

Měření krátkých časových intervalů s pikosekundovým rozlišením

J. Pavelka
Gymnázium Brno
j.pavelka@centrum.cz

Abstrakt:

V projektu jsem se seznámil se základními principy měření času s nanosekundovou a pikosekundovou přesností. Naměřil jsem zpoždění a rychlost šíření elektrického signálu v koaxiálním kabelu v závislosti na teplotě.

1 Úvod

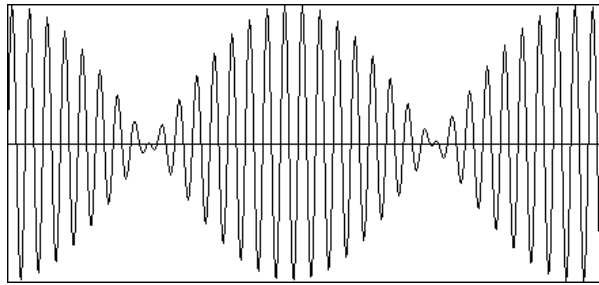
Měření času patří k nejstarším pokusům v historii lidstva. Postupně se zvyšovaly nároky na přesnost měření této základní veličiny. Zejména v posledních desetiletích vznikla potřeba rychlého a bezkontaktního měření krátkých i extrémně velkých vzdáleností s maximální možnou přesností. Mezi nejpřesnější známé metody patří měření času, který potřebuje elektromagnetický signál k překonání vzdálenosti k měřenému objektu a návratu k přijímači. V roce 1969 byla touto metodou stanovena vzdálenost Měsíce od Země s přesností na 5 m. Synchronizace a navigace umělých družic je dnes bez této metody naprosto nemyslitelná. Tato metoda má však i své využití v průmyslu nebo mikroskopii.

2 Metody měření krátkých časových intervalů

K měření byl použit čítač časových intervalů HP 5730B. Na vstup přístroje je připojen zdroj vysokofrekvenčního signálu. První impuls spustí vnitřní oscilátor přístroje s vlastní frekvencí 200 MHz, pomocí kterého se určí délka měřeného intervalu nebo periodu vlnění s přesností na 5 ns. Světelný signál za tuto dobu urazí asi 1,5 m. Vzhledem k tomu, že při měření vzdáleností touto metodou zpravidla požadujeme přesnost měření v setinách nebo desetínách metru, je zapotřebí zvýšit rozlišovací schopnost přístroje řádově na pikosekundy. K tomuto zpřesnění se často využívá Vernierova jevu (známého například z posuvných měřidel). K původnímu signálu je přimíchán další signál, který má velmi blízkou frekvenci. Jejich složením vzniknou rázy, jejichž frekvence je řádově nižší. Pokud známe přesně parametry přimíchaného signálu, můžeme vypočítat velmi přesně parametry původního signálu.

$$A = \sin(2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot t) + \sin(2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot t) = 2 \cdot \sin\left(\frac{f_1 + f_2}{2} \cdot \pi \cdot t\right) \cdot \cos\left(\frac{f_1 - f_2}{2} \cdot \pi \cdot t\right)$$

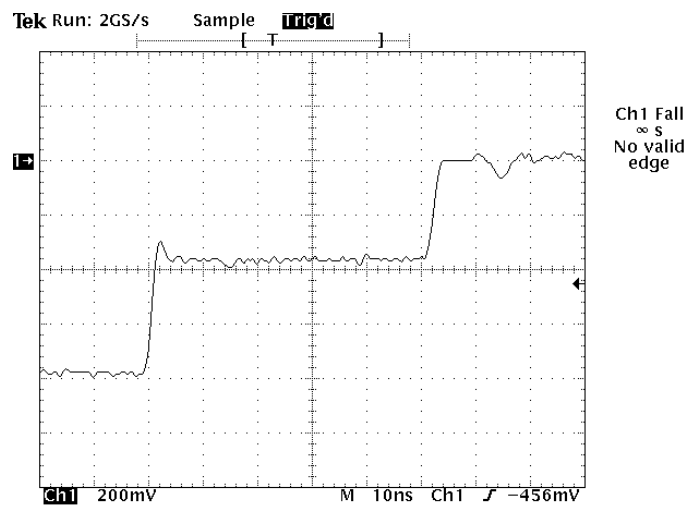
Z této rovnice je vidět, že frekvence jednotlivých rázů je tím větší, čím méně se frekvence obou vlnění liší. Touto metodou je možno měření zpřesnit až stokrát.



Obrázek 1. Rázy vzniklé složením dvou vlnění

3 Měření zpoždění koaxiálního kabelu

K čítači časových intervalů byl připojen oscilátor o frekvenci 200 Hz. Elektrické impulzy z tohoto zdroje mají velmi ostrý náběh, proto bylo možno přesně změřit čas mezi původním a odraženým signálem. Ke vstupu čítače byl připojen koaxiální kabel s volným koncem, jehož parametry jsme měřili. Signál se na vstupu od čítače rozdělil, část byla detekována, zbytek prošel kabelem, kde se odrazil a na vstupu do čítače byl opět zadetekován. Čítač změřil čas, který uplynul mezi zaznamenáním původního a odraženého impulzu – zpoždění signálu.

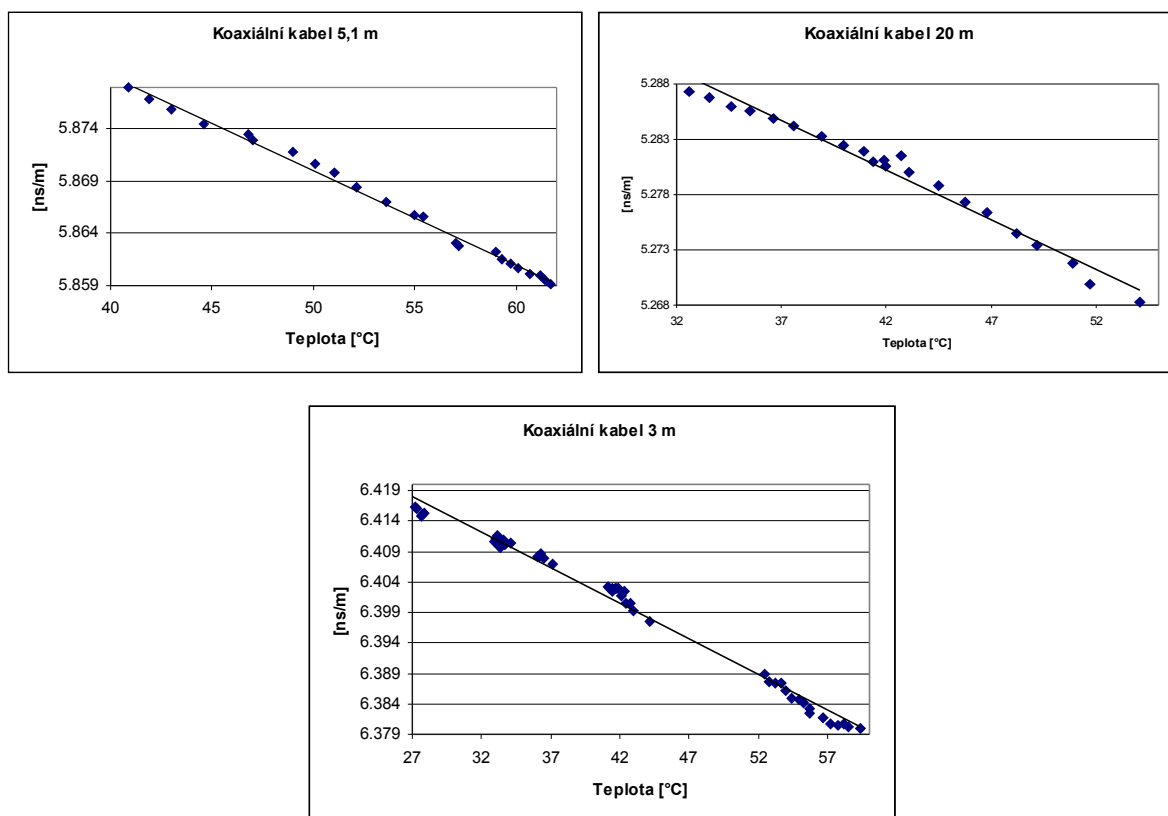


Obrázek 2. Náběhová hrana původního a odraženého impulzu

Cílem projektu bylo zjistit závislost zpoždění signálu v kabelu na teplotě. Při zahřátí se změní délka, odpor a elektromagnetické vlastnosti kabelu. Kabel jsme vložili do vodní lázně a postupně měnili její teplotu. Po ustálení teploty jsme čas, za který prošel vyslaný signál na konec kabelu a zpět. Ze získaných hodnot jsme vypočítali čas, za který signál urazí jeden metr kabelu při dané teplotě – zpoždění kabelu. Měření jsme zopakovali pro tři kabely délky 3m, 5,1 m a 20 m. Od naměřeného času zpoždění signálu bylo zapotřebí odečíst dobu potřebnou k překonání neponořené části kabelu.

4 Výsledky měření

Z naměřených hodnot vyplývá, že čas, za který překoná signál 1 m koaxiálního kabelu je za běžně dosažitelných podmínek asi 5 – 6 ns. Z grafů na obrázku 2 je vidět, že závislost tohoto času na teplotě je přímo úměrná, zpoždění signálu v kabelu klesá asi o $0,9 \text{ ps}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$. Tyto hodnoty odpovídají rychlosti šíření signálu rovné $1,79\cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což je asi 60% rychlosti světla ve vakuu. Tato rychlost je však stále tak velká, že je nezbytné měřit časové intervaly s přesností na pikosekundy.



Obrázek 3. Zpoždění signálu

Poděkování

Chtěl bych poděkovat supervisorovi Ing. Martinu Fedyszynovi a ostatním organizátorům za věnovaný čas, FJFI ČVUT za materiální zajištění.

Reference:

- [1] HEWLETT PACKARD: *Users Manual for Universal Time Interval Counter*, HP Company, 1995.
- [2] M. FEDYSZYN: *Měření času s pikosekundovou přesností*
<http://fyzika.fjfi.cvut.cz/howto/ProcFyzSemTyd/default.html>
- [3] <http://kfe.fjfi.cvut.cz/~blazej/en/res/prj/pet.html>