

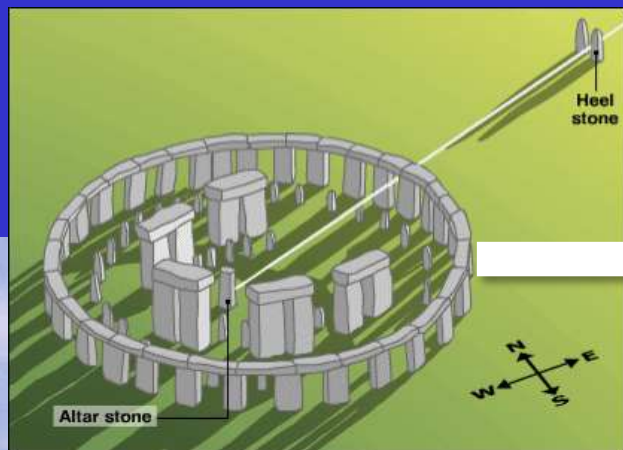
Metrologia: pomiar czasu i częstotliwości



dr inż. Paweł Zalewski
Akademia Morska w Szczecinie

Wzorce czasu:

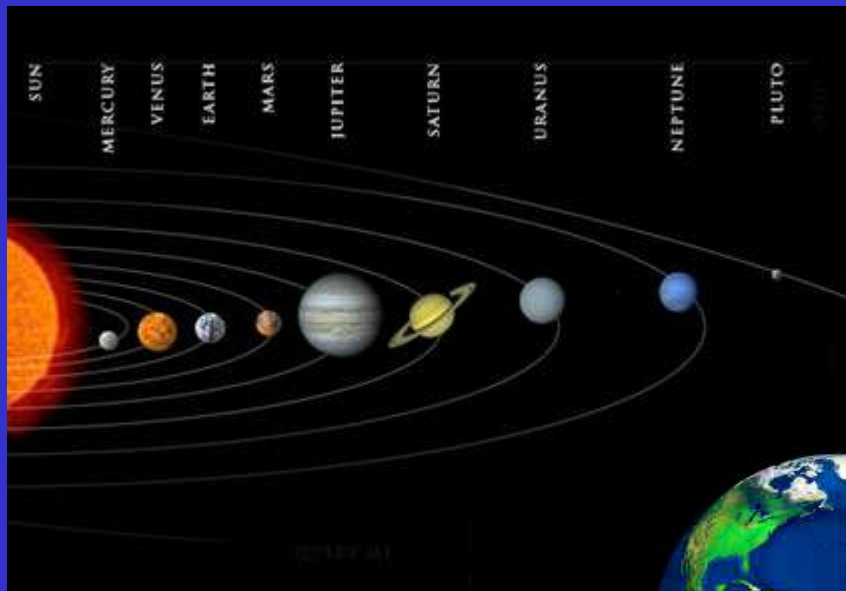
Problem określania czasu towarzyszy nam już od dawna. Pięć tysięcy lat temu plemiona epoki kamiennej wzniosły w południowej Anglii Stonehenge, wielkie obserwatorium astronomiczne do sygnalizowania rozpoczynającego się roku.



Dzisiejsze zegary atomowe wskazują czas z dokładnością do jednej bilionowej sekundy.

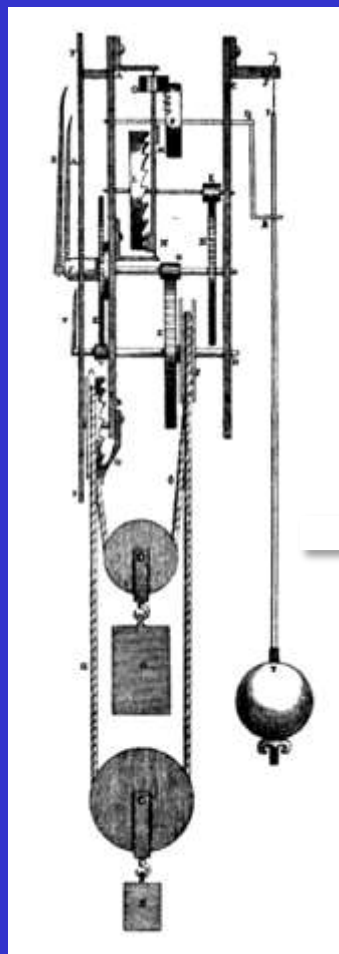
Wzorce czasu:

Z naukowego punktu widzenia zadanie pomiaru czasu sprowadza się do bardzo prostej czynności: znalezienia w przyrodzie zjawiska powtarzającego się regularnie i użycie go w charakterze zegara. Powszechnie uważa się, że pierwszym takim zjawiskiem był ruch Ziemi: jej krążenie po orbicie wokół słońca (co określa długość roku) i jej obrót wokół własnej osi (co definiuje długość doby).



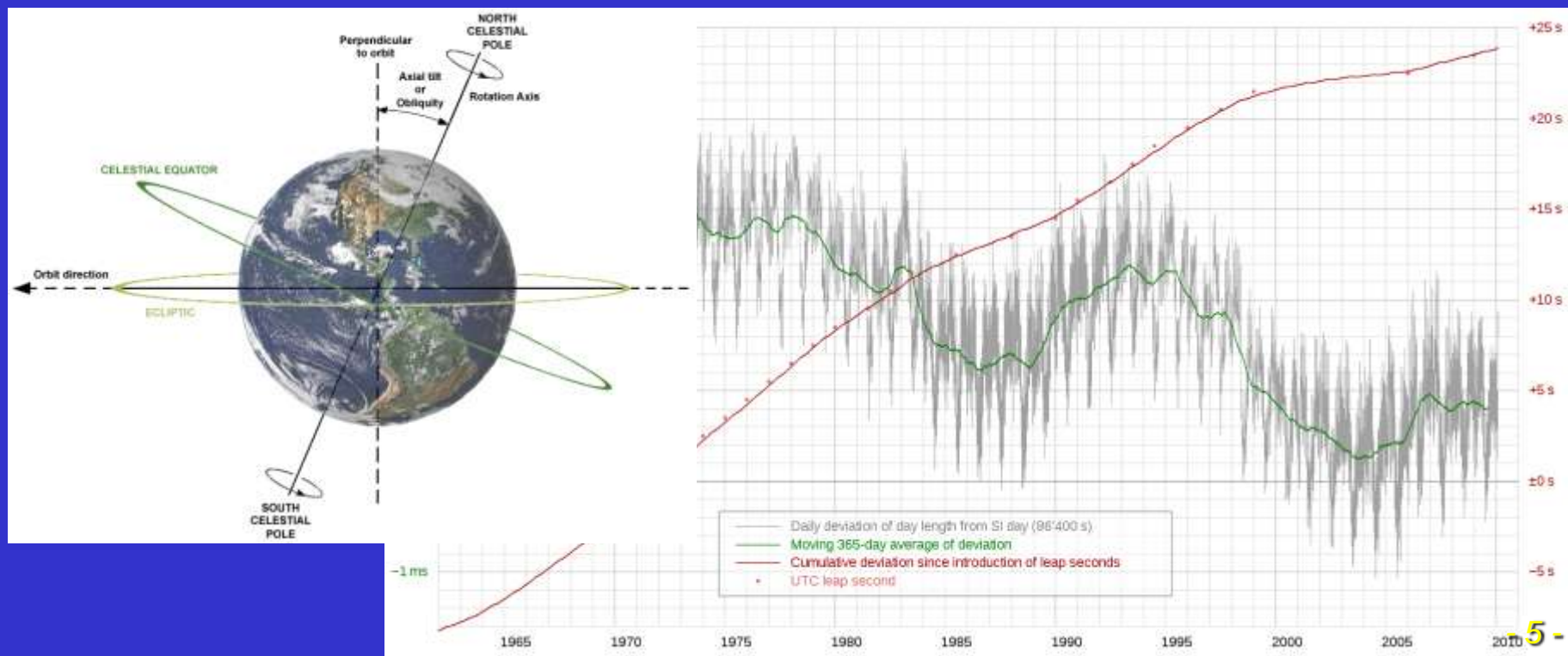
Wzorce czasu:

Następnie miejsce Ziemi zajęły ruchy wahadła i zegary ery kolei żelaznej, które wskazywały czas z dokładnością do ułamka sekundy na rok. Jeszcze większą dokładność pomiaru czasu umożliwiły w ostatnim stuleciu pomiary wibracji kryształów kwarcu.



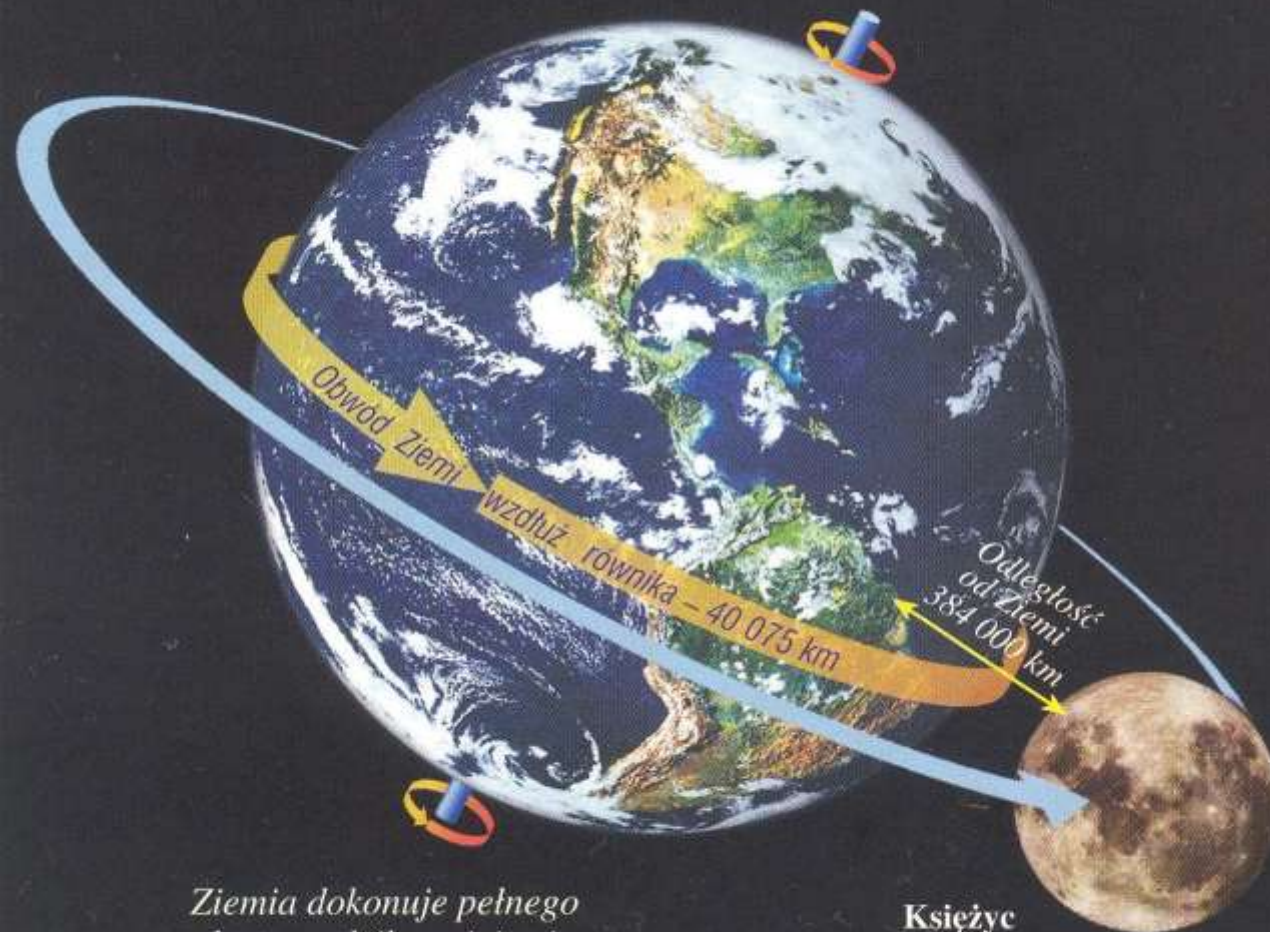
Wzorce czasu:

Postęp w jakości wzorców - od ruchów Ziemi do wibracji kwarcu - ilustruje ważną prawdę o czasie. Zdarzenia, wydarzające się według starego wzorca powtarzane i regularne, często po szczególnym zbadaniu za pomocą drugiego - lepszego wzorca - okazują się nierówne i nieregularne. Obrót Ziemi jest tak naprawdę bardzo niedokładny. Gdy wieje wiatr zachodni, ziemia cofa się na wschód, co może w rezultacie zmienić długość doby o dziesiątki tysięcznych sekundy. Również pływy i trzęsienia ziemi mogą oddziaływać na długość doby.



Wzorce czasu:

ZIEMIA I KSIEŻYC



Ziemia dokonuje pełnego obrotu wokół swojej osi w ciągu 23 godzin, 56 minut i 4,09 sekundy.

Księżyc
średnica 3 476 km
czas obiegu wokół Ziemi
27,3 dnia

Wzorce czasu:

Jednym ze sposobów wyznaczania dokładności wzorca czasu jest określenie miejsca znaczącego, na którym nie można już mieć pewności co do dokładności pomiaru.

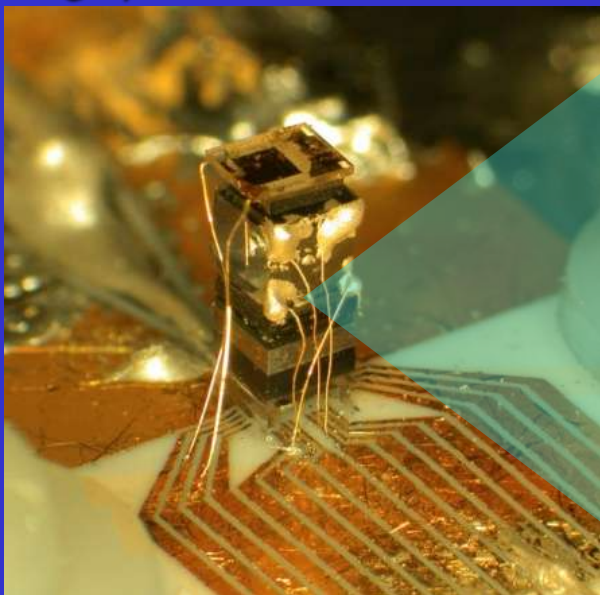
Na przykład zegarek spóźniający się o jedną sekundę na rok byłby niepewny na siódmym miejscu po przecinku.

$$\frac{1}{365 \times 24 \times 60 \times 60} = \frac{1}{31536000} = 0,00000003..$$

Przy tej metodzie liczenia najlepszym zegarom wahadłowym można ufać do szóstego miejsca po przecinku, a najlepszym kwarcowym do około dziewiątego miejsca, a nawet taka dokładność pomiaru nie zbliża się do dokładności wymaganej przez współczesną technikę.

Wzorce czasu:

Pod koniec lat czterdziestych fizyk Norman Ramsey (późniejszy laureat Nagrody Nobla) wymyślił bardzo dokładny sposób pomiarów obrotów elektronów w atomie. W wyniku tego powstał zegar atomowy, używany jako wzór na całym świecie po dziś dzień. W zegarach tych wiązki atomów przechodzą przez szereg wnęk rezonansowych, pozwalając na niezwykle dokładne pomiary częstotliwości związanych z ruchem elektronów w atomie. **Od 1967 roku sekunda definiowana jest jako czas potrzebny na wykonanie 9 192 631 770 powtórzeń określonego cyklu w atomie cezu 133** (liczba okresów promieniowania odpowiadających przejściu między dwoma nadsubtelnymi poziomami stanu podstawowego).



Wzorce czasu:

Pożytek z użycia elektronu jako wzorca czasu jest ewidentny. Na elektrony w normalnych warunkach nie działają wiatry, ani naturalne wymuszenia zewnętrzne. Każdy elektron w atomie cezu we wszechświecie zachowuje się tak samo, tak więc wzorzec cezowy jest zarówno uniwersalny, jak i odtwarzalny. Zegary atomowe są dokładne do trzynastu miejsc po przecinku.

Sieć zegarów atomowych w urzędach normalizacyjnych na całym świecie wyznacza czas UTC. Śledzą one nierównomierności obrotu Ziemi. Co jakiś czas następuje „głosowanie” nad decyzją, czy obrót ziemi spowolnił się na tyle, aby można było wprowadzić sekundę przestępną. Zdarza się to mniej więcej raz do roku – bieżące informacje o sekundach przestępnych (ang. leap seconds) podawane są m. in. w sekcji „time signals” 2 tomu ALRS.

Wzorce czasu:

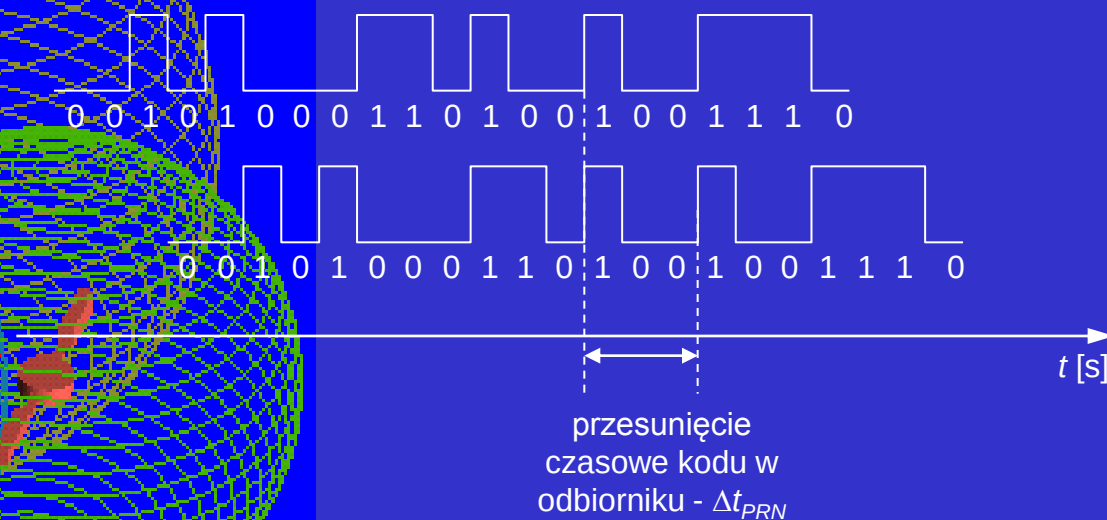
Trwają prace nad poprawą dokładności wzorców czasu:

Jeden z projektów wykorzystuje technikę umożliwiającą złapanie pojedynczych atomów (lub niewielkich ich grup) i izolowanie ich od otoczenia przez długi czas (rekord wynosi kilka miesięcy). Po wyizolowaniu w ten sposób grupy atomów, lasery mogą spowolnić ich ruch w takim stopniu, by miały one mniejszy wpływ na światło, które emitują lub absorbują. Urządzenia takie osiągnęły dokładność trzynastu miejsc po przecinku i powinny osiągnąć piętnaście.

Sugerowano także możliwość użycia do ustanowienia wzorca czasu fal radiowych emitowanych przez martwe gwiazdy zwane pulsarami. Pulsary obracają się bardzo szybko i pod pewnym kątem do swojej osi rotacji emitują wiązki promieniowania radiowego. Wnioskodawcy utrzymują, że potencjalna dokładność może wynieść piętnaście miejsc po przecinku.

Wzorce czasu:

Współcześnie najpowszechniejsze zastosowanie dokładnego pomiaru czasu występuje w Globalnym Nawigacyjnym Systemie Satelitarnym (GNSS, którego częścią jest GPS), składającym się z kilkudziesięciu satelitów wyposażonych w zegary atomowe. Odbierając sygnały przesłane przez co najmniej cztery satelity, oraz znając dokładny czas wysłania sygnałów, obserwator może zlokalizować swoją pozycję na Ziemi z dokładnością do centymetra.

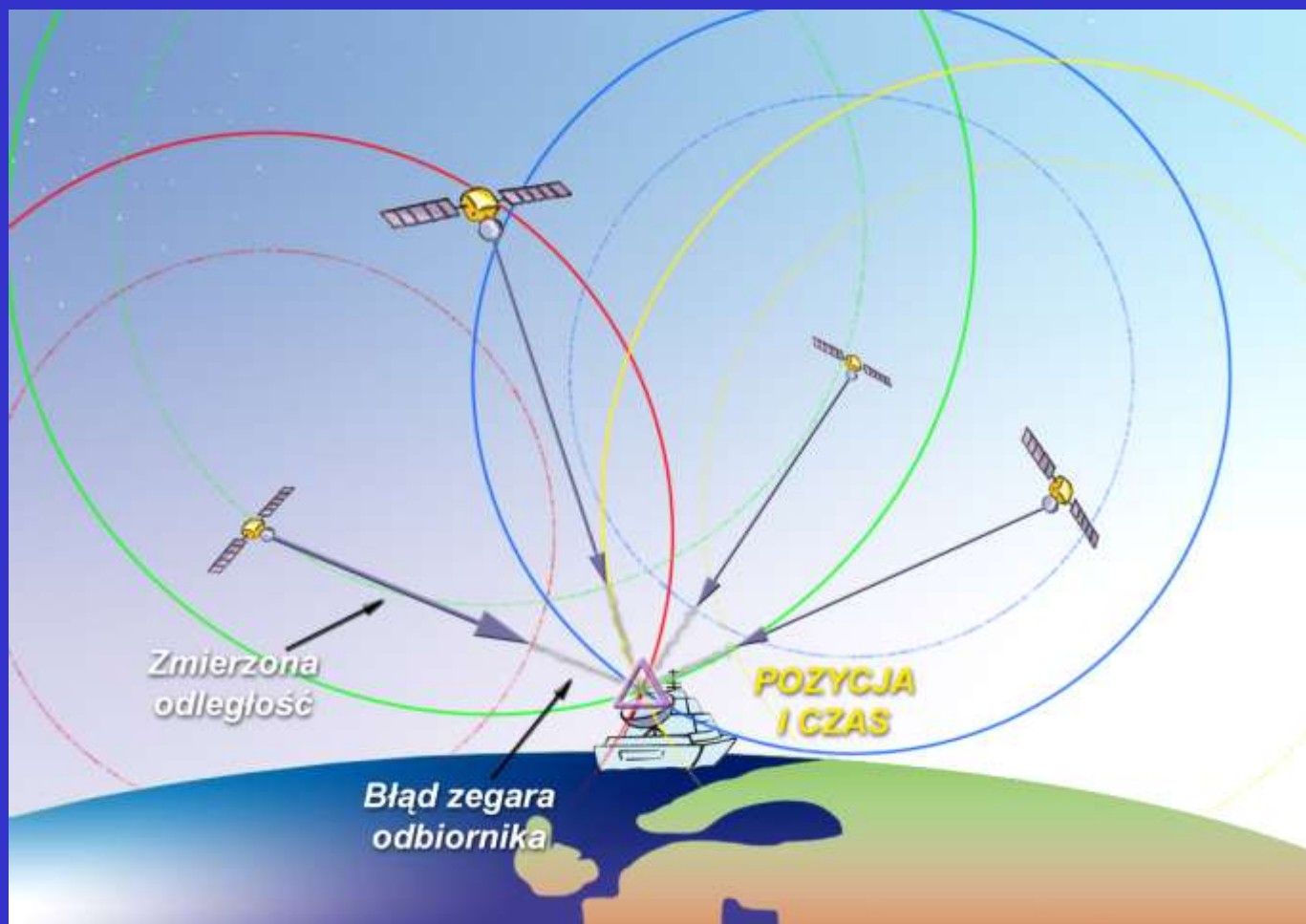


Wyznaczenie odległości do satelity techniką kodową w systemie GNSS.

Pomiar odległości na podstawie czasu:

$$p_{Rs_j} = c \times t_{Rs_j}$$

$$p_{Rs_j} = \sqrt{(x_R - x_{s_j})^2 + (y_R - y_{s_j})^2 + (z_R - z_{s_j})^2} + c \times \Delta t_R$$



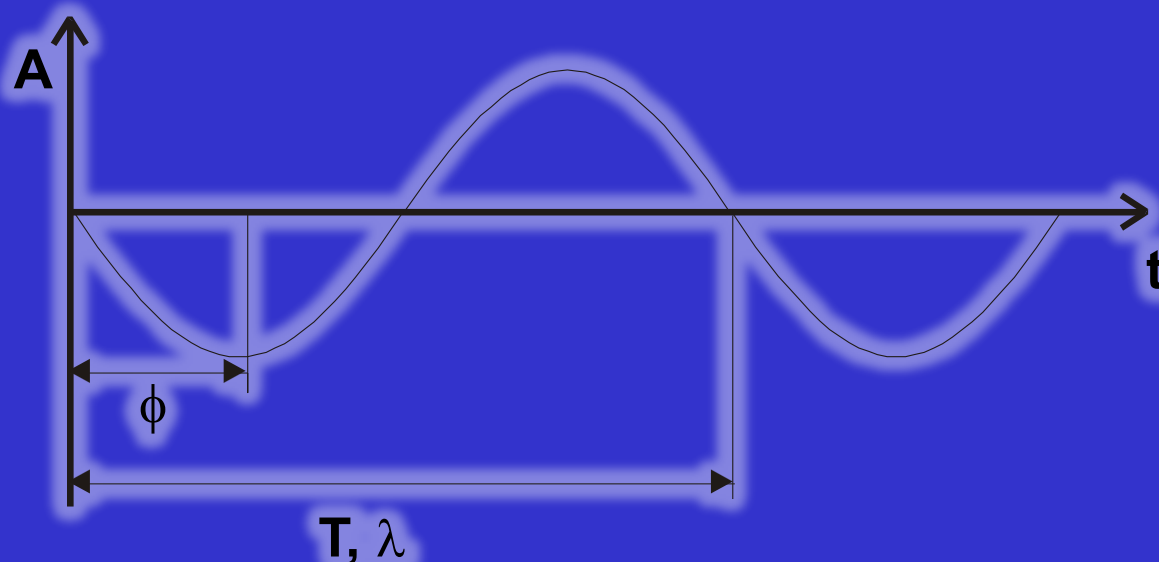
Korekcja czasu w wyniku sprowadzenia czterech pomiarów satelitarnych do jednego punktu.

Pomiar czasu i częstotliwości:

Okresem T sygnału nazywamy czas jednej pełnej zmiany przebiegu sygnału (fali). Częstotliwością f sygnału okresowego nazywamy liczbę jego okresów T w jednostkowym przedziale czasu (najczęściej w jednej sekundzie).

Częstotliwość jest odwrotnością okresu przebiegu :

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$



Pomiar czasu i częstotliwości:

Jednostką okresu (czasu) jest sekunda (s), częstotliwości herc (Hz).

W codziennym stosowaniu wykorzystywane są jednostki podwielokrotne czasu, np. *ms*, *μs*, *ns* i wielokrotne częstotliwości, np. *kHz*, *MHz* czy *GHz*.

Wspomniane parametry są wielkościami, które można mierzyć z bardzo dużą dokładnością **częstościomierzami cyfrowymi**, dzięki istnieniu doskonałych wzorców częstotliwości, np. kwarcowych.

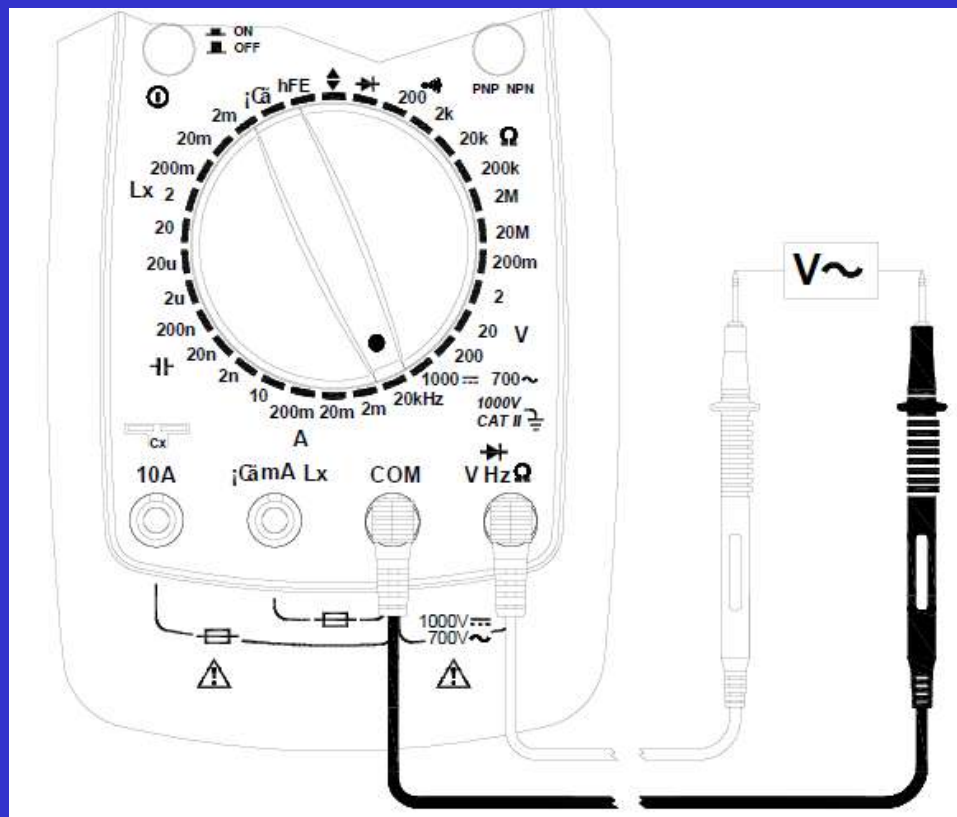
Do podstawowych metod pomiaru czasu i częstotliwości można zaliczyć :

- metody cyfrowe;
- metody oscyloskopowe.

Pomiar częstotliwości metodą cyfrową:

Metoda cyfrowa polega na zliczaniu liczby n okresów przebiegu w czasie wzorcowego przedziału czasu T_w i określeniu częstotliwości bezpośrednio z zależności :

$$f = \frac{n}{T_w}$$



Multimetr z możliwością pomiaru częstotliwości.

Pomiar częstotliwości metodą cyfrową:

Badany przebieg o nieznanej częstotliwości w wejściowych układach formujących kształtowany jest w ciąg impulsów prostokątnych o takiej samej częstotliwości.

Generator wzorcowy (kwarcowy) wytwarza impuls prostokątny otwierający bramkę na czas T_w pomiaru.

W czasie jej otwarcia licznik zlicza n impulsów mierzonego przebiegu o częstotliwości f , zatem:

$$T_w = nT$$

Liczba zliczonych impulsów n jest bezpośrednio miarą częstotliwości.

Pomiar częstotliwości metodą cyfrową:

Błąd pomiaru częstotliwości jest zależny od dokładności określenia czasu otwarcia bramki T_w (zwykle jest pomijalnie mały, jest to bowiem błąd generatora wzorcowego – kwarcowego) oraz od błędu zliczania impulsów (jego wartość bezwzględna wynosi ± 1 impuls), zatem względna niepewność pomiarowa częstotliwości δf częstościomierzem cyfrowym wynosi:

$$\delta f = \delta T_w + \frac{1}{n} = \delta T_w + \frac{1}{f T_w}$$

Z powyższej zależności wynika, iż:

- błąd pomiaru częstotliwości maleje ze wzrostem liczby zliczanych impulsów n (co jest równoznaczne z mierzeniem dużych częstotliwości),
- wydłużenie czasu bramkowania T_w powoduje zmniejszenie błędu pomiaru,
- zmniejszanie się mierzonej częstotliwości prowadzi do wzrostu błędu pomiaru.

Pomiar czasu częstotliwości metodą oscyloskopową:

Metoda oscyloskopowa pomiaru okresu i częstotliwości:



Oscyloskopy pomiarowe.

Pomiar częstotliwości metodą oscyloskopową:

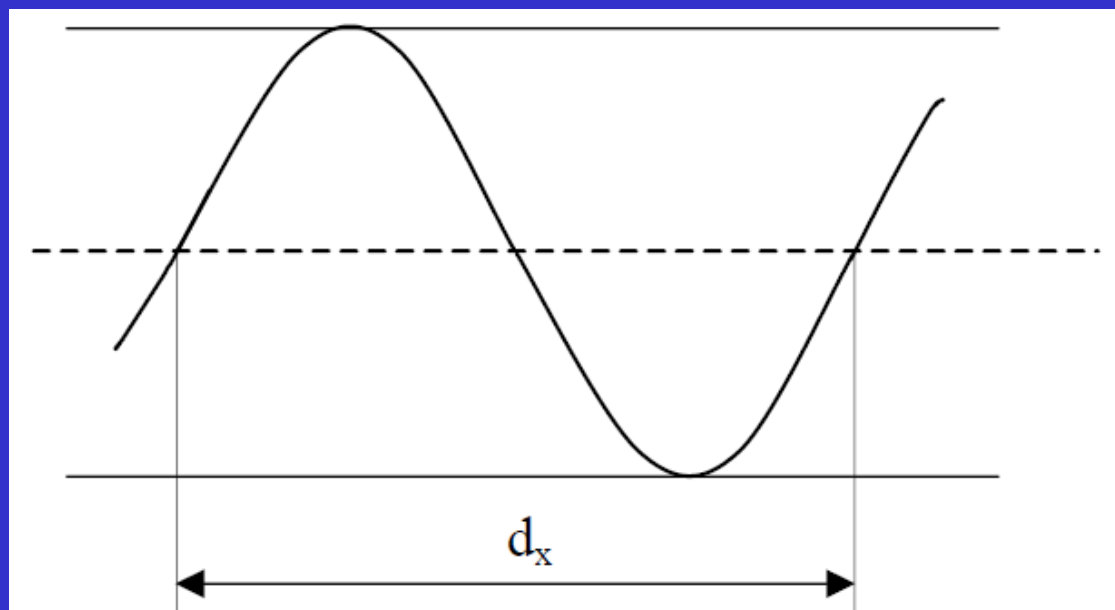
Pomiary oscyloskopowe umożliwiają pomiar metodą:

- **pośrednią**, poprzez pomiar okresu badanego przebiegu ,
- **porównawczą**, w której oscyloskop jest używany jako wskaźnik zrównania ze sobą sygnałów o częstotliwości mierzonej f i wzorcowej f_w doprowadzonych do torów X i Y oscyloskopu.

Pomiar częstotliwości metodą oscyloskopową:

W **metodzie pośredniej** częstotliwość określa się według zależności ze slajdu 13, jako odwrotność pomierzonego bezpośrednio z ekranu oscyloskopu czasu okresu T_x badanego przebiegu, przy znajomości współczynnika kalibracji generatora podstawy czasu S_x . Czas trwania okresu wyniesie:

$$T_x = d_x \cdot S_x$$



gdzie: d_x - odczytana z ekranu długość odcinka (np. w cm) odpowiadająca jednemu okresowi;

S_x - współczynnik nastawy kalibratora podstawy czasu (np. w ms/cm).

Pomiar częstotliwości metodą oscyloskopową:

Źródłami błędów metody pośredniej pomiaru okresu fali (tym samym i częstotliwości) są:

- błąd odczytu długości odcinka odpowiadającego okresowi przebiegu $\Delta l / l_x$;
- niedokładności kalibracji generatora podstawy czasu δS_x .

Niepewność względna wyznaczenia czasu lub częstotliwości wynosi więc:

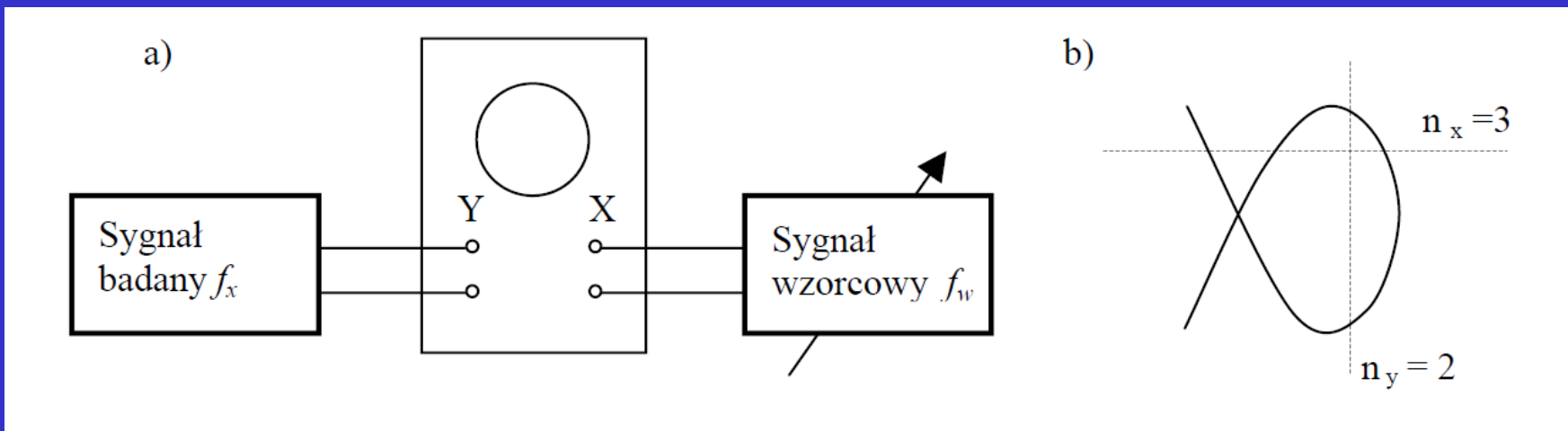
$$\delta f_x = \delta S_x + \frac{\Delta l}{l}$$

W praktyce niepewność wyznaczenia częstotliwości metodą pośrednią może osiągać kilka procent wartości pomierzonej.

Pomiar częstotliwości metodą oscyloskopową:

Metoda porównawcza, znana również jako metoda figur Lissajous zapewnia większa dokładność pomiaru.

Pomiar częstotliwości tą metoda polega na bezpośrednim porównaniu sygnału o nieznannej częstotliwości f_x , z sygnałem o wzorcowej częstotliwości f_w podłączonymi odpowiednio do wejść X i Y oscyloskopu (oscyloskop powinien pracować w trybie z wyłączoną wewnętrzną podstawą czasu). Jednoczesne wystereowanie obu kanałów powoduje pojawienie się na ekranie figur Lissajous.



Pomiar częstotliwości metodą figur Lissajous:

a) układ pomiarowy, b) przykład określenia ilości punktów przecięć.

Pomiar częstotliwości metodą oscyloskopową:

Zrównanie obu częstotliwości (poprzez dostrajanie f_w), lub zapewnienie stosunku częstotliwości równego liczbie całkowitej, daje możliwość uzyskania na ekranie nieruchomych obrazów. Niewielka różnica częstotliwości powoduje obrót obrazu z szybkością proporcjonalną do rozbieżności częstotliwości. Kształt figur jest przede wszystkim zależny od stosunku częstotliwości i przesunięcia fazowego między sygnałami. Należy pamiętać, że regularne kształty figur uzyskuje się dla tylko nieznacznie odkształconych sygnałów sinusoidalnych.

Częstotliwość f_x określa się na podstawie ilości przecięć n_x i n_y figury na ekranie z prostymi równoległymi do osi X oraz do osi Y (slajd 22). Obie proste powinny być tak poprowadzone, aby nie były styczne do obserwowanej figury i nie przechodziły przez jej punkty węzłowe. Liczbowy stosunek ilości przecięć wskazuje ile razy częstotliwość badana jest większa lub mniejsza od częstotliwości wzorcowej.

Aplikacja rysująca krzywe Lissajous p. Marcina Pawła Sadowskiego z Wydziału Fizyki UW
(<http://www.sadowski.edu.pl>)

Pomiar częstotliwości metodą oscyloskopową:

Jeżeli odpowiednio f_x oznacza nieznaną częstotliwość sygnału podłączonego do wejścia np. kanału X , a f_w częstotliwość sygnału generatora wzorcowego, podłączonego do wejścia kanału Y oscyloskopu; n_x liczbę przecięć figury z prostą w osi X (pozioma), a n_y liczbę przecięć figury z prostą osi Y (pionowa), to poszukiwaną częstotliwość f_x określa zależność :

$$f_x = \frac{n_x}{n_y} \cdot f_w$$

Pomiar tą metodą może być bardzo dokładny, jeżeli dysponuje się dokładnym generatorem sygnału wzorcowego f_w . Jeżeli figura na ekranie pozostaje nieruchoma, to dokładność pomiaru jest określona dokładnością generatora wzorcowego: $\delta f_x = \delta f_w$. Natomiast w przypadku różnicy częstotliwości tych sygnałów obraz obraca się wokół własnej osi, powodując dodatkową niepewność Δf wyniku pomiaru. Oszacować ją można za pomocą pomiaru czasu t , w którym obraz obróci się o 360° . Wówczas dodatkowy błąd wynosi:

$$\Delta f = \frac{1}{t}$$

Pomiar częstotliwości metodą oscyloskopową:

Całkowity błąd pomiaru częstotliwości:

$$\delta f_x = \delta f_w + \frac{\Delta f}{f_x}$$

Metodę figur Lissajous powinno stosować się, gdy stosunek obu częstotliwości nie przekracza wartości 5 do 10; przy większych stosunkach trudno jest zinterpretować otrzymany obraz ze względu na duże zagęszczenie linii.