

SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

Ing. Tomáš Bagala

Autoreferát dizertačnej práce

PROGRESÍVNE METÓDY GENEROVANIA A SPRACOVANIA SIGNÁLOV S VYSOKOU STABILITOU FREKVENCIE

na získanie vedecko-akademickej hodnosti philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe: Elektronika a fotonika

v študijnom odbore:

Elektrotechnika

Miesto a dátum: Bratislava, August 2020

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na Ústave elektroniky a fotoniky FEI STU v Bratislave

Predkladatel':	Ing. Tomáš Bagala Slovenská technická univerzita v Bratislave Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav elektroniky a fotoniky Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Školiteľ:	doc. Ing. Vladimír Štofanik PhD. Slovenská technická univerzita v Bratislave Fakulta elektrotechniky a informatiky Ústav elektroniky a fotoniky Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava
Oponenti:	prof. Ing. Dagmar Faktorová, PhD. Katedra merania a aplikovanej elektrotechniky Fakulta elektrotechniky a informačných technológií Žilinská univerzita v Žiline Univerzitná 8215/1 010 26 Žilina
	prof. Ing. Milan Štork, CSc . Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací Fakulta elektrotechnická ZČU v Plzni Univerzitní 26 306 14 Plzeň Česká republika
Autoreferát bol rozos	laný dňa
Obhajoba dizertačnej	práce sa koná dňa hod.
Na	Fakulta elektrotechniky a informatiky Slovenská technická univerzita v Bratislave Ilkovičova 3, miestnosť:
	Prof. Dr. Ing.

Prof. Dr. Ing. Miloš Oravec Dekan fakulty STU v Bratislave, FEI Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

OBSAH

ÚVOD	6
2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE	8
3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	9
3.1 Hybridný systém kombinujúci výhody CSAC a OCXO	9
3.2 Hybridný systém s dynamickým posúvaním fázy porovnávaných signálov	12
3.3 Hybridný systém s adaptívnym algoritmom stabilizácie frekvencie	16
4 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE	20
ZÁVER	24
Smerovanie ďalšieho výskumu	25
ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI AUTORA	26
POUŽITÁ LITERATÚRA	27

ÚVOD

S neustálym rozvojom dnešných a najmä budúcich rádiokomunikačných systémov kriticky narastajú požiadavky na presnosť a stabilitu frekvencie referenčných oscilátorov, ktoré predstavujú ich neoddeliteľnú systémovú súčasť. Tieto obvody zásadne limitujú možnosti systému ako napríklad: minimálny potrebný pomer výkonu užitočného signálu k výkonu šumu na vstupe prijímacieho zariadenia alebo interval vzájomnej synchronizácie jednotlivých zariadení v komunikačnom systéme. Táto práca sa zaoberá progresívnymi metódami spracovania RF signálov s cieľom dosiahnutia čo najvyššej stability frekvencie RF signálov z krátkodobého ako i dlhodobého hľadiska. Je viac než isté, že v oblasti číslicového spracovania RF signálov má uvedené smerovanie veľký potenciál do budúcna.

V súčasnosti je využitie progresívnych číslicových techník spracovania signálov veľmi rozšírené aj pre spracovanie RF signálov, a to čoraz vyšších frekvencií. Vďaka možnosti dynamickej konfigurácie vnútornej štruktúry programovateľných číslicových integrovaných obvodov sa ponúka široká škála možností priameho spracovania RF signálov, ktoré je možné veľmi rýchlo meniť zmenou programovateľnej vnútornej štruktúry číslicových obvodov, často bez nutnosti zásahu do navrhnutého hardvérového riešenia zariadenia. Programovateľné logické obvody, resp. hradlové polia (PLD a FPGA) majú v súčasnosti relatívne vysokú hustotu integrácie, sú dostatočne rýchle a dokážu syntetizovať komplexné štruktúry ako napríklad: MCU, DSP, pamätí, obvodov rýchleho paralelného spracovania a prenosu dát, systémy využívajúce RTOS a pod. Nevyhnutnú súčasť pri číslicovom spracovaní RF signálov tvoria samozrejme tiež rýchle A/D a D/A prevodníky a iné typy zmiešaných integrovaných obvodov a systémov (napr. PLL), ktorých parametre sú veľmi dôležité a často limitujú dosiahnuteľné parametre v systémoch s číslicovým spracovaním RF signálov. Fázový šum, resp. stabilita a presnosť frekvencie pri spracovaní RF signálov je kľúčovým parametrom nielen pri komunikačných systémoch, ale zohráva dôležitú úlohu aj v navigačných systémoch pri presnosti určenia geografickej polohy, v radarových a rádiolokačných systémoch rozhoduje o presnosti vzdialenosti a rýchlostí pohybujúcich sa objektov, v rádioastronómii merania pri zaznamenávaní a analýze užitočných RF signálov veľmi nízkych výkonov, ako aj v mnohých ďalších aplikáciách.

Hlavné požiadavky referenčných oscilátorov a generátorov RF signálov zahŕňajú predovšetkým presnosť frekvencie a stabilitu frekvencie z krátkodobého i dlhodobého hľadiska. V náročnejších nízkopríkonových aplikáciách s limitovanou energiou

napájacieho zdroja (batériové napájanie) sa pri generovaní a spracovaní RF signálov často nedokáže zabezpečiť kombinácia potrebnej krátkodobej stability frekvencie súčasne s potrebnou dlhodobou stabilitou frekvencie. Aj táto práca sa zaoberá viacerými progresívnymi metódami spracovania a generovania RF signálov, ktoré smerujú k zvyšovaniu dlhodobej stability frekvencie, pri zachovaní alebo zmenšení úrovne krátkodobej nestability frekvencie, resp. fázového šumu RF signálov. Nami navrhnuté metódy a systémy opisované v tejto práci boli aj prakticky zrealizované a následne verifikované meraniami.

2 CIELE DIZERTAČNEJ PRÁCE

Na základe vykonanej analýzy súčasného stavu a potrieb v oblasti spracovania signálov, na ktoré sa kladú vysoké požiadavky na stabilitu frekvencie z krátkodobého aj dlhodobého hľadiska a z nej získaných poznatkov, ako aj dosiahnutých prezentovaných výsledkov v rámci doterajšieho štúdia, boli ciele výskumu reprezentujúce tézy dizertačnej práce stanovené nasledovne:

- a) Vypracovať metodiku, implementovať a optimalizovať návrh hardwarového a softwarového riešenia základných blokov komplexného systému generujúceho presné a stabilné referenčné frekvencie využívajúci progresívne princípy založené na číslicovom spracovaní signálov. Cieľový systém by mal byť jednak čo najodolnejší voči vplyvom zmien okolitej teploty, pri súčasnom zachovaní malých rozmerov a nízkej spotreby energie; inými slovami cieľový systém má byť flexibilný, prenosný a vhodný pre batériové napájanie.
- b) Na základe progresívnych princípov spracovania RF signálov navrhnúť riešenie obvodu vykonávajúceho kontinuálne precízne porovnávanie frekvencie preladiteľného OCXO, vyznačujúceho sa nízkou úrovňou fázového šumu, s frekvenciou CSAC, ktorý zabezpečí extrémne vysokú dlhodobú stabilitu frekvencie a presnosť frekvencie celého systému.
- c) Navrhnúť a optimalizovať spôsob filtrácie regulačnej odchýlky v obvode spätnej väzby regulácie (dolaďovania) frekvencie OCXO, a tiež adaptívnu metódu voľby meracieho časového intervalu s dynamicky prispôsobiteľnou dĺžkou trvania. Súčasťou filtrácie má byť aj možnosť priameho štatistického vyhodnocovania Allanovej odchýlky frekvencie.
- d) Navrhnúť a optimalizovať spôsob generovania hodnôt číslicovej reprezentácie v závislosti od ladiaceho napätia na výstupe D/A prevodníka v obvode spätnej väzby regulácie frekvencie OCXO tak, aby sa dosiahla čo najvyššia presnosť, resp. rozlišovacia schopnosť dolaďovania frekvencie OCXO a zároveň dostatočná rýchlosť odozvy (reakcie) celého systému už pri zaistení minimálnych odchýlok porovnávaných frekvencií.

3 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Experimentálna časť popisuje implementácie hybridných systémov kombinujúcich CSAC a OCXO s cieľom získania čo najvyššej dosiahnuteľnej stability frekvencie z krátkodobého i dlhodobého hľadiska. V tejto kapitole sú popísané experimentálne výsledky vývoja hybridných systémov, ako aj rozšírený systém generovania RF signálov s optimalizovaným dolaďovaním frekvencie, ktorý vyhodnocuje namerané dáta pomocou štatistických ukazovateľov výpočtu frekvenčnej nestability.

3.1 Hybridný systém kombinujúci výhody CSAC a OCXO

Základný princíp činnosti navrhnutého hybridného systému spočíva v dolaďovaní aktuálnej frekvencie OCXO podľa aktuálnej frekvencie CSAC, pričom sa využíva princíp regulačnej slučky, ktorá porovnáva okamžité frekvencie oboch oscilátorov.

Obvodové riešenie na obrázku 1 tvorí regulačnú slučku s nastaviteľnými vlastnosťami porovnávajúceho obvodu. Obvod periodicky porovnáva priebežnú frekvenciu f_{OUT} voči f_{REF} počas definovaného integračného časového intervalu a následne dolaďuje frekvenciu OCXO pomocou ladiaceho napätia U_{CORR} . Časový integračný interval určuje rozlišovaciu schopnosť vyhodnotenia aktuálnej frekvencie f_{OUT} v systéme, a tiež určuje reakčný čas regulačného systému. Voľba veľkosti integračného intervalu je kompromisom medzi dostatočným rozlíšením merania frekvencie na jednej strane a reakčným časom systému, resp. oneskorením, počas ktorého môže dôjsť k odladeniu frekvencie OCXO na druhej strane. CSAC zaručuje zvýšenú absolútnu presnosť a dlhodobú stabilitu frekvencie v hybridnom systéme pri zachovaní nízkej úrovne fázového šumu, ktorý v hybridnom systéme určuje dominantne OCXO.



Obr. 1 Bloková schéma základného hybridného systému na báze CSAC a OCXO

Optimalizácia regulačnej slučky principiálne spočíva na voľbe optimálneho časového intervalu medzi dvoma doladeniami frekvencie OCXO vzhľadom k frekvencii CSAC, resp. perióde synchronizácie uvedených oscilátorov v systéme. Príliš krátka perióda dolaďovania OCXO zhoršuje krátkodobú stabilitu frekvencie a príliš dlhý čas medzi doladeniami môže spôsobiť neakceptovateľné odladenie frekvencie OCXO. Signál z výstupu OCXO s frekvenciou f_{OUT} je základným, resp. primárnym výstupným RF signálom hybridného systému.

Pre dosiahnutie najvyššej rozlišovacej schopnosti porovnávania frekvencií OCXO a CSAC sa v hybridnom systéme požaduje, aby súčin násobiacej konštanty PLL násobičky frekvencie a deličky frekvencie referenčného signálu P_s . P_T dosahoval čo najvyššie hodnoty. Keďže veľkosť P_T určuje aj integračný čas merania, tak konštanta násobenia frekvencie P_s zásadne predurčuje rozlišovaciu schopnosť vyhodnocovania priebežnej odchýlky frekvencie OCXO v hybridnom systéme. Najvyššie dosiahnuteľná horná frekvencia na výstupe PLL násobičky daná súčinom P_s . f_{OUT} závisí na limitných hodnotách číslicových obvodov použitých pri konkrétnej implementácii.

Frekvencia referenčného signálu f_{REF} delená konštantou P_T určuje recipročne integračný čas, počas ktorého sa hradluje binárne počítadlo impulzov a akumulujú sa impulzy s frekvenciou P_s . f_{OUT} .

Výpočtová jednotka v systéme na konci integračného času vypočíta rozdiel Pmedzi aktuálnou meranou číselnou hodnotou a jej nominálnou požadovanou hodnotou, ktorý sleduje okamžitú odchýlku frekvencie f_{OUT} od referenčnej frekvencie f_{REF} . Výpočtová jednotka s ohľadom na priebežne získavané odchýlky frekvencie f_{OUT} určuje optimálnu hodnotu spätnoväzobného riadiaceho napätia U_{CORR} pre doladenie frekvencie OCXO. Vypočítaná hodnota R sa privádza do nízkošumového D/A prevodníka. Doplnený je o vhodný dolno-priepustný filter (DPF), ktorý vytvára riadiace napätie pre dolaďovanie frekvencie OCXO.

Porovnanie oscilátorov OCXO s CSAC

Po predpokladanom ustálení pomerov v OCXO a CSAC po ich zapnutí (30 minút po zapnutí) sme následne merali ich stability frekvencie počas dlhšieho časového intervalu. Obrázok 2 ilustruje nameranú frekvenčnú nestabilitu uvedených oscilátorov počas šesťhodinového časového intervalu. OCXO vykazoval kontinuálny frekvenčný drift spôsobený zmenou okolitej teploty v miestnosti laboratória. Odchýlka frekvencie $(f - f_{nom}) / f_{nom}$ OCXO dosahuje relatívnu zmenu frekvencie najmenej 10*ppb* počas šiestich hodín merania. CSAC sa vyznačuje schopnosťou udržania absolútnej presnosti hodnoty nominálnej frekvencie bez výraznejšieho driftu vplyvom zmien okolitej teploty v laboratóriu (obr. 2).



Obr. 2 Porovnanie priebehov fluktuácií frekvencie OCXO (MTI 230-0827) a CSAC (SA.45s) nameraných počas šesťhodinového intervalu



Obr. 3 Porovnanie nameraných Allanových odchýliek v prípade OCXO (MTI 230-0827) a v prípade CSAC (SA.45s) pre rôzne integračné časy τ

Na obr. 3 sú uvedené namerané hodnoty Allanových odchýliek použitého OCXO (MTI 230-0827) bez použitia dolaďovania frekvencie a CSAC (SA.45s). Uvedené merania poukazujú na nižšie hodnoty Allanovej odchýlky v prípade OCXO v porovnaní s CSAC pre integračné časy $\tau \le 10s$. Pre dlhšie integračné časy $\tau \ge 10s$ v prípade OCXO nestabilita frekvencie monotónne rastie a naopak v prípade CSAC klesá.

3.2 Hybridný systém s dynamickým posúvaním fázy porovnávaných signálov

Táto realizácia hybridného systému podstatne zvyšuje rozlišovaciu schopnosť merania resp. porovnávania aktuálnych frekvencií OCXO a CSAC, pričom sa využíva dynamické ovplyvňovanie oneskorenia, resp. fázového posunu signálu odvodeného z výstupného signálu OCXO. Bloková schéma implementácie systému je uvedená na obrázku 4.

Základné hrubé meranie frekvencie OCXO je implementované podobne ako v predošlej implementácii s využitím dvoch základných blokov FPGA. Postačuje jeden jednoduchší 16 stavový posuvný register SRL16 a jeden 16 stavový posuvný register so vstupom pre aktiváciu hodín SRLC16E. SRL16 delí frekvenciu referenčného signálu z CSAC číslom 32 a tvorí periodický referenčný signál REF_CLK s frekvenciou 312,5*kHz*. Integračný čas pre hrubé meranie frekvencie je realizovaný celočíselným počtom periód signálu REF_CLK.

Implementovaný algoritmus v MCU adaptívne upravuje integračný čas merania frekvencie OCXO vzhľadom na dve protichodné kritéria: chceme dosiahnuť čo najvyššie rozlíšenie merania frekvencie na jednej strane a chceme dosiahnuť rýchly reakčný čas systému na druhej strane. Tento integračný časový interval je určený logickou úrovňou 1 na výstupe GATE_OUT a je definovaný ako adaptívne volený celistvý násobok periód referenčného signálu s frekvenciou 312,5*kHz* privádzaného na vstup REF_CLK. Hradlovací signál GATE_OUT je prenášaný do vnútornej štruktúry FPGA synchrónne s nábežnou hranou signálu REF_CLK. Hrubé meranie aktuálnej frekvencie OCXO je realizované sprostredkovane ako meranie počtu hodinových impulzov na výstupe násobiaceho PLL bloku DCM2, kde je predpokladaná nominálna frekvencia 120*MHz*. Tento hodinový signál je privedený na hodinový signál bloku SRLC16E, ktorý realizuje najnižšie 4 bity binárneho počítadla, zvyšné vyššie bity počítadla sú implementované inkrementáciou hodnoty vnútorných registrov integrovaného čítača v MCU vždy

pri nábežnej hrane signálu MEAS_CLK s nominálnou frekvenciou 3,75*MHz*. Po skončení meracieho intervalu MCU vyčíta stav 4-bitového registra SRLC16E, a doplní si tak hodnotu binárneho počítadla. Táto hodnota reprezentuje v MCU aktuálnu hodnotu frekvencie OCXO prenásobenú dvanástimi s neurčitosťou ± 1 impulz.



Obr. 4 Zjednodušená bloková schéma hybridného systému s dynamickým posúvaním fázy porovnávaných signálov

Druhou dôležitou časťou implementácie je obvod pre jemné rozlíšenie frekvencie s využitím doplnkového DCM bloku DCM3 v konfigurácii obvodu dynamického fázového posuvu, ktorý podstatne zlepšuje rozlíšenie merania aktuálnej frekvencie OCXO. Výstupný signál z bloku DCM2 s nominálnou frekvenciou 120*MHz*, ktorý je odvodený z OCXO, sa časovo oneskoruje v bloku DCM3, pričom toto oneskorenie, resp. fázový posun periodicky dynamicky nastavuje MCU inkrementáciou alebo dekrementáciou o jeden diskrétny krok.

Cieľom je dosiahnuť, aby sa signál na výstupe DCM3 dostával do fázy s referenčným signálom na výstupe bloku DCM1 s nominálnou frekvenciou 120*MHz*

odvodenou z CSAC. Porovnávanie fáz uvedených signálov je realizované jednoduchým preklápacím obvodom, resp. registrom REG2. Dosiahnutie rovnakých fáz by malo byť teoreticky v ideálnom prípade v systéme indikované pravidelným striedaním sa log. hodnôt 0 a 1 na výstupe REG2, pričom frekvencia hodinového signálu registra REG2 je 120*MHz*, a preto aj maximálna frekvencia zmien logických úrovní na výstupe REG2 môže byť až 120*MHz*. Registrom REG3 sa odoberá synchrónne aktuálna hodnota stavu z výstupu REG2 s podstatne nižšou frekvenciou 312,5 *kHz*, výstupný signál SRL16 je tiež hodinovým signálom REG3. Výstupné logické stavy sleduje MCU na vstupe PSINCDEC. Reálny sled logických hodnôt 0 a 1 na výstupe REG2. a tiež REG3 je ovplyvnený taktiež rôznymi typmi šumov v rámci logických a sekvenčných elementov vo vnútornej štruktúre FPGA (XC3S200).

Úlohou MCU je preto vhodnou filtráciou, napr. priemerovaním zvoleného súboru po sebe nasledujúcich log. hodnôt 0 a 1 na vstupe PSINCDEC, určiť veľmi presne mieru časového posunutia signálu na výstupe DCM3, resp. či predbieha alebo zaostáva za referenčným signálom na výstupe DCM1. Následne môže MCU povoliť úpravu oneskorenia v bloku DCM3 aktivovaním výstupu PSEN (log. úrovňou 1). Implementovaný algoritmus v MCU rozhoduje o úprave hodnoty ladiaceho napätia OCXO, ktorá sa nastavuje pomocou 16-bitového nízkošumového D/A prevodníka. Číslicová 16-bitová hodnota reprezentujúca požadované ladiace napätie sa posiela z MCU do D/A prevodníka cez SPI zbernicu. MCU môže tiež vyvolať aktivovaním signálu PSRST (log. úrovňou 1) nastavenie preddefinovanej hodnoty vkladaného oneskorovania signálu v rámci bloku DCM3, čo sa využíva v prvom kroku pri hrubom meraní, resp. dolaďovaní frekvencie OCXO.

Porovnanie frekvenčných nestabilít OCXO, pri uzavretej a otvorenej spätnoväzobnej slučke dolaďovania frekvencie OCXO, je zobrazený na obrázku 5. Zmena frekvencie OCXO bez ladenia dosahuje $\Delta\left(\frac{f-f_{nom}}{f_{nom}}\right) \approx 3ppb$ počas 30 minút merania pri jeho $f_{nom} = 10.000\ 000\ 000\ MHz$. Zmena frekvencie OCXO so zapnutým ladením je vo zvolenej mierke osi y na obrázku 5 príliš malá.

Obrázok 6 zobrazuje frekvenčnú nestabilitu v jemnejšej mierke s uzavretou slučkou dolaďovania frekvencie OCXO v hybridnom systéme. Zmena frekvencie OCXO s ladením dosahuje $\Delta\left(\frac{f-f_{nom}}{f_{nom}}\right)$ pod úrovňou 0,04*ppb*.



Obr. 5 Porovnanie nameraných fluktuácií frekvencie výstupného signálu OCXO (MTI 230-0827) v prípade uzavretej (červený priebeh) a v prípade otvorenej (modrý priebeh) spätnoväzobnej slučky dolaďovania frekvencie OCXO v hybridnom systéme



Obr. 6 Namerané fluktuácie frekvencie výstupného signálu OCXO (MTI 230-0827) pri uzavretej spätnoväzobnej slučke dolaďovania frekvencie OCXO

Na obrázku 7 je znázornený nameraný priebeh fázových šumov CSAC SA.45s (modrý priebeh) a OCXO (MTI 230-0827) v hybridnom systéme s uzavretou (čierny priebeh) a s otvorenou (červený priebeh) spätnoväzobnou slučkou dolaďovania frekvencie. OCXO bez dolaďovania frekvencie má na celom rozsahu nižšiu úroveň £. Dolaďovanie frekvencie oscilátora z princípu spôsobuje zmenu jeho okamžitej frekvencie, a preto sa zvýši aj jeho úroveň £. Vhodnou technikou dolaďovania je možné eliminovať zvýšenú úroveň £ pod jeho zvolenú najvyššiu akceptovateľnú úroveň (pre náš prípad je to \mathcal{E}_{CSAC}). Hodnota \mathcal{E}_{OCXO} s aktívnym dolaďovaním frekvencie (\mathcal{E}_{REG}) dosahuje prienik s hodnotou \mathcal{E}_{CSAC} pri $f_{offset} \leq 2Hz$, pre vyššie hodnoty f_{offset} disponuje \mathcal{E}_{REG} s lepšími výsledkami než \mathcal{E}_{CSAC} .



Obr. 7 Porovnanie fázových šumov CSAC SA.45s (modrý priebeh) a OCXO (MTI 230-0827) v navrhnutom hybridnom systéme v prípade uzavretej (čierny priebeh) a v prípade otvorenej (červený priebeh) spätnoväzobnej slučky dolaďovania frekvencie OCXO

3.3 Hybridný systém s adaptívnym algoritmom stabilizácie frekvencie

Spojením výhodných vlastností oscilátorov CSAC a OCXO, princípov precízneho kontinuálneho merania frekvencie, rýchlych pamätí, štatistických metód vyhodnocovania frekvenčnej stability a adaptívneho algoritmu dolaďovania frekvencie OCXO, bol navrhnutý hybridný systém generujúci RF signál so zvýšenou stabilitou frekvencie so schopnosťou dynamického prispôsobenia sa okamžitým podmienkam.

Navrhnutý hybridný systém:

- umožňuje odoberať výstupný RF signál s nízkym fázovým šumom priamo z výstupu OCXO, ako aj RF signál so zvýšenou stabilitou frekvencie reprezentovaný alternatívnym spôsobom,
- redukuje úroveň fázového šumu, resp. krátkodobé nestability frekvencie RF signálu v porovnaní s RF signálom na výstupe CSAC,

- redukuje dlhodobé nestability frekvencie vrátane starnutia frekvencie RF signálu v porovnaní s RF signálom na výstupe použitého OCXO bez dodatočného dolaďovania frekvencie,
- užívateľovi ponúka možnosť monitorovania aktuálnych štatistických ukazovateľov stability frekvencie RF signálov v systéme cez sériové komunikačné rozhranie.

Implementácia navrhnutého hybridného systému, uvedená na obr. 8, môže byť kompaktná a realizovaná v rámci vnútornej štruktúry jediného FPGA, čo znižuje nároky na celkové rozmery prototypu. Implementácia systému obsahuje meranie frekvencie, celkové číslicové spracovanie signálov, obsluhu pamätí a stavové automaty. Popis v rámci vnútornej štruktúry je vytvorený v HDL, tak aby bol univerzálny a použiteľný aj pre iné architektúry programovateľných obvodov.

Štatistické spracovanie vyhodnotenia frekvenčnej nestability je možné zahrnúť do implementácii v rámci FPGA vďaka využitiu DSP blokov a konfigurovateľným pamätiam. Adaptívne dolaďovanie frekvencie OCXO zabezpečuje algoritmus výpočtu aktuálnej hodnoty riadiaceho napätia pre doladenie frekvencie OCXO a zároveň výber vhodných časových intervalov medzi dvoma aktualizáciami hodnoty v samotnom D/A prevodníku v spätnej väzbe uzavretej regulačnej slučke systému.

S využitím techniky kontinuálneho merania frekvencie, so zaručením nulového neaktívneho časového intervalu medzi dvoma bezprostredne za sebou nasledujúcimi meraniami v súbore, je možné s výhodou realizovať štatistické vyhodnotenie nestability frekvencie meraného signálu v časovej oblasti. Všeobecne uznávanou mierou pre hodnotenie stability oscilátorov je Allanova odchýlka. Získaná Allanova odchýlka pre rôzne priemerovacie časové intervaly môže potom vyjadrovať mieru stability frekvencie z krátkodobého i dlhodobého hľadiska. Adaptívny algoritmus môže optimalizovať veľkosť časových intervalov medzi zmenami veľkosti riadiaceho napätia pre doladenie frekvencie OCXO, tak aby sa čo najlepšie zosúladila aktuálna frekvencia OCXO s frekvenciou referenčného signálu z výstupu CSAC. Uvedený adaptívny algoritmus využíva históriu predošlých nameraných hodnôt frekvencie OCXO, ktoré fluktuujú vplyvom pôsobenia rôznych vonkajších faktorov.



Obr. 8 Bloková schéma implementácie hybridného systému s adaptívnym algoritmom stabilizácie frekvencie OCXO

Bloková schéma na obrázku 8 pozostáva z modulu merania frekvencie, DSP bloku spracovania súboru nameraných hodnôt frekvencií s využitím štatistických nástrojov a priemerovacích techník, ktoré ukladajú dáta z meraní do dvoch pamätí. Pamäte ponechávajú posledné dve vypočítané hodnoty Allanovej odchýlky pre určenie trendu vývoja odchýlky frekvencie OCXO v čase. Obvody voľby rozsahov merania frekvencie synchronizujú rôzne dĺžky časových intervalov, ktoré spracováva DSP blok a ukladá do pamäte. Adaptívny algoritmus dolaďovania frekvencie ukladá do pamätí hodnoty Allanovej odchýlky pre konkrétne platné priemerovacie časové intervaly, a taktiež sú v prípade potreby prístupné užívateľovi cez jednoduché sériové komunikačne rozhranie. Adaptívny algoritmus opakovane vo vhodne zvolených časových intervaloch vypočíta číslicovú reprezentáciu potrebnej hodnoty veľkosti riadiaceho napätia pre doladenie aktuálnej frekvencie použitého OCXO v uzavretej regulačnej slučke hybridného systému. Následne sa uvedená číslicová reprezentácia prevedie pomocou D/A prevodník na riadiace napätie, ktoré je filtrované DPF a privedené na vstup ladenia frekvencie použitého OCXO.

Nárast intervalu neistôt meraní Allanových odchýlok pre väčšie hodnoty τ na obrázku 9 súvisí predovšetkým s nedostatočným počtom nameraných hodnôt v súbore pre danú hodnotu τ . Pre získanie presnejšieho merania je preto nutné splniť podmienku $M \gg \tau$. Pri dostatočne dlhej prevádzke kontinuálneho merania frekvencie je možné pomer $\frac{M}{\tau}$ zvýšiť, a tiež výpočet rozšíriť o ďalšiu väčšiu hodnotu τ , pokým to veľkosť pamäte umožní.



Obr. 9 Séria hodnôt Allanovej odchýlky vypočítanej zo súboru nameraných frekvencií RF signálu pre rôzne veľkosti súboru meraní

4 PRÍNOSY DIZERTAČNEJ PRÁCE

Za hlavné prínosy dizertačnej práce možno považovať nasledovné body:

1. Vypracovanie metodiky implementácie a optimalizácie návrhu riešenia základných blokov hybridného systému generujúceho RF signály so zvýšenou stabilitou frekvencie z krátkodobého ako aj dlhodobého časového hľadiska.

Metodika návrhu hybridného systému je založená na využití dvoch principiálne odlišných referenčných oscilátorov OCXO a CSAC, ktoré spolu ako celok vykazujú výhodnejšie vlastnosti z hľadiska dosiahnuteľnej krátkodobej a zároveň dlhodobej stability frekvencie generovaných RF signálov. V práci sme preskúmali a overili základné predpoklady a charakteristiky uvedených vysokostabilných oscilátorov, potrebné pre voľbu a optimalizáciu ďalších potrebných komponentov hybridného systému so zvýšenou stabilitou frekvencie z krátkodobého ako aj dlhodobého hľadiska.

Na základe zvolenej metodiky sme navrhli konkrétne implementácie troch základných blokov hybridného generátora RF signálov a riešenia boli optimalizované z hľadiska dosiahnuteľných výsledkov pri použití zvolených technológií. Pri implementácii sme využili progresívne princípy číslicového spracovania signálov, ktoré zahŕňajú:

- a) techniky precízneho merania frekvencie, ktoré umožňujú získať rozlíšenie merania v čase na úrovni stoviek pikosekúnd s bežnými typovými radmi FPGA obvodov a desiatok pikosekúnd s vyššími typovými radmi,
- b) paralelné numerické a štatistické spracovanie zberníc signálov, ktoré využívajú rýchle aritmetické a logické operácie,
- c) ukladanie priebežných výsledkov do rýchlych pamätí s viacnásobným prístupom v jednom čase,
- d) adaptívne algoritmy pre určovanie veľkosti riadiaceho napätia pre dolaďovanie frekvencie OCXO v uzavretej regulačnej slučke systému.

Cieľový hybridný systém má za úlohu s využitím CSAC v systéme podstatne redukovať resp. eliminovať negatívne vplyvy meniacej sa okolitej teploty a iných destabilizačných faktorov pôsobiacich na dlhodobú stabilitu frekvencie použitého OCXO, ktorý zabezpečí extrémne nízku úroveň fázového šumu v systéme.

Nami navrhnuté a realizované implementácie hybridných systémov kombinujúcich OCXO a CSAC obsahujú číslicové obvody, ktoré sú integrovateľné do jediného obvodu. 16-bitový D/A prevodník, potrebný pre vytvorenie riadiaceho napätia pre dolaďovanie

frekvencie OCXO je preferovaný ako samostatný obvod, vzhľadom na požadovanú nízku úroveň šumu riadiaceho napätia. Navrhnutý systém je kompaktný a je vhodný aj ako základ pre integráciu do súčasných komplexnejších RF systémov.

Príkon realizovaných implementácií hybridných systémov v podstatnej miere predurčuje spotreba použitého OCXO (vzhľadom na použitie termostatu), ktorá sa typicky pohybuje na úrovni 2W pri bežnej izbovej teplote okolia. Pri určitých aplikáciách je však v prípade potreby možné v hybridných systémoch OCXO zapínať iba v časovo ohraničených intervaloch, kedy sa skutočne požaduje vysoká krátkodobá stabilita generovaného RF signálu. V takomto prípade sa stáva navrhnutý hybridný systém kombinujúci OCXO a CSAC zaujímavým riešením aj pre mnohé aplikácie s obmedzenou energiou napájacieho zdroja, resp. batériové napájanie.

2. Návrh spôsobu a implementácia kontinuálneho precízneho vyhodnocovania vzájomného vzťahu frekvencie dolaďovaného OCXO s frekvenciou CSAC.

V návrhu našich implementácií sme vychádzali z princípov merania frekvencie RF signálov, ktoré v súčasnosti využívajú precízne čítače frekvencie s veľmi vysokou rozlišovacou schopnosťou merania. Základný princíp precízneho merania frekvencie je založený na recipročnom meraní zvoleného počtu periód meraného signálu, doplneného o kontinuálne vyhodnocovanie časových značiek v systéme.

V rámci nami navrhnutého hybridného systému sme implementovali originálny spôsob dynamického ovplyvňovania oneskorenia signálu odvodeného z OCXO so súčasným vyhodnocovaním fluktuácií vzájomného fázového posunu dvoch porovnávaných periodických RF signálov odvodených z OCXO a CSAC. V uvedenej implementácii sme pre daný účel efektívne využili interné DCM moduly v rámci použitého FPGA XC3S200.

Dodatočne zvýšenie rozlišovacej schopnosti merania frekvencie sa pri našich implementáciách dosiahlo tiež generovaním a súčasným spracovaním fázovo posunutých signálov tesne pod hranicou najvyššej možnej rýchlosti spracovania číslicových signálov v rámci použitých obvodov FPGA.

3. Návrh a optimalizácia spôsobu adaptívnej filtrácie regulačnej odchýlky pri uzavretej slučke spätnej väzby systému regulácie (dolaďovania) frekvencie OCXO na základe priameho štatistického vyhodnocovania Allanovej odchýlky a dynamicky prispôsobovanou dĺžkou integračného časového intervalu v systéme.

Najprecíznejšie súčasné používané metodiky meraní sa usilujú zahrnúť komplexné štatistické informácie ku reálnym meraným údajom, ktorých limitné hodnoty rozlíšenia a presnosti merania určujú limity aktuálne dostupných technológií. V našom prípade dodatočným štatistickým spracovaním súboru viacerých meraní je možné zvýšiť rozlišovaciu schopnosť určenia frekvencie meraného signálu.

Implementovaním primárneho hodnotiaceho ukazovateľa miery štatistickej odchýlky je možné priame optimalizovanie metódy merania frekvencie. Pri požiadavke merania a vyhodnocovania Allanovej odchýlky je podľa definície nutné stanoviť podmienku zaručenia nulového neaktívneho časového intervalu medzi dvomi meraniami. Tento fakt predurčuje metódu kontinuálneho merania frekvencie ako vhodnú voľbu. Kontinuálne recipročné meranie frekvencie je založené na kontinuálnom ukladaní časových značiek do pamäti vždy po uplynutí zvoleného počtu periód meraného signálu, čo ponúka možnosť archivácie a spätného dohľadania informácie o hodnote frekvenčnej nestability v zvolenom čase.

Rýchla pamäť umožňuje nájsť a vybrať vhodný spôsob filtrácie regulačnej odchýlky, pretože obsahuje informácie o veľkosti frekvenčnej nestability z krátkodobého i dlhodobého hľadiska pre aktuálne zmerané hodnoty ako aj pre ich predošlé nadobudnuté hodnoty, za predpokladu, že už sú k dispozícii z dostatočne dlhého súboru meraní.

Nami navrhnutý a implementovaný adaptívny algoritmus filtrácie regulačnej odchýlky ponúka možnosť dynamicky prispôsobovať v ľubovoľnom čase integračný časový interval na základe porovnávania hodnôt Allanovej odchýlky pre rôzne meracie intervaly, ktoré sú vypočítavané zo súboru meraní priebežne ukladaných do pamäte systému. Aktuálne hodnoty počítanej Allanovej odchýlky v systéme je možné priebežne v prípade potreby monitorovať prostredníctvom doplneného sériového rozhrania.

V navrhnutom hybridnom systéme je tiež naďalej možná modifikácia algoritmov zmenou vnútornej konfigurácie použitého obvodu FPGA.

4. Návrh a optimalizácia spôsobu adaptívneho generovania ladiaceho napätia pre OCXO tak, aby sa dosiahla čo najvyššia presnosť frekvencie a zároveň dostatočná rýchlosť odozvy systému pri náhlej zmene pracovnej teploty.

Závislosť frekvencie konkrétne použitého OCXO v systéme od veľkosti jednosmerného ladiaceho napätia je vopred známa, resp. bola určená z kalibračného merania použitého OCXO. V hybridnom systéme na základe určenia aktuálnej hodnoty frekvencie OCXO môže byť približná hodnota ladiaceho napätia potrebná pre doladenie frekvencie OCXO určená veľmi rýchlo na základe známej strmosti uvedenej závislosti, resp. kalibračných koeficientov. Určenie presnej hodnoty ladiaceho napätia sa následne cyklicky získava zmenou predošlej hodnoty pripočítaním alebo odpočítaním vhodnej konštanty na základe strmosti ladiacej charakteristiky OCXO.

Adaptívny spôsob určovania a generovania riadiaceho napätia pre dolaďovanie frekvencie OCXO v uzavretej regulačnej slučke systému v princípe priamo súvisí s už spomínaným adaptívnym algoritmom určovania aktuálnej frekvencie na základe štatistického vyhodnocovania súboru meraní s dynamickým prispôsobovaním aktuálneho integračného časového intervalu v hybridnom systéme.

ZÁVER

Dizertačná práca v úvodnej časti prináša stručný prehľad v oblasti vývoja vysokostabilných termostatovaných kryštálových oscilátorov (OCXO), ďalej etalónov času a frekvencie využívajúcich kvantové javy vedúci až ku dnešným kompaktným oscilátorom kvantového typu s nízkou spotrebou (CSAC), a tiež prehlaď techník precízneho merania a vyhodnocovania nestabilít frekvencie oscilátorov.

V práci sa ďalej zaoberám návrhom a implementáciou hybridných systémov kombinujúcich CSAC a OCXO, metódami zvyšovania rozlišovacej schopnosti pri precíznom meraní aktuálnej frekvencie oscilátorov a návrhom adaptívnych algoritmov optimalizácie dolaďovania frekvencie OCXO v uzavretej regulačnej slučke hybridného systému. Ďalej sa venujem návrhu a implementácii priameho štatistického vyhodnocovania nestability frekvencie dolaďovaného oscilátora pre rôzne integračné meracie časové intervaly. Spôsob kvantitatívneho vyhodnocovania nestabilít frekvencie OCXO v hybridnom systéme je založený na číslicovom spracovaní RF signálov s využitím štruktúry paralelného toku dát.

Použité platformy programovateľných číslicových obvodov (FPGA) ponúkajú možnosť rýchlej rekonfigurácie a návrh implementácií systémov v rámci vnútornej štruktúry programovateľného obvodu a dostatočnú variabilitu pri optimalizácii algoritmov merania, vyhodnocovania a dolaďovania frekvencie oscilátorov. Navrhnuté adaptívne číslicové systémy sú integrovateľné do jediného programovateľného obvodu, vďaka čomu sa dosiahne vysoká flexibilita, a tiež malé rozmery.

Zvolené výsledky nášho výskumu boli úspešne prezentované a publikované aj v zborníkoch najvýznamnejších medzinárodných konferencií zameraných na skúmanú problematiku (IEEE IFCS a EFTF).

Táto práca bola realizovaná aj s podporou projektov: VEGA No.: 1/0921/13, 1/0664/14, 1/0558/17, 1/0668/17, 1/0746/19, APVV 15-0254 a s podporou výzvy STU na podporu mladých výskumníkov.

Smerovanie ďalšieho výskumu

Odporúčané ďalšie smerovania výskumu v danej oblasti zahŕňa implementáciu algoritmov priameho výpočtu resp. vyhodnocovania hodnoty intervalu neurčitosti merania frekvencie, resp. Allanovej odchýlky. Táto dodatočná štatistická informácia kladie vyššie nároky na veľkosť pamäte potrebnej pre implementáciu, pretože hardvérová štruktúra musí byť schopná uchovať väčší objem dát reprezentujúci dostatočne dlhú históriu fluktuácií frekvencie meraného RF signálu. Tieto dáta by mali byť platné pre každý vyhodnocovaný priemerovací interval τ a využité k získaniu príslušných hodnôt Allanových odchýliek vrátane neistôt merania. Implementácia uvedených algoritmov kladie vyššie nároky i na priebežné číslicové spracovanie podstatne väčšieho množstva dát uloženého v pamäti systému.

Ďalšie možné smerovanie výskumu súvisí s optimalizáciou adaptívnych algoritmov dolaďovania frekvencie oscilátora (OCXO), jednou z možností je aj využitie predikčných algoritmov, napr. Kalmanových filtrov alebo neurónových sietí, ktoré sú schopné predpovedať správanie sa systému s určitou mierou pravdepodobnosti.

Námetom pre ďalší výskum môžu byť aj implementácie spracovania a vyhodnocovania fluktuácií frekvencií RF signálov priamo vo frekvenčnej oblasti, pomocou číslicových techník merania fázového šumu v oscilátoroch. Ide tu o aplikáciu rýchlej Fourierovej analýzy a rôznych komplexných kompenzačných riešení pre odstránenie systematických a náhodných chýb merania. Systémy pre merania fázového šumu RF signálov sa realizujú v súčasnosti iba ako samostatné meracie zariadenia, ktoré riešia problematiku precízneho merania komplexne. Jedná sa o pomerne zložité zariadenia s väčšími rozmermi a spotrebou, čo limituje ich priame použitie v skúmaných systémoch, ktoré musia disponovať dostatočnou flexibilitou.

ZOZNAM PUBLIKAČNEJ ČINNOSTI AUTORA

Pracovisko: E231 - FEI. Ústav elektroniky a fotoniky Autor: Bagala, Tomáš Rok vydania: 2016~2020

Zobrazovací formát: Zoznam dokumentov podľa ISO690 Štatistika: Kategória publikačnej činnosti Triedenie: Kategória publikačnej činnosti, Meno prvého autora Voľby: Číslovanie kategórií publ. činnosti, Číslovanie ohlasu poradovými číslami,

ADC Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch

ADC01 Hagara M., Stojanović R., <u>Bagala T.</u>, Kubinec P., Ondráček O., Grayscale image formats for edge detection and for its FPGA implementation, V databáze SCOPUS, 2020 MICPRO Microprocessors and Microsystems, vol. 75, 2020.

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

- AFC01 <u>Bagala T.</u>, Fibich A., Kubinec P., Štofanik V., Improvement of short-term frequency stability of the chip scale atomic clock, 2016 IEEE International frequency control symposium, IEEE, 2016, p.137-140, ISBN 978-1-5090-2091-1.
- AFC02 <u>Bagala T.</u>, Fibich A., Štofanik V., Long-term frequency stability improvement of OCXO using CSAC, 2016 EFTF European Frequency and Time Forum, IEEE, 2016, p.377-379, ISBN 978-1-5090-0720-2.
- AFC03 Štofanik V., Fibich A., <u>Bagala T.</u>, Kubinec P.,Dynamic phase shifting method utilized in the enhanced frequency controlled clock system, 2017 EFTF/IFCS Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium, IEEE, 2017, p.575-577, ISBN -1-5386-2916-1.
- AFC04 Kubinec P., Ondráček O., Hagara M., Fibich A., <u>Bagala T.</u>, Reverberator's late reflections parameters calculation, *Radioelektronika 2018*, IEEE, 2018, p.148-151, ISBN 978-1-5386-2485-2.
- AFC05 <u>Bagala T.</u>, Fibich A., Hagara M., Kubinec P., Ondráček O., Štofanik V., Stojanović R.,Single clock square root algorithm based on binomial series and its FPGA implementation, 2018 MECO Mediterranean Conference on Embedded Computing, IEEE, 2018, p.141-144, ISBN 978-1-5386-5682-2.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 <u>Bagala T.</u>, Fibich A., Kubinec P., Štofanik V., Enhanced clock based on the chip scale atomic clock and dual-mode crystal oscillator, 2016 Radioelektronika, 2016, p.199-202, ISBN 978-1-5090-1674-7.

Štatistika: kategória publikačnej činnosti

ADC	Vedecké práce v zahraničných karentovaných časopisoch	1
AFC	Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách	5
AFD	Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách	1
Súčet		7

POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] M. A. Lombardi, *The evolution of time measurement, part 3: atomic clocks*, IEEE Instrumentation & Measurement Mag., vol. 14, no. 6, pp.46-49, 2011.
- [2] R. A. Sykes, *High-frequency Plated Quartz Crystal Units*, Proc. IRE, vol. 36, pp.4-7, Jan. 1948.
- [3] A. W. Warner, *High-Frequency Crystal Units for Primary Frequency Standards*, Proc. IRE, vol. 40, pp.1030-1033, 1952.
- [4] A. W. Warner, Frequency Aging of High-Frequency Plated Crystal Units, Proc. IRE, vol. 43, pp.790-792, 1955.
- [5] A. W. Warner, *Ultra-Precise Quartz Crystal Frequency Standards*, IRE Trans. on Instrumentation, vol. 1-7, pp.185-188,1958.
- [6] A. W. Warner, Design and Performance of Ultra precise 2.5-MC Quartz Crystal Units, Bell Sys. Technical Journal, volume 39, pp.1193-1217, 1960.
- [7] J. R. Norton, J. M. Cloeren, P. G. Sulzer, *Brief history of the development of ultra*precise oscillators for ground and space applications, Proceedings of 1996 IEEE International Frequency Control Symposium, Honolulu, USA, 1996, pp. 47-57.
- [8] P. G. Sulzer, *Transistor Frequency Standard*, Electronics, pp.206-214, 1953.
- [9] Instruction Manual JK-Sulzer Frequency Standard-Model FS-1100T.
- [10] J. M. Wolfskill, R.T. Schlaudecker, Fabrication of High Precision 5MC Crystal Units, in Proceedings 13thAnnular Symposium on Frequency Control, p.512, 1959.
- [11] R. J. Byrne, J. L. Hokanson, Effect of High-Temperature Processing on the Aging Behavior of Precision 5-MHz Quartz Crystal Units, IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, vol. IM-17, no.I, pp.76-79, 1968.
- [12] H. P. Stratemeyer, *The Stability of Standard-Frequency Oscillators*, The General Radio Experimenter, vol. 38, no. 6, pp.1-16, 1964.
- [13] E. P. EerNisse, Quartz Resonator Frequency Shifts Arising from the Electrode Stress, in Proceedings 29thAnnular Symposium onFrequency Control, pp.1-4, 1975.
- [14] J. A. Kusters, *Transient Thermal Compensation for Quartz Resonators*, IEEE Trans. Sonics Ultrasonic's, vol. SU-23, pp.273-276, 1976.
- [15] C. Wenzel, *Private communications*, 1996.
- [16] C. Wenzel, New Oscillators Advanced the Art of Low Noise Performance, RF Design, pp.51-52, 1993.

- [17] J. R. Norton, J. M. Cloern, Brief history of the development of ultra-precise oscillators for ground and space application, Proceedings of 1996 IEEE IFCS pp.47-57, 1996.
- [18] K. Weiss, B. Gniewinska, L. Nafalski, *The modern OCXO quartz oscillators* requirements and parameters, pp.209-212, 2004.
- [19] G. Robischon, A new BVA OCXO, Proceedings of EFTF, pp.358-361, 1998.
- [20] 260 Series OCXO Ultra Stable Atomic Standard Replacement, dostupné na: <u>http://www.mti-milliren.com/pdfs/260.pdf</u>
- [21] 240 Series OCXO, dostupné na: <u>http://www.mti-milliren.com/pdfs/240.pdf</u>
- [22] 270 Series OCXO Ultra Compact, dostupné na: <u>http://www.mti-</u> <u>milliren.com/pdfs/270.pdf</u>
- [23] P. Salzenstein, A. Kuna, L. Sojdr, J. Chauvin, Significant step in ultra-high stability quartz crystal oscillators, Electronics Letters, 2010, pp.1433-1434.
- [24] F. Sthal, S. Galliou, P. Abbe, X. Vacheret, G. Cibiel, Ultra-stable crystal ovens and simple characterization, Electronic Letter, pp.900–901, 2007.
- [25] C.R. Ekstrom, P.A. Koppang, *Error bars for three-cornered hats*, IEEE Trans. Ultrasonic Ferro electronics Frequency Control, pp.876–879, 2006.
- [26] OCXO 8607 10TIMES BETTER THAN ANY OTHER OCXO, dostupné na:<u>http://www.sungwhatech.com/product/pdf/ocxo/8607.pdf</u>
- [27] An OCXO with Rubidium Oscillator Performance, dostupné na: <u>https://www.microwavejournal.com/articles/2301-an-ocxo-with-rubidium-oscillator-performance</u>
- [28] GPS Disciplined Oscillators (GPSDO), dostupné na: <u>https://www.microsemi.com/product-directory/clocks-frequency-references/3826-gps-disciplined-oscillators-gpsdo</u>
- [29] J. G. Hartnett, C. R. Locke, E. N. Ivanov, M. E. Tobar, P. L. Stanwix, Cryogenic sapphire oscillator with exceptionally high long-term frequency stability, 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Geneva, 2007, pp.1028-1031, 2007.
- [30] Cryogenic sapphire oscillators, dostupné na: <u>https://teams.femto-st.fr/equipe-ohms/cryogenic-sapphire-oscillators</u>
- [31] A Mobile Ultra-low Phase Noise Sapphire Oscillator, dostupné na: https://www.microwavejournal.com/articles/3367-a-mobile-ultra-low-phase-noisesapphire-oscillator

- [32] V. Giordano, S. Grop, Ch. Fluhr, B. Dubois, Y. Kersalé, E. Rubiola, The Autonomous Cryocooled Sapphire Oscillator: A Reference for Frequency Stability and Phase Noise Measurements, Journal of Physics: Conference Series, 2016.
- [33] ULTRA-LOW INSTABILITY SIGNAL SOURCE, dostupné na: <u>http://www.uliss-st.com/technology.html</u>
- [34] J. Zelenka, *Piezo-elektrické rezonátory a jejich použití*, Academia Praha, 1983.
- [35] Fumio Nakajima, *Quartz crystal oscillator angular velocity detector circuits*, U.S. Patent 5,420,548, Dátum vydania: 30.5.1995.
- [36] S. Knappe, *Emerging Topics: MEMS atomic clocks*, v Y. Gianchandani, O. Tabata,H. Zappe, (eds.) Comprehensive Microsystems, Elsevier, Netherlands, 2007.
- [37] J. Lim, K. Choi, H. Kim, T. Jackson, D. Kenny, *Miniature Oven Controlled Crystal Oscillator (OCXO) on a CMOS Chip*, 2006 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, Miami, FL, pp.401-404, 2006.
- [38] EMXO Evacuated Miniature Crystal Oscillator, dostupné na: https://www.microsemi.com/product-directory/high-reliability-ruggedoscillators/4850-emxo
- [39] OX-204 Oven Controlled Crystal Oscillators (OCXO), dostupné na: https://www.vectron.com/products/ocxo/ox-204.htm
- [40] Ultra Low Phase Noise Oven Controlled Quartz Oscillator, dostupné na: <u>https://www.trisynttechnology.com/data/LOW_NOISE_OSCILLATORS/TRISYN_T_OCXO-10-100_ULN_Datasheet_ENG.pdf</u>
- [41] Ultra-Low Phase Noise OCXO, dostupné na: https://abracon.com/Precisiontiming/AOCJY7TQ.pdf
- [42] Ultra Low Phase Noise, Precision SC-cut HF OCXO in Tiny 14x21x7.5mm SMD
 Package, dostupné na: <u>https://www.nelfc.com/pdf/1319a.pdf</u>
- [43] Y. S. Shmaliy, A. Ph. Kurotchka, E. G. Sokolinskiy, A. V. Marienko, *Quartz* crystal oscillator with an effective aging rate compensation, 1998.
- [44] Y. Zhang, Z. J. Zhang, Construction of Aging Model and Compensation Based on Nonlinear Time Series Analysis, 2017.
- [45] A. Hati, C. Nelson, D. Howe, Vibration-Induced PM Noise in Oscillators and Its Suppression, 2009.

- [46] D. A. Howe, J. Lanfranchi, L. Cutsinger, A. Hati, C. W. Nelson, Vibration-induced PM noise in oscillators and measurements of correlation with vibration sensors, in Proceedings 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, pp.494–498, 2005.
- [47] M. M. Driscoll, J. B. Donovan, Vibration-induced phase noise: It isn't just about the oscillator, in Proceedings Frequency Control Symposium IEEE Int. 2007 Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, pp.535–540, 2007.
- [48] Poseidon 2 Datasheet: Low g-Sensitivity OCXO Oscillator, dostupné na: https://resources.bliley.com/poseidon-2-g-sensitivity-ocxo-oscillator
- [49] D. B. Sullivan, J. C. Bergquist, J. J. Bollinger, R. E. Drullinger, W. M. Itano, S. R. Jefferts, W. D. Lee, D. Meekhof, T. E. Parker, F. L. Walls, D. J. Wineland, *Primary atomic frequency standards at NIST*, J. Res. NIST, vol. 106, pp. 47–63, 2001.
- [50] I. Rabi, J. Zacharias, S. Millman, P. Kusch, A new method of measuring nuclear magnetic moment, Physical Review, vol. 53, p. 318,1938.
- [51] N. Ramsey, *Molecular Beams*, Clarendon Press, Oxford, 1956.
- [52] N. Ramsey, *History of atomic clocks*, J. of Research of the National Bureau of Standards, vol. 88, pp. 301-320, 1983.
- [53] H. Lyons, *The atomic clock Instruments*, pp.133-135, 1949.
- [54] R. Lutwak, A. Rashed, M. M. Varghese, G. Tepolt, J. M. Leblanc, M. John, S. D. Mark, K. Geib, G. Peake, S. Römisch, *The Chip-Scale Atomic Clock - Prototype Evaluation*, 2007.
- [55] R. Lutwak, *The SA.45S Chip-Scale Atomic Clock-early production statistics*, 43rd Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, pp.207-219, 2011.
- [56] R. Lutwak, P. Vlitas, M. Varghese, M. Mescher, D. K. Serkland, G. M. Peake, 2005, *The MAC– A Miniature Atomic Clock*, in Proceedings of the 2005 Joint IEEE International Frequency Control Symposium and Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, Vancouver, Canada, pp.752-757, 2005.
- [57] S. Knappe, V. Shah, P. Schwindt, L. Hollberg, J. Kitching, L. Liew, J. Moreland, A micro fabricated atomic clock, Applied Physics, 2004.
- [58] J. Kitching, S. Knappe, L. A. Liew, J. Moreland, H. Robinson, P. Schwindt, V. Shah, V. Gerginov, L. Hollberg, *Chip-Scale Atomic Clocks at NIST*, 2005.

- [59] S. Knappe, P. D. D. Schwindt, V. Shah, L. Hollberg, J. Kitching, L. A. Liew, J. Moreland, A chip-scale atomic clock based on ^87Rb with improved frequency stability, Optics express, pp.1249-1253, 2005.
- [60] R. Lutwak, The Miniature Atomic Clock Pre-Production Results, 2007 IEEE International Frequency Control Symposium Joint with the 21st European Frequency and Time Forum, Geneva, pp.1327-1333, 2007.
- [61] J. F. DeNatale, *Compact, low-power chip-scale atomic clock*, 2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Monterey, pp.67-70, 2008.
- [62] Ch. Gorecki, *Development of First European Chip-scale Atomic Clocks: Technologies, Assembling and Metrology*, Procedia Engineering, pp.898-903, 2012.
- [63] Low Noise CSAC (LN-CSAC): Low Noise Chip Scale Atomic Clock, dostupné na: <u>https://www.microsemi.com/product-directory/embedded-clocks-frequency-</u> <u>references/4518-low-noise-csac-ln-csac</u>
- [64] A. Gardner, J. Collins, A second look at Chip Scale Atomic Clocks for long term precision timing, 2016.
- [65] Atomic Clock with Enhanced Stability (ACES), dostupné na: https://www.darpa.mil/program/atomic-clock-with-enhanced-stability
- [66] Space Chip Atomic Clock (CSAC), dostupné na: <u>https://www.microsemi.com/product-directory/embedded-clocks-frequency-</u> <u>references/5207-space-csac</u>
- [67] Pendulum Instruments: Frekvenčný čítač CNT-90, dostupné na: <u>https://pendulum-instruments.com/products/frequency-counters-analyzers/</u>
- [68] R. Acquafredda, T. Adam, N. Agafonova, S.P. Alvarez, M. Ambrosio, A. Anokhina, S. Aoki, A. Ariga, T.Ariga, L. Arrabito, C. Aufranc, D. Autiero, A. Badertscher, A. Bagulya, E. Baussan, A. Bergnoli, F. Greggio, A. Bertolin, M. Besnier, R. Zimmermann, *The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam*, Journal of Instrumentation, 2009.
- [69] Chip Atomic Clock (CSAC), dostupné na: <u>https://www.microsemi.com/product-</u> directory/clocks-frequency-references/3824-chip-scale-atomic-clock-csac.
- [70] Network Time Protocol (Version 1): Specification and Implementation, dostupné na: <u>https://tools.ietf.org/html/rfc1059</u>

- [71] H. Tsuchida, Frequency Stability, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, J.G. Webster, 1999.
- [72] G. Becker, Über die Begriffe Phase-Phasenzeit und Phasenwinkel bei zeitabhängigen Vorgängen, PTB-Mitteilungen, pp.348–352, 1971.
- [73] J. M. Bland, D. G. Altman, *Statistics notes: measurement error*, 1996.
- [74] D. W. Allan, *Statistics of atomic frequency standards*, Proceedings IEEE, pp. 221–230, 1966.
- [75] Proceedings of Annual Symposium on Frequency Control (1956-1991) and of the IEEE International Frequency Control Symposium (1992-2019), IEEE, New York, NY, USA, dostupné na: IEEE Xplore, <u>www.ieee.org/ieeexplore</u>
- [76] D. B. Sullivan, D. W. Allan, D. A. Howe, F. L. Walls, *Characterization of clocks and oscillators*, National Institute of Standards and Technology, Technical Note, p. 1337, 1990.
- [77] D. W. Allan, J. H. Shoaf, D. Halford, *Statistics of Time and Frequency Data Analysis*, NBS Monograph140, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA, pp.151–204, 1974.
- [78] R. A. Baugh, *Frequency modulation analysis with the Hadamard variance*, In Proceedings of the 25th Annual Frequency Control Symposium, pp.470–475, 1981.
- [79] J. Rutman, Characterization of frequency stability: A transfer function approach and its application to measurement via filtering of phase noise, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, IM-23, pp.40–48, 1974.
- [80] J. Groslambert, A new "filtered Allan variance" and its application to the identification of phase and frequency noise sources, In Proceedings of the 43rd Annual Frequency Control Symposium, pp.326–330, 1989.
- [81] S. Zhang, X. Wang, H. Wang, J. Yang, From Allan variance to phase noise: A new conversion approach, EFTF-2010 24th European Frequency and Time Forum, Noordwijk, pp.1-8, 2010.
- [82] C. D. Motchenbacher, F. C. Fitchen, *Low-Noise Electronic Design*, Wiley, New York, 1973.
- [83] J. G. Webster, Frequency Standards, Characterization in Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, 1999.

- [84] D. Owen, Good Practice Guide to Phase Noise Measurement, NPL Technical Note, 2004.
- [85] Sh. Zhang, F. Li, F. Yu, X. Jiang, H. Y. Lee, J. Luo, *Recent Developments in Piezoelectric Crystals*, Journal of the Korean Ceramic Society, 2018.
- [86] S. Asmar, *Ultra-Stable Oscillators for Probe Radio Science Investigations*, International Planetary Probe Workshop, Toulouse, France, 2012.
- [87] J. Cartright, Choosing an AT or SC cut for OCXOs, Connor Winfield, 2008, dostupné na: <u>www.conwin.com/pdfs/at_or_sc_for_ocxo.pdf</u>
- [88] J. R. Vig, Quartz Crystal Resonators and Oscillators For Frequency Control and Timing Applications– A Tutorial, U. S. Army Communications-Electronics Command Attn: AMSEL-RD-C2-PT, Fort Monmouth, NJ, USA, 2014.
- [89] M. A. Lombardi, NIST Frequency Measurement and Analysis System: Operator's Manual, NIST, 2001, dostupné na: <u>http://tf.nist.gov/general/pdf/1469.pdf</u>.
- [90] F. L. Walls, J. R. Vig, Fundamental Limits on the Frequency Stabilities of Quartz Crystal Oscillators, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 42, pp.576-589, 1995.
- [91] F. L. Walls, J. J. Gagnepain, *Environmental Sensitivities of Quartz Oscillators*, IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, vol. 39, pp.241-249, 1992.
- [92] MTI 260-0624-D Teardown, dostupné na: https://imgur.com/gallery/dkiTe/comment/589488795
- [93] D. Serkland, K. Geib, G. Peake, R. Lutwak, A. Rashed, M. M. Varghese, G. Tepolt,
 M. Prouty, *VCSELs for atomic sensors*, Proceedings of SPIE The International Society for Optical Engineering, 2007.
- [94] National Academies of Science, Engineering and Medicine, An Assessment of Four Divisions of the Physical Measurement Laboratory at the National Institute of Standards and Technology, Washington, The National Academies Press, 2018.
- [95] B. Ghosal, gm. Saxena, *Design Verification Model of Rubidium Frequency Standard for Space*, Journal of Modern Physics, 2013.

- [96] S. Knappe, P. Schwindt, V. Gerginov, V. Shah, A. Brannon, B. Lindseth, L.-A. Liew, H. Robinson, J. Moreland, Z. Popovic, L. Hollberg, J. Kitching, *Chip-scale atomic devices at NIST*, Proc SPIE, 2007.
- [97] E. Burt, *Introduction to microwave atomic clocks*, IEEE Frequency Control Symposium, New Orleans, Louisiana, 2016.
- [98] S. Johansson, *Modern frequency counting principles*, Pendulum Intruments AB, Sweden.
- [99] S. Johansson, New frequency counting principle improves resolution, Proceedings of the 2005 IEEE International Frequency Control Symposium and Exposition, Vancouver, 2005.
- [100] P. Boven, Increasing the resolution of reciprocal frequency counters, <u>https://www.febo.com/pipermail/timenuts/attachments/20071201/e7833af</u> <u>5/attachment.pdf</u>.
- [101] Tektronix FCA3000/3100, stránka produktu, dostupné na: https://www.tek.com/frequency-counter/fca3000-3100
- [102] C. Nelson: *Phase and Amplitude Modulation Noise Metrology*, National Institute of Standards and Technology, Boulder, CO, USA, 2016.
- [103] T. Bagala, A. Fibich, M. Hagara, P. Kubinec, O. Ondráček, V. Štofanik, R. Stojanović, Single clock square root algorithm based on binomial series and its FPGA implementation, 2018 7th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, pp.1-4, 2018.
- [104] Testovanie hypotéz, dostupné na: <u>https://www.math.sk/mpm/wp-</u> content/uploads/2017/11/testyHypotez2.pdf
- [105] IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic, in IEEE Std 754-2019 (Revision of IEEE 754-2008), pp.1-84, 2019.
- [106] 754-2019 IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic, dostupné na: https://standards.ieee.org/standard/754-2019.html
- [107] G. Sutter, D. Sanchez-Roman, V. Moreno, J. P. Deschamps, S. López-Buedo, F. Gomez-Arribas, & I. Gonzalez, *Floating Point FPGA Cores: Multiplication and Addition*, 2012.