspieszać również w kierunku pionowym (II zas. dyn. Newtona).
3. Punkt równowagi między składową pionową ciągu a siłą grawitacji - Opór powietrza w kierunku pionowym jest już pomijalny. Pochyliliśmy dziób pod takim kątem, że składowa pionowa ciągu równoważy siłę grawitacji i nie przekracza jej wartości. W pionie działające

siły równoważą się, więc pędzimy w górę dalej z poprzednią, stałą prędkością (I zas. dyn. Newtona). Poprzez pochylenie dziobu, zwiększyliśmy znacznie składową poziomą. Poruszamy się z większym przyspieszeniem poziomym. Siła wypadkowa pokrywa się ze składową poziomą siły ciągu.

4. Zbliżamy się do pożądanego pułapu, więc decydujemy że wystarczy nam już prędkości pionowej. Poprzez dalsze pochylenie dziobu pozwalamy sile grawitacji wygrać z naszą składową pionową. Na nasz statek, w pionie, działa teraz pewna część siły grawitacji - zaczynamy wyhamowywać prędkość pionową. Ponownie zwiększyliśmy przyspieszenie poziome.
5. Osiągnęliśmy już prawie pierwszą prędkość kosmiczną (poziomą / styczną), lecz dalej mamy pewien zapas prędkości pionowej, której musimy się pozbyć przed mającym wkrótce nastąpić wejściem na orbitę, a siła grawitacji jest nieco za słaba przy tak dużej prędkości stycznej, żeby w tak krótkim czasie pomóc nam w wyhamowaniu prędkości pionowej. Aby pozbyć się jej nadmiaru, pochylamy dziób poniżej poziomu, tak że składowa pionowa ciągu **dodaje się** do siły grawitacji.
6. Wyłączamy silniki. Nasza prędkość pozioma jest na tyle duża, że jedyna działająca na nas teraz siła - siła grawitacji odchyla nasz tor lotu na kształt koła.

Zastosowanie powyższego profilu wejścia pomoże nam osiągnąć orbitę kołową, a nie eliptyczną.

Warto wiedzieć, że punkt 5. musimy wykonać tylko wtedy, gdy używamy realistycznych silników rakietowych, tzn. takich, których nie można wyłączyć i włączyć ponownie. Jeśli nasze silniki posiadają taką zdolność, to możemy je w pkt. 5 po prostu wyłączyć i po prostu poczekać aż osiągniemy najwyższy punkt trajektorii (apocentrum) i wtedy włączyć silniki w kierunku czysto poziomym, aby nie marnować paliwa na kontrowanie prędkości pionowej, która wkrótce i tak zostanie wyzerowana w apocentrum.

Wejście na orbitę trwa około 8 minut

Starty w kierunkach wschodnich

Ziemia obraca się z zachodu na wschód. Wynikająca z tego obrotu prędkość styczna na równiku Ziemi, wynosi ok. 465 m/s.

Jako że aby wejść na orbitę musimy rozwinąć odpowiednią prędkość styczną, możemy wystartować w kierunku wschodnim, zyskując w ten sposób część naturalnej, „darmowej” prędkości. Będzie to nasza prędkość początkowa. Po wejściu na orbitę nie interesuje nas już z jaką prędkością porusza się pod nami Ziemia.
Ilość zyskanej prędkości zależy od naszej szerokości geograficznej (im wyżej, tym mniejsza prędkość), oraz od azymutu startu (im bliższy wschodniemu, tym więcej wykorzystamy).

Wykorzystanie ruchu rotacyjnego

Aby być na danej orbicie, musimy mieć odpowiednią prędkość. Prędkość tą można rozłożyć na dwie składowe - północną i wschodnią. Składowa wschodnia prędkości, którą musimy rozwinąć silnikami, będzie pomniejszona o prędkość wynikającą z rotacji Ziemi. Składowa północna pozostanie niezmienna.

Prędkość Ziemi będzie nam pomagała tylko do pewniej inklinacji granicznej. Podczas lotu na orbitę polarną, rotacja będzie nam przeszkadzać i musimy ją skontrować, kierując się na północny zachód.

Zasada zachowania energii - wzory

Ze wzoru na energię potencjalną wynika, że im dalej jesteśmy od ciała, tym większą mamy energię

potencjalną (R ↑, x/R ↓, (- x/R) ↑), czyli jeśli R się zwiększa, to x/R się zmniejsza, ale (-x/R) się zwiększa). Energia potencjalna wzrasta od minus nieskończoności do zera.

Zasada zachowania energii - orbita eliptyczna

Przyspieszamy w kierunku prograde, a więc wyrzucamy paliwo, które przestaje należeć do układu (układ na czas przyspieszania silnikami przestaje być izolowany), i tym samym, poprzez zwiększenie energii kinetycznej, zwiększamy energię mechaniczną układu.

Wykres przedstawia cykliczne zmiany energii podczas okrążania ciała (wykonywania orbit) na orbicie eliptycznej. Jak powiedzieliśmy, na większych wysokościach nasza energia potencjalna jest większa, a mechaniczna zawsze stała. Dlatego też, aby energia była w równowadze, to energia kinetyczna musi się zmniejszyć na wyższych wysokościach.

Zmiana płaszczyzny orbity

Ponieważ zmiana płaszczyzny trwa pewien czas, należy zacząć ją wykonywać w momencie, gdy czas do osiągnięcia węzła wynosi około połowę całkowitego czasu, jaki zajmie nam ta zmiana. Gdybyśmy tak nie zrobili, to przeskoczylibyśmy orientację docelową, i pomimo posiadania takich samych inklinacji (nachyleń), mielibyśmy inny LAN (przesunięcie).

Podczas zmiany musimy być zorientowani (anty) normalnie do trajektorii aktualnej, a nie pierwotnej. Jeśli byśmy tego nie zrobili, to wektor przyspieszenia nie powodowałby tylko odchylenia trajektorii, lecz jego część zostałaby zużyta na przyspieszenie statku w kierunku w jakim się porusza - w rezultacie - do podwyższenia apocentrum.

Synchronizacja - zakończenie

a) Orbita początkowa 1) względem orbity docelowej 2) (czyli takiej, jaką musimy mieć, żeby zrównać wysokość z celem) ma mniejszą energię mechaniczną i potencjalną, ale większą kinetyczną, a więc i większą prędkość.

b) Podwyższamy apocentrum w 3) poprzez przyspieszanie prograde - zwiększamy naszą energię kinetyczną w tym punkcie, a więc i energię orbity. Wykonujemy parę orbit aby dogonić cel. Energia naszej aktualnej, eliptycznej orbity jest jednak mniejsza niż naszej docelowej orbity kołowej. W punkcie spotkania z satelitą mamy tą samą wysokość co na orbicie docelowej, a więc tą samą energię potencjalną. Skoro nasza energia mechaniczna jest jednak mniejsza, to oznacza to, że aby równowaga była zachowana, to nasza energia kinetyczna musi być mniejsza. Poruszamy się wolniej niż nasz cel na tej wysokości, pomimo, że na niższej wysokości poruszaliśmy się dużo szybciej.

c) Poprzez wyrównanie prędkości, a więc dodanie do orbity energii pozostałej do osiągnięcia orbity docelowej, podwyższamy apocentrum.

Loty poza układ Ziemia-Księżyc

W lotach tych, wykorzystujemy różnice w okresach ciał o różnych wysokościach orbit, podobnie jak w przypadku synchronizacji realistycznej, czyli oczekiwaniu na innej orbicie na dogodny moment, ażeby w tym momencie utworzyć przecięcie z orbitą celu. W przecięciu tym spotykamy się z celem. Różnice polegają na tym, że teraz w centrum jest Słońce, a nie ciało źródłowe. Ciało źródłowe wykorzystujemy jedynie jako nasz początkowy transporter wokół Słońca. To ciało

źródłowe nadaje nam główną prędkość.

Aby wyrwać się z ciała, musimy rozwinąć drugą prędkość kosmiczną. Ramię wyjściowe utworzonej przez to orbity hiperbolicznej musi być jednak skierowane w odpowiednim kierunku. Będzie to kierunek prograde względem orbity okołosłonecznej dla lotów na cele na wyższych orbitach, oraz retrograde względem orbity okołosłonecznej dla lotów na cele na niższych orbitach. Zauważmy, że wystrzelenia z orbity ciała źródłowego na wyższe orbity okołosłoneczne (prograde) dochodzi zawsze po nieoświetlonej stronie planety, a na niższe po oświetlonej.

Asysta grawitacyjna

Załóżmy że jesteśmy stacjonarnym obserwatorem i widzimy planetę poruszającą się na lewo z prędkością U i statek poruszający się w prawo z prędkością v. Jeśli statek jest na właściwym torze, to przejdzie blisko planety, poruszając się z prędkością U + v względem powierzchni planety, ponieważ planeta porusza się w przeciwnym kierunku z prędkością U. Gdy statek opuści orbitę, ciągle porusza się z prędkością U + v względem powierzchni planety, lecz w przeciwnym kierunku, w lewo. Ponieważ planeta porusza się z prędkością U, statek porusza się z prędkością 2U + v z twojego punktu widzenia. Jego prędkość została zwiększona o 2U, czyli o dwukrotność prędkości, z jaką porusza się planeta.