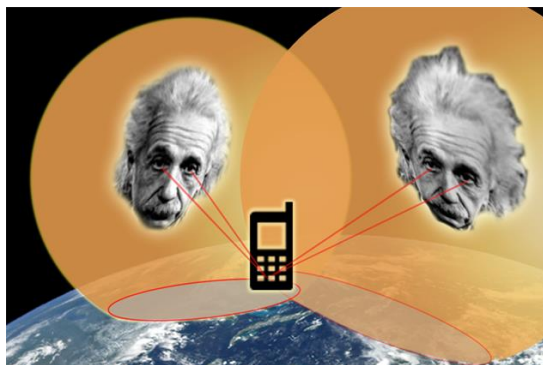


K čemu je teorie relativity? Bez ní byste netrefili domů

19. září 2014 10:19, aktualizováno 16:15 ([udělat kom](#))

Navigační systém GPS pracuje s přesným časem a vysokými rychlostmi. **Satelitům na oběžné dráze ubíhá čas pomaleji kvůli vysoké rychlosti a zároveň rychleji kvůli nižší gravitaci.** Aha Díky Einsteinovi ovšem víme, jak relativistické zpoždění korigovat, a zvýšit tak přesnost lokalizace.



[Dalších 12 fotografií v galerii](#)

Albert Einstein a jeho rovnice pomohly k fungování systému GPS. | foto: Pavel Kasík, Technet.cz (s využitím Public Domain obrázků)

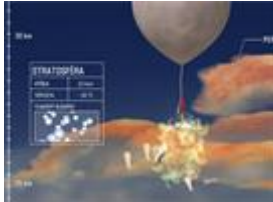
Ze střední školy a ze sci-fi [filmů](#) víme, že čas plyne tím pomaleji, čím rychleji se objekt pohybuje. A že to má něco společného s Einsteinem a jeho teorií relativity. Stejně jako zbytek teoretické fyziky i tento koncept vypadá ... teoreticky. Na rozdíl od Archimédova zákona nebo Newtonovy poučky o akci a reakci jsou Einsteinovy rovnice příliš vzdálené od světa, který zažíváme na vlastní [kůži](#). Proto ostatně způsobily takový rozruch, když se je podařilo experimentálně potvrdit.

[Stratocaching na hraně civilního využití GPS](#)

Náš „experiment na dotek vesmíru“ spočívá ve vypuštění balónu do stratosféry a následném rozhození „semínek“ s GPS, která budou hráči (třeba i vy, [když se přihlásíte](#)) hledat pomocí vysílaných souřadnic.



Stratocaching - experiment na dotek vesmíru.



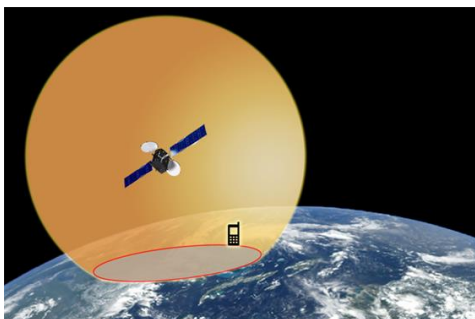
Ve výšce kolem 25 až 30 kilometrů se uvolní náklad Stratokeší

Civilní využití GPS umožňuje lokalizovat přijímače do výšky 18 km (některé umožní i výše, za předpokladu, že nepřesáhnou rychlost 1 852 km/h). Náš balón poletí až 30 km nad zem, takže některé civilní GPS přijímače přestanou fungovat.

Přesto i vy máte nejspíš v kapse zařízení, které funguje díky Einsteinovi. Napřed pomáhalo navádět řízené střely, pak brázdit oceán a v posledních letech je jeho hlavním úkolem umístit na mapu modrou šipku, abyste trefili domů.

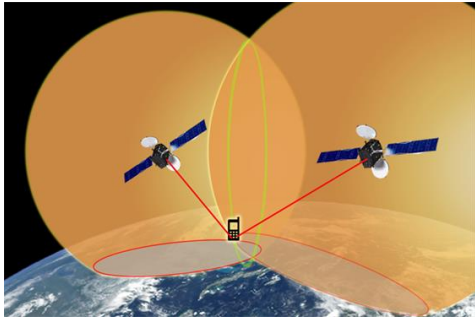
Z vesmíru do vašeho mobilu

Přestože americký globální polohovací [systém](#) GPS [patří](#) svým dopadem mezi nejprezratnější technologie posledních padesáti let, jeho základní princip není složitý. Kolem Země obíhají desítky družic, které vysílají (když to zjednodušíme) přesný čas. Protože jejich signál putuje [rychlostí světla](#) a z místa, které známe, mohli bychom z intervalu [jakého ? délkového nebo časového ? vypočítat](#), jak daleko se přijímač od družice nachází. Zjistili bychom tedy, že jsme někde na pomyslné kouli.



Jedna družice k určení polohy nestačí. Mobilní telefon s přijímačem GPS zná pouze vzdálenost od družice (a to ještě pouze za předpokladu, že by měl přesný čas, což nemá, bere si jej z GPS družic). Telefon by se tedy mohl nacházet kdekoli na povrchu koule.

Abychom našli svou polohu spolehlivě, potřebujeme signál z více družic. Dvě nestačí - jejich průsečík je kružnice.



Druhá družice pomůže upřesnit čas a také omezí možnost, kde se přijímač nachází, na průnik dvou koulí (zde zelená kružnice). Teprve třetí družice umožní určit polohu na jeden ze dvou bodů (a jeden bude zřejmě zcela mimo zemský povrch).

Ale třetí družice už nám konečně pomůže najít se na mapě. Tři koule totiž mají právě dva průsečíky a jeden z nich může počítač vyloučit, protože se nachází mimo atmosféru (a není potřeba umělé inteligence na to, aby bylo jasné, že to asi nebudete vy). Čtvrtá a další družice, se kterými vaše GPS naváže kontakt, pak pomohou výsledek dále zpřesnit.

Čtyři rovnice o čtyřech neznámých

V textu jsme trochu zjednodušili princip výpočtu polohy. Přijímač GPS totiž nezná přesný čas. Jak je to tedy doopravdy?

Protože GPS přijímač nemá k dispozici přesné atomové hodiny, není schopen ze změřeného zpoždění určit vzdálenost od družice s přijatelnou přesností. „To co přijímač ze změřeného zpoždění vypočte, se anglicky označuje pseudorange" (překládal jsem jako "zdánlivá vzdálenost"). Pseudorange se od skutečné vzdálenosti liší o obrovskou odchylku (běžně tisíce km), která je způsobena chybou hodin přijímače,“ vysvětluje **Ing. Petr Pánek, CSc.** z [Ústavu fotoniky a elektroniky AV ČR](#). „Důležité je, že pokud současně měříme zpoždění signálu od několika družic, tato odchylka je ve všech případech stejná. Když změříme současně zpoždění od čtyř družic, z výsledků měření můžeme sestavit [čtyři rovnice o čtyřech neznámých](#) (3 souřadnice polohy a chyba hodin) a jejich řešením dostaneme 3D polohu a přesný čas. Když je k dispozici více než čtyři družice, úloha je přeuredená a provede se vyrovnání, které vede ke zpřesnění.“

Čísla mimo naše chápání



V současné době obíhá Zemi 31 [satelitů](#) systému GPS.

Jestli jste teď získali pocit, že systém GPS opravdu není tak složitý, možná přemýšlíte, proč přišel až koncem 20.století. Je to jednoduché - je totiž závislý na třech technologiích, které jsou relativně nové:

- **Lety do vesmíru** - jinak by nešlo vypustit družice
- **Atomové hodiny** - jinak by nebylo možné vysílat přesný čas
- **Miniaturní počítač** - aby byl přijímač GPS mobilní, schopný zpracovávat informace z družic a převádět je v reálném čase na informace o poloze s vysokou přesností

Pro představu, nebo spíše jako ukázka, že se GPS naší představivosti vymyká: aby GPS mohlo mít přesnost na desítky metrů, musí být měření přesné na miliontiny sekund, tedy mikrosekundy. Pro centimetrovou přesnost už by to byly miliardy sekund, tedy nanosekundy.

**

Přesná GPS musí počítat se zpomalením i zrychlením času

V těchto řádech najednou přichází ke slovu i nepatrné zkreslení, které vzniká v důsledku relativistických efektů. Jeden z podrobných rozborů této odchylky nabídli v roce 1997 američtí vědci Marc Weiss a Neil Ashby na [konferenci](#) zabývající se přesným měřením času ([PDF](#)). Popisují zejména [dva efekty](#) související s teorií relativity, které mají vliv na běh atomových hodin na palubě družice.

- **vysoká rychlost** - GPS satelity obíhají Zemi přibližně rychlostí 4 000 m/s (14 400 km/h), což způsobuje každý den **zpoždění** přesných hodin o **7,214 mikrosekund**. Toto zpoždění předpovídá [Einsteinova speciální teorie relativity](#).
- **nižší působení gravitace** - tím, že satelity obíhají dále od Země, působí na ně gravitační pole naší planety méně. Proto zde čas ubíhá rychleji. Tento efekt, předpovězený [Einsteinovou obecnou teorií relativity](#), má za následek **zrychlení času** oproti zemskému povrchu, a to přibližně o **45,85 mikrosekund**.

Součtem těchto dvou efektů dospěli vědci k číslu **38,64 mikrosekund denně**, o které se atomové hodiny na palubě GPS satelitů **předbíhají**. Aby se tomu

zabránilo, je potřeba je nepatrně zpomalit. V praxi to znamená, že místo frekvence 10,23 MHz mají impulzy frekvenci nepřesných 10,22999999543 MHz. A toto provedení vlastně „přesahuje“ moje neohrabaný popis, že : na raketě neběží čas pomaleji než na Zemi, respektive netikají na raketě hodinky pomaleji, ale informace která k nám má doletět z rakety je >pootočena< respektive je pootočena soustava rakety vůči vztažní soustavě pozorovatele na Zemi. To je ona korekce frekvence. Byla potřeba kvůli onomu pootočení soustav (x,y,z, t₁,t₂,t₃)

Je to ještě složitější

Protože nemáme v GPS navigaci atomové hodiny (to by náklady na pořízení absurdně prodražilo, o rozměrech nemluvě), srovnává místo toho přijímač údaje o čase z jednotlivých družic. Někomu by tedy mohlo napadnout, že rychlejší běh času na palubě GPS družic nemá na přesnost navigačního systému vliv - vždyť přijímač pracuje s rozdíly časů z družic, a ty jsou relativistickými efekty ovlivněny všechny stejně.

Ale družice nejsou vypuštěny všechny naráz, a tak by se časy různily podle toho, jak dlouho by na oběžné dráze byly. Tvar oběžných drah navíc není kruhový, ale eliptický, a v průběhu jednoho obletu se tak u každé družice mění jak rychlost, tak vzdálenost od Země.

Relativistic effects in the GPS

Satellite clock

$$\Delta\tau' = \int_A^B \left\{ 1 + \underbrace{\frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}}_{\text{time dilation}} + \underbrace{\frac{1}{c^2} (U - W_0)}_{\text{redshift}} \right\} d\tau$$

$$\Delta t_{\text{eccentricity}} = \frac{2}{c^2} \sqrt{GM a} e \sin E = \frac{2}{c^2} \mathbf{v} \cdot \mathbf{r}$$

Light signal

$$\Delta t = \frac{D}{c} + \frac{2 \omega A}{c^2}$$

Sagnac effect

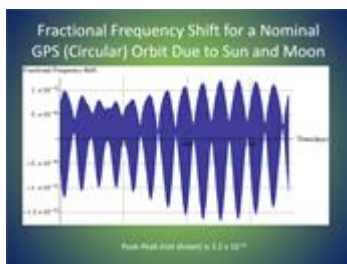
Relativistic effects incorporated in the GPS (satellite clock – geoid clock)

| | |
|---------------------------|------------------------------|
| Time dilation: | - 7.2 μs per day |
| Gravitational redshift: | + 45.8 μs per day |
| Net secular effect: | + 38.6 μs per day |
| Residual periodic effect: | 46 ns amplitude for e = 0.02 |
| Sagnac effect: | 133 ns maximum |

μ miko 10⁶ ; n nano 10⁹

Shrnutí relativistických efektů

Navíc jsme ještě nezmínili [Sagnacův efekt](#), další důsledek speciální teorie relativity, popisující odlišnost plynutí času na základě rotace **Země**. Podrobné vysvětlení lze nalézt v článku z PhysicsToday.org ([zde v PDF](#)), pro naše účely je důležité, že na východní a západní polokouli se efekt projevuje opačně a výsledkem je zkreslení až 133 nanosekund, což by vedlo k nepřesnosti v řádu desítek metrů. Řešit lze i [Shapirův efekt](#), popisující zpoždění signálu procházejícího gravitačním polem (opět důsledek obecné teorie relativity), jak popisují opět Weiss a Asby ([PDF](#)).



Takhle nepatrně - ale měřitelně - kolísá frekvence v důsledku působení Slunce a Měsíce.

I při započtení všech relativistických zkreslení jsou tu další nepřesnosti, vycházející z průchodu signálu měnící se atmosférou nebo odrazem GPS signálu od terénu a dokonce i aktivita na Slunci. Stejně tak ale existují i metody [na zpřesnění výsledků GPS](#), především dnes již rozšířená A-GPS (asistované GPS využívá dat stažených z internetu k rychlejšímu nalezení polohy, protože nemusí čekat, až svou přesnou polohu prozradí družice) nebo dynamické dodatečné korigování na základě GPS koordinátů pozemní stanice.

Relativistické zkreslení tedy není jediné, ale rozhodně je nejzajímavější. Sice nemáme sci-fi vychytávky jako warpový pohon nebo transportér, ale když popojíždíme večer v zácpě, naši polohu zjišťuje palubní navigace [pomocí](#) desítek atomových hodin obíhajících tisíce kilometrů nad Zemí. A to je docela slušné sci-fi.

Podívejte se na animaci experimentu Stratocaching a [pojďte do toho s námi](#):

Stratocaching 2014 v animaci | (1:14) | video: [Vojtěch Žák](#)

Aktualizace 10:54 - Do článku jsme doplnili ilustrace.

Aktualizace 12:36 - Do článku jsme doplnili přesnější omezení civilního GPS.

Aktualizace 16:15 - Do článku jsme doplnili vysvětlení rovnic a popis výpočtu.

Autor: [Pavel Kasík](#)

Zdroj: http://technet.idnes.cz/gps-relativisticka-korekce-einstein-stratocaching-fxi-tec-vesmir.aspx?c=A140915_130940_tec-vesmir_pka