

Co stihne světlo za pikosekundu? Měření času s pikosekundovou přesností

V. Cupal¹, J. Lískovec², J. Pavlišta³, D. Šulc⁴

¹Gymn. Jeseník, ²Gymn. Olomouc Čajkovského 9,

³Gymn. Jana Masaryka Jihlava, ⁴Gymn. Břeclav

²jan.liskovec@seznam.cz

Abstrakt

Naším tématem bylo měření časových intervalů. Seznámili jsme se s různými metodami měření a jejich výhodami a slabostmi. V praxi jsme si vyzkoušeli jednoduchý experiment. Proměřili jsme změny zpoždění průchodu elektrického impulzu koaxiálním kabelem na teplotě.

1 Úvod

Měření času je úkon provázející člověka od začátku jeho bádání a poznávání okolí a sebe sama. Historickými objevy se tento obor stále zlepšoval – zpřesňoval. Od slunečních k mechanickým až např. k atomovým. Měření času bylo základem pro další rozvoj jiných oblastí. Náš experiment využívá měření intervalu elektrických impulzů ke zjištění teplotní závislosti doby průběhu signálu koaxiálním kabelem. Jiným využitím měření s pikosekundovou přesností může být zjišťování vzdálenosti družic nebo Měsíce. Toto má využití například při předpovídání zemětřesení díky předcházejícím posuvům zemských ker nebo ke změření konstanty G/M. Další možnou aplikací je synchronizace časů na oběžné dráze.

2 Metody měření času

První metodou moderního měření času je počítání vln elektrického napětí vycházejících z ustáleného oscilátoru. Limitem tohoto způsobu jsou však nanosekundy. Můžeme mít také kondenzátor o známé kapacitě. Jeho nabíjení z původní hodnoty napětí na vyšší probíhá po exponenciálně dané kapacitou. Pokud změříme napětí, na které se kondenzátor nabil, můžeme zjistit i dobu, po kterou k tomu docházelo. Chyby tohoto způsobu vznikají nepřesnostmi stavby kondenzátoru a při určování napětí. Jsou vhodné i pro časy kratší než 1 ps, ale jen v malém dynamickém rozsahu.

Zpřesnění první metody lze dosáhnout na základě principu použitého na posuvném měřítku (zmámém pod obecným názvem šupléra) – Vernierův princip. Máme dva signály o podobné vysoké frekvenci (v našem případě 200 a $200 \cdot (255/256)$ MHz). Pokud tyto dva

signály spojíme vznikne signál (viz rovnice 1) modulovaný s nižší frekvencí, kterou jsme schopni měřit.

$$u_1 + u_2 = 2A \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right) \cos\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right) \quad (1)$$

Nyní počítáme jen počet nosných vln o nižší frekvenci $f_1 - f_2$. Tento způsob jsme použili i my v našem experimentu a analogický princip používáme při ladění nástrojů pomocí ladiček.

3 Experiment

Naše pokusná aparatura se skládala z těchto částí: generátor impulzů, čítač časových intervalů HP 5370B, osciloskop, termostatová vana, teploměr a pásmové měřidlo. Generátor vytváří kladný pulz s frekvencí 100 Hz, amplitudou 5V, šířkou 10 ns a náběžnou dobou 3 ns. Impulz prochází čítačem a dál volně končí v termostatu. Na volném konci se odráží zpátky, protože okolní prostředí má nekonečnou impedanci. Poté znovu, ale zeslaben projde čítačem, který měří časový interval mezi těmito průchody. Celková délka kabelu byla 28,07 m, z čehož 26 m bylo ponořeno. Při výpočtech bylo ale třeba uvažovat délky dvojnásobné, protože impulzy procházely tam a zpět.

Z množství výsledků také počítá čítač aritmetický průměr a směrodatnou odchylku. Aparaturu jsme nechali prvně zahřát a měřili s koaxiálním kabelem ve vzduchu o pokojové teplotě (25°C). Poté jsme ho ponořili do termostatu, který měl uvnitř vodu o teplotě 54°C. Nakonec jsme do termostatu nalili vodu studenou a ověřili, že se hodnota zpoždění vrátila na hodnotu odpovídající pokojové teplotě.

4 Statistika

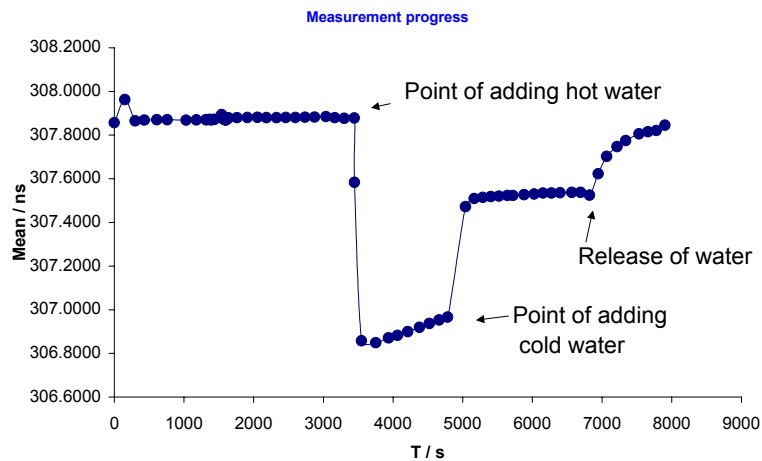
Měření jsou zatížena různými chybami. Seznámili jsme se základními typy chyb (systematické, náhodné). Ukázali jsme si pravděpodobnostní rozložení náhodné chyby (Gaussova křivka) a pravidla pro výpočet celkové chyby měření. Ze vzorce pro průměrnou odchylku měření (viz rovnice 2) vyplývá, že pokud chceme mít měření n -krát přesnější, musíme provést dalších n^2 měření.

$$\overline{\Delta x} = \frac{\Delta x}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

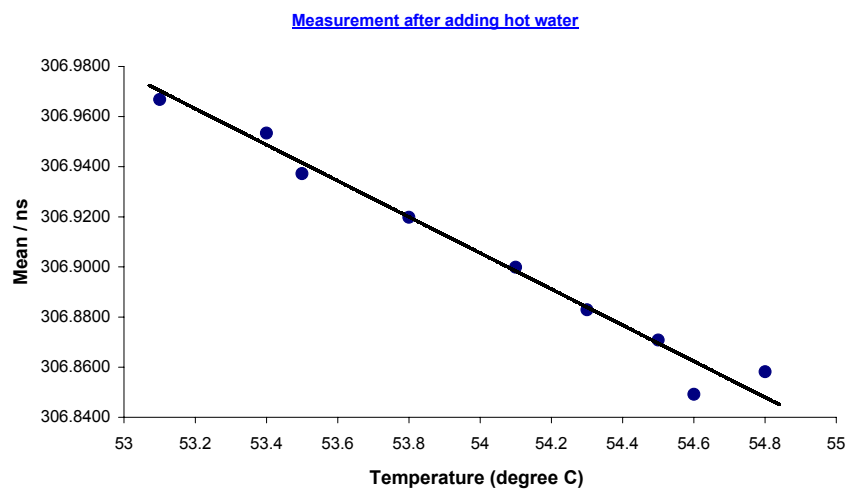
Chyby při našem měření nastaly především kvůli nepřesnému odečítání teplot, nemůžeme vyloučit ani chybu přístroje.

5 Výsledky a závěry

Výsledky našeho měření ukazují změny doby, kterou elektrický impuls prochází kabelem, tedy jeho rychlosti v závislosti na tom, v jakém prostředí se nachází. Impulzy jsou tak rychlé, že bychom bez měření na pikosekundy neobešli. Následující graf č.1 ukazuje změny časového intervalu zachycené čítačem v průběhu celého experimentu.



Graf 1: Celkový časový průběh změn zpoždění.



Graf 2: Závislost zpoždění v kabelu na teplotě okolí, výsledná změna je $-0,67 \text{ ps/K/m}$

Z našich výsledků vyplývá, že elektrický signál se naším konkrétním koaxiálním kabelem šířil rychlostí $1,8 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$, což odpovídá $c/1,7$ a dále jsme naměřili, že zpoždění se mění s teplotou rychlostí $-0,67 \text{ ps K}^{-1} \text{ m}^{-1}$.

Poděkování

Děkujeme za skvělou podporu a pomoc našemu supervisorovi Ing. Josefovi Blažejovi, PhD. a samozřejmě také celé fakultě a organizátorům, že tuto akci pro nás vůbec podnikají.

Reference:

- [1] Hewlett Packard: *Users Manual for Universal Time Interval Counter*. HP Company, 1983
- [2] VRBOVÁ, M. A KOL.: *Lasery a moderní optika*. Prometheus, 1994
- [3] MIKULČÁK A KOL. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*. Prometheus, 1988
- [4] A. V. KOTWAL, M. KIRBY, W. J. ROBERTSON *COT Calibration System Prototype Tests*. Duke University, [online] <http://www.phy.duke.edu/research/hep/internal/fanout_test.ps>, 1999