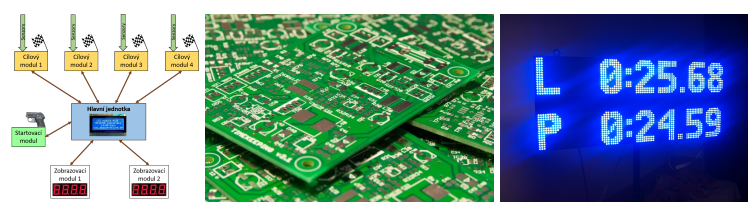


Spolehlivá bezdrátová časomíra (nejen) pro požární sport

Tomáš Pelka*



Abstrakt

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí bezdrátového zařízení pro měření různých disciplín požárního sportu. Cílem je nahradit dlouhé kabelové rozvody bezdrátovými spoji při zachování srovnatelné, nebo lepší spolehlivosti. Hlavním problémem je potřeba přesné synchronizace hodin mezi jednotlivými moduly. Důležitou částí je proto návrh vhodného synchronizačního algoritmu a komunikačního protokolu. Parametry navrženého systému (zejména přesnost synchronizace a měření) byly úspěšně ověřeny v laboratorních podmínkách. Práce proto pokračuje návrhem a konstrukcí zejména elektronických částí jednotlivých modulů (zobrazovací panel, cílové moduly, hlavní jednotka) s ohledem na široký rozsah napájecích napětí a další provozní podmínky. Navržený systém je použitelný nejen pro soutěže v požárním sportu, ale díky malým rozměrům, nízké hmotnosti a rychlé instalaci jej lze využít také při tréninku.

Klíčová slova: bezdrátová časomíra pro požární sport — synchronizace hodin — synchronizace času — SimpliciTI — CC1101

Příložené materiály: N/A

*xpelka01@stud.fit.vutbr.cz, Faculty of Information Technology, Brno University of Technology

1. Úvod

Požární sport je skupina několika disciplín – individuálních i kolektivních, mající společný základ v atletice. Už od počátku požárního sportu bylo potřeba měřit a srovnávat výkony soutěžících. Nejprve se používaly mechanické stopky, které byly nahrazeny různými elektronickými zařízeními. Ty jsou obvykle propojeny dlouhými kabely, což s sebou nese řadu nevýhod – zdloouvavá instalace, možnost poškození kabeláže (závodníky, diváky), apod.

Tato práce navazuje na mou dříve vypracovanou bakalářskou práci [1]. Zabývá se návrhem a konstrukcí komplexního zařízení, které nahrazuje až 100 m dlouhé kabelové spoje bezdrátovou komunikací při zachování srovnatelné, nebo lepší spolehlivosti a přesnosti měření

(minimální rozlišovací jednotka 0,01 s). Konkurenční bezdrátové časomíry používají nespolehlivý přenos dat (např. vestavěnými bezdrátovými zvonky) a nejsou tak odolné proti dočasnému rušení, nebo zpoždění. Důležitou součástí je proto návrh vhodného synchronizačního algoritmu a komunikačního protokolu, jejichž funkčnost bude důkladně ověřena.

Nahrazením kabelů došlo k výraznému snížení hmotnosti a velikosti celého zařízení. Vzniklo několik modulů s různým účelem – cílový modul, hlavní jednotka, zobrazovací panel a další. Objevuje se možnost použití časomíry pro trénink, což vyžaduje rychlou instalaci a snadnou přenositelnost zařízení. V případě tréninku je vhodné zařízení napájet z malých vestavěných akumulátorů. Zároveň musí jednotlivé mod-

uly disponovat možností připojení k různým externím zdrojům napájení, aby bylo možné zajistit déletrvající provoz např. při soutěži. Proto se práce zabývá také návrhem elektroniky, která kombinuje provoz z vestavěného Li-ion akumulátoru a externího zdroje (akumulátor, palubní napětí osobního nebo nákladního vozidla, síťový adaptér).

Navržený systém časomíry používá současné moderní technologie, které umožnily celé zařízení rapidně zmenšit a zároveň zvýšit jeho spolehlivost. Díky snadné přenositelnosti, malé hmotnosti a krátké době instalace je možné rozšířit jeho použití i na tréninky, což dosud nebylo obvyklé. Celý koncept je velmi univerzální a lze jej bez větších úprav použít pro konstrukci časomír pro další sportovní oblasti – např. atletické oddíly, školy, ale také agility, a další.

2. Disciplíny a jejich měření

Disciplíny požárního sportu mají původ v atletice a jsou považovány za velmi rychlé. Měřené časy mohou sice dosáhnout až 5 minut (limit na provedení disciplíny štafeta 4×100 m s překážkami), ale rozdíly mezi závodníky často dosahují desetin, nebo dokonce setin sekundy. Podle pravidel [2, 3] musí být elektronická časomíra schopná měřit všechny disciplíny s přesností 0,01 s.

Soutěžní pokus je obvykle odstartován výstřelem ze startovací pistole, méně obvyklé je startování pomocí optické brány (první člen družstva, který protne paprsek, spustí měření času). U individuálních disciplín (běh na 100 m s překážkami, výstup do 4. podlaží cvičné věže) je možné postavit několik drah paralelně (obvykle 2 nebo 4) pro urychlení průběhu soutěže. Všichni závodníci jsou odstartováni současně a to i v případě kolektivních disciplín. Začátek měření pokusu je pro danou skupinu závodníků stejný, na trati je vždy právě jedna skupina – startování je sekvenční, nebo paralelní, nikdy ne zřetězené.

Ukončení měření času se u jednotlivých disciplín liší. V případě běhu na 100 m s překážkami je v cíli optická brána, stejně jako u štafety 4×100 m s překážkami. Při výstupu do 4. podlaží cvičné věže se musí závodník dotknout podlahy – musí šlápnout na dvě desky se spínači. Požární útok, který probíhá na dva terče, se od předchozích disciplín liší tím, že se čas pokusu zastaví po sražení obou terčů. Zároveň je obvyklé změřit mezičas prvního sražení terče.

3. Specifikace prvků časomíry

Z předchozí kapitoly plyne, že jednotlivé disciplíny vyžadují různé způsoby měření – startování, ukončení

pokusu, další parametry (doba přípravy, limit na provedení pokusu). Tyto požadavky se budou snažit napříč disciplínami maximálně abstrahovat. Cílem je minimalizace počtu prvků specifických pro jednotlivé disciplíny, a naopak navržení prvků univerzálních.

Časomíru jako celek rozdělím na několik modulů, které budou mezi sebou komunikovat bezdrátově. Kriterium na rozdělení je zejména vzdálenost, která bude nahrazena bezdrátovým spojením.

Navržené rozdělení je následující, některé moduly lze sloučit do jednoho:

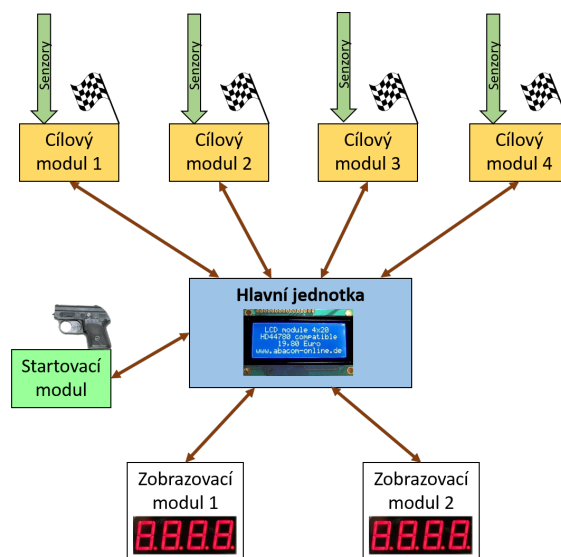
- hlavní jednotka (právě 1),
- startovací modul (nejvýše 1),
- cílový modul (alespoň 1),
- zobrazovací moduly (volitelně).

3.1 Topologie

Každá sestava časomíry bude mít hlavní jednotku. Díky tomu se nám nabízí možnost uspořádat komunikující moduly do hvězdicové topologie, kde středem bude právě hlavní jednotka.

Ustavení sítě bude proto jednoduché – každý modul se bude snažit připojit pouze k hlavní jednotce.

Vzdálenost, na kterou zařízení komunikují, musí spolu s volbou bezdrátových modulů umožnit přímou komunikaci bez použití opakováčů (repeater) a jim podobných zařízení.



Obrázek 1. Příklad časomíry se startovací jednotkou a čtyřmi cílovými moduly

3.2 Hlavní jednotka

V sestavě časomíry je právě jedna hlavní jednotka. Slouží jako přístupový bod a je středem veškerého toku dat. Proto musí být v dosahu všech ostatních modulů. Obvykle bývá umístěna blízko startu. Řídí

synchronizaci hodin mezi moduly (bude popsáno dále). Před započítím dalšího pokusu (měření) zřetelně signalizuje připravenost časomíry jako celku, která je podmíněna např. vynulováním časů, synchronizovanými hodinami, apod.

Obsluhují ji časoměři, kteří se starají o zápis časů a jejich vyhodnocení. Je vybavena ovládacími tlačítky a LCD displejem, na kterém jsou zobrazovány dosažené časy v jednotlivých drahách. Může být propojena s PC, do kterého budou přenášeny naměřené časy a další.

3.3 Startovací modul

V sestavě časomíry je nejvýše jeden startovací modul. Zajišťuje bezdrátovou komunikaci mezi senzory u startu a hlavní jednotkou. Umožňuje připojit startovací zařízení – obvykle pistoli s vestavěným spínačem. Volitelně je k ní možné připojit optickou bránu, která bude využita pro hlídání předčasného startu, nebo pro speciální způsob startování.

Na příkaz nového měření (od hlavní jednotky) odpovídá, jestli je připraven (připojené senzory jsou v klidu, paměť časů musí být prázdná). Následně čeká na aktivaci startovacího senzoru. Pokud dojde ke 2. aktivaci startovacího senzoru (2 výstřely z pistole znamenají neplatný start), nebo aktivaci volitelně instalované optické brány pro hlídání předčasného startu, tak předá informaci o neplatném startu.

Čas odstartování a případné informace o neplatném startu si nejprve ukládá do paměti (která se nevymaže při ztrátě napájení), a teprve poté se vše snaží odeslat hlavní jednotce. Data z paměti maže až po obdržení potvrzení o přijetí, případně při vynuceném nulování.

Prostřednictvím hlavní jednotky je možno konfigurovat typ startovacího senzoru (optická brána, nebo spínač – spínací, rozpínací, přepínací) a parametry pro detekci předčasného startu (prodlevu).

3.4 Cílové moduly

V sestavě časomíry je alespoň jeden cílový modul. Umožňuje připojit různá koncová čidla (spínací, rozpínací, přepínací, nebo optickou bránu) a může signalizovat aktivaci koncového čidla (např. pomocí relé nebo LED diod). Teoreticky mohou být měřeny až 4 dráhy současně a to pomocí jediného modulu se 4 připojenými senzory, nebo až 4 moduly – každý s jedním připojeným senzorem.

Na příkaz nového měření (od hlavní jednotky) odpovídá, jestli je připraven (připojené senzory jsou v klidu, paměť časů musí být prázdná). Následně čeká na aktivaci senzorů. Časy aktivace senzorů si průběžně

ukládá do paměti (která se nevymaže při ztrátě napájení), a snaží se vše odeslat hlavní jednotce. Data z paměti maže až po obdržení potvrzení o přijetí, případně při vynuceném nulování.

3.5 Zobrazovací moduly

V sestavě časomíry může být různý počet zobrazovacích modulů. Pro účely tréninku nemusí být nainstalován žádný (výsledný čas bude zobrazen pouze na displeji hlavní jednotky). Na soutěžích může být i větší počet zobrazovacích panelů.

Modul bude vestavěn přímo do zobrazovacího panelu (např. z LED diod). Kromě měřeného času pokusu mohou být zobrazovány průběžné výsledky, odpočet času na přípravu pokusu, jméno soutěžícího (nebo družstva), hodiny, nebo teplota vzduchu. Vhodná je také možnost regulace jasu.

Při bezdrátové komunikaci může dojít ke ztrátě dat, což by mohlo vést k nesprávným výsledkům zobrazeným prostřednictvím tohoto modulu.

Při měření času pokusu obdrží tyto moduly čas odstartování pokusu. Protože jsou jejich hodiny synchronizovány s hlavní jednotkou, tak je možné spočítat uplynulou dobu od startu a tento čas průběžně zobrazovat. Pokud by ale došlo ke ztrátě času o ukončení pokusu, tak zobrazovací modul bude dále čítat. Tato situace sice nebude mít vliv na výsledný čas (jedná se o dočasnou chybu, z které se časomíra díky komunikačnímu protokolu zotaví), ale může to zmást jak diváky, tak závodníky.

Řešením je pravidelné zasílání zpráv, které informují modul o tom, že veškerá komunikace probíhá správně a nejsou žádná nedoručená data – vše, co má modul k dispozici je aktuální. Pokud zobrazovací modul neobdrží včas tuto zprávu, tak displej automaticky zhasne a rozsvítí se, až bude problém s komunikací vyřešen.

4. Synchronizace hodin (času)

U bezdrátové komunikace nelze předpokládat 100% spolehlivost doručení dat. Mohou nastat kolize v síti, chyba při přenosu, nebo dočasné rušení. Pokud bychom přenášeli pouze informace o změnách stavů senzorů, tak nám měřený čas mohou znehodnotit dva problémy – možnost ztráty dat, nebo nedeterministické zpoždění.

Tento způsob přenosu využívají např. bezdrátové zvonky. Jedná se o nespolehlivé řešení, které je zdrojem nepřesnosti měření. Proto budou místo změn stavů senzorů přenášeny časy těchto událostí. Zařízení se budou pokoušet doručit data tak dlouho, dokud nepřijde potvrzení – tím jsme odstranili oba problémy. Vznikl

ale nový problém – všechna zařízení musí mít k dispozici v každém okamžiku stejné časové razítko.

4.1 Přesnost krystalu

Přesnost krystalu určuje, o kolik se může lišit skutečná frekvence od udávané (za předepsaných podmínek). Její jednotkou je obvykle ppm (parts per million), což je jedna miliontina. Krystaly dostupné na trhu mají přesnost přibližně v rozmezí 10–100 ppm.

Při určování nejhorší chyby měření budeme předpokládat, že jeden modul se odchyluje směrem nahoru a druhý dolů. Vznikne tak možná chyba až dvojnásobku přesnosti krystalu. Nyní spočítáme pomocí vzorce 1, za jakou dobu se začnou časy mezi moduly lišit o rozlišovací jednotku.

$$t_{odchylka} = 2 \cdot \text{presnost} \cdot \Delta t_{doba}$$

$$\Delta t_{doba} = \frac{t_{odchylka}}{2 \cdot \text{presnost}} \quad (1)$$

Pokud bychom měli krystal s přesností 20 ppm (což odpovídá poměrně kvalitnímu krystalu), tak k překročení povolené odchylky (0,01 s) dojde za:

$$\Delta t_{doba} = \frac{0,01}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 250 \text{ s}$$

4.2 Možnosti synchronizace hodin

Dalo se předpokládat, že k odchylce hodin dojde v relativně krátké době. Synchronizaci hodin jednotlivých modulů bude nutné provádět během soutěže (případně v průběhu samotného měřenoého pokusu). Proto je potřeba najít metodu synchronizace, která bude jednoduchá (nesmí příliš zatěžovat zvolený mikrokontrolér), nenáročná na přenos dat, a bude mít požadovanou přesnost (alespoň 0,01 s).

Možností, z kterých jsem vycházel, je několik:

- GPS,
- Network Time Protocol (NTP),
- Precision Time Protocol (PTP),
- Reference Broadcast Synchronization (RBS)
- Simple Network Time Protocol (SNTP).

Při synchronizaci pomocí bezdrátové komunikace může přesnost negativně ovlivnit:

- Zpoždění síťového zařízení (fronty, přístup k médiu, výpočet kontrolního součtu, šifrování).
- Samotný přenos (šíření) dat.
- Latence software (OS, obsluha přerušování).

Při komunikaci na krátké vzdálenosti (což 100 m je) můžeme zpoždění při přenosu (šíření) dat ignorovat. Výsledný synchronizační algoritmus musí popsané negativní vlastnosti maximálně eliminovat.

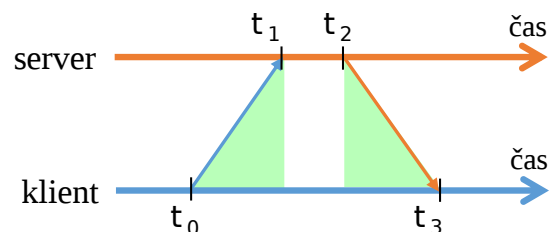
GPS umožňuje synchronizaci s přesností několika desítek nanosekund – s využitím signálu 1PPS [4, 5]. Problémem je nutnost být v dosahu signálu GPS, což není možné např. v uzavřených prostorách (halové soutěže), navíc jsou GPS přijímače poměrně drahé.

RBS [6] vyžaduje nejméně 3 zařízení – jedno vysílá synchronizační signál, ostatní poslouchají. Během jedné iterace lze synchronizovat pouze $N - 1$ zařízení. Všechny tyto vlastnosti jsou pro časomíru nevhodné. Velmi omezující je hlavně minimální počet zařízení, protože nejmenší sestava časomíry čítá 2 prvky (cílový modul a hlavní jednotku).

NTP [7], SNTP [8] a PTP [9] jsou si velmi podobné. Synchronizace času proběhne na základě výměny několika zpráv, a měření časů událostí, které při komunikaci nastaly. Zmíněné protokoly se liší např. v průměrování naměřených hodnot, v hardwarové podpoře (např. tvorby časových razítek).

Princip (algoritmus) výměny zpráv u protokolu NTP je znázorněn na obrázku 2. Synchronizaci iniciuje klient a má tyto kroky:

1. Klient si uloží čas (t_0).
2. Klient odešle zprávu (požadavek ke zjištění zpoždění) NTP serveru.
3. Server si uloží čas přijetí požadavku (t_1).
4. Server připraví zprávu (odpověď), do které připojí čas t_1 a t_2 , což je jeho aktuální čas.
5. Server připravenou zprávu odešle.
6. Klient si uloží čas přijetí odpovědi (t_3).



Obrázek 2. Znázornění NTP synchronizačního algoritmu

Z časů t_0 až t_3 je možné pomocí vzorce 2 spočítat celkové zpoždění δ , které nastalo při komunikaci (zeleně zvýrazněné trojúhelníky na obrázku 2).

$$\delta = (t_3 - t_0) - (t_2 - t_1) \quad (2)$$

Při výpočtu offsetu θ (vzorec 3) času klienta oproti času serveru se předpokládá, že zpoždění při komunikaci směrem k serveru je stejné, jako směrem ke klientovi. Vzorec pro výpočet offsetu byl odvozen následovně:

$$\theta = t_1 - t_0 - \frac{\delta}{2}$$

$$\theta = \frac{(t_1 - t_0) + (t_2 - t_3)}{2} \quad (3)$$

4.3 Výsledný synchronizační algoritmus

Při tvorbě časových razítek jsem se inspiroval protokolem PTP, který definuje hardwarovou podporu pro jejich tvorbu. Bezdrátový modul ihned po přijetí zprávy vygeneruje přerušení do mikrokontroléru, kde bude ve velmi krátké době obslouženo, přičemž se uloží čas události. Nejedná se sice o přímou hardwarovou podporu tvorby časového razítka, ale výsledek bude v důsledku vysoké priority při obsluze přerušení podobný.

Bezdrátová časomíra nepoužívá switche, routery ani jiné podobné síťové prvky, které by mohly pakety náhodně pozdržet. Proto není třeba využívat dalších vlastností PTP, které toto zpoždění eliminují. Proto jsou ostatní postupy (výpočty zpoždění a offsetu, způsob komunikace) přijaty z jednoduchého SNTP.

5. Realizace prototypu, testování

5.1 Volba komunikační frekvence

Pro bezdrátovou komunikaci je nutné zvolit vhodný kmitočet. Využívání vymezených kmitočtů stanovuje Český telekomunikační úřad ve všeobecném oprávnění [10]. Ten taky zpřístupnil přehled kmitočtů na své webové aplikaci „Využití rádiového spektra“ [11].

Z možných kmitočtových pásem lze použít 433 MHz, 868 MHz, nebo 2,4 GHz. Pásmo 2,4 GHz je intenzivně využíváno pro bezdrátové připojení k internetu – a to poskytovateli připojení i samotnými domácnostmi (domácí WiFi routery). Pásmo 433 MHz je využíváno bezdrátovými zvonky a hračkami, jejichž vysílače jsou často velmi laciného provedení a způsobují proto velké rušení. Vhodnou volbou tedy bude kmitočtové pásmo 868 MHz, na kterém lze provozovat zařízení krátkého dosahu (SRD) s vyzařovaným výkonem do 25 mW. Toto pásmo je ČTÚ rozděleno na několik menších částí, které jsou všeobecným oprávněním různě omezeny, zejména klíčovacím poměrem. Jako alternativu ke klíčovacího poměru lze použít metodu *Listen Before Talk*.

Klíčovací poměr (známý též jako *duty cycle*, *DC*) je definován jako podíl času, kdy zařízení aktivně vysílá v rámci jakékoliv jedné hodiny. V kmitočtovém pásmu 863–870 MHz je určen $DC \leq 0,1 \%$. Pro pásmo 868,0–868,6 (což jsou jen některé kanály) je $DC \leq 1,0 \%$, což odpovídá době 36 s, po kterou je možné vysílat v rámci jedné hodiny.

Bezdrátová časomíra vybavená maximálním počtem modulů však generuje značný síťový provoz. Aby byl s takovým množstvím zpráv dodržen DC, tak by bylo nutné nastavit baudrate na poměrně vysokou hodnotu, kterou bezdrátový modul nemusí podporovat,

nebo při ní bude komunikace nestabilní. Proto je toto omezení nutné řešit implementací *Listen Before Talk*.

Listen Before Talk je metoda vysílání, při které je nejprve určitou dobu poslouchána komunikace na vybraném kanálu. Pokud nepřesáhne úroveň signálu hraniční (prahovou) hodnotu, tak je možné vysílat.

5.2 Volba bezdrátových modulů

Při průzkumu dostupných řešení na trhu jsem narazil na moduly s čipy firem Nordic Semiconductor, Texas Instruments, HopeRF, Amber Wireless.

Cena modulů **Amber Wireless** byla vysoká (přibližně 700 Kč za kus), proto jsem je bez zkoumání parametrů vyřadil.

Nordic Semiconductor vyrábí populární čip nRF905, který řada čínských výrobců používá na výrobu hotových modulů. Jeden modul lze pořídit přibližně za 100 Kč.

HopeRF nabízí hotové bezdrátové moduly, které mají srovnatelné parametry s čipy Nordic Semiconductor a jejichž průměrná cena za kus je 60 Kč.

Texas Instruments vyrábí celou řadu čipů pro bezdrátovou komunikaci. Hotové moduly jsou nejčastěji vyráběny s čipem CC1101. Parametry těchto modulů jsou podobné jako u předchozích dvou firem, jejich cena se pohybuje kolem 100 Kč za kus – tedy stejně jako za moduly Nordic Semiconductor. Velkou výhodou čipů od Texas Instruments je dostupnost softwarového řešení a protokolu SimpliciTI [12], který je určen pro použití s jejich čipy. Jedná se o jednoduchý protokol určený pro malé bezdrátové sítě.

Protokol SimpliciTI se zdál být dobře použitelný pro bezdrátovou časomíru a proto jsem se rozhodl použít právě moduly s čipem CC1101 od Texas Instruments. Další výhodou byla přímá podpora *Listen Before Talk* (pro zajištění *duty cycle*) a *Adaptive Frequency Agility* (volba nejméně zarušeného kanálu).

5.3 Volba mikrokontroléru

Nabídka MCU je v dnešní době velmi široká. Nejvíce mě zaujala nově vzniklá řada 16bitových mikrokontrolérů firmy Texas Instruments s označením FR, která má nový typ paměti, tzv. FRAM (Ferroelectric Random Access Memory), která kombinuje výhody flash paměti a SRAM. Je stálá jako flash, rychlá podobně jako SRAM, a přitom má nízkou spotřebu.

Dalším důvodem pro volbu mikrokontroléru od TI bylo použití protokolu SimpliciTI, který je určen pro mikrokontroléry firmy TI, včetně příkladů pro některé vývojové kity.

Minimální požadavky na MCU byly výrazně ovlivněny knihovnou SimpliciTI (vyžaduje alespoň 10 kB

programové paměti a 1 kB RAM) a bezdrátovými moduly (komunikační rozhraní SPI). Pro měření času je požadováno počítadlo RTC (real time clock), které funguje i v režimu nízké spotřeby. Samozřejmostí jsou pull up/down rezistory u pinů obecného použití, což sníží počet externích součástek. Dalšími kritérii byla spotřeba, cena a dostupnost.

Všechny požadavky splňoval mikrokontrolér TI MSP430FR4133 [13, 14], který je osazen i na LaunchPadu (vývojový kit TI) s označením MSP-EXP430FR4133 [15].

5.4 Dosah bezdrátových modulů

Bezdrátové moduly je možné osadit různými anténami, v případě bezdrátové časomíry je vhodné použít všesměrové antény.

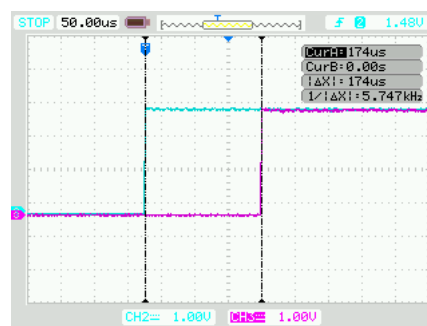
Velmi levnou variantou je pružinová anténa, která mi byla doručena jako součást modulu. Její parametry však nebyly uvedeny. Při experimentálním měření dosahu jsem zjistil, že při vzdálenosti 30 m dochází ke ztrátě zpráv. Měření probíhalo na volném prostranství (poli) v malé obci Traplice, kde se nepředpokládala přítomnost rušení. Moduly měly na sebe přímý výhled. Výkon vysílače byl nastaven na 0 dBm, baudrate na 76,8 kBaud/s. Při zvýšení výkonu vysílače nad +10 dBm přestala komunikace fungovat, což je způsobeno pravděpodobně špatnou konstrukcí antény. Naměřené parametry pružinové antény považuji za nedostatečné pro bezdrátovou časomíru.

Při dalším experimentu jsem použil prutovou anténu dlouhou se ziskem 3 dBi. Měření dosahu probíhalo za stejných podmínek jako u pružinové antény. Moduly byly schopné spolehlivé komunikace na vzdálenost 150 m i bez přímé viditelnosti (modul zakryt vlastním tělem). Dosah prutové antény je více než dostatečný. Její použití je vhodné pro všechny moduly bezdrátové časomíry.

5.5 Přesnost synchronizace hodin

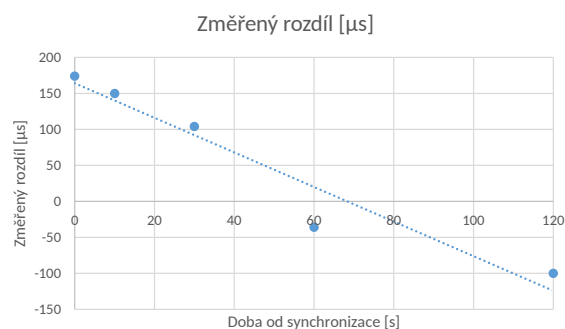
Pro ověření přesnosti synchronizace jsem použil jednoduchý firmware, který blikal LED diodou – invertoval stav pinu vždy přesně v celou vteřinu. Místo LED diody byl připojen osciloskop. Tlačítkem byla vynucena synchronizace modulů. Následně byly na osciloskopu sledovány signály reprezentované napětím přivedeným na LED diody LaunchPadů.

Okamžitě po synchronizaci byla naměřena absolutní hodnota zpoždění pouhých 174 μ s, což je velmi dobrý výsledek. Po 2 minutách se absolutní hodnota zpoždění zlepšila na 100 μ s, ve skutečnosti ale došlo k posunu o 274 μ s proti hodnotě naměřené ihned po synchronizaci. Na grafu 4 je vidět, že se naměřené



Obrázek 3. Výstup z osciloskopu při měření zpoždění ihned po synchronizaci

hodnoty mění s časem přibližně lineárně, což je pravděpodobně způsobeno nepřesností krystalů, která je zde v požadované toleranci.



Obrázek 4. Graf naměřených hodnot zpoždění mezi 2 moduly

Přesnost měření závodních pokusů závisí pouze na přesnosti synchronizace jednotlivých modulů. Naměřené hodnoty splnily všechny podmínky s rezervou.

6. Vlastní hardware

Nyní, když se podařilo ověřit klíčové vlastnosti časomíry na prototypových deskách, můžu přistoupit k návrhu vlastního hardwaru. Hlavním důvodem k tomuto kroku je zvýšení spolehlivosti (doposud byly vývojové kity propojeny spoustou vodičů s periferiemi) a miniaturizace (vše na jedné desce).

6.1 Napájecí obvody

Kvůli přenositelnosti zařízení je každý modul vybaven vlastním vestavěným akumulátorem. Kromě toho lze moduly napájet z externího zdroje, který zároveň slouží jako zdroj pro nabíjení vestavěného akumulátoru.

Rozsah provozních napětí je celkem velký – od 6 do 30 V. Napětí je snižováno na 3,3 V (mikrokontrolér, bezdrátový modul) a 5 V (LED diody, relé). Aby při snižování napětí bylo dosaženo maximální efektivity, tak jsou namísto lineárních regulátorů použity spínané regulátory napětí v režimu *Step-Down*.

Speciální napájecí větví je volitelná 12 V větev, která slouží např. pro napájení optických závor. Zde

je použit speciální spínaný regulátor (SEPIC), který dokáže napětí jak snižovat (při použití externího zdroje napětí), tak zvyšovat (při napájení z vestavěného akumulátoru).

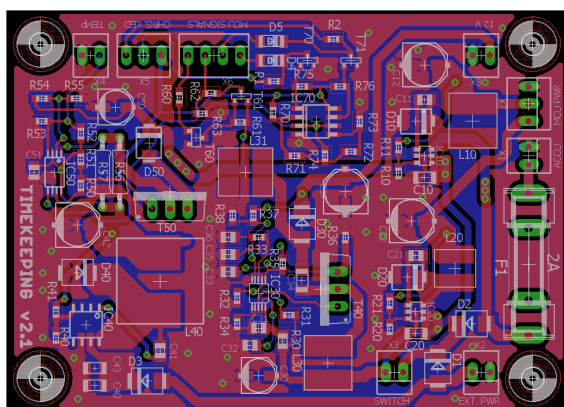
6.2 Nabíjení akumulátoru

V každém modulu jsou dva vestavěné lithiové akumulátory, jejichž napětí při sériovém zapojení je cca 7,4 V. Li-ion akumulátory byly zvoleny zejména kvůli jejich malým rozměrům a dostatečnému rozsahu provozních teplot ve srovnání s olověnými akumulátory.

Nabíjení akumulátoru je spuštěno vždy při připojení externího zdroje a probíhá zcela automaticky – je použit inteligentní řídicí čip, který sleduje a hlídá nabíjecí napětí, proud i teplotu akumulátoru.

6.3 Desky plošných spojů (DPS)

Pro návrh zapojení a DPS byl použit software Eagle. Při návrhu DPS jsem dbal na vhodné rozmístění součástek a spojů s ohledem na elektromagnetickou kompatibilitu [16] a možnost případného rušení.



Obrázek 5. DPS pro napájení a nabíjení

7. Závěr

Po seznámení s hlavními disciplínami požárního sportu byla navržena nová časomíra. Její hlavní předností je bezdrátová komunikace, která nahradila 100 m dlouhé propojovací kabely. Dalším cílem při návrhu byla spolehlivost a modularita.

K dosažení vytyčených cílů bylo nutno vyřešit synchronizaci času mezi jednotlivými moduly. Byly prozkoumány různé synchronizační algoritmy a na základě získaných znalostí byla vytvořena vlastní metoda synchronizace hodin.

Za účelem ověření přesnosti navrženého řešení byl postaven prototyp na vývojových deskách Texas Instruments. Bezdrátovou komunikaci zajišťovaly moduly s čipem TI CC1101 podporující komunikační protokol SimpliciTI. Měření v laboratoři ukázalo přesnost synchronizace ve stovkách μs , což je o řád lepší, než

požadavek. Dále byl ověřen dosah bezdrátových modulů, který je při použití vhodné antény více než 150 m.

Po ověření konceptu byly navrženy některé DPS, zejména jde o obvody napájení a nabíjení, které umožňují provoz zařízení jak z vestavěných akumulátorů, tak z externích zdrojů s různými napětími.

Navržený systém je vhodný pro použití nejen na soutěžích v požárním sportu, ale i na tréninku a to díky malým rozměrům a možnému provozu z vestavěných akumulátorů. Jinou cílovou skupinou mohou být atletické oddíly, školy, atd.

Další práce bude směřovat k dokončení firmwaru jednotlivých modulů, vytvoření vhodného uživatelského rozhraní a montáž do přístrojových krabiček s vhodným krytím (proti vodě, aj.). Důležité je také důkladné testování přímo v terénu – na konkrétních soutěžích, apod.

Vývoj je sice v plném proudu, ale už nyní je možné odhadnout celkovou pořizovací cenu. Uvedu zde dvě typické sestavy časomíry, aby je bylo možné srovnat s nabídkou konkurence. Sestava časomíry pro trénink (hlavní jednotka s LCD displejem, startovací zařízení, 2 cílové moduly včetně senzorů) se může pohybovat od 15 do 20 000 Kč podle volby příslušenství (optické brány, startovací pistole se spínačem nebo s mikrofonom, apod.). Cena sestavy pro soutěže (jako sestava pro trénink, navíc s velkým dvouřádkovým zobrazovacím displejem – výška znaku 160 mm) se podle zvoleného příslušenství může pohybovat od 30 do 35 000 Kč. Nejsou zde žádné skryté náklady – do ceny jsou započítány napájecí adaptéry, akumulátory, přístrojové krabičky (cílové jsou s krytím IP67 včetně konektorů), stojany (např. pro zobrazovací panel), apod.

Literatura

- [1] Tomáš Pelka. Bezdrátová komunikace v oblasti požárního sportu. bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta informačních technologií, 2015.
- [2] GŘ HZS ČR. Pravidla požárního sportu [online], 2010. <http://www.hzscr.cz/soubor/pravidla-ps-2010-finalni-verze-zmeny-pdf.aspx>.
- [3] Sdružení hasičů Čech, Moravy a Slezska. Směrnice hasičských sportovních soutěží pro muže a ženy [online], 2011-06-16. http://www.dh.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1383:uorhs-pipravila-novelu-&catid=60:poarni-sport&Itemid=81.

- [4] Texas Instruments. Ti gps pps timing application note [online], leden 2012. http://processors.wiki.ti.com/images/f/f1/TI_GPS_PPS_Timing_AppNote.pdf.
- [5] Jingbo Ye. Gps time synchronization [online], 2016. <http://www.physics.smu.edu/~yejb/GPSPaper.pdf>.
- [6] Jeremy Elson, Lewis Girod, and Deborah Estrin. Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts [online], prosinec 2002. https://www.usenix.org/legacy/event/osdi02/tech/full_papers/elson/elson.pdf.
- [7] D. Mills, U. Delaware, J. Martin, J. Burbank, and W. Kasch. Network time protocol version 4: Protocol and algorithms specification [online], červen 2010. <http://www.ietf.org/rfc/rfc5905.txt>.
- [8] D. Mills. Simple network time protocol (snTP) version 4 for ipv4, ipv6 and osi [online], leden 2006. <http://www.ietf.org/rfc/rfc5905.txt>.
- [9] Ieee standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems. *IEEE Std 1588-2008 (Revision of IEEE Std 1588-2002)*, pages c1–269, 2008.
- [10] Český telekomunikační úřad. Všeobecné oprávnění č. vo-r/10/05.2014-3 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu [online], 2014-05-07. https://www.ctu.cz/cs/download/oo/rok_2014/vo-r_10-05_2014-03.pdf.
- [11] Český telekomunikační úřad. Využití rádiového spektra [online], 2016. <http://spektrum.ctu.cz/kmitocty/>.
- [12] Texas Instruments. Simplici compliant protocol stack [online], 2016. <http://www.ti.com/tool/SimpliCITI>.
- [13] Texas Instruments. Msp430fr4xx and msp430fr2xx family user's guide [online], 2016. <http://www.ti.com/lit/pdf/slau445>.
- [14] Texas Instruments. Msp430fr413x mixed-signal microcontrollers (rev. a) [online], 2015]. <http://www.ti.com/lit/gpn/msp430fr4133>.
- [15] Texas Instruments. Msp430fr4133 launchpad development kit - msp-exp430fr4133 [online], 2016. <http://www.ti.com/tool/msp-exp430fr4133>.
- [16] Texas Instruments. System-level esd considerations [online], 2016. <http://www.ti.com/lit/an/slaa530/slaa530.pdf>.